



การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วยในหอดูดซับแบบเบตนิ่ง  
ADSORPTION OF METHYLENE BLUE BY BANANA PEELS  
IN FIXED BED COLUMN

นางสาวจิตตราภรณ์ ขันทะหัตถ์ รหัส 54362784  
นางสาวสุปราณี ประทุมทอง รหัส 54363002

ห้อง คณะวิทยาศาสตร์
วันที่รับ..... 30 ต.ค. 2558
เลขที่รับ..... 16899183
เลขที่ใบเสร็จรับเงิน.....
เลขที่บัญชี.....
ชื่อผู้รับ.....
ชื่อหน่วยงาน.....
เลขที่ติดต่อ..... 14186

2557

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ปีการศึกษา 2557



## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วยในหลอดดูดซับแบบเบดนิ่ง  
ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวจิตราภรณ์ ชันทะหัตต์ รหัส 54362784  
นางสาวสุปราณี ประทุมทอง รหัส 54363002  
ที่ปรึกษาโครงการ ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม  
ปีการศึกษา 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....*Dr. B. R. Janadorn*.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม)  
.....*Dr. N. Komkeang*.....กรรมการ  
(ดร.นิคม กลมเกลี้ยง)  
.....*Dr. P. Rungroj*.....กรรมการ  
(ดร.ปณัฐพงศ์ บุญนวล)  
.....*Dr. A. A. Jantarpitak*.....กรรมการ  
(อาจารย์อภาภรณ์ จันทรปรีกษ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วยในหอดูดซับแบบเบตนิ่ง
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวจิตตราภรณ์ ชันทะหัตต์ รหัส 54362784 นางสาวสุปราณี ประทุมทอง รหัส 54363002
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วยในหอดูดซับแบบเบตนิ่ง ในปัจจัยการดูดซับต่างๆ ได้แก่ ขนาดของเปลือกกล้วย ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม อัตราการไหลของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ความสูงของหอดูดซับ การปรับปรุงประสิทธิภาพของหอดูดซับ และศึกษาแบบจำลองของการดูดซับ ด้วยแบบจำลองการดูดซับไอโซเทิร์มของฟรุนด์ลิช และแลงมัวร์ โดยวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของหอดูดซับด้วยเครื่องเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์ผลการส่องผ่านแสงโดยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงเพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูบนเปลือกกล้วย จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่สูงที่สุดในช่วง  $T_d$  ที่  $C_r/C_0 = 1$  คือ 917.24 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วย อัตราการไหลที่ 3 มิลลิตรต่อนาที และเปลือกกล้วยนี้ว่าที่ขนาด 40 เมช มีปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่สูงที่สุดในช่วง  $T_r$  ที่  $C_r/C_0 = 0.5$  คือ 42.13 และ 117.28 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วย ตามลำดับ ความสูงของหอดูดซับในหอดูดซับ 15 เซนติเมตร มีปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่สูงที่สุดในช่วง  $T_b = 0.05$  คือ 21.48 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วย และในการปรับปรุงประสิทธิภาพของหอดูดซับด้วยสารละลายเบสส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าลักษณะของการดูดซับของเปลือกกล้วยนี้ว่าที่แสดงออกมาเป็นแบบผสม กล่าวคือ เปลือกกล้วยนี้ว่ามีลักษณะการดูดซับแบบชั้นเดียวและหลายชั้น

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องนี้สำเร็จได้ต้องขอกราบขอบพระคุณ ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ดร.นิคม กลมเกลี้ยง ดร.ปณัฐพงศ์ บุญนวล และอาจารย์อภาภรณ์ จันทรปรีกษ์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ในการให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูล และแนวทางการวิเคราะห์ต่างๆ ตลอดจนสละเวลาให้คำแนะนำทั้งภาคทฤษฎีและปฏิบัติ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขที่เป็นประโยชน์สำหรับโครงการนี้ ทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์เป็นอย่างยิ่ง

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำโครงการวิจัย อีกทั้งยังแนะนำข้อมูลในการใช้งานอุปกรณ์และเครื่องมืออย่างถูกต้อง ตลอดจนการดำเนินโครงการจนสำเร็จโครงการ

ขอขอบคุณพี่ๆ และขอบใจเพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย

ประโยชน์และคุณค่าที่มาจากงานวิจัยนี้ ขอมอบแต่ บิดา มารดา ผู้ซึ่งเป็นที่รักยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่มีเมตตาอบรมสั่งสอนให้ความรู้แก่ผู้ดำเนินโครงการวิจัย

ผู้ดำเนินโครงการ

นางสาวจิตตราภรณ์ ชันทะหัตถ์

นางสาวสุปราณี ประทุมทอง

พฤษภาคม 2558

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 กระบวนการดูดซับ.....	3
2.2 ตัวดูดซับ.....	12
2.3 การวัดปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะแบบไหลผ่าน.....	13
2.4 สีย้อม.....	14
2.5 สีย้อมเมทิลีนบลู.....	16
2.6 หอดูดซับแบบเบดนิ่ง.....	17
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	21
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	21
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.3 แผนภาพการทดลอง.....	22
3.4 วิธีการทดลอง.....	23
3.5 เครื่องมือการทดลอง.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	26
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ.....	26
4.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วยในหลอดดูดซับแบบเบตนิ่ง.....	29
4.3 ลักษณะการดูดซับการดูดซับของเปลือกกล้วยน้ำว้า.....	42
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	47
เอกสารอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก ก.....	52
ภาคผนวก ข.....	54
ภาคผนวก ค.....	57
ภาคผนวก ง.....	73

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกประเภทสีย้อม.....	15
2.2 คุณสมบัติสีย้อมเมทิลีนบลู.....	16
2.3 สมบัติการดูดกลืนแสง.....	17
4.1 แสดงพันธะที่อยู่บนพื้นผิวของเปลือกกล้วยน้ำว้าในแต่ละช่วงเลขคลื่น.....	29
4.2 แสดงความดันตกคร่อมในระบบจากปัจจัยต่างๆ.....	36
4.3 สรุปรีมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่จุดต่างๆ ของแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษา.....	41
4.4 ตารางเปรียบเทียบลักษณะการดูดซับของเปลือกกล้วยน้ำว้าด้วยสมการไอโซเทิร์ม การดูดซับแบบฟรุนด์ลิช และแลงมัวร์.....	44
4.5 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่างๆ กับเปลือกกล้วยน้ำว้า.....	45



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงความเข้มข้นภายในคอลัมน์ของสารดูดซับ.....	5
2.2 การเปลี่ยนแปลงของชั้นความเข้มข้นของสารดูดซับ.....	7
2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(X/M)$ และ $\ln C_e$ .....	10
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{x/M}$ และ $C_e$ .....	11
2.5 ความหนาแน่นประเภทต่างๆ ของระบบดูดซับ ช่องว่างในเม็ดตัวดูดซับและระหว่างเม็ดตัวดูดซับ.....	12
2.6 ภาพจำลองระบบทดสอบปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจะเพาะของตัวดูดซับทดสอบแบบไหลผ่านชั้นตัวดูดซับทดสอบ.....	14
2.7 กระบวนการเกิดสีย้อมเมทิลีนบลู.....	16
2.8 หอดูดซับแบบเบตนิ่ง.....	18
3.1 แผนภาพการทดลอง.....	22
3.2 กระบวนการเตรียมตัวดูดซับ.....	23
3.3 กระบวนการเตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู.....	23
3.4 กระบวนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจากเปลือกกล้วยน้ำว้า.....	24
4.1 ภาพ SEM ของเปลือกกล้วยน้ำว้า a) กำลังขยาย 500 เท่า b) กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	26
4.2 FT-IR spectrometer แสดงลักษณะทางเคมีของเปลือกกล้วย สีย้อมเมทิลีนบลู และเปลือกกล้วยที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู.....	27
4.3 FT-IR spectrometer แสดงลักษณะทางเคมีของเปลือกกล้วย เปลือกกล้วยที่ถูกปรับปรุงด้วยสารละลายกรดอะซิติก และเปลือกกล้วยที่ถูกปรับปรุงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	28
4.4 ตัวอย่างสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ผ่านการดูดซับที่เวลาต่างๆ ขนาดของตัวดูดซับ 12 เมช อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	30
4.5 แสดงความสัมพันธ์ $C_t/C_0$ กับเวลา ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 50 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดของตัวดูดซับ 12 เมช ความสูง 5 เซนติเมตร และอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิลิตรต่อนาที.....	31
4.6 ตัวอย่างสารละลายสีย้อมที่เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ขนาดของตัวดูดซับ 12 เมช ความสูง 5 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	32



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แสดงความสัมพันธ์ $C_t/C_0$ กับเวลา ที่อัตราการไหลของสารละลายสีย้อมต่างๆ คือ 3 5 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ขนาดของตัวดูดซับ 12 เมช ความสูง 5 เซนติเมตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	33
4.8 ตัวอย่างสารละลายสีย้อมที่ผ่านการดูดซับที่เวลาต่างๆ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย สีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดของเปลือกกล้วย 12 เมช อัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที และความสูงของตัวดูดซับ 6 เซนติเมตร.....	34
4.9 แสดงความสัมพันธ์ $C_t/C_0$ กับเวลา ที่ความสูงของตัวดูดซับ 5 8 และ 15 เซนติเมตร ขนาดของตัวดูดซับ 12 เมช อัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	35
4.10 ตัวอย่างสารละลายสีย้อมที่ผ่านการดูดซับแล้วของตัวดูดซับขนาด 40 เมช ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	37
4.11 แสดงความสัมพันธ์ $C_t/C_0$ กับเวลาที่ขนาดของตัวดูดซับ 12 20 และ 40 เมช ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	38
4.12 แสดงความสัมพันธ์ $C_t/C_0$ กับเวลา ของตัวดูดซับชนิดไม่ปรับปรุง ปรับปรุงด้วยสารละลายเบส และสารละลายกรด ที่ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และขนาดของตัวดูดซับ 12 เมช.....	39
4.13 แสดงความสัมพันธ์เวลากับ a) ความสูงของตัวดูดซับในหอดูดซับ b) อัตราการไหลของสารถูกดูดซับ c) ขนาดของตัวดูดซับในหอดูดซับ และ d) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับ ณ จุด $T_c @ C_t/C_0 = 0.5$ .....	40
4.14 สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับฟรอนด์ลิส a) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู b) อัตราการไหลของสีย้อมเมทิลีนบลู c) ความสูงของตัวดูดซับ และ d) ขนาดของตัวดูดซับ.....	42
4.15 สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับแลงมีวัวร์ a) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู b) อัตราการไหลของสีย้อมเมทิลีนบลู c) ความสูงของตัวดูดซับ และ d) ขนาดของตัวดูดซับ.....	43

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

สีย้อม (dyestuffs) คือ สารมีสีที่ละลายน้ำได้ หรืออาจทำให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ เวลาใช้ มักจะถูกดูดซึมเข้าไปในวัสดุที่ถูกย้อม ประโยชน์ที่สำคัญที่สุดของสีย้อมก็คือ การให้สีแก่วัสดุสิ่งทอ สีย้อมที่ดีควรมีลักษณะต่างๆ ดังนี้ คือ มีความเข้มของสีสูง ละลายน้ำได้หรือเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ มีแรงดึงดูดหรือมีแรงยึดติดกับเส้นใย คงทนต่อการซักและการใช้งาน คงทนต่อกระบวนการผลิตขั้นต่อมา ให้ความปลอดภัย มีความสะดวกในการใช้งาน และมีราคาเหมาะสม อย่างไรก็ตามการนำสีย้อมไปใช้งานในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศ จากการขยายตัวของอุตสาหกรรมสิ่งทอย้อมมีน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสีย้อมออกมาเป็นมลพิษทางน้ำ

ในปัจจุบันมีความพยายามและงานวิจัยมากมายเพื่อปรับปรุง พัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสีย เช่น กระบวนการทางเคมี (chemical process) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรดและด่างสูงๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไป แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง กระบวนการทางชีววิทยา (biological process) เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่างๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย เป็นการทำบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้ค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากต้องควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ แบคทีเรีย รวมทั้งสภาวะอากาศที่เหมาะสม กระบวนการทางกายภาพ (physical process) เป็นการทำบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD5) ประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น ซึ่งโครงการวิจัยนี้จะเลือกใช้กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (physical-chemical process) นั่นคือ กระบวนการดูดซับ (adsorption) เป็นเทคนิคหนึ่งในกระบวนการทางกายภาพ-เคมี เทคนิคนี้มีต้นทุนต่ำเนื่องจากใช้พลังงานน้อย และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาไม่แพง นอกจากนี้ตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถล้างและนำกลับมาใช้ในระบบใหม่ได้ (regenerate) โดยตัวดูดซับที่ใช้อาจจะเป็นตัวดูดซับที่ได้จากธรรมชาติ หรือตัวดูดซับทางพาณิชย์ก็ได้ ตัวดูดซับทางธรรมชาตินั้น มีหลายตัวที่เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพที่จะนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ เช่น ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าว กากแอปเปิ้ล ฟางข้าวสาเล็ ใช้ทางการเกษตร นอกจากนี้วัสดุธรรมชาติบางชนิดยังสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพได้ เช่น ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าว กากแอปเปิ้ล ฟางข้าวสาเล็ เปลือกส้ม รากผักตบชวา ผักตบชวา ปาล์ม ขี้เลื่อย ผงใบสะเดา [1], [2]

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นสู่การศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีสีย้อม และสารเคมีต่างๆ ที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าวโดยกระบวนการการดูดซับ โดยน้ำเสียที่ใช้ศึกษา

เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ และตัวดูดซับทางธรรมชาติที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่นคือ เปลือกกล้วยน้ำว่า โดยจะนำเอาเปลือกกล้วยชนิดนี้มาใช้เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากโครงการวิจัยเรื่องการศึกษาการดูดซับสี ย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วยโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะและเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งของนิสิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี ปีการศึกษา 2556 [2] ได้ทำการวิจัยแล้วว่ากล้วยน้ำว่ามี ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีกว่ากล้วยชนิดอื่น (เปลือกกล้วยหักมุก) ดังนั้นจึงเป็น ทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยในการลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสียดังกล่าว และยังเป็นการนำเศษวัสดุเหลือใช้ทาง การเกษตรหรือวัสดุทางธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการใช้วัสดุจากธรรมชาติซึ่งได้แก่ เปลือกกล้วยน้ำว่า เพื่อ ดูดซับสีย้อมชนิดสีเมทิลีนบลู (methylene blue dye (MB)) โดยจะศึกษาถึงปัจจัยและตัวแปรที่มี ผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง (fixed bed column) เพื่อการนำไป ประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษากระบวนการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลู จากน้ำโดยใช้เปลือกกล้วยน้ำว่าเป็นตัว ดูดซับ ในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง
2. เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ใช้ในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง

## 1.3 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

### ตัวแปรต้น

- ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู 50 - 600 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ขนาดของเปลือกกล้วย 12 - 40 เมซ
- ความสูงของตัวดูดซับ 5 - 15 เซนติเมตร
- อัตราการไหลของสารละลายเมทิลีนบลู 3 - 10 มิลลิเมตรต่อนาที
- ชนิดของสารที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวเปลือกกล้วย (โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดแอสซิติค)

### ตัวแปรตาม

- ประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกกล้วย

### ตัวแปรควบคุม

- อุณหภูมิในการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง
- ขนาดของหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุล หรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่าสารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent)

การดูดซับเป็นการถ่ายโอนสาร (mass transfer) จากก๊าซหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลว การดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกันดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ของสารดูดซับ (diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของสิ่งสกปรก ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่บนพื้นผิวภายในรูพรุน (intraparticle diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของสิ่งสกปรกจะพุ่งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 ระยะการดูดซับที่ผิว (adsorption) เป็นระยะที่เกิดการดูดซับที่ผิวในรูพรุนระหว่างสิ่งสกปรก และพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับที่ผิวในระยะที่ 3 อาจจะดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ หรือทางเคมี หรือทั้งสองชนิดพร้อมกันในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย การดูดซับจะพิจารณาเฉพาะการเกาะติดด้วยแรงทางกายภาพมากกว่าทางเคมี [3], [4]

##### 2.1.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยจำแนกแรงดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงกายภาพและแรงเคมี การดูดซับจึงแยกออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของแรงที่ดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับดังนี้

1. การดูดซับแบบกายภาพ (physisorption) คือการดูดหรือดึงสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดรวมกันแรงกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ได้แก่

- แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ เช่น การดูดซับความชื้นด้วยผลึกดูดความชื้น ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วลบบนผิวผลึกดูดความชื้น หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วลบของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วบวกบนผิวผลึกดูดความชื้น เป็นต้น

- แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวดูดซับ เช่น การดูดซับไอออนแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และไอออนแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ในน้ำ กระทำได้ด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนบนผิวตัวดูดซับชนิดพอลิเมอร์
- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เช่น การดูดซับกลิ่น ซึ่งมักเป็นไอระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ด้วยผ่านดูดซับ หรือการดูดซับไอสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยผ่านดูดซับ เป็นต้น

ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิปกติ หรืออุณหภูมิต่ำกว่าปกติ และเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้น ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำกว่าปกติ เช่น การดูดซับกลิ่นอับต่างๆ ในตู้เย็นและในห้องโดยสารปรับอากาศ เป็นต้น สามารถเกิดได้ทั้งผิวของตัวดูดซับโดยตรงและเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลที่ต้องการดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับแล้ว โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงมักเรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า “การดูดซับหลายชั้น (multilayer adsorption)”

ความร้อนของการดูดซับแบบกายภาพนี้มักมีค่าประมาณ 2-3 เท่าของความร้อนแฝงของการควบแน่นไอสารถูกดูดซับชนิดนั้นๆ ณ อุณหภูมิเดียวกัน ความร้อนของการดูดซับแปรผันตรงกับแรงของการดูดซับ นั่นคือ แรงของการดูดซับมีค่ามาก มีผลให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง เช่น แรงดึงดูดระหว่างขั้วมักมีค่าสูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลความร้อนของการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างขั้ว จึงมีค่าสูงกว่าความร้อนของการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เป็นต้น

2. การดูดซับแบบเคมี (chemisorption) คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้นการดูดซับจึงมักเกิดขึ้นได้ดีหรือเกิดขึ้นได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูงๆ และการดูดซับจะเกิดเฉพาะผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นคือการดูดซับแบบเคมีนี้จะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับเช่นเดียวกับการดูดซับแบบกายภาพ การดูดซับแบบเคมีนี้จึงเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น และมักเรียกการดูดซับประเภทนี้ว่า การดูดซับชั้นเดียว (monolayer adsorption) ความร้อนของการดูดซับประเภทนี้ จึงมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของการดูดซับแบบกายภาพ หรือมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนแฝงของการควบแน่นไอสารถูกดูดซับชนิดนั้นๆ ไม่น้อยกว่า 3 เท่า [4]

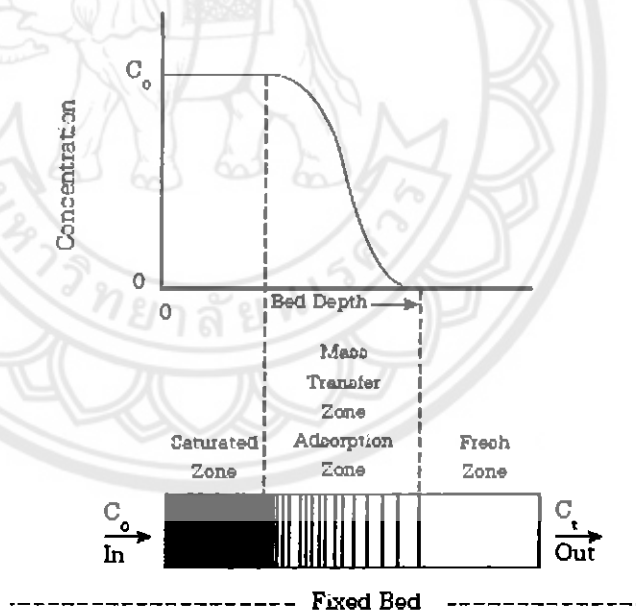
### 2.1.2 กลไกของกระบวนการดูดติดผิว

การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่พวกสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า สารถูกดูดซับ ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติดเรียกว่า ตัวดูดซับ การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (phase) ต่างๆทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว ก๊าซ และของแข็ง ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (liquid-solid Interface)

ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยจะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมีแรงขับเคลื่อน (driving force) อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี [4]

### 2.1.3 ความสามารถในการดูดซับ

รองศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ ศิวะเตชาเทพ ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับในเรื่องของอุปกรณ์ควบคุมมลพิษ รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นความเข้มข้นของสารมลพิษที่เข้าสู่คอลัมน์ของสารดูดซับ กระแสของไหลที่มีมลพิษเข้าสู่คอลัมน์ทางด้านซ้ายมือ และถูกสารดูดซับดูดซับเอาไว้ ทำให้กระแสของไหลที่สะอาดออกจากคอลัมน์ทางด้านขวามือ จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของของไหลมลพิษจะสูงสุดทางซ้ายมือแล้วค่อยๆ ลดลงไปทางขวามือ ความเข้มข้นนี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทางขวามือ หากยังมีการผ่านกระแสของไหลที่ปนเปื้อนมลพิษเข้าสู่คอลัมน์



รูปที่ 2.1 แสดงความเข้มข้นภายในคอลัมน์ของสารดูดซับ [2]

ส่วนของสารดูดซับที่แสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารมลพิษจากศูนย์ไปยังจุดอิ่มตัวเรียกว่าบริเวณถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer zone (MTZ)) ซึ่งเป็นส่วนของสารดูดซับที่กำลังเกิดปฏิกิริยาดูดซับความเข้มข้นของสารมลพิษจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องผ่านตัวกลางจากค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่จุดเริ่มต้นของบริเวณถ่ายโอนมวลสารไปยังความเข้มข้นสูงสุดเมื่อถึงตอนสุดท้าย

เมื่อตัวกลางที่เป็นสารดูดซับเกิดการอิ่มตัว การดูดซับจะเริ่มลดลงบริเวณถ่ายโอนมวลสารจะเคลื่อนไปตามทิศทางการไหลของกระแสของไหล และในที่สุดของไหลจะหลุดออกจากชั้นของตัวดูดซับ ซึ่งจะเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ออกจากตัวกลางกับเวลา ซึ่งจะเรียกว่า กราฟเบรคทูร์ (breakthrough curve) ภาพที่ 2.2 ที่ช่วงเบรคทูร์นี้ความเข้มข้นที่ทางออกจะเริ่มเพิ่มขึ้นจนในที่สุดจะเท่ากับความเข้มข้นทางเข้า กราฟเบรคทูร์นี้อาจเรียกว่า เป็นจุดที่ความสามารถของสารดูดซับในการดูดซับสารมลพิษเริ่มหมดไป จุดอิ่มตัวคือจุดที่จะดูดซับปริมาณของสารมลพิษได้สูงสุดต่อน้ำหนักของสารดูดซับ โดยจุด  $t_b$  แสดงถึงช่วงของการเปลี่ยนของความเข้มข้นของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นขาออกต่อความเข้มข้นขาเข้ามีค่าเท่ากับ 0.05 จุด  $t_i$  แสดงถึงจุดเปลี่ยนของตัวดูดซับเมื่อเวลาผ่านไปที่ความเข้มข้นขาออกต่อความเข้มข้นขาเข้ามีค่าเท่ากับ 0.5 และจุด  $t_d$  แสดงถึงจุดอิ่มตัวของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นขาออกต่อความเข้มข้นขาเข้ามีค่าเท่ากับ 1

ความหนาของชั้นดูดซับมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการดูดซับมาก ความหนาของชั้นดูดซับจะต้องมากกว่าความหนาของบริเวณถ่ายโอนมวลสารเสมอ การตรวจสอบว่าความหนาของชั้นดูดซับมากกว่าบริเวณถ่ายโอนมวลสารหรือไม่ ทำได้โดยใช้สมการที่ 1 ดังนี้

$$MTZ = \frac{1}{1 - X_s} D \left(1 - \frac{C_s}{C_g}\right) \quad (1)$$

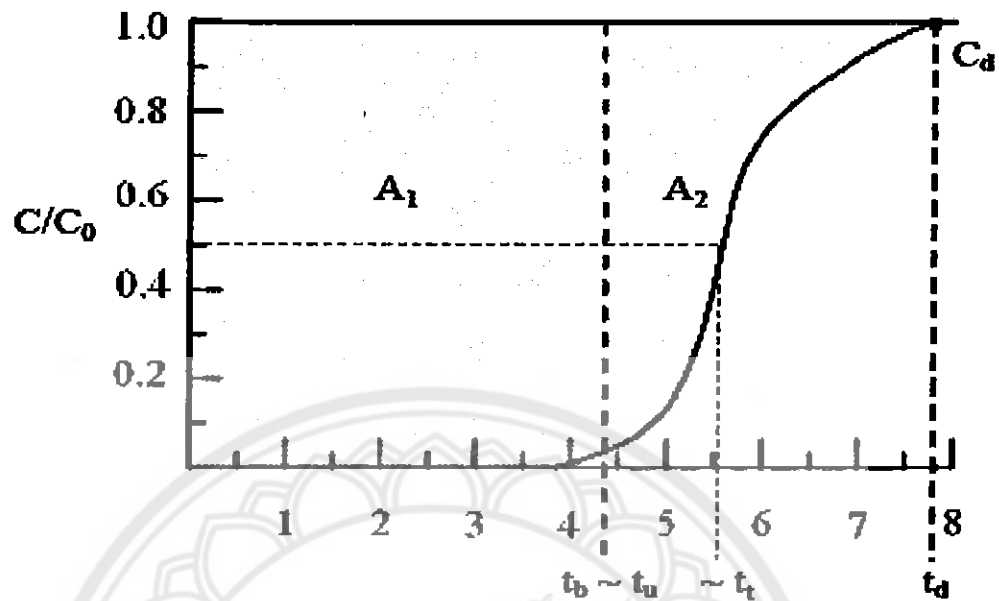
เมื่อ  $D$  คือ ความหนาของชั้นดูดซับ (เมตร)

$C_s$  คือ ความสามารถในการดูดซับจนเบรคทูร์

$C_g$  คือ ความสามารถในการดูดซับจนอิ่มตัว

$X_s$  คือ องศาของความอิ่มตัวในบริเวณถ่ายโอนมวลสาร (ร้อยละ 50)

MTZ คือ ความหนาของบริเวณถ่ายโอนมวลสาร (เมตร)



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของชั้นความเข้มข้นของสารดูดซับ [2]

เมื่อของไหลที่ไหลออกมีความเข้มข้นของมลพิษสูงเกินไป หรือเมื่อเวลาผ่านไปการทำงานของคอลัมน์ จะหยุดลง สารดูดซับควรได้รับการฟื้นฟูเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การฟื้นฟูสารดูดซับทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารดูดซับโดยใช้ไอน้ำผ่านเข้าไปในชั้นของสารดูดซับเพื่อไล่สารที่ถูกดูดซับออกไปจากผิวของสารดูดซับ การทำงานอย่างต่อเนื่องของระบบดูดซับจึงต้องการตัวกลางที่เป็นชั้นดูดซับมากกว่า 2 ตัว เพื่อให้มีตัวสำรองไว้ใช้ขณะที่อีกตัวทำงานจนระบบเต็ม และต้องฟื้นฟู [15]

#### 2.1.4 ประเภทสารดูดซับ

สารดูดซับมีมากมายหลายชนิดซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. ตัวดูดซับอนินทรีย์ธรรมชาติ คือ ตัวดูดซับอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ดินเหนียวดูดซับ (activated clay) เป็นของแข็งผสมที่ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์ของซิลิกอน ( $\text{SiO}_2$ ) สารประกอบออกไซด์ของอะลูมิเนียม ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และอาจมีสารประกอบออกไซด์ของโลหะอื่นๆ เช่น สารประกอบออกไซด์ของโซเดียม ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) สารประกอบออกไซด์ของแคลเซียม ( $\text{CaO}$ ) สารประกอบออกไซด์ของโพแทสเซียม ( $\text{K}_2\text{O}$ ) และสารประกอบออกไซด์ของแมกนีเซียม ( $\text{MgO}$ ) เป็นต้น หรือสารประกอบออกไซด์ของธาตุโลหะ เช่น สารประกอบออกไซด์ของฟอสฟอรัส ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) เป็นต้น

2. ตัวดูดซับอนินทรีย์สังเคราะห์ คือ ตัวดูดซับอนินทรีย์สังเคราะห์ขึ้นเลียนแบบสารประกอบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้แก่ ผลึกซิลิกาดูดความชื้น (silica gel) ผลึกอะลูมินาดูดความชื้น (activated alumina) และผลึกคัตโมเลกุล (zeolite molecular sieves) ซึ่งเป็นผลึกของสารประกอบสารประกอบออกไซด์ของซิลิกอน ผลึกสารประกอบออกไซด์ของอะลูมินา ผลึกสารประกอบออกไซด์ร่วมของซิลิกอนและอะลูมิเนียม ตามลำดับ



3. ถ่านดูดซับ คือตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากวัสดุสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ถ่านดูดซับนี้ จำแนกย่อยตามขนาดปากโพรงของเม็ดถ่าน ถ่านดูดซับแบ่งออกเป็นถ่านดูดซับทั่วไปและถ่านคัดโมเลกุล ถ่านดูดซับทั่วไปมีโพรงขนาดต่างๆมากมาย โพรงดังกล่าวมักมีขนาดใหญ่มากกว่า 1 นาโนเมตร ส่วนถ่านคัดโมเลกุลจะมีขนาดโพรงของเม็ดตัวดูดซับเล็กกว่า 1 นาโนเมตร ถ่านดูดซับจึงมีธาตุคาร์บอน ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของสารประกอบอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก ถ่านดูดซับพาณิชย์ต่างๆ จึงผลิตจากวัสดุสารประกอบอินทรีย์ หรือสารชีวมวลชนิดต่างๆ เช่น ถ่านหิน เศษไม้ และกะลามะพร้าว เป็นต้น [4]

#### 2.1.5 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การดูดซับ

โดยทั่วไปกระบวนการดูดซับอาจจะจัดเป็นการดูดซับทางกายภาพหรือสารเคมีขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างปัจจัยทางกายภาพและเคมีที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับเหล่านี้ได้แก่

1. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับนั้นคือ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลง
2. ขนาดของตัวดูดซับ ในกรณีที่มีโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่มีรูพรุนนั้น พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดของตัวดูดซับ
3. ความมีขั้ว (polarity) ของโมเลกุลความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น
4. ความเป็นกรดต่างของสารละลาย การที่ pH ของสารละลายมีค่าต่ำกว่า  $pH_{ZPC}$  (pH of zero point of the charge) บนพื้นผิวของตัวดูดซับจะแสดงประจุบวกของ  $H^+$  และการที่ pH ของสารละลายมีค่ามากกว่า  $pH_{ZPC}$  บนพื้นผิวของตัวดูดซับจะแสดงประจุลบของ  $OH^-$  โดยตัวดูดซับที่ประจุบวกบนพื้นผิวจะสามารถดึงดูดโมเลกุลของสารที่ประจุลบได้ดี ดังนั้นการดูดซับสีย้อมกรดจึงเกิดได้ดีในสารละลายที่มี pH ต่ำและเมื่อเพิ่ม pH ทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะมีแนวโน้มที่ลดลง ในขณะที่ตัวดูดซับสีย้อมประเภทสีย้อมเบส จะเกิดได้ดีในสารละลายที่มี pH สูง เนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างประจุลบบนพื้นผิวของตัวดูดซับ และประจุบวกบนโมเลกุลของสีย้อม และการลด pH ทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะมีแนวโน้มลดลง
5. อุณหภูมิกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน (exothermic process) ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้การดูดซับมีแนวโน้มเกิดได้ลดลง แต่การดูดซับในของเหลวนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมิมีค่าน้อยมากเนื่องจากของเหลวมีค่าความจุความร้อนสูงแต่การทดลองของ

Dogan และคณะ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่ง Dogan และคณะได้อธิบายผลจากการทดลองว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการกระตุ้นหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่แอลกอฮอล์ (alcoholic) คาร์บอนิลิก (carbonylic) และฟีนอลิก (phenolic) ซึ่งอยู่บนพื้นผิวของการดูดซับทำให้เกิดแรงดึงดูดกันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (OH) บนตัวดูดซับกับประจุบวกบนโมเลกุลของสีย้อมบางชนิดนอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) มีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้ปริมาณการดูดซับจำเพาะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น [5]

### 2.1.6 สมการที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

กระบวนการการดูดซับได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้อยู่ในรูปของสมการอย่างง่าย แล้วนำสมการมาสร้างกราฟเพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ได้ซึ่งค่าคงที่ต่างๆ เหล่านี้จะเป็นแนวทางที่นำมาใช้ในการคำนวณการออกแบบระบบดูดซับ โดยมีผู้สร้างสมการเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ และอธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดซับไว้หลายสมการ แต่ที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ไอโซเทิร์มของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) และไอโซเทิร์มของแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm)

- ไอโซเทิร์มของฟรอนด์ลิช

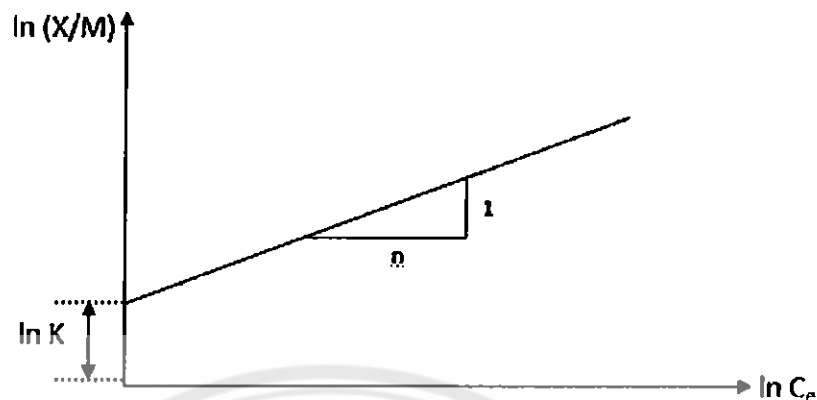
สมการของฟรอนด์ลิช เป็นสมการที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อที่จะอธิบายสมมูลของการดูดซับโดยมีรูปแบบที่เป็นสมการเอมพิริคัล (Empirical equation) สมการของฟรอนด์ลิชเป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวาง อันเป็นผลเนื่องมาจากสาเหตุที่สมการของฟรอนด์ลิช สามารถอธิบายข้อมูลของกระบวนการดูดซับส่วนใหญ่ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยสมการฟรอนด์ลิชสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการที่ 2 ดังนี้

$$\frac{X}{M} = KC_e^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

และสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการ 3

$$\ln \left( \frac{X}{M} \right) = \ln K + \left( \frac{1}{n} \right) \ln C_e \quad (3)$$

รูปที่ 2.3 แสดงสมการเชิงเส้นของไอโซเทิร์มของฟรอนด์ลิช โดยที่  $X/M$  คือ มวลสารของสารถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับ หรือจำนวนโมลของสารถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล ค่า  $C_e$  คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายของสารถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล และ ค่า  $K$  และ  $1/n$  เป็นค่าคงที่ โดยค่า  $1/n$  เป็นค่าคงที่ที่ไม่มีหน่วย ส่วนค่า  $K$  เป็นค่าคงที่ที่มีหน่วย โดยหน่วยของค่า  $K$  นั้นจะขึ้นอยู่กับหน่วยของ  $X/M$  และ  $C_e$  ที่ใช้ในสมการของไอโซเทิร์ม



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(X/M)$  และ  $\ln C_e$  [14]

ค่า  $K$  ในสมการของฟรุนด์ลิช จะแสดงให้เห็นถึงค่าความสามารถเริ่มต้นของการดูดซับของสารถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ ส่วนค่า  $1/n$  เป็นค่าที่แสดงความแข็งแรงของการดูดซับ (strength of adsorption) โดยในกรณีที่ค่า  $K$  มีค่าสูงมากๆ จะแสดงถึงค่าความสามารถในการดูดซับของของสารถูกดูดซับที่สูง ( $X/M$  มีค่าที่สูง) ส่วนในกรณีที่กำหนดให้ค่า  $K$  และ  $C_e$  มีค่าที่คงที่ เมื่อค่าของ  $1/n$  มีค่าที่ต่ำมากๆ จะแสดงให้เห็นว่าสภาพของการดูดซับของสารถูกดูดซับ จะมีแนวโน้มที่จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าของ  $C_e$  ทำให้กราฟของสมการไอโซเทิร์ม มีความชันที่ต่ำจนเริ่มที่จะขนานกับแนวแกน  $x$  ที่สถานะเช่นนี้ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการดูดซับของสารถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible) ส่วนในกรณีที่ค่า  $1/n$  มีค่าสูงมากๆ จะแสดงให้เห็นถึงความไม่แข็งแรงของพันธะในการดูดซับ ดังนั้น ค่า  $X/M$  จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มหรือลดลงของค่า  $C_e$

อย่างไรก็ตามสมการของฟรุนด์ลิช ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้สำหรับทุกๆ ค่าของ  $C_e$  ที่ใช้ในการทดลอง กล่าวคือ เมื่อ  $C_e$  มีค่าที่เพิ่มขึ้นดังสมการที่ 1 ค่า  $X/M$  ก็จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน จนกระทั่งปริมาณสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ ตัวดูดซับเริ่มเข้าสู่สถานะที่อิ่มตัว ค่า  $X/M$  ก็จะเริ่มมีค่าที่คงที่ เมื่อค่า  $C_e$  มีค่าที่เพิ่มขึ้นจากจุดนี้ ค่า  $X/M$  จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ (มีค่าที่คงที่) ดังนั้น ที่สถานะเช่นนี้สมการของฟรุนด์ลิชจะไม่สามารถใช้ทำนายกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นได้อีกต่อไป ดังนั้นในการทดลองของไอโซเทิร์ม จำเป็นต้องคำนึงถึงเรื่องนี้เป็นสิ่งสำคัญ

- ไอโซเทิร์มของแลงมัวร์

บางครั้งเรียกว่า แบบจำลองการดูดซับแบบชั้นเดียวในอุดมคติ (ideal localized monolayer mode) มีสมมุติฐานที่สำคัญ ดังนี้

- แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดซับจะรับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น หรือกล่าวได้ว่าการดูดซับติดผิวเพียงชั้นเดียว
- มีพื้นที่ที่ถูกดูดซับจำกัดโมเลกุลที่ถูกดูดซับที่ผิวของของแข็งอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน

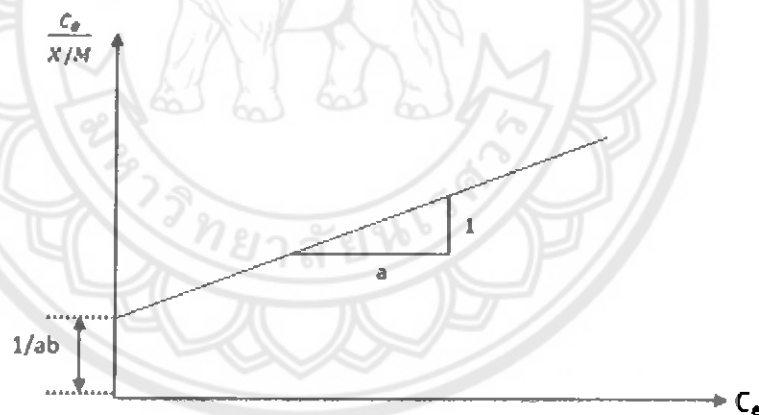
- ตรงบริเวณจุดซับจะเกิดอัตราการติดและหลุดออก ซึ่งอัตราการติดมีมากกว่าอัตราการหลุดจนกระทั่งถึงสภาวะสมดุล (อัตราการติดเท่ากับการหลุด)
- พลังงานในการดูดซับมีค่าเท่ากันในทุกๆ ตำแหน่ง

นอกจากนี้โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาอย่างอิสระระหว่างพื้นที่ผิว หรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้ได้ โดยสมการไอโซเทิร์มของแลงมัวร์ แสดงไว้ในสมการ 4 ดังนี้

$$\frac{X}{M} = \frac{abC_e}{1 + bC_e} \quad (4)$$

และสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้ โดยรูปที่ 2.4 แสดงกราฟสมการเชิงเส้นของไอโซเทิร์มของแลงมัวร์ ดังสมการที่ 5

$$\frac{C_e}{\left(\frac{X}{M}\right)} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a}C_e \quad (5)$$



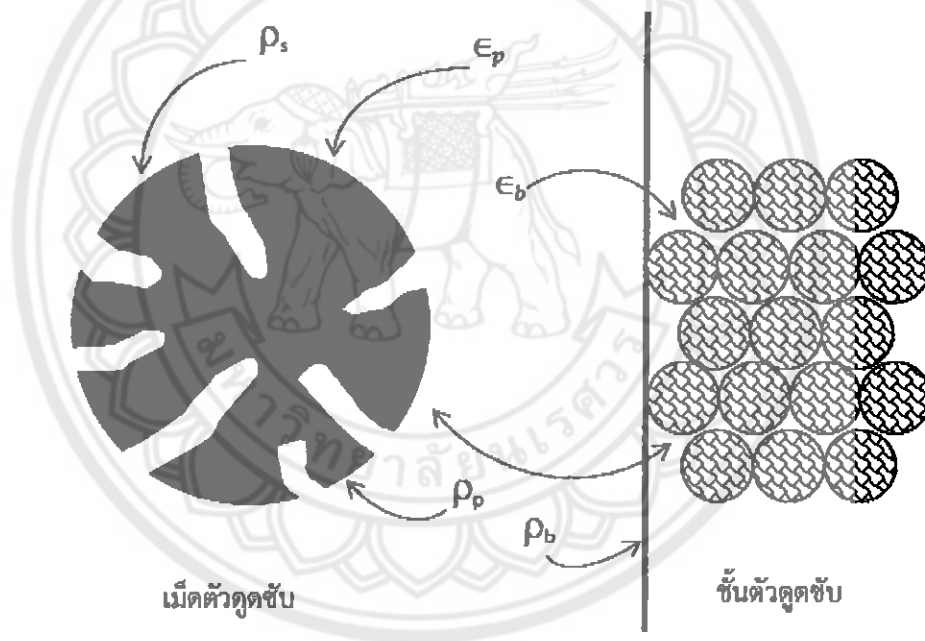
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{C_e}{X/M}$  และ  $C_e$  [14]

โดยที่ค่า  $X/M$  และค่า  $C_e$  มีความหมายเช่นเดียวกับอธิบายไว้ในตอนแรก ค่า  $a$  และค่า  $b$  เป็นค่าคงที่ ซึ่งในสมการไอโซเทิร์มของแลงมัวร์ ค่า  $a$  เป็นค่าคงที่ที่แสดงความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสารถูกดูดซับบนตัวดูดซับ ที่มีลักษณะของการดูดซับแบบชั้นเดียว ส่วนค่า  $b$  จะแสดงถึงค่าพลังงานของการดูดซับ (energy of adsorption) โดยค่า  $b$  จะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อค่าความแข็งแรงของพันธะในการดูดซับมีค่าที่สูงขึ้น [14]

## 2.2 ตัวดูดซับ

การดูดซับเป็นการสะสมสารถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับซึ่งมักเป็นของแข็ง ตัวดูดซับจึงต้องมีพื้นผิวจำเพาะมากๆ เพื่อให้สามารถดูดซับสารถูกดูดซับได้ปริมาณมากๆ ดังนั้นตัวดูดซับจึงมีลักษณะพรุนหรือมีโพรงภายในเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะให้มากขึ้นโดยมีขนาดเท่าเดิม เมื่อตัวดูดซับมีโพรงภายในมาก แต่ตัวดูดซับมีขนาดเท่าเดิม ตัวดูดซับจึงมีความหนาแน่นลดลง

หน่วยดูดซับทั่วไปมีลักษณะเป็นทรงกลมแนวตั้ง และบรรจุเม็ดตัวดูดซับที่มีโพรงอยู่ภายใน เม็ดตัวดูดซับเหล่านั้น ความหนาแน่นของหน่วยดูดซับจำแนกเป็นความหนาแน่นของวัสดุตัวดูดซับ (solid density,  $\rho_s$ ) ความหนาแน่นของเม็ดตัวดูดซับ (adsorbent density,  $\rho_p$ ) และความหนาแน่นของชั้นตัวดูดซับ (bulk density,  $\rho_b$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ความหนาแน่นทั้งสามประเภทของหน่วยดูดซับ นิยามไว้ดังนี้



รูปที่ 2.5 ความหนาแน่นประเภทต่างๆ ของระบบดูดซับ ช่องว่างในเม็ดตัวดูดซับและระหว่างเม็ดตัวดูดซับ [4]

ความหนาแน่นของวัสดุตัวดูดซับ ( $\rho_s$ ) เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของเม็ดตัวดูดซับ และวัสดุเหล่านั้นมักไม่มีโพรง

ความหนาแน่นของเม็ดตัวดูดซับ ( $\rho_p$ ) คือ ความหนาแน่นของเม็ดตัวดูดซับซึ่งประกอบด้วยวัสดุของแข็งที่มีโพรงอยู่ภายในวัสดุ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้สูงมากขึ้นจากผิวจำเพาะเดิม (วัสดุของแข็งที่ไม่มีโพรง)

ความหนาแน่นของชั้นเม็ดตัวดูดซับ ( $\rho_b$ ) คือ ความหนาแน่นของชั้นเม็ดตัวดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับ และเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดตัวดูดซับที่บรรจุไว้ในชั้นตัวดูดซับนั้น เม็ดตัวดูดซับดังกล่าวอาจเป็นชนิดที่มีโพรงจำเพาะมากๆ มีโพรงจำเพาะน้อยๆ หรือไม่มีโพรง

ความหนาแน่นของเม็ดตัวดูดซับแปรผกผันกับปริมาตรโพรงจำเพาะของเม็ดตัวดูดซับนั้น นั่นคือ เมื่อเม็ดตัวดูดซับมีอัตราส่วนปริมาตรโพรงต่อปริมาตรเม็ดตัวดูดซับ หรือความพรุนของเม็ดตัวดูดซับเท่ากับ  $\epsilon_p$  ความหนาแน่นของวัสดุตัวดูดซับ ความหนาแน่นของเม็ดตัวดูดซับ และสัดส่วนโพรงของเม็ดตัวดูดซับจึงสัมพันธ์ต่อกัน ดังสมการที่ 6

$$\rho_p = (1 - \epsilon_p)\rho_s \quad (6)$$

เมื่อบรรจุเม็ดตัวดูดซับในหน่วยดูดซับจะเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดของตัวดูดซับ ความหนาแน่นของชั้นเม็ดตัวดูดซับที่บรรจุในหน่วยตัวดูดซับดังกล่าวจึงแปรเปลี่ยนตามขนาดของเม็ดตัวดูดซับ หรือแปรผันตามอัตราส่วนปริมาตรช่องว่างระหว่างเม็ดตัวดูดซับกับปริมาตรของชั้นเม็ดตัวดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับนั้น เรียกว่า “ความพรุนของชั้นเม็ดตัวดูดซับ ( $\epsilon_b$ )” สมการความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของเม็ดตัวดูดซับและความหนาแน่นของชั้นเม็ดตัวดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับนั้นกับความพรุนของชั้นเม็ดตัวดูดซับ ดังสมการที่ 7

$$\rho_b = (1 - \epsilon_b)\rho_p \quad (7)$$

ความพรุนรวมของชั้นเม็ดตัวดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับ ( $\epsilon_r$ ) คือ ผลรวมของความพรุนของชั้นเม็ดตัวดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับ ( $\epsilon_b$ ) กับความพรุนของเม็ดตัวดูดซับ ( $\epsilon_p$ ) ที่บรรจุในหน่วยดูดซับดังกล่าว ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนทั้งสอง ดังสมการที่ 8

$$\epsilon_r = \epsilon_b + (1 - \epsilon_b)\epsilon_p \quad (8)$$

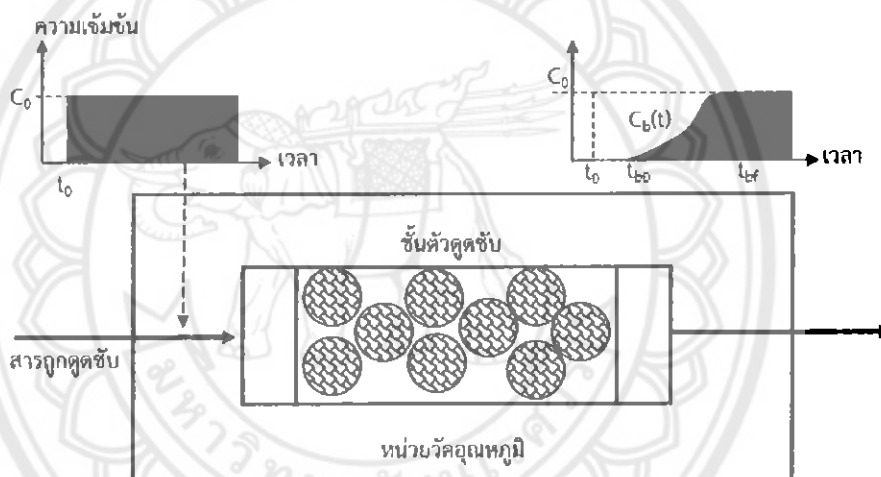
### 2.3 การวัดปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะแบบไหลผ่าน

ระบบทดสอบปริมาณสมมูลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะแบบไหลผ่าน ประกอบด้วยหน่วยดูดซับ หน่วยควบคุมอุณหภูมิ หน่วยควบคุมอัตราการไหล และหน่วยวิเคราะห์สารถูกดูดซับ [6, 15] แสดงในรูปที่ 2.6 หน่วยดูดซับมักมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  บรรจุตัวดูดซับที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย  $d_p$  และชั้นตัวดูดซับสูง (หรือยาว)  $H$  หน่วยดูดซับบรรจุตัวดูดซับที่มีมวล  $W_{des}$  ไว้ และอาจอยู่ในหน่วยควบคุมอุณหภูมิ เมื่อต้องการทดสอบปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ ณ อุณหภูมิที่แตกต่างจากอุณหภูมิบรรยากาศปกติ หน่วยควบคุมการไหล (ไม่ได้แสดงไว้ในรูป) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของของไหลไหลเข้าตามที่กำหนดไว้ และหน่วยวิเคราะห์สารถูกดูดซับ (ไม่ได้แสดงไว้ในรูป) ทำหน้าที่วิเคราะห์ปริมาณสารถูกดูดซับที่ไหลออกจากหน่วยดูดซับละบับที่กผลวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง หรือทำหน้าที่วิเคราะห์ปริมาณสารถูกดูดซับที่ไหลออกจากหน่วยดูดซับและ

บันทึกผลวิเคราะห์ด้วยความถี่ที่เหมาะสมของระบบตัวดูดซับนั้น การทดสอบปริมาณสมมูลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะแบบไหลผ่านชั้นตัวดูดซับมีขั้นตอนสำคัญดังนี้

1. วัดความดันตลอดความสูง (ความยาว) ของชั้นตัวดูดซับเมื่อของไหลไหลผ่านชั้นตัวดูดซับด้วยอัตราการไหลคงที่ต่างๆ
2. คำนวณรูพรุนเฉลี่ยของชั้นตัวดูดซับ ( $\epsilon_b$ ) จากจุดตัดแกนตั้งของความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการความดันลดของ เบรก-โคเซนี (Blake-Kozeny) ดังสมการที่ 9

$$\ln\left(\frac{\Delta P d_p}{H \rho v_o^2}\right) = -\ln\left(\frac{\rho d_p d_p}{\mu}\right) + \ln\left(\frac{150(1 - \epsilon_b)^2}{\epsilon_b^3}\right) \quad (9)$$



รูปที่ 2.6 ภาพจำลองระบบทดสอบปริมาณสมมูลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับทดสอบแบบไหลผ่านชั้นตัวดูดซับทดสอบ [4]

## 2.4 สีย้อม

โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลสีย้อมประกอบด้วย 3 ส่วนคือ พันธะคู่สลับ (conjugated double bonds) หมู่ปฏิกิริยาที่เรียกว่าโครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้เป็นหมู่ปฏิกิริยาที่ไม่อิ่มตัว มีหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนหมู่ปฏิกิริยาที่เรียกว่า ออโซโครม (auxochromes) เป็นหมู่ปฏิกิริยาที่อิ่มตัวที่มีอิเล็กตรอนซึ่งมักไม่เกิดพันธะเชื่อมอยู่กับพันธะคู่สลับ และให้คุณสมบัติในการละลายน้ำรวมทั้งการรวมตัวเกิดเป็นพันธะ (bond) กับเส้นใยและมีผลต่อความเข้มสีของโครโมฟอร์ทั้งโครโมฟอร์ และออโซโครมต่างเชื่อมอยู่กับพันธะคู่สลับทั้ง 3 ส่วนนี้เรียกรวมกันว่า โครโมเจน (chromogen)

สีย้อมที่นำมาใช้ในการย้อมมีอยู่มากมายหลายชนิด การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาใช้ในการย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าการรวมตัวของสีกับ

น้ำ โดยสามารถทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้ เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติด (substativity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น อาจกล่าวได้กว้างๆ ว่าแรงกระทำหรือพันธะที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยได้ คือพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' forces) แรงไอออน (Ionic forces) และพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) แรงเหล่านี้มักจะไม่ทำหน้าที่เพียงลำพังการดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด คือ พันธะโควาเลนต์การยึดติดของโมเลกุลสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใย นอกจากเกิดจากแรงกระทำหรือพันธะแล้วรูปร่าง และขนาดของสีก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีขี้ดและยาวมากเท่าใดจะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น อันจะทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ จะทำให้การติดสีมีความคงทนสูงมากขึ้น ดังนี้ เป็นต้น

การจำแนกชนิดของสีย้อม มีหลายระบบด้วยกัน เช่น จำแนกตามแหล่งกำเนิดตามกลุ่มเคมีภายในโครงสร้างหรือการใช้งาน ระบบที่ใช้กันมากในปัจจุบัน เป็นระบบที่ใช้ในดัชนีสี (color index) ที่แบ่งตามการใช้งานดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทสีย้อม [6]

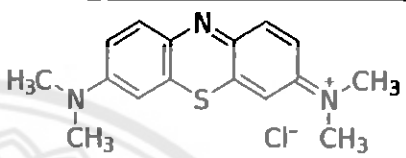
ประเภทสีย้อม	สมบัติกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสี
สีแอซิด (acid dye)	ประจุลบละลายน้ำได้ดีสีติดไม่แน่น	ไนลอนขนสัตว์
สีเมทัลคอมเพล็กซ์ (metal complex dye)	ประจุลบละลายน้ำได้น้อยสีติดแน่น	ไนลอนขนสัตว์
สีย้อมไตรงค์ (direct dye)	ประจุลบละลายน้ำได้ดีสีติดไม่แน่น	ฝ้ายวิสคอส
สีดิสเพอร์ส (disperse dye)	ไม่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำได้น้อย กระจายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ สีติดแน่น	โพลีเอสเตอร์ใน ลอนอะครีลิก เซลลูโลสอะเซเตค
สีรีแอคทีฟ (reactive dye)	ประจุลบละลายน้ำได้ดีสีติดไม่แน่น	ฝ้ายวิสคอสขนสัตว์

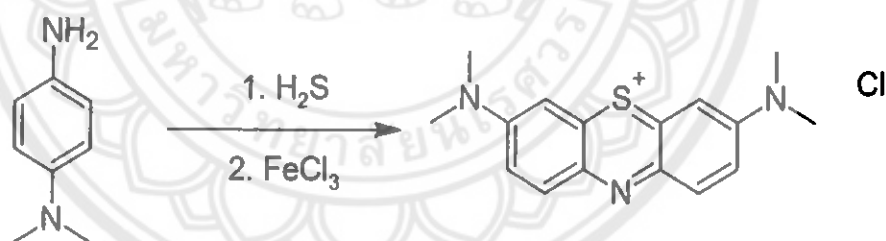


## 2.5 สีย้อมเมทิลีนบลู

สีย้อมเมทิลีนบลูเกิดจาก 4-อะมิโนโตเมทิลอะนิไลด์ (4-Aminodimethylaniline) กับไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายในกรดไฮโดรคลอริกเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเฟอร์ริกคลอไรด์จะได้ดังรูปที่ 2.7 และคุณสมบัติของเมทิลีนบลู ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติสีย้อมเมทิลีนบลู [7]

สูตรโครงสร้าง	 <p>3,7-Bis (Dimethylamino) -Phenothiazin-5-ium Chloride</p>
สูตรโครงโมเลกุล	$C_{16}H_{18}N_3S\text{Cl}$
น้ำหนักโมเลกุล	319.85 กรัมต่อโมล
จุดหลอมเหลว	100-110 องศาเซลเซียส (with decomposition)



รูปที่ 2.7 กระบวนการเกิดสีย้อมเมทิลีนบลู [7]

### 2.3.1 คุณสมบัติการดูดกลืน

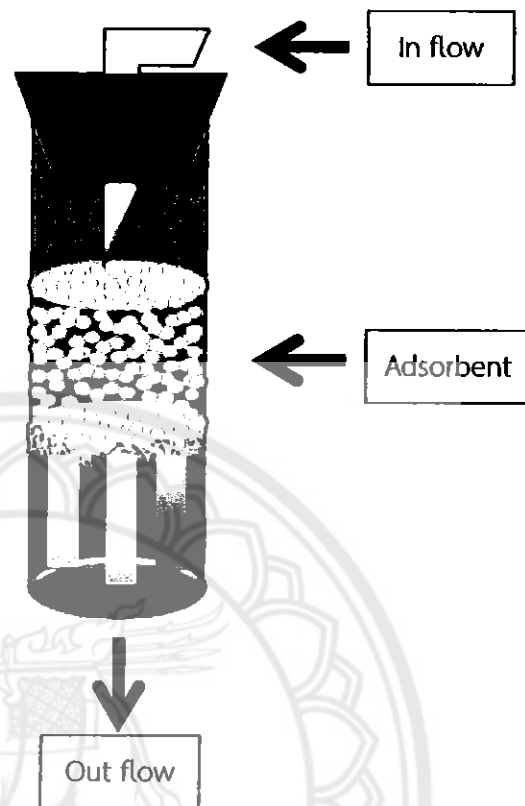
เมทิลีนบลูเป็นสีย้อมประจุบวกที่มีศักยภาพสูงในการดูดกลืนของแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 600 ถึง 670 นาโนเมตร ลักษณะของการดูดกลืนแสงจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ รวมไปถึงผลกระทบจากการดูดซับโดยตัวดูดซับ [10] ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติการดูดกลืนแสง [10]

ประเภท	ความยาวคลื่นในการดูดซับ (นาโนเมตร)	ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน (ลูกบาศก์เดซิเมตร/โมล· เซนติเมตร)
MB+ (Solution)	664	95000
MBH2+ (Solution)	741	76000
(MB+)2 (Solution)	605	132000
(MB+)3 (Solution)	580	110000
MB+ (Adsorbed On Clay)	673	116000
MBH2+ (Adsorbed On Clay)	763	86000
(MB+)2 (Adsorbed On Clay)	596	80000
(MB+)3 (Adsorbed On Clay)	570	114000

### 2.6 หอดูดซับแบบเบตนิ่ง

หอดูดซับเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ควรให้ความสำคัญ โดยในโครงการนี้จะใช้หอดูดซับแบบเบตนิ่งซึ่งถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากหอดูดซับประเภทนี้มีข้อดีคือสามารถออกแบบและจัดสร้างได้ง่าย มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ การดำเนินงานไม่ซับซ้อน โดยตัวดูดซับที่อยู่ภายในหอดูดซับจะไม่มีการเคลื่อนที่ หลักการทำงานของหอดูดซับแบบเบตนิ่ง คือให้สารที่ปนเปื้อนไหลจากส่วนบนของหอดูดซับ จากนั้นสารจะไหลผ่านตัวดูดซับและเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นในคอลัมน์ สุดท้ายแล้วสารจะออกจากหอดูดซับทางด้านล่างซึ่งเป็นสารที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 หอดูดซับแบบเบดนิ่ง [2]

### 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ.2008 Runging Han และคณะ ได้ศึกษาการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้ผงของใบต้นฟีนิกซ์เป็นตัวดูดซับ ในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง ที่ค่าความเป็นกรดต่าง(pH) เท่ากับ 7.4 ศึกษาโดยการเปรียบเทียบตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ อัตราการไหล (5 8 และ 12 มิลลิลิตรต่อนาที) ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู (30 50 และ 100 มิลลิลิตรต่อลิตร) และความสูงของตัวดูดซับ (10 15 และ 30 เซนติเมตร) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้ทฤษฎีของโทมัส อัดัม โบฮาร์ท (Thomas Adams-Bohart) ยูน เนลสัน (Yoon-Nelson) และเชค (Clark) เพื่อประกอบกับงานวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งจะเห็นว่า อัตราการไหล ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู และความสูงของตัวดูดซับส่งผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

ในปี ค.ศ.2009 Md. Tamez Uddin และคณะได้ทำการศึกษาการดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลู โดยใช้ผงของใบขมุนเป็นตัวดูดซับ ในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง โดยจะศึกษาผลกระทบต่างๆ จากตัวแปรที่ต่างกัน เช่น ความสูงของเบด (5-10 เซนติเมตร) อัตราการไหล (30-50 มิลลิลิตรต่อนาที) และความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู (100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตัวดูดซับที่ใช้จะมีความเป็นกลาง (pH=0) จากการศึกษาพบว่า ปริมาณและสมมูลของการดูดซับจะลดลงเมื่ออัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการไหลต่ำๆ จะทำให้การทำงานของหอดูดซับแบบ

เบตนิ่งดีที่สุด ในการศึกษาครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองของโทมัสกับการทดลอง เพื่อหาลักษณะของตัวแปรที่เหมาะสม ซึ่งเป็นประโยชน์ในการออกแบบการทดลอง [10]

ในปี ค.ศ.2009 K. Vijayaraghavan และคณะ ได้ศึกษาการกำจัดสารประกอบสีย้อมรีเมซอล (complex remazol) โดยใช้ซีลี้อยและถ่านหิน (ถ่านกัมมันต์) สำหรับสารละลายที่เป็นต่างจะไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ซึ่งความเป็นกรดต่างจะอยู่ในช่วง 2 ถึง 10.7 ตามโมเดลของแลงมัวร์ ค่าการดูดซับสูงสุดของ ซีลี้อยเป็น 415.4 510.3 368.5 และ 453.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ของ สีย้อมรีแอคทีฟสีดำ (reactive black 5 (RB5)) สีย้อมรีแอคทีฟสีส้ม (reactive orange 16 (RO16)) สีย้อมรีเมซอลสีฟ้า (remazol brilliant blue R (RBBR)) และสีย้อมรีเมซอลสีม่วง (remazol brilliant violet 5R (RBV)) ตามลำดับ ซึ่งตรงกันข้ามกับถ่านหิน ที่ลดลงเล็กน้อย 150.8 197.4 178.3 และ 201.1 มิลลิกรัมต่อกรัม ของ สีย้อมรีแอคทีฟสีดำ สีย้อมรีแอคทีฟสีส้ม สีย้อมรีเมซอลสีฟ้า และสีย้อมรีเมซอลสีม่วงตามลำดับ ในกรณีของน้ำทิ้ง สีย้อม ซีลี้อยแสดงประสิทธิภาพการลดสีจาก 100 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้เงื่อนไขค่าความเป็นกรดค่าที่ไม่ทำการปรับสภาพที่ 10.7 เทียบกับ 52 เปอร์เซ็นต์ของถ่านหิน [11]

ในปี ค.ศ.2011 D.K. Mahmoud และคณะ ได้ศึกษาตัวดูดซับ (H-KFC) ที่เตรียมจากถ่านเส้นใยปอแก้วโดยการใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 โมลาร์ การใช้กรดเพื่อทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นด้วย ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเบื้องต้น ปริมาณตัวดูดซับ ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย และอุณหภูมิ โดยพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 8.5 มีกรดดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่การวิเคราะห์จุดสมดุลของข้อมูลใช้แบบจำลองแลงมัวร์ ฟรันทซ์ลิช และเทมกินไอโซเทิร์ม พบว่าการใช้แบบจำลองแลงมัวร์ไอโซเทิร์ม ให้ผลจุดสมดุลของข้อมูลดีที่สุด เมื่อนำข้อมูลทางจลศาสตร์มาวิเคราะห์ด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order) และปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order) แสดงให้เห็นว่าการดูดซับไม่ได้มีแค่ขั้นตอนเดียว การศึกษาทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ พบว่าการดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนและเกิดขึ้นได้เองที่อุณหภูมิสูง [12]

ในปี ค.ศ.2013 นางสาวจิตรา และคณะ ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วย โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่เปลือกกล้วยน้ำว้าขนาด 50 20 และ 12 เมช ณ อุณหภูมิห้อง ความเข้มข้น 3 7 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกกล้วย 2 ชนิด คือเปลือกกล้วยน้ำว้า และเปลือกกล้วยหักมุก ซึ่งจะเห็นได้ว่าเปลือกกล้วยน้ำว้า มีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีกว่าเปลือกกล้วยหักมุก และขนาดของเปลือกกล้วยที่มีขนาด 12 เมช มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดี [2]

ในปี ค.ศ.2010 มัลลิกา ถาบุตร ได้ทำการศึกษาพัฒนาตัวดูดซับโลหะหนักและสีย้อมผ้าแทนถ่านกัมมันต์เชิงการค้า โดยเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก และสีจากน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งตัวดูดซับในที่นี้คือถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากหินแอนทราไซต์ ซีเฝ้าชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ และถ่านกัมมันต์เชิงการค้าโดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ขนาดของอนุภาค (140-200 เมช และ 200-270 เมช)

ปริมาณของตัวดูดซับ (40 และ 100 กรัมต่อลิตร) ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้น (40 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร) และความเข้มข้นของสีย้อมผ้าชนิด เบนฟิกซีแดง (benefix red 5B) (125 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งได้ทำการพัฒนาตัวดูดซับจากขี้เถ้าขานอ้อย โดยการปรับสภาพด้วยการแช่ในสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งความเป็นกรด-ด่างไม่เปลี่ยนแปลง จากนั้นนำมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วเก็บใบโถดูดความชื้น จากการศึกษาพบว่า ตัวดูดซับจากขี้เถ้าขานอ้อย 200-270 เมช สามารถทำการดูดซับโลหะหนักทองแดงและนิกเกิลจากน้ำเสียได้ดีที่สุด ในขณะที่ดูดซับสีได้ต่ำที่สุด ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากหินแอนทราไซต์ 140-200 เมช สามารถดูดซับสีได้ดีที่สุด ดูดซับโลหะหนักได้ต่ำกว่า ในด้านต้นทุนการผลิตตัวดูดซับวัสดุชีวมวลอื่นๆ ที่หาง่ายในท้องถิ่น เช่น ขานอ้อย เศษไม้ยูคาลิปตัส กากกาแฟ ชั่งข้าวโพด ขี้เลื่อย สามารถถูกพัฒนาให้เป็นตัวดูดซับได้ [16]



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

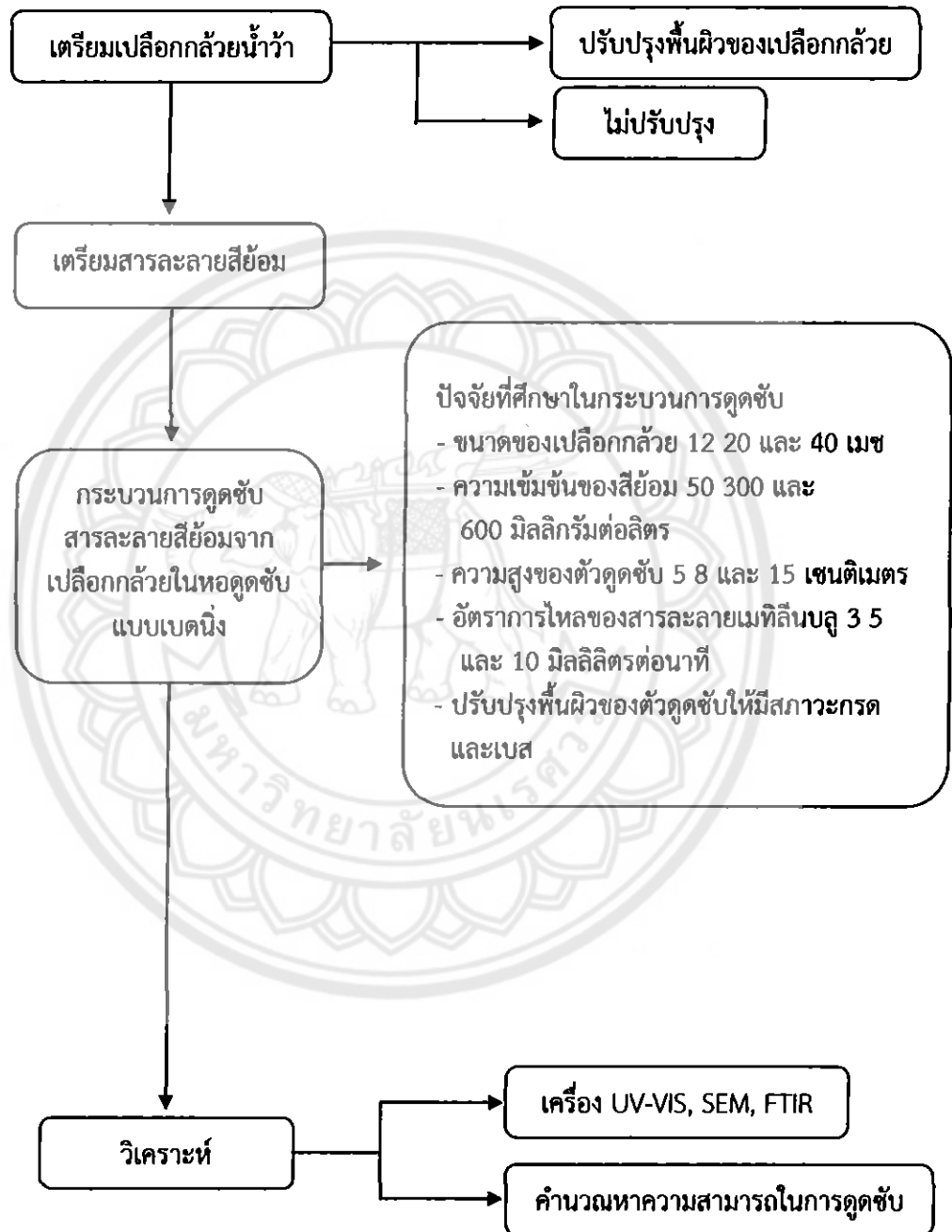
#### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

- 3.1.1 เปลือกกล้วยน้ำว้า
- 3.1.2 สีย้อมเมทิลีนบลู
- 3.1.3 น้ำกลั่น
- 3.1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 3.1.5 สารละลายกรดอะซิติก ( $C_2H_4O_2$ )

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 3.2.2 ปีกเกอร์ขนาด 1000 และ 500 มิลลิลิตร
- 3.2.3 เครื่องสูบลำจ่ายสาร (peristaltic pump)
- 3.2.4 หอดูดซับแบบเบดนิ่ง
- 3.2.5 เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน (magnetic stirrers with heating)
- 3.2.6 แม่เหล็กกวนสาร (magnetic)
- 3.2.7 เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง
- 3.2.8 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS spectrophotometer)
- 3.2.9 เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (fourier transform infrared spectroscopy (FTIR))
- 3.2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope (SEM))

## 3.3 แผนภาพการทดลอง



รูปที่ 3.1 แผนภาพการทดลอง

### 3.4 วิธีการทดลอง

จากการศึกษากระบวนการดูดซับสีย้อมจากเปลือกกล้วยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

#### 3.4.1 การเตรียมเปลือกกล้วย

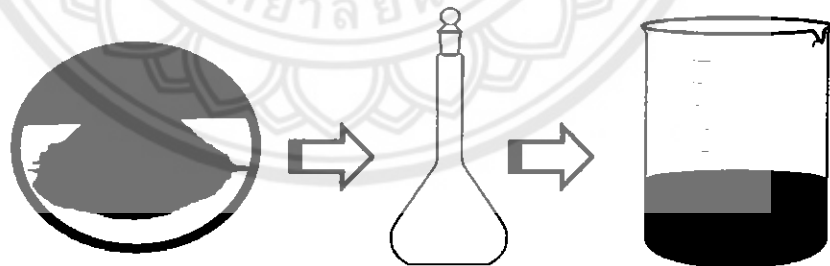
นำกล้วยน้ำว้าไปล้างน้ำสะอาดจากนั้นตากแดดให้แห้ง เมื่อแห้งแล้วนำไปบดละเอียดในเครื่องบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาดตามที่ต้องการ จากนั้นนำเปลือกกล้วยที่ได้ไปเข้าตู้อบ (oven) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเก็บในถุงพลาสติก และควบคุมความชื้นเพื่อป้องกันการขึ้นราโดยเก็บในตู้ควบคุมความชื้น แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กระบวนการเตรียมตัวดูดซับ

#### 3.4.2 การเตรียมสารละลายสีย้อม

เตรียมสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อกรัม เริ่มจากการชั่งเมทิลีนบลู เช่น สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อกรัม จะต้องใช้เมทิลีนบลู 0.1 กรัม ในน้ำกลั่น 2000 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร และนำไปใช้งาน แสดงดังรูปที่ 3.3



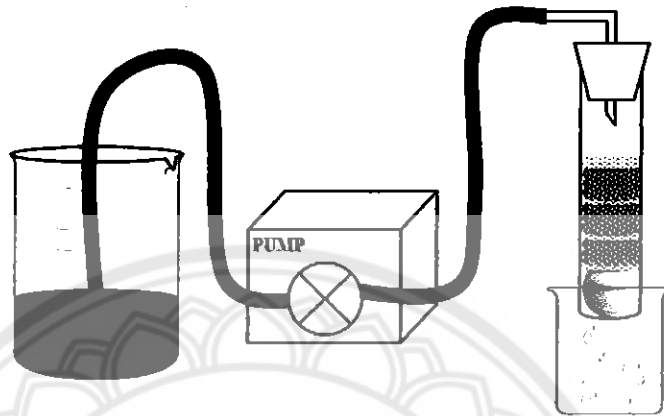
รูปที่ 3.3 กระบวนการเตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

#### 3.4.3 กระบวนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจากเปลือกกล้วยน้ำว้า

นำเปลือกกล้วยน้ำว้าที่เตรียมไว้ที่อุณหภูมิห้องมาบรรจุใส่หลอดดูดซับแบบเบดนิ่ง ซึ่งจะมีลักษณะเป็นคอลัมน์แก้ว จากนั้นป้อนสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่อัตราการไหลคงที่เข้าสู่ที่ส่วนบนของคอลัมน์ และเมื่อสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูไหลผ่านตัวดูดซับในหลอดดูดซับแบบเบดนิ่งแล้ว ทำการเก็บตัวอย่างที่ออกมาส่วนปลายของคอลัมน์ ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ขนาดเปลือกกล้วยน้ำว้า ปริมาณเปลือกกล้วยน้ำว้า ความเป็นกรดต่างของเปลือกกล้วยน้ำว้า ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม



และอัตราการไหลของสารละลายสีย้อม เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู การทดลองลงกระบวนการดูดซับจะแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กระบวนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจากเปลือกกล้วยน้ำว้า

#### 3.4.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม

เครื่องวัดการดูดกลืนแสงและคำนวณหาปริมาณที่เหลือของสีย้อมจากกราฟมาตรฐาน เตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมโดยใช้ความเข้มข้นในช่วง 1 ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายมาตรฐานสีย้อมที่ได้จากการเตรียมไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเมทิลีนบลูจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 663 นาโนเมตร จากนั้นพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) กับค่าการดูดกลืนแสงและจากการทดลองนำสารละลายที่ได้จากการทดลองนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่นเดียวกันจากนั้นนำค่าที่วัดได้มาคำนวณความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือโดยสามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้จากสูตรดังนี้

$$\text{ปริมาณของการดูดซับ} = \frac{\text{ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น}} \quad (6)$$

### 3.5 เครื่องมือการทดลอง

#### 3.5.1 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารโดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 ถึง 1000 นาโนเมตร ของสารเคมีนั้น ได้แก่ สารอินทรีย์ (organic compound) สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic compound) โดยนำสารตัวอย่างใส่ในเซลล์ควอตซ์ (quartz) แล้ววางในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแสง สารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสี หรือแสงบางส่วนไว้ แสงที่ไม่ดูดกลืนจะผ่านออกมายังเครื่องวัดแสง (photomultiplier tube) เครื่องวัดแสงจะทำการวัดปริมาณแสงที่ออกมา โดยการ

หักล้างกับปริมาณของแสงก่อนดูดกลืน จากนั้นจะทำการประมวลผลเป็นสเปกตรัม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และค่าความยาวคลื่น [19]

### 3.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

โดยหลักการของเครื่องจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (primary electron) เราจะควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงๆ และใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) โฟกัสให้อิเล็กตรอนนั้นตกกระทบชิ้นงาน และเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบชิ้นงานจะเกิดอันตรกิริยาได้สัญญาณแบบต่างๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา อิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับ (backscattered electron) หรือรังสีเอกซ์สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกจับโดยเครื่องตรวจจับและแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นจะแปลเป็นภาพในที่สุด [17]

### 3.5.3 เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

หลักการของเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรดเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างไม่ทราบชนิด โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัว โดยการทำงานจะเริ่มจากรังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดจะถูกฉายไปยังอินเตอร์เฟอโรเมทรี (Interferometer) ซึ่งประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ กระจกที่ตรึงอยู่กับที่ โดยทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์กึ่งสะท้อนแสง ลำรังสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นลำรังสีก็จะสะท้อนจากกระจกกลับมาวมกันที่ตัวแยกแสงเกิดตัวแทรกสอดขึ้น หลังจากนั้นลำแสงก็ผ่านไปยังตัวอย่าง และในที่สุดก็จะตกลงบนเครื่องตรวจจับ [18]

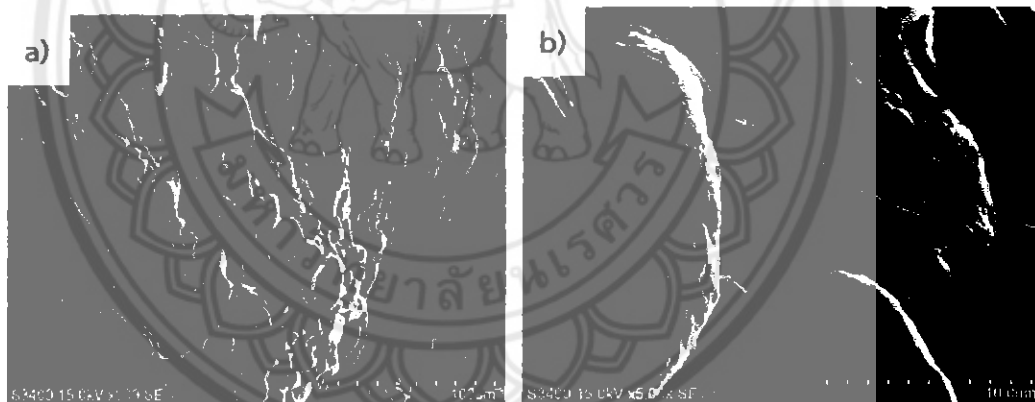
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู 50 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสูงของเปลือกกล้วยในหลอดดูดซับ 5 8 และ 15 เซนติเมตร ขนาดของเปลือกกล้วย 12 20 และ 40 เมช โดยอธิบายผลของปัจจัยดังกล่าวจากผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ

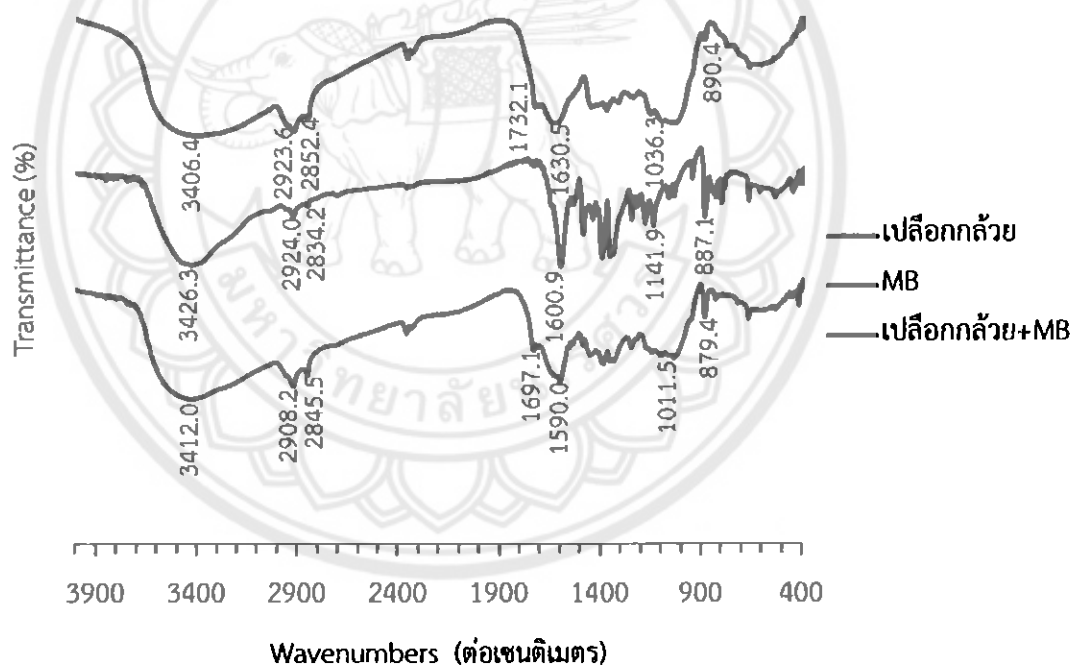
จากรูปที่ 4.1 แสดงการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคหรือสัณฐานวิทยาของเปลือกกล้วยน้ำว่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 และ 5,000 เท่า จะเห็นว่าพื้นที่ผิวของเปลือกกล้วยมีลักษณะขรุขระทั่วทั้งพื้นที่ ซึ่งทำให้เปลือกกล้วยมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้



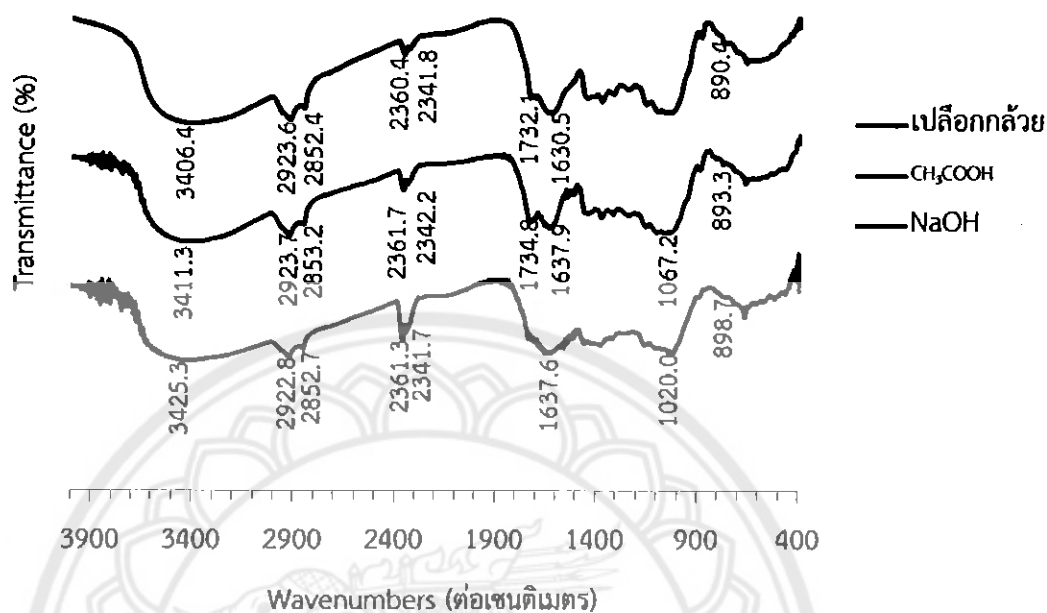
รูปที่ 4.1 ภาพ SEM ของเปลือกกล้วยน้ำว่า a) กำลังขยาย 500 เท่า b) กำลังขยาย 5,000 เท่า

จากรูปที่ 4.2 จะสามารถพิจารณาได้ถึงลักษณะทางเคมีของเปลือกกล้วยน้ำว่า สีย้อมเมทิลีนบลู และเปลือกกล้วยที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ซึ่งผลจากการวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FT-IR) แสดงให้เห็นถึงพันธะบนพื้นผิวของเปลือกกล้วยในแต่ละช่วงเลขคลื่น (wavenumber) เป็นดังต่อไปนี้คือ 3406.4 2923.6 2852.4 1732.1 1630.5 1036.3 และ 890.4 ต่อเซนติเมตร ซึ่งจะแสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะหมู่ไฮดรอกซิล (OH stretching) การสั่นแบบยืดของพันธะแอลเคน (CH stretching) การสั่นแบบยืดของพันธะกรดคาร์บอกซิลิก (C=O stretching) การสั่นแบบยืดของพันธะเอสเทอร์ (COO<sup>-</sup> anion stretching) การสั่นแบบยืดของพันธะอีเธอร์ (CO stretching) และ การเปลี่ยนรูปของเอมีน (NH) ตามลำดับดังตารางที่ 4.1 [31] โดยในพันธะกรดคาร์บอกซิลิก และหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นพันธะที่อยู่ในเปลือกกล้วย จะทำหน้าที่หลัก

ในการกำจัดสารละลายสีย้อมเมทิลินบลู สังเกตจากเส้นกราฟของเปลือกกกล้วยที่ผ่านการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูจะเห็นว่าฟังก์ชันในเปลือกกกล้วยที่กล่าวมาข้างต้นเกิดการเคลื่อน (shifted) โดยมีช่วงเลขคลื่นดังนี้ 3412 2908.2 1697.1 1590 1011.5 และ 879.4 ต่อเซนติเมตร จากรูปที่ 4.3 แสดงลักษณะทางเคมีจากเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟทั้งสามเส้นมีลักษณะทางเคมีที่คล้ายกัน แต่จะเห็นได้ว่าที่เส้นกราฟของเปลือกที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วงเลขคลื่น 1630.5 ต่อเซนติเมตร เกิดการเคลื่อนของช่วงเลขคลื่นเป็น 1637.6 ต่อเซนติเมตร อาจเป็นผลมาจากการย่อยสลายบนพื้นผิวของเปลือกกกล้วย ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการแช่สารละลายเบส จากพันธะต่างๆ ที่อยู่บนพื้นผิวของเปลือกกกล้วยน้ำว่า เป็นสาเหตุที่ทำให้เปลือกกกล้วยน้ำว่ามีการดูดซับสารละลายได้หลายประเภท เนื่องจากเปลือกกกล้วยน้ำว่ามีลักษณะจำเพาะของการดูดซับแบบไม่เจาะจง โดยสารละลายที่ดูดซับได้ ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง [22] โครเมียม [23] ตะกั่ว และสังกะสี [24] นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ เช่น สีย้อมเมทิลินบลู [31] สารประกอบพีนอล เป็นต้น [32]



รูปที่ 4.2 FT-IR spectrometer แสดงลักษณะทางเคมีของเปลือกกกล้วย สีย้อมเมทิลินบลู และเปลือกกกล้วยที่ผ่านการดูดซับเมทิลินบลู



รูปที่ 4.3 FT-IR spectrometer แสดงลักษณะทางเคมีของเปลือกกล้วย เปลือกกล้วยที่ถูกปรับปรุงด้วยสารละลายกรดอะซิติก และเปลือกกล้วยที่ถูกปรับปรุงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ผลของพันธะที่อยู่บนพื้นผิวของเปลือกกล้วยในแต่ละช่วงเลขคลื่น ที่ผ่านการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด จะแสดงให้เห็นถึงพันธะที่ผิวของเปลือกกล้วยในแต่ละช่วงเลขคลื่น เป็นดังต่อไปนี้คือ 3406.4 2923.6 2852.4 1732.1 1630.5 1036.3 และ 890.4 ต่อเซนติเมตร ซึ่งจะแสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะหมู่ไฮดรอกซิล (OH stretching) การสั่นแบบยืดของพันธะแอลเคน (CH stretching) การสั่นแบบยืดของพันธะกรดคาร์บอกซิลิก (C=O stretching) การสั่นแบบยืดของพันธะเอสเทอร์ (COO<sup>-</sup> anion stretching) การสั่นแบบยืดของพันธะอีเทอร์ (CO stretching) และ การเปลี่ยนรูปของเอมีน (NH) ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1 [31]

ตารางที่ 4.1 แสดงพันธะที่อยู่บนพื้นผิวของเปลือกกล้วยน้ำว่าในแต่ละช่วงเลขคลื่น

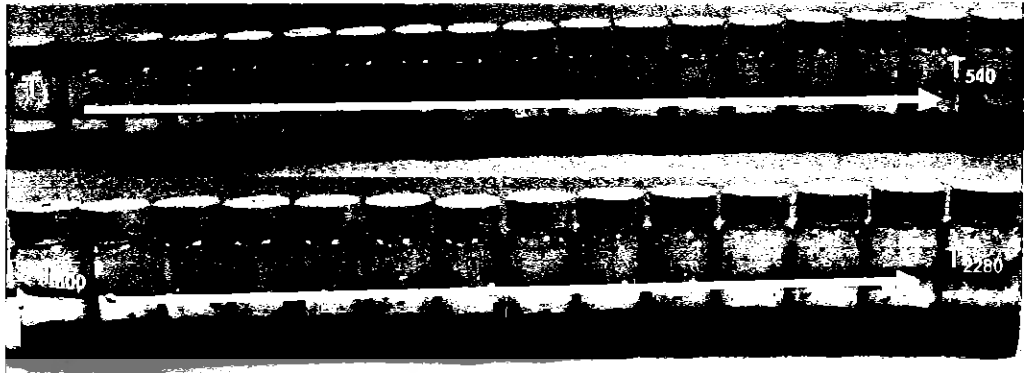
ช่วงเลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)	พันธะ
3406.4	OH stretching
2923.6	CH stretching
2852.4	CH stretching
1732.1	C=O stretching
1630.5	COO <sup>-</sup> anion stretching
1036.3	CO stretching
890.4	NH

#### 4.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วยในหลอดดูดซับแบบเบตนิ่ง

##### 4.2.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดของเปลือกกล้วย 12 เมช อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที และความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร ในการทดลองชุดนี้ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที และเก็บทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะทำการเก็บสารละลายสีย้อมทุกๆ 1 ชั่วโมง

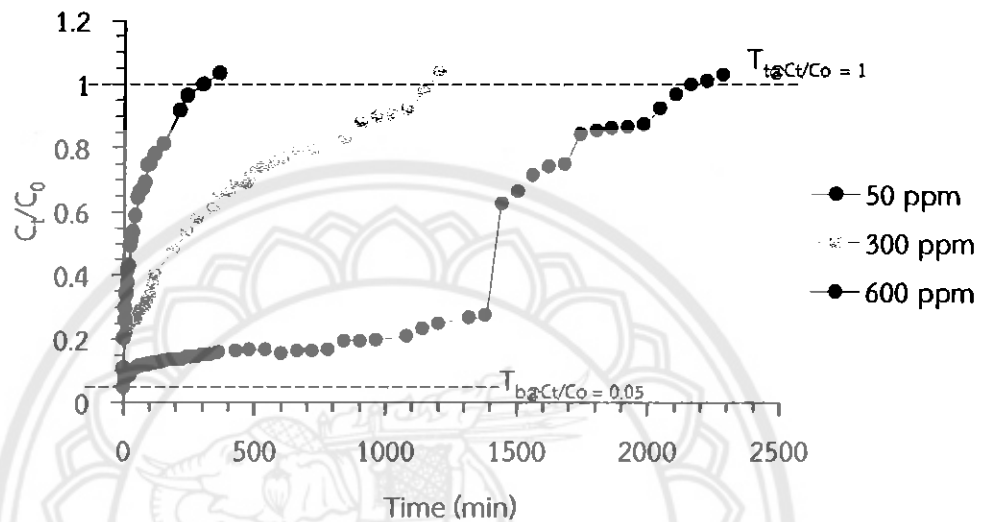
จากการทดลองพบว่าในช่วงแรกของการเก็บตัวอย่าง สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ผ่านหลอดดูดซับแบบเบตนิ่งจะถูกดูดซับโดยตัวดูดซับ สังเกตได้จากสีของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนไป โดยในช่วงนาทีแรกจะเห็นเป็นสีเขียวอ่อน ซึ่งเป็นผลมาจากยางของเปลือกกล้วยที่ติดมา จากนั้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ออกมาจะมีสีฟ้าอ่อนและค่อยๆ เข้มขึ้นในเวลาถัดมา เนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับที่ต่ำลง ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่ผ่านตัวดูดซับแล้วมีปริมาณที่มากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ผ่านการดูดซับที่เวลาต่างๆ ขนาดของตัวดูดซับ 12 เมช อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_t/C_0$  กับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยพิจารณาที่จุดแรกคือจุด  $T_b$  หรือจุดของเวลาที่มีความเข้มข้นขาออกของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู เป็น 5 เปอร์เซ็นต์ [20] ของความเข้มข้นขาเข้า ( $C_t/C_0 = 0.05$ ) พบว่า ณ จุด  $T_b$  มีผลของเวลาที่มีความเข้มข้นขาออกของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเพียงจุดเดียวคือ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลา 10 นาที เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับที่ 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นปริมาณที่สูงเกินจากประสิทธิภาพของตัวดูดซับ ทำให้ในช่วงแรกของการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้นดังกล่าวเป็นไปได้ไม่ได้ จากนั้นเมื่อพิจารณาที่จุด  $T_d$  หรือจุดของเวลาที่มีความเข้มข้นขาออกของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มข้นขาเข้า ( $C_t/C_0 = 1$ ) ซึ่งเป็นจุดที่ตัวดูดซับเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว หรือสภาวะสมดุล พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดจุด  $T_d$  ในชั่วโมงที่ 36 19 และ 5 มีปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่จุดสมดุลการดูดซับ 208.76 313.05 และ 917.24 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วย ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นและเวลาที่ใช้ในการดูดซับลดลง เนื่องจากกระบวนการดูดซับเกิดการถ่ายเทมวล ความเข้มข้นเป็นแรงขับเคลื่อน (driving force) ในการเกิดการถ่ายเทมวล ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู ทำให้ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการดูดซับลดลง เนื่องจากอัตราเร็วในการดูดซับที่เพิ่มสูงขึ้น [9] นอกจากนี้ Quek และ Al-Duri [28] อธิบายเส้นโค้งการดูดซับที่แตกต่างกันของตัวถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำและความเข้มข้นเริ่มต้นสูง โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำ เส้นโค้งการดูดซับมีลักษณะแบนเรียบ อธิบายได้ว่าขอบเขตการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้าง และการแพร่ที่ผิวรอบนอกตัวดูดซับเป็นขั้นตอนควบคุมการดูดซับ (controlled process) ในทางตรงกันข้ามที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูง เส้นโค้งการดูดซับมีลักษณะชัน อธิบายได้ว่าขอบเขตการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นเป็นบริเวณแคบ และการแพร่ภายในรูพรุนตัวดูดซับเป็นขั้นตอนควบคุมการดูดซับ สำหรับผลการทดลองที่มีค่า  $C_t/C_0$  มากกว่า 1 เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวของเปลือกกล้วยนี้ว่าในหอดูดซับ จะเกิดการสะสมของสารละลายเมทิลีนบลูที่บริเวณทางออกของหอดูดซับ เป็นผลให้ความเข้มข้น

ขาคอกต่อความเข้มข้นขาเข้าของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูมีค่าเกิน 1 [25] โดยในการทดลองความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุดและใช้เวลาในการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลต่ำที่สุด



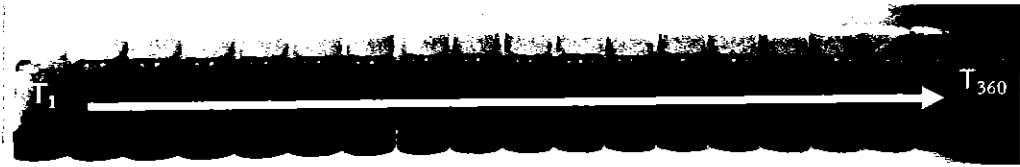
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์  $C_t/C_0$  กับเวลา ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 50 300 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดของตัวดูดซับ 12 เมช ความสูง 5 เซนติเมตร และอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิลิตรต่อนาที

#### 4.2.2 ผลของอัตราการไหลของสีย้อมเมทิลีนบลูต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการไหล 3 5 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดของเปลือกกล้วย 12 เมช และความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร ในการทดลองทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที เก็บทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะทำการเก็บสารละลายสีย้อมทุกๆ 1 ชั่วโมง

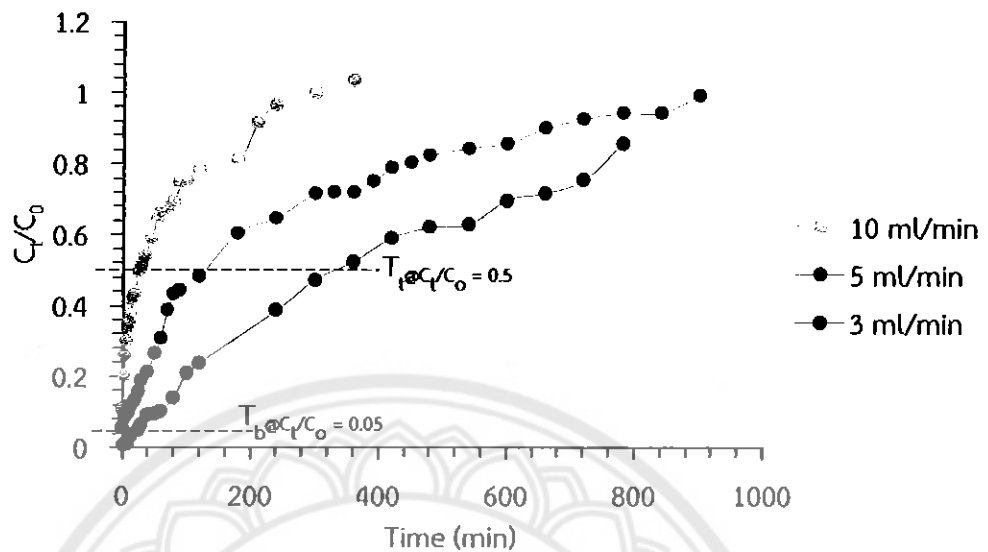
จากรูปที่ 4.6 ตัวอย่างสารละลายสีย้อมที่เวลาต่างๆที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที จากรูปจะเห็นว่าสีของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ออกมาหลังจากผ่านตัวดูดซับแล้วมีสีที่ค่อนข้างเหมือนกัน แม้ว่าจะไม่เห็นถึงความแตกต่างของสี แต่เมื่อนำไปทดสอบการส่องผ่านแสงโดยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง ทำให้ทราบว่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับที่ต่ำลงจนถึงจุดอิ่มตัว





รูปที่ 4.6 ตัวอย่างสารละลายสีย้อมที่เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ขนาดของตัวดูดซับ 12 เมช ความสูง 5 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

การศึกษาผลของอัตราการไหลของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ส่งผลต่อการดูดซับที่อัตราการไหล 3.5 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากการทดลองพิจารณาจุดแรกที่  $T_b$  ( $C_t/C_0 = 0.05$ ) พบว่า ณ จุด  $T_b$  พบผลของเวลาที่ความเข้มข้นขาออกของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเพียงจุดเดียวคือที่อัตราการไหลของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลา 25 นาที เนื่องจากที่อัตราการไหลของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 5 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นอัตราการไหลที่ไม่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการถ่ายเทมวลน้อยเกินไป ดังนั้นในช่วงแรกของการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่อัตราการไหลดังกล่าวจึงเป็นไปได้ไม่ดี จากนั้นเมื่อพิจารณาจุด  $T_t$  ( $C_t/C_0 = 0.5$ ) ซึ่งเป็นจุดที่ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่อัตราการไหลของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 3.5 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที เกิดจุด  $T_t$  ในชั่วโมงที่ 5:30 2:10 และ 0:38 ชั่วโมง และมีปริมาณการดูดซับคือ 42.13 24.8 และ 11.61 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วย แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลสีย้อมเมทิลีนบลูมีผลต่อการดูดซับ โดยที่อัตราการไหลต่ำๆ สีย้อมเมทิลีนบลูจะมีเวลาในการสัมผัสกับเปลือกกล้วย เพื่อถ่ายเทมวลได้นานกว่า เป็นผลทำให้เปลือกกล้วยสามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้มากขึ้น และจะใช้เวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุลการดูดซับยาวนานขึ้น [30] สอดคล้องกับการทดลองของ Han และคณะที่ใช้แกลบในประเทศจีนดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู [29] โดยในการทดลองอัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้สูงสุดและใช้เวลาในการดูดซับนานที่สุด

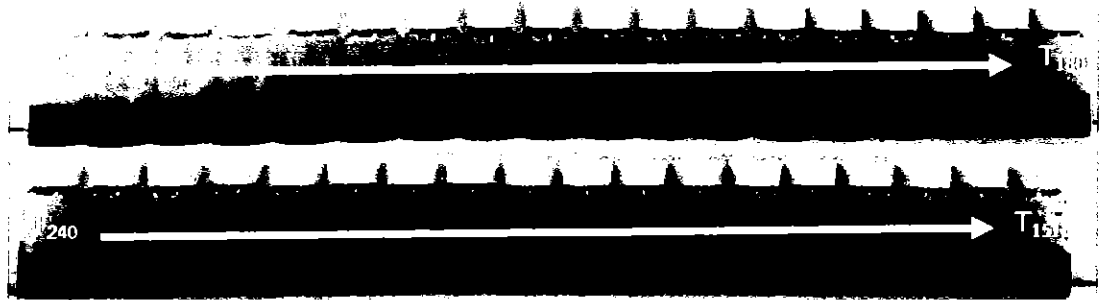


รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์  $C_t/C_0$  กับเวลา ที่อัตราการไหลของสารละลายสีย้อมต่างๆ คือ 3 5 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ขนาดของตัวดูดซับ 12 เมช ความสูง 5 เซนติเมตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 4.2.3 ผลของความสูงของตัวดูดซับที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

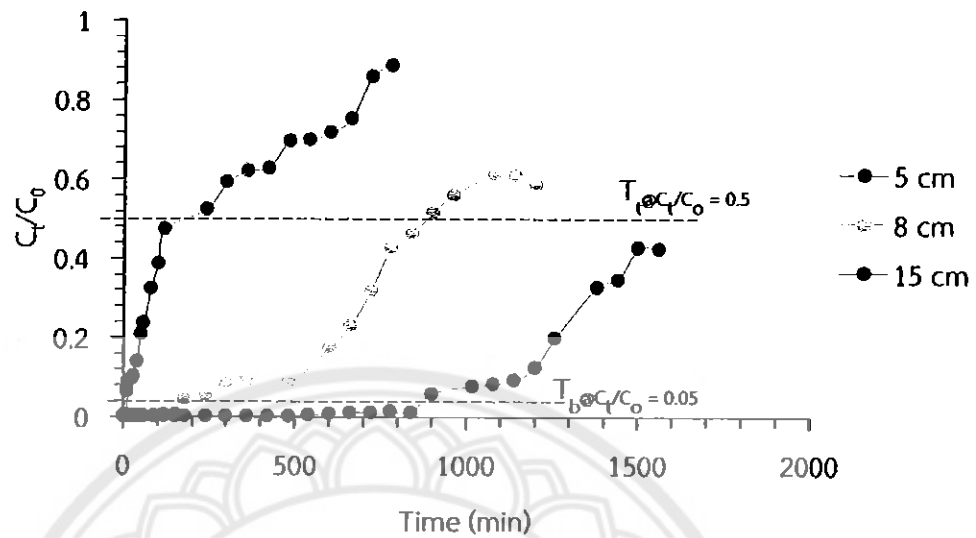
การทดลองเพื่อศึกษาผลของความสูงของตัวดูดซับภายในหอดูดซับที่ 5 8 และ 15 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดของเปลือกกล้วย 12 เมช และอัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที ในการทดลองจะทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที เก็บทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะทำการเก็บสารละลายสีย้อมทุกๆ 1 ชั่วโมง

จากการทดลองในช่วงแรกของการเก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมที่ผ่านการดูดซับในครั้งแรก สีย้อมจะถูกดูดซับโดยตัวดูดซับ ซึ่งสังเกตได้จากสีของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนไป โดยเริ่มจากสีเขียวอ่อนที่เป็นผลของยางกล้วย จากนั้นเปลี่ยนเป็นสีฟ้า และสีน้ำเงินเข้มตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างสารละลายสีย้อมที่ผ่านการดูดซับที่เวลาต่างๆ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดของเปลือกกล้วย 12 เมช อัตราการไหล 3 มิลลิตรต่อนาที และความสูงของตัวดูดซับ 6 เซนติเมตร

เมื่อพิจารณาผลของความสูงของตัวดูดซับที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ จากรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์  $C_t/C_0$  กับเวลา ที่ความสูงต่างๆ ของตัวดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง พิจารณาจุดแรกที่  $T_b$  ( $C_t/C_0 = 0.05$ ) พบว่า ผลของเวลาที่ความเข้มข้นขาออกของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ที่ความสูงของตัวดูดซับ 5 8 และ 15 เซนติเมตร เกิดจุด  $T_b$  ที่เวลา 0:12 4:0 และ 14:40 ชั่วโมง มีปริมาณการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูอยู่ที่ 1.24 6.59 และ 21.48 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วย จะเห็นว่า การเพิ่มความสูงของเปลือกกล้วยมีผลทำให้ปริมาณการดูดซับสูงขึ้น และมีระยะเวลาการดูดซับที่นานขึ้น เนื่องจากความสูงของตัวดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง แสดงถึงพื้นที่ในการถ่ายเทมวล เมื่อความสูงของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อพิจารณาจุด  $T_f$  ( $C_t/C_0 = 0.5$ ) พบว่าที่ความสูงของตัวดูดซับในหอดูดซับ 5 8 และ 15 เซนติเมตร เกิดจุด  $T_f$  ในชั่วโมงที่ 2:40 14:40 และ 28:20 ปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลูของความสูงดังกล่าว 158.42 239.68 และ 267.58 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วย จะเห็นว่าเมื่อความสูงของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการดูดซับและปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูมีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับผลของจุด  $T_b$  ที่ความสูงต่างๆ ของตัวดูดซับ แต่ที่ความสูงของตัวดูดซับ 15 เซนติเมตร จะเห็นว่าเส้นกราฟที่แสดงผลความเข้มข้นขาออกต่อความเข้มข้นขาเข้ามีจุดสิ้นสุดที่ไม่ถึง 0.5 อาจเป็นผลมาจากการเกิดความดันตกคร่อม หรือแรงต้านในระบบที่มากจากการเพิ่มความสูงของตัวดูดซับ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการหยุดระบบเมื่ออัตราการไหลลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ จากอัตราอัตราการไหลในช่วงแรก



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์  $C_t/C_0$  กับเวลา ที่ความสูงของตัวดูดซับ 5 8 และ 15 เซนติเมตร ขนาดของตัวดูดซับ 12 เมช อัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วยน้ำว้าในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง พบว่าบางสภาวะของชุดการทดลองจำเป็นต้องหยุดระบบเนื่องจากอัตราการไหลขาออกของสารละลายลดลง ซึ่งความดันตกคร่อมเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าที่ความสูงของตัวดูดซับ 15 เซนติเมตร เกิดความดันตกคร่อม -12.69 ปาสคาล ซึ่งเป็นความดันตกคร่อมที่เกิดจากการเพิ่มความสูงของตัวดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่ง อย่างไรก็ตามที่ชุดการทดลองของตัวดูดซับขนาด 40 เมช สามารถทำการทดลองได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีอัตราการไหลขาออกของสารละลายคงที่และมีการอัดตัวของตัวดูดซับเพียงบางส่วน เกิดความดันตกคร่อม -124.40 ปาสคาล เนื่องจากความดันตกคร่อมในระบบเกิดจากหลายปัจจัย ได้แก่ ความเร็วเริ่มต้นในการป้อนสารถูกดูดซับ ความสูงของตัวดูดซับ และช่องว่างระหว่างตัวดูดซับ (void) ดังนั้นในการดำเนินระบบการดูดซับในหอดูดซับแบบเบดนิ่งนี้ควรคำนวณขนาดของคอลัมน์เพื่อลดการเกิดความดันตกคร่อม

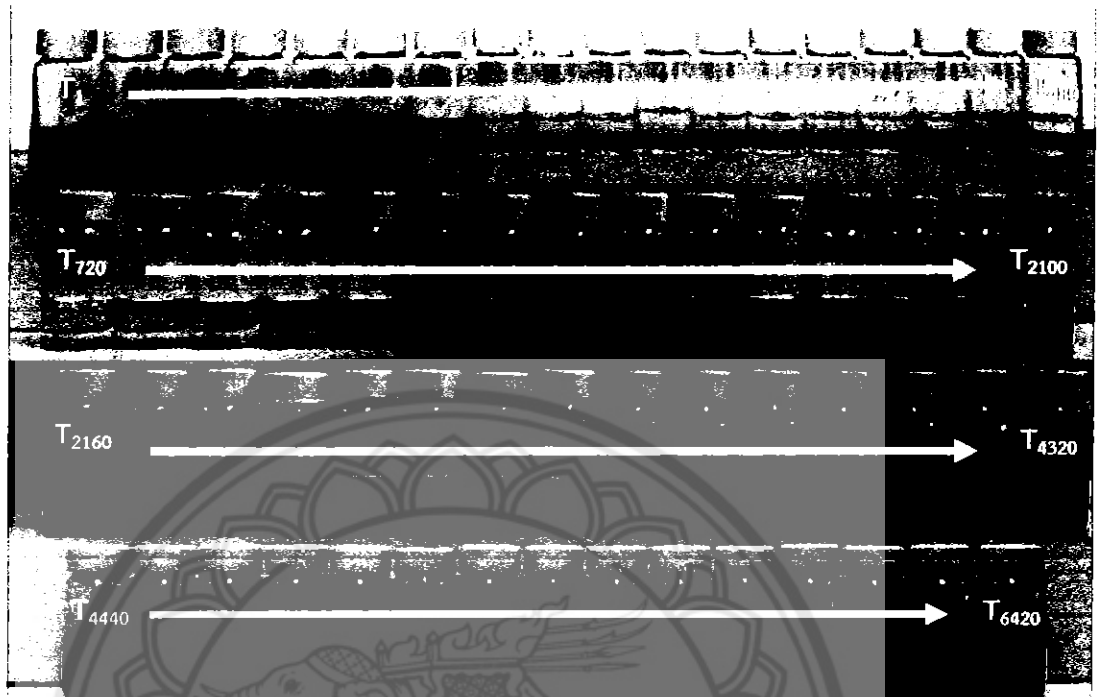
ตารางที่ 4.2 แสดงความดันตกคร่อมในระบบจากปัจจัยต่างๆ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ		ความดันตกคร่อม (ปาสคาล)
อัตราการไหลของ สีย้อมเมทิลีนบลู (มิลลิลิตรต่อนาที)	3	-4.23
	5	-7.05
	10	-14.10
ความสูงของตัวดูดซับ (เซนติเมตร)	5	-4.23
	8	-6.77
	15	-12.69
ขนาดของตัวดูดซับ (เมช)	12	-7.05
	20	-28.14
	40	-124.40

#### 4.2.4 ผลของขนาดของตัวดูดซับที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การทดลองเพื่อศึกษาขนาดของตัวดูดซับ 12 20 และ 40 เมช ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร เลือกกล้วยขนาด 12 เมช ในการทดลองชุดนี้จะทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที และเก็บทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะทำการเก็บสารละลายสีย้อมทุกๆ 1 ชั่วโมง

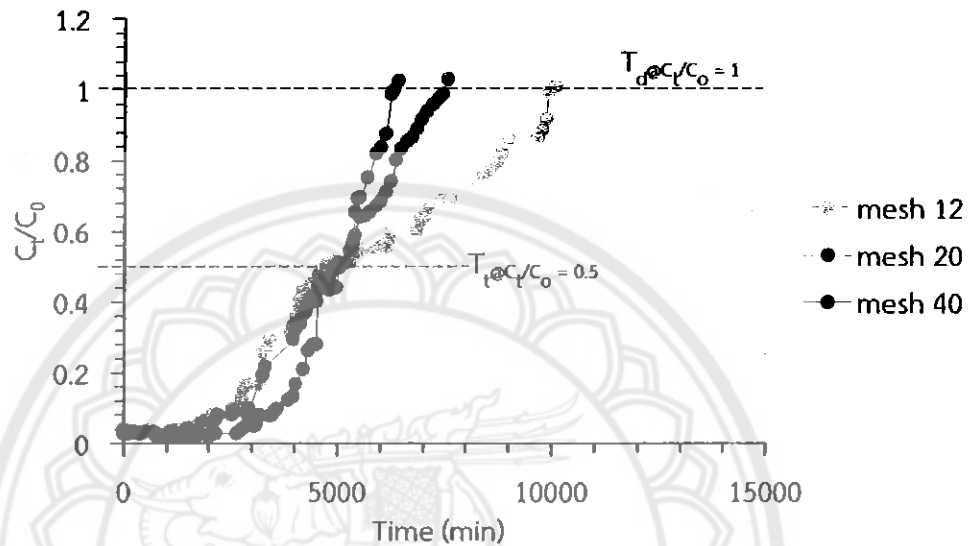
จากการทดลองในช่วงแรกของการเก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ผ่านการดูดซับในครั้งแรกสีย้อมจะถูกดูดซับโดยตัวดูดซับ ซึ่งสังเกตได้จากสีของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนไป โดยเริ่มจากสีเหลืองซึ่งเป็นผลของยางกล้วย จากนั้นเปลี่ยนเป็นน้ำสีใส สีฟ้า และสีน้ำเงินเข้มตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างสารละลายที่ย้อมที่ผ่านการดูดซับแล้วของตัวดูดซับขนาด 40 เมช ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 5 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่ย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองตามรูปที่ 4.11 พิจารณาที่ขนาดของตัวดูดซับ 12 20 และ 40 เมช มีจุด  $T_c$  ( $C_t/C_0 = 0.5$ ) อยู่ที่ 78:20 81:40 และ 83:20 ชั่วโมง สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้ 89.83 113.72 และ 117.28 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วย ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของการดูดซับ ณ จุด  $T_c$  แสดงถึงการลดลงของขนาดของตัวดูดซับทำให้ความเข้มข้นขาออกต่อความเข้มข้นขาเข้าของสารละลายที่ย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น เนื่องจากเปลือกกล้วยที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับน้อยกว่าเปลือกกล้วยขนาดเล็กเมื่อเทียบในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งทำให้เปลือกกล้วยขนาดใหญ่ใช้เวลาและปริมาณการดูดซับที่น้อยกว่าเปลือกกล้วยขนาดเล็ก โดยสอดคล้องกับการรายงานของ Bulet และ Baysal [27] รายงานว่าการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสีย โดยใช้เปลือกข้าวสาลีเป็นตัวดูดซับ พบว่าการดูดซับโลหะตะกั่วโดยใช้เปลือกข้าวสาลีขนาด 500 1000 และ 1500 ไมครอน เป็นตัวดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสีย มีค่าลดลงตามขนาดของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 98.35 96.43 และ 93.62 ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวมีแนวโน้มตามพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น และขนาดของอนุภาคที่ลดลง โดยเกิดขึ้นที่บริเวณผิวนอกของอนุภาคตัวดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นรูพรุน จากนั้นเมื่อพิจารณาจุด  $T_d$  ( $C_t/C_0 = 1$ ) ของตัวดูดซับ 12 20 และ 40 เมช เวลาที่ใช้ในการดูดซับที่จุด  $T_d = 166$  124 และ 104 ชั่วโมง ปริมาณการดูดซับที่จุดทั้ง 3 คือ 313.70 311.47 และ 292.45 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วย ตามลำดับ จะเห็นว่าพฤติกรรมการดูดซับของสารละลายที่ย้อมเมทิลีนบลูที่ตัวดูดซับขนาดต่างๆ มีการเปลี่ยนไปคือ ขนาดของเปลือกกล้วยที่มีขนาดใหญ่จะมีปริมาณการดูดซับที่มากกว่าเปลือกกล้วยที่มีขนาดเล็ก อาจเป็นผลมาจากในระบบของการดูดซับมีการเกิดฟาวลิง

(fouling) เกิดขึ้นในระบบการดูดซับ การเกิดฟาวลิ่งนั้นคือการเกิดตะกรัน หรือคราบเมือกที่ไปอุดตัน ในส่วนของช่องว่างของตัวดูดซับ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เปลือกกล้วยที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณการดูดซับ สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่มากที่สุด [26]



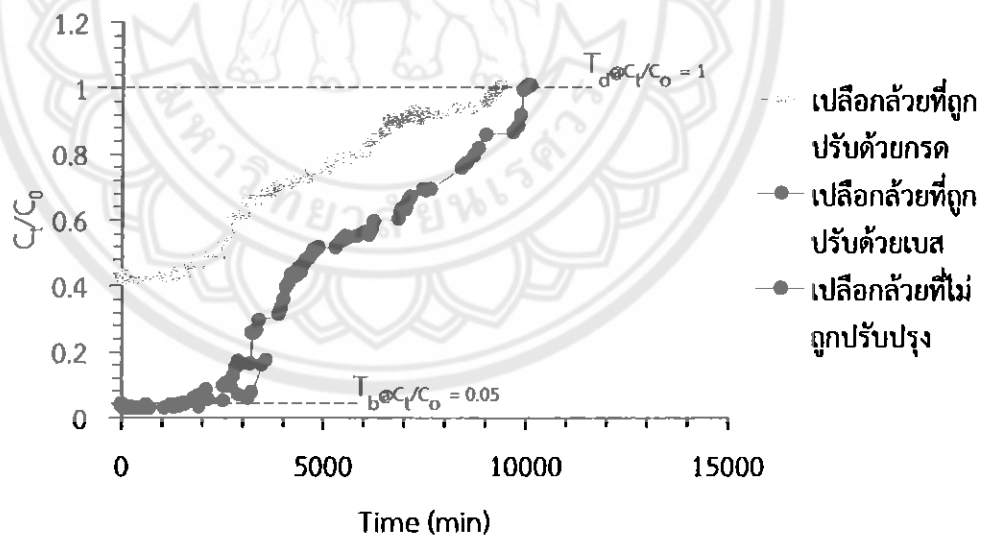
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์  $C_t/C_0$  กับเวลาที่ขนาดของตัวดูดซับ 12 20 และ 40 เมช ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 4.2.5 การปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวดูดซับ

ในการทดลองเรื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวดูดซับจะทำการปรับพื้นผิวของตัวดูดซับ ด้วยสารละลายกรดความเข้มข้น 1 โมลาร์ [34] (acetic acid solution, pH ~ 4) และสารละลาย เบสความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ [34] (sodium hydroxide solution, pH ~ 10) ในขั้นตอนการแช่ สารละลายกรด-เบส ตัวดูดซับที่ถูกแช่ด้วยสารละลายเบสจะเกิดสภาวะอิมตัว สังเกตจากเปลือกกล้วย เกิดการพองตัว อาจเนื่องมาจากกรดอะมิโนที่มีอยู่ในสารชีวมวล ซึ่งประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลทำให้ เปลือกกล้วยมีสภาวะเป็นกรดอ่อน เมื่อนำมาแช่กับสารละลายเบส จึงเกิดการเคลื่อนตัวของพันธะ ซึ่ง อาจแสดงถึงการย่อยสลายพื้นที่ผิวบางส่วนของตัวดูดซับ ดังช่วงของเลขคลื่นที่ 1637.6 ต่อเซนติเมตร ของรูปที่ 4.3 [33] ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวดูดซับควรมีการล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้งจน ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าเท่ากับเปลือกกล้วยผ่านการแช่กรดและเบส เพื่อให้แน่ใจว่าสารละลายกรด เบสไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

การศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของตัวดูดซับเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 จากการทดลองพิจารณาจุดแรกที่  $T_b$  ( $C_t/C_0 = 0.05$ ) เพื่อวิเคราะห์ผลของการ ปรับปรุงพื้นผิวของเปลือกกล้วยพบว่า ณ จุด  $T_b$  พบผลของเวลาที่ความเข้มข้นขาออกของสารละลาย สีย้อมเมทิลีนบลูเพียง 2 จุดเดียว คือ เปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและถูกปรับสภาพโดย

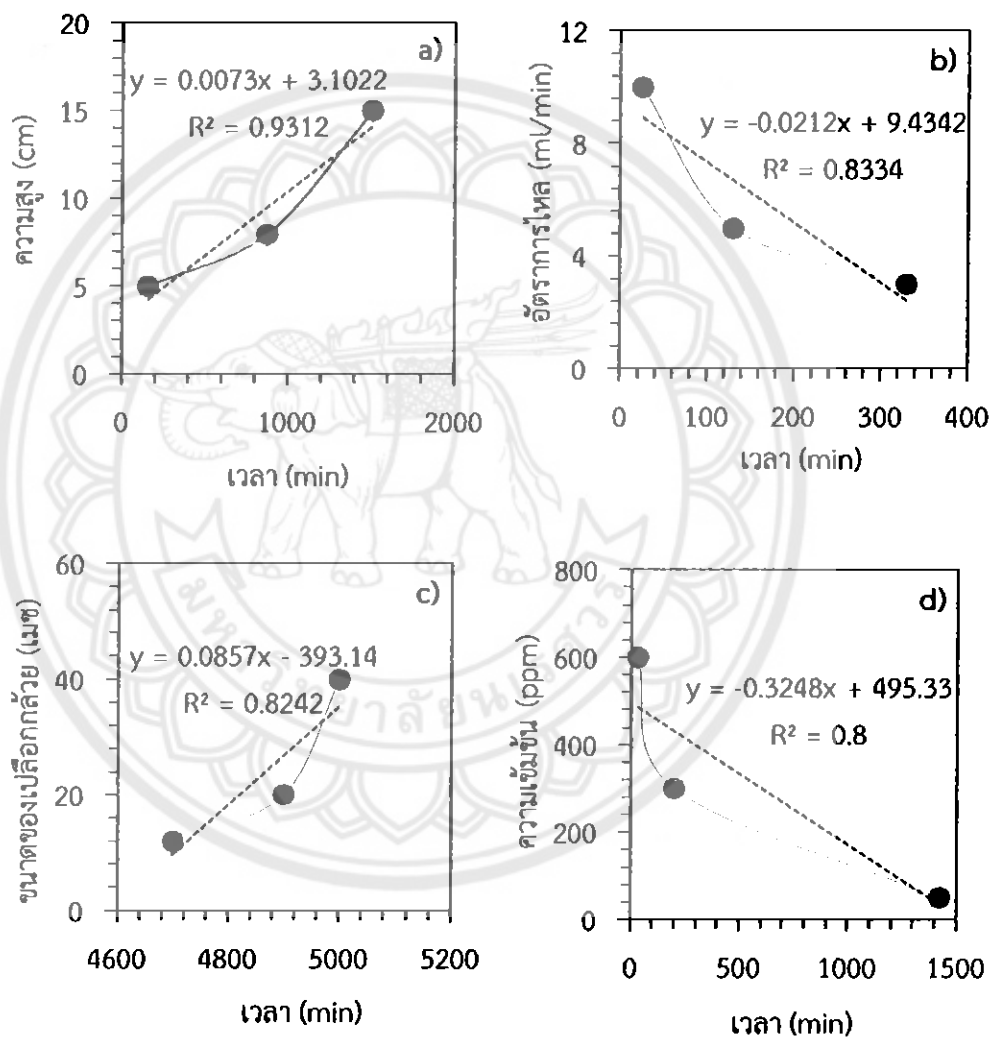
สารละลายเบส โดยเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่จุด  $T_b = 27$  และ 12 ชั่วโมง ปริมาณการดูดซับ ณ จุดดังกล่าวคือ 2.01 และ 2.30 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วย ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเปลือกกล้วยที่ถูกปรับปรุงโดยสารละลายเบสที่มีปริมาณการดูดซับที่สูงกว่าเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับปรุง เนื่องจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายเบสจะแสดง  $\text{OH}^-$  ส่วนสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูจะแสดง จึงเป็นสาเหตุให้เปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายเบส และสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วเกิดขึ้น จึงทำให้ปริมาณการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้น จากนั้นพิจารณาจุด  $T_d (C_t/C_0 = 1)$  ซึ่งเป็นจุดที่ตัวดูดซับจะเข้าสู่สภาวะสมดุล พบผลของเวลาที่ความเข้มข้นขาออกของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเพียง 2 จุด เนื่องจากเปลือกกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเบสเกิดการอุดตัน เป็นผลให้อัตราการไหลลดลง จึงต้องทำการหยุดระบบ ดังนั้นในการพิจารณา ณ จุด  $T_d$  เปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและถูกปรับสภาพโดยสารละลายกรดเกิดจุด  $T_d$  ในชั่วโมงที่ 166 และ 154 มีปริมาณการดูดซับคือ 313.70 และ 79.88 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วย จะเห็นได้ว่าเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับปรุงโดยสารละลายกรดจะมีปริมาณการดูดซับน้อยกว่าเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับปรุง เนื่องจากสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูแสดง  $\text{H}^+$  เช่นเดียวกับพื้นผิวของเปลือกกล้วยที่ผ่านการแช่สารละลายกรด ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณการดูดซับของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายกรดน้อยกว่าเปลือกกล้วยที่ไม่ถูกปรับปรุง



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์  $C_t/C_0$  กับเวลา ของตัวดูดซับชนิดไม่ปรับปรุง ปรับปรุงด้วยสารละลายเบส และสารละลายกรด ที่ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และขนาดของตัวดูดซับ 12 เมช



จากการทำการศึกษาดังปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วยน้ำว่า สามารถสรุปปัจจัยที่มีผลมากที่สุดต่อการดูดซับได้โดยการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่จุด  $T_f = 0.5$  ได้ดังรูปที่ 4.13 จากการพิจารณา พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่มากที่สุดคือ ความสูงของตัวดูดซับในหอ ดูดซับแบบเบตนิ่ง และที่ปัจจัยที่มีผลน้อยที่สุดคือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์เวลากับ a) ความสูงของตัวดูดซับในหอดูดซับ b) อัตราการไหลของสารถูกดูดซับ c) ขนาดของตัวดูดซับ และ d) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับ ณ จุด  $T_f$  ( $C_f/C_0 = 0.5$ )

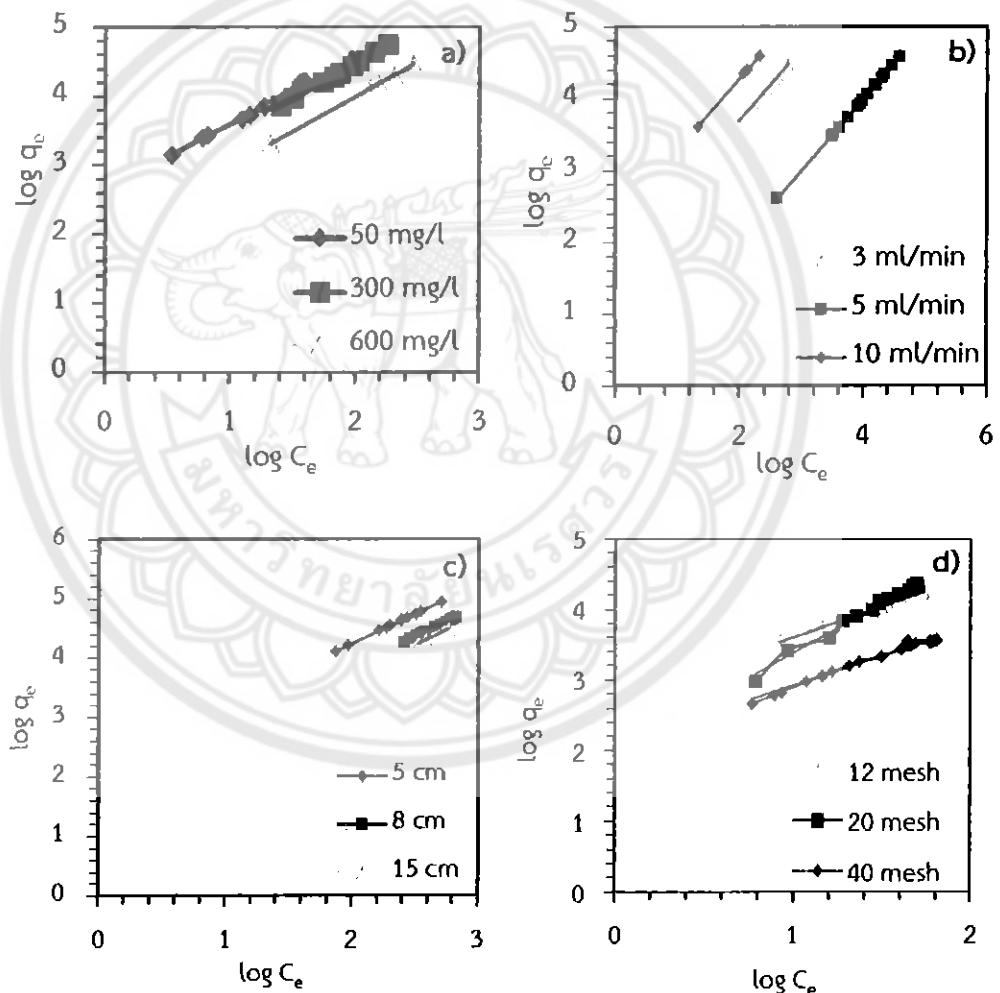
จากผลการทดลองสามารถสรุปปริมาณการดูดซับ ณ จุดที่พิจารณาคือ  $T_b$  ( $C_f/C_0 = 0.05$ )  $T_f$  ( $C_f/C_0 = 0.5$ ) และ  $T_d$  ( $C_f/C_0 = 1$ ) ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่จุดต่างๆ ของแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษา

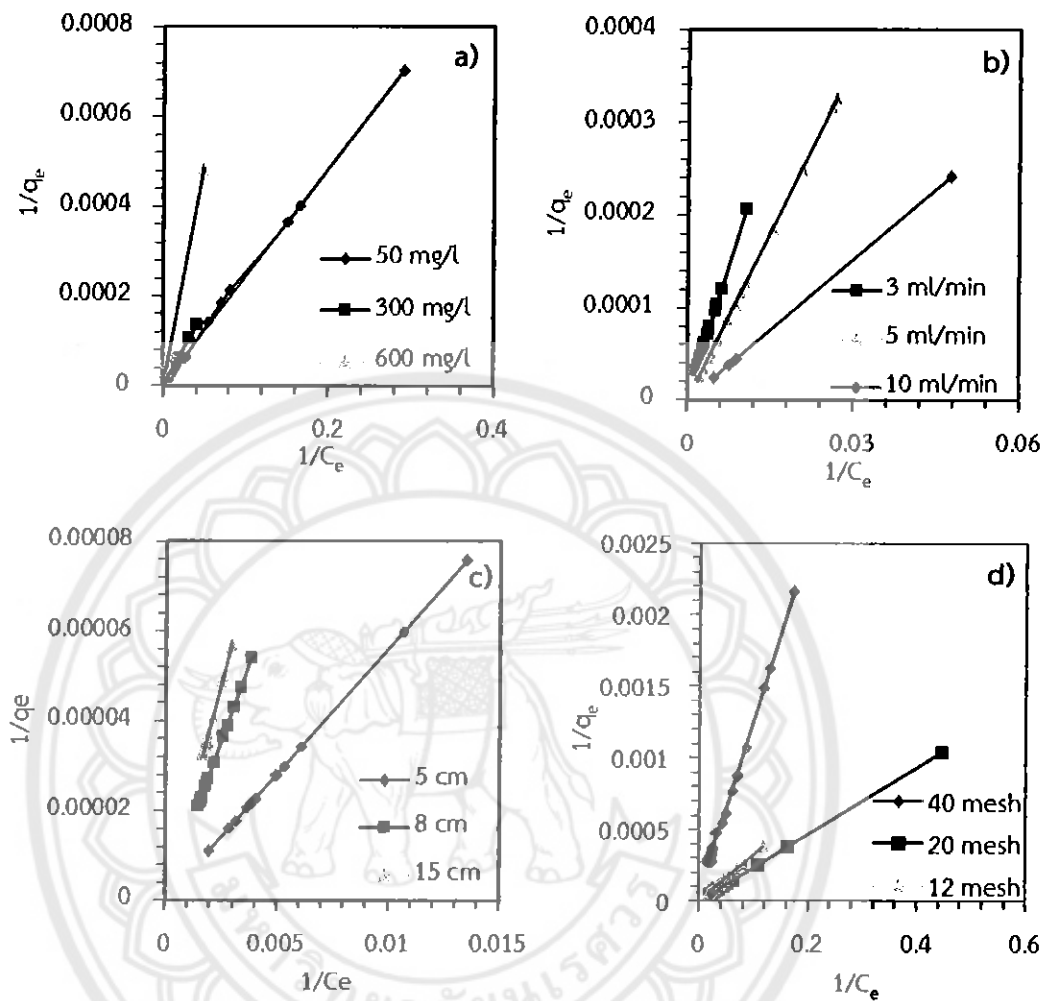
ปริมาณการดูดซับที่ความเข้มข้นขาออก	ความเข้มข้นของ MB (ppm)			ความสูงของตัวดูดซับ (cm)			อัตราการไหลของ MB (ml/min)			ขนาดของตัวดูดซับ (เมช)			ปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวดูดซับ		
	50	300	600	5	8	15	3	5	10	12	20	40	กรด	เบส	ไม่ปรับ
ปริมาณการดูดซับที่ความเข้มข้นขาออก 5% (mg/g)	0.008	-	-	1.24	6.59	21.48	-	-	-	2.01	2.50	2.55	-	2.3	2.01
ปริมาณการดูดซับที่ความเข้มข้นขาออก 50% (mg/g)	-	-	-	158.42	239.68	267.58	42.13	24.38	11.61	89.83	113.72	117.28	-	-	-
ปริมาณการดูดซับที่ความเข้มข้นขาออก 100% (mg/g)	208.76	313.05	917.24	-	-	-	-	235.63	166.22	313.7	311.47	292.45	79.88	-	313.7

### 4.3 ลักษณะการดูดซับของเปลือกกล้วยน้ำว้า

ลักษณะการดูดซับของเปลือกกล้วยน้ำว้าสามารถทำการเปรียบเทียบโดยใช้สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับคือ สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับฟรอนด์ลิช ซึ่งมีลักษณะการดูดซับแบบหลายชั้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันสูง พิสูจน์ความเป็นจริงของสมการโดยการสร้างกราฟ ดังรูปที่ 4.14 และสมการไอโซเทิร์มของการดูดซับแลงมัวร์ ลักษณะการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว บนตัวดูดซับนั้น ตำแหน่งของการดูดซับและโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีค่าแน่นอน โดยในแต่ละตำแหน่งของการดูดซับจะสามารถบรรจุโมเลกุลที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น พิสูจน์ความเป็นจริงของสมการโดยการสร้างกราฟ ดังรูปที่ 4.15 [14]



รูปที่ 4.14 สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับฟรอนด์ลิช a) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลินบลู b) อัตราการไหลของสีย้อมเมทิลินบลู c) ความสูงของตัวดูดซับ และ d) ขนาดของตัวดูดซับ



รูปที่ 4.15 สมการไอโซเทิร์มของการดูดซับแลงมัวร์ a) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู b) อัตราการไหลของสีย้อมเมทิลีนบลู c) ความสูงของตัวดูดซับ และ d) ขนาดของตัวดูดซับ

จากผลการสร้างกราฟเส้นตรงของแต่ละแบบจำลองของการดูดซับของทุกปัจจัยที่ทำการศึกษา พบว่าลักษณะของการดูดซับของเปลือกกล้วยน้ำว้าที่แสดงออกมาเป็นแบบผสม กล่าวคือ เปลือกกล้วยน้ำว้ามีลักษณะการดูดซับแบบชั้นเดียว และหลายชั้น แสดงดังตารางที่ 4.4 [21]

ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบลักษณะการดูดซับของเปลือกกล้วยน้ำว้าด้วยสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช และแลงมัวร์

รูปแบบการทดลอง	สมการฟรุนด์ลิช ( $R^2$ )	สมการแลงมัวร์ ( $R^2$ )
ขนาดของตัวดูดซับ 12 เมช	0.9970	0.9987
ขนาดของตัวดูดซับ 20 เมช	1	0.9332
ขนาดของตัวดูดซับ 40 เมช	0.9631	0.994
ความเข้มข้นของ MB ที่ 50 mg/l	0.9973	0.9987
ความเข้มข้นของ MB ที่ 300 mg/l	0.9993	0.9998
ความเข้มข้นของ MB ที่ 600 mg/l	1	1
ความสูงของตัวดูดซับ 5 cm	1	1
ความสูงของตัวดูดซับ 6 cm	1	1
ความสูงของตัวดูดซับ 8 cm	1	1
ความสูงของตัวดูดซับ 15 cm	1	1
อัตราการไหลของ MB ที่ 3 ml/min	1	1
อัตราการไหลของ MB ที่ 5 ml/min	1	1
อัตราการไหลของ MB ที่ 10 ml/min	1	1
กรด	0.9896	0.9979
เบส	N/A	N/A

\* N/A คือ not applicable (นำมาใช้ไม่ได้)

ผลการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูของเปลือกกล้วยน้ำว้ากับตัวดูดซับชนิดอื่น ได้แก่ ดิน โคลิตซาน [36] ผงใบจากต้นพินักซ์ [9] และเปลือกถั่วลิสง [37] แสดงดังตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าปริมาณการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วยน้ำว้ามีปริมาณการดูดซับที่สูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นที่นำมาพิจารณา โดยมีเงื่อนไขของการศึกษา เช่น ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเริ่มต้น อัตราการไหล และความสูง ที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่างๆ กับเปลือกกล้วยน้ำว้า

ชนิดของตัวดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	อัตราการไหล (mL/min)	ความสูงของตัวดูดซับ (cm)	ปริมาณการดูดซับ (mg/g)	หมายเหตุ
ดิน	50	5	4.5	112.995	M. Auta
โคโคซาน	50	5	4.5	69.980	(2013) [36]
ผงใบจากต้นพีนิคซ์	50	8	10	125±5.48	Runping Han (2008) [9]
เปลือกถั่วลิสง	60	10	8.5	134.2±48.4	Jiyun Song (2010) [37]
เปลือกกล้วย	50	5	5	313.70	งานวิจัยนี้
เปลือกกล้วย	50	10	5	208.76	งานวิจัยนี้

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วยโดยใช้หอดูดซับแบบเบตนิ่งโดยศึกษาในปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ขนาดของเปลือกกล้วย ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม อัตราการไหลของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ความสูงของตัวดูดซับ และการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวดูดซับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วยในหอดูดซับแบบเบตนิ่ง

1. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่สูงที่สุดในช่วง  $T_d = 1$  คือ 917.24 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วย ที่ความสูงของเปลือกกล้วยในหอดูดซับแบบเบตนิ่ง 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 10 มิลลิตรต่อนาที และตัวดูดซับขนาด 12 เมช

2. ผลของอัตราการไหล พบว่าที่อัตราการไหล 3 มิลลิตรต่อนาที มีปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่สูงที่สุดในช่วง  $T_f = 0.5$  คือ 42.13 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วยที่ความสูงของเปลือกกล้วยในหอดูดซับแบบเบตนิ่ง 5 เซนติเมตร ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวดูดซับขนาด 12 เมช

3. ผลของความสูงของตัวดูดซับ พบว่าที่ความสูง 15 เซนติเมตร มีปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่สูงที่สุดในช่วง  $T_h = 0.05$  คือ 21.48 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วยที่อัตราการไหล 3 มิลลิตรต่อนาที ตัวดูดซับขนาด 12 เมช และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อเวลาผ่านไปที่ความสูงของตัวดูดซับ 15 เซนติเมตร เกิดความดันตกคร่อมจึงเป็นผลให้ต้องมีการหยุดระบบการดูดซับ

4. ผลของขนาดของตัวดูดซับ พบว่าเปลือกกล้วยน้ำว้าที่ขนาด 40 เมช มีปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่สูงที่สุดในช่วง  $T_s = 0.5$  คือ 117.28 มิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของเปลือกกล้วยที่ความสูงของเปลือกกล้วยในหอดูดซับแบบเบตนิ่ง 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 5 มิลลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

5. การปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวดูดซับ พบว่าผลจากการแช่สารละลายเบสที่ทำการศึกษาคือจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ

### 5.1.2 แบบจำลองการดูดซับ

จากผลการทดลอง พบว่าลักษณะของการดูดซับของเปลือกกล้วยน้ำว้าที่แสดงออกมาเป็นแบบผสม กล่าวคือเปลือกกล้วยน้ำว้ามีลักษณะการดูดซับแบบชั้นเดียว และหลายชั้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเปลือกกล้วยน้ำว้ามีประเภทการดูดซับแบบการภาพ

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการทำการทดลองจะเห็นว่า เมื่อตัวดูดซับที่บรรจุในหลอดดูดซับมีปริมาณมาก จะเกิดความดันตกคร่อม อันเนื่องมาจากมีแรงต้านทานในระบบสูง ดังนั้นการเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดดูดซับ และการเพิ่มอัตราการไหลก็เป็นส่วนช่วยในการลดความดันที่เกิดขึ้นในระบบได้ กล่าวคือ การคำนวณสภาวะที่เหมาะสม เป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับกระบวนการและการดำเนินงาน
2. ในส่วนของการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวดูดซับจะต้องทำการล้างจนสารละลายกรด และเบสออกจนหมดมีค่า  $\text{pH} \sim 7$





## เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร.ภิญโญ พานิชพันธ์ และคณะ. (2010). **นิเวศวิทยาและสิ่งแวดล้อม**. e-book online. กรุงเทพฯ: นายพิทักษ์พงษ์ คมพุดชา.
- [2] นางสาวจิตรา หันตาเร็วและคณะ. (2013). **โครงการวิจัยเรื่องการศึกษาการดูดซับสีข้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกกล้วยโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะและเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง**. ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. วศ.บ., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- [3] W.L. McCabe et., al. (1985). **Unit Operations of Chemical Engineering**. (4<sup>th</sup> ed). New York: McGraw-Hill, Inc.
- [4] เดชา ฉัตรศิริเวช. (2009). **กระบวนการดูดซับ**. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- [5] โกวิทย์ ปิยะมังกลา และคณะ. (2008). **จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเรซิน**. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 18(1), 16-25.
- [6] นครินทร์ แพรชชาย. (2007). **การกำจัดสีข้อมผ้าจากน้ำล้างสีข้อมผ้าโดยการใช้กลบที่ปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. วศ.บ., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- [7] L. Michaelis et., al. (1940). **Semiquinone Radicals of the Thiazines**. *Journal of the American Chemical Society*. 62(1), 204-211.
- [8] J. Cenens and R. A. Schoonheydt. (1988). **Visible spectroscopy of methylene blue on hectorite, laponite b, and barasym in aqueous suspension**. *Clay and clay minerals*. 36(3), 214-224.
- [9] Runping Hun et., al. (2008). **Adsorption of methylene blue by phoenix tree leaf powder in a fixed-bed column: experiments and prediction of breakthrough curves**. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2009(245), 284-297.
- [10] Minjia Menga, Yonghai Feng and member. (2009). **Highly efficient adsorption of salicylic acid from aqueous solution by wollastonite-based imprinted adsorbent: A fixed-bed column study**. *Chemical Engineering Journal*. 2013(225), 331-339.
- [11] K. Vijayaraghavan et., al. (2009). **Treatment of complex Remazol dye effluent using sawdust- and coal-based activated carbons**. *Journal of Hazardous Materials*. 2013(167), 790-796.

### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] D.K. Mahmoud et., al. (2012). Batch adsorption of basic dye using acid treated kenaffibre char. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies, *Chemical Engineering Journal*. 181- 182, 449-457.
- [13] Christie J. Geankoplis. 2010. *Transport processes and unit Operations*. (3<sup>rd</sup> ed). New Jersey: A Simon&Schuster company.
- [14] อัจฉราพร ศรีอ่อน. (2010). การเตรียมเซรามิกอะลูมินาพูนเพื่อใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. วท.บ., มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- [15] รองศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ. (2004). ความสามารถในการดูดซับ. (พิมพ์ครั้งที่ 1). วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม: มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.
- [16] มลลิกา ถาบุตร. (2010). การพัฒนาตัวดูดซับโลหะหนักและสีย้อมผ้าแทนถ่านกัมมันต์เชิงการค้า. *วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร*. 18(2), 17-27
- [17] นายจิรัฐติกุล และคณะ. (2013). หลักการของเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM). การดูดซับสารอินทรีย์ปนเปื้อนดินลมหอบสีเหลืองและสีแดง. รายงานโครงการหมายเลข CE2013-28, 31-38.
- [18] พรวิภา วัฒนกุล. (1998). เครื่องมือ Fourier Transform Infrared (FTIR). การวิเคราะห์พลอยโดยใช้เครื่องมือขั้นสูง, 5-9.
- [19] มั่น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. (1992). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: บริษัท ชวนพิมพ์ 50 จำกัด
- [20] ศร.ดร.ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย. (2011). กระบวนการดูดซับ. นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยสุรนารี
- [21] ดร.วีรชัย พุทธวงศ์. (2007). การใช้สเปกโทรเมตรีในการพิสูจน์สารประกอบอินทรีย์. นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
- [22] M. A. Hossain et., al. (2007). Biosorption of Cu(II) From Water by Banana Peel Based Biosorbent: Experiments and Models of Adsorption and Desorption. *Journal of water sustainability*. 2012(2), 87-104.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

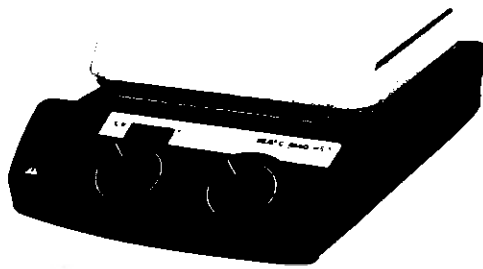
- [23] Jamil R. Memon et., al. (2008). Banana Peel: A Green and Economical Sorbent for Cr(III) Removal. *Pakistan journal of analytical & environmental chemistry*. 9(1), 20 – 25
- [24] นางสาวภัทรนันท์ เจตณสุนทรเวทิน. (2014). การศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนของตะกั่วและสังกะสีด้วยผงเปลือกกล้วยและเปลือกส้ม. *โครงการงานวิทยาศาสตร์ ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ*. เชียงใหม่: โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย
- [25] Chalida Sangnin and Anawat Sungpet. (2010). Breakthrough curves of caffeine and polyphenols through columns packed with  $H^+$  and  $Ca_2^+$  form ion-exchange resins. *Kasarsart University conference*. Bangkok: Department of chemical engineering, faculty of engineering, King Mongkut's University of technology Thonburi.
- [26] วณิดา ชูอักษร. (2012). เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. 2012(17). 181-191.
- [27] Bulut and Baysal. (2006). Removal of Pb(II) from wastewater using wheat bran. Department of Chemistry. *Journal of Environmental Management*. 78(2), 107-13.
- [28] S.Y. Quek and B. Al-Duri. (2007). Application of film-pore diffusion model for the adsorption of metal ions on coir in a fixed-bed column, *Chemical Engineering and Process*. (vol. 46), 477-485.
- [29] P. Han et., al. (2007). Biosorption of methylene blue from aqueous solution by rice-husk in a fixed-bed column. *Journal of hazardous materials*. (vol. 141), 713-718.
- [30] I.A.W. Tan et., al. (2008). Adsorption of basic dye using activated carbon prepared from oil palm shell: batch and fixed bed studies. *Desalination*. (vol. 225), 13-28.
- [31] Helder Pereira de Carvalho et., al. (2015). Improvement of Methylene Blue removal by electrocoagulation/banana peel adsorption coupling in a batch system. *Alexandria engineering journal*. 2015(1), 1-10
- [32] M. Achaka et., al. (2009). Low cost biosorbent "banana peel" for the removal of phenolic compounds from olive mill wastewater: Kinetic and equilibrium studies. *Journal of hazardous materials*. 166, 117-125

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

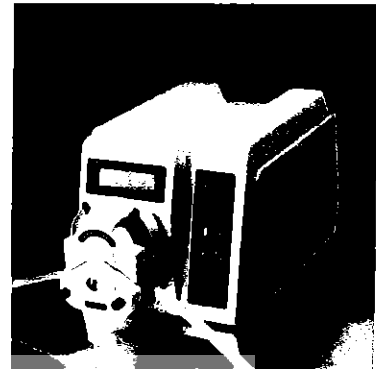
- [33] ปรียา ยืนยงสวัสดิ์ และสุดใจ คงทอง. (1994). การศึกษาคุณสมบัติของสารโพลีแซกคาไรด์ จากเปลือกกล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า และกล้วยหอม. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขต หาดใหญ่.
- [34] นางสาวจุฬณีย์ แสงระวี. (2003). ศึกษาความเป็นไปได้ของซังข้าวโพดในการดูดซับ สารประกอบกลุ่มฟีนอลิกในน้ำทิ้ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. วท.บ., มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา
- [35] R. Di Felicea and L.G. Gibilarob. (2003). Shorter communication wall effects for the pressure drop in fixed beds. *Chemical engineering science*. 2004(59), 3037 – 3040
- [36] M. Auta and B.H. Hameed. (2013). Chitosan–clay composite as highly effective and low-cost adsorbent for batch and fixed-bed adsorption of methylene blue. *Chemical Engineering Journal*. 2014(237). 352–361.
- [37] Jiyun Song et., al. (2010). Adsorption characteristics of methylene blue by peanut husk in batch and column modes. *Desalination*. 2011(265). 119–125.



ภาคผนวก ก  
อุปกรณ์ในการทดลอง



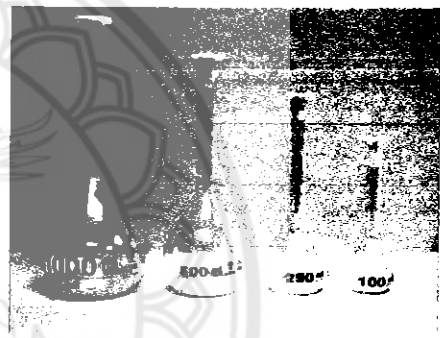
เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน



ปั๊มสุบจ่ายสาร



แม่เหล็กกวนสาร



ขวดวัดปริมาตร



บีกเกอร์



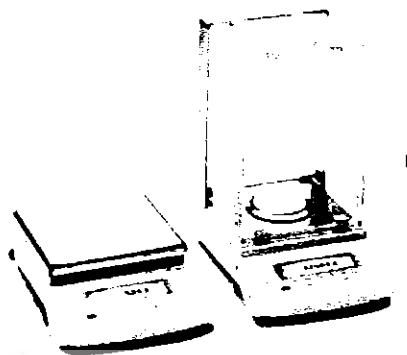
หลอดซั้บแบบเบตนั้ง

รูปที่ ก.1 อุปกรณ์การทดลอง



ภาคผนวก ข  
เครื่องมือและวิธีการทดลอง

มหาวิทยาลัยพระนคร



เครื่องชั่งดิจิทัล 4 ตำแหน่ง



UV-VIS spectrophotometer



Scanning electron microscope



Fourier transform infrared spectroscopy

รูปที่ ข.1. รูปเครื่องมือที่ใช้ในวิเคราะห์การทดลอง





เปลือกกล้วยหลังจากตากแดด

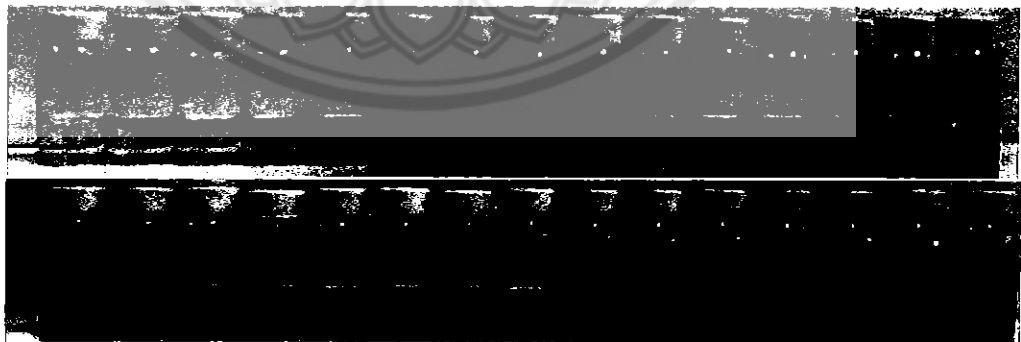


อบเปลือกกล้วยที่ 100 องศาเซลเซียส



สารละลายซีซีเอ็มที่ลิ้นบลู

การบรรจุเปลือกกล้วยในหลอดซ้ำแบบเบดนิ่ง



ตัวอย่างสารละลายซีซีเอ็มที่วิเคราะห์ ณ เวลาต่างๆ

รูปที่ ข.2 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง



ภาคผนวก ค : พิจารณาที่ขนาดของเปลือกกล้วย 12 mesh อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที และ  
ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร

ตาราง ค.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอีเอ็มเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_o$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_o$
1	0:1	0.12939	0.04817	360	6:0	1.09819	0.17699
5	0:5	0.31994	0.07301	430	7:10	1.14977	0.18381
10	0:10	0.36696	0.07914	480	8:0	1.17290	0.18687
20	0:20	0.41337	0.08519	540	9:0	0.70826	0.12542
25	0:25	0.42700	0.08696	600	10:0	0.91835	0.13695
30	0:30	0.53847	0.10149	660	11:0	0.97976	0.14422
40	0:40	0.58303	0.10730	720	12:0	1.01255	0.14809
50	0:50	0.60301	0.10991	780	13:0	1.13392	0.16244
60	1:0	0.64668	0.11560	840	14:0	1.40066	0.19397
70	1:10	0.67112	0.11879	900	15:0	1.42180	0.19647
80	1:20	0.67198	0.11890	960	16:0	1.50021	0.20007
90	1:30	0.70172	0.12277	1080	18:0	1.60089	0.21164
100	1:40	0.70364	0.12302	1140	19:0	1.80919	0.23559
110	1:50	0.73361	0.12693	1200	20:0	1.93832	0.25043
120	2:0	0.76206	0.13064	1320	22:0	2.10005	0.26902
140	2:20	0.77073	0.13177	1380	23:0	2.17789	0.27797
160	2:40	0.81495	0.13754	1440	23:1	5.05468	0.62571
180	3:0	0.81914	0.13808	1500	25:0	5.40850	0.66752
200	3:20	0.82361	0.13866	1560	26:0	5.81590	0.71567
220	3:40	0.84446	0.14138	1620	27:0	6.06408	0.74500
240	4:0	0.84557	0.14358	1680	28:0	6.12500	0.75220
260	4:20	0.84792	0.14389	1740	29:0	6.34693	0.84409
280	4:40	0.91433	0.15268	1800	30:0	6.43425	0.85528
300	5:0	1.01668	0.16621	1860	31:0	6.49763	0.86340
330	5:30	1.01940	0.16657	1920	32:0	6.53423	0.86809

ตาราง ค.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_o$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_o$
1980	33:0	6.59975	0.87649	2160	36:0	7.57015	1.00084
2040	34:0	6.97543	0.92463	2220	37:0	7.65588	1.01183
2100	35:0	7.30670	0.96708	2280	38:0	7.81435	1.03214



ตาราง ค.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายย้อมเมทิลีนบลู 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_o$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_o$
1	0:1	5.12545	0.10369	460	7:40	36.87440	0.68096
5	0:5	10.82070	0.21376	470	7:50	37.34195	0.68954
10	0:10	10.97970	0.21683	480	8:0	38.29215	0.70697
15	0:15	11.91505	0.23491	490	8:10	39.12885	0.72232
20	0:20	12.38255	0.24395	500	8:20	39.53810	0.72983
30	0:30	12.84165	0.25282	510	8:30	39.85930	0.73573
35	0:35	13.11690	0.25814	520	8:40	40.08015	0.73978
50	0:40	13.24325	0.26058	530	8:50	40.39605	0.74558
50	0:50	14.12925	0.27770	540	9:0	40.44645	0.74650
60	1:0	14.94705	0.29351	550	9:10	40.58260	0.74900
70	1:10	15.12460	0.29694	560	9:20	40.65510	0.75033
80	1:20	15.19865	0.29837	570	9:30	40.76210	0.75229
90	1:30	16.47180	0.32298	580	9:40	41.03865	0.75737
100	1:40	17.23115	0.33765	590	9:50	41.38290	0.76368
110	1:50	19.09105	0.37359	600	10:0	41.47155	0.76531
120	2:0	20.74190	0.40550	660	11:0	42.77005	0.78913
190	3:10	24.73700	0.48271	720	12:0	42.98320	0.79304
240	4:10	27.54660	0.53701	840	14:0	44.98325	0.82974
280	4:40	29.75360	0.57966	900	15:0	47.47505	0.87867
340	5:40	31.38855	0.61126	960	16:0	48.67370	0.90075
360	6:10	33.62600	0.65450	1020	17:0	49.07960	0.90822
400	6:40	34.02815	0.66227	1080	18:0	49.82485	0.92195
430	7:10	35.55855	0.69185	1140	19:0	52.82100	0.97712
460	7:40	36.87440	0.68096	1200	20:0	56.27350	1.04070

ตาราง ค.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายซียมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$
1	0:1	11.00350	0.10930	55	0:55	66.38960	0.64769
3	0:3	20.71010	0.20365	60	1:5	68.07950	0.66412
5	0:5	26.46720	0.25961	70	1:10	69.08600	0.67390
7	0:7	30.51340	0.29895	80	1:20	71.03690	0.69286
9	0:9	34.46420	0.33735	90	1:30	76.56420	0.74659
11	0:11	36.01910	0.35247	100	1:40	76.91980	0.75005
13	0:13	38.73410	0.37886	120	2:10	80.15040	0.78145
15	0:15	42.71560	0.41756	150	2:40	83.27480	0.81182
20	0:20	44.43090	0.43423	210	3:30	94.10160	0.91707
25	0:25	50.62140	0.49441	240	4:0	99.04010	0.96507
30	0:30	52.72290	0.51484	300	5:0	102.61200	0.99980
35	0:35	55.18700	0.53879	360	6:0	106.11300	1.03383

ภาคผนวก ค : พิจารณาเปลือกกล้วย 12 mesh ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายซียมเมทิลีนบลู  
600 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร

ตาราง ค.4 อัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_o$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs จริง	$C_t/C_o$
3	0:3	0.36362	0.00533	100	1:40	23.39780	0.20869
6	0:6	0.78989	0.00909	120	2:0	26.72830	0.23809
9	0:9	1.00579	0.01100	240	4:0	43.54290	0.38654
12	0:12	2.95489	0.02821	300	5:0	53.39630	0.47353
15	0:15	3.81940	0.03584	360	6:0	59.15450	0.52437
25	0:25	5.26392	0.04859	420	7:0	66.84770	0.59229
30	0:30	7.03001	0.06418	480	8:0	70.04070	0.62048
40	0:40	10.10310	0.09132	540	9:0	70.92430	0.62828
50	0:50	10.52550	0.09504	600	10:0	78.73160	0.69720
60	1:0	11.23570	0.10131	660	11:0	81.05940	0.71776

ตาราง ค.5 อัตราการไหล 5 มิลลิิตรต่อนาที

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$
1	0:1	5.91662	0.05442	240	4:0	73.04840	0.64783
5	0:5	9.15663	0.08306	300	5:0	80.83110	0.71663
10	0:10	10.84300	0.09797	330	5:30	81.05250	0.71858
15	0:15	13.19030	0.11872	360	6:0	81.40160	0.72167
20	0:20	14.87230	0.13359	390	6:30	84.57210	0.74969
25	0:25	17.40130	0.15594	420	7:0	89.08670	0.78960
30	0:30	21.14290	0.18901	450	7:30	90.56540	0.80267
40	0:40	24.07610	0.21494	480	8:0	92.99000	0.82410
50	0:50	29.81630	0.26568	540	9:0	95.13050	0.84302
60	1:0	34.53720	0.30741	600	10:0	96.69940	0.85689
70	1:10	43.51880	0.38680	660	11:0	101.69200	0.90102
80	1:20	48.78710	0.43337	720	12:0	104.58800	0.92662
90	1:30	50.03900	0.44444	780	13:0	106.35000	0.94220
120	2:0	54.26900	0.48183	840	14:0	106.54500	0.94392
180	3:0	68.30520	0.60590	900	15:0	112.04400	0.99253



ตาราง ค.6 อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$
1	0:1	11.00350	0.10930	55	0:55	66.38960	0.64769
3	0:3	20.71010	0.20365	60	1:5	68.07950	0.66412
5	0:5	26.46720	0.25961	70	1:10	69.08600	0.67390
7	0:7	30.51340	0.29895	80	1:20	71.03690	0.69286
9	0:9	34.46420	0.33735	90	1:30	76.56420	0.74659
11	0:11	36.01910	0.35247	100	1:40	76.91980	0.75005
13	0:13	38.73410	0.37886	120	2:10	80.15040	0.78145
15	0:15	42.71560	0.41756	180	2:40	83.27480	0.81182
20	0:20	44.43090	0.43423	210	3:30	94.10160	0.91707
25	0:25	50.62140	0.49441	240	4:0	99.04010	0.96507
30	0:30	52.72290	0.51484	300	5:0	102.61200	0.99980
35	0:35	55.18700	0.53879	360	6:0	106.11300	1.03383
45	0:45	60.28500	0.58835				

ภาคผนวก ค : พิจารณานาขนาดของตัวดูดซับ 12 mesh อัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที  
และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายซีลียมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตาราง ค.7 ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$
3	0:3	0.02955	0.00238	120	2:0	53.39630	0.47353
6	0:6	0.03819	0.00246	240	4:0	59.15450	0.52437
9	0:9	0.05264	0.00258	300	5:0	66.84770	0.59229
12	0:12	7.03001	0.06418	360	6:0	70.04070	0.62048
15	0:15	10.10310	0.09132	420	7:0	70.92430	0.62828
25	0:25	10.52550	0.09504	480	8:0	78.73160	0.69720
30	0:30	11.23570	0.10131	540	9:0	78.98940	0.69948
40	0:40	15.55870	0.13948	600	10:0	81.05940	0.71776
50	0:50	23.39780	0.20869	660	11:0	85.14740	0.75385
60	1:0	26.72830	0.23809	720	12:0	97.05370	0.85896
80	1:20	36.36230	0.32315	780	13:0	100.57900	0.88875
100	1:40	43.54290	0.38654				

ตาราง ค.8 ความสูงของตัวดูดซับ 8 เซนติเมตร

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_o$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_o$
4	0:4	0.27353	0.00449	150	2:30	0.87801	0.00977
8	0:8	0.14384	0.00336	180	3:0	5.03873	0.04614
12	0:12	0.15711	0.00347	240	4:0	5.61549	0.05118
16	0:16	0.15796	0.00348	300	5:0	9.24676	0.08293
20	0:20	0.15906	0.00349	360	6:0	10.31920	0.09230
24	0:24	0.14344	0.00335	480	8:0	9.76029	0.08742
28	0:28	0.13055	0.00324	600	10:0	19.67320	0.17407
32	0:32	0.13291	0.00326	660	11:0	26.05610	0.22986
36	0:36	0.14105	0.00333	720	12:0	36.20580	0.31858
40	0:40	0.16180	0.00351	780	13:0	48.78080	0.42850
44	0:44	0.13693	0.00330	840	14:0	52.86610	0.46421
48	0:48	0.15479	0.00345	900	15:0	58.79770	0.51606
52	0:52	0.17202	0.00360	960	16:0	63.89930	0.56065
56	0:56	0.14977	0.00341	1080	18:0	69.98510	0.61385
60	1:0	0.21704	0.00400	1140	19:0	69.48220	0.60945
90	1:30	0.21279	0.00396	1200	20:0	66.88070	0.58671
120	2:0	0.66224	0.00789				

ตาราง ค.9 ความสูงของตัวดูดซับ 15 เซนติเมตร

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_o$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_o$
1	0:1	0.00000	0.00240	360	6:0	0.06749	0.00307
5	0:5	0.00000	0.00240	420	7:0	0.07308	0.00313
10	0:10	0.00000	0.00240	480	8:0	0.10360	0.00343
15	0:15	0.00000	0.00240	540	9:0	0.25914	0.00499
20	0:20	0.00000	0.00240	600	10:0	0.66889	0.00908
25	0:25	0.00000	0.00240	660	11:0	0.97480	0.01213
30	0:30	0.00000	0.00240	720	12:0	1.00000	0.01238
35	0:35	0.00000	0.00240	780	13:0	1.13000	0.01368
40	0:40	0.00000	0.00240	840	14:0	1.10000	0.01338
45	0:45	0.00000	0.00240	900	15:0	5.67000	0.05902
50	0:50	0.00000	0.00240	1020	17:0	7.55103	0.07781
55	0:55	0.00000	0.00240	1080	18:0	8.02355	0.08253
60	1:0	0.00000	0.00240	1140	19:0	8.95423	0.09182
90	1:30	0.00000	0.00240	1200	20:0	12.16900	0.12393
120	2:0	0.00000	0.00240	1260	21:0	19.70600	0.19920
150	2:30	0.00000	0.00240	1380	23:0	32.73130	0.32929
180	3:0	0.00000	0.00240	1440	24:0	34.40460	0.34600
240	4:0	0.05109	0.00291	1500	25:0	42.50020	0.42685
300	5:0	0.05960	0.00299	1560	26:0	42.20610	0.42391

ภาคผนวก ค : ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร  
อัตราการไหล 5 มิลลิิตรต่อนาที ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร  
เปลือกกล้วยขนาด 12 mesh

ตาราง ค.10 ขนาดของตัวดูดซับ 12 mesh

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$
1	0:1	0.09331	0.03502	2580	43:0	0.79337	0.10261
10	0:10	0.11781	0.03759	2640	44:0	0.74211	0.09752
20	0:20	0.14103	0.04003	2700	45:0	0.72174	0.09550
30	0:30	0.11903	0.03772	2760	46:0	1.02096	0.12521
60	1:0	0.09622	0.03532	2820	47:0	1.28365	0.15129
120	2:0	0.05425	0.03091	2880	48:0	1.49445	0.17222
180	3:0	0.04713	0.03017	2940	49:0	1.40755	0.16360
240	4:0	0.06351	0.03189	3180	53:0	1.41352	0.16419
300	5:0	0.04937	0.03040	3240	54:0	2.35208	0.25738
600	10:0	0.13263	0.03914	3300	55:0	2.37602	0.25976
660	11:0	0.08977	0.03464	3360	56:0	2.44200	0.26631
1200	20:0	0.10916	0.03668	3420	57:0	2.73895	0.29579
1260	21:0	0.14574	0.04052	3900	65:0	2.91937	0.31371
1320	22:0	0.06000	0.03152	3960	66:0	3.13163	0.33478
1380	23:0	0.10389	0.03613	4020	67:0	3.38123	0.35956
1440	24:0	0.12000	0.03782	4080	68:0	3.75322	0.39650
1500	25:0	0.16500	0.04254	4140	69:0	3.87620	0.40871
1560	26:0	0.15270	0.04125	4200	70:0	4.13722	0.43463
1800	30:0	0.31065	0.05784	4260	71:0	4.13523	0.43443
1860	31:0	0.31570	0.05837	4320	72:0	4.10787	0.43171
1920	32:0	0.38730	0.06589	4380	73:0	4.32167	0.45294
2040	34:0	0.30352	0.05709	4500	75:0	4.42500	0.46320
2100	35:0	0.56780	0.08485	4560	76:0	4.59167	0.47975
2520	42:0	0.72968	0.09629	4620	77:0	4.63833	0.48438

ตาราง ค.10 ขนาดของตัวดูดซับ 12 mesh (ต่อ)

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$
4680	78:0	4.70167	0.49067	7020	117:0	6.20593	0.63330
4740	79:0	4.88167	0.50854	7080	118:0	6.49365	0.66157
4800	80:0	4.88668	0.50904	7140	119:0	6.57118	0.66919
4860	81:0	5.02635	0.51741	7440	124:0	6.80000	0.69349
5280	88:0	5.00532	0.51535	7500	125:0	6.77000	0.69053
5400	90:0	5.21632	0.53608	7620	127:0	6.81333	0.69480
5460	91:0	5.24143	0.53854	8400	140:0	7.46667	0.75916
5520	92:0	5.35032	0.54924	8520	142:0	7.59000	0.77130
5580	93:0	5.34543	0.54876	8700	145:0	7.82833	0.79478
5820	97:0	5.35107	0.54932	8820	147:0	8.07167	0.81875
6000	100:0	5.48883	0.56285	9000	150:0	8.47018	0.85801
6060	101:0	5.45162	0.55919	9660	161:0	8.53940	0.86482
6120	102:0	5.39783	0.55391	9780	163:0	8.73862	0.88445
6180	103:0	5.54202	0.56808	9840	164:0	9.68507	0.91763
6240	104:0	5.81333	0.59473	9900	165:0	10.52123	0.99494
6840	114:0	5.89757	0.60301	9960	166:0	10.60017	1.00224
6900	115:0	6.16575	0.62936	10020	167:0	10.65067	1.00691
6960	116:0	6.24930	0.63756	10080	168:0	10.67067	1.00876

ตาราง ค.11 ขนาดของตัวดูดซับ 20 mesh

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$
1	0:1	0.00156	0.02774	4500	75:0	3.56078	0.40378
30	0:30	0.00107	0.02768	4560	76:0	3.96348	0.44656
60	1:0	0.00091	0.02766	4680	78:0	4.05333	0.45610
120	2:0	0.00415	0.02804	4800	80:0	4.14883	0.46625
360	6:0	0.00502	0.02814	4920	82:0	4.42017	0.49507
420	7:0	0.00536	0.02817	5040	84:0	4.42683	0.49578
720	12:0	0.01081	0.02880	5160	86:0	4.55817	0.50973
780	13:0	0.01046	0.02876	5280	88:0	4.89568	0.54559
1080	18:0	0.05011	0.03331	5400	90:0	5.30503	0.58908
1140	19:0	0.05689	0.03409	5520	92:0	5.79672	0.64131
1440	24:0	0.04680	0.03293	5640	94:0	5.84167	0.64608
1500	25:0	0.13190	0.04270	5760	96:0	5.93300	0.65579
1800	30:0	0.13429	0.04297	5880	98:0	6.08187	0.67160
1860	31:0	0.27465	0.05908	6000	100:0	6.22583	0.68690
2160	36:0	0.34002	0.06659	6120	102:0	6.46087	0.71186
2220	37:0	0.45066	0.07929	6240	104:0	6.73793	0.74130
2520	42:0	0.46346	0.08076	6360	106:0	7.30317	0.80134
2580	43:0	0.57445	0.08653	6480	108:0	7.60327	0.83322
2880	48:0	0.58535	0.08769	6600	110:0	7.80667	0.85483
2940	49:0	0.69649	0.09950	6720	112:0	7.89850	0.86459
3240	54:0	1.58162	0.19353	6840	114:0	8.12333	0.88847
3300	55:0	1.79902	0.21662	6960	116:0	8.40733	0.91864
3960	66:0	2.54054	0.29540	7080	118:0	8.57763	0.93673
4020	67:0	2.80578	0.32357	7200	120:0	8.78973	0.95927
4140	69:0	2.96387	0.34037	7320	122:0	8.91282	0.97234
4260	71:0	3.24288	0.37001	7440	124:0	9.05035	0.98695
4320	72:0	3.46394	0.39349	7560	126:0	9.45350	1.02978

ตาราง ค.12 ขนาดของตัวดูดซับ 40 mesh

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_o$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_o$
1	0:1	0.04586	0.03668	1500	25:0	-0.00600	0.02267
6	0:6	0.01375	0.03256	1560	26:0	-0.01020	0.02227
12	0:12	0.01152	0.03228	1620	27:0	-0.00950	0.02233
18	0:18	0.00887	0.03194	1680	28:0	-0.00960	0.02232
24	0:24	0.00846	0.03189	1740	29:0	-0.00730	0.02255
27	0:27	0.01162	0.03229	1980	33:0	-0.00600	0.02267
30	0:30	0.00780	0.03180	2040	34:0	0.03150	0.02630
40	0:40	0.00768	0.03178	2100	35:0	0.06559	0.02961
50	0:50	0.00310	0.03120	2160	36:0	0.06160	0.02922
60	1:0	0.00340	0.03124	2640	44:0	0.09170	0.02974
90	1:30	0.00210	0.03107	2760	46:0	0.17720	0.03741
120	2:0	0.00270	0.03115	2880	48:0	0.29480	0.04795
150	2:30	0.00390	0.03130	2940	49:0	0.35120	0.05301
180	3:0	0.00280	0.03116	3000	50:0	0.39720	0.05713
210	3:30	0.00320	0.03121	3060	51:0	0.32203	0.05039
240	4:0	0.00230	0.03110	3120	52:0	0.37028	0.05472
300	5:0	0.00090	0.03092	3180	53:0	0.64437	0.07929
480	8:0	0.00340	0.03124	3420	57:0	0.62918	0.07792
720	12:0	0.00610	0.03158	3480	58:0	0.66371	0.08102
780	13:0	0.00610	0.02237	3540	59:0	0.78105	0.09154
840	14:0	0.00990	0.02271	3600	60:0	0.86651	0.09920
960	16:0	0.00160	0.02196	3840	64:0	0.92056	0.12246
1080	18:0	-0.00730	0.02115	3960	66:0	1.01310	0.13222
1140	19:0	-0.00990	0.02091	4020	67:0	1.36308	0.16915
1200	20:0	-0.01090	0.02082	4200	70:0	1.76805	0.21188
1260	21:0	-0.00990	0.02091	4320	72:0	2.26655	0.26447
1380	23:0	-0.01200	0.02072	4440	74:0	2.43100	0.28182
1440	24:0	-0.01140	0.02078	4500	75:0	2.42888	0.28160



ตาราง ค.12 ขนาดของตัวดูดซับ 40 mesh (ต่อ)

เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$	เวลา (min)	เวลา (hr.)	Abs	$C_t/C_0$
4560	76:0	3.91550	0.43845	5520	92:0	5.41320	0.69779
4800	80:0	3.89382	0.43616	5700	95:0	5.84833	0.75149
4860	81:0	3.92192	0.43913	5880	98:0	6.40727	0.82048
4980	83:0	3.94190	0.44124	6000	100:0	6.53442	0.83618
5040	84:0	3.89385	0.51025	6120	102:0	6.86333	0.87678
5340	89:0	4.34860	0.56638	6240	104:0	7.77333	0.98910
5400	90:0	5.06187	0.65442	6300	105:0	7.84500	0.99794
5460	91:0	5.37970	0.69365	6420	107:0	8.08333	1.02736





ภาคผนวก ง

การคำนวณ

มหาวิทยาลัยพระนคร

### 1. การสร้างกราฟมาตรฐาน (calibration curve)

กราฟมาตรฐานเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูและค่าการดูดกลืนแสงของสีที่ทำการศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูและค่าการดูดกลืนคลีนแสงจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง การเตรียมกราฟมาตรฐานมีขั้นตอนดังนี้

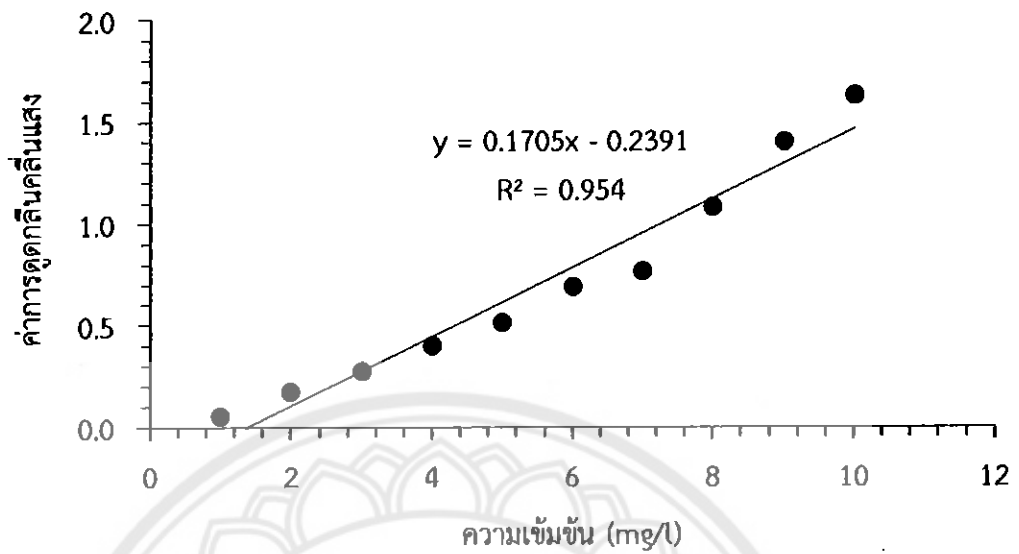
1.1 ทำโดยการเตรียมสารละลายมาตรฐาน (blank) และสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 1 2 3 4 5 6 7 8 9 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

1.2 นำสารละลาย ที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนคลีนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง

1.3 นำค่าที่ได้จากการวัดมาเขียนกราฟและสร้างสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู โดยค่าการดูดกลืนแสงจะแสดงในตารางที่ ง.1 และรูปที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 ค่าการดูดกลืนคลีนแสงของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

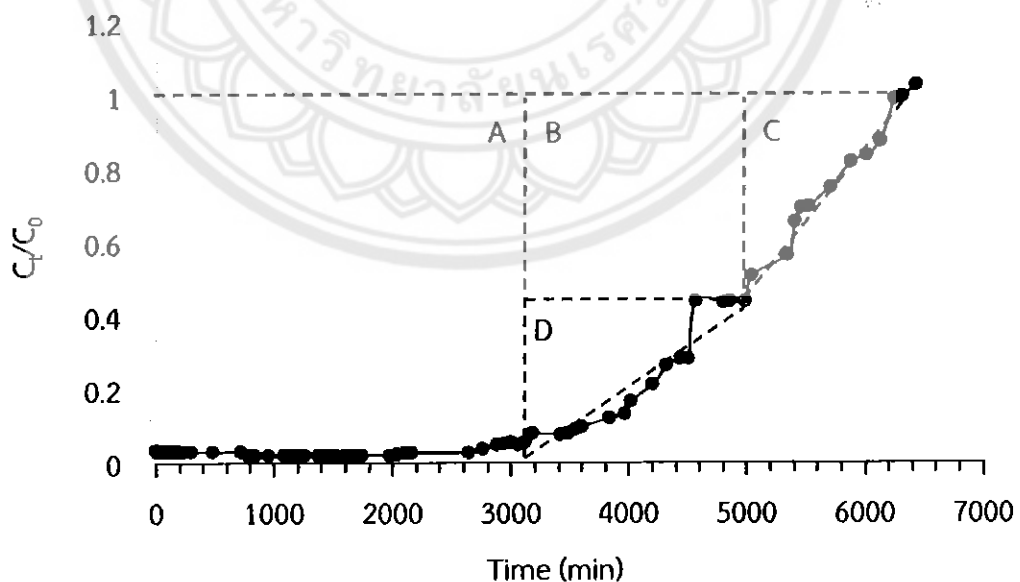
ตัวอย่างที่	ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนคลีนแสง
1	1	0.054
2	2	0.171
3	3	0.274
4	4	0.402
5	5	0.512
6	6	0.688
7	7	0.769
8	8	1.083
9	9	1.404
10	10	1.629



รูปที่ ง.1 กราฟมาตรฐาน

## 2. การคำนวณปริมาณการดูดซับ (adsorption capacity)

การคำนวณปริมาณการดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูของเปลือกกล้วยน้ำว้า สามารถคำนวณได้โดยหาพื้นที่เหนือเส้นกราฟดัง รูปที่ ง.2



รูปที่ ง.2 แสดงตัวอย่างการคำนวณปริมาณการดูดซับของการทดลอง ขนาดของตัวดูดซับ 40 mesh ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 5 มิลลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร  
ตัวอย่างการคำนวณ

จากสมการที่ 9 สามารถคำนวณปริมาณการดูดซับได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณการดูดซับ} &= \frac{\text{พื้นที่เหนือเส้นกราฟ} \times \text{อัตรากราฟไหล} \times \text{ความเข้มข้นของสารละลาย}}{\text{น้ำหนักของเปลือกกล้วย}} & (9) \\
 &= \frac{(A + B + C + D) \times \text{อัตรากราฟไหล} \times \text{ความเข้มข้นของสารละลาย}}{\text{น้ำหนักของเปลือกกล้วย}} \\
 &= \frac{(2905.80 + 981.08 + 456.71 + 335.62) \times 5 \times 50}{4} \\
 &= 292.45 \text{ mg/g}
 \end{aligned}$$

### 3. ไอโซเทิร์มของการดูดซับ

การคำนวณไอโซเทิร์มของการดูดซับเพื่อทดสอบลักษณะการดูดซับโดยสมการของฟรอนด์ลิช และแลงมัวร์ มีตัวแปรในการคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned}
 C_e &= \text{ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ ณ เวลาต่างๆ} \\
 X/M &= \text{ปริมาณการดูดซับในทุกๆ 60 นาที} \\
 &= \frac{(t_f/t_{f_1}) \times (1 - (C_e/C_0)) \times \text{อัตรากราฟไหล} \times \text{ความเข้มข้นของสารละลาย}}{\text{น้ำหนักของเปลือกกล้วย}} & (10)
 \end{aligned}$$

โดย :  $t_f$  = เวลา ณ การพิจารณา (นาที)  
 $t_{f_1}$  = เวลาก่อนการพิจารณา (นาที)  
 $C_e/C_0$  = ความเข้มข้นสุดท้ายต่อความเข้มข้นเริ่มต้น

ตัวอย่างการคำนวณ X/M

$$\begin{aligned}
 X/M &= \frac{(60/0) \times (1 - 0.03124) \times 5 \times 50}{4} \\
 &= 3632.864
 \end{aligned}$$

โดยจากการคำนวณสามารถนำมาสร้างกราฟ ซึ่งผลเป็นไปตามตารางที่ ง.2

ตารางที่ ๓.2 การคำนวณไอโซเทิร์มการดูดซับ

เวลา (min)	X/M	C <sub>e</sub>	พารามิเตอร์		แลงมัวร์	
			logq <sub>e</sub>	logC <sub>e</sub>	1/q <sub>e</sub>	1/C <sub>e</sub>
1	3632.864	44.267	3.560	1.646	0.00028	0.023
120	3633.200	44.271	3.560	1.646	0.00028	0.023
180	3633.152	44.270	3.560	1.646	0.00028	0.023
240	3633.393	44.273	3.560	1.646	0.00028	0.023
300	3634.066	44.281	3.560	1.646	0.00028	0.023
480	3632.864	44.267	3.560	1.646	0.00028	0.023
720	3631.565	44.251	3.560	1.646	0.00028	0.023
780	3666.121	63.076	3.564	1.800	0.00027	0.016
840	3664.826	63.053	3.564	1.800	0.00027	0.016
960	3667.654	63.102	3.564	1.800	0.00027	0.016
1080	3670.686	63.154	3.565	1.800	0.00027	0.016
1140	3671.572	63.169	3.565	1.801	0.00027	0.016
1200	3671.913	63.175	3.565	1.801	0.00027	0.016

ตารางที่ ง.2 การคำนวณไอโซเทอรั่มการดูดซับ (ต่อ)

เวลา (min)	X/M	C <sub>e</sub>	พรุนต์ลิตซ์		แลงมัวร์	
			logq <sub>e</sub>	logC <sub>e</sub>	1/q <sub>e</sub>	1/C <sub>e</sub>
1260	3671.572	63.169	3.565	1.801	0.00027	0.016
1380	3672.287	63.182	3.565	1.801	0.00027	0.016
1440	3672.083	63.178	3.565	1.801	0.00027	0.016
1500	3664.977	59.150	3.564	1.772	0.00027	0.017
1560	3666.502	59.175	3.564	1.772	0.00027	0.017
1620	3666.248	59.171	3.564	1.772	0.00027	0.017
1680	3666.284	59.171	3.564	1.772	0.00027	0.017
1740	3665.449	59.158	3.564	1.772	0.00027	0.017
1980	3664.977	59.150	3.564	1.772	0.00027	0.017
2040	3651.357	58.930	3.562	1.770	0.00027	0.017
2100	3638.977	58.730	3.561	1.769	0.00027	0.017
2160	3640.425	58.754	3.561	1.769	0.00027	0.017
2640	3638.462	63.445	3.561	1.802	0.00027	0.016
2760	3609.721	62.943	3.557	1.799	0.00028	0.016

ตารางที่ ง.2 การคำนวณไอโซเทิร์มการดูดซับ (ต่อ)

เวลา (min)	X/M	C <sub>e</sub>	พารามิตริช		แลงมัวร์	
			logq <sub>e</sub>	logC <sub>e</sub>	1/q <sub>e</sub>	1/C <sub>e</sub>
2880	3570.189	62.254	3.553	1.794	0.00028	0.016
2940	3551.229	61.923	3.550	1.792	0.00028	0.016
3000	3535.766	61.654	3.548	1.790	0.00028	0.016
3060	3561.035	62.094	3.552	1.793	0.00028	0.016
3120	3544.815	61.812	3.550	1.791	0.00028	0.016
3180	3452.678	60.205	3.538	1.780	0.00029	0.017
3420	3457.785	60.294	3.539	1.780	0.00029	0.017
3480	3446.175	60.092	3.537	1.779	0.00029	0.017
3540	3406.730	59.404	3.532	1.774	0.00029	0.017
3600	3378.005	58.903	3.529	1.770	0.00030	0.017
3840	3290.778	48.753	3.517	1.688	0.00030	0.021
3960	3254.164	48.210	3.512	1.683	0.00031	0.021
4020	3115.690	46.159	3.494	1.664	0.00032	0.022
4200	2955.461	43.785	3.471	1.641	0.00034	0.023

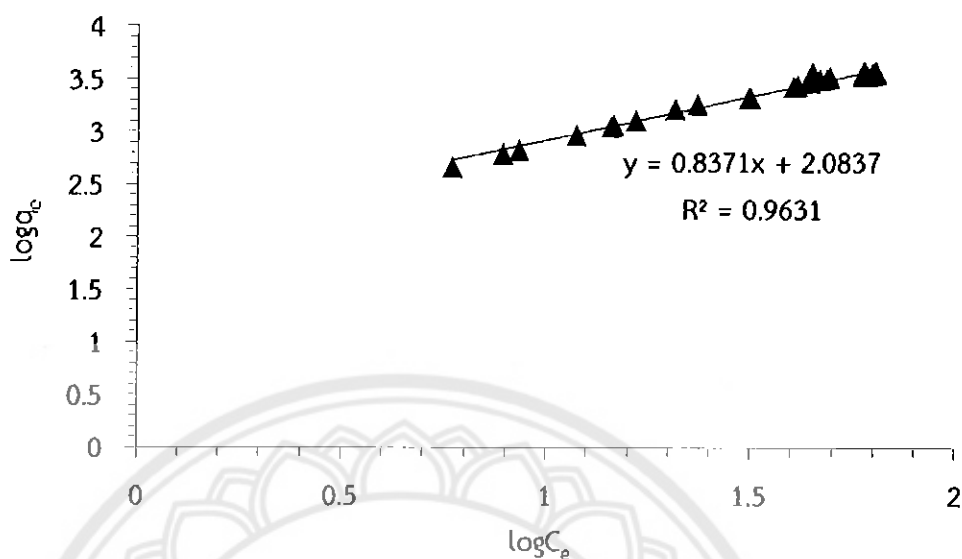


ตารางที่ ง.2 การคำนวณไอโซเทอริมการดูดซับ (ต่อ)

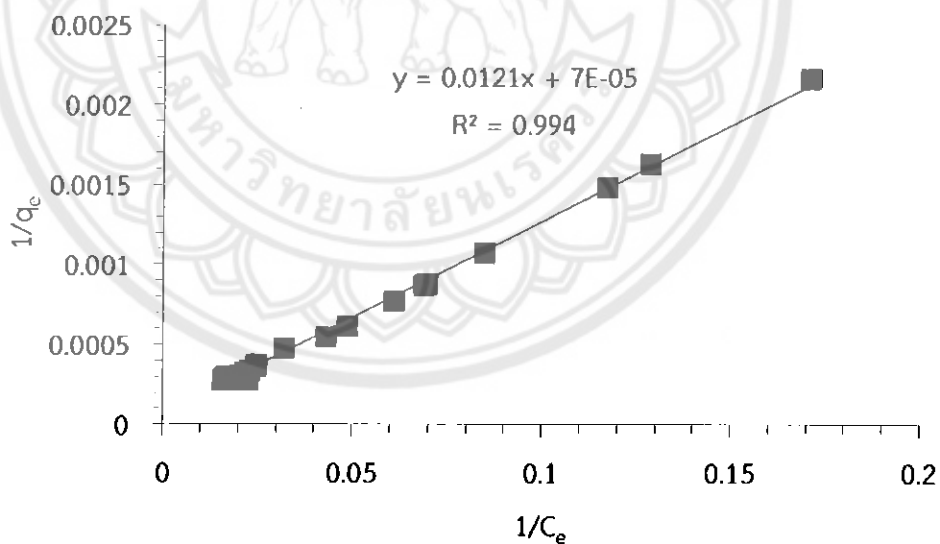
เวลา (min)	X/M	C <sub>e</sub>	พหุนามลิซ		เลขมัวร์	
			logq <sub>e</sub>	logC <sub>e</sub>	1/q <sub>e</sub>	1/C <sub>e</sub>
4320	2758.226	40.863	3.441	1.611	0.00036	0.024
4440	2693.160	39.899	3.430	1.601	0.00037	0.025
4500	2693.997	39.912	3.430	1.601	0.00037	0.025
4560	2105.807	31.198	3.323	1.494	0.00047	0.032
4800	2114.386	31.325	3.325	1.496	0.00047	0.032
4860	2103.268	31.160	3.323	1.494	0.00048	0.032
4980	2095.361	31.043	3.321	1.492	0.00048	0.032
5040	1836.552	23.258	3.264	1.367	0.00054	0.043
5340	1626.065	20.592	3.211	1.314	0.00061	0.049
5400	1295.921	16.411	3.113	1.215	0.00077	0.061
5460	1148.808	14.548	3.060	1.163	0.00087	0.069
5520	1133.302	14.352	3.054	1.157	0.00088	0.070
5700	931.896	11.801	2.969	1.072	0.00107	0.085
5880	673.187	8.525	2.828	0.931	0.00149	0.117

ตารางที่ ๑.2 การคำนวณไอโซเทอริกการดูดซับ (ต่อ)

เวลา (min)	X/M	C <sub>e</sub>	พรูปดลิลช		แลงมัวร์	
			logq <sub>e</sub>	logC <sub>e</sub>	1/q <sub>e</sub>	1/C <sub>e</sub>
6000	614.334	7.780	2.788	0.891	0.00163	0.129
6120	462.091	5.852	2.665	0.767	0.00216	0.171



รูปที่ ๓.3 แสดงผลของสมการไอโซเทิร์มฟรอนต์ลิซของขนาดของตัวดูดซับ 40 mesh ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ ๓.4 แสดงผลของสมการไอโซเทิร์มแลงมัวร์ของขนาดของตัวดูดซับ 40 mesh ความสูงของตัวดูดซับ 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 3. ความดันตกคร่อม

ในการไหลของสารละลายเมทิลีนบลูจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) จึงต้องใช้สมการของ เบรก-โคเชนี ในการคำนวณหาความดันตกคร่อมในระบบ ดังสมการที่ 9 หรือ 10

$$\ln\left(\frac{\Delta P d_p}{H \rho v_o^2}\right) = -\ln\left(\frac{\rho d_p d_p}{\mu}\right) + \ln\left(\frac{150(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\right) \quad (11)$$

หรือ

$$\frac{P_o - P_L}{L} = 150 \left(\frac{\mu v_o}{D_p^2}\right) \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (12)$$

กำหนดให้

- ขนาด 12 mesh จะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D_p$ ) = 0.00168 เมตร
  - ค่าความหนืดของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู กำหนดให้มีค่าความหนืดเท่ากับน้ำ ( $\mu$ ) = 0.001 กิโลกรัมต่อเมตร × วินาที
  - ความสูงของตัวดูดซับในหอดูดซับแบบเบตนิ่ง ( $L$ ) = 0.05 เมตร
  - รัศมีของคอลัมน์ ( $r$ ) = 0.0075 เมตร
  - น้ำหนักของตัวดูดซับ ( $W$ ) = 0.004 กิโลกรัม
  - อัตราการไหลของสีย้อมเมทิลีนบลู ( $Q$ ) =  $8.3333 \times 10^{-8}$  ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
  - ความเร็วเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ( $v_o$ ) = 0.00047 เมตรต่อวินาที
  - ความหนาแน่นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ( $\rho$ ) = 950 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
  - ความหนาแน่นของชั้นตัวดูดซับ  $\rho_b = 457.17$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
  - ค่าความพรุนของชั้นบรรจุตัวดูดซับ  $\varepsilon_b = 0.4$  [35]
- สมการหาค่าสัดส่วนของช่องว่างของชั้นตัวดูดซับ สามารถหาได้โดยสมการที่ 13 หรือ 14

$$\varepsilon = 1 - \frac{W}{\rho_p AL} \quad (13)$$

เมื่อ

$$\rho_p = \frac{\rho_b}{(1-\varepsilon_b)} \quad (14)$$

แทนค่า

$$\varepsilon = 1 - \frac{0.004(1-0.4)}{457.17 \times \pi \times (0.0075)^2 \times 0.05}$$

$$\varepsilon = 0.4$$

$$\text{แทนค่า} \quad \Delta P = -(0.05 \times 150 \times \left( \frac{0.001 \times 0.00047}{(0.00168)^2} \right) \frac{(1-0.4)^2}{0.4^3})$$

$$\Delta P = -7.05 \text{ Pa}$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในระบบนี้จะมีความดันตกคร่อมเกิดขึ้น จากค่าความดันตกคร่อมในระบบมีค่าติดลบจะแสดงถึง ค่าความดันเริ่มต้นมีค่ามากกว่าค่าความดันสุดท้ายของหลอดขับแบบเบคนิง

