



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (แกลบ) สำหรับการกำจัด  
สีย้อมผ้าในอุตสาหกรรมครัวเรือน

ประชาติ วัชรบัณฑิต

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก  
มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี  
ปีงบประมาณ 2561

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่สนับสนุนและให้ทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน พ.ศ. 2561

ขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี (ค.บ.) มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรีที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

ประชาติ วัชรบัณฑิต

ผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## บทคัดย่อภาษาไทย

น้ำเสียจากการย้อมผ้าส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีความสนใจที่จะต้องใช้วัสดุเหลือทิ้งราคาถูกมากำจัดสีย้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการดูดซับสีย้อมผ้าในอุตสาหกรรมครัวเรือนด้วยแกลบในระบบกะ (batch) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ เวลาที่เข้าสู่สมดุล ความเข้มข้นสารละลายและอุณหภูมิ รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับได้แก่ หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR พื้นที่ผิว และพื้นผิวด้วย SEM สมดุลการดูดซับวิเคราะห์โดยใช้สมการแลงเมียร์ ฟรุนดลิช และดูบินิน-ราตซ์เควิช ผลการทดลองพบว่าข้อมูลการทดลองสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 14.9 15.6 และ 16.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40°C ตามลำดับ ส่วนจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองทุกอุณหภูมิ และจลนพลศาสตร์การดูดซับพบว่าการทดลองสามารถเกิดขึ้นได้เองและเป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน

คำสำคัญ: การดูดซับ, สีย้อม, แกลบ

## Abstract

As the direct discharge of dyeing wastewater into the environment has harmful effects, there is a growing interest in using low-cost and waste materials to adsorb dyes. The main objective of this study was to investigate the adsorption of a commercial synthetic dye in household-scale dyeing onto rice husk using batch process. The effects of adsorption such as contact time, initial dye concentration and temperature were evaluated. The rice husk was characterized by Fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR), BET surface area and scanning electron microscopy (SEM). The equilibrium adsorption data were analyzed by Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich isotherm models. It was found that the Langmuir isotherm provided a good model and the maximum monolayer adsorption capacity values were 14.9, 15.6 and 16.9 mg/g at 20, 30 and 40°C, respectively. The kinetic experimental data were fitted well by pseudo-second order model at all temperatures. The thermodynamic investigation indicated that the adsorption of dye was spontaneous and endothermic.

**Key words :** adsorption isotherm, dyestuff, rice husk

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก.
บทคัดย่อภาษาไทย	ข.
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค.
สารบัญ	ง.
สารบัญตาราง	ช.
สารบัญรูป	ซ.
บทที่ 1	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	2
1.5 นิยามศัพท์	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม	4
2.2 แกลบ	5
2.3 ประโยชน์ของแกลบ	6
2.4 การดูดซับ	6
2.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	7
2.5 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ	7
2.6 การกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการดูดซับ	8
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	11
3.1 การเตรียมสารละลายสีย้อม	11
3.2 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ	11
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง	13
4.1 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ	13
4.2 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิต่าง ๆ	15
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิต่าง ๆ	16
4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	16
4.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม	20
4.6 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ	24

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	26
5.1 สรุปผลการวิจัย	26
5.2 ข้อเสนอแนะ	26
เอกสารอ้างอิง	27
ภาคผนวก	28
ภาคผนวก ก.	28

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 องค์ประกอบพื้นฐานของแกลบ	5
1.2 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของแกลบ	5
4.1 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	17
4.2 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	18
4.3 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	19
4.4 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบที่อุณหภูมิต่าง ๆ	20
4.5 จลนพลศาสตร์และการแพร่ภายในอนุภาคการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบ	24
4.6 พารามิเตอร์อุณหพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกลบ	25
ก.1 ผลของเวลาในการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกลบ	29
ก.2 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมผ้าในการดูดซับด้วยแกลบ	29

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.1 พื้นผิวของเกลบที่กำลังขยาย 2000X	14
4.2 หมู่ฟังก์ชันของเกลบก่อนและหลังดูดซับสีย้อม	14
4.3 ผลของเวลาในการดูดซับสีย้อมด้วยเกลบ	15
4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม	16
4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ด้วยเกลบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	17
4.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิชด้วยเกลบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	17
4.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ด้วยเกลบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	18
4.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิชด้วยเกลบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	18
4.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ด้วยเกลบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	19
4.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิชด้วยเกลบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	19
4.11 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมแบบ pseudo first และ second order ด้วยเกลบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	21
4.12 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมแบบ pseudo first และ second order ด้วยเกลบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	22
4.13 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมแบบ pseudo first และ second order ด้วยเกลบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	23
4.14 อุณหพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมด้วยเกลบ	25



## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

จังหวัดลพบุรี เป็นพื้นที่ที่ประชาชนส่วนมากประกอบอาชีพเกษตรกรรม โดยเฉพาะชาวบ้านที่วัดบ้านทราย ตำบลบ้านทราย อำเภอบ้านหมี่ จังหวัดลพบุรี เมื่อเสร็จสิ้นฤดูการทำนาแล้ว ชาวบ้านจะทำการหารายได้เสริม ได้แก่การทอผ้า โดยเฉพาะผ้าทอบ้านหมี่และในปัจจุบันได้พัฒนาผ้าทอเป็นสินค้าที่มีชื่อเสียงโดยเฉพาะสินค้าโอท็อป ทำให้มีผู้สนใจสินค้ามาก ทำให้มีการย้อมผ้าเป็นจำนวนมาก และสีย้อมที่ใช้ย้อมผ้านั้นมีทั้งที่เป็นสีธรรมชาติและสีสังเคราะห์ ซึ่งหลังจากทำการย้อมแล้วก็นำย้อมลงบนพื้นดินหรือลงในบ่อน้ำโดยไม่ได้มีการกำจัดที่ถูกต้องทำให้น้ำสีย้อมไหลซึมลงในแหล่งน้ำธรรมชาติและน้ำบาดาลทำให้น้ำที่ใช้ปนเปื้อนและส่งผลกระทบต่อสุขภาพของคนในชุมชน (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544) ที่สำคัญยังมีโครงสร้างที่เป็นสารเชิงซ้อนอะโรมาติก มีความคงตัวสูงยากต่อการย่อยสลายและยังสามารถบังทางเดินแสง ส่งผลให้การสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชลดลง (Aksu, 2005) สูดสายชล และคณะ (2011) อ้างถึง Levine (1991) กล่าวว่าน้ำทิ้งจากการย้อมผ้านั้นจะมีความเข้มข้นของสีอยู่ระหว่าง 10–20 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้สีของน้ำเสียค่อนข้างเข้มและมีความเป็นพิษค่อนข้างสูง จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมต่อทั้งมนุษย์และระบบนิเวศน์ และที่สำคัญรัฐบาลได้มีการรณรงค์ให้มีการใช้ทรัพยากรน้ำให้ประหยัดและเกิดประสิทธิภาพอย่างสูงสุด ทำให้ต้องมีการกำจัดมลพิษของสีย้อมก่อนที่จะปล่อยลงสู่น้ำลำคลองในชุมชน

จากเหตุผลข้างต้นผู้วิจัยมีความต้องการที่จะพัฒนาตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งแต่ละปีมีวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรจำนวนมาก ได้แก่ แกลบ เพื่อให้ชุมชนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อมผ้าในอุตสาหกรรมครัวเรือน โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการกำจัด ได้แก่ เวลาที่สัมผัส ความเข้มข้นของสารละลาย และอุณหภูมิ ซึ่งนอกจากจะเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาสร้างมูลค่าเพิ่มและใช้ประโยชน์แล้ว และที่สำคัญเพื่อให้ได้ข้อมูลในการออกแบบถังบำบัดน้ำเสียสำหรับระบบปฏิบัติการจริงในการกำจัดสีย้อมของชุมชนต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวัสดุดูดซับและสร้างมูลค่าเพิ่มวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมด้วยแกลบ ในปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ เวลาที่สัมผัส ความเข้มข้นของสารละลาย และอุณหภูมิ

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ตัวดูดซับที่ใช้ได้แก่ แกลบ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากโรงสีในอำเภอบ้านหมี่ จังหวัดลพบุรี
2. น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำสังเคราะห์และน้ำที่เหลือจากการย้อมผ้าจริงจากชุมชนวัดบ้านทราย ตำบลบ้านทราย อำเภอบ้านหมี่ จังหวัดลพบุรี

3. ศึกษาไอโซเทอร์ม จลนพลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์การกำจัดสีย้อมผ้าในอุตสาหกรรมคร้วเรือนด้วยแกลบ เพื่อหาประสิทธิภาพและออกแบบถังบำบัด

4. ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของแกลบ ได้แก่

4.1 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานด้วย Scanning Electron Microscope equipped with Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) เพื่อศึกษาถึงพื้นผิวและการกระจายตัวของรูพรุน

4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วย Scanning Electron Microscope equipped Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) เพื่อศึกษาถึงปริมาณซิลิกาและอลูมินา

4.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) เพื่อศึกษาถึงหมู่ฟังก์ชัน

4.4 พื้นที่ผิว (surface area) และรูพรุน (pore volume) ด้วย  $N_2$  adsorption

#### 1.4 กรอบแนวความคิดของการวิจัย



#### 1.5 นิยามศัพท์

การดูดซับ คือ การถ่ายโอนองค์ประกอบจากของเหลว (liquid phase) ไปอยู่บนผิวของของแข็ง (solid phase) โมเลกุลที่จับอยู่กับผิวของแข็งเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ขณะที่ของแข็งที่จับตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent)

ไอโซเทอร์ม คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ ( $q_e$ ) ต่อ 1 หน่วยมวลของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล ( $C_e$ ) และที่อุณหภูมิคงที่

จลนพลศาสตร์การดูดซับ คือ จลนพลศาสตร์การดูดซับ คือ การศึกษากลไกการดูดซับจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาหรือเรียกว่า อัตราเร็วของการดูดซับ (rate of reaction) ณ เวลาต่าง ๆ ก่อนการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## บทที่ 2

### เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544) ลักษณะน้ำเสียของการฟอกย้อม จะมีปริมาณสารอินทรีย์สูงซึ่งเกิดจากแป้ง สีย้อม กรดแอสติก เส้นใยและเส้นด้าย ซึ่งทำให้มีค่าบีโอดีประมาณ 100–1000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีประมาณ 500–1200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง มีของแข็งแขวนลอย มีอุณหภูมิสูงเนื่องจากการย้อมจะใช้อุณหภูมิในการย้อมสูงประมาณ 50 องศาเซลเซียส มีความเข้มข้นของสีสูง มีโลหะเจือปนเนื่องจากโลหะจะเจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า มีปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมดสูง ซึ่งลักษณะน้ำเสียในการฟอกย้อมประเภทต่างๆ มีความแตกต่างกัน

ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมต่อสิ่งแวดล้อม (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544)

1. สารอินทรีย์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen ; DO) ลดลง ซึ่งจะทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน แหล่งน้ำไม่สามารถฟอกตัวเอง (self purification) ได้ทัน เกิดกลิ่น และไม่สามารถใช้แหล่งน้ำให้เป็นประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้ และที่สำคัญสารอินทรีย์บางตัวเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เกิดการสะสมอยู่ในระบบนิเวศนั้นหากสารนั้นเป็นสาร ที่สลายตัวได้ยากเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์กรณีได้รับสารโดยตรง
2. อุณหภูมิ น้ำเสียอุณหภูมิสูงจะส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ปริมาณออกซิเจนละลายสูงสุดลดลง เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์
3. ของแข็งแขวนลอย ทำให้เพิ่มปริมาณอินทรีย์ในแหล่งน้ำ สามารถตกตะกอนทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินได้ รวมทั้งทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ
4. ของแข็งละลายน้ำ ซึ่งบางชนิดมีโลหะหนักเจือปนอยู่ทำให้เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำหรือจุลชีพได้
5. สี ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำและปริมาณแสงที่จะผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืช ไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ จะทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในแหล่งน้ำลดลง
6. โลหะหนัก ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดโรคที่ร้ายแรงได้ รวมทั้งโลหะหนักเป็นสารที่สะสมอยู่ในระบบนิเวศ และเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์

สีย้อมที่นำมาใช้ในการย้อมมีอยู่มากมายหลายชนิด การที่จะนำสีย้อมใด ๆ มาใช้ในการย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยสามารถทำให้เกิดสถานะเช่นนี้ขึ้นได้ เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติด (substativity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (bond) ยึดกันแน่น อาจกล่าว ได้กว้างๆว่าแรงกระทำหรือพันธะที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยได้ คือพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) แรงไอออน (ionic forces) พันธะโควาเลนต์ (covalent bond) แรงเหล่านี้มักจะไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็

อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด คือ พันธะโควาเลนต์ (นครินทร์, 2549)

## 2.2 แกลบ (Rice husk)

แกลบ เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีมากในประเทศไทย คือ ประมาณ 23 % ของข้าวที่ผลิต (Prasara-A, 2006). ดังนั้นในแต่ละปีจึงมีปริมาณแกลบเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก แกลบมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (เหมือนกับชานอ้อย) แต่ในเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วย D-xylose, D-galctose, L-arabinose และ D-glucuronic acid ซึ่งพืชแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบและปริมาณที่แตกต่างกัน (Genieva, and others, 2008) ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานและตารางที่ 2 ได้แสดงองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของแกลบตามลำดับ

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบพื้นฐานของแกลบ

องค์ประกอบ (% โดยมวล)				อ้างอิง
เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า	
31.12	22.48	22.34	13.87	Senthil Kumar, and others, 2010
28.6	28.6	24.4	18.4	Di Blasi, 1999
34.4	29.3	19.2	-	Mahvi, and others, 2004

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของแกลบ

องค์ประกอบ	ร้อยละ
Proximate Analysis : Fixed carbon	9.3
Volatile matter	72.8
Ash content	17.9
Higher heating value, MJ kg <sup>-1</sup>	-
Ultimate Analysis : Carbon	48.9
Hydrogen	6.2
Oxygen (by difference)	44.1
Nitrogen	0.8

ที่มา (Wannapeera et al., 2008)

### 2.3 ประโยชน์ของแกลบ

ใช้เป็นเชื้อเพลิง วัสดุก่อสร้าง อาหารเลี้ยงสัตว์ เครื่องนอน ปุ๋ย ผลิตภัณฑ์คอนกรีต และซีเมนต์แกลบ (เช่น ใช้ในงานคอนกรีต ตัวเร่งปฏิกิริยา) เป็นต้น (Rice hulls or Rice husk, 2010)

### 2.4 การดูดซับ

การดูดซับเป็นการแยกสารองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซโดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมสัมผัสกับตัวดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน

กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นเรื่อยๆ โดยที่สารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับและคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมๆกัน จนกว่าอัตราการดูดซับและการคายการดูดซับจะเท่ากัน ซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะสมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ส่วนไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ ต่อ น้ำหนักของตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ ที่สมดุลการดูดซับ ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ที่สมดุลการดูดซับไปพล็อตกราฟกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ จะได้เส้นโค้งแนวโน้ม ที่เกิดขึ้นจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับรูปแบบของไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายสมการด้วยกัน ซึ่งแล้วแต่ว่าจะนำเอาสมการแบบใดมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับ แต่ที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับ คือ สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's adsorption isotherm) สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิคซ์ (Freundlich's adsorption isotherm) และไอโซเทอมการดูดซับของเทมคิน (Temkin's adsorption isotherm) โดยไอโซเทอมแต่ละรูปแบบมีรายละเอียดดังนี้

1. ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ มีสมมติฐานของสมการว่าทุกๆ ตำแหน่งดูดซับ (Adsorption site) มีลักษณะเหมือนกัน (Homogenous) และการดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอนและพื้นที่นั้นๆสามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว(Monolayer)สมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังสมการ 1

$$\frac{C_e}{q_c} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{K_L q_m} \quad \dots\dots\dots(1)$$

โดยที่  $C_e$  = ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  $q_c$  = ปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $q_m$  = ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $K_L$  = ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์

2. ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช มีสมมติฐานของสมการว่าทุกๆ ตำแหน่งดูดซับ(Adsorption site) มีลักษณะไม่เหมือนกัน (Heterogenous) และการดูดซับจะเกิดขึ้นสามารถ ดูดซับโมเลกุลได้หลายชั้น (Multilayer) สมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มฟรุนดลิช ดังสมการ 2

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{.....(2)}$$

โดยที่  $q_e$  = ปริมาณของสีย้อมถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $C_e$  = ความเข้มข้นของสีย้อมที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  $K_F$  = ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (ลิตรต่อมิลลิกรัม) และ  $n$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

### 2.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยสมการ Pseudo-First Order Equation ดังสมการ 3

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad \text{.....(3)}$$

โดยที่  $q_e$  = ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $q_t$  = ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $k_1$  = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที)  $t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

สมการ Pseudo-Second Order Equation ดังสมการ 4

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

### 2.6 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

อุณหภูมิตั้งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับ ดังนั้นจึงศึกษาพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์เช่น เอนทาลปี ( $\Delta H$ ) เอนโทรปี ( $\Delta S$ ) และพลังงานอิสระ ( $\Delta G$ ) ของการดูดซับ ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มการดูดซับและพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์จะเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\log(q_e/C_e) = (\Delta S_{ads}/2.303R) - (\Delta H_{ads}/2.303RT) \quad \text{.....(5)}$$

โดย  $q_e$  เป็นปริมาณการดูดซับมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม(mg/g)  $C_e$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ภาวะสมดุลมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร(mg/L)  $T$  เป็นอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน(K)

และ เป็นค่าคงที่ของแก๊ส

พลังงานอิสระ ( $\Delta G_{ads}$ ) เอนโทรปี ( $\Delta S_{ads}$ ) เอนทาลปี ( $\Delta H_{ads}$ ) ของการดูดซับจะเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\Delta G_{ads} = \Delta H_{ads} - T\Delta S_{ads} \quad \dots\dots\dots(6)$$

## 2.7 การกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับ

การกำจัดสีด้วยวิธีธรรมชาติมีวิธีการกำจัดหลายวิธีทั้งแบบกายภาพและเคมีในกระบวนการต่าง ๆ แต่การดูดซับเป็นวิธีที่ได้เปรียบกว่าวิธีอื่นๆ ทั้งในเรื่องของประสิทธิภาพ ในการกำจัด ค่าใช้จ่าย ง่ายต่อการดำเนินระบบ และไม่ทำให้เกิดสารพิษ แต่อย่างไรก็ตามการเลือกตัวดูดซับให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพก็เป็นสิ่งสำคัญมาก ซึ่งต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่าย ในการบำบัดน้ำเสียด้วย ในปัจจุบันมีการใช้ตัวดูดซับหรือมีการพัฒนาตัวดูดซับกันมากขึ้น และ ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ตัวดูดซับที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ใบ กากใย เปลือกผลไม้ เมล็ด เป็นต้น และวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม เช่น ขี้เลื่อย เปลือกไม้ เป็นต้น ซึ่งขี้เลื่อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมไม้ที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับทำอาหารและกล่องบรรจุภัณฑ์ รวมทั้งหาง่ายและราคาไม่แพง (Garg, 2004) และมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ (ลิกนิน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส) ของหมู่โพลีฟีนอลิก ซึ่งสามารถเกิดกลไกการจับ (binding) กับสารละลายเมทิลีนบลูได้ (Shukla et al., 2002)

วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร มีสารอินทรีย์ เป็นองค์ประกอบ (ลิกนิน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส) ของหมู่โพลีฟีนอลิก ซึ่ง Jacobsen and Wyman (2000) กล่าวว่าเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืช โดยเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับไฮโดรเจนได้ เฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนหนึ่งของพืชที่ประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์หลายชนิด ซึ่งพืชแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน และลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้าง 3 มิติ เป็น aromatic polymer ไม่ชอบน้ำ(หมู่ฟังก์ชัน คือ หมู่ methoxyl group-OCH<sub>3</sub> หมู่ hydroxyl group-OH และส่วนที่เป็น Phenolic) หมู่ไฮดรอกซิลสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันอื่นหรือกับหมู่อัลดีไฮด์หรือหมู่คีโตนเกิด linkage ใหม่ขึ้นและจะสร้างพันธะต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆ

ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีผู้วิจัยที่ทำตัวดูดซับสีจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น

Han et al., (2007). ศึกษาใช้แกลบดูดซับเมทิลีนบลูในระบบคอลัมน์ โดยศึกษาที่เอช อัตราการไหล ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู และความสูงของแกลบ ใช้สมการโทมส์ทำนายการดูดซับของอัตราการไหล และความเข้มข้นของเมทิลีนบลู สมการ BDST ทำนายผลการทดลอง พบว่าแกลบสามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพที่อัตราการไหล 8.2 มิลลิลิตรต่ออนาที และความเข้มข้นเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีสมดุลการดูดซับ 4.41 มิลลิกรัมต่อกรัม



Han et al., (2008). ใช้แกลบดูดซับคองโกเรตในระบบคอลัมน์ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ พีเอช อัตราการไหล ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู และความสูงของแกลบ ผลการทดลองที่ได้นำมาพลอตกราฟเบรคทรู ใช้สมการโทมัส อัดัมส์-โบฮาร์ท และยูนิ-เนลสัน และสมการ BDST ทำนายผลของความสูงของแกลบ พบว่าสมการโทมัสทำนายผลการทดลองได้ดี

Mahvi et al., (2004). ศึกษาการใช้แกลบและเถาแกลบดูดซับฟีนอล และศึกษาจลนศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับในระบบเขย่า ปัจจัยศึกษาที่ศึกษาได้แก่ พีเอช ความเข้มข้น ปริมาณตัวดูดซับ พบว่าการดูดซับที่สมดุลของแกลบและเถาแกลบจะเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 6 ชั่วโมง ความเข้มข้น 150-500 ไมโครกรัมต่อลิตร และเวลา 3 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 500-1300 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับสมการอันดับหนึ่ง การดูดซับฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ผลการทดลองสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ โดยเถาแกลบมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่า

นครินทร์(2549) ศึกษาการกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำล้างสีย้อมผ้าโดยการใช้แกลบที่ปรับสภาพด้วย วิธีทางเคมี ทำการทดลองที่สภาวะ อุณหภูมิในการดูดซับ 30°C pH = 7 และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมผ้า 150 ppm พบว่าแกลบที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 wt% และแกลบที่ปรับสภาพด้วยนอร์มัล-3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ 60wt% (CHMAC) สามารถดูดซับสีเบสิก และสีรีแอคทีฟ ได้เท่ากับ 97.16% และ 71.87% ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสีเบสิกได้ 97.59% แต่ไม่สามารถดูดซับสีรีแอคทีฟได้ ผลการศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับเวลาในการปรับสภาพแกลบ พบว่าแกลบที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 wt% กับเวลาในการปรับสภาพแกลบ 1 วัน สามารถดูดซับสีเบสิกได้ดีที่สุด และแกลบที่ปรับสภาพด้วย CHMAC ความเข้มข้น 60 wt% กับเวลาในการปรับสภาพแกลบ 4 ชั่วโมง สามารถดูดซับสีรีแอคทีฟได้ดีที่สุด โดยเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มจาก 30°C เป็น 70°C ความสามารถในการดูดซับสีเบสิกและสีรีแอคทีฟ จะเพิ่มจาก 71.87% เป็น 94.47% สำหรับผลของ pH พบว่าแกลบสามารถดูดซับสีเบสิกได้ดีที่ pH = 12 และแกลบสามารถดูดซับสีรีแอคทีฟได้ดีที่ pH = 2

ศรีประภา กล้วยไม้ ณ ออยุธยาและคณะ (2545). ศึกษาการกำจัดสีเมทัลคอมเพล็กซ์จากน้ำเสียฟอกย้อมสังเคราะห์โดยแกลบ พื้นผิวแกลบประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) คีโตน (>C=O), อัลดีไฮด์ (-CHO) คาร์บอกซิเลท (-CO<sub>2</sub>) ซิลอกเซน (Si-O-Si) และซิลานอล (Si-OH) ที่มีความสามารถในการดูดซับได้ทั้งสารสีย้อมและโลหะหนัก ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ เช่น สีชนิดไตรเรทท์ และแอซิด คือ Sirius Blue Direct KGRN และ Black Acid 172 ที่มี Cu และ Cr เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างสี จากการศึกษาพบว่าแกลบสามารถกำจัดน้ำเสียสีย้อม Sirius Blue Direct KGRN และ Black Acid 172 เข้มข้น 215 และ 164 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ถึง 88% และ 95% ตามลำดับ โดยไม่พบการแยกตัวของโลหะการดูดซับเข้าสู่สมดุลภายใน 15 นาที อัตราการดูดซับขึ้นกับขั้นการกระจายและการดูดซับภายในอนุภาค

ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ ( $k_{ad}$ ) และค่าคงที่ที่สมดุล ( $K_c$ ) ของการกำจัดสีไดเรกต์ และสีแอซิดที่อัตราส่วนน้ำหนักแกลบต่อปริมาณน้ำเสีย 5% คือ  $0.133 \text{ นาที}^{-1}$  และ  $0.392 \text{ นาที}^{-1}$  และ  $0.930$  และ  $0.954$  ตามลำดับ และแกลบมีความจุของการดูดซับสีไดเรกต์และสีแอซิดสูงสุด ( $Q_{max}$ ) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เท่ากับ  $9.72$  และ  $32.50$  มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยค่า  $Q_{max}$  จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบการดูดซับลดลง และค่าเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) มีค่าเท่ากับ  $3.8$  และ  $2.9$  กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกของการดูดซับสีเกิดจากการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การเตรียมสารละลายสีย้อม

##### 1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

น้ำตัวอย่าง เป็นน้ำตัวอย่างที่เตรียมขึ้นและน้ำตัวอย่างจริง  
ตัวดูดซับ คือ แกลบ

##### 2. ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 3.2 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

##### 3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ

แกลบมาล้างน้ำและแช่ด้วย 0.1 M HCl นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และนำมาคัดขนาดให้ได้อนุภาค 50–100 เมช เก็บในโถดูดความชื้น

##### 3.2.2 ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของแกลบ ได้แก่

1. วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานด้วย Scanning Electron Microscope equipped with Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) เพื่อศึกษาถึงพื้นผิวและการกระจายตัวของรูพรุน
2. วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วย Scanning Electron Microscope equipped Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) เพื่อศึกษาถึงปริมาณซิลิกาและอลูมินา
3. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) เพื่อศึกษาถึงหมู่ฟังก์ชัน
4. พื้นผิว (surface area) และรูพรุน (pore volume) ด้วย  $N_2$  adsorption

##### 3.2.3 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมด้วยปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ เวลาที่สัมผัส ความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิ มีขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

##### 3.2.3.1 ศึกษาเวลาที่เข้าสู่สมดุล

1. ชั่งตัวดูดซับแกลบปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. บีบน้ำตัวอย่าง ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ในข้อ 1
3. นำตัวอย่างมาเขย่าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ความเร็ว 220 รอบต่อนาที อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$

4. นำสารละลายที่เวลาต่างๆไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และวัดปริมาณสีที่ย้อมที่เหลือด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer
5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ แล้วนำค่าปริมาณการดูดซับที่เวลาต่างๆไปเขียนกราฟ เพื่อหาเวลาที่เข้าสู่สมดุล

### 3.2.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลาย

1. ชั่งແລบปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เปิดน้ำตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (จำนวน 5 ค่า) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ในข้อ 1
3. นำตัวอย่างมาเขย่าที่ช่วงเวลาเข้าสู่สมดุลจากข้อ 2.2 ที่ความเร็ว 220 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30°C
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และวัดปริมาณสีที่ย้อมที่เหลือด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer
5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ แล้วเขียนกราฟระหว่างค่าปริมาณการดูดซับกับปริมาณตัวดูดซับ

### 3.2.3.3 นำตัวดูดซับไปทดสอบกับน้ำตัวอย่างจริงจากชุมชน

$$\% \text{ การกำจัด} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots(6)$$

และคำนวณความสามารถในการกำจัด (adsorption capacity) ดังสมการ 7

$$q = \frac{V(C_0 - C_t)}{W} \quad \dots\dots\dots(7)$$

โดยที่  $q$  = ความสามารถในการกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)  $C_t$  = ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ที่เวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  $V$  = ปริมาตรน้ำเสียที่ใช้ (ลิตร) และ  $W$  = ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ แบ่งการทดลองดังบทที่ 3 ที่มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ ได้แก่

1. วิเคราะห์พื้นที่ผิว ด้วยวิธีบีอีที (Bet method)
2. วิเคราะห์พื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)
3. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

ตอนที่ 2 ประสิทธิภาพการดูดซับ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่

1. เวลาที่เข้าสู่สมดุล
2. ความเข้มข้นของสารละลาย
3. อุณหภูมิ

ตอนที่ 3 จากผลการทดลองใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์การดูดซับ

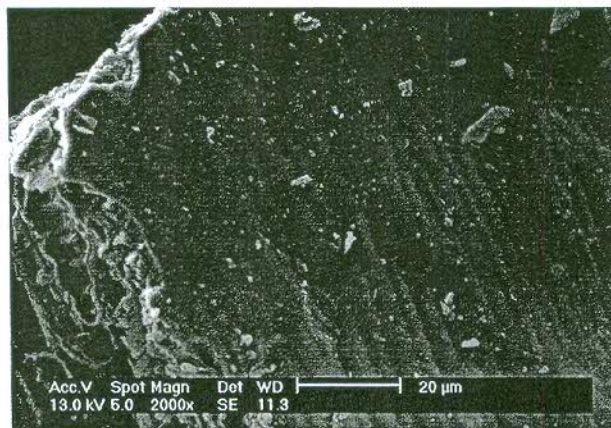
ผลการทดลองมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

#### 4.1 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

4.1.1 วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับด้วยวิธีบีอีที โดยการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ด้วยเครื่อง Autosorb-1 MP Quantachrome (ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่) พบว่าแกลบมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 18.27 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (total pore volume) เท่ากับ  $0.039 \text{ cm}^3/\text{g}$  และรัศมีรูพรุนเฉลี่ย (average pore radius) เท่ากับ  $42.72 \text{ \AA}$

4.1.2 วิเคราะห์พื้นผิวของแกลบด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 2000X ดังรูปที่ 4.1

จากรูป 4.1 พื้นผิวของแกลบ พบว่าพื้นผิวของแกลบมีลักษณะขรุขระและมีรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่ ซึ่งโดยทั่วไปพบว่าโครงสร้างของตัวดูดซับที่มีรูพรุนและมีพื้นผิวที่ขรุขระสามารถกำจัดสารปนเปื้อนต่าง ๆ ได้ดี

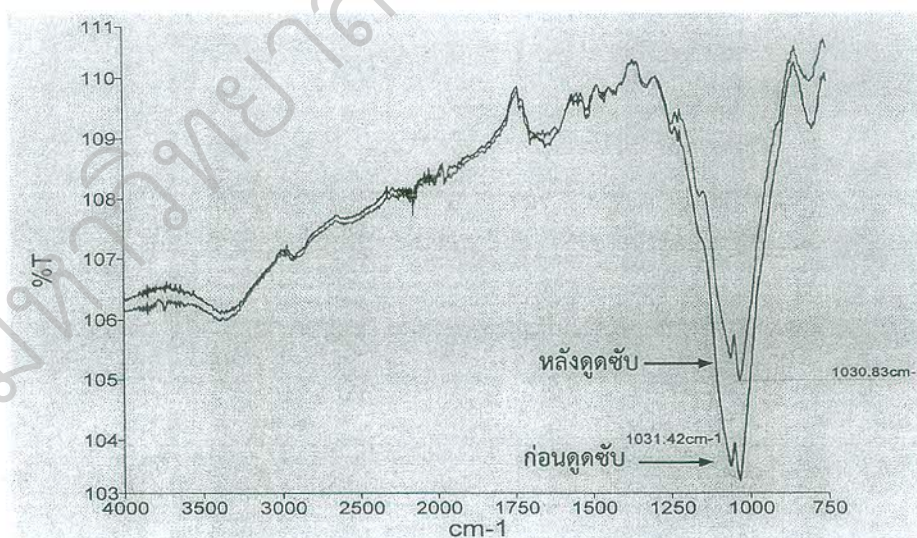


รูป 4.1 พื้นผิวของแกลบที่กำลังขยาย 2000X

จากรูป 4.1 พื้นผิวของแกลบ พบว่าพื้นผิวของแกลบมีลักษณะขรุขระและมีรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่ ซึ่งโดยทั่วไปพบว่าโครงสร้างของตัวดูดซับที่มีรูพรุนและมีพื้นผิวที่ขรุขระสามารถกำจัดสารปนเปื้อนต่าง ๆ ได้ดี

4.1.4 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแกลบก่อนและหลังดูดซับสี้อมด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) ดังรูปที่ 4.2

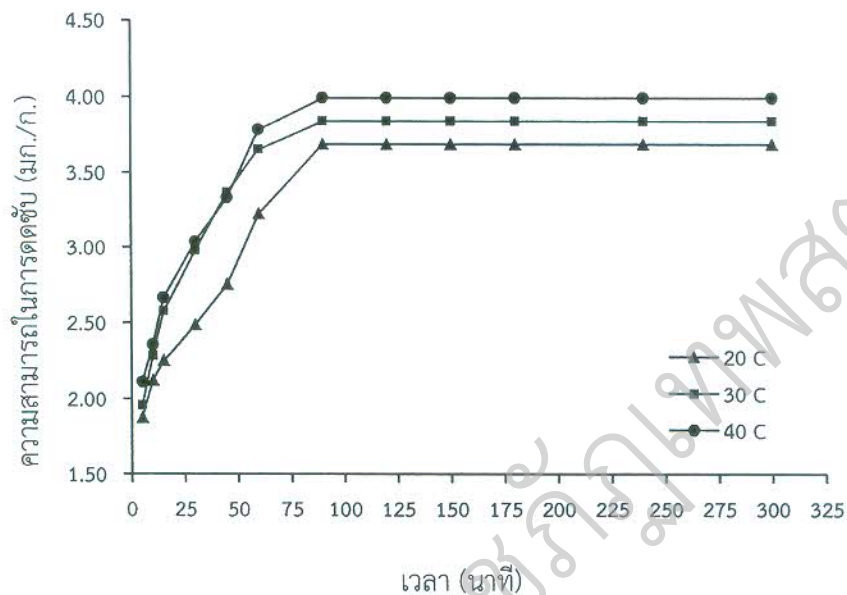
จากรูปที่ 4.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับที่ความยาวคลื่น  $4000-750\text{ cm}^{-1}$  พบว่ามีพีคในช่วงความยาวคลื่นประมาณ  $1031.42\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงพันธะ Si-O และหลังการดูดซับพบว่าพีคเคลื่อนที่ไปที่  $1030.81\text{ cm}^{-1}$



รูป 4.2 หมู่ฟังก์ชันของแกลบก่อนและหลังดูดซับสี้อม

#### 4.2 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ทำการทดลองการดูดซับสารละลายที่เวลา 5-300 นาที โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม ที่ความเข้มข้นสารละลาย 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.3

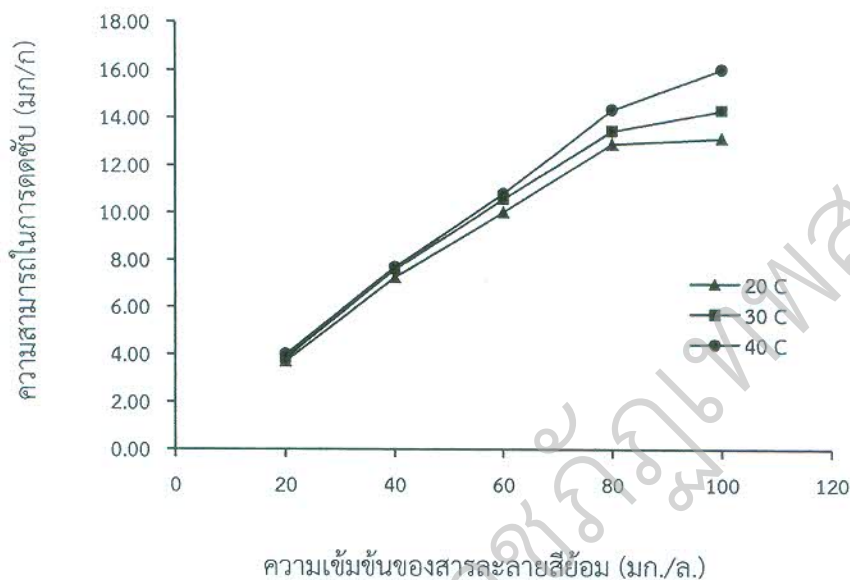


รูปที่ 4.3 ผลของเวลาในการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบ

ในการศึกษาผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุลที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบ ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาที่เวลาต่าง ๆ คือ 5 10 15 30 45 60 90 120 150 180 210 240 และ 300 นาที ที่ความเข้มข้นสีย้อม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3 พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลา 5 นาที โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับ ( $q_t$ ) เท่ากับ 1.857 1.956 และ 2.114 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การที่การดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นเนื่องจากมีบริเวณตำแหน่งดูดซับ (binding site) ของตัวดูดซับยังว่างอยู่ และการที่เกิดการดูดซับขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเกิดจากการดูดซับทางกายภาพหรือเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Gupta and Rastogi, 2009) การดูดซับจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งการดูดซับเริ่มช้าลงและเข้าสู่สมดุลที่เวลา 90 นาที โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลเท่ากับ 3.689 3.842 และ 3.911 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

#### 4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ทำการทดลองการดูดซับสารละลายสี้อมด้วยแกลบ ใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม ที่ความเข้มข้นสารละลายสี้อม 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เวลาที่เข้าสู่สมดุล 90 นาที (จากข้อ 4.2) ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายสี้อม

ผลของความเข้มข้นของสารละลายสี้อมที่ความเข้มข้น 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.4 ผลการทดลองพบว่าการดูดซับสี้อมด้วยแกลบมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 3.689-13.175 3.842-14.327 และ 3.993-16.060 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

#### 4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

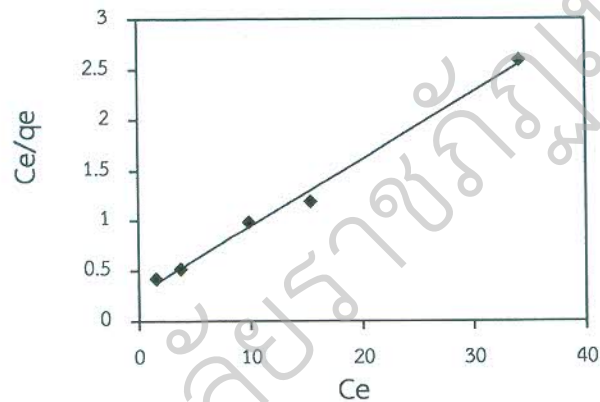
ในกระบวนการดูดซับนิยมใช้สมการไอโซเทอร์มช่วยในการทำนายและออกแบบการทดลอง และในการทดลองการดูดซับสี้อมด้วยแกลบ โดยใช้แบบจำลองแลงเมียร์และฟรุนดลิช อธิบายผลการทดลอง และในการทดลองครั้งนี้ทำการทดลองที่ความเข้มข้นสารละลาย 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม เวลาในการเขย่า 90 นาที ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส ผลการทดลองและค่าความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มจะเป็นดังตารางที่ 4.1



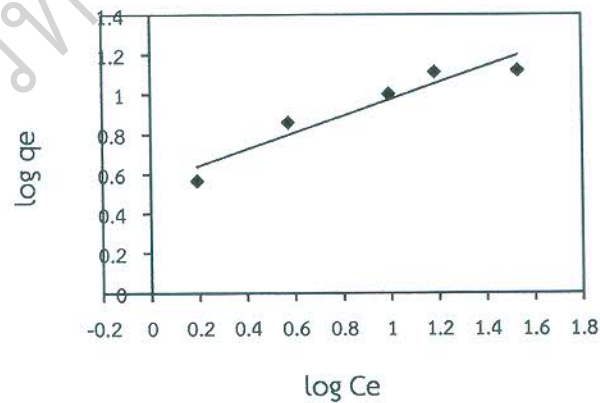
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้นสารละลาย (มก./ล.)	Ce (มก./ล.)	qe (มก./ก.)	Ce/qe	log Ce	log qe
20	1.553	3.689	0.421	0.191	0.567
40	3.745	7.251	0.516	0.573	0.860
60	9.854	10.029	0.983	0.994	1.001
80	15.365	12.927	1.189	1.187	1.111
100	34.125	13.175	2.590	1.533	1.120

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 เมื่อนำมาเขียนกราฟแบบสมการเส้นตรง (linear equation) จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแลงเมียร์กับฟรอนตลิชของแกลบ ดังรูป 4.5-4.6



รูปที่ 4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ด้วยแกลบ

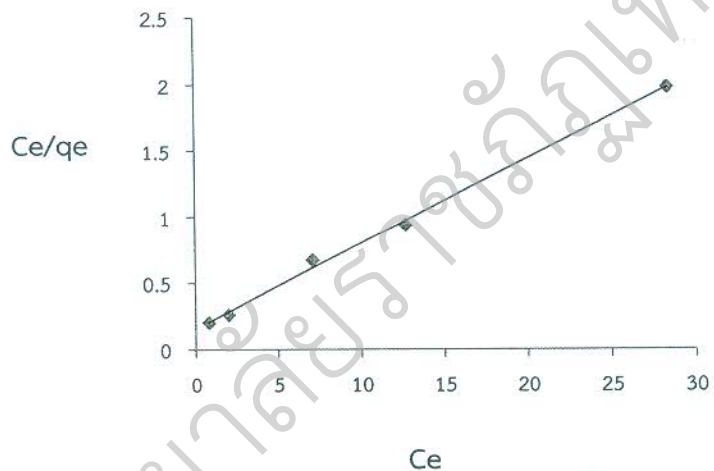


รูปที่ 4.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนตลิชด้วยแกลบ

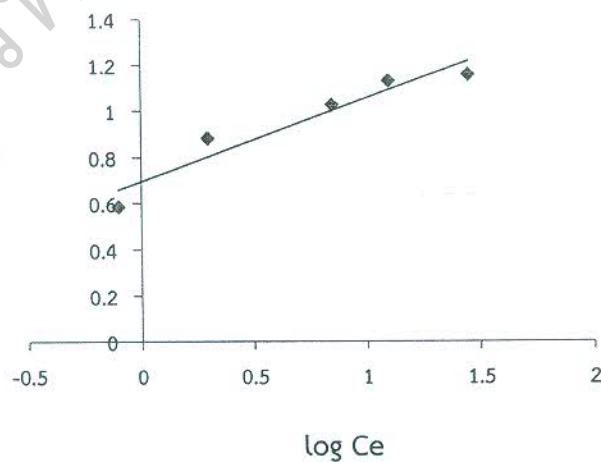
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้นสารละลาย (มก./ล.)	Ce (มก./ล.)	qe (มก./ก.)	Ce/qe	log Ce	log qe
20	0.788	3.842	0.205	-0.103	0.585
40	1.986	7.603	0.261	0.298	0.881
60	7.075	10.585	0.668	0.850	1.025
80	12.658	13.468	0.940	1.102	1.129
100	28.365	14.327	1.980	1.453	1.156

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 เมื่อนำมาเขียนกราฟแบบสมการเส้นตรง (linear equation) จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแลงเมียร์กับฟรอนตลิชของแกลบ ดังรูป 4.7-4.8



รูปที่ 4.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ด้วยแกลบ

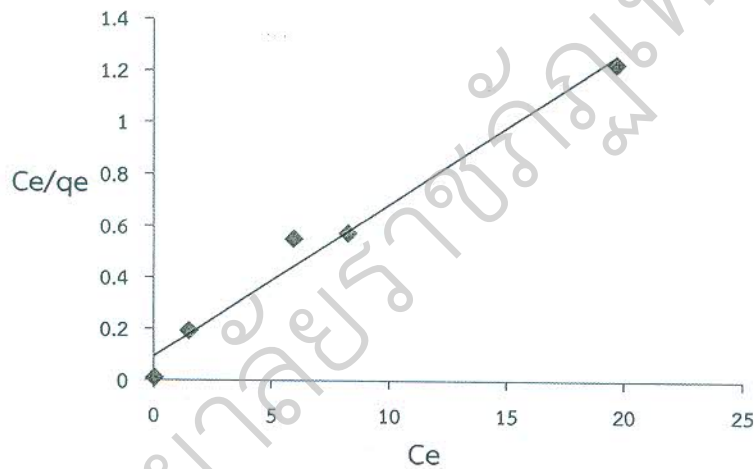


รูปที่ 4.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนตลิชด้วยแกลบ

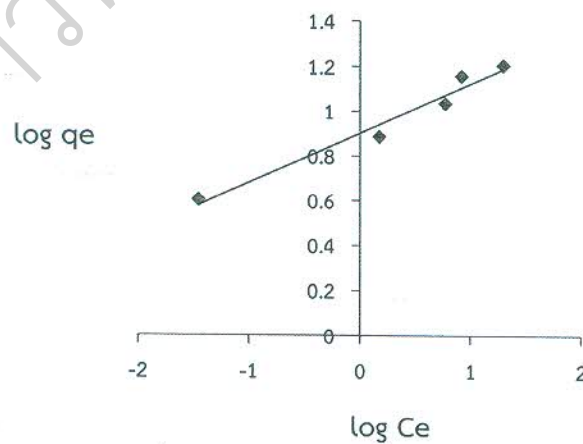
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อมด้วยแกลบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้นสารละลาย (มก./ล.)	Ce (มก./ล.)	qe (มก./ก.)	Ce/qe	log Ce	log qe
20	0.035	3.993	0.009	-1.456	0.601
40	1.487	7.703	0.193	0.172	0.887
60	5.958	10.808	0.551	0.775	1.034
80	8.236	14.353	0.574	0.916	1.157
100	19.698	16.060	1.226	1.294	1.206

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 เมื่อนำมาเขียนกราฟแบบสมการเส้นตรง (linear equation) จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแลงเมียร์กับพหุนดลิจของแกลบ ดังรูป 4.9-4.10



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ด้วยแกลบ



รูปที่ 4.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับพหุนดลิจด้วยแกลบ

จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้สมการเส้นตรงไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการทำนายผลการทดลองการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส จะได้พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.4

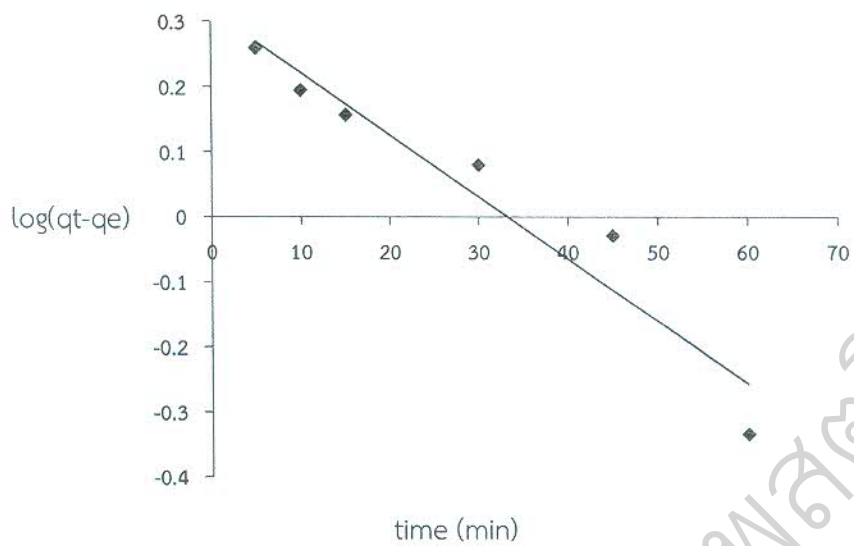
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ไอโซเทอร์มการดูดซับ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	20	30	40
ไอโซเทอร์มแลงเมียร์			
$q_{max}$ (mg/g)	14.9	15.6	16.9
$K_L$ (L/mg)	0.242	0.407	0.649
$R_L$	0.171-0.040	0.109-0.024	0.072-0.015
$R^2$	0.994	0.998	0.977
ไอโซเทอร์มฟรุนดลิช			
$1/n$	0.417	0.359	0.221
$K_F$ (mg/g)	3.62	4.97	7.98
$R^2$	0.908	0.921	0.967

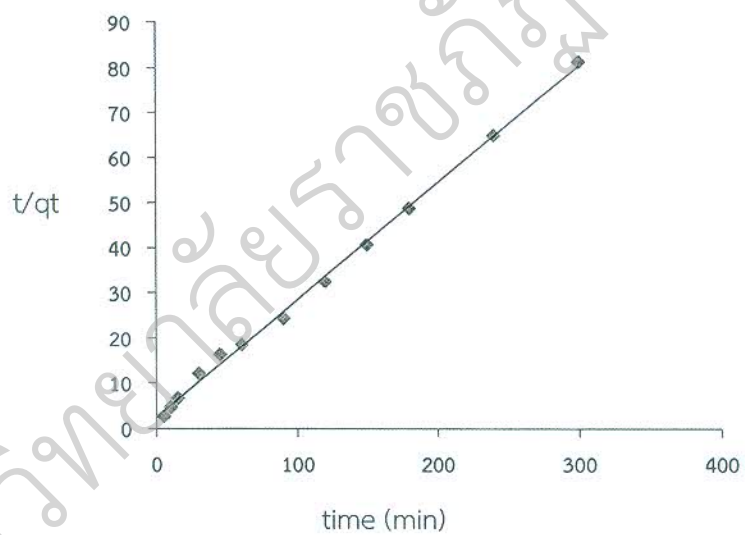
ผลการทดลองการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบในสภาวะสมดุล ณ เวลา 90 นาที ความเข้มข้นสารละลายสีย้อม 20-300 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient:  $R^2$ ) ผลการทดลองพบว่าการดูดซับสีย้อมของแกลบสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์ และฟรุนดลิช แต่สอดคล้องกับกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์มากกว่าทุกอุณหภูมิ (ดังตารางที่ 4.4) โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (maximum adsorption capacity:  $q_{max}$ ) เท่ากับ 14.9 15.6 และ 16.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พารามิเตอร์ต่างๆ ของไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบแสดงดังตารางที่ 4.4

#### 4.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมด้วยแกลบโดยใช้สมการ pseudo—first order และ pseudo—second order ในการทำนายผลการทดลองโดยทำการศึกษา ณ เวลาต่าง ๆ 5-300 นาที ความเข้มข้นของสารละลาย 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส ผลการทดลองเมื่อนำไปเขียนกราฟตามสมการ pseudo—first order และ pseudo—second order ของการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบ ดังรูปที่ 4.11-4.13 (ก และ ข) และนำผลที่ได้จากสมการทั้งสองไปหาพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์การดูดซับจะเป็นดังตารางที่ 4.5

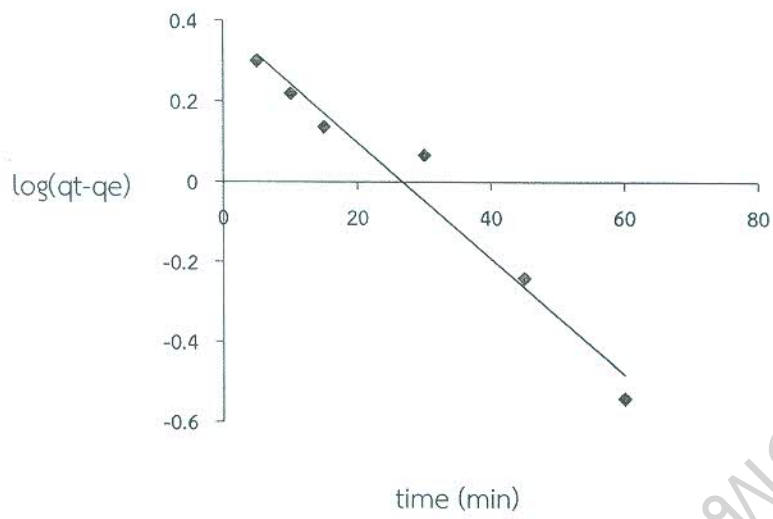


ก. pseudo first order

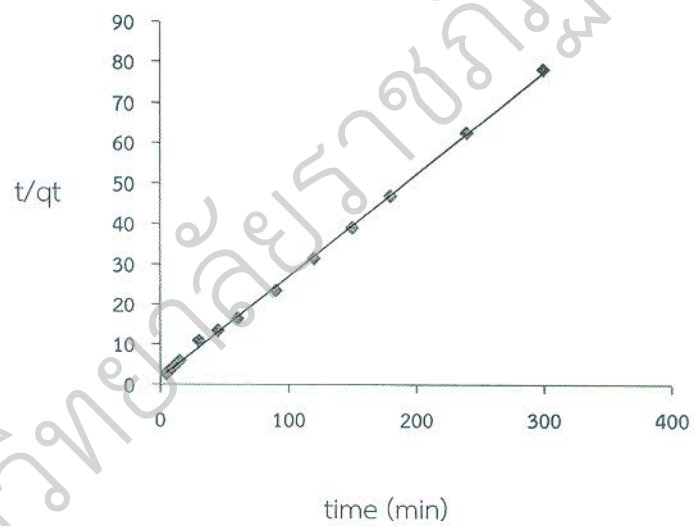


ข. pseudo second order

รูปที่ 4.11 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมแบบ pseudo first และ second order ด้วยแคลบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

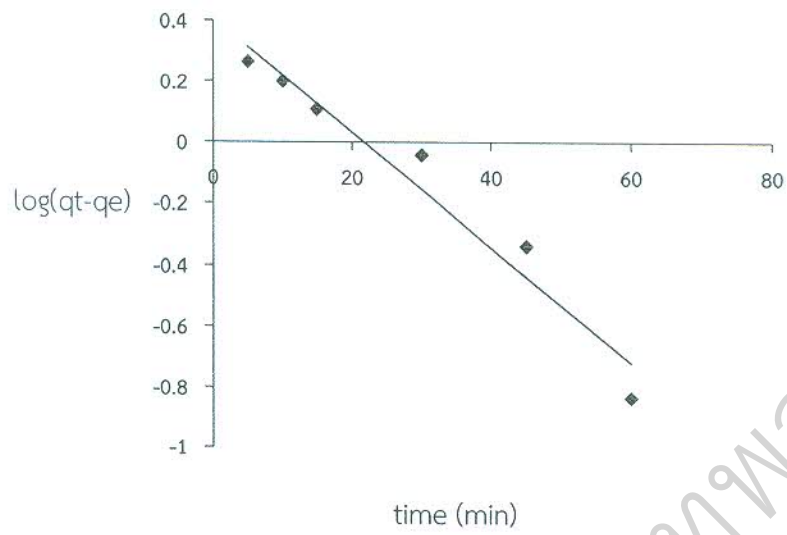


ก. pseudo first order

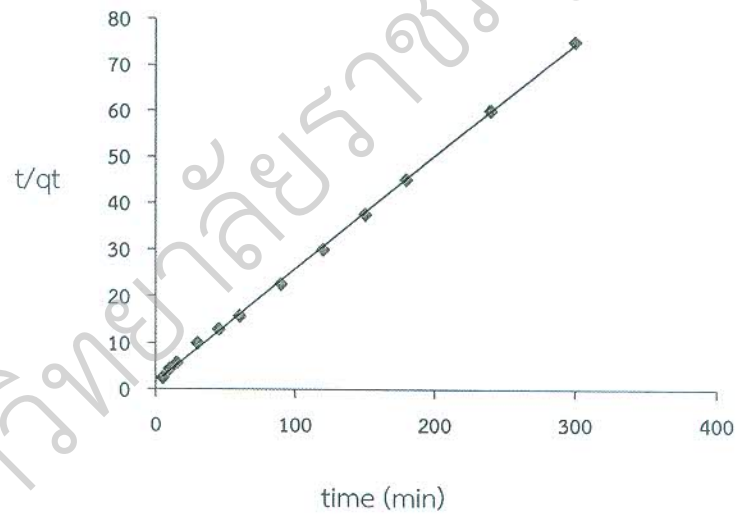


ข. pseudo second order

รูปที่ 4.12 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมแบบ pseudo first และ second order ด้วยแกลบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ก. pseudo first order



ข. pseudo second order

รูปที่ 4.13 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมแบบ pseudo first และ second order ด้วยแคลบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมด้วยแกลบ เมื่อพิจารณาจากค่า correlation coefficient ( $R^2$ ) ดังตารางที่ 4.5 ผลการทดลองพบว่าข้อมูลการทดลองการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองของทั้งสองตัวดูดซับ บ่งบอกว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบเคมี (chemical adsorption) ซึ่งการดูดซับทางเคมีจะเกี่ยวข้องกับการนำอิเล็กตรอนมาใช้ร่วมกัน หรือเกิดการเปลี่ยนของอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

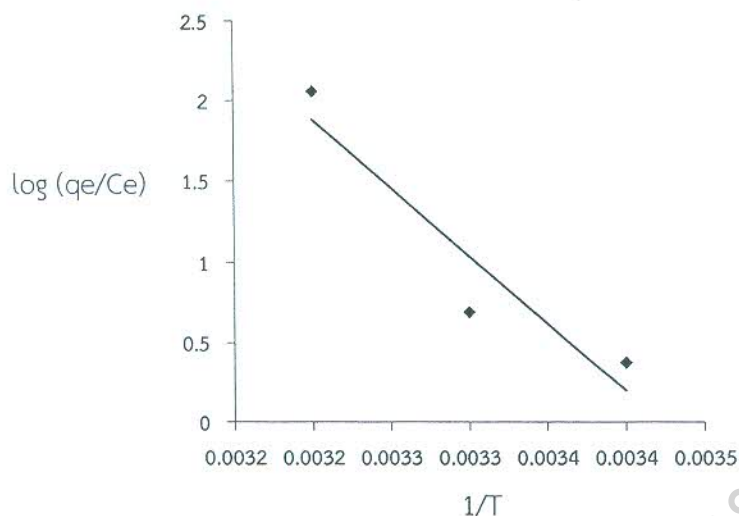
ตารางที่ 4.5 จลนพลศาสตร์และการแพร่ภายในอนุภาคการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบ

จลนพลศาสตร์การดูดซับ	พารามิเตอร์		
$q_e$ (exp) (mg/g)	3.69	3.84	3.99
Pseudo—first order			
$q_e$ (cal) (mg/g)	2.70	2.44	2.56
$k_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	0.222	0.033	0.043
$R^2$	0.928	0.963	0.955
Pseudo—second order			
$q_e$ (cal) (mg/g)	3.85	3.96	4.11
$k_2$ ( $\text{g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ )	0.026	0.037	0.038
$R^2$	0.998	0.999	0.999
Intraparticle diffusion			
K	0.242	0.268	0.273
C	1.291	1.467	1.552
$R^2$	0.973	0.977	0.981

#### 4.6 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

ทำการศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับ ได้แก่ พลังงานอิสระของการดูดซับ ( $\Delta G$ ) เอนทาลปีของการดูดซับ ( $\Delta H$ ) และเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S$ ) ที่ความเข้มข้นสารละลาย 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส ผลการทดลองดังรูปที่ 4.14





รูปที่ 4.14 อุณหพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมด้วยแคลส

จากตารางที่ 4.6 ศึกษาพลังงานอิสระของการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแคลส ที่อุณหภูมิ 20–40 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $-2.14$   $-3.99$  และ  $-12.13$  kJ/mol ตามลำดับ พลังงานอิสระมีค่าเป็นลบบ่งบอกว่าเกิดการดูดซับที่ตีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ส่วนค่าเอนทาลปีของการดูดซับและเอนโทรปีของการดูดซับ มีค่าเท่ากับ  $160.97$  kJ/mol และ  $0.55$  J/mol โดยค่าเอนทาลปีของการดูดซับและเอนโทรปีของการดูดซับเป็นบวกบ่งบอกว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบดูดความร้อน (endothermic) ส่วนเอนโทรปีเป็นบวกบ่งบอกว่าเกิดการเพิ่มขึ้นของความไร้ระเบียบในกระบวนการดูดซับบริเวณรอยต่อระหว่างของแข็ง (ตัวดูดซับ) กับของเหลวของสารละลาย

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์อุณหพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแคลส

อุณหภูมิ (K)	$-\Delta G$ (kJ/mol)	$\Delta H$ (kJ/mol)	$\Delta s$ (J/mol)
293	2.14	160.97	0.55
303	3.99		
313	12.13		

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกลบ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกลบ ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้
  - 1.1 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุลที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ คือ 5-300 นาที อุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียส พบว่าสมดุลการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 90 นาที โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 3.689 3.842 และ 3.911 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
  - 1.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้น 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียส พบว่าการดูดซับสีย้อมด้วยแกลบมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 3.689-13.175 3.842-14.327 และ 3.993-16.060 มิลลิกรัม ต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
2. ไอโซเทอร์มการดูดซับการทดลองการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกลบ สารละลายเข้มข้น 20—100 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองเมื่อพิจารณาจากค่า correlation coefficient ( $R^2$ ) พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (maximum adsorption capacity:  $q_{max}$ ) เท่ากับ 14.9 15.6 และ 16.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
3. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกลบ พบว่าผลการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองทุกอุณหภูมิ
4. จากข้อมูลการทดลองสรุปได้ว่าแกลบมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำทิ้งจากสีย้อมผ้าในอุตสาหกรรมครัวเรือนได้ดี

#### ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับ เช่น การปรับปรุงสภาพผิวตัวดูดซับ
2. ควรศึกษาวัสดุเหลือทิ้งตัวอื่น ๆ เช่น ขานอ้อย และขุยมะพร้าว

## เอกสารอ้างอิง

- นครินทร์ แพรชาย. (2549). การกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำล้างสีย้อมผ้าโดยการใช้แกลบที่ปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ศรีประภา กล้วยไม้ ณ อยุธยา, ไพทีย์ อธิเวชญาน, วรรณัด นาคบรรพต และภาวิณี ชัยประเสริฐ. (2545). การกำจัดสีเมทัลคอมเพล็กซ์จากน้ำเสียฟอกย้อมสิ่งเครื่องใช้โดยแกลบ การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, 24-26 ตุลาคม, ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์, กรุงเทพฯ, 2545 : 677.
- Han, R., Wang, Y., Yu, W., Zou, W., Shi, J. and Liu., H. (2007). Biosorption of methylene blue from aqueous solution by rice husk in a fixed-bed column. "Journal of Hazardous Materials" 141: 713-718.
- Han, R., Ding, D., Xu, Y., Zou, W., Wang, Y., Li, Y., and Zou, Y. (2008). Use of rice husk for the adsorption of congo red from aqueous solution in column mode. "Bioresource Technology" 99: 2938-2946.
- Mahvi, A. H., Maleki, A. และ Eslami, A. (2004). Potential of Rice Husk and Rice Husk Ash for Phenol Removal in Aqueous Systems. "American Journal of Applied Sciences." 1 (4): 321-326.
- Di Blasi, C., Buonanno, F. and Branca, C. (1999). Reactivities of some biomass chars in air. Carbon. 37 (8): 1227-1238.
- Prasara-A, J. (2010). Life Cycle Assessment in Policy Context: the Case of Rice Husk Applications in Thailand. VDM Verlag Dr. Müller.
- Wannapeera, J., Worasuwanarak, N and Pipatmanomai, S. (2008). Product yields and characteristics of rice husk, rice straw and corncob during fast pyrolysis in a drop-tube/fixed-bed reactor. Songklanakarin J. Sci. Technol. 30 (3): 393-404.
- Jacobsen, S.E. and Wyman, C.E. (2000). Cellulose and hemicellulose hydrolysis models for application to current and novel pretreatment processes. Appl Biochem Biotechnol. 81-96.
- Shukla, A., Y. Zhang, P. Dubey, J.L. Margrave and S.S. Shukla. (2002). The role of sawdust in the removal of unwanted materials from water. J. Hazard. Mater. 95 : 137-152.

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี  
ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยเกลือ

ตารางที่ ก.1 ผลของเวลาในการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยเกลือ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	20	30	40
5	1.875	1.957	2.114
10	2.125	2.287	2.358
15	2.254	2.575	2.665
30	2.487	2.977	3.036
45	2.754	3.369	3.332
60	3.225	3.654	3.785
90	3.689	3.842	3.993
120	3.689	3.842	3.993
150	3.689	3.842	3.993
180	3.689	3.842	3.993
240	3.689	3.842	3.993
300	3.689	3.842	3.993

ตารางที่ ก.2 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมผ้าในการดูดซับด้วยเกลือ

ความเข้มข้นของสีย้อมผ้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	20	30	40
20	3.689	3.842	3.993
40	7.251	7.603	7.703
60	10.029	10.585	10.808
80	12.927	13.468	14.353
100	13.175	14.327	16.060