

การจัดทำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลไลต์ตัดแปรด้วยไคโตซาน

ทรงศักดิ์ สระแก้ว

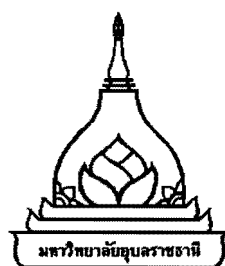
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**REMOVAL OF DYE USING CHITOSAN MODIFIED
MONTMORILLONITE CLAY**

SONGSAK SAKAEW

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
YEAR 2011
COPY RIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY**



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การกำจัดสีย้อมโดยใช้เรซินมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยโคโคซาน

ผู้วิจัย นายทรงศักดิ์ สระแก้ว

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

..... จักรกฤษณ์ อัมพพ อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.จักรกฤษณ์ อัมพพ)

..... สมาน สอนอง กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมาน สอนองราษฎร์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุมนา สิริพัฒนากุล)

..... กรรมการ

(ดร.กรรณิกา รัตนพงศ์เลขา)

..... กรรมการ

(ดร.ธัญลักษณ์ ราษฎร์ภักดี)

..... คณบดี

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นท แสงเทียน)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2554

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ได้แก่

ขอขอบพระคุณ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยดูแลเอาใจใส่ เป็นอย่างดีและให้กำลังใจในการทำงานวิจัยจนเสร็จสิ้นและลงส่งไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณประธานหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับขอบเขตของวิทยานิพนธ์และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะทำให้สามารถทำงานวิจัยสำเร็จลงด้วยดี รวมถึงเจ้าหน้าที่ธุรการบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่กรุณาช่วยเหลือ ในระหว่างดำเนินงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลองเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และสาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือในการทำงานวิจัย ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณหลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และโครงการทุนนักวิจัยหน้าใหม่ ที่ให้การสนับสนุน ด้านทุนวิจัยเป็นอย่างดี

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ทรงศักดิ์ สระแก้ว

(นายทรงศักดิ์ สระแก้ว)

ผู้วิจัย

สารบัญ		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ก
บทคัดย่อภาษาไทย		ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ค
สารบัญ		จ
สารบัญตาราง		ช
สารบัญภาพ		ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ		ต
บทที่		
1 บทนำ		
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย		1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย		3
1.3 สมมติฐาน		3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย		4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ		5
1.6 สถานที่ทำการวิจัย		5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		
2.1 สีย้อม		6
2.2 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์		8
2.3 ไคโตซาน		11
2.4 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน		12
2.5 การดูดซับ		14
2.6 ไอโซเทอมการดูดซับ		19
2.7 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ		21
2.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับ		23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 พลังงานกระตุ้น	25
2.10 หอดูดซับ	25
2.11 การขยายขนาดของหอดูดซับ	31
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 กรอบงานวิจัย	34
3.2 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และสารเคมีที่ใช้งานวิจัย	35
3.3 การเตรียมตัวดูดซับจากแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์	35
3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับและสีย้อม	36
3.5 การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสีย้อม	38
3.6 การศึกษาการดูดซับแบบกะ	40
3.7 การศึกษาการดูดซับในระบบหอดูดซับแบบเบคคิง	44
4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับและสีย้อม	48
4.2 ผลการศึกษาสมดุลการดูดซับ	55
4.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	62
4.4 ผลการศึกษาการดูดซับในระบบหอดูดซับแบบเบคคิง	69
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	78
5.2 ข้อเสนอแนะ	79
เอกสารอ้างอิง	80
ภาคผนวก	
ก ผลการศึกษาสมดุลการดูดซับ	87
ข ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	98
ค ผลการศึกษาการดูดซับสีย้อมในระบบหอดูดซับแบบเบคคิง	117
ง ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของก๊าซไนโตรเจน	160
จ ผลงานการนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ	162
ประวัติผู้วิจัย	178

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีโดยน้ำหนัก (%wt) ของแร่ดิน MMT	10
3.1 สมการมาตรฐานและ $\lambda_{\max}$ ของสีย้อม	40
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ	48
4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุต่าง ๆ ของตัวดูดซับ	52
4.3 ผลการวิเคราะห์จุดไอโซอิเล็กทริกของตัวดูดซับ	54
4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ของตัวดูดซับและสีย้อม	54
4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO	56
4.6 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนดลิชของการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	58
4.7 พารามิเตอร์ของเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสีย้อม RB5 และสีย้อม MO โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ	60
4.8 เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับของสีย้อม RB5 และ MO โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ	62
4.9 พารามิเตอร์ของสมการอันดับหนึ่งเทียมและสมการอันดับสองเทียมของการดูดซับสีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 และ MO	65
4.10 ค่าคงที่ k_2 (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ และมีสภาวะในการทดลองแตกต่างกัน	66
4.11 ค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ และมีสภาวะในการทดลองแตกต่างกัน	68
4.12 พารามิเตอร์ที่ได้จากการดูดซับสีย้อม RB5 ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ความสูงของเบด และอัตราการไหลแตกต่างกัน	70
4.13 พารามิเตอร์ที่ได้จากการดูดซับสีย้อม MO ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ความสูงของเบด และอัตราการไหลแตกต่างกัน	70
ก.1 ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของสีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน	96
ก.2 ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของสีย้อม MO ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน	96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.3 ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของสีย้อม RB5 และ MO ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นแตกต่างกัน	97
ข.1 ปริมาณการดูดซับที่เวลาใด ๆ ของสีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	115
ข.2 ปริมาณการดูดซับที่เวลาใด ๆ ของสีย้อม MO ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	116
ค.1 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหอดูดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม RB5 ที่ความสูงของเบดแตกต่างกัน	142
ค.2 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหอดูดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม RB5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน	145
ค.3 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหอดูดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม RB5 ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน	148
ค.4 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหอดูดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม MO ที่ความสูงของเบดแตกต่างกัน	151
ค.5 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหอดูดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม MO ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน	154
ค.6 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหอดูดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม MO ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน	157

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์	9
2.2	โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซาน	11
2.3	โครงสร้างโมเลกุลของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน	13
2.4	แผนภาพจำลองกลไกการดูดซับของเหลว	16
2.5	การพล็อตด้วยสมการ BET	18
2.6	รูปแบบความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในหอดูดซับ (a) รูปแบบของความเข้มข้น (b) กราฟเบเรคทรูสำหรับการดูดซับในระบบหอดูดซับ	26
2.7	ลักษณะการถ่ายโอนมวลของกราฟเบเรคทรู (a) บริเวณการถ่ายเทมวลสารแคบ (b) บริเวณการถ่ายเทมวลสารกว้าง	27
3.1	แผนภาพขั้นตอนการวิจัย	34
3.2	โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม (a) RB5 และ (b) MO	35
3.3	กราฟมาตรฐานของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 ที่ $\lambda_{\max} = 614 \text{ nm}$	39
3.4	กราฟมาตรฐานของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO ที่ $\lambda_{\max} = 520 \text{ nm}$	40
3.5	อุปกรณ์การทดลองหอดูดซับแบบเบคกิง	47
4.1	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของแร่ดิน MMT และ CTS/MMT	50
4.2	สเปกตรัม FTIR ของ MMT CTS/MMT และ CTS	51
4.3	ผลการวิเคราะห์พื้นฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ (a) CTS/MMT และ (b) MMT	52
4.4	จุดไอโซอิเล็กทริกของ (a) MMT และ (b) CTS/MMT	53
4.5	ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์ของสีย้อม (a) RB5 และ (b) MO ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	57
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีย้อมกับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม RB5 และ MO	59
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_L$ กับ $1/T$ ของการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ	61
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีย้อมกับเวลาสัมผัสของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม (a) RB5 และ (b) MO ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.9	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีย้อม (a) RB5 และ (b) MO ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	67
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ของการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ	69
4.11	กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม (a) RB5 และ (b) MO ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่ความสูงของเบคแตกต่างกัน	71
4.12	กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม (a) RB5 และ (b) MO ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน	73
4.13	กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม (a) RB5 และ (b) MO ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน	76
ก.1	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C	88
ก.2	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C	88
ก.3	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C	89
ก.4	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C	89
ก.5	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C	90
ก.6	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C	90
ก.7	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C	91
ก.8	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C	91

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ก.9	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C 92
ก.10	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C 92
ก.11	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C 93
ก.12	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C 93
ก.13	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C 94
ก.14	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C 94
ก.15	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C 95
ก.16	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C 95
ข.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 กับเวลาสัมผัส ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C 99
ข.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 กับเวลาสัมผัส ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C 99
ข.3	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับ สีข้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C 100
ข.4	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับ สีข้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C 100
ข.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 กับเวลาสัมผัส ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C 101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ข.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 กับเวลาสัมผัส ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C	101
ข.7	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีข้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C	102
ข.8	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีข้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C	102
ข.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 กับเวลาสัมผัส ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C	103
ข.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 กับเวลาสัมผัส ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C	103
ข.11	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีข้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C	104
ข.12	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีข้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C	104
ข.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 กับเวลาสัมผัส ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C	105
ข.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 กับเวลาสัมผัส ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C	105
ข.15	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีข้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C	106
ข.16	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีข้อม RB5 ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C	106
ข.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO กับเวลาสัมผัส ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C	107
ข.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO กับเวลาสัมผัส ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C	107

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ข.19	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C	108
ข.20	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C	108
ข.21	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO กับเวลาสัมผัสที่อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C	109
ข.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO กับเวลาสัมผัสที่อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C	109
ข.23	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C	110
ข.24	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C	110
ข.25	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO กับเวลาสัมผัสที่อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C	111
ข.26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO กับเวลาสัมผัสที่อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C	111
ข.27	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C	112
ข.28	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C	112
ข.29	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO กับเวลาสัมผัสที่อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C	113
ข.30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO กับเวลาสัมผัสที่อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C	113
ข.31	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C	114
ข.32	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีข้อม MO ที่อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C	114

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ก.1	กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม RB5 ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่ความสูงของเบคแตกต่างกัน ($C_0 = 100 \text{ mg/L}$ และ $Q = 3.57 \pm 0.02 \text{ mL/min}$)	118
ก.2	กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม MO ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่ความสูงของเบคแตกต่างกัน ($C_0 = 100 \text{ mg/L}$ และ $Q = 3.57 \pm 0.02 \text{ mL/min}$)	118
ก.3	กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม RB5 ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน ($H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.57 \pm 0.02 \text{ mL/min}$)	119
ก.4	กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม MO ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน ($H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.57 \pm 0.02 \text{ mL/min}$)	119
ก.5	กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม RB5 ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน ($C_0 = 100 \text{ mg/L}$ และ $H = 15 \text{ cm}$)	120
ก.6	กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม MO ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน ($C_0 = 100 \text{ mg/L}$ และ $H = 15 \text{ cm}$)	120
ก.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลาที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.59 \text{ mL/min}$	121
ก.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สี RB5 กับปริมาตรสะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.59 \text{ mL/min}$	121
ก.9	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 หลังผ่านหอดูดซับกับเวลาที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.59 \text{ mL/min}$	122
ก.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลาที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$	122
ก.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สี RB5 กับปริมาตรสะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$	123
ก.12	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 หลังผ่านหอดูดซับกับเวลาที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$	123
ก.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลาที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$	124

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ก.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สี RB5 กับปริมาตร สะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$	124
ก.15	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$	125
ก.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 กับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 20 \text{ cm}$ และ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$	125
ก.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สี RB5 กับปริมาตร สะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 20 \text{ cm}$ และ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$	126
ก.18	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 20 \text{ cm}$ และ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$	126
ก.19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 กับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 25 \text{ cm}$ และ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$	127
ก.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สี RB5 กับปริมาตร สะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 25 \text{ cm}$ และ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$	127
ก.21	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 25 \text{ cm}$ และ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$	128
ก.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 กับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 7.18 \text{ mL/min}$	128
ก.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สี RB5 กับปริมาตร สะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 7.18 \text{ mL/min}$	129
ก.24	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 7.18 \text{ mL/min}$	129
ก.25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม RB5 กับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 9.18 \text{ mL/min}$	130
ก.26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สี RB5 กับปริมาตร สะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 9.18 \text{ mL/min}$	130

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ค.27	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 9.18 \text{ mL/min}$	131
ค.28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลา ที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.58 \text{ mL/min}$	131
ค.29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับปริมาตร สะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.58 \text{ mL/min}$	132
ค.30	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา ที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.58 \text{ mL/min}$	132
ค.31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.58 \text{ mL/min}$	133
ค.32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับปริมาตร สะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.58 \text{ mL/min}$	133
ค.33	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.58 \text{ mL/min}$	134
ค.34	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลา ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$	134
ค.35	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับปริมาตร สะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$	135
ค.36	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$	135
ค.37	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 20 \text{ cm}$ และ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$	136
ค.38	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับปริมาตร สะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 20 \text{ cm}$ และ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$	136
ค.39	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 20 \text{ cm}$ และ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$	137

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ค.40	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO กับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 25 \text{ cm}$ และ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$	137
ค.41	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สี MO กับปริมาตร สะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 25 \text{ cm}$ และ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$	138
ค.42	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 25 \text{ cm}$ และ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$	138
ค.43	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO กับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 7.15 \text{ mL/min}$	139
ค.44	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สี MO กับปริมาตร สะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 7.15 \text{ mL/min}$	139
ค.45	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 7.15 \text{ mL/min}$	140
ค.46	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO กับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 9.19 \text{ mL/min}$	140
ค.47	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สี MO กับปริมาตร สะสมหลังผ่านหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 9.19 \text{ mL/min}$	141
ค.48	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีข้อม MO หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, $H = 15 \text{ cm}$ และ $Q = 9.19 \text{ mL/min}$	141
ง.1	ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของก๊าซไนโตรเจนบนแร่ดิน MMT	161
ง.2	ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของก๊าซไนโตรเจนบนแร่ดิน CTS/MMT	161

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

R^2	=	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
θ	=	The Bragg angle
d001	=	ระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Å°)
QACs	=	สาร Quaternary Ammonium Cations
BET	=	Brunauer Emmett and Teller
XRD	=	X-Ray Diffusion
FTIR	=	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
SEM	=	Scanning Electron Microscope
MMT	=	แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite clay)
CTS/MMT	=	แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน (Chitosan modified Montmorillonite)
CCN	=	Chitosan/clay nanocomposite
<i>N,O</i> -CMC-MMT	=	<i>N,O</i> -carboxymethyl-chitosan/montmorillonite
R1	=	Chitosan/amino resin
GMA/MBA-TEPA	=	Glycidyl methacrylate/methelenebisacrylimide resin loaded with tetraethelenepentamine
MOF-235	=	Iron terephthalate
MWCNTs	=	Multiwalled carbon nanotubes
CMK-3	=	Mesoporous carbon material-kinetic
CTMAB/10SSTA-MMT	=	Cetyl trimethyl ammonium bromide anionic surfactants sodium stearate and their mixture to montmorillonite
RB5	=	Reactive Black 5
MO	=	Methyl Orange
Organo-clay	=	แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารอินทรีย์ประเภท QACs
TMA	=	สาร Tetramethyl – ammonium
TDMA	=	สาร Tetradecyltrimethylhexadecylammonium
TDMA-Br	=	สาร Tetradecyltrimethyl ammonium bromide

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

HDTMA	=	สาร Hexadecyltrimethylammonium
Abs	=	Absorbance
$\lambda_{\max}$	=	ความยาวคลื่นที่สารตัวอย่างสามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุด (nm)
pI	=	จุดไอโซอิเล็กทริก
%wt	=	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
CEC	=	ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity) (meq./g)
P	=	ความดันที่สมดุลของตัวดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ
P_0	=	ความดันที่อิ่มตัวของตัวดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ
v	=	ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับ หน่วยเป็นปริมาตร
v_m	=	ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียว
c	=	ค่าคงที่ของ BET
E_1	=	ความร้อนของการดูดซับที่เกิดขึ้นชั้นแรก
E_L	=	ความร้อนของการดูดซับที่ชั้นที่สองและชั้นที่สูงขึ้นต่อ ๆ ไป
N	=	เลขอะโวกาโด (Avogadro's number)
s	=	พื้นที่ที่ตัวดูดซับปกคลุมบนพื้นผิวของของแข็ง
V	=	ปริมาตรเชิง โมลของแก๊สที่ถูกดูดซับ
a	=	มวลของตัวดูดซับ หน่วยเป็นกรัม
r_k	=	รัศมีของรูพรุน
σ	=	แรงดึงดูด
C_e	=	ความเข้มข้นของสีย้อมที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/L)
C_0	=	ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น (mg/L)
q	=	ปริมาณการดูดซับสีย้อม (mg/g)
q_e	=	ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล(mg/g)
q_m	=	ปริมาณการดูดซับสีย้อมแบบชั้นเดียวสูงสุดจากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (mg/g)
q_t	=	ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่เวลา t (mg/g)
m	=	น้ำหนักของแร่ดิน (g)
V	=	ปริมาตรของน้ำ (L)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

K_d	=	สัมประสิทธิ์การแจกแจงหรือ ค่าคงที่ Henry's Law (L/g)
K_F	=	ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (L/g)
K_L	=	ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (L/g)
$\Delta_{ads} G^\circ$	=	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (kJ/mol)
$\Delta_{ads} H^\circ$	=	การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมาตรฐาน (kJ/mol)
$\Delta_{ads} S^\circ$	=	การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน (kJ/mol*K)
R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol*K)
T	=	อุณหภูมิของสารละลายสี่ย้อม (K)
k_1	=	ค่าคงที่ของสมการอันดับหนึ่งเทียม (1/min)
k_2	=	ค่าคงที่ของสมการอันดับสองเทียม (g/mg*min)
$q_{e, exp}$	=	ปริมาณการดูดซับสี่ย้อมที่สถานะสมดุลจากการทดลอง (mg/g)
$q_{e, cal}$	=	ปริมาณการดูดซับสี่ย้อมที่สถานะสมดุลจากการคำนวณ (mg/g)
E_a	=	พลังงานกระตุ้น (kJ/mol)
MTZ	=	Mass Transfer Zone
t^*	=	เวลาการดูดซับอุดมคติของกราฟเบรคทรวู (min)
L	=	ความยาวของเบดในหอดูดซับ (m)
W_{sat}	=	น้ำหนักของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่สถานะสมดุล (g/g)
W_0	=	น้ำหนักของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่เวลาเริ่มต้น (g/g)
ρ_b	=	ความหนาแน่นรวมของเบดในหอดูดซับ (kg/m ³)
t_b	=	เวลาที่จุดเบรคทรวู (min)
V_b	=	ปริมาตรที่จุดเบรคทรวู (mL)
q_{total}	=	ปริมาณการดูดซับสี่ย้อมทั้งหมดในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง (mg)
LUB	=	ความยาวของเบดที่ยังไม่ได้ใช้งาน (m)
BV	=	Bed volume
Q	=	อัตราการไหลในหอดูดซับจริง (m ³ of fixed-bed/min)
Q_0	=	อัตราการไหลในหอดูดซับขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ (m ³ of fixed-bed/min)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

M	=	น้ำหนักของตัวดูดซับในหอดูดซับจริง (kg/min)
P	=	ความหนาแน่นรวมของตัวดูดซับ (kg/m ³)
T	=	เวลาที่จุดเบรคทูลสำหรับหอดูดซับจริง (min)
M_t	=	มวลของตัวดูดซับในหอดูดซับ ณ จุดที่ตัวดูดซับหมดสภาพต่อหน่วยเวลา (kg/min)
D_{sc}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ภายในรูพรุนของอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก
D_{LC}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ภายในรูพรุนของอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่
d_{LC}	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดอนุภาคใหญ่
d_{LC}	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดอนุภาคเล็ก
x	=	แฟกเตอร์การแพร่ (Diffusivity factor)
$EBCT_{sc}$	=	EBCT ของอนุภาคที่อยู่ในหอดูดซับขนาดเล็ก
$EBCT_{LC}$	=	EBCT ของอนุภาคที่อยู่ในหอดูดซับขนาดใหญ่
t_{sc}	=	เวลาในการดำเนินการของหอดูดซับขนาดเล็ก
t_{LC}	=	เวลาในการดำเนินการของหอดูดซับขนาดใหญ่
v_{sc}	=	ความเร็วในหอดูดซับขนาดเล็ก
v_{LC}	=	ความเร็วในหอดูดซับขนาดใหญ่
$Re_{sc, min}$	=	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่น้อยที่สุดในหอดูดซับขนาดเล็ก
Re_{LC}	=	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในหอดูดซับขนาดใหญ่
ν	=	ความหนืดเชิงไคเนเมติก (Kinematic viscosity)
e	=	ความพรุนในเบดนิ่ง
Re	=	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
L_{sc}	=	ความยาวของเบคของหอดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ได้แก่

ขอขอบพระคุณ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพหุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยดูแลเอาใจใส่ เป็นอย่างดีและให้กำลังใจในการทำงานวิจัยจนเสร็จสิ้นและลงส่งไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณประธานหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับขอบเขตของวิทยานิพนธ์และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะทำให้สามารถทำงานวิจัยสำเร็จลงด้วยดี รวมถึงเจ้าหน้าที่ธุรการบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่กรุณาช่วยเหลือ ในระหว่างดำเนินงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลองเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และสาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือในการทำงานวิจัย ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณหลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และโครงการทุนนักวิจัยหน้าใหม่ ที่ให้การสนับสนุน ด้านทุนวิจัยเป็นอย่างดี

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ทรงศักดิ์ สระแก้ว

(นายทรงศักดิ์ สระแก้ว)

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การกำจัดสีย้อมโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน
 โดย : ทรงศักดิ์ สระแก้ว
 ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชา : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
 ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ดร.จักรกฤษณ์ อัมพพ

ศัพท์สำคัญ : การดูดซับ สีมะทิลออเรนจ์ สีรีแอดทีฟแบล็ค 5 สารไคโตซาน แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดสีย้อมที่มีประจุลบ 2 สี ได้แก่ สีรีแอดทีฟแบล็ค 5 (Reactive Black 5: RB5) และสีเมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange: MO) จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน (Chitosan modified Montmorillonite: CTS/MMT) เป็นตัวดูดซับ การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ พบว่า การดัดแปรแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite: MMT) ด้วยสารไคโตซานจะส่งผลให้แร่ดิน MMT มีพื้นที่ผิวลดลง มีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยใหญ่ขึ้น และระยะของช่องว่างระหว่างชั้นดิน (d_{001}) เพิ่มขึ้นจากเดิม 1.27 nm ไปเป็น 1.40 nm ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) แสดงให้เห็นการแลกเปลี่ยนของหมู่อะมิโนของไคโตซานกับประจุบวกภายในแร่ดิน MMT ส่วนที่ 2 การศึกษาสมดุลและจลนพลศาสตร์การดูดซับ พบว่า แร่ดิน CTS/MMT มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี RB5 และ MO สูงกว่าแร่ดิน MMT ร้อยละ 71.48 และ 65.18 ตามลำดับ ปริมาณการดูดซับสีย้อมเกิดขึ้นสูงสุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 และอุณหภูมิ 55 °C ข้อมูลสมดุลการดูดซับมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช อัตราการดูดซับของสีย้อมทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเข้าสู่สมดุลภายใน 60 นาที ข้อมูลอัตราการดูดซับสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม ส่วนที่ 3 การศึกษาการดูดซับในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับแบบเบคกิง พบว่า ปริมาณการดูดซับสูงสุดของสี RB5 และ MO มีค่าเท่ากับ 9.12 และ 7.35 mg/g ตามลำดับ ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความสูงของเบคและความเข้มข้นเริ่มต้น แต่จะลดลงตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสำหรับการกำจัดสี RB5 และ MO

ABSTRACT

TITLE : REMOVAL OF DYE USING CHITOSAN MODIFIED
MONTMORILLONITE CLAY

BY : SONGSAK SAKAEW

DEGREE : MASTER OF ENGINEERING

MAJOR : ENVIRONMENTAL ENGINEERING

CHAIR : CHAKKRIT UMPUCH, Ph.D.

KEYWORDS : ADSORPTION / METHY ORANGE / REACTIVE BLACK 5 / CHITOSAN /
CHITOSAN MODIFIED MONTMORILLONITE CLAY

The objective of this research was to study the removal of two negatively-charged dyes such as reactive black 5 (RB5) and methyl orange (MO) from aqueous solution by using chitosan modified montmorillonite (CTS/MMT) as adsorbents. The experiment was divided into 3 parts. Firstly, the physical properties of the both adsorbents were characterized. The modification of montmorillonite (MMT) by intercalation of chitosan caused a decrease of surface area and an increase of average pore size and an expansion of basal spacing (d_{001}) from 1.27 nm to 1.40 nm. The result of Fourier Transform Infrared Spectrophotometer shows the ion-exchange between amino groups of chitosan with the positively-charged molecules inside MMT. Secondly, the study of equilibrium and kinetic adsorptions was investigated. The CTS/MMT has dye removal percentage of RB5 and MO higher than that of MMT about 71.48 and 65.18, respectively. The maximum adsorption capacity of both dyes was obtained at initial pH value of the dye solution of 2 and operating temperature of 55 °C. The equilibrium adsorption data was better fitted to Langmuir isotherm model comparing with that of Freundlich isotherm. The rate of adsorption increased initially rapid and reached equilibrium within 60 min. The adsorption rate data were better fitted to pseudo-second order equation. Finally, fixed-bed adsorption column experiments demonstrating that the maximum of adsorption capacity of RB5 and MO was 9.12 and 7.35 mg/g, respectively. The adsorption capacities increased with bed height and initial dye concentration, but

decreased with an increase in flow rate. The results show that the CTS/MMT is an effective adsorbent for removal of RB5 and MO.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันน้ำเสียที่เกิดจากการปนเปื้อนของเสียเคมีมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมฟอกย้อม อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ เป็นต้น น้ำเสียที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะมีอุณหภูมิสูง มีสีเข้ม มีกลิ่นเหม็น และมีปริมาณสารอินทรีย์สูง เนื่องจากเสียเคมีสามารถละลายน้ำได้ดี มีขนาดโมเลกุลใหญ่และมีโครงสร้างซับซ้อนจึงไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติที่สภาวะปกติ (Aksu, 2005) หากน้ำเสียเหล่านี้ปนเปื้อนลงในแหล่งน้ำธรรมชาติในปริมาณมากจะทำให้แหล่งน้ำเน่าเสีย ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ เช่น สัตว์น้ำที่ละลายในน้ำจะบดบังแสงแดดทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ และจะลดการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ผิวน้ำ ส่งผลให้ออกซิเจนในน้ำลดลงและส่งผลเสียต่อสัตว์น้ำเป็นต้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการทำลายทัศนียภาพและเป็นที่น่ารังเกียจ

การกำจัดเสียที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ ถึงแม้ว่าวิธีการทางเคมีและทางชีวภาพจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเสียสูง แต่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีลักษณะเฉพาะ มีการใช้พลังงานสูง และมีปริมาณของผลิตภัณฑ์พลอยได้เกิดขึ้นตามมาด้วย การใช้วิธีทางกายภาพ เช่น การดูดซับ การแลกเปลี่ยนประจุ และการกรองผ่านแผ่นเยื่อบาง เป็นต้น เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและไม่ก่อให้เกิดสารพลอยได้ตามมา ดังนั้นวิธีทางกายภาพจึงเป็นวิธีที่นำมาใช้ในการกำจัดเสียเคมีอย่างแพร่หลาย (Al-Deges et al., 2008) การดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากมีต้นทุนต่ำและเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งสามารถนำวัสดุที่มีราคาถูกมาใช้เป็นตัวดูดซับ เช่น แร่ดิน วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เปลือกผลไม้ ชีวมวล และไบโอพอลิเมอร์ เป็นต้น (Rafatullah et al., 2010) ในอดีตได้มีการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดเสียสูงมาก ซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลและหมู่อะมิโนอยู่ที่พื้นผิวทำหน้าที่ในการยึดจับและสามารถดูดซับไอออนที่มีประจุบวกและไอออนที่มีประจุลบไว้ที่ผิวได้ดี ตัวอย่างเช่น ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสีเมทิลีนบลู (Methylene Blue) และสีเอซิคบลู 29 (Acid Blue 29) ในปริมาณสูงถึง 453.12 และ 554.32 mg/g ตามลำดับ (Auta and Hameed, 2011) อย่างไรก็ตามถ่านกัมมันต์มีต้นทุนในการเตรียมสูง และยากต่อการนำกลับมาใช้ใหม่และการกำจัด ดังนั้นเมื่อไม่นานมานี้ การพัฒนาตัวดูดซับจากแร่ดินธรรมชาติมี

การศึกษาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูก มีปริมาณมาก และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Wang and Wang, 2007)

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) เป็นแร่ดินธรรมชาติชนิดหนึ่งที่นิยมใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมเคมีเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง และมีราคาถูก มีปริมาณมากและมีการผลิตในเชิงพาณิชย์ภายในประเทศ และผลิตภัณฑ์แร่ดินมีความบริสุทธิ์สูงเนื่องจากผ่านกระบวนการทำบริสุทธิ์หลายขั้นตอน (จักรกฤษณ์ อัมพฤษ และรัตนวรรณ เกียรติโกมล, 2549) แร่ดิน MMT เป็นแร่ดินในกลุ่มสเมคไทต์ (Smectite) ที่มีอลูมินา (Al_2O_3) และซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก โครงสร้างของแร่ดิน MMT จะซ้อนกันเป็นชั้น (Lamellar structure) และระหว่างชั้นดินจะมีช่องว่างอยู่ซึ่งสามารถขยายตัวได้เมื่อละลายในน้ำ แร่ดิน MMT มีประจุลบอยู่บนพื้นผิวทำให้สามารถดูดซับสีย้อมที่มีประจุบวกได้ดี เช่น แร่ดิน MMT มีปริมาณการดูดซับของสีเมทิลีนบลูแบบชั้นเดียวสูงสุดเท่ากับ 322.6 mg/g (ปิยะมากรณ์ จารุงศ์, 2545) แร่ดิน MMT มีปริมาณการดูดซับของสีโรดามีนบี (Rhodamine B) แบบชั้นเดียวสูงสุดเท่ากับ 42.19 mg/g (Panneer Selvam et al., 2008) เป็นต้น

ถึงแม้ว่าแร่ดิน MMT มีปริมาณในการดูดซับสีย้อมที่มีประจุสูง แต่เมื่อนำมาดูดซับสีย้อมที่มีประจุลบจะดูดซับได้น้อย เนื่องจากแรงผลักระหว่างประจุลบของแร่ดินกับประจุลบของสีย้อม (จักรกฤษณ์ อัมพฤษ, 2549) และสีย้อมที่มีประจุลบเป็นสีที่ใช้มากในอุตสาหกรรมฟอกย้อมของประเทศ ดังนั้นจึงได้มีการดัดแปรแร่ดิน MMT ด้วยสารต่าง ๆ เช่น สารลดแรงตึงผิวและกรด เพื่อเพิ่มปริมาณการดูดซับของแร่ดินให้สามารถดูดซับไอออนที่มีประจุลบได้ ตัวอย่างเช่น การดัดแปรแร่ดิน MMT ด้วยสารลดแรงตึงผิวซิทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรมاید (Cetyltrimethylammonium bromide) สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การกำจัดเมทิลออเรนจ์ได้ถึง 80.12 % และการดัดแปรสารลดแรงตึงผิวจิมินี (Gemini) สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดเมทิลออเรนจ์ได้ถึง 90.62 % (Kan et al., 2011) การดัดแปรแร่ดิน MMT ด้วยกรดไฮโดรคลอริกสามารถเพิ่มปริมาณการดูดซับเมทิลออเรนจ์ได้ถึง 88 % แต่จะมีเวลาในการเข้าสู่สมดุลนานกว่า (Teng and Lin, 2006) เป็นต้น ดังนั้น แร่ดิน MMT ที่ถูกดัดแปรจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมดีกว่าแร่ดิน MMT

นอกจากนี้ แร่ดิน MMT สามารถนำมาดัดแปรด้วยสารไคโตซาน (CTS/MMT) และทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุบวก และสามารถดูดซับไอออนที่มีประจุลบได้ดี เนื่องจากสารไคโตซานเป็นไบโอโพลิเมอร์ธรรมชาติที่มีประจุบวกอยู่ที่ผิว (Darder et al., 2003) ไคโตซานเป็นสารที่สามารถสกัดได้จากเปลือกแข็งของสัตว์พวกกุ้ง แมลง และปู เป็นต้น ซึ่งมีการบริโภคสัตว์เหล่านี้ในประเทศไทยเป็นจำนวนมาก จึงทำให้มีเปลือกแข็งของสัตว์เหล่านี้เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ถึงแม้ว่าสารไคโตซานจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูง แต่สารไคโตซานละลายน้ำได้น้อย และพองตัวง่ายเมื่อละลายน้ำ การนำสารไคโตซานมาตรึงไว้บนพื้นผิวของแร่ดิน MMT จะช่วยให้มี

ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเคมีเพิ่มขึ้น เช่น การคัดแปรแร่ดิน MMT ด้วยสารไคโตซานจะมีปริมาณการดูดซับสีคองโกเรด (Congo Red) เท่ากับ 54.52 mg/g ซึ่งสูงกว่าปริมาณการดูดซับด้วยแร่ดิน MMT มีค่าเท่ากับ 12.70 mg/g แต่มีค่าน้อยกว่าสารไคโตซานอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 81.23 mg/g (Wang and Wang, 2007) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาคัดแปรแร่ดิน MMT ด้วยไคโตซานเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อมเคมีที่มีประจุลบจากน้ำสีสังเคราะห์ ได้แก่ สีรีแอคทีฟแบล็ค 5 และสีเมทิลออเรนจ์ ซึ่งเป็นสีย้อมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อม และอุตสาหกรรมสิ่งทอของประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาการกำจัดสีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลในคัดแปรด้วยไคโตซานเป็นตัวดูดซับ โดยศึกษาในประเด็นดังนี้

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการดูดซับแบบกะชกขั้นตอนเดียว
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการดูดซับในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

1.3 สมมติฐาน

1.3.1 แร่ดิน CTS/MMT จะมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่มีประจุลบได้ดีกว่าแร่ดิน MMT เนื่องจากแร่ดิน MMT มีประจุลบ เมื่อนำมาคัดแปรด้วยสารไคโตซานจะทำให้แร่ดินมีประจุบวก

1.3.2 ปริมาณการดูดซับสีย้อมในการทดลองแบบกะชกขั้นตอนเดียวอาจจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการสัมผัส หรือการลดลงของค่าพีเอชของสารละลายเนื่องจากในโรงงานฟอกย้อมจะนิยมย้อมสีที่มีประจุลบในสภาวะที่เป็นกรด หรือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื่องจากในขั้นตอนการย้อมสีผ้าจะนิยมย้อมที่อุณหภูมิสูง

1.3.3 ปริมาณการดูดซับสีย้อมในหน่วยปฏิบัติการหอดูดซับอาจจะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพราะอาจจะทำให้การถ่ายโอนมวลสูงขึ้นเมื่อความแตกต่างของความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้น หรือการลดลงของอัตราการใช้เนื่องจากทำให้เวลาสัมผัสระหว่างสีย้อมในสารละลายกับตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น หรือการเพิ่มขึ้นของความสูงของเบดนิ่งเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 สีย้อมที่ใช้ในการทดลองเป็นสีย้อมที่มีประจุลบ จำนวน 2 ชนิด คือ สิริแอคทีฟแบล็ค 5 (Reactive Black 5) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich บริษัท Sigma-Aldrich จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา และเมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange) ยี่ห้อ Labchem บริษัท Asia Pacific Specialty Chemicals จำกัด ประเทศออสเตรเลีย

1.4.2 ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือ แร่ดิน MMT (บริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด) และแร่ดิน CTS/MMT

1.4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ ประกอบด้วย การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ย ระยะของช่องว่างระหว่างชั้นดิน หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ สัณฐานและลักษณะพื้นผิว ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน จุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point) และปริมาณสารอินทรีย์ในตัวดูดซับ

1.4.4 การศึกษาการดูดซับแบบกะชนิดขั้นตอนเดียว ประกอบด้วย การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ การศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส และการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

1.4.5 การศึกษาการดูดซับในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ประกอบไปด้วย การศึกษาอิทธิพลของความสูงของเบดนิ่ง อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม และอิทธิพลของอัตราการไหล

1.4.6 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับใช้ตัวดูดซับ 2 ชนิด ส่วนการทดลองที่เหลือเลือกใช้ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับสีย้อมแต่ละสีได้มากกว่าจากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

1.4.7 การศึกษาการดูดซับแบบกะจะทำการทดลอง 2 ชั่วโมงและความเร็วรอบในการเขย่า 200 rpm

1.4.8 วิเคราะห์ปริมาณการดูดซับด้วยหลักการดูดกลืนแสงเทียบกับความเข้มข้นด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)

1.4.9 การศึกษานี้พิจารณาเฉพาะการกำจัดสีย้อม เพื่อบ่งชี้ประสิทธิภาพและศักยภาพของระบบเท่านั้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถกำจัดสีขุ่นในน้ำสีสังเคราะห์ได้ โดยใช้เรซิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ

1.5.2 ผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีขุ่นในน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานฟอกย้อมได้

1.5.3 เพิ่มประสิทธิภาพและพัฒนาความสามารถในการใช้เรซิน MMT ที่เป็นวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่มากในประเทศ และมีราคาถูกให้เกิดประโยชน์มากขึ้น

1.5.4 สามารถนำสารโคโคซานที่สกัดมาจากเปลือกนอกของสัตว์พวกกุ้ง แมลง และปู ซึ่งเป็นของเสียชนิดหนึ่งที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทย มาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

1.6 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อม

สีย้อม (Dyes) คือ สียชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมวัสดุสิ่งทอ อาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยโดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400 – 700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ กันไป ซึ่งสายตาสถาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาสถาออกมาเป็นต่างกันไป

สีย้อมเคมีอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทางคือ ทางการหายใจด้วยการสูดดมสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ จากการสัมผัสทางผิวหนังและจากการปะปนเข้าไปกับอาหารการกิน สารบางชนิดในสีย้อมหากเข้าสู่ร่างกายจะไปสะสมอยู่ภายในอวัยวะต่าง ๆ จะก่อตัวเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น 2-naphthylamine และ NH_2 Benzdine สีย้อมบางชนิด เช่น สี Azo เป็นสีที่ทำได้ง่ายและมีราคาถูกซึ่งมีส่วนประกอบของโลหะหนักโครเมียมผสมอยู่ ถ้าทิ้งลงไปใต้น้ำจะเป็นอันตรายต่อปลาและสิ่งมีชีวิตในน้ำ ถ้าเข้าสู่ร่างกายมนุษย์จะเป็นสารก่อมะเร็ง (จักรกฤษณ์ อัมพฤษ, 2549) การจำแนกสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุด คือ การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้ เนื่องจากสีย้อมมีหลายประเภทและมีการใช้งานที่ไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้งาน ออกเป็น 11 ประเภท ได้ดังนี้

2.1.1 สีเอซิด (Acid dye) สีย้อมชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

2.1.2 สีไดเรกต์ (Direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบ อะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ค่อนข้าง ทนแสง

2.1.3 สีเบสิก (Basic dye) หรือบางครั้งเรียกสีแคทไอออนิก (Cationic dyes) ทั้งนี้เพราะเวลาสีอยู่ในน้ำ สีจะแสดงประจุบวกบนโครงสร้างโมเลกุลของสี และใช้ส่วนประจุบวกนี้ให้เกิดพันธะกับเส้นใยที่แสดงประจุลบเป็นพันธะไอออนิก นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุบวกจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใยที่มีประจุลบ เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนต่อการซักและแสง

2.1.4 สีดิสเพอร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันทหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณากลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo dyes) และสีย้อมแอมมิโนแอนทราควิโนน (Amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (Ethanalamine; $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

2.1.5 สีรีแอคทีฟ (Reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นค่า สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสถานะที่เป็นค่า กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง $70-75^\circ\text{C}$ และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสถานะ

2.1.6 สีอะโซอิก (Azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

2.1.7 สีแว็ต (Vat dye) ตัวสีทำจากต้นคราม ต้องหมักให้ตัวสีละลายออกมาจากต้นพืช จึงจะใช้ย้อมได้ ดังที่ใช้นักจะเรียกว่า “Vat” จึงเรียกกันว่า สี Vat ตามดังที่ใช้นักเป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้ สีแว็ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไป

ฝังในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแฉ่ำ สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีนินดิโก (Indigoid) และ สีแอนทราควินอยด์ (Antraquinoid)

2.1.8 สีมอร์แคนท์ หรือโครม (Mordant or chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดินบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แคนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจาก สีมอร์แคนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน และเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

2.1.9 สีนินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับ น้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

2.1.10 สีออกซิเดชัน (Oxidation dye) เป็นสีที่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์ หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

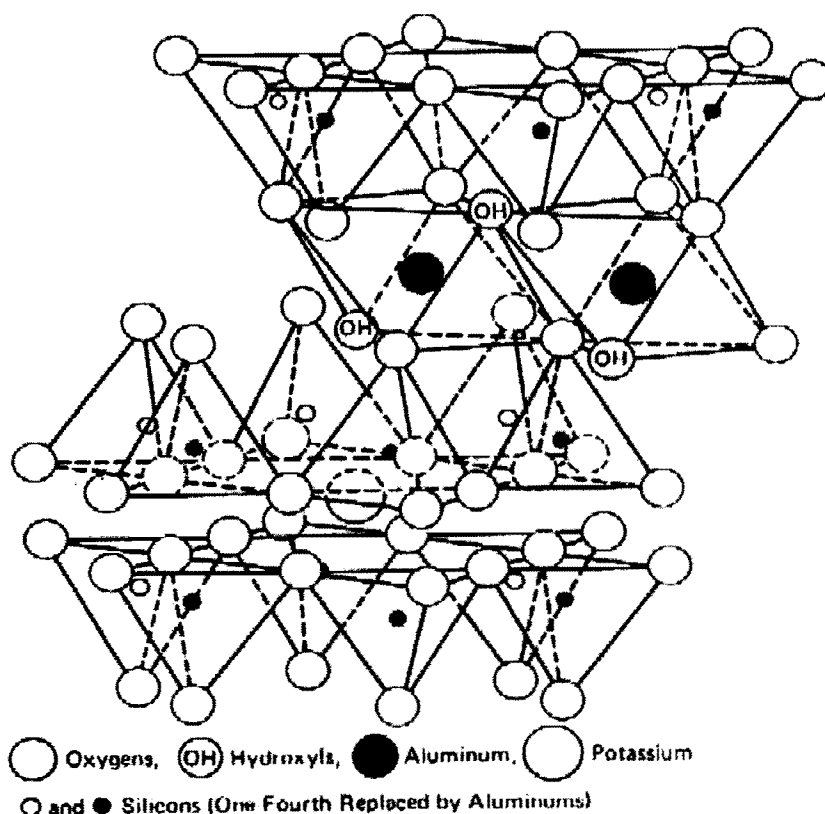
2.1.11 สีซัลเฟอร์ (Sulfur dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้ โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะ ละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้า สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทน ต่อการซัก

สมบัติของการละลายน้ำของสีย้อมเคมีสังเคราะห์มีความสำคัญต่อความยากง่ายในการ กำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสีย ถ้าเป็นสีย้อมเคมีสังเคราะห์ละลายน้ำไม่ได้จะทำการกำจัดสีย้อมเหล่านี้ ด้วยวิธีการตกตะกอนสีย้อมซึ่งจะทำได้โดยง่าย แต่ถ้าเป็นสีย้อมเคมีสังเคราะห์ที่ละลายน้ำอาจต้อง ใช้วิธีการที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น การดูดซับ และการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน เป็นต้น ดังนั้นสีย้อมเคมี สังเคราะห์แต่ละชนิดจึงมีวิธีการกำจัดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสมบัติของสีแต่ละประเภท (จักรกฤษณ์ อัมพพ, 2549)

2.2 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite clay: MMT) มีโครงสร้างเป็นชั้น ๆ ซ้อน กันหลายชั้นมีลักษณะการจัดเรียงตัวที่ไม่แน่นอน เมื่อนำแร่ดิน MMT ไปละลายน้ำ แร่ดินจะเกิดการ พองตัวอย่างรวดเร็ว และขยายตัวได้ แร่ดิน MMT เป็นแร่ดินในกลุ่มสเมคไทต์ (Smectite) มีสูตรทาง เคมีทั่วไปคือ $M_x(Al_{2-y}, Mg_y)Si_4O_{10}(OH)_{2-n}(H_2O)_n$ สำหรับสูตรอย่างง่าย (Empirical formula) ของแร่ ดิน MMT ได้แก่ $(Na, Ca)_{0.3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_{2-n}(H_2O)_n$ โครงสร้างของแร่ดินแสดงไว้ในภาพที่ 2.1 ในแต่ละชั้นดินจะประกอบไปด้วยแผ่น 3 แผ่นซ้อนกัน ได้แก่ แผ่นของซิลิกาที่มีรูปร่างของเซลล์

หน่วยเป็นแบบทรงสี่หน้า 2 แผ่นประกบกับแผ่นของอลูมินาที่มีรูปร่างของเซลล์หน่วยเป็นแบบทรงแปดหน้าแทรกอยู่ตรงกลาง ระหว่างชั้นดินแต่ละชั้นจะมีช่องว่างอยู่ เนื่องจากประจุของชั้นดินมีความไม่สมดุลกัน เพราะ Al^{3+} สามารถเข้าไปแทนที่ Si^{4+} ในแผ่นซิลิกา นอกจากนี้ Mg^{2+} และ Zn^{2+} สามารถเข้าไปแทนที่ Al^{3+} ในแผ่นอลูมินาได้ ทำให้แร่ดินชนิดนี้แสดงประจุเป็นลบ เมื่อการแทนที่เกิดขึ้นมาก ๆ ประจุลบจะมีอำนาจสูงขึ้นทำให้ออกซิเจนภายในชั้นดินพยายามจัดเรียงตัวใหม่ แต่เนื่องจากเซลล์หน่วยของชั้นดินมีการยึดตัวกันอย่างแน่นหนาอยู่แล้วทำให้ออกซิเจนไม่สามารถขยับได้จึงส่งผลให้มีแรงผลักเกิดขึ้นระหว่างชั้นดิน ชั้นดินจึงแยกชั้นออกจากกันเกิดเป็นช่องว่างระหว่างชั้นดินขึ้น ดังนั้นแร่ดิน MMT ในธรรมชาติจึงมีไอออนบวกของโลหะ เช่น โซเดียมไอออน แคลเซียมไอออน และน้ำ (ปิยะภรณ์ จารวงษ์ และ รัตนวรรณ เกียรติโกมล, 2547) แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นดิน เพื่อดุลกับประจุลบบนแร่ดิน MMT ด้วยเหตุนี้ทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นดินสามารถขยายตัวได้เมื่อละลายอยู่ในน้ำ



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ วงกลมกลวงใหญ่ คือ ออกซิเจน วงกลมกลวงเล็ก คือ ไฮโดรเจน วงกลมสีคำใหญ่ คือ อลูมิเนียม, เหล็ก, แมกนีเซียม วงกลมสีคำเล็ก คือ ซิลิกา บางส่วนเป็นอลูมินา วงกลมที่มี OH อยู่ตรงกลาง คือ ไฮดรอกซิล (Ohtsuka, 1997)

แร่ดิน MMT มีองค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และแร่ดิน MMT มีค่า CEC (Cation exchange capacity) เท่ากับ 80 meq./g

ตารางที่ 2.1 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีโดยน้ำหนัก (%wt) ของแร่ดิน MMT

องค์ประกอบทางเคมี	%wt	องค์ประกอบทางเคมี	%wt
SiO ₂	56-60	MgO	1.5-2.0
Al ₂ O ₃	16-18	CaO	1.9-2.1
Fe ₂ O ₃	5-7	K ₂ O ₃	0.3-0.5
Na ₂ O	2.4-3	TiO ₂	1.2-1.5

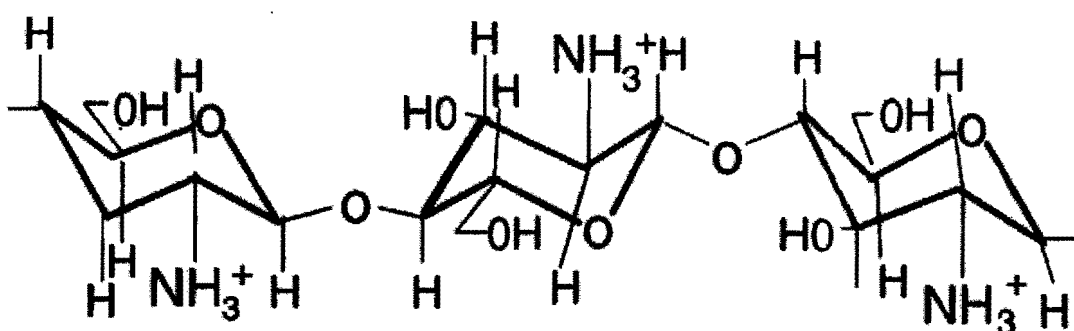
หมายเหตุ : ข้อมูลจาก บริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด

เนื่องจากแร่ดิน MMT มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) จึงเป็นตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับที่ไม่มีประจุหรือไอออนที่มีประจุลบได้น้อย อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเหล่านี้สามารถนำมาปรับปรุงได้โดยการนำแร่ดิน MMT ไปดัดแปรด้วยสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic Surfactant) กลายเป็นตัวดูดซับสามารถดูดซับ โมเลกุลที่ไม่มีประจุ และ โมเลกุลที่มีประจุลบได้ดี แร่ดินที่ถูกดัดแปรนี้จะถูก เรียกว่า “Organo-clay” ซึ่งจะมีคุณสมบัติชอบสารอินทรีย์ (Organophilic) จึงเป็นตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่จะเป็น โมเลกุลที่เป็น โซ่ยาวและปลายข้างหนึ่งเป็นประจุบวก ประจุบวกเหล่านี้จะเข้าไปยึดจับกับประจุลบด้วยแรงทางไฟฟ้า ทำให้ประจุลบบนแร่ดิน MMT มีความแรงลดลง ส่งผลให้สามารถดูดซับไอออนที่มีประจุลบได้ดีขึ้น เช่น การดัดแปรแร่ดิน MMT โดยใช้สารลดแรงตึงผิว Tetradecyltrimethyl ammonium bromide (TDMA-Br) มาใช้เป็นสารปรับปรุงพื้นผิวของแร่ดินสามารถนำไปเป็นตัวดูดซับสีเมทิลออเรนจ์ซึ่งเป็นสีที่มีประจุลบได้ดี แต่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีเมทิลีนบลูซึ่งเป็นสีที่มีประจุบวกได้น้อยลง (Wibulswas, 2004) นอกจากนี้ได้มีการนำสารลดแรงตึงผิว Hexadecyltrimethylammonium (HDTMA) มาดัดแปรคุณสมบัติพื้นผิวของแร่ดิน MMT พบว่า สามารถดูดซับสารอินทรีย์ เช่น กรดฮิวมิก ฟีนอล และแนปทาลิน เป็นต้น ที่อยู่ในน้ำได้ดี (ปิยะมาภรณ์ จารวงศ์ และรัตนวรรณ เกียรติโกมล, 2547)

2.3 ไคโตซาน

ไคโตซานเป็นไบโอโพลิเมอร์ธรรมชาติอย่างหนึ่งเป็นสารอนุพันธ์ของไคติน มีรูปร่างหน้าตาคล้ายกับไคติน และไม่ละลายน้ำ ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญอยู่ในรูปของ D-glucosamine โดยไคโตซานจะได้จากปฏิกิริยาการดึงส่วนที่เรียกว่า หมู่อะซิทิล (Acetyl group) ของไคตินออกไป เรียกว่า ปฏิกิริยาคีอะซิไทเลชัน (Deacetylation) ทำให้จากเดิมโมเลกุลเดี่ยวของไคตินที่เคยเป็นเอ็น-อะซิทิลกลูโคซามีน (N-acetylglucosamine) ถูกปรับเปลี่ยนใหม่เหลือแค่ กลูโคซามีน (Glucosamine) เท่านั้น จากที่เคยเรียกว่าไคตินก็เลยเปลี่ยนชื่อเป็นไคโตซาน พบได้ในธรรมชาติ และเป็นองค์ประกอบอยู่ในเปลือกนอกของสัตว์พวกกุ้ง ปู แมลง และเชื้อรา เป็นสารธรรมชาติที่มีลักษณะโดดเด่นเฉพาะตัว คือ เป็นวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ย่อยสลายตามธรรมชาติ มีความปลอดภัยในการนำมาใช้กับมนุษย์ ไม่เกิดผลเสียและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ไม่เกิดการแพ้ ภูมิไวไฟและไม่เป็นพิษ (Non-phytoxic) ต่อพืชและสัตว์ ในแง่ทางเศรษฐกิจ ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ชนิดหนึ่งของไคตินซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูก เนื่องจากไคตินเป็นโพลิเมอร์ที่มีมากที่สุดเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส

ไคโตซานเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับโลหะหนัก เช่น ทองแดง (Wu et al., 1999) และสารอินทรีย์ที่มีประจุลบหรือเป็นกลาง เช่น สิริแอคทีฟ (Wu et al., 2001) เนื่องจากมีหมู่เอมิโน ($-NH_2$) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) อยู่บนโซ่โพลิเมอร์ทำหน้าที่ยึดเกาะและเป็นบริเวณที่มีการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางเคมี ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและความสามารถในการดูดซับ ประสิทธิภาพของการดูดซับจะขึ้นอยู่กับการรับโปรตอนของหมู่เอมิโนกลายเป็น $-NH_3^+$ ($pK = 6.3$) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (Dambies et al., 2001)

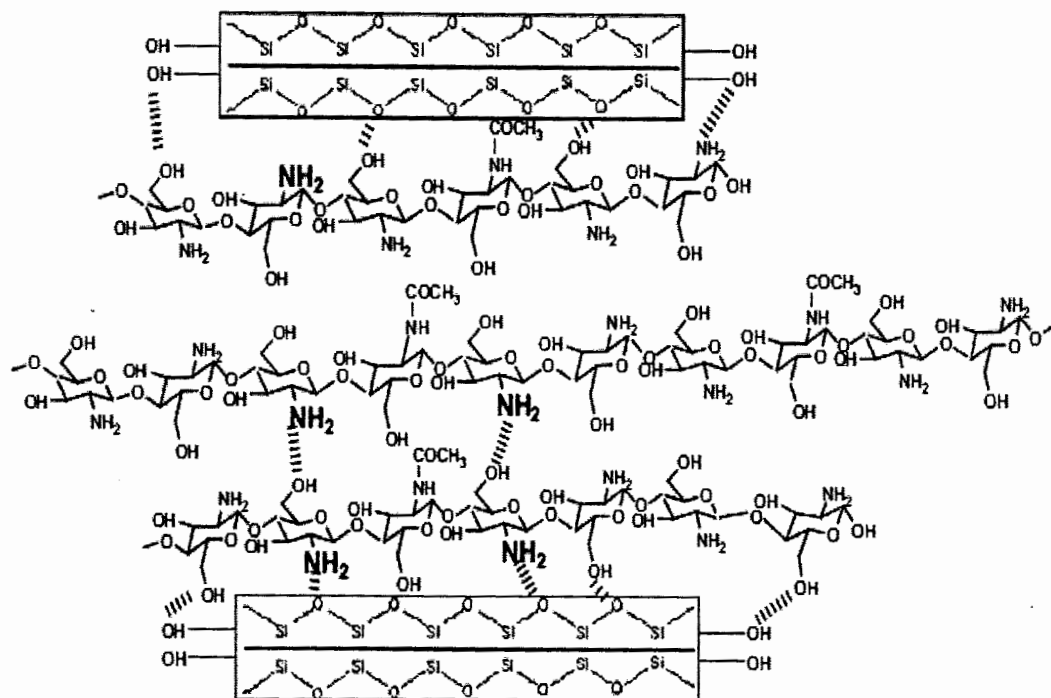


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซาน (An and Dultz, 2007)

ถึงแม้ว่าไคโตซานจะแสดงความสามารถในการดูดซับได้ดีแล้ว แต่ยังมีข้อด้อยบางประการ ได้แก่ เกิดการบวมหรือพองตัวมาก (Highly swollen) เมื่อละลายอยู่ในน้ำ มีความถ่วงจำเพาะต่ำ จึงอาจจะนำมาซึ่งความไม่สะดวกในการใช้งาน เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานในการทดลองการดูดซับแบบกะ และในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง คุณสมบัติทางกายภาพเหล่านี้สามารถถูกปรับปรุงได้โดยการนำไคโตซานไปตรึงหรือเคลือบไว้บนพื้นผิวของแร่ดิน MMT

2.4 แร่ดินมอนต์มอริลไลต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน

เนื่องจากแร่ดิน MMT มีคุณสมบัติชอบน้ำและสารไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก จึงทำให้ไคโตซานสามารถเข้าไปแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนบวกที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นดินได้ง่าย ไคโตซานมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนบวกที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของแร่ดิน MMT ได้สูงถึง 180% CEC (Cation Exchange Capacity) (Darder et al., 2003) เนื่องจากไคโตซานหนึ่งโมเลกุลจะประกอบไปด้วยหมู่เอมีโน ($-NH_2$) หนึ่งหมู่และหมู่ไฮดรอกซิล (OH) สองหมู่ หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (H-bonds) กับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ในแผ่นซิลิเกตของแร่ดิน MMT ได้ จึงทำให้ไคโตซานยึดเกาะบนแร่ดิน MMT ด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรง ดังแสดงในภาพที่ 2.3 โดยทั่วไป การแทนที่ของหมู่เอมีโนบนโซ่ไบโอพอลิเมอร์ของไคโตซานบนแร่ดิน MMT สามารถศึกษาได้โดยการวิเคราะห์ IR-spectra เช่น การแลกเปลี่ยนประจุบวกของโซเดียมไอออน (Na^+) กับหมู่เอมีโนที่โปรตอนเนต ($-NH_3^+$) จะเกิดที่พิก 1594 cm^{-1} ในแร่ดิน MMT ไปเป็น 1520 cm^{-1} ในแร่ดิน CTS/MMT (Monvisade and Siriphannon, 2009) การดัดแปรแร่ดิน MMT ด้วยสารไคโตซานยังส่งผลให้ช่องว่างระหว่างชั้นดิน (Basal spacing) ซึ่งจะนิยามแสดงด้วยค่า d_{001} ขยายใหญ่ขึ้นเนื่องจากโซ่พอลิเมอร์ของสารไคโตซานเข้าไปแทรกและเป็นตัวก้ำยันอยู่ภายในช่องว่างระหว่างชั้น (ขยายตัวได้เมื่อละลายอยู่ในน้ำ) ในลักษณะชั้นเดี่ยว (Monolayer) เช่น การดัดแปรแร่ดิน MMT ด้วยสารไคโตซานที่ 25 %CEC จะทำให้ d_{001} กว้างขึ้นจาก 1.30 nm ไปเป็น 1.52 nm เป็นต้น เมื่อทำการเพิ่มปริมาณของไคโตซานบนแร่ดิน MMT โซ่พอลิเมอร์จะจับตัวกันหนาขึ้นเป็นลักษณะสองชั้น (Bilayer) และจะทำให้ d_{001} กว้างขึ้นกว่าลักษณะชั้นเดี่ยว เช่น การดัดแปรด้วยสารไคโตซานที่ 160% CEC จะทำให้ช่องว่าง d_{001} เพิ่มขึ้นจากเดิม 1.30 nm ไปเป็น 2.52 nm (Wang et al., 2005) แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณของไคโตซานมากกว่านี้จะไม่มีผลต่อการขยายตัวของช่องว่าง d_{001} อีกต่อไป



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของแร่ดินมอนต์มอริลโลในตัดัดแปรด้วยไคโตซาน

(Wang et al., 2005)

แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับที่สามารถดูดซับโลหะหนักที่มีประจุบวกได้ดี เช่น ตะกั่ว ทองแดง และนิกเกิล เป็นต้น การดูดซับโลหะหนักเกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวกันระหว่างหมู่อะมิโนและหมู่ไฮดรอกซิลบนโซ่ไบโอพอลิเมอร์ของไคโตซานกับโลหะหนัก โดยมีปริมาณการดูดซับโลหะหนักแบบชั้นเดียวมีค่าเท่ากับ 28.77 mg/g สำหรับตะกั่ว 20.90 mg/g สำหรับทองแดง และ 20.90 mg/g สำหรับนิกเกิล เป็นต้น (Futalan et al., 2011) แร่ดิน CTS/MMT สามารถนำมาดูดซับสีย้อมที่มีประจุบวกได้ดี เช่น สีย้อมสีฟ้า 9 (Basic blue 9) สีย้อมสีฟ้า 66 (Basic blue 66) สีย้อมสีเหลือง 1 (Basic yellow 1) เป็นต้น ซึ่งมีปริมาณการดูดซับอยู่ในช่วง 46 – 49 mg/g หรือมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมโดยมวลในช่วง 92-99 % โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 500 ppm ปริมาตร 100 mL และปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 1 g (Monvisade and Siriphannon, 2009) นอกจากนี้แร่ดิน CTS/MMT ยังมีความสามารถในการดูดซับกรดอินทรีย์ได้ดีซึ่งจะแตกตัวเป็นประจุลบที่ค่าพีเอชสูงกว่าค่า pKa เช่น ปริมาณการดูดซับกรดแทนนิก (Tannic acid) ซึ่งเป็นสารมลพิษ บนแร่ดิน CTS/MMT มีค่าเท่ากับ 240 g/kg ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 (An and Dultz, 2007) แร่ดิน CTS/MMT สามารถดูดซับสีย้อมที่มีประจุลบได้ดีด้วยเช่นกัน เช่น แร่ดิน CTS/MMT สามารถดูดซับสีย้อมคองโกเรด (Congo Red) ในปริมาณการดูดซับเท่ากับ 53.42 mg/g (Wang and Wang, 2007) แร่ดิน

CTS/MMT สามารถดูดซับสีย้อมแอทีฟเรด (Reactive Red) ในปริมาณการดูดซับเท่ากับ 5.61 mg/g (Kittinaovaratt et al., 2010) และแร่ดิน CTS/MMT มีปริมาณการดูดซับสีย้อมฟอสฟอเรนจิว 34 (Bezactiv Orange V-3R) เท่ากับ 279 mg/g (Nesic et al., 2012) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับทั้งไอออนบวกและไอออนลบได้ดี

2.5 การดูดซับ

การดูดซับ หมายถึง ปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่ง หรือ สารประกอบหลายชนิดไว้บนผิวของแข็ง โดยไม่เปลี่ยนโครงสร้างของแข็งนั้น ระบบของแข็งที่เก็บ สะสมสารประกอบอื่น ๆ ไว้บนผิว เรียกว่า “ตัวดูดซับ (Adsorbent)” ส่วนสารประกอบต่าง ๆ ที่ สะสมบนผิวของตัวดูดซับ เรียกว่า “สารถูกดูดซับหรือตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)” (เฉชา นัศรศิริเวช, 2552) โดยกระบวนการดูดซับจะเกิดจากการแยกสาร (ตัวถูกดูดซับ) ซึ่งอนุภาคของตัวถูกดูดซับจะ ละลายอยู่ในของไหล (ของเหลวหรือแก๊ส) และจะไหลเข้าสัมผัสกับของแข็ง (ตัวดูดซับ) โดย อนุภาคของตัวถูกดูดซับจะแพร่ผ่านเข้าไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับผ่านรอยต่อระหว่างของแข็งกับ ของเหลว (จักรกฤษณ์ อัมพพ, 2549) ดังนั้น ตัวดูดซับจึงมักเป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นรูพรุน จำนวนมากโดยมีขนาดเท่าเดิม เพื่อเพิ่มพื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีผลให้ สามารถดูดซับได้มากขึ้นตามสัดส่วนพื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น เมื่อตัวดูดซับมีรูพรุน ภายในมาก แต่ตัวดูดซับมีขนาดเท่าเดิม ตัวดูดซับจึงมีความหนาแน่นลดลง แม้ว่าการเพิ่มปริมาณ รูพรุนที่มีขนาดเล็กในตัวดูดซับจะทำให้ตัวดูดซับมีพื้นผิวจำเพาะมากขึ้น แต่รูพรุนขนาดเล็กอาจเป็น อุปสรรคต่อการแพร่ของตัวถูกดูดซับภายในรูพรุนของตัวดูดซับไปยังพื้นผิวในรูพรุนขนาดเล็ก ดังกล่าว เมื่อพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพของรูพรุนในตัวดูดซับ รูพรุนส่วนใหญ่ของตัวดูดซับ จึงควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสถานะก๊าซหรือไอ เพื่อให้ตัวถูกดูดซับนั้น สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ และสามารถแพร่ต่อไปยังพื้นผิวภายในรูพรุนเหล่านั้นได้อย่าง สะดวก ส่วนการดูดซับตัวถูกดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อยู่ในสถานะของเหลวนั้น เช่น การดูดซับไอออน ชนิดต่าง ๆ หรือสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่ละลายน้ำ เป็นต้น รูพรุนส่วนใหญ่ของตัวดูดซับ ควรจะมีขนาดใหญ่เพียงพอ เพื่อให้ของเหลวที่มีตัวถูกดูดซับเหล่านั้น สามารถไหลเข้าสู่รูพรุนของตัว ดูดซับได้อย่างสะดวก โดยที่ตัวถูกดูดซับยังคงอยู่ในลักษณะเดิม นั่นคือ เมื่อดูดซับไอออนชนิดต่าง ๆ หรือสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่ละลายน้ำได้แล้ว ไอออนหรือสารประกอบอินทรีย์ เหล่านั้นยังคงสภาพเป็นสารละลายของไอออนหรือสารละลายของสารประกอบอินทรีย์ดังกล่าว เช่นเดิม การดูดซับตัวถูกดูดซับในระบบของเหลวมักมีผลให้ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่อยู่ ภายในรูพรุนของตัวดูดซับมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับชนิดเดียวกันที่อยู่บนผิวภายนอก

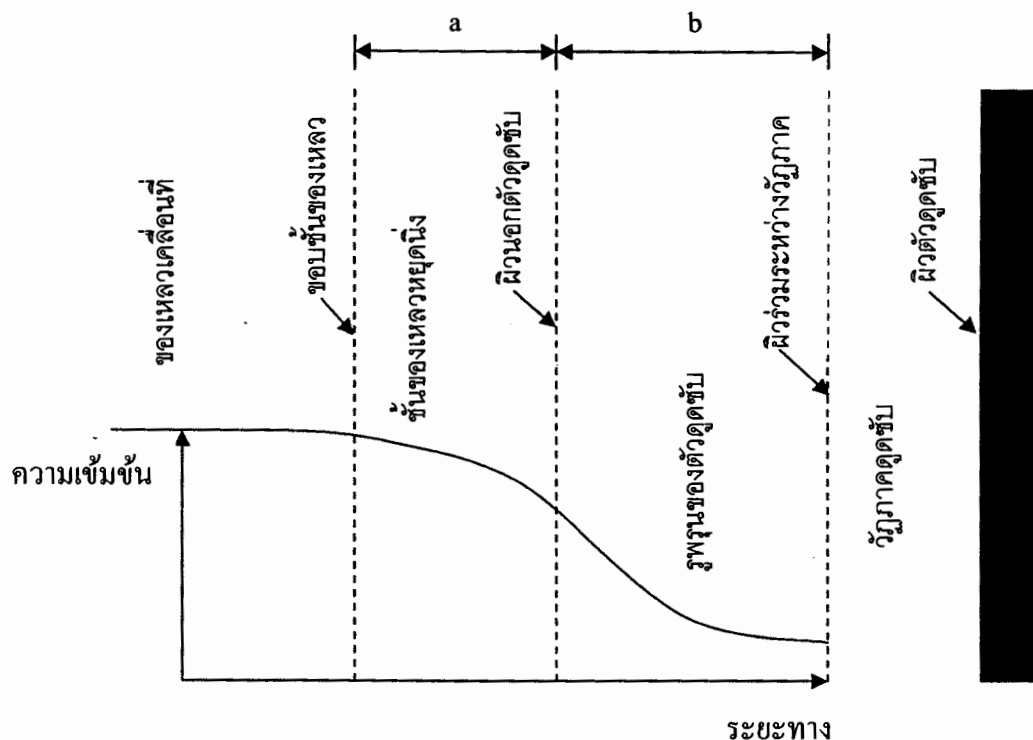
ตัวดูดซับ ดังนั้น สารประกอบทุกชนิดที่อยู่ในรูปพรุนของตัวดูดซับจัดเป็น “ตัวถูกดูดซับ” ของระบบดูดซับของเหลวโดยไม่ต้องเกาะติดผิวในรูปพรุนของตัวดูดซับ

การดูดซับสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท (McKay, 1996) ได้ดังนี้

(1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) คือ ตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับจะยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอ่อน ๆ เรียกว่า “แรง van der Waals” และเป็นกระบวนการผันกลับได้ ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิปกติ หรือ ณ อุณหภูมิบรรยากาศทั่วไป และเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้น ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ เช่น การดูดซับกลิ่นอับต่าง ๆ ในตู้เย็นและในห้องโดยสารปรับอากาศ เป็นต้น การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนชั้นของตัวดูดซับแล้ว โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงเรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า “การดูดซับหลายชั้น (Multilayer adsorption)”

(2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) คือ ตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวของตัวดูดซับโดยพันธะเคมี ได้แก่ พันธะไอออนิก และพันธะโควาเลนต์ เป็นต้น ในการสร้างพันธะเคมีต้องใช้พลังงานสูงและเป็นระบบที่ผันกลับไม่ได้ ดังนั้น การดูดซับจึงมักเกิดได้ดีหรือเกิดขึ้นได้เร็วที่อุณหภูมิสูง ๆ และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นคือ การดูดซับทางเคมีนี้จะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับเช่นเดียวกับการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมีนี้จึงเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้นและเรียกการดูดซับประเภทนี้ว่า “การดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption)” ความร้อนของการดูดซับประเภทนี้ จึงมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพ

กลไกในการดูดซับจะเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การถ่ายโอนมหภาค การถ่ายโอนจุลภาค และการดูดซับ การถ่ายโอนมหภาคจะศึกษาการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับผ่านของไหลไปยังรอยต่อระหว่างของเหลวกับของแข็ง (Liquid-solid interface) สำหรับการถ่ายโอนจุลภาคจะศึกษาการแพร่ผ่านของตัวถูกดูดซับเข้าไปในรูปพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งรูปพรุนจะเชื่อมโยงกันอยู่ภายในตัวดูดซับ ส่วนการดูดซับจะศึกษาถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ ดังภาพที่ 2.4 แสดงกลไกการดูดซับของของเหลว



ภาพที่ 2.4 แผนภาพจำลองกลไกการดูดซับของเหลว (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

จากภาพที่ 2-4 สามารถอธิบายได้ว่ากลไกการดูดซับตัวถูกดูดซับในของเหลวผสมเป็นการถ่ายโอนมวลจากของเหลวเคลื่อนที่ผ่านชั้นของเหลวหยุดนิ่งรอบตัวดูดซับซึ่งมีความหนาของชั้นเป็น a จากนั้นจะผ่านเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับซึ่งมีความลึกเป็น b จนถึงวัฏภาคดูดซับซึ่งอยู่บนผิวของรูพรุนในตัวดูดซับ

การเลือกใช้ตัวดูดซับจะพิจารณาถึงความจำเพาะเจาะจงต่อตัวถูกดูดซับ และปริมาณการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ ตามการนิยามของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับจะถูกจำแนกเป็นรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนน้อยกว่า 2 nm สำหรับรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนอยู่ในช่วง 2 - 50 nm และรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่า 50 nm ตัวดูดซับอาจจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม เป็นทรงกระบอก เป็นแผ่นบางขนาดเล็ก หรือเป็นผงที่มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 50 μm ถึง 1.2 cm มีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 300 ถึง 1200 m^2/g มีความพรุนภายในตัวดูดซับประมาณ 30-85 % พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับสามารถวัดได้ด้วยโดยใช้วิธี BET (Brunauer Emmett Teller) ซึ่งจะศึกษาการดูดซับและการคาย

ของก๊าซในโตรเจน บนตัวดูดซับ ดังนั้น ควรเลือกวัสดุตัวดูดซับที่มีรูพรุนสูงและขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กเชื่อมต่อกัน มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากเมื่อเทียบกับหนึ่งหน่วยปริมาตรตัวดูดซับ (จักรกฤษณ์ อัมพูช, 2549)

ทฤษฎี BET (Brunauer Emmett and Teller) มีจุดประสงค์เพื่ออธิบายการดูดซับทางกายภาพของโมเลกุลของแก๊สบนพื้นผิวของของแข็ง และใช้เป็นวิธีการหรือเทคนิคพื้นฐานที่สำคัญในการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ แนวคิดของทฤษฎีนี้คือการขยายขอบเขตทฤษฎีแลงเมียร์ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้ อธิบายการดูดซับของโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่เรียงตัวเป็นชั้นเดียว ให้สามารถอธิบายการดูดซับของโมเลกุลที่เรียงตัวกันแบบหลายชั้นโดยอาศัยสมมติฐานต่าง ๆ ดังนี้ (a) โมเลกุลของแก๊สสามารถถูกดูดซับเชิงกายภาพบนพื้นผิวของของแข็งแบบหลาย ๆ ชั้นจนนับไม่ถ้วน (b) ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลแต่ละชั้น (c) ทฤษฎีของแลงเมียร์สามารถอธิบายโมเลกุลที่อยู่ในแต่ละชั้นได้ สมการของ BET แสดงได้ดังนี้

$$\frac{1}{v[(P_0/P)-1]} = \frac{c-1}{v_m c} \left(\frac{P}{P_0} \right) + \frac{1}{v_m c} \quad (2.1)$$

โดย	P	คือ ความดันที่สมดุลของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ
	P ₀	คือ ความดันที่อิ่มตัวของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ
	v	คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับ หน่วยเป็นปริมาตร
	v _m	คือ ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียว
	c	คือ ค่าคงที่ของ BET ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการนี้

$$c = \exp \left(\frac{E_1 - E_L}{RT} \right) \quad (2.2)$$

ที่ซึ่ง	E ₁	คือ ความร้อนของการดูดซับที่เกิดขึ้นชั้นแรก
	E _L	คือ ความร้อนของการดูดซับที่ชั้นที่สองและชั้นที่สูงขึ้นต่อ ๆ ไป และมีค่าเท่ากับ ความร้อนของการหลอมละลาย (Liquefaction)

สมการที่ 2.1 เป็นไอโซเทอมของการดูดซับชนิดหนึ่ง และสามารถนำข้อมูลการทดลองมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/v[(P_0/P)-1]$ และ $\theta = P/P_0$ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 กราฟนี้จะถูกเรียกว่า BET plot ความสัมพันธ์นี้จะให้เส้นกราฟที่เป็นเส้นตรงเฉพาะ P/P_0 อยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.35 ความชัน A และจุดตัดแกน y หรือ I จะถูกนำมาคำนวณปริมาณการดูดซับแก๊สที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียว (v_m) และค่าคงที่ของ BET (c) โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$v_m = \frac{1}{A+I} \quad (2.3)$$

$$v_m = 1 + \frac{A}{I} \quad (2.4)$$

วิธีการ BET จะถูกใช้ในการหาพื้นที่ผิวของของแข็ง โดยการดูดซับโมเลกุลของแก๊สเชิงกายภาพ ซึ่งสามารถหาพื้นที่ผิวทั้งหมดแทนค่า S_{total} และพื้นที่ผิวจำเพาะ S (Specific surface area) ได้จากสมการ

$$S_{BET, total} = \frac{(v_m N s)}{V} \quad (2.5)$$

ที่ซึ่ง v_m คือ หน่วยของปริมาณซึ่งเป็นหน่วยของปริมาตรเชิง โมลของแก๊สที่ถูกดูดซับ

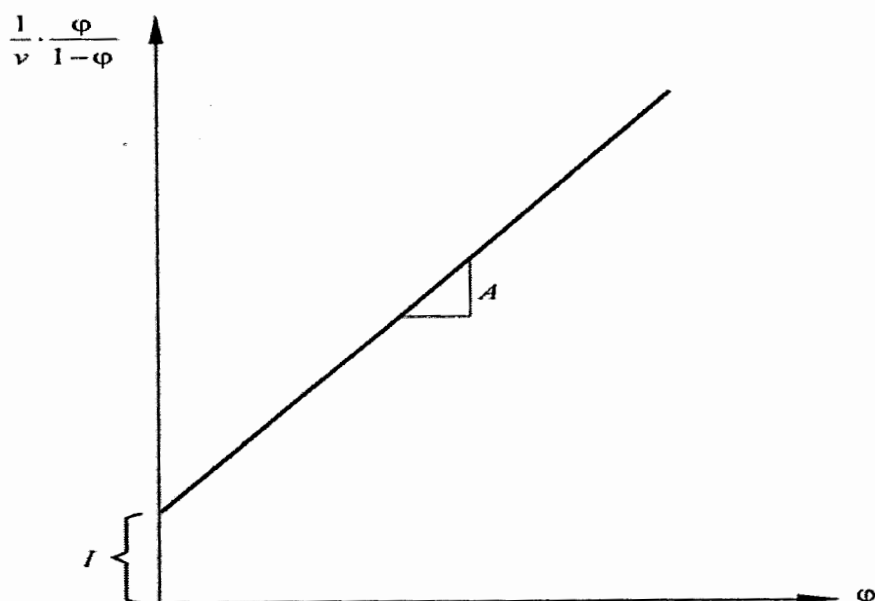
$$S_{BET} = \frac{(S_{total})}{a} \quad (2.6)$$

ที่ซึ่ง N คือ เลขอะโวกาโด (Avogadro's number)

s คือ พื้นที่ที่ตัวถูกดูดซับปกคลุมบนพื้นผิวของของแข็ง

V คือ ปริมาตรเชิงโมลของแก๊สที่ถูกดูดซับ

a คือ มวลของตัวดูดซับ หน่วยเป็นกรัม



ภาพที่ 2.5 การพล็อตด้วยสมการ BET

นอกจากนี้ค่าปริมาณการดูดซับแก๊สที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียว (v_m) ยังสามารถนำมาหาค่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยได้โดยอาศัยสมการต่อไปนี้

$$r_k = \frac{2\sigma v_m}{RT \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)} \quad (2.7)$$

โดย r_k คือ รัศมีของรูพรุน
 σ คือ แรงตึงผิว

2.6 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของเหลว ส่วนใหญ่พฤติกรรมของการดูดซับในของเหลวจะมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich) และแลงเมียร์ (Langmuir) เช่น การดูดซับของถ่านกัมมันต์ในน้ำ และน้ำเสีย เป็นต้น (Rozada et al., 2003)

ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ สามารถคำนวณได้จากสมการมวลสาร (Seader and Henley, 1998) โดยจะถือว่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่หายไปจากสารละลาย จะถูกดูดซับอยู่บนตัวดูดซับเท่านั้น ซึ่งปริมาณการดูดซับหาได้ตามสมการที่ 2.8 และสำหรับประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมสามารถคำนวณได้จากสมการเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.9

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (2.8)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสีย้อมในตัวแร่ดินที่สภาวะสมดุล (mg/g)
 m คือ น้ำหนักของแร่ดิน (g)
 V คือ ปริมาตรของน้ำ (L)
 C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเคมีในน้ำ (mg/L)
 C_e คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสีย้อมเคมีในน้ำ (mg/L)

$$\% \text{ Removal} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (2.9)$$

รายละเอียดของไอโซเทอมการดูดซับมีดังนี้

(1) ไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear isotherm)

เป็นไอโซเทอมที่ปริมาณของตัวถูกละลายบนตัวดูดซับจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สถานะสมดุล โดยทั่วไปแล้วจะเรียกว่า “Henry’s Law” มีรูปแบบสมการเป็นดังนี้

$$q_e = K_d C_e \quad (2.10)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)
 C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกละลายในสารละลายหลังการดูดซับ (mg/L)
 K_d คือ สัมประสิทธิ์การแจกแจงหรือ ค่าคงที่ Henry’s Law (L/g)

(2) ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Chen et al., 2011) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.11 ซึ่งอธิบายถึงการจับตัวกันเป็นชั้น ๆ ของตัวถูกละลาย (Multilayer) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ เนื่องจากโมเลกุลของตัวถูกละลายมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันสูง

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.11)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)
 C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกละลายในสารละลายหลังการดูดซับ (mg/L)
 K_F, n คือ ค่าคงที่

ค่าคงที่ในสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช สามารถหาได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง q_e กับ C_e โดยใช้สมการที่ 2.12 ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการใหม่ของสมการที่ 2.11

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2.12)$$

โดยค่าคงที่ n หาได้จากค่าเศษหนึ่งส่วนความชัน ($\frac{1}{\text{slope}}$) และค่าคงที่ K_F หาได้จากค่าเอกซ์โพเนนเชียลของจุดตัดแกน y ในสมการที่ 2.12

(3) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Almeida et al., 2009) มีสมมติฐานว่าตัวถูกละลายจะปกคลุมผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.13

$$q_e = \frac{K_L C_e}{1 + a_L C_e} \quad (2.13)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)
 C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายหลังการดูดซับ (mg/L)
 a_L, K_L คือ ค่าคงที่

การหาค่าคงที่ในสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ สามารถหาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e โดยใช้สมการที่ 2.14 ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการใหม่ของสมการที่ 2.13

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L} + \frac{a_L}{K_L} C_e \quad (2.14)$$

เมื่อหาค่าเศษหนึ่งส่วนความชัน ($\frac{1}{\text{slope}}$) หรือหาค่า $\frac{K_L}{a_L}$ ในสมการที่ 2.14 จะได้ปริมาณการดูดซับแบบชั้นเดียวของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวดูดซับสูงสุด และแทนด้วยสัญลักษณ์ q_m

2.7 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

อุณหพลศาสตร์ คือ การศึกษาเกี่ยวกับพลังงาน ความร้อน และงาน โดยในการศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน ($\Delta_{ads} G^\circ$) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมาตรฐาน ($\Delta_{ads} H^\circ$) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน ($\Delta_{ads} S^\circ$) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (Standard free energy, $\Delta_{ads} G^\circ$) คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะมาตรฐานหรือการที่สารตั้งต้นเปลี่ยนไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่สภาวะมาตรฐาน (25 °C และ 1 atm)

ถ้า $\Delta_{ads} G^\circ = -$ คือ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางไปข้างหน้า
 $\Delta_{ads} G^\circ = +$ คือ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้ แต่จะเกิดได้เองในทิศทางย้อนกลับ
 $\Delta_{ads} G^\circ = 0$ คือ ระบบอยู่ในสมดุล ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

สมการการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (Standard Gibbs' free energy change equation) มีรูปแบบสมการเป็นดังนี้ (Almeida *et al.*, 2009)

$$\Delta_{ads} G^0 = -RT \ln K_L \quad (2.15)$$

- เมื่อ $\Delta_{ads} G^0$ คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (kJ/mol)
 K_L คือ ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์ (L/g)
 R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol*K)
 T คือ อุณหภูมิของสารละลายสี่ข้อม (K)

การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมาตรฐาน (Standard enthalpy, $\Delta_{ads} H^0$) คือ เป็นการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดจากการที่ธาตุองค์ประกอบทำปฏิกิริยากันเพื่อเกิดเป็นสารประกอบหรือธาตุชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะมาตรฐาน (25 °C และ 1 atm) และปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบจะเกิดขึ้นในกระบวนการที่ความดันคงที่

- ถ้า $\Delta_{ads} H^0 = +$ คือ เป็นระบบดูดความร้อน
 $\Delta_{ads} H^0 = -$ คือ เป็นระบบคายความร้อน

การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน (Standard entropy, $\Delta_{ads} S^0$) คือ ปริมาณที่บอกถึงความไม่เป็นระเบียบของระบบ ซึ่งระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูง เอนโทรปีก็จะยังมีค่าสูง แต่ถ้าระบบมีความไม่เป็นระเบียบน้อย เอนโทรปีก็จะยังมีค่าต่ำ โดยค่าของเอนโทรปีจะมีค่าขึ้นอยู่กับทั้งเอนทาลปี และอุณหภูมิ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะมาตรฐาน (25 °C และ 1 atm)

- ถ้า $\Delta_{ads} S^0 = +$ คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในทิศทางไปข้างหน้า
 $\Delta_{ads} S^0 = -$ คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในทิศทางย้อนกลับ
 $\Delta_{ads} S^0 = 0$ คือ ระบบอยู่ในสมดุล ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

การหาค่า ($\Delta_{ads} H^0$) และ ($\Delta_{ads} S^0$) สามารถหาได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_L$ กับ $1/T$ โดยใช้สมการของ Van't Hoff (Almeida et al., 2009) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.16

$$\ln K_L = \frac{\Delta_{ads} H^0}{RT} - \frac{\Delta_{ads} S^0}{R} \quad (2.16)$$

- เมื่อ $\Delta_{ads} H^0$ คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมาตรฐาน (kJ/mol)
 $\Delta_{ads} S^0$ คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน (J/mol*K)
 K_L คือ ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์ (L/g)
 R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol*K)
 T คือ อุณหภูมิของสารละลายสี่ข้อม (K)

2.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

การดูดซับสารถูกดูดซับชนิดหนึ่ง จะประกอบไปด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบ ๆ ตัวดูดซับ การแพร่ในรูพรุนตัวดูดซับไปยังพื้นผิวตัวดูดซับ และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวตัวดูดซับ ซึ่งขั้นตอนใดที่เกิดขึ้นช้าที่สุด ขั้นตอนนั้นจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับของระบบการดูดซับนั้น ๆ (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552) โดยการแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับ ในหลักของการถ่ายโอนโมเมนตัม ของไหลที่อยู่รอบตัวดูดซับที่หยุดนิ่งจะเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ จึงเกิดขึ้นของไหลบาง ๆ ล้อมรอบตัวดูดซับ ชั้นของไหลนี้เป็นอุปสรรคต่อการดูดซับ นอกจากนี้ความหนาของชั้นของไหลรอบตัวดูดซับแปรผกผันกับอัตราการเคลื่อนที่ของของไหล นั่นคือ เมื่อของไหลเคลื่อนที่เร็วมากขึ้น ความหนาของชั้นของไหลรอบตัวดูดซับจะลดลงของไหลในชั้นของไหลรอบตัวดูดซับจะเคลื่อนที่ช้ามาก จึงมักพิจารณาให้เสมือนหยุดนิ่ง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจึงแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับได้ การแพร่ของตัวถูกดูดซับจึงเกิดขึ้นจากผลต่างของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับตามกฎการแพร่ของฟิคค์ (Fick's law of diffusion) เพียงอย่างเดียว ส่วนการแพร่ในรูพรุนของตัวดูดซับ เมื่อตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ แม้ว่าตัวถูกดูดซับอาจเกาะติดผิวหน้าของตัวดูดซับซึ่งเป็นพื้นผิวดูดซับส่วนน้อยของตัวดูดซับ แต่ตัวถูกดูดซับส่วนใหญ่จะแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับและแพร่ไปยังพื้นผิวตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับบางส่วนสามารถเกาะติดที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับดังกล่าว และตัวถูกดูดซับอีกบางส่วนยังคงแพร่เข้าสู่ส่วนลึกของรูพรุนต่อไป

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับจะแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อทางกายภาพและทางเคมี คือ วัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับจะมีอิทธิพลต่อกลไกการดูดซับด้วย และเพื่อทราบถึงกลไกการดูดซับ เช่น การถ่ายโอนมวลสารระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมี แบบจำลองจลนพลศาสตร์จึงถูกใช้อธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ซึ่งแบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ Pseudo-first order และ Pseudo-second order (Wang and Wang, 2007) โดยอัตราการดูดซับจะขึ้นอยู่กับว่าขั้นตอนใดเกิดขึ้นช้าที่สุด ดังกล่าวข้างต้น ขั้นตอนนั้นจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ

ดังนั้น จึงสามารถอธิบายได้ว่า ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของตัวถูกดูดซับผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับเกิดขึ้นช้าที่สุด เป็นอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ส่วนขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าที่สุด เป็นอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ซึ่งขั้นตอนในการหากลไกอัตราการดูดซับของจลนพลศาสตร์มีรายละเอียดแสดงได้ดังนี้

(1) สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order equation)

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับจะถูกอธิบายโดยสมการเชิงอนุพันธ์แสดงไว้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.17)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับที่สมดุล (mg/g)

q_t คือ ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับที่เวลา t (mg/g)

k_1 คือ ค่าคงที่ของสมการ Pseudo-first order (1/min)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.17 โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

ที่ $t = 0$; $q_t = 0$ และ $t = t$; $q_t = q_t$ จะได้

$$\ln \left[\frac{q_e}{(q_e - q_t)} \right] = k_1 t \quad (2.18)$$

สามารถจัดรูปใหม่ของสมการที่ 2.18 ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.19)$$

ค่าคงที่ k_1 และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับ t

(2) สมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order equation)

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับจะถูกอธิบายโดยสมการเชิงอนุพันธ์ดังแสดงต่อไปนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.20)$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่ของสมการ Pseudo-second order (g/mg*min)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.20 โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

ที่ $t = 0$; $q_t = 0$ และ $t = t$; $q_t = q_t$ จะได้

$$\frac{t}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (2.21)$$

สมการที่ 2.21 สามารถจัดรูปใหม่ในรูปของสมการเส้นตรง ดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.22)$$

ค่าคงที่ k_2 , q_e และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ กับ t

2.9 พลังงานกระตุ้น

พลังงานกระตุ้น (E_a) คือ พลังงานอย่างต่ำที่โมเลกุลของสารตั้งต้นจะต้องมี จึงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ ปฏิกิริยาใดที่เกิดเร็วมากแสดงว่ามีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำ ปฏิกิริยาใดที่เกิดช้าแสดงว่ามีพลังงานกระตุ้นสูงมาก ถ้าค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าอยู่ในช่วง 5-40 kJ/mol แสดงว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าอยู่ในช่วง 40-800 kJ/mol แสดงว่าเป็นการดูดซับทางเคมี (Alkan et al., 2008)

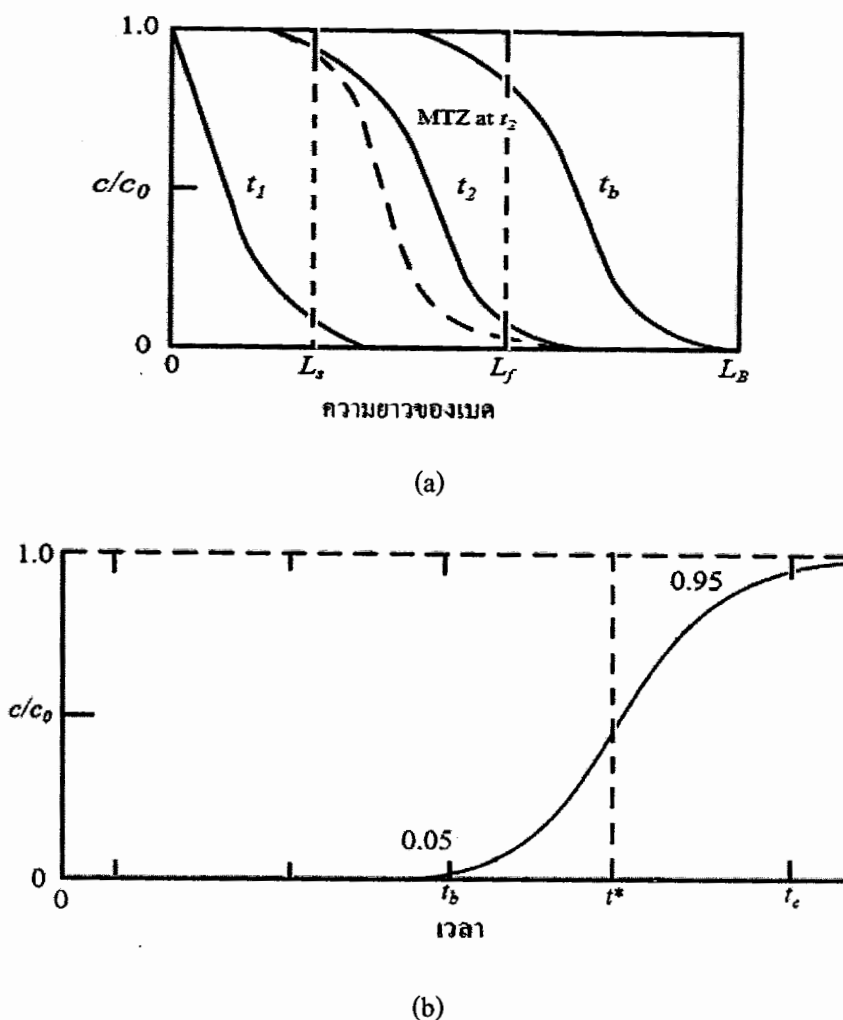
ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถหาได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ โดยใช้สมการของ Arrhenius (Almeida et al., 2009) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.23

$$\ln k_2 = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (2.23)$$

เมื่อ	E_a	คือ พลังงานกระตุ้น
	k_2	คือ ค่าคงที่ของสมการอันดับสองเทียม (g/mg*min)
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol*K)
	T	คือ อุณหภูมิของสารละลายสี่ย้อม (K)

2.10 หอดูดซับ

การศึกษาการดูดซับในระบบหอดูดซับจะศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นในเฟสของไหลและเฟสของแข็งเทียบกับเวลาหรือตำแหน่งภายในหอดูดซับ (Juang et al., 2004) อันดับแรกจะพิจารณาการถ่ายโอนมวลสารบริเวณใกล้กับทางเข้าของหอดูดซับซึ่งเป็นบริเวณที่ของไหลไหลสัมผัสกับตัวดูดซับเป็นส่วนแรกและมีการถ่ายโอนมวลสารมากที่สุดเป็นส่วนแรก ถ้าตัวดูดซับเริ่มต้นไม่มีตัวถูกดูดซับเจือปนอยู่ เมื่อนำมาทำการดูดซับลักษณะของความเข้มข้นในเฟสของไหลเทียบกับความยาวของเบดในหอดูดซับจะลดลงเป็นแบบเลขชี้กำลัง (Exponential) และจะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ถ้าการถ่ายโอนมวลสารเกิดขึ้นไม่ถึงปลายของหอดูดซับ รูปแบบของความเข้มข้นจะแทนด้วยเส้นกราฟ e , ดังแสดงในภาพที่ 2.6a โดย c/c_0 ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ในกราฟและแทนอัตราส่วนของความเข้มข้นในเฟสของไหลขณะเกิดการดูดซับเทียบกับความเข้มข้นในเฟสของไหลขาเข้าเริ่มต้น



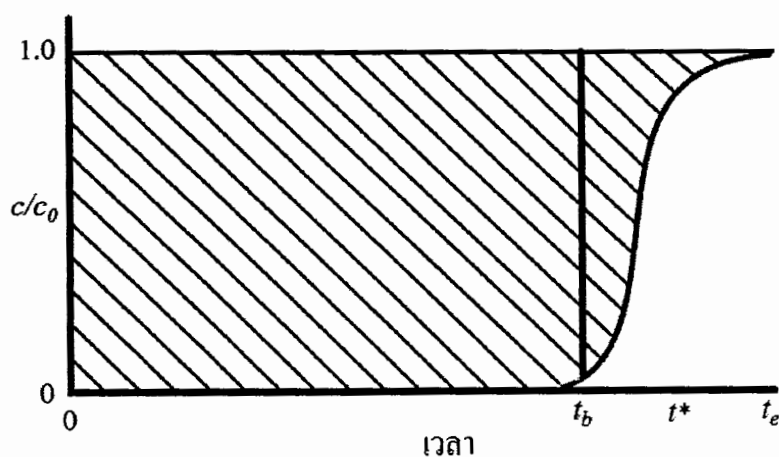
ภาพที่ 2.6 รูปแบบความเข้มข้นของตัวถูกละลายในหอดูดซับ (Seader and Henley, 1998)

(a) รูปแบบของความเข้มข้น (b) กราฟเบรคทรูสำหรับการดูดซับในระบบหอดูดซับ

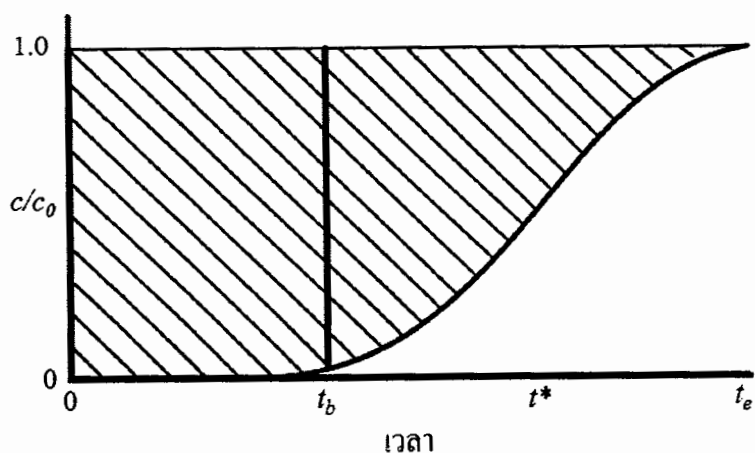
เมื่อเวลาผ่านไปเล็กน้อยตัวดูดซับที่อยู่ใกล้กับทางเข้าจะเริ่มอิ่มตัวและบริเวณที่มีการถ่ายโอนมวลสารจะเลื่อนห่างออกจากทางเข้าหอดูดซับออกไปเรื่อย ๆ จนถึงปลายหอดูดซับ และรูปแบบของความเข้มข้นจะมีรูปร่างคล้ายกับตัวอักษรเอสและเรียกรูปแบบของความเข้มข้นเช่นนี้ว่า “S-shaped” หรือแทนด้วยเส้นกราฟ t_2 ในภาพที่ 2.6a พื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นมากที่สุด หรือบริเวณระหว่าง L_s และ L_f จะเรียกว่า “Mass Transfer Zone” หรือแทนด้วย MTZ (Lin et al., 2004) MTZ จะเคลื่อนที่ลงตามแนวตั้งของหอดูดซับ ดังแสดงด้วยรูปแบบความเข้มข้นในเส้นกราฟ t_2 ในภาพที่ 2.6a เนื่องจากรูปแบบของความเข้มข้นในเส้นกราฟ $t_1 - t_b$ มีลักษณะคล้ายกันจึงสามารถนำมาหาค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายเฉลี่ยบนตัวดูดซับได้ นอกจากนี้กราฟดังกล่าวยังแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่อยู่บริเวณทางเข้าหอดูดซับอิ่มตัวแล้วเนื่องจากเกิดการถ่ายเท

มวลสารเป็นส่วนแรก ส่วนบริเวณปลายทางออกของหอคูดซับจะเป็นบริเวณที่ยังไม่มีการถ่ายเทมวลสารและความเข้มข้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์

สำหรับกราฟในภาพที่ 2.6b จะถูกเรียกว่า “กราฟเบรคทรู” โดยที่เวลา t_b ในกราฟเบรคทรู ความเข้มข้นที่ออกมาจากหอคูดซับจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบความเข้มข้นในภาพที่ 2.6a ปกติแล้วความเข้มข้น (c/c_0) ของตัวถูกดูดซับที่จุดเบรคทรูจะอยู่ที่ 0.05 - 0.10 ของความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่จุดนี้ไปความเข้มข้นที่ออกมาจากหอคูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นในของไหลที่ออกมาจากหอคูดซับมีความเข้มข้นเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น (c/c_0) เท่ากับ 0.95 แต่ไม่เกิน 1.0 ที่เวลา t_e



(a)



(b)

ภาพที่ 2.7 ลักษณะการถ่ายโอนมวลของกราฟเบรคทรู (McCabe et al., 2001)

(a) บริเวณการถ่ายเทมวลสารแคบ (b) บริเวณการถ่ายเทมวลสารกว้าง

ถ้ากราฟเบรคทรมีรูปร่างที่สมมาตรเป็นรูปตัวอักษรเอสจะเรียกว่า “S-shape” เมื่อพิจารณาสมมูลมวลสารของกราฟเบรคทรู พบว่า พื้นที่ระหว่างเหนือเส้นกราฟเบรคทรูและภายใต้เส้นตรงของสัดส่วน $c/c_0 = 1.0$ หรือพื้นที่แรเงาทั้งหมดในภาพที่ 2.7 ซึ่งจะเป็นปริมาณการดูดซับทั้งหมดในหอดูดซับ (Chen and Wang, 2004) ถ้ากราฟเบรคทรมีลักษณะสมมาตรปริมาณของตัวถูกดูดซับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าทางด้านซ้ายของเส้นประ t^* (เวลาการดูดซับอุดมคติ) ในภาพที่ 2.6b เนื่องจากพื้นที่เหนือเส้นกราฟเบรคทรูทางด้านขวามือของเส้นประ t^* จะทดแทนพื้นที่ที่อยู่ภายใต้เส้นกราฟเบรคทรูทางด้านซ้ายมือของเส้น t^*

สำหรับหนึ่งหน่วยพื้นที่ของหน้าตัดหอดูดซับอัตราการไหลจะเป็นผลคูณของความเข้มข้นเริ่มต้นกับ Superficial velocity นั่นคือ

$$F_A = u_0 c_0 \quad (2.24)$$

เมื่อ F_A คือ อัตราการไหลขาเข้าของตัวถูกดูดซับต่อพื้นที่หน้าตัดของหอดูดซับ ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)
 u_0 คือ Superficial velocity ของของไหล (cm/s)
 c_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับในของไหลขาเข้า (g/cm^3)

สำหรับกราฟเบรคทรูอุดมคติตัวถูกดูดซับในเฟสของไหลจะถูกดูดซับทั้งหมดที่เวลา t^* และความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับจะเพิ่มจากค่าเริ่มต้น W_0 จนกระทั่งตัวดูดซับเข้าสู่สมดุลหรืออิ่มตัว W_{sat} ดังนั้น

$$u_0 c_0 t^* = L \rho_b (W_{sat} - W_0) \quad (2.25)$$

จัดรูปสมการใหม่

$$t^* = \frac{L \rho_b (W_{sat} - W_0)}{u_0 c_0} \quad (2.26)$$

เมื่อ t^* คือ เวลาการดูดซับอุดมคติของกราฟเบรคทรู (min)
 L คือ ความยาวของเบคในหอดูดซับ (m)
 W_{sat} คือ น้ำหนักของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (g/g)
 W_0 คือ น้ำหนักของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่เวลาเริ่มต้น (g/g)
 ρ_b คือ ความหนาแน่นรวมของเบคในหอดูดซับ (kg/m^3)

เวลา ณ จุดเบรคทรูแทนด้วยสัญลักษณ์ t_b จะมีค่าน้อยกว่าเวลา t^* เสมอ และปริมาณของตัวดูดซับที่แท้จริงจนถึงจุดเบรคทรูสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตกราฟเบรคทรูจากเวลา $t = 0$ จนกระทั่งถึงเวลา ณ จุดเบรคทรู t_b (Farran et al., 2000) หรือการหาพื้นที่แรเงาของกราฟเบรคทรูในช่วงเวลา $t = 0$ จนกระทั่งถึงเวลา t_b ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ถ้าช่วงของ MTZ แคบเมื่อเทียบกับความยาวของหอดูดซับกราฟเบรคทรูจะมีลักษณะค่อนข้างสั้นดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.6a และความสามารถในการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับจะอยู่ที่จุดเบรคทรู ถ้าช่วงของ MTZ มีลักษณะกว้างเมื่อเทียบกับความยาวของหอดูดซับดังแสดงในภาพที่ 2.7b ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ t_b มีค่าน้อยและน้อยกว่า t_b ในกรณีที่ช่วงของ MTZ แคบ

ในกรณีของระบบอุดมคติจะไม่มี ความต้านทานการถ่ายเทมวลสารและไม่มีการแพร่กระจายในแนวแกน บริเวณที่มีการถ่ายเทมวลสารจะกว้างและมีแนวโน้มเข้าสู่อนันต์ ลักษณะของกราฟเบรคทรูจึงเป็นเส้นตรงแนวตั้งฉาก c/c_0 เท่ากับ 0 ถึง 1.0 เมื่อตัวดูดซับทั้งหมดอิ่มตัว ปัจจัยที่มีผลต่อความกว้างของ MTZ ได้แก่ อัตราการถ่ายเทมวลสาร อัตราการไหล และรูปร่างของกราฟสมดุล วิธีการที่ทำนายรูปแบบของความเข้มข้นและความกว้างของ MTZ ได้กล่าวไว้แล้ว แต่การคำนวณหาความยาวของหอดูดซับยังให้ผลที่ไม่แม่นยำมากพอ เนื่องจากความไม่แน่นอนของความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลสาร (Walker and Weatherley, 1998) ดังนั้นการขยายขนาดของหอดูดซับโดยทั่วไปจึงศึกษาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการในระบบหอดูดซับขนาดเล็ก และการออกแบบหอดูดซับที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดของอนุภาคและ Superficial velocity จะยังมีค่าเท่าเดิม แต่ความยาวของหอดูดซับไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่าเดิม

ถ้าระบบมีไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสม รูปแบบของความเข้มข้นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดความยาวของหอดูดซับและรูปร่างของกราฟเบรคทรูจะไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าความยาวของหอดูดซับจะแตกต่างกัน หอดูดซับที่มีความยาวมากขึ้นสัดส่วนของ MTZ เมื่อเทียบกับความยาวของหอดูดซับ ถ้าพิจารณาช่วง MTZ อย่างคร่าว ๆ จะสมมุติให้ตัวดูดซับครึ่งหนึ่งใน MTZ เกิดการอิ่มตัวและอีกครึ่งหนึ่งยังไม่เกิดการดูดซับ ดังนั้นหลักในการขยายขนาดหอดูดซับจะกำหนดให้ปริมาณของตัวดูดซับที่ไม่ถูกใช้งาน (Unused adsorbent) หรือความยาวของเบดที่ไม่ถูกใช้งาน (Length of unused bed) ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดความยาวของเบดทั้งหมดในหอดูดซับ

การหาความยาวของเบดที่ยังไม่ถูกใช้งานสามารถหาได้จากกราฟเบรคทรู โดยหาปริมาณของตัวดูดซับทั้งหมดที่ถูกดูดซับจากการอินทิเกรตพื้นที่บนเส้นกราฟเบรคทรูถึงจุดเบรคทรูและหาความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับโดยการอินทิเกรตพื้นที่ทั้งหมดบนเส้นกราฟเบรคทรูหรือหาจากสมดุลการดูดซับ อัตราส่วนของปริมาณทั้งสองจะเป็นสัดส่วนของความสามารถในการดูดซับของเบด ณ จุดเบรคทรู (Fraction of bed capacity utilized) และถ้านำไป

ลบด้วยหนึ่งจะได้สัดส่วนของเบดที่ไม่ถูกใช้งาน (Unused fraction) และอัตราส่วนของเบดที่ไม่ถูกใช้งานสามารถแปรเป็นความยาวของเบดที่ไม่ถูกใช้งาน (LUB) ได้ ซึ่งจะสมมติให้เป็นค่าคงที่ และเวลา ณ จุดเบรคทुरुจะคำนวณจากเวลาที่อุดมคติ และสัดส่วนของเบดที่ไม่ถูกใช้งานดังสมการที่ 2.24

$$t_b = t^*(1 - LUB/L) \quad (2.27)$$

เมื่อ t_b คือ เวลาที่จุดเบรคทुरु (min)
 LUB คือ ความยาวของเบดที่ยังไม่ได้ใช้งาน (m)

ในปี 1966 มีผู้ศึกษาและพัฒนาสมการที่ใช้ในการขยายขนาดหอดูดซับจากหอดูดซับขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ ไปเป็นหอดูดซับที่ใช้งานจริงดังนี้ (Reynolds and Richards, 1996)

(1) คำนวณหาปริมาตรของตัวดูดซับ

$$Bed\ volume\ (BV) = Q/Q_0 \quad (2.28)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลในหอดูดซับจริง (m^3 of fixed-bed/min)
 Q_0 คือ อัตราการไหลในหอดูดซับขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ (m^3 of fixed-bed/min)

(2) มวลของการออกแบบหอดูดซับ

$$M = (BV) P \quad (2.29)$$

เมื่อ M คือ น้ำหนักของตัวดูดซับในหอดูดซับจริง (kg/min)
 P คือ ความหนาแน่นรวมของตัวดูดซับ (kg/m^3)

(3) เวลาของการออกแบบหอดูดซับจนถึงจุดเบรคทुरु

$$T = M/M_t \quad (2.30)$$

เมื่อ T คือ เวลาที่จุดเบรคทुरुสำหรับหอดูดซับจริง (min)
 M_t คือ มวลของตัวดูดซับในหอดูดซับ ณ จุดที่ตัวดูดซับหมดสภาพต่อหน่วยเวลา (kg/min)

(4) ปริมาตรของไหลที่ผ่านการบำบัดจากหอดูดซับจนกระทั่งถึงจุดเบรคท루 (V_b)

$$V_b = QT \quad (2.31)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลในหอดูดซับจริง (m^3 of fixed-bed/min)
 T คือ เวลาที่จุดเบรคท루สำหรับหอดูดซับจริง (min)

2.11 การขยายขนาดของหอดูดซับ

การขยายขนาดของหอดูดซับ (Absorber) สามารถประมาณได้โดยการใช้ข้อมูลจากการทดลองหอดูดซับที่มีขนาดเล็กหรือ RSSCT (Rapid small-scale column test) สมการการคำนวณของแบบจำลองนี้จะถูกพัฒนาการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficients) ค่าเวลาในการสัมผัสในเบดที่ยังไม่ถูกดูดซับ หรือ EBCTS (Empty bed contact times) และความเร็วในการดำเนินงาน (Loading rates) ระหว่างหอดูดซับที่มีขนาดเล็กกับหอดูดซับที่มีขนาดใหญ่ สมการขยายขนาดนี้เป็นฟังก์ชันกับอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคคาร์บอนที่มีในหอดูดซับขนาดเล็กกับเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคคาร์บอนในหอดูดซับขนาดใหญ่ จากการออกแบบหอดูดซับเป็นจำนวนมาก แสดงให้เห็นว่า การออกแบบจะต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคและค่าความสามารถในการแพร่ของขั้นตอนการกำหนดอัตรา (Rate of limiting step) เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์อย่างง่าย (Empirical relationships) สามารถตั้งสมมติฐานที่ว่า “การลดลงของขนาดอนุภาคจะทำให้การแพร่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับลดลง” ซึ่งความสัมพันธ์นี้จะนำไปตามสมการต่อไป

$$D_{sc} = (d_{sc}/d_{sc}) \times D_{sc} \quad (2.32)$$

ที่ซึ่ง D_{sc} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ภายในรูพรุนของอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก
 D_{LC} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ภายในรูพรุนของอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่
 d_{LC} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดอนุภาคใหญ่
 d_{LC} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดอนุภาคเล็ก
 x คือ แฟกเตอร์การแพร่ (Diffusivity factor)

ถ้าอัตราการแพร่เข้าสู่รูพรุนภายในตัวดูดซับเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราและการแพร่ผ่านเกิดขึ้นไม่คงที่ ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรของอนุภาคที่มีขนาดเล็กและอนุภาคที่มีขนาด

ใหญ่ เช่น EBCT และเวลาในการดำเนินการ จะเข้ามาเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนของขนาดของอนุภาค ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$EBCT_s = (d_{sc}/d_{LC})^{2-x} \cdot EBCT_{LC} \quad (2.33)$$

$$t_{se} = (d_{sc}/d_{LC})^{2-x} \cdot t_{LC} \quad (2.34)$$

ที่ซึ่ง $EBCT_{sc}$ คือ EBCT ของอนุภาคที่อยู่ในหอดูดซับขนาดเล็ก

$EBCT_{LC}$ คือ EBCT ของอนุภาคที่อยู่ในหอดูดซับขนาดใหญ่

t_{sc} คือ เวลาในการดำเนินการของหอดูดซับขนาดเล็ก

t_{LC} คือ เวลาในการดำเนินการของหอดูดซับขนาดใหญ่

ดังนั้นค่า $EBCT_{sc}$ และ t_{sc} จะมีค่าน้อยกว่าค่าตัวแปรในหอดูดซับขนาดใหญ่ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ใช้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในหอดูดซับขนาดเล็กกับความเร็วของหอดูดซับขนาดใหญ่จะสามารถนิยามได้โดยสมการต่อไปนี้

$$v_{sc} = (d_{LC}/d_{sc}) \cdot v_{LC} \cdot (Re_{sc, min}/Re_{LC}) \quad (2.35)$$

ที่ซึ่ง v_{sc} คือ ความเร็วในหอดูดซับขนาดเล็ก

v_{LC} คือ ความเร็วในหอดูดซับขนาดใหญ่

$Re_{sc, min}$ คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่น้อยที่สุดในหอดูดซับขนาดเล็ก หรือค่า $Re_{sc, min}$ จะนิยามเป็นค่าความเร็วที่น้อยที่สุดที่สามารถดำเนินงานในการทดสอบ RSSCT โดยปราศจากอิทธิพลของการกระจายตัวและการถ่ายโอนมวลภายนอก ซึ่งจะอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.13

Re_{LC} คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ในหอดูดซับขนาดใหญ่

$$Re = (d \cdot v) / (\nu \cdot e) \quad (2.36)$$

ที่ซึ่ง ν คือ ความหนืดเชิงไคเนมติก (Kinematic viscosity)

e คือ ความพรุนในเบดนิ่ง

Re คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

สมการความเร็วนี้จะถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นอันดับแรกโดยการใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของหอดูดซับที่มีขนาดใหญ่ต่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของหอดูดซับที่มีขนาดเล็ก ค่าอัตราส่วนระหว่าง $Re_{sc, min}$ กับ Re_{LC} จะถูกใช้เพื่อลดรูปของสมการ v_{sc} จะลดลงเหลือเป็นความยาวของเบดดังแสดงในสมการที่ (2.37)

$$L_{sc} = v_{sc} \cdot EBCT_{sc} \quad (2.37)$$

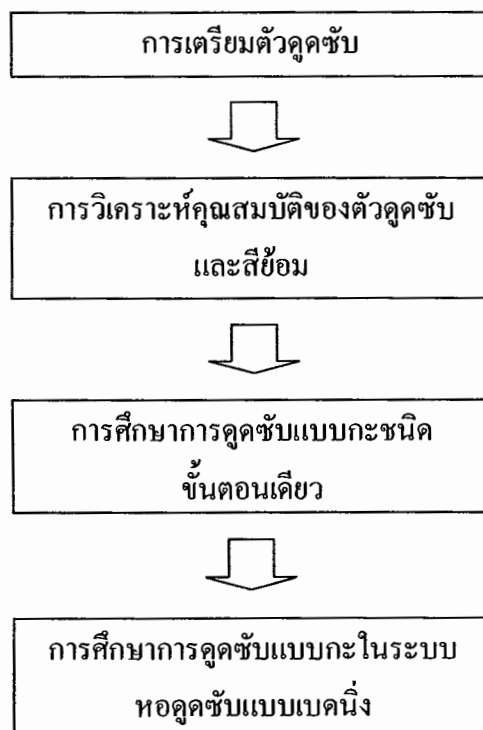
ที่ซึ่ง L_{sc} คือ ความยาวของเบคของหอดูดซับที่มีรูปทรงขนาดเล็ก

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 กรอบงานวิจัย

ทำการคัดแปรแร่ดิน MMT ด้วยสารไคโตซาน และวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับทั้งสองชนิด (แร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS/MMT) จากนั้นศึกษาการดูดซับสีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์ (สารละลายสีย้อม) ในการทดลองแบบกะ และศึกษาการดูดซับในระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง ขั้นตอนการวิจัยทั้งหมดสามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นแบบแผนภาพได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการวิจัย

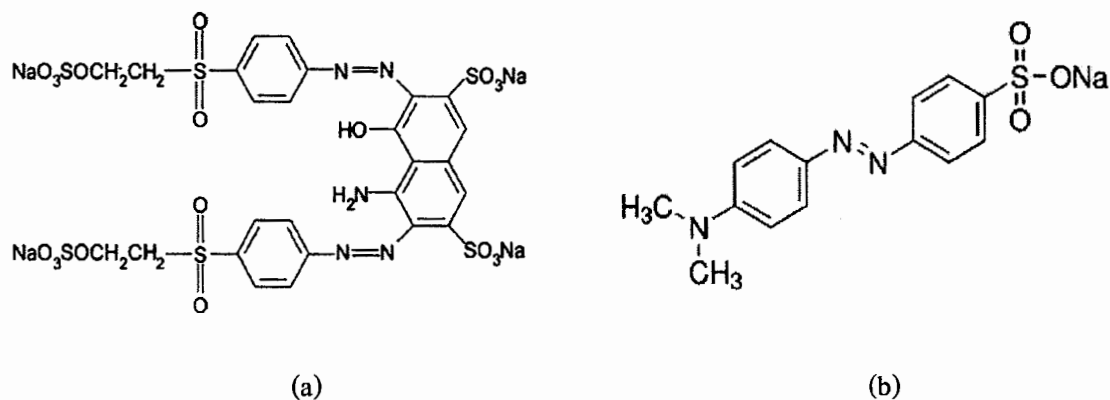
3.2 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 แร่ดิน MMT (Montmorillonite clays)

3.2.2 สารไคโตซาน (Chitosan, high molecular weight) ยี่ห้อ Aldrich บริษัท Sigma-Aldrich จำกัด ประเทศไอร์แลนด์

3.2.3 สีย้อม RB5 ซึ่งโครงสร้างของสีย้อมได้แสดงไว้ในภาพที่ 3.2a มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 991.82 g/mol และมีประจุลบ

3.2.4 สีย้อม MO ซึ่งโครงสร้างของสีย้อมได้แสดงไว้ในภาพที่ 3.2b มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 327.34 g/mol และมีประจุลบ



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม (a) RB5 และ (b) MO

3.3 การเตรียมตัวดูดซับจากแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

วิธีการดัดแปรแร่ดิน MMT ด้วยสารไคโตซานมีวิธีการดังนี้

3.3.1 นำแร่ดิน MMT 1 g ละลายในน้ำกลั่น 100 mL และเติมสารละลายไคโตซานเข้มข้น 2 g/L ปริมาตร 100 mL

3.3.2 ทำการกวนด้วยอัตราการกวนคงที่ ที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 1 hr ที่อุณหภูมิห้อง

3.3.3 จากนั้นปรับค่าพีเอชด้วยสารละลาย 0.1 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ 0.1 M กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ให้อยู่ในช่วง 7.0 - 7.5 ทั้งสารละลายให้อยู่ในรูปของเจลเป็นเวลา 30 min ที่อุณหภูมิห้อง

3.3.4 หลังจากนั้นกรองแร่ดินด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ เพื่อรีดน้ำออกและล้างด้วยน้ำกลั่น และทำให้แห้งโดยอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 24 hr

3.3.5 นำแร่ดิน MMT ที่ตัดแปรด้วยสารไฮโดรเจนมาบดด้วยครกวิทยาศาสตร์ให้ละเอียด จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 mesh ก็จะได้ขนาดอนุภาคเท่ากับ $75\ \mu\text{m}$

3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับและสีย้อม

3.4.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ

นำตัวดูดซับทั้งสองชนิด (แร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS/MMT) ไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน โดยใช้หลักการการดูดซับและการคายของก๊าซไนโตรเจนบนตัวดูดซับ (N_2 adsorption-desorption) วิเคราะห์ด้วยเครื่องออโตเมติกเซอร์เฟกอนาไลเซอร์ (Automatic Surface Analyzer) รุ่น ASI-C-8 ยี่ห้อ Quantachrome Instrument อุณหภูมิที่ใช้ $77.4\ \text{K}$ (ปิยะมาภรณ์ จารวงศ์ และ รัตนวรรณ เกียรติโกมล, 2547)

3.4.2 การวิเคราะห์ระยะของช่องว่างระหว่างชั้นดินของตัวดูดซับ

การวิเคราะห์หาระยะระหว่างชั้นดิน (ค่า d_{001}) ของแร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS/MMT โดยใช้กฎของแบรกกส์ (Bragg's law) เพื่อเปลี่ยนค่า 2θ ไปเป็นค่า d_{001} วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction: XRD) รุ่น X' Pert MPD ยี่ห้อ Philips โดยใช้อัตราในการสแกน 2.4 องศาต่อนาที สแกนมุม 2θ ในช่วง $5 - 18$ องศา ค่าศักย์ไฟฟ้า $30\ \text{kV}$ และค่ากระแสไฟฟ้า $25\ \text{mA}$ (Wang and Wang, 2007)

3.4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ

การวิเคราะห์หาการแทนที่ของหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ หมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) ของสารไฮโดรเจนกับหมู่ของน้ำในแร่ดิน MMT เมื่อทำการตัดแปรแร่ดิน MMT ด้วยสารไฮโดรเจน วิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer: FTIR) รุ่น Spectrum RX 1 ยี่ห้อ Perkin Elmer ใช้สาร KBr ผสมกับตัวอย่าง และสแกนเวฟเนัมเบอร์ (Wavenumbers Scan) ในช่วง $4,000 - 400\ \text{cm}^{-1}$ (Wang and Wang, 2007)

3.4.4 การวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ

นำแร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS/MMT ไปศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิว วิเคราะห์ด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น JSM-5410LV ยี่ห้อ JEOL ใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า

3.4.5 การวิเคราะห์ปริมาณของธาตุต่างๆ ของตัวดูดซับ

วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณธาตุคาร์บอน ธาตุไฮโดรเจน ธาตุไนโตรเจน และธาตุซัลเฟอร์ของตัวดูดซับทั้งสองชนิด เพื่อยืนยันว่ามีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ

ทางเคมีของตัวดูดซับหลังจากทำการคัดแปรแร่ดิน MMT ด้วยสารไฮโดรคลอริก วิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS Analyzer รุ่น Flash EA 1112 ยี่ห้อ THERMOQUEST โดยใช้เทคนิคการเผา

3.4.6 การวิเคราะห์จุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point) ของตัวดูดซับ

การหาจุดไอโซอิเล็กทริก (จุดที่มีประจุสุทธิเป็นศูนย์) ใช้วิธี Solid addition method (Wang et al., 2008)

3.4.6.1 นำตัวดูดซับ 0.1 g ละลายในสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) ที่ความเข้มข้น 0.1 M จำนวน 45 mL

3.4.6.2 ทำการเตรียมสารละลายดังข้อ 1 ข้างต้น ให้มีค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0) แตกต่างกัน (2, 4, 6, 8, 10 และ 12) โดยการปรับค่าพีเอชด้วยสารละลาย 0.1 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ 0.1 M กรดไนตริก (HNO_3)

3.4.6.3 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 48 hr ที่อุณหภูมิ 25 °C

3.4.6.4 หลังจากนั้นนำไปวัดค่าพีเอชสุดท้าย (pH_f) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาจุดที่มีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (pI) โดยการนำค่า pH_0 กับ $\text{pH}_0 - \text{pH}_f$ (ของแต่ละ pH ต่าง ๆ) ไปพล็อตกราฟ

3.4.6.5 ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 – 4 แต่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) เท่ากับ 0.01 M

3.4.7 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ (Organic matter) ของตัวดูดซับและสีย้อม

เนื่องจากสีย้อมเคมีมีปริมาณสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของแร่ดิน CTS/MMT แล้ว จะส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ในตัวดูดซับเพิ่มขึ้น (จักรกฤษณ์ อัมพพ, 2549) เพื่อเป็นการยืนยันว่าสีย้อมถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของตัวดูดซับจริง จึงได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในตัวดูดซับและสีย้อม โดยใช้วิธี Organic matter determination (Reddy, 2011) ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

3.4.7.1 นำตัวดูดซับหรือผงสีย้อมและถ้วยกระเบื้องเปล่าไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 hr เพื่อไล่ความชื้นออกให้หมด เสร็จแล้วนำไปวางทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) ที่อุณหภูมิห้อง

3.4.7.2 จากนั้นชั่งถ้วยกระเบื้องเปล่าและจดบันทึกมวลของถ้วยกระเบื้องเปล่า (M_p)

3.4.7.3 ชั่งตัวดูดซับหรือผงสีย้อมที่อบแห้งแล้ว (M_D) ใส่ในถ้วยกระเบื้อง

3.4.7.4 นำไปเผาที่อุณหภูมิ 440 °C เป็นเวลา 12 hr เสร็จแล้วนำไปวางทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้อง

3.4.7.5 จากนั้นนำไปชั่งก็จะทราบมวลของถ้วยกระเบื้องและซีเถ้า (M_{PA}) แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ต่อไป

การวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$M_A = M_{PA} - M_P \quad (3.1)$$

$$M_O = M_D - M_A \quad (3.2)$$

$$OM = \frac{M_O}{M_D} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ	M_P	คือ มวลของถ้วยกระเบื้อง (g)
	M_{PA}	คือ มวลของถ้วยกระเบื้องและซีเถ้า (g)
	M_D	คือ มวลของตัวดูดซับหรือผงสีย้อมแห้ง (g)
	M_A	คือ มวลของซีเถ้า (g)
	M_O	คือ มวลของสารอินทรีย์ (g)
	OM	คือ เปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์ (Organic matter, %)

3.5 การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสีย้อม

การทำกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ของสีย้อมเพื่อจะใช้เป็นวิธีในการวัดความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม ซึ่งจะใช้หลักการดูดกลืนแสง โดยอาศัยกฎของเบียร์ (Beer's Law) ที่กล่าวว่า “เมื่อแสงส่องผ่านสารละลายตัวกลาง ค่าความเข้มแสงจะลดลงเป็นปฏิกิริยาแบบชี้กำลัง (Exponential) กับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลาย” ซึ่งจะวัดความเข้มของแสงส่องผ่านในรูปของค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Absorbance, Abs) โดยใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) (จักรกฤษณ์ อัมพสุข, 2549) ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

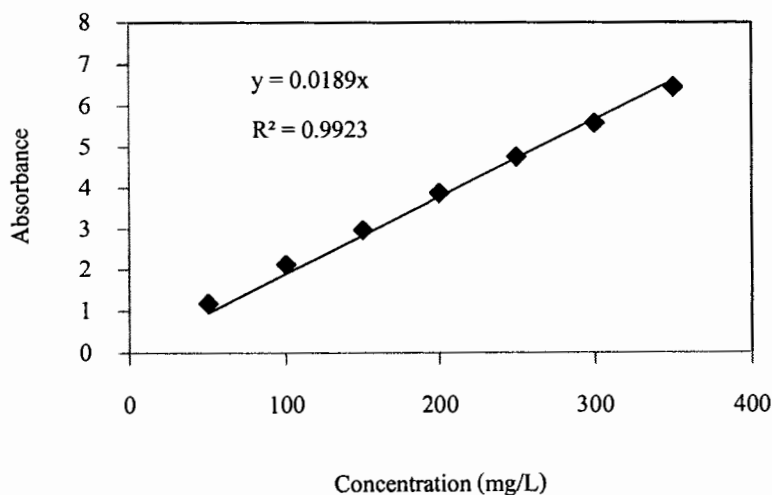
3.5.1 เตรียมสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้น 1,000 mg/L เพื่อใช้เป็นสารละลายมาตรฐาน โดยการละลายผงสีย้อมจำนวน 0.1 g ในน้ำเดือด เมื่อสีย้อมละลายดีแล้วจะปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรให้มีปริมาตรเท่ากับ 100 mL

3.5.2 ทำการเตรียมสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน โดยใช้วิธีการเจือจางสารในข้อ 1 ซึ่งใช้หลักการสมมูลมวลสารตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 3-4 แล้วทำการสแกนหาค่าความยาวคลื่นของสีย้อมแต่ละสีที่สามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุดนั่นคือ ค่า λ_{max}

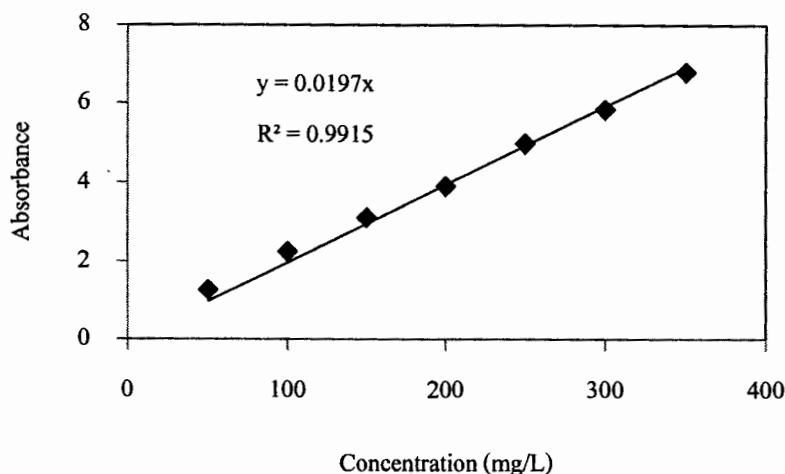
$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (3.4)$$

เมื่อ	C_1	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำสีย้อมมีค่าเท่ากับ 1,000 mg/L
	C_2	คือ ความเข้มข้นน้ำสีย้อมที่ต้องการเตรียม (mg/L)
	V_1	คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานสีย้อมที่ต้องใช้ (mL)
	V_2	คือ ปริมาตรของน้ำสีย้อมที่ต้องการเตรียม (mL)

3.5.3 สร้างกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ของสีย้อม ซึ่งทำได้โดยนำน้ำสีย้อมที่ทราบความเข้มข้นต่าง ๆ แล้ว มาวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) โดยใช้ค่าความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุด ($\lambda_{\max}$) ที่หาได้จากข้อที่ 2) แล้วนำข้อมูลไปสร้างกราฟมาตรฐาน ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) กับความเข้มข้นของสีย้อม ดังแสดงในภาพที่ 3.3 และ 3.4



ภาพที่ 3.3 กราฟมาตรฐานของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 ที่ $\lambda_{\max} = 614 \text{ nm}$



ภาพที่ 3.4 กราฟมาตรฐานของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO ที่ $\lambda_{\max} = 520 \text{ nm}$

ตารางที่ 3.1 สมการมาตรฐานและ $\lambda_{\max}$ ของสีย้อม

ลำดับที่	สีย้อม	$\lambda_{\max}$ (nm)	สมการมาตรฐาน	R^2
1	สี Reactive Black 5	614	$\text{Abs}=0.0189\text{conc.}$	0.9923
2	สี Methyl Orange	520	$\text{Abs}=0.0197\text{conc.}$	0.9915

3.6 การศึกษาการดูดซับแบบกะ

3.6.1 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม โดยใช้แร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ มีวิธีการดังนี้

3.6.1.1 เตรียมสารละลายสีย้อมความเข้มข้นเริ่มต้น 200 mg/L ปริมาตร 200 mL เพื่อใช้เป็นน้ำสีสังเคราะห์ จากนั้นวัดค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0) ของสารละลายสีย้อม

3.6.1.2 นำน้ำสีสังเคราะห์ไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) เพื่อให้ทราบค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

3.6.1.3 เติมตัวดูดซับลงไปใต้น้ำสีสังเคราะห์ 0.5 g (การเลือกปริมาณของตัวดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมจะได้มาจากการทดลองสุ่มหลาย ๆ ครั้งเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตผล)

3.6.1.4 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 25 °C

3.6.1.5 นำสารแขวนลอยที่เขย่าเสร็จแล้วไปวัดค่าพีเอชที่สมดุล (pH_e) หลังจากนั้นนำไปแยกตัวดูดซับออกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 6000 rpm เป็นเวลา 30 min

3.6.1.6 นำสารละลายส่วนที่ใสไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) แล้วเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.9 ในหัวข้อ 2.6 บทที่ 2

3.6.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

3.6.2.1 เตรียมสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันในช่วง 0 - 300 mg/L ปริมาตร 200 mL เพื่อใช้เป็นน้ำสีสังเคราะห์ จากนั้นวัดค่าพีเอชเริ่มต้น (pH₀) ของสารละลายสีย้อม

3.6.2.2 นำไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) เพื่อให้ทราบค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

3.6.2.3 เติมตัวดูดซับลงไปในน้ำสีสังเคราะห์ 0.1 g โดยเลือกใช้ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับสีย้อมแต่ละสีได้มากกว่าจากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในหัวข้อ 3.6.1 (แร่ดิน MMT หรือแร่ดิน CTS/MMT)

3.6.2.4 ทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 25 °C เพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับ

3.6.2.5 ต่อมานำสารแขวนลอยที่เขย่าเสร็จแล้วไปวัดค่าพีเอชที่สมดุล (pH_e) จากนั้นนำไปแยกตัวดูดซับออกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 6000 rpm เป็นเวลา 30 min

3.6.2.6 นำสารละลายส่วนที่ใสมาวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) และเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน

3.6.2.7 จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับ และนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาหาพฤติกรรมของการดูดซับว่ามีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบใดบ้าง เช่น

แบบเส้นตรง (Linear) ฟรอนด์ลิช (Freundlich) และแลงเมียร์ (Langmuir) โดยสามารถหาได้จากสมการไอโซเทอมการดูดซับ ซึ่งอยู่ในบทที่ 2 ในหัวข้อ 2.6

3.6.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับจะทำการทดลองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ค่า มีวิธีการศึกษาดังนี้

3.6.3.1 เตรียมน้ำสีสังเคราะห์จากสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 mg/L ปริมาตร 200 mL ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL ตามจำนวนที่กำหนด จากนั้นวัดค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0) ของสารละลายสีย้อม

3.6.3.2 นำไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) เพื่อให้ทราบค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

3.6.3.3 เติมตัวดูดซับจำนวน 0.1 g ลงไปผสมกับน้ำสีสังเคราะห์ ในขวดรูปชมพู่ซึ่งสีย้อมแต่ละสีจะใช้ปริมาณตัวดูดซับที่เท่ากัน โดยเลือกใช้ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับสีย้อมแต่ละสีได้มากกว่าจากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในหัวข้อ 3.6.1 (แร่ดิน MMT หรือแร่ดิน CTS/MMT)

3.6.3.4 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm โดยจะทำการปรับค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 4 ค่า (25 35 45 และ 55 °C)

3.6.3.5 เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 10 นาที ใน 1 ชั่วโมงแรก ต่อมาเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 30 นาที จนถึงชั่วโมงที่ 3 หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าความเข้มข้นจะคงที่

3.6.3.6 นำตัวอย่างน้ำที่เก็บได้ไปวัดค่าพีเอชที่เวลาใด ๆ (pH_t) จากนั้นนำไปแยกตัวดูดซับออกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ด้วยความเร็วรอบ 6,000 rpm เป็นเวลา 30 min ทันที แล้วนำสารละลายส่วนที่ใสไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) และเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน

3.6.3.7 วิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับ และนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองอัตราการดูดซับ โดยใช้สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order equation) และสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order equation) ซึ่งสมการเหล่านี้จะอยู่ในบทที่ 2 ในหัวข้อ 2.8 จากนั้นนำไปศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ของพลังงานกระตุ้น ศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับ และศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับต่อไป

3.6.4 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อปริมาณการดูดซับ

3.6.4.1 เตรียมสารละลายสีย้อมความเข้มข้นเริ่มต้น 200 mg/L จำนวนปริมาตร 200 mL เพื่อใช้เป็นน้ำสีสังเคราะห์

3.6.4.2 ทำการเตรียมสารละลายดังข้อ 1 ข้างต้น ให้มีค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0) แตกต่างกัน 5 ค่า (2 4 6 8 และ 10) โดยการปรับค่าพีเอชด้วยสารละลาย 0.1 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ 0.1 M กรดไนตริก (HNO_3)

3.6.4.3 นำน้ำสีสังเคราะห์ไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) เพื่อให้ทราบค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

3.6.4.4 เติมตัวดูดซับลงไปจำนวน 0.1 g ในน้ำสีสังเคราะห์ โดยเลือกใช้ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับสีย้อมแต่ละสีได้มากกว่าจากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในหัวข้อ 3.6.1 (แร่ดิน MMT หรือแร่ดิน CTS/MMT)

3.6.4.5 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 25 °C เพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับ

3.6.4.6 นำสารแขวนลอยที่เขย่าเสร็จแล้วไปวัดค่าพีเอชที่สมดุล (pH_e) จากนั้นนำไปแยกตัวดูดซับออกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 6000 rpm เป็นเวลา 30 min

3.6.4.7 นำสารละลายส่วนที่ใสไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) แล้วเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อปริมาณการดูดซับต่อไป

3.6.5 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับ

ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับจะทำการทดลองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ค่า มีวิธีการศึกษาดังนี้

3.6.5.1 เตรียมสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันในช่วง 0 - 300 mg/L ปริมาตร 200 mL จากนั้นวัดค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0) ของสารละลายสีย้อม

3.6.5.2 นำไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) เพื่อให้ทราบค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

3.6.5.3 เติมตัวดูดซับลงไปใต้น้ำสี่สักระยะ 0.1 g โดยเลือกใช้ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับสีย้อมแต่ละสีได้มากกว่าจากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในหัวข้อ 3.6.1 (แร่ดิน MMT หรือแร่ดิน CTS/MMT)

3.6.5.4 ทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr โดยจะทำการปรับค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 4 ค่า (25 35 45 และ 55 °C)

3.6.5.5 ต่อมานำสารแขวนลอยที่เขย่าเสร็จแล้วไปวัดค่าพีเอชที่สมดุล (pH) จากนั้นนำไปแยกตัวดูดซับออกโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 6000 rpm เป็นเวลา 30 min

3.6.5.6 นำสารละลายส่วนที่ใสไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) และเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน นำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับ และจากนั้นนำไปศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับต่อไป

3.7 การศึกษาการดูดซับในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

การดูดซับสีย้อมภายในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ใช้ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับสีย้อมแต่ละสีได้มากกว่าจากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในหัวข้อ 3.6.1 (แร่ดิน MMT หรือแร่ดิน CTS/MMT) ลักษณะของอุปกรณ์การทดลองแสดงไว้ในภาพที่ 3.5 ซึ่งมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.7.1 การศึกษาอิทธิพลของความสูงของเบดต่อการดูดซับแบบเบดนิ่ง

ในการศึกษาอิทธิพลของความสูงของเบดต่อการดูดซับแบบเบดนิ่งจะทำการทดลองโดยใช้ความสูงของเบดที่แตกต่างกัน 3 ค่า มีวิธีการศึกษาดังนี้

3.7.1.1 นำตัวดูดซับผสมกับทรายควอตซ์ในอัตราส่วนทรายต่อตัวดูดซับเท่ากับ 1 g : 0.02 g (2 % โดยน้ำหนัก) แล้วเขย่าให้เข้ากัน สำหรับความสูงของเบดที่ใช้ 15 20 และ 25 cm (ใช้ตัวดูดซับ 0.6 0.8 และ 1.0 g ผสมกับทรายควอตซ์ 30 40 และ 50 g ตามลำดับ) เนื่องจากแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เมื่อละลายน้ำจะมีความหนืดสูงถ้าบรรจุลงในคอลัมน์โดยตรงจะทำให้เกิดการอุดตัน ดังนั้นจึงต้องทำการผสมด้วยทรายควอตซ์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดการอุดตันขึ้นภายในหอดูดซับ (Wibulswas, 2004)

3.7.1.2 ปิดจุกสายยางที่ก้นคอลัมน์ก่อน แล้วจึงบรรจุใบแก้วลงไปสูง 10 cm ต่อมานำตัวดูดซับที่ผสมกับทรายควอตซ์แล้วลงในคอลัมน์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 cm และยาว 40 cm

3.7.1.3 ปล่อน้ำกลั่นให้ไหลผ่านคอลัมน์ ที่บรรจุตัวดูดซับผสมกับทรายควอตซ์ เก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากคอลัมน์แล้วนำไปทำเป็นเบลงค์ (Blank) เพื่อปรับค่าศูนย์ในเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)

3.7.1.4 เมื่อน้ำกลั่นไหลออกจากคอลัมน์จนหมดแล้ว ให้ดูสารละลายสีข้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L และอัตราการไหล 5 mL/min จากถังใส่สารละลายสีข้อมโดยใช้ปั๊มชนิดโซลินอยด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 25 °C

3.7.1.5 เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านคอลัมน์ทุก ๆ 1 นาทีในครึ่งชั่วโมงแรก ต่อมาเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 5 นาทีจนครบ 2 ชั่วโมง เพื่อนำไปหาอัตราการไหล ค่าพีเอช และวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) และเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟเบรคทรูเพื่อหาปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) เวลาที่จุดเบรคทรู (t_b) และปริมาตรที่จุดเบรคทรู (V_b)

3.7.2 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีข้อมต่อการดูดซับแบบเบคนิ่ง

ในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีข้อมต่อการดูดซับแบบเบคนิ่งจะทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน 3 ค่า มีวิธีการศึกษาดังนี้

3.7.2.1 ความสูงของเบคที่ใช้ 15 cm โดยการนำตัวดูดซับผสมกับทรายควอตซ์ในอัตราส่วน 2 % โดยน้ำหนัก แล้วเขย่าให้เข้ากัน (ใช้ตัวดูดซับ 0.6 g ผสมกับทรายควอตซ์ 30 g)

3.7.2.2 ทำการปิดจุกสายยางที่ก้นคอลัมน์ก่อน แล้วจึงบรรจุใยแก้วลงไปสูง 10 cm ต่อมาเทตัวดูดซับที่ผสมกับทรายควอตซ์แล้วลงในคอลัมน์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 cm และยาว 40 cm ก็จะได้ความสูงของเบคประมาณ 15 cm

3.7.2.3 ปล่อน้ำกลั่นให้ไหลผ่านคอลัมน์ ที่บรรจุตัวดูดซับผสมกับทรายควอตซ์ เก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากคอลัมน์แล้วนำไปทำเป็นเบลงค์ (Blank) เพื่อปรับค่าศูนย์ในเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)

3.7.2.4 เมื่อน้ำกลั่นไหลออกจากคอลัมน์จนหมดแล้ว ให้ดูสารละลายสีข้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน (50 100 และ 200 mg/L) และอัตราการไหล 5 mL/min จากถังใส่สารละลายสีข้อมโดยใช้ปั๊มชนิดโซลินอยด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 25 °C

3.7.2.5 เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านคอลัมน์ทุก ๆ 1 นาทีในครึ่งชั่วโมงแรก ต่อมาเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 5 นาทีจนครบ 2 ชั่วโมง เพื่อนำไปหาอัตราการไหล ค่าพีเอช และวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) และเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำ

ผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟเบรคทรูเพื่อหาปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) เวลาที่จุดเบรคทรู (t_b) และปริมาตรที่จุดเบรคทรู (V_b)

3.7.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมต่อการดูดซับแบบเบคนิง

ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมต่อการดูดซับแบบเบคนิงจะทำการทดลองโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน 3 ค่า มีวิธีการศึกษาดังนี้

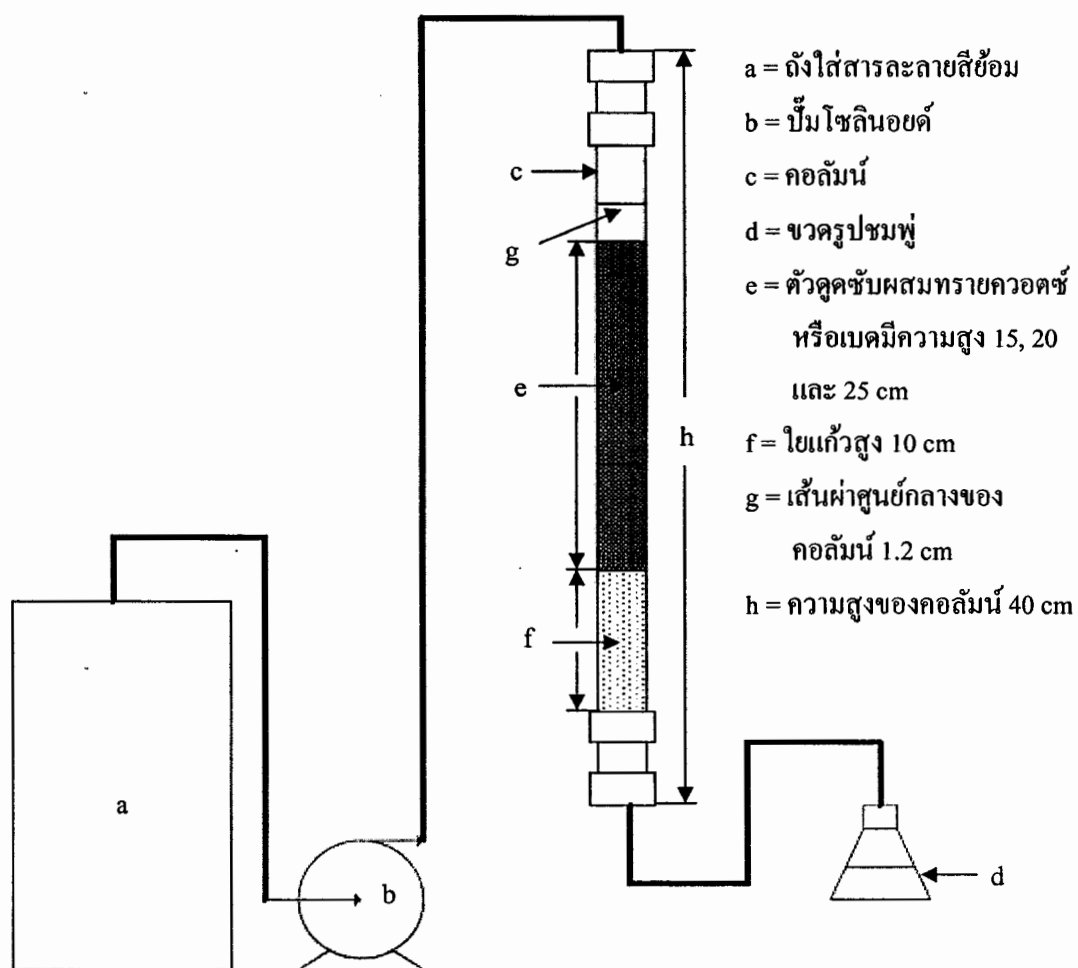
3.7.3.1 ความสูงของเบคที่ใช้ 15 cm โดยการนำตัวดูดซับผสมกับทรายควอตซ์ในอัตราส่วน 2 % โดยน้ำหนัก แล้วเขย่าให้เข้ากัน (ใช้ตัวดูดซับ 0.6 g ผสมกับทรายควอตซ์ 30 g)

3.7.3.2 ทำการปิดจุกสายยางที่ก้นคอลัมน์ก่อน แล้วจึงบรรจุใยแก้วลงไปสูง 10 cm ต่อมาเทตัวดูดซับที่ผสมกับทรายควอตซ์แล้วลงในคอลัมน์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 cm และยาว 40 cm ก็จะให้ความสูงของเบคประมาณ 15 cm

3.7.3.3 ปล่อน้ำกลั่นให้ไหลผ่านคอลัมน์ ที่บรรจุตัวดูดซับผสมกับทรายควอตซ์ เก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากคอลัมน์แล้วนำไปทำเป็นแบลนด์ (Blank) เพื่อปรับค่าศูนย์ในเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)

3.7.3.4 เมื่อน้ำกลั่นไหลออกจากคอลัมน์จนหมดแล้ว ให้ดูดสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L และอัตราการไหลแตกต่างกัน (5 10 และ 15 mL/min) จากถังใส่สารละลายสีย้อมโดยใช้ปั๊มชนิดโซลินอยด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 25 °C

3.7.3.5 เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านคอลัมน์ทุก ๆ 1 นาทีในครึ่งชั่วโมงแรก ต่อมาเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 5 นาทีจนครบ 2 ชั่วโมง เพื่อนำไปหาอัตราการไหล ค่าพีเอช และวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) และเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟเบรคทรูเพื่อหาปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) เวลาที่จุดเบรคทรู (t_b) และปริมาตรที่จุดเบรคทรู (V_b)



ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์การทดลองหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับและสีย้อม

4.1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ

จากการวิเคราะห์ตัวดูดซับด้วยเครื่อง Automatic Surface Analyzer วิเคราะห์ด้วย BET-method เพื่อศึกษาหาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า แร่ดิน CTS/MMT มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าและมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าแร่ดิน MMT เนื่องจากโมเลกุลของโคโคซานจะเข้าไปปกคลุมรูพรุนขนาดเล็กของแร่ดิน MMT ส่วนรูพรุนขนาดใหญ่จะไม่ถูกบดบัง จึงทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของแร่ดิน CTS/MMT ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวลดลงเนื่องจากพื้นที่ผิวภายในรูพรุนขนาดเล็กหายไป เมื่อเทียบกับแร่ดิน MMT (Wang and Wang, 2007)

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ

ชนิดตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ขนาดรูพรุน เฉลี่ย (nm)	d_{001} (Å)	อ้างอิง
MMT	78.23	3.62	12.71	งานวิจัยนี้
MMT	61.40	6.70	12.74	Wang and Wang, 2007
MMT	46.00	14.20	12.30	Monvisade and Siriphannon, 2009
MMT	-	-	13.00	An and Dultz, 2007
MMT	-	-	12.60	Kittinaovarat et al., 2010
CTS/MMT	27.95	8.92	15.20	งานวิจัยนี้
CTS/MMT	22.30	11.80	15.76	Wang and Wang, 2007
CTS/MMT	23.00	16.90	13.60	Monvisade and Siriphannon, 2009
CTS/MMT	-	-	18.80	An and Dultz, 2007
CTS/MMT	-	-	15.60	Kittinaovarat et al., 2010
CTS/MMT	-	-	16.20	Kittinaovarat et al., 2010

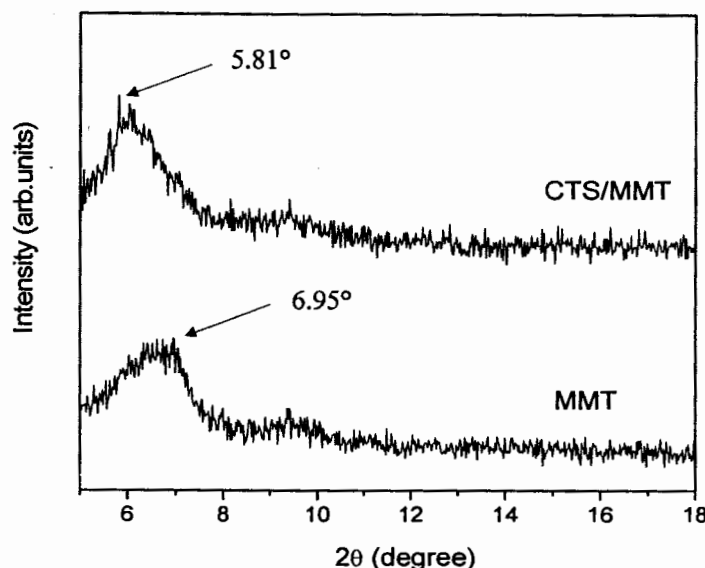
เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของแร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS/MMT กับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า แร่ดินที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากจะมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยน้อย (Monvisade and Siriphannon, 2009; Wang and Wang, 2007) เมื่อพิจารณาปริมาณการดูดซับสีย้อมที่มีประจุลบด้วยแร่ดิน CTS/MMT กับแร่ดิน MMT พบว่า แร่ดิน CTS/MMT มีปริมาณการดูดซับมากกว่า ถึงแม้ว่าแร่ดิน MMT มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า แสดงให้เห็นว่าการดูดซับไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะกระบวนการทางกายภาพอย่างเดียว แต่จะมีกระบวนการทางเคมีมาเกี่ยวข้องด้วย

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ระยะของช่องว่างระหว่างชั้นดินของตัวดูดซับ

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของแร่ดิน MMT และ CTS/MMT แสดงไว้ในภาพที่ 4.1 ค่าความเข้มของรังสี (Intensity) มีค่าสูงสุด เมื่อค่ามุม $2\theta = 5.81^\circ$ สำหรับแร่ดิน MMT และเมื่อค่ามุมเท่ากับ $2\theta = 6.95^\circ$ สำหรับแร่ดิน CTS/MMT ซึ่งค่ามุมเหล่านี้สามารถนำไปคำนวณหาช่องว่างระหว่างชั้นดิน (d_{001}) ของแร่ดินได้โดยอาศัย Bragg's law ผลการคำนวณ พบว่า ระยะ d_{001} ของแร่ดิน MMT มีค่าเท่ากับ 12.71 Å และแร่ดิน CTS/MMT มีค่าเท่ากับ 15.20 Å (ดูในตารางที่ 4.1) การที่ระยะ d_{001} ของแร่ดิน MMT ขยายตัวเมื่อถูกดัดแปรด้วยสารโคโคซาน สามารถอธิบายได้ดังนี้ ระยะ d_{001} ของแร่ดิน MMT สามารถขยายตัวได้เมื่อละลายอยู่ในน้ำและจะหดตัวกลับมายู่ในระยะเดิมเมื่อแร่ดิน MMT แห้งตัวลง เมื่อทำการดัดแปรด้วยสารโคโคซาน โมเลกุลของสารโคโคซานจะเข้าไปแทรกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนบวกที่อยู่ภายในช่องว่าง d_{001} และจะถูกยึดติดผิวไว้ที่บริเวณนั้น เมื่อแร่ดิน CTS/MMT แห้งตัวลงช่องว่างดังกล่าวก็จะหดตัวลง แต่เนื่องจากโมเลกุลของโคโคซานที่มีขนาดใหญ่และถูกตรึงไว้ในช่องว่างนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวค้ำยัน จึงส่งผลให้ช่องว่างดังกล่าวหดตัวได้น้อยลง และมีระยะกว้างกว่าระยะเดิม (Wang and Wang, 2007)

เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษากับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า ระยะของช่องว่างระหว่างชั้นดิน (d_{001}) ของแร่ดิน MMT มีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคืออยู่ในช่วง 12.30 ถึง 13.00 Å ส่วนแร่ดิน CTS/MMT จะมีระยะของช่องว่างระหว่างชั้น แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ระยะช่วงที่หนึ่ง 13.60 ถึง 15.76 Å และระยะช่วงที่สอง 16.20 ถึง 18.20 Å ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากงานวิจัยของ An and Dultz (2007) และ Kittinaovarath et al. (2010) อธิบายลักษณะที่พบนี้ว่า ปริมาณโคโคซานที่ใช้ในการดัดแปรแร่ดิน MMT จะส่งผลให้ช่องว่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นได้ตามปริมาณโคโคซานที่ใช้ในการดัดแปร แต่การเพิ่มขึ้นจะแบ่งออกเป็น 2 ระยะ ได้แก่ ระยะแรก โคโคซานจัดเรียงตัวกันเป็นแบบชั้นเดียวภายในช่องว่างระหว่างชั้น (monolayer) และระยะที่สอง โคโคซานจัดเรียงตัวกันเป็นแบบสองชั้นภายในช่องว่างระหว่างชั้น (bilayer) ช่องว่างระหว่างชั้นสามารถขยายตัวสูงสุดได้ไม่เกินความกว้างของระยะที่สอง ถึงแม้จะมีการเพิ่มปริมาณโคโคซานที่ใช้ในการดัดแปรก็ตาม ดังนั้น ปริมาณของโคโคซานที่ใช้ในการดัดแปรในงานวิจัยนี้จะก่อให้เกิดการจัดเรียงตัวของโคโคซานในช่องว่าง

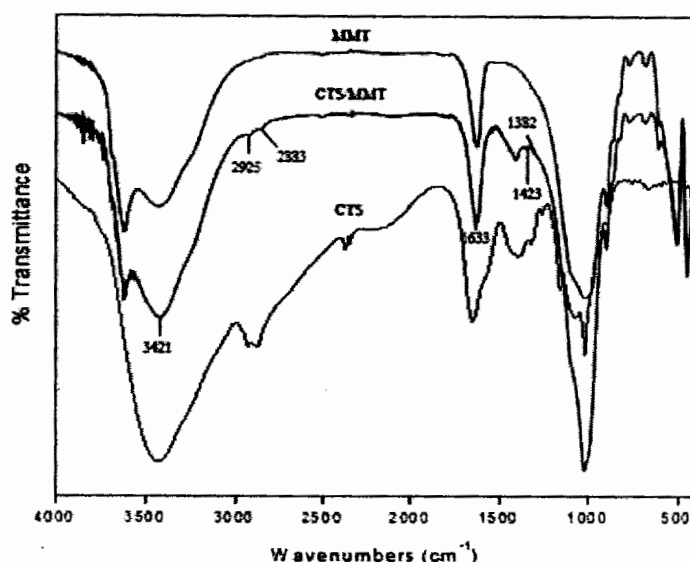
เพียงชั้นเดียวเท่านั้น นอกจากนี้ปริมาณในการดูดซับไอออนลบของแร่ดิน CTS/MMT จะเพิ่มขึ้นตามระยะของช่องว่างระหว่างชั้นที่เพิ่มขึ้น (An and Dultz, 2007; Kittinaovarat et al. 2010; Wang and Wang, 2007)



ภาพที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของแร่ดิน MMT และ CTS/MMT

4.1.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ

ภาพที่ 4.2 แสดง IR Spectra ของแร่ดิน MMT ไคโตซาน และแร่ดิน CTS/MMT วิเคราะห์โดยใช้ด้วยเครื่อง FTIR เพื่อศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนไปของแร่ดิน MMT ที่ถูกดัดแปรไปเป็นแร่ดิน CTS/MMT พบว่า IR-spectra ของแร่ดิน MMT แสดงให้เห็นถึงหมู่ O-H stretching ที่พิกัด 3622 cm^{-1} หมู่ -OH ที่พิกัด 3421 cm^{-1} และ H_2O ที่พิกัด 1633 cm^{-1} IR-spectra ของสารไคโตซาน แสดงให้เห็นถึงหมู่ O-H และ N-H ที่พิกัด 3421 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C-H (Methyl) ที่พิกัด 2925 cm^{-1} และ 1423 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชัน C-H (Methylene) ที่พิกัด 2883 cm^{-1} และ 1382 cm^{-1} และพบหมู่ฟังก์ชัน NH-CO ที่พิกัด 1633 cm^{-1} ส่วน IR-spectra ของแร่ดิน CTS/MMT แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชัน O-H N-H และ H_2O ที่พิกัด 3421 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน C-H (Methyl) (2925 cm^{-1} และ 1423 cm^{-1}) พบหมู่ฟังก์ชัน C-H (Methylene) (2883 cm^{-1} และ 1382 cm^{-1}) และที่พิกัด 1633 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน NH-CO และ H_2O (Wang and Wang, 2007) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่พบในตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT จะมีหมู่ฟังก์ชันของสารไคโตซานปรากฏอยู่ด้วย (Wang et al., 2005) จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างหมู่อะมิโน ($-\text{NH}_3^+$) ของสารไคโตซานกับประจุบวกที่อยู่ภายในแร่ดิน MMT (Monvisade and Siriphannon, 2009)

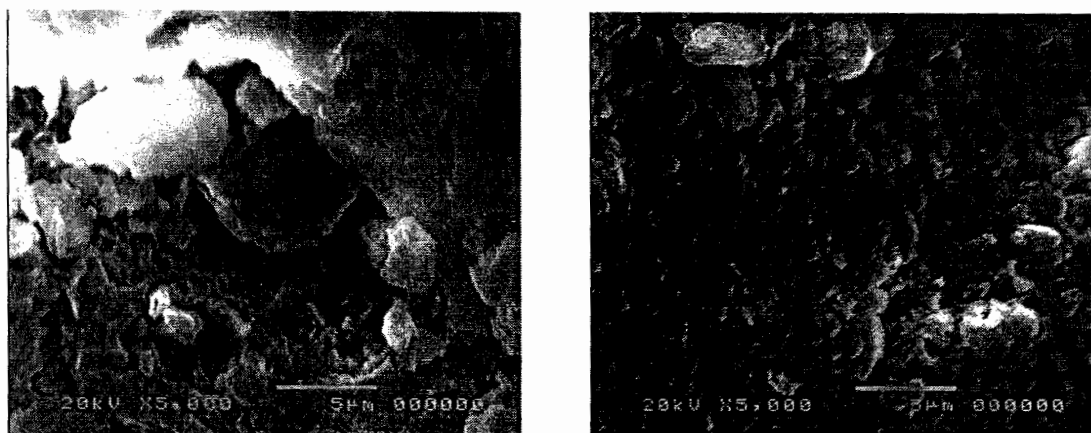


ภาพที่ 4.2 สเปกตรัม FTIR ของ MMT CTS/MMT และ CTS

4.1.4 ผลการวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ

จากการวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยเครื่อง SEM ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 4-3 พบว่า จากภาพที่ 4-3a จะเห็นได้ว่ามีโมเลกุลขนาดใหญ่ของไคโตซานยึดเกาะหรือเคลือบอยู่บนพื้นผิวของแร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS/MMT มีลักษณะของรูพรุนกว้างขึ้น เมื่อเทียบกับแร่ดิน MMT ดังแสดงในภาพที่ 4-3b

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการศึกษากับผลที่รายงานจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมาพบว่า ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pandey and Mishra (2011) และ Wang and Wang (2008) นั่นคือ สารที่ใช้ปรับสภาพแร่ดิน MMT จะปกคลุมหรือเคลือบอยู่บนผิวของแร่ดิน MMT เช่น สาร Chitosan/clay nanocomposite (CCN) (Pandey and Mishra, 2011) และสาร *N,O*-carboxymethyl-chitosan/montmorillonite (*N,O*-CMC-MMT) (Wang and Wang, 2008) นอกจากนี้แร่ดิน *N,O*-CMC-MMT และแร่ดิน CCN มีลักษณะรูพรุนที่กว้างขึ้นเช่นเดียวกันกับแร่ดิน CTS/MMT ในงานวิจัยนี้



(a)

(b)

ภาพที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ (a) CTS/MMT และ (b) MMT

4.1.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุต่างๆ ของตัวดูดซับ

จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับด้วยเครื่อง CHNS Analyzer ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า แร่ดิน CTS/MMT มีปริมาณของธาตุคาร์บอน ธาตุไฮโดรเจน ธาตุไนโตรเจน และธาตุซัลเฟอร์ สูงกว่าแร่ดิน MMT ซึ่งแสดงถึงการปรากฏของโมเลกุลไคโตซานเกาะติดอยู่กับแร่ดิน CTS/MMT

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุต่างๆ ของตัวดูดซับ

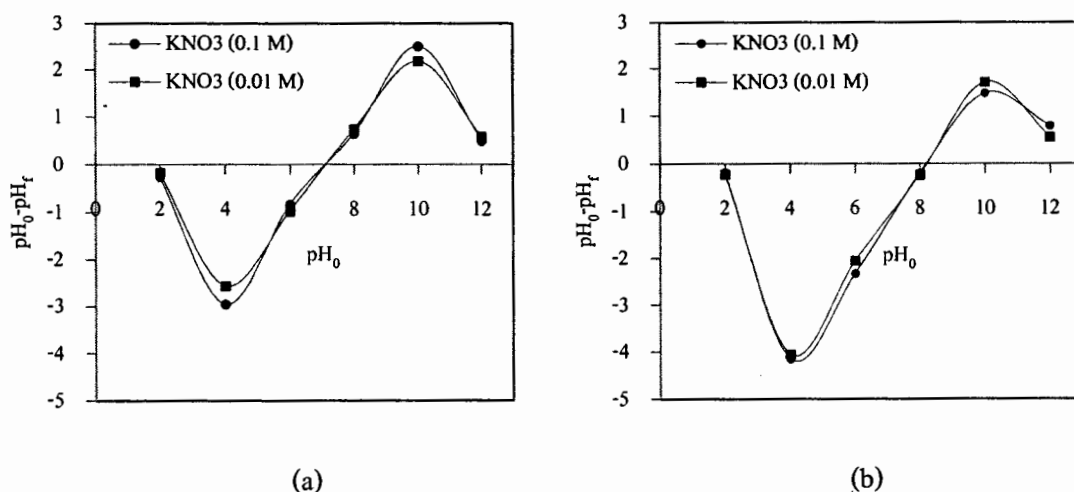
ชนิดตัวดูดซับ	ปริมาณของธาตุต่างๆ ของตัวดูดซับ			
	% C	% H	% N	% S
MMT	2.9290	1.8250	0.4620	0.3436
CTS/MMT	14.1000	3.6220	2.6270	1.6400

หมายเหตุ : Montmorillonite clay (MMT)

Chitosan modified Montmorillonite (CTS/MMT)

4.1.6 ผลการวิเคราะห์จุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point) ของตัวดูดซับ

จุดไอโซอิเล็กทริก (pI) ของตัวดูดซับ คือ ค่าพีเอช (pH) ของตัวดูดซับที่มีประจุสุทธิเป็นศูนย์ (หรือไม่มีประจุ) ซึ่งค่านี้จะเป็นค่าเฉพาะตัวสำหรับตัวดูดซับแต่ละชนิด (Wang et al., 2008) จากการวิเคราะห์จุดไอโซอิเล็กทริกของตัวดูดซับ ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า แร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS/MMT มีจุดไอโซอิเล็กทริกเท่ากับ 7.1 และ 8.2 ตามลำดับ ลักษณะกราฟของจุดไอโซอิเล็กทริกได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.4 พบว่า ถ้าพีเอชของตัวดูดซับมีค่าต่ำกว่าจุดไอโซอิเล็กทริกแสดงว่าพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีประจุสุทธิเป็นบวก และในทางตรงกันข้าม ถ้าพีเอชของตัวดูดซับมีค่าสูงกว่าจุดไอโซอิเล็กทริกแสดงว่าพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีประจุสุทธิเป็นลบ (Yahya et al., 2008)



ภาพที่ 4.4 จุดไอโซอิเล็กทริกของ (a) MMT และ (b) CTS/MMT

การคัดแปรแร่ดิน MMT ไปเป็นแร่ดิน CTS/MMT นอกจากจะส่งผลให้จุดไอโซอิเล็กทริกของแร่ดิน MMT เพิ่มขึ้นจาก 7.10 ไปเป็น 8.20 แล้วยังส่งผลให้แร่ดิน CTS/MMT ยังมีผลต่างของค่า $pH_0 - pH_r$ กว้างกว่าแร่ดิน MMT ที่ช่วง pH ต่ำกว่า 8.20 ทั้งนี้เนื่องมาจากสารโคโคซาน มีหมู่อะมิโนอยู่ในโมเลกุลและเมื่อนำมาเกาะติดผิวกับแร่ดิน MMT จะส่งผลให้แร่ดิน CTS/MMT มีปริมาณหมู่อะมิโนที่มีประจุบวกเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้มีผลต่างของค่า $pH_0 - pH_r$ ในช่วงที่ต่ำกว่า 8.20 กว้างมากขึ้นและสามารถดูดซับไอออนที่มีประจุลบได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับแร่ดิน MMT ส่วนที่ค่า pH สูงกว่า 8.20 จะมีค่าผลต่างของ $pH_0 - pH_r$ ของแร่ดินแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างแร่ดิน MMT และแร่ดิน CTS/MMT

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์จุดไอโซอิเล็กทริกของตัวดูดซับ

ลำดับที่	ชนิดตัวดูดซับ	จุดไอโซอิเล็กทริก (pI)
1	MMT	7.10
2	CTS/MMT	8.20

หมายเหตุ : Montmorillonite clay (MMT)

Chitosan modified Montmorillonite (CTS/MMT)

4.1.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ (Organic matter) ของตัวดูดซับและสีย้อม

จากการวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในตัวดูดซับและสีย้อม โดยใช้วิธี Organic matter determination (ASTM D 2974 – Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Organic Soils) ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า แร่ดิน CTS/MMT และผงสีย้อมทั้ง 2 ชนิดจะมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ ส่วนในแร่ดิน MMT จะไม่มีสารอินทรีย์อยู่เลย เมื่อทำการดูดซับสีย้อมทั้งสองด้วยแร่ดิน CTS/MMT แล้วพบว่า ปริมาณสารอินทรีย์ของแร่ดิน CTS/MMT หลังการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 26.28 % (แร่ดิน CTS/MMT ก่อนดูดซับ) ไปเป็น 38.17 และ 33.27 สำหรับสีย้อม RB5 และ MO ตามลำดับ ปริมาณสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นนี้แสดงให้เห็นถึงการปรากฏอยู่ของสีย้อมในแร่ดิน CTS/MMT

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ของตัวดูดซับและสีย้อม

ชนิดสีย้อม	% Organic matter		
	ผงสีย้อม	แร่ดิน CTS/MMT ก่อนดูดซับ	แร่ดิน CTS/MMT หลังดูดซับ
RB5	41.15	26.28	38.17
MO	35.42	26.28	33.27

หมายเหตุ : แร่ดิน MMT มีปริมาณสารอินทรีย์ก่อนการดูดซับเท่ากับ 0.00 %

4.2 ผลการศึกษาสมมูลการดูดซับ

4.2.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO ด้วยแร่ดิน MMT และ CTS/MMT สามารถทำได้โดยการหาเปอร์เซ็นต์การกำจัด (Removal percentage) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 พบว่า แร่ดิน CTS/MMT มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมทั้งสองชนิดสูงกว่าแร่ดิน MMT การที่แร่ดิน CTS/MMT สามารถดูดซับสีย้อมได้มากกว่านั้น อาจเนื่องมาจากแร่ดิน CTS/MMT มีช่องว่างระหว่างชั้นดิน (d_{001}) ที่กว้างขึ้นและมีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าแร่ดิน MMT ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ทำให้สีย้อมที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นดินมากขึ้น การที่โมเลกุลของสีย้อมยึดเกาะกับพื้นผิวของแร่ดิน CTS/MMT อาจเนื่องมาจาก แรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ และแรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic forces) ระหว่างประจุบวกของหมู่อะมิโนบนแร่ดิน CTS/MMT กับประจุลบของสีย้อม (Wang and Wang, 2007) ก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาการดูดซับสีคองโกเรด (เป็นสีที่มีประจุลบ) ด้วยอนุพันธ์ของแร่ดิน MMT พบว่า แร่ดิน CTS/MMT (Wang and Wang, 2007) และแร่ดิน *N,O*-CMC-MMT (Wang and Wang, 2008) สามารถดูดซับสี คองโกเรดได้มากกว่าแร่ดิน MMT ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

เมื่อทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม MO และ RB5 ด้วยแร่ดิน MMT พบว่า แร่ดิน MMT ให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม MO สูงกว่า ซึ่งอาจเนื่องมาจากขนาดโมเลกุลของสีย้อม RB5 ใหญ่กว่าสีย้อม MO จึงแพร่เข้าไปในรูพรุนหรือช่องว่างระหว่างชั้นดินได้น้อยกว่าสีย้อม MO และอาจเกิดจากแรงผลักระหว่างไฟฟ้า (Repulsion forces) ระหว่างประจุลบของแร่ดิน MMT กับประจุลบของสีย้อม RB5 ที่สูงกว่าเนื่องจาก RB5 มีจำนวนหมู่ซัลโฟเนต (Sulphonate functional group) ซึ่งเป็นหมู่ที่มีประจุลบอยู่ในโมเลกุลมากกว่าสีย้อม MO ขณะที่เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม RB5 ด้วยแร่ดิน CTS/MMT มีค่าสูงกว่าสีย้อม MO ซึ่งอาจเนื่องมาจากสีย้อม RB5 มีจำนวนหมู่ซัลโฟเนตที่ทำหน้าที่ในการยึดเหนี่ยวและเกิดปฏิกิริยากับแร่ดิน CTS/MMT มากกว่าสีย้อม MO จึงทำให้สามารถยึดจับสีย้อม RB5 ได้มากกว่า MO (Elwakeel, 2009; Mohammadi et al., 2011)

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$ โดยใช้ ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25°C และ $\text{pH}_0 = 7.0 \pm 0.5$

ชนิดสีย้อม	% การกำจัดสีย้อม	
	MMT	CTS/MMT
RB5	1.85	73.33
MO	2.15	67.33

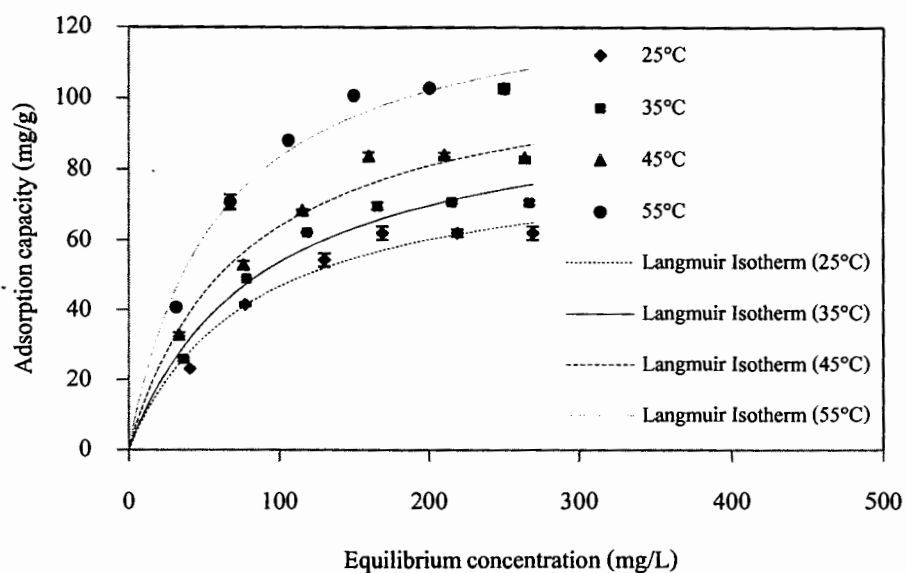
จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่า แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับที่สามารถดูดซับสีย้อม RB5 และ MO ในน้ำสีสังเคราะห์ได้มากกว่าแร่ดิน MMT ดังนั้น ในการทดลองขั้นตอนต่อไป จะศึกษาเฉพาะการดูดซับสีย้อมด้วยแร่ดิน CTS/MMT เท่านั้น

4.2.2 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

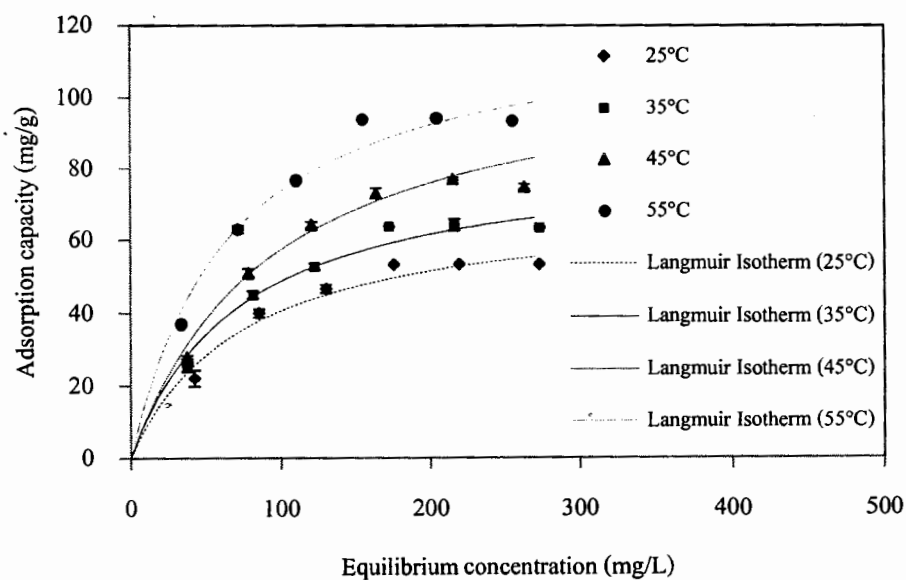
ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของเหลวที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับเพื่อหากลไกของการดูดซับสีย้อม ซึ่งไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบจำลองที่อธิบายได้โดยสมการว่า กลไกการดูดซับสีย้อมเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์) หรือการดูดซับแบบหลายชั้น (ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช) ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมการสมดุลมวลสาร ซึ่งอยู่ในบทที่ 2 ในหัวข้อ 2.6

ไอโซเทอมการดูดซับของสี RB5 และ MO ด้วยแร่ดิน CTS/MMT แสดงไว้ในภาพที่ 4.5 ผลการพล็อตข้อมูลการทดลองกับสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่า ไอโซเทอมการดูดซับของสีย้อมทั้งสองชนิดมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยพิจารณาจากค่า R^2 ในตารางที่ 4.6 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการนำผลการทดลองการดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิต่าง ๆ ($25, 35, 45$ และ 55°C) มาพล็อตกับสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 เช่นเดียวกัน

จากการศึกษาหาคะควบคุมของสีย้อม RB5 และ MO ดังแสดงในตารางที่ ก.1 และ ก.2 พบว่า มีปริมาณการดูดซับก่อนและหลังการดูดซับแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย (ไม่เกินร้อยละ 5) หรือไม่เกิดการดูดซับเลย



(a)



(b)

ภาพที่ 4.5 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์ของสีย้อม (a) RB5 และ (b) MO ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g และ $pH_0 = 7.0 \pm 0.5$

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนดิชของการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

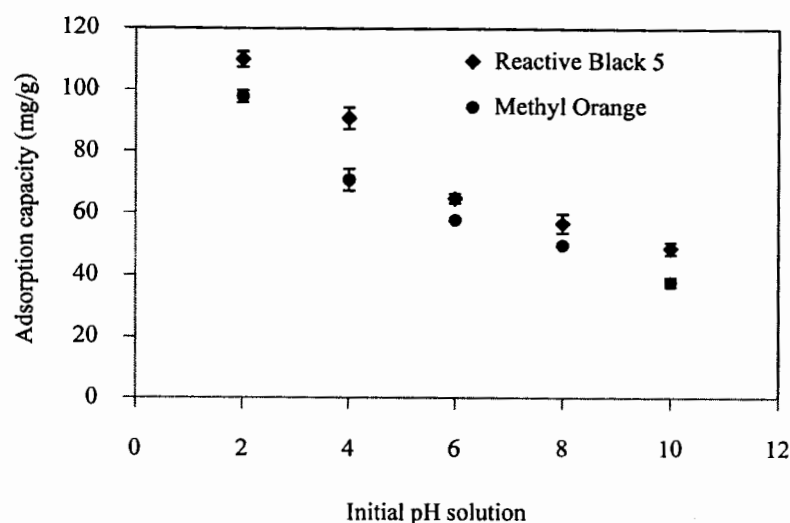
ชนิดสีย้อม	อุณหภูมิ (°C)	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช		
		q_m (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	n	R^2
RB5	25	82.64	1.143	0.9616	4.59	2.03	0.8565
	35	94.34	1.245	0.9531	4.55	1.93	0.8761
	45	111.11	1.507	0.9775	6.65	2.10	0.9425
	55	138.89	1.999	0.9870	8.27	2.07	0.9408
MO	25	68.49	1.047	0.9730	4.81	2.21	0.8483
	35	84.75	1.128	0.9786	4.93	2.08	0.9212
	45	100.00	1.347	0.9611	5.16	1.97	0.8914
	55	123.46	1.833	0.9809	7.93	2.13	0.9276

จากตารางที่ 4.6 พบว่า ค่า q_m ปริมาณการดูดซับสูงสุดแบบชั้นเดียวของสีย้อม RB5 และ MO ค่า K_L และ K_F จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ แสดงว่าปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และแสดงว่ากระบวนการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดนี้บนแร่ดิน CTS/MMT เป็นกระบวนการดูดความร้อน (Endothermic process) ซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อ 4.2.4 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับ

4.2.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อปริมาณการดูดซับ

จากผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อปริมาณการดูดซับ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.6 พบว่า ปริมาณการดูดซับลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชเริ่มต้น เนื่องจาก โมเลกุลที่มีประจุลบของสีย้อม RB5 และ MO จะถูกดูดติดผิวบนแร่ดิน CTS/MMT ที่มีประจุบวก ที่ค่าพีเอชของสารละลายสูงจะมีปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนมากซึ่งจะเข้าไปแย่งจับกับโมเลกุลสีย้อมในบริเวณที่มีประจุบวกของแร่ดิน CTS/MMT ส่งผลให้มีพื้นที่ว่างสำหรับยึดจับกับโมเลกุลสีย้อมลดลง ดังนั้นปริมาณการดูดซับสีย้อมจึงลดลง แต่ที่ค่าพีเอชต่ำ จะมีปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนน้อย ทำให้มีพื้นที่ว่างสำหรับดูดซับโมเลกุลสีย้อมเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นปริมาณการดูดซับจึงสูงขึ้น (Wang and Wang, 2008) เนื่องจากแร่ดิน CTS/MMT มีจุดไอโซอิเล็กทริกเท่ากับ 8.2 (ในหัวข้อ 4.1.6) ซึ่งให้เห็นว่าที่ค่าพีเอชสูงกว่าจุดนี้พื้นผิวของตัวดูดซับจะมีประจุเป็นลบ แต่ผล

การทดลองจากภาพที่ 4.6 พบว่าการดูดซับสีของสีย้อมที่พีเอชสูงยังสามารถเกิดขึ้นได้อีกนั้น ทั้งนี้ เนื่องจากโมเลกุลสีย้อมถูกยึดเหนี่ยวกับพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางเคมี (Wang and Wang, 2007)



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีของสีย้อมกับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม RB 5 และ MO ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g และอุณหภูมิในการดูดซับ 25°C

จากการศึกษาหาค่าความจุของสีย้อม RB5 และ MO ดังแสดงในตารางที่ ก.3 พบว่ามีปริมาณการดูดซับก่อนและหลังการดูดซับแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย (ไม่เกินร้อยละ 5) หรือไม่เกิดการดูดซับเลย

4.2.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับ

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล ได้ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า ปริมาณการดูดซับของสีย้อมทั้งสองชนิดจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เนื่องจากการถ่ายโอนมวลสารจะเกิดขึ้นได้เร็ว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และยังทำให้โครงสร้างภายในของตัวดูดซับขยายตัวมากขึ้น จึงทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่ของสีย้อมสามารถเข้าไปได้มากขึ้น (Wang and Wang, 2008) จากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมามีการศึกษาการดูดซับสีของสีย้อมด้วยแร่ดิน CTS/MMT (Wang and Wang, 2007) และแร่ดิน *N,O*-CMC-MMT (Wang and Wang, 2008) พบว่า ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการดูดซับสีย้อม RB5 ด้วยสาร Chitosan/amino resin (Elwakeel, 2009) และสีย้อม MO ด้วยสาร

Iron terephthalate (Haque et al., 2011) พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

4.2.5 ผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ

การศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ โดยการนำผลการทดลองมาพล็อตกับสมการของ Standard Gibbs' free energy change และสมการของ Van't Hoff (Almeida *et al.*, 2009) เพื่อศึกษาว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้เองหรือไม่และจะเกิดไปในทิศทางใด (การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน: $\Delta_{ads}G^\circ$) เพื่อหาปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบ (การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมาตรฐาน: $\Delta_{ads}H^\circ$) และหาปริมาณที่บอกถึงความไม่เป็นระเบียบของระบบว่าจะเกิดไปในทิศทางใด (การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน: $\Delta_{ads}S^\circ$)

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ของเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ และมีสภาวะในการทดลองแตกต่างกัน

ชนิดตัวดูดซับ	$\Delta_{ads}G^\circ$ (kJ/mol)				$\Delta_{ads}H^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta_{ads}S^\circ$ (kJ/mol*K)	อ้างอิง
	25 °C	35 °C	45 °C	55 °C			
CTS/MMT, RB5	-0.33	-0.56	-1.08	-1.89	+15.53	+0.0527	งานวิจัยนี้
R1, RB5	-29.88	-31.21	-32.54	-	+9.75	+0.1329	Elwakeel, 2009
GMA/MBA- TEPA, RB5	-8.41	-9.34	-10.28	-	+19.40	+0.0933	Elwakeel and Rekaby, 2011
CTS/MMT, MO	-0.11	-0.31	-0.79	-1.65	+15.44	+0.0516	งานวิจัยนี้
MOF-235, MO	-31.10	-35.90	-41.00	-	+99.6	+0.4410	Haque <i>et al.</i> , 2011
MWCNTs, MO	-27.62	-30.15	-32.19	-33.71	+19.39	+0.1015	Yao <i>et al.</i> , 2011

หมายเหตุ : Chitosan modified montmorillonite (CTS/MMT)

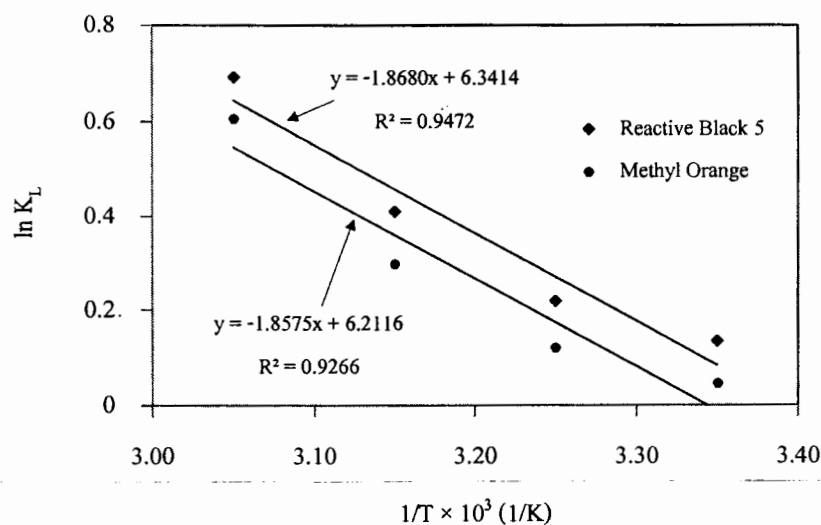
Chitosan/amino resin (R1)

Glycidyl methacrylate/methelenebisacrylimide resin loaded with
tetraethelenepentamine (GMA/MBA-TEPA)

Iron terephthalate (MOF-235)

Multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs)

จากการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสีย้อม Reactive Black 5 และ Methyl Orange ค่าพารามิเตอร์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 พบว่า การดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดด้วยแร่ดิน CTS/MMT มีค่า $\Delta_{ads}G^\circ$ เป็นลบ ซึ่งแสดงว่าเป็นกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นได้เองในทิศทางไปข้างหน้า การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการศึกษานี้อยู่ในช่วง -0.11 ถึง -1.89 kJ/mol เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 ไปเป็น 55 °C การลดลงของค่า $\Delta_{ads}G^\circ$ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นเองได้มากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่วน $\Delta_{ads}H^\circ$ มีค่าเป็นบวก แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นระบบดูดความร้อน และ $\Delta_{ads}S^\circ$ มีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าจุดสัมผัสระหว่างเฟสของแข็งและของเหลวมีความไม่เป็นระเบียบเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ประการที่หนึ่ง มีการปลดปล่อยประจุบวกของสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ออกมาจากแร่ดิน MMT และประการที่สอง เกิดจากโมเลกุลสีย้อมเข้าไปแทนที่โมเลกุลของตัวทำละลายที่ถูกดูดซับไว้ก่อนแล้ว ณ บริเวณพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับ จึงทำให้ความไม่เป็นระเบียบเพิ่มมากขึ้น (Almeida et al., 2009)



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_L$ กับ $1/T$ ของการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ

จากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมามีการศึกษาหาพารามิเตอร์ของเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่า $\Delta_{ads}G^\circ$ จะมีค่าลดลง นอกจากนี้ $\Delta_{ads}H^\circ$ และ $\Delta_{ads}S^\circ$ จะมีค่าเป็นบวกเช่นเดียวกันกับงานวิจัยนี้ ดังแสดงไว้ใน

ตารางที่ 4.7 ลักษณะของกราฟจากสมการของ Van't Hoff แสดงไว้ในภาพที่ 4.7 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ ของการดูดซับสีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์

4.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

4.3.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับ

จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับ ได้ผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับเวลาสัมผัส พบว่า ปริมาณการดูดซับของสีย้อมทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ในช่วงแรก ๆ ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงจุด ๆ หนึ่ง และจะเข้าสู่สมดุลการดูดซับภายในเวลาประมาณ 60 นาที ก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ พบว่า เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับมีค่าใกล้เคียงกันกับงานวิจัยนี้ โดยพิจารณาจากตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับของสีย้อม RB5 และ MO โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ และมีสถานะในการทดลองแตกต่างกัน

ชนิดของตัวดูดซับ	เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ (min)	อ้างอิง
CTS/MMT ดูดซับ RB5	60	งานวิจัยนี้
R1 ดูดซับ RB5	50	Elwakeel, 2009
GMA/MBA-TEPA ดูดซับ RB5	60	Elwakeel and Rekaby, 2011
CTS/MMT ดูดซับ MO	60	งานวิจัยนี้
CMK-3 ดูดซับ MO	60	Mohammadi et al., 2011
MWCNTs ดูดซับ MO	65	Yao et al., 2011

หมายเหตุ : Chitosan modified Montmorillonite (CTS/MMT)

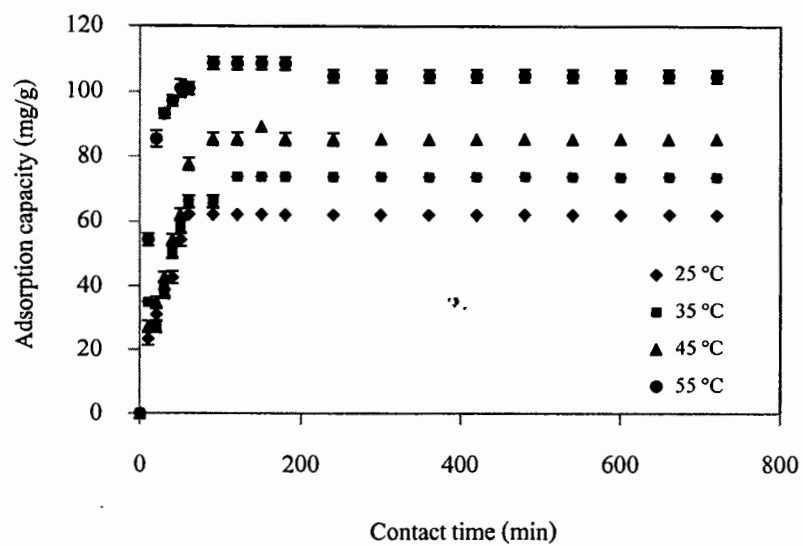
Chitosan/amino resin (R1)

Glycidyl methacrylate/methelenebisacrylimide resin loaded with

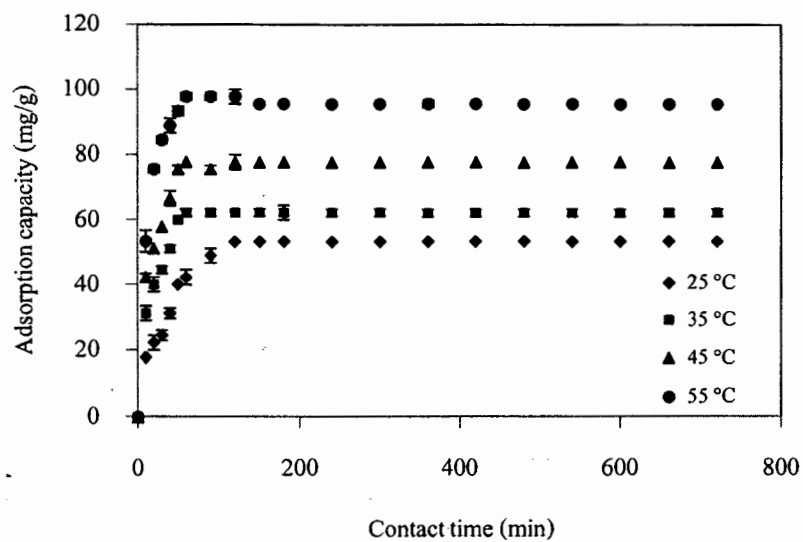
tetraethelenepentamine (GMA/MBA-TEPA)

Mesoporous carbon material-kinetic (CMK-3)

Multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs)



(a)



(b)

ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีขึ้นอยู่กับเวลาสัมผัสของน้ำสีสังเคราะห์สี่ช้อน
 (a) RB5 และ (b) MO ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ
 0.1 g, $C_0 = 200 \text{ mg/L}$ และ $\text{pH}_0 = 7.0 \pm 0.5$

4.3.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ ได้ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่า อัตราการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยพิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมี (k_2) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับ ในหัวข้อ 4.2.4 แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิไม่ได้มีผลต่อเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ เนื่องจากอัตราการเข้าสู่สมดุลจะขึ้นอยู่กับอัตราการกวน ซึ่งในการศึกษานี้กำหนดให้อัตราการกวนเท่ากันทุกอุณหภูมิ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.8 จากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมามีการศึกษาการดูดซับสีย้อม RB5 ด้วยสาร Chitosan/amino resin (Elwakeel, 2009) และการดูดซับสีย้อม MO ด้วยสาร CTMAB/10SSTA-MMT (Chen et al., 2011) พบว่า อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการดูดซับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมี (k_2) จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

4.3.3 ผลการหาอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับ

การศึกษาอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับเพื่อหากลไกของอัตราการดูดซับสีย้อมกระทำได้โดยการพิจารณาความสอดคล้องของข้อมูลการดูดซับกับแบบจำลองการดูดซับแบบจำลองอัตราการดูดซับที่เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป ได้แก่ แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order equation) ซึ่งจะบ่งบอกได้ว่าขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของตัวถูกดูดซับผ่านชั้นของไฮดรอลิวดูดซับเกิดขึ้นช้าที่สุด และแบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order equation) ซึ่งจะบ่งชี้ได้ว่าขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าที่สุด เมื่อนำผลการทดลองมาพล็อตกับสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม และสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการพล็อตสมการแสดงในภาพที่ 4.9 พบว่า อัตราการดูดซับของสีย้อมทั้งสองชนิดมีความสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมมากกว่าสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม โดยพิจารณาจากค่า R^2 ในตารางที่ 4.9 และจากตารางนี้ยังพบอีกว่า ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี (k_2) ของการดูดซับสีย้อม RB5 จะมีค่ามากกว่าสีย้อม MO ดังนั้น แสดงว่ากระบวนการดูดซับสีย้อม RB5 สามารถเกิดขึ้นได้เร็วกว่าสีย้อม MO

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ของสมการอันดับหนึ่งเทียมและสมการอันดับสองเทียมของการดูดซับ
สีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 และ MO

ชนิดสีย้อม	อุณหภูมิ (°C)	$q_{e,exp}$ (mg/g)	สมการอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)			สมการอันดับสองเทียม (Pseudo-second order)		
			$k_1 \times 10^2$ (min ⁻¹)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2	$k_2 \times 10^3$ (g/mg*min)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2
Reactive Black 5	25	62.14	3.65	64.96	0.9293	1.89	63.29	0.9993
	35	73.78	4.79	69.29	0.8935	2.91	75.76	0.9987
	45	85.44	5.16	96.09	0.8791	4.67	87.71	0.9984
	55	104.85	5.69	113.33	0.8380	8.51	103.09	0.9994
Methyl Orange	25	53.33	3.09	48.97	0.9251	1.15	54.35	0.9993
	35	62.22	5.71	67.96	0.8858	2.35	62.89	0.9998
	45	77.77	6.16	71.43	0.9078	3.43	78.13	0.9997
	55	95.55	7.12	88.26	0.9206	6.15	97.09	0.9995

จากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมามีการศึกษาการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ พบว่า มีอัตราการดูดซับสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมมากกว่าสมการอันดับหนึ่งเทียม (ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้) โดยพิจารณาจากค่า R^2 ในตารางที่ 4.10 และยังพบอีกว่า ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี (k_2) ของการดูดซับสีย้อม RB5 โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT (งานวิจัยนี้) จะมีค่ามากกว่าการดูดซับสีย้อมโดยใช้ตัวดูดซับ Chitosan/amino resin (Elwakeel, 2009) แต่จะมีค่าน้อยกว่าการดูดซับสีย้อมโดยใช้ตัวดูดซับ GMA/MBA-TEPA (Elwakeel and Rekaby, 2011) ส่วนค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี (k_2) ของการดูดซับสีย้อม MO โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT (งานวิจัยนี้) จะมีค่าน้อยกว่าการดูดซับสีย้อมโดยใช้ตัวดูดซับ CMK-3 (Mohammadi et al., 2011) MWCNTs (Yao et al., 2011) และ CTMAB/10SSTA-MMT (Chen et al., 2011)

จากการศึกษาชุดควบคุมของสีย้อม RB5 และ MO ดังแสดงในตารางที่ ข.1 และ ข.2 พบว่า มีปริมาณการดูดซับที่เวลาใด ๆ แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย (ไม่เกินร้อยละ 5) หรือไม่เกิดการดูดซับเลย

ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่ k_2 (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ และมีสภาวะในการทดลองแตกต่างกัน

ชนิดของตัวดูดซับ	$k_2 \times 10^3$ (g/mg*min)	R^2 (อันดับ หนึ่งเทียบ)	R^2 (อันดับ สองเทียบ)	อ้างอิง
CTS/MMT ดูดซับ RB5	1.890	0.9293	0.9993	งานวิจัยนี้
R1 ดูดซับ RB5	1.470	0.9770	0.9990	Elwakeel, 2009
GMA/MBA-TEPA ดูดซับ RB5	9.580	0.9600	0.9990	Elwakeel and Rekaby, 2011
CTS/MMT ดูดซับ MO	1.150	0.9251	0.9993	งานวิจัยนี้
CMK-3 ดูดซับ MO	4.000	0.8156	0.9998	Mohammadi <i>et al.</i> , 2011
MWCNTs ดูดซับ MO	4.570	0.9699	0.9980	Yao <i>et al.</i> , 2011
CTMAB/10SSTA-MMT ดูดซับ MO	4.892	0.9060	0.9990	Chen <i>et al.</i> , 2011

หมายเหตุ : Chitosan modified Montmorillonite (CTS/MMT)

Chitosan/amino resin (R1)

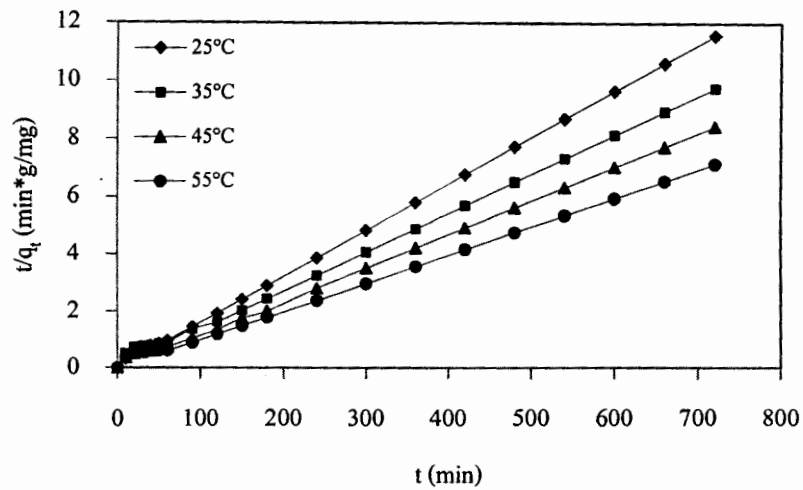
Glycidyl methacrylate/methelenebisacrylimide resin loaded with

tetraethelenepentamine (GMA/MBA-TEPA)

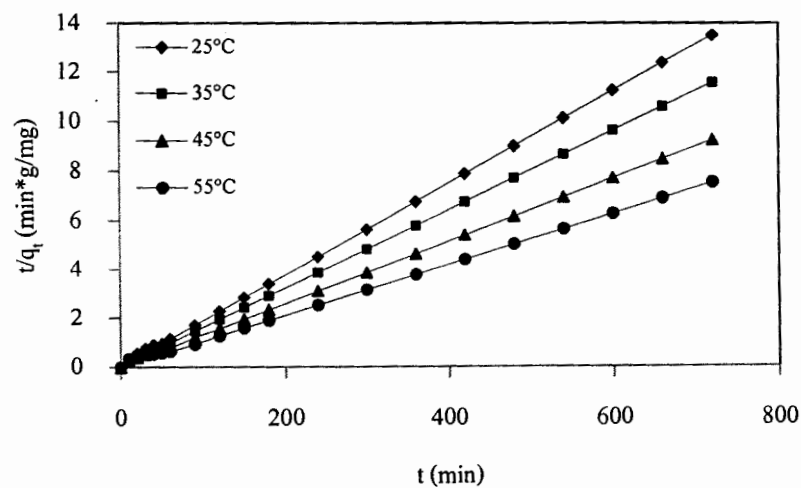
Mesoporous carbon material-kinetic (CMK-3)

Multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs)

Cetyl trimethyl ammonium bromide anionic surfactants sodium stearate and their mixture to montmorillonite (CTMAB/10SSTA-MMT)



(a)



(b)

ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t (min*g/mg) และ t (min) แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีย้อม (a) RB5 และ (b) MO ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ

4.3.4 ผลพารามิเตอร์ของพลังงานกระตุ้น

การศึกษาพารามิเตอร์ของพลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถหาได้โดยการนำผลการทดลองไปพล็อตกับสมการ Arrhenius (Almeida et al., 2009) พลังงานกระตุ้นหรือพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) เป็นพลังงานต่ำที่สุดที่โมเลกุลของสารตั้งต้นจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ ปฏิกิริยาที่เกิดได้เร็ว แสดงว่ามีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำ ปฏิกิริยาที่เกิดได้ช้าแสดงว่ามีพลังงานกระตุ้นสูง

ตารางที่ 4.11 ค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ และมีสภาวะในการทดลองแตกต่างกัน

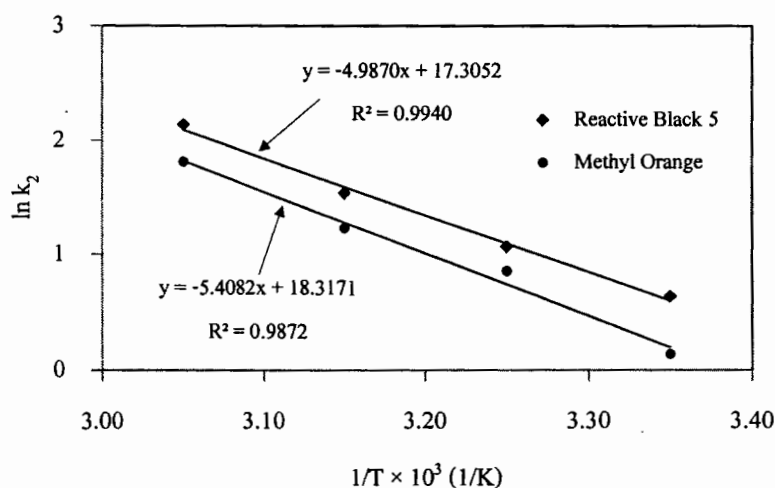
ชนิดของตัวดูดซับ	E_a (kJ/mol)	R^2	อ้างอิง
CTS/MMT ดูดซับ RB5	+41.46	0.9940	งานวิจัยนี้
Kaolinite clay ดูดซับ RB5	+38.10	-	Karaoglu et al., 2010
CTS/MMT ดูดซับ MO	+44.96	0.9872	งานวิจัยนี้
CTMAB/10SSTA–MMT ดูดซับ MO	+4.050	-	Chen et al., 2011

หมายเหตุ : Chitosan modified Montmorillonite (CTS/MMT)

Cetyl trimethyl ammonium bromide anionic surfactants sodium stearate and their mixture to montmorillonite (CTMAB/10SSTA–MMT)

ค่าพารามิเตอร์ของพลังงานกระตุ้นแสดงไว้ในตารางที่ 4.11 พบว่า พลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อม RB5 มีค่าน้อยกว่าสีย้อม MO ดังนั้น แสดงว่ากระบวนการดูดซับสีย้อม RB5 สามารถเกิดขึ้นได้เร็วกว่าสีย้อม MO ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมี (k_2) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 (ถ้า k_2 มีค่ามากกระบวนการดูดซับสีย้อมจะเกิดขึ้นได้เร็ว แต่ถ้า k_2 มีค่าน้อยกระบวนการดูดซับสีย้อมจะเกิดขึ้นช้า) นอกจากนี้ ถ้าค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าอยู่ในช่วง 5-40 kJ/mol แสดงว่า เป็นการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าอยู่ในช่วง 40-800 kJ/mol แสดงว่า เป็นการดูดซับทางเคมี (Alkan et al., 2008) ดังนั้น การดูดซับสีย้อม RB5 และ MO ด้วยเรซิน CTS/MMT จึงเป็นการดูดซับทางเคมี ดังแสดงค่าพลังงานกระตุ้นไว้ในตารางที่ 4.11 และจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมามีการศึกษาหาพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ พบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นจะมีค่าเป็นบวกเช่นเดียวกันกับงานวิจัยนี้

ดังแสดงในตารางที่ 4.11 ลักษณะของกราฟจากสมการ Arrhenius แสดงไว้ในภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ของการดูดซับสีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ของการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO โดยใช้เรซิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ

4.4 ผลการศึกษาการดูดซับในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

การศึกษากการดูดซับสีย้อมในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่งนี้ จะศึกษาที่ความสูงของเบด ความเข้มข้นเริ่มต้น และอัตราการไหลแตกต่างกัน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษาจะมีประโยชน์ในการนำไปออกแบบเพื่อขยายขนาดของหอดูดซับแบบเบดนิ่งได้ และจากผลการศึกษา พบว่าลักษณะของกราฟเบรคทรูที่ได้เป็นเส้นโค้งคล้ายรูปตัวอักษรเอสหรือเรียกว่า “S-shape” ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.11 4.12 และ 4.13 โดยความเข้มข้นของสีย้อมที่ผ่านหอดูดซับออกมาในช่วงแรก ๆ จะมีค่าน้อย แต่เมื่อถึงจุดเบรคทรูความเข้มข้นก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งคงที่ในที่สุด

ตารางที่ 4.12 พารามิเตอร์ที่ได้จากการดูดซับสีย้อม RB5 ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ความสูงของเบด และอัตราการไหลแตกต่างกัน

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ความสูงของเบด (cm)	อัตราการไหล (mL/min)	q_{total} (mg)	q_e (mg/g)	t_b (min)	V_b (mL)
50	15	3.59	4.27	7.12	2.93	10.54
100	15	3.57	4.79	7.98	2.52	9.07
200	15	3.57	5.51	9.17	2.29	8.23
100	20	3.56	6.51	8.14	3.86	13.89
100	25	3.56	8.40	8.40	4.34	15.63
100	15	7.18	3.54	5.89	1.54	11.06
100	15	9.18	2.77	4.62	1.35	12.39

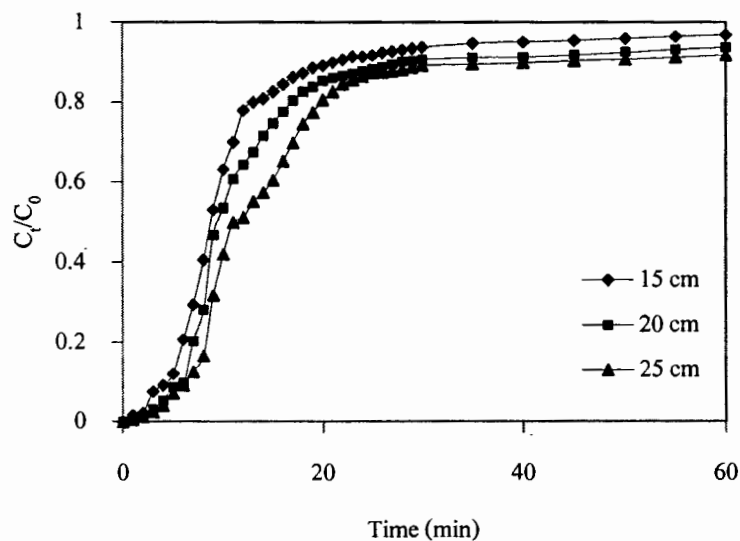
ตารางที่ 4.13 พารามิเตอร์ที่ได้จากการดูดซับสีย้อม MO ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ความสูงของเบด และอัตราการไหลแตกต่างกัน

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ความสูงของเบด (cm)	อัตราการไหล (mL/min)	q_{total} (mg)	q_e (mg/g)	t_b (min)	V_b (mL)
50	15	3.58	2.27	3.79	2.57	9.24
100	15	3.58	3.18	5.29	2.17	7.83
200	15	3.57	4.41	7.35	2.09	7.55
100	20	3.56	3.78	4.72	2.29	8.24
100	25	3.56	4.21	4.21	2.98	10.71
100	15	7.15	2.67	4.45	1.93	12.89
100	15	9.19	1.87	3.12	1.43	13.17

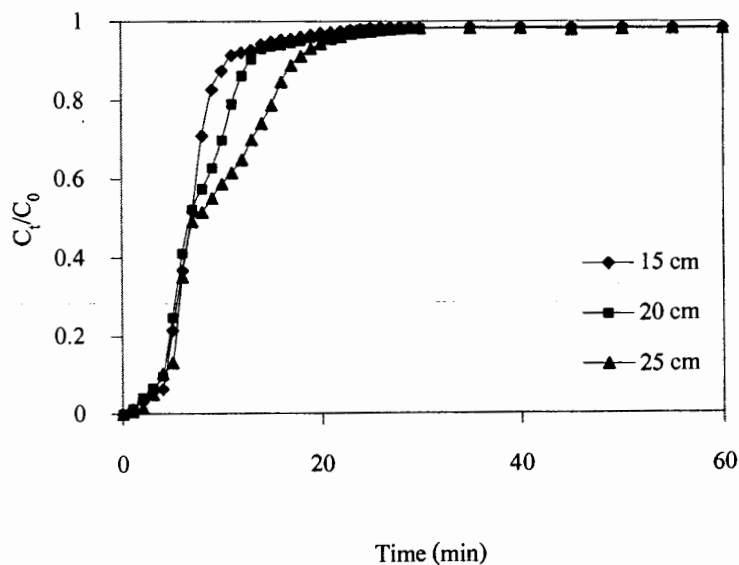
4.4.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของความสูงของเบดต่อการดูดซับแบบเบดนิ่ง

จากผลการศึกษาอิทธิพลของความสูงของเบดต่อการดูดซับแบบเบดนิ่ง พบว่าเมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับที่สมดุล เวลาและปริมาตรที่จุดเบรคทฤษฎีจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องมาจากเมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้นก็จะทำให้เบดมีพื้นที่ผิวที่สามารถดูดซับได้เพิ่มมากขึ้น

(ปริมาณของตัวดูดซับจะแปรผันตามความสูงของเบค) จึงทำให้การดูดซับสีย้อมเกิดขึ้นได้มากและ
 อิ่มตัวช้า จึงส่งผลให้ปริมาณการดูดซับที่สมดุล เวลาและปริมาตรที่จุดเบรคทुरुเพิ่มขึ้น



(a)



(b)

ภาพที่ 4.11 กราฟเบรคทुरुของการดูดซับสีย้อม (a) RB5 และ (b) MO ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่
 ความสูงของเบคแตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L และอัตราการไหล
 เท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min)

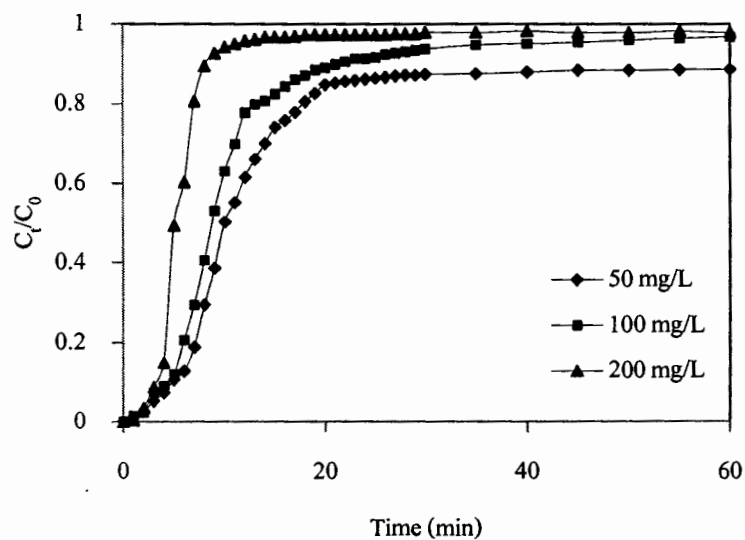
การดูดซับสีย้อม RB5 ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ที่อัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L ได้ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.12 พบว่า ที่ความสูงของเบดเท่ากับ 25 cm จะมีปริมาณการดูดซับที่สมดุล เวลาและปริมาตรที่จุดเบรคทรมากกว่าเบดที่สูง 15 และ 20 cm มีค่าเท่ากับ 8.40 mg/g, 4.34 min และ 15.63 mL ตามลำดับ ลักษณะของกราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม RB5 ที่ความสูงของเบดแตกต่างกันแสดงไว้ในภาพที่ 4.11a

การดูดซับสีย้อม MO ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ที่อัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L ได้ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.13 พบว่า ที่ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm จะมีปริมาณการดูดซับที่สมดุลมากกว่าเบดที่สูง 20 และ 25 cm มีค่าเท่ากับ 5.29 mg/g แต่ปริมาณการดูดซับทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความสูงของเบด (ซึ่งโดยปกติแล้วปริมาณการดูดซับที่สมดุลจะแปรผันตามปริมาณการดูดซับทั้งหมด) และเนื่องจากเบดทั้ง 3 ขนาดมีค่าปริมาณการดูดซับทั้งหมดใกล้เคียงกันมาก ดังนั้น เบดที่มีความสูงน้อย จะมีปริมาณการดูดซับที่สมดุลมากกว่าเบดที่มีความสูงมาก (ปริมาณการดูดซับที่สมดุลหาได้จากปริมาณการดูดซับทั้งหมดหารด้วยปริมาณของตัวดูดซับ) แต่ที่ความสูงของเบดเท่ากับ 25 cm จะมีเวลาและปริมาตรที่จุดเบรคทรมากกว่าเบดที่สูง 15 และ 20 cm มีค่าเท่ากับ 2.98 min และ 10.71 mL ตามลำดับ ลักษณะของกราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม MO ที่ความสูงของเบดแตกต่างกันแสดงไว้ในภาพที่ 4.11b

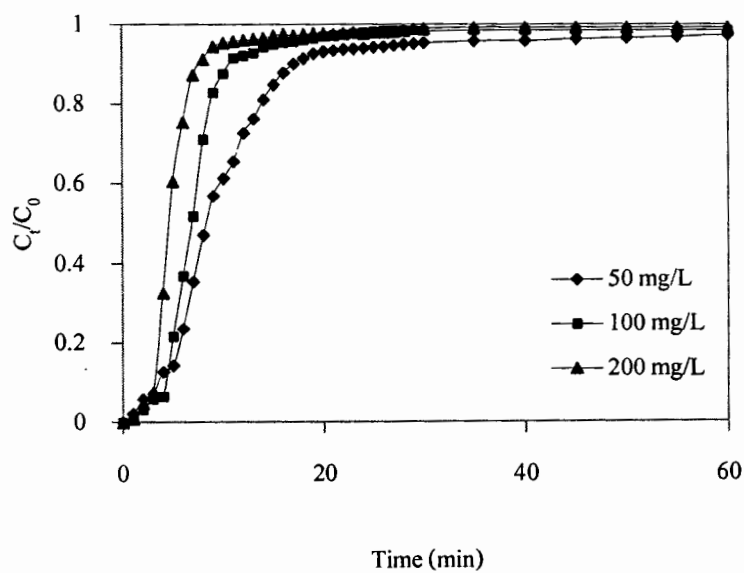
นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ปริมาณการดูดซับที่สมดุล เวลาและปริมาตรที่จุดเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม RB5 จะมีค่ามากกว่าสีย้อม MO

4.4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อการดูดซับแบบเบดนิ่ง

จากผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อการดูดซับแบบเบดนิ่ง พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้น แต่เวลาและปริมาตรที่จุดเบรคทรูจะลดลง เนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นก็จะทำให้การถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นได้มาก (การถ่ายโอนมวลของตัวถูกดูดซับจะแปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย) ดังนั้นจึงทำให้การดูดซับสีย้อมเกิดขึ้นได้มากเช่นกัน (ปริมาณการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้น) และนอกจากนี้ยังทำให้ตัวดูดซับอิ่มตัวเร็วมากขึ้นอีกด้วย จึงส่งผลให้เวลาและปริมาตรที่จุดเบรคทรูลดลง



(a)



(b)

ภาพที่ 4.12 กราฟเบรคทูรของการดูดซับสีย้อม (a) RB5 และ (b) MO ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน (ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min)

การดูดซับสีย้อม RB 5 ในระบบหอดูดซับแบบเบคนิ่ง ที่ความสูงของเบคเท่ากับ 15 cm และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min ได้ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.12 พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 200 mg/L จะมีปริมาณการดูดซับที่สมดุลมากกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 และ 100 mg/L มีค่าเท่ากับ 9.17 mg/g แต่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 mg/L จะมีเวลาและปริมาตรที่จุดเบรคทรูมากกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 และ 200 mg/L มีค่าเท่ากับ 2.93 min และ 10.54 mL ตามลำดับ ลักษณะของกราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม RB5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันแสดงไว้ในภาพที่ 4.12a

การดูดซับสีย้อม MO ในระบบหอดูดซับแบบเบคนิ่ง ที่ความสูงของเบคเท่ากับ 15 cm และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min ได้ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.13 พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 200 mg/L จะมีปริมาณการดูดซับที่สมดุลมากกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 และ 100 mg/L มีค่าเท่ากับ 7.35 mg/g แต่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 mg/L จะมีเวลาและปริมาตรที่จุดเบรคทรูมากกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 และ 200 mg/L มีค่าเท่ากับ 2.57 min และ 9.24 mL ตามลำดับ ลักษณะของกราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม MO ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันแสดงไว้ในภาพที่ 4.12b

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ปริมาณการดูดซับที่สมดุล เวลาและปริมาตรที่จุดเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม RB5 จะมีค่ามากกว่าสีย้อม MO

ก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาการดูดซับสีย้อม RB5 ด้วยถ่านกัมมันต์ (Ahmad and Hameed, 2010) และสารไคโตซาน (Barron-Zambrano et al., 2010) ในระบบหอดูดซับแบบเบคนิ่ง พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้น แต่ปริมาตรที่จุดเบรคทรูจะลดลง ต่อมาได้มีการศึกษาการดูดซับสีย้อม MO ด้วยสารสปอโรพอลเลนิน (Sporopollenin: DAE-S) ในระบบหอดูดซับแบบเบคนิ่ง พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้นด้วย (Kucukosmanoglu et al., 2006) จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่า มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

4.4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมต่อการดูดซับแบบเบคนิ่ง

จากผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมต่อการดูดซับแบบเบคนิ่ง พบว่า เมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับที่สมดุลและเวลาที่จุดเบรคทรูจะลดลง แต่ปริมาตรที่จุดเบรคทรูจะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นเวลาในการสัมผัสกับตัวดูดซับจะมีน้อย (เวลาในการสัมผัสจะแปรผกผันกับอัตราการไหล) จึงส่งผลให้ปริมาณการดูดซับที่สมดุลและเวลาที่จุดเบรคทรูลดลง ส่วนปริมาตรที่จุดเบรคทรูจะเพิ่มขึ้น เพราะว่

เวลาที่จุดเบรคทुरुทั้ง 3. อัตราการไหลมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงทำให้ที่อัตราการไหลสูงมีปริมาณที่จุดเบรคทुरुมากกว่าที่อัตราการไหลต่ำ (ปริมาณที่จุดเบรคทुरुหาได้จากอัตราการไหลคูณกับเวลาที่จุดเบรคทुरु) ซึ่งโดยปกติแล้วปริมาณที่จุดเบรคทुरुจะแปรผันตามเวลาที่จุดเบรคทुरु

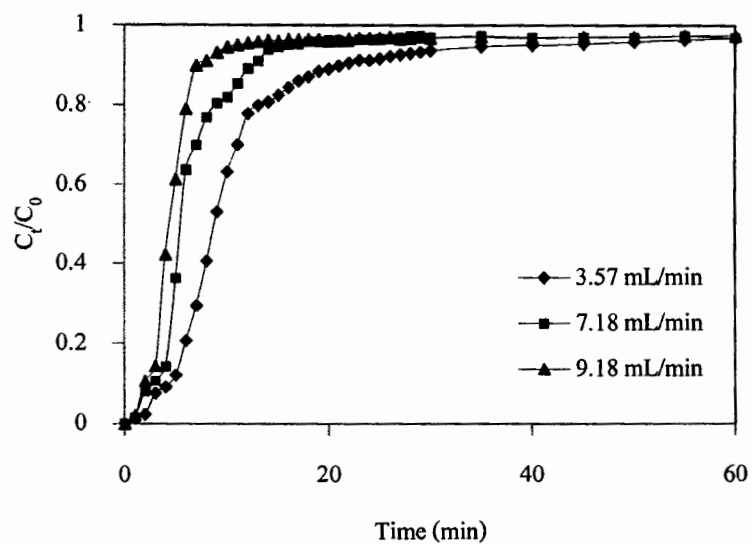
การดูดซับสีย้อม RB5 ในระบบหอดูดซับแบบเบคนึ่ง ที่ความสูงของเบคเท่ากับ 15 cm และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L ได้ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.12 พบว่าที่อัตราการไหลเท่ากับ 3.57 mL/min จะมีปริมาณการดูดซับที่สมดุลและเวลาที่จุดเบรคทुरुมากกว่าที่อัตราการไหลเท่ากับ 7.18 และ 9.18 mL/min มีค่าเท่ากับ 7.98 mg/g และ 2.52 min ตามลำดับ แต่ที่อัตราการไหลเท่ากับ 9.18 mL/min จะมีปริมาณที่จุดเบรคทुरुมากกว่าที่อัตราการไหลเท่ากับ 3.57 และ 7.18 mL/min มีค่าเท่ากับ 12.39 mL ลักษณะของกราฟเบรคทुरुของการดูดซับสีย้อม RB5 ที่อัตราการไหลแตกต่างกันแสดงไว้ในภาพที่ 4.13a

การดูดซับสีย้อม MO ในระบบหอดูดซับแบบเบคนึ่ง ที่ความสูงของเบคเท่ากับ 15 cm และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L ได้ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.13 พบว่าที่อัตราการไหลเท่ากับ 3.58 mL/min จะมีปริมาณการดูดซับที่สมดุลและเวลาที่จุดเบรคทुरुมากกว่าที่อัตราการไหลเท่ากับ 7.15 และ 9.19 mL/min มีค่าเท่ากับ 5.29 mg/g และ 2.17 min ตามลำดับ แต่ที่อัตราการไหลเท่ากับ 9.19 mL/min จะมีปริมาณที่จุดเบรคทुरुมากกว่าที่อัตราการไหลเท่ากับ 3.58 และ 7.15 mL/min มีค่าเท่ากับ 13.17 mL ลักษณะของกราฟเบรคทुरुของการดูดซับสีย้อม Methyl Orange ที่อัตราการไหลแตกต่างกันแสดงไว้ในภาพที่ 4.13b

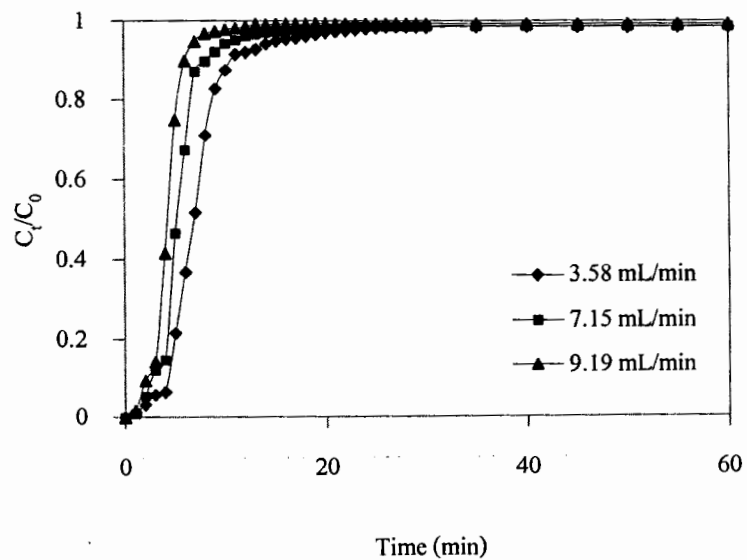
นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ปริมาณการดูดซับที่สมดุลและเวลาที่จุดเบรคทुरुของการดูดซับสีย้อม RB5 จะมีค่ามากกว่าสีย้อม MO แต่ปริมาณที่จุดเบรคทुरुของการดูดซับสีย้อม RB5 จะมีค่าน้อยกว่าสีย้อม MO

จากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมามีการศึกษาการดูดซับสีย้อม RB5 ด้วยสาร Chitosan/amino resin (Elwakeel, 2009) ถ่านกัมมันต์ (Ahmad and Hameed, 2010) และสารไคโตซาน (Barron-Zambrano et al., 2010) ในระบบหอดูดซับแบบเบคนึ่ง พบว่า เมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับที่สมดุลและเวลาที่จุดเบรคทुरुจะลดลง ส่วนปริมาณที่จุดเบรคทुरुจะเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

จากการศึกษาชุดควบคุมของสีย้อม RB5 และ MO ดังแสดงในตารางที่ ค.1-ค.6 พบว่า มีอัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหอดูดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย (ไม่เกินร้อยละ 5) หรือไม่เกิดการดูดซับเลย



(a)



(b)

ภาพที่ 4.13 กราฟเบรคท루ของการดูดซับสีข้อม (a) RB5 และ (b) MO ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่อัตรา
การไหลแตกต่างกัน (ความสูงของเบคเท่ากับ 15 cm และ ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ
100 mg/L)

จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า การศึกษาการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ที่ความสูงของเบด ความเข้มข้นเริ่มต้น และอัตราการไหลแตกต่างกัน พบว่า ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความสูงของเบดและความเข้มข้นเริ่มต้น แต่จะลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น เวลาที่จุดเบรคทुरुจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความสูงของเบด แต่จะลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ปริมาตรที่จุดเบรคทुरुจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความสูงของเบดและอัตราการไหล แต่จะลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการคัดแปรแร่ดิน MMT ด้วยสารไคโตซาน พบว่า แร่ดิน CTS/MMT มีพื้นที่ผิวลดลง และมีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าแร่ดิน MMT นอกจากนี้ยังพบอีกว่ามีระยะของช่องว่างระหว่างชั้นดินกว้างขึ้นอีกด้วย

จากการศึกษาการดูดซับแบบกะชนิดขั้นตอนเดียว โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาสมมูลการดูดซับ พบว่า แร่ดิน CTS/MMT สามารถดูดซับสีย้อม RB5 และ MO (เป็นสีที่มีประจุลบ) ได้ดีกว่าแร่ดิน MMT สำหรับการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อปริมาณการดูดซับ พบว่า การดูดซับสีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์ที่มีค่าพีเอชต่ำจะสามารถดูดซับสีย้อมได้ดีกว่าที่ค่าพีเอชสูง และการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับของสีย้อมทั้งสองชนิดจะเพิ่มขึ้นด้วย ไอโซเทอมการดูดซับของสีย้อมทั้งสองชนิดมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (การดูดซับแบบชั้นเดียว) มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และปริมาณการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุด (q_m) ของการดูดซับสีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิ 25 35 45 และ 55°C มีค่าเท่ากับ 82.64 94.34 111.11 และ 138.89 mg/g ตามลำดับ และสีย้อม MO ที่อุณหภูมิ 25 35 45 และ 55°C มีค่าเท่ากับ 68.49 84.75 100.00 และ 123.46 mg/g ตามลำดับ

การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ พบว่า อัตราการดูดซับของสีย้อมทั้งสองชนิดมีความสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าที่สุด) มากกว่าสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมี (k_2) ของการดูดซับสีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิ 25 - 55°C มีค่าอยู่ในช่วง $1.89 \times 10^3 - 8.51 \times 10^3$ g/mg*min และสีย้อม MO ที่อุณหภูมิ 25 - 55°C มีค่าอยู่ในช่วง $1.15 \times 10^3 - 6.15 \times 10^3$ g/mg*min สำหรับการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับ พบว่า ปริมาณการดูดซับของสีย้อมทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะเข้าสู่สมดุลการดูดซับภายในเวลา 60 นาที และการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ พบว่า อัตราการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการดูดซับ

จากการศึกษาการดูดซับสีย้อม RB5 และ MO ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ที่ความสูงของเบด ความเข้มข้นเริ่มต้น และอัตราการไหลแตกต่างกัน พบว่า ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความสูงของเบด และความเข้มข้นเริ่มต้น แต่จะลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งการดูดซับสีย้อม RB5 ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ควรเลือกใช้ความสูงของเบดเท่ากับ 25 cm ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 200 mg/L และอัตราการไหลเท่ากับ 3.56 mL/min ส่วนการดูดซับสีย้อม MO ในระบบหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ควรเลือกใช้ความสูงของเบดเท่ากับ 25 cm ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 200 mg/L และอัตราการไหลเท่ากับ 9.19 mL/min

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาเปรียบเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ ในการดูดซับสีย้อม เช่น ถ่านกัมมันต์ และ มวลชีวภาพ เป็นต้น

5.2.2 ควรศึกษาโดยใช้สารชนิดอื่น ๆ ในการนำมาดัดแปรแร่ดิน MMT เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมที่ดียิ่งขึ้น เช่น สาร Tetramethyl – ammonium (TMA), Tetradecyl trimethylhexadecylammonium (TDMA) และ Hexadecyltrimethylammonium (HDTMA) เป็นต้น

5.2.3 ควรศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิดอื่น ๆ เช่น สีเอซิด สีไคเร็กท์ สีเบสิก สีดิสเพอร์ส และสีซัลเฟอร์ เป็นต้น

5.2.4 ควรศึกษาการดูดซับน้ำจริงที่มีสีย้อม เพราะมีสารตัวอื่น ๆ อยู่ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- จักรกฤษณ์ อัมพข. การกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2549.
- จักรกฤษณ์ อัมพข และรัตนวรรณ (วิบูลย์สวัสดิ์) เกียรติโกมล. “จลนพลศาสตร์ของการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในระบบถังกวน”, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. 17(3): 40-47, 2549.
- เฉชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- ปิยมารณ์ จารุงศ์. การดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2545.
- ปิยมารณ์ จารุงศ์ และรัตนวรรณ เกียรติโกมล. “การดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays”, วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 11(1) : 39-51 ; มกราคม-มีนาคม, 2547.
- Ahmad, A.A. and Hameed, B.H. “Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste”, Journal of Hazardous Materials. 175: 298-303, 2010.
- Aksu, Z. “Adsorption of biosorption for the removal of organic pollutants: a review”, Process Biochemistry. 40: 997-1026, 2005.
- Alkan, M. and et al. “Adsorption kinetics and mechanism of maxilon blue 5G dye on sepiolite from aqueous solutions”, Chemical Engineering Journal. 139: 213-223, 2008.
- Almeida, C.A.P., and et al. “Removal of methylene blue from colored effluents by adsorption on montmorillonite clay”, Journal of Colloid and Interface Science. 332: 46-53, 2009.
- Al-Degs, Y.S. and et al. “Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon”, Dyes and Pigments. 77: 16-23, 2008.
- An, J.-H. and Dultz, S. “Adsorption of tannic acid on chitosan-montmorillonite as a function of pH and surface charge properties”, Applied Clay Science. 36: 256-264, 2007.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Auta, M. and Hameed, B.H. "Optimized waste tea activated carbon for adsorption of methylene blue and acid blue 29 dyes using response surface methodology", Chemical Engineering Journal. 175: 233-243, 2011.
- Barron-Zambrano, J. and et al. "Biosorption of Reactive Black 5 from aqueous solutions by chitosan: Column studies", Journal of Environmental Management. 91: 2669-2675, 2010.
- Chen, J.P. and Wang, L. "Characterization of metal adsorption kinetic properties in batch and fixed-bed reactors", Chemosphere. 54: 397-404, 2004.
- Chen, D. and et al. "Characterization of anion-cationic surfactants modified montmorillonite and its application for removal of methyl orange" Chemical Engineering Journal. 171: 1150-1158, 2011.
- Dambies, L. and et al. "Characterization of metal ion interactions with chitosan by X-ray photoelectron spectroscopy", Colloids Surf., Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 177: 203-214, 2001.
- Darder, M., Colilla, M. and Ruiz-Hitzky, E. "Biopolymer-clay nanocomposites based on chitosan intercalated in montmorillonite" Chemistry of Materials. 15: 3774-3780, 2003.
- Elwakeel, K.Z. "Removal of Reactive Black 5 from aqueous solution using magnetic chitosan resins", Journal of Hazardous Materials. 167: 383-392, 2009.
- Elwakeel, K.Z. and Rekaby, M. "Efficient removal of Reactive Black 5 from aqueous media using glycidyl methacrylate resin modified with tetraethylenepentamine", Journal of Hazardous Materials. 188: 10-18, 2011.
- Farran, A. and Chentouf, A. "Study of the behaviour of azinphos-methyl in a clay mineral by batch and column leaching", Journal of Chromatography. A869: 481-485, 2000.
- Futalan, C.M. and et al. "Comparative and competitive adsorption of copper, lead, and nickel using chitosan immobilized on bentonite", Carbohydrate Polymers. 83: 528-536, 2011.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Haque, E., Jun, J.W. and Jhung S.H. “Adsorptive removal of methyl orange and methylene blue from aqueous solution with a metal-organic framework material, iron terephthalate (MOF-235)”, Journal of Hazardous Materials. 185: 507-511, 2011.
- Juang, R., Lin, S. and Tsao, K. “Sorption of phenols from water in column systems usingsurfactant-modified montmorillonite”, Journal of Colloid and Interface Science. 269: 46-52, 2004.
- Kan, T. and et al. “Removal of methyl orange from aqueous solutions using a bentonite modified with a new gemini surfactant”, Applied Clay Science. 54: 184 – 187, 2011.
- Karaoglu, M.H., Dogan, M. and Alkan, M. “Kinetic analysis of reactive blue 221 adsorption on kaolinite”, Desalination. 256: 154-165, 2010.
- Kittinaovarat, S., Kansomwan, P. and Jiratumnukul, N. “Chitosan/modified montmorillonite beads and adsorption reactive red 120”, Applied clay Science. 48: 87-91, 2010.
- Kucukosmanoglu, M., Gezici, O. and Ayar, A. “The adsorption behaviors of Methylene Blue and Methyl Orange in a diaminoethane sporopollenin-mediated column system”, Separation and Purification Technology. 52: 280-287, 2006.
- Lin, S., Juang, R. and Wang, Y. “Adsorption of acid dye from water onto pristine and acidactivated clays in fixed beds”, Journal of Hazardous Materials. B 113: 195-200, 2004.
- McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P. Unit Operations of Chemical Engineering. Singapore: McGraw-Hill, 2001.
- Mckay, G. Use of adsorbents for the removal of pollutants from wastewaters. New York: CRC Press, 1996.
- Mohammadi, N., and et al. “Adsorption process of methyl orange dye onto mesoporous carbon material-kinetic and thermodynamic studies”, Journal of Colloid and Interface Science. 362: 457-462, 2011.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

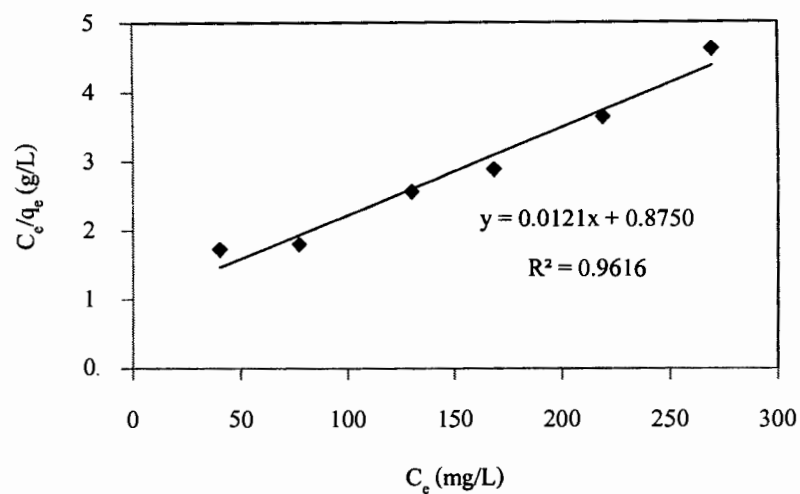
- Monvisade, P. and Siriphannon, P. "Chitosan intercalated montmorillonite : Preparation, characterization and cationic dye adsorption", Applied Clay Science. 42: 427-431, 2009.
- Nesic, A. R., Velickovic, S.J. and Antonovic, D.G. "Charaterization of chitosan/montmorillonite membranes as adsorbents for Bezactiv Orange V-3R dye", Journal of Hazardous Materials. Article in press, 2012.
- Ohtsuka, K. "Preparation and properties of two-dimensional microporous pillared interlayer solids", Chemistry of Materials. 9: 2039-2050, 1997.
- Pandy, S. and Mishra, S.B. "Organic-inorganic hybrid of chitosan/organoclay bionanocomposites for hexavalent chromium uptake", Journal of Colloid and Interface Science. 361: 509-520, 2011.
- Panneer Selvam, P., and et al. "Removal of rhodamine B from aqueous solution by adsorption onto sodium montmorillonite", Journal of Hazardous Materials. 155: 39-44, 2008.
- Rafatullah, M., and et al. "Adsorption of Methylene Blue on low-cost adsorbent", Journal of Hazardous Materials. 177: 70-80, 2010.
- Reddy, K. "Organic matter determination", Engineering Properties of Soils Based on Laboratory Testing. <http://www.uic.edu/classes/ceem/ceemlab/Experiment%20Organic%20Content.pdf>. March, 2011.
- Reynolds, T.D. and Richards, P.A. Unit Operations and Process in Environmental Engineering. New York: PWS Publishing Company, 1996.
- Rozada, F., and et al. "Dye adsorption by sewage sludge-based activated carbons in batch and fixed-bed systems", Bioresource Technology. 87: 221-230, 2003.
- Seader, J.D. and Henley, J.E. Separation process principles. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- Teng, M.-Y. and Lin, S.-H. "Removal of methyl orange dye from water onto raw and acid-activated montmorillonite in fixed beds", Desalination. 201: 71-81, 2006.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

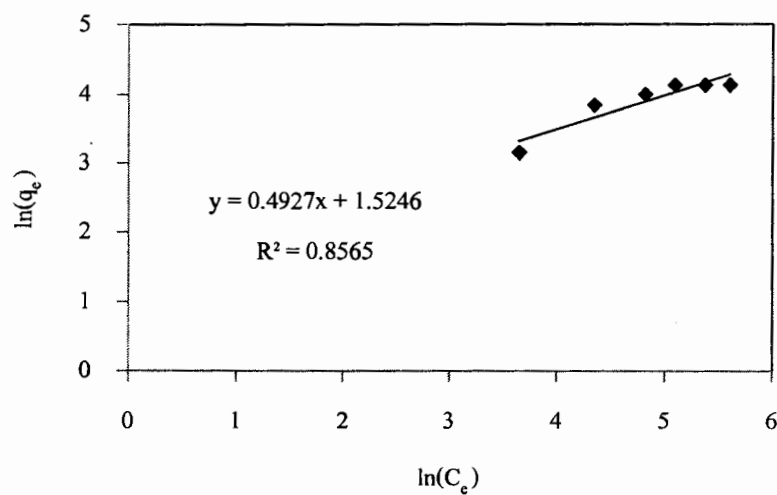
- Walker, G.M. and Weatherley, L.R. "Fixed bed adsorption of acid dyes onto activated carbon", Environmental Pollution. 99: 133-136, 1998.
- Wang, L. and Wang, A. "Adsorption characteristics of Congo Red onto the chitosan/montmorillonite nanocomposite", Journal of Hazardous Materials. 147: 979-985, 2007.
- Wang, L. and Wang, A. "Adsorption behaviors of Congo red on the *N, O*-carboxymethyl-chitosan/montmorillonite nanocomposite", Chemical Engineering Journal. 143: 43-50, 2008.
- Wang, L., Zhang, J. and Wang, A. "Removal of methylene blue from aqueous solution using chitosan-g-poly (acrylic acid)/montmorillonite superadsorbent nanocomposite", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 322: 47-53, 2008.
- Wang, S.F., and et al. "Biopolymer chitosan/montmorillonite nanocomposite: Preparation and characterization", Polymer Degradation and Stability. 90: 123-131, 2005.
- Wibulswas, R. "Batch and fixed bed sorption of methylene blue on precursor and QACs modified montmorillonite", Separation and Purification Technology. 39: 3-12, 2004.
- Wu, F.C., Tseng, R.L. and Juang, R.S. "Role of pH in metal adsorption from aqueous solutions containing chelating agents onto chitosan", Industrial & Engineering Chemistry Research. 38: 270-275, 1999.
- Wu, F.C., Tseng, R.L. and Juang, R.S. "Enhanced abilities of highly swollen chitosan beads for color removal and tyrosinase immobilization", Journal of Hazardous Materials. B 81: 167-177, 2001.
- Yahya, S. and et al. "Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon" Dyes and Pigments. 77: 16-23, 2008.
- Yao, Y. and et al. "Equilibrium and kinetic studies of methyl orange adsorption on multiwalled carbon nanotubes", Chemical Engineering Journal. 170: 82-89, 2011.

ภาคผนวก

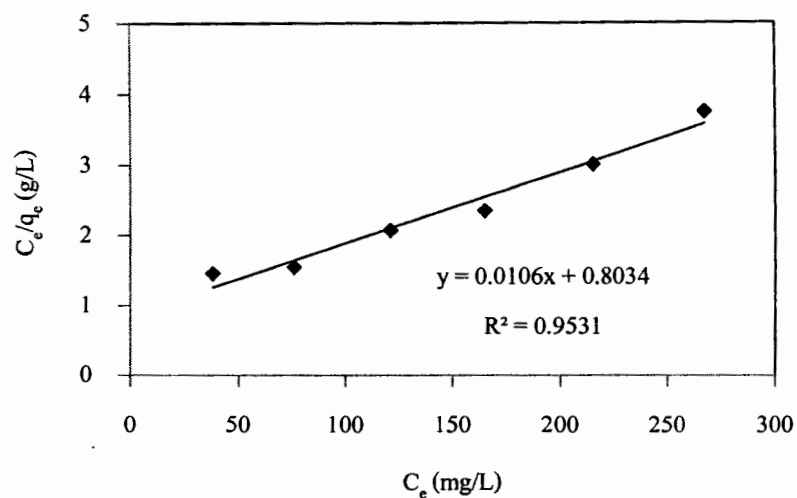
ภาคผนวก ก
ผลการศึกษาสมดุผลการดูฉบับ



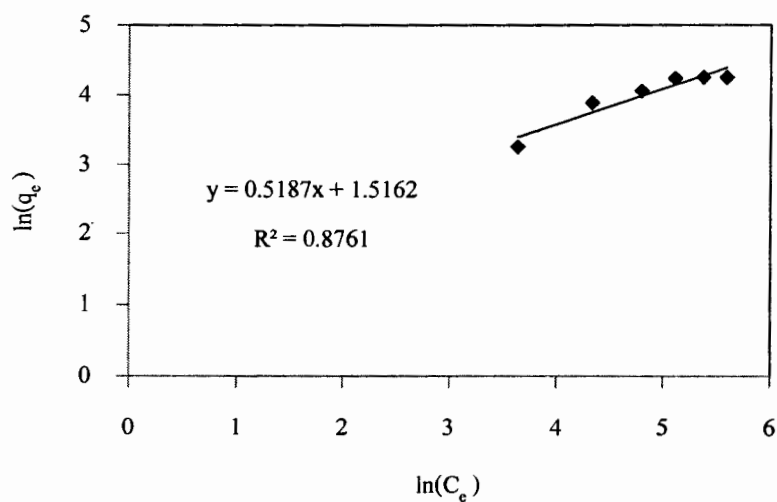
ภาพที่ ก.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$



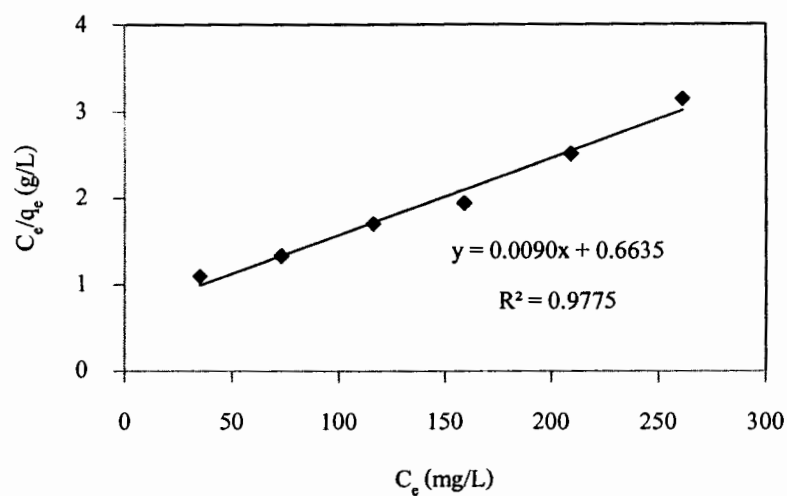
ภาพที่ ก.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$



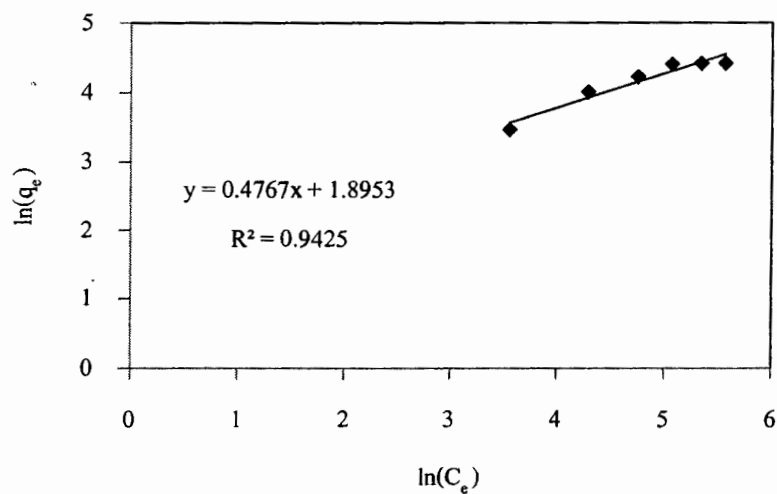
ภาพที่ ก.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$



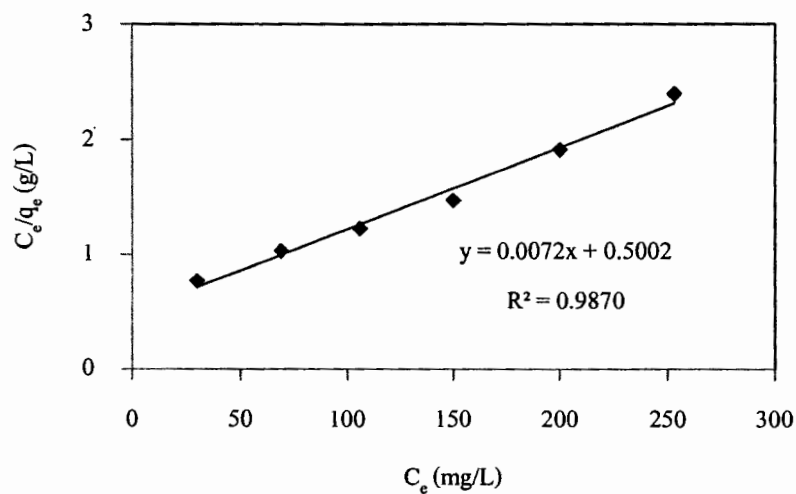
ภาพที่ ก.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรันทซ์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 35 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$



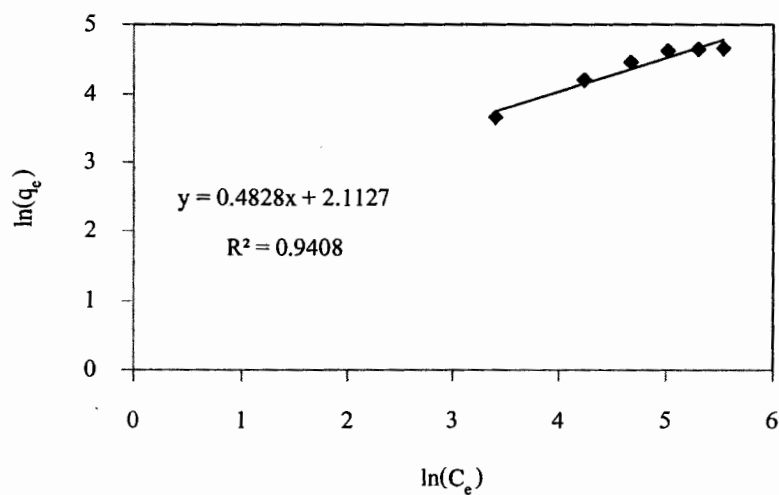
ภาพที่ ก.5 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$



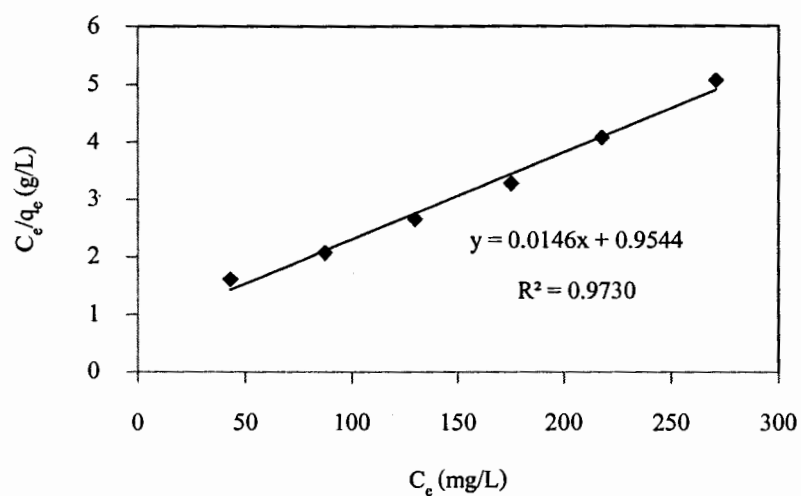
ภาพที่ ก.6 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรันทซ์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$



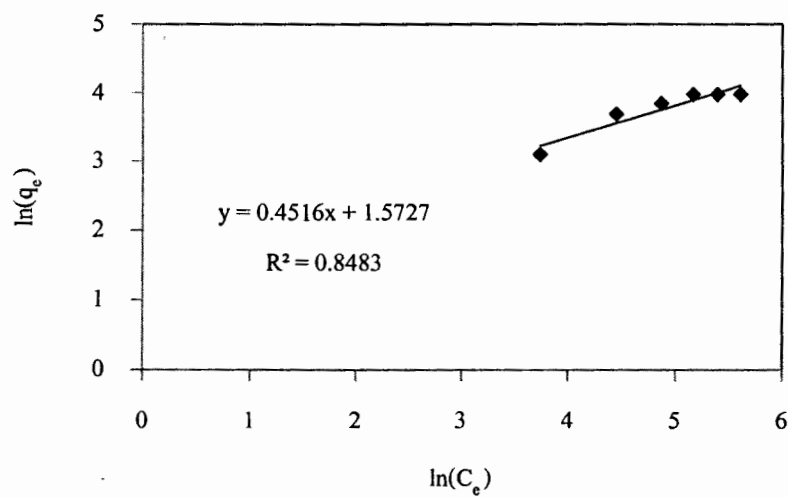
ภาพที่ ก.7 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$



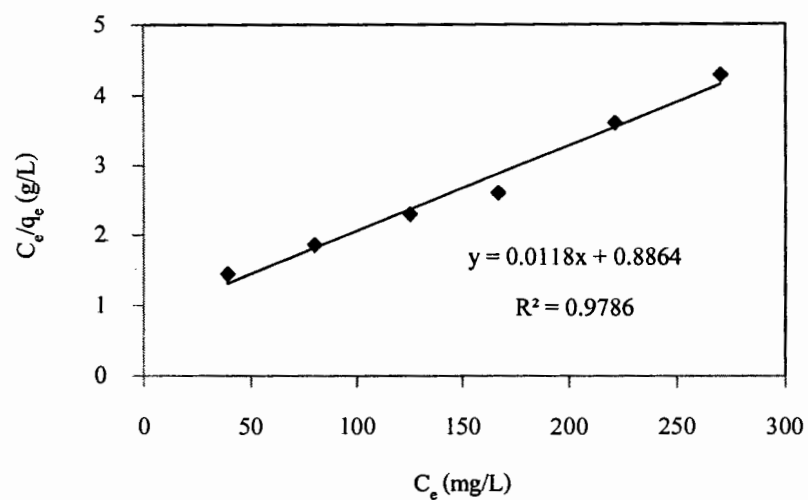
ภาพที่ ก.8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$



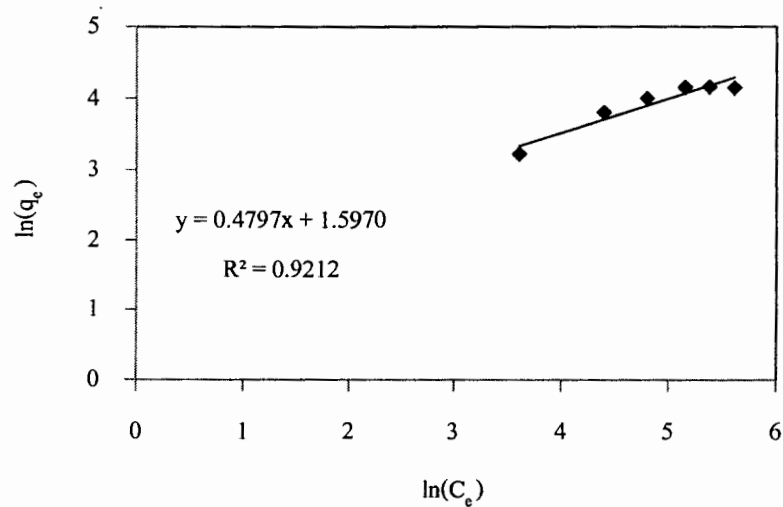
ภาพที่ ก.9 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$



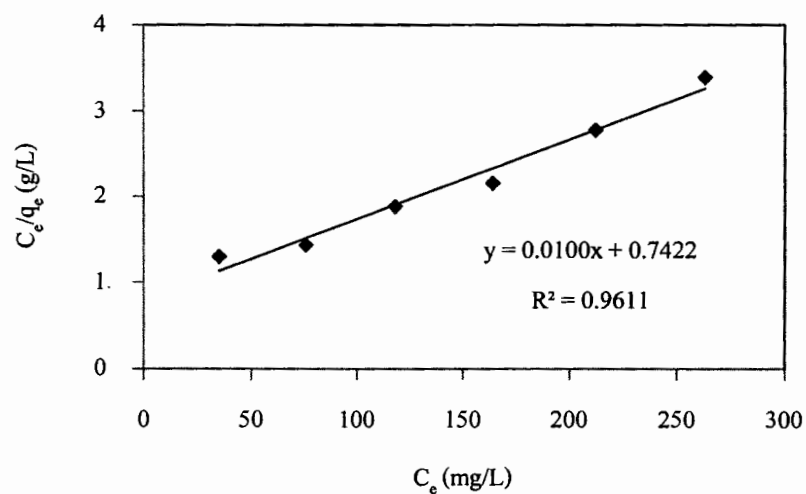
ภาพที่ ก.10 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรันทิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$



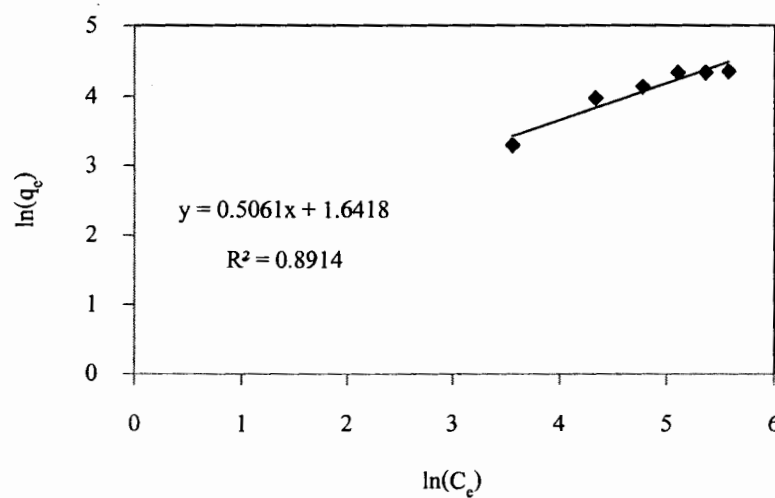
ภาพที่ ก.11 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



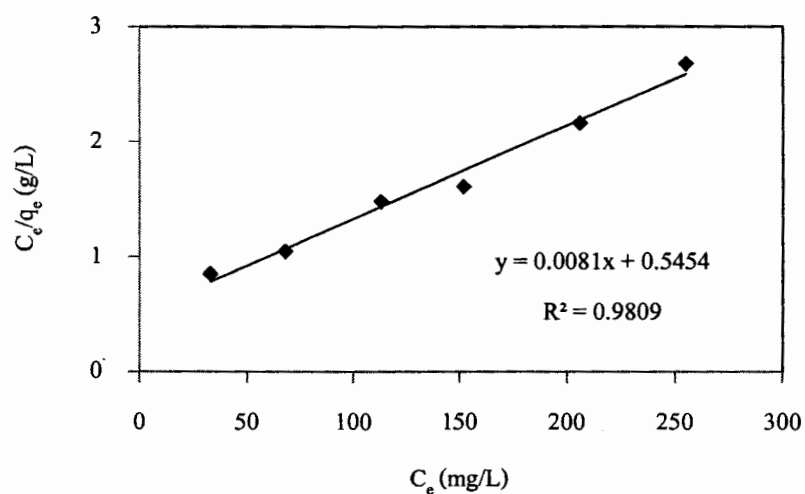
ภาพที่ ก.12 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



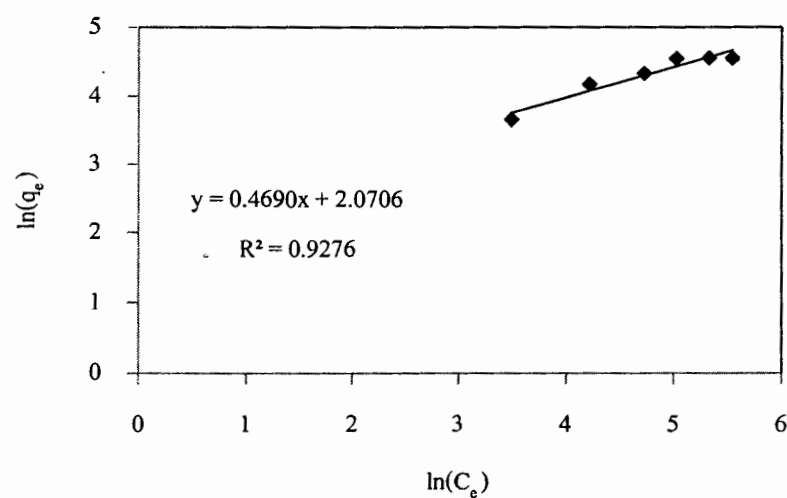
ภาพที่ ก.13 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$



ภาพที่ ก.14 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 45 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$



ภาพที่ ก.15 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$



ภาพที่ ก.16 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดิชจากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 55 °C และ $pH_0 = 7 \pm 0.5$

ตารางที่ ก.1 ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของสีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	ชุดควบคุม						ชุดการทดลอง					
	ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (mg/g) ที่ C_0 (mg/L) แตกต่างกัน						ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (mg/g) ที่ C_0 (mg/L) แตกต่างกัน					
	50	100	150	200	250	300	50	100	150	200	250	300
25	0	0	2.2	0	1.5	2.6	26.7	46.7	53.3	62.2	62.2	62.2
35	0	0	1.2	0	0	2.2	28.9	48.9	62.2	71.1	71.1	71.1
45	2.2	1.8	0	0	2.3	2.4	35.6	53.3	66.7	82.2	84.4	82.2
55	0	2.1	2.4	0	0	3.4	42.2	68.9	86.7	102.2	104.4	106.7

หมายเหตุ : ปริมาณการดูดซับก่อนการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0 mg/g

ตารางที่ ก.2 ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของสีย้อม MO ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	ชุดควบคุม						ชุดการทดลอง					
	ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (mg/g) ที่ C_0 (mg/L) แตกต่างกัน						ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (mg/g) ที่ C_0 (mg/L) แตกต่างกัน					
	50	100	150	200	250	300	50	100	150	200	250	300
25	0	0	2.8	0	3.2	2.3	23.3	38.8	46.6	54.4	54.4	54.4
35	0	0	0	2.3	3.1	3.3	27.2	42.7	54.3	62.1	62.1	62.1
45	0	2.6	3.4	3.5	0	2.5	31.1	50.5	62.2	73.8	77.7	73.7
55	3.1	0	3.2	0	2.3	0	38.8	62.1	77.6	93.2	97.1	93.2

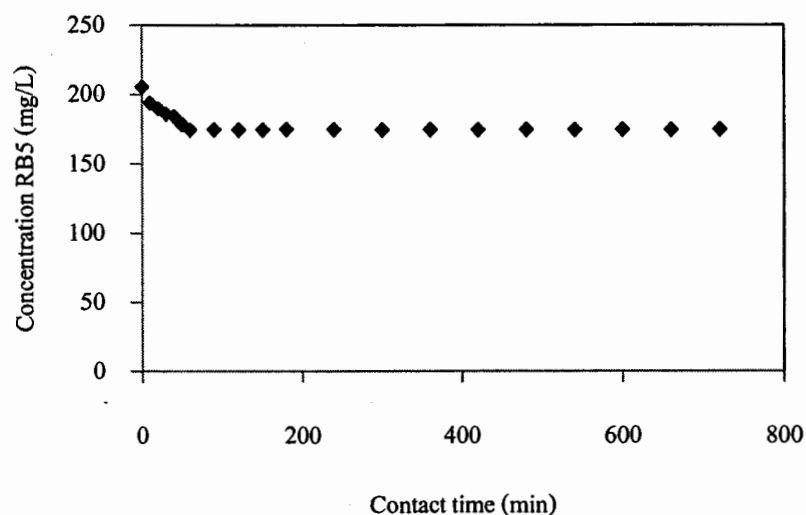
หมายเหตุ : ปริมาณการดูดซับก่อนการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0 mg/g

ตารางที่ ก.3 ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของสีย้อม RB5 และ MO ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นแตกต่างกัน

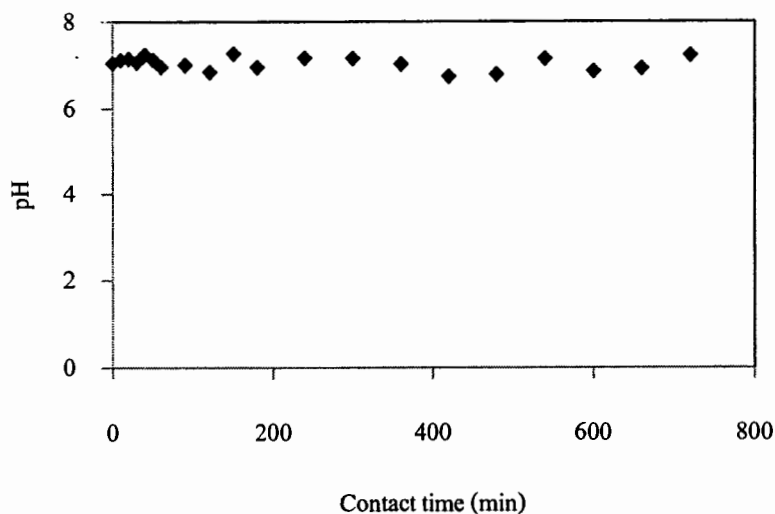
ชนิดสีย้อม		ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (mg/g) ที่พีเอชแตกต่างกัน				
		2	4	6	8	10
RB5	ชุดควบคุม	4.45	1.22	0	0	2.23
	ชุดการทดลอง	111.11	91.11	64.44	57.78	48.89
MO	ชุดควบคุม	1.48	0	3.89	0	0
	ชุดการทดลอง	97.09	69.90	58.25	50.48	38.83

หมายเหตุ : ปริมาณการดูดซับก่อนการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0 mg/g

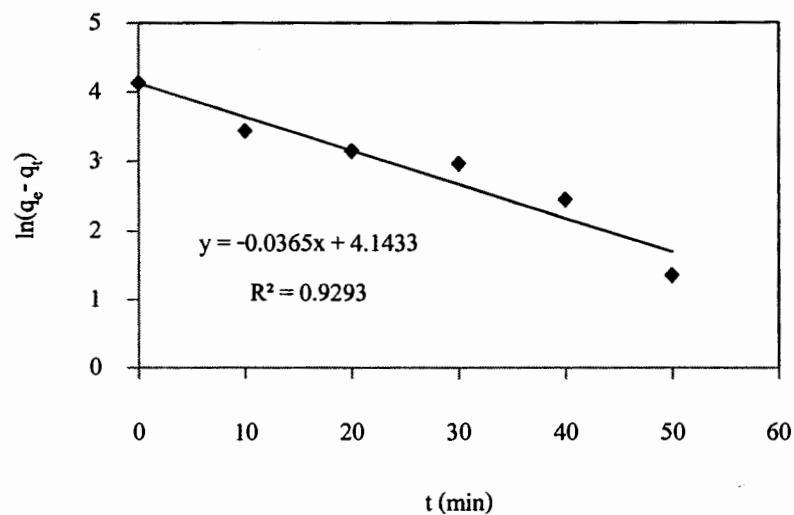
ภาคผนวก ข
ผลการศึกษาจนพจนานุกรมการดูฉบับ



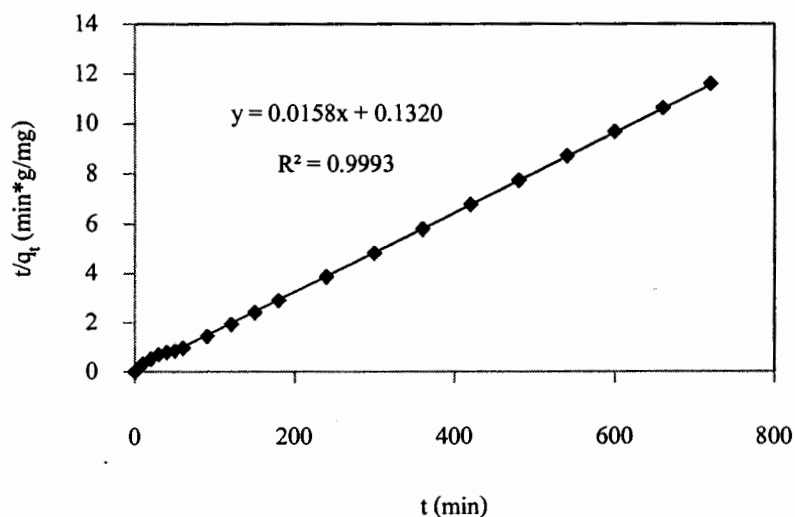
ภาพที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลาสัมผัส ที่ $C_0 = 205.31 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



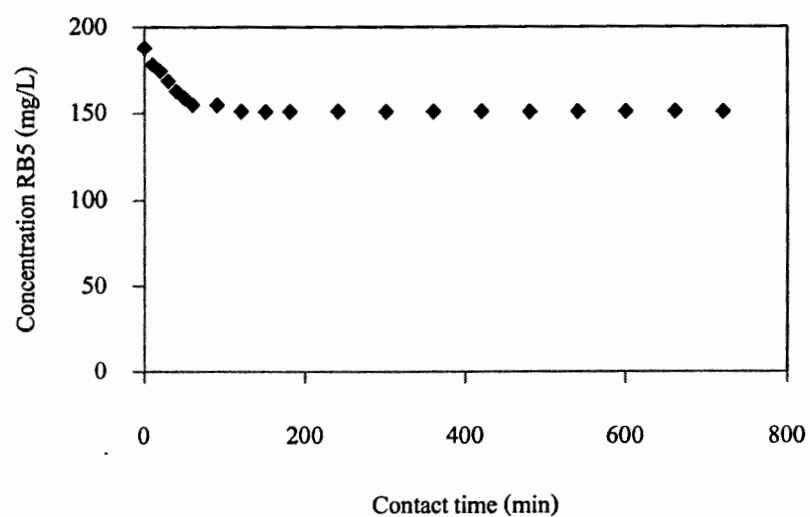
ภาพที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลาสัมผัส โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 25°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



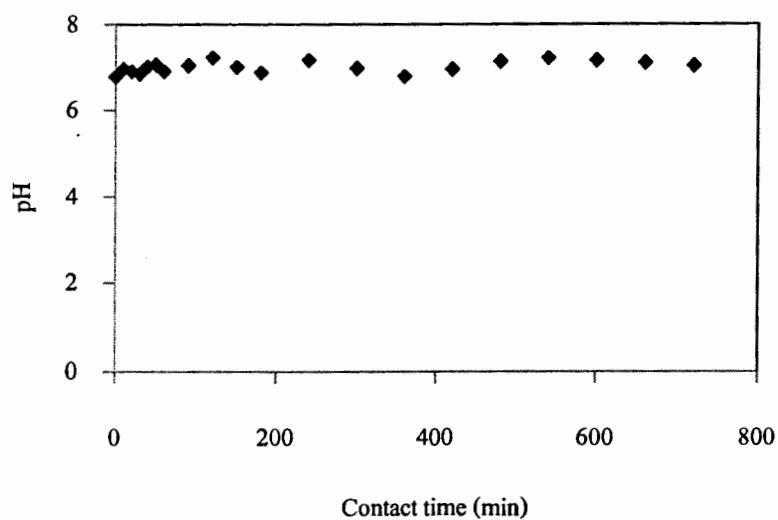
ภาพที่ ข.3 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีย้อม RB5 ที่ $C_0 = 205.31 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



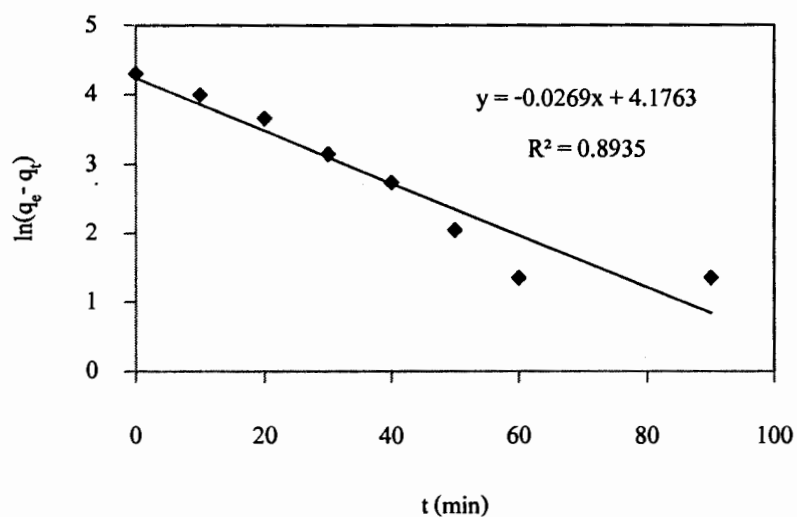
ภาพที่ ข.4 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีย้อม RB5 ที่ $C_0 = 205.31 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



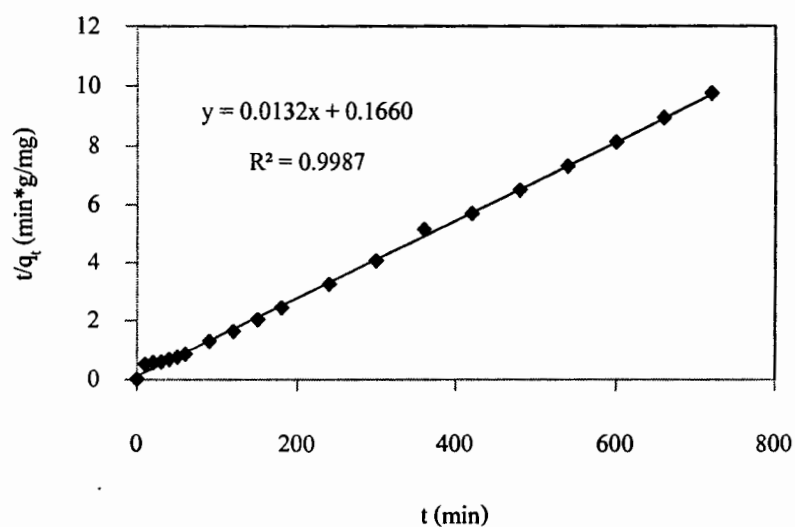
ภาพที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลาสัมผัส ที่ $C_0 = 187.83 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 35°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



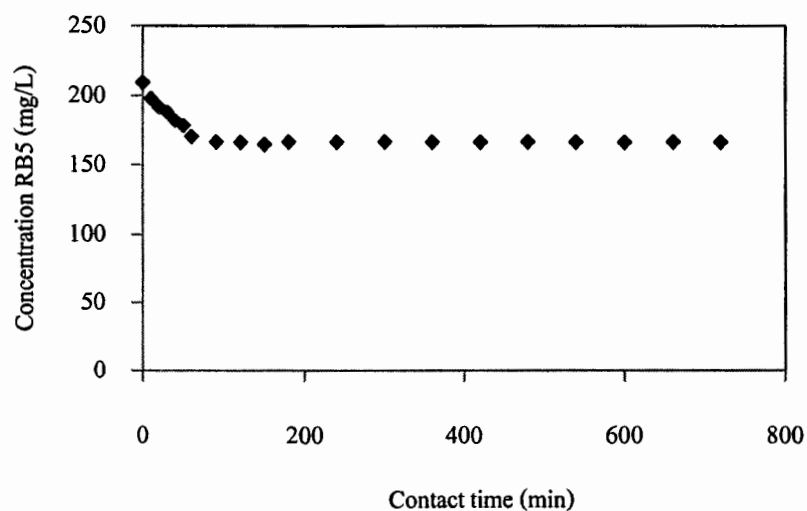
ภาพที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลาสัมผัส โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 35°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



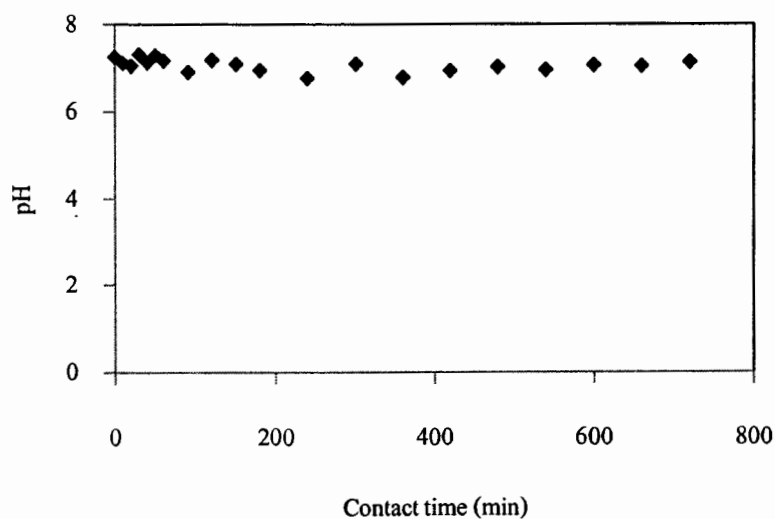
ภาพที่ ข.7 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีข้อม RB5 ที่ $C_0 = 187.83 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 35°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



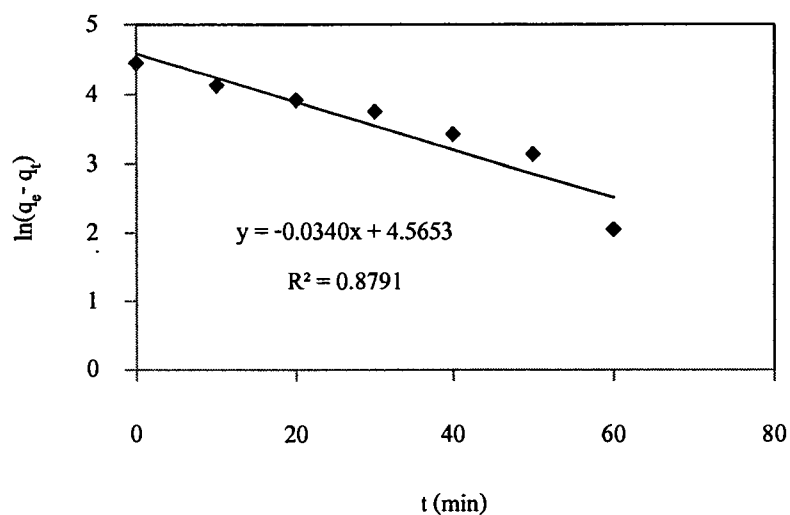
ภาพที่ ข.8 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีข้อม RB5 ที่ $C_0 = 187.83 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 35°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



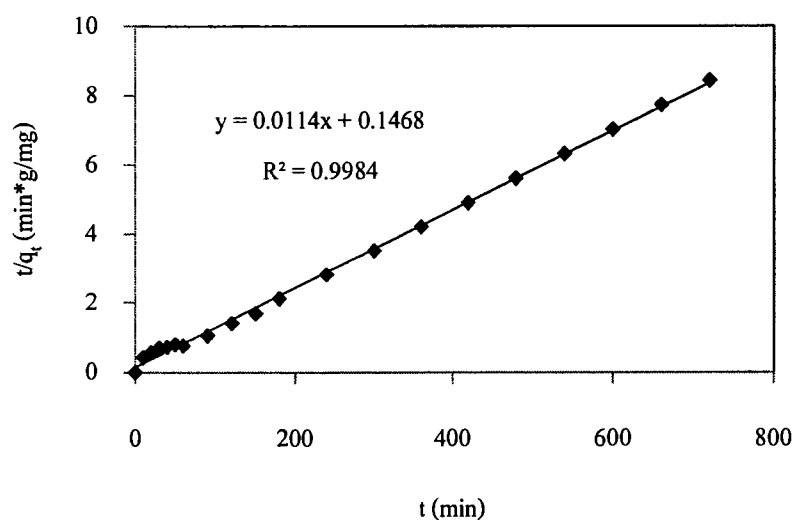
ภาพที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลาสัมผัส ที่ $C_0 = 209.19 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 45°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



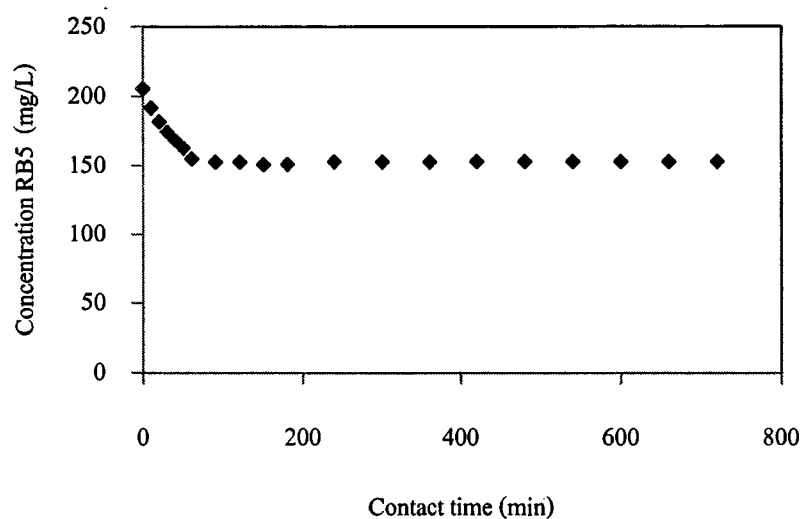
ภาพที่ ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลาสัมผัส โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 45°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



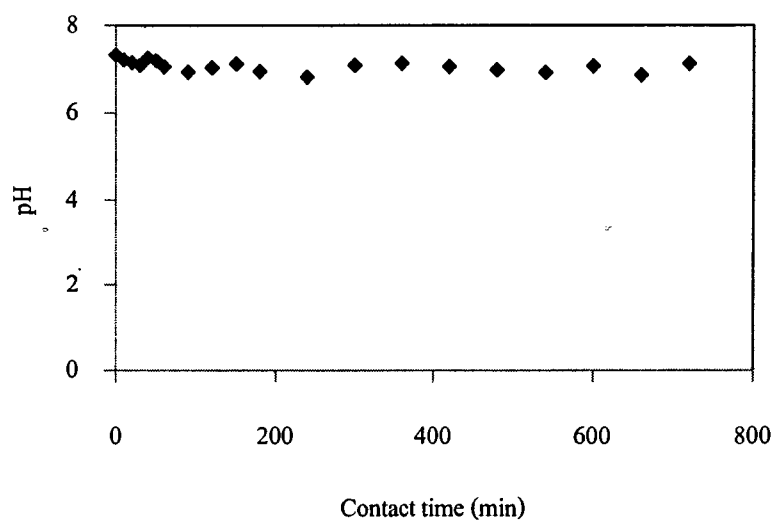
ภาพที่ ข.11 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีข้อม RB5 ที่ $C_0 = 209.19 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 45°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



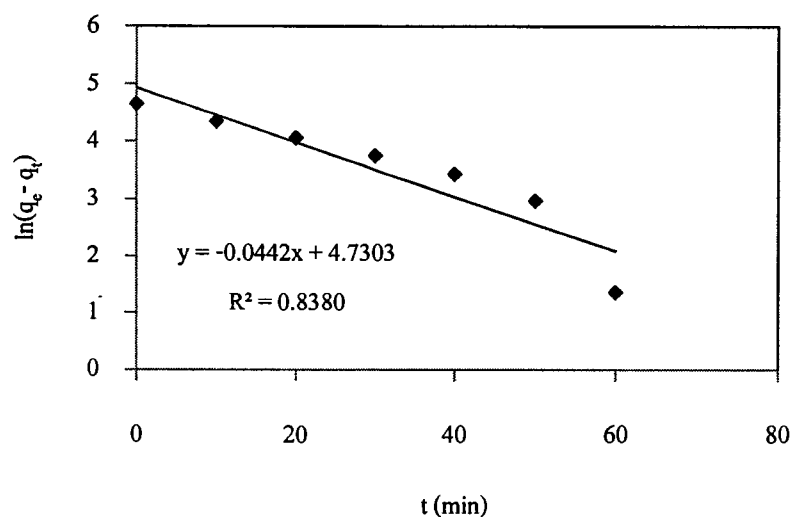
ภาพที่ ข.12 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีข้อม RB5 ที่ $C_0 = 209.19 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 45°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



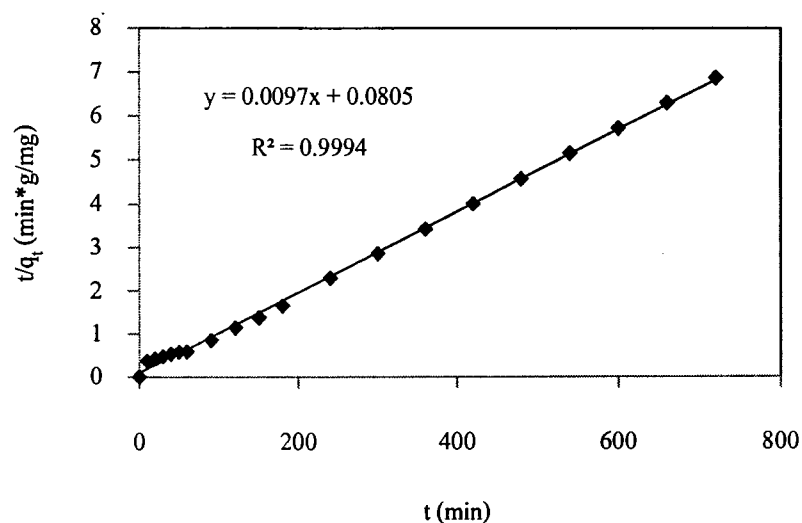
ภาพที่ ข.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลาสัมผัส ที่ $C_0 = 205.31 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 55°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



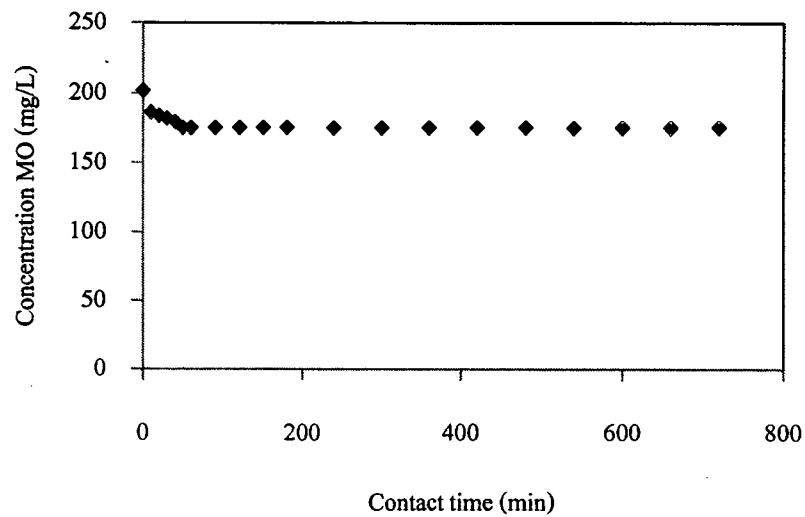
ภาพที่ ข.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลาสัมผัส โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 55°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



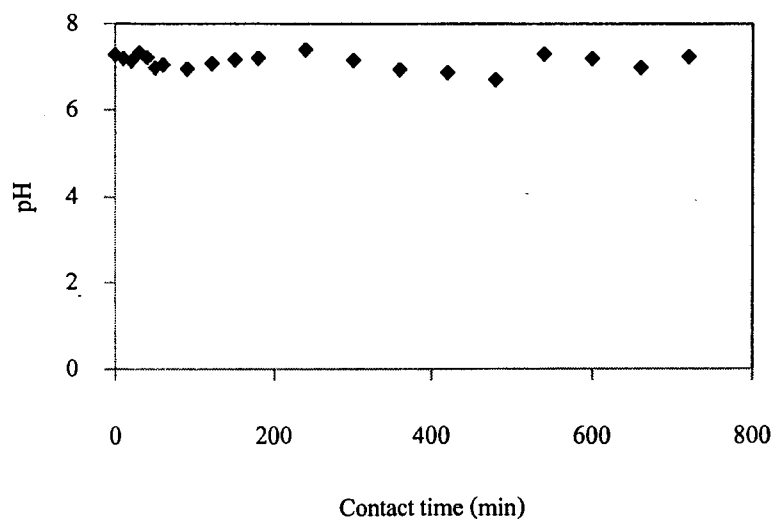
ภาพที่ ข.15 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีข้อม RB5 ที่ $C_0 = 205.31 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 55°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



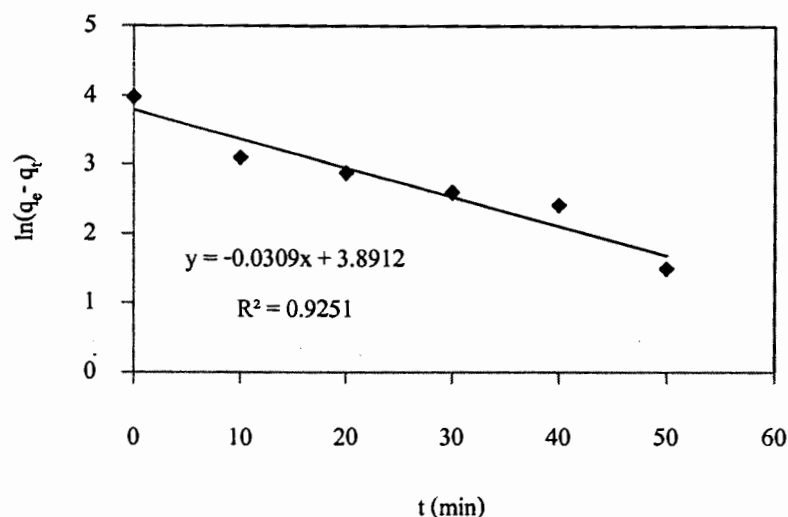
ภาพที่ ข.16 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีข้อม RB5 ที่ $C_0 = 205.31 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 55°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



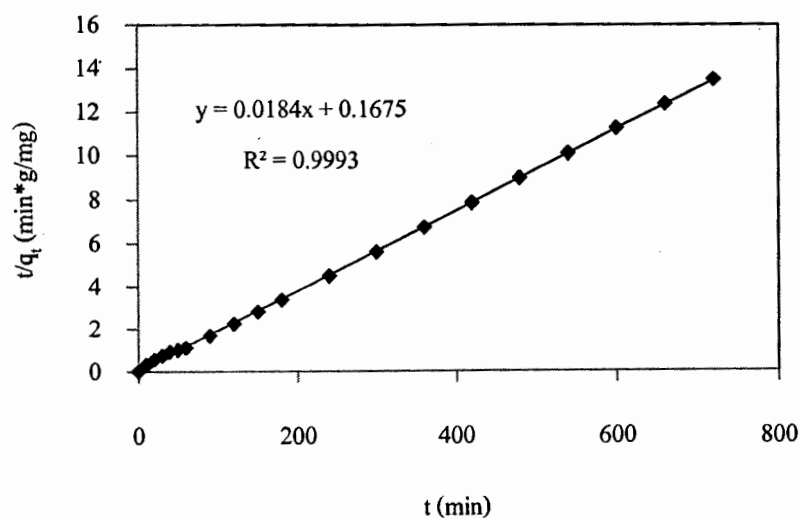
ภาพที่ ข.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลาสัมผัส ที่ C_0 = 201.89 mg/L โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



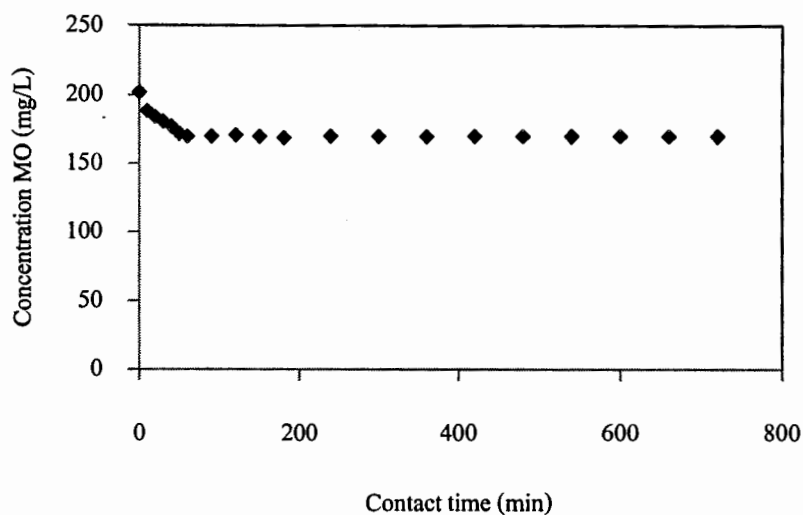
ภาพที่ ข.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลาสัมผัส โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 25°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



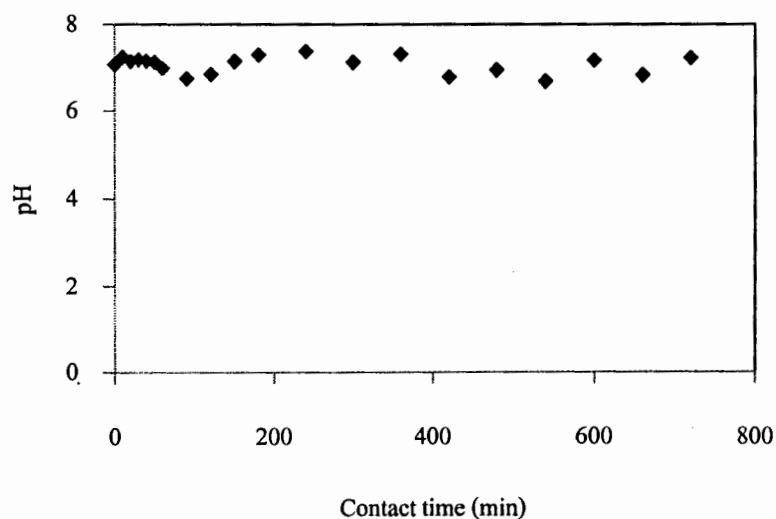
ภาพที่ ข.19 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีข้อม MO ที่ $C_0 = 201.89$ mg/L โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



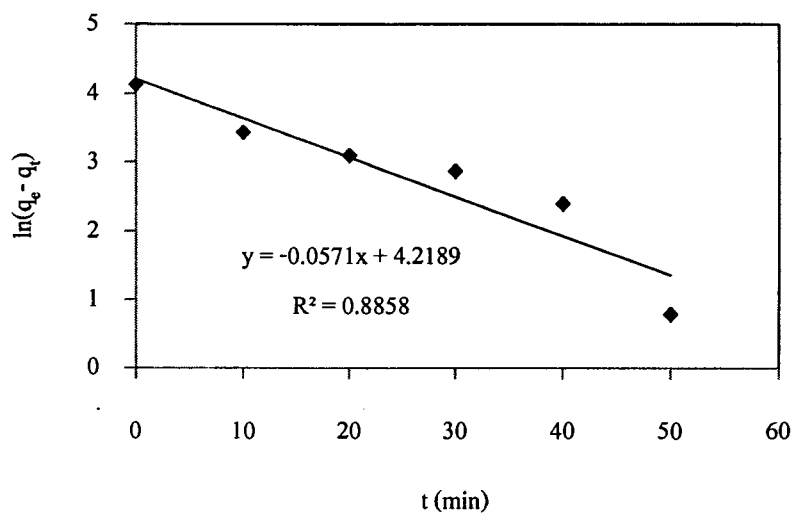
ภาพที่ ข.20 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีข้อม MO ที่ $C_0 = 201.89$ mg/L โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



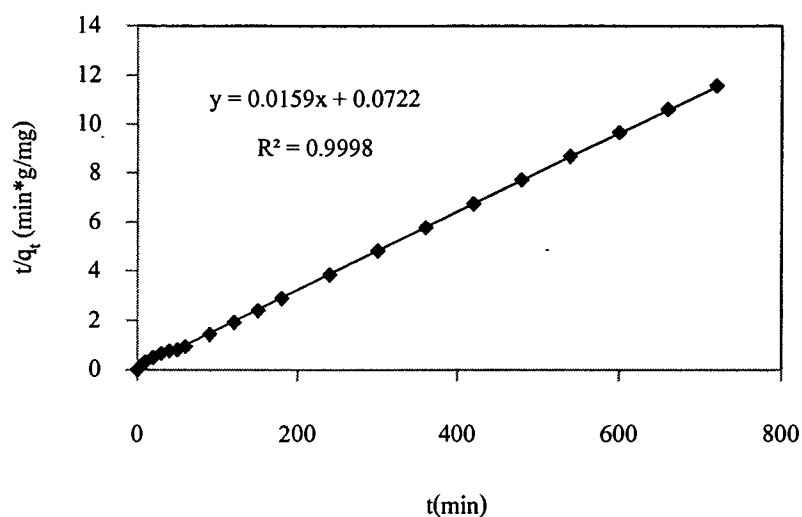
ภาพที่ ข.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลาสัมผัส ที่ $C_0 = 201.89 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 35°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



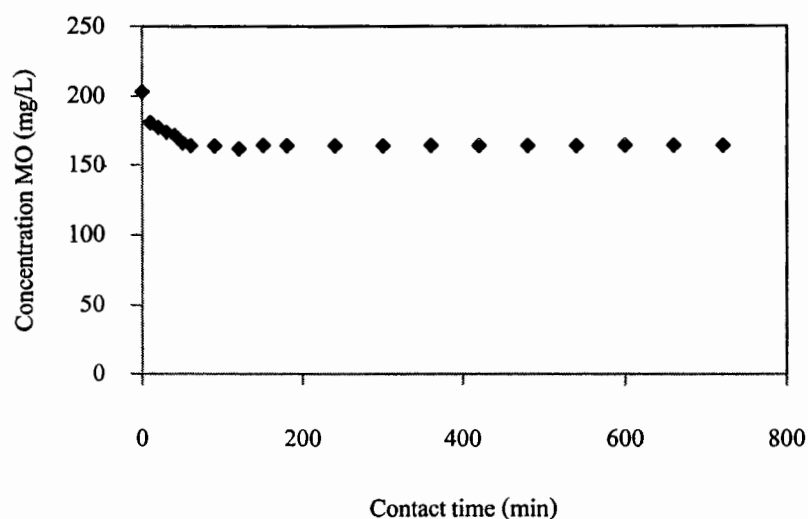
ภาพที่ ข.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลาสัมผัส โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 35°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



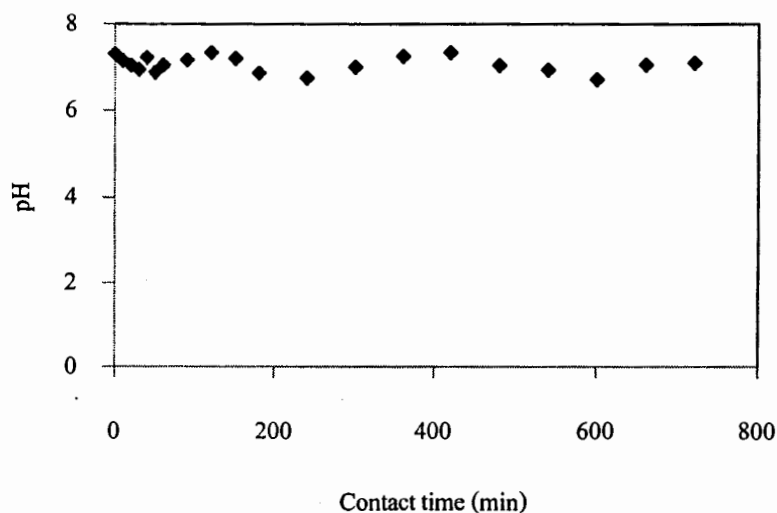
ภาพที่ ข.23 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีย้อม MO ที่ $C_0 = 201.89 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 35°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



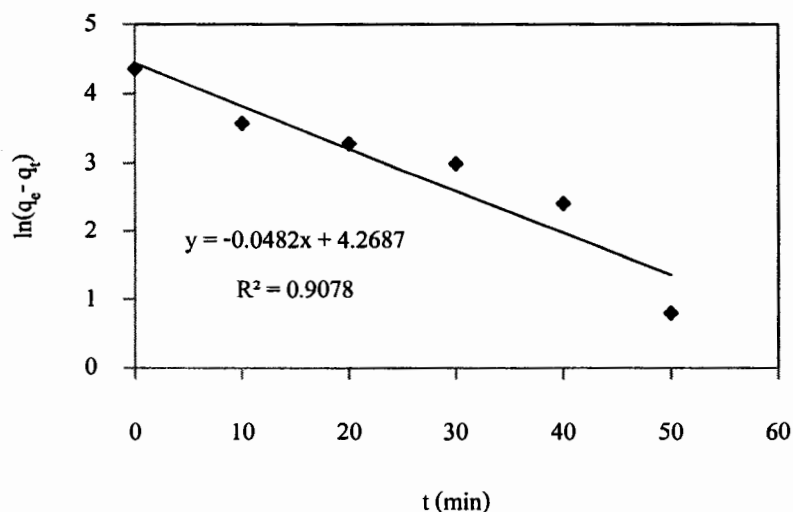
ภาพที่ ข.24 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีย้อม MO ที่ $C_0 = 201.89 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 35°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



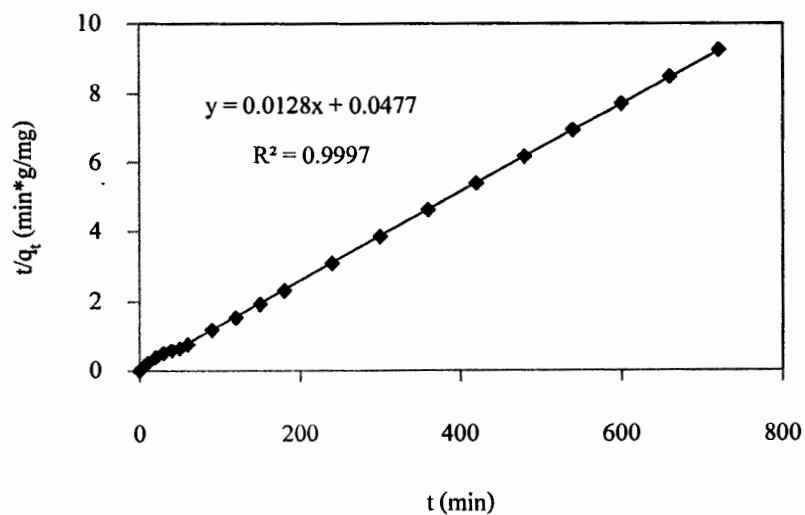
ภาพที่ ข.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลาสัมผัส ที่ $C_0 = 203.00 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 45°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



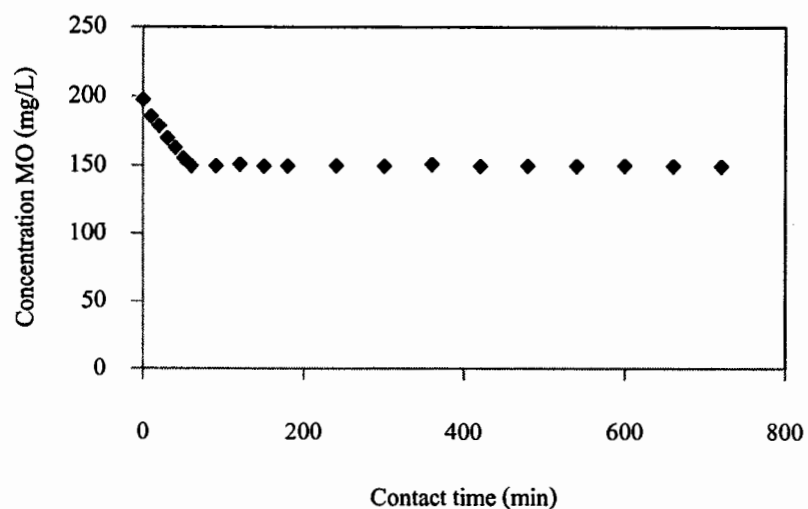
ภาพที่ ข.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลาสัมผัส โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 45°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



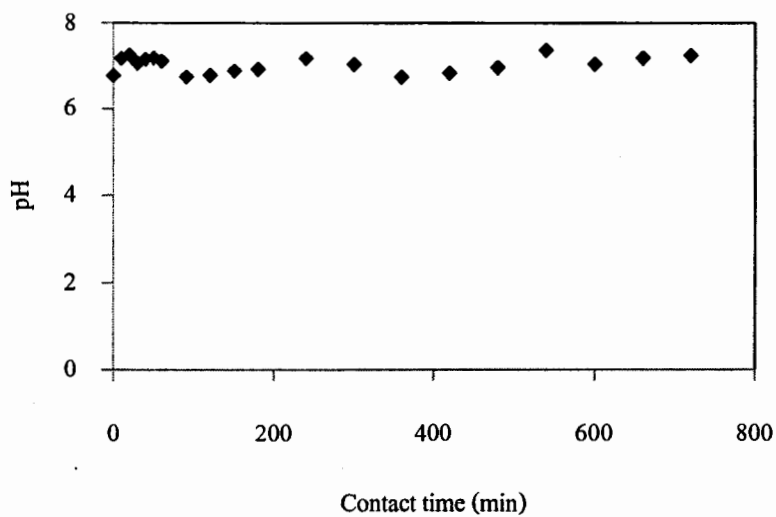
ภาพที่ ข.27 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีย้อม MO ที่ $C_0 = 203.00 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 45°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



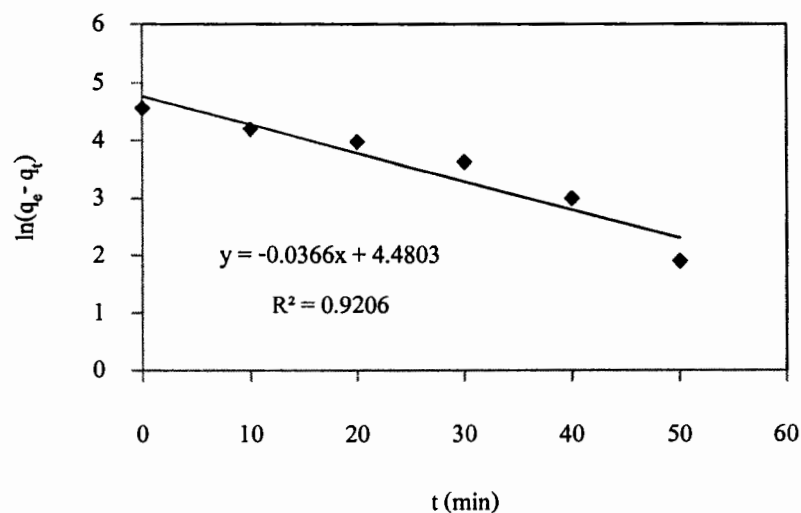
ภาพที่ ข.28 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีย้อม MO ที่ $C_0 = 203.00 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 45°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



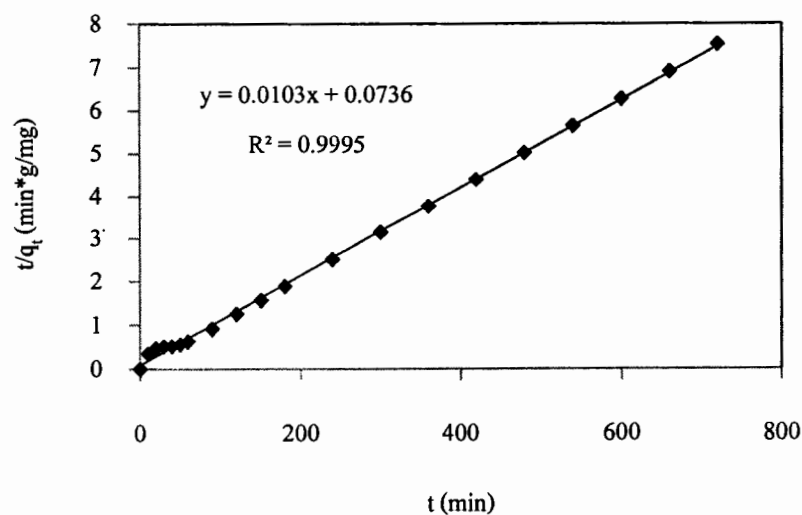
ภาพที่ ข.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลาสัมผัส ที่ $C_0 = 197.44 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 55°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



ภาพที่ ข.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลาสัมผัส โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 55°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



ภาพที่ ข.31 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับสีข้อม MO ที่ $C_0 = 197.44 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 55°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



ภาพที่ ข.32 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีข้อม MO ที่ $C_0 = 197.44 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับแร่ดิน CTS/MMT ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 55°C และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$

ตารางที่ ข.1 ปริมาณการดูดซับที่เวลาใด ๆ ของสีย้อม RB5 ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

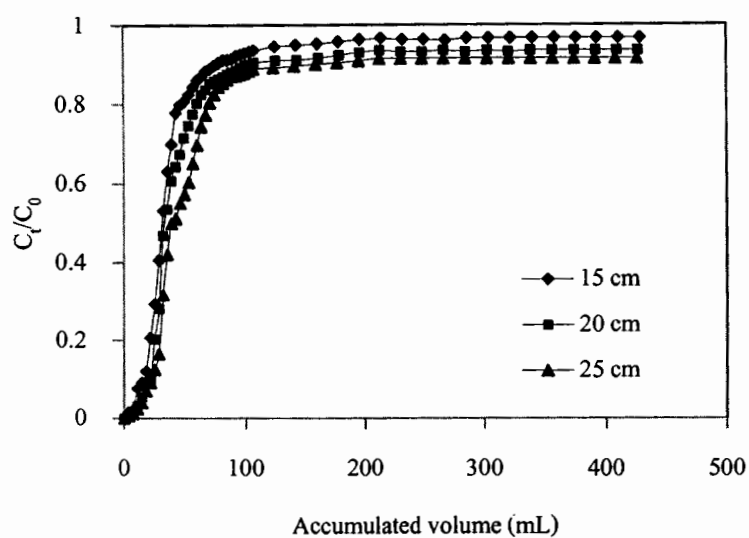
เวลา (นาที)	ชุดควบคุม				ชุดการทดลอง			
	ปริมาณการดูดซับ (mg/g) ที่อุณหภูมิ (°C) แตกต่างกัน				ปริมาณการดูดซับ (mg/g) ที่อุณหภูมิ (°C) แตกต่างกัน			
	25	35	45	55	25	35	45	55
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1.25	0	0	24.44	33.33	35.34	51.11
20	2.42	0	0	0	31.12	42.22	53.33	82.22
30	0	0	3.14	0	37.78	57.78	68.89	93.33
40	0	1.22	0	2.62	42.22	66.67	77.78	97.78
50	2.45	0	0	2.22	55.56	66.67	77.78	100.00
60	2.27	0	3.24	4.15	62.22	73.33	80.00	100.00
90	0	3.24	2.22	1.25	62.22	73.33	88.89	108.89
120	4.48	0	0	0	62.25	73.33	88.89	108.89
150	0	0	2.34	2.72	62.22	73.33	88.89	108.79
180	0	1.45	3.24	2.34	62.22	73.35	88.89	108.89
240	2.22	0	0	2.45	62.23	73.33	84.44	104.45
300	0	1.25	2.24	0	62.22	73.33	84.54	104.45
360	0	2.24	0	0	62.22	73.35	84.44	104.44
420	0	0	0	2.22	62.23	73.33	84.44	104.44
480	2.25	0	3.24	0	62.22	73.35	84.54	104.45
540	2.14	0	4.15	4.15	62.23	73.33	84.54	104.44
600	0	0	0	2.22	62.22	73.33	84.44	104.45
660	0	0	1.25	0	62.22	73.33	84.44	104.44
720	0	0	0	0	62.22	73.33	84.44	104.44

ตารางที่ ข.2 ปริมาณการดูดซับที่เวลาใด ๆ ของสีย้อม MO ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

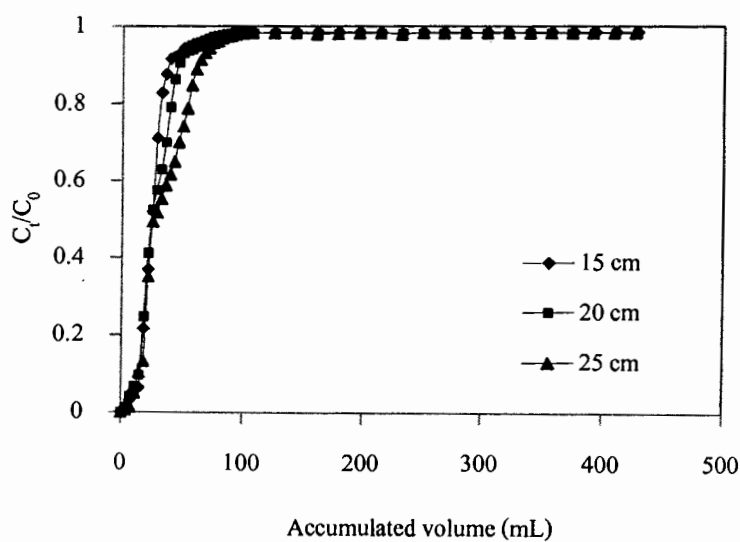
เวลา (นาที)	ชุดควบคุม				ชุดการทดลอง			
	ปริมาณการดูดซับ (mg/g) ที่อุณหภูมิ (°C) แตกต่างกัน				ปริมาณการดูดซับ (mg/g) ที่อุณหภูมิ (°C) แตกต่างกัน			
	25	35	45	55	25	35	45	55
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	3.89	1.47	19.42	27.18	42.72	54.37
20	0	2.68	0	0	23.30	34.95	50.49	73.79
30	0	1.59	0	0	27.18	42.72	50.48	85.43
40	0	0	0	2.85	31.07	46.60	58.25	89.32
50	2.49	0	0	0	38.83	54.37	62.13	93.20
60	0	0	3.89	2.49	42.72	62.13	73.79	100.97
90	0	1.47	2.13	1.55	50.48	58.25	77.65	100.97
120	2.49	0	0	2.49	54.36	62.13	77.67	100.97
150	1.85	0	2.45	0	54.36	66.02	81.55	97.08
180	0	3.12	0	0	54.37	62.13	77.67	97.08
240	0	2.15	0	0	54.36	62.13	77.67	97.09
300	0	1.85	0	2.49	54.36	62.14	77.67	97.09
360	3.89	0	3.12	2.45	54.37	62.13	77.67	97.08
420	0	3.42	2.85	0	54.36	62.14	77.65	97.09
480	1.85	0	0	0	54.37	62.13	77.65	97.08
540	0	3.89	1.59	0	54.36	62.14	77.67	97.08
600	0	2.45	0	0	54.36	62.14	77.67	97.08
660	0	0	0	0	54.36	62.13	77.67	97.08
720	0	0	0	0	54.36	62.13	77.67	97.08

ภาคผนวก ค

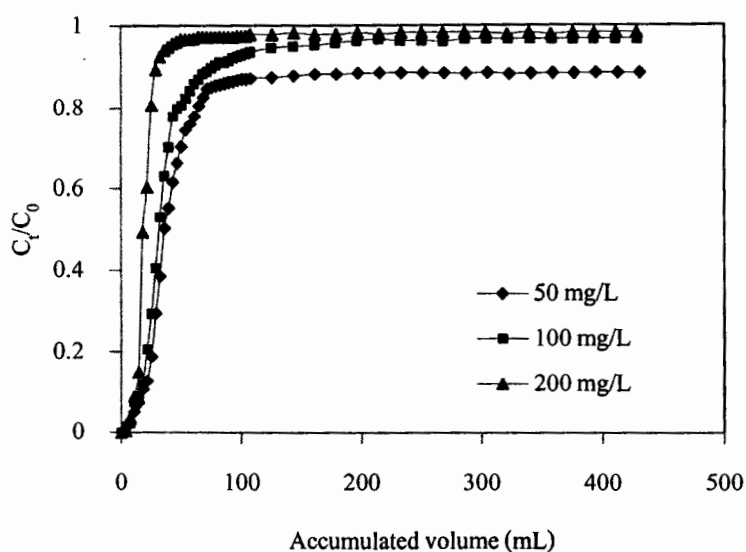
ผลการศึกษารอดชีวิตในระหว่างการรักษาแบบเบ็ดเสร็จ



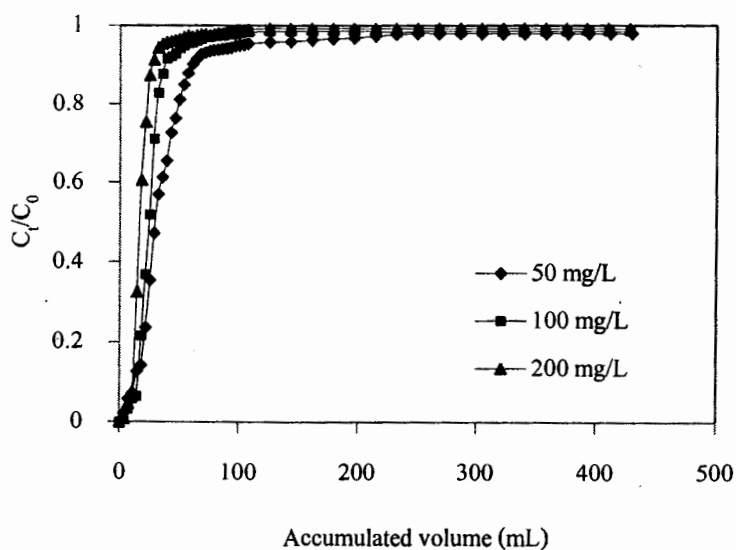
ภาพที่ ค.1 กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม RB5 ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่ความสูงของเบดแตก
ต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้น=100 mg/L และอัตราการไหล=3.57 ± 0.02 mL/min)



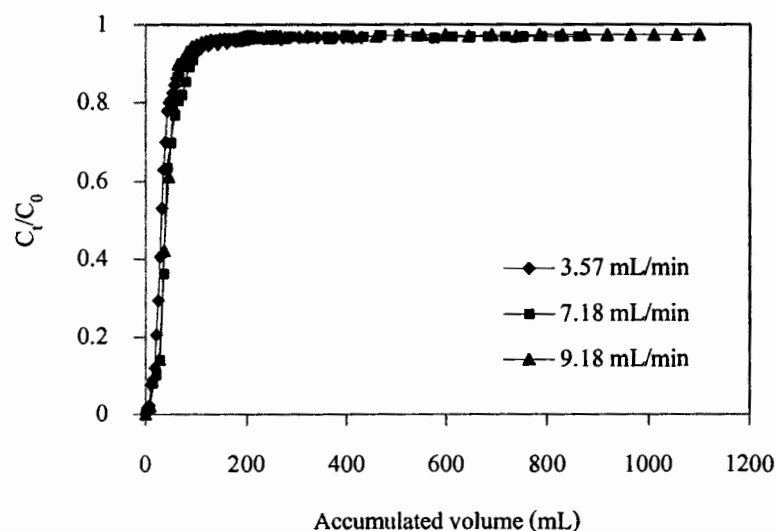
ภาพที่ ค.2 กราฟเบรคทรูของการดูดซับสีย้อม MO ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่ความสูงของเบดแตก
ต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้น=100 mg/L และอัตราการไหล=3.57 ± 0.02 mL/min)



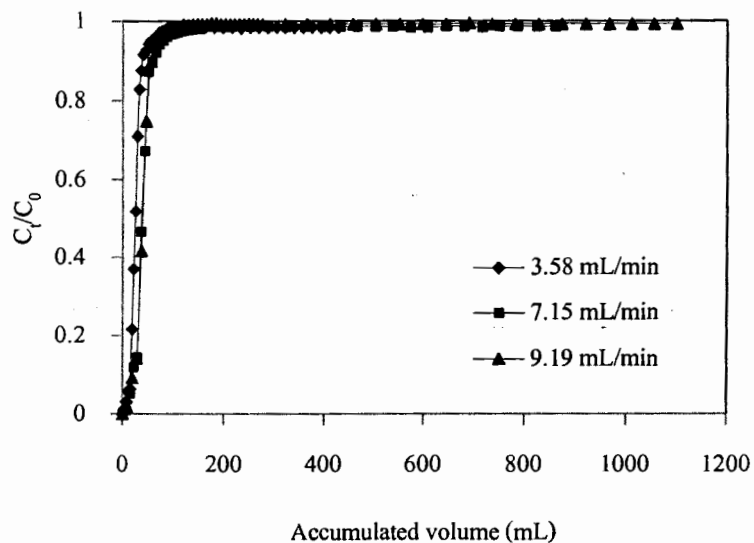
ภาพที่ ค.3 กราฟเบรคทูรของการดูดซับสีย้อม RB5 ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน (ความสูงของเบด = 15 cm และอัตราการไหล = 3.57 ± 0.02 mL/min)



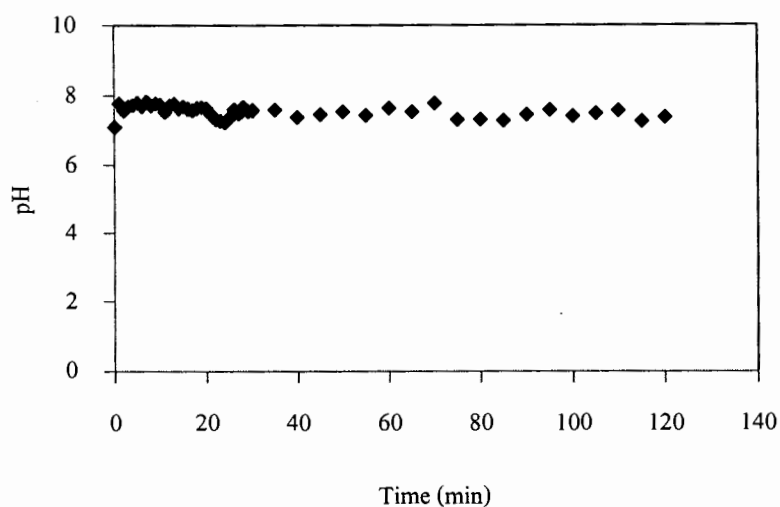
ภาพที่ ค.4 กราฟเบรคทูรของการดูดซับสีย้อม MO ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน (ความสูงของเบด = 15 cm และอัตราการไหล = 3.57 ± 0.02 mL/min)



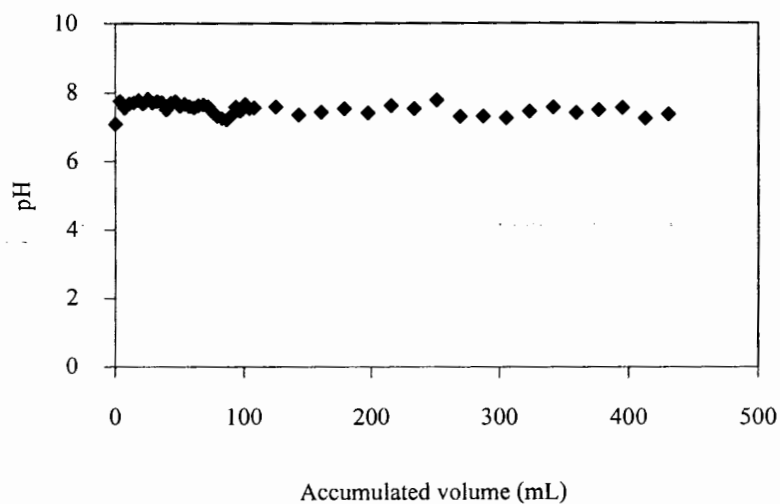
ภาพที่ ค.5 กราฟเบรคท루ของการดูดซับสีย้อม RB5 ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้น = 100 mg/L และความสูงของเบด = 15 cm)



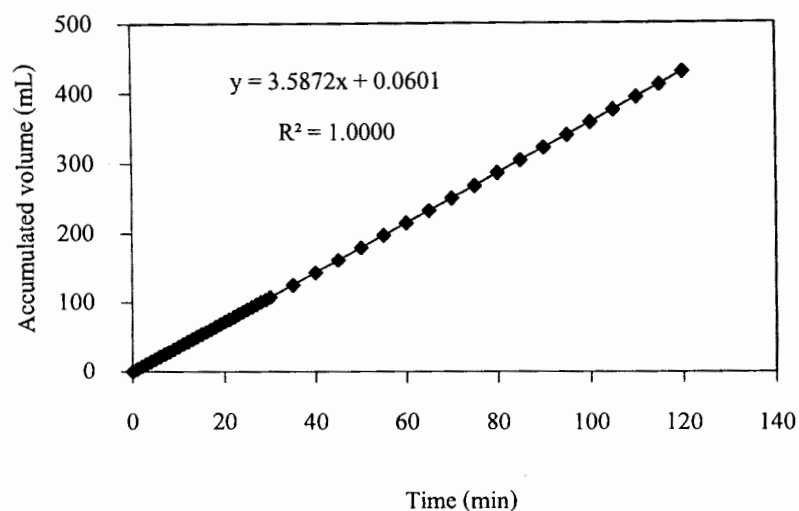
ภาพที่ ค.6 กราฟเบรคท루ของการดูดซับสีย้อม MO ด้วยแร่ดิน CTS/MMT ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้น = 100 mg/L และความสูงของเบด = 15 cm)



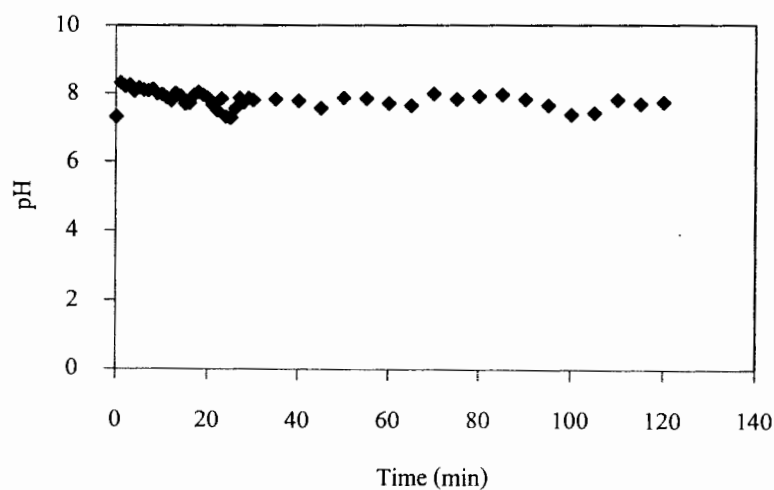
ภาพที่ ค.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลา โดยใช้เรซิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$
 $Q = 3.59 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



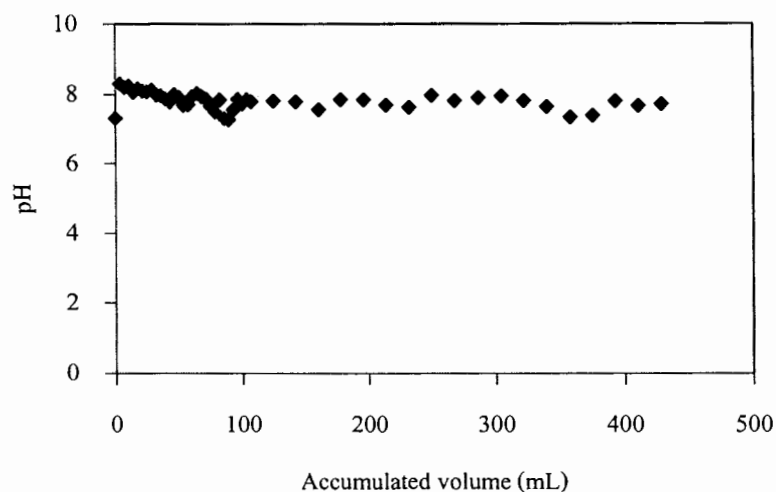
ภาพที่ ค.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับปริมาตรสะสมหลังจากผ่านหอดูดซับ โดยใช้เรซิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$
 $Q = 3.59 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



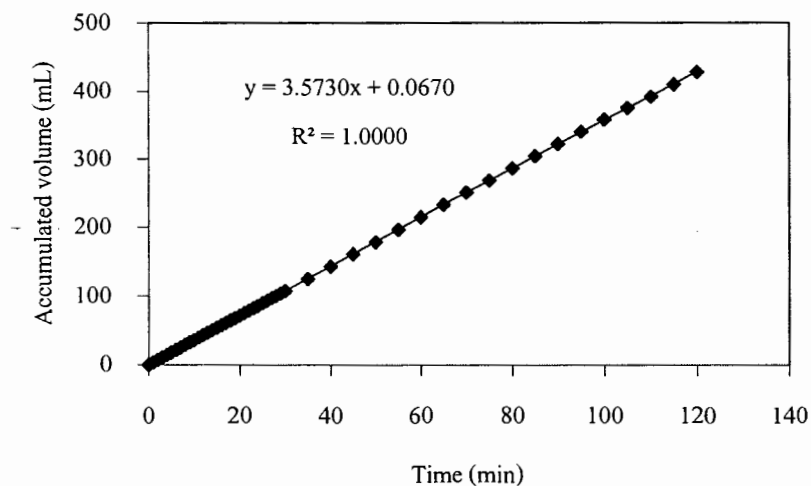
ภาพที่ ค.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 หลังผ่านหอดูดซับ กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$
 $Q = 3.59 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



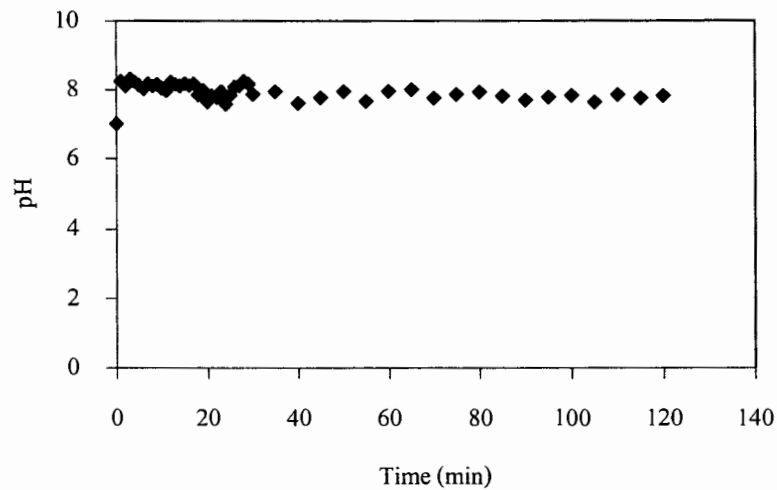
ภาพที่ ค.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$
 $Q = 3.57 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



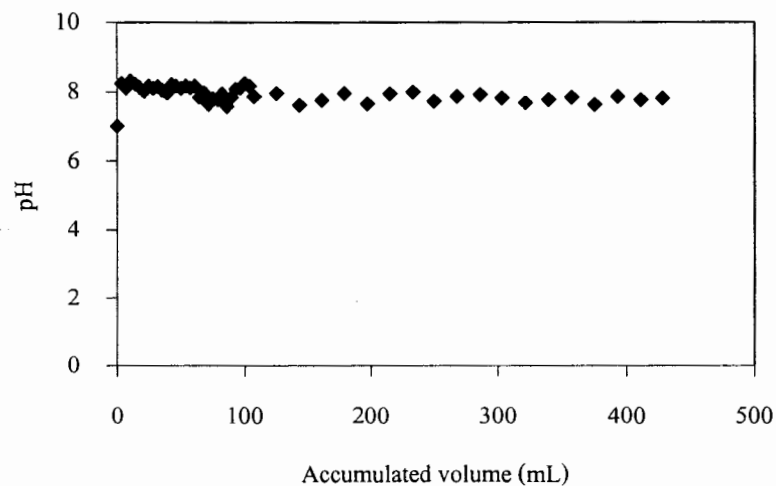
ภาพที่ ค.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับปริมาตรสะสมหลังผ่านหอดูดซับ โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



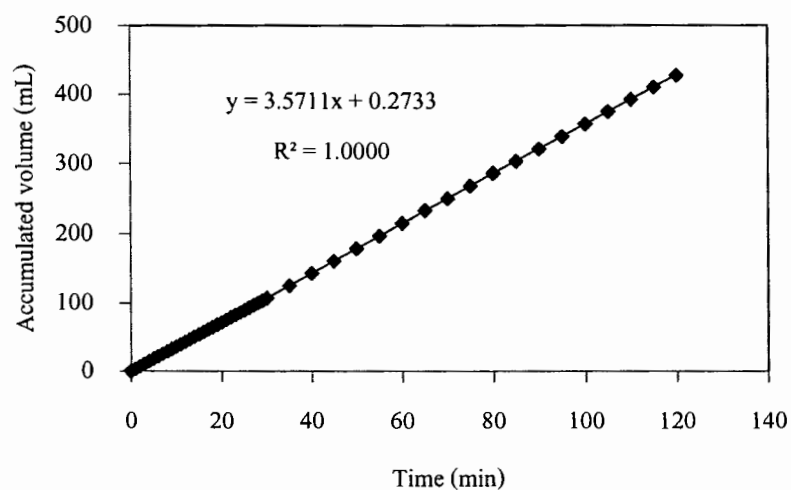
ภาพที่ ค.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



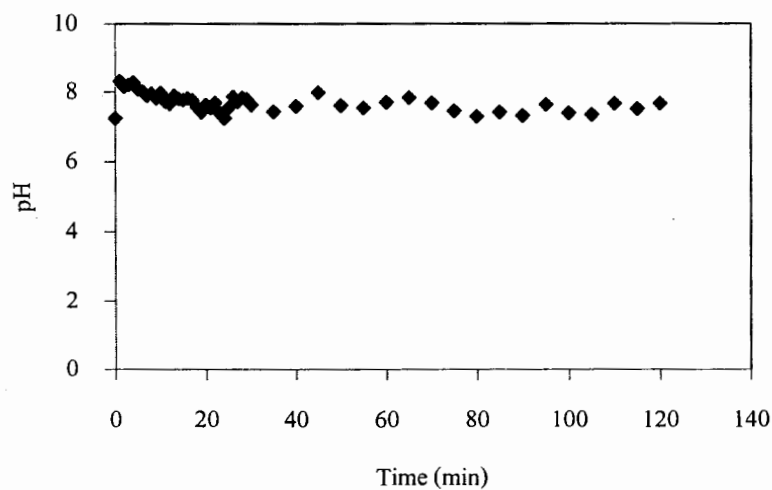
ภาพที่ ค.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



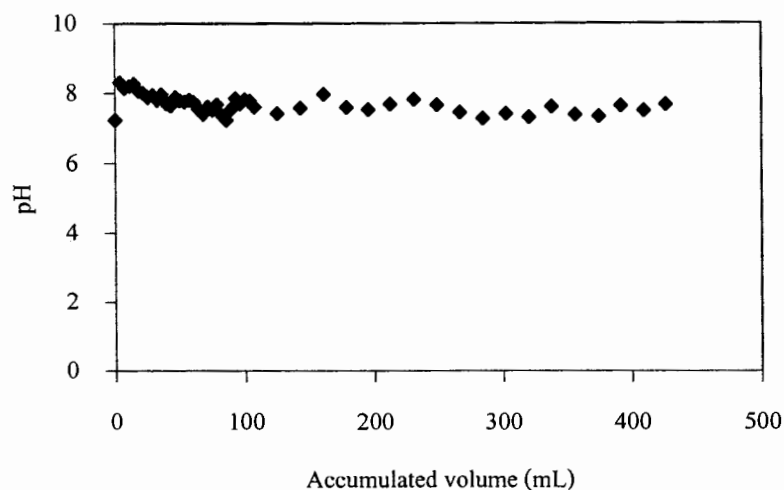
ภาพที่ ค.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับปริมาตรสะสมหลังผ่านหอดูดซับ โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



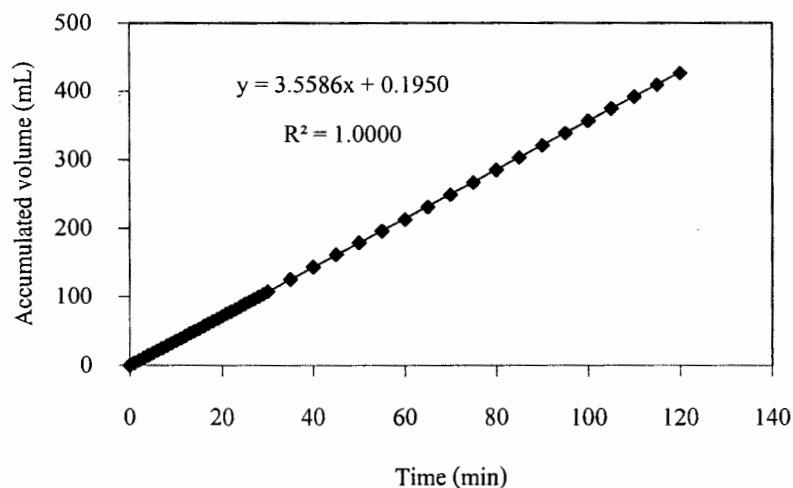
ภาพที่ ค.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 หลังผ่านหอดูดซับ กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$
 $Q = 3.57 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



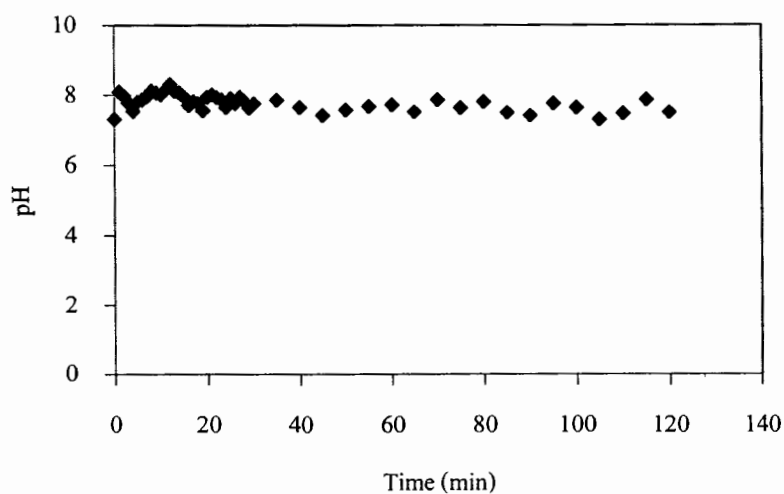
ภาพที่ ค.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 20 \text{ cm}$
 $Q = 3.56 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



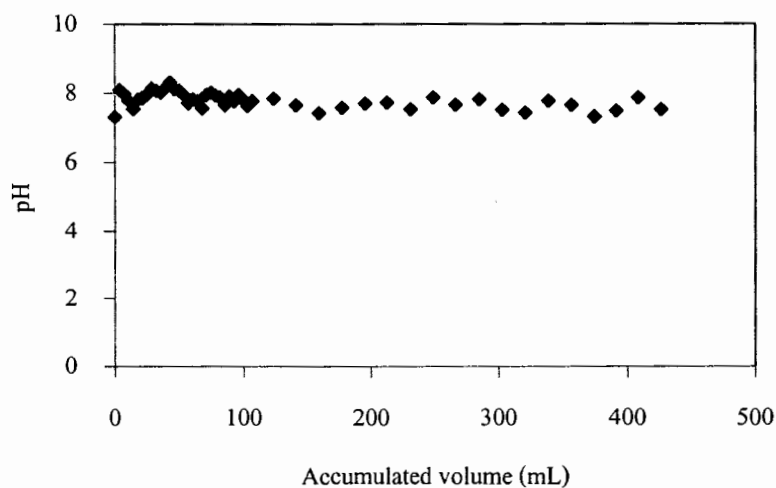
ภาพที่ ค.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับปริมาตรสะสมหลังจากผ่านหอดูดซับ โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 20 \text{ cm}$ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



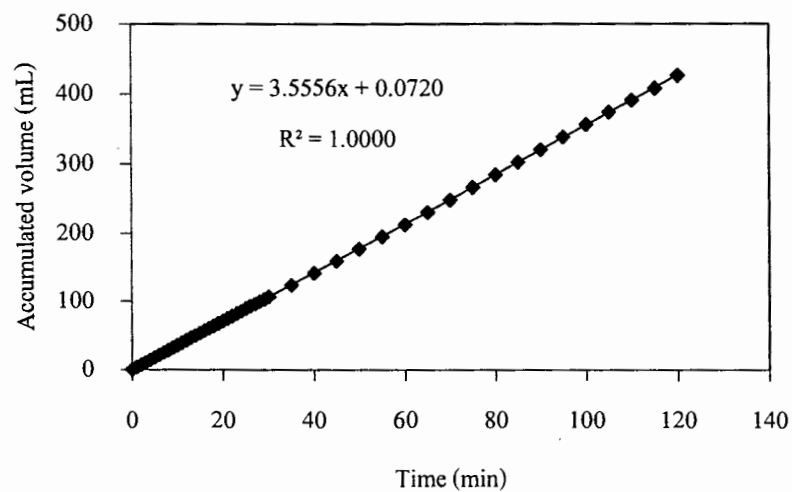
ภาพที่ ค.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 หลังจากผ่านหอดูดซับ กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 20 \text{ cm}$ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



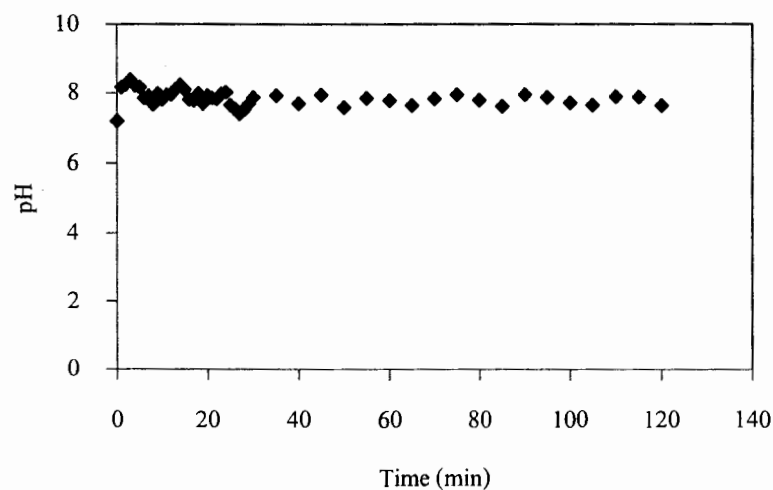
ภาพที่ ค.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 25 \text{ cm}$ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



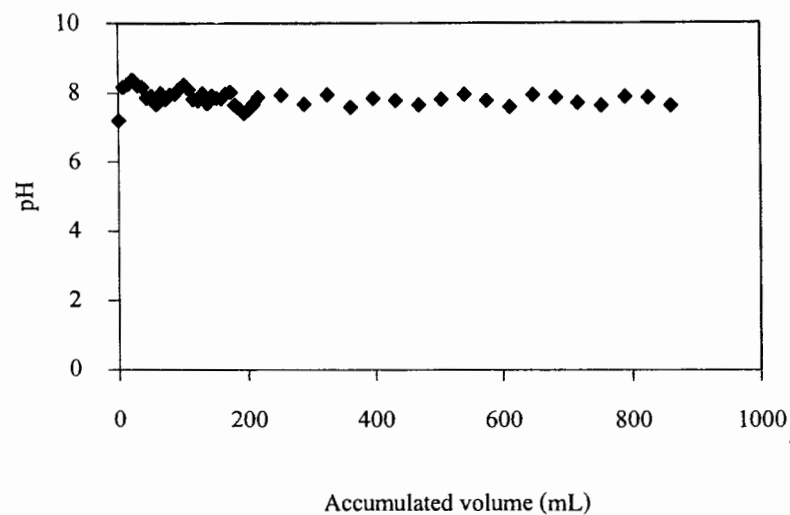
ภาพที่ ค.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับปริมาตรสะสมหลังจากผ่านหอดูดซับ โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 25 \text{ cm}$ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



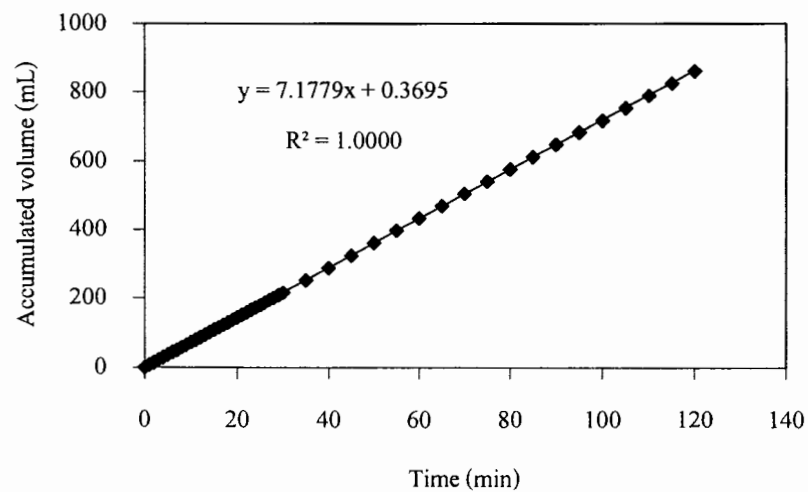
ภาพที่ ค.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 หลังผ่านหอดูดซับ กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 25 \text{ cm}$
 $Q = 3.56 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



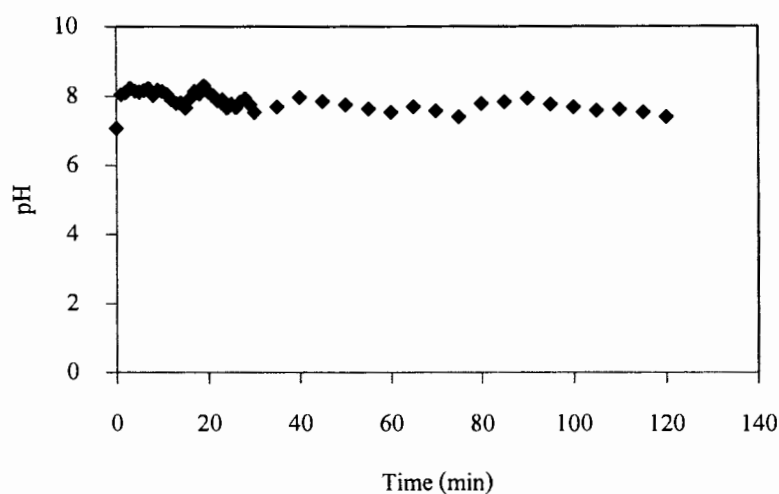
ภาพที่ ค.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$
 $Q = 7.18 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



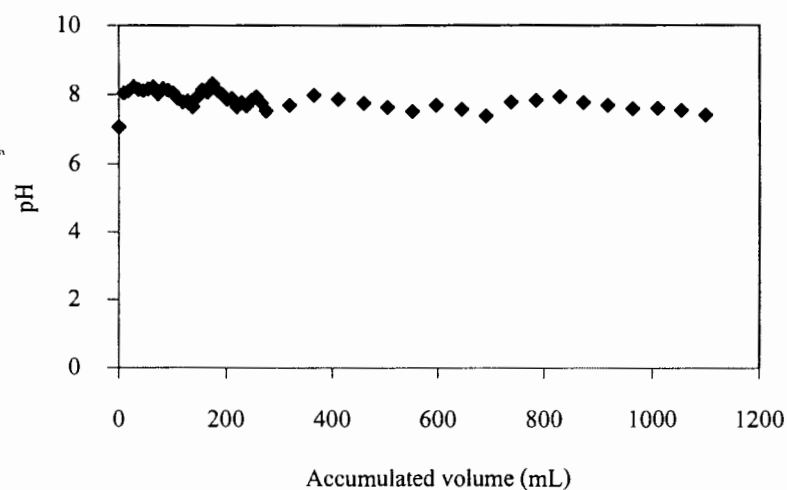
ภาพที่ ค.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับปริมาตรสะสมหลังผ่านหอดูดซับ โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 7.18 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



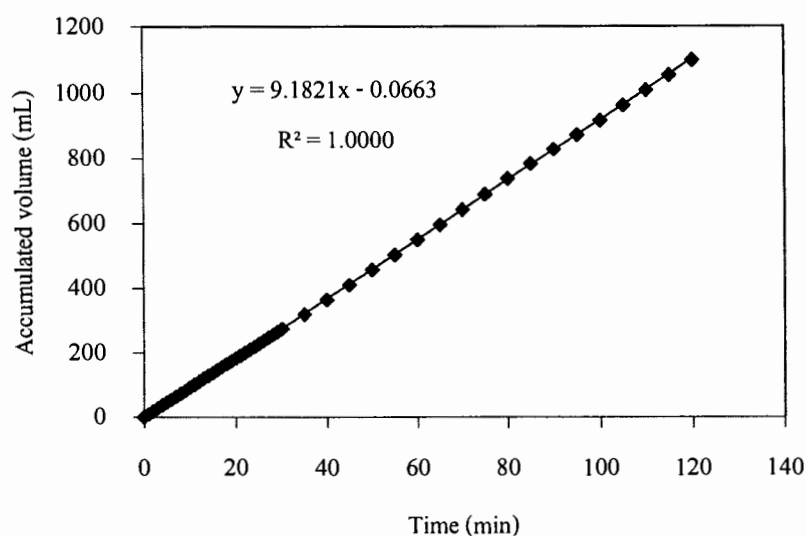
ภาพที่ ค.24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 7.18 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



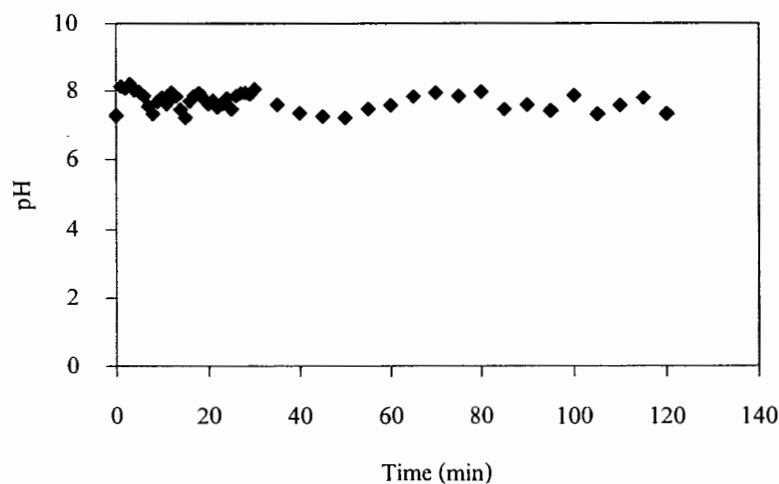
ภาพที่ ค.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 9.18 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



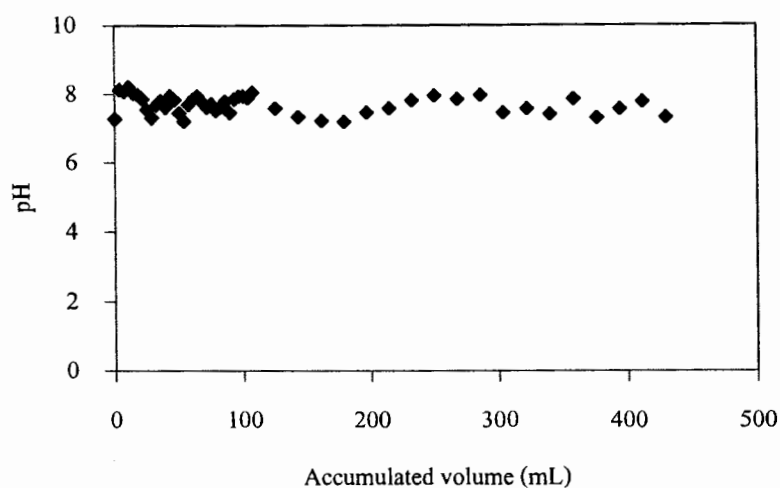
ภาพที่ ค.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 กับปริมาตรสะสมหลังจากผ่านหอดูดซับ โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 9.18 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



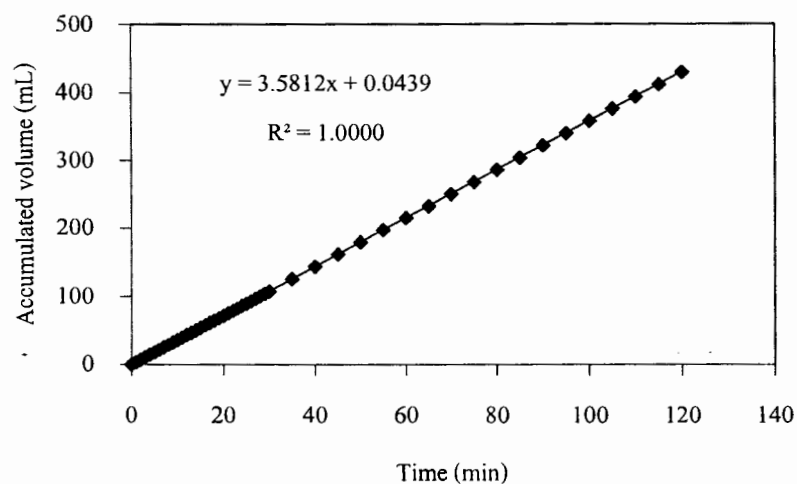
ภาพที่ ค.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม RB5 หลังผ่านหอดูดซับ กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$
 $Q = 9.18 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



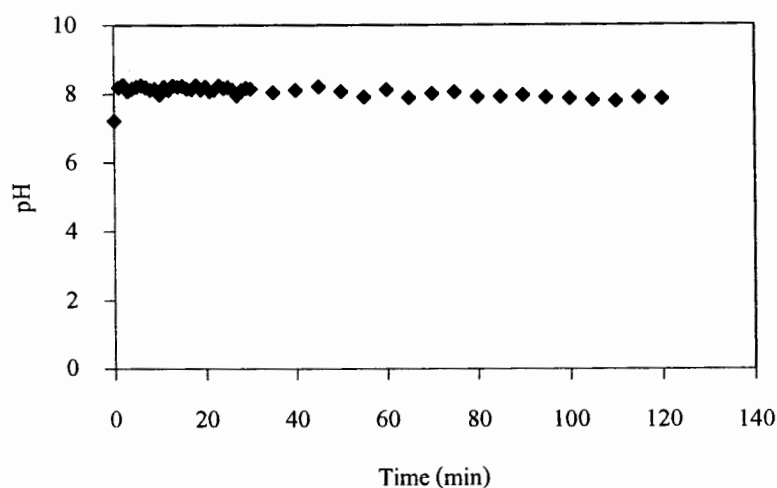
ภาพที่ ค.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$
 $Q = 3.58 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



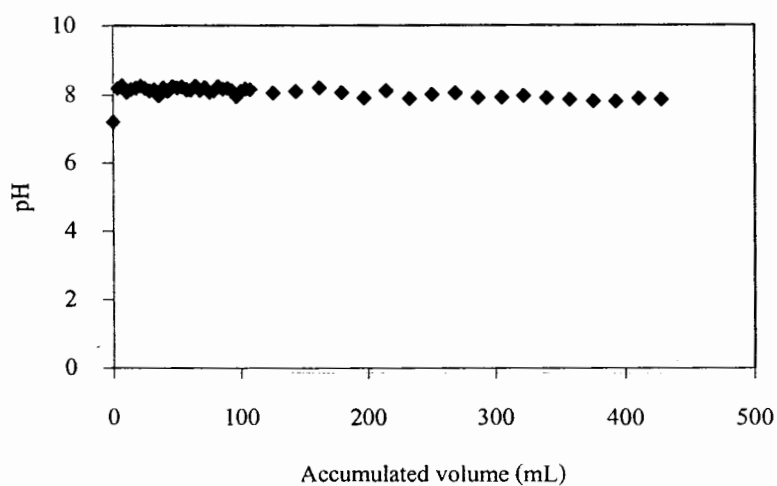
ภาพที่ ค.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับปริมาตรสะสมหลังผ่านหอดูดซับ โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 3.58 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



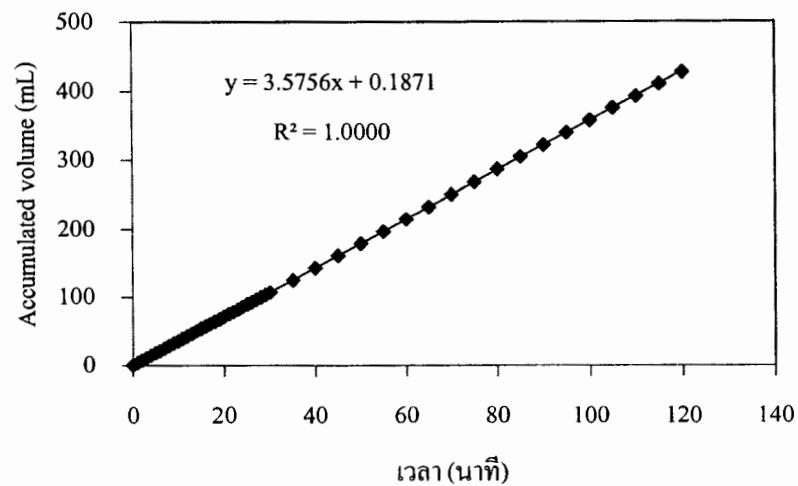
ภาพที่ ค.30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 3.58 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



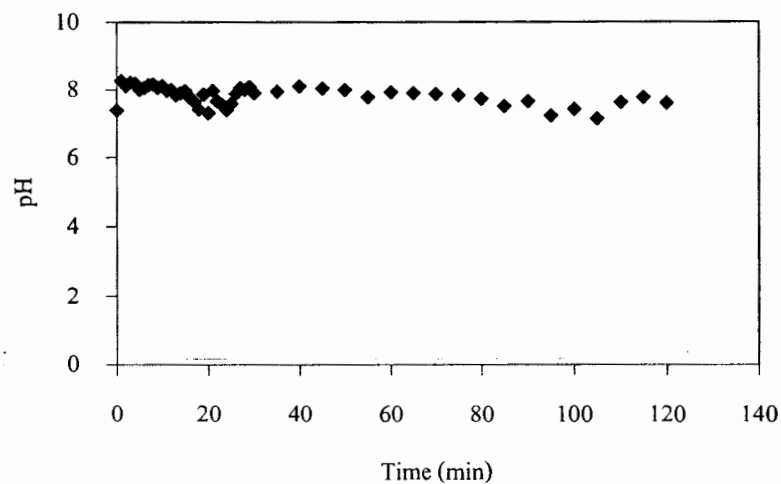
ภาพที่ ค.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 3.58 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



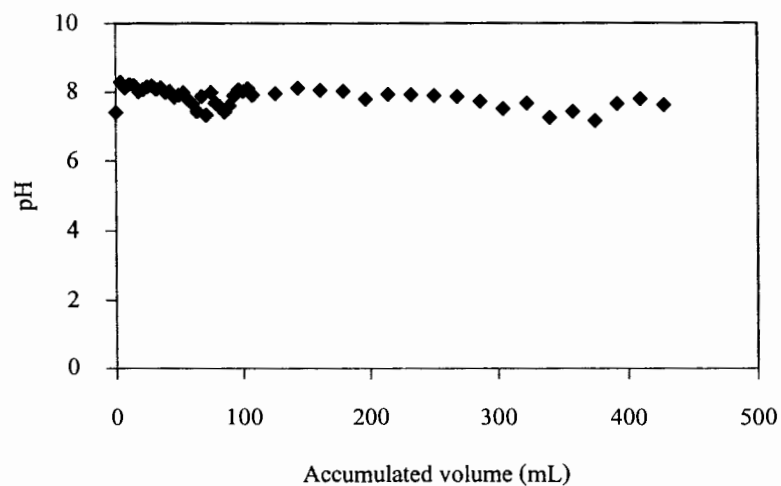
ภาพที่ ค.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับปริมาตรสะสมหลังจากผ่านหอดูดซับ โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 3.58 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



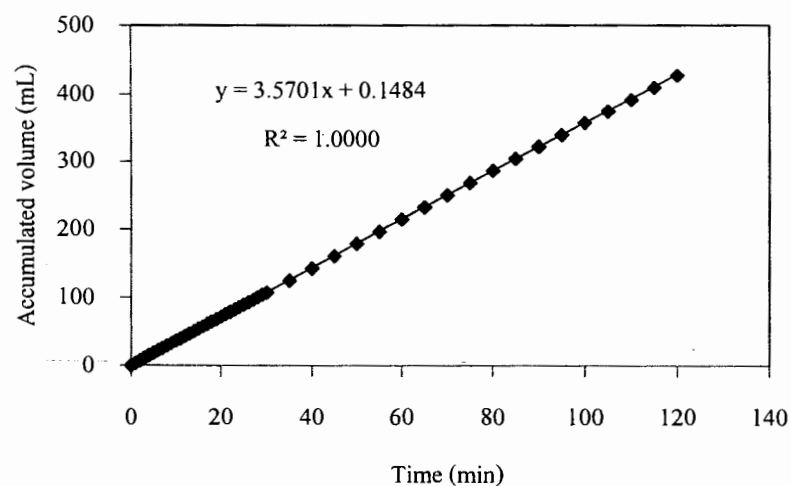
ภาพที่ ก.33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO หลังผ่านหอดูดซับ กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 3.58 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



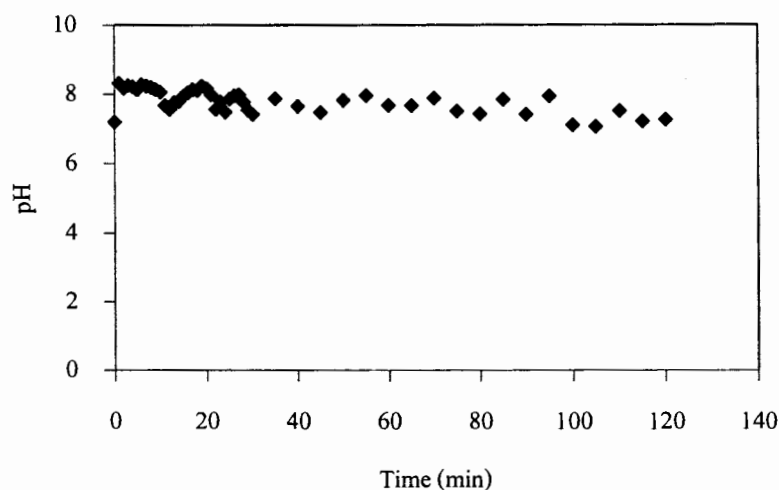
ภาพที่ ก.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



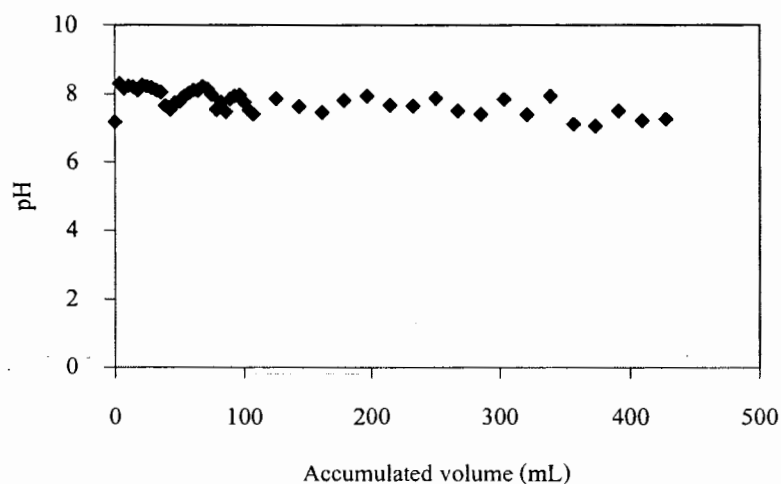
ภาพที่ ค.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับปริมาตรสะสมหลังผ่านหอดูดซับ โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



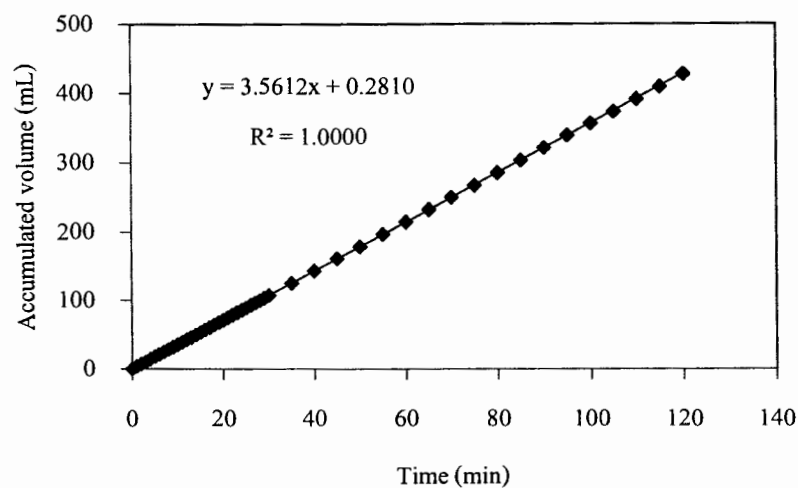
ภาพที่ ค.36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 200 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 3.57 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



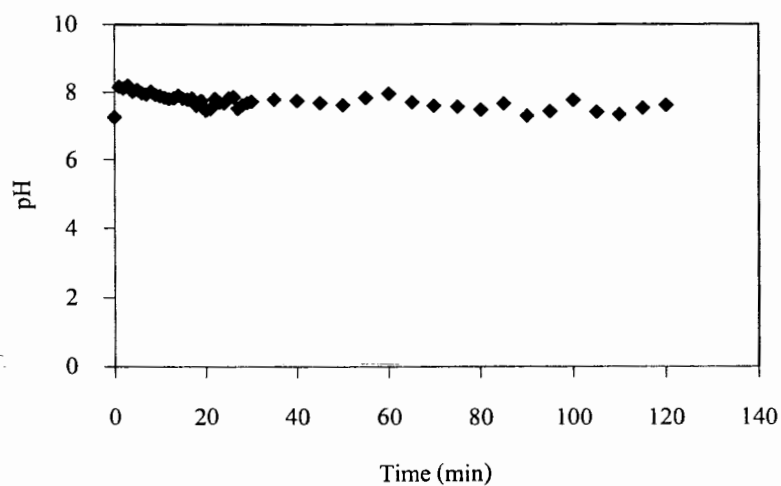
ภาพที่ ค.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 20 \text{ cm}$ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



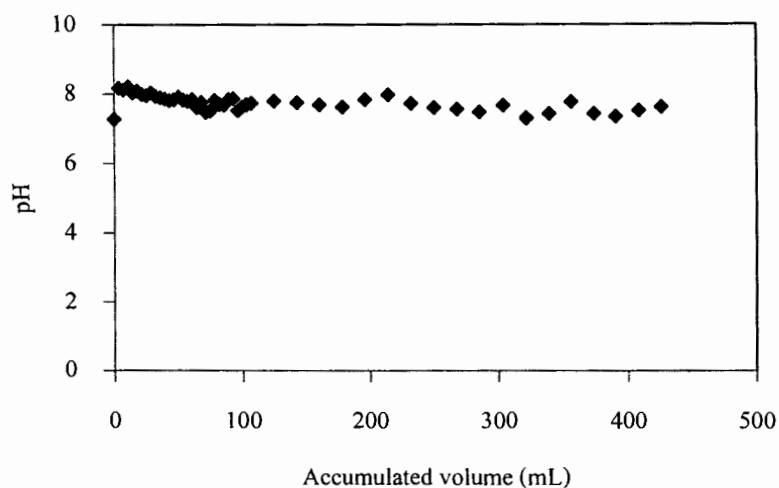
ภาพที่ ค.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับปริมาตรสะสมหลังผ่านหอดูดซับ โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 20 \text{ cm}$ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



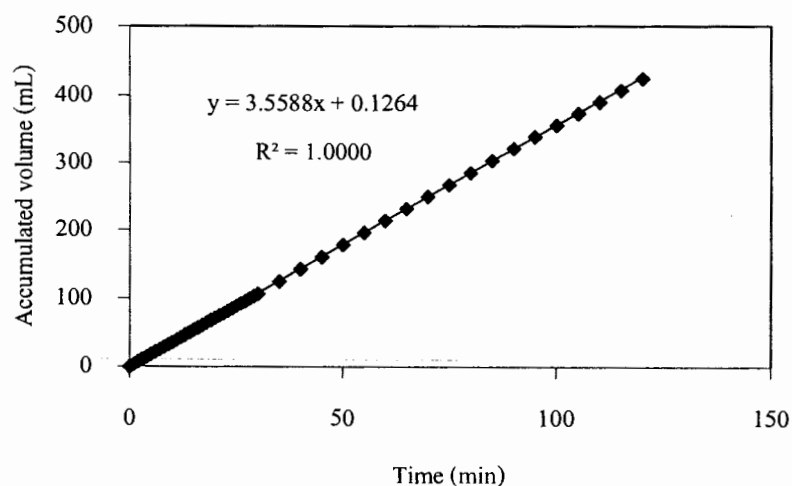
ภาพที่ ค.39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO หลังผ่านหอดูดซับ กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 20 \text{ cm}$
 $Q = 3.56 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



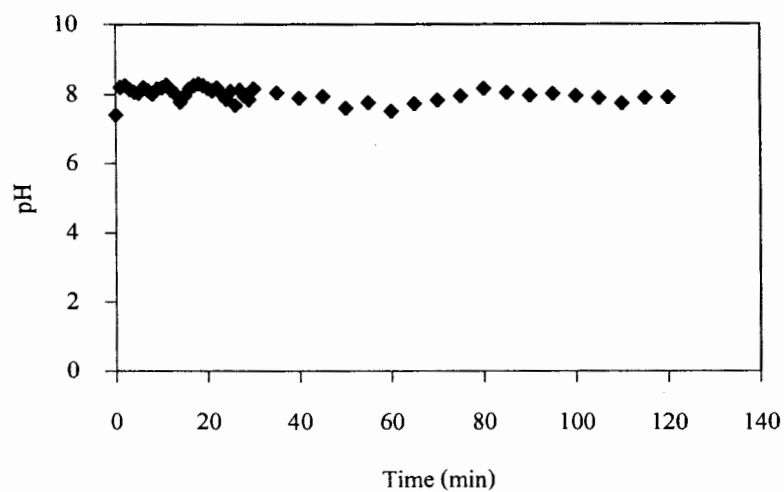
ภาพที่ ค.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 25 \text{ cm}$
 $Q = 3.56 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



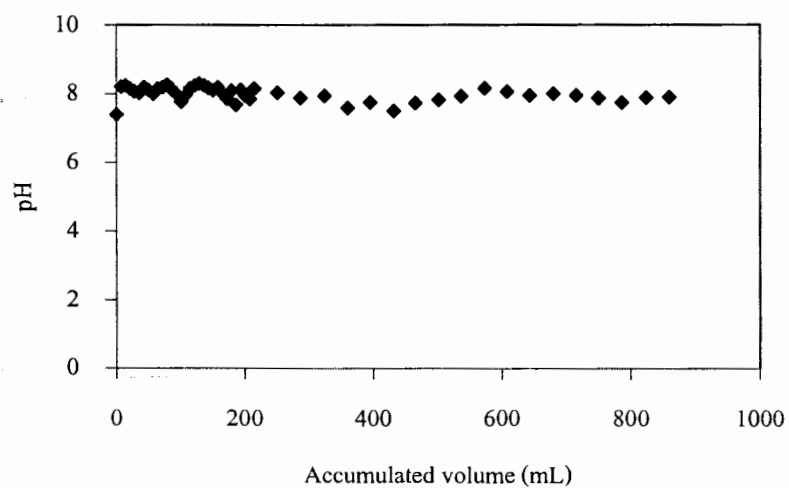
ภาพที่ ค.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับปริมาตรสะสมหลังผ่านหอดูดซับ โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 25 \text{ cm}$ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



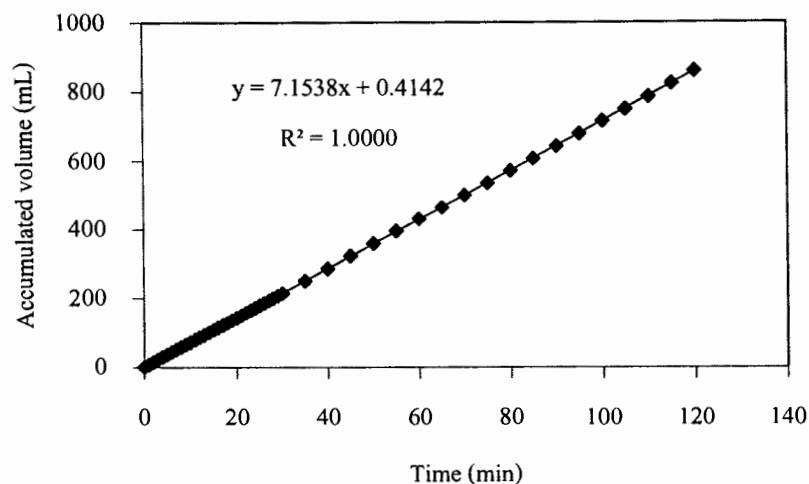
ภาพที่ ค.42 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO หลังผ่านหอดูดซับ กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 25 \text{ cm}$ $Q = 3.56 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



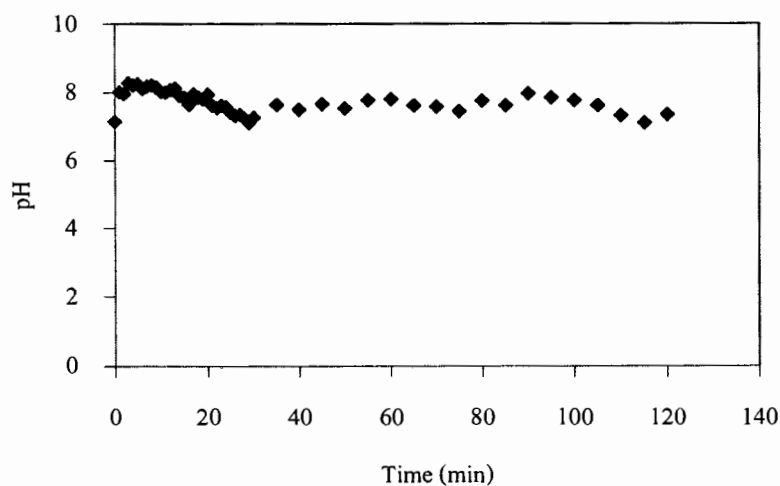
ภาพที่ ก.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 7.15 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



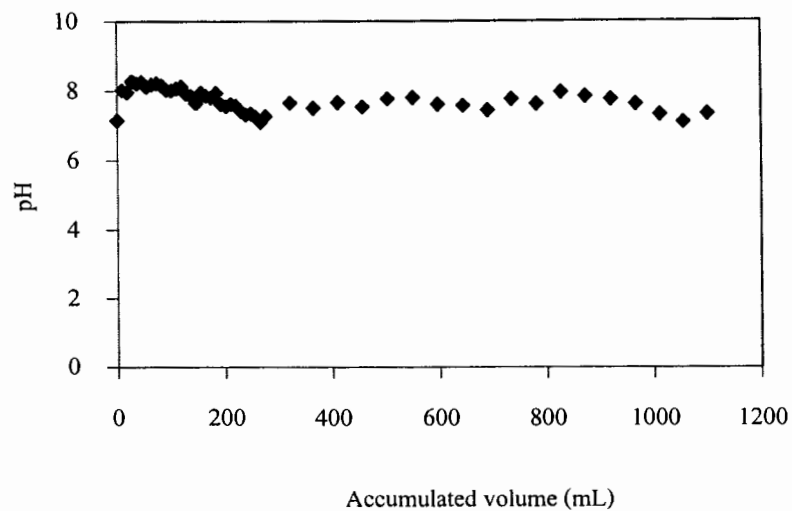
ภาพที่ ก.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับปริมาตรสะสมหลังผ่านหอดูดซับ โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 7.15 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



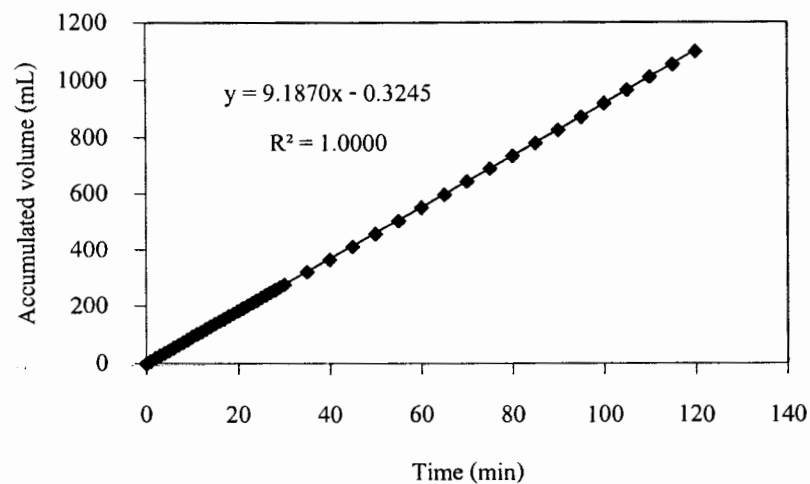
ภาพที่ ค.45 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO หลังผ่านหอดูดซับ กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$
 $Q = 7.15 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



ภาพที่ ค.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับในระบบหอดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$
 $Q = 9.19 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



ภาพที่ ค.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO กับปริมาตรสะสมหลังผ่านหอดูดซับ โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 9.19 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$



ภาพที่ ค.48 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสะสมของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MO หลังผ่านหอดูดซับกับเวลา โดยใช้แร่ดิน CTS/MMT เป็นตัวดูดซับ ที่ $C_0 = 100 \text{ mg/L}$ $H = 15 \text{ cm}$ $Q = 9.19 \text{ mL/min}$ และ $\text{pH}_0 = 7 \pm 0.5$

ตารางที่ ก.1 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหลอดซั้บกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม RB5 ที่ความสูงของเบดแตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min)

เวลา (นาทึ)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C/C_0			C/C_0		
	ที่ความสูงของเบด (cm) แตกต่างกััน			ที่ความสูงของเบด (cm) แตกต่างกััน		
	15	20	25	15	20	25
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	0.0155	0.0086	0.0051
2	1.0000	1.0000	1.0000	0.0223	0.0120	0.0120
3	1.0000	1.0000	1.0000	0.0756	0.0309	0.0240
4	0.9983	1.0000	0.9965	0.0911	0.0532	0.0394
5	1.0000	0.9965	1.0000	0.1203	0.0875	0.0703
6	0.9983	1.0000	1.0000	0.2062	0.0978	0.0909
7	0.9966	0.9965	1.0000	0.2938	0.2024	0.1252
8	1.0000	0.9982	1.0000	0.4055	0.2813	0.1647
9	1.0000	0.9965	0.9965	0.5309	0.4683	0.3173
10	1.0000	1.0000	0.9982	0.6306	0.5352	0.4202
11	1.0000	1.0000	0.9965	0.6993	0.6072	0.4991
12	1.0000	1.0000	1.0000	0.7784	0.6432	0.5111
13	0.9966	1.0000	1.0000	0.7989	0.6741	0.5506
14	0.9983	1.0000	0.9982	0.8076	0.7153	0.5729
15	1.0000	0.9982	1.0000	0.8247	0.7461	0.6038
16	1.0000	0.9982	1.0000	0.8436	0.7753	0.6518
17	1.0000	1.0000	0.9965	0.8608	0.8027	0.6981
18	0.9983	1.0000	1.0000	0.8711	0.8250	0.7444
19	1.0000	1.0000	1.0000	0.8849	0.8371	0.7736
20	1.0000	1.0000	1.0000	0.8900	0.8525	0.8045
21	1.0000	1.0000	0.9965	0.8986	0.8593	0.8250

ตารางที่ ค.1 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหลอดซึบกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C_t/C_0) ของสีย้อม RB5 ที่ความสูงของเบดแตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C_t/C_0			C_t/C_0		
	ที่ความสูงของเบด (cm) แตกต่างกัน			ที่ความสูงของเบด (cm) แตกต่างกัน		
	15	20	25	15	20	25
22	1.0000	0.9982	1.0000	0.9055	0.8645	0.8439
23	1.0000	0.9965	1.0000	0.9124	0.8696	0.8542
24	1.0000	1.0000	1.0000	0.9124	0.8765	0.8628
25	1.0000	1.0000	0.9965	0.9158	0.8816	0.8713
26	0.9983	0.9982	1.0000	0.9227	0.8867	0.8731
27	0.9983	1.0000	1.0000	0.9261	0.8936	0.8713
28	0.9983	0.9965	0.9965	0.9295	0.9005	0.8765
29	1.0000	1.0000	1.0000	0.9329	0.9022	0.8799
30	1.0000	1.0000	0.9965	0.9364	0.9056	0.8902
35	1.0000	1.0000	1.0000	0.9467	0.9108	0.8937
40	1.0000	1.0000	1.0000	0.9502	0.9125	0.8970
45	1.0000	1.0000	1.0000	0.9536	0.9177	0.9022
50	1.0000	0.9983	1.0000	0.9587	0.9245	0.9057
55	1.0000	1.0000	1.0000	0.9639	0.9314	0.9108
60	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9365	0.9159
65	1.0000	1.0000	1.0000	0.9639	0.9331	0.9159
70	1.0000	1.0000	1.0000	0.9639	0.9331	0.9159
75	1.0000	1.0000	1.0000	0.9622	0.9365	0.9159
80	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9331	0.9159
85	1.0000	1.0000	0.9982	0.9673	0.9365	0.9159
90	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9331	0.9159
95	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9365	0.9159

ตารางที่ ค.1 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหลอดซึบกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C_t/C_0) ของสีย้อม RB5 ที่ความสูงของเบดแตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C_t/C_0 ที่ความสูงของเบด (cm) แตกต่างกัน			C_t/C_0 ที่ความสูงของเบด (cm) แตกต่างกัน		
	15	20	25	15	20	25
100	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9365	0.9159
105	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9365	0.9159
110	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9365	0.9159
115	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9365	0.9159
120	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9365	0.9159

ตารางที่ ก.2 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหลอดซึบกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C_t/C_0) ของสีย้อม RB5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน (ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C_t/C_0 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) แตกต่างกัน			C_t/C_0 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) แตกต่างกัน		
	50	100	200	50	100	200
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1	0.9971	1.0000	1.0000	0.0122	0.0155	0.0033
2	0.9981	1.0000	1.0000	0.0254	0.0223	0.0344
3	1.0000	1.0000	0.9980	0.0519	0.0756	0.0889
4	1.0000	0.9983	0.9942	0.0733	0.0911	0.1493
5	0.9971	1.0000	0.9980	0.1069	0.1203	0.4938
6	1.0000	0.9983	1.0000	0.1283	0.2062	0.6028
7	1.0000	0.9966	1.0000	0.1884	0.2938	0.8073
8	1.0000	1.0000	1.0000	0.2943	0.4055	0.8949
9	0.9990	1.0000	1.0000	0.3859	0.5309	0.9260
10	0.9971	1.0000	1.0000	0.5031	0.6306	0.9416
11	1.0000	1.0000	0.9980	0.5519	0.6993	0.9494
12	1.0000	1.0000	1.0000	0.6151	0.7784	0.9572
13	1.0000	0.9966	1.0000	0.6609	0.7989	0.9611
14	1.0000	0.9983	1.0000	0.7006	0.8076	0.9669
15	1.0000	1.0000	1.0000	0.7413	0.8247	0.9669
16	1.0000	1.0000	1.0000	0.7586	0.8436	0.9669
17	0.9990	1.0000	1.0000	0.7790	0.8608	0.9688
18	1.0000	0.9983	1.0000	0.8055	0.8711	0.9727
19	1.0000	1.0000	0.9980	0.8269	0.8849	0.9727
20	1.0000	1.0000	1.0000	0.8483	0.8900	0.9727
21	1.0000	1.0000	1.0000	0.8523	0.8986	0.9727

ตารางที่ ค.2 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหอดูดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C_t/C_0) ของสีย้อม RB5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน (ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C_t/C_0 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) แตกต่างกัน			C_t/C_0 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) แตกต่างกัน		
	50	100	200	50	100	200
22	1.0000	1.0000	1.0000	0.8564	0.9055	0.9727
23	1.0000	1.0000	1.0000	0.8584	0.9124	0.9727
24	1.0000	1.0000	0.9980	0.8615	0.9124	0.9727
25	1.0000	1.0000	1.0000	0.8645	0.9158	0.9727
26	0.9990	0.9983	1.0000	0.8666	0.9227	0.9727
27	0.9990	0.9983	1.0000	0.8696	0.9261	0.9746
28	1.0000	0.9983	1.0000	0.8717	0.9295	0.9746
29	1.0000	1.0000	1.0000	0.8717	0.9329	0.9746
30	0.9990	1.0000	1.0000	0.8737	0.9364	0.9785
35	0.9981	1.0000	1.0000	0.8757	0.9467	0.9785
40	1.0000	1.0000	1.0000	0.8798	0.9502	0.9824
45	1.0000	1.0000	1.0000	0.8839	0.9536	0.9785
50	1.0000	1.0000	0.9980	0.8839	0.9587	0.9785
55	1.0000	1.0000	1.0000	0.8859	0.9639	0.9824
60	1.0000	1.0000	1.0000	0.8869	0.9673	0.9785
65	1.0000	1.0000	1.0000	0.8869	0.9639	0.9824
70	1.0000	1.0000	1.0000	0.8869	0.9639	0.9824
75	1.0000	1.0000	1.0000	0.8859	0.9622	0.9824
80	1.0000	1.0000	1.0000	0.8849	0.9673	0.9824
85	0.9990	1.0000	1.0000	0.8869	0.9673	0.9824
90	1.0000	1.0000	1.0000	0.8839	0.9673	0.9785
95	1.0000	1.0000	1.0000	0.8849	0.9673	0.9824

ตารางที่ ก.2 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหอดูดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C_t/C_0) ของสีย้อม RB5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน (ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C_t/C_0 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) แตกต่างกัน			C_t/C_0 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) แตกต่างกัน		
	50	100	200	50	100	200
100	1.0000	1.0000	1.0000	0.8859	0.9673	0.9785
105	1.0000	1.0000	1.0000	0.8849	0.9673	0.9825
110	1.0000	1.0000	1.0000	0.8869	0.9673	0.9825
115	1.0000	1.0000	1.0000	0.8859	0.9673	0.9825
120	1.0000	1.0000	1.0000	0.8859	0.9673	0.9825

ตารางที่ ค.3 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหอดูดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C_t/C_0) ของสีย้อม RB5 ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน (ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C_t/C_0 ที่อัตราการไหล (mL/min) แตกต่างกัน			C_t/C_0 ที่อัตราการไหล (mL/min) แตกต่างกัน		
	3.57	7.18	9.18	3.57	7.18	9.18
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	0.0155	0.0153	0.0207
2	1.0000	1.0000	1.0000	0.0223	0.0801	0.1052
3	1.0000	1.0000	1.0000	0.0756	0.1056	0.1431
4	0.9983	1.0000	1.0000	0.0911	0.1413	0.4224
5	1.0000	1.0000	1.0000	0.1203	0.3628	0.6120
6	0.9983	0.9965	0.9982	0.2062	0.6354	0.7896
7	0.9966	1.0000	0.9982	0.2938	0.6984	0.8982
8	1.0000	1.0000	0.9982	0.4055	0.7683	0.9103
9	1.0000	1.0000	1.0000	0.5309	0.8040	0.9310
10	1.0000	0.9982	0.9948	0.6306	0.8194	0.9448
11	1.0000	0.9982	1.0000	0.6993	0.8534	0.9500
12	1.0000	0.9965	1.0000	0.7784	0.8909	0.9552
13	0.9966	0.9965	1.0000	0.7989	0.9097	0.9586
14	0.9983	0.9982	0.9982	0.8076	0.9386	0.9620
15	1.0000	1.0000	1.0000	0.8247	0.9454	0.9603
16	1.0000	1.0000	0.9982	0.8436	0.9505	0.9637
17	1.0000	0.9982	0.9982	0.8608	0.9523	0.9637
18	0.9983	1.0000	1.0000	0.8711	0.9591	0.9637
19	1.0000	0.9982	1.0000	0.8849	0.9591	0.9637
20	1.0000	1.0000	0.9982	0.8900	0.9625	0.9603
21	1.0000	0.9982	1.0000	0.8986	0.9625	0.9620

ตารางที่ ๓.3 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหลอดซั้บกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม RB5 ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน (ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C/C_0 ที่อัตราการไหล (mL/min) แตกต่างกัน			C/C_0 ที่อัตราการไหล (mL/min) แตกต่างกัน		
	3.57	7.18	9.18	3.57	7.18	9.18
22	1.0000	1.0000	0.9982	0.9055	0.9591	0.9655
23	1.0000	1.0000	0.9982	0.9124	0.9642	0.9672
24	1.0000	1.0000	1.0000	0.9124	0.9642	0.9672
25	1.0000	0.9982	1.0000	0.9158	0.9659	0.9672
26	0.9983	0.9965	1.0000	0.9227	0.9659	0.9706
27	0.9983	1.0000	1.0000	0.9261	0.9693	0.9655
28	0.9983	0.9965	1.0000	0.9295	0.9727	0.9672
29	1.0000	0.9982	1.0000	0.9329	0.9727	0.9706
30	1.0000	0.9982	1.0000	0.9364	0.9693	0.9672
35	1.0000	1.0000	1.0000	0.9467	0.9727	0.9706
40	1.0000	1.0000	0.9982	0.9502	0.9693	0.9672
45	1.0000	1.0000	0.9982	0.9536	0.9693	0.9706
50	1.0000	0.9982	1.0000	0.9587	0.9693	0.9706
55	1.0000	0.9982	1.0000	0.9639	0.9727	0.9741
60	1.0000	1.0000	0.9982	0.9673	0.9693	0.9741
65	1.0000	1.0000	1.0000	0.9639	0.9727	0.9741
70	1.0000	1.0000	1.0000	0.9639	0.9727	0.9706
75	1.0000	1.0000	0.9982	0.9622	0.9693	0.9741
80	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9659	0.9706
85	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9693	0.9741
90	1.0000	1.0000	0.9982	0.9673	0.9693	0.9741
95	1.0000	1.0000	0.9982	0.9673	0.9693	0.9741

ตารางที่ ค.3 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหลอดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม RB5 ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน (ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C/C_0 ที่อัตราการไหล (mL/min) แตกต่างกัน			C/C_0 ที่อัตราการไหล (mL/min) แตกต่างกัน		
	3.57	7.18	9.18	3.57	7.18	9.18
100	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9693	0.9741
105	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9693	0.9741
110	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9693	0.9741
115	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9693	0.9741
120	1.0000	1.0000	1.0000	0.9673	0.9693	0.9741

ตารางที่ ค.4 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหลอดซั้บกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม MO ที่ความสูงของเบดแตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C/C_0			C/C_0		
	ที่ความสูงของเบด (cm) แตกต่างกัน			ที่ความสูงของเบด (cm) แตกต่างกัน		
	15	20	25	15	20	25
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	0.0174	0.0138	0.0057
2	1.0000	1.0000	1.0000	0.0429	0.0426	0.0150
3	1.0000	1.0000	1.0000	0.0835	0.0680	0.0508
4	1.0000	1.0000	0.9988	0.0951	0.0980	0.1052
5	0.9988	0.9976	1.0000	0.2018	0.2468	0.1329
6	0.9988	1.0000	1.0000	0.3723	0.4117	0.3514
7	1.0000	1.0000	0.9976	0.5208	0.5224	0.4924
8	1.0000	1.0000	1.0000	0.7111	0.5743	0.5156
9	0.9976	0.9976	0.9976	0.8109	0.6286	0.5514
10	1.0000	1.0000	1.0000	0.8758	0.7001	0.5872
11	1.0000	1.0000	1.0000	0.9037	0.7912	0.6162
12	1.0000	1.0000	1.0000	0.9141	0.8627	0.6497
13	1.0000	1.0000	1.0000	0.9245	0.9054	0.7005
14	0.9988	1.0000	0.9976	0.9454	0.9307	0.7421
15	1.0000	0.9988	0.9988	0.9524	0.9365	0.7884
16	0.9976	0.9988	0.9988	0.9570	0.9400	0.8473
17	1.0000	0.9988	0.9976	0.9524	0.9469	0.8890
18	0.9988	1.0000	1.0000	0.9571	0.9515	0.9132
19	0.9988	1.0000	0.9976	0.9593	0.9596	0.9317
20	1.0000	1.0000	0.9988	0.9651	0.9630	0.9445
21	0.9976	0.9976	0.9976	0.9698	0.9677	0.9572

ตารางที่ ค.4 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหลอดซั้บกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม MO ที่ความสูงของเบคแตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C/C_0 ที่ความสูงของเบค (cm) แตกต่างกัน			C/C_0 ที่ความสูงของเบค (cm) แตกต่างกัน		
	15	20	25	15	20	25
22	1.0000	1.0000	0.9988	0.9733	0.9723	0.9618
23	1.0000	1.0000	0.9988	0.9756	0.9769	0.9699
24	1.0000	1.0000	1.0000	0.9779	0.9792	0.9734
25	1.0000	1.0000	1.0000	0.9802	0.9815	0.9757
26	1.0000	1.0000	1.0000	0.9825	0.9815	0.9791
27	1.0000	1.0000	0.9976	0.9837	0.9815	0.9815
28	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9815	0.9826
29	0.9976	1.0000	1.0000	0.9825	0.9815	0.9849
30	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9815	0.9838
35	1.0000	1.0000	0.9976	0.9849	0.9815	0.9838
40	1.0000	0.9976	0.9976	0.9837	0.9815	0.9838
45	0.9976	0.9976	1.0000	0.9849	0.9815	0.9803
50	0.9988	1.0000	1.0000	0.9849	0.9815	0.9815
55	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9815	0.9838
60	1.0000	0.9988	0.9976	0.9837	0.9815	0.9838
65	1.0000	1.0000	0.9988	0.9849	0.9815	0.9803
70	1.0000	0.9976	1.0000	0.9849	0.9815	0.9838
75	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9815	0.9838
80	0.9976	1.0000	1.0000	0.9849	0.9815	0.9838
85	0.9976	1.0000	1.0000	0.9849	0.9815	0.9838
90	1.0000	0.9976	1.0000	0.9849	0.9815	0.9838
95	1.0000	0.9976	1.0000	0.9849	0.9815	0.9838

ตารางที่ ค.4 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหอดูดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม MO ที่ความสูงของเบคแตกต่างกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C/C_0 ที่ความสูงของเบค (cm) แตกต่างกัน			C/C_0 ที่ความสูงของเบค (cm) แตกต่างกัน		
	15	20	25	15	20	25
100	0.9988	1.0000	1.0000	0.9849	0.9815	0.98381
105	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9815	0.98381
110	1.0000	0.9988	1.0000	0.9849	0.9815	0.98381
115	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9815	0.98381
120	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9815	0.98381

ตารางที่ ค.5 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหลอดขับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม MO ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน (ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C/C_0 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) แตกต่างกัน			C/C_0 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) แตกต่างกัน		
	50	100	200	50	100	200
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	0.0099	0.0174	0.0088
2	1.0000	1.0000	1.0000	0.0280	0.0429	0.0473
3	1.0000	1.0000	1.0000	0.0668	0.0835	0.0751
4	0.9990	1.0000	0.9986	0.1183	0.0951	0.3255
5	0.9990	0.9988	1.0000	0.1309	0.2018	0.6051
6	1.0000	0.9988	1.0000	0.2384	0.3723	0.7535
7	1.0000	1.0000	1.0000	0.3495	0.5208	0.8727
8	1.0000	1.0000	1.0000	0.4706	0.7111	0.9125
9	1.0000	0.9976	0.9986	0.5736	0.8109	0.9443
10	0.9981	1.0000	1.0000	0.6115	0.8758	0.9536
11	0.9990	1.0000	1.0000	0.6486	0.9037	0.9575
12	1.0000	1.0000	1.0000	0.7253	0.9141	0.96024
13	1.0000	1.0000	1.0000	0.7606	0.9245	0.9628
14	0.9990	0.9988	1.0000	0.7976	0.9454	0.9655
15	0.9990	1.0000	0.9973	0.8626	0.9524	0.9708
16	0.9990	0.9976	1.0000	0.8753	0.9570	0.9748
17	1.0000	1.0000	0.9973	0.8988	0.9524	0.9721
18	1.0000	0.9988	1.0000	0.9141	0.9571	0.9748
19	1.0000	0.9988	1.0000	0.9259	0.9593	0.9774
20	1.0000	1.0000	1.0000	0.9277	0.9651	0.9774
21	1.0000	0.9976	1.0000	0.9331	0.9698	0.9748

ตารางที่ ค.5 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหลอดซึบกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม MO ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน (ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C/C_0 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) แตกต่างกัน			C/C_0 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) แตกต่างกัน		
	50	100	200	50	100	200
22	0.9990	1.0000	1.0000	0.9349	0.9733	0.9774
23	1.0000	1.0000	1.0000	0.9367	0.9756	0.9801
24	1.0000	1.0000	1.0000	0.9385	0.9779	0.9774
25	1.0000	1.0000	1.0000	0.9412	0.9802	0.9801
26	1.0000	1.0000	1.0000	0.9439	0.9825	0.9801
27	1.0000	1.0000	0.9986	0.9457	0.9837	0.9814
28	1.0000	1.0000	1.0000	0.9494	0.9849	0.9840
29	0.9991	0.9976	1.0000	0.9530	0.9825	0.9880
30	0.9991	1.0000	1.0000	0.9557	0.9849	0.9894
35	1.0000	1.0000	0.9973	0.9584	0.9849	0.9920
40	0.9982	1.0000	1.0000	0.9638	0.9837	0.9920
45	0.9982	0.9976	1.0000	0.9683	0.9849	0.9920
50	1.0000	0.9988	1.0000	0.9710	0.9849	0.9920
55	0.9991	1.0000	1.0000	0.9765	0.9849	0.9920
60	1.0000	1.0000	1.0000	0.9774	0.9837	0.9920
65	1.0000	1.0000	1.0000	0.9765	0.9849	0.9920
70	1.0000	1.0000	1.0000	0.9765	0.9849	0.9920
75	1.0000	1.0000	1.0000	0.9765	0.9849	0.9920
80	1.0000	0.9976	0.9986	0.9765	0.9849	0.9920
85	1.0000	0.9976	1.0000	0.9765	0.9849	0.9920
90	1.0000	1.0000	1.0000	0.9765	0.9849	0.9920
95	1.0000	1.0000	1.0000	0.9765	0.9849	0.9920

ตารางที่ ค.5 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหอดูดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม MO ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน (ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm และอัตราการไหลเท่ากับ 3.57 ± 0.02 mL/min) (ต่อ)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C/C_0 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) แตกต่างกัน			C/C_0 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) แตกต่างกัน		
	50	100	200	50	100	200
100	1.0000	0.9988	0.9987	0.9765	0.9849	0.9920
105	1.0000	1.0000	1.0000	0.9765	0.9849	0.9920
110	1.0000	1.0000	1.0000	0.9765	0.9849	0.9920
115	1.0000	1.0000	1.0000	0.9765	0.9849	0.9920
120	1.0000	1.0000	1.0000	0.9765	0.9849	0.9920

ตารางที่ ค.6 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหอดูดซับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม MO ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน (ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L)

เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C/C_0 ที่อัตราการไหล (mL/min) แตกต่างกัน			C/C_0 ที่อัตราการไหล (mL/min) แตกต่างกัน		
	3.57	7.18	9.18	3.57	7.18	9.18
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	0.0174	0.0092	0.0172
2	1.0000	1.0000	1.0000	0.0429	0.0530	0.0931
3	1.0000	1.0000	1.0000	0.0835	0.1199	0.1425
4	1.0000	1.0000	1.0000	0.0951	0.1464	0.4161
5	0.9988	0.9988	0.9988	0.2018	0.4659	0.7494
6	0.9988	1.0000	1.0000	0.3723	0.6735	0.8988
7	1.0000	1.0000	1.0000	0.5208	0.8719	0.9482
8	1.0000	1.0000	0.9976	0.7111	0.8973	0.9678
9	0.9976	1.0000	1.0000	0.8109	0.9215	0.9735
10	1.0000	0.9976	0.9976	0.8758	0.9423	0.9781
11	1.0000	1.0000	1.0000	0.9037	0.9515	0.9816
12	1.0000	1.0000	1.0000	0.9141	0.9619	0.9862
13	1.0000	0.9988	0.9976	0.9245	0.9665	0.9919
14	0.9988	0.9976	0.9976	0.9454	0.9700	0.9908
15	1.0000	1.0000	1.0000	0.9524	0.9723	0.9919
16	0.9976	1.0000	1.0000	0.9570	0.9746	0.9931
17	1.0000	1.0000	1.0000	0.9524	0.9769	0.9919
18	0.9988	1.0000	0.9976	0.9571	0.9780	0.9919
19	0.9988	1.0000	0.9976	0.9593	0.9792	0.9942
20	1.0000	1.0000	0.9976	0.9651	0.9803	0.9942
21	0.9976	1.0000	0.9976	0.9698	0.9815	0.9919

ตารางที่ ๓.6 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหลอดขับกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม MO ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน (ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L) (ต่อ)

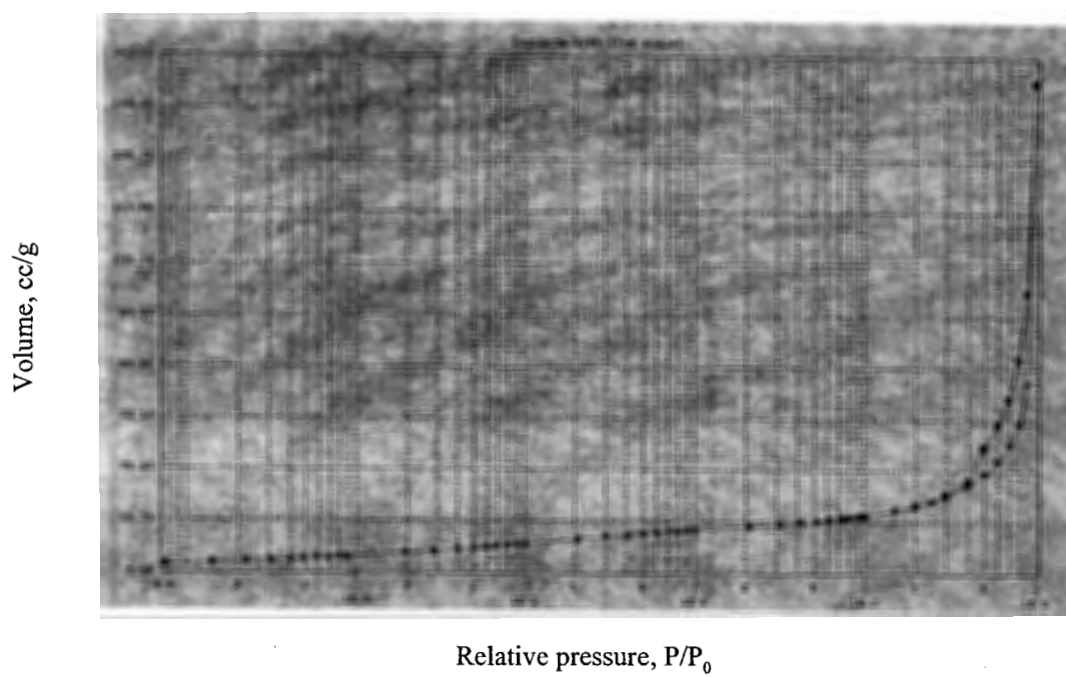
เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C/C_0 ที่อัตราการไหล (mL/min) แตกต่างกัน			C/C_0 ที่อัตราการไหล (mL/min) แตกต่างกัน		
	3.57	7.18	9.18	3.57	7.18	9.18
22	1.0000	0.9976	1.0000	0.9733	0.9861	0.9919
23	1.0000	1.0000	1.0000	0.9756	0.9861	0.9919
24	1.0000	1.0000	1.0000	0.9779	0.9861	0.9919
25	1.0000	1.0000	1.0000	0.9802	0.9861	0.9919
26	1.0000	1.0000	1.0000	0.9825	0.9861	0.9919
27	1.0000	1.0000	1.0000	0.9837	0.9861	0.9931
28	1.0000	0.9976	1.0000	0.9849	0.9861	0.9919
29	0.9976	1.0000	1.0000	0.9825	0.9861	0.9919
30	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9861	0.9919
35	1.0000	1.0000	0.9976	0.9849	0.9861	0.9919
40	1.0000	0.9988	0.9976	0.9837	0.9861	0.9919
45	0.9976	1.0000	1.0000	0.9849	0.9861	0.9919
50	0.9988	0.9976	1.0000	0.9849	0.9861	0.9919
55	1.0000	0.9976	1.0000	0.9849	0.9861	0.9919
60	1.0000	1.0000	0.9988	0.9837	0.9861	0.9919
65	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9861	0.9919
70	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9861	0.9919
75	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9861	0.9942
80	0.9976	1.0000	1.0000	0.9849	0.9838	0.9919
85	0.9976	1.0000	1.0000	0.9849	0.9838	0.9919
90	1.0000	0.9976	0.9976	0.9849	0.9861	0.9919
95	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9861	0.9919

ตารางที่ ค.6 อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ หลังผ่านหลอดซั้บกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ของสีย้อม MO ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน (ความสูงของเบดเท่ากับ 15 cm และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg/L) (ต่อ)

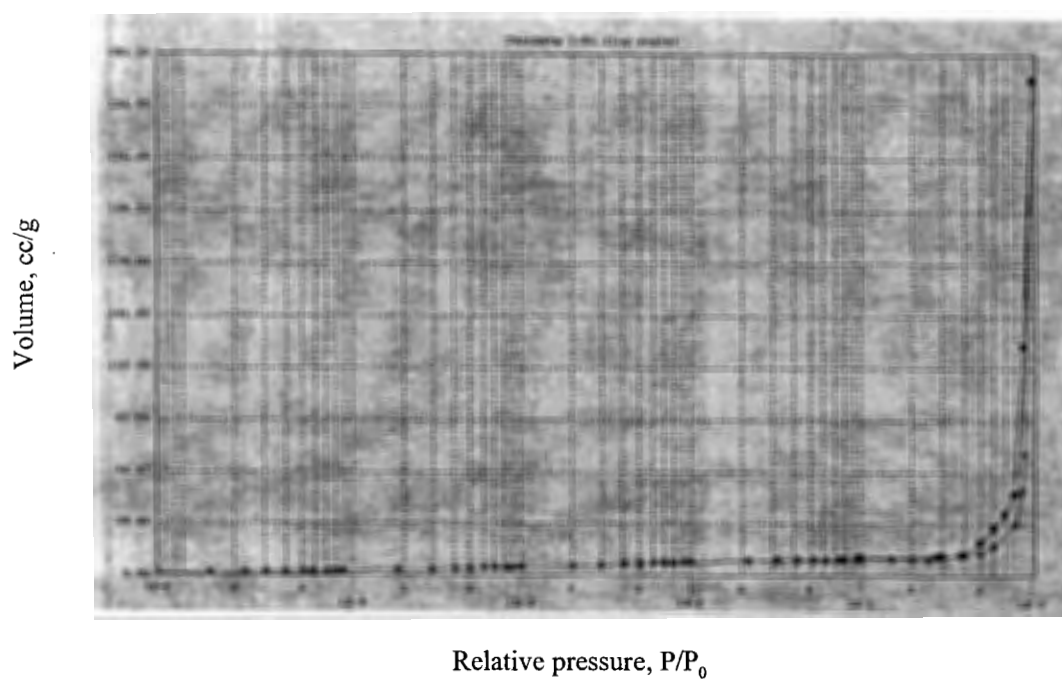
เวลา (นาที)	ชุดควบคุม			ชุดการทดลอง		
	C/C_0 ที่อัตราการไหล (mL/min) แตกต่างกัน			C/C_0 ที่อัตราการไหล (mL/min) แตกต่างกัน		
	3.57	7.18	9.18	3.57	7.18	9.18
100	0.9988	1.0000	1.0000	0.9849	0.9838	0.9919
105	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9861	0.9919
110	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9861	0.9919
115	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9861	0.9919
120	1.0000	1.0000	1.0000	0.9849	0.9861	0.9919

ภาคผนวก ง

ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของก๊าซไนโตรเจน



ภาพที่ ง.1 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของก๊าซไนโตรเจนบนแร่ดิน MMT



ภาพที่ ง.2 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับของก๊าซไนโตรเจนบนแร่ดิน CTS/MMT

ภาคผนวก จ
ผลงานการนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ

การกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน

Removal of Dye from Synthetic Wastewater by using Chitosan-coated-Montmorillonite clay

ทรงศักดิ์ สระแก้ว¹ และ จักรกฤษณ์ อัมพช^{2*}

Songsak Sakaew¹ and Chakkrit Umpuch^{2*}

¹นิสิตบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี 34190

²อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี 34190

^{*}ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

จ.อุบลราชธานี 34190

โทรศัพท์ : 045-353300 ต่อ 3359, โทรสาร : 045-353333, E-mail : Jaggrit@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับสีย้อมผ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ (MMT) และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน (CTS/MMT) เป็นตัวดูดซับ งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การทดลองส่วนที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับและสีย้อมผ้า พบว่า สารไคโตซานสามารถเข้าไปยึดติดกับผิวของแร่ดินและแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นดิน ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างชั้นดิน (d_{001}) กว้างขึ้นซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และยืนยันการแลกเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของสารไคโตซานกับโมเลกุลที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นดินด้วยเครื่อง FTIR สีย้อมผ้าที่นำมาศึกษามีทั้งสิ้น 5 สี ได้แก่ สีเขียวหัวเป็ด สีคราม สีเลือดหมู สีไผ่น้ำ และสีแดง ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของสีย้อมผ้าเป็นสารอินทรีย์ วิเคราะห์ด้วย Organic Matter method การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาการดูดซับแบบกะ พบว่า แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซานมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้าสูงกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ ไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยกเว้นสีเขียวหัวเป็ดจะสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช และการทดลองส่วนที่ 3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ พบว่า อัตราการดูดซับสอดคล้องกับสมการการดูดซับอันดับหนึ่งและสองเทียม นอกจากนี้การปรากฏของสีย้อมผ้าในตัวดูดซับหลังการดูดซับถูกยืนยันด้วยปริมาณ Organic matter หลังการดูดซับที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : การดูดซับ สีย้อมผ้าเคมี สารไคโตซาน น้ำเสียสังเคราะห์ แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน

Abstract

The objective of this research was to study the adsorption of chemical dyes from synthetic wastewater by using montmorillonite (MMT) and chitosan-coated-montmorillonite clay (CTS/MMT) as adsorbents. This research was divided into 3 parts. Firstly, The properties of both adsorbents and 5 chemical dyes such as dark green, ocean blue, maroon, yellow and red color were analyzed. The interlayer (d_{001}) of montmorillonite clay was increased by modifying the clay surface with chitosan analyzed by XRD and the substitute of functional group of chitosan to those in the interlayer was analyzed by FTIR. The chemical dyes were organic determined by organic matter method. Secondly, the batch adsorption showing that the chitosan-coated-montmorillonite clay adsorbed those dyes greater than that of the precursor. The equilibrium data of those dyes are fitted well by Langmuir's isotherm except the dark green dye that is conform to Freundlich's isotherm. Finally, kinetic adsorption showing that was conform to pseudo-first and pseudo-second order kinetic models with good correlation. The increase of organic matter of the adsorbent after adsorption confirmed the chemical dye adsorbed on the clay.

Keywords : Adsorption, Chemical dyes, Chitosan, Synthetic wastewater, Montmorillonite clay, Chitosan-coated-Montmorillonite clay

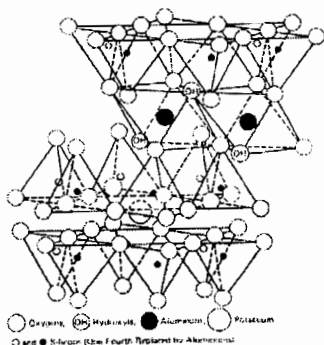
บทนำ

ผลิตภัณฑ์ผ้าไหม ผ้าฝ้าย และผ้ากาบขาว เป็นต้น เป็นสินค้าโอท็อปที่มีการผลิตเป็นจำนวนมากในชุมชนใกล้เคียงกับมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี แต่ในขั้นตอนการย้อมสีผ้าก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก เนื่องจากชาวบ้านจะนิยมใช้สีย้อมผ้าเคมีสังเคราะห์ ที่มีราคาถูก หาสีได้ง่ายในท้องถิ่น และให้ผ้าที่มีสีสดติดทนนาน น้ำเสียเหล่านี้จะถูกปล่อยสู่แหล่งรองรับทางธรรมชาติ เช่น ลำธารที่อยู่ใกล้เคียง พื้นดินใต้ถุนบ้าน เป็นต้น โดยไม่ได้รับการบำบัดก่อนทิ้งแต่อย่างใด น้ำเสียเหล่านี้ย่อยสลายเองตามธรรมชาติได้น้อย จึงก่อให้เกิดปัญหาแหล่งน้ำเน่าเสียและการปนเปื้อนของสีย้อมในดินได้ ซึ่งกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับใช้บำบัดน้ำเสียที่ย่อยสลายได้น้อยโดยกระบวนการทางชีวภาพ [1]

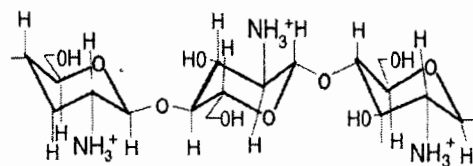
แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินที่พบมากในประเทศไทย มีราคาถูก มีการผลิตเชิงพาณิชย์จึงทำให้ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับความบริสุทธิ์และปริมาณของแร่ดิน องค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) อยู่ในแผ่นอลูมินาและซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อยู่ในแผ่นซิลิกา ในลักษณะซ้อนกันเป็นชั้นๆ (Lamellar structure) โดยหนึ่งชั้นดินจะประกอบไปด้วยแผ่นซิลิกาสองแผ่นประกบกับแผ่นอลูมินาหนึ่งแผ่นและมีช่องว่างชั้นอยู่ระหว่างแต่ละชั้นดิน ลักษณะโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์แสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยในชั้นโครงสร้างของแร่ดินจะมีประจุสุทธิเป็นลบ [2] ลักษณะโครงสร้างที่เป็นชั้นสามารถขยายตัวได้เมื่ออยู่ในน้ำจึงทำให้โมเลกุลที่มีประจุบวก เช่น Na^+ Ca^{2+} และน้ำ เป็นต้น เข้ามาแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นดินเพื่อให้ประจุภายในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์สมดุลกัน [3] ด้วยลักษณะเช่นนี้จึงทำให้แร่ดินชนิดนี้สามารถยัดจับและแทนที่ด้วยโมเลกุลที่มีประจุบวกได้ดี เช่น สารเมทิลลีนบลู [4] เป็นต้น

นอกจากนี้ แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ยังสามารถนำมาปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแร่ดินเพื่อให้มีสภาพเหมาะสมกับการนำไปใช้ดูดซับสารปนเปื้อนที่ต่างชนิดกันในน้ำ เช่น การนำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติมาทำปฏิกิริยา (ion-exchange) กับสารลดแรงตึงผิวประเภท Quaternary ammonium Compound (QACs) เพื่อเปลี่ยนแปลงพื้นผิวในโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ให้เหมาะกับการดูดซับสารอินทรีย์ ซึ่งตัวดูดซับชนิดนี้จะถูกเรียกว่า “Organo-clay” [5] แร่ดิน Organo-clay สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดี เนื่องจากสีย้อมผ้าเหล่านี้มีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ [3]

โคโคซาน (CTS) เป็นไบโอโพลิเมอร์ธรรมชาติอย่างหนึ่ง เป็นสารอนุพันธ์ของโคตินที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญในรูปของ D-glucosamine พบได้ในธรรมชาติ โดยเป็นองค์ประกอบอยู่ในเปลือกนอกของสัตว์พวกกุ้ง ปู แมลง และเชื้อรา เป็นสารธรรมชาติที่มีลักษณะโคเคนเฉพาะตัว คือ เป็นวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ย่อยสลายตามธรรมชาติ มีความปลอดภัยในการนำมาใช้กับมนุษย์ ไม่เกิดผลเสียและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ไม่เกิดการแพ้ ไม่ไวไฟและไม่เป็นพิษ (non-phytoxic) ต่อพืช โคโคซานเป็นตัวดูดซับที่นำมาใช้ในการดูดซับของแข็งแขวนลอยซึ่งไม่มีประจุ และสามารถนำไปใช้ดูดซับโลหะที่มีประจุบวกได้ดี เพราะว่ามีหมู่อะมิโน ($-NH_2$) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) อยู่บนโซ่โพลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะและเกิดปฏิกิริยา โครงสร้างของโคโคซานแสดงไว้ในรูปที่ 2 [6] ในประเทศไทยมีการบริโภคสัตว์ที่มีเปลือก เช่น กุ้ง ปู และแมลง เป็นต้น จึงทำให้มีเปลือกเหล่านี้เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก เมื่อนำมาสกัดสารโคโคซาน ก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่าของของเสียประเภทนี้ได้



รูปที่ 1 โครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ [7]



รูปที่ 2 โครงสร้างของโมเลกุลโคโคซาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับสีย้อมผ้าเคมีจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ และศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโดยการปรับปรุงพื้นผิวของแร่ดินด้วยสารโคโคซานต่อมวลวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับและสีย้อมผ้า ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ ศึกษาไอโซเทอมและจลนพลศาสตร์การดูดซับ โดยจะแสดงอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เจริญผลพลศาสตร์และเชิงสมดุลในการทดลองแบบกะชนิดขั้นตอนเดียว

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สีย้อมผ้าเคมีสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองคือสีย้อมผ้าตราสีโคตติกลองของบริษัท พัวเทียมสัน จำกัด จำนวน 5 สี ได้แก่ สีเขียวหัวเป็ด สีคราม สีเลือดหมู สีไพน่า และสีแดงแก่

2. สารโคโคซานจากบริษัท Aldrich Chemistry

3. แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิตโดยบริษัทไทยนิปปอนด์เคมีภัณฑ์ จำกัด โดยแร่ดินมีปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีโดยน้ำหนัก (%wt) ประกอบไปด้วย SiO_2 (56-60 %), Al_2O_3 (16-18 %), Fe_2O_3 (5-7 %), Na_2O (2.4-3 %), MgO (1.5-2.0 %), CaO (1.9-2.1 %), K_2O_3 (0.3-0.5 %) และ TiO_2 (1.2-1.5 %) มีค่า CEC (Cation exchange capacity) เท่ากับ 0.8 meq./g ซึ่งเป็นข้อมูลที่ทางบริษัทระบุไว้

วิธีการทดลอง

1. การเตรียมแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยโคโคซาน

นำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ 1 g ละลายในน้ำกลั่น 100 mL และเติมสารละลายโคโคซาน เข้มข้น 2 g/L ปริมาตร 100 mL ทำการกวนด้วยอัตราความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ 25°C จากนั้นปรับค่า pH ด้วยสารละลาย 0.1 M NaOH หรือ 0.1 M HCl ให้อยู่ในช่วง 7.0 - 7.5 ที่สารละลายให้อยู่ในรูปของเจลเป็นเวลาครึ่งชั่วโมง ที่ 25°C หลังจากนั้นกรองแร่ดินด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ เพื่อแยกแร่ดินและล้างด้วยน้ำกลั่น และทำให้แห้งโดยอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่เคลือบผิวด้วยโคโคซานมาบดด้วยครกวิทยาศาสตร์ให้ละเอียด แล้วก็นำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 mesh ก็จะได้ขนาดอนุภาคเท่ากับ 75 μm

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับและสีย้อมผ้า

กรณีที่ 1 การวิเคราะห์หาระยะระหว่างชั้นดิน (ค่า d_{001}) ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยสารโคโคซาน โดยใช้กฎของแบรกก์ (Bragg's law) เพื่อเปลี่ยนค่า 2θ ไปเป็นค่า d_{001} วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (Philips Model X' Pert MPD) กรณีที่ 2 การวิเคราะห์หาการแทนที่ของหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ $(-\text{NH}_2)$ และหมู่ไฮดรอกซิล $(-\text{OH})$ ของสารโคโคซาน กับหมู่ของน้ำในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารโคโคซาน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrophotometer (Perkin Elmer Model Spectrum RX 1) [8] กรณีที่ 3 วิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในตัวดูดซับทั้งสองชนิดก่อนการดูดซับและในตัวดูดซับ (CTS/MMT) หลังการดูดซับสีย้อมผ้าทั้ง 5 สี ซึ่งใช้ปริมาณตัวอย่างในการทดลอง 2 g เพื่อใช้ยืนยันว่าสีย้อมถูกตรึงไว้ที่ผิวของตัวดูดซับ โดยใช้วิธี Organic matter determination อ้างอิงจาก ASTM D 2974 – Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Organic Soils กรณีที่ 4 เนื่องจากสีย้อมผ้าเคมีสังเคราะห์ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ เพราะมีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก [3] ดังนั้น จึงได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในสีย้อมผ้า โดยใช้วิธี Organic matter determination มีวิธีการวิเคราะห์เช่นเดียวกับกรณีที่ 3 ดังข้างต้น แต่เปลี่ยนจากตัวดูดซับเป็นผงสีย้อมผ้า

3. วิธีการวัดปริมาณสีย้อมผ้าในของเหลว

การวัดความเข้มข้นของสีย้อมผ้าในสารละลาย ทำได้โดยการวัดความเข้มของแสงส่องผ่านในรูปของค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Absorbance, Abs) โดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer แล้วเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน กระทำโดยใช้ตามวิธีของ จักรกฤษณ์ อัมพพ [3]

4. การศึกษาการดูดซับแบบกะของสีย้อมผ้า

การศึกษาการดูดซับแบบกะของสีย้อมผ้าประกอบไปด้วยการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ และ การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ มีวิธีการทดลองโดยกระทำตามวิธีของ จักรกฤษณ์ อัมพุข [3] ยกเว้น ใช้ปริมาณแร่ดินเท่ากับ 0.5 g

5. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมผ้า มีวิธีการทดลองโดยกระทำตามวิธีของ จักรกฤษณ์ อัมพุข [3] ยกเว้น จะเปลี่ยนมาใช้ปริมาตรของสารละลายเป็น 800 mL ปริมาณแร่ดิน 0.4 g และศึกษาในเครื่อง Jar-test

ผลการทดลองและวิจารณ์

1 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้า

ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้า สามารถคำนวณได้จากเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมผ้าดังสมการ (1)

$$\% \text{ Removal} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

โดย C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมผ้าในน้ำ (mg/L) และ C_e คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสีย้อมผ้าในน้ำ (mg/L)

เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมผ้าแสดงไว้ในตารางที่ 1 แร่ดินมอนต์มอริลไลต์เคลือบผิวด้วยไคโตซานมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสูงกว่าแร่ดินมอนต์มอริลไลต์ธรรมชาติ การที่แร่ดินมอนต์มอริลไลต์เคลือบผิวด้วยไคโตซานสามารถดูดซับสีย้อมผ้าได้มากกว่านั้น เนื่องจากโมเลกุลของไคโตซานเข้าไปยึดจับกับพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลไลต์และแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นดินส่งผลให้ค่า 2θ มีค่าลดลงดังแสดงไว้ในรูปที่ 3 จึงทำให้แร่ดินมีช่องว่างระหว่างชั้นดินที่กว้างขึ้นและทำให้ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าแร่ดินมอนต์มอริลไลต์ธรรมชาติอีกด้วย ทำให้สีย้อมผ้าเข้าไปยึดจับกับแร่ดินได้มากขึ้นทั้งพื้นที่ผิวภายนอก และพื้นที่ในช่องว่างระหว่างชั้นดิน [8]

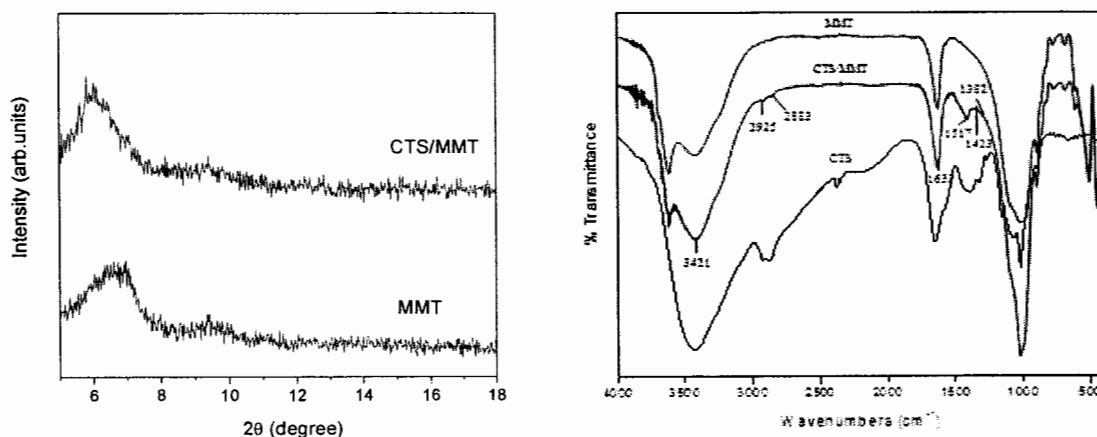
ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้า และปริมาณสารอินทรีย์ในสีย้อมผ้าและตัวดูดซับ

ชนิดสี	% การกำจัดสีย้อมผ้า		% Organic matter	
	CTS/MMT	MMT	ผงสีย้อมผ้า	แร่ดิน CTS/MMT หลังดูดซับ
สีเขียวหัวเป็ด	18.29	4.73	19.13	33.33
สีคราม	97.71	40.29	3.61	40.49
สีเลือดหมู	96.49	33.88	21.74	35.17
สีไผ่น้ำ	61.22	16.62	21.78	34.45
สีแดงแก่	93.44	30.60	8.71	37.90

หมายเหตุ แร่ดิน MMT มีปริมาณสารอินทรีย์ก่อนการดูดซับเท่ากับ 0.00 %

แร่ดิน CTS/MMT มีปริมาณสารอินทรีย์ก่อนการดูดซับเท่ากับ 26.28 %

จากรูปที่ 4 พบว่า ที่ความถี่ 3421 cm^{-1} ของ CTS/MMT จะพบหมู่ฟังก์ชัน O-H และ N-H (ส่วน MMT จะพบหมู่ฟังก์ชัน -OH และ น้ำ) ที่ความถี่ 2925 cm^{-1} และ 1423 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน C-H (Methyl) ส่วนที่ความถี่ 2883 cm^{-1} และ 1382 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน C-H (Methylene) และที่ความถี่ 1517 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน N-H (Amine) แต่สำหรับในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติจะไม่พบเลย และที่ความถี่ 1633 cm^{-1} ของ CTS/MMT พบหมู่ฟังก์ชัน NH - CO (ส่วน MMT จะพบหมู่ฟังก์ชัน -OH และ น้ำ) ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่ามีโมเลกุลของโคโคซานอยู่ในตัวดูดซับแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยโคโคซานจริง

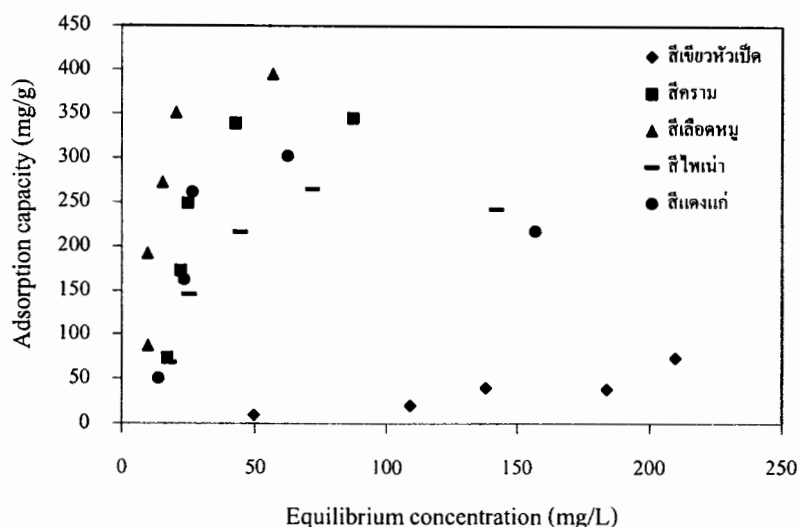


รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของ MMT รูปที่ 4 สเปกตรัม FTIR ของ MMT, CTS/MMT และ CTS และ CTS/MMT

จากตารางที่ 1 พบว่า แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยโคโคซาน (CTS/MMT) และผงสีย้อมผ้าทั้ง 5 ชนิดจะมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ ส่วนในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ (MMT) จะไม่มีสารอินทรีย์อยู่เลย โดยพิจารณาจากปริมาณสารอินทรีย์ สำหรับในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยโคโคซาน (CTS/MMT) ก่อนการดูดซับจะมีสารอินทรีย์อยู่ประมาณ 26.28 % แต่ในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยโคโคซานหลังการดูดซับสีย้อมผ้าทั้ง 5 ชนิด พบว่ามีปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่า ดังนั้นจึงสามารถพิสูจน์ได้ว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยโคโคซานเกิดการดูดซับสีย้อมผ้าจริง

2 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมผ้า

ไอโซเทอมของการดูดซับ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของเหลวที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบจำลองที่อธิบายได้โดยสมการซึ่งมีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์กลไกการดูดซับ ส่วนใหญ่พฤติกรรมของการดูดซับในของเหลวจะมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และแบบฟรอนด์ช (Freundlich) [8] ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมการมวลสาร [9]



รูปที่ 5 ไอโซเทอมการดูดซับสี่ย้อมผ้าด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยโคโคซาน

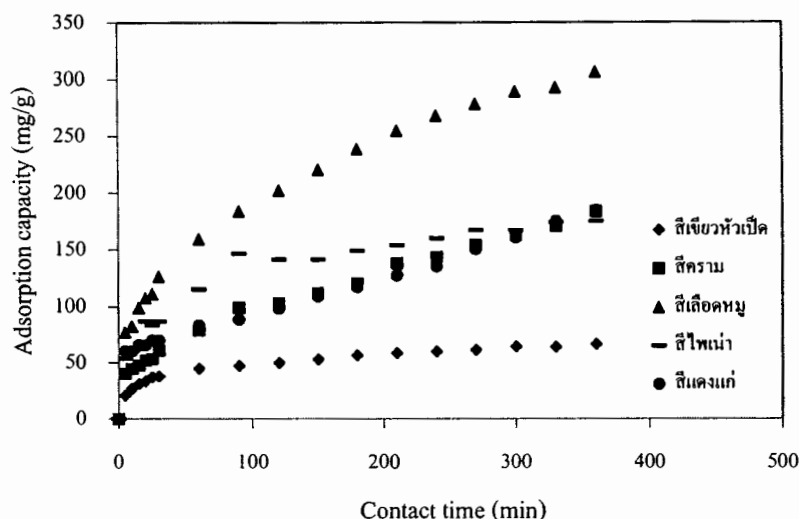
จากรูปที่ 5 พบว่า ไอโซเทอมการดูดซับสี่ย้อมผ้าส่วนใหญ่มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยกเว้นสี่เขียวหัวเปิดซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยพิจารณาจากค่า R^2 ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich ของสี่ย้อมผ้า

ชนิดสี	ไอโซเทอมแบบ Langmuir			ไอโซเทอมแบบ Freundlich		
	q_m (mg/g)	b (L/mg)	R^2	K_f (L/g)	n	R^2
สี่เขียวหัวเปิด	-	-	0.8764	3.270	1.584	0.9725
สี่คราม	454.546	0.042	0.9271	-	-	0.6330
สี่เลือดหนู	476.191	0.101	0.9764	-	-	0.5886
สี่โพเน่า	277.778	0.063	0.9762	-	-	0.7050
สี่แดงแก่	222.222	0.563	0.9720	-	-	0.4016

3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสี่ย้อมผ้า

อัตราการดูดซับสี่ย้อมผ้าจะพิจารณาระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสี่ย้อมผ้า ดังแสดงในรูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับเวลาสัมผัส พบว่า ปริมาณการดูดซับของสี่ย้อมผ้าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น สี่เขียวหัวเปิดและสี่โพเน่าจะเข้าสู่สมดุลการดูดซับเร็วที่สุด (ประมาณ 120 นาที) ส่วนสี่ย้อมผ้าที่เหลือจะมีระยะเวลาเข้าสู่สมดุลนานกว่า 360 นาที นอกจากนี้ ยังพบว่า กลไกการดูดซับสี่ย้อมผ้าส่วนใหญ่มีความสอดคล้องกับทั้งอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม ยกเว้นสี่แดงแก่จะสอดคล้องกับอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมอย่างเดียว โดยพิจารณาจากค่า R^2 ในตารางที่ 5



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับของสีย้อมผ้าเทียบกับเวลาสัมผัส

เพื่อทำการทำนายกลไกอัตราการดูดซับ ผลการทดลองจะถูกนำมาพล็อตกับสมการกลไกการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และสมการการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) [8] อัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการแพร่ของตัวถูกดูดซับ ว่าขั้นตอนใดเกิดขึ้นช้าที่สุด ขั้นตอนนั้นจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ [10]

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ของสมการอันดับหนึ่งเทียมและสมการอันดับสองเทียมของการดูดซับสีย้อมผ้า

ชนิดสี	$q_{e,exp}$ (mg/g)	สมการอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)			สมการอันดับสองเทียม (Pseudo-second order)		
		k_1 (min^{-1})	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2	k_2 ($\text{g/mg} \cdot \text{min}$)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2
สี่เขียวหัวเป็ด	66.025	8.80×10^{-3}	43.978	0.9672	6.68×10^{-4}	66.667	0.9910
สีคราม	183.678	6.50×10^{-3}	161.451	0.9615	9.639×10^{-5}	185.185	0.9415
สีเลื้อยหมู	306.118	8.30×10^{-3}	256.364	0.9835	7.38×10^{-5}	322.581	0.9758
สีไผ่น้ำ	175.354	9.10×10^{-3}	145.795	0.9500	2.18×10^{-4}	181.818	0.9920
สีแดงแก่	184.714	-	-	0.8696	1.17×10^{-4}	178.571	0.9218

หมายเหตุ $q_{e,exp}$ คือ ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลจากการทดลอง (mg/g)

$q_{e,cal}$ คือ ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลจากการคำนวณ (mg/g)

สรุป

การปรับปรุงแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารโคโคซานส่งผลให้แร่ดินมีช่องว่างระหว่างชั้นดินที่กว้างขึ้นและมีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ เนื่องมาจากมีโมเลกุลของโคโคซาน

เข้าไปยึดจับกับพื้นผิวของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์และแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นดิน ดังนั้นจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้าทั้ง 5 ชนิดมีค่าสูงกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ จากการหาปริมาณสารอินทรีย์ พบว่า แร่ดิน CTS/MMT และผงสีย้อมผ้าทั้ง 5 ชนิด มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ ส่วนในแร่ดิน MMT จะไม่มีสารอินทรีย์อยู่เลย และปริมาณสารอินทรีย์ในตัวดูดซับหลังการดูดซับมีค่ามากกว่าก่อนการดูดซับ แสดงว่าปริมาณสารอินทรีย์ส่วนที่เกินมานั้นเป็นของสีย้อมผ้า ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าสีย้อมผ้าถูกดูดซับไว้ที่ผิวของตัวดูดซับจริง นอกจากนั้น ไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยกเว้นสีเขียวหัวเป็ดที่ไอโซเทอมสอดคล้องกับไอโซเทอมของฟรุนดลิช พารามิเตอร์เชิงสมมูลของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ที่ได้คือ q_m อยู่ในช่วง 222.222-476.191 mg/g และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชที่ได้คือ K_f มีค่าเท่ากับ 3.270 L/g สำหรับการศึกษากลไกการดูดซับ พบว่า อัตราการดูดซับสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งและสองเทียม พารามิเตอร์เชิงกลไกการดูดซับของสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมคือ k_1 อยู่ในช่วง $6.50 \times 10^{-3} - 9.10 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ และสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมคือ k_2 อยู่ในช่วง $7.38 \times 10^{-5} - 6.68 \times 10^{-4} \text{ g/mg} \cdot \text{min}$

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้อาณัติงานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลองเป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณ โครงการทุนนักวิจัยหน้าใหม่ ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mckay, G. 1996. Use of adsorbents for the removal of pollutants from wastewaters. New York: CRC Press.
- [2] Charuwong, P. and Kiattikomol, R. 2004. Removal of Organic Compounds from Aqueous Solution by Montmorillonite clays and Organo-clays. Suranaree J. Sci. Technol. 11: 39-51.
- [3] จักรกฤษณ์ อัมพพ. 2549. การกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [4] Almeida, C.A.P., Debacher, N.A., Downs, A.J., Cottet, L. and Mello, C.A.D. 2009 Removal of methylene blue from colored effluents by adsorption on montmorillonite clay. Journal of Colloid and Interface Science 332: 46-53.
- [5] Detel, S.K., Jamrah, A.L. and Sparks, D.L. 1998. Sorption and co-sorption of 1-2-4-trichloro-benzene and tannic acid by organo-clays. Water Research. 32:3689-3697.
- [6] An, J.-H. and Dultz, S. 2007. Adsorption of tannic acid on chitosan-montmorillonite as a function of pH and surface charge properties. Applied Clay Science 36: 256-264.
- [7] Ohtsuka, K. 1997. Preparation and properties of two-dimensional microporous pillared interlayer solids. Chem. Matter 9: 2039-2050.

- [8] Wang, L. and Wang, A. 2007 Adsorption characteristics of Congo Red onto the chitosan/montmorillonite nanocomposite. *Journal of Hazardous Materials* 147: 979-985.
- [9] Seader, J.D. and Henley, J.E. 1998. *Separation process principles*. New York: John Wiley & Sons.
- [10] เดชา นัตรศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Removal of Azo Dyes from Aqueous Solution by using Chitosan-coated-Montmorillonite clay

S. Sakaew¹, C. Umpuch^{1,2*}

¹ Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 34190, Thailand

² National Center of Excellence for Environmental and Hazardous Waste Management, Ubon
Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 34190, Thailand

*e-mail: Jaggrit@hotmail.com

Abstract – In this study, montmorillonite clay (MMT) was modified by chitosan to form a nanocomposite: chitosan-coated montmorillonite (CTS/MMT) and used as the adsorbent for the removal of two azo dyes, reactive black (RB5) and methyl orange (MO), from aqueous solution by the batch adsorption technique. The MMT and CTS/MMT samples were characterized by X-ray diffraction (XRD) and CHNS-analyzer. Batch adsorption experiment was divided into 3 parts. Firstly, the dye removal efficiency was investigated. It was observed that CTS/MMT provides higher removal efficiency of both dyes than that of MMT. Secondly, the dye equilibrium adsorption was investigated and the equilibrium data was fitted by Langmuir and Freundlich equations. It was demonstrated that the experimental results are better fitted to Langmuir isotherm. Finally, the kinetic adsorption was studied by studying effect of contact time and fitting the experimental data to pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetic models. The results indicate that the adsorption rate is initially rapid and reaches equilibrium at 60 min and the experimental results follows pseudo-second order kinetic model with the best correlation.

Keyword: *adsorption, azo dye, chitosan-coated-montmorillonite, isotherm, kinetic adsorption*

1. Introduction

Presently, textile industries are much larger scale-up to increase the amount of products. Reactive dyes, which contains at least one azo bond ($-N=N-$) bearing aromatic rings, are the most common dyes used due to their advantages such as bright colors, excellent color fastness and ease of applications [1]. Many reactive dyes are toxic to some organisms and may cause direct destruction of creatures in water. In addition, since reactive dyes are highly soluble in water, their removal from effluent is difficult by using conventional physicochemical and biological treatment methods [2].

MMT is the natural matter, low cost and high support in Thailand. The inner layer of MMT composes of an alumina (Al_2O_3) complex octahedral sheet, which is situated between two silica (SiO_4) tetrahedral sheets. The substitution of Al^{3+} for Si^{4+} in the tetrahedral layer and Mg^{2+} or Fe^{2+} for Al^{3+} in the octahedral layer results in a net negative charge on the layer surfaces. Naturally, the negative charge in the interlayer is compensated with cations such as Na^+ , or Ca^{2+} . When MMT dissolves in water, it swells due to cations accumulation in the interlayer enhancing its basal spacing. Since the charge on the clay surface is negative, it can highly adsorb cationic dye such as methylene blue [3].

Chitosan (CTS) is the N-deacetylated derivative of chitin and the second most plentiful natural biopolymer. As a well-known sorbent, CTS is widely used for the removal of heavy, transition metals and dyes because amine group ($-NH_2$) and hydroxyl group ($-OH$) on the polymer chain of CTS can adsorb both cationic and anionic molecules [4]. Nevertheless, CTS has some limitation that is the weak mechanical property and low specific gravity so it swells and floats when dissolves in water. To improve this limitation, it is immobilized on the negatively charged MMT surface to form nanocomposite such as CTS/MMT. Therefore, the objective of this research was to study adsorption of two azo dyes by using MMT and CTS/MMT as adsorbents in batch adsorption test.

2. RESEARCH METHODOLOGY

2.1 Materials

The commercial montmorillonite (MMT) was supplied by Thai Nippon Chemical Industries Co. Ltd., Thailand and was used without further

purification. The chemical composition (wt%) of the MMT was SiO_2 : 56-60% and Al_2O_3 : 16-18%. The cation exchange capacity (CEC) of this clay was 0.8 meq/g. The chitosan (CTS) was purchased from Sigma-Aldrich. The azo dyes used were reactive black 5 (RB5) and methyl orange (MO) obtained from Asia Pacific Specialty.

2.2 Preparation of chitosan-coated-montmorillonite

An amount of 1.0 g of MMT dissolved in 100 mL distilled water and 100 mL of 2g/L chitosan solution were added into a batch reactor. The mixing was done by stirring at constant speed 200 rpm for 1 h at room temperature (25°C). The pH of suspension was adjusted to 7.0-7.5 by 0.1M NaOH or 0.1M HCl solutions and let it in gel for 30 min. The formed composite was filtrated and washed with distilled water and then dried at 40°C for 12 h. All samples as adsorbents were ground into powder to pass through a 200-mesh sieve, and stored in desiccators. The adsorbents were characterized by X-ray power diffractometer (XRD). The intercalation of chitosan onto MMT surface was confirmed by using CHNS-analyzer.

2.3 Batch adsorption test

All adsorption experiments were carried out on a mechanical shaker at 200 rpm using 250 mL Erlenmeyer flasks. A series of adsorption experiment were carried out at room temperature (25°C). The first experiment was to study the isotherm. 100 mL of dye solutions with different initial concentrations of 50, 100, 150, 200 and 250 ppm were prepared. Then, the dye solution and 0.1 g of CTS/MMT was added into the flasks and then horizontally shaken for 24 h at 200 rpm and then centrifuged at 30,000 rpm for 1 hr. The supernatant was measured absorbance by using UV-spectrophotometer at λ_{max} equal to 614 nm and 520 nm for RB5 and MO, respectively. The second experiment the effect of contact time and kinetic study was carried out. 200mL of 200 mg/L dye solution and 0.1 g of CTS/MMT was added into the flasks and then shaken horizontally for contact time ranging from 5 to 12 h. The samples were collected in certain time interval and then treated as the procedure in the first experiment.

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1 Properties of MMT and CTS/MMT

The content of C, H and N of CTS/MMT was higher than that of MMT. This confirms that the CTS were intercalated to the surface and interlayer of MMT. It causes wider interlayer in CTS/MMT. The d_{001} reflection for basal spacing determined by XRD was found to shift from 1.27 nm (original clay) to 1.40 nm in CTS/MMT.

3.2 Adsorption isotherms of azo dyes

The percent removal of RB5 and MO adsorbed onto CTS/MMT was 73.33% and 67.33%, respectively, whereas that of MMT was 1.85% for RB5 and 2.15% for MO so that adsorption equilibrium and kinetic adsorption test were carried with only CTS/MMT.

Fig. 1 shows adsorption isotherms of RB5 and MO dyes adsorbed onto CTS/MMT constructed by plotting equilibrium quantity of azo dye adsorbed on CTS/MMT: q_e (mg adsorbed azo dye/ g adsorbent) versus equilibrium dye concentration: C_e (mg/L). The equilibrium experimental data was fitted to Langmuir's and Freundlich's equation to determine model parameters for both dyes as shown in Table 1.

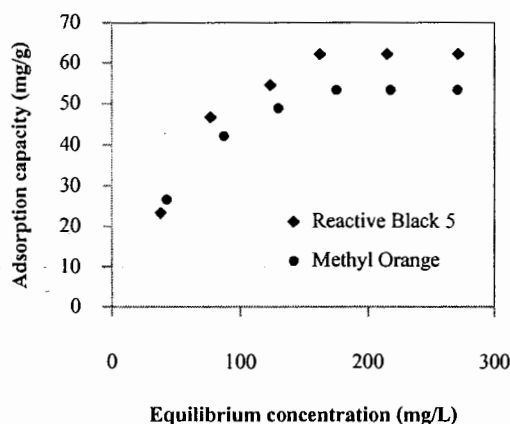


Fig. 1. Adsorption isotherms of RB5 and MO adsorbed onto CTS/MMT (C_0 50-200 mg/L, 0.1g adsorbent, 25°C)

The Langmuir [5] isotherm is valid for monolayer adsorption onto a surface with a finite number of identical sites. The Langmuir model is based on the assumption of adsorption homogeneity, such as equally available adsorption sites, monolayer surface coverage, and no interaction between adsorbed species. If azo dyes adsorption follows the Langmuir model, the adsorption process can be expressed as:

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

where q_m (mg/g) the maximum adsorption capacity and b is the Langmuir constant related to the rate of adsorption. The Langmuir equation obeys Henry's law at low concentration.

The Freundlich [6] equation is the empirical relationship whereby it is assumed that the adsorption energy of dye binding to a site on an adsorbent depends on whether or not the adjacent sites are already occupied. The Freundlich isotherm model is usually adopted for heterogeneous adsorption. One limitation of the Freundlich model is that the amount of adsorbed solute increases indefinitely with the concentration of solute in the solution. This isotherm can be described as follows:

$$\ln q_e = \log k_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2)$$

where k_f (mg/g)(L/g) $^{1/n}$ and n are the physical constants of the Freundlich adsorption isotherm. The k_f and n are indicators of the adsorption capacity and adsorption intensity, respectively. n is a constant representing the mutual interaction of sorbed species. Experimental values of n are usually greater than unity and this means that the forces between the sorbed molecules are repulsive. In addition, the closer the n value of the Freundlich sorption equations is the zero, the more heterogeneous is the system.

The equilibrium data was fitted to Langmuir and Freundlich isotherms. The results shows best fit to Langmuir isotherm for both RB5 and MO indicating the monolayer of dye molecules covers along CTS/MMT surface. The maximum monolayer capacity was 64.51 mg/g for RB5 and 54.64 mg/g for MO.

Table 1. Adsorption parameters of Langmuir and Freundlich isotherms

RB5		
Equilibrium model	parameter	Value
Langmuir isotherm	q_{max} (mg/g)	64.51
	b (L/mg)	0.010
	R^2	0.9685
Freundlich isotherm	k_f (mg/g)(L/g) $^{1/n}$	4.53
	n	2.07
	R^2	0.8565
MO		
Equilibrium model	parameter	Value
Langmuir isotherm	q_{max} (mg/g)	54.64
	b (L/mg)	0.009
	R^2	0.9880
Freundlich isotherm	k_f (mg/g)(L/g) $^{1/n}$	4.37
	n	2.13
	R^2	0.8917

3.3 Adsorption kinetics of azo dyes

Adsorption rate of both dyes onto CTS/MMT was illustrated in Fig. 2. It was found that the adsorption capacity rapidly increased and reached equilibrium within 60 min.

The relationship between quantities of azo dye adsorbed on CTS/MMT: q_t (mg adsorbed dye/g CTS/MMT) versus time t (min) was constructed to analyze the effect of contact time to the adsorption efficiency. Moreover, the kinetic data were analyzed by applying pseudo-first-order and pseudo-second-order models in order to gain a better understanding of the adsorption process.

Pseudo-first order kinetic model [7] is the earliest known one describing the adsorption rate based on the adsorption capacity. The pseudo-first-order rate expression is generally expressed as follows:

$$\ln(q_e - q_t) = \log q_e - k_1 t \quad (3)$$

where k_1 is the rate constant of first-order adsorption. The pseudo-first-order equation does not fit well for whole range of contact time and is in generally applicable over the initial 20-30 min of the sorption process.

Pseudo-second order kinetic model [8] was developed by Ho in 1995. The fitting of experimental data and second-order kinetic expression for the sorption systems of dye using CTS/MMT was obtained in which chemical sorption is the rate-limiting step. It is expressed as:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

where k_2 is the rate constant of second-order adsorption.

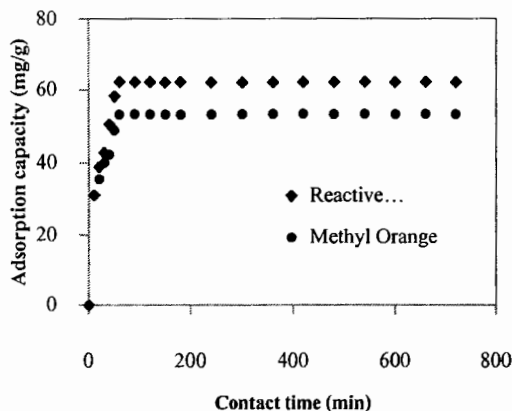


Fig. 2. Effect of contact time on the adsorption of RB5 and MO onto CTS/MMT (C_0 200 mg/L, 0.1g adsorbent, 200 rpm and 25°C)

The experimental data conform to Pseudo-second-order kinetic with good correlation. The kinetic rate constants were 3.17×10^{-2} g/mg.min for RB5 and 4.27×10^{-3} g/mg.min for MO. This indicates that the adsorption rate was controlled by chemical adsorption [9].

Table 2. Adsorption parameters of pseudo-first and pseudo-second order model

RB5		
Kinetic model	parameter	Value
Pseudo-first-order	k_1 (g/mg.min)	3.65×10^{-2}
	$q_{e,cal}$	54.64
	R^2	0.9279
Pseudo-second-order	k_2 (g/mg.min)	3.17×10^{-2}
	$q_{e,cal}$ (mg/g)	52.89
	R^2	0.9997
MO		
Kinetic model	parameter	Value
Pseudo-first-order	k_1 (g/mg.min)	4.23×10^{-2}
	$q_{e,cal}$	44.59
	R^2	0.9276
Pseudo-second-order	k_2 (g/mg.min)	4.27×10^{-3}
	$q_{e,cal}$ (mg/g)	53.76
	R^2	0.9998

4. CONCLUSIONS

The intercalation of CTS in MMT structure producing CTS/MMT causes higher RB5 and MO dyes removal efficiency. The equilibrium data conforms to Langmuir isotherm and the adsorption rate rapidly increased and reached to equilibrium within 60 min and the result was better fitted to pseudo-second order kinetic model. The CTS/MMT is effective adsorbent for remove azo dyes.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge the environmental engineering program in department of chemical engineering, Faculty of engineering, Ubon Ratchathani University for financial support.

REFERENCES

- A.A. Ahmad, B.H. Hameed, Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste. *J. Hazard Mater* 175(2010) 298-303.
- D. Fan, X. Zhu, J. Yan, Adsorption properties of Chromium (VI) by chitosan coated montmorillonite, *J. Bio. Sci.* 6(5) (2006) 941-945.
- R. Wibulswas, Batch and fixed bed sorption of methylene blue on precursor and QACs modified montmorillonite, *Sep and Purif Technol* 39 (2004) 3-12.
- F.C. Wu, R.L. Tseng, R.S. Juang, Enhanced abilities of highly swollen chitosan beads for color removal and

- tyrosinase immobilization, *J. Hazard Mater B81* (2001) 167-177.
- V. Lugo-Lugo, S. Hernandez-Lopez, C. Barrear-Diaz, F. Urena-Nunez, and B. Bilyeu, A comparative study of natural, formaldehyde-treated and copolymer-grafted orange peel for Pb(II) adsorption under batch and continuous mode, *J Hazard Mater 161* (2009) 1255-1264.
- M. Ajmal, R.A.K. Rao, R. Ahmad, and J. Ahmad, Adsorption studies on Citrus reticulata (fruit peel of orange): removal and recovery of Ni(II) from electroplating wastewater, *J Hazard Mater B79* (2000) 117-131.
- S. Lagegren, B.K. Svenska, Zur theorie der sogenannten adsorption geloester stoffe, *Vaternskapsakad handlingar*, 24(4) (1898), 1-39.
- Y.S. Ho, G. McKay, "Sorption of dye from aqueous solution by peat, *Chem Eng J 70* (1998) 115-124.
- N. Feng, G. Xu, Y. S. Liang, Adsorption study of copper (II) by chemically modified orange peel, *J. Hazard Mater 164* (2009) 1286-1292.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายทรงศักดิ์ สระแก้ว
วัน เดือน ปี เกิด	26 มิถุนายน 2530
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมีและชีวภาพ) มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, พ.ศ. 2552
นำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการ	ทรงศักดิ์ สระแก้ว และจักรกฤษณ์ อัมพูช. “การกำจัดสี ย้อมผ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ดินมอนต์มอริล โลไนต์เคลือบผิวด้วยไคโตซาน”, ใน <u>การประชุม วิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 10</u> , น.31. สงขลา : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2554. Sakaew, S. and Umpuch, C. “Removal of Azo Dyes from Aqueous Solution by using Chitosan-coated- Montmorillonite clay”, <u>Thailand Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (TIChE) International Conference 2011</u> , p.52. Songkhla : The Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry, 2011. Umpuch, C. and Sakaew, S. “Removal of commercial blue dye from water onto Chitosan-coated- Montmorillonite in fixed bed”, <u>Thailand Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference 2011</u> , p.T-31. Songkhla : The Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry, 2011.