

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red โดยใช้ต้นข่าซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจาก  
การเกษตร



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **The Adsorption of Dye Congo Red Using Alpinia Galange**



Mr. Phummarin Rungratsamepat

Mr. Soranan Samakkee

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements For the  
degree of Bachelor of Chemical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red โดยใช้ดินขำ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร  
จัดทำโดย นายภูมรินทร์ รุ่งรัมย์พัฒน์ รหัสประจำตัว 47015544  
นายสรนันท์ สามัคคี รหัสประจำตัว 47015553  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

พ.ศ. ๒๕๖๕ อัสวแสงรัตน์

ประธานกรรมการ

(ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์)

ศ.ส

กรรมการ

(ดร.สุชาติ นิยมิตตกพงศ์)

ศ.ส อ.ศ.สุลักษณ์

กรรมการ

(อาจารย์ ศิริพันธ์ มุราชัญญลักษณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red โดยใช้ดินข่า ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร
จัดทำโดย	นายภูมรินทร์ รุ่งระวีพัฒน์ รหัสประจำตัว 47015544 นายสรนันท์ สามัคคี รหัสประจำตัว 47015553
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red ด้วยดินข่าซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นจะค่อยๆคงที่เนื่องจากเกิดสภาวะสมดุล เมื่อพิจารณา Adsorption Isotherm ของดินข่า พบว่าพฤติกรรมของการดูดซับของดินข่าเป็นไปตามแบบจำลองของ Langmuir สำหรับการศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ พบว่าการดูดซับมีการลดลงเป็นแบบจำลองอันดับ 2 และค่าคงที่อัตราการแพร่ภายในอนุภาค ( $k_p$ ) จะลดลงเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ ที่ 25 องศาเซลเซียส ดินข่ามีความสามารถในการดูดซับดีกว่าที่ 35 45 และ 55 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดอัตราการคายซับเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และพบว่าการดูดซับเป็นแบบจำลองอันดับ 2 และการแพร่ภายในอนุภาคที่อุณหภูมิต่ำจะแพร่ได้ดีกว่าการแพร่ที่อุณหภูมิสูง โดยดูจากค่า  $k_p$  และยังได้ค่าพลังงานการกระตุ้น ( $E_a$ ) เท่ากับ 14.381 J/mol และค่าแฟกเตอร์การชน ( $A$ ) เท่ากับ 0.8503 และจากการศึกษาคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่ากระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อนที่เกิดขึ้นได้เอง และเป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอน

**Report Title**      The Adsorption of Congo Red Dye Solvent Using Galingale  
**Student**            Mr. Phummarin Rungratsamepat    ID. 47015544  
                              Mr. Soranan Samakke                    ID. 47015553  
**Advisor**            Dr. Ponsawan Assawasaengrat  
**Report for**        Bachelor degree of Chemical Engineering  
                              Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering  
                              King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### Abstract

This project is to study the adsorption of Congo Red dye solvent with galingale which is agricultural waste. It was found that when the initial concentration increased, the adsorption rate increased very fast at the beginning, then gradually constant due to the equilibrium state. Further study adsorption isotherm of galingale showed that the adsorption behavior could be explained by Langmuir adsorption model. As for the quantity of adsorbent increase the experiments resulted in the second order model and the diffusion rate constant value of particle ( $k_p$ ) decreased when the quantity of adsorbent increase. The effects of temperature, the temperature of 25 °C exhibited the best result, compared to those at 35, 45 and 55 °C because of desorption rate increased when temperature increase and found this adsorption followed the second order model. The diffusion of the dye at low temperature was also better than that high temperature by comparing the  $k_p$  value. The activation energy was calculated to be 14.381 J/mol with the collision factor (A) of 0.8503. From the study of the thermodynamic properties, the adsorption process was exothermic process with physical adsorption that did not involve the exchange electrons.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และ ดร.สุชาสินี เนรมิตตคพงษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ คำปรึกษา คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ อาจารย์ บุญชัย โชติวิริยวณิชย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ข้อมูลและอุปกรณ์เกี่ยวกับสี

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ

คณะผู้จัดทำ

นายภูมรินทร์ รุ่งรัมย์พัฒน์

นายสรนันทน์ สามีคคี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 การดูดซับ.....	3
2.2 ประเภทของการดูดซับ.....	3
2.3 กลไกการดูดซับ.....	4
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	6
2.5 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	7
2.6 แบบจำลองการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่.....	8
2.7 ผลของอุณหภูมิ ต่ออัตราการดูดซับ.....	11
2.8 อัตราการดูดซับ.....	13
2.9 ผลของคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	14
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 การทดลอง.....	19
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	19
3.2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้.....	19
3.3 การดำเนินการทดลอง.....	20
1. การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีข้อม.....	20

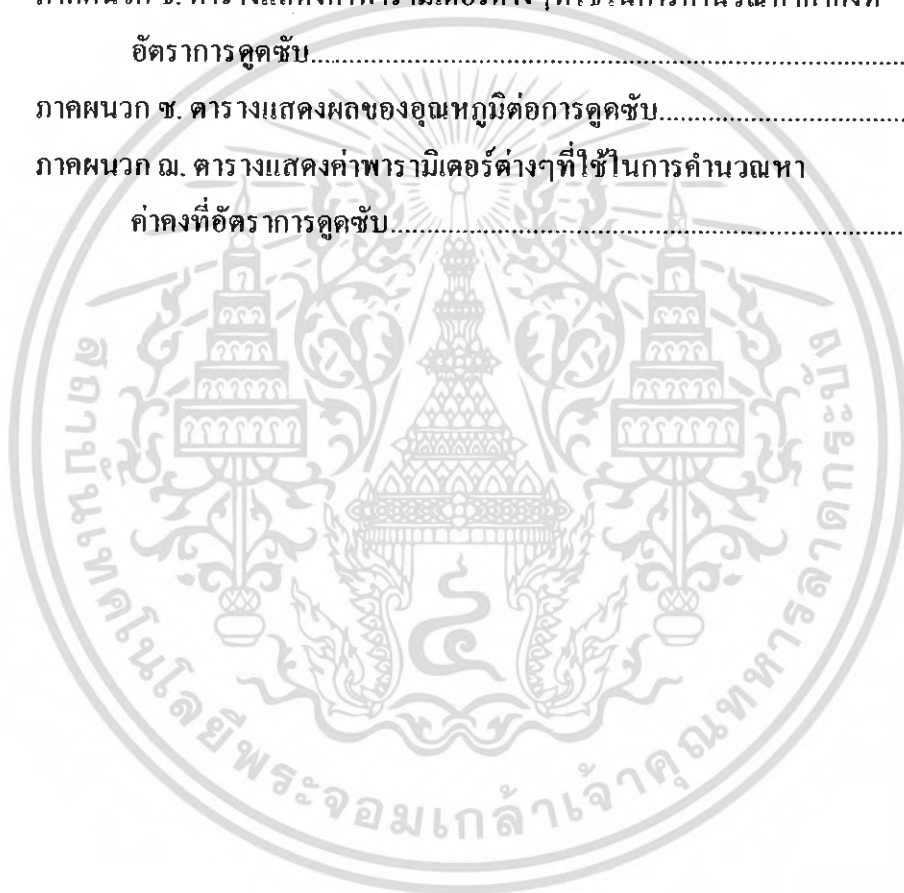
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2. การศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับ.....	20
3. การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ.....	21
4. การศึกษา Adsorption isotherm ของการดูดซับสีย้อมของดินข่า.....	21
5. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	21
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	22
4.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อการดูดซับ.....	22
4.2 การศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับ.....	24
4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ.....	24
4.4 การศึกษา Adsorption isotherm ของการดูดซับสีย้อมของดินข่า.....	28
4.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	38
เอกสารอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก.....	43
ภาคผนวก ก. องค์ประกอบทางเคมีของพืช.....	43
ก.1 เซลลูโลส (Cellulose).....	43
ก.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose).....	44
ก.3 ลิกนิน (Lignin).....	45
ภาคผนวก ข. สีย้อม.....	46
ข.1 คุณสมบัติของสีย้อม.....	46
ข.2 สัญลักษณ์ของสี.....	47
ข.3 การตั้งชื่อสี.....	48
ข.4 การจำแนกสีย้อม.....	49
ข.5 การย้อม.....	52
ข.6 แหล่งกำเนิดและลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.....	54
ภาคผนวก ค. การกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน.....	55
ภาคผนวก ง. การหาความเข้มข้นของสารละลายสี.....	59
ง.1 วิธีการสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน (Calibration Curve).....	59
ง.2 วิธีการหาค่าความเข้มข้นของสารละลายสี.....	59

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ง.3 กราฟเทียบมาตรฐาน.....	59
ภาคผนวก จ. ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm.....	61
ภาคผนวก ฉ. ตารางแสดงผลของการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับ.....	64
ภาคผนวก ช. ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ อัตราการดูดซับ.....	66
ภาคผนวก ซ. ตารางแสดงผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ.....	68
ภาคผนวก ฅ. ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหา ค่าคงที่อัตราการดูดซับ.....	71



# สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะโครงสร้างของสี Congo red .....	3
2.2 กลไกการดูดซับ.....	5
2.3 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแบบต่าง ๆ.....	7
2.4 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง.....	10
2.5 ลักษณะของ Freundlich adsorption isotherm .....	11
2.6 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่กับอุณหภูมิ .....	13
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e/c_e)$ กับ $1/T$ .....	15
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น กับเวลาโดยใช้ดินฆ่าเชื้อสี Congo Red ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	23
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณสีที่ย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนัก ตัวดูดซับกับเวลาโดยใช้ดินฆ่าเชื้อสี Congo Red ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	23
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้น เริ่มต้นกับเวลาโดยใช้ดินฆ่าเชื้อสี Congo Red ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	26
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณสีที่ย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนัก ตัวดูดซับกับเวลา โดยใช้ดินฆ่าเชื้อสี Congo Red ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	26
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น กับเวลาโดยใช้ดินฆ่าเชื้อสี Congo Red ที่ความอุณหภูมิต่าง ๆ.....	27
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณสีที่ย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนัก ตัวดูดซับกับเวลา โดยใช้ดินฆ่าเชื้อสี Congo Red ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	27
4.7 Adsorption isotherm ของตัวดูดซับขนาด Mesh number 20-60 ความเข้มข้นต่าง ๆที่อุณหภูมิห้อง.....	29
4.8 Langmuir adsorption isotherm ของดินฆ่า ขนาด Mesh number 20-60 ที่อุณหภูมิห้อง.....	29
4.9 Freundlich adsorption isotherm ของดินฆ่า ขนาด Mesh number 20-60 ที่อุณหภูมิห้อง.....	30
4.10 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินฆ่า ในแบบจำลอง อันดับหนึ่งที่มีปริมาณต่าง ๆ.....	32

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่า ในแบบจำลอง อันดับสองที่ปริมาณต่างๆ.....	32
4.12 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่า ในการแพร่ภายในตัวดูดซับที่ปริมาณต่างๆ.....	33
4.13 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่า ในแบบจำลอง อันดับหนึ่งที่อุณหภูมิต่างๆ.....	34
4.14 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่า ในแบบจำลอง อันดับสองที่อุณหภูมิต่างๆ.....	34
4.15 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่า ในแบบจำลองการแพร่ภายในตัวดูดซับที่อุณหภูมิต่าง.....	35
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ กับ $1/T$ ของสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่า ในแบบจำลองอันดับสองที่อุณหภูมิต่างๆ.....	36
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_c/C_c)$ กับ $1/T$ ของสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่า.....	36
ก.1 โครงสร้างของเซกดูโลส.....	43
ก.2 โครงสร้างของเฮมิเซกดูโลส.....	44
ก.3 โครงสร้างของลิกนิน.....	45
ง.1 กราฟเทียบมาตรฐานสารละลายสีย้อม Congo Red.....	60

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงค่าคงที่ของสมการ Langmuir และ Freundlich ของสารละลายสีข้อม Congo Red โดยต้นข้าขนาด Mesh number 20-60 .....	30
4.2 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ต้นข้าที่ปริมาณต่างๆ.....	33
4.3 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ต้นข้าที่อุณหภูมิต่างๆ.....	35
4.4 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red โดยใช้ต้นข้า.....	37
ง.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายสีข้อม Congo Red .....	60
จ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red โดยใช้ต้นข้า ขนาด Mesh number 20-60 ที่อุณหภูมิห้อง.....	61
จ.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red โดยใช้ต้นข้า ขนาด Mesh number 20-60 ที่อุณหภูมิห้อง.....	62
จ.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red โดยใช้ต้นข้า ขนาด Mesh number 20-60 ที่อุณหภูมิห้อง.....	63
ฉ.1 ผลของการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ต้นข้า ขนาด Mesh number 20-60 อุณหภูมิห้องที่ปริมาณต่าง ๆ.....	64
ฉ.2 ผลของการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ต้นข้า ขนาด Mesh number 20-60 อุณหภูมิห้องที่ปริมาณต่าง ๆ.....	65
ช.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ต้นข้า ขนาด Mesh number 20-60 อุณหภูมิห้อง ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	66
ช.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ต้นข้า ขนาด Mesh number 20-60 อุณหภูมิห้อง ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	67

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.1 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ดันท้าขนาด Mesh number 20-60 ปริมาณ 1 กรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ .....	68
ข.2 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ดันท้าขนาด Mesh number 20-60 ปริมาณ 1 กรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	69
ฉ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับ สารละลายสีข้อม Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ดันท้า ขนาด Mesh number 20-60 ปริมาณ 1 กรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	71
ฉ.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับ สารละลายสีข้อม Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ดันท้า ขนาด Mesh number 20-60 ปริมาณ 1 กรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	72

## สัญลักษณ์และคำย่อ

- $C$  : ความเข้มข้นของสารละลายที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- $C$  : ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- $C_0$  : ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- $E_a$  : พลังงานกระตุ้น (จูลต่อ โมล)
- $k_a$  : ค่าคงที่ของการดูดซับ (นาที<sup>-1</sup>)
- $k_d$  : ค่าคงที่ของการดูดคาย (นาที<sup>-1</sup>)
- $k_i$  : ค่าคงที่ของอัตราการแพร่ภายในโมเลกุลของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม.นาที<sup>0.5</sup>)
- $k_1$  : ค่าคงที่อัตราสำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (นาที<sup>-1</sup>)
- $K_A$  : ค่าคงที่สำหรับสมการแลงเมียร์
- $K_F$  : ค่าคงที่สำหรับสมการฟลอยลิต
- $n$  : ค่าคงที่
- $p$  : ความดันข้อ (บรรยากาศ)
- $p_0$  : ความดัน ไออัมตัว (บรรยากาศ)
- $q$  : ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- $q_m$  : ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- $q_t$  : ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- $q_1$  : ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล สำหรับการดูดซับ อันดับหนึ่ง (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- $q_2$  : ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่เวลาต่าง ๆ สำหรับการดูดซับ อันดับสอง (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- $r_a$  : อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด
- $r_d$  : อัตราการคายซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด
- $R$  : ค่าคงที่ของก๊าซ (จูลต่อ โมล.เคลวิน)
- $R^2$  : สัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบน
- $T$  : อุณหภูมิ (เคลวิน)
- $T$  : เวลา (นาที)
- $\theta$  : สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยตัวที่ถูกดูดซับต่อพื้นที่ผิวที่ใช้ดูดซับ
- $A$  : แฟกเตอร์ความถี่ของการชน
- $K_C$  : ค่าคงที่การดูดซับที่สภาวะสมดุล (ลิตร/มิลลิกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- $C_p$  : ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $q_s$  : ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)  
 $\Delta G$  : การเปลี่ยนแปลงพลังงานกิบส์ (จูล / โมล)  
 $\Delta H$  : การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (จูล/โมล)  
 $\Delta S$  : การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (จูล/โมล เคลวิน)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- $C_p$  : ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $q_c$  : ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)  
 $\Delta G$  : การเปลี่ยนแปลงพลังงานกิบส์ (จูล/โมล)  
 $\Delta H$  : การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (จูล/โมล)  
 $\Delta S$  : การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (จูล/โมล เคลวิน)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมของไทยได้มีการขยายตัวและเติบโตอย่างเห็นได้ชัดซึ่งกระบวนการทางอุตสาหกรรมหลายประเภทได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นผลกระทบที่ทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศ ทางน้ำ และทางพื้นดิน ซึ่งมลภาวะเหล่านี้ส่งผลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อมนุษย์ของทั้งสิ้น ทั้งที่มนุษย์เป็นผู้สร้างมลภาวะเหล่านั้นขึ้นมาเอง

น้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมจะมีสิ่งเจือปนประเภทต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ โลหะหนัก สี และอื่นๆ ลักษณะของน้ำเสียประเภทหนึ่งที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมก็คือ น้ำเสียที่เกิดจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อม

ในการกำจัดน้ำเสียที่มีสารเจือปนจำพวก สีฟอกย้อมอาจทำได้หลายวิธี แต่จะยกตัวอย่างเฉพาะการกำจัดน้ำเสียด้วยการดูดซับ โดยวิธีนี้มักนิยมใช้คาร์บอนกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ ซึ่งใช้ได้ผล ดีในการกำจัดน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม แต่ก็มีข้อเสียเนื่องมาจากราคาที่ค่อนข้างสูง และการนำไปใช้ก็มีกระบวนการค่อนข้างยุ่งยาก จึงจะมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการเหล่านั้นเพิ่มขึ้นมา

การนำวัสดุจากธรรมชาติที่หาได้ง่ายมาเป็นตัวดูดซับเป็นการปฏิบัติที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และยังเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับหลักเศรษฐกิจพอเพียงที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวได้ทรงพระราชดำริไว้แก่ปวงชนชาวไทย

โครงการนี้จึงทำการทดลองศึกษาการดูดซับสารละลาย Congo Red โดยใช้ตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือ ต้นข่าซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูก และมีอยู่จำนวนมากในประเทศไทย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red โดยใช้ต้นข่าซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรเป็นตัวดูดซับ
2. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมCongo Redปริมาณของตัวดูดซับที่มีต่อการดูดซับ
3. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red โดยใช้ต้นข่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ทำการทดลองเพื่อศึกษาการดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red โดยใช้ดินข่าเป็นตัวดูดซับ ขนาด Mesh number 20-60 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและผ่านการวิเคราะห์จากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV – Visible Spectrophotometer)

2. ทำการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรต่างที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีข้อม โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่

2.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 300 ppm ที่อุณหภูมิห้องในปริมาณดินข่า 1 กรัม

2.2 ผลของการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับ ในปริมาณ ดินข่าที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 1 จนถึง 5 กรัม ความเข้มข้น 40 ppm ที่อุณหภูมิห้อง

2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสีข้อม ที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45°C ที่ความเข้มข้น 40 ppm ในปริมาณดินข่า 1 กรัม

3. ทำการทดลองเพื่อหา Adsorption Isotherm ของการดูดซับด้วยดินข่าที่ความเข้มข้นต่างๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 750 ppm

4. ทำการทดลอง เพื่อศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ที่ปริมาณของตัวดูดซับ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 กรัม และที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25 35 และ 45°C โดยใช้ดินข่าเป็นตัวดูดซับขนาด Mesh number 20-60

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. เข้าใจหลักการ วิธีการ และขั้นตอนในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ
2. ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา และประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารละลายสีข้อมที่ถูกละลายออกมาค้ำน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม
3. เพื่อนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์
4. เรียนรู้การทำงานเป็นกลุ่ม การวางแผน การควบคุมการทำงาน และการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นขณะดำเนินโครงการ

## บทที่ 2

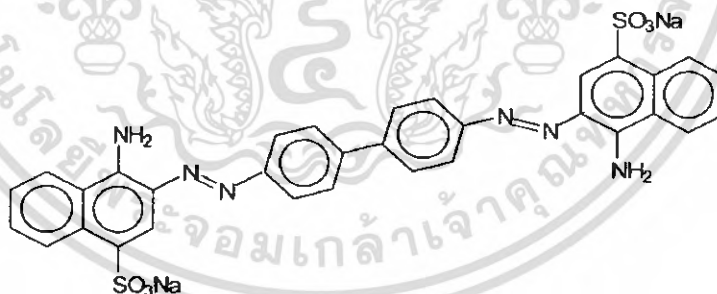
### ทฤษฎี

#### 2.1 การดูดซับ [1-3]

การดูดซับ คือ การที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารหนึ่งยึดติดอยู่กับผิวของสารอีกสารหนึ่ง โดยสารที่ไปยึดเกาะอยู่ผิวหน้าเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ตัวถูกดูดซับไปเกาะเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ปริมาณการดูดซับจะขึ้นกับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของตัวถูกดูดซับและของตัวดูดซับ พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ

การดูดซับยังเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจมากในด้านการบำบัดน้ำเสีย หรือการทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น เนื่องจากการดูดซับสามารถกำจัดสารที่ปนเปื้อนมากับน้ำได้ถึงระดับโมเลกุล ซึ่งการตกตะกอนและการกรองแบบธรรมดาไม่สามารถทำได้ โดยอาศัยความสามารถเฉพาะตัวของสารในการดึงโมเลกุลของสารปนเปื้อนให้มาเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ ปฏิกิริยาการดูดซับจะเกิดขึ้นระหว่างสองพื้นผิว (Surface) โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว

ซึ่งโครงสร้างที่ Congo red ( $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$ ) ที่ใช้ในการทดลอง มีลักษณะดังนี้



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของสี Congo red [41]

#### 2.2 ประเภทของการดูดซับ

แบ่งการดูดซับได้สองประเภท ตามลักษณะระหว่างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลคือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

##### 2.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การยึดติดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลผิวหน้าของตัวดูดซับจะเป็นแรงอ่อนข้างอ่อน เช่น แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) แรงไดโพล - ไดโพล (dipole-dipole interaction) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dipole forces) โดยโมเลกุลตัวดูดซับจะเหมือนเดิม

ลักษณะการเกาะจับด้วยแรงทางกายภาพ

1. เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม ลักษณะแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

2. เกิดจากหลักการที่ว่าโมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มาอยู่ด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะแบบเดียวกันเข้ามาใกล้จะเกิดแรงดึงดูดกัน แรงที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงอ่อน ๆ ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วทั้งคู่

3. เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเกิดการเหนี่ยวนำประจุตรงกันข้ามทำให้เกิดการดึงดูดกัน ลักษณะของการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวดูดซับเป็นโมเลกุลที่มีขั้วและโมเลกุลของตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว

### 2.2.1 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เกี่ยวข้องกับแรงหรือพันธะเคมี ของตัวดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี การเกาะของตัวดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับจะเหมือนกับแรงที่ใช้ในการยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมภายในโมเลกุล การดูดซับทางเคมีต้องอาศัยพลังงานเข้าร่วมด้วย

ข้อแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพ ไม่มีการถ่ายเทหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน สามารถผันกลับได้ที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่การดูดซับทางเคมีจะผันกลับไม่ได้

2. การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดได้ทั่ว ๆ ไปบนผิวตัวดูดซับไม่มีบริเวณจำเพาะ ภายใต้อุณหภูมิและความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการดูดซับได้หลายชั้น การดูดซับทางเคมีจะเกิดในบริเวณจำเพาะเท่านั้น

3. ความร้อนที่ได้จากการดูดซับทางกายภาพจะน้อยกว่าการดูดซับทางเคมีทางเคมี

### 2.3 กลไกการดูดซับ [2,3,5]

กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 3 ระยะดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือ

1. โมเลกุลของตัวดูดซับจะไปเกาะที่ผิวรอบนอก

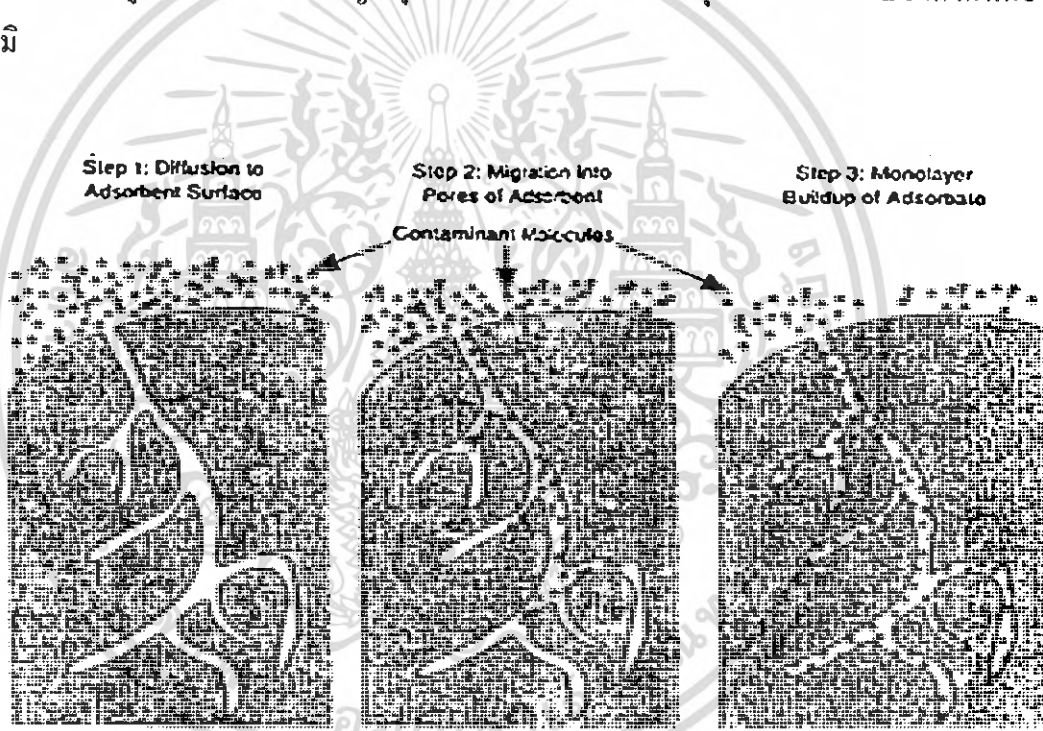
2. โมเลกุลของตัวดูดซับจะถูกดูดซับและแพร่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

3. เกิดการดูดซับในรูพรุน ระหว่างตัวดูดซับและพื้นที่ผิวเกิดทั้งแรงทางกายภาพและทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับเกิดขึ้นอย่างเป็นขั้นตอน ในขั้นตอนแรกการแพร่กระจายในโมเลกุลของก๊าซ และเข้าไปสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ ในขั้นตอนที่สอง โมเลกุลของสารพิษจะเคลื่อนที่จากพื้นผิว เหล็กๆของผิวหน้าออกไปยังโพรงช่องว่างภายในของสารดูดซับ การดูดซับจะเกิดในโพรงช่องว่าง เหล่านี้เพราะความเหมาะสมระหว่างรูปร่างของโมเลกุลของก๊าซและไอกับลักษณะของพื้นผิวของ สาร คือ พื้นที่ในขั้นตอนที่สาม โมเลกุลของสารมลพิษจะเกาะติดที่ผิวในโพรงช่องว่าง ดังแสดงใน รูปที่ 2.2

การดูดซับที่สมดุล คือการจัดให้อยู่ในสภาพที่อัตราการเคลื่อนที่หนีจากผิวสารของสารดูด ซับของโมเลกุลของก๊าซหรือไอเท่ากับอัตราที่เคลื่อนเข้าไปในผิวของสารดูดซับ การวัดปริมาณ ไอ ที่มากที่สุดที่อาจถูกดูดซับ อยู่ที่การกำหนดสภาพการทำงาน ถึงแม้ว่าจำนวน โมเลกุลจะมีผลต่อการ เปลี่ยนแปลงการดูดซับ แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดสำหรับระบบการควบคุมสำหรับมลพิษอากาศนี้คือ อุณหภูมิ



รูปที่ 2.2 กลไกการดูดซับ

โดยปกติทั่วไป ข้อมูลในการดูดซับ Adsorption isotherm ซึ่ง isotherm คือเส้นกราฟแสดง ความสามารถของสารดูดซับกับความดันของสารมลพิษ ที่อุณหภูมิคงที่ประสิทธิภาพของสารดูด ซับปกติให้อยู่ในรูปร้อยละของน้ำหนักหรือเป็นกรัม

## 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Factors affecting adsorption) [1,2,5]

### 2.4.1 สมบัติของตัวดูดซับ

#### 1. พื้นที่และโครงสร้างของรูพรุน (surface area and pore structure)

ความสามารถในการดูดซับมากขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวมากขึ้น โครงสร้างของรูพรุนมีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น แต่ขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุน ความสามารถในการดูดซับลดลง

#### 2. ขนาดของตัวดูดซับ (Adsorption size)

ตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลงซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ถ้ารูพรุนมีมากการดูดซับจะขึ้นกับรูพรุนมากกว่าขนาด

### 2.4.2 สมบัติของตัวถูกดูดซับ

#### 1. ความสามารถในการละลาย

ความสามารถในการละลาย เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จะถูกดึงออกจากรูพรุนไปเกาะติดกับตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ข่อมมีแรงยึดติดเหนียวกับน้ำ ได้อย่างเหนียวแน่นจึงถูกดูดซับ ได้ยาก ตัวถูกดูดซับที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยสามารถเกาะ ติดตัวดูดซับ ได้ดีต่ำกว่านี้ไม่เป็นจริงเสมอไป

#### 2. น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล

น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลส่งผลให้ความสามารถในการละลายลดลง

#### 3. ความมีขั้วของโมเลกุล

ความมีขั้วของโมเลกุล ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพมีขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้นเพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มมากขึ้น

### 2.4.3 อุณหภูมิ

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับก็เพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับก็จะลดลง เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแบบคลายความร้อน

### 2.4.4 เวลา

เวลาเป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสำหรับการบำบัดน้ำเสียซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสจะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับในการกำจัดที่ที่ดีที่สุด ทั้งนี้ ทั้ง นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ และสารถูกดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้จริง

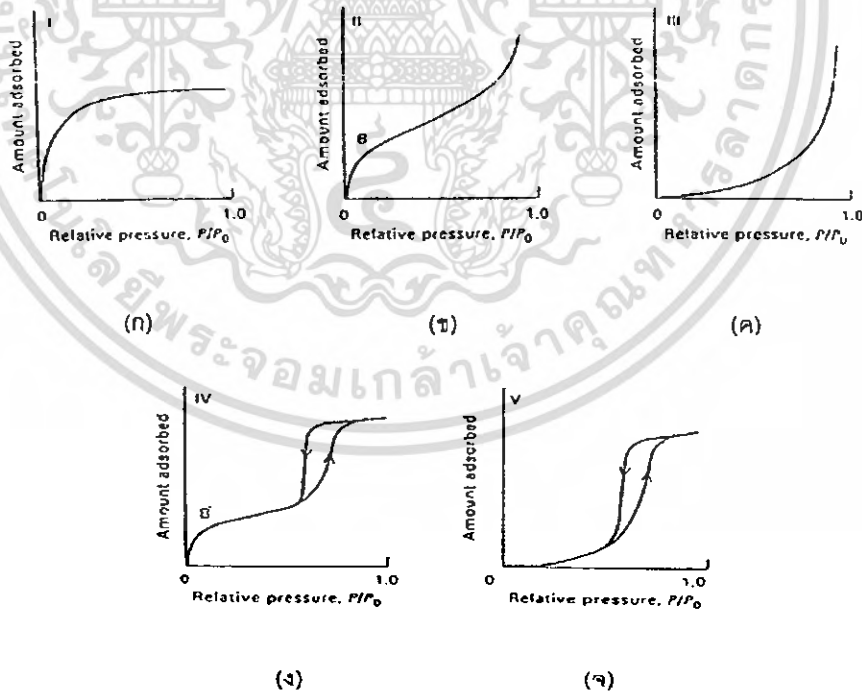
## 2.5 ไอโซเทอมของการดูดซับ ( Adsorption isotherm ) [1-3,5-6,]

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับและความเข้มข้นของสารที่ถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย ในสภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ไปเขียนกราฟกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับซึ่งสามารถนำไปใช้หาความสามารถของตัวดูดซับ ในการดูดซับสารและสามารถใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพ ในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้ ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

1. Langmuir ได้มาจาก Langmuir equation isotherm รูปร่างไอโซเทอมที่พบบ่อยในตัวดูดซับที่มีรูพรุนที่มีขนาดเล็กมาก และมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อยมาก การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ดังรูป 2.3 ก

2. S-shaped isotherm หรือ sigmoid จะพบในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ มีการดูดซับเพียงชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์ ดัง รูปที่ 2.3 ข จุด B จะเป็นตำแหน่งที่มีการดูดซับเพียงชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์และเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น

3. Convex isotherm เกิดขึ้นในกรณีที่มีการดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีแรงดึงดูดที่อ่อน ทำให้ตัวถูกดูดซับ ไม่เปียกผิวของตัวดูดซับ เช่น ใช้น้ำบนกราไฟต์ ดัง รูปที่ 2.3 ค



รูปที่ 2.3 ลักษณะเส้น ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแบบต่าง ๆ [2]

4. เหมือนกับแบบ sigmoid จะพบในตัวดูดซับที่มีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 2-50 นาโนเมตรที่ค่า  $P/P_0$  ต่ำลักษณะเส้น ไอโซเทอมจะเหมือนกับแบบ sigmoid เมื่อค่า Capillary condensation มีค่าเพิ่มขึ้นจะเกิด Capillary condensation ขึ้นซึ่งจะทำให้เกิด Hysteresis effect ขึ้น ดังรูปที่ 2.3ง. ไอโซเทอมชนิดนี้จะพบกับตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม

5. เหมือนกับแบบ Convex isotherm แต่จะเกิด Capillary condensation ที่ค่า  $P/P_0$  สูง ๆ ไอโซเทอมชนิดนี้จะพบได้ยาก ดังรูปที่ 2.3จ

## 2.6 แบบจำลองการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Models for adsorption isotherm) [5]

สามารถใช้ได้ทั้งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี แต่มีข้อกำหนดดังนี้

1. จะต้องมีความสมดุลที่แท้จริง
2. การดูดซับสามารถผันกลับได้ โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในตัวถูกดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อทำการดูดซับและการคายหลายๆ ครั้ง

ระบบดูดซับได้ถูกวิเคราะห์ด้วยทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ให้อยู่ในรูปแบบสมการอย่างง่าย แล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ ได้ ซึ่งเป็นแนวทางที่นำมาใช้ในการคำนวณ ออกแบบระบบดูดซับ การวิเคราะห์ระบบดูดซับได้มีผู้วิเคราะห์คือ Langmuir และ Freundlich

### 2.6.1 แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

Langmuir Isotherm เป็น Isotherm อีกหนึ่งทางเลือกที่นิยมใช้สำหรับอธิบายสมดุลในการดูดซับและยังเป็นพื้นฐานของการดูดซับแบบอื่นๆ เป็น Isotherm ที่พบมากในในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากโดยใน Langmuir Isotherm นี้เราจะตั้งสมมติฐานว่า

1. ที่ทุกตำแหน่งผิวสัมผัส สามารถดูดซับโมเลกุลได้
2. ไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในแนวระนาบบนพื้นที่ผิวตัวถูกดูดซับหรือไม่คิดแรงกระทำระหว่างตัวถูกดูดซับ
3. พลังงานกลไกของการดูดซับทุก ๆ โมเลกุลบนผิวตัวดูดซับเกิดขึ้นเหมือน ๆ กัน โดยที่การดูดซับ เป็นกระบวนการผันกลับได้ ไม่คิดถึงพลังงานที่ใช้ในการดูดซับหรือการคายซับ (พลังงานในการดูดซับคงที่)
4. การดูดซับโมเลกุลในแต่ละพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวที่ทำให้เกิด การดูดซับที่จำกัด หรือกล่าวได้ว่าตัวถูกดูดซับจะมีการจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ โดยถ้าบนพื้นที่ผิวนี้เต็มทำให้อัตราการดูดซับจะเท่ากับอัตราการปล่อย adsorbate ออกจากพื้นผิว (desorption หรือการคายซับ) ถ้ากำหนดให้

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

โดยที่  $\theta$  คือ สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยตัวที่ถูกดูดซับต่อพื้นที่ผิวที่ใช้ดูดซับ  
 $q$  คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ  
 $q_m$  คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ณ.สภาวะสมดุล  
 อัตราการดูดซับต่อพื้นที่ทั้งหมด

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

โดยที่  $k_a$  คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ (นาที<sup>-1</sup>)  
 $C$  คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 อัตราการคายซับต่อพื้นที่ทั้งหมด

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

โดยที่  $k_d$  คือ ค่าคงที่ของการคายซับ (นาที<sup>-1</sup>)  
 ที่สภาวะสมดุลอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ

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

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

กำหนดให้

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

จะได้สมการ

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

จัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้เป็น

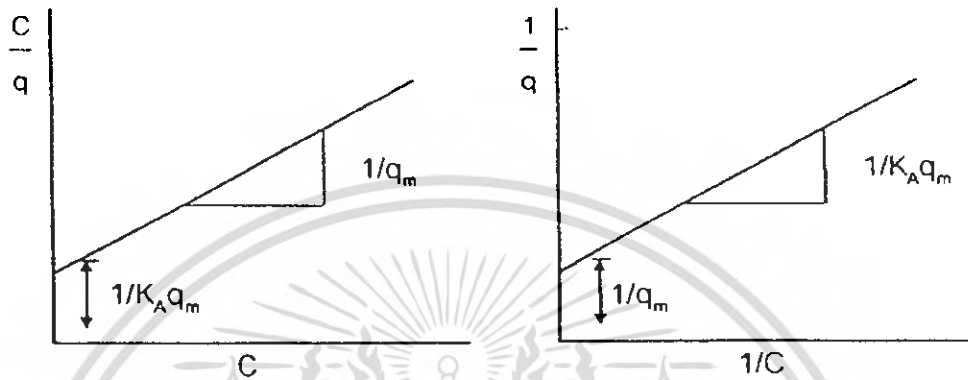
$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \left( \frac{1}{K_A q_m} \right) \left( \frac{1}{C} \right) \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

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

ค่า  $q_m$  และค่า  $K_A$  สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกนของกราฟที่ รูป 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง

### 2.6.2 แบบจำลองการดูดซับฟรุนลิค (Freundlich adsorption isotherm)

สมการของ Freundlich adsorption isotherm สมการสำหรับระบบดูดซับ ซึ่งสมการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจางและมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ

ข้อสมมุติฐานของ Freundlich isotherm

1. การดูดซับโมเลกุลในแต่ละพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวที่ทำให้เกิดการดูดซับที่ไม่จำกัด หรือกล่าวได้ว่า เป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับจะมีการจัดเรียงซ้อนกันหลายชั้น บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับด้วยพันธะอ่อนๆ

2. มีความร้อนของการดูดซับซึ่งจะมีค่าลดลงเป็นลักษณะเส้นโค้ง เมื่อปริมาณผิวหน้าที่ไม่ว่างมีค่าเพิ่มขึ้น

สามารถเขียนสมการการดูดซับของฟรุนลิค ได้ดังนี้

$$q = K_f C^{1/n} \quad (2.10)$$

$K_f$  คือ ค่าคงที่ของ Freundlich

$n$  คือ ค่าคงที่

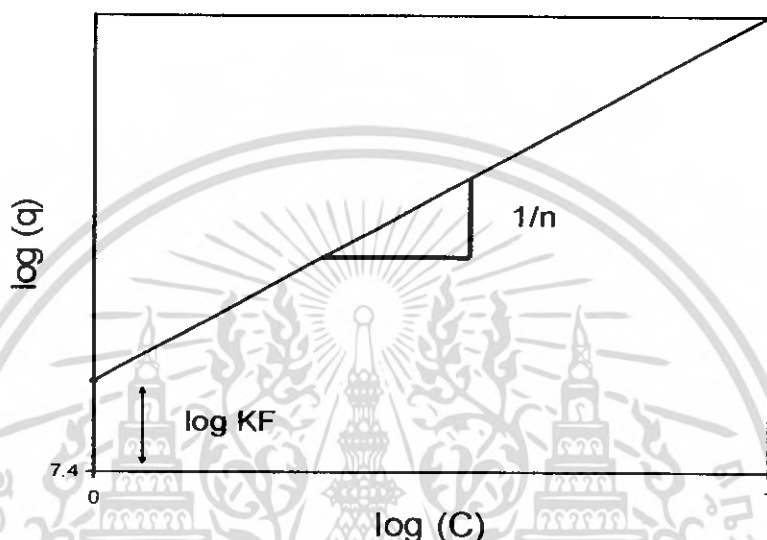
เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า  $K_f$  และ  $n$  ได้ด้วยวิธีการกราฟ จึงจำเป็นต้องใช้

Logarithm มาจัดรูปสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\log q = \log K_f + \frac{1}{n} \log C \quad (2.11)$$

จากสมการ(2.11) ถ้าเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้เส้นตรงซึ่งสามารถหาค่า  $K_f$  และ  $n$  ได้จาก จุดตัดแกนและความชันของเส้นตรง ดังแสดงใน รูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของ Freundlich adsorption isotherm [5]

## 2.7 อัตราการดูดซับ

ในการทดลองศึกษาการดูดซับสีย้อม จะใช้แบบจำลอง 3 แบบในการทดสอบ คือ

1. แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง
2. แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง
3. แบบจำลองการแพร่ภายในตัวดูดซับ

### 2.7.1 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง

สมการแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_1 - q_t) \quad (2.12)$$

ทำการอินทิเกรตจาก

$$t = 0 \longrightarrow t = t$$

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

$$\log(q_1 - q_t) = \log(q_1) - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $q_1$  คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)  
 $q_t$  คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/กรัม)  
 $k_1$  คือ ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/นาที)  
 $t$  คือ เวลา (นาที)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง  $\log(q_1 - q_t)$  กับ  $t$  จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่าได้  $k_1$  ได้จากความชัน

### 2.7.2 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง

สมการแบบจำลองการดูดซับอันดับสองสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_2 - q_t)^2 \quad (2.14)$$

ทำการอินทิเกรตจาก

$$t = 0 \longrightarrow t = t$$

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

$$\frac{1}{(q_2 - q_t)} = \frac{1}{q_2} + k_2 t \quad (2.15)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_2^2} + \frac{1}{q_2} t \quad (2.16)$$

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

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง  $t/q_t$  กับ  $t$  จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่าได้  $k_2$  ได้จากจุดตัดแกน y

### 2.7.3 แบบจำลองการแพร่ภายในตัวดูดซับ

สมการจำลองการแพร่ภายในตัวดูดซับสามารถเขียนได้เป็น

$$q_t = k_p t^{0.5} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $q_i$  คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/กรัม)

$k_i$  คือ Intraparticle differential rate constant (มิลลิกรัม/กรัม นาที<sup>0.5</sup>)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง  $q_i$  กับ  $t^{0.5}$  จะได้เส้นตรง จะได้เส้นตรงที่มีความชัน =  $k_i$

## 2.8 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ [4,8,12]

ผลของอุณหภูมิที่มีผลที่มีต่ออัตราการดูดซับ พบว่าค่าคงที่อัตราขึ้นกับอุณหภูมิ เอส อาร์เรเนียส (S.Arrhenius) เป็นผู้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $k$  กับ  $t$  ดังนั้น

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (2.18)$$

โดยที่  $A$  คือ แฟกเตอร์ความถี่ของการชน

$E_a$  คือ พลังงานกระตุ้น (จูล/โมล)

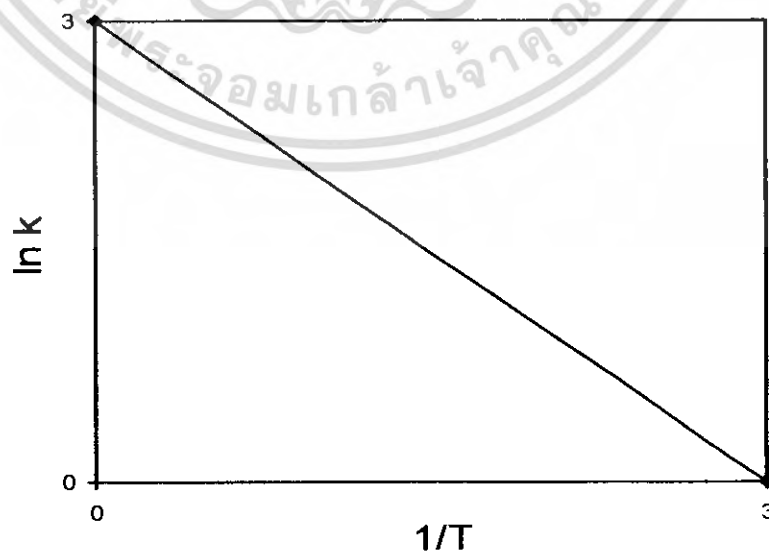
$R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่า = 8.3143 (จูล/โมล เคลวิน)

$T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

เมื่อเขียนสมการที่ (2.12) ในรูปของลอการิทึม จะได้

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (2.19)$$

เมื่อนำสมการ (2.13) มาเขียนกราฟระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  จะได้เส้นตรงตามรูปที่ 2.6 สามารถหาค่า  $E_a$  ได้จากความชันของกราฟ



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่กับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 ผลของอุณหภูมิทางเทอร์โมไดนามิกส์ [42,43,44]

ในกระบวนการการดูดซับความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมินั้นถือว่าเป็นอีกตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการดูดซับ และยังเป็นตัวแปรที่ควรจะนำมาพิจารณาในกระบวนการดูดซับ โดยปกติแล้วกระบวนการดูดซับที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีความเข้มข้นลดลงนั้นจะเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic) ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของ เลอ ชาตอลิเออร์ (Le Chatelier's Principle) โดยผลของอุณหภูมินั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics Parameters) ดังสมการต่อไปนี้

$$K_c = \frac{C_e}{q_e} \quad (2.20)$$

$$\Delta G = -RT \ln K_c \quad (2.21)$$

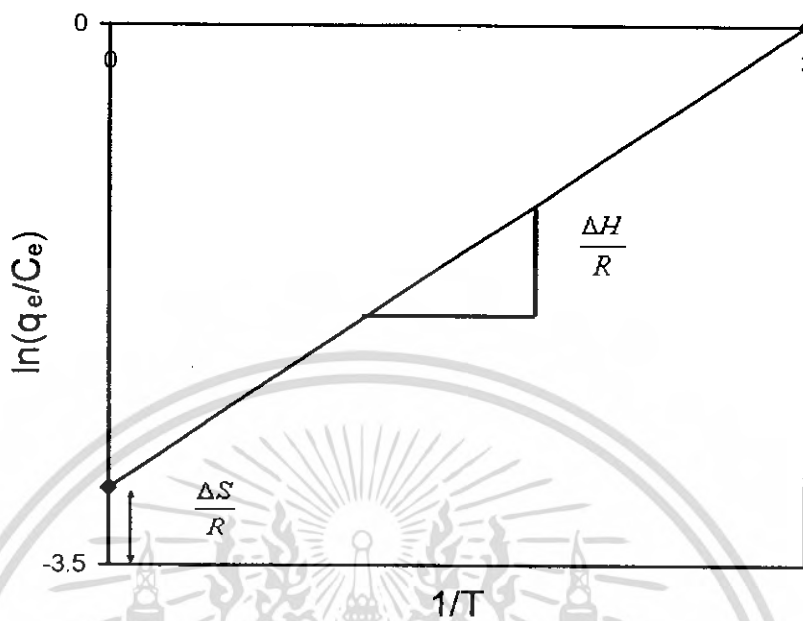
โดยที่  $K_c$  คือ ค่าคงที่การดูดซับที่สภาวะสมดุล (ลิตร/มิลลิกรัม)  
 $C_e$  คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $q_e$  คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)  
 $\Delta G$  คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy change) (จูล / โมล)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.22)$$

โดยที่  $\Delta H$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (จูล/โมล)  
 $\Delta S$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (จูล/โมล เคลวิน)  
 นำสมการที่ (2.21) และ (2.22) แทนลงในสมการที่ (2.23) จะได้

$$\ln\left(\frac{q_e}{C_e}\right) = -\frac{\Delta H}{R}\left(\frac{1}{T}\right) + \frac{\Delta S}{R} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.23) นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(q_e/C_e)$  กับ  $1/T$  สามารถหาค่า  $\Delta H$  และ  $\Delta S$  ได้



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(q_e/C_e)$  กับ  $1/T$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gang Sun และ Xiangjing Xu [25] ใช้ก้านดอกทานตะวันในการดูดซับสี 2 ประเภทได้แก่ Basic dyes (Methylene Blue และ Basic Red 9) และ Direct dyes (Congo Red และ Direct Blue 71) พบว่าก้านดอกทานตะวันสามารถดูดซับสีประเภท Basic dyes ได้ในปริมาณสูงกว่า Direct dyes มาก นอกจากนี้แกนกลางของก้านดอกทานตะวันซึ่งมีลักษณะอ่อนนุ่มและมีรูพรุนมากก็สามารถดูดซับสีได้ดีกว่าส่วนอื่น ๆ และขนาดของก้านดอกทานตะวันที่ใช้ดูดซับก็มีผล คือ ยิ่งมีขนาดเล็กยิ่งดูดซับได้ดี เพราะมีพื้นที่ผิวมาก

Mamdouh M. Nassar , Ychia H, Magdy [27] ใช้ผลปาล์มดูดซับสี Basic dyes 3 ชนิด ได้แก่ Yellow dye, Red dye, และ Blue dye พบว่าผลปาล์มมีประสิทธิภาพในการดูดซับ Yellow dye ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ Red dye และ Blue dye ตามลำดับและเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดูดซับ (คิดจากปริมาณที่สามารถดูดซับได้เท่านั้น) พบว่าค่าใช้จ่ายในการดูดซับ Yellow dye เท่ากับ 1.9 % Red dye เท่ากับ 4.4 % Blue dye เท่ากับ 7.1 % เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คาร์บอนกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ

วิภาดา นวลฉวี และคณะ [5] ใช้ผงผักคชชาในการดูดซับสีโครเมียม ซึ่งได้แก่สี Sirius Red F3B (CI 35780) , Sirius Red Violet RL (CI 2540) , Sirius Blue S-BRR (CI 34140) และ Sirius Orange K-CF (CI 40215) โดยทำการเปรียบเทียบผลการดูดซับระหว่าง ผักคชชาและคาร์บอนกัมมันต์ (ถ่านไม้โกงกาง) พบว่าผักคชชาจะมีการดูดซับที่สูงกว่า ยกเว้นสี Sirius Orange K-CF ที่ทำการดูดซับจากความเข้มข้นเริ่มต้น 25.00 ppm ให้เหลือความเข้มข้นน้อยกว่า 4 ppm ถ่านไม้โกงกางจะมีประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าสี Sirius Red F3B มีโครงสร้างใหญ่ที่สุดจึงมีประสิทธิภาพในใกล้เคียงกับการดูดซับสีน้อยที่สุด ส่วนสีชนิดอื่น ๆ นั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับสี

Poots และคณะ [31] ได้ทำการทดลองใช้ไม้ในการดูดซับสี Tcon Blue (Acid Blue 25) โดยทำการศึกษาผลของเวลาในการสัมผัส ขนาดของอนุภาคและความสามารถในการดูดซับ พบว่าแม้ว่าในการดูดซับ Acid dyes ด้วยไม้จะใช้เวลาในการสัมผัสนานกว่าจะถึงสมดุลแต่ก็มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีได้ดี

Asfour และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาสภาวะสมดุลของการดูดซับสีย้อมประเภทสี Basic dyes โดยใช้ขี้เลื่อยจากไม้เนื้อแข็งเป็นสารดูดซับ โดยทำการทดลองเป็น 2 ชุด ให้มีขนาดอนุภาคและอุณหภูมิต่างกัน พบว่าการดูดซับของสีย้อมประเภทสี Basic dyes โดยใช้ขี้เลื่อยเป็นสารดูดซับสามารถแสดงความสัมพันธ์ทางไอโซเทอม (Isotherm) ของ Langmuir และ Freundlich ได้เป็นอย่างดีและความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดอนุภาคลงและเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายขึ้น นอกจากนี้ขี้เลื่อยยังมีราคาเพียงร้อยละ 8.4 ของราคาคาร์บอนกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้เห็นใช้ระบบระบบออนไลน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Asfour และคณะ [19] ได้ทำการทดลองกำจัดสีข้อมประเภทสี Basic dyes โดยใช้ซีลีเยอจากไม้เนื้อแข็งเป็นสารดูดซับ พบว่าที่อุณหภูมิ 80 ° C การกำจัดสีจะใช้เวลา 100 นาที โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่ใช้เท่ากับ 200 มิลลิกรัม/ลิตร และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 ° C เป็น 80 ° C เวลาในการสัมผัส (Contact time) จะลดลงร้อยละ 44

Lee Aik [32] ได้ทดลองหาผลของการใช้ซีลีเยอเป็นสารดูดซับ เพื่อดูดซับสีข้อมจากโรงงานฟอกข้อมสิ่งทอ ซึ่งเป็นวิธีบำบัดแบบฟิสิกส์-เคมี สีข้อมที่ใช้คือ Congo Red ซึ่งเป็นสีประเภท Direct dyes ทำการทดสอบกับไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง โดยแสดงผลการกำจัดสีในเทอมของ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลงและความสามารถในการดูดซับเมื่อใช้ไม้เนื้อแข็งจะสูงกว่าใช้ไม้เนื้ออ่อนเป็นสารดูดซับ

พัชร คำธิดา และคณะ [30] ศึกษาดินฟอกสีที่ใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันถั่วเหลืองมาผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันออกด้วยสารละลายเฮกเซนแล้วนำมาใช้ดูดซับสีอินทรีย์ซึ่งได้แก่ Basic Blue , Basic Yellow , Acid Blue และ Acid Red โดยพบว่าดินฟอกสี HSBE มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีอินทรีย์ประเภท Basic dyes ได้ดีกว่า Acid dyes โดยสภาวะที่เป็นกลางและเบสเหมาะสมกับการดูดซับสีอินทรีย์ประเภท Basic dyes ในขณะที่สภาวะที่เป็นกรดเหมาะต่อการดูดซับสีอินทรีย์ประเภท Acid dyes สำหรับปริมาณดินฟอกสี HSBE ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีอินทรีย์ประเภท Basic dyes คือ 5 กรัมและสำหรับ Acid dyes คือ 50 กรัม

กานดา ใจดี [33] ศึกษาโคโคแซนที่สกัดจากเปลือกกุ้งมาทำการดูดซับสี โดยสีที่ใช้ได้แก่สี DIANIX RED 2 BSL-FS 150 Dystar, Dystar Thai Ltd. พบว่าหากนำโคโคแซนมาผสมกับผลคาร์บอนกัมมันต์ 3 % โดยน้ำหนักจะทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับโดยโคโคแซนมาผสมกับผงคาร์บอนกัมมันต์ 3 % โดยน้ำหนักกับการใช้ผงคาร์บอนกัมมันต์อิสระเป็นตัวดูดซับจะได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันและพบว่าสำหรับสารละลายสีข้อมผ้าที่มีสภาพเป็นกรด ทั้งโคโคแซนและคาร์บอนกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีขึ้น

อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์ [6] ศึกษาซีลีเยอลอยลิกไนต์ในการดูดซับสีจากน้ำสังเคราะห์ โดยเตรียมจากสีข้อมผ้าประเภทต่าง ๆ ดังนี้ Acid dyes (Nylosan blue N-GL และ Telon Blue AFN) , Reactive dyes (Drim. Blue X-3LR และ Levafix Blue E-GRN) , Sulphur dyes (Sulgholsol Black SG) , Direct dyes (Indosol Rubine SF-RGN และ Sirius Supra Red F3B) , Basic dyes (Apollofix Red SF-3B) , Disperse dyes (Foron Blue S-R) และ Pigment dyes (Acramin Blue FFG) โดยพบว่าค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายสีในช่วง 4-8 ไม่ค่อยมีการดูดซับสีข้อมใน Acid Red มีแนวโน้มจะถูกดูดซับได้ดีในช่วงที่เป็นกรด ส่วนการเพิ่มของอุณหภูมิในการทดลองจะพบว่า ทำให้การดูดซับสีดีขึ้นเล็กน้อยถึงดีมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสีแต่ละชนิดและพบว่าซีลีเยอลอยลิกไนต์สามารถดูดซับสีส่วนใหญ่ได้ดี เมื่อนำไปใช้ในระบบ Continuous treatment แต่เมื่อนำซีลีเยอลอยลิกไนต์ไปใช้

จริงในการดูดซับสีจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม และพบว่าสามารถลดความเข้มข้นสีที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งได้เพียงเล็กน้อยและมีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้ประมาณร้อยละ 20 ซึ่งเป็นค่าที่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้

ราตรี ปิ่นทอง และคณะ [34.] ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อม Methylene Blue และ Congo Red โดยใช้ดินข้าวโพดและดินมันสำปะหลัง จากการทดลองพบว่าดินข้าวโพดมีความสามารถในการดูดซับดีกว่าดินมันสำปะหลัง และ Methylene Blue ถูกดูดซับได้ดีกว่า Congo Red ผลการศึกษา Isotherm เป็นไปตามแบบจำลองของ Langmuir isotherm และมันสำปะหลังจะดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับของข้าวโพดจะลดลง การศึกษาจลนพลศาสตร์ พบว่าเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง

นันทิมา จงเทพ และคณะ [35.] ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ ดินข่า ช้างข้าวโพด ต้นผักตบชวา ต้นบอน ต้นกล้วย จากการทดลองพบว่าดินข่ามีความสามารถในการดูดซับได้ดีที่สุดตามลำดับผลการศึกษา Isotherm เป็นไปตามแบบจำลองของ Langmuir isotherm

จตุพร โทงว่ง และคณะ [36.] ทำการวิจัยโดยใช้ผักตบชวา โสน และบอน ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยศึกษาระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม ค่า pH ประสิทธิภาพในการดูดซับ จากการทดลองพบว่า ผักตบชวา และบอนสามารถดูดซับได้ดี ที่สุด 4 วัน ส่วน โสนดูดซับได้ดีที่ 3 วัน และที่ pH 7 จะเหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลของผักตบชวา ที่ pH 5 จะเหมาะสมสำหรับการดูดซับของบอนและโสน Isotherm ของการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองของ Freundlich isotherm

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องยวี่ – วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV – Visible Spectrophotometer)
2. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
3. เครื่องกวน
4. เครื่องปั่นสาร
5. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) 50 100 250 500 และ 1000 ml
6. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) 125 และ 250 ml
7. บีกเกอร์ (Beakers) 50 100 250 500 และ 1000 ml
8. ช้อนตักสาร (Spatula)
9. หลอดหยอด (Dropper)
10. หลอดทดลอง (Test tube)
11. ที่ใส่หลอดทดลอง (Rack)
12. แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)
13. ขวดฉีดน้ำกั้น (Wash bottom)
14. กรวย (Funnel)
15. ปิเปต (Pipet) 1, 5 และ 10 ml
16. หลอดและเข็มฉีดยา
17. นาฬิกาจับเวลา
18. ถ้วยกระเบื้อง
19. ตู้อบ (Oven)
20. โถดูดความชื้น (Desiccators)
21. Magnetic bar
- 2.2 Water Bath (อ่างควบคุมอุณหภูมิ)

#### 3.2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้

1. ต้นข้าว
2. สี Congo red

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การดำเนินการทดลอง

#### ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับ

1. นำดินข่า มาล้างให้สะอาดแล้วหั่นให้เป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นสารจนละเอียด
2. นำตัวดูดซับ ที่ได้ไปล้างด้วยน้ำสะอาด จนกว่าสีของน้ำล้างที่ได้จะใส
3. นำตัวดูดซับไปอบในตู้อบ (Oven) จนแห้งที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 วัน จะได้ตัวดูดซับที่แห้ง
4. นำตัวดูดซับที่แห้งแล้วมาคัดขนาด Mesh number 20-60 จากนั้นนำไปเก็บในโถดูดความชื้น (Desiccators) เพื่อทำการทดลองต่อไป

#### การทดลองตอนที่ 1 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

1. เตรียมสารละลายสี Congo red ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ตั้งแต่ 30 60 90 180 และ 300 ppm ในปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
2. ชั่งดินข่าขนาด Mesh number 20-60หนัก 1 กรัม ใส่ลงไปในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
3. นำไปปั่นจนที่ความเร็วรอบเท่ากัน ที่อุณหภูมิห้อง จับเวลา แล้วเก็บสารละลายตัวอย่างที่เวลาต่างๆ นำมาวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง บันทึกผลการทดลอง จนครบ 3 ชั่วโมง
4. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง นำผลที่ได้สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C/C_0$ ) กับเวลา ( $t$ )

#### การทดลองตอนที่ 2 การศึกษา Adsorption isotherm

1. เตรียมสารละลายสี Congo red ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 750 ppm ในปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
2. ชั่งดินข่าขนาด Mesh number 20-60หนัก 1 กรัม ใส่ลงไปในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
3. นำไปปั่นจนที่ความเร็วรอบเท่ากัน ที่อุณหภูมิห้อง จับเวลา แล้วเก็บสารละลายตัวอย่างที่เวลาต่างๆ นำมาวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง บันทึกผลการทดลอง จนครบ 3 ชั่วโมง
4. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง นำผลที่ได้สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกราฟความเข้มข้นระหว่างปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ ( $q$ ) กับเวลา ( $t$ ) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลอง Langmuir isotherm และแบบจำลอง Freundlich isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทดลองตอนที่ 3 การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ

1. เตรียมสารละลายสี Congo red ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ตั้งแต่ 40 ppm ในปริมาตร 500 มิลลิลิตรใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
2. ชั่งต้นขำขนาด Mesh number 20-60 นก 1 2 3 4 และ 5 กรัม ใส่ลงไปในบีกเกอร์
3. นำไปปั่นกวนที่ความเร็วรอบเท่ากัน ที่อุณหภูมิห้อง จับเวลา แล้วเก็บสารละลายตัวอย่างที่เวลาต่างๆ นำมาวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง บันทึกผลการทดลองจนครบ 3 ชั่วโมง
4. นำผลที่ได้จากการทดลองในปริมาณต่างๆมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ( $c/c_0$ ) กับเวลา ( $t$ ) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีที่ยอมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ ( $q$ ) กับเวลา ( $t$ )

### การทดลองตอนที่ 4 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ

1. เตรียมสารละลายสี Congo red ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ตั้งแต่ 40 ppm ในปริมาตร 500 มิลลิลิตรใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
2. ชั่งต้นขำขนาด Mesh number 20-60 นก 1 กรัม ใส่ลงไปในบีกเกอร์
3. นำไปปั่นกวนที่ความเร็วรอบเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 35 45 และ 55 องศาเซลเซียส จับเวลา แล้วเก็บสารละลายตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ นำมาวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง บันทึกผลการทดลอง จนครบ 7 ชั่วโมง
4. นำผลที่ได้มาสร้างกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C/C_0$ ) กับเวลา ( $t$ ) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีที่ยอมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ ( $q$ ) กับเวลา ( $t$ )

### การทดลองตอนที่ 5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

นำข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองในตอนที่ 3. และการทดลองในตอนที่ 4. ซึ่งเป็นข้อมูลของการศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับและการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ มาพลอตกราฟเพื่อหาค่าคงที่อัตราการดูดซับของสารละลายสีย้อม Congo red ในแบบจำลองทั้ง 3 แบบ ได้แก่ แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง และแบบจำลองการแพร่ในตัวดูดซับ

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

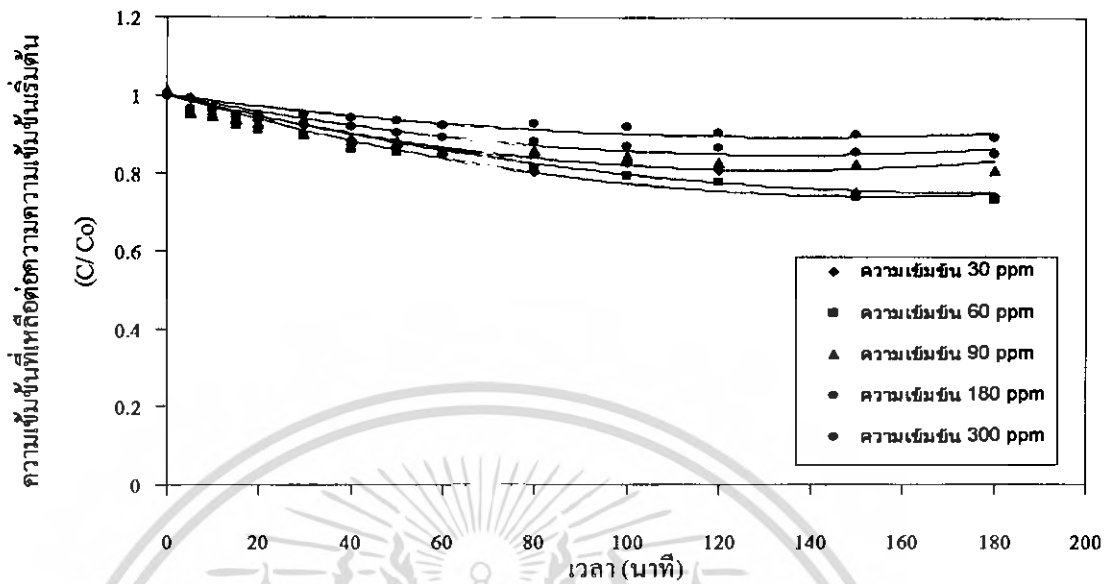
#### 4.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

จากการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red ของดินข่า ขนาด Mesh Number 20 – 60 ปริมาณ 1 กรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 60 90 100 180 และ 300 ppm ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ทำการปั่น กวนความเร็วรอบเท่ากัน ที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลาโดยใช้ดินข่าดูดซับสี Congo Red ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับค่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา โดยใช้ดินข่าดูดซับสี Congo Red ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

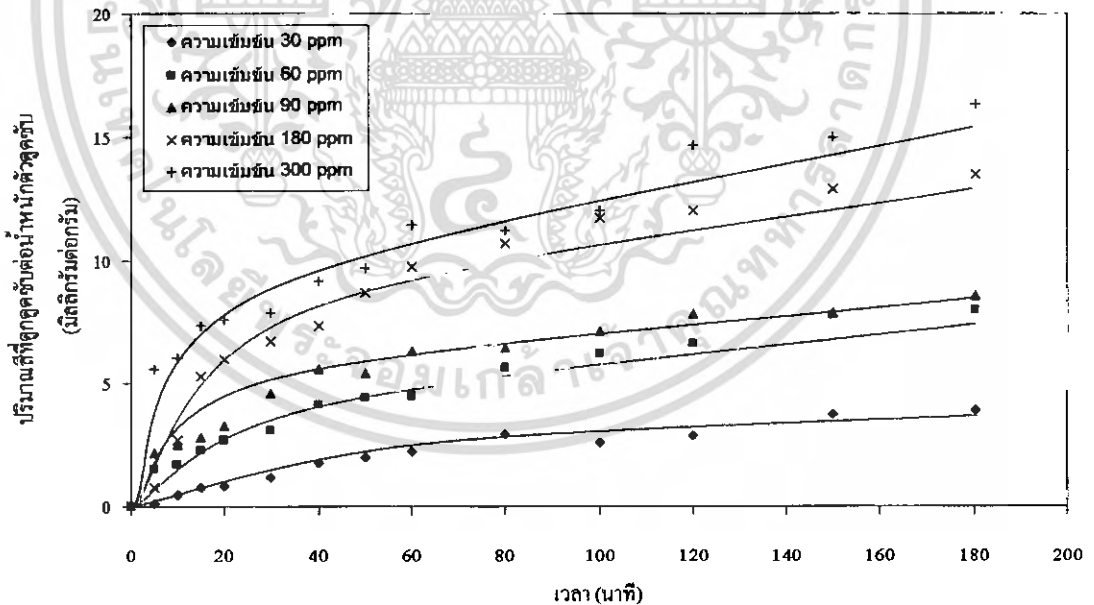
จากรูปที่ 4.1 พบว่าทุก ๆ ความเข้มข้นของสารละลายสี Congo Red จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ และค่อย ๆ คงที่ เนื่องจากในเวลาเริ่มแรกอัตราการดูดซับสีของตัวดูดซับยังมีค่ามากอยู่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการดูดซับจะมีค่าลดลงอันเนื่องมาจากการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับและที่ความเข้มข้น 30 ppm ดินข่าสามารถดูดซับสี Congo Red ได้ค่าความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C/C_0$ ) น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ ที่ความเข้มข้นอื่น ๆ

จากรูปที่ 4.2 พบว่าอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับค่อน้ำหนักตัวดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และค่อย ๆ คงที่ เพราะว่าตัวดูดซับยังมีอัตราการดูดซับที่สูงอยู่ อัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับค่อน้ำหนักตัวดูดซับจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆจะมีค่าคงที่เนื่องจากอัตราการดูดซับของตัวดูดซับเริ่มเข้าสู่สมดุลแล้ว

จากการทดลองการดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red ของดินข่าจะมีอัตราการดูดซับที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาแรก ๆ ตั้งแต่ 0 – 60 นาที และมีแนวโน้มที่จะเริ่มคงที่ในช่วงเวลา 80 -180 นาที และ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมสูงขึ้น อัตราในการดูดซับก็จะสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลาโดยใช้ดินข่าดูดซับสี Congo Red ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณสีที่ย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลาโดยใช้ดินข่าดูดซับสี Congo Red ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับ

จากการศึกษาปริมาณของตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red ของดินข้าขนาด Mesh Number 20 – 60 ในปริมาณ 1 2 3 4 และ 5 กรัม ที่ความเข้มข้น 40 ppm ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ทำการปั่น กวนความเร็วรอบเท่ากัน ที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา โดยใช้ดินข้าดูดซับสี Congo Red ที่ปริมาณต่าง ๆ และรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา โดยใช้ดินข้าดูดซับสี Congo Red ที่ปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.3 ที่ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม จะมีค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C/C_0$ ) มากกว่าที่ปริมาณอื่น ๆ และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับขึ้นจนถึง 5 กรัม ค่า  $C/C_0$  จะลดลงรวดเร็ว เนื่องจากพื้นที่ผิวในการดูดซับของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการดูดซับมากขึ้น และที่ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม จะมีความเข้มข้นสุดท้ายเหลืออยู่น้อยกว่าที่ปริมาณการดูดซับอื่นๆ

จากรูปที่ 4.4 ที่ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เป็นผลทำให้กราฟที่ได้ นั้น ไม่คงที่ และค่าปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับจะเข้าสู่สมมูลได้รวดเร็วที่ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม เนื่องจากปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับ เป็นสัดส่วนคงที่โดยตรงกับน้ำหนักตัวดูดซับ เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับขึ้นมีผลทำให้ค่าอัตราการดูดซับเข้าสู่สมมูลได้เร็วขึ้น

## 4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ

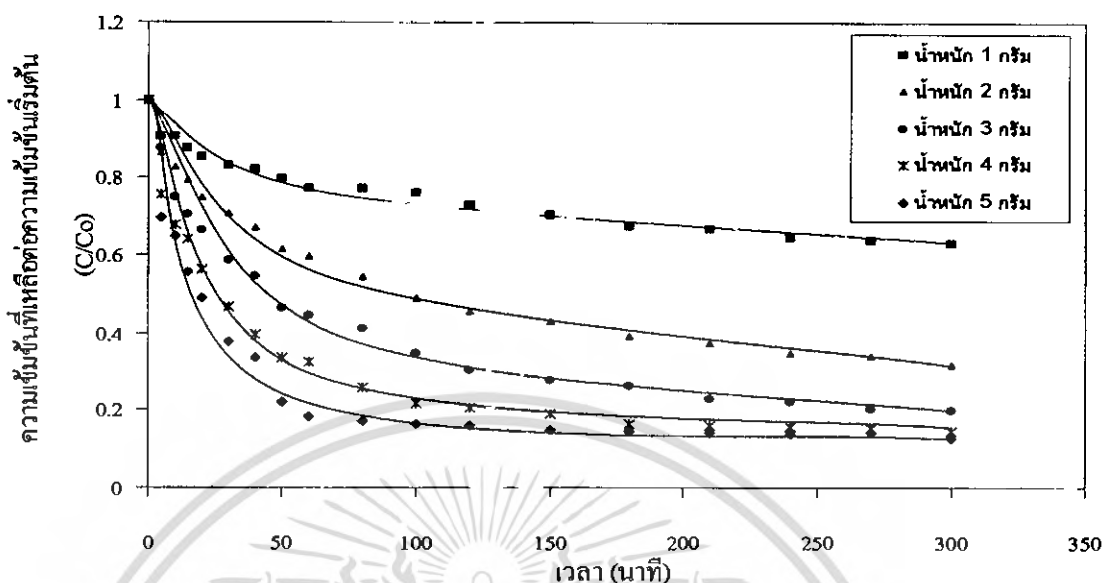
จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red ของดินข้าขนาด Mesh Number 20 – 60 ปริมาณ 1 กรัม ที่ความเข้มข้น 40 ppm ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ทำการปั่น กวนความเร็วรอบเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 35 45 และ 55 °C ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลาโดยใช้ดินข้าดูดซับสีย้อม Congo Red ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา โดยใช้ดินข้าดูดซับสี Congo Red ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.5 นั้นพบว่าที่อุณหภูมิ 25 °C จะมี ค่าความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C/C_0$ ) จากการทดลองเหลือน้อยกว่า ค่าความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C/C_0$ ) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และเมื่อทำการทดลองการดูดซับ ที่อุณหภูมิสูงสูงขึ้นค่าความเข้มข้นสุดท้ายก็จะมีค่า สูงตามไปด้วยเช่นกัน

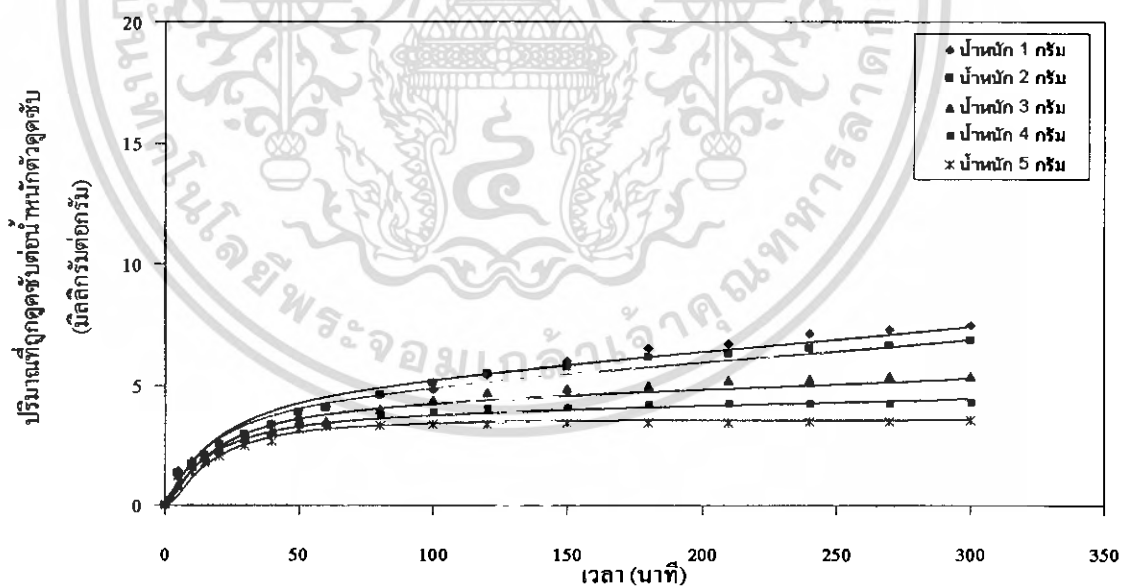
จากรูปที่ 4.6 พบว่าที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  จะมีค่าอัตราส่วนปริมาณสีที่ชอบที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับหรือค่าอัตราการดูดซับที่สูงกว่าช่วงอุณหภูมิอื่นๆ และเมื่อทำการทดลองการดูดซับที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าอัตราการดูดซับจะมีค่าลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

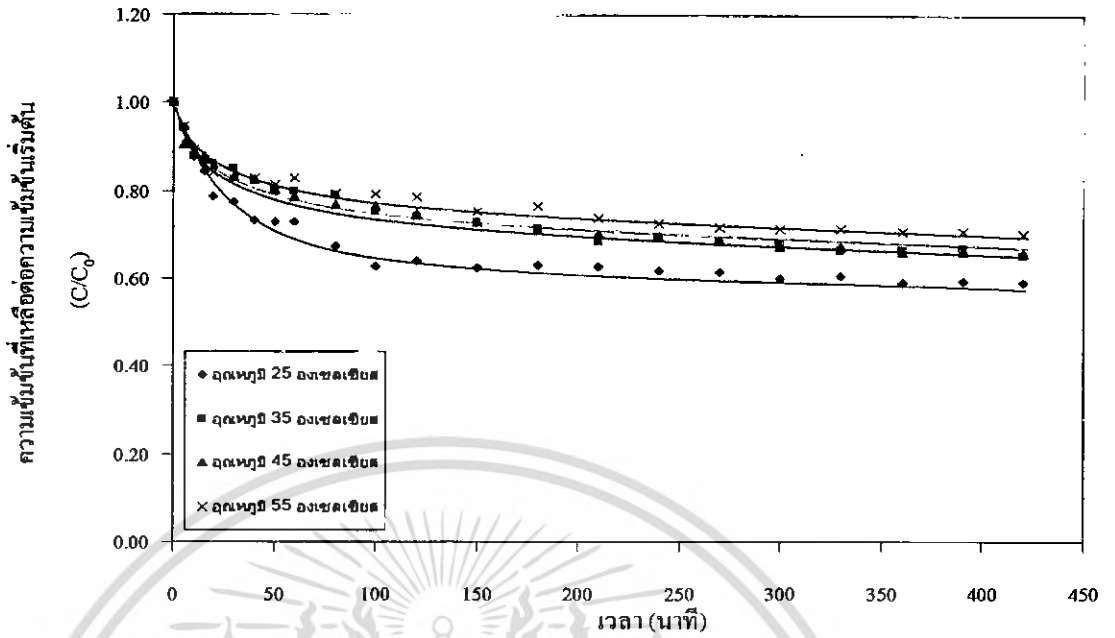


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลาโดยใช้ดินข่าดูดซับสี Congo Red ที่ปริมาณต่าง ๆ

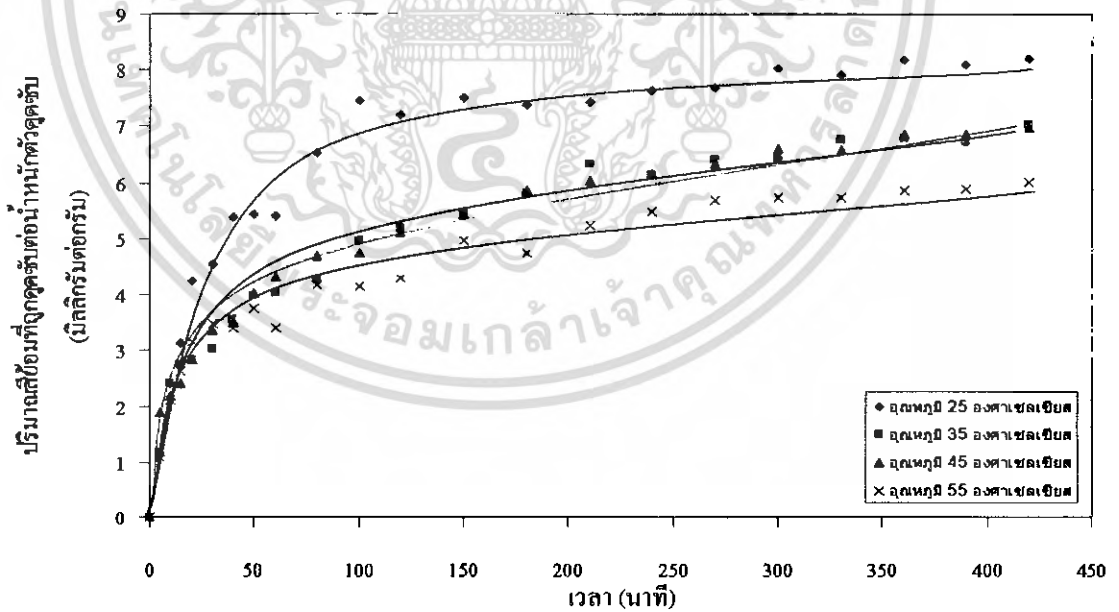


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณสีข้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลาโดยใช้ดินข่าดูดซับสี Congo Red ที่ปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลาโดยใช้ต้นขำคูด ชนิด Congo Red ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณสีที่ย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลาโดยใช้ต้นขำคูดชนิด Congo Red ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

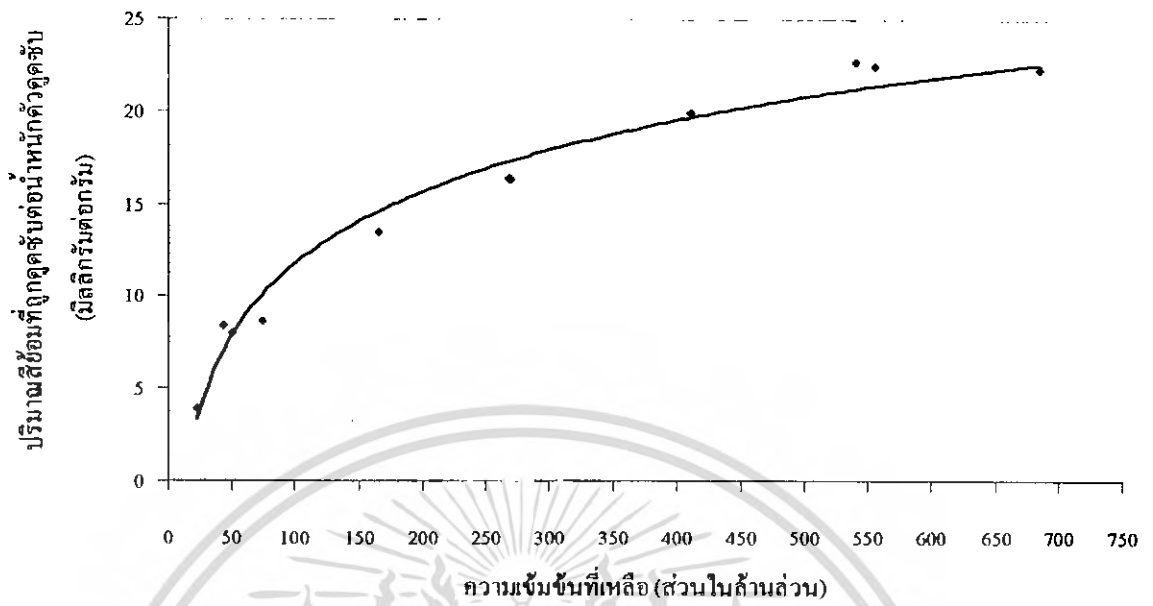
#### 4.4 การศึกษา Adsorption isotherm ของการดูดซับสีย้อมของต้นข่า

จากข้อมูลข้างต้นนำมาศึกษา Adsorption isotherm แสดงดังรูปที่ 4.7 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 จากรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ และความเข้มข้นที่เหลือ ซึ่งแสดงถึง Adsorption isotherm ที่ได้จากการทดลองที่มีการดูดซับจนถึงสภาวะสมดุล สามารถเขียนกราฟเพื่อสร้างแบบจำลอง Langmuir adsorption isotherm และแบบจำลอง Freundlich adsorption isotherm ได้

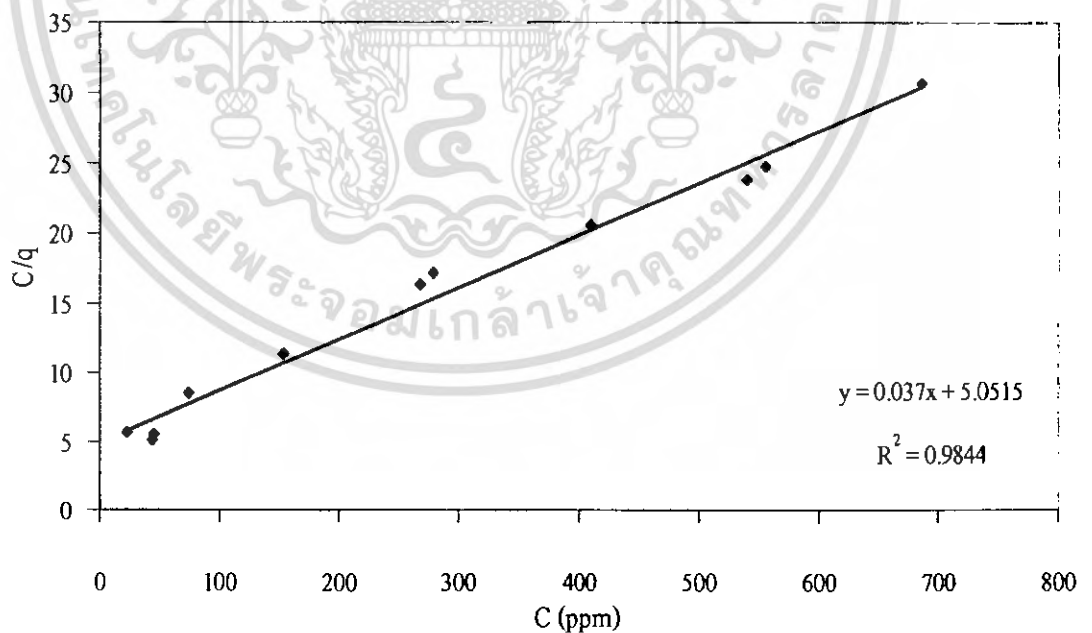
โดยแบบจำลอง Langmuir adsorption isotherm จะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือต่อปริมาณการดูดซับ ( $C/q$ ) กับความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือ ( $C$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากกราฟจะสามารถหาปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับสูงสุด ( $q_m$ ) ได้จากความชันของกราฟและสามารถหาค่าคงที่ Langmuir ( $K_A$ ) ได้จากจุดตัดของกราฟดังแสดงในตาราง 4.1

แบบจำลอง Freundlich adsorption isotherm จะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ ( $\ln q$ ) และลอการิทึมของความเข้มข้น ( $\ln C$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากกราฟสามารถหาค่าคงที่ของ Freundlich ( $K_F$  และ  $n$ ) ได้จากความชันและจุดตัดของกราฟ ดังแสดงในตาราง 4.1

เมื่อพิจารณาค่า  $R^2$  จะพบว่า Adsorption isotherm ที่ได้จากการทดลองจะใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Langmuir มากกว่าแบบจำลอง Freundlich เนื่องจากค่า  $R^2$  ของ Langmuir มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่า  $R^2$  ของ Freundlich

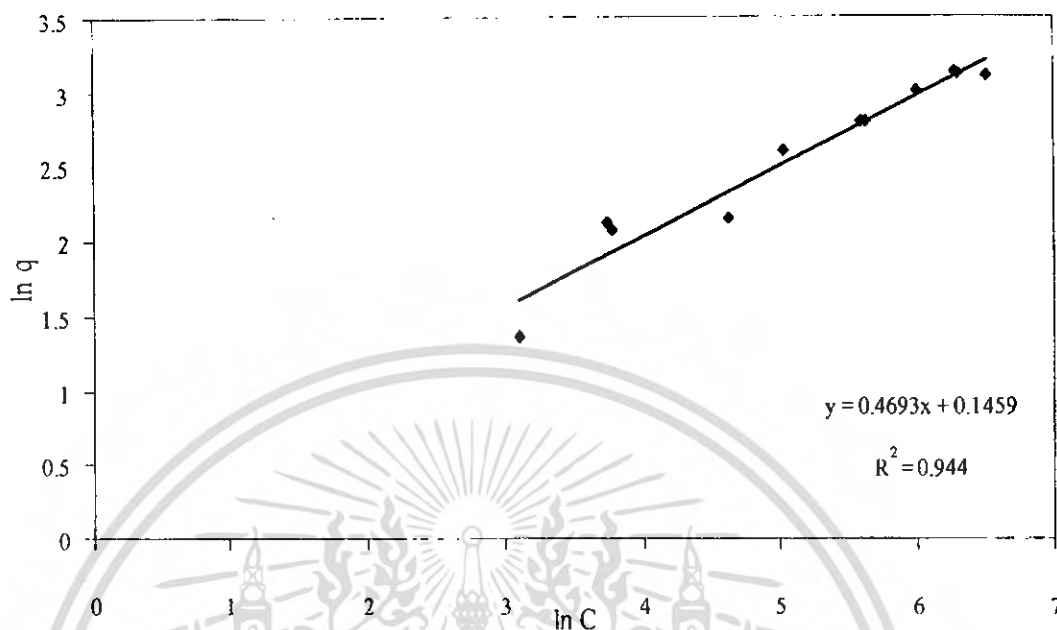


รูปที่ 4.7 Adsorption isotherm ของตัวดูดซับขนาด Mesh number 20-60 ความเข้มข้นต่างๆที่ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.8 Langmuir adsorption isotherm ของดินฆ่าขนาด Mesh number 20-60 ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 Freundlich adsorption isotherm ของดินขำขนาด Mesh number 20-60 ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของสมการ Langmuir และ Freundlich ของสารละลายสีช้อม Congo Red โดยดินขำขนาด Mesh number 20-60

Langmuir constant			Freundlich constant		
$K_A$	$q_m$	$R^2$	$K_F$	$n$	$R^2$
0.007	27.027	0.984	1.221	2.130	0.944

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับนั้นเป็นการศึกษา เพื่อหาค่าคงที่อัตราการดูดซับ ของสาร ละลายสีย้อม Congo red โดยทำการศึกษาในแบบจำลองทั้ง 3 แบบ ได้แก่ แบบจำลอง การดูดซับอันดับหนึ่ง แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง และแบบจำลองการแพร่ในตัวดูดซับ

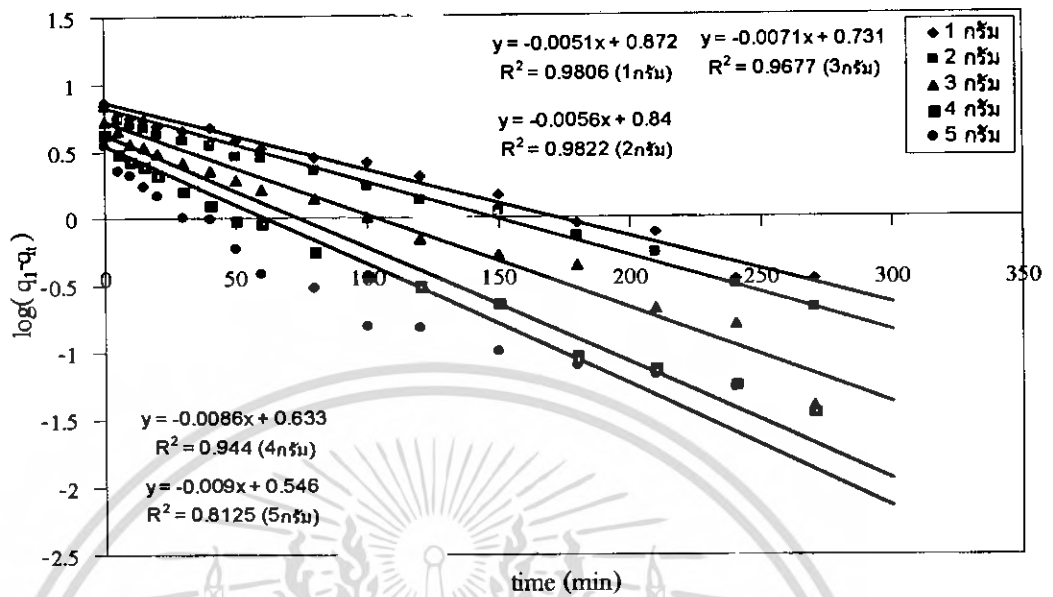
##### 4.5.1 ผลของปริมาณตัวดูดซับ

การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับ ในแบบจำลองอันดับหนึ่ง และในแบบจำลองอันดับสอง ที่ปริมาณของตัวดูดซับต่างๆ ได้ผลดังรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า ค่าคงที่อัตราการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองอันดับสอง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่า  $R^2$  ที่มีค่า เข้าใกล้เส้นตรงมากกว่า ในแบบจำลองอันดับหนึ่ง จากรูปที่ 4.12 แสดงการหาค่าคงที่อัตราการ แพร่ ( $k_p$ ) ภายในอนุภาคที่ปริมาณตัวดูดซับตั้งแต่ 1 2 3 4 และ 5 กรัม สามารถหาได้จากความชัน ของสมการ ในกราฟรูปที่ 4.12 ซึ่งค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2

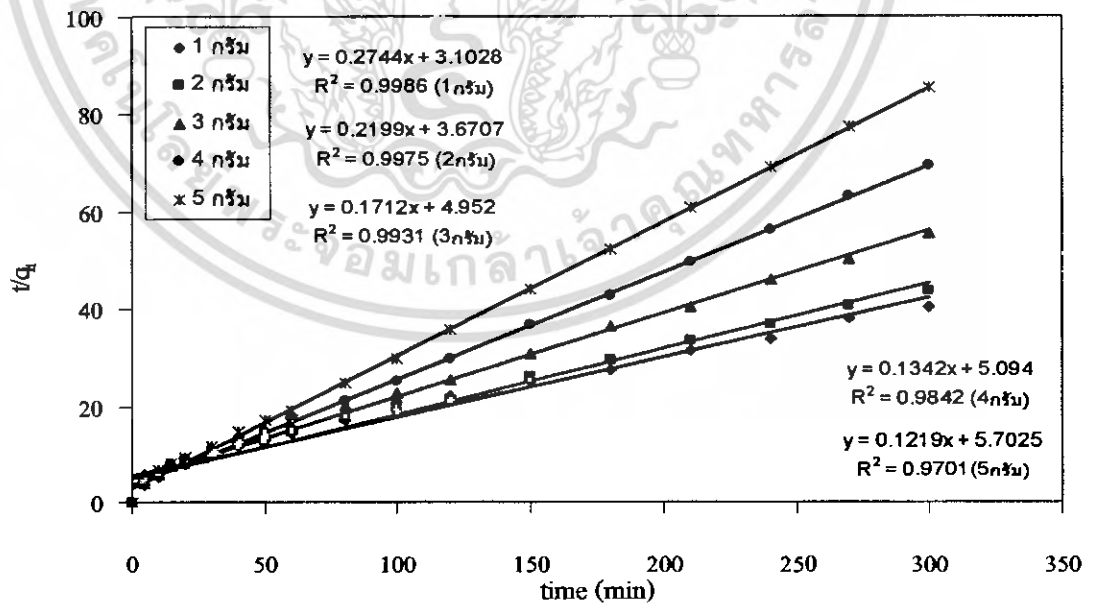
##### 4.5.2 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ ตั้งแต่ 25 35 45 และ 55 องศาเซลเซียส สามารถหาค่าคงที่อัตราการดูดซับในแบบจำลองอันดับหนึ่ง และในแบบจำลองอันดับสอง ได้ผล ดังรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าค่าคงที่อัตราการดูดซับ เป็นไปตามแบบ จำลองอันดับสอง โดยพิจารณาจากค่า  $R^2$  จากรูปที่ 4.15 แสดงการหาค่าคงที่อัตราการแพร่ ( $k_p$ ) ใน อนุภาคที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 25 35 45 และ 55 องศาเซลเซียส สามารถหาได้จากความชันของ สมการซึ่งค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3

จากรูปที่ 4.16 สามารถหาค่าพลังงานการกระตุ้น ( $E_a$ ) และค่าแฟกเตอร์ความถี่ของการ ชน(A) ได้จากค่าความชันและจุดตัดแกนจากสมการเส้นตรงของกราฟ ซึ่งได้ค่า  $E_a$  เท่ากับ 14.381 จูลต่อโมล และค่า A เท่ากับ 0.8503 ในการศึกษาคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยพลอตกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log (q_e / C_e)$  กับ  $1/T$  ดังแสดงใน รูปที่ 4.17 ซึ่งจากความชันและจุดตัด สามารถนำข้อมูลมาคำนวณหาค่า  $\Delta G$   $\Delta S$  และ  $\Delta H$  ได้ ค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3 เมื่อ พิจารณาค่า  $\Delta H$  ที่ได้นั้นมีค่าติดลบ ซึ่งกล่าวได้ว่ากระบวนการดูดซับ นั้นเป็นกระบวนการคาย ความร้อน

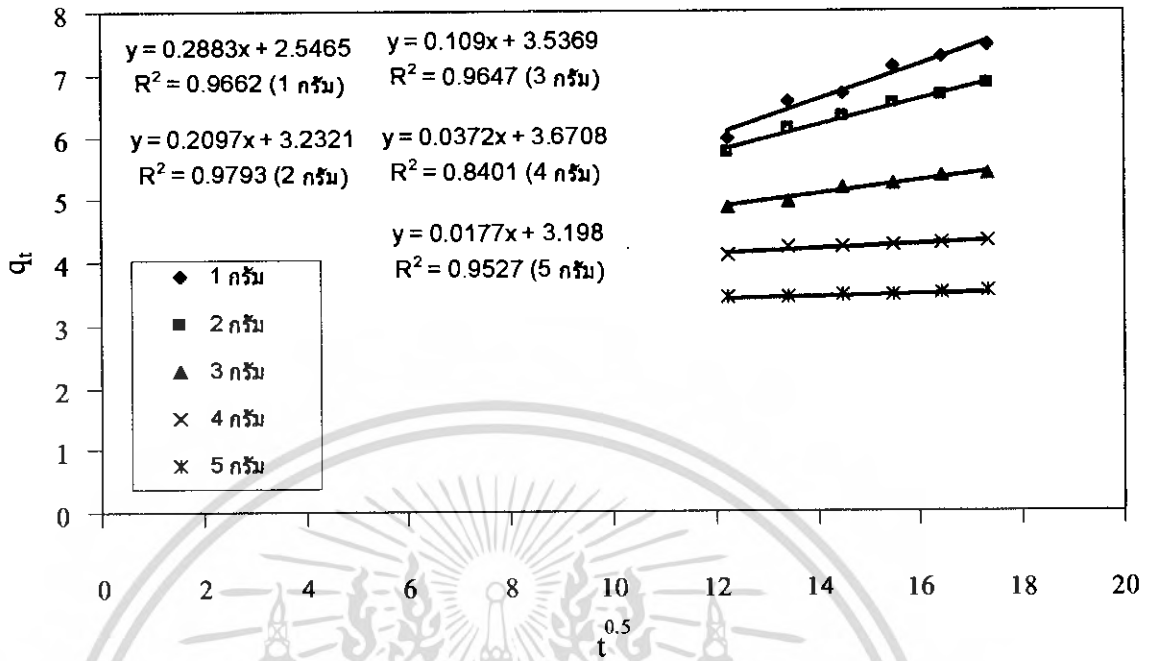


รูปที่ 4.10 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่า ในแบบจำลองอันดับหนึ่งที่มีปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.11 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่า ในแบบจำลองอันดับสองที่มีปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

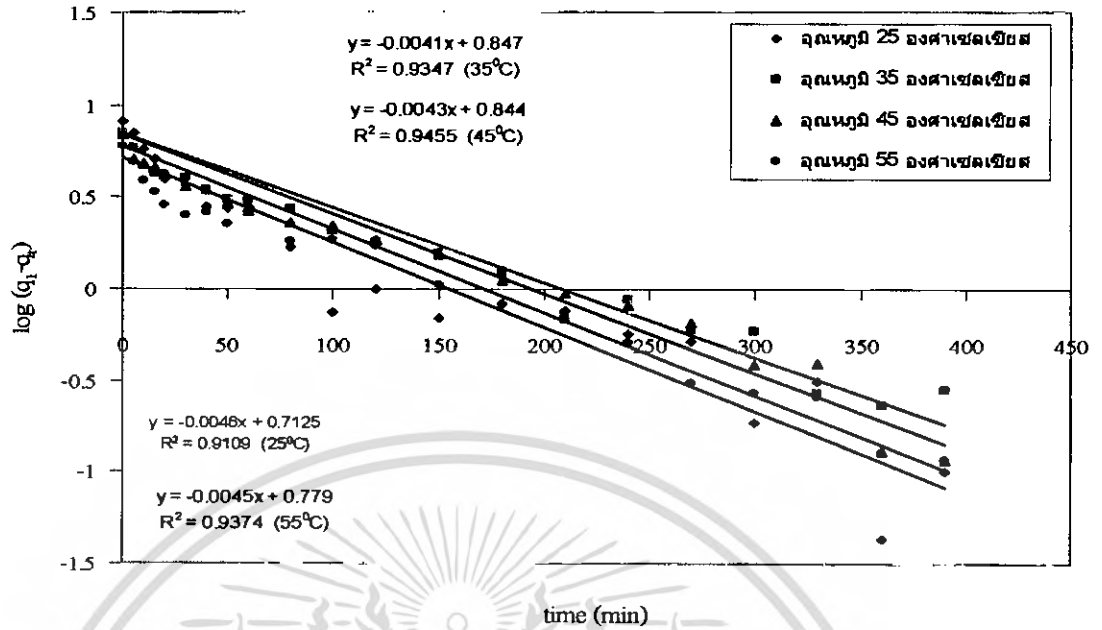


รูปที่ 4.12 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่าในการแพร่ภายใน ตัวดูดซับที่ปริมาณต่างๆ

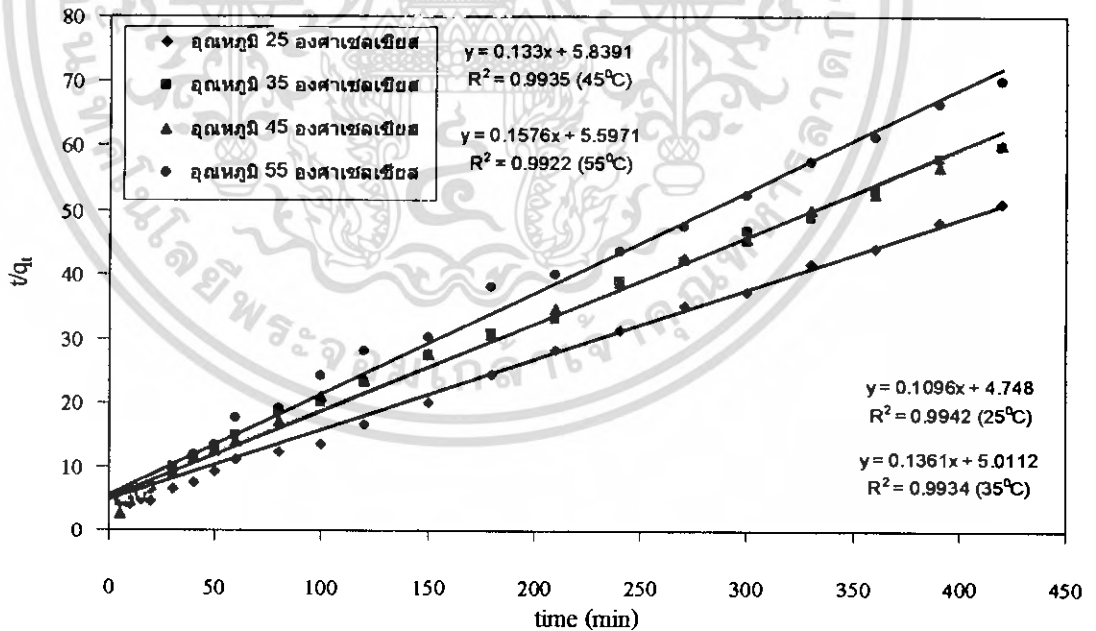
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่าที่ปริมาณต่างๆ

ปริมาณ (กรัม)	แบบจำลองอันดับหนึ่ง			แบบจำลองอันดับสอง			การแพร่ในตัวดูดซับ	
	$q_1$	$k_1$	$R^2$	$q_2$	$k_2$	$R^2$	$k_i$	$R^2$
1	7.454	0.011	0.980	3.644	$2.420 \times 10^{-4}$	0.998	0.288	0.966
2	6.840	0.012	0.982	4.547	$1.310 \times 10^{-4}$	0.997	0.209	0.979
3	5.386	0.016	0.967	5.841	$5.918 \times 10^{-3}$	0.993	0.109	0.964
4	4.305	0.019	0.944	7.451	$3.535 \times 10^{-3}$	0.984	0.037	0.840
5	3.516	0.020	0.812	8.203	$2.606 \times 10^{-3}$	0.970	0.017	0.952

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

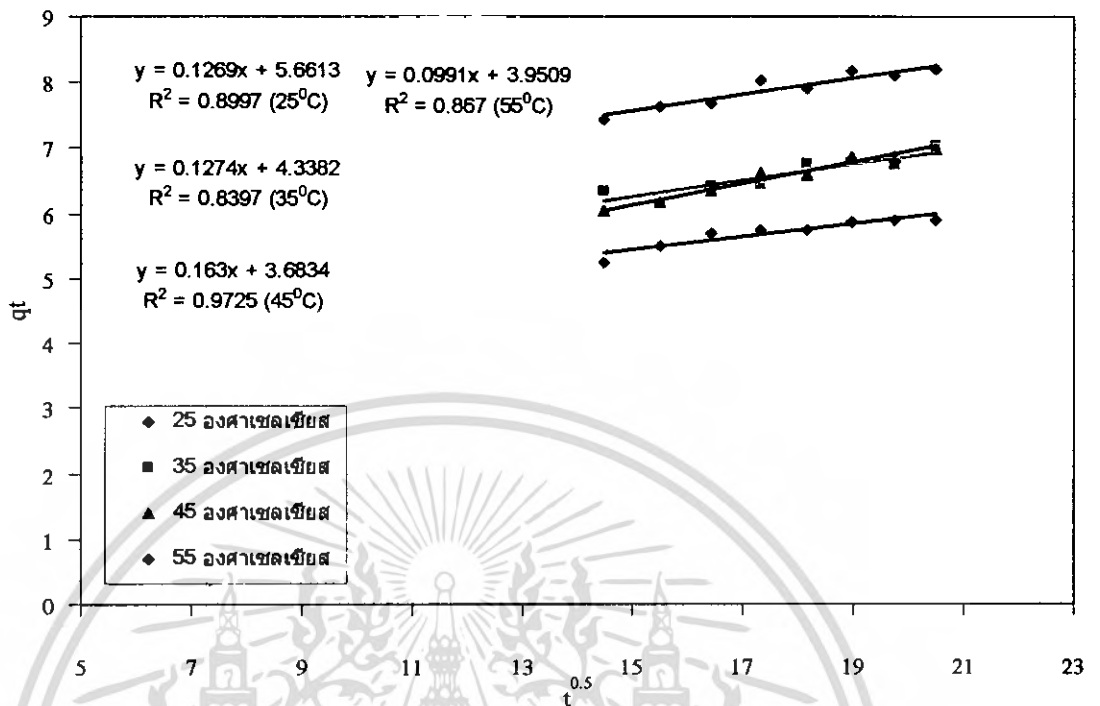


รูปที่ 4.13 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่า ในแบบจำลองอันดับหนึ่งที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.14 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่า ในแบบจำลองอันดับสองที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

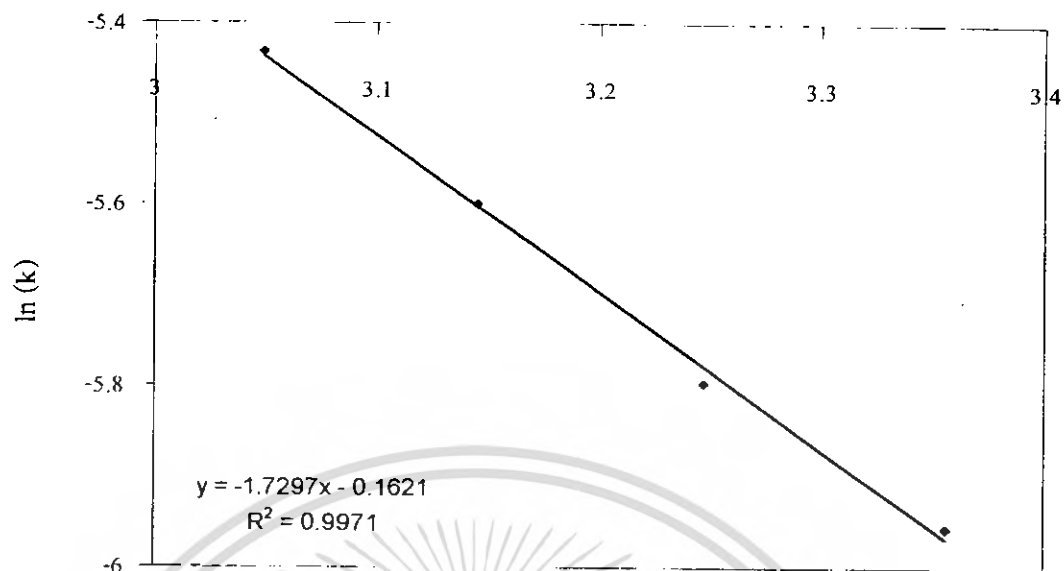


รูปที่ 4.15 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลาย Congo Red โดยใช้ด้นป่า ในแบบจำลองการแพร่ภายในตัวดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ

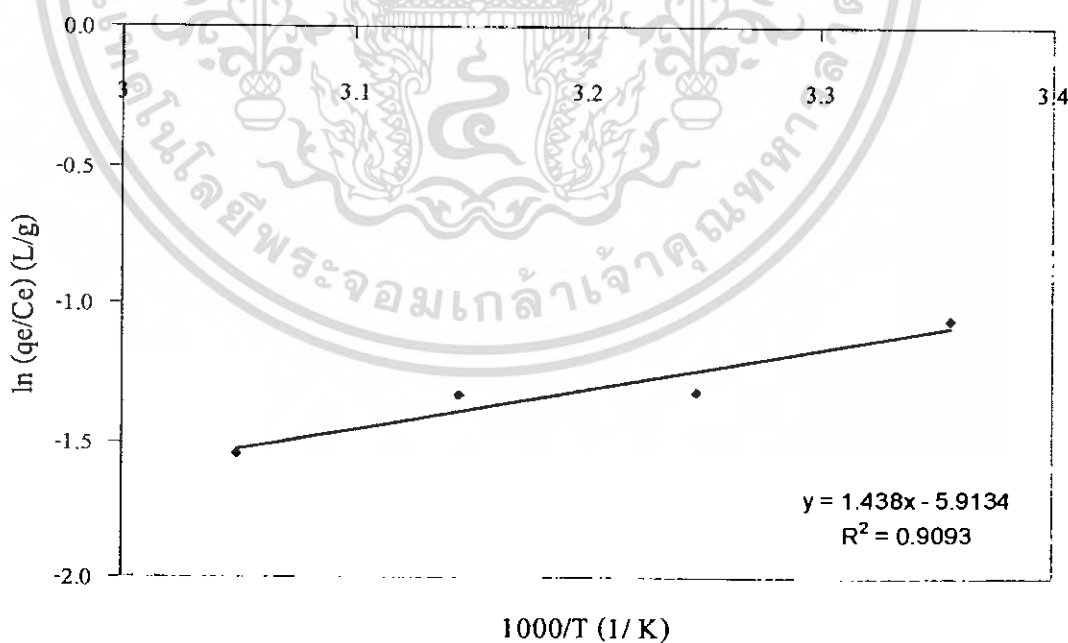
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลาย Congo Red โดยใช้ด้นป่าที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	แบบจำลองอันดับหนึ่ง			แบบจำลองอันดับสอง			การแพร่ในตัวดูดซับ	
	$q_1$	$k_1$	$R^2$	$q_2$	$k_2$	$R^2$	$k_i$	$R^2$
25	9.742	$10.130 \times 10^{-3}$	0.926	10.309	$2.531 \times 10^{-3}$	0.992	0.157	0.979
35	7.028	$9.442 \times 10^{-3}$	0.934	7.347	$3.696 \times 10^{-3}$	0.993	0.127	0.839
45	6.990	$9.902 \times 10^{-3}$	0.945	7.518	$3.030 \times 10^{-3}$	0.993	0.163	0.972
55	6.008	$10.360 \times 10^{-3}$	0.937	6.345	$4.437 \times 10^{-3}$	0.999	0.099	0.867

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(k)$  กับ  $1/T$  ของสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่าในแบบจำลองอันดับสองที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(q_e/C_e)$  กับ  $1/T$  ของการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ดินข่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red โดยใช้  
ต้นข่า

อุณหภูมิ		คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์		
(°C)	(K)	$\Delta G$ (kJ/mol)	$\Delta H$ (J/mol)	$\Delta S$ (J/mol)
25	298	2.618	-11.955	-49.165
35	308	3.382		
45	318	3.513		
55	328	4.210		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

เมื่อทำการศึกษา Adsorption isotherm ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่าง ๆ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red ของดินข่าซึ่ง ในแบบจำลองของ Langmuir adsorption isotherm พบว่ามีค่า  $K_L$  เท่ากับ 0.007 ค่า  $q_m$  เท่ากับ 27.027 และค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.984 และแบบจำลองของ Freundlich adsorption isotherm ซึ่งมีค่า  $K_F$  เท่ากับ 1.221 ค่า  $n$  เท่ากับ 2.130 และค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.944 เมื่อพิจารณาจากข้อมูลข้างต้นพบว่า Adsorption isotherm จะมีแนวโน้มเป็นไปตามแบบจำลองของ Langmuir adsorption isotherm กระบวนการดูดซับของดินข่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดี เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม Congo Red เพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิ 25°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับ

การศึกษากลไกการดูดซับของดินข่าโดยเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ เป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับ อันดับสอง ค่าคงที่อัตราการแพร่ภายในอนุภาค ( $k_p$ ) จะลดลงเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และกลไกการดูดซับของดินข่าโดยเพิ่มอุณหภูมิ เป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับ อันดับสอง การแพร่ภายในอนุภาคที่อุณหภูมิต่ำจะแพร่ได้ดีกว่าการแพร่ที่อุณหภูมิสูงโดยดูจากค่า  $k_p$  และยังได้ค่าพลังงานการกระตุ้น ( $E_a$ ) เท่ากับ 14.381 J/mol และค่าแฟกเตอร์การชน ( $A$ ) เท่ากับ 0.8503 และจากการศึกษาคูสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่า กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อนที่เกิดขึ้นได้เอง และเป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอน

### 5.2 ข้อจำกัดในการทดลองและข้อเสนอแนะในการทดลองต่อไป

1. เมื่อทำการทดลองที่ความเข้มข้นสูง ๆ การวัดความเข้มข้น จะเกิดค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นจาก เครื่องยูวี – วิสibelสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เนื่องจากเครื่องไม่สามารถหาความเข้มข้นสูงๆ ได้โดยตรง
2. หากทำการศึกษาต่อควร มีการศึกษาความมีขั้วของโมเลกุลระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

## เอกสารอ้างอิง

[1.] Noll, K.E., Gounarios, V. and Hou, W., 1992, Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control. Michigan, Lewis, pp. 199-216.

[2.] Charles, N., Satterfield, 1991, Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. 2nd ed., New York : McGraw-Hill Book Company, pp. 31-50.

[3.] Oscik, J., Adsorption. New York, John Wiley & Sons, pp. 157-193.

[4.] ทบวงมหาวิทยาลัย เคมี เล่ม 1. บริษัทอักษรเจริญทัศน์ อจท. จำกัด 2540 หน้า 336-353.

[5.] วิภาวดี นวลทวี และศรีประภา กล้วยไม้ ณ อรุณา การบำบัดสีโครเมียมด้วยผัก ตบชวา วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2540.

[6.] อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์ การกำจัดสีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีการดูดซับด้วยซีดีแอลออลิกไนต์ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2538.

[7.] วิไลโร วนิชย์โรคม การบำบัดของน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอโดยกระบวนการดูดซับด้วย Activated Carbon วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2536.

[8.] Ho, Y.S. and McKay, G., 1998 Sorption of Dyes from Aqueous Solution by Peat. Chemical Engineering Journal, Vol.70, 115-124.

[9.] ชูติ เดชวิทย์และสายใจ นารดสมบูรณ์ ผลของโซเดียมคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์ต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2541.

[10.] อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์และคณะ การดูดซับสีข้อมผ้าในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ประเภทต่าง ๆ การประชุมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 หน้า 1-12.

[11.] อัจฉราพร ไสละสูต คู่มือการข้อมสี พิมพ์ครั้งที่ 9 กรุงเทพฯ : กรุงเทพฯเทคนิค 19 การพิมพ์หน้า 149-153.

[12.] ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เคมีทั่วไป เล่ม 1 สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2535 หน้า 308-341

[13.] สมชาย เอกธรรมสุทธิ การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าโดยวิธีทางเคมี วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2514.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14.] วิวรรณ ขจรเกียรติคุณ การใช้ถักรองดูดซับน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในการบำบัดขั้นสุดท้าย วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2539.

[15.] McKay, G., Geundi, M.E., and Nassar, 1986, Equilibrium Studies During the Removal of Dycstuff mfrom Aquocous Solutions Using Bagasse Pith. Water Research, Vol. 12, pp. 1513-1520.

[16.] Ghash, M.M., Wcodard, F.E., Sproul, O.J., Knowlton, P.B. and Gvertin, P.D., 1978, Treatability Studics and Design Consideration for Textile Wastewater. Water and Waste Engineering, Vol.4, No.15, pp. 35-51.

[17.] McKay, G., Geundi, M.E., and Nassar, 1988, External Mass Trasport Processes During the Adsorption of Dyes onto Bagasse Pith. Water Research, Vol. 12, pp. 1527-1533.

[18.] Ernst, W.R., 1979, Adsorption of Textile Dyes from Aquocous Solution by Activated Carbon from Peanut Hulls. GRAL 7924, January, p.87

[19.] Asfour, H.M., Nassar, M.M., Fadail, O.A. and Ei-Geundi, M.S., 1985, Colour Removal from textile Effluents Using Hardwood Scwdust as an Absorbent. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, Vol. 35A, pp. 25-35.

[20.] Mitchell, M., Ernst, W.R., Rasmussen, E.T., Bangerzadch, P. and lightsey, G.R., 1978, Adsorption of Textile Dayes by Activated Carbon Produccd From Agricultural, Municipal and Industrial Waste. Bullentin of Environmental Contamination and Toxicology, Vol. 19, No. 3, pp. 307-311.

[21.] Villiers, R.V., 1972, Lime Classification and Activated Carbon Adsorption should be Useful for Primary Treatment and Raw Municipal Wastewater. Water and Waste Engineering, Vol. 1, No. 9, pp. 32-35.

[22.] Pachal, B.D. and Roy, A.H., 1976, Treatment of Dye Waste with Granular Activated Carbon. Textile Chemist and Colorist, Vol.8, No.4, pp. 34-38

[23.] Weber, W.J., mJr., 1972, Physicochemical System for Direct Wastewater Treatment, Vanderbilt University. Nashville, Tannesse, Environment Press, pp.13-25.

[24.] Geundi, M.E., 1991, Colour Removal from Textile Effluents by Adsorption Techniques. Water Research, Vol. 25, No. 3, pp. 271-273.

[25.] Gang Sun and Xiangjing Xu, 1997, Sunflower Stalks as Adsorption for Color Removal from Textile Wastewater. Ind. Eng. Chem., Vol. 3, pp. 808-812.

[26.] Chia-Chang Lin and Hwai-Shen Liu, 2000, Adsorption in Centrifugal Field : Basic เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dye Adsorption by Activated Carbon. Ind. Eng. Chem., Vol. 39, No. 1, pp. 161-167.

[27.] Nassar, M.M. and Magdy, Y.H., 1997, Removal of Different Basic Dyes from Aqueous Solutions by Adsorption on palm-fruit Bunch Particles. Chemical Engineering Journal, Vol. 66, pp. 223-226.

[28.] McKay, G., Blair, H.S. and Gardner, Adsorption of Dyes on Chitin. I. Equilibrium Studies. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 27, pp. 3043-3057.

[29.] McKay, G., Otterburn, M.s., and Aga, J.A., Fuller's Earth and Fired Clay as Adsorbents for Dyestuffs External Mass Transport Processes During Adsorption. Water Air and Soil Pollution, Vol. 26, pp. 149-161.

[30.] พัชรีย์ คำธิตา และคณะ การกำจัดสีอินทรีย์ที่ละลายในน้ำด้วยดินฟอกสีที่ใช้แล้ว วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและกระบวนการ มหาวิทยาลัยรังสิต 2537.

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

[32.] Heng, L.A., 1992, Textile Wastewater Treatment using sawdust Adsorption Technique. Environmental Protection and Control Technology, Vol. 11, pp. 573-580.

[33.] กานดา ใจดี โคโดเซนบำบัดสีย้อม วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2541.

[34.] ราตรี ปิ่นทอง และคณะ การดูดซับสารละลายสีย้อมโดยใช้ต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลัง วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2543.

[35.] นิมิ จงเทพ และคณะ การดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red โดยใช้วัสดุทางธรรมชาติ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547

[36.] จตุพร โทงว่ง และคณะ การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผักตบชวา โสน และบอน วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545

[37.] พงษ์ชัย เพชรสังหาร และคณะ การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากเมล็ดกาแฟเพื่อใช้ในการดูดซับฟีนอลและทอลูอิน วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544

[38.] ชูวดี เศษทวีทย์ และคณะ ผลของสารละลายซิงค์คลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์และสารละลายผสมระหว่างซิงค์คลอไรด์ต่อการผลิต คาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าว วิทยานิพนธ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2541

[39.] Krishna G. Bhattacharyya , Arunima Sharma , 2004 , Kinetics and thermodynamics of Methylene Blue adsorption on Neem (*Azadirachta indica*) leaf powder ,Department of Chemistry, Gauhati University , pp.51-59

[40.] Ewa Lorenc-Grabowska , Grazyna Gryglewicz ,2006,Adsorption characteristics of Congo Red on coal - based mesoporous activated carbon , Wroclaw University of Technology , pp 34-40

[41.] Ali Tor , Yunus Cengelglu , 2006 , Removal of congo red from aqueous solution by adsorption onto acid activated red mud , Selcuk University, Department of Environmental Engineering , pp 409-415

[42.] Zehra Bekci , Yoldas Seki , M. Kadir Yurdakoc , 2006 , A study of equilibrium and FTIR , SEM /EDS analysis of trimethoprim adsorption onto K10 , Dokuz Eylu University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Chemistry , pp 67-74

[43.] Augustine E. Ofomaja , 2006 , Sorption dynamics and isotherm studies of methylene blue uptake on to palm kernel fibre,Department of Industrial Chemistry, Faculty of Physical Science, University of Benin , pp 35-43

[44.] Y.O nal , C.Aknil-Basar , C.Sarici-Ozdemir , 2006 , Investigation kinetics mechanisms of adsorption malachite green onto activated carbon , Inonu University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering

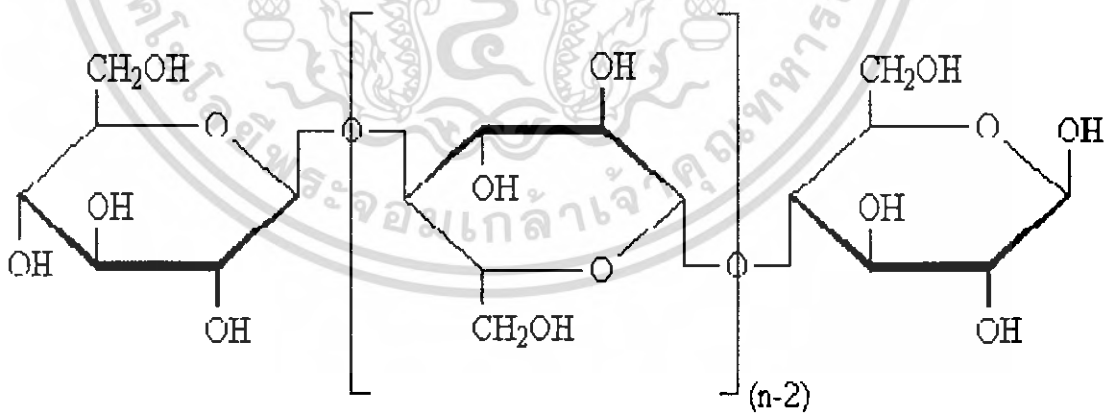
## ภาคผนวก ก

### องค์ประกอบทางเคมีของพืช

วัสดุพืชในธรรมชาติจะประกอบด้วยสารเคมีอินทรีย์และเคมีอนินทรีย์อยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ลิกนิน สารประกอบฟีนอล สารที่มีองค์ประกอบของอีเทอร์ กรดอะลิฟาติกฟอสเฟต ซิลิเกต ซัลเฟต คาร์โบเนต เตรตและแมกนีเซียม เป็นต้น จากองค์ประกอบพืชดังกล่าวมาแล้วนี้ส่วนใหญ่เป็นสารเคมีอินทรีย์ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญคือ ลิกนิน(Lignin) และคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) สำหรับคาร์โบไฮเดรตถ้าแยกตามปริมาณที่เป็นองค์ประกอบในพืชจะพบว่าที่สำคัญได้แก่ เซลลูโลส(Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส(Hemicellulose)

#### ก.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรท์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของพืชที่มีมากที่สุดในธรรมชาติมีประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนประกอบพืชทั้งหมด โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับผนังเซลล์ของพืช ในโครงสร้างของเซลลูโลสจะประกอบด้วยโมเลกุลของ D-glycoside เชื่อมต่อกันจากคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 เข้ากับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ด้วยพันธะ  $\beta$ -glycoside (รูป 2.8) ความยาวของโซ่ประกอบไปด้วย D-glycoside ตั้งแต่ 300 ถึง 2500 หน่วยและถ้าไฮโดรไลต์เซลลูโลสเพียงบางส่วนจะได้เซลไบโอส แต่ถ้าไฮโดรไลต์ทั้งหมดจะได้ D-glycoside



รูปที่ ก.1 โครงสร้างของเซลลูโลส [36]

คุณสมบัติของเซลลูโลส คือ จะไม่เกิดการละลายน้ำ ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์หรือในสารละลายด่างอ่อน แต่สามารถที่จะละลายได้ดีในกรดหรือด่างแก่ ดังนั้นสามารถที่จะแบ่งชนิดของเซลลูโลสออกตามลักษณะการละลายในกรดหรือด่างแก่ ได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

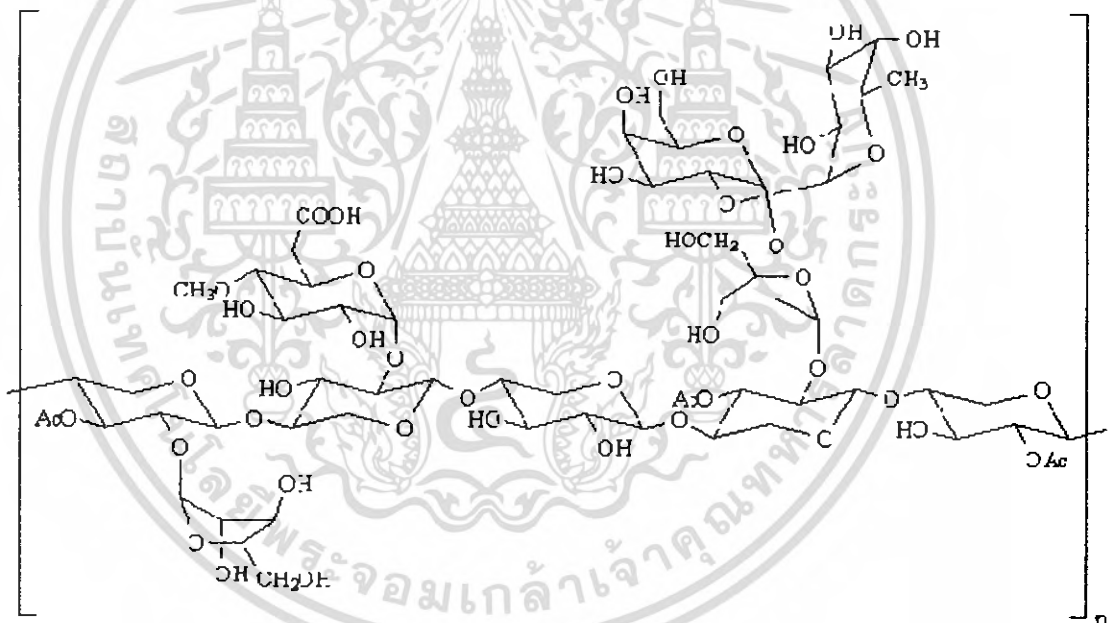
#### 1. a-Cellulose เป็นเซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลาย 17.5 % NaOH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. b-Cellulose เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายในสารละลาย 17.5 % NaOH
3. g-Cellulose เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายในสารละลายได้ดีทั้งในสารละลาย 17.5 % NaOH และในสารละลายกรดเจือจาง

### ก.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสจัดเป็นสารพอลิแซคคาไรด์ที่มีมากรองลงมาจากเซลลูโลส จะมีลักษณะเป็น Heterogenous ที่ประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์หลายชนิดมารวมกันเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) โครงสร้างจะเป็นลักษณะของกิ่งก้านสาขาแตกต่างไปจากเซลลูโลส (รูปที่ 2ข.) และน้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะต่ำกว่าเซลลูโลส ขนาดของโมเลกุลมีความยาวประมาณ 30-50 หน่วยและมีองค์ประกอบหลัก คือ ไซแลน (xylan) เมื่อถูกย่อยสลายจะได้น้ำตาลที่เป็นเพนโตสและเฮกโซส



รูปที่ ก.2 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [36]

### ก.3 ลิกนิน (Lignin)

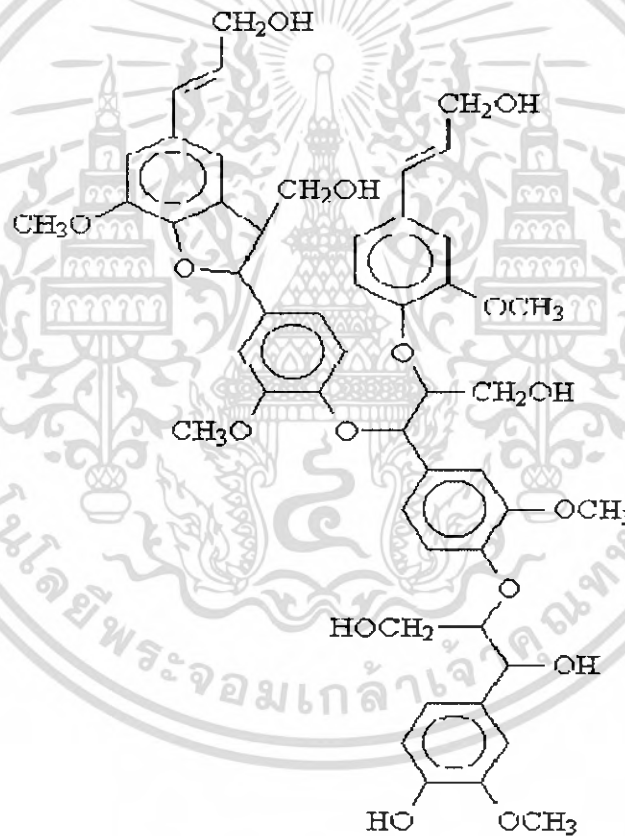
ลิกนินจัดอยู่ในพวก Heterogeneous organic polymer จะอยู่ภายในโครงสร้างของพืช โดยอยู่ในบริเวณรอบเซลลูโลสและป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยสลาย จากการค้นคว้าที่ผ่านมายังไม่พบโครงสร้างที่แน่นอนของลิกนิน ทราบเพียงว่าลิกนินเป็นโพลีเมอร์ของสารประกอบอะโรมาติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยของโครงสร้าง Phenylpropane type ( $C_6 - C_3$ ) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด คือ

1. coniferyl alcohol ( $R_1=H, R_2=OCH_3$ )
2. Sinapyl alcohol ( $R_1=R_2=OCH_3$ )
3. p-coumaryl alcohol ( $R_1=R_2=H$ )

โดยปกติจะไม่สามารถระบุได้ว่าลิกนินจัดเป็นสารประกอบประเภทใดเพราะไม่สามารถกำหนดโครงสร้างที่แน่นอนได้ ทั้งนี้เนื่องจากลิกนินไม่อยู่ในลักษณะตัวเดียวที่จะเกาะกันเป็นสายยาว ซึ่งมีอยู่หลายแบบที่ประกอบด้วยหน่วยต่าง ๆ เหล่านี้ คือ Phenyl Propane, Guaiacyl Unit, Syringly Unit และ para-Hydroxyphenyl Unit ลักษณะหน่วยย่อยในโครงสร้างของลิกนินแสดงดังรูปและโครงสร้างของลิกนินแสดงดัง รูปที่ 3ก.



รูปที่ ก.3 โครงสร้างของลิกนิน [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### สีเขียวอม

สีเขียวอมเป็นสารที่ละลายน้ำได้ หรือสามารถทำให้ละลายน้ำได้ คุณคิดเส้นใยได้ การนำสีเขียวอม  
เข้ามาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัว  
ของสีกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสภาวะที่โมเลกุลของสีเขียวอมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิด  
การคูติด (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (Bond) ยึดติดกันแน่น อิทธิพลที่ทำให้เกิดการ  
คูติดกับเส้นใย คือ

ก. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)

ข. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's forces)

ค. แรงไอออนิก (Ionic forces)

ง. พันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond)

การคูติดกันระหว่างโมเลกุลของเส้นใย จะต้องประกอบด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้ง  
อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แต่แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควา  
เลนต์ (Covalent- bond) อิทธิพลของรูปร่างและขนาดโมเลกุลของสีก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผล  
กระทบต่อการย้อมเป็นอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีเขียวอมยิ่งเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่อง  
ว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น ทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีเขียวอมมีลักษณะแบน  
และมีความกว้างความยาวมาก ๆ จะทำให้เกิดการติดสีที่มีความคงทนสูงมากขึ้น

#### ข.1 คุณสมบัติของสีเขียวอม

ในสีเขียวอมแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปในสภาพสารละลายหรือสารแขวน  
ลอย เช่น ความสามารถในการละลายน้ำ การรวมตัวในสารละลาย การย่อยสลายในระหว่างการ  
ย้อมสี อัตราการเกิด ปฏิกิริยา การให้และรับอิเล็กตรอน สำหรับโครงสร้างทางเคมีของสีแต่ละชนิด  
มีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติของสีดังนี้

1. ความเหมาะสมต่อเส้นใยชนิดหนึ่ง ๆ จะขึ้นอยู่กับอนุมูลของเส้นใยและสีเขียวอม
2. ความสามารถที่จะเข้ากันได้ดีกับเส้นใยหนึ่ง ๆ
3. จลนพลศาสตร์ของสีเขียวอม
4. คุณสมบัติการเคลื่อนตัวและความสม่ำเสมอของสี
5. ความทนต่อแสง
6. ความทนต่อความชื้น
7. ความทนต่อความร้อน และอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกสีขึ้นอยู่กับเลือกตามชนิดของวัตถุ ที่จะย้อมมีความคงทนพอดี สามารถย้อมออกมาได้เหมือน สีตามตัวอย่าง และมีราคาถูกพอตามต้องการ สีย้อมที่ผลิตขึ้นมาในห้องทดลองมีจำนวนมากและมัก จะมีสีสันทันใกล้เคียงกัน ยากต่อการจดจำ เช่น สีฟ้าอาจจะมีสีฟ้าอ่อนไปทางแดง หรือฟ้าอ่อนไปทางเหลือง ดังนั้นจะต้องมีสัญลักษณ์ของสีเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว

## ข.2 สัญลักษณ์ของสี

### ก.2.1 สัญลักษณ์บอกสี

บี (B)	ออกสีน้ำเงิน
จี (G)	ออกสีเขียวหรือเหลือง
เจ (J)	ออกสีเหลือง
เอ็ม (M)	ออกสีแดงคล้ำ
อาร์ (R)	ออกสีแดง
วี (V)	ออกสีม่วง
วาย (Y)	ออกสีเหลือง

### ข.2.2 สัญลักษณ์บอกความเข้มข้นของสี

เอ (A)	เข้มข้นมาก
อี (E)	เข้มข้นมากที่สุด (Excellent)
โอ (O)	เข้มข้นมาก
เอกซ์ (X)	เข้มข้นเป็นพิเศษ (Extra)
เค (K)	เข้มข้น (Konz)

### ข.2.3 สัญลักษณ์บอกธรรมชาติของสี

ซี...(C=Chlorine)	ทนต่อสารคลอรีน(ฟอกขาวด้วยไฮโปคลอไรต์ได้)บางครั้งใช้สีซีแอลมีความหมายเช่นเดียวกัน
ดี...(D=Discharge)	สามารถลอกสีออกได้
ดี...(Disperse)	สีชนิดกระจายตัวได้
เอฟ...(F=Fast)	ความคงทนของสีดีไม่ตก(สัญลักษณ์ตัวนี้ระบุก่อนอย่างอื่น)
เอฟ...(F=Fine)	ให้สีสดไม่มีสิ่งอื่นปนเปื้อน(ระบุเป็นตัวสุดท้าย)
เอช...(H=Half Wool)	ใช้กับผ้าขนสัตว์ปนฝ้ายหรือปนเรยอนได้
เค...(K=Kait)	ใช้ย้อมเย็นได้
แอล...(L=Light)	ทนแสงได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอน...(N=Neutral)	อาจย้อมในน้ำย้อมที่เป็นกลางได้
พี...(P=Perion)	เหมาะสำหรับใช้ย้อมไพลอน
เอส...(S=Soluble)	ละลายน้ำได้ดี
เอส...(S=Silk)	เหมาะสำหรับใช้ย้อมไหม
ที...(T=Tannin)	เหมาะสำหรับพิมพ์ลอกสีด้วยแทนนิน
ยู...(U=Ultra)	กระจายตัวได้ดีเป็นพิเศษ
ดับเบิลยู...(W=Washing)	ทนต่อการซักดี
ดับเบิลยู...(W=Wool)	สีโคเรคท์เหมาะสำหรับย้อมขนสัตว์

#### ข.2.4 สัญลักษณ์บอกคุณภาพ

ซีพี...(CP=Chemical pure)	มีความบริสุทธิ์สูง
เอฟแซค...(FZ=Free from Zinc)	ไม่มีสังกะสีปน
แซคเอฟ...(ZF=Zinc free)	ไม่มีสังกะสี

#### ข.3 การตั้งชื่อสี

สมาคมผู้ประกอบการย้อมสีในประเทศสหรัฐอเมริกาและอังกฤษ (American Association of Textile Chemists and Colorists และ Society of Dyes and Colorists) ได้ร่วมกันจัดทำทะเบียนรายชื่อสีที่มีจำหน่ายในท้องตลาดขึ้นเรียกว่า Colour Index โดยตั้งชื่อให้กับสีแต่ละตัว เรียกว่า CI Generic Name โดยมีองค์ประกอบดังนี้

CI + ชื่อประเภทของสี + เฉดสี + หมายเลขลำดับ

โดยที่ประเภทของสีแบ่งออกเป็น 17 ประเภทคือ Acid, Azoic, Direct, Disperse, Fluorescent Briteners, Food, Ingrain, Leather, Mordant, Oxidation, Pigment, Reactive, Solvent, Sulphur และ Vat

เฉดสีจะแบ่งออกเป็น 8 เฉดสีคือ Yellow, Orange, Red, Violet, Blue, Green, Brown และ Black

ตัวอย่างการเรียกชื่อสี เช่น CI Acid Yellow 1 หมายถึง สีแอซิดสีเหลืองหมายเลขหนึ่ง

#### ข.4 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมสามารถจำแนกออกได้หลายแบบ เช่น จำแนกตามโครงสร้างทางเคมี จำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี จำแนกตามลักษณะตามกายภาพ จำแนกตามลักษณะการใช้งาน และจำแนกตามลักษณะการย้อม

##### ข.4.1 จำแนกตามโครงสร้างทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สีย้อมอะโซ (Azo dyes) คือสีย้อมที่มีกลุ่มอะโซ ( $N=N$ ) อยู่ใน โครงสร้างโมเลกุล สีย้อมกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่และมีความสำคัญมากที่สุด โดยครอบคลุมถึงร้อยละ 50 ของสีย้อมที่ใช้ทั้งหมด คุณลักษณะที่สำคัญของสีย้อมกลุ่มนี้ คือ มีสีให้เลือกครบทุกโทนสี แต่โดยทั่ว ๆ ไปจะมีความสำคัญโดยเฉพาะในช่วงของสีเหลือง แสด แดง น้ำตาล และสีดำ มีกรรมวิธีการสังเคราะห์ค่อนข้างง่าย มีความสว่างสดใสและมีความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดี และราคาไม่แพง

2. สีย้อมแอนทราควิโนน (Anthraquinone dyes) เป็นสีย้อมที่มีโครงสร้างของแอนทราควิโนนเป็นโครงสร้างหลักอยู่ในโมเลกุล และส่วนใหญ่อะจะสังเคราะห์ได้โดยอาศัยแอนทราควิโนนเป็นสารเริ่มต้น สีย้อมกลุ่มนี้มีความสำคัญเป็นอันดับสองรองจากสีอะโซ โดยครอบคลุมประมาณร้อยละ 25 ของสีย้อมทั้งหมด สีย้อมที่มีความสำคัญ คือ สีม่วง ฟ้า เขียว และแดงแสด เป็นสีที่มีความสว่างสดใส และมีความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ดี แต่ความเข้มข้นของสีน้อยกว่าสีอะโซ และยังมีราคาแพงอีกด้วย

3. สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur dyes) เป็นสีย้อมที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล สีย้อมกลุ่มนี้เป็นสีที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดในบรรดาสีย้อมทั้งหมด เนื่องจากเป็นสีที่มีราคาถูก นิยมใช้ย้อมสีที่บ ึ่งต้องการความเข้มสูง เช่น สีดำ น้ำตาล และน้ำเงิน สีย้อมนี้มิให้เลือกไม่มากนัก ส่วนมากจะเป็นสีที่บ ึ่งไม่สดใส

4. สีย้อมอินดิโกออยด์ (Indigoid dyes) เป็นสีที่มีโครงสร้างของอินดิโกติน ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของสีอินดิโกอยู่ในโมเลกุล

#### ข.4.2 จำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี

- สีย้อมฝ้าย ได้แก่ สีไครเรทท์ สีรีแอคทีฟ สีเว็ด สีซัลเฟอร์
- สีย้อมโพลีเอสเตอร์ ได้แก่ สีดิสเพอร์ส
- สีย้อมไนลอนไหม และขนแกะ ได้แก่ สีแอตติก สีเมทัลคอมเพล็กซ์
- สีย้อมอะคริลิก ได้แก่ สีเบสิด

#### ข.4.3 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

##### ข.4.3.1 สีชนิดที่ละลายน้ำได้

- สีแอตติก
- สีเบสิด
- สีไครเรทท์
- สีรีแอคทีฟ

##### ข.4.3.2 สีชนิดที่ละลายน้ำไม่ได้

- สีอะโซ
- สีดิสเพอร์ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สีแ้วด
- สีพิกเมนต์
- สีซัลเฟอร์
- สีมัทคอมเพล็กซ์

#### ข.4.4 จำแนกตามลักษณะการใช้งาน

1. สีไครเรทท์ สีข้อมไครเรทท์บางครั้งถูกเรียกว่าสีข้อมฝ้าย ชื่อของสีชนิดนี้ได้มาจากการที่สีข้อมชนิดนี้เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่สามารถข้อมติดใยฝ้ายโดยซึมเข้าไปในภายในเซลล์ของใยได้โดยตรง ไม่ต้องเติมสารช่วยข้อมใด ๆ ทั้งสิ้น แต่ในปัจจุบันการข้อมด้วยสีไครเรทท์นี้จะใช้เกลือช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการข้อมให้สูงขึ้น สีข้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีกรดซัลโฟนิคซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้

2. สีรีแอคทีฟ เป็นสีข้อมที่ใช้ข้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด สามารถละลายน้ำได้ มีคุณสมบัติเป็นแอนไอออน โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์ กลายเป็นสารประกอบชนิดใหม่กับเซลลูโลส มีคุณสมบัติการละลายและการดูดติดเส้นใยของตัวสีจะทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในของเส้นใยได้ และเมื่อเกิดปฏิกิริยาดัวยตัวสีก็จะติดกับเส้นใย

3. สีแ้วด นิยมใช้กับเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะใยฝ้าย สีข้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำจึงต้องใช้ตัวรับอิเล็กตรอนที่มีความเหมาะสมมาทำให้ละลาย สารที่รับอิเล็กตรอนที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ หลังจากนั้นจะสูญเสียอิเล็กตรอนกลับเป็นตัวสีข้อมแ้วดที่ไม่ละลายน้ำดั้งเดิมทำให้เกิดการติดทนอย่างถาวรกับเส้นใยได้ดี โครงสร้างของสีประเภทนี้แตกต่างกันมาก สารประกอบเชิงซ้อนของสีทุกตัวจะต้องมีหมู่คาร์บอนิลอย่างน้อยหนึ่งหมู่รวมอยู่ด้วยเสมอ

4. สีซัลเฟอร์ เตรียมได้จากการหลอมละลายกำมะถันหรือโซเดียมซัลไฟด์กับกรดอะมิโนและสารประกอบไนโตรเจน ใช้ข้อมใยฝ้ายโดยเฉพาะ สีที่ข้อมได้จะไม่ค่อยสลาย ตามปกติแล้วสีข้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่ในปัจจุบันได้มีผู้ผลิตสีข้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่โดยนำสีข้อมไปทำการรีดิวซ์ ทำให้สีชนิดนี้ละลายน้ำได้ สีข้อมชนิดนี้ข้อมง่าย มีราคาถูก และมีความคงทนต่อน้ำได้ดี

5. สีดิสเพอร์ส สีชนิดนี้ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ข้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด ที่ดูดซึมน้ำได้น้อย สีชนิดนี้ไม่ละลายน้ำแต่เป็นละอองละเอียดละลายอยู่ในน้ำ เมื่อมีสารช่วยกระจายที่เหมาะสมจะสามารถใช้ข้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีอย่างอื่นช่วย

สีดิสเพอร์สอาจแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ โดยพิจารณาจากกลุ่มสารเคมีในตัวสีข้อม ได้แก่ สีข้อมอะโซ และสีข้อมอะมิโนแอนทราควิโนน

6. สีแอสิค สีกลุ่มนี้นิยมใช้ข้อมกับเส้นใยโปรตีนในน้ำข้อมซึ่งมีสภาพเป็นกรดเจือจางอาจ จะ นำไปใช้ข้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ด้วย เช่น ป่าน และใยโพลีเอไมด์ เป็นต้น สีข้อมเกิดจากเกลือโซเดียมของสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็น

เกลือของกรดกำมะถัน มีโครงสร้างเป็นไอออนลบใน ส่วนประกอบที่ให้สี กลุ่มเคมีของสีแอตติกนี้ ประกอบด้วย กลุ่มสีอะโซ(ประเภท ไครอริลเมธ และแอนทราควิโนน) สีแอตติกดูดความชื้นจากอากาศได้ง่าย การเก็บรักษาจึงต้องระมัดระวังเป็นอย่างดี ถ้าสีดูดความชื้นเข้าไป จะทำให้เสื่อมสภาพเร็ว

7. สีเบสิก นิยมใช้ซ่อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดสามารถใช้ซ่อมเส้นใยอะคริลิกได้ แต่ซ่อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย ตัวสีซ่อมเป็นเกลือเบสอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ ให้ไอออนบวก บางครั้งจะเรียกสีซ่อมชนิดนี้ว่า สีแคทไอออนิก ซ่อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลของสีซ่อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย เส้นใยประเภทนี้มีความคงทนต่ำ นิยมใช้กันในประเทศแถบตะวันออก ที่นิยมความสดใสของสีมากกว่าความคงทน

8. สีมอร์แคนท์ หรือสีโครม เป็นสีที่นิยมใช้ซ่อมเส้นใยโปรตีน ตัวสีซ่อมนี้อยู่ในกลุ่มสีซ่อมแอตติกที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบโคออร์ดิเนทที่ถาวรขึ้นกับ โลหะบางชนิดได้ เช่น โครเมียม อลูมิเนียม เป็นต้น สารโคออร์ดิเนทใหม่นี้จะดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่าจึงทำให้มีความคงทนต่อแสงและน้ำได้เพิ่มขึ้น สีประเภทนี้ใช้เป็นสีแอตติกไม่ได้เพราะว่าถ้ายังไม่ได้นำตัวสีทำปฏิกิริยากับโครเมียม สีจะไม่คงทนต่อค่า

9. สีซ่อมอะโซอิก สีซ่อมกลุ่มนี้ใช้ซ่อมกับเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้น ตัวสีซ่อมชนิดนี้เป็นสารประกอบอะโซเท่านั้น แต่ว่าตัวสีไม่ละลายน้ำ

10. สีซ่อมโลหะ เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำใช้ซ่อมเส้นใยเซลลูโลสและให้สีต่าง ๆ กัน เมื่อซ่อมแล้วต้องทำให้สารตัวนี้ตกตะกอนภายในเส้นใยด้วย

#### ข.4.5 จำแนกตามวิธีการซ่อม

1. การซ่อมโดยตรงกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและตัวสีมีมาก การซ่อมโดยตรงในน้ำซึ่งประกอบด้วยตัวสีและสารช่วยซ่อมที่เหมาะสม ภาชนะน้ำซ่อมจำแนกออกตามชนิดของสารช่วยซ่อมออกเป็น 3 ชนิด คือ เป็นกรด เป็นด่าง และเป็นกลาง สีในกลุ่มนี้ได้แก่ สีซ่อมไครลิก สีแอตติก สีเบสิก สีคิสเพอร์ส สีอาซิเตท ฯลฯ

2. การซ่อมด้วยสารช่วยติดกำลังยึดระหว่างเส้นใยและตัวสีมีน้อย การนำไปซ่อมด้วยสารเคมีก่อนจะช่วยให้เส้นใยและสีรวมตัวยึดกันได้ดีขึ้น ดังนั้นเวลาซ่อมด้วยสารเคมีให้เป็นตัวกลางเชื่อมก่อน สีในกลุ่มนี้ได้แก่ สีเบสิก สีโครมที่เป็นกรด สีมอร์แคนท์

3. การซ่อมแบบต้องลดขนาดตัวสีก่อน ตัวสีที่ไม่ละลายน้ำจะรวมตัวอยู่กับเส้นใยไม่ได้ เวลาซ่อมต้องลดขนาดโมเลกุลของสีให้เล็กลงให้มากที่สุดก่อน (ละลาย) สารประกอบเกลือโคสจะซึมเข้าไปภายในเส้นใยเวลาซ่อมแล้วออกซิโคซินเป็นตัวสีเดิมที่ไม่ละลายน้ำได้แก่ สีกำมะถัน

4. การข้อมโดยวิธีออกซิไคซ์ต้องข้อมเส้นใยด้วยสารออกซิไคซ์ก่อนเพื่อให้สารนั้นทำปฏิกิริยาออกซิเคชันตัวสีกับเส้นใยให้เกิดเป็นสี สีในกลุ่มนี้ได้แก่ สีออกซิเคชัน สีแว็คที่ละลายน้ำได้

5. การข้อมโดยทำให้เกิดสี ส่วนประกอบของสีแต่ละชนิดแยกกันข้อมทีละครั้ง การทำตกแต่งภายหลังให้เกิดเป็นสีไม่แต่เฉพาะจะใช้กับสีแนฟทอลเท่านั้น ใช้กับสีข้อมโดยตรงก็ได้ สีแนฟทอลและสีออกซิเคชันที่ต้องข้อมทับล้นรวมอยู่ในกลุ่มนี้

6. การข้อมที่ต้องทำให้สีติดสารที่ใช้เป็นตัวติดกับเส้นใยเองไม่ได้ต้องทำให้ติดโดยการข้อมทับหรือตกแต่งภายหลังข้อมใช้สารเคมีช่วย ได้แก่ ปีกเมนต์ชนิดต่าง ๆ

## ข.5 การข้อม

### ข.5.1 หลักการข้อมผ้า

กรรมวิธีในการข้อมผ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การข้อมผ้าในหม้อต้มแบบครั้งคราว และการข้อมแบบต่อเนื่องในเครื่องข้อมการข้อมแบบครั้งคราวนั้นให้น้ำปริมาณน้อยแต่ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกสูง ส่วนการข้อมแบบต่อเนื่องจะให้ผลตรงข้ามกัน เนื่องจากกรรมวิธีในการข้อมผ้าแต่ละแบบมีความแตกต่างกัน ทางด้านตัวสีข้อม สารช่วยข้อม และสามารถติดสีบนเนื้อผ้าเป็นต้น จึงทำให้สารมลพิษที่ติดมากับน้ำข้อมแตกต่างกัน การข้อมที่มีประสิทธิภาพนั้นก็คือการข้อมให้สีผ้ามีสีที่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งผืนผ้าและด้าย สีข้อมต้องติดเส้นใยเข้าไปถึงภายในและต้องทนต่อการซักล้างไม่หลุดออกได้ง่าย การข้อมโดยทั่วไปจะนำสีข้อมมาทำให้อยู่ในรูปสารละลายหรือสารแขวนลอย ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำมาข้อมเส้นใยที่ต้องการตามด้วยกระบวนการทำให้สีข้อมติดกับเส้นใยเพื่อให้ความคงทนต่อการซักล้างด้วยน้ำยาต่าง ๆ การข้อมสี

โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

1. การทำให้เกิดการแพร่กระจายหรือซึมผ่านบนพื้นผิวของเส้นใย
2. การดูดซึมสีข้อมของเส้นใย
3. การซึมผ่านของโมเลกุลสีข้อมผ่านชั้นกั้นทางจุลศาสตร์เข้าไปภายในเส้นใย
4. การดูดซับ
5. การถ่ายสีด้วยแรงเชิงกลโดยการอัด
6. การกักเก็บเชิงกล
7. ปฏิกิริยาเคมีบนเส้นใย
8. การสร้างพันธะทางเคมีกับอนุภาคของเส้นใย
9. การละลายในเส้นใย เช่น การละลายของสีข้อมชนิดคิสเพอร์สที่เป็นของแข็ง ในเส้น

### ไฮโพลีเอสเทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติแล้วขั้นตอนที่สีข้อมซึมผ่านเส้นใยจะเป็นขั้นตอนที่ช้าและมีผลต่ออัตรา การข้อมสีมากที่สุด ความเข้าใจในหลักการต่าง ๆ เหล่านี้จะเกี่ยวเนื่องกับคุณสมบัติของตัวข้อมสี ซึ่งจะใช้เป็นหลักเกณฑ์สำคัญในการเลือกชนิดของสีข้อม โดยเฉพาะการผสมสี 3 สี เครื่องข้อมผ้า รุ่นใหม่ที่มี ระบบควบคุมโดยไมโครโปรเซสเซอร์ สามารถควบคุมตัวแปรในการข้อมผ้าต่าง ๆ ได้ ดี เช่น ปริมาณการใช้สีข้อมและสารเคมีต่าง ๆ

#### ข.5.2 สารช่วยข้อม

สารช่วยข้อม คือสารเคมีที่ใส่ลงไปในการบวนการข้อมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการ ดูดติดสีได้มากขึ้น ทำให้สีที่ติดเส้นใยมีความคงทนสม่ำเสมอ

##### ข.5.2.1 ประเภทสารช่วยข้อม

1. กรดใช้สำหรับข้อมเส้นใยโปรตีน และไนลอนเมื่อใช้สีข้อมแอลลิก
2. ด่าง ใช้สำหรับข้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีข้อมอะโซอิก แว้ด และ กำมะถัน
3. เกลือ ใช้ในการข้อมด้วยสีข้อมแอลลิก และการข้อมเส้นใยเซลลูโลสทุก ชนิด
4. สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ ใช้กับสีแว้ด
5. สารนำใช้เมื่อข้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
6. สารละลายอินทรีย์ ใช้เมื่อข้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
7. สารรับอิเล็กตรอนใช้สำหรับรับอิเล็กตรอนจากสีบางชนิดเพื่อ ประโยชน์ในการ ดูดซึมเข้าไปในเส้นใย

##### ข.5.3 น้ำข้อม / พื้นผิวที่สัมผัส

ลักษณะและอัตราการหมุนเวียนของของเหลว เช่น ในเครื่องเจ็ต เครื่องบีบ หรือแป็คแกง จะทำหน้าที่ควบคุมความสม่ำเสมอของสีที่ข้อมให้คงที่

##### ข.5.4 วิธีการต่าง ๆ และเทคนิคในการข้อมสี

มีวิธีการและเทคนิคหลายอย่าง ที่ทำให้สีข้อมติดแน่นบนเส้นใยอย่างถาวรแต่ ละวิธีจะมีลักษณะ เฉพาะของตัวเอง

##### ข.5.5 อัตราส่วนของของเหลว

อัตราส่วนของของเหลวที่ใช้ ในขณะที่ข้อมสีจะมีผลกระทบอย่างมากต่อการ ใช้สีทุกชนิด อัตราส่วนของของเหลวถูกกำหนดโดยชนิดของเครื่องที่ใช้ การใช้อัตราส่วนของของเหลวในอัตราต่ำจะทำให้ปริมาณการ ใช้สีข้อมรีแอคทีฟเป็นไปอย่างประหยัด ซึ่งจะช่วยลดการ สูญเสีย เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสใน Dye bath เช่นในการข้อมสีรีแอคทีฟบนผ้าคอตตอน ใช้เครื่องข้อมแบบแป็คแกง การข้อมด้วยเครื่อง จิกเกอร์ จะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการ ข้อมด้วยเครื่องวินซ์ และการข้อมสีที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ก็คือวิธีการ Pad-roll หรือ Pad- batch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะใช้อัตราส่วนของของเหลวในการข้อมเป็น 1:1 ในปัจจุบันเทคโนโลยีการข้อมสีรีแอคทีฟในอัตราส่วนของของเหลวที่ต่ำหรือต่ำมาก ๆ โดยเครื่อง Jet dyeing ได้ถูกพิจารณาแล้วว่าเป็นวิธีการที่ดีในแง่เศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

สำหรับผ้าฝ้ายส่วนใหญ่แล้วจะข้อมด้วยสีไครเรทท์และสีรีแอคทีฟ ส่วนระบบการข้อมก็ได้มีการพัฒนาขึ้นมาใหม่หลายอย่าง เช่น ระบบการข้อมที่ใช้ปริมาณเกลือต่ำ อัตราส่วนของน้ำและวัสดุข้อมนอกจากนี้ยังมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้อมใหม่ ๆ ขึ้นมาทำให้อุตสาหกรรมฟอกข้อมสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความคงทนสูง มีต้นทุนการผลิตต่ำและยังช่วยลดปริมาณน้ำทิ้งที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมด้วย

## ข.6 แหล่งกำเนิดและลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกข้อม

### ข.6.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสีย

#### ข.6.1.1 น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการข้อมผ้า

1. กระบวนการต้มแป้ง เป็นการกำจัดแป้งที่ติดมากับกระบวนการทอออก การต้มแป้งเป็นการทำให้แป้งสลายตัวเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้
2. กระบวนการทำความสะอาด เป็นการเอาสิ่งสกปรกที่ติดมากับเส้นใยออกก่อนที่จะนำไปทอเป็นผืนผ้า
3. กระบวนการฟอกขาว เป็นการกำจัดสีธรรมชาติของเส้นใยออกโดยใช้สารเคมีคือ โซเดียมไฮโปคลอไรด์ กระบวนการนี้จะทำก่อนการข้อมเพื่อให้สีติดสีดีขึ้นและสีไม่เปลี่ยน
4. กระบวนการชุบมัน เป็นการทำให้ผ้าเพิ่มความมันและดูสีได้มากขึ้น ทำให้ผ้านุ่มทำได้โดยการชุบผ้าลงในน้ำยาโซดาไฟที่อุณหภูมิต่ำ
5. กระบวนการข้อมสี และการตกแต่งพิเศษ
6. กระบวนการพิมพ์ผ้า

ข.6.1.2 น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ในกระบวนการฟอกข้อมจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ถ้าไอน้ำถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำจะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำข้อมโดยตรง จะไปเพิ่มปริมาณของน้ำข้อมและถูกรวมเป็นน้ำเสีย

ข.6.1.3 น้ำหล่อเย็น ในกระบวนการข้อมบางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของน้ำข้อมลงในระยะเวลาอันสั้นซึ่งทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

#### ข. 6.1.4 น้ำที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### การกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

#### ข้อ 1. คำจำกัดความ

น้ำเสีย หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการ โครงการงานอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อมและให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงาน รวมถึงจากกิจกรรมอื่นๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง ที่กำหนด ไว้ในประกาศนี้

#### ข้อ 2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0
2. ทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่าดังนี้
  - 2.1 ค่า ทีดีเอส ไม่มากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 2.2 น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่าความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า ทีดีเอส ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่า ทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. โลหะหนักมีค่าดังนี้
  - 4.1 ปรอท (Mercury) ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 4.2 เซลเลนียม (Selenium) ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 4.3 แคดเมียม (Cadmium) ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 4.4 ตะกั่ว (Lead) ไม่มากกว่า 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 4.5 อาร์เซนิก (Arsenic) ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 4.6 โครเมียม (Chromium)
    - 4.6.1 Hexavalent Chromium ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
    - 4.6.2 Trivalent Chromium ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 4.7 บาเรียม (Barium) ไม่มากกว่า 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4.8 นิกเกิล (Nickel) ไม่มากกว่า 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.9 ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.10 สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.11 แมงกานีส (Manganese) ไม่มากกว่า 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. ซัลไฟด์(Sulphide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
6. ไซยาไนด์(Cyanide)คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์( $HCN$ ) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
7. ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
8. สารประกอบฟีนอล (Phenols Compound) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
9. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
10. เพสติกไซด์ (Pesticide) ต้องไม่มี
11. อุณหภูมิ ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส
12. สี ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
13. กลิ่น ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
14. น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร
15. ค่า บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
16. ค่า ทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร
17. ค่า ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม แต่ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อ 3 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ 2 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

1. การตรวจสอบค่าความเป็นกรดและด่างของน้ำทิ้ง ให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดแกลด่างของน้ำ ( pH Meter )
2. การตรวจสอบค่า ทีดีเอส ให้ใช้วิธีการระเหยแห้ง ระหว่างอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ถึง อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง
3. การตรวจสอบค่าสารแขวนลอย ให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว ( Glass Fiber Filter Disc )
4. การตรวจสอบค่าโลหะหนัก ให้ใช้วิธีการดังนี้
  - 4.1 การตรวจสอบค่าสังกะสี โครเมียม ทองแดง แคดเมียม แมงกานีส ตะกั่ว นิกเกิล และแมงกานีส ให้ใช้วิธีอะตอมมิก แอปซอพชั่น สเปกโตรโฟโตเมตริ ( Atomic Absorption Spectrophotometry ) ชนิดไคเร็คเอสปิเรชั่น ( Direct Aspiration ) หรือวิธีพลาสมา อิมิสชั่น สเปกโตรสโคปี ( Plasma Emission Spectroscopy ) ชนิดอินดักทีฟลี คัพเพิลพลาสมา ( Inductively Coupled Plasma : ICP )
  - 4.2 การตรวจสอบค่าอาร์เซนิก และเซลเนียม ให้ใช้วิธีอะตอมมิก แอปซอพชั่น สเปกโตรโฟโตเมตริ ( Atomic Absorption Spectrophotometry ) ชนิดไฮไดรด์ เจนเนอเรชั่น ( Hydride Generation ) หรือวิธีพลาสมา อิมิสชั่น สเปกโตรสโคปี ( Plasma Emission Spectroscopy ) ชนิด อินดักทีฟลี คัพเพิล พลาสมา ( Inductively Coupled Plasma : ICP )
  - 4.3 การตรวจสอบค่าปรอท ให้ใช้วิธีอะตอมมิก แอปซอพชั่น โคลด์ เวปอร์ เทคนิค ( Atomic- Absorption Cold Vapour Technique )
5. การตรวจสอบค่าซัลไฟด์ ให้ใช้วิธีการไตเตรท ( Titrate )
6. การตรวจสอบค่าไซยาไนด์ ให้ใช้วิธีกลั่นและตามด้วยวิธีไพริดีน บาร์บิturic แอซิด ( Pyridine- – Barbituric Acid )
7. การตรวจสอบค่าฟอร์มัลดีไฮด์ ให้ใช้วิธีเทียบสี ( Spectrophotometry )
8. การตรวจสอบค่าสารประกอบฟีนอล ให้ใช้วิธีกลั่น และตามด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน ( Distillation, 4-Aminoantipyrine )
9. การตรวจสอบค่าคลอรีนอิสระ ให้ใช้วิธีไอโอดิเมตริค ( Iodometric Method )
10. การตรวจสอบค่าสารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ ให้ใช้วิธีก๊าซโครมาโตกราฟี ( Gas – Chromatography )
11. การตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำ ให้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
12. การตรวจสอบค่าน้ำมันและไขมัน ให้ใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. การตรวจสอบค่าบีไอดี ให้ใช้วิธีอะไซด์โมดิฟิเคชัน (Azide Modification) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน คัดค่อนกัน หรือวิธีอื่นที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมให้ความเห็นชอบ
14. การตรวจสอบค่าทีเคเอ็น ให้ใช้วิธีเจลดาคาล์ (Kjeldahl)
15. การตรวจสอบค่าซีไอดี ให้ใช้วิธีย่อยสลาย โดยโปตัสเซียม ไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion)

#### ข้อ 4 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ตามข้อ 3 จะต้องเป็นไปตามคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของสมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย หรือ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ซึ่ง American Public Health Association, American Water Work Association และ Water Environment Federation ของ

สหรัฐอเมริกา ร่วมกันกำหนดไว้ด้วย

แหล่งที่มา : พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535.ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2(พ.ศ.2536) ประกาศราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 113 ตอนที่ 5 ง.วันที่ 27 มิถุนายน 2539

## ภาคผนวก ง

### การหาความเข้มข้นของสารละลายสี

#### ง.1 วิธีการสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน (Calibration Curve)

1. นำสารละลายสีที่มีความเข้มข้นเจือจางมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นนำค่าสเปกตรัมที่ได้มาหาค่าความยาวคลื่นแสงที่ให้การดูดกลืนแสงมากที่สุด ( $\lambda_{max}$ )
2. เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆสารละลาย Congo Red เตรียมที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง 40 ppm
3. นำสารละลายที่เตรียมไว้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ ( $\lambda_{max}$ ) ของแต่ละสารละลาย
4. นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลาย ก็จะได้กราฟเทียบมาตรฐาน

#### ง.2 วิธีการหาค่าความเข้มข้นของสารละลายสี

1. นำสารละลายสีที่ต้องการหาความเข้มข้นมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่  $\lambda_{max}$  ของแต่ละสารละลาย
2. นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาหาความเข้มข้นโดยใช้เทียบมาตรฐาน

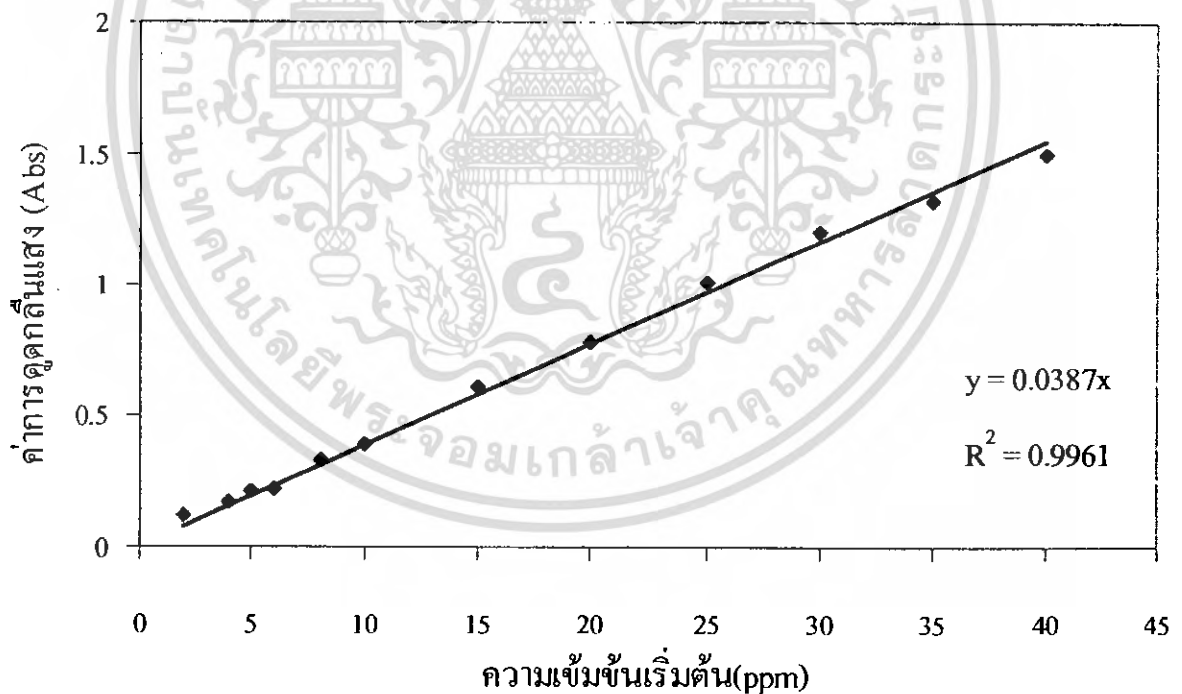
#### ง.3 กราฟเทียบมาตรฐาน

ความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ( $\lambda_{max}$ )

- สารละลายสี Congo Red = 497 นาโนเมตร

ตารางที่ ง.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายสีข้อม Congo Red

ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)
2	0.116	15	0.611
4	0.172	20	0.783
5	0.210	25	1.009
6	0.221	30	1.200
8	0.332	35	1.321
10	0.386	40	1.500



รูปที่ ง.1 กราฟเทียบมาตรฐานสารละลายสีข้อม Congo Red

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm

ตารางที่ จ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี  
ซ้อม Congo Red โดยใช้ดินข่าขนาด Mesh number 20-60 ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเริ่มต้นมีลิกรัมต่อลิตร (ppm)								
	30 ppm			60 ppm			90 ppm		
	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>
0	30.00	0	1	60.04	0	1	90.87	0	1
5	29.80	0.1	0.993	57.04	1.499	0.950	86.51	2.179	0.952
10	29.07	0.465	0.969	56.62	1.706	0.943	85.89	2.489	0.945
15	28.50	0.750	0.950	55.49	2.274	0.924	85.27	2.799	0.938
20	28.37	0.815	0.945	54.66	2.687	0.9104	84.34	3.264	0.928
30	27.70	1.150	0.923	53.83	3.101	0.896	81.70	4.582	0.899
40	26.53	1.735	0.884	51.83	4.101	0.863	80.31	5.580	0.883
50	26.07	1.965	0.869	51.25	4.393	0.853	80.00	5.435	0.880
60	25.55	2.225	0.851	51.04	4.496	0.850	78.13	6.365	0.859
80	24.16	2.920	0.805	48.77	5.633	0.812	77.98	6.443	0.858
100	24.88	2.560	0.829	47.63	6.202	0.793	76.58	7.140	0.842
120	24.26	2.870	0.808	46.80	6.615	0.779	75.19	7.838	0.827
150	22.50	3.750	0.750	44.43	7.804	0.740	75.03	7.916	0.825
180	22.22	3.890	0.740	44.03	8	0.733	73.64	8.613	0.810

ตารางที่ จ.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี  
 ย้อม Congo Red โดยใช้ดินข่า ขนาด Mesh number 20-60 ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเริ่มต้นมีลิกรัมต่อลิตร (ppm)								
	180ppm			300ppm			600 ppm		
	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>
0	180.13	0	1	300.70	0	1.	600.2	0	1
5	178.61	0.762	0.991	300.00	0.35	1.000	593.46	3.37	0.988
10	174.82	2.655	0.970	295.86	2.417	0.986	584.71	7.745	0.974
15	169.54	5.295	0.941	293.79	3.451	0.979	572.61	13.795	0.954
20	168.12	6.005	0.933	293.54	3.580	0.978	571.06	14.57	0.951
30	166.69	6.72	0.925	293.54	3.580	0.978	570.06	15.07	0.950
40	165.35	7.388	0.918	289.40	5.647	0.964	567.95	16.12	0.946
50	162.63	8.749	0.902	288.11	6.293	0.960	565.89	17.12	0.942
60	160.60	9.764	0.891	286.82	9.393	0.956	564.86	17.67	0.941
80	158.72	10.703	0.881	281.91	10.169	0.939	559.17	20.513	0.931
100	156.08	11.726	0.869	280.36	10.169	0.934	557.42	21.39	0.928
120	156.08	12.023	0.866	281.013	9.786	0.937	556.82	21.69	0.927
150	154.32	12.904	0.856	279.84	10.428	0.932	556.04	22.08	0.926
180	153.09	13.516	0.849	267.95	16.371	0.893	555.32	22.44	0.927

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี  
ย้อม Congo Red โดยใช้ดินข่า ขนาด Mesh number 20-60 ที่อุณหภูมิห้อง

Co (ppm)	C (ppm)	q (mg/g)	c/q	ln C	ln q
30	22.22	3.89	5.71	3.1	1.35
60.04	44.03	8	5.5	3.78	2.07
60.36	42.687	8.364	5.1	3.75	2.12
90.87	73.643	8.613	8.55	4.64	2.15
180.13	153.098	13.516	11.32	5.03	2.6
300	279.327	16.327	17.1	5.63	2.79
300.7	267.958	16.371	16.36	5.59	2.79
450.32	410.43	19.94	20.58	6.01	2.99
585.56	540.051	22.754	23.73	6.29	3.12
600.2	555.32	22.44	24.74	6.31	3.11
730	685.35	22.325	30.69	6.52	3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

ตารางแสดงผลของการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับ

ตารางที่ ฉ.1 ผลของการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ดินข่านขนาด Mesh number 20-60 อุณหภูมิห้อง ที่ปริมาณต่าง ๆ

เวลา (นาที)	น้ำหนัก								
	1 กรัม			2 กรัม			3 กรัม		
	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>
0	40.10	0	1	40.10	0	1	40.31	0	1
5	37.28	1.410	0.907	34.70	1.349	0.865	35.34	0.826	0.876
10	36.40	1.846	0.905	33.17	1.730	0.827	30.20	1.683	0.749
15	36.30	1.898	0.876	31.80	2.073	0.793	28.47	1.971	0.706
20	35.14	2.479	0.853	30.00	2.525	0.748	26.82	2.246	0.665
30	34.23	2.932	0.831	28.39	2.927	0.707	23.61	2.780	0.586
40	33.33	2.232	0.819	26.92	3.293	0.671	21.93	3.060	0.544
50	32.86	3.3616	0.796	24.67	3.855	0.615	19.66	3.439	0.463
60	31.93	4.082	0.770	23.92	4.043	0.596	17.82	3.746	0.442
80	30.87	4.611	0.770	21.86	4.560	0.545	16.51	3.964	0.409
100	30.49	4.805	0.760	19.68	5.100	0.490	14.03	4.318	0.348
120	29.27	5.412	0.730	18.29	5.451	0.456	12.09	4.701	0.300
150	28.17	5.955	0.703	17.20	5.722	0.429	11.11	4.864	0.275
180	27.00	6.545	0.673	15.65	6.110	0.390	10.56	4.955	0.262
210	26.71	6.691	0.666	14.88	6.304	0.971	9.22	5.179	0.228
240	25.86	7.117	0.645	13.97	6.530	0.348	8.91	5.230	0.221
270	25.52	7.285	0.636	13.56	6.633	0.338	8.21	5.347	0.203
300	25.19	7.454	0.628	12.73	6.840	0.317	7.98	5.386	0.198

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.2 ผลของการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ดินขาว ขนาด Mesh number 20-60 อุณหภูมิห้อง ที่ปริมาณต่างๆ

เวลา (นาที)	น้ำหนัก					
	4 กรัม			5 กรัม		
	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>
0	40.31	0	1	40.23	0	1
5	30.59	0.758	0.758	28.11	1.217	0.698
10	27.36	0.678	0.678	26.17	1.405	0.650
15	25.83	0.640	0.640	22.42	1.780	0.557
20	22.76	0.564	0.564	19.71	2.051	0.490
30	18.81	0.466	0.466	15.24	2.498	0.378
40	15.96	3.042	0.395	13.43	2.679	0.334
50	13.48	3.352	0.334	10.92	2.930	0.271
60	13.15	3.394	0.326	8.81	3.149	0.219
80	10.33	3.746	0.256	7.98	3.225	0.198
100	8.70	3.950	0.215	6.61	3.361	0.164
120	8.25	4.005	0.205	6.53	3.369	0.162
150	7.64	4.082	0.189	6.04	3.418	0.150
180	6.58	4.215	0.163	5.84	3.439	0.145
210	6.46	4.231	0.160	5.71	3.451	0.141
240	6.30	4.250	0.156	5.58	3.464	0.138
270	6.15	4.270	0.152	5.40	3.482	0.134
300	5.86	4.305	0.145	5.06	3.516	0.125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับ

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีเขียวอม  
Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ดินข่า ขนาด Mesh number 20-60 อนุกรม  
ห้องที่ปริมาณ ต่าง ๆ

เวลา (นาที)	$t^{0.5}$	1 กรัม			2 กรัม			3 กรัม		
		$q_t$	$\log(q_t - q_\infty)$	$t/q_t$	$q_t$	$\log(q_t - q_\infty)$	$t/q_t$	$q_t$	$\log(q_t - q_\infty)$	$t/q_t$
0	0	0	0.872	0	0	0.84	0	0	0.731	0
5	2.23	1.410	0.781	3.55	1.349	0.74	3.71	0.826	0.658	6.053
10	3.16	1.846	0.748	5.42	1.730	0.71	5.78	1.683	0.568	5.941
15	3.87	1.898	0.745	7.90	2.073	0.68	7.24	1.971	0.533	7.610
20	4.47	2.479	0.697	8.07	2.525	0.63	7.92	2.246	0.496	8.904
30	5.48	2.932	0.655	10.23	2.927	0.59	10.25	2.780	0.415	10.791
40	6.32	2.232	0.680	11.82	3.293	0.55	12.15	3.060	0.366	13.071
50	7.07	3.3616	0.584	13.83	3.855	0.47	12.97	3.439	0.289	14.539
60	7.75	4.082	0.528	14.70	4.043	0.45	14.84	3.746	0.214	16.017
80	8.94	4.611	0.454	17.35	4.560	0.36	17.54	3.964	0.152	20.181
100	10.00	4.805	0.423	20.81	5.100	0.24	19.61	4.318	0.003	22.841
120	10.95	5.412	0.310	22.17	5.451	0.14	21.66	4.701	-0.164	25.520
150	12.25	5.955	0.175	25.19	5.722	0.05	26.21	4.864	-0.282	30.830
180	13.41	6.545	-0.043	27.49	6.110	-0.14	29.46	4.955	-0.365	36.320
210	14.49	6.691	-0.117	31.38	6.304	-0.27	33.31	5.179	-0.684	40.548
240	15.49	7.117	-0.472	33.72	6.530	-0.51	36.75	5.230	-0.806	45.889
270	16.43	7.285	-0.472	37.94	6.633	-0.68	40.71	5.347	-1.408	50.490
300	17.32	7.454	-	40.25	6.840	-	43.86	5.386	-	55.690

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีข้อม  
Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ดินข่า ขนาด Mesh number 20-60 อนุกรม  
ห้องที่ปริมาณ ต่าง ๆ

เวลา (นาที)	$t^{0.5}$	4 กรัม			5 กรัม		
		$q_t$	$\log(q_1 - q_t)$	$t/q_t$	$q_t$	$\log(q_1 - q_t)$	$t/q_t$
0	0	0	0.633	0	0	0.546	0
5	2.23	0.758	0.489	4.115	1.217	0.361	4.108
10	3.16	0.678	0.429	6.180	1.405	0.324	7.111
15	3.87	0.640	0.397	8.287	1.780	0.239	8.426
20	4.47	0.564	0.324	9.119	2.051	0.165	9.740
30	5.48	0.466	0.208	11.164	2.498	0.007	12.009
40	6.32	3.042	0.101	13.149	2.679	-0.007	14.930
50	7.07	3.352	-0.020	14.916	2.930	-0.232	17.064
60	7.75	3.394	-0.040	17.678	3.149	-0.425	19.053
80	8.94	3.746	-0.252	21.356	3.225	-0.536	24.806
100	10.00	3.950	-0.449	25.316	3.361	-0.811	29.755
120	10.95	4.005	-0.522	29.962	3.369	-0.832	35.612
150	12.25	4.082	-0.651	36.746	3.418	-1.010	43.881
180	13.41	4.215	-1.045	42.704	3.439	-1.113	52.340
210	14.49	4.231	-1.130	49.633	3.451	-1.187	60.832
240	15.49	4.250	-1.259	56.206	3.464	-1.283	69.282
270	16.43	4.270	-1.455	63.231	3.482	-1.468	77.541
300	17.32	4.305	-	69.685	3.516	-	85.321

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ

ตารางที่ ข.1 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสีข้อม Congo Red ที่ความเข้มข้น 40ppm โดยใช้ต้นข้าวขนาด Mesh number 20-60 ปริมาณ 1 กรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (นาท)	อุณหภูมิ					
	อุณหภูมิ 25°C			อุณหภูมิ 35°C		
	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>
0	40.06	0	1.00	40.39	0	1
5	37.81	1.124	0.94	38.04	1.176	0.942
10	35.23	2.416	0.88	35.56	2.416	0.880
15	33.81	3.127	0.84	34.86	2.765	0.863
20	31.53	4.263	0.79	34.70	2.842	0.859
30	30.97	4.547	0.77	34.32	3.036	0.850
40	29.29	5.385	0.73	33.28	3.553	0.824
50	29.15	5.456	0.73	32.43	3.979	0.803
60	29.23	5.414	0.73	32.33	4.031	0.800
80	26.99	6.536	0.67	31.86	4.264	0.789
100	25.14	7.459	0.63	30.44	4.974	0.754
120	25.63	7.218	0.64	29.97	5.207	0.742
150	25.03	7.516	0.62	29.46	5.465	0.729
180	25.31	7.374	0.63	28.76	5.814	0.712
210	25.17	7.445	0.63	27.70	6.344	0.686
240	24.77	7.644	0.62	28.09	6.150	0.695
270	24.69	7.686	0.62	27.55	6.421	0.682
300	24.01	8.027	0.60	27.52	6.434	0.681

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ					
	อุณหภูมิ 25°C			อุณหภูมิ 35°C		
	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>
330	24.26	7.899	0.61	26.87	6.757	0.665
360	23.72	8.169	0.59	26.80	6.796	0.663
390	23.84	8.112	0.59	26.90	6.744	0.666
420	23.64	8.212	0.59	26.33	7.028	0.652

ตารางที่ ข.2 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red ที่ความเข้มข้น 40ppm โดยใช้ต้นข้าว ขนาด Mesh number 20-60 ปริมาณ 1 กรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ					
	อุณหภูมิ 45°C			อุณหภูมิ 55°C		
	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>
0	40.39	0	1	40.15	0	1
5	36.61	1.886	0.907	37.98	1.085	0.946
10	35.99	2.196	0.891	35.91	2.119	0.894
15	35.56	2.416	0.880	34.88	2.636	0.869
20	34.70	2.842	0.859	33.82	3.165	0.842
30	33.67	3.359	0.834	33.17	3.488	0.826
40	33.39	3.501	0.827	33.35	3.398	0.831
50	32.35	4.018	0.801	32.66	3.747	0.813
60	31.73	4.328	0.786	33.33	3.411	0.830
80	31.01	4.690	0.768	31.78	4.186	0.792
100	30.88	4.755	0.765	31.86	4.147	0.793
120	30.13	5.129	0.746	31.57	4.289	0.786
150	29.48	5.452	0.730	30.23	4.961	0.753
180	28.63	5.879	0.709	30.67	4.742	0.764
210	28.29	6.047	0.701	29.63	5.258	0.738

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ					
	อุณหภูมิ 45°C			อุณหภูมิ 55°C		
	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>	C(ppm)	q(mg/g)	C/ C <sub>0</sub>
240	28.04	6.176	0.694	29.17	5.491	0.727
270	27.73	6.331	0.687	28.76	5.698	0.716
300	27.18	6.602	0.673	28.68	5.736	0.714
330	27.21	6.589	0.674	28.65	5.749	0.714
360	26.67	6.860	0.660	28.39	5.879	0.707
390	26.64	6.873	0.660	28.37	5.891	0.707
420	26.41	6.990	0.654	28.14	6.008	0.701

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับ

ตารางที่ ฉ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายซีซียม Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ดินข่า ขนาด Mesh number 20-60 ปริมาณ 1 กรัม ที่ อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (นาที)	$t^{0.5}$	อุณหภูมิ 25°C			อุณหภูมิ 35°C		
		$q_t$	$\log(q_t - q_\infty)$	$t/q_t$	$q_t$	$\log(q_t - q_\infty)$	$t/q_t$
0	0	0	0.914	-	0	0.847	-
5	2.23	1.124	0.851	4.448	1.176	0.767	4.252
10	3.16	2.416	0.763	4.139	2.416	0.664	4.139
15	3.87	3.127	0.706	4.797	2.765	0.630	5.425
20	4.47	4.263	0.596	4.692	2.842	0.622	7.037
30	5.48	4.547	0.564	6.598	3.036	0.601	9.881
40	6.32	5.385	0.451	7.428	3.553	0.541	11.258
50	7.07	5.456	0.440	9.164	3.979	0.484	12.566
60	7.75	5.414	0.447	11.082	4.031	0.477	14.885
80	8.94	6.536	0.224	12.240	4.264	0.442	18.762
100	10.00	7.459	-0.123	13.407	4.974	0.313	20.105
120	10.95	7.218	-0.003	16.625	5.207	0.260	23.046
150	12.25	7.516	-0.157	19.957	5.465	0.194	27.447
180	13.41	7.374	-0.077	24.410	5.814	0.084	30.960
210	14.49	7.445	-0.115	28.207	6.344	-0.165	33.102
240	15.49	7.644	-0.246	31.397	6.150	-0.057	39.024
270	16.43	7.686	-0.279	35.129	6.421	-0.217	42.050
300	17.32	8.027	-0.733	37.374	6.434	-0.226	46.627
330	18.16	7.899	-0.504	41.777	6.757	-0.567	48.838
360	18.97	8.169	-1.367	44.069	6.796	-0.635	52.972
390	19.74	8.112	-1	48.077	6.744	-0.547	57.829
420	20.49	8.212	-	51.145	7.028	-	59.761

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีข้อม  
Congo Red ที่ความเข้มข้น 40 ppm โดยใช้ดินข่า ขนาด Mesh number 20-60 ปริมาณ  
1 กรัม ที่ อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (นาท)	$t^{0.5}$	อุณหภูมิ 45°C			อุณหภูมิ 55°C		
		$q_t$	$\log(q_t - q_\infty)$	$t/q_t$	$q_t$	$\log(q_t - q_\infty)$	$t/q_t$
0	0	0	0.844	-	0	0.779	-
5	2.23	1.886	0.708	2.651	1.085	0.692	4.608
10	3.16	2.196	0.681	4.554	2.119	0.590	4.719
15	3.87	2.416	0.660	6.209	2.636	0.528	5.690
20	4.47	2.842	0.618	7.037	3.165	0.454	6.319
30	5.48	3.359	0.560	8.931	3.488	0.401	8.601
40	6.32	3.501	0.543	11.425	3.398	0.416	11.772
50	7.07	4.018	0.473	12.444	3.747	0.354	13.344
60	7.75	4.328	0.425	13.863	3.411	0.414	17.590
80	8.94	4.690	0.362	17.058	4.186	0.260	19.111
100	10.00	4.755	0.349	21.030	4.147	0.270	24.114
120	10.95	5.129	0.270	23.396	4.289	0.235	27.979
150	12.25	5.452	0.187	27.513	4.961	0.020	30.236
180	13.41	5.879	0.046	30.617	4.742	0.102	37.959
210	14.49	6.047	-0.025	34.728	5.258	-0.126	39.939
240	15.49	6.176	-0.089	38.860	5.491	-0.287	43.708
270	16.43	6.331	-0.181	42.647	5.698	-0.510	47.385
300	17.32	6.602	-0.411	45.441	5.736	-0.567	52.301
330	18.16	6.589	-0.397	50.083	5.749	-0.588	57.401
360	18.97	6.860	-0.886	52.478	5.879	-0.893	61.235
390	19.74	6.873	-0.932	56.744	5.891	-0.936	66.203
420	20.49	6.990	-	60.086	5.891	-	69.918

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้