

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมชนิดเมธิลีนบลูโดยซีโอไลต์ชนิดบีต้า
และชนิด ZSM-5



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**61727**
วัน,เดือน,ปี.....**2 1 ก.ค. 2549**

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE ADSORPTION OF METHYLENE BLUE DYE SOLUTION USING ZEOLITE BETA
AND ZEOLITE ZSM-5



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมชนิดเมธิลีนบลูโดยซีโอไลต์ชนิด
ปีต้า และ ชนิด ZSM-5
นักศึกษา นางสาวศิริรัตน์ สุริโย รหัส 44010842
นางสาวเอมอร ชันฉวีจิตร รหัส 44010906
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
พ.ศ. 2547
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

.....
(ดร.พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง)

.....กรรมการ
(ดร.สุชาสินี เนรมิตตกพงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมชนิดเมทิลีนบลูโดยซีโอไลต์ชนิดบีต้า และ ชนิด ZSM-5

โดย นางสาวศิริรัตน์ สุริโย

นางสาวเอมอร ชัณวีจิตร

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล

ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5, 10, 20, 30, 40, 60 และ 80 พีพีเอ็ม ตามลำดับ โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า และตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เพื่อใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากสีย้อม เมื่อทำการวิเคราะห์ผลโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer) จะพบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้ามีประสิทธิภาพการดูดซับดีกว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เนื่องจากตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้ามีโครงสร้างเป็นรูพรุนจุลภาคขนาดใหญ่ (12 T-ring หรือ Large Pore) มีขนาด 0.76x0.64 นาโนเมตร ซึ่งตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) ที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดกลาง (10-ring หรือ Mesopore) โดยอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาของตัวดูดซับซีโอไลต์ มีผลน้อยมากต่อการดูดซับ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมสูง ประสิทธิภาพในการดูดซับ และความเร็วในการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า และ ZSM-5 (26) สูงขึ้น จากข้อมูลการดูดซับนำมาหาความสัมพันธ์ พบว่าทั้งซีโอไลต์ชนิดบีต้าและ ZSM-5 (26) เป็นตัวดูดซับแบบอุณหภูมิคงที่ของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) จากการศึกษาอัตราเร็วในการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลูบนตัวดูดซับซีโอไลต์ พบว่า ทั้งตัวดูดซับชนิดบีต้าและ ชนิด ZSM-5 (26) สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี หากปราศจากความกรุณาและความอนุเคราะห์ของหลายฝ่ายด้วยกัน ซึ่งทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณ

สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการศึกษางานวิจัยนี้

ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องวัดการกระเจิงแสงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction และ X-Ray Fluorescence Spectrometry)

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่จำเป็นในการทดลอง

นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งทางด้านทฤษฎี และทางด้านปฏิบัติ ตลอดจนการให้คำปรึกษาและการแก้ไขต่างๆ

ดร. สุธาสินี เนรมิตตทพงษ์ และ ดร. ดวงกมล ณ ระนอง ที่ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำ คำปรึกษาที่แนบ ตลอดจนช่วยแก้ปัญหาและให้ความรู้คุณ พิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เพื่อนนักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

และสุดท้ายปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความกรุณาและอนุเคราะห์ของ ดร. พรสวรรค์ กาญจนวนิชย์กุล อาจารย์ที่ศึกษางานวิจัยนี้ สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยตลอดระยะเวลาของการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป.....	X
สัญลักษณ์และอักษรย่อ	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การศึกษา	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 ซีไอไลต์	4
2.2 การดูดซับ	8
2.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ	10
2.4 แบบจำลองการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่.....	13
2.5 อัตราการดูดซับ.....	16
2.6 สีย้อม	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง	21
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.3 การเตรียมตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า	22
3.4 การวิเคราะห์โดยการกระเจิงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction)	24
3.5 การวิเคราะห์โดยการกระเจิงแสงของรังสีเอกซ์ (XRFs)	25
3.6 ขั้นตอนการนำตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าและตัวดูดซับซีโอไลต์ ชนิด ZSM-5 ไปดูดซับสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู.....	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย	27
4.1 การวัดปริมาณซิลิกาต่ออลูมินา ของตัวดูดซับซีโอไลต์	27
4.2 การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา	28
4.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู บนดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า และตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26)	30
4.4 การศึกษา Adsorption isotherm.....	33
4.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ	35
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	39

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การจัดแบ่งขนาดรูพรุนตามมาตรฐานสากล.....	9
ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆในตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า และตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	27
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของสมการ Langmuir.....	33
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า.....	38
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26)	38
ตารางที่ ก.1 แสดงค่าตำแหน่งมาตรฐานของความเป็นผลึกซีโอไลต์ชนิดบีต้า.....	43
ตารางที่ ก.2 แสดงค่าตำแหน่งมาตรฐานของความเป็นผลึกซีโอไลต์ชนิด ZSM-5.....	44
ตารางที่ ก.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆในตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าในรูปของโซเดียม.....	45
ตารางที่ ก.4 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆในตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM 5 ในรูปของโซเดียม....	45
ตารางที่ ข.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู.....	47
ตารางที่ ค.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลาย สีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่อุณหภูมิห้อง.....	49
ตารางที่ ค.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลาย สีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อุณหภูมิห้อง.....	49
ตารางที่ ง.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่อุณหภูมิห้อง.....	50
ตารางที่ ง.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่อุณหภูมิห้อง.....	51
ตารางที่ ง.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่อุณหภูมิห้อง.....	52

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ง.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่อุณหภูมิต่ำ.....	53
ตารางที่ ง.5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่อุณหภูมิต่ำ.....	54
ตารางที่ ง.6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 60 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลูโดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่อุณหภูมิต่ำ.....	55
ตารางที่ ง.7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 80 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่อุณหภูมิต่ำ.....	56
ตารางที่ ง.8 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อุณหภูมิต่ำ.....	57
ตารางที่ ง.9 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อุณหภูมิต่ำ.....	58
ตารางที่ ง.10 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อุณหภูมิต่ำ.....	59
ตารางที่ ง.11 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลูโดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อุณหภูมิต่ำ.....	60
ตารางที่ ง.12 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อุณหภูมิต่ำ.....	61
ตารางที่ ง.13 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลูโดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา 38 ที่อุณหภูมิต่ำ.....	62
ตารางที่ ง.14 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา 38 ที่อุณหภูมิต่ำ.....	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ง.15	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีข้ม ชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา 38 ที่อุณหภูมิห้อง.....	64
ตารางที่ ง.16	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีข้ม ชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา 38 ที่อุณหภูมิห้อง.....	65
ตารางที่ ง.17	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีข้ม ชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา 38 ที่อุณหภูมิห้อง.....	66
ตารางที่ จ.1	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ความเข้มข้น 5 ppm ที่ $q_1 = 2.546$	67
ตารางที่ จ.2	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ความเข้มข้น 10 ppm ที่ $q_1 = 5.742$	68
ตารางที่ จ.3	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ความเข้มข้น 20 ppm ที่ $q_1 = 10.482$	69
ตารางที่ จ.4	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ความเข้มข้น 30 ppm ที่ $q_1 = 15.997$	71
ตารางที่ จ.5	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ความเข้มข้น 40 ppm ที่ $q_1 = 24.533$	72
ตารางที่ จ.6	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ความเข้มข้น 60 ppm ที่ $q_1 = 27.904$	73
ตารางที่ จ.7	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ความเข้มข้น 80 ppm ที่ $q_1 = 30.043$	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ จ.8	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลองการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ความเข้มข้น 5 ppm ที่ $q_1 = 3.024 \dots 75$	
ตารางที่ จ.9	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลองการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ความเข้มข้น 10 ppm ที่ $q_1 = 7.082 \dots 76$	
ตารางที่ จ.10	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลองการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ความเข้มข้น 20 ppm ที่ $q_1 = 8.797 \dots 77$	77
ตารางที่ จ.11	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลองการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ความเข้มข้น 30 ppm ที่ $q_1 = 9.792 \dots 78$	78
ตารางที่ จ.12	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลองการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ความเข้มข้น 40 ppm ที่ $q_1 = 11.77 \dots 79$	79

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่สำคัญชนิดต่าง.....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดบีต้า.....	7
รูปที่ 2.3 ลักษณะรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5.....	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5.....	8
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5.....	8
รูปที่ 2.6 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแบบ Langmuir.....	11
รูปที่ 2.7 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแบบ.....	11
รูปที่ 2.8 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแบบ.....	12
รูปที่ 2.9 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพที่เหมือนกับแบบ Sigmoid ที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 2-50 นาโนเมตร.....	12
รูปที่ 2.10 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพที่เหมือนกับแบบ Convex.....	13
รูปที่ 2.11 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปของกราฟเส้นตรง.....	15
รูปที่ 2.12 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเมทิลีนบลู (Methylene blue).....	19
รูปที่ 3.1 ลักษณะเจลดัดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่เตรียมได้.....	23
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์เครื่องอัดความดัน.....	23
รูปที่ 4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออลูมินาต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมโดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) และ ZSM-5 (38) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่างกัน.....	30
รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า.....	31
รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26).....	32

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 Adsorption isotherm ของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า และตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) ที่อุณหภูมิห้อง.....	34
รูปที่ 4.5 Langmuir adsorption isotherm ของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า และตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) ที่อุณหภูมิห้อง.....	34
รูปที่ 4.6 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า.....	36
รูปที่ 4.7 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26).....	37
รูป ก.1 แสดงหลักการการยิงรังสีเอ็กซ์ของเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน.....	42
รูปที่ ก.2 รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า.....	43
รูปที่ ก.3 รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 26.....	44
รูป ก.4 แสดงหลักการการยิงรังสีเอ็กซ์ของเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์.....	45
รูปที่ ข.1 กราฟเทียบมาตรฐานของสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู.....	48

สัญลักษณ์และคำย่อ

C	: ความเข้มข้นของสารละลายที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
C_0	: ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม)
K_2	: ค่าคงที่การดูดซับ (นาที่ ⁻¹)
K_d	: ค่าคงที่การคายซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร นาที่)
K_1	: ค่าคงที่อัตราสำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (นาที่ ⁻¹)
K_A	: ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์
P	: ความดันไอน้ำ (บรรยากาศ)
P_0	: ความดันไออิ่มตัว (บรรยากาศ)
q	: ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
q_m	: ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (มิลลิกรัมต่อกรัม)
q_t	: ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
q_1	: ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลสำหรับการดูดซับอันดับหนึ่ง (มิลลิกรัมต่อกรัม)
q_2	: ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลสำหรับการดูดซับอันดับสอง (มิลลิกรัมต่อกรัม)
r_a	: อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด
r_d	: อัตราการคายซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด
R^2	: สัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบน
t	: เวลา (นาที่)
ZSM-5 (26)	: ZSM-5 ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาเท่ากับ 26
ZSM-5 (38)	: ZSM-5 ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาเท่ากับ 38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อมได้มีการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น พบว่าสิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้งซึ่งส่งผลให้เกิดน้ำเสียจากสีย้อมที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แม้ว่าสีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ แต่ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้ง ปัจจุบันมิได้อยู่ที่ความเป็นพิษแต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้ง เนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้นแม้ว่าสีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถทำให้น้ำมีสีเป็นที่น่ารังเกียจของผู้พบเห็นได้ จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้ง ก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม

การบำบัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อมมีวิธีการบำบัดหลายวิธี เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี กระบวนการทางชีววิทยา การออกซิไดซ์ เทคโนโลยีเยื่อแผ่น และเทคโนโลยีใหม่ๆ

เทคโนโลยีใหม่ที่นิยมนำมาใช้คือ กระบวนการดูดซับโดยตัวดูดซับชนิดอนินทรีย์ ถูกนำมาใช้ในโรงงานสิ่งทอและฟอกย้อม ประสิทธิภาพในการกำจัดสีค่อนข้างดี อัตราการกำจัดเป็นไปอย่างรวดเร็ว และให้ผลในการกำจัดดี แม้ว่าจะมีความแปรผันของความเข้มข้นสีที่สูง [1]

ดังนั้นจึงทำการทดลองศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู (Methylene blue) ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า และตัวดูดซับชนิด ZSM-5

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู (Methylene blue) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ระหว่างตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าและตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิดบีต้าในรูปของโซเดียมและตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิด ZSM-5 ในรูปของโซเดียม
2. ศึกษาและทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีย้อมระหว่างตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิดบีต้า และตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิด ZSM-5 สีย้อมที่ใช้ในการทดลอง คือ เมธิลีนบลู (Methylene blue) ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง
3. ศึกษาและทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวดูดซับซีไอไลต์โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา
4. ศึกษาผลของชนิดของตัวดูดซับซีไอไลต์ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม และการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาที่มีต่อการดูดซับ
5. ทำการทดลองเพื่อหา Adsorption isotherm และศึกษาจลนพลศาสตร์ ของการดูดซับด้วยตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิดบีต้า และตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิด ZSM-5

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการดูดซับ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสารละลายสีย้อม
2. เตรียมตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิดบีต้าในรูปของโซเดียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)
3. ทำการทดลองดูดซับสารละลายสีย้อม โดยสารละลายสีย้อมที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือชนิดเมธิลีนบลู (Methylene blue) ที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 5, 10, 20, 30, 40, 60 และ 80 พีพีเอ็ม ทำการเก็บข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิดบีต้า และตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิด ZSM-5
4. ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาเท่ากับ 20 และ 40 ในการวิเคราะห์ เมื่อสารละลายสีย้อมที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู (Methylene blue) ที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 5, 10, 20, 30 และ 40 พีพีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับซีโอไลต์แต่ละชนิดที่เกิดขึ้น หลังจากทำการดูดซับสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู (Methylene blue) ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ
6. การศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับซีโอไลต์ที่ค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาต่างกัน
7. สรุปผลและเขียนรายงานพร้อมข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

เข้าใจหลักการ วิธีการ และขั้นตอนในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับ และทราบถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าและตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารละลายสีย้อมที่ปล่อยในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 ซีโอไลต์

ซีโอไลต์คือสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอมและออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) โดยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมอยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างทรงสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุมโดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม

นอกจากซิลิกอน อะลูมิเนียม และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงสร้างผลึก สามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้ [2]

ซีโอไลต์ได้ชื่อว่าเป็นสารโมเลกุลลาร์ซีฟ (Molecular sieve) เนื่องจากโมเลกุลมีช่องว่างที่สม่ำเสมอจำนวนมาก ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติคล้ายตะแกรง (Sieve) มีขนาดของช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ คือประมาณ 2-10 อังสตรอม ซึ่งต่างจากสารดูดซับอื่น เช่น คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon) อะลูมินากัมมันต์ (Activated alumina) ซิลิกาเจล (Silica gel) ซึ่งไม่มีโครงสร้างเป็นโครงสร้างผลึก (Crystal structure) และช่องว่างระหว่างโมเลกุลไม่สม่ำเสมอ ซีโอไลต์อาจมีขนาดตั้งแต่ 20-50 อังสตรอม หรือ 20-1000 อังสตรอม

ซีโอไลต์แสดงคุณสมบัติเป็นสารดูดซับที่ดี สามารถแยกก๊าซและไอผสม เช่น แอมโมเนีย ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น กระบวนการดูดซับ (Adsorption) จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซีโอไลต์ และขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับ

ซีโอไลต์มีทั้งที่พบตามธรรมชาติ (Natural หรือ Mineral zeolite) และที่สังเคราะห์ขึ้นแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ที่พบตามธรรมชาติมีมากกว่า 35 ชนิด ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์มีถึงประมาณ 100 ชนิด เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกัน ดังนั้นจะมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพแตกต่างกัน

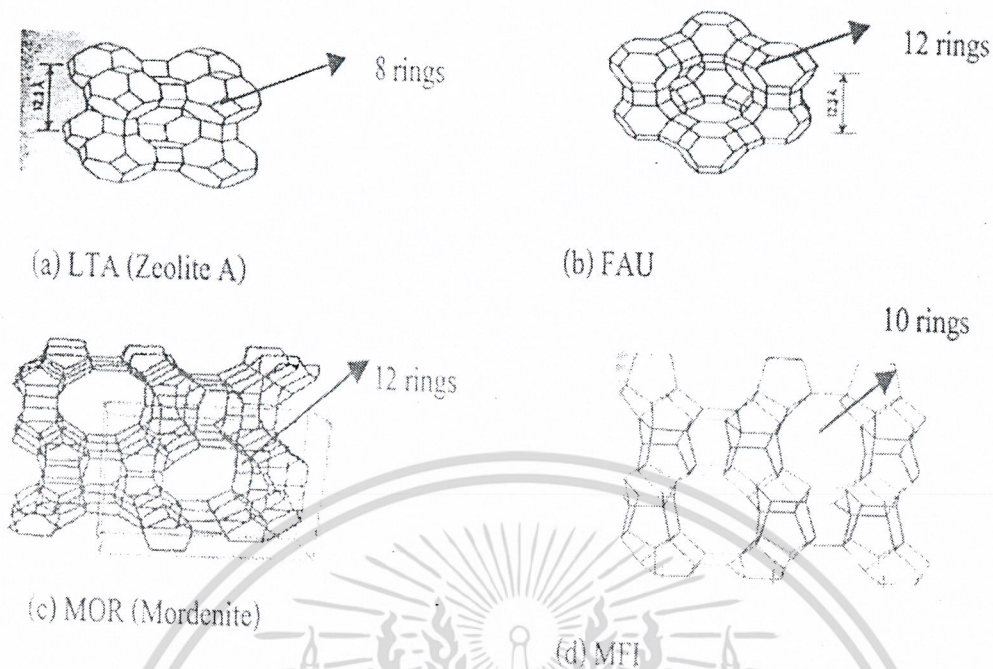
ซีโอไลต์ธรรมชาติพบทั้งที่อยู่บนผิวโลกและใต้มหาสมุทร จะพบมากในโพรงของหิน

บาซอลท์ และหินภูเขาไฟ (Volcanic rock) มีอยู่มากกว่า 35 ชนิด แต่เดิมซีโอไลต์ธรรมชาติถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง อุตสาหกรรมกระดาษ ปัจจุบันยังใช้ในอุตสาหกรรมแยกก๊าซธรรมชาติ และแยกแอมโมเนียในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย เป็นต้น

ซีโอไลต์สังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ที่เตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีโดยมีการควบคุมสภาวะเพื่อให้เกิดผลึกจำนวนมากขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เช่น ซีโอไลต์ เอ (Zeolite A) ซีโอไลต์เอ็กซ์ (Zeolite X) ซีโอไลต์บีต้า (Zeolite Beta) ซีโอไลต์แอล (Zeolite L) เป็นต้น ซีโอไลต์สังเคราะห์มีประโยชน์และถูกนำมาใช้มากกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติเนื่องจากมีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอ มีโครงสร้างแน่นอน และค่อนข้างบริสุทธิ์ มีสารปนเปื้อน เช่น เหล็กน้อย ซีโอไลต์ธรรมชาติจะมีเหล็กปนเปื้อนอยู่มากกว่า ปัจจุบัน ซีโอไลต์มีประโยชน์ และมีบทบาทในอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น

1. ใช้เป็นสารดูดซับในการแยกและทำให้บริสุทธิ์ในกระบวนการอุตสาหกรรมทางเคมี เช่น ในกระบวนการอบแห้งของก๊าซธรรมชาติแยกสารที่ทำให้เกิดมลภาวะ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ออกจากอากาศ เป็นต้น
2. ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ในกระบวนการการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Cracking catalyst) ในอุตสาหกรรมน้ำมันใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นแก๊สโซลีน
3. ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน เช่น แยกสารเรดิโอไอโซโทป (Radioisotope) จากกากของเสีย กำจัดแอมโมเนียในน้ำทิ้ง กำจัดสารโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว เหล็ก ปะปน แมงกานีส เป็นต้น

เนื่องจากซีโอไลต์มีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซีโอไลต์แต่ละชนิดจึงมีคุณสมบัติเหมาะในการใช้งานแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อจะนำซีโอไลต์ไปใช้งานในด้านใดจึงควรศึกษาคุณสมบัติให้เหมาะสมก่อน เพื่อให้สามารถใช้งานได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด โครงสร้างของ ซีโอไลต์ชนิดต่างๆ ที่สำคัญ [3] แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่สำคัญชนิดต่าง [4]

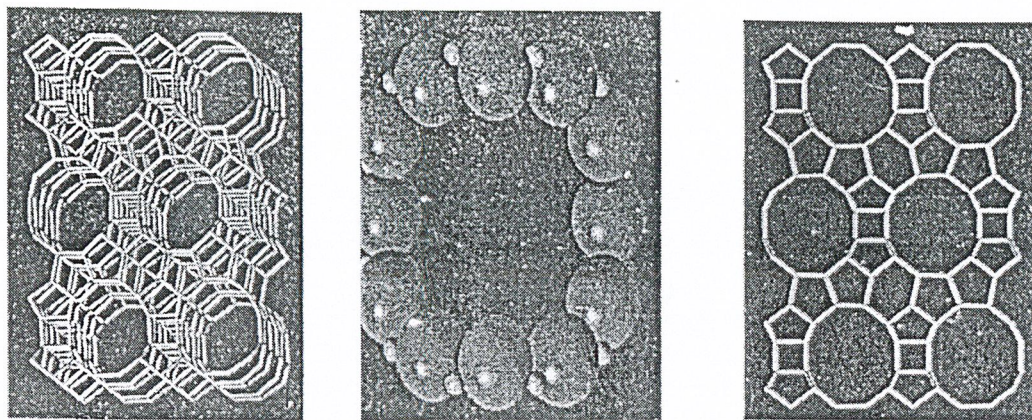
2.1.1 ซีโอไลต์ชนิดบีต้า (Zeolite Beta) [5]

ซีโอไลต์บีต้ามีการค้นพบในปี ค.ศ. 1967 และได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ มากมาย เช่น

- ปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking)
- ปฏิกิริยาอัลคิเลชัน (Alkylation)
- ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerisation)
- ปฏิกิริยาดิสพรอพออร์ทิเนชัน (Disproportionation)

ซีโอไลต์บีต้ามีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ในผลึกที่มีช่องกว้างประมาณ 20-1000 โครงสร้างของบีต้าเป็นระบบปิด 3 ทิศทาง (3-Dimensional pore opening system) แบบท่อ (Channel structure) รูปทรงจุลภาคของซีโอไลต์บีต้าเป็นรูปทรงจุลภาคขนาดใหญ่ (12 T-ring หรือ Large Pore) มีขนาด 0.76x0.64 นาโนเมตร ซีโอไลต์บีต้าโครงสร้างแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดบีต้า [5]

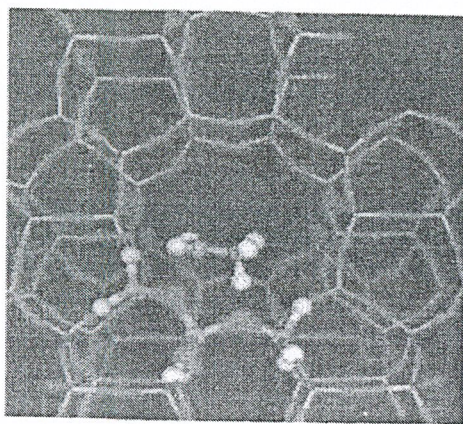
2.1.2 ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 [6]

ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสูง การแทนที่ของซิลิกอนไอออน (ประจุ 4+) ด้วยอะลูมิเนียมไอออน (ประจุ 3+) ทำให้โปรตอนเพิ่มขึ้น โดยโปรตอนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ซีโอไลต์มีระดับของความเป็นกรดสูงซึ่งส่งผลต่อการทำปฏิกิริยา ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนสูงตลอดทั้งโครงสร้าง โครงสร้างของรูพรุนมีลักษณะเป็นสองทิศทางตัดกัน ซึ่งจะยอมให้โมเลกุลที่มีขนาดเหมาะสมผ่านจากจุดหนึ่งในตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังที่อยู่ในอนุภาครูพรุนที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ โดยทั้งสองแบบก่อตัวด้วยวงแหวนออกซิเจนที่สมาชิก 10 ตัวเหมือนกัน แบบแรกของรูพรุนหน้าตัดขวางมีลักษณะเป็นเส้นตรงและรูปไข่ แบบที่สองรูพรุนที่ตัดผ่านจะทำมุมให้เหมาะสมกับรูพรุนที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงในรูปแบบที่ซิกแซกโดยหน้าตัดขวางจะมีลักษณะเป็นวงกลม ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 [7]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 [7]

2.2 การดูดซับ [8]

การดูดซับ คือ กระบวนการจับโมเลกุลของของเหลวหรือก๊าซด้วยของแข็งหรือของเหลว โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) จะอยู่บนผิวของสารดูดซับ ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นของแข็ง นิยมใช้สารประกอบที่มีรูพรุนเป็นสารดูดซับ เพราะว่ามีพื้นที่ผิวภายในมาก เมื่อโมเลกุลของของไหลผ่านเข้าไปในการดูดซับก็จะถูกดูดไว้ภายในรูพรุน ซึ่งกระบวนการดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนของสารถูกดูดซับ คุณสมบัติของทั้งสารถูกดูดซับและสารดูดซับจำนวนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ (Molecular layers) ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิว และขนาดรูพรุนของสารดูดซับ การดูดซับโมเลกุลของสารบนผิวของสารดูดซับ อาจเกิดจากแรงทางกายภาพหรือแรงจากทางเคมีหรือจากทั้งสองแรงร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 สารดูดซับ

สารดูดซับสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

1. สารดูดซับแบบไม่มีขั้ว (Non-polar adsorbent) จะเกิดการดูดซับแบบกายภาพ สารดูดซับที่สำคัญของกลุ่มนี้ คือ คาร์บอนกัมมันต์
2. สารดูดซับแบบมีขั้ว (Polar adsorbent) การดูดซับที่เกิดขึ้นกับสารประเภทนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลก๊าซและผิวของสารดูดซับได้แก่ พวกรอกไซด์ เช่น ออกไซด์ของซิลิกา และออกไซด์ของโลหะ วัสดุจำพวกซิลิกา ได้แก่ ซิลิกาเจล ฟูลเลอร์เอิร์ธ (Fuller's earth)
3. สารดูดซับประเภทที่อาศัยปฏิกิริยาเคมี สารดูดซับนี้จะมีผิวหน้าที่ดูดซับทางเคมี โดยทั่วไปสารดูดซับที่ใช้ ได้แก่ โคลไมต์ คาร์บอนกัมมันต์ อัลคาไลน์อะลูมินา ซิลิกาเจลกัมมันต์ และแมงกานีสออกไซด์กัมมันต์

2.2.2 การจำแนกขนาดของรูพรุน [9]

จากการศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างและขนาดของรูพรุน พบว่ามีหลายลักษณะแตกต่างกันของแข็งบางชนิดอาจจะมีรูพรุนขนาดเล็กเท่ากับขนาดโมเลกุล หรือเพียง 2-3 อังสตรอม แต่บางชนิดอาจมีรูพรุนขนาดใหญ่เป็นล้านๆ อังสตรอมก็ได้ Dubinin ได้จำแนกขนาดของรูพรุนโดยอาศัยสมบัติด้านการดูดซับและการควบแน่นในรูพรุน การจัดแบ่งตามลักษณะนี้ต่อมาได้รับการยอมรับจากที่ประชุม The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) และถือเป็นมาตรฐานสากลดังนี้

ตารางที่ 2.1 การจัดแบ่งขนาดรูพรุนตามมาตรฐานสากล [9]

ชื่อรูพรุน	ความกว้างของรูพรุน
รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore)	น้อยกว่า 20 อังสตรอม
รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore)	ระหว่าง 20-500 อังสตรอม
รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore)	มากกว่า 500 อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเลขที่บอกขนาดรูพรุนในตารางเป็นค่าประมาณ ทั้งนี้ด้วยเหตุว่าความกว้างของรูพรุนที่จัดแบ่งแต่จะมีปัญหาในการตัดสินว่าเป็นรูพรุนประเภทใดปกติจะใช้สมบัติด้านการดูดซับ ประกอบ การพิจารณา ตัวอย่างเช่น รูพรุนขนาด 20 อังสตรอม ที่แค่นี้ไปมาและมีการเชื่อมโยงกับ รูพรุนอื่นจะมีแรงดูดซับมากกว่ารูพรุนขนาดเดียวกันที่ตรงและไม่มีมีการเชื่อมโยง รูพรุน กรณีแรกจัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กและกรณีหลังจัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง

2.2.3 กลไกการดูดซับ [10]

โดยทั่วไปการดูดซับเกิดขึ้นผ่าน 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

1. การแพร่ไปยังผิวของสารดูดซับ (Diffusion to adsorbent surface) โมเลกุลของสารดูดซับแพร่ผ่าน Bulk Phase ไปยังผิวด้านนอกของอนุภาคของสารดูดซับ
2. การผ่านเข้ารูพรุนของสารดูดซับ (Migration into pores of adsorbent) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ผิวด้านนอกซึ่งมีพื้นที่น้อยไปยังรูพรุนภายในอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าและการดูดซับเกือบทั้งหมดจะยึดติดอยู่ภายในรูพรุน
3. การดูดซับชั้นเดียวของสารดูดซับอย่างรวดเร็ว (Monolayer build up of adsorption) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดอยู่ที่ผิวภายในรูพรุน

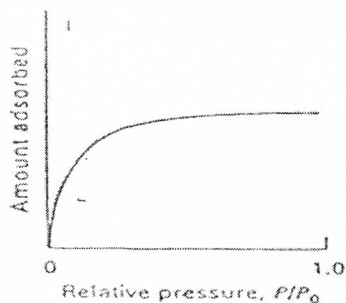
2.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherms) [8]

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่จะถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสารที่ถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุลและที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ไปเขียนกราฟ กับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ จะได้ไอโซเทอมของการดูดซับซึ่งสามารถนำไปใช้หาความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับสาร และสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่างๆ ได้

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่มดังนี้

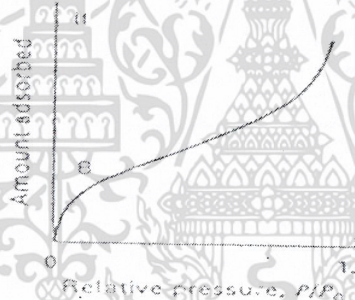
1. Langmuir ได้มาจาก Langmuir equation isotherm รูปร่างของไอโซเทอมแบบนี้จะพบมากในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากและมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อยมาก การดูดซับจะเป็นแบบชั้นเดียว ดังแสดงในรูป 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



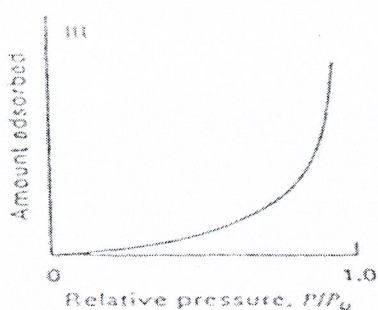
รูปที่ 2.6 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแบบ Langmuir [8]

2. Sigmoid หรือ S-shaped isotherm จะพบในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูป 2.7 ที่จุด B จะเป็นตำแหน่งที่มีการดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์ และเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น



รูปที่ 2.7 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแบบ Sigmoid [8]

3. Convex isotherm ที่ไม่มีจุด B จะเป็นแบบที่พบยาก เกิดขึ้นในกรณีที่มีการดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีแรงดึงดูดที่อ่อน ทำให้ตัวดูดซับไม่เปียกผิวของตัวดูดซับเช่น ไอน้ำบนกราไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแบบ Convex [8]

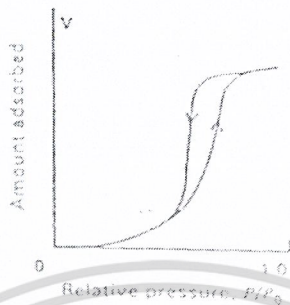
4. เหมือนกับแบบ Sigmoid จะพบในตัวดูดซับที่มีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 2-50 นาโนเมตร ที่ค่าอัตราส่วนความดันต่อความดันเริ่มต้น (P/P_0) ต่ำ ลักษณะของเส้นไอโซเทอมจะเหมือนกับแบบ Sigmoid เมื่อค่าอัตราส่วนความดันต่อความดันเริ่มต้น (P/P_0) เพิ่มมากขึ้นจะเกิด Capillary condensation ขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิด Hysteresis effect ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ไอโซเทอมชนิดนี้จะพบกับตัวเร่งปฏิกิริยาในทางอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.9 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพที่เหมือนกับแบบ Sigmoid ที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 2-50 นาโนเมตร[8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เหมือนกับแบบ Convex isotherm แต่จะเกิด Capillary condensation ที่อัตราส่วนความดันต่อความดันเริ่มต้น (P/P_0) สูง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ไอโซเทอมชนิดนี้พบได้ยาก



รูปที่ 2.10 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพที่เหมือนกับแบบ Convex [8]

2.4 แบบจำลองการดูดซับที่อุณหภูมิต่ำ (Models for adsorption isotherm)

สามารถใช้ได้กับทั้งการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี แต่มีข้อแม้ว่า

1. จะต้องมีความสมดุลที่แท้จริง
2. การดูดซับสามารถผันกลับได้ โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในตัวถูกดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่อทำการดูดซับและการคายซับหลายๆ ครั้ง

2.4.1 แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานของทฤษฎีนี้มีแนวความคิดจากแบบจำลองชั้นเดียว ดังนี้

1. ที่ทุก ๆ ตำแหน่งผิวสัมผัส สามารถดูดซับโมเลกุลได้
2. ไม่มีแรงกระทำระหว่างตัวดูดซับ
3. พลังงานและกลไกการดูดซับของทุก ๆ โมเลกุลบนผิวตัวดูดซับเกิดขึ้นเหมือนกัน
4. การดูดซับของโมเลกุลบนแต่ละพื้นผิวของตัวดูดซับ จะเกิดแบบชั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดให้

$$\theta = \frac{q}{q_m} \quad (2.1)$$

โดยที่ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

q_m คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (มิลลิกรัม/กรัม)

θ คือ สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับต่อพื้นที่ผิวที่ใช้ดูดซับทั้งหมด

อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด

$$r_a = k_a C(1 - \theta) \quad (2.2)$$

โดยที่ k_a คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ (1/นาที)

C คือ ค่าความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

อัตราการคายซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด

$$r_d = k_d \theta \quad (2.3)$$

โดยที่ k_d คือ ค่าคงที่ของการคายซับ (มิลลิกรัม/ลิตร-นาที)

เมื่อคิดที่สภาวะสมดุล อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ

$$k_a C(1 - \theta) = k_d \theta \quad (2.4)$$

$$\theta = \frac{k_a C}{(k_d + k_a C)} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดได้

$$K_A = \frac{k_a}{k_d} \quad (2.6)$$

จะได้สมการ

$$q = \frac{q_m K_A C}{1 + K_A C} \quad (2.7)$$

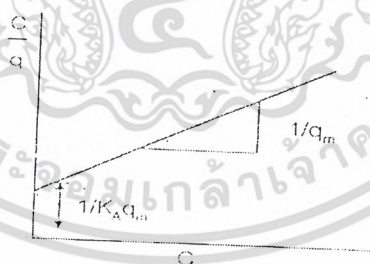
จัดรูปให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้เป็น

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{K_A q_m} + \frac{C}{q_m} \quad (2.8)$$

หรือ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} \left(\frac{1}{K_A q_m} \right) \frac{1}{C} \quad (2.9)$$

ค่า q_m และค่า K_A สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกนของกราฟรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปของกราฟเส้นตรง[8]

2.5 อัตราการดูดซับ [11]

ในการทดลองศึกษาการดูดซับสีย้อม จะใช้แบบจำลอง 2 แบบในการทดสอบ คือ

1. แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง
2. แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง

2.5.1 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง

สมการแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_1 - q_t) \quad (2.10)$$

ทำการอินทิเกรตจาก $t = 0$ → $t = t$

$$q_t = 0 \rightarrow q_t = q_t$$

$$\log(q_1 - q_t) = \log(q_1) - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.11)$$

โดยที่ q_1 คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

q_t คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/กรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/นาที)

t คือ เวลา (นาที)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_1 - q_t)$ กับ t จะได้เป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า k_1 ได้จากความชัน

2.5.2 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง

สมการแบบจำลองการดูดซับอันดับสองสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_2 - q_t)^2 \quad (2.12)$$

ทำการอินทิเกรต จาก $t = 0 \longrightarrow t = t$

$$q_t = 0 \longrightarrow q_t = q_t$$

$$\frac{1}{(q_2 - q_t)} = \frac{1}{q_2} + k_2 t \quad (2.13)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_2^2} + \frac{1}{q_2} t \quad (2.14)$$

โดยที่ q_2 คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สมดุลที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)
 q_t คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/กรัม)
 k_2 คือ ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (1/นาที)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า k_2 ได้จากจุดตัดแกน y

2.6 สีย้อม [1]

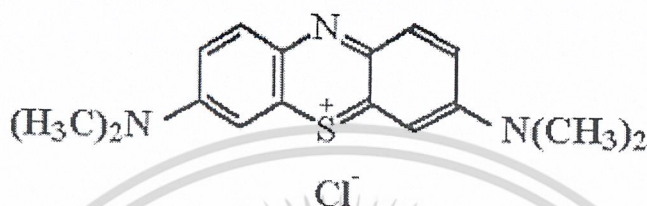
สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียม หรือถ่านหินเมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซินไซลีนแอนทราซีนโทลูอินแนพทาลีน และพาราฟินซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาหลายชนิดขึ้นอยู่กับ ความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไปการที่จะนำสีย้อมใดๆมาย้อมให้ได้ผลดี ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีอำนาจมากกว่าน้ำ จะเกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อม มีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดเรียงตัวกัน ในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดเส้นใยได้เอง (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (Bond) ยึดติดกันแน่น อาจกล่าวได้ว่า อิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใย คือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond), แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' force), แรงไอออน (Ionic force) และ พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กำลังแรงเหล่านี้มักไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อม กับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ การเกิดสีของสีย้อม สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอม ประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า "โครโมฟอร์" ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม คือ

- กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso group)
- กลุ่มไนโตร (Nitro group)
- กลุ่มอะโซ (Azo group)
- กลุ่มเอทิลีน (Ethylene group)
- กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl group)
- กลุ่มคาร์บอนิล – ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen group)
- กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur group)

กลุ่มอะตอมต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวไว้บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป

2.6.1 สีย้อมชนิดเมธิลีนบลู (Methylene blue)[12]

เมธิลีนบลู มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าสวิสบลู (Swiss blue) มีความสามารถในการละลายน้ำได้ประมาณ 3.55 เปอร์เซ็นต์ เมื่อละลายน้ำแล้วจะเป็นสีน้ำเงิน มีน้ำหนักโมเลกุล 319.86 มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเมธิลีนบลู (Methylene blue) [12]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ghash และคณะ[13] กล่าวว่า การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าเกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์และสี โดยทั่วไปวิธีการกำจัดสีและสารอินทรีย์จะสามารถทำได้โดยการใช้ระบบทางชีววิทยาควบคู่กับระบบฟิสิกส์-เคมี แม้ว่าระบบกำจัดทางชีววิทยาจะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดีแต่ไม่สามารถกำจัดสีได้เป็นที่น่าพอใจ กระบวนการดูดซับด้วยถ่าน (Carbon adsorption) จะตามด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยเคมี (Chemical coagulation) เป็นวิธีที่สามารถกำจัดสีจากน้ำเสียได้ การรวมกระบวนการทางชีววิทยาและการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) สามารถกำจัดสารเคมีและสีของน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าได้

Mamdouh M. Nassar, Yehia H, Magdy [14] ใช้ผลปาล์มดูดซับสีย้อมพื้นฐาน 3 ชนิด ได้แก่ สีย้อมสีเหลือง (Yellow dye) สีย้อมสีแดง (Red dye) และสีย้อมสีน้ำเงิน (Blue dye) พบว่าผลปาล์มมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมสีเหลือง (Yellow dye) ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ สีย้อมสีแดง (Red dye) และสีย้อมสีน้ำเงิน (Blue dye) ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดูดซับ (คิดจากปริมาณที่สามารถดูดซับได้เท่านั้น) พบว่าค่าใช้จ่ายในการดูดซับสีย้อมสีเหลือง (Yellow dye) เท่ากับ 1.9 เปอร์เซ็นต์ สีย้อมสีแดง (Red dye) เท่ากับ 4.4 เปอร์เซ็นต์ สีย้อมสีน้ำเงิน (Blue dye) 7.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คาร์บอนกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Asfour และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาสภาวะสมดุลของการดูดซับสีย้อมประเภทสีย้อมพื้นฐาน (Basic dyes) โดยใช้ซีลี้อย่างเข้มข้นเป็นสารดูดซับ โดยทำการทดลองเป็น 2 ชุด ให้มีขนาดอนุภาคและอุณหภูมิต่างกัน พบว่าการดูดซับของสีย้อมประเภทสีย้อมพื้นฐาน (Basic dyes) โดยใช้ซีลี้อย่างเข้มข้นเป็นสารดูดซับสามารถแสดงความสัมพันธ์ทางไอโซเทอมของ Langmuir และ Freundlich ได้เป็นอย่างดี และความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดอนุภาคลง และเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายขึ้น นอกจากนี้ซีลี้อยังมีราคาเพียงร้อยละ 8.4 ของราคาคาร์บอนกัมมันต์

V.J.P. Poots และคณะ [16] ใช้ Peat (เป็นถ่านหินร่วนที่เกิดจากต้นไม้ที่เกิดการทับถมกัน) ในการดูดซับสี Telon blue (Acid blue 25) โดยได้ศึกษาทั้งไอโซเทอมของ Langmuir หรือ Freundlich ผลของเวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นและขนาดของอนุภาค peat โดยใช้ระบบ Fixed bed ต่ออนุกรมกัน

Gang Sun และ Xiangjing Xu [17] ใช้ก้านดอกทานตะวันในการดูดซับสี 2 ประเภทได้สีย้อมพื้นฐาน (Basic dyes) พวก เมธิลีนบลู และสีย้อมสีแดง 9 (Basic red 9) และ Direct dyes พวก Congo red และ Direct blue 71 พบว่าก้านดอกทานตะวันสามารถดูดซับสีย้อมพื้นฐาน (Basic dyes) ได้ในปริมาณสูงกว่า Direct dyes มาก นอกจากนี้แกนกลางของก้านดอกทานตะวันซึ่งมีลักษณะอ่อนนุ่มและมีรูพรุนมากก็สามารถดูดซับสีได้ดีกว่าส่วนอื่นๆ และขนาดของก้านดอกทานตะวันที่ใช้ดูดซับก็มีผล คือ ยังมีขนาดเล็กยิ่งดูดซับได้ดีเพราะมีพื้นที่ผิวมาก

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

1. เครื่องอัดความดัน
2. เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge)
3. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
4. เครื่องวัดการกระเจิงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction)
5. เครื่องวัดการกระเจิงแสงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence spectrophotometer)
6. ตู้อบ
7. บีกเกอร์พลาสติก 250 มิลลิลิตร
8. บีกเกอร์ขนาด 250 และ 1000 มิลลิลิตร
9. ช้อนตักสาร
10. หลอดหยด
11. พลาสติกถนอมอาหาร
12. ฟอล์ยถนอมอาหาร
13. ถ้วยกระเบื้องเคลือบ
14. เครื่องปั่นกวน
15. เทปลอนทรงกระบอกสูง
16. บิวเรท
17. ชุดขาตั้งบิวเรท
18. ขวดวัดปริมาตรขนาด 50, 100, 500, 1000 มิลลิลิตร
19. ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 และ 500 มิลลิลิตร
20. กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TEAOH)
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
3. โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)
4. โซเดียมอะลูมิเนต (NaAlO_2)
5. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
6. คะตะลอยด์ (Cataloid)
7. เมธิลีนบลู

วิธีการทดลอง

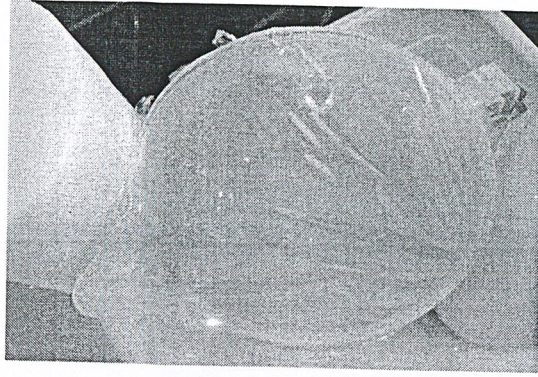
3.3 การเตรียมตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า

เตรียมตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าแบบไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) เป็นการเตรียมที่สภาวะความดัน 3 บาร์ อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมเจล

1. ผสมเตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TEAOH) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้าด้วยกัน และทำการปั่นกวนอย่างแรง จนได้สารละลายใส ใช้เวลาประมาณ 20 นาที
2. ผสมโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) โซเดียมอะลูมิเนต (NaAlO_2) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้าด้วยกัน เติมลงไปในข้อ 1 (จะได้สารละลายขาวขุ่น) ทำการปั่นกวนอย่างแรง จนได้สารละลายใส ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
3. เติมกะตะลอยด์ (Cataloid) โดยเติมตัวกะตะลอยด์ด้วยหลอดหยดทีละหยด และทำการปั่นกวนอย่างแรง จนได้สารละลายใสจะได้ลักษณะเป็นเจลใสแสดงดังรูปที่ 3.1 ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

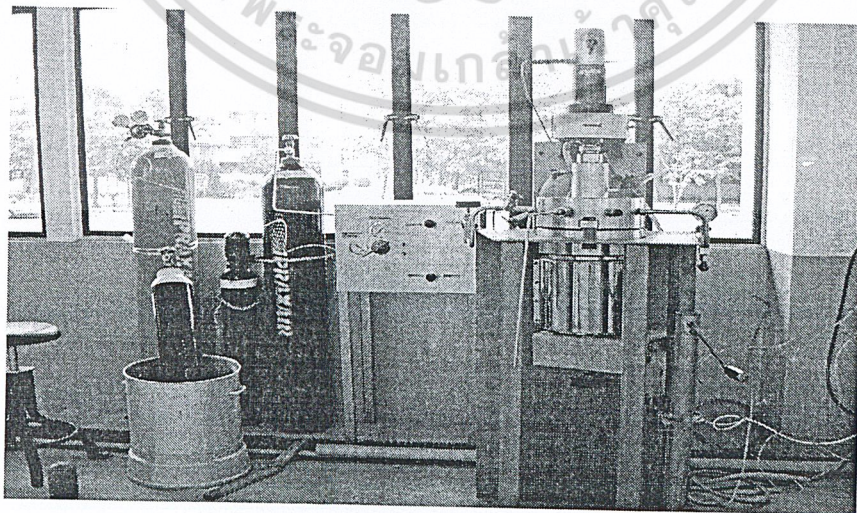
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ลักษณะเจลตัวดูดซับซีไอโอดีชนิดบีต้าที่เตรียมได้

3.3.2 ขั้นตอนการตกผลึก (ขั้นตอนการนำเจลเข้า เครื่องอัดความดัน)

นำเจลที่เตรียมได้เทลงในภาชนะเทปลอน และติดตั้งอุปกรณ์เครื่องอัดความดัน ดังรูปที่ 3.2 ทำการเปิดก๊าซไนโตรเจน และใส่ก๊าซที่ค้างอยู่ในด้วยก๊าซไนโตรเจน 3 ครั้ง จากนั้นทำการตรวจรอยรั่ว โดยตั้งความดันไว้ที่ค่า ๆ หนึ่ง สังเกตดูค่าความดัน ถ้าความดันยังคงเหลืออยู่ที่ค่าเดิม แสดงว่าไม่มีรอยรั่วเกิดขึ้น และปรับค่าความดันไว้ที่ 3 บาร์ ทำการเปิดวาล์วน้ำและควบคุมอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกคือ 135 องศาเซลเซียส และเมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการให้เริ่มจับเวลา และควบคุมทิ้งไว้ 40 ชั่วโมง เมื่อครบ 40 ชั่วโมงนำสารที่ได้ออกจาก เครื่องอัดความดัน และนำสารปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (PH) ให้ได้ประมาณ 8-9 โดยนำมาล้างกับน้ำกลั่นนำไปสารที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่ออบจนแห้งแล้วจะได้ผงที่มีลักษณะคล้ายผงแป้งที่ได้จากการสังเคราะห์



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์เครื่องอัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ขั้นตอนการเตรียมรูปของโซเดียม

นำผงที่มีลักษณะคล้ายผงแป้งที่ได้จากการสังเคราะห์มาเผาด้วยเครื่องคาร์บอลไลท์ (Carbolite) เพื่อทำการเผาไล่เทมเพลต (Template) ที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-5 ชั่วโมง โดยตั้งค่าต่างๆ ของเครื่องคาร์บอลไลท์ (Carbolite) มีดังนี้

$$\begin{array}{ll} R_1 = 8.6 & R_2 = 50 \\ L_1 = 540 & L_2 = 540 \\ D_1 = 3.5 & D_2 = 0 \end{array}$$

- R_1 คือ อัตราในการเพิ่มอุณหภูมิ ขั้นตอนที่ 1 โดย $R_1 = L_1 - \text{อุณหภูมิห้อง} / 60$
 L_1 คือ อุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนที่ 1 หน่วยเป็นองศาเซลเซียส
 D_1 คือ เวลาที่ใช้ในขั้นตอนที่ 1 หน่วยเป็นชั่วโมง
 R_2 คือ อัตราในการเพิ่มอุณหภูมิ ขั้นตอนที่ 2 โดย $R_2 = L_2 - \text{อุณหภูมิห้อง} / 60$
 L_2 คือ อุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2 หน่วยเป็นองศาเซลเซียส
 D_2 คือ เวลาที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2 หน่วยเป็นชั่วโมง

3.4 การวิเคราะห์โดยวิธีการกระเจิงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) [18]

ตรวจดูความเป็นผลึกและรูปแบบ XRD ของตัวดูดซับซีโอไลต์โดยใช้เครื่อง X-Ray diffractometer SEIMENS D5000 ที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์โปรแกรม Diffract AT version 3.3 เพื่อควบคุมการวิเคราะห์ผล XRD การทดสอบนี้ปฏิบัติตามโดยใช้ การแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า $\text{CuK}\alpha$ กับสารที่ใช้กรอง คือ นิเกิล (Ni) และสภาวะที่ใช้วัดคือ

ช่วง 2θ ของการตรวจวัด	4-40°
ความสามารถในการแยกเฟส (Resolution)	0.04
จำนวนที่ตรวจมองกวาด (Scan)	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวิเคราะห์โดยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (XRFs)

ตรวจดูปริมาณของอะลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) และโซเดียม (Na) ในตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้การวิเคราะห์ผล XRFs ที่ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.6 ขั้นตอนการนำตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าและตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) ไปดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู [5]

3.6.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า และ ZSM-5 (26)

3.6.1.1 เตรียมสารละลายสีเมธิลีนบลู (Methylene blue) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ที่ความเข้มข้น 5, 10, 20, 30 และ 40 ส่วนในล้านส่วน (ppm)) ปริมาตร 400 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.6.1.2 ชั่งตัวดูดซับซีโอไลต์สองชนิดคือซีโอไลต์ชนิดบีต้า และ ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) 1.5 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีเมธิลีนบลู (Methylene blue) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทำการปั่นกวน และจับเวลา แล้วเก็บสารตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ นำตัวอย่างที่ได้ ไปเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) และนำมาวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)

3.6.1.3 นำผลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) กับ เวลา (t) และ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (q) กับ เวลา (t)

3.6.1.4 ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 3.6.1.1-3.6.1.3 โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26)

3.6.2 ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

3.6.2.1 ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับ ข้อ 3.6.1.1

3.6.2.2 ชั่งตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาเท่ากับ 38 มา 1.5 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีเมธิลีนบลู (Methylene blue) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ทำการปั่น กวน และจับเวลา แล้วเก็บสารตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ นำตัวอย่างที่ได้ ไปเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) และนำมาวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)

3.6.2.3 นำผลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) กับ เวลา (t) และ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (q) กับ เวลา (t)

3.6.3 ศึกษา Adsorption isotherm

3.6.3.1 ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับ ข้อ 3.6.1.1 และ ข้อ 3.6.1.2 โดย สารละลายจะเตรียมที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ใช้เวลาในการปั่นกวน 24 ชั่วโมงแล้ววัดค่าดูดกลืนแสงของสารละลายด้วยเครื่องยูวี- วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)

3.6.3.2 นำผลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (q) กับ ความเข้มข้นที่เหลือ

3.6.4 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

3.6.4.1 นำผลการทดลองจากหัวข้อ 3.6.1 มาเขียนกราฟระหว่างค่าเวลา ต่อ ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาใด ๆ $\left(\frac{t}{q_t}\right)$ กับ เวลา (t)

3.6.4.2 จากกราฟที่ได้นำมาคำนวณหาค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับ (1/นาทีก) และปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 การวัดปริมาณซิลิกาต่ออลูมินา ของตัวดูดซับซีโอไลต์

นำตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าและตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) มาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูง ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา ข้อมูลที่ได้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาธาตุประกอบในสารตัวอย่างได้ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆในตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า และตัวดูดซับซีโอไลต์

ชนิด ZSM-5

ชนิดของตัวดูดซับ	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (โดยน้ำหนัก)
บีต้า	13.6
ZSM-5 (26) ¹	26.2
ZSM-5 (38) ²	38.6

¹ ZSM-5 (26) คือ ZSM-5 ที่มี SiO₂/Al₂O₃ = 26

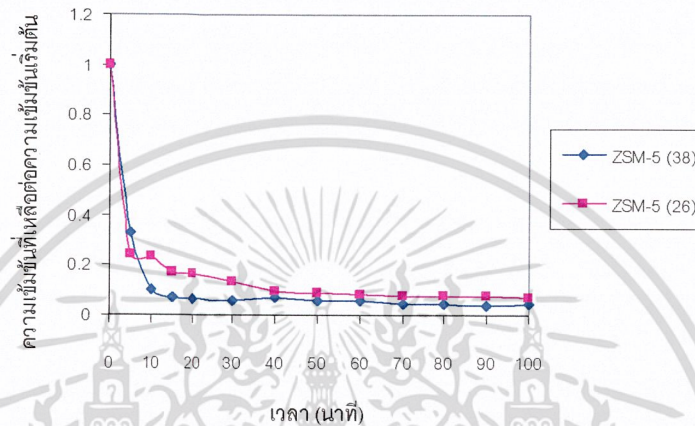
² ZSM-5 (26) คือ ZSM-5 ที่มี SiO₂/Al₂O₃ = 38

จากตารางแสดงค่าองค์ประกอบของธาตุต่างๆในตัวดูดซับซีโอไลต์แต่ละชนิด พบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า และตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เมื่อนำไปวิเคราะห์โดยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry หรือ XRFs) ค่าอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินาของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าเท่ากับ 13.6 และค่าอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินาของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) และ ZSM-5 (38) เท่ากับ 26.2 และ 38.6 ตามลำดับ

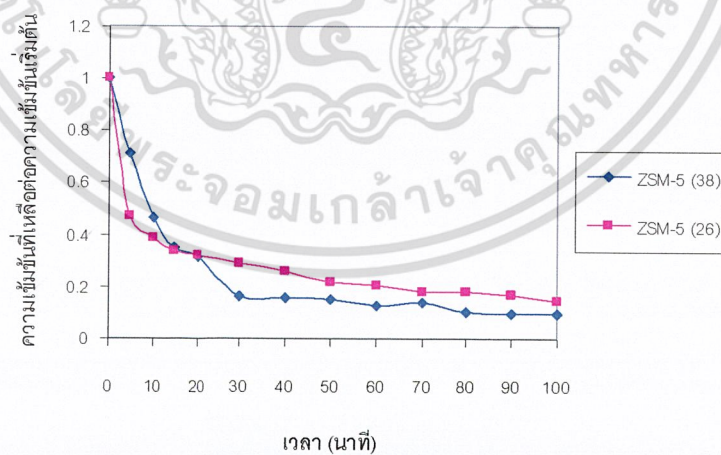
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา

จากการทดลองนำตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาเท่ากับ 26 และ 38 มาทำการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมทิลีนบลู (Methylene Blue) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5, 10, 20, 30, และ 40 พีพีเอ็ม แสดงดังรูปที่ 4.1

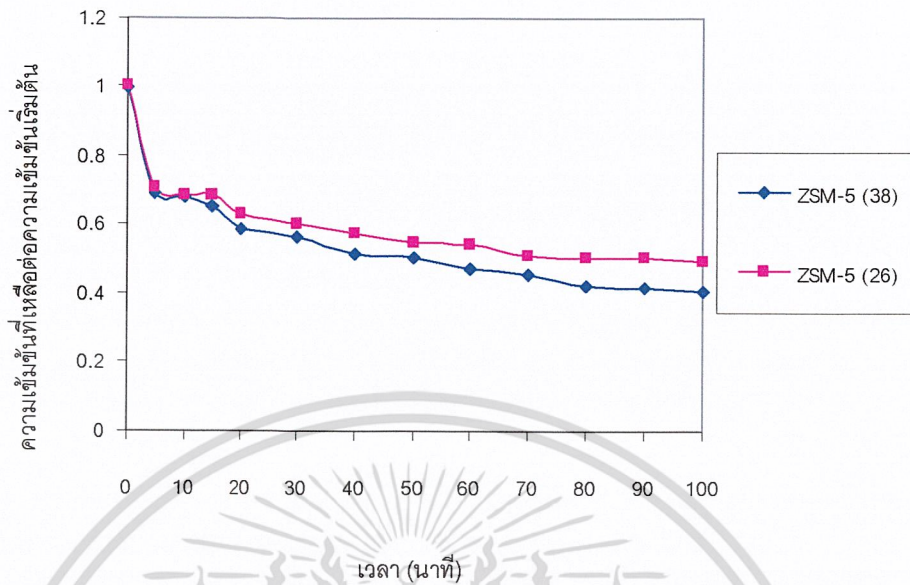


(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 5 พีพีเอ็ม

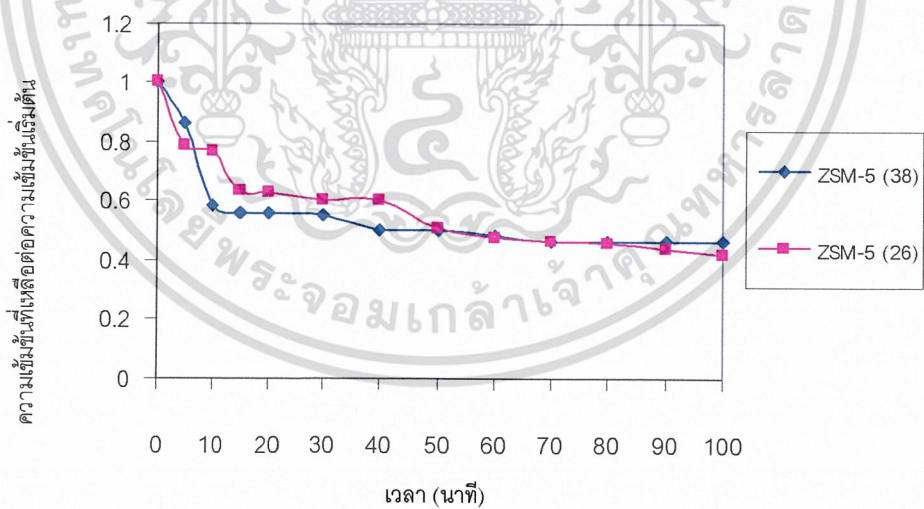


(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 10 พีพีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

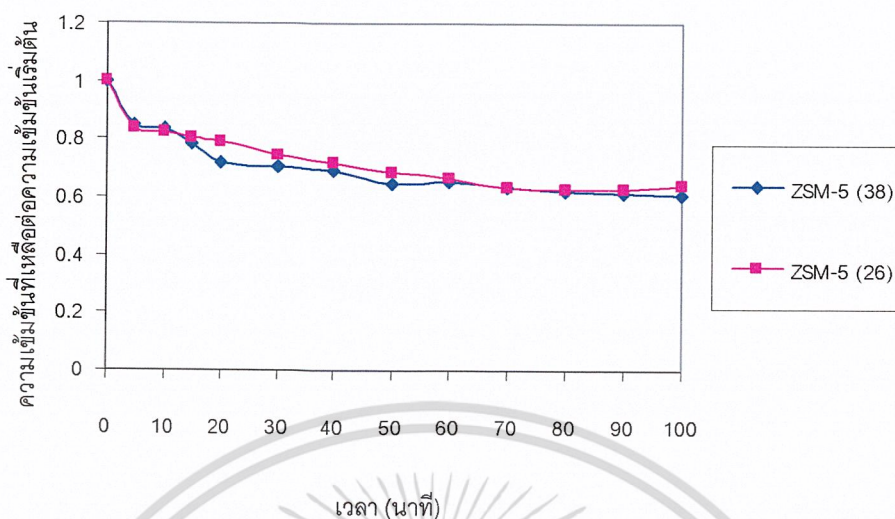


(ค) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายย้อมเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม



(ง) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายย้อมเท่ากับ 30 พีพีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- (จ) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสียอมเท่ากับ 40 พีพีเอ็ม

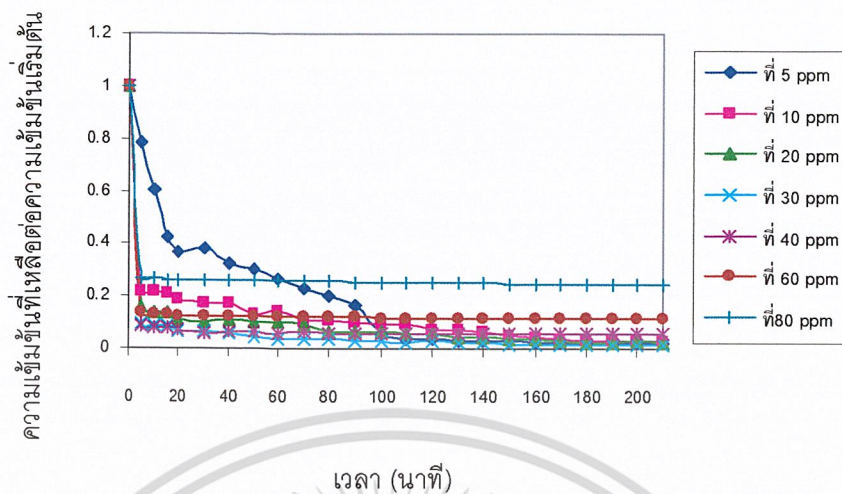
รูปที่ 4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออลูมินาต่อการดูดซับสารละลายสียอมโดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) และ ZSM-5 (38) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสียอมต่างกัน

จากกราฟพบว่าเมื่อทำการทดลองการดูดซับโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาเท่ากับ 26 และ 38 ตามลำดับ โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ในการทดลอง ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ จากผลการทดลองจะพบว่าถึงค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินามีค่าต่างกัน แต่ประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์มีค่าใกล้เคียงกัน

4.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสียอมเมธิลีนบลู (Methylene Blue) บนดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า และตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26)

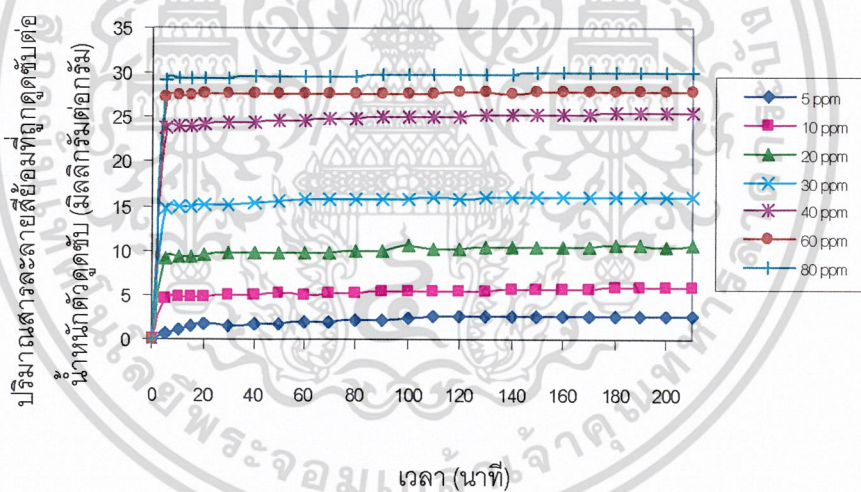
จากการทดลองใช้สารละลายสียอมเมธิลีนบลู (Methylene Blue) สำหรับตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5, 10, 20, 30, 40, 60 และ 80 พีพีเอ็ม และตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5, 10, 20, 30 และ 40 พีพีเอ็ม ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เวลา (นาที)

(ก)



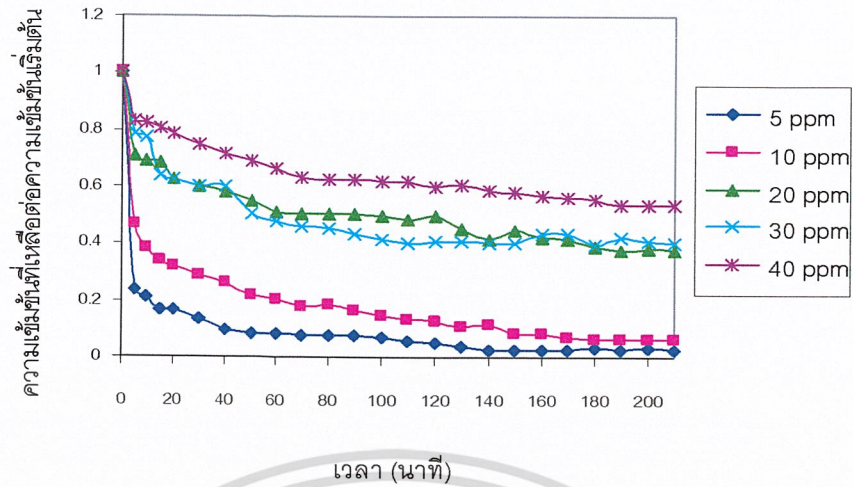
(ข)

รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมโดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า

(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา

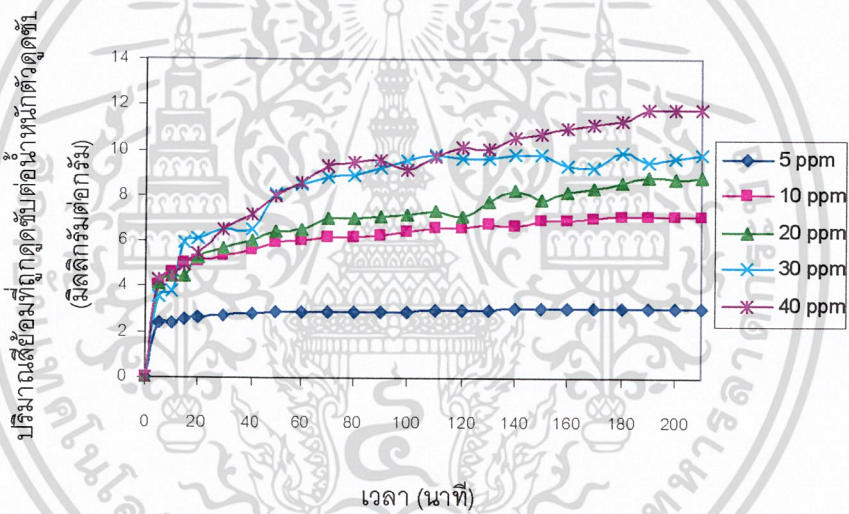
(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เวลา (นาที)

(ก)



เวลา (นาที)

(ข)

รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมโดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด

ZSM-5 (26)

(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่เหลือต่อความชื้นเริ่มต้นกับเวลา

(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีเมธิลีนบลู (Methylene Blue) สูงขึ้น อัตราเร็วในการดูดซับก็จะสูงขึ้นด้วย

4.4 การศึกษา Adsorption isotherm

Adsorption isotherm ที่ได้จากการทดลองแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาจะพบว่า ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าสามารถดูดซับสารละลายสีเมธิลีนบลู (Methylene Blue) ได้ดีกว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เพราะเมื่อพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพแล้วพบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้ามีโครงสร้างเป็นรูพรุนจุลภาคขนาดใหญ่ (12 T-ring หรือ Large Pore) มีขนาด 0.76x0.64 นาโนเมตร [5] ซึ่งตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) ที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดกลาง (10-ring หรือ Mesopore) [9] จึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำกว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า

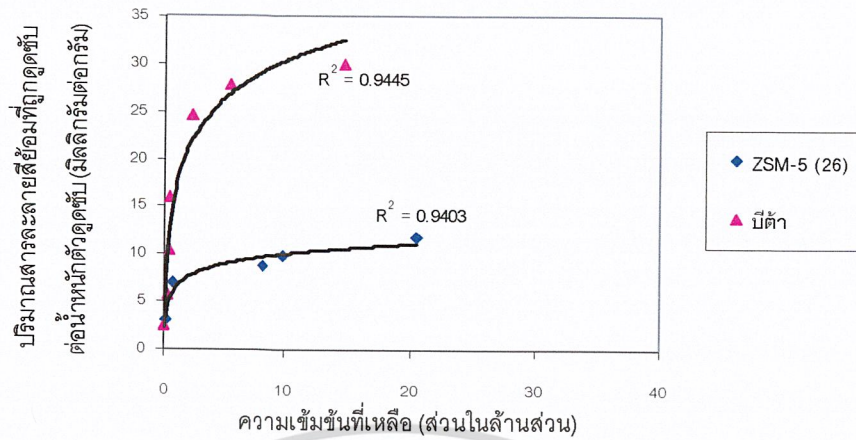
นำข้อมูลจาก Adsorption isotherm ในรูปที่ 4.4 ไปเขียนกราฟ เพื่อสร้างเป็นแบบจำลอง Langmuir adsorption isotherm

โดยแบบจำลอง Langmuir adsorption isotherm จะเขียนระหว่างความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือต่อปริมาณการดูดซับ (C/q) กับความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือ (C) ตามสมการที่ (2.8) กราฟที่เขียนได้จะแสดงรูปที่ 4.5 จากกราฟสามารถหาปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับสูงสุด (q_m) ได้จากความชันของกราฟและสามารถหาค่าคงที่ของ Langmuir (K_A) ได้จากจุดตัดของกราฟ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

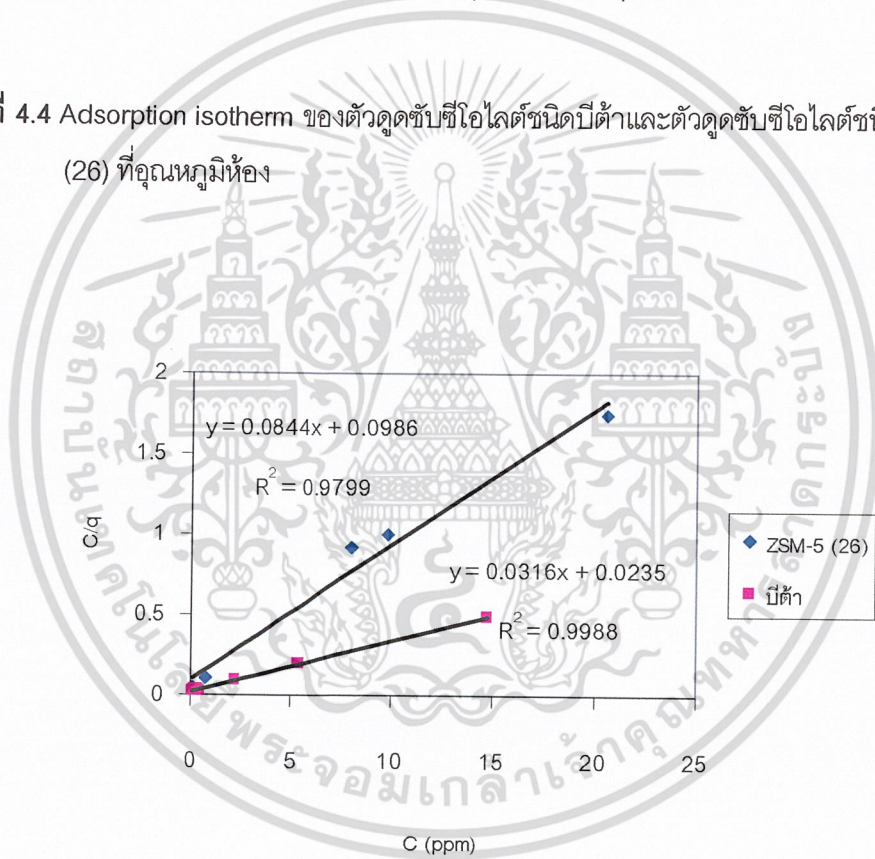
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของสมการ Langmuir

ชนิดของสี	ชนิดของตัวดูดซับ	Langmuir constant		
		K_a	q_m	R^2
สารละลายสีเมธิลีนบลู	ZSM-5 (26)	0.8559	11.8483	0.9799
	บีต้า	1.3447	31.6456	0.9988

จากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาค่า R^2 จะพบว่า Adsorption isotherm ที่ได้จากการทดลองจะใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Langmuir ซึ่งปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับสูงสุด (q_m) ของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าจะมีค่าสูงกว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26)



รูปที่ 4.4 Adsorption isotherm ของตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิดปีต้าและตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.5 Langmuir adsorption isotherm ของตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิดปีต้าและตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) ที่อุณหภูมิห้อง

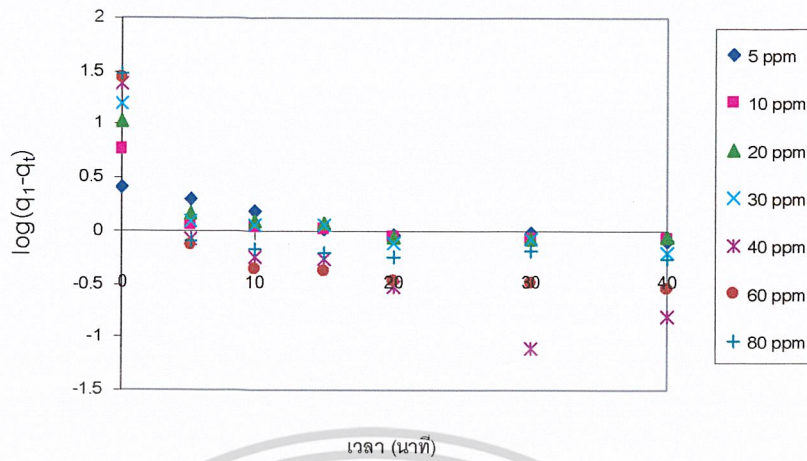
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

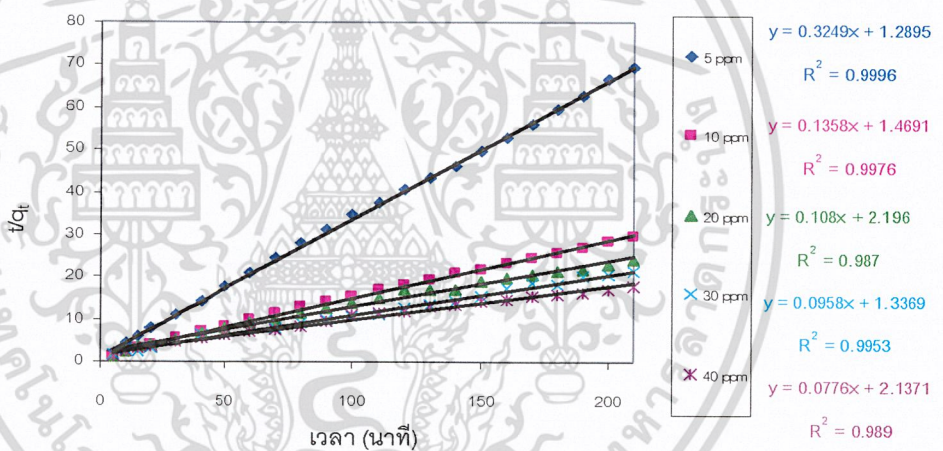
การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับจะทำการหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีย้อมโดยใช้แบบจำลองสองแบบ คือ แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง และแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง

จากผลการทดลองทำการเขียนกราฟระหว่างค่าผลต่างลอการิทึมของปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สมดุล (q_t) และปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (q_t) กับเวลา (t) และเขียนกราฟระหว่างเวลาต่อปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) จะได้กราฟของแบบจำลองอันดับหนึ่ง และแบบจำลองอันดับสองของตัวดูดซับซีไอไลต์ชนิดบีดำตามลำดับ ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.6





(ก)

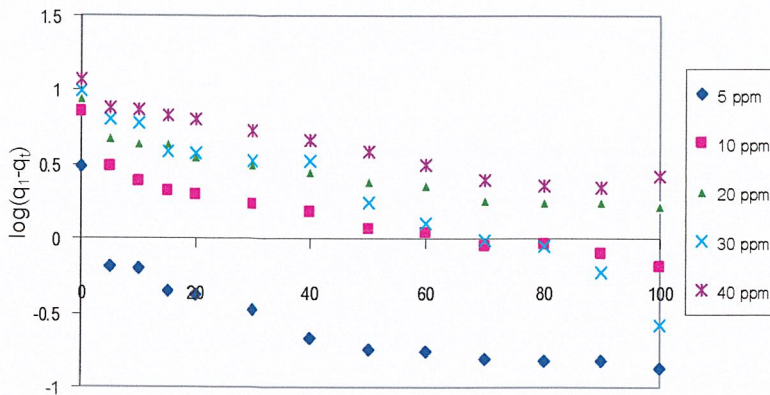


(ข)

รูปที่ 4.6 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมทิลีนบลู (Methylene Blue) โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า (ก) แบบจำลองอันดับหนึ่ง (ข) แบบจำลองอันดับสอง

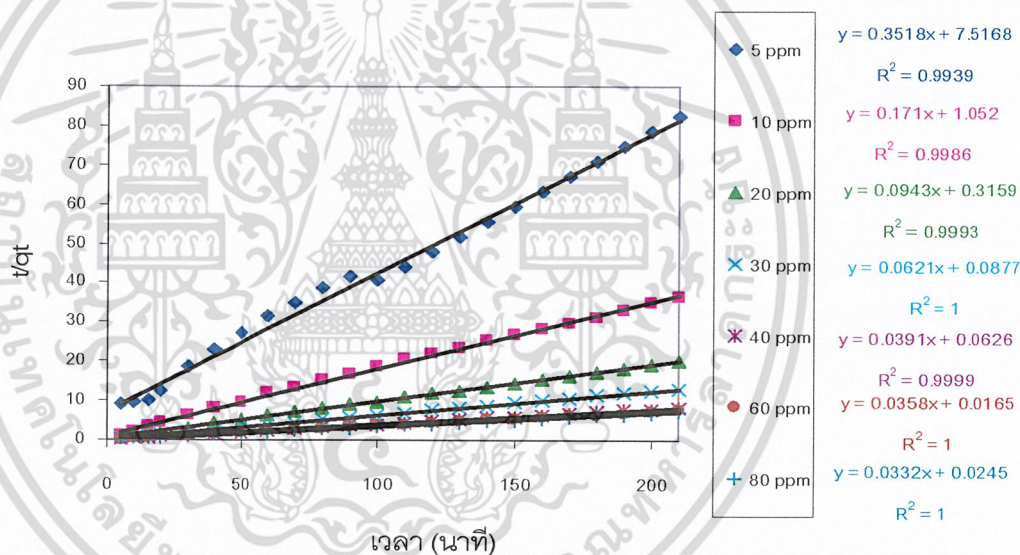
ทำการเขียนกราฟเช่นเดียวกันกับวิธีการที่กล่าวมาข้างต้น โดยใช้ผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เวลา (นาที)

(ก)



เวลา (นาที)

(ข)

รูปที่ 4.7 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมทิลีนบลู (Methylene Blue) โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26)

(ก) แบบจำลองอันดับหนึ่ง (ข) แบบจำลองอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าอัตราการดูดซับของสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู (Methylene Blue) บนตัวดูดซับซีโอไลต์ทั้งสองชนิด สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง ซึ่งแสดงค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง แสดงดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู (Methylene Blue) โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารละลายสีย้อม ที่ค่าต่างๆ (ppm)	แบบจำลองอันดับสอง		
	q_2	k_2	$(R_2)^2$
5	2.843	0.016	0.9939
10	5.848	0.028	0.9986
20	10.604	0.028	0.9996
30	16.103	0.024	1
40	25.575	0.024	0.9999
60	27.933	0.077	1
80	30.120	0.045	1

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู (Methylene Blue) โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26)

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารละลายสีย้อม ที่ค่าต่างๆ (ppm)	แบบจำลองอันดับสอง		
	q_2	k_2	$(R_2)^2$
5	3.078	0.082	0.9996
10	7.363	0.013	0.9976
20	9.259	0.005	0.9879
30	10.438	0.006	0.9958
40	12.887	0.003	0.9890

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลจากการทดลองการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู (Methylene Blue) โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า และตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) พบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า สามารถดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู (Methylene Blue) ได้ดีกว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) เนื่องจากตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้ามีโครงสร้างเป็นรูพรุนจุลภาคขนาดใหญ่ (12 T-ring หรือ Large Pore) มีขนาด 0.76x0.64 นาโนเมตร [5] ซึ่งตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (26) ที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดกลาง (10-ring หรือ Mesopore) [9] และการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู (Methylene Blue) โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ทั้งสอง จะเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) ซึ่งสามารถใช้สมการ Langmuir อธิบาย Adsorption isotherm ของตัวดูดซับซีโอไลต์โดยน้ำหนักแห้งในงานวิจัยครั้งนี้ได้

ผลของอัตราการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู (Methylene Blue) โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ทั้งสอง จะพบว่าสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม จะพบว่าประสิทธิภาพ และความเร็วในการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์สูงขึ้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูง

สำหรับผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา จะพบว่าไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งต่อไปควรให้ความสนใจกับอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ โดยการทำการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันเพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

- [1] www.navy.mi.th/science/BrithDay46/briday-data/biology.htm
- [2] <http://update.se-ed.com>
- [3] สุนี ลาวันยากุล, ซีโอดี, วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 41, 131 (มค. 36) หน้า 28-30
- [4] Adam Chen, Adsorption on Zeolite, Chemical Engineering, 489-500, Dec. 14, 2001.
- [5] ชีวรัตน์ ศิลปรัตน์., ปรินญา รุ่งโรจน์กิจไพศาล. และ ปวีณา จรัสโชติพิณิจ."การดูดซับตะกั่วโดยการพัฒนาตัวกลางดูดซับที่ได้จากเปลือกหอยแครง" ปรินญานิพนธ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
- [6] <http://chemelab.ucsd.edu/methanol/memmos/ZSM-5.html>
- [7] http://www.ku.ac.th/research_good15.html
- [8] Frank L. Slejko, Adsorption Tecnology: A step -by- step Appraoach to process Evaluation and Applications. New York: Marcel Dekker, 1985.
- [9] K.D. Henning and J. Degel, Active Carbon for Solvent Recovery, France: Paper presented at the meeting of European Rologravure Association Engineers Group, 1990.
- [10] ขวัญภา ธยามานนท์, ปริญญา รัตนสัมฤทธิ์ และพงษ์ศักดิ์ วัฒนจรูญโรจน์. 2544. การผลิตสารดูดความชื้นด้วย โซล-เจล เทคโนโลยี. ระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [11] จิวรรณ ขจรเกียรติคุณ. การใช้ถังกรองดูดซับน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีการดูดซับด้วยซีโออดีออลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [12] <http://stainfile.info/StainFile/dyes/37235.htm>
- [13] Ghash, M.M., Wcodard, F.E., Sproul, O.J., Knowlton, P.B. and Gvertin, P.D., 1978, Treatability Studies and Design Consideration for Textile Wastewater. Water and Waste Engineering, Vol.4, No.15, pp. 35-51
- [14] Gang Sun and Xiangjing Xu, 1997, Sunflower Stalks as Adsorption for Color Removal from Textile Wastewater. Ind. Eng. Chem., Vol. 3, pp. 808-812

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[15] Nassar, M.M. and Magdy, Y.H., 1997, Removal of Different Basic Dyes from Effluent Using Natural Adsorption on Palm-fruit Bunch Partcles. Chemical Engineering Journal, Vol. 66,pp. 223-226

[16] Asfour, H.M., Nassar, M.M., Fadali, O.A. and El-Geundi, M.S., 1985, Colour Removal from Textile Effluents Using Harwood Sewdust as an Absorbate. Jouenal of chemical Tecnology and Biotechnology, Vol. 35A, pp. 28-35

[17] Poots, V.J.P., Mckay and Heavy, J.J., 1976, The Removal of Acid Dyes from Effluent Using Natural Adsorbents-II Wood. Water Research, Vol.10, pp. 1067-1070

[18] http://www.mtec.or.th/th/labs/xrd&xrf/xrftech_th.html

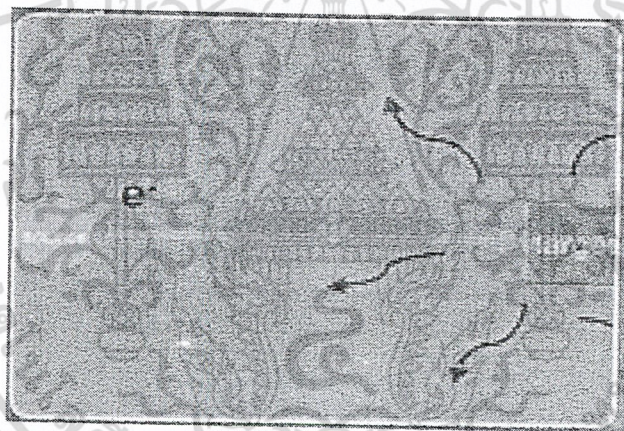


ภาคผนวก ก

การกระเจิงของรังสีเอ็กซ์

ก.1 เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction หรือ XRD)

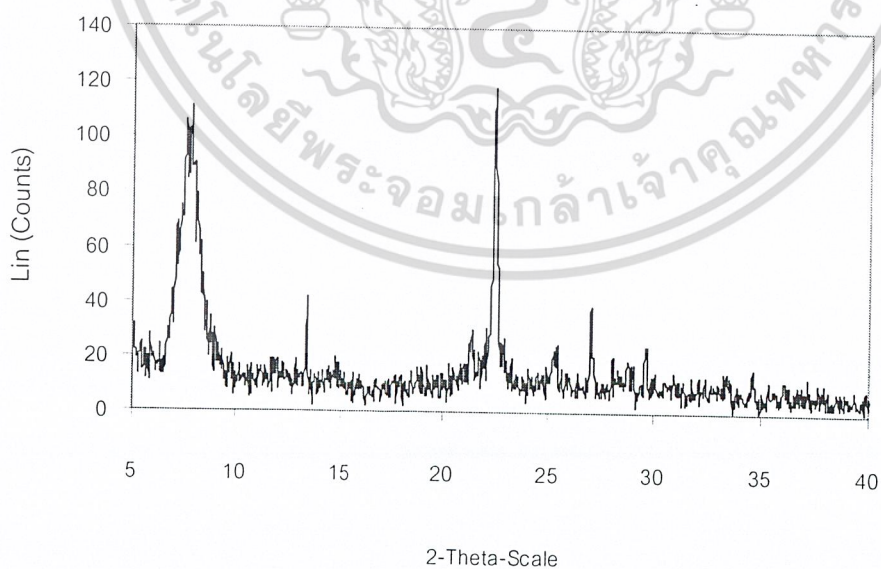
เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction) หรือเทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน และเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกัน โดยมีตัวรับข้อมูล (Detector) เนื่องจากสารประกอบและธาตุที่มีส่วนผสมหรือโครงสร้างต่างกัน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสี ที่มุมที่มีองศาต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับ จึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบ ที่มีอยู่ในตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นได้ แสดงดังรูป ก.1



รูป ก.1 แสดงหลักการการยิงรังสีเอ็กซ์ของเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าตำแหน่งมาตรฐานของความเป็นผลึกซีโอไลต์ชนิดบีต้า (จากการประมวลผลของเครื่อง XRD)

2-Theta-Scale (แกน X)	ร้อยละของความเป็นผลึกซีโอไลต์ชนิดบีต้า
7.615	80
17.306	5
18.907	5
21.086	75
22.263	100
25.208	35
27.081	35
28.503	35
29.455	35
33.065	10
34.550	5
35.700	5

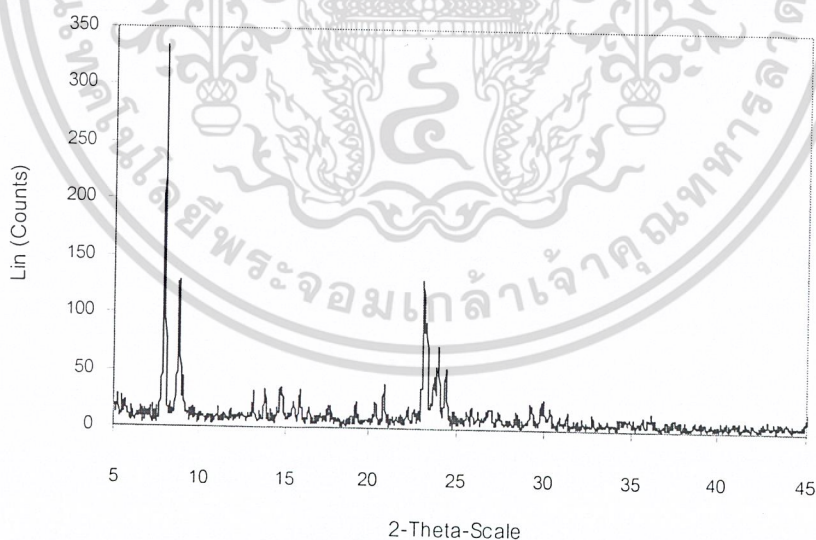


รูปที่ ก.2 รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าตำแหน่งมาตรฐานของความเป็นผลึกซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (จากการประมวลผลของเครื่อง XRD)

2-Theta-Scale (แกน X)	ร้อยละของความเป็นผลึกซีโอไลต์ชนิด ZSM-5
7.919	100
8.805	41
11.902	1
14.784	9
15.518	4
15.876	6
23.109	26
23.271	22
23.910	13
24.379	11
30.011	3
30.347	2



รูปที่ ก.3 รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ

26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry หรือ XRFs)

เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry) หรือเทคนิค XRFs เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอน (Photon) ออกมา (Fluoresced) เนื่องจากปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงาน จะมีความยาวคลื่นและพลังงานต่างกัน และเนื่องจากปริมาณของโฟตอน (Photon) ที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นๆ ข้อมูลที่ได้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุที่ประกอบในตัวอย่างได้ ดังรูปที่ ก.4



รูป ก.4 แสดงหลักการการยิงรังสีเอ็กซ์ของเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์

ตารางที่ ก.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆในตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าในรูปของไซเดียม

Al_2O_3	SiO_2	K_2O
5.7 KCps	84.8 KCps	2.4 KCps
6.74 %	91.9 %	0.454 %

ตารางที่ ก.4 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆในตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ในรูปของไซเดียม

Al_2O_3	SiO_2
3.1 KCps	88.6 KCps
3.67 %	96.2 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

กราฟเทียบมาตรฐานของสารละลายสีย้อมชนิดชนิดเมธิลีน (Methylene blue)

การทำกราฟมาตรฐานของสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู

ซึ่งสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู 0.05 กรัม นำมาทำละลายกับน้ำกลั่นในปริมาตร 500 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม จากนั้นนำสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25 และ 30 พีพีเอ็ม ตามลำดับ หลังจากนั้นนำสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ ไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร เพื่อหาค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู

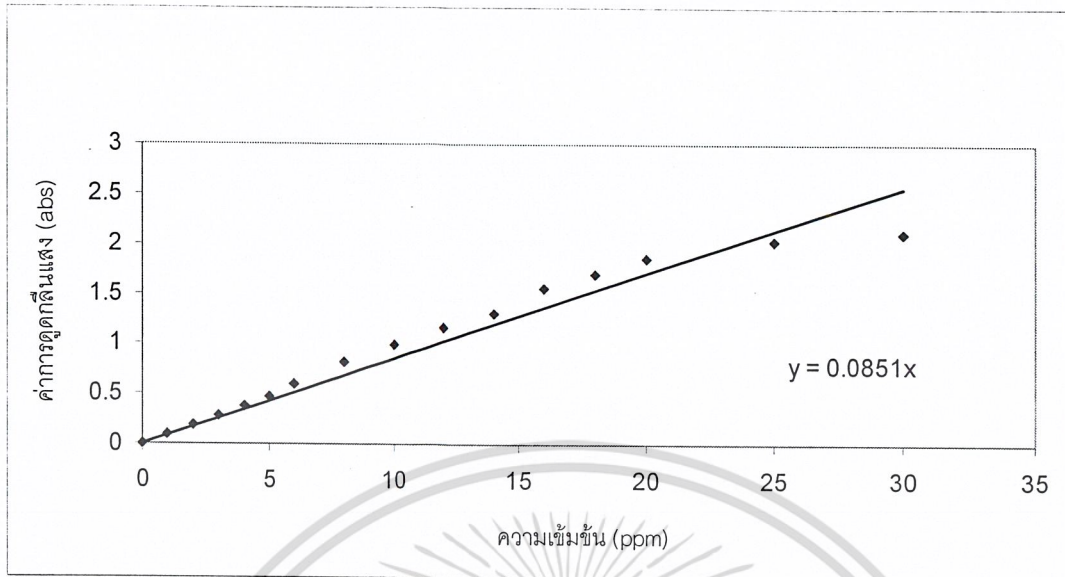


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู

ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)
0	0
1	0.095
2	0.186
3	0.276
4	0.384
5	0.478
6	0.596
8	0.816
10	0.995
12	1.169
14	1.311
16	1.560
18	1.704
20	1.850
25	2.022
30	2.098

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 กราฟเทียบมาตรฐานของสารละลายย้อมชนิดเมธิลีนบลู (Methylene blue)



ภาคผนวก ค

ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm

ตารางที่ ค.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลาย สีย้อมชนิดเมริลีนบลู โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) (ppm)	ความเข้มข้นที่เหลือ (C) (ppm)	ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนัก ที่ถูกดูดซับ (q) (mg/g)
5	0.071	2.546
10	0.2259	5.742
20	0.411	10.482
30	0.423	15.997
40	2.233	24.533
60	5.358	27.904
80	14.717	30.043

ตารางที่ ค.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลาย สีย้อมชนิดเมริลีนบลู โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) (ppm)	ความเข้มข้นที่เหลือ (C) (ppm)	ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนัก ที่ถูกดูดซับ (q) (mg/g)
5	0.129	3.024
10	0.705	7.082
20	8.061	8.797
30	9.812	9.792
40	20.525	11.777

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ตารางแสดงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับ

ตารางที่ ง.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ppm ต่อการดูดซับสารละลายสีข้อมาชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดปีต้าที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 5 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	0.331	3.890	0	1
5	0.26	3.055	0.556	0.785
10	0.199	2.338	1.034	0.601
15	0.14	1.645	1.496	0.423
20	0.122	1.434	1.637	0.366
30	0.126	1.481	1.606	0.381
40	0.107	1.257	1.755	0.323
50	0.099	1.163	1.817	0.299
60	0.088	1.034	1.904	0.266
70	0.075	0.881	2.005	0.227
80	0.067	0.787	2.068	0.202
90	0.055	0.646	2.162	0.166
100	0.018	0.212	2.452	0.054
110	0.012	0.141	2.499	0.036
120	0.011	0.129	2.507	0.033
130	0.01	0.118	2.515	0.030
140	0.009	0.106	2.523	0.027
150	0.009	0.106	2.523	0.027
160	0.008	0.094	2.530	0.024
170	0.007	0.082	2.538	0.021
180	0.006	0.071	2.546	0.018
190	0.006	0.071	2.546	0.018
200	0.006	0.071	2.546	0.018
210	0.006	0.071	2.546	0.0181

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู
โดยใช้ตัวดูดซับซีโอโลต์ชนิดบีต้าที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 10 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	0.755	8.872	0	1
5	0.164	1.927	4.630	0.217
10	0.161	1.892	4.653	0.213
15	0.155	1.821	4.700	0.205
20	0.139	1.633	4.826	0.184
30	0.128	1.504	4.912	0.170
40	0.128	1.504	4.912	0.170
50	0.097	1.140	5.155	0.128
60	0.108	1.269	5.069	0.143
70	0.082	0.964	5.272	0.109
80	0.081	0.952	5.280	0.107
90	0.075	0.881	5.327	0.099
100	0.073	0.856	5.343	0.097
110	0.069	0.811	5.374	0.091
120	0.057	0.670	5.468	0.075
130	0.054	0.635	5.492	0.072
140	0.048	0.564	5.539	0.063
150	0.038	0.447	5.617	0.050
160	0.034	0.399	5.648	0.045
170	0.029	0.341	5.687	0.038
180	0.022	0.259	5.742	0.029
190	0.024	0.282	5.727	0.032
200	0.021	0.247	5.750	0.028
210	0.022	0.259	5.742	0.029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm ต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดปีต้าที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 20 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	1.373	16.134	0	1
5	0.218	2.561	9.048	0.159
10	0.19	2.233	9.268	0.138
15	0.185	2.174	9.307	0.135
20	0.147	1.723	9.604	0.107
30	0.141	1.657	9.651	0.103
40	0.145	1.709	9.620	0.106
50	0.135	1.586	9.698	0.098
60	0.134	1.575	9.706	0.098
70	0.13	1.528	9.738	0.095
80	0.094	1.105	10.020	0.068
90	0.093	1.093	10.027	0.068
100	0.088	1.034	10.067	0.064
110	0.081	0.952	10.121	0.059
120	0.077	0.905	10.153	0.056
130	0.062	0.729	10.270	0.045
140	0.058	0.682	10.301	0.042
150	0.049	0.576	10.372	0.036
160	0.047	0.552	10.388	0.034
170	0.041	0.482	10.435	0.030
180	0.035	0.411	10.482	0.025
190	0.034	0.399	10.490	0.025
200	0.036	0.423	10.474	0.026
210	0.035	0.411	10.482	0.025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดปีต้าที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 30 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	2.078	24.418	0	1
5	0.193	2.268	14.767	0.093
10	0.181	2.127	14.861	0.087
15	0.18	2.115	14.869	0.087
20	0.136	1.598	15.213	0.065
30	0.141	1.657	15.174	0.068
40	0.114	1.340	15.386	0.055
50	0.086	1.011	15.605	0.041
60	0.068	0.799	15.746	0.033
70	0.072	0.846	15.715	0.035
80	0.07	0.823	15.731	0.034
90	0.062	0.729	15.793	0.030
100	0.058	0.682	15.825	0.028
110	0.049	0.576	15.895	0.024
120	0.055	0.646	15.848	0.026
130	0.048	0.564	15.903	0.023
140	0.042	0.494	15.950	0.020
150	0.036	0.423	15.997	0.017
160	0.035	0.411	16.005	0.017
170	0.034	0.340	16.013	0.016
180	0.036	0.423	15.997	0.017
190	0.036	0.423	15.997	0.017
200	0.034	0.340	16.013	0.016
210	0.036	0.423	15.997	0.017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู
โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดปีต้าที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 40 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	1.993	39.033	0	1
5	0.179	3.506	23.685	0.090
10	0.157	3.075	23.972	0.079
15	0.155	3.036	23.998	0.078
20	0.137	2.683	24.233	0.069
30	0.12	2.350	24.455	0.060
40	0.126	2.468	24.377	0.063
50	0.125	2.448	24.390	0.063
60	0.12	2.350	24.455	0.060
70	0.123	2.409	24.416	0.062
80	0.118	2.311	24.481	0.059
90	0.115	2.252	24.520	0.058
100	0.116	2.272	24.507	0.058
110	0.114	2.233	24.533	0.057
120	0.113	2.213	24.546	0.057
130	0.114	2.233	24.533	0.057
140	0.114	2.233	24.533	0.057
150	0.114	2.233	24.533	0.057
160	0.113	2.213	24.546	0.056
170	0.113	2.213	24.546	0.056
180	0.112	2.193	24.559	0.056
190	0.113	2.213	24.546	0.057
200	0.113	2.213	24.546	0.057
210	0.114	2.233	24.533	0.057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 60 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมริลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 60 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	2.009	47.215	0	1
5	0.275	6.463	27.168	0.137
10	0.256	6.016	27.465	0.127
15	0.255	5.993	27.481	0.127
20	0.25	5.875	27.560	0.124
30	0.249	5.852	27.575	0.124
40	0.246	5.781	27.622	0.122
50	0.244	5.734	27.654	0.121
60	0.245	5.758	27.638	0.122
70	0.243	5.711	27.669	0.121
80	0.242	5.687	27.685	0.120
90	0.24	5.640	27.716	0.119
100	0.238	5.593	27.748	0.118
110	0.235	5.523	27.795	0.117
120	0.234	5.499	27.810	0.116
130	0.234	5.499	27.810	0.116
140	0.235	5.523	27.795	0.117
150	0.233	5.476	27.826	0.116
160	0.232	5.452	27.842	0.115
170	0.23	5.405	27.873	0.114
180	0.227	5.335	27.920	0.113
190	0.228	5.358	27.904	0.113
200	0.228	5.358	27.904	0.113
210	0.228	5.358	27.904	0.113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 80 ppm ต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 80 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	2.035	59.783	0	1
5	0.542	15.922	29.240	0.266
10	0.536	15.746	29.357	0.263
15	0.533	15.658	29.416	0.262
20	0.53	15.570	29.475	0.260
30	0.534	15.687	29.397	0.262
40	0.529	15.541	29.495	0.260
50	0.527	15.482	29.534	0.259
60	0.525	15.423	29.573	0.258
70	0.52	15.276	29.671	0.256
80	0.521	15.306	29.651	0.256
90	0.517	15.188	29.730	0.254
100	0.514	15.100	29.788	0.253
110	0.511	15.012	29.847	0.251
120	0.512	15.041	29.828	0.252
130	0.511	15.012	29.847	0.251
140	0.508	14.924	29.906	0.250
150	0.503	14.777	30.004	0.247
160	0.5	14.689	30.063	0.246
170	0.501	14.718	30.043	0.246
180	0.502	14.747	30.024	0.247
190	0.503	14.777	30.004	0.247
200	0.502	14.747	30.024	0.247
210	0.501	14.718	30.043	0.246

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.8 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ppm ต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 5 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	0.397	4.665	0	1
5	0.095	1.116	2.366	0.239
10	0.092	1.081	2.390	0.232
15	0.067	0.787	2.585	0.169
20	0.065	0.763	2.601	0.164
30	0.053	0.623	2.695	0.134
40	0.038	0.447	2.812	0.096
50	0.034	0.400	2.844	0.086
60	0.033	0.388	2.852	0.083
70	0.031	0.364	2.867	0.078
80	0.03	0.353	2.875	0.076
90	0.03	0.353	2.875	0.076
100	0.028	0.329	2.891	0.071
110	0.023	0.270	2.930	0.058
120	0.019	0.223	2.961	0.048
130	0.015	0.176	2.993	0.038
140	0.011	0.129	3.024	0.028
150	0.01	0.118	3.032	0.025
160	0.011	0.129	3.024	0.028
170	0.01	0.118	3.032	0.025
180	0.012	0.141	3.016	0.030
190	0.011	0.129	3.024	0.028
200	0.013	0.153	3.0087	0.033
210	0.011	0.129	3.024	0.028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.9 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppm ต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 10 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	0.964	11.328	0	1
5	0.451	5.230	4.019	0.468
10	0.372	4.371	4.638	0.386
15	0.326	3.831	4.9981	0.338
20	0.309	3.631	5.131	0.321
30	0.28	3.290	5.358	0.291
40	0.251	2.949	5.586	0.260
50	0.208	2.444	5.922	0.216
60	0.2	2.350	5.985	0.207
70	0.173	2.033	6.197	0.179
80	0.177	2.080	6.165	0.184
90	0.162	1.904	6.282	0.168
100	0.142	1.669	6.439	0.147
110	0.126	1.481	6.565	0.131
120	0.123	1.445	6.588	0.128
130	0.102	1.199	6.753	0.106
140	0.113	1.328	6.667	0.117
150	0.081	0.952	6.917	0.084
160	0.079	0.928	6.933	0.082
170	0.069	0.811	7.011	0.072
180	0.065	0.764	7.043	0.067
190	0.061	0.717	7.074	0.063
200	0.061	0.717	7.074	0.063
210	0.06	0.705	7.082	0.062

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.10 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมริลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 20 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	1.809	21.257	0	1
5	1.283	15.076	4.121	0.709
10	1.243	14.606	4.434	0.687
15	1.241	14.583	4.450	0.686
20	1.135	13.337	5.280	0.627
30	1.086	12.761	5.664	0.600
40	1.045	12.280	5.985	0.578
50	0.992	11.657	6.400	0.548
60	0.98	11.516	6.494	0.542
70	0.918	10.787	6.980	0.507
80	0.912	10.717	7.027	0.504
90	0.908	10.670	7.058	0.502
100	0.895	10.517	7.160	0.495
110	0.875	10.282	7.317	0.484
120	0.902	10.599	7.105	0.499
130	0.823	9.671	7.724	0.455
140	0.755	8.872	8.257	0.417
150	0.807	9.483	7.850	0.446
160	0.764	8.978	8.186	0.422
170	0.752	8.837	8.280	0.416
180	0.72	8.461	8.531	0.398
190	0.682	8.014	8.829	0.377
200	0.697	8.190	8.711	0.385
210	0.686	8.061	8.797	0.379

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.11 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm ต่อการดูดซับสารละลายสี้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 30 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	2.085	24.501	0	1
5	1.636	19.224	3.517	0.785
10	1.606	18.872	3.752	0.770
15	1.33	15.629	5.915	0.638
20	1.31	15.394	6.071	0.628
30	1.257	14.771	6.486	0.603
40	1.256	14.759	6.494	0.602
50	1.056	12.409	8.061	0.506
60	0.998	11.727	8.515	0.479
70	0.961	11.293	8.805	0.461
80	0.95	11.163	8.892	0.456
90	0.91	10.693	9.205	0.436
100	0.869	10.212	9.526	0.417
110	0.834	9.800	9.800	0.400
120	0.852	10.012	9.659	0.409
130	0.856	10.059	9.628	0.411
140	0.838	9.847	9.769	0.402
150	0.833	9.788	9.808	0.400
160	0.899	10.564	9.291	0.431
170	0.906	10.646	9.236	0.435
180	0.824	9.683	9.879	0.395
190	0.879	10.329	9.448	0.422
200	0.851	10.000	9.667	0.408
210	0.835	9.812	9.792	0.400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.12 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 40 ppm				
เวลา(นาท)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	1.95	38.190	0	1
5	1.623	31.786	4.269	0.832
10	1.608	31.492	4.465	0.825
15	1.569	30.729	4.975	0.805
20	1.534	30.043	5.432	0.787
30	1.451	28.418	6.515	0.744
40	1.4	27.419	7.181	0.718
50	1.341	26.263	7.951	0.688
60	1.292	25.304	8.591	0.663
70	1.236	24.207	9.322	0.634
80	1.225	23.991	9.466	0.628
90	1.217	23.835	9.570	0.624
100	1.252	24.520	9.113	0.642
110	1.204	23.580	9.740	0.617
120	1.175	23.012	10.119	0.603
130	1.178	23.071	10.080	0.604
140	1.144	22.405	10.524	0.587
150	1.131	22.150	10.693	0.580
160	1.108	21.700	10.994	0.568
170	1.096	21.465	11.150	0.562
180	1.085	21.250	11.294	0.556
190	1.05	20.564	11.751	0.538
200	1.047	20.505	11.790	0.537
210	1.048	20.525	11.777	0.537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.13 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ppmต่อการดูดซับสารละลายสี้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา 38 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 5 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	0.255	2.996	0	1
5	0.084	0.987	2.009	0.329
10	0.026	0.306	2.691	0.102
15	0.017	0.199	2.797	0.067
20	0.016	0.188	2.8087	0.063
30	0.015	0.176	2.8207	0.059
40	0.017	0.199	2.797	0.067
50	0.015	0.176	2.8207	0.059
60	0.014	0.165	2.832	0.055
70	0.012	0.141	2.855	0.047
80	0.011	0.130	2.867	0.043
90	0.01	0.118	2.879	0.039
100	0.011	0.129	2.867	0.043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.14 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppm ต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา 38 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 10 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	0.802	9.424	0	1
5	0.57	6.698	1.817	0.711
10	0.372	4.371	3.368	0.464
15	0.28	3.290	4.089	0.349
20	0.251	2.949	4.316	0.313
30	0.132	1.551	5.249	0.165
40	0.126	1.481	5.296	0.157
50	0.123	1.445	5.319	0.153
60	0.102	1.199	5.484	0.127
70	0.112	1.316	5.405	0.139
80	0.081	0.952	5.648	0.101
90	0.079	0.928	5.664	0.099
100	0.075	0.881	5.695	0.093

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.15 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppmต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา 38 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 20 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	1.457	17.121	0	1
5	1.009	11.857	3.510	0.693
10	0.992	11.657	3.643	0.681
15	0.954	11.210	3.940	0.655
20	0.857	10.071	4.700	0.588
30	0.821	9.647	4.982	0.563
40	0.748	8.789	5.554	0.513
50	0.732	8.602	5.680	0.502
60	0.684	8.038	6.056	0.469
70	0.664	7.803	6.212	0.456
80	0.612	7.192	6.620	0.420
90	0.604	7.098	6.682	0.415
100	0.589	6.921	6.799	0.404

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.16 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm ต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา 38 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 30 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	1.457	17.121	0	1
5	1.009	11.857	3.509	0.693
10	0.992	11.657	3.643	0.681
15	0.954	11.210	3.940	0.655
20	0.857	10.071	4.700	0.588
30	0.821	9.647	4.982	0.563
40	0.748	8.789	5.554	0.513
50	0.732	8.602	5.680	0.502
60	0.684	8.038	6.056	0.469
70	0.664	7.803	6.212	0.456
80	0.612	7.192	6.620	0.420
90	0.604	7.098	6.682	0.415
100	0.589	6.921	6.799	0.404

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.17 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ppm ต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลู โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา 38 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น 40 ppm				
เวลา(นาที)	abs	C (ppm)	q (mg/g)	C/Co
0	1.864	36.506	0	1
5	1.582	30.983	3.682	0.849
10	1.556	30.474	4.021	0.835
15	1.457	28.535	5.314	0.782
20	1.339	26.224	6.855	0.718
30	1.313	25.715	7.194	0.704
40	1.286	25.186	7.547	0.689
50	1.2	23.502	8.670	0.644
60	1.211	23.717	8.526	0.650
70	1.185	23.208	8.865	0.636
80	1.155	22.620	9.257	0.620
90	1.142	22.366	9.427	0.613
100	1.132	22.170	9.557	0.607

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับ
อัตราแบบจำลองการดูดซับ

ตารางที่ จ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง
การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ความเข้มข้น 5 ppm ที่ $q_1 = 2.546$

ความเข้มข้น 5 ppm			
เวลา(นาท)	t/qt	qt	log(q1-qt)
0	-	0	0.406
5	8.993	0.556	0.299
10	9.6713	1.034	0.180
15	10.027	1.496	0.021
20	12.217	1.637	-0.041
30	18.680	1.606	-0.027
40	22.779	1.756	-0.102
50	27.518	1.817	-0.137
60	31.513	1.904	-0.192
70	34.913	2.005	-0.267
80	38.685	2.068	-0.321
90	41.628	2.162	-0.416
100	40.783	2.452	-1.027
110	44.018	2.499	-1.328
120	47.866	2.507	-1.409
130	51.690	2.515	-1.509
140	55.489	2.523	-1.638
150	59.453	2.523	-1.638
160	63.241	2.53	-1.796
170	66.982	2.538	-2.097
180	70.699	2.546	-
190	74.627	2.546	-
200	78.555	2.546	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1(ต่อ) ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดปีต้าที่ความเข้มข้น 5 ppm ที่ $q_1 = 2.546$

ความเข้มข้น 5 ppm			
เวลา(นาท)	t/qt	qt	log(q1-qt)
210	82.482	2.546	-

ตารางที่ จ.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดปีต้าที่ความเข้มข้น 10 ppm ที่ $q_1 = 5.742$

ความเข้มข้น 10 ppm			
เวลา(นาท)	t/qt	qt	log(q1-qt)
0	-	0	0.759
5	1.080	4.629	0.046
10	2.149	4.653	0.037
15	3.191	4.7	0.018
20	4.119	4.856	-0.0526
30	6.107	4.912	-0.081
40	8.143	4.912	-0.081
50	9.699	5.155	-0.231
60	11.837	5.069	-0.172
70	13.278	5.272	-0.328
80	15.152	5.28	-0.335
90	16.895	5.327	-0.382
100	18.716	5.343	-0.399
110	20.469	5.374	-0.434
120	21.946	5.468	-0.562
130	23.671	5.492	-0.602
140	25.275	5.539	-0.693
150	26.705	5.617	-0.903

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.2 (ต่อ) ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลองการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ความเข้มข้น 10 ppm ที่ $q_1 = 5.742$

ความเข้มข้น 10 ppm			
เวลา(นาที)	t/qt	qt	log(q1-qt)
160	28.328	5.648	-1.026
170	29.892	5.687	-1.259
180	31.347	5.742	-
190	33.176	5.727	-1.8239
200	34.782	5.75	-
210	36.572	5.742	-

ตารางที่ จ.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลองการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ความเข้มข้น 20 ppm ที่ $q_1 = 10.482$

ความเข้มข้น 20 ppm			
เวลา(นาที)	t/qt	qt	log(q1-qt)
0	-	0	1.020
5	0.553	9.048	0.157
10	1.079	9.268	0.084
15	1.612	9.307	0.070
20	2.082	9.604	-0.057
30	3.108	9.651	-0.080
40	4.158	9.62	-0.064
50	5.156	9.698	-0.106
60	6.182	9.706	-0.110
70	7.188	9.738	-0.128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.3 (ต่อ) ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตรา
แบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ความเข้มข้น 20 ppm ที่
 $q_1 = 10.482$

ความเข้มข้น 10 ppm			
เวลา(นาที)	t/qt	qt	$\log(q_1-qt)$
80	7.984	10.019	-0.334
90	8.975	10.027	-0.341
100	9.375	10.666	-
110	10.868	10.121	-0.442
120	11.819	10.153	-0.482
130	12.658	10.27	-0.673
140	13.590	10.301	-0.742
150	14.462	10.372	-0.958
160	15.402	10.388	-1.026
170	16.291	10.435	-1.327
180	17.172	10.482	-
190	18.114	10.489	-
200	19.094	10.474	-2.096
210	20.034	10.482	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดปีต้าที่ความเข้มข้น 30 ppm ที่ $q_1 = 15.997$

ความเข้มข้น 30 ppm			
เวลา(นาทีก)	t/qt	qt	log(q1-qt)
0	-	0	1.204
5	0.339	14.767	0.089
10	0.673	14.861	0.055
15	1.009	14.869	0.052
20	1.315	15.213	-0.106
30	1.977	15.174	-0.085
40	2.599	15.386	-0.214
50	3.204	15.605	-0.407
60	3.810	15.746	-0.600
70	4.454	15.715	-0.549
80	5.085	15.731	-0.575
90	5.699	15.793	-0.690
100	6.319	15.825	-0.764
110	6.920	15.895	-0.991
120	7.572	15.848	-0.827
130	8.175	15.903	-1.027
140	8.778	15.949	-1.319
150	9.419	15.926	-1.149
160	9.996	16.005	-
170	10.616	16.013	-
180	11.252	15.997	-
190	11.877	15.997	-
200	12.489	16.013	-
210	13.127	15.997	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.5 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีดำที่ความเข้มข้น 40 ppm ที่ $q_1 = 24.533$

ความเข้มข้น 40 ppm			
เวลา(นาที)	t/qt	qt	log(q1-qt)
0	-	0	1.389
5	0.211	23.685	-0.072
10	0.417	23.972	-0.251
15	0.625	23.998	-0.272
20	0.825	24.233	-0.523
30	1.227	24.455	-1.108
40	1.641	24.377	-0.807
50	2.025	24.689	-
60	2.436	24.625	-
70	2.829	24.742	-
80	3.218	24.859	-
90	3.605	24.964	-
100	4.001	24.99	-
110	4.404	24.977	-
120	4.786	25.069	-
130	5.161	25.186	-
140	5.547	25.238	-
150	5.930	25.291	-
160	6.333	25.264	-
170	6.713	25.323	-
180	7.084	25.408	-
190	7.462	25.46	-
200	7.863	25.434	-
210	8.244	25.473	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.6 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดบีต้าที่ความเข้มข้น 60 ppm ที่ $q_1 = 27.904$

ความเข้มข้น 60 ppm			
เวลา(นาที)	t/qt	qt	log(q1-qt)
0	-	0	1.446
5	0.184	27.168	-0.133
10	0.364	27.466	-0.359
15	0.546	27.481	-0.374
20	0.726	27.559	-0.462
30	1.088	27.575	-0.483
40	1.448	27.622	-0.550
50	1.808	27.654	-0.602
60	2.171	27.638	-0.575
70	2.529	27.669	-0.629
80	2.890	27.685	-0.660
90	3.247	27.716	-0.726
100	3.604	27.748	-0.807
110	3.964	27.745	-0.798
120	4.314	27.81	-1.026
130	4.674	27.81	-1.026
140	5.045	27.745	-0.798
150	5.390	27.826	-1.107
160	5.746	27.842	-1.207
170	6.099	27.873	-1.508
180	6.446	27.92	-
190	6.809	27.904	-
200	7.167	27.904	-
210	7.525	27.904	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.7 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลท์ชนิดปีต้าที่ความเข้มข้น 80 ppm ที่ $q_1 = 30.043$

ความเข้มข้น 80 ppm			
เวลา(นาท)	t/qt	qt	log(q1-qt)
0	-	0	1.478
5	0.171	29.24	-0.095
10	0.341	29.358	-0.164
15	0.510	29.416	-0.203
20	0.679	29.475	-0.246
30	1.021	29.397	-0.189
40	1.356	29.495	-0.261
50	1.693	29.534	-0.293
60	2.029	29.573	-0.328
70	2.359	29.671	-0.429
80	2.698	29.651	-0.407
90	3.027	29.729	-0.503
100	3.357	29.788	-0.593
110	3.685	29.847	-0.707
120	4.023	29.828	-0.667
130	4.355	29.847	-0.707
140	4.681	29.906	-0.863
150	4.999	30.004	-1.408
160	5.322	30.063	-
170	5.658	30.043	-
180	5.995	30.024	-1.721
190	6.332	30.004	-1.408
200	6.661	30.024	-1.721
210	6.989	30.043	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.8 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ความเข้มข้น 5 ppm ที่ $q_1 = 3.024$

ความเข้มข้น 5 ppm			
เวลา(นาที)	t/qt	qt	log(qt-q ₁)
0	-	0	0.481
5	2.113	2.366	-0.182
10	4.186	2.389	-0.197
15	5.803	2.585	-0.358
20	7.689	2.601	-0.374
30	11.132	2.695	-0.483
40	14.225	2.812	-0.674
50	17.581	2.844	-0.745
60	21.038	2.852	-0.764
70	24.416	2.867	-0.804
80	27.826	2.875	-0.827
90	31.304	2.875	-0.827
100	34.590	2.891	-0.876
110	37.555	2.929	-1.022
120	40.527	2.961	-1.201

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.9 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ความเข้มข้น 10 ppm ที่ $q_1 = 7.082$

ความเข้มข้น 10 ppm			
เวลา(นาที)	t/qt	qt	log(qt-q1)
0	-	0	0.850
5	1.244	4.019	0.48
10	2.156	4.638	0.388
15	3.001	4.998	0.319
20	3.898	5.131	0.290
30	5.599	5.358	0.237
40	7.161	5.586	0.175
50	8.443	5.922	0.064
60	10.025	5.985	0.040
70	11.296	6.197	-0.053
80	12.976	6.165	-0.038
90	14.324	6.283	-0.097
100	15.530	6.439	-0.192
110	16.756	6.565	-0.287
120	18.215	6.588	-0.306
130	19.251	6.753	-0.483
140	20.999	6.667	-0.382
150	21.686	6.917	-0.783
160	23.078	6.933	-0.827
170	24.248	7.011	-1.149
180	25.557	7.043	-1.409
190	26.859	7.074	-2.097
200	28.273	7.074	-2.097
210	29.653	7.082	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.10 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง
การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ความเข้มข้น 20 ppm ที่
 $q_1 = 8.797$

ความเข้มข้น 20 ppm			
เวลา(นาที)	t/qt	qt	log(qt-q1)
0	-	0	0.944
5	1.213	4.121	0.670
10	2.255	4.434	0.640
15	3.372	4.449	0.638
20	3.788	5.28	0.546
30	5.297	5.664	0.496
40	6.683	5.985	0.449
50	7.813	6.4	0.380
60	9.240	6.494	0.362
70	10.029	6.98	0.260
80	11.384	7.027	0.248
90	12.755	7.056	0.241
100	13.966	7.16	0.214
110	15.033	7.317	0.170
120	16.889	7.105	0.228
130	16.831	7.724	0.031
140	16.955	8.257	-0.268
150	19.111	7.849	-0.023
160	19.546	8.186	-0.214
170	20.531	8.28	-0.287
180	21.099	8.531	-0.575
190	21.520	8.829	-
200	22.959	8.711	-1.066
210	23.872	8.797	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.11 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ความเข้มข้น 30 ppm ที่ $q_1 = 9.792$

ความเข้มข้น 30 ppm			
เวลา(นาที)	t/qt	qt	log(qt-q ₁)
0	-	0	0.991
5	1.422	3.517	0.798
10	2.665	3.752	0.781
15	2.536	5.915	0.588
20	3.294	6.071	0.571
30	4.625	6.486	0.512
40	6.160	6.494	0.518
50	6.203	8.061	0.238
60	7.046	8.515	0.106
70	7.950	8.805	-0.006
80	8.997	8.892	-0.046
90	9.777	9.205	-0.231
100	10.498	9.526	-0.575
110	11.224	9.8	-
120	12.424	9.659	-0.876
130	13.504	9.627	-0.783
140	14.331	9.769	-1.638
150	15.294	9.808	-
160	17.221	9.291	-0.300
170	18.406	9.236	-0.255
180	18.220	9.879	-
190	20.110	9.448	-0.463
200	20.689	9.667	-0.903
210	21.446	9.792	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.12 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับอัตราแบบจำลอง
การดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ความเข้มข้น 40 ppm ที่
 $q_1 = 11.777$

ความเข้มข้น 40 ppm			
เวลา(นาที)	t/qt	qt	log(qt-q1)
0	-	0	1.071
5	1.171	4.269	0.876
10	2.240	4.465	0.864
15	3.015	4.975	0.833
20	3.682	5.432	0.802
30	4.605	6.515	0.721
40	5.570	7.181	0.662
50	6.289	7.951	0.583
60	6.984	8.591	0.503
70	7.509	9.322	0.390
80	8.451	9.466	0.364
90	9.404	9.57	0.344
100	10.973	9.113	0.426
110	11.294	9.74	0.309
120	11.859	10.119	0.220
130	12.898	10.079	0.230
140	13.303	10.524	0.098
150	14.028	10.693	0.035
160	14.553	10.994	-0.106
170	15.247	11.15	-0.203
180	15.938	11.294	-0.316
190	16.169	11.751	-1.585
200	16.964	11.79	-
210	17.831	11.777	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้