

การบำบัดน้ำเสียสี้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยซีเลื่อย  
ปรับปรุงคุณภาพ

REACTIVE BLUE 19 DYES TREATMENT IN WASTEWATER  
BY SAWDUST MODIFIED



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การบำบัดน้ำเสียสี้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยซีลี้อย  
ปรับปรุงคุณภาพ

REACTIVE BLUE 19 DYES TREATMENT IN WASTEWATER  
BY SAWDUST MODIFIED



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REACTIVE BLUE 19 DYES TREATMENT IN WASTEWATER  
BY SAWDUST MODIFIED



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
(ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ      การบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยขี้เลื่อยปรับปรุงคุณภาพ  
 ชื่อนักศึกษา                นางสาวเพ็ญพิมพ์ เล่าหะรัตน์      รหัสนักศึกษา 56050735  
    นางสาวภารดี คลอดแคล้ว              รหัสนักศึกษา 56050740  
    นางสาวมัทรี ทวลกะสิน                รหัสนักศึกษา 56050742

ปริญญา                        วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
 ภาควิชา                        เคมี  
 ปีการศึกษา                    2559  
 อาจารย์ที่ปรึกษา              ดร.กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี  
 สิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ประธานกรรมการ	
ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ กรรมการ	
ดร.กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยซีลีอียปรับปรุงคุณภาพ	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวเพ็ญพิมพ์ เลาะห์รัตน์	รหัสนักศึกษา 56050735
	นางสาวภาวดี คลอดแคล้ว	รหัสนักศึกษา 56050740
	นางสาวมัทรี หวลกะสิน	รหัสนักศึกษา 56050742
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.กฤษณัฐ สุวรรณรัตน์	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยซีลีอียปรับปรุงคุณภาพ (MRS) โดยใช้ ซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (CTAC) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวประจุบวก พบว่าที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที MRS ขนาด 35 เมช ปริมาณ 0.5 กรัม ( $w/v = 16.67 \text{ kg/m}^3$ ) สามารถดูดซับสีย้อมได้ดีที่ pH 6 มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงถึง 97.24% เป็นไปตามไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟลูนดิช ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของคูบินิน - ราตซ์เควิช สามารถบ่งชี้ได้ว่า ผิวของตัวดูดซับไม่เหมือนกัน และเป็นการดูดซับทางกายภาพ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ (R<sup>2</sup>) ของการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อม พบว่าเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง ในการศึกษาพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อมจากสมการอาร์เรเนียส พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และจากสมการของแวนท์ฮอฟฟ์ในการศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม พบว่าค่าเอนทัลปีมาตรฐาน ( $\Delta H^0$ ) และค่าเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) มีค่าเป็นบวก แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีมาก บ่งบอกถึงการเกิดพันธะหรือมีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ และค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน ( $\Delta G^0$ ) มีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสามารถเกิดได้เองในธรรมชาติโดยอุณหภูมิต่ำที่มีความสัมพันธ์กับโมเลกุลของพื้นที่ผิวตัวดูดซับ และการศึกษาประสิทธิภาพการคายซับ พบว่ากรดไนตริก 0.1 โมลาร์ สามารถคายซับได้ 20.77%

**คำสำคัญ** การดูดซับ, ไอโซเทอร์มการดูดซับ, ซีลีอียปรับปรุงคุณภาพ, อุณหพลศาสตร์, ซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Reactive Blue 19 Dyes treatment in wastewater by Rubber Sawdust Modified.	
<b>Student</b>	Miss Penpim Laoharat	Student ID 56050735
	Miss Paradee KlodKlaew	Student ID 56050740
	Miss Matsee Huankasin	Student ID 56050742
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)	
<b>Department</b>	Chemistry	
<b>Faculty</b>	Science	
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
<b>Academic year</b>	2016	
<b>Advisor</b>	Dr. Glinsukol Suwannarat	

### Abstract

This special project aimed to study the optimize conditions of dyes adsorption reactive blue 19 by Rubber Sawdust Modified (MRS) With Cetyl Trimethyl Ammonium Chlorid (CTAC), this is cationic surfactant. From the experiment, MRS which size 35 mesh amount 0.5 grams (w/v 16.67 kg/m<sup>3</sup>) can adsorb dyes for the best at pH 6 with shaking speed 200 rpm give the effective adsorption equals 97.24 percent. The adsorption characteristics of MRS are according Freundlich isotherm. Complementary with Dubinin-Radushkevich isotherm indicate adsorbent heterogeneous and adsorption process was physical. Kinetic study at the system temperature (25°C-55°C) the pseudo second-order kinetic R<sup>2</sup> 1. Activation energy of dyes adsorption from Arrhenius equation which the effective adsorption was slightly decreasing with the increasing temperature and thermodynamic study of dyes adsorption from van't Hoff which  $\Delta H^0 > 0$  and  $\Delta S^0 > 0$  the process will be endothermic, the more irregular between adsorbent with adsorbate and  $\Delta G^0 < 0$  indicated the feasibility of the process and the spontaneous nature of the adsorption by at different temperatures effect with molecule of the surface area adsorbent. Finally, study efficiency desorption nitric acid 0.1 M give the effective desorption equals 20.77 percent.

**Keyword :** Adsorption, Isotherm, Rubber Sawdust Modified (MRS) , Kinetics, Cetyl Trimethyl Ammonium Chlorid (CTAC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สามารถเสร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายเป็นอย่างดี ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ดร.กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะคอยช่วยเหลือ ตลอดจนแนะแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนการทดลอง ทำให้การดำเนินงานผ่านไปได้อย่างดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ ที่ช่วยชี้แนะข้อบกพร่องและแนวทางการแก้ไขปัญหา รวมทั้งตรวจสอบและติชมโครงการพิเศษเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี เจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ และช่วยอำนวยความสะดวกต่างๆ จนทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณบริษัท Thai Ambica Chemica Co.Ltd. ผู้ให้ความอนุเคราะห์สีย้อม Reactive blue 19 สำหรับทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณกัญญาวีร์ ชัยแสง ผู้ให้ความอนุเคราะห์ซีลี้อยู่ยงพารา ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบริษัทฮวงวดจำกัดผู้ให้ความอนุเคราะห์ Cetyl Trimethyl Ammonium Chloride จำนวน 1 กิโลกรัม สำหรับทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ บิดา มารดา บุคคลในครอบครัว ตลอดจนเพื่อนๆ ชั้นปีที่ 4 สาขาเคมีสิ่งแวดล้อมทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ กำลังใจและเป็นທີ່ปรึกษาที่ดีตลอดการทำโครงการพิเศษฉบับนี้ ทำให้คณะผู้จัดทำมีแรงใจในการทำโครงการพิเศษเล่มนี้ให้ออกมาสมบูรณ์ที่สุด

เพ็ญพิมพ์ เลาะห์รัตน์

ภารดี คลอดแคล้ว

มัทรี ทวละสิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ช
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาโครงการพิเศษ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการดูดซับ .....	4
2.2 ประเภทของการดูดซับ .....	4
2.2.1 การดูดซับทางกายภาพ .....	4
2.2.2 การดูดซับทางเคมี .....	5
2.3 กลไกการดูดซับ .....	5
2.4 แร่งที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ .....	6
2.4.1 แร่งแวนเดอร์วาลส์.....	6
2.4.2 แร่งไฟฟ้าสถิต .....	6
2.4.3 แร่งทางเคมี.....	7
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ .....	7
2.5.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ.....	7
2.5.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ.....	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 ผลของอุณหภูมิ.....	8
2.5.4 อัตราของการกวน.....	8
2.5.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลาย.....	9
2.5.6 ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ.....	9
2.6 สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	9
2.6.1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	10
2.6.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับ.....	11
2.7 จลนศาสตร์ในการดูดซับ.....	16
2.7.1 แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง.....	16
2.7.2 แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง.....	16
2.7.3 สมการของ Elovich.....	17
2.7.4 การแพร่ภายในรูพรุน.....	17
2.8 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ.....	18
2.9 อุณหพลศาสตร์และสมดุลเคมี.....	19
2.9.1 ความหมายของเอนทัลปีและเอนโทรปี.....	19
2.9.2 พลังงานอิสระและสมดุลเคมี.....	20
2.9.3 การหาค่าเอนทัลปีโดยใช้สมการของแวนท์ฮอฟฟ์.....	22
2.10 สีย้อม.....	23
2.10.1 คุณสมบัติของสีย้อม.....	23
2.10.2 สีย้อมรีแอกทีฟ.....	24
2.10.3 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟ.....	25
2.10.4 ชนิดของกลุ่มรีแอกทีฟ.....	25
2.10.5 สีย้อมรีแอกทีฟหมู่อะโซ.....	27
2.11 ขี้เลื่อยไม้ยางพารา.....	30
2.11.1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้.....	30
2.11.2 ลักษณะของขี้เลื่อย.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12 สารลดแรงตึงผิว.....	35
2.13 ความเป็นพิษของสีย้อม.....	37
2.14 น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.....	38
2.14.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.....	38
2.14.2 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	39
2.14.3 ปัญหาเฉพาะตัวสำหรับน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	40
2.15 การวัดความเข้มข้นสี.....	40
2.15.1 การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์.....	40
2.15.2 การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วย ADMI.....	41
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>46</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	46
3.1.1 อุปกรณ์.....	46
3.1.2 สารเคมี.....	46
3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....	47
3.2.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ.....	47
3.2.2 ศึกษาคุณสมบัติทางเคมี.....	47
3.3 วิธีการทดลอง.....	47
3.3.1 การเตรียม MRS.....	47
3.3.2 การเตรียมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์.....	48
3.3.3 ศึกษาการวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันเฉพาะด้วย FT-IR.....	48
3.3.4 ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟลู 19.....	48
3.3.4.1 ศึกษาอิทธิพลของขนาด.....	48
3.3.4.2 ศึกษาอิทธิพลของ pH.....	49
3.3.4.3 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ.....	49
3.3.4.4 ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนวเส้ห้ร้บการเข้งานเพอ้การศ้กข้ทอานัน้ เมอ้อนุญาตเท้หนาเบ้เข้ประยอ้ชนด้านการค้  
ไม่ว้การณ้ใ้ดๆ ท้งล้ัน อี้กท้งห้ห้ามมิให้ด้ดแปลงเน้อหา และด้องอ้างอ้งถ้งเจ้าขงเอกสารท้กคร้้งท้มีการนำเบ้ใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.4.5 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้น .....	50
3.3.4.6 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วยวอบ .....	51
3.3.5 การหาประจุที่ผิวเป็นศูนย์.....	51
3.3.6 ศึกษาความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ (การคายซับ) .....	52
3.3.7 การวัดค่า ADMI .....	52
3.3.8 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ .....	53
3.3.9 ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ.....	53
3.3.9.1 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้น .....	53
3.3.9.2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ.....	54
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>55</b>
4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี.....	55
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิว โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	55
4.1.2 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบโดย FT-IR .....	56
4.1.3 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดย X-ray Fluorescent.....	58
4.2 ผลการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 .....	59
4.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีย้อม .....	59
4.3.1 ผลการศึกษาขนาดที่เหมาะสม .....	59
4.3.2 ผลการศึกษาสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม .....	60
4.3.3 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสม .....	61
4.3.4 ผลการศึกษาเวลาที่สมดุล.....	62
4.3.5 ผลการศึกษาความเข้มข้นสีย้อม .....	63
4.3.6 ผลการศึกษาความเร็วยวอบในการเขย่า .....	64
4.5 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ในการดูดซับ .....	65
4.5.1 ผลการศึกษาการดูดซับที่ความเข้มข้นต่างกัน ณ เวลาต่างกัน .....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.2 ผลการศึกษาการดูดซับที่อุณหภูมิต่างกัน ณ เวลาต่างกัน.....	65
4.6 ผลการศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์.....	66
4.7 ผลการศึกษาความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ (การคายซับ).....	66
4.8 การวัดค่า ADMI โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อการดูดซับ .....	67
4.9 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ .....	68
4.10 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ .....	72
4.10.1 จลนศาสตร์การดูดซับ ณ ความเข้มข้นและเวลาต่างกัน .....	72
4.10.2 จลนศาสตร์การดูดซับ ณ อุณหภูมิและเวลาต่างกัน .....	73
4.11 ผลพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อม.....	77
4.12 ผลอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม.....	78
4.12.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ( $\Delta H^0$ ) .....	78
4.12.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) .....	80
4.12.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^0$ ) .....	80
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>81</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	82
เอกสารอ้างอิง.....	83
<b>ภาคผนวก</b> .....	<b>87</b>
ภาคผนวก ก การหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม .....	88
ภาคผนวก ข ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ .....	90
ภาคผนวก ค ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อการดูดซับ.....	103
ภาคผนวก ง ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ .....	105
ภาคผนวก จ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ .....	106
ภาคผนวก ฉ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส.....	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ช ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาค่าเอนทาลปีมาตรฐาน ( $\Delta H^\circ$ ).....	108
ภาคผนวก ซ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS .....	109
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลการศึกษาหาขนาดอนุภาคของตัวดูดซับโดย SEM.....	110
ภาคผนวก ชู ข้อมูลการศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับโดยใช้ FT-IR.....	111
ภาคผนวก ฎ เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพ .....	112



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อเครื่องหมายของ $\Delta G$ .....	21
2.2 โครงสร้างของสีย้อมที่มีกลุ่มรีแอคทีฟประเภท Monofunction.....	27
2.3 โครงสร้างของสีย้อมที่มีกลุ่มรีแอคทีฟประเภท Bifunction .....	29
2.4 ข้อดีและข้อเสียของซีลื้อย.....	34
2.5 ข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ของ Cetyl Trimethyl Ammonium Chloride (CTAC).....	37
2.6 ผลกระทบของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม.....	39
3.1 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับ.....	47
4.1 ความยาวคลื่นที่หมู่ฟังก์ชันต่างๆ.....	56
4.2 องค์ประกอบทางเคมี .....	58
4.3 ผลการคายซับ .....	66
4.4 ค่า ADMI ของน้ำสีย้อมก่อนและหลังการดูดซับด้วย MRS ที่สภาวะสมดุล .....	67
4.5 ค่าคงที่ต่างๆที่ได้จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับ.....	70
4.6 ค่าคงที่ต่างๆที่ได้จากแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและสอง .....	75
4.7 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิต่างๆ.....	77
4.8 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ.....	79
4.9 ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์ .....	80
ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟลู 19.....	89
ข.1 ผลของขนาดที่มีผลต่อการดูดซับ .....	90
ข.2 ผลการศึกษาค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับ .....	91
ข.3 ผลของการศึกษาหาปริมาณที่มีผลต่อการดูดซับ.....	92
ข.4 ผลของการศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ .....	93
ข.5 ผลของการศึกษาความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับ.....	95
ข.6 ผลของการศึกษาความเร็วรอบที่มีผลต่อการดูดซับ .....	96
ข.7 ผลของการศึกษาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ .....	97
ข.8 ผลของอัตราส่วน $w/v = 16.67 \text{ kg/m}^3$ ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เข้มข้น $100 \text{ g/m}^3$ .....	97
ข.9 ผลของอัตราส่วน $w/v = 16.67 \text{ kg/m}^3$ ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เข้มข้น $150 \text{ g/m}^3$ .....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.10 ผลของอัตราส่วน w/v = 16.67 kg/m <sup>3</sup> ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เข้มข้น 200 g/m <sup>3</sup> .....	98
ข.11 ผลของอัตราส่วน w/v = 16.67 kg/m <sup>3</sup> ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เข้มข้น 250 g/m <sup>3</sup> .....	99
ข.12 ผลของอัตราส่วน w/v = 16.67 kg/m <sup>3</sup> ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เข้มข้น 200 g/m <sup>3</sup> t = 25 °C.....	100
ข.13 ผลของอัตราส่วน w/v = 16.67 kg/m <sup>3</sup> ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เข้มข้น 200 g/m <sup>3</sup> t = 33 °C.....	101
ข.14 ผลของอัตราส่วน w/v = 16.67 kg/m <sup>3</sup> ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เข้มข้น 200 g/m <sup>3</sup> t = 35 °C.....	101
ข.15 ผลของอัตราส่วน w/v = 16.67 kg/m <sup>3</sup> ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เข้มข้น 200 g/m <sup>3</sup> t = 45 °C.....	102
ข.16 ผลของอัตราส่วน w/v = 16.67 kg/m <sup>3</sup> ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เข้มข้น 200 g/m <sup>3</sup> t = 55 °C.....	102
ค.1 การวัดหาค่าทรานสมิตแตนซ์ (%T) ของแต่ละความยาวคลื่น .....	104
ง.1 ค่าไอโซเทอร์มของการดูดซับ .....	105
จ.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายในสารละลายที่ใช้ในการศึกษาจลศาสตร์การดูดซับ .....	106
จ.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายในสารละลายที่ใช้ในการศึกษาจลศาสตร์การดูดซับ ที่ t ต่างกัน .....	106
ฉ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับ .....	107
ช.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการดูดซับ .....	108
ซ.1 ผลค่าความเป็นกรด-ด่างที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 .....	109
ซ.2 ผลปริมาณที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 .....	109
ซ.3 ผลความเร็วรอบที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 .....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	6
2.2	8
2.3	10
2.4	13
2.5	14
2.6	18
2.7	19
2.8	23
2.9	24
2.10	30
2.11	31
2.12	31
2.13	32
2.14	33
2.15	34
2.16	35
4.1	55
4.2	56
4.3	59
4.4	60
4.5	61
4.6	62
4.7	63
4.8	64
4.9	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดของอนุภูมิกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ .....	65
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นและสุดท้าย .....	66
4.12 ความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับ .....	68
4.13 จลนศาสตร์การดูดซับที่ความเข้มข้นต่างกัน .....	72
4.14 จลนศาสตร์การดูดซับที่อุณหภูมิต่างกัน .....	73
4.15 ความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการผลิตปฏิกิริยาอันดับสองที่อุณหภูมิต่างๆ .....	77
4.16 ความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียส .....	78
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสมการแวนฮอฟฟ์ .....	79
ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 .....	88
ฅ.1 เปรียบเทียบ MRS หลังการดูดซับที่กำลังขยาย 5000 เท่า .....	110
ญ.1 สเปกตรัมของซีลีเยอเมื่อวิเคราะห์ด้วย FT-IR .....	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำย่อ	ความหมาย
CTAC	Cetyl Trimethyl Ammonium Chloride
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
SEM	Scanning electron microscope
XRF	X-ray Fluorescence
UV-vis	UV-Visible Spectrophotometer
ADMI	American Dye Manufacturers Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
pH <sub>pzc</sub>	pH of zero point of the charge
C	ค่าความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (กรัม/เมตร <sup>3</sup> )
C <sub>e</sub>	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล
C <sub>0</sub>	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับ
C <sub>s</sub>	ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับในน้ำ
C <sub>t</sub>	ความเข้มข้นที่เวลานั้นๆ ของสารที่ถูกดูดซับในก๊าซหรือของเหลว
q <sub>D</sub>	ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม/กิโลกรัม)
q <sub>m</sub>	ปริมาณสูงสุดของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (กรัม/กิโลกรัม)
q <sub>e</sub>	จำนวนการดูดซับที่ย่อมต่อปริมาณตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (กรัม/กิโลกรัม)
q <sub>t</sub>	จำนวนการดูดซับที่ย่อมต่อปริมาณตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (กรัม/กิโลกรัม)
r <sub>a</sub>	อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด
r <sub>d</sub>	อัตราการคายซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด
k <sub>a</sub>	ค่าคงที่การดูดซับ (1/นาทึ)
k <sub>d</sub>	ค่าคงที่การคายซับ (กรัม/เมตร <sup>3</sup> .นาทึ)
k <sub>1</sub>	ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/n)
k <sub>2</sub>	ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (1/n)
k <sub>F</sub>	ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของฟรุนดลิช
k <sub>L</sub>	ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
$K_{DR}$	ค่าคงที่การดูดซับของ Dubinin-Radushkevich
$K_{id}$	ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน
$b_0$	ค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ
$A$	ค่าคงที่สมดุลของการยึดเกาะ
$E$	พลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยของการดูดซับ
$V$	ปริมาณของสารละลายหรือก๊าซ
$W$	น้ำหนักแห้งของสารดูดซับที่ใช้
$1/n$	ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ
$\mu g$	ไมโครกรัม
$mg$	มิลลิกรัม
$kg$	กิโลกรัม
$J$	จูล
$mol$	โมล
$min$	นาที
$\alpha$	อัตราเร็วในการดูดซับ
$\beta$	สัมประสิทธิ์ของการคายซับ
$t$	เวลา (นาที)
$m$	ปริมาณสารดูดซับ
$n$	ความหนาแน่นการดูดซับ
$pH$	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
$R^2$	Correlation Coefficient
$\theta$	สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยตัวดูดซับต่อพื้นที่ผิวที่ใช้ดูดซับทั้งหมด
$K$	ค่าคงที่สมดุล
$H^+$	ไฮโดรเจนไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
A	แฟกเตอร์ความถี่ของการชน
Ea	พลังงานกระตุ้น (จูลต่อโมล)
R	ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.3143 (จูลต่อโมล.เคลวิน)
T	อุณหภูมิ (เคลวิน)
$\Delta S$	การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (จูลต่อโมล.เคลวิน)
$\Delta G$	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (จูลต่อโมล)
$-\Delta H$	ความร้อนคายออกมาจากระบบ (Exothermic)
$+\Delta H$	ความร้อนจะถูกดูดเข้าไปในระบบ (Endothermic)
$\Delta H$	ความร้อนจะถูกดูดเข้าไปในระบบ (Endothermic)
$S_1$	เอนโทรปี ณ สภาวะเริ่มต้น
$S_2$	เอนโทรปี ณ สภาวะสุดท้าย
Q	อัตราส่วนของปฏิกิริยา
nm	นาโนเมตร
mm	มิลลิเมตร
$m^3$	ลูกบาศก์เมตร
$^{\circ}C$	องศาเซลเซียส
ln	ล็อกการิทึมธรรมชาติ
log	ล็อกการิทึม
RS	Rubber Sawdust
MRS	Modified Rubber Sawdust

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งออกสินค้าประเภทสิ่งทอเป็นอันดับต้นๆ ของโลก ซึ่งเป็นผลมาจากการผลักดันของภาครัฐ ทำให้การขยายตัวของอุตสาหกรรมสิ่งทอมากขึ้น และหนึ่งในนั้นคือ อุตสาหกรรมการฟอกย้อม ทำให้มีโรงงานฟอกย้อมขนาดใหญ่เกิดขึ้นหลายแห่ง ส่งผลให้มีมูลค่าการส่งออกสูง แต่ในทางกลับกันน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมประเภทนี้ก็มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเช่นกันซึ่งน้ำทิ้งเหล่านั้นมีการปนเปื้อนของสีและสารเคมีหลายชนิด

ยางพาราเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยอีกชนิดหนึ่ง อุตสาหกรรมการส่งออกและแปรรูปไม้ยางพาราของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตคือขี้เลื่อยไม้ยางพารา ซึ่งจัดเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งในโครงสร้างมีกลุ่มฟังก์ชันนอล คือกลุ่มไฮดรอกซิล (OH) และคาร์บอกซิลิก (COO<sup>-</sup>) เป็นจำนวนมาก ปัจจุบันมีการนำขี้เลื่อยไม้ยางพารามาใช้ประโยชน์ทั้งการนำไปเป็นวัสดุในการเพาะเห็ด งานหัตถกรรมงานปั้นจากขี้เลื่อย เชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม ตลอดจนเป็นวัสดุที่ใช้ในการดูดซับของเสียหรือสีย้อม เป็นต้น เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือใช้และมีปริมาณมาก

สีย้อมที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นสีประเภทสีเอโซ (Azo Dyes) และสีแอนทราควิโนน (Anthraquinone Dyes) ซึ่งจะมีหมู่เอโซ (-N=N-) และโครงสร้างแอนทราควิโนนเป็นโครงสร้างหลักในโมเลกุล คุณสมบัติของสีย้อมสังเคราะห์นั้นไม่มีโครงสร้างซับซ้อนสีเหล่านี้จึงมีความคงตัวสูง ทนต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในน้ำเสีย ส่งผลต่อทัศนียภาพและไม่เหมาะต่อการนำไปอุปโภค นอกจากนี้ยังลดความสามารถในการส่องผ่านของแสงลงไปแหล่งน้ำทำให้กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชในแหล่งน้ำลดลง ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการบำบัดมีอยู่หลายวิธี เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์, การใช้โอโซน, การตกตะกอนด้วยสารเคมี และการใช้จุลินทรีย์ในการบำบัด เป็นต้น

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยขี้เลื่อยไม้ยางพาราปรับปรุงคุณภาพด้วย Cetyltrimethyl Ammonium Chloride (CTAC) โดยนำขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติที่เหลือใช้จากเกษตรกรรมหรืออุตสาหกรรมมาเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากมีส่วนประกอบของ lignocelluloses ประกอบด้วย cellulose, lignin และ pectin ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสีย รวมทั้งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ซึ่งมีราคาสูง ส่วนสารปรับปรุงคุณภาพ Cetyltrimethyl Ammonium Chloride (CTAC) จัดอยู่ในประเภทสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cationic Surfactant) มีความสามารถในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 เนื่องจากเป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีโครงสร้างเป็นแอนไอออนใน ส่วนประกอบที่ให้สี บางครั้งเรียกสีประเภทนี้ว่า สีแอนไอออนิก (Anionic Dyes) นอกจากนี้ยัง ทำการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ ศึกษาจลนศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมรี แอคทีฟบลู 19 โดยวิธีการแบบแบตช์ (Batch Reactor) โดยศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูด ซับ 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง, แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยา อันดับสอง, สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับเพื่อนำค่าคงที่อัตราเร็วจาก แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับที่เหมาะสมไปหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับ และ ทางอุณหพลศาสตร์มีการพิจารณาค่าของเอนทาลปีมาตรฐาน ( $\Delta H^0$ ) พลังงานอิสระมาตรฐานของกิบส์ ( $\Delta G^0$ ) และค่าเอนโทรปีมาตรฐาน ( $\Delta S^0$ ) ที่มีผลต่อการดูดซับ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยซีลี้อยไม้ยางพาราปรับปรุง คุณภาพ
2. ศึกษาประสิทธิภาพการนำซีลี้อยไม้ยางพาราปรับปรุงคุณภาพในการดูดซับน้ำกลับมาใช้ใหม่
3. เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยซีลี้อยไม้ยางพาราปรับปรุง คุณภาพ
4. เพื่อศึกษาจลนศาสตร์ในการดูดซับ หาค่าพลังงานกระตุ้นและศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูด ซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยซีลี้อยไม้ยางพาราปรับปรุงคุณภาพ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ตัวดูดซับที่ใช้ในการศึกษาคือ ซีลี้อยไม้ยางพาราปรับปรุงคุณภาพด้วย Cetyltrimethyl Ammonium Chloride (Modified Rubber Sawdust by Cetyltrimethyl Ammonium Chloride, MRS)
2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพคือ ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีคือ วิเคราะห์ หาค่าหมู่ฟังก์ชัน และองค์ประกอบของแร่ธาตุของซีลี้อยไม้ยางพาราปรับปรุงคุณภาพ
3. ศึกษา pH และความเข้มข้นของสีย้อมที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมแอคทีฟบลู 19 ด้วยซีลี้อยไม้ ยางพาราปรับปรุงคุณภาพ
4. ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยใช้ไอโซเทอร์มของ Langmuir, Freundlich, Temkin และ Dubinin-Radushkevich โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองแปรผันความเข้มข้นของ สารละลายสีย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับโดยศึกษาแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ จากข้อมูลระหว่างค่าการดูดซับที่เวลาต่างๆ และค่าการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว
6. ศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส และศึกษาค่าทางอุณหพลศาสตร์จากสมการแวนท์ฮอฟฟ์ คือ เอนทาลปี ( $\Delta H^0$ ) และเอนโทรปี ( $\Delta S^0$ ) นำค่าที่ได้ไปหาค่าพลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G^0$ ) ต่อไป
7. ศึกษาประสิทธิภาพการคายซับของซีลี้อยู่ไมยางพาราปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟลู 19 ของซีลี้อยู่ไมยางพาราปรับปรุงคุณภาพ
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา น้ำเสียจากอุตสาหกรรมการฟอกย้อมได้โดยใช้วัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ
3. สามารถเพิ่มคุณค่าให้กับวัสดุเหลือใช้จากไมยางพารา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กระบวนการดูดซับ

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการกักพวงสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก ซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่งโดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้ เรียกว่า Adsorbate ส่วนที่เป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติด เรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิวนี้อาจเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆ ทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบก๊าซ-ของแข็ง ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว และของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้พิจารณาเฉพาะแบบของเหลว-ของแข็ง (Liquid-Solid Interface) ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำ และไปเกาะติดอยู่บนผิวตัวดูดซับโมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ โดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

### 2.2 ประเภทของการดูดซับ

#### 2.2.1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อนคือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waal Force) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิดคือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อน ทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่ายซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วยสารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้จะเกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาทางเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิมคือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมเกิดเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง ประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งหมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยากคือ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น

### ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพไม่มีการถ่ายเทหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน สามารถผันกลับได้ในสภาวะอุณหภูมิเดียวกัน แต่การดูดซับทางเคมีจะผันกลับไม่ได้
2. การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดได้ทั่วๆ ไปบนพื้นผิวตัวดูดซับไม่มีบริเวณจำเพาะในการเกิดกระบวนการดูดซับภายใต้สภาวะความดัน และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการดูดซับหลายชั้นได้ การดูดซับทางเคมีจะเกิดในบริเวณจำเพาะเท่านั้น และโดยทั่วไปการดูดซับทางเคมีจะเกิดแบบชั้นเดียวเท่านั้น
3. ความร้อนที่ได้จากการดูดซับทางกายภาพจะน้อยกว่าการดูดซับทางเคมี

## 2.3 กลไกการดูดซับ (กรองกาญจน์, 2530)

กลไกการดูดซับเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนติดต่อกัน (รูป 2.1)

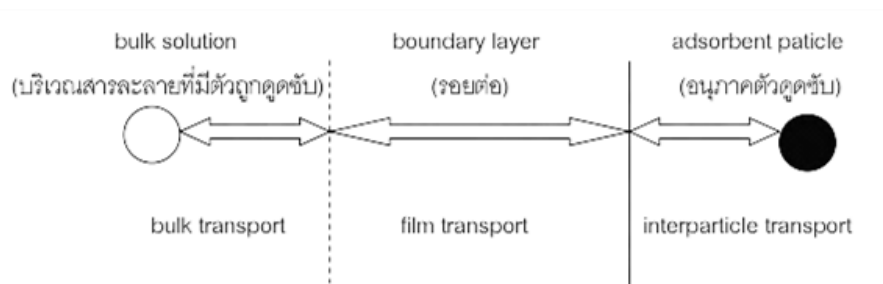
ขั้นตอนที่ 1 (Bulk transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (Mass transfer) จากสารละลาย (Bulk solution) ไปยังฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 (Film transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (Mass transfer) ข้ามฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 (Intraparticle transport หรือ Pore transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (Mass transfer) เข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 (Adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับ active site บนผิวตัวดูดซับเกิดเร็วมากและอาจดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมี หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ชั้นการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ (นิพนธ์, 2550)

## 2.4 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ (วินัย, 2541)

ในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายจะเกิดการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (Physical force) และแรงทางเคมี (Chemical force) โดยแรงทางกายภาพได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงไฟฟ้าสถิตเกิดที่บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ เช่น Ion exchange ส่วนแรงทางเคมีจะเป็นผลเนื่องมาจากเกิดแรงกระทำ (Interaction) เกิดเป็นสารประกอบติดผิวตัวดูดซับด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bonding) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding)

**2.4.1 แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waal's force)** อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่อยู่ในสภาพไม่มีขั้วสามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากันมีผลทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้นและสามารถถูกดูดซับด้วยตัวถูกดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำจึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับจะสามารถทำได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวถูกดูดซับได้ง่าย

**2.4.2 แรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force)** เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกันหรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆ เกิดจากแรง 3 แรง

### 1. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว (polar molecule)

เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation effect) ที่มีขั้ว 2 โมเลกุลคือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่งทำให้เกิดแรงระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงข้าม

### 2. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-polar molecule)

เกิดจากผลของการกระจายตัว (Dispersion effect) ซึ่งจะเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น สารอินทรีย์และสารกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Polar and Non-polar molecule)

เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (Induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาอยู่ใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงข้ามซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

**2.4.3 แรงทางเคมี (Chemical force)** เป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ อาจเกิดเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดสารเชิงซ้อน การที่โลหะหนักสามารถถูกดูดซับไว้ที่ผิวของตัวดูดซับต่างๆ เช่น คอลลอยด์ ดินเหนียวเนื่องมาจากโลหะหนักเป็นธาตุทรานซิชันที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับได้ แรงทางเคมีมีลักษณะดังนี้

1. เป็นพันธะเคมีที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนรวมกันหรือให้อิเล็กตรอนหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าทางฟิสิกส์
2. ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (Irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากและมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

## 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

### 2.5.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ (Nature of the adsorbent)

#### 1. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับก็จะต่ำลง

#### 2. ขนาดของตัวดูดซับ

ถ้าตัวดูดซับไม่มีรูพรุนพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลงซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุนขนาดตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ

### 2.5.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ (Nature of the adsorbate)

#### 1. ความสามารถในการทำละลาย

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลของตัวดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำและไปเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ ตัวดูดซับที่ไม่ละลายน้ำมักสามารถเกาะติดบนผิวตัวดูดซับไม่ได้เป็นจริงเสมอไปเพราะมีตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล

เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของตัวถูกละลายเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับจะมากขึ้นเพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะส่งผลให้ความสามารถในการละลายลดลง

## 3. ความมีขั้วของโมเลกุล

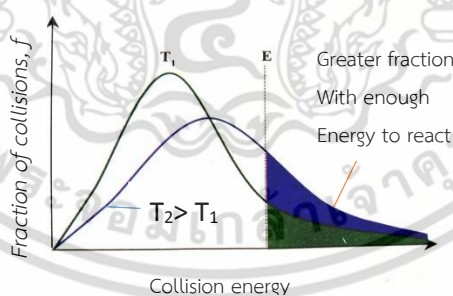
ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อมีสภาพมีขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้นเพราะการเพิ่มสภาพความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

## 4. ความเข้มข้นของสารละลายหรือตัวถูกละลาย

โดยทั่วไปแล้วอัตราเร็วของการดูดซับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลายคือ อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น และอัตราการดูดซับจะลดลงเมื่อความเข้มข้นลดลง

### 2.5.3 ผลของอุณหภูมิ (Effect of temperature)

อัตราเร็วของการดูดซับจะเกิดช้าหรือเร็วนั้นขึ้นกับอุณหภูมิของสารละลายคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราเร็วของการดูดซับเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าระบบที่มีความเข้มข้นของสารเท่ากัน 2 ระบบนั้นจำนวนโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานกระตุ้น (เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ใต้กราฟ) ของระบบที่มีอุณหภูมิสูงจะมีมากกว่าจำนวนโมเลกุลที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจึงเป็นการเพิ่มจำนวนโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานกระตุ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของโมเลกุลเหล่านี้จะส่งผลให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของพลังงานของระบบที่มีความเข้มข้นของสารเท่ากัน (ยูวรัตน์, 2544)

### 2.5.4 อัตราของการกวน

ความเร็วของการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายข้ามผ่านชั้นฟิล์มนั้น (Film diffusion) ขึ้นกับความหนาของชั้นฟิล์ม ซึ่งหากชั้นฟิล์มยิ่งหนาขึ้นเท่าไรจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านมากขึ้นและส่งผลให้กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นช้าลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งหากไม่มีการกวนของสารละลาย โดยการกวนสารละลายพบว่าจะช่วยให้อัตราเร็วของการดูดซับเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.5 ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

ค่าความเป็นกรด-ด่างมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ซึ่งจะมีผลต่อการดูดซับหรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่สารที่ถูกดูดซับมีประจุเป็นบวกและสารดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำๆ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการแย่งกันจับกับตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับไฮโดรเนียมไอออนในสารละลาย แต่จะให้ผลในทางตรงกันข้ามเมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงๆ ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลง และปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มมากขึ้นจะลดผลในการเข้าแย่งจับกับตำแหน่งการดูดซับของสารดูดซับและในกรณีที่สารที่ถูกดูดซับมีประจุเป็นลบก็จะให้ผลในทางตรงกันข้ามกับที่ได้กล่าวมา

### 2.5.6 ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ

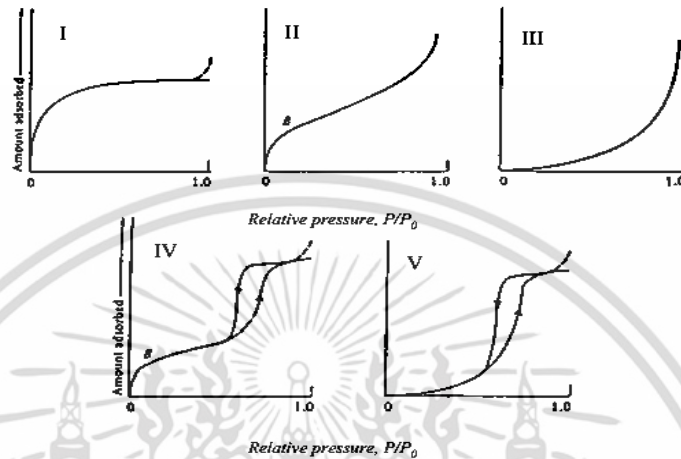
ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of Adsorption) เท่ากับอัตราการคายซับ (Rate of Desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น (ยวรัตน์, 2544)

## 2.6 สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium and Adsorption Isotherm)

การดูดซับตัวของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย (Liquid-Solid Adsorption) จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะมีการคายการดูดซับ (Desorption) เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน จนในที่สุดจำนวนตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับกับที่คายออกมาจะเท่ากัน ผลที่ตามมาคือ อัตราการดูดซับและอัตราการคายตัวจะเท่ากันหรือเข้าสู่ภาวะสมดุล เรียกว่าสมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนผิวของแข็งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งที่เกิดการสมดุลของการดูดซับหนึ่งๆ จะเป็นคุณสมบัติของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย ตัวดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของระบบปริมาณของการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปเราใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น (Charler, 1991)

### 2.6.1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับคือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ ( $q$ ) ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ( $c$ ) ณ อุณหภูมิคงที่ โดยทั่วไปการศึกษาการดูดซับมักพบไอโซเทอร์มใน 5 ลักษณะ ซึ่งจำแนกจากลักษณะความโค้งของความชันของเส้นไอโซเทอร์มในช่วงแรก



รูปที่ 2.3 ลักษณะเส้นไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบต่างๆ (weber, 1972)

**Type I** พบมากที่สุดเป็นการดูดซับโดยมีชั้นของตัวที่ถูกดูดซับได้หนาหนึ่งโมเลกุล (Single layer Adsorption) พบทั้งการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางฟิสิกส์จะเป็นปรากฏการณ์ดูดซับของ Microporous powers ซึ่งปริมาณของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้หนึ่งจะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนเป็น Microporous และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์

**Type II** พบมากในปรากฏการณ์การดูดซับที่มีชั้นของตัวดูดซับที่หนาขึ้นเรื่อยๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่าอนันต์) โดยจะเกิดบน nonporous power ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนกว้างกว่า Microporous (1.5 นาโนเมตร) จุดที่เปลี่ยนกราฟ (inflection point or knee of isotherm) เกิดขึ้นเมื่อการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่ม Relative pressure จะทำการดูดซับมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบ Multilayer

**Type III** การดูดซับคล้าย type II แต่การดูดซับของชั้นแรกนั้นให้ความร้อนออกมาน้อยกว่า ความร้อนของการควบแน่นเป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (Heat of adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกดูดซับที่เป็นของเหลว (the adsorbate heat of liquefaction) ดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้นเกิดเพราะตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Type IV** เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับที่มีรูพรุนประมาณ 15-1,000 อังสตรอม การดูดซับคล้าย type II สำหรับความหนาของโมเลกุลชั้นแรกๆ แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัว เนื่องจากรูพรุนแคปิลารีภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ความชื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อ relative pressure เพิ่มขึ้นชี้ให้เห็นว่าตัวดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น ปรากฏการณ์ที่มีจุดเปลี่ยนของเส้นกราฟนี้เกิดขึ้นเช่นเดียวกับใน type II คือเกือบเป็น monolayer ที่สมบูรณ์

**Type V** เป็นการดูดซับคล้าย type III ในช่วงความเข้มข้นต่ำแต่การดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เข้าสู่ค่าสูงสุดค่าหนึ่งเช่นเดียวกับ type IV เป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นผลจากแรงดึงดูดและตัวดูดซับมีค่าน้อยๆ โดยขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 15-1,000 อังสตรอม

### 2.6.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับ

โดยทั่วไปสมการไอโซเทอร์มของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีได้ถูกนำมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น นิยมเปลี่ยนเส้นโค้งให้อยู่ในรูปเส้นตรงแล้วคำนวณหาค่าต่างๆ ด้วยสมการเพื่อใช้อธิบายการดูดซับ แต่ที่นิยมกันมากในการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับคือ Langmuir isotherm, Freundlich isotherm, Temkin isotherm และ Dubinin-Radushkevich isotherm

#### 1. ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

แบบจำลองนี้ถูกพัฒนามาจากแนวคิดที่ว่า เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มจำนวน ตัวถูกดูดซับที่ถูกจับตำแหน่ง binding site บนตัวดูดซับก็เพิ่มขึ้น ชัดขวางการจับตัวของโมเลกุลอื่น ดังนั้นอัตราการดูดซับจึงเป็นสัดส่วนระหว่างตำแหน่ง binding sites ที่ว่างบนตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวดูดซับ และที่สภาวะสมดุลอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายการดูดซับ ลักษณะการดูดซับจึงเป็นลักษณะ monomolecular layer โดยมีสมมุติฐาน ดังนี้

1. การดูดซับมีลักษณะเป็น monomolecular layer คือ มีตำแหน่งที่เกิดการดูดซับแน่นอน และเมื่อเกิดการดูดซับแล้วไอออนหรือโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับซึ่งกันและกัน หรือชั้นของตัวดูดซับมีความหนาแน่นเท่ากันหมด
2. เมื่อดูดซับแล้วตัวดูดซับจะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกันในพื้นผิวสัมผัส และตัวดูดซับจะไม่มีผลกระทบต่อกัน
3. พื้นผิวในการดูดซับมีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกันทำให้โครงสร้างของสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเหมือนกันเป็น homogeneous surface
4. พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\theta = q/q_m \quad (2.1)$$

โดยที่  $q$  = ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (กรัม/กิโลกรัม)

$q_m$  = ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (กรัม/กิโลกรัม)

$\theta$  = สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ปกคลุมด้วยตัวดูดซับต่อพื้นที่ผิวที่ใช้ดูดซับทั้งหมด

อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด สามารถคำนวณได้ดังสมการ

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

โดยที่  $k_a$  = ค่าคงที่การดูดซับ (1/นาทีก)

$C$  = ค่าความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (กรัม/เมตร<sup>3</sup>)

อัตราการคายซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด สามารถคำนวณได้ดังสมการ

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

โดยที่  $k_d$  = ค่าคงที่การคายซับ (กรัม/เมตร<sup>3</sup>\*นาทีก)

เมื่อคิดที่สภาวะสมดุล อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 - 2.9

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

$$\theta / (1 - \theta) = k_a C / k_d \quad (2.5)$$

$$\theta = k_a C(1 - \theta) / k_d \quad (2.6)$$

$$\theta = (k_a / k_d) C - (k_a / k_d) \theta \quad (2.7)$$

$$\theta + (k_a / k_d) C \theta = (k_a / k_d) C \quad (2.8)$$

$$\theta [1 + (k_a / k_d) C] = (k_a / k_d) C \quad (2.9)$$

ถ้ากำหนดให้

$$K_A = k_a / k_d \quad (2.10)$$

$$\theta = (K_A C) / (1 + K_A C) \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.1) กำหนดให้

$$\theta = q/q_m$$

จะได้สมการ

$$q = (q_m K_A C) / (1 + K_A C) \quad (2.12)$$

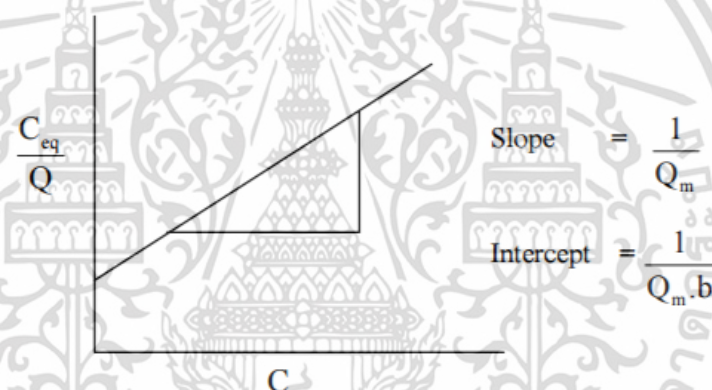
จัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง ได้เป็น

$$C/q = (1/K_A q_m) + K_A/q_m \quad (2.13)$$

หรือ

$$1/q = 1/q_m + [1/K_A q_m](1/C) \quad (2.14)$$

ค่า  $q_m$  และค่า  $K_A$  สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกนของกราฟรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (เกรียงศักดิ์, 2546)

## 2. ไอโซเทอร์มฟรุนดลิช (Freudlich isotherm)

สมการของ Freudlich ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า

1. การดูดซับมีลักษณะเป็น monolayer
2. ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน
3. ใช้ได้ดีกับตัวถูกดูดซับที่มีแนวโน้มถูกดูดได้ง่ายและมีความเข้มข้นต่ำถึงปานกลาง

สามารถเขียนสมการการดูดซับของ Freudlich ได้ดังนี้

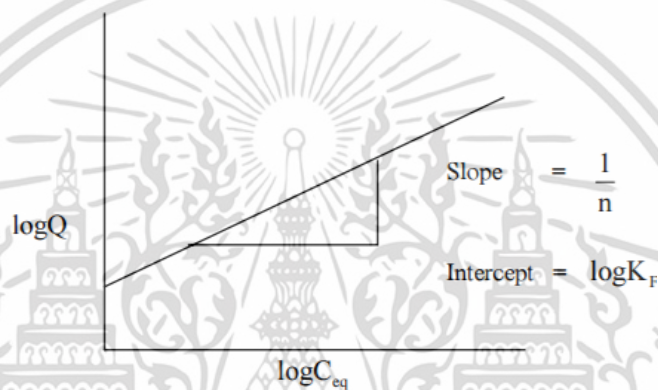
$$q = K_f C^{1/n} \quad (2.15)$$

หรือ

$$\ln q = \ln K_f + 1/n \ln C \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่า  $\ln q$  กับ  $\ln C$  มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้  $\ln q$  เป็นแกน  $y$  และ  $\ln C$  เป็นแกน  $x$  จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\ln K_F$  เมื่อค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความเข้มข้นมากจะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยก็จะส่งผลต่อการดูดซับมาก คือ เมื่อความเข้มข้นต่ำอัตราการดูดซับก็จะต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น เมื่อ  $1/n \ll 1$  หรือความเข้มข้นต่ำมากจนบางครั้งเกือบชิดแกน  $x$  นั้นแสดงว่าอัตราการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำหรือสูงจะไม่แตกต่างกันมากนัก หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะไม่มีผลต่อการดูดซับ อย่างไรก็ตาม จากลักษณะของ Freundlich isotherm จะสังเกตเห็นว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ トラบเท่าที่ความเข้มข้นของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายมีสูงขึ้นซึ่งก็เป็นข้อเสียของสมการของ Freundlich ที่สำคัญอีกข้อหนึ่ง คือทำให้ไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดได้



รูปที่ 2.5 ลักษณะของไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบฟรุนดลิช (เกรียงศักดิ์, 2546)

### 3. ไอโซเทอร์มเทมกิน (Temkin isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Temkin จะแตกต่างจากของ Langmuir และ Freundlich ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับของ Temkin สามารถนำไปใช้ได้กับการดูดซับทางเคมี เนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ ซึ่งไอโซเทอร์มนี้มีสมมติฐานว่าพลังงานการดูดซับจะลดลงเป็นเส้นตรง เมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ (Adsorbent-adsorbate interactions) สมการของ Temkin เขียนได้เป็น

$$q_e = \frac{RT}{b_0} \ln A + \frac{RT}{b_0} \ln C_e \quad (2.17)$$

เมื่อ  $b_0$  = ค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ (จูลต่อโมล)

$A$  = ค่าคงที่สมดุลของการยึดเกาะ (ลิตรต่อกรัม) ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานยึดเกาะสูงสุด

$R_k$  = ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมล.เคลวิน)

$n.T_k$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(K) จากสมการ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\ln C_e$  ค่าคงที่ A และ B หาได้จากจุดตัดแกน และความชันของเส้นกราฟตามลำดับ

#### 4. ไอโซเทอร์ม Dubinin-Radushkevich (D-R isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ได้เสนอไอโซเทอร์มการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับของตัวดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมีหรือทางกายภาพ สมการของไอโซเทอร์มของ Dubinin-Radushkevich เขียนได้เป็น

$$\ln q_e = \ln q_D - K_{DR}[RT \ln(1 + (C_e)^2)]^2 \quad (2.18)$$

เมื่อ  $q_D$  = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$K_{DR}$  = ค่าคงที่การดูดซับของ Dubinin-Radushkevich (โมล<sup>2</sup>ต่อกิโลจูล<sup>2</sup>) ซึ่งสัมพันธ์กับพลัง

อิสระการดูดซับเฉลี่ยต่อสารที่ถูกดูดซับ 1 โมล

$C_e$  = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย ณ ภาวะสมดุล (โมลต่อลิตร)

$R$  = ค่าคงที่ของแก๊ส (8.134 จูลต่อโมล.เคลวิน)

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

จากสมการเมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $q_e$  กับ  $\ln C$  สามารถหาค่า  $n$  และ  $K_{DR}$  ได้จากจุดตัดแกน และค่าความชัน ตามลำดับค่า  $n$  และ  $K_{DR}$  จากสมการ Dubinin-Radushkevich เกี่ยวข้องกับพลังงานดูดซับอิสระ ( $E$ ) ของการดูดซับต่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ เมื่อเกิดการเคลื่อนที่จากสารละลายสู่พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งพลังงานดูดซับอิสระหาได้จากสมการ

$$E = \frac{1}{\sqrt{2\beta}} \quad (2.19)$$

เมื่อ  $E$  = พลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยของการดูดซับ (กิโลจูลต่อโมล)

จากผลพบว่า ค่าพลังงานดูดซับอิสระ ( $E$ ) สามารถบ่งบอกกลไกการดูดซับได้ ถ้าหากค่า  $E = 8-16$  กิโลจูลต่อโมล เป็นกระบวนการดูดซับไหลโดยการแลกเปลี่ยนไอออนทางเคมีถ้าค่า  $E < 8$  กิโลจูลต่อโมล จะเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่า  $E > 16$  กิโลจูลต่อโมล จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี

## 2.7 จลนศาสตร์ในการดูดซับ (Kinetic absorption) (สันทัด และขนิษฐา, 2542)

### 2.7.1 แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first-order kinetic model)

สมการแบบจำลองอันดับหนึ่งแสดงในสมการที่ 2.20

$$dq_t/dt = k_1(q_e - q_t) \quad (2.20)$$

$$\text{ทำการอินทิเกรตจาก } t = 0 \longrightarrow t = t$$

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

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - (k_1/2.303)t \quad (2.21)$$

โดยที่  $q_e$  = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวที่ถูกดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (กรัมต่อกิโลกรัม)

$q_t$  = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวที่ถูกดูดซับที่เวลาต่างๆ (กรัมต่อกิโลกรัม)

$k_1$  = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/n)

$t$  = เวลา (นาทีก)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง  $\log(q_e - q_t)$  กับ  $t$  จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า  $k_1$  ได้จากความชัน

### 2.7.2 แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second-order kinetic model)

สมการแบบจำลองอันดับหนึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$dq_t/dt = k_2(q_{e2} - q_t)^2 \quad (2.22)$$

$$\text{ทำการอินทิเกรตจาก } t = 0 \longrightarrow t = t$$

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

$$1/(q_{e2} - q_t) = 1/q_{e2} + k_2t \quad (2.23)$$

$$t/q_t = \{1/(k_2q_{e2}^2)\} + (1/q_{e2})t \quad (2.24)$$

โดยที่  $q_{e2}$  = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวที่ถูกดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (กรัมต่อกิโลกรัม)

$q_t$  = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (กรัมต่อกิโลกรัม)

$k_2$  = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (กิโลกรัมต่อกรัม.นาทีก)

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

### 2.7.3 สมการของ Elovich (Elovich model)

สมมติฐานของสมการของ Elovich นี้คือ พื้นที่ผิวของแข็งหรือตัวดูดซับต่างชนิดกัน พลังงานจากการดูดซับนั้นต่างกัน และการดูดซับที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีการใช้งานจะทำให้การคายซับและแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับไม่ส่งผลต่อจลนศาสตร์ของการดูดซับนี้ (Feng-Chin Wu and *et al*, 2009) ซึ่งสมการของ Elovich แสดงได้ดังนี้

ถ้า  $\beta qt \gg 1$  และ  $qt = 0$  ที่  $t = 0$  และ  $qt = qt$  ที่  $t = t$  จะได้สมการในรูปของสมการ

เส้นตรง แสดงได้เป็น

$$q_t = 1/\beta \ln(\alpha\beta) + 1/\beta \ln t \quad (2.25)$$

โดย  $\alpha$  = อัตราเร็วในการดูดซับ

$\beta$  = สัมประสิทธิ์ของการคายซับ

สมการนี้จำกัดการใช้งานเฉพาะช่วงเริ่มต้นของการดูดซับในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับเท่านั้น โดยกระบวนการดูดซับนั้นยังไม่เข้าสู่ภาวะสมดุล

นอกจากนี้พฤติกรรมของการดูดซับที่อธิบายโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสอง และสมการของ Elovich นี้สามารถอธิบายการดูดซับได้ดีเมื่อสัดส่วนของพื้นที่ผิวบนสารดูดซับถูกใช้งานได้ไม่เกินร้อยละ 70 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง  $t/q_t$  กับ  $t$  จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า  $k_2$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$

### 2.7.4 การแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion model)

จลนศาสตร์การดูดซับนอกจากจะสอดคล้องกับสมการจลนศาสตร์การดูดซับที่ผิวตัวดูดซับแล้ว จลนศาสตร์การดูดซับอาจสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วย ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่ถูกใช้ในการทำนายจลนศาสตร์การดูดซับ สมการการแพร่ภายในรูพรุนของ Weber และ Morris สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$q_t = k_{id}(t)^{1/2} + C \quad (2.26)$$

โดย  $k_{id}$  = ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (มิลลิกรัมต่อกรัม.นาที)

เมื่อพลอตระหว่าง  $q_t$  กับ  $t^{1/2}$  จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ  $k_{id}$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $C$  ซึ่งค่า  $C$  จะบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม ยิ่งค่า  $C$  มากผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์มยิ่งมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ (สุนทร, 2554)

จากค่าคงที่อัตราเร็ว  $k$  ในสมการอัตราเร็วของการดูดซับ ขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิ และค่าของ  $E_a$  เช่นถ้า  $E_a$  มาก หรือที่อุณหภูมิต่ำทำให้ค่าคงที่อัตราเร็ว  $k$  น้อย ความสัมพันธ์ระหว่าง  $k$  กับ  $E_a$  และอุณหภูมิที่อยู่ในสมการที่เรียกว่า **สมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation)**

$$K = A e^{-E_a/RT} \quad (2.27)$$

โดยที่  $A$  = แฟกเตอร์ความถี่ของการชน

$E_a$  = พลังงานกระตุ้น (จูลต่อโมล)

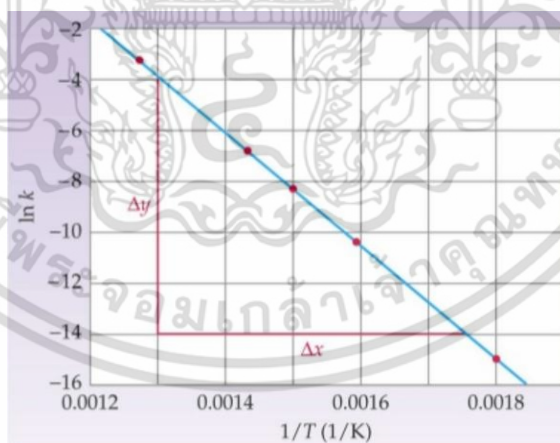
$R$  = ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.3143 (จูลต่อโมล.เคลวิน)

$T$  = อุณหภูมิ (เคลวิน)

ใส่ค่า  $\ln$  เข้าทั้งสองข้างของสมการได้เป็น

$$\ln k = \ln A - E_a / RT \quad (2.28)$$

เมื่อนำสมการ (2.29) มาเขียนกราฟระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  จะได้กราฟเส้นตรงตามรูปที่ 2.6 สามารถหาค่า  $E_a$  ได้จากความชันของกราฟ



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับอุณหภูมิ (สุนทร, 2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 อุณหพลศาสตร์และสมดุลเคมี (นภดล และคณะ, 2542)

### 2.9.1 ความหมายของเอนทัลปีและเอนโทรปี

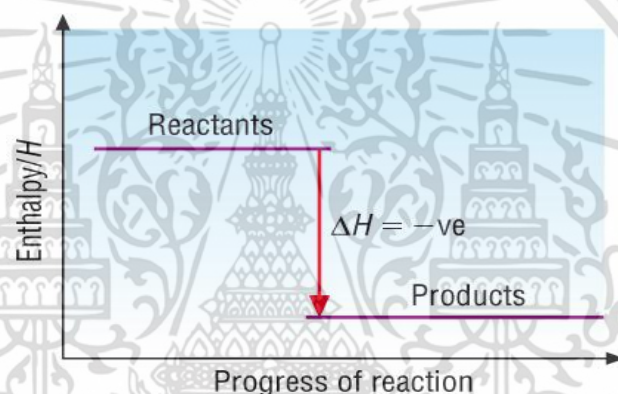
ความร้อนของปฏิกิริยาหรือเอนทัลปี (Heat or enthalpy of reaction) เป็นเทอมที่ใช้บอกถึงปริมาณความร้อนที่ถูกดูดเข้าไป หรือคายออกมาต่อโมลของสารที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ถ้าปฏิกิริยาเกิดที่ความดันคงที่และงานที่เกี่ยวข้องเป็นแบบขยายตัวหรือหดตัวเท่านั้น

การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีคือ  $\Delta H = H_2 - H_1$  (2.29)

$H_2$  = สภาวะสุดท้าย (final state)

$H_1$  = สภาวะเริ่มต้น (initial state)

ในกรณีที่  $H_2$  มีค่าน้อยกว่า  $H_1$  หรือ  $H_2$  มีเสถียรภาพมากกว่า  $H_1$  (ระบบที่มีเสถียรภาพมากกว่าจะมีพลังงานน้อยกว่า) การเปลี่ยนแปลงสถานะนี้ ดังรูป 2.7 ความร้อนคายออกจากระบบ



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับกระบวนการเกิดปฏิกิริยา (Apache, 2560)

$\Delta H =$  ลบ แสดงว่าความร้อนคายออกจากระบบ (exothermic)

ตรงกันข้ามถ้า  $H_2$  มีพลังงานมากกว่า  $H_1$  หรือ  $H_2$  มีเสถียรภาพน้อยกว่า  $H_1$  ความร้อนจะต้องถูกดูดเข้าไปในระบบ หรืออาจกล่าวได้ว่าเราจะต้องให้ความร้อนแก่ระบบ

$\Delta H =$  บวก แสดงว่าความร้อนจะถูกดูดเข้าไปในระบบ (endothermic)

เอนโทรปี (Entropy,  $S$ ) คือ ปริมาณที่บอกถึงความไม่เป็นระเบียบของระบบหรืออาจกล่าวได้ว่าเอนโทรปีบอกให้ทราบว่าอะตอม โมเลกุล หรือไอออนกระจายตัวอยู่ในระบบอย่างไม่เป็นระเบียบมากน้อยเพียงใด ยิ่งระบบมีความเป็นระเบียบมากเพียงใดเอนโทรปีก็จะลดลงเพียงนั้น

ให้  $S_1 =$  เอนโทรปี ณ สภาวะเริ่มต้น

$S_2 =$  เอนโทรปี ณ สภาวะสุดท้าย

และ  $\Delta S = S_1 - S_2$

$\Delta S =$  การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta S$  เป็นปริมาณที่วัดได้โดยให้ความร้อนแก่ระบบ เมื่อให้ความร้อนแก่ระบบอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความเป็นระเบียบเริ่มลดลงหรือไม่เป็นระเบียบสูงขึ้น เอนโทรปี  $S_2$  มีค่าสูงขึ้น ( $\Delta S > 0$ ) และถ้าเพิ่มความร้อนขึ้นไปอีกความไม่เป็นระเบียบมากขึ้นตามลำดับ  $S_2$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนั้นเห็นได้ว่า  $\Delta S$  แปรผันโดยตรงกับปริมาณความร้อนที่เพิ่มให้กับระบบ

ถ้า  $\Delta S =$  บวก ระบบมีความไม่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น

ถ้า  $\Delta S =$  ลบ ระบบมีความไม่เป็นระเบียบลดลงหรือความเป็นระเบียบเพิ่มขึ้น

## 2.9.2 พลังงานอิสระและสมดุลเคมี (Thermodynamic and Equilibrium)

กิบส์ (Josiah W. Gibbs) เป็นนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน ได้นำฟังก์ชันทางเทอร์โมไดนามิกส์อีกฟังก์ชันหนึ่งมาใช้คือ  $G$  เรียกว่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) เรียกสั้นลงว่าพลังงานอิสระมีนิยาม ดังนี้

$$G = H - TS \quad (2.30)$$

สังเกตว่าปริมาณทั้งหมดในสมการ (2.31) เป็นสมบัติของระบบ รวมทั้งอุณหภูมิ  $T$  ด้วยและจะเห็นว่า  $G$  มีหน่วยเป็นพลังงาน (ทั้ง  $H$  และ  $TS$  ก็มีหน่วยเป็นพลังงาน) และเป็นฟังก์ชันสถานะเช่นเดียวกับ  $H$  และ  $S$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ ( $\Delta G$ ) ของระบบในกระบวนการที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิคงที่คือ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.31)$$

สรุปสภาวะการเกิดปฏิกิริยาและสภาวะที่ระบบจะอยู่ในสมดุลที่อุณหภูมิและความดันคงที่ โดยอาศัยค่าของ  $\Delta G$  ได้ดังนี้

$\Delta G < 0$  ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางที่ไปข้างหน้า

$\Delta G > 0$  ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้ แต่เกิดขึ้นได้เองในทิศทางย้อนกลับ

$\Delta G = 0$  ระบบอยู่ในสมดุล ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

ในสมการ (2.31) ทำนายเครื่องหมายของ  $\Delta G$  นั้น เราจำเป็นต้องทราบค่าของ  $\Delta H$  และ  $\Delta S$  ถ้า  $\Delta H$  มีค่าเป็นลบ (ปฏิกิริยาคายความร้อน) และ  $\Delta S$  มีค่าเป็นบวก (ปฏิกิริยาทำให้ระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูงขึ้น)  $\Delta G$  มีแนวโน้มที่จะเป็นลบ แต่อุณหภูมิก็อาจมีผลต่อทิศทางของปฏิกิริยาด้วยว่าจะเกิดขึ้นได้เองในทิศทางใด ความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้ 4 ระบบ คือ

- ถ้าทั้ง  $\Delta H$  และ  $\Delta S$  มีค่าเป็นบวก  $\Delta G$  จะเป็นลบก็ต่อเมื่อ  $T\Delta S$  มีค่ามากกว่า  $\Delta H$  นั่นคือเมื่อ  $T$  มีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ถ้า  $\Delta H$  เป็นบวก และ  $\Delta S$  เป็นลบ  $\Delta G$  จะเป็นบวกเสมอไม่ว่าอุณหภูมิจะเป็นเท่าใดก็ตาม
- ถ้า  $\Delta H$  เป็นลบ และ  $\Delta S$  เป็นบวก  $\Delta G$  จะเป็นลบเสมอไม่ว่าอุณหภูมิจะเป็นเท่าใด
- ถ้า  $\Delta H$  เป็นลบ และ  $\Delta S$  เป็นลบ  $\Delta G$  จะเป็นลบเฉพาะเมื่อ  $T\Delta S$  มีค่าน้อยกว่า  $\Delta H$  นั่นคือ  $T$  มีค่าต่ำ

ในกรณีแรกและกรณีสุดท้าย อุณหภูมิที่จะทำให้  $\Delta G$  มีค่าเป็นลบนั้นขึ้นอยู่กับค่าของ  $\Delta H$  และ  $\Delta S$

ตารางที่ 2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อเครื่องหมายของ  $\Delta G$  ในทั้ง 4 กรณี

$\Delta H$	$\Delta S$	$\Delta G$
+	+	ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองที่อุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิต่ำ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองในทิศทางตรงกันข้าม
+	-	$\Delta G$ มีค่าเป็นบวกเสมอ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางตรงกัน ข้ามที่ทุกอุณหภูมิ
-	+	$\Delta G$ มีค่าเป็นลบเสมอ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองที่ทุกอุณหภูมิ
-	-	ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองที่อุณหภูมิต่ำที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นได้เอง

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐานของปฏิกิริยา คือ

$$\Delta G^0 = \Delta G^0 \text{ (สำหรับผลิตภัณฑ์)} - G^0 \text{ (สารตั้งต้น)} \quad (2.32)$$

$\Delta G^0$  ในสมการนี้ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อสารตั้งต้นในสภาวะมาตรฐาน กลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ในสภาวะมาตรฐาน เช่น สมมติว่าเราเริ่มปฏิกิริยาในสารละลายโดยให้สารตั้งต้นทุกชนิดอยู่ในสภาวะมาตรฐาน (คือความเข้มข้นเท่ากับ 1 โมลาร์) ทันทีที่เกิดปฏิกิริยาขึ้น ทั้งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ก็จะไม่อยู่ในสภาวะมาตรฐานอีกต่อไป เพราะต่างก็จะไม่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 โมลาร์ ภายใต้สภาวะที่ไม่ใช่มาตรฐาน เราจะต้องทำนายทิศทางของปฏิกิริยาจาก  $\Delta G$  ไม่ใช่จาก  $\Delta G^0$  ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta G$  และ  $\Delta G^0$  คือ

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln Q \quad (2.33)$$

เมื่อ  $R$  เป็นค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อเคลวิน.โมล)  $T$  เป็นอุณหภูมิสมบูรณ์ของปฏิกิริยา และ  $Q$  เป็นอัตราส่วนของปฏิกิริยา จากสมการจะเห็นว่า  $\Delta G$  มีค่าขึ้นอยู่กับ  $\Delta G^0$  และ  $RT \ln Q$  สำหรับปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $T$  ใดๆ  $\Delta G^0$  จะมีค่าที่แน่นอนแต่ค่าของ  $RT \ln Q$  มีค่าที่ไม่แน่นอนเพราะ  $Q$  อาจเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบของสารในปฏิกิริยา เราพิจารณากรณีพิเศษ 2 วิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1 : ถ้า  $\Delta G^0$  มีค่าเป็นลบมาก พจน์  $RT \ln Q$  จะมีค่าไม่เป็นบวกมากพอที่จะหักล้างกับพจน์  $\Delta G^0$  ได้จนกว่าจะเกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้นมากพอ

กรณีที่ 2 : ถ้า  $\Delta G^0$  มีค่าเป็นบวกมาก พจน์  $RT \ln Q$  จะมีค่าไม่เป็นลบมากกว่าความเป็นบวกของ  $\Delta G^0$  เฉพาะเมื่อมีสารผลิตภัณฑ์เพียงเล็กน้อยและสารตั้งต้นมีความเข้มข้นสูงมากเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์

โดยนิยามแล้วที่สมดุล  $\Delta G = 0$  และ  $Q = K$  เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงที่สมดุลดังนั้นจะได้

$$0 = \Delta G^0 + RT \ln K$$

หรือ 
$$\Delta G^0 = -RT \ln K \quad (2.34)$$

สมการที่ (2.34) เป็นสมการที่สำคัญที่สุดสมการหนึ่งเพราะเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ ดังนั้นถ้าทราบค่าของ  $K$  เราก็จะคำนวณค่า  $\Delta G^0$  ได้ หรือถ้าทราบค่าของ  $\Delta G^0$  ก็จะคำนวณหา  $K$  ได้เช่นกัน

### 2.9.3 การหาค่าเอนทัลปีโดยใช้สมการของแวนท์ฮอฟฟ์

จากสมการของกิบส์และเฮลโมลทซ์ นำไปสู่การคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่สมดุล ( $K$ ) ตามสมการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ( $T$ ) ได้ดังนี้

$$d(\Delta G^0/T) = (\Delta H^0/T^2)/dT \quad (2.35)$$

ที่สภาวะสมดุล 
$$\Delta G^0 = -RT \ln K$$

ดังนั้น 
$$d(-R \ln K) = (-\Delta H^0/T^2)/dT$$

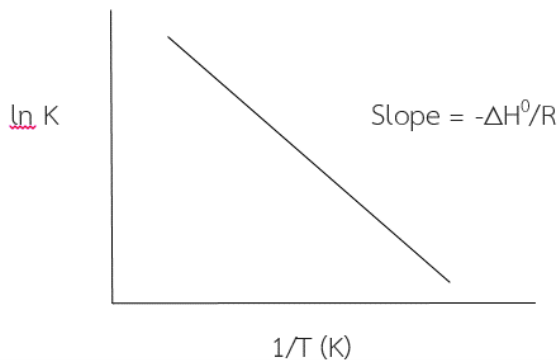
$$d(\ln K) = (\Delta H^0/RT^2)/dT \quad (2.36)$$

หรือ 
$$d(\ln K) = (-\Delta H^0/R)d[1/T] \quad (2.37)$$

เรียกสมการที่ (2.36) ว่าสมการของแวนฮอฟฟ์ (van't Hoff equation) เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.36) และสมมติว่า  $\Delta H^0$  ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนั้น

$$\ln K = (-\Delta H^0/R)(1/T) + \text{ค่าคงที่} \quad (2.38)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง  $\ln K$  และ  $1/T$  จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และจากค่าความชันของกราฟ สามารถนำไปคำนวณหา  $\Delta H^0$  ได้



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln K$  และ  $1/T$  (นภดล และคณะ, 2542)

### 2.10 สีย้อม (ชัยยุทธ และคณะ, 2543)

สีย้อมเป็นสารละลายที่ละลายน้ำได้ หรือสามารถทำให้ละลายน้ำได้ ดูดติดเส้นใยได้ การนำสีย้อมมาใช้ให้เกิดผลดีขึ้นกับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสถานะที่โมเลกุลของสีย้อมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (Bond) ยึดติดกันแน่น อิทธิพลที่ทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใย คือ

- ก. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)
- ข. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's forces)
- ค. แรงไอออนิก (Ionic forces)
- ง. พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond)

การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของเส้นใยจะต้องประกอบด้วยแรงตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งอาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกันไป แต่แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุดได้แก่ พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) อิทธิพลของรูปร่างและขนาดโมเลกุลของสีมีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการใช้ย้อมเป็นอย่างมาก เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้นซึ่งทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างความยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีที่มีความคงตัวสูงมากขึ้น

#### 2.10.1 คุณสมบัติของสีย้อม (วรรณวิภา, 2547)

ในสีย้อมแต่ละชนิดจะดูซ้ำจะมีคุณสมบัติที่ต่างกันออกไปในสภาพสารละลายหรือสารแขวนลอย เช่น ความสามารถในการละลาย การรวมตัวในสารละลาย การย่อยสลายในระหว่างการย้อมสี อัตราการเกิดปฏิกิริยา การให้และการรับอิเล็กตรอน สำหรับโครงสร้างทางเคมีของแต่ละ

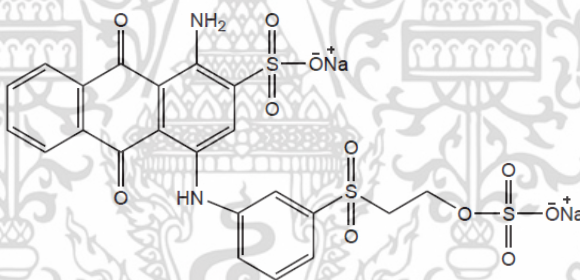
ชนิดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติของสีดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความเหมาะสมต่อเส้นใยชนิดหนึ่งๆ จะขึ้นอยู่กับอนุโมลของสีย้อมและเส้นใย
2. ความสามารถที่จะเข้ากันได้ดีกับเส้นใยหนึ่ง ๆ
3. จลนพลศาสตร์ของสีย้อม
4. คุณสมบัติการเคลื่อนตัวและความสม่ำเสมอของสี
5. ความทนต่อแสง
6. ความทนต่อความร้อน และอื่นๆ

การเลือกสีย้อมต้องเลือกตามชนิดของวัตถุที่จะย้อม มีความคงทนพอดีสามารถย้อมออกมาได้เหมือนสีตามตัวอย่างและมีราคาถูกต้องตามต้องการ สีย้อมที่ผลิตขึ้นมาในท้องตลาดมีจำนวนมาก และมักมีสีสันทันใกล้เคียงกันยากต่อการจดจำ เช่น สีฟ้าอาจจะมีสีฟ้าค่อนข้างแดงหรือฟ้าค่อนข้างไปทางเหลือง ดังนั้นจะต้องมีสัญลักษณ์ของสีเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว

### 2.10.2 สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dyes)

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้สีย้อมรีแอคทีฟสีน้ำเงิน Reactive Blue 19 จากบริษัท Thai Ambica Chemicals Co. Ltd. ซึ่งสูตรโครงสร้างทางเคมีของสีย้อม แสดงดังรูป 2.9



รูป 2.9 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสีย้อม Reactive Blue 19 (Umar lash A. *et al*, 2015)

สีรีแอคทีฟ เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี และย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีสูตรโครงสร้างคือ  $C_{22}H_{16}N_2Na_2O_{11}S_3$  มวลโมเลกุลคือ 626.54 โครโมฟอร์คือ หมู่แอนทราควิโนน ( $C_{14}H_8O_2$ ) โดยจะมีคุณสมบัติเป็นอออนลบเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง ขณะย้อมโมเลกุลของสีจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี ( $OH^-$ ) ของเส้นใยเซลลูโลส แล้วเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์เพื่อสร้างสารประกอบครอสลิงก์กับเซลลูโลสซึ่งเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ ทำให้เกิดเป็นสีที่มีความทนทานต่อการซักฟอกโครงสร้างเคมีที่เป็นองค์ประกอบของสีรีแอคทีฟมีได้ทุกประเภท ยกตัวอย่าง เช่น กลุ่มอะโซแอนทราควิโนนอยด์ ฟาธาโลไซยานีน เป็นต้น

### 2.10.3 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอคทีฟ

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 กลุ่ม และสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่ายคือ S-D-T-X

1. D = Chromophoric group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี (Chromophore) และสร้างการยึดเกาะ (Substantivity) กับเส้นใยเซลลูโลส
2. X = Reactive system เป็นกลุ่มที่ทำให้สีย้อมเกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซี (OH) ของเส้นใย
3. T = Bridging group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง Reactive system กับ Chromophore ยกตัวอย่าง เช่น หมู่  $-NH-$ ,  $-NHCO-$ ,  $-SO_2-$ ,  $-NHSO_2-$  และ  $-NCH_3-$  เป็นต้น
4. S = Solubilising group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง และเป็นกลุ่มที่อยู่ติดกับโครโมฟอร์ (Chromophoric group) โดยทั่วไปเป็นพวกกรดซัลโฟนิค ( $-SO_2Na$ ) ซึ่งอาจมีเพียงกลุ่มเดียวหรือมากกว่า 1 กลุ่ม

ส่วนประกอบ 2 ส่วนที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สีย้อมแต่ละชนิดแตกต่างกัน คือ

- (1) โครโมฟอร์ (D)
- (2) กลุ่มรีแอคทีฟ (X)

ในบางกรณีกลุ่มรีแอคทีฟ (Reactive group) อาจต่ออยู่กับโครโมฟอร์โดยตรง โดยที่ไม่มี Bridging group ก็ได้ และกลุ่มรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะเป็นสาร heterocyclic ring สีรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกลุ่มโครโมฟอร์ชนิดอะโซซึ่งได้แก่ Unmetallised azo และ Metal – complex azo เป็นส่วนมากโดยสูงถึงร้อยละ 81 เพราะฉะนั้นในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมประเภทรีแอคทีฟ ถ้าสามารถทำลายพันธะอะโซในกลุ่มโครโมฟอร์ได้ก็จะลดสีในน้ำเสียลงได้

### 2.10.4 ชนิดของกลุ่มรีแอคทีฟ

#### 1. Monofunctional System

1.1 Dichloro-s-triazine dyes โมเลกุลของกลุ่มรีแอคทีฟประเภทไดคลอโรไตรอะซีนจะมีขั้วที่พันธะของ C=N และ C-Cl เนื่องจากอะตอมของ N กับ Cl มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีหรือความสามารถที่อะตอมจะดึงดูดอิเล็กตรอนเข้ามาหาอะตอมนั้นสูงกว่าอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของสีย้อม ซึ่งคาดได้ว่าจะเกิดปฏิกิริยาแบบแทนที่ (Nucleophilic Substitution)

1.2 Aminochloro-s-triazine dyes กลุ่มรีแอคทีฟอะมิโนคลอโรไตรอะซีนได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมไดคลอโรไตรอะซีนกับอะมีนที่อุณหภูมิ 25-45 องศาเซลเซียส เกิดเป็นสีย้อมรี

แอคทีฟที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำกว่าพวกสีย้อมไดคลอโรไตรอะซีนมาก ยกตัวอย่างเช่นสีย้อม C.I. Reactive Red 3 ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกลุ่มรีแอคทีฟพวก 2-amino-4-chloro

1.3 Aminofluoro-s-triazine dyes การทำงานของกลุ่มรีแอคทีฟอะมิโนฟลูออโรไตรอะซีนคือ ขณะย้อมอะตอมฟลูออรีนจะแตกตัวออกจากโมเลกุลของสีย้อม และการที่ฟลูออรีนมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงกว่าคลอรีน ทำให้สีย้อมมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าสีย้อมพวกที่มีกลุ่มรีแอคทีฟเป็นอะมิโนคลอโร

1.4 Trichloropyrimidine dyes สีย้อมไตรคลอโรไพริมิดีนได้จากปฏิกิริยาการแทนที่ (Nucleophilic Substitution) ของอะตอมคลอรีนตำแหน่งที่ 4 เพื่อสร้างพันธะระหว่าง NH กับโครโมฟอร์

1.5 Chlorodifluoropyrimidine dyes เป็นสีย้อมจำพวกไพริมิดีนที่มีธาตุหมู่ 7 (Halopyrimidine) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยได้ง่ายกว่า ด้วยการปรับปรุงโครงสร้างโดยการใช้ฟลูออรีนแทนคลอรีนเพื่อเป็นกลุ่มรีแอคทีฟส่วนมากที่ใช้กัน ได้แก่ กลุ่มรีแอคทีฟ 5-chloro-2,6-difluoropyrimidine

1.6 Dichloroquinoxaline dyes สีย้อมที่มีกลุ่มรีแอคทีฟประเภทนี้จะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าสีย้อมไดคลอโรไพริมิดีน โดยเปรียบได้กับกลุ่มรีแอคทีฟไดคลอโรไตรอะซีนและไดฟลูออโรไพริมิดีน

1.7 Sulphatoethy-sulphone และ -sulphonamide dyes สีย้อมที่มีหมู่รีแอคทีฟประเภทนี้ส่วนใหญ่จะมีการยึดเกาะที่ต่ำกว่าสีย้อมพวกฮาโลเฮทเทอโรไซคลิกมาก โดยจะมีหมู่ซัลฟาโตที่อยู่ท้ายสุดของโมเลกุลทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำ

1.8 Phosphonic acid dyes โครงสร้างของสีย้อมชนิดกรดฟอสฟอนิกส่วนใหญ่เป็นสารตัวกลางระเหยง่าย อันได้แก่ 3-aminophenylphosphonic acid ซึ่งเกาะอยู่กับหมู่โครโมเจนโมโนอะโซ กลุ่มรีแอคทีฟประเภทนี้จะมีความเสถียรในการสร้างพันธะกับเส้นใยมากเป็นพิเศษ โดยมีค่าสูงกว่าสีย้อมคลอโรไตรอะซีนที่ย้อมภายใต้สภาพกรด และสีย้อมไวนิลซัลโฟนที่ย้อมภายใต้สภาวะต่าง

## 2. Bifunctional Systems

1.1 Bis (aminochlorotriazine) dyes ประกอบด้วยกลุ่มรีแอคทีฟที่เหมือนกัน 2 หมู่ ซึ่งทำให้มีการดูดติดและการยึดเกาะกับเส้นใยสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสีย้อมที่มีกลุ่มรีแอคทีฟอะมิโนคลอโรไตรอะซีนเพียงหมู่เดียวรวมทั้งมีปริมาณสีย้อมที่หลุดไปกับน้ำที่น้อยกว่าด้วย สำหรับขนาดของโมเลกุลจะมีค่าเป็นสองเท่าของสีย้อมที่มีกลุ่มรีแอคทีฟเดียว นอกจากนี้สีย้อมที่มีกลุ่มรีแอคทีฟ 2 กลุ่ม จะเกิดการทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำต่ำกว่าที่มีกลุ่มรีแอคทีฟเพียงกลุ่มเดียว

1.2 Bis (aminonicotinotriazine) dyes ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมอะมิโนคลอโรไตรอะซีนกับเทอเทียรีอะมีน เกิดเป็นอนุพันธ์ของควอทเทอนารีแอมโมเนีย โดยอะตอม

ไนโตรเจนตัวที่ 4 ที่เพิ่มขึ้นนี้จะเป็นตัวนำพาประจุบวก จึงทำให้พันธะ C-N ที่เชื่อมอยู่กับวงของไตรอะซีนมีสภาพขั้วมากขึ้น และทำให้สีย้อมประเภทนี้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าสีย้อมที่มีโครงสร้างแบบเดิม

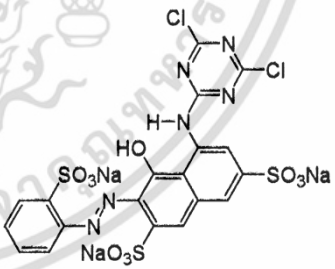
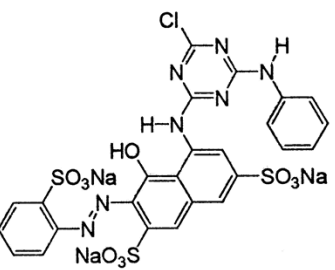
1.3 Aminochlorotriazine-sulphatoethylsulphone dyes ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมไดคลอโรไตรอะซีนกับอะริลอะมีนที่มีหมู่ 2-sulphatoethylsulphone ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยได้โดยหมู่โมโนคลอโรไตรอะซีนหรือหมู่ไวนิลซัลโฟน ซึ่งหมู่ไวนิลซัลโฟนนี้จะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าหมู่โมโนคลอโรไตรอะซีน

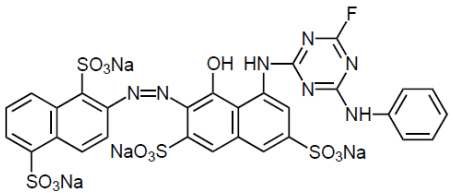
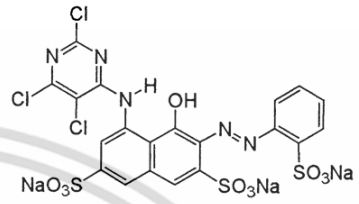
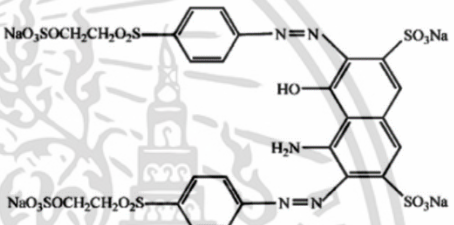
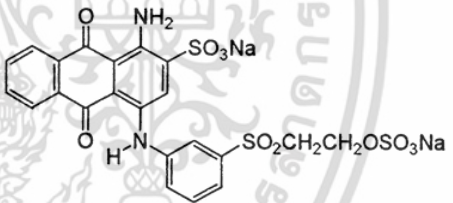
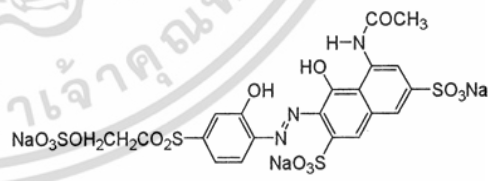
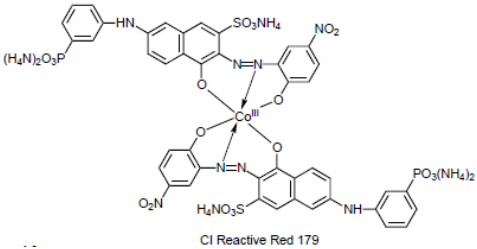
1.4 Aminofluorotriazine-sulphatoethylsulphone dyes ประกอบด้วยหมู่อะลิฟาติกไวนิลซัลโฟนและ Bridging group คือ โมโนฟลูออโรไตรอะซีนหรืออะริลไวนิลซัลโฟน วัตถุประสงค์การใช้งานของสีย้อมประเภทนี้ ได้แก่ ค่าสัมพรรคภาพที่อยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงปานกลาง แต่มีการยึดเกาะสูง สีย้อมชนิดนี้จึงเหมาะสมในการรักษาสภาพแวดล้อมมากที่สุด

### 2.10.5 สีย้อมรีแอคทีฟหมู่อะโซ

สีรีแอคทีฟเป็นชื่อสีย้อมที่เรียกตามลักษณะของการใช้งาน ซึ่งสีย้อมชนิดดังกล่าวมีความเหมาะสมต่อการย้อมเส้นใยเซลลูโลสและมีคุณสมบัติการละลายน้ำที่ดี และต้องการสภาวะการย้อมที่แตกต่าง สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟหมู่อะโซจะมีโครงสร้างโครโมฟอร์ของโมเลกุลเป็นอะโซ (-N=N-) ซึ่งได้แก่ สัญลักษณ์กลุ่ม D หรือ Chromophoric group

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างของสีย้อมที่มีกลุ่มรีแอคทีฟประเภท Monofunction

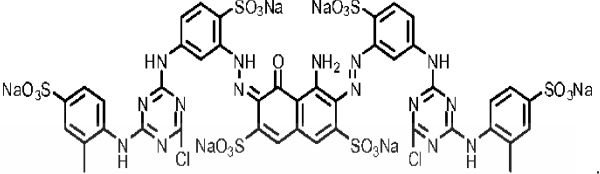
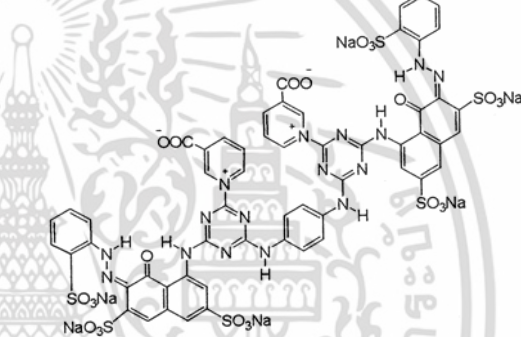
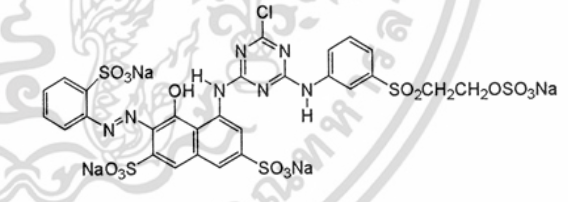
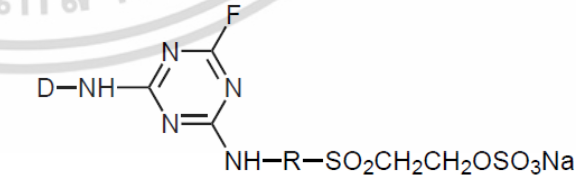
กลุ่มรีแอคทีฟ	ตัวอย่าง
Dichloro-triazine	C.I.Reactive Red 1 
Aminochloro-s-triazine	C.I.Reactive Red 3 

Aminofluoro-s-triazine	2- amino-4-fluoro-s-triazine dyes 
Trichloropyrimidine Sulphatoethy-sulphone และ Sulphonamide	 <p>C.I.Reactive Black 5</p>  <p>C.I.Reactive Blue 19</p>  <p>C.I.Reactive Violet 5</p> 
Phosphonic acid	C.I.Reactive Red 179 

ที่มา : Kazi Reja (2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของสีย้อมที่มีกลุ่มรีแอคทีฟประเภท Bifunction

กลุ่มรีแอคทีฟ	ตัวอย่าง
Bis (aminochlorotriazine)	B.I.Reactive Blue 171 
Bis (aminonicotinotriazine)	B.I.Reactive Red 221 : Substituent X = Nicotin 
Aminochlorotriazine-sulphatoethylsulphone	
Aminofluorotriazine-sulphatoethylsulphone	 <p>D = dye chromophore      R = aliphatic group</p>

ที่มา : Kazi Reja (2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

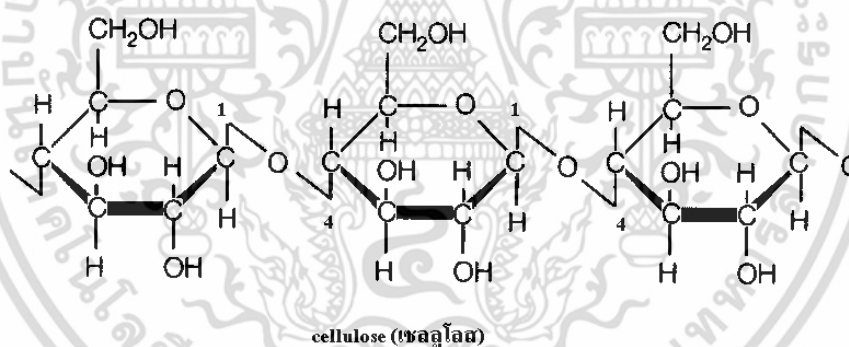
## 2.11 ซีลลิวไม้อย่างพารา

### 2.11.1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ (ทรงกลด, 2560)

องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ประกอบด้วยสารที่สำคัญอยู่สองประเภทคือ สารพวกโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งเรียกรวมๆ ว่าไฮโดรเซลลูโลส ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส อีกประเภทหนึ่งได้แก่ ลิกนิน นอกจากนี้ยังมีสารอินทรีย์อื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบส่วนน้อยอีกเช่น เทนิน ยางน้ำมัน ไม้ แอลคาลอยด์และสารที่มีสีอื่นๆ อีกหลายชนิดสารเหล่านี้จัดอยู่ในประเภทสารแทรกหรือสารที่สกัดได้ ส่วนสารประกอบอินทรีย์นั้นคือ ส่วนที่เป็นซีลลิวไม้อประกอบด้วยสารประกอบต่างๆ มากมาย ซึ่งจะแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยที่สำคัญได้ ดังนี้

#### 1. เซลลูโลส (Cellulose)

เป็นสารประกอบที่มีมากที่สุดของเนื้อไม้คือ ประมาณร้อยละ 40 ทั้งในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (Softwood) และไม้ใบกว้าง (Hardwood) มีโครงสร้างอัดกันแน่นเป็นเส้นตรงไม่มีกิ่ง สูตรโครงสร้างทางเคมี  $(C_6H_{10}O_5)_n$  ซ้ำกันใน 2 ลักษณะ เรียกว่า Cellobiose unit ซึ่งส่วนปลายของทั้งสองข้างคือ Reducing end group (C1) ส่วนที่ทำปฏิกิริยาอย่างสุด และ Non-Reducing end group (C4) ส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา



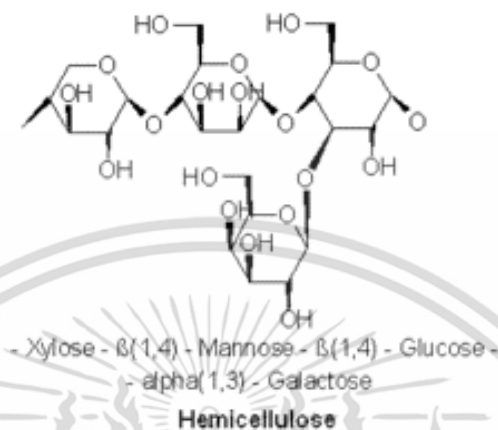
รูป 2.10 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส (Cellulose) (ดุขฎฐีและคณะ, 2557)

จำนวนโมเลกุลของ Glucose Unit (DP = Degree of Polymerization) เท่ากับ 1000 ถึง 3000 หรือ 4000 แต่ละ Unit ยึดเกาะกันด้วยพันธะ “1,4-B-D-anhydroglucosidic bonding” เซลลูโลสจะไม่ละลายในน้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์สะเทิน (Neutral organic solvent) เช่น เบนซีน แอลกอฮอล์ และอีเทอร์ แต่จะละลายได้ดีในกรดเกลือและกรดกำมะถันเข้มข้น เซลลูโลสเมื่อนำไปทำปฏิกิริยาทางเคมีเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสามารถผลิตพลาสติก น้ำตาล เจล ฟิล์ม เส้นใยชนิดใหม่ สารเคลือบระเบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

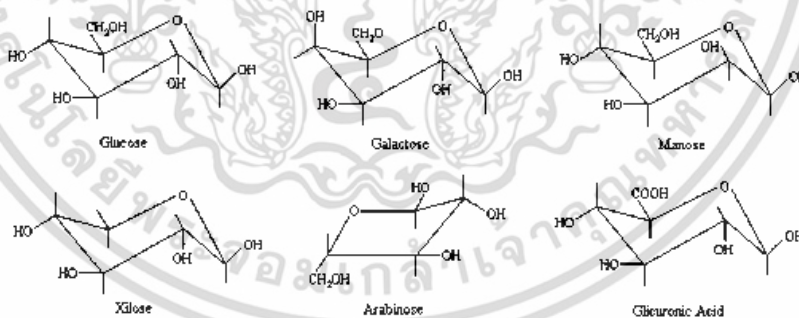
## 2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses)

ในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (Softwood) จะมีประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 ส่วนในไม้ใบกว้าง (Hardwood) มีประมาณร้อยละ 30 ถึง 35 เป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่ซ้ำกันมีโครงสร้างลักษณะเป็นกิ่งจับกันอยู่แบบหลวมๆ



รูป 2.11 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) (Helena Arkkola, 2016)

เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วย น้ำตาล 5 ชนิดและกรดบางชนิด คือ  
Hexoses (จำนวน C = 6) : glucose, mannose, galactose  
Pentose (จำนวน C = 5) : xylose, arabinose  
Acid : 4-O-methyl-D glucuronic acid มีสูตรโครงสร้างดังนี้



รูป 2.12 สูตรโครงสร้างของส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลส (University of Michigan, 2560)

### ประโยชน์ของ Hemicelluloses

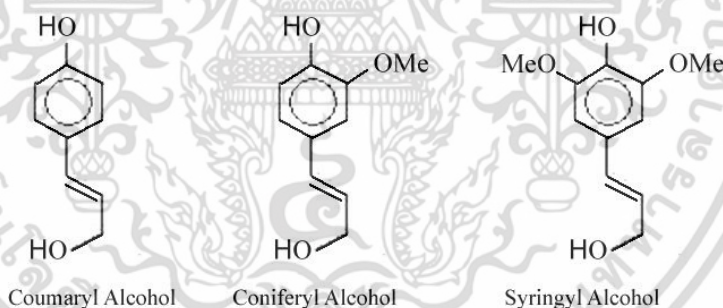
1. ในรูป monomer สามารถแยกน้ำตาลโดยวิธี Hydrolysis (Hydrolysis คือ การสลายโดยใช้น้ำเป็นตัวช่วยย่อยสลายทำให้โมเลกุลของสารเปลี่ยนแปลงไปคุณสมบัติก็เปลี่ยนแปลงไป) เรียกวิธีนี้ว่า Wood saccharification (การทำน้ำตาลจากเนื้อไม้) และวิธี Steam Explosion ใช้น้ำไปแยกใช้ได้ดีและได้น้ำตาลมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ในรูป Polymer มีผลทำให้ผลผลิตเยื่อมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงของเยื่อและกระดาษเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีโครงสร้างเป็น Amorphous (อยู่รวมกันแบบหลวมๆ) น้ำจึงเข้าไปได้ง่ายเกิดการพองตัวเยื่ออ้วนน้ำได้ดีมีประโยชน์ในการตีเยื่อคือ ทำให้ผิวของเส้นใยแตกออกเกิดการประสานตัวด้วย H-bond ทำให้เยื่อมีความแข็งแรงมากขึ้น
3. เมื่อนำไปทำปฏิกิริยาทางเคมีสังเคราะห์ได้ Food additive (สารแต่งเติมทำให้อาหารข้น) Jelly agent (ใช้ในเครื่องสำอาง เป็นตัว Absorbent) Adhesive (ตัวเชื่อมประสาน)

### 3. ลิกนิน (Lignin)

เป็นสารประกอบที่มีมากรองจากเซลลูโลสในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (Softwood) จะมีลิกนินประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 ส่วนในไม้ใบกว้าง (Hardwood) มีลิกนินประมาณร้อยละ 20 ถึง 25 เป็นสารพอลิเมอร์ที่ซับซ้อนกว่า Cellulose กับ Hemicelluloses และเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ชนิดหนึ่งพบในไม้ใบกว้าง (Hardwood) ไม้ใบแคบ (Softwood) พืชล้มลุก (Grasses) และพืชชั้นต่ำต่างๆ ไป แต่ไม่พบใน Lichens mosses fungi mushrooms โมเลกุลใหญ่ค่า Glucose Unit (DP = Degree of Polymerization) เยอะลักษณะโครงสร้างเป็น 3 มิติทำหน้าที่เป็น Cell wall adhesive ยึดเส้นใยที่อยู่รวมกันให้เป็นโครงสร้างของเนื้อไม้สามารถพบลิกนินในผลบาสท์ (Bast) เปลือก (Bark) เช่นกัน

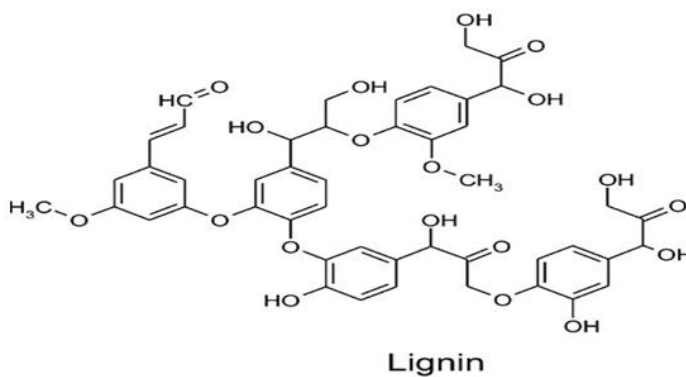


รูป 2.13 สูตรโครงสร้างของ Monomer ของลิกนิน (University of Michigan, 2560)

ชนิดของลิกนินแบ่งตามโครงสร้างเป็น 4 ประเภท คือ

1. G type (Guaiacyl lignin) ประกอบด้วย Coniferyl alc. พบในไม้ใบแคบที่ปกติ
2. G-S type (Guaiacy-Syringyl lignin) พบในไม้ใบกว้างทั้งปกติและไม่ปกติประกอบด้วย Coniferyl alc. และ Sinapyl alc.
3. H-G type (4-Hydroxyphenyl-Guaiacyl-Syringyl lignin) มี Monomer ทั้ง 3 ชนิดอยู่รวมกัน
4. H-G type (Hydroxylphenyl-Guaiacyl lignin) โดยมากพบในไม้ไม่ปกติซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น Compression wood ประกอบด้วย Coniferyl act. และ p-coumaryl act

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็น ใบเขียวประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.14 สูตรโครงสร้างของลิกนิน (University of Michigan, 2560)

### ประโยชน์ของ Lignin

- 1) ลิกนินที่ได้จากการต้มเยื่อกระดาษสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้
- 2) ลิกนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเมื่อนำมาสังเคราะห์จะได้สารอินทรีย์เช่น วานิลลิน (Vanillin) ไดเมธิล-ซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide = DMSO)
- 3) ลิกนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมักใช้ในรูปของแหล่งลิกนินที่ได้มาโดยตรง เช่น ลิกนิน ซัลโฟเนตหรือคราฟลิกนิน และลิกนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงใช้กันมากในอุตสาหกรรมกระดาษ เจาะน้ำมัน ทำสี ทำยาฆ่าแมลง ทำซีเมนต์ ทำยาง และอาจใช้เป็นตัวเพิ่ม (Extenders) ในกาวยีนอล

### 2.11.2 ลักษณะของขี้เลื่อย

ขี้เลื่อย (Sawdust or wood dust) หมายถึง ผงไม้ที่เกิดจากการตัดไม้ด้วยเลื่อยหรือเกิดจากการขีดไม้ด้วยกระดาษทรายหรือเครื่องขัดลักษณะเป็นผงไม้ละเอียด เป็นของเสียในโรงงานที่เป็นพิษ โดยเฉพาะการทำให้เกิดอาการอักเสบ โดยอาจนำไปบดให้ละเอียดก่อนนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ หรือนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุเพาะเห็ด วัสดุในการก่อสร้าง เช่น ไม้อัด อิฐ ผสมในเครื่องปั้นดินเหนียวเพื่อช่วยในการขึ้นรูป ส่วนประกอบในการทำรูป หรืออัดแท่งเป็นถ่านเพื่อใช้เป็นวัสดุชีวมวล

ขี้เลื่อยมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก (เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ที่มีหมู่โพลีฟีนอลซึ่งสามารถจับกับโลหะหนักได้ด้วยกลไกต่างกันตัวอย่าง เช่น ขี้เลื่อยจากต้นพอบลาร์ และต้นเฟอร์ที่ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต ดูดซับทองแดงและสังกะสีได้ดี ขี้เลื่อยจากต้นมะพร้าวที่ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกดูดซับนิกเกิลและปรอทได้



รูป 2.15 ลักษณะของขี้เลื่อย (Sawdust or wood dust)

คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของขี้เลื่อย (อิทธิสุนทร, 2551)

1. pH 4.2-6 มีความแปรปรวนมากขึ้นอยู่กับชนิดของไม้และอายุของขี้เลื่อย
2. คุณสมบัติในการอุ้มน้ำดีมากถ้ามากเกินไปจะมีปัญหาเกี่ยวกับการระบายอากาศ
3. คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุมีค่าสูงเมื่อขี้เลื่อยผ่านขบวนการสลายตัว
4. ความหนาแน่นรวมเมื่อแห้งต่ำ
5. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใช้ต่ำ
6. ความคงทนของโครงสร้าง สามารถสลายตัวได้

ตาราง 2.4 ข้อดีและข้อเสียของขี้เลื่อย

ข้อดี	ข้อเสีย
1. น้ำหนักเบาต่อการนำไปใช้	1. ต้องเสียเวลาในการปล่อยให้สลายตัวนาน ยากในการกำจัดโรคและแมลง
2. ความสามารถในการอุ้มน้ำดีมาก	2. มีความแปรปรวนในด้านองค์ประกอบมาก
3. ราคาถูกมาก	3. มีการสลายตัวหลังจากนำมาใช้และเกิดการอัดตัวแน่น

ที่มา : อิทธิสุนทร (2551)

ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (Rubber Sawdust) มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในต่างประเทศมีการนำไม้เบิร์ชขูดมาผลิตเป็นไซแลนและไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ที่มีมูลค่าสูง สำหรับประเทศไทยยังไม่มียานวิจัยใดที่ทำการผลิตไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้จากการย่อยไซแลนจากขี้เลื่อย

การใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือที่เกิดจากอุตสาหกรรมยางพารายังมีอยู่น้อย โดยเฉพาะวัสดุเศษเหลือจากการแปรรูปไม้ยางพารา ได้แก่ ขี้เลื่อย เศษไม้ ปีกไม้ ปัจจุบันการใช้ประโยชน์ขี้เลื่อยไม้ยางพารามักนำมาใช้เป็นวัสดุชีวมวลหรือเชื้อเพลิง การผลิตผงถ่านกัมมันต์ การแปรรูปไม้อัด ใช้เป็น

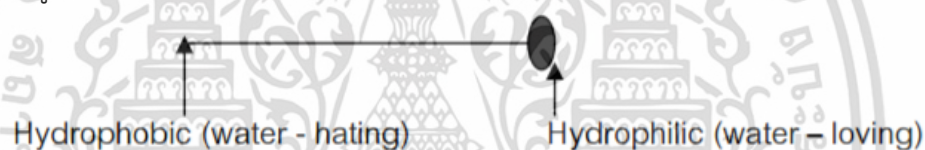
วัสดุเพาะเห็ด เป็นต้น จะเห็นได้ว่าเชื้อเห็ดเป็นสิ่งที่มีมูลค่าต่ำ อีกทั้งยังคงเหลือในรูปของเศษวัสดุเหลือทิ้ง โรงงานบางแห่งอาจนำเชื้อเห็ดไปเผาทำลายทำให้เกิดภาวะโลกร้อน

จากการศึกษาพบว่าโดยปกติเชื้อเห็ดเป็นสิ่งทีระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ไม่สามารถย่อยดูดซึม และเกิดการหมักโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักเป็นลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) อย่างไรก็ตามร่างกายมนุษย์สามารถนำสารนี้มาใช้ประโยชน์ได้หากเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี องค์ประกอบและขนาดโมเลกุลให้มีขนาดเล็กลง

## 2.12 สารลดแรงตึงผิว (จिरसा, 2548)

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นสารที่เมื่อละลายน้ำแล้วจะช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ คำว่า Surfactant มาจากคำว่า Surface active agent มีคุณลักษณะที่สำคัญ 2 ส่วนได้แก่ ส่วนหัวที่เป็น Hydrophilic (ชอบน้ำ) และส่วนหางที่เป็น Hydrophobic (ไม่ชอบน้ำแต่ชอบน้ำมัน)

หลักการทำงานของสารลดแรงตึงผิวคือ ส่วนที่ชอบน้ำจะทำการจับกับน้ำ และส่วนที่ชอบน้ำมันจะทำการจับสิ่งสกปรกพวกไขมันที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกไปแล้วแขวนลอยอยู่ในน้ำ



รูปที่ 2.16 ส่วนที่เป็น Hydrophilic และส่วนที่เป็น Hydrophobic ของสารลดแรงตึงผิว (จिरसा, 2548)

สารลดแรงตึงผิวแบ่งออกเป็นหลายกลุ่ม ขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าบนส่วนประกอบที่ละลายน้ำ (Hydrophilic) โดยสามารถแยกได้เป็น 4 ประเภท

1. Anionic Surfactant
2. Cationic Surfactant
3. Nonionic Surfactant
4. Amphoteric Surfactant (Zwitterionics)

1. Anionic Surfactant เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบน Hydrophilic ให้ประจุลบ ส่วนมากแสดงอยู่ในรูป Carboxylate, Sulfate, Sulfonate หรือ Phosphate สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทผงซักฟอก, ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและน้ำยาล้างจาน เป็นต้น โดยใช้มากถึง 49% ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมด เนื่องจากสามารถขจัดคราบสกปรกได้ดี ยกตัวอย่าง เช่น Sodium dodecyl sulphate (SDS) ซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{SO}_4\text{Na}^+$

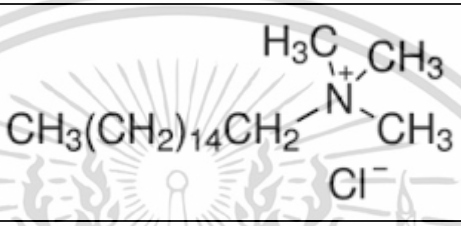
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Cationic Surfactant เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบน Hydrophilic ให้ประจุบวก ส่วนมากจะเป็นพวก Quaternary Ammonium สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้จะไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นด่างสูง (pH 10-11) เนื่องจาก ammonium salt จะมีการสูญเสียประจุบวก ทำให้เกิดตะกอนได้ สารลดแรงตึงผิวประเภท cationic จะทำให้เกิดการระคายเคืองมากกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภท anionic นิยมใช้ในพวกน้ำยาปรับผ้านุ่ม ครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับการจัดแต่งทรงผม เป็นต้น ยกตัวอย่างเช่น Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) ซึ่งมีสูตรโมเลกุลคือ  $C_{16}H_{33}N(CH_3)_3^+Br^-$

3. Nonionic Surfactant สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะต่างจากสารลดแรงตึงผิวประเภท anionic และ cationic ตรงที่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุ โดยมีพวก Polyether หรือ Polyhydroxyl เป็นกลุ่มที่แสดงคุณสมบัติคล้ายพวกที่มีประจุใช้มากในผงซักฟอก, น้ำยาล้างจานและ ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิว เป็นต้น ยกตัวอย่างเช่น Polyoxyethylene alcohol ซึ่งมีสูตรโมเลกุลคือ  $(C_nH_{2n+1}(OCH_2CH_2)_mOH)$

4. Amphoteric Surfactant (Zwitterionics) เป็น สารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบน Hydrophilic สามารถให้ได้ทั้งประจุบวกและลบ โดยจะแสดงคุณสมบัติประเภทใดขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสภาพแวดล้อม ถ้าสภาพแวดล้อมเป็นด่าง (pH>7) ประจุไฟฟ้าบน Hydrophilic จะให้ประจุลบ ถ้าสภาพแวดล้อมเป็นกรด (pH<7) ประจุไฟฟ้าบน Hydrophilic จะให้ประจุบวก และในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกลางจะไม่เกิดการให้ประจุไฟฟ้าบน Hydrophilic สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิว หรือผม ในปัจจุบันยังใช้น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทอื่น เช่น b-N-Alkylaminopropionic Acids มีสูตรโมเลกุลคือ  $RN^+H_2CH_2CH_2COO^-$

ตาราง 2.5 ข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ของ Cetyl Trimethyl Ammonium Chloride

CTAC	
ชื่อทั่วไป/ชื่ออื่น	Cetyl Trimethyl Ammonium Chloride (ซีติว ไตรเมทิล แอมโมเนียม คลอไรด์)
ชื่อวิทยาศาสตร์	Quartamin 86W; Hexadecyltrimethylammonium chloride solution; N-N-N trimethyl chloride; CTAC; Quat-S-30
สูตรทางเคมี	$C_{19}H_{42}ClN$
โครงสร้างทางเคมี	
CAS Number	112-02-7
เกรดสินค้า	เครื่องสำอาง (Cosmetic Grade)
อุตสาหกรรมที่ใช้	น้ำยानวดผม และน้ำยาปรับผ้านุ่ม (Conditioners and fabric softener)
ส่วนผสมหลัก (Main ingredient)	สารลดแรงตึงผิว ชนิดขั้วลบ (Cationic Surfactant)
ข้อมูลทั่วไป	Cetyl Trimethyl Ammonium Chloride ของเหลวไม่มีสีจนถึงสีเหลืองใส ละลายน้ำได้ เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ข่าเชื้อและป้องกันไฟฟ้าสถิต ใช้ในเวชภัณฑ์ยาโดยจะใช้เป็นสื่อกลางและข่าเชื้อได้ ใช้ในผลิตภัณฑ์ดูแลเส้นผม เช่น คอนดิชันเนอร์ แชมพู ป้องกันไฟฟ้าสถิต ในอุตสาหกรรมไฟเบอร์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมเครื่องสำอางโดยใช้เป็นส่วนผสมในการทำผลิตภัณฑ์ดูแลบุคคล เป็นต้น

### 2.13 ความเป็นพิษของสีย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ จากประวัติที่มีการเก็บรวบรวมในต่างประเทศไม่พบว่าผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมพิมพ์มีอัตราการตายหรือการเจ็บป่วยสูงกว่าบุคคลในอาชีพอื่น แต่สีย้อมบางชนิดอาจเปลี่ยนแปลงกลายเป็นสารพิษที่มีพิษได้ เช่น สีย้อมที่โครงสร้างแบบอะโซ ซึ่งเป็ยีสีย้อมที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยมีการใช้ถึง 60-70 % ของสีย้อมที่ใช้กันอยู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการรึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีย้อมอะโซจะมีพันธะคู่ของไนโตรเจน (N=N) เป็นหมู่โครโมฟอร์ ซึ่งในสถานะที่ไม่ใช่ออกซิเจน หมู่อะโซจะถูกทำลายโดยสารรีดิวซ์ (Reducing agent) พันธะอะโซจะแตกตัวออกได้เป็นสารอะโรมาติกเอมีน (Aromatic amine) ซึ่งเป็นสารตัวกลาง (intermediate) ของสารก่อมะเร็ง และเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ทดลองได้ แต่สารพิษนี้สามารถถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้ในสถานะที่ใช่ออกซิเจน

ดังนั้นการบำบัดสีย้อมโดยใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายแบบไม่ใช่ออกซิเจนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถใช้เป็นขั้นสุดท้ายในการกำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องใช้กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช่ออกซิเจนร่วมด้วยเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสีย้อมที่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามสารอะโรมาติกเอมีนที่ใช้ในอุตสาหกรรมสีที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งมีเพียง 15 ชนิดเท่านั้น โดยทั่วไปแล้วสีย้อมจะไม่แตกตัวให้สารอะโรมาติกเอมีน แต่จะแตกตัวให้กรดอะโรมาติกเอมีโนซัลโฟนิค (Aromatic aminosulphonic acid) ซึ่งไม่ก่อให้เกิดมะเร็งหรือโอกาสที่จะก่อให้เกิดมะเร็งน้อยมาก สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางคือ โดยทางหายใจด้วยการสูดดมสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศโดยการสัมผัสทางผิวหนังและโดยการปะปนเข้าไปกับอาหารการกิน

สำหรับผลกระทบของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าสีย้อมเป็นสารที่สลายตัวทางชีวภาพได้ยาก แต่มีความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ ดังนั้นปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำที่ปัจจุบันจึงไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อมแต่อยู่ที่สีของน้ำที่ สีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้มแม้จะมีสีอยู่ในแหล่งน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อยก็ทำให้น้ำมีสีเป็นที่น่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น โดยทั่วไปแล้วปริมาณของสีที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้วสังเกตเห็นได้จะอยู่ในช่วง 0.1-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดสี สภาพแสง และระดับความใสของน้ำ และจากการศึกษาพบว่าสีย้อมที่ปล่อยมาจากโรงงานย้อมสิ่งทอมีความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่โรงงานจะต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้งแม้ว่าสีจะมีความเป็นพิษต่ำก็ตาม

## 2.14 น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

### 2.14.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

1. ปริมาณสารอินทรีย์สูง เนื่องจากมีค่า BOD และ COD สูง ปริมาณสารอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อม ได้แก่ สีย้อม, เส้นใย และด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการฟอกย้อมและตกแต่ง ไชมัน และตัวทำละลายต่างๆ เป็นต้น
2. มีความเป็นด่างสูง สารที่ทำให้มีลักษณะเป็นด่างคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต
3. มีอุณหภูมิสูง
4. มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำมาจากเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. มีสีเข้มมาก ซึ่งมาจากสีที่ใช้ในกระบวนการย้อมผ้า
6. มีโลหะหนักเจือปน โลหะหนักนี้มาจากสีที่ใช้ย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่จะเป็นพวก โลหะทองแดง, โครเมียม, ตะกั่ว และสังกะสี

#### 2.14.2 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบด้วยสีย้อมและสารเคมีต่างๆ มากมาย เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศของแหล่งน้ำและมนุษย์ โดยผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลกระทบของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

ผลของน้ำเสีย	ผลกระทบที่เกิดขึ้น
ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำลดลง	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สิ่งมีชีวิตในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน</li> <li>- ทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถฟอกตัวเอง (Self Purification)</li> <li>- ทำให้เกิดกลิ่น</li> </ul>
ค่าความเป็นด่าง	- น้ำเสียที่มีความเป็นด่างสูงหากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรง จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตสามารถดำรงอยู่ในน้ำที่มีสภาวะเป็นกลาง
อุณหภูมิ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ</li> <li>- ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง</li> <li>- เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของพื้จลินทรีย์</li> </ul>
ของแข็งที่ละลายน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ของแข็งที่ละลายน้ำได้บางตัว จะทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเป็นโรคได้</li> <li>- ทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำเพื่อให้เกิดประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้</li> </ul>
สี	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ</li> <li>- ทำให้ปริมาณแสงที่จะผ่านลงสู่แหล่งน้ำมีปริมาณน้อยลง ส่งผลให้พื้ชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง</li> </ul>
โลหะหนัก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดโรค</li> <li>- โลหะหนักจะสะสมอยู่ในระบบนิเวศ</li> <li>- เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์</li> </ul>
ของแข็งแขวนลอย	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ</li> <li>- สามารถตกตะกอนทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินได้</li> <li>- ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.14.3 ปัญหาเฉพาะตัวสำหรับน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อม

#### 1. ความหลากหลายของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำทิ้ง

การฟอกย้อมสิ่งทอเป็นกระบวนการที่ต้องใช้สารเคมีและสีย้อมชนิดต่างๆ มากมาย รวมแล้วหลายร้อยชนิด สารเคมีและสีย้อมเหล่านี้บางส่วนจะถูกดูดซึมไว้ในวัสดุสิ่งทอ แต่จะมีบางส่วนเหลือปะปนมาในน้ำทิ้ง สารเคมีและสีย้อมแต่ละชนิดจะมีสมบัติด้านความเป็นพิษ ด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และด้านความยากง่ายในการกำจัดที่แตกต่างกันไป

#### 2. ความหลากหลายของน้ำทิ้งในด้านคุณภาพและปริมาณ

น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมจะมีความหลากหลายมาก ทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ย้อม กระบวนการ และชนิดของสีย้อมที่ใช้รวมถึงประเภทของเครื่องจักรที่ใช้

#### 3. สีของน้ำทิ้ง

น้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมจะมีสีทำให้เป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็นและการกำจัดสีจากน้ำทิ้งก็เป็นเรื่องที่ทำได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูงมากด้วย

#### 4. ปริมาณของน้ำทิ้งค่อนข้างมาก

โรงงานฟอกย้อมมีปริมาณน้ำทิ้งค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมอื่นๆ ทำให้ต้องใช้พื้นที่ในการบำบัดน้ำทิ้งมาก ต้นทุนการจัดตั้งระบบน้ำทิ้งจึงสูงตามไปด้วย

### 2.15 การวัดความเข้มข้นสี (APHA, AWWA and WEF, 2006)

หน่วยของสีย้อมที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายหน่วย เช่น หน่วยแพลตินัมโคบอลต์ (Platinum-Cobalt unit) และหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI unit) หน่วยโลวิบอนด์ (Lovibond unit) แต่ที่นิยมใช้ได้แก่ เช่น หน่วยแพลตินัมโคบอลต์ และหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI unit)

#### 2.15.1 การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ (Pt-Co)

การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ เป็นการวัดสีของน้ำตัวอย่างเทียบกับสารละลายสีมาตรฐานซึ่งเตรียมจาก  $K_2PtCl_6$  และ  $CoCl_2 \cdot 6H_2O$  ที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งสีของสารละลายมาตรฐานนี้มีสีเหลืองคล้ายกับสีของน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป โดยสารละลายมาตรฐาน 1 หน่วยสี (แพลตินัมโคบอลต์) หมายถึง ความเข้มข้นสีของสารละลายมาตรฐานแพลตินัมโคบอลต์ซึ่งมีความเข้มข้นของแพลตินัมเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของคลอโรแพลตินเนตการวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์มักใช้ในการวัดสีของน้ำที่เกิดจากสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ ได้แก่ น้ำธรรมชาติและน้ำดื่ม วิธีนี้ไม่เหมาะที่จะใช้วัดสีของน้ำเสียอุตสาหกรรม ซึ่งมีความเข้มข้นของสีสูงและเกิดสารอินทรีย์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.15.2 การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วย เอดีเอ็มไอ (ADMI)

การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยเอดีเอ็มไอถูกพัฒนาขึ้นในปี 1970 โดยสถาบันผู้ผลิตสีแห่งอเมริกา (American Dye Manufacturers Institute : ADMI) เพื่อใช้ในการศึกษาผลกระทบของสี ย้อมผ้าต่อสิ่งแวดล้อม โดยการวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยเอดีเอ็มไอถูกพัฒนาขึ้นโดยมีบรรทัดฐาน 4 ข้อ คือ

1. สามารถใช้ได้กับทุกเฉดสี
2. สามารถบ่งบอกถึงความแตกต่างของค่าสีที่มีปริมาณน้อยๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. สัมพันธ์กับค่าวัดสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์
4. เครื่องมือที่ใช้ราคาไม่สูงมากนัก

การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยเอดีเอ็มไอจะทำการวัดโดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิสชัน (%Transmission) ของน้ำตัวอย่างทุกๆ 10 นาโนเมตร โดยใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร หลักการที่ใช้จะยึดตามสูตรของ Adams-Nickerson Chromatic Value คือถ้ามีสีอยู่ 2 สี คือสี A และ B เมื่อมองด้วยตาเปล่าแล้วเห็นความแตกต่างของสีทั้งสองจากสภาวะไร้สีในระดับที่เท่ากัน ค่าสีทั้งสองสีนี้จะมีค่าเอดีเอ็มไอเท่ากัน การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยเอดีเอ็มไอสามารถวัดสีในน้ำที่มีความเข้มข้นสูงๆ ได้ เหมาะสำหรับการใช้ในการวัดความเข้มข้นของสีของน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม

## 2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**Annadurai et al. (1999)** ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟด้วยไคติน โดยสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Verofix Red โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณของไคติน ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และขนาดของอนุภาคไคติน พบว่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของไคติน ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ แต่การดูดซับจะลดลงเมื่อขนาดของอนุภาคไคตินเพิ่มขึ้น

**Al-Qodah. (2000)** ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมของเก้าหินน้ำมัน สีย้อมที่ใช้ในการศึกษาใช้สีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Drim yellow-k4G (2) Drim blue-KBL และ (3) Drim red-K4BL พบว่าความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงเมื่อขนาดของสารดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 100-300 ไมโครเมตร ความสามารถการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นจาก 20-45 องศาเซลเซียส และความเร็วในการเขย่าเพิ่มขึ้นจาก 200-600 รอบต่อนาที

**เทพฤทธิ์ (2544)** ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในสารละลายสีย้อมโดยการดูดซับสีย้อมโดยการดูดซับด้วยซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว ซึ่งซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และในการศึกษาใช้สีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Red 2 (2) Reactive Red 120 และ (3) Reactive Red 141 จากการศึกษาพบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ของระบบอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2.0-10.0 การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดของซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วมีประสิทธิภาพดี โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าร้อยละ 82, 89 และ 98 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีค่าต่ำกว่า 5.0 แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ของระบบมีค่าสูงกว่า 5.0 ละเมื่อขนาดของสารดูดซับมีขนาดตั้งแต่ 75-250 ไมโครเมตร พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของสารดูดซับมีขนาดเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นจาก 30-60 องศาเซลเซียส

**สกล ศิริวัฒน์ (2546)** ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมแบล็ค 2 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Red 141 และ (2) Basic Red 14 ด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบด้วยไคโตซานเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์แบบธรรมดา พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.0, 7.0 และ 9.0 พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าลดลงเท่ากับ 5.0 ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น 1.18 เท่าของการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเท่ากับ 7.0 และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 9.0 ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น 0.88 เท่าของการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเท่ากับ 7.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Amagan et al. (2004)** ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟกลุ่มเอโซ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Everzol Black B (2) Everzol Red 3RS และ (3) Everzol Yellow 3RS ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ และซีโอไลต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยควอเทอนารี เอมีน จากการศึกษาพบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด แต่ซีโอไลต์ที่ผ่านการกระตุ้นมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมชนิด Everzol Black B, Everzol Red 3RS และ Everzol Yellow 3RS ตามลำดับ เท่ากับ 2.90, 3.70 และ 7.60 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

**Rachakornkij et al. (2004)** ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยขานอ้อยมาใช้ในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากสารละลาย โดยในการศึกษาใช้สีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด คือ (1) Remazol Black B (2) Remazol Brilliant Blue และ (3) Remazol Brilliant Red F3B และเถ้าลอยขานอ้อยที่ใช้ในการศึกษาเป็นของเสียจากโรงงานน้ำตาลในจังหวัดสระบุรี จากการศึกษาพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสารละลายซึ่งมีค่าตั้งแต่ 5.0-9.0 ไม่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟทั้งสามชนิด และค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมจะลดลงจากร้อยละ 58.91-97.05 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมตั้งแต่ 50-200 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าร้อยละในการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 96.66-99.10 93.52-97.83 และ 94.32-98.18 สำหรับสีย้อม Remazol Black B, Remazol Brilliant Blue และ Remazol Brilliant Red F3B ตามลำดับ เมื่อปริมาณสารดูดซับเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 20.00-120.00 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบว่าสภาวะที่ให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมสูงที่สุด คือ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายประมาณ 5.0 และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 240, 300 และ 240 นาที สำหรับสีย้อม (1) Remazol Black B (2) Remazol Brilliant Blue และ (3) Remazol Brilliant Red F3B ตามลำดับ โดยพบว่าค่าร้อยละในการกำจัดมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 58.48-98.03, 46.15-93.47 และ 46.03-94.60 สำหรับสีย้อม (1) Remazol Black B (2) Remazol Brilliant Blue และ (3) Remazol Brilliant Red F3B ตามลำดับ

**Gulnaz et al. (2006)** ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของ Dried Activated Sludge โดยสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Reactive Black 5 พบว่าระยะเวลาสัมผัสมีผลต่อการดูดซับสีย้อม Reactive Black 5 ของ Dried Activated Sludge ซึ่งการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วงแรก โดยในช่วง 15 นาทีแรกสามารถกำจัดสีย้อม Reactive Black 5 ได้ร้อยละ 50 และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อม Reactive Black 5 มีค่าเท่ากับ 2.0, 4.0 และ 6.0 ค่าความจุในการดูดซับสีย้อม Reactive Black 5 จะมีค่าเท่ากับ 74.00, 52.00 และ 14.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิของสารละลายสีย้อม Reactive Black 5 มีค่าเท่ากับ 20, 35 และ 50 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Reactive Black จะมีค่าเท่ากับ 74.00, 62.00 และ 47.00

มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม Reactive Black 5 มีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 5.00, 100.00 และ 200.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ความจุการดูดซับสีย้อม Reactive Black 5 จะมีค่าเท่ากับ 34.00, 74.00 และ 104.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

Rao, B.V.V., and Rao, M. S (2006) ได้ใช้เกลือลอยในการดูดซับสีย้อมเมทิลลีนบลูและคองโกเรดเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับแวนโน้มจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 15-60 นาที

Leechart *et al.* (2009) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยแคลบซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Reactive Red 141 จากการศึกษพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 0-24 ชั่วโมง

**พลวัฒน์ และคณะ (2559)** งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับเพื่อกำจัดโลหะหนักนิกเกิล ( $Ni^{2+}$ ) โดยใช้ซีลี้อย (SD) และซีลี้อยปรับสภาพ (MSD) ด้วยกระบวนการ Alkali-Acid Modification โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายกรดซัลฟิวริกโดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ค่า pH ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของนิกเกิลเริ่มต้น และอุณหภูมิการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับพบว่าสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second-order ซึ่งอธิบายกลไกของการดูดซับการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับพบว่า สอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวและมีตำแหน่งการดูดซับที่แน่นอน และค่าความสามารถในการดูดซับนิกเกิลของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 7.84 และ 9.79 มิลลิกรัมต่อกรัมการศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับโดยใช้สมการของ Van't Hoff ซึ่งค่าคงที่  $K_c$  สามารถคำนวณได้จากสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์, ฟรุนดิช และไอโซเทอร์มของการดูดซับ ตามลำดับโดย  $\Delta H^0$  ของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพมีค่าเท่ากับ -24.80 และ -26.99 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ ส่วน  $\Delta G^0$  ของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพมีค่าเป็นลบ ซึ่งบ่งบอกถึงกระบวนการดูดซับนิกเกิลโดยใช้ซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพเป็นคายความร้อนและเกิดขึ้นได้เองและ  $\Delta S^0$  ของซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพมีค่าเท่ากับ -13.38 และ -24.90 จูลต่อโมล.เคลวิน ตามลำดับ

Reza Ansari *et al.* (2012) ในการศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับสีย้อมคองโกเรดโดยซีลี้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) การทดลองการดูดซับดำเนินการโดยใช้วิธีการทดลองแบบแบตช์และใช้คอลัมน์ภายใต้สภาวะการทำงานต่างๆ ผลพารามิเตอร์บางอย่างที่มีความสำคัญ เช่น พีเอชของสารละลาย, ปริมาณของตัวดูดซับ, ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น และเวลาที่ใช้การทดสอบ เป็นต้น ในการทดลองแบบแบตช์สามารถอธิบายโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดิชในการวิเคราะห์ไอโซเทอร์ม ซึ่งพบว่าลักษณะการดูดซับสีย้อมคองโกเรดของซีลี้อยเป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ และลักษณะการดูดซับของซีลี้อยที่ปรับปรุงด้วย CTAB เป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช ซึ่งบ่งบอกถึงความไม่สม่ำเสมอของพื้นที่ผิวดูดซับของซีลี้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงคุณภาพ โดยการดูดซับสูงสุดของซีลีเยอและซีลีเยอปรับปรุงด้วย CTAB คือ 5.2 และ 9.1 mg/g ตามลำดับ ตามรูปแบบของแลงเมียร์ อย่างไรก็ตามความสามารถการดูดซับนั้นแตกต่างกันมาก สำหรับซีลีเยอปรับปรุง CTAB และซีลีเยอในวิธีแบบคอลัมน์ (66.73 มิลลิกรัมต่อกรัม) เพื่อศึกษาหาความเป็นไปได้ของความสามารถดำเนินการฟื้นสภาพคอลัมน์ในการใช้งานบ่อยๆ พบว่าซีลีเยอที่ได้มีการพัฒนา คอลัมน์สามารถสร้างใหม่ได้อย่างง่ายดายและมีประสิทธิภาพสูงโดยใช้เอทานอลในการล้างสารละลาย

Monawar MunjidMustsfa *et al.* (2016) ได้ทำการศึกษาเชื้อราขาวเน่า (*Panustigrinus*) ถูกใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพสำหรับการขจัดสีย้อมรีแอคทีฟพลู 19 กระบวนการของพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันคือความเข้มข้นเริ่มต้น (50-150 มิลลิกรัมต่อลิตร) เวลา (30-90 นาที) และพีเอช (2-6) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สำคัญสำหรับการประเมินผลกระบวนการดูดซับ, ความสมดุลและจลนศาสตร์ เชื้อราขาวเน่าแสดงศักยภาพที่ดีในการย้อมสีอะโซเป็นสายพันธุ์ที่แสดงให้เห็นถึงการลดลงของสีถึง 83.18% พีเอช 2 ที่เวลา 90 นาที และความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ไอโซเทอร์มเป็นไปตามแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซึ่มสีย้อมเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับอันดับสองซึ่งให้เห็นว่าเป็นการดูดซับทางเคมีเป็นอัตราที่เป็นไปแบบจำกัดที่ควบคุมกระบวนการดูดซับทางชีวภาพ

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น Genesys 10s ยี่ห้อ Thermo Scientific
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น 1455VP ยี่ห้อ Leo บริษัท ซายน์ เอ็นจิเนียร์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ประเทศ USA
3. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) รุ่น Genesys 105 ยี่ห้อ Thermo scientific ประเทศ USA
4. เครื่องกรองลดความดัน (Filter pressure) รุ่น Aspirator A-35 ยี่ห้อ EYELA ประเทศ Japan
5. เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter) รุ่น UB-10 ยี่ห้อ Denver
6. ตู้อบสาร (Hot Air Oven) รุ่น UN 55 ยี่ห้อ Memmert
7. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น ML204/01 ยี่ห้อ Mettler Toledo
8. กระดาษกรอง (Filter papers) เบอร์ 42 Whatman
9. ตะแกรงร่อน (Sieved)
10. เครื่องบด 60 mesh
11. กรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
12. ขวดน้ำกลั่น (Wash bottle)
13. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

##### 3.1.2 สารเคมี

1. สีย้อมผ้า Ambifix Blue VR (Reactive blue 19) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Thai Ambica Chemicals Co. Ltd.
2. น้ำกลั่น (Distilled water)
3. ชี้เลื่อยไม้ยางพารา (Rubber Sawdust)
4. Cetyl Trimethyl ammonium chloride (CTAC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

### 3.2.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ

ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของ MRS ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM โดยอ้างอิงวิธีการและเครื่องมือในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

### 3.2.2 ศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมี

ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีของ MRS ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) องค์ประกอบของแร่ธาตุใน MRS และหมู่ฟังก์ชัน โดยอ้างอิงวิธีการและเครื่องมือในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับ

ลักษณะสมบัติ	ปัจจัย	วิธีการวิเคราะห์	อ้างอิง
ทางกายภาพ	ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM	Scanning Electron Microscopy	Faith <i>et al.</i> (2011)
ทางเคมี	ความเป็นกรด-ด่าง	pH Meter	กรมวิชาการเกษตร. (2546)
	องค์ประกอบของแร่ธาตุ	X-Ray Fluorescence Spectrometry	วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. (2543)
	หมู่ฟังก์ชัน	Fourier Transform Infrared Spectrometer	ธีรยุทธ วิไลวัลย์ และวรวรรณ พันธุมนาวิน. (2548)

## 3.3 วิธีการทดลอง

### 3.3.1 การเตรียมขี้เลื่อยปรับสภาพ (Modified Rubber Sawdust : MRS)

1. ชั่ง RS มาจำนวน 35 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายตัวอย่างเข้มข้น 2 โมลาร์ ในอัตราส่วน 7:1 ของ RS (Reza Ansari and Babak Seyghali) ผสมให้เข้ากัน 5 ชั่วโมง
3. นำไปกรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจน pH เป็น 7 จากนั้นทดสอบตะกอน Cl โดยใช้ AgNO<sub>3</sub>
4. นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์เพื่อเก็บไว้ใช้ในการทดลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การเตรียมสารละลายซีรียมรีแอกทีฟฟลู 19

#### 3.3.2.1. การเตรียมสต็อกสารละลายซีรียมรีแอกทีฟฟลู 19

ซีรียมรีแอกทีฟฟลู 19 มา 0.05 กรัม ละลายน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตรจะได้สารละลายน้ำเสียซีรียมสังเคราะห์ซีรียมรีแอกทีฟฟลู 19 ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

#### 3.3.2.2. การสแกนค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายซีรียมรีแอกทีฟฟลู 19

นำสารละลายน้ำเสียซีรียมสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มาสแกนหาความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงสูงสุดโดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (สแกนจาก 200-800 นาโนเมตร)

### 3.3.3 ศึกษาการวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันเฉพาะด้วยวิธี Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR

1. เตรียม MRS ก่อนและหลังการดูดซับประมาณ 0.5 กรัม มาบดผสมกับ KBr
2. แล้วนำไปอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นใส จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันหลักด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR

### 3.3.4 ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสารละลายซีรียมรีแอกทีฟฟลู 19

#### 3.3.4.1 ศึกษาอิทธิพลของขนาดที่มีผลต่อสารละลายซีรียมรีแอกทีฟฟลู 19

1. นำ MRS (จาก 3.3.1) ขนาด 60 เมช มา 0.3 กรัม (F.Ferrero) ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายซีรียมรีแอกทีฟฟลู 19 ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปรับ pH เท่ากับ 3 (Sushmita Banerjee, M.C. Chattopadhyaya) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. นำมาเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที (Nevine Kamal Amin) เป็นเวลา 90 นาที
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองลดความดันจนครบ จากนั้นนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
5. ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนขนาดของ MRS เป็น 35 และ 20 เมช ตามลำดับ

### 3.3.4.2 ศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อสารละลายสี้อมรีแอคทีฟบลู 19

1. นำ MRS ขนาดที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.1) มา 0.3 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายสี้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปรับ pH เท่ากับ 3 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. นำมาเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 90 นาที
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองลดความดันจนครบ จากนั้นนำสารละลายส่วนใส่ไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
5. ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนค่า pH ของสารละลายสี้อมจาก pH 3 เป็น 4, 5, 6, 7 และ 8 ตามลำดับ

### 3.3.4.3 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อสารละลายสี้อมรีแอคทีฟบลู 19

1. นำ MRS ขนาดที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.1) มา 0.3 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายสี้อมรีแอคทีฟบลู 19 (Reactive Blue 19) ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปรับ pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.2) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. นำมาเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 90 นาที
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองลดความดันจนครบ จากนั้นนำสารละลายส่วนใส่ไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
5. ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนปริมาณ MRS จาก 0.3 กรัม ( $w/v = 10 \text{ kg/m}^3$ ) เป็น 0.5 กรัม ( $w/v = 16.67 \text{ kg/m}^3$ ), 0.7 กรัม ( $w/v = 23.33 \text{ kg/m}^3$ ), 0.9 กรัม ( $w/v = 30 \text{ kg/m}^3$ ), 1.5 กรัม ( $w/v = 50 \text{ kg/m}^3$ ) และ 2.1 กรัม ( $w/v = 70 \text{ kg/m}^3$ ) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 3.3.4.4 ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19

1. นำ MRS ขนาดที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.1) ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.3) ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปรับ pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.2) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. นำมาเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยเก็บที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 110, 120 และ 150 นาที
4. นำสารละลายไปกรองลดความดันจนครบ จากนั้นนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

#### 3.3.4.5 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นที่มีผลต่อสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19

1. นำ MRS ขนาดที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.1) ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.3) ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปรับ pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.2) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. นำมาเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยเก็บที่เวลาเหมาะสม (จากการทดลองที่ 3.3.4.4) นำสารละลายที่ได้ไปกรองลดความดันจนครบ จากนั้นนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
4. ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายจาก 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 150, 200 และ 250 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

### 3.3.4.6 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบที่มีผลต่อสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19

1. นำ MRS ขนาดที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.1) ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.3) ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปรับ pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.5.4.2) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. นำมาเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.5.4.4)
4. นำสารละลายไปกรองลดความดันจนครบ จากนั้นนำสารละลายส่วนใส่ไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
5. ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนความเร็วในการเขย่าจาก 150 รอบต่อนาที เป็น 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที

### 3.3.5 การหาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Change, $pH_{pzc}$ )

1. เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 3.0-12.0 ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์
3. นำ MRS ปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. นำมาเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
5. จากนั้นวัดค่า pH ภายหลังจากการเขย่า นำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟระหว่างค่า pH เริ่มต้น (Initial pH) และสุดท้าย (Final pH) ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับหาได้จากวิธีดริฟท์เทส (Drift test)

### 3.3.6 ศึกษาความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ (การคายขับ)

1. นำ MRS ที่ผ่านการดูดซับ (จากการทดลอง 3.3.4) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
3. นำมาเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 90 นาที
4. กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
5. นำสารละลายที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่อยู่ในสารละลาย โดยวัดความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 อีก 2 ซ้ำ พร้อมเตรียมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นชุดควบคุม
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 อีก 3 ซ้ำ แต่เปลี่ยนสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร พร้อมเตรียมน้ำกลั่น เป็นชุดควบคุม
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 อีก 3 ซ้ำ แต่เปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ 50 มิลลิลิตร พร้อมเตรียมน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม

### 3.3.7 การวัดค่า ADMI โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานแพลตตินัม-โคบอลต์
2. นำสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งปรับค่า pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.2) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. นำ MRS ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.3) ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
4. นำมาเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ในเวลาที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.4)
5. นำสารละลายสีย้อมไปกรองลดความดันจนครบ จากนั้นนำสารละลายก่อนการดูดซับและสารละลายสีย้อมหลังการดูดซับที่สภาวะที่เหมาะสม
6. นำสารละลายมาตรฐานแพลตตินัม-โคบอลต์ และสารละลายสีย้อมก่อนการดูดซับและหลังการดูดซับที่สภาวะที่เหมาะสมวัดค่าทรานส์มิตแตนซ์ (%T) ของแต่ละความยาวคลื่นด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer แล้วคำนวณหาค่า ADMI ในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI) จากโปรแกรมการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.8 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับโดยใช้ไอโซเทอร์มของ Langmuir, Freundlich, TemKin และ Dubinin-Radushkevich โดยนำข้อมูลจากการทดลอง 3.3.4.5 มาคำนวณ

3.3.9 ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสี่ข้อมสั้งเคราะห์ที่สภาวะเหมาะสม โดยศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับ 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), Elovich model และ Intraparticle diffusion model

3.3.9.1 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสี่ข้อม

1. นำ MRS ขนาดที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.1) ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.3) ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายสี่ข้อมรีแอคทีฟลู 19 ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปรับ pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.2) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. นำมาเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยเก็บที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 110, 120 และ 150 นาที
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองลดความดันจนครบ จากนั้นนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
5. ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายจาก 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 150, 200 และ 250 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

### 3.3.9.2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม

1. นำ MRS ขนาดที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.1) ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.3) ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่มีความเข้มข้น 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปรับ pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.4.2) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. นำมาเขย่าด้วยเครื่อง water bath shaker ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยเก็บที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 110, 120 และ 150 นาที
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองลดความดันจนครบ จากนั้นนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.3.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
5. ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียสเป็น 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียสตามลำดับ

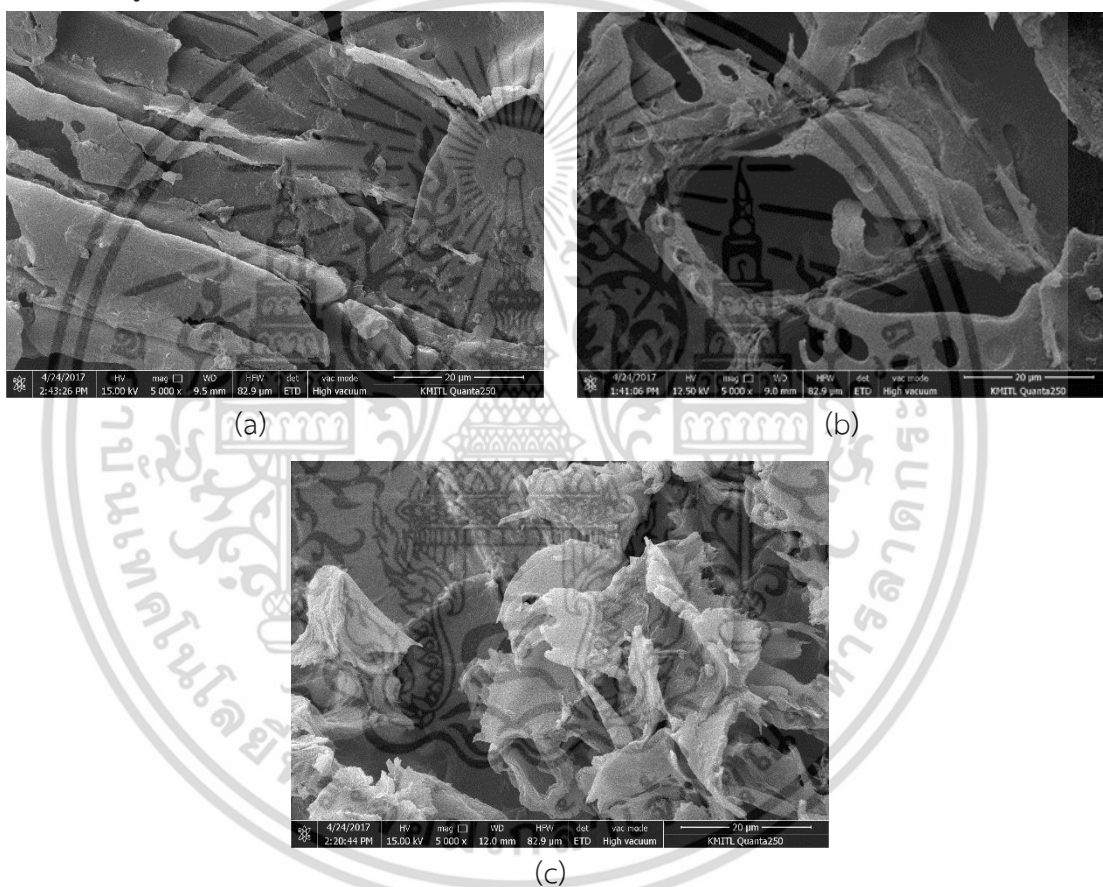
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี

##### 4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อนำ RS ก่อนดูดซับ, MRS ก่อนและหลังดูดซับมาศึกษาลักษณะพื้นผิวโดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ผลแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิว (a) RS ก่อนดูดซับ, (b) MRS ก่อนดูดซับ และ (c) MRS หลังดูดซับ

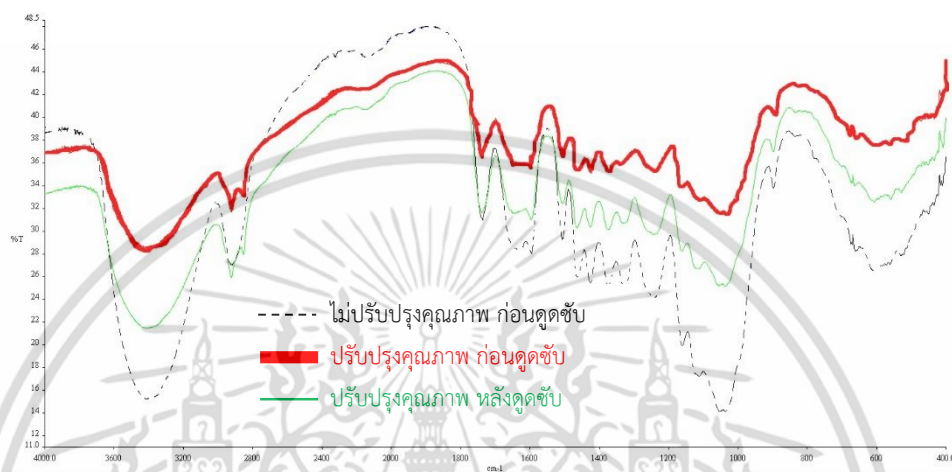
จากรูปที่ 4.1 พบว่า RS ก่อนดูดซับ (a) มีขนาดรูพรุนที่เล็ก และมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบสม่ำเสมอ ส่วน MRS ก่อนดูดซับ (b) พบว่าบริเวณพื้นผิวมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ และมีขนาดรูพรุนที่เพิ่มขึ้น จากการปรับปรุงคุณภาพด้วย CTAC เนื่องจากเฮมิเซลลูโลส และลิกนินสลายออกมา เป็นผลให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณา MRS หลังการดูดซับ (c) พบว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพด้วยแรงไฟฟ้าสถิต (Sumanjit *et al*, 2015) ส่งผลให้พื้นที่ผิวลดลง เนื่องจากโมเลกุลของสีเข้าไปยังรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบ RS และ MRS โดย Fourier Transform

##### Infrared Spectroscopy (FTIR)

จากการนำ RS ก่อนดูดซับ, MRS ก่อนและหลังดูดซับ มาศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบโดย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ซึ่งจะเป็นการแสดงลักษณะแถบหรือพีคของการดูดรังสีอินฟราเรด โดยแสดงถึงปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนด้วยเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์ สามารถพิจารณาได้จากโครมาโตแกรมดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของขี้เลื่อยไม้ยางพารา

#### ตารางที่ 4.1 ความยาวคลื่นที่หมู่ฟังก์ชันต่างๆ

Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )			หมู่ฟังก์ชัน
RS	MRS ก่อนดูดซับ	MRS หลังดูดซับ	
3415.75	3420.14	3415.03	-OH
2919.17	2923.43	2922.32	C-H
	2847.19	2851.06	C-H
1738.87	1736.45	1737.63	C=O
1598.06	1595.53	1595.20	N-H
1508.88	1507.24	1505.78	Aromatic ring
1425.88	1426.08	1425.08	C-O cellulose
1458.93	1462.80	1463.51	C-H
1331.40	1325.60	1325.60	C=C
1373.76	1373.12	1373.12	-OH phenol
1035.51	1035.08	1035.08	C-NH <sub>2</sub>
		1204.66	SO <sub>2</sub>
896.61	898.55	898.55	C-H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าบริเวณ  $3400\text{ cm}^{-1}$  มีลักษณะแถบกว้าง (Broad band) ของหมู่  $\text{-OH}$  โดย RS มี %T เริ่มต้นอยู่ที่ 39 พบหมู่  $\text{C-H}$  ( $2919.17$  และ  $2919.95\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ), หมู่  $\text{C=O}$  ( $1736.45$  และ  $1738.87\text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ), นอกจากนี้พบหมู่ฟังก์ชันของ Aromatic ring ( $1508.88$  และ  $1506.97\text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ),  $\text{C-O}$  cellulose ( $1425.88$  และ  $1425.73\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ), หมู่  $\text{C-H}$  ( $1458.93$  และ  $1463.62\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ), หมู่  $\text{C=C}$  ( $1331.40$  และ  $1329.22\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ), หมู่  $\text{-OH}$  phenol ( $1373.76$  และ  $1372.49\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ), หมู่  $\text{C-NH}_2$  ( $1035.51$  และ  $1035.51\text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ) และหมู่  $\text{SO}_2$  ( $1204.46\text{ cm}^{-1}$ ) จะพบว่าหลังการดูดซับลักษณะของพีคที่เกิดขึ้นจะยาวกว่าพีคก่อนการดูดซับ และหมู่  $\text{C-H}$  ( $896.61$  และ  $894.68\text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ)

ส่วน MRS ก่อนดูดซับ มี %T เริ่มต้น 37 โดยมีหมู่ฟังก์ชันคล้ายกับ RS แต่ที่หมู่  $\text{C-H}$  พบว่าเกิดพีคขึ้น 2 พีค ( $2923.43$ ,  $2847.19\text{ cm}^{-1}$ ) ซึ่งลักษณะของพีคที่เกิดขึ้นจะยาวในพีคแรก และหดสั้นในพีคที่สอง เมื่อผ่านการดูดซับแล้วพบว่า %T ลดลงอยู่ที่ 33 พบพีคสองพีคที่หมู่  $\text{C-H}$  ( $2922.32$ ,  $2851.06\text{ cm}^{-1}$ ) ซึ่งลักษณะของพีคที่เกิดขึ้นจะยาวในพีคแรกและหดสั้นในพีคที่สอง นอกจากนี้ยังพบสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันอีเธอร์แอคทีฟที่พบ 19 ที่จับกับตัวดูดซับคือหมู่  $\text{N-H}$  ( $1595.20$  และ  $1595.20\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ), หมู่  $\text{C-NH}_2$  ( $1035.51$  และ  $1035.51\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ) จะพบว่าหลังการดูดซับลักษณะของพีคที่เกิดขึ้นจะยาวกว่าพีคก่อนการดูดซับ และพบหมู่  $\text{SO}_2$  ( $1204.66\text{ cm}^{-1}$ ) เพิ่มขึ้นหลังการดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A.A. El-Bindary *et al.*, (2016) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่พบ 19 ด้วยเถ้าลอยจากฟางข้าว

#### 4.1.3 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดย X-ray Fluorescent (XRF)

จากการนำ MRS มาศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ X-ray Fluorescent (XRF) ผลที่ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมี

สารประกอบ	RS	MRS
	ปริมาณ (%)	ปริมาณ (%)
O	32.60	30.70
Ca	30.30	40.70
Mg	8.72	-
K	7.06	-
Fe	4.89	9.42
Si	4.42	-
S	3.30	4.94

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.2 พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของ RS และ MRS คือ ออกซิเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเซลลูโลส ตามงานวิจัยของคุณฐิตาภรณ์ และคณะ ได้ทำการทดลองหาคุณสมบัติทางเคมีและเชิงกลของไม้ยางพารา พบว่ามีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส ซึ่งเป็นไปตามการวิเคราะห์ผล สำหรับ MRS พบว่า แมกนีเซียม, โพแทสเซียม และซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบของธาตุอาหารรองและธาตุอาหารเสริมของพืชไม่สามารถตรวจวัดได้ อาจเป็นผลมาจากเมื่อนำไปปรับปรุงคุณภาพมีส่วนทำให้ธาตุเหล่านี้หายไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

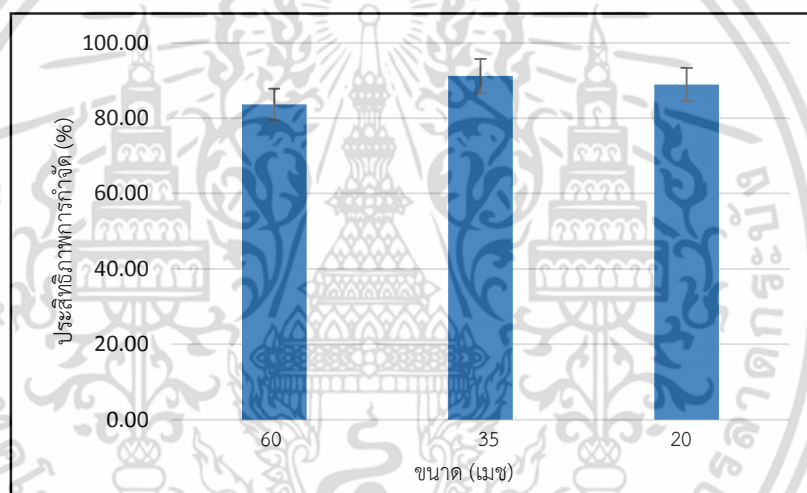
## 4.2 ผลการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19

เมื่อทำการสแกนสารละลายสีย้อมเข้มข้น 0.01 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร พบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 590 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sohair A. *et al*, (2012) ได้ทำการทดลองเรื่องการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยวัสดุทางธรรมชาติ ดังนั้นจึงใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 590 นาโนเมตรในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีตลอดการทดลอง

## 4.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีย้อม

### 4.3.1 ผลการศึกษาขนาดที่เหมาะสม

จากการศึกษาขนาดที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 โดยใช้ MRS ขนาด 60, 35 และ 10 เมช สามารถนำมาเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับขนาดของตัวดูดซับ ได้ดังรูปที่ 4.3

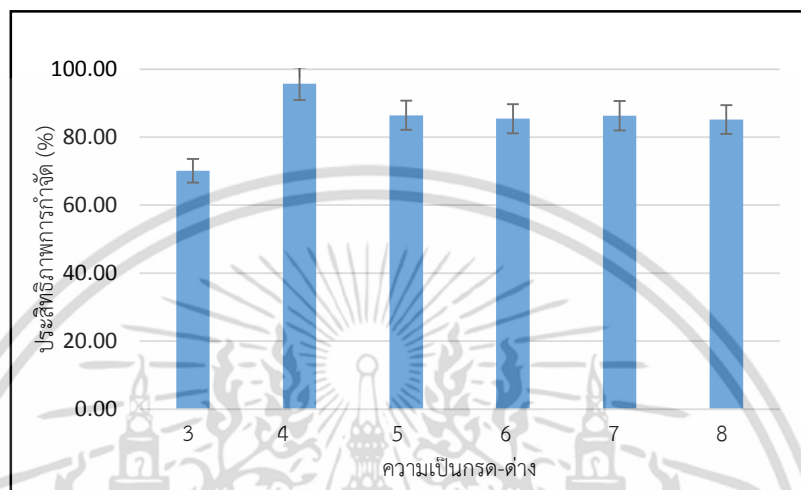


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับขนาดของตัวดูดซับ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของ MRS ขนาด 60, 35 และ 20 เมชเท่ากับ 83.66%, 91.20% และ 88.93% ซึ่งขนาด 35 เมชให้ประสิทธิภาพการกำจัดมากที่สุด เนื่องจากสารที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพมีลักษณะเป็นสารละลายที่มีความหนืดจึงทำให้อนุภาคขนาด 60 เมช มีการรวมตัวกันเป็นก้อนมากกว่าขนาด 35 เมชและ 20 เมช ส่งผลให้พื้นที่ผิวในการดูดซับน้อยลง (แสดงภาคผนวก ฉ)

#### 4.3.2 ผลการศึกษาสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม

จากการศึกษาสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟที่ฟบลู 19 ของ MRS โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำย้อมเริ่มต้นคือ 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 สามารถนำมาเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียได้ดังรูปที่ 4.4

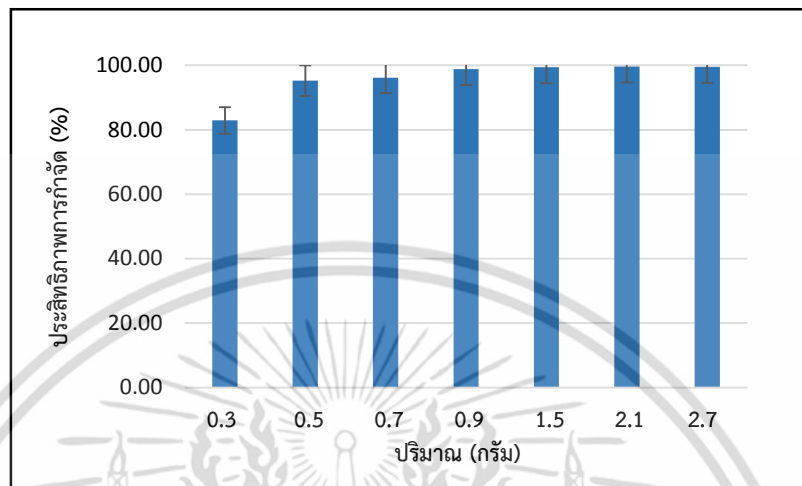


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย

จากรูปที่ 4.4 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของ MRS ที่ pH 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 เท่ากับ 70.11%, 95.71%, 86.45%, 85.42%, 86.34% และ 85.2% ที่ pH 4 ถึง 8 มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (แสดงภาคผนวก ซ) เนื่องจาก RS ถูกเคลือบด้วยตัวปรับปรุงคุณภาพที่มีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทประจุบวก ดังนั้นเมื่อค่า pH เปลี่ยนแปลงจึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด อีกทั้งน้ำเสียสังเคราะห์มีค่า pH เริ่มต้นที่ pH 6 ดังนั้นจึงถือได้ว่าที่ pH 6 เป็นค่าที่เหมาะสมในการทดลอง ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Reza Ansari *et al.* (2012) ซึ่งทำการทดลองดูดซับสีประจุลบโดยใช้ซีลี้อยู่ปรับปรุงคุณภาพด้วย CTAB ผลการทดลอง pH ที่ดีที่สุดเท่ากับ 6

#### 4.3.3 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสม

จากการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 โดยใช้ MRS ปริมาณ 0.3, 0.9, 1.5, 2.1 และ 2.7 กรัม สามารถนำมาเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับปริมาณตัวดูดซับได้ดังรูปที่ 4.5

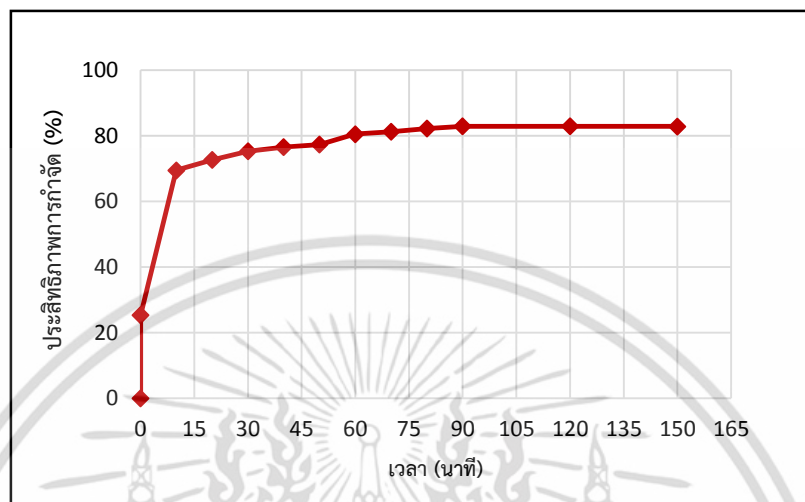


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับปริมาณตัวดูดซับ

จากรูปที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของ MRS ปริมาณ 0.3, 0.9, 1.5, 2.1 และ 2.7 กรัม เท่ากับ 82.89%, 98.85%, 99.39%, 99.61% และ 99.58% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดพบว่าที่ปริมาณ 0.9 ถึง 2.7 กรัมมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด เนื่องจากปริมาณของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมและการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับสารละลายมีค่าเพิ่มมากขึ้น (C. Namasivayam and D. Kavitha, 2002) ดังนั้นจึงทำการศึกษาปริมาณในช่วง 0.5 และ 0.7 กรัม ซึ่งสามารถนำมาเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับปริมาณตัวดูดซับได้ดังรูปที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดที่ปริมาณ 0.5 และ 0.7 ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (แสดงภาพผนวก ข) ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมในการทดลองเท่ากับ 0.5 กรัม

#### 4.3.4 ผลการศึกษาเวลาที่สมดุล

จากการศึกษาเวลาที่สมดุลในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 โดยใช้ MRS ซึ่งทำการเก็บ ณ เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 120 และ 150 นาที สามารถนำมาเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ได้ดังรูปที่ 4.6

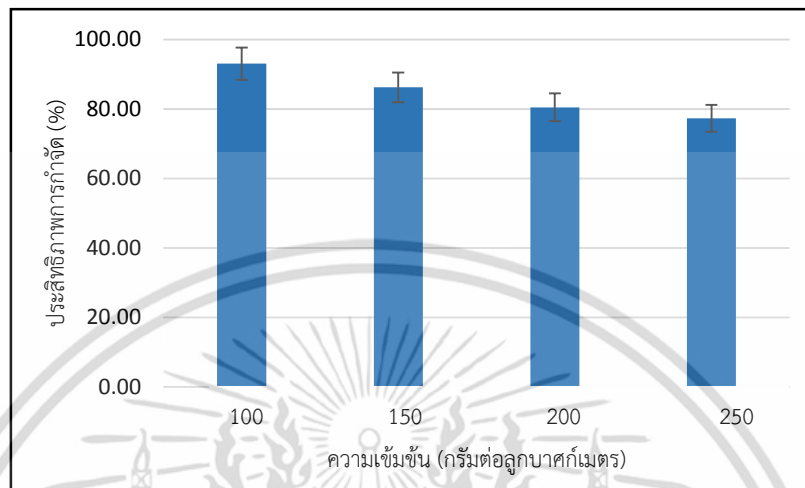


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

จากรูปที่ 4.6 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของ MRS ณ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ณ เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 90, 120 และ 150 นาที เท่ากับ 25.37%, 69.49%, 72.66%, 75.29%, 76.54%, 77.35%, 80.51%, 81.24%, 82.20%, 82.90%, 82.92% และ 82.86% ตามลำดับ เมื่อพิจารณารูปพบว่า การดูดซับเข้าสู่สมดุล ณ เวลา 60 นาที ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A.A.El-Bindary *et al.*(2016) ได้ทำการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ด้วยเถ้าลอยจากเปลือกข้าว ผลการทดลองเวลาเข้าสู่สมดุลที่ 60 นาที

#### 4.3.5 ผลการศึกษาความเข้มข้นสีย้อม

จากการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 โดย MRS ซึ่งเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100 ,150, 200 และ 250 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับความเข้มข้นสีย้อม ได้ดังรูปที่ 4.7

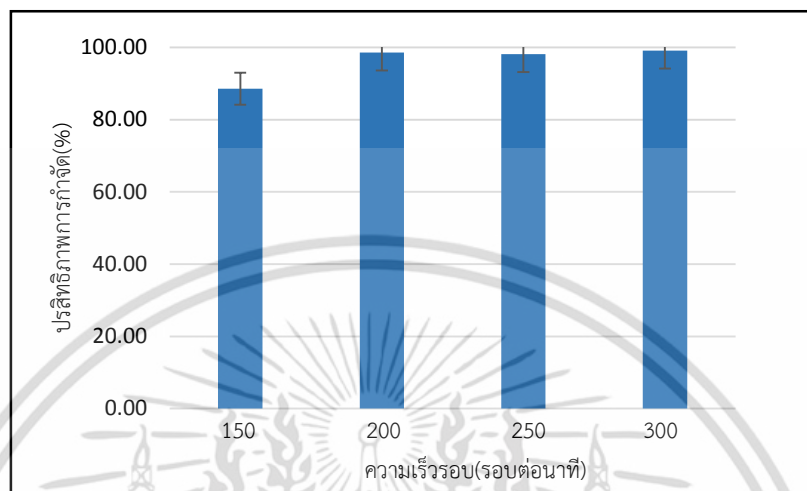


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับความเข้มข้นสีย้อม

จากรูปที่ 4.7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของ MRS ที่ความเข้มข้น 100, 150, 200 และ 250 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร เท่ากับ 93.10%, 86.24%, 80.20% และ 77.32% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของตัวดูดซับความเข้มข้นต่างกัน พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น แต่ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับบริเวณผิวของตัวดูดซับให้สูงขึ้นเกิดแรงขับเคลื่อน (Driving Force) ที่เพิ่มสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับสีย้อมของ MSR จึงสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง (รวินทร์ และคณะ, 2554)

#### 4.3.6 ผลการศึกษาความเร็วรอบในการเขย่า

จากการศึกษาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟพลู 19 โดย MRS ทำการศึกษาที่ความเร็วรอบ 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับความเร็วยรอบในการเขย่า ได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับความเร็วยรอบในการเขย่า

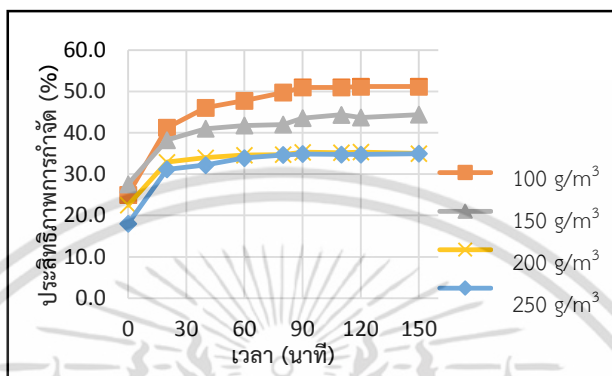
จากรูปที่ 4.8 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของ MRS ที่ความเร็วรอบ 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาทีเท่ากับ 88.55%, 98.19%, 98.27% และ 99.80% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดพบว่าที่ความเร็วรอบ 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 (แสดงภาคผนวก ข) จึงเลือกความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีเป็นความเร็วรอบที่เหมาะสม

จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟพลู 19 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณ 30 มิลลิลิตร โดยใช้ MRS คือ ขนาด 35 เมช pH 6 ปริมาณ 0.5 กรัม ระยะเวลาการดูดซับ 60 นาที และความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 97.24 เปอร์เซ็นต์

#### 4.5 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19

##### 4.5.1 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับที่ความเข้มข้นต่างกัน ณ เวลาต่างกัน

จากการศึกษาความเข้มข้นที่สมดุลในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ของ MRS ทำการศึกษาที่ความเข้มข้น 100, 150, 200 และ 250 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ได้ดังรูปที่ 4.9

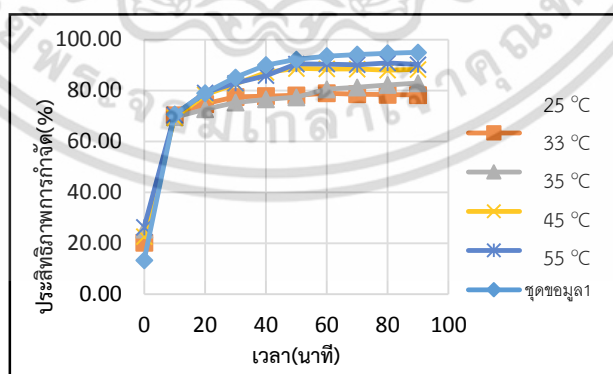


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดของความเข้มข้นกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดลดลง และเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสมดุลของการดูดซับพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจะคงที่ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาจลนศาสตร์ของการดูดซับ

##### 4.5.2 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับที่อุณหภูมิต่างกัน ณ เวลาต่างกัน

จากการศึกษาอุณหภูมิที่สมดุลในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ของ MRS ทำการศึกษาที่ 25, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ได้ดังรูปที่ 4.10

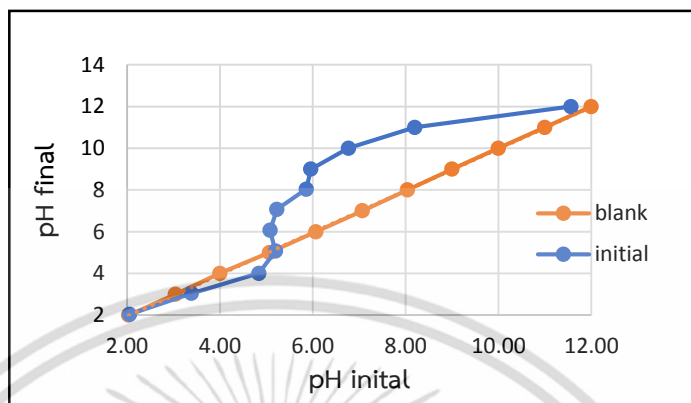


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดของอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

จากรูปที่ 4.10 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสมดุลของการดูดซับประสิทธิภาพการกำจัดจะคงที่ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาจลนศาสตร์ พลังงานกระตุ้น และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 ผลการศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์

จากการศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของ MRS ปริมาณ 0.5 กรัม สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างก่อน และหลังดูดซับ ได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นและสุดท้าย

จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อพิจารณาค่าประจุที่ผิวของ MRS มีค่าเท่ากับ 5.15 ดังนั้นสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าน้อยกว่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ประจุที่ผิวของตัวดูดซับจะมีค่าเป็นบวก ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่ามากกว่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ แสดงว่าประจุที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นลบ เป็นไปตามงานวิจัยของ Sushmita Banerjee , M.C. Chattopadhyaya (2013) ซึ่งทำการดูดซับสีประจุลบด้วยซีลี้อยู่ ผลการทดลองค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของซีลี้อยู่เท่ากับ 6.32

#### 4.7 ผลการศึกษาความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ (การคายซับ)

จากการศึกษาความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เข้มข้น 0.1 โมลาร์, โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ และน้ำกลั่น ได้ผลการทดลองจากการนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง 590 นาโนเมตร ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการคายซับ

สารละลาย	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นสุดท้าย	%การคายซับ
กรดไนตริก	89.82	18.656	20.77
โซเดียมไฮดรอกไซด์	89.82	3.333	3.71
น้ำกลั่น	89.82	0.000	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.3 พบว่ากรดไนตริกให้ประสิทธิภาพการคายซัลไฟที่ดีที่สุดคือ 20.77 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าประสิทธิภาพการคายซัลไฟน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์จึงไม่เหมาะสมในการนำกลับมาใช้ใหม่

#### 4.8 การวัดค่า ADMI โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟลู 19

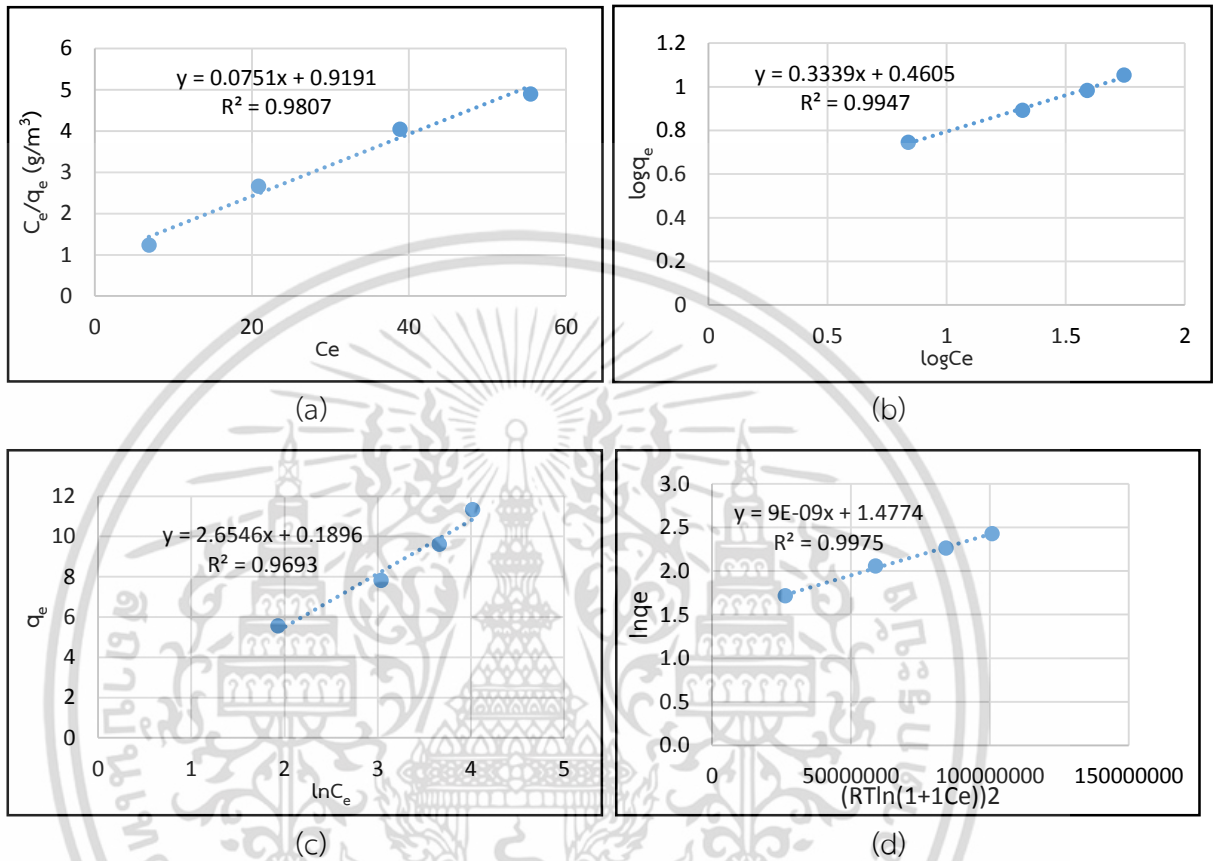
ตารางที่ 4.4 ค่า ADMI ของสี้อมก่อน และหลังการดูดซับด้วย MRS ที่สภาวะสมดุล

	Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI
ก่อนดูดซับ	96.1184	97.96	117.5020	9.83	9.82	9.88	0.0318	4,587
หลังดูดซับ	88.7835	91.57	111.3115	9.52	9.57	9.67	0.0993	143

จากตารางที่ 4.4 พบว่าความเข้มข้นของสี้อม 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ pH 6 มีค่าหน่วยสี้อมอยู่ที่ 4,587 ADMI และจากการทดลองการดูดซับสี้อมด้วย MRS ที่สภาวะสมดุลแล้ว มีปริมาณอยู่ในช่วง 143 ADMI คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดสี้อม 96.88 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า ADMI มีค่าใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่วัดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร และเป็นไปตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ควบคุมมาตรฐานค่าสี้อมในน้ำทิ้งให้จำกัดอยู่ที่ 300 ADMI (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2559)

#### 4.9 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19

จากการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดกับความเข้มข้นของสีย้อม สามารถนำผลการทดลองมาศึกษาไอโซเทอร์ม 4 ไอโซเทอร์มคือ Langmuir isotherm, Freundlich isotherm, Temkin isotherm และ Dubinin-Radushkevich isotherm



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับ

- (a) ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir
- (b) ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich
- (c) ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Temkin
- (d) ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับ Langmuir isotherm, Freundlich isotherm, Temkin isotherm และ Dubinin-Radushkevich isotherm ที่ได้จากรูปที่ 4.12 สามารถนำไปแทนค่าในสมการได้ดังนี้

#### ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir

$$C_e/q_e = (1/K_L q_m) + C_e/q_m$$

โดยความชันมีค่าเท่ากับ  $1/q_m$  จุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ  $1/K_L q_m$  และ  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $1/(1+K_L C_0)$

#### ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich

$$\log q_e = \log K_F + 1/n \log C_e$$

โดยความชันมีค่าเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ  $\log K_F$

#### ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Temkin

$$q_e = \frac{RT}{b_0} \ln A + \frac{RT}{b_0} \ln C_e$$

โดยความชันมีค่าเท่ากับ  $\frac{RT}{b_0}$  และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ  $\frac{RT}{b_0} \ln A$

#### ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich

$$\ln q_e = \ln q_D - K_{DR} [RT \ln (1+C_e)]^2$$

โดยความชันมีค่าเท่ากับ  $K_{DR}$  และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ  $\ln q_D$

จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับ Langmuir, Freundlich, Temkin และ Dubinin-Radushkevich สามารถหาค่าคงที่ต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin และ Dubinin-Radushkevich.

Isotherms	MRS
<b>Langmuir isotherm</b>	
$q_{\max}$ (mg/g)	13.3156
$K_L$ (L/mg)	0.0817
$R_L$	0.1092
$R^2$	0.9807
<b>Freundlich isotherm</b>	
$K_F$ (L/g)	2.8873
$1/n$	0.3339
$R^2$	0.9947
<b>Temkin isotherm</b>	
$b_0$ (kJ/mol)	0.9584
$A$ (L/g)	1.2188
$R^2$	0.9693
<b>Dubinin-Radushkevich isotherm</b>	
$K_{Dr}$	$9 \times 10^{-9}$
$q_D$ (mg/g)	4.3815
$E$ (kJ/mol)	$3 \times 10^{-5}$
$R^2$	0.9975

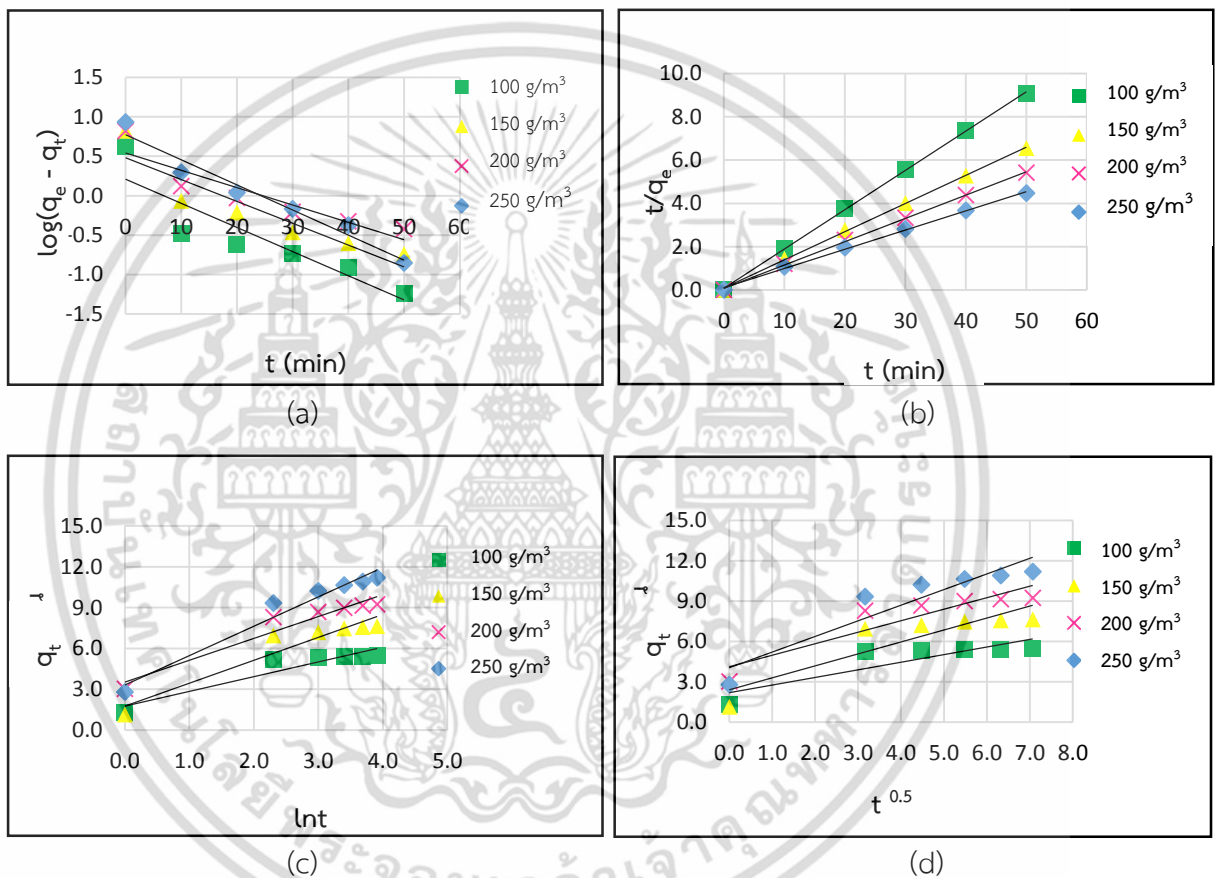
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ด้วย MRS มีลักษณะพื้นผิวขรุขระ และไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ใช้ทั้งการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ผลการทดลองสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของ Dubinin-Radushkevich เนื่องจากไอโซเทอร์มนี้ได้เสนอการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นได้ทั้งการดูดซับทางเคมีหรือทางกายภาพ ที่เกิดบนผิวของตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) และค่าพลังงานดูดซับอิสระ ( $E$ ) สามารถบ่งบอกกลไกของการดูดซับได้ ถ้าหากค่า  $E = 8-16$  kJ/mol เป็นกระบวนการดูดซับโดยการแลกเปลี่ยนไอออนทางเคมี ถ้าค่า  $E < 8$  kJ/mol จะเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่า  $E > 16$  kJ/mol จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี ดังนั้นในการทดลองนี้ การดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ด้วย MRS เป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ จากงานวิจัยของ Reza Ansari and Babak Seyghali ได้ทำการดูดซับสีแอสิตกรีน 25 โดยใช้ซีลี้อยและซีลี้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย CTAB จากผลการทดลองไอโซเทอร์มที่ทำการดูดซับด้วยซีลี้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย CTAB เป็นไปตามไอโซเทอร์มของ Freundlich ค่า  $K_F$  เท่ากับ 2.33 L/g และค่า  $1/n$  เท่ากับ 0.48 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

#### 4.10 จลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19

จลนศาสตร์ของการดูดซับสารละลายสีย้อมด้วย MRS ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิในการดูดซับที่แตกต่างกัน โดยใช้แบบจำลองในการพิจารณา 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion)

##### 4.10.1 จลนศาสตร์ของการดูดซับ ณ ความเข้มข้น และเวลาที่ต่างกัน

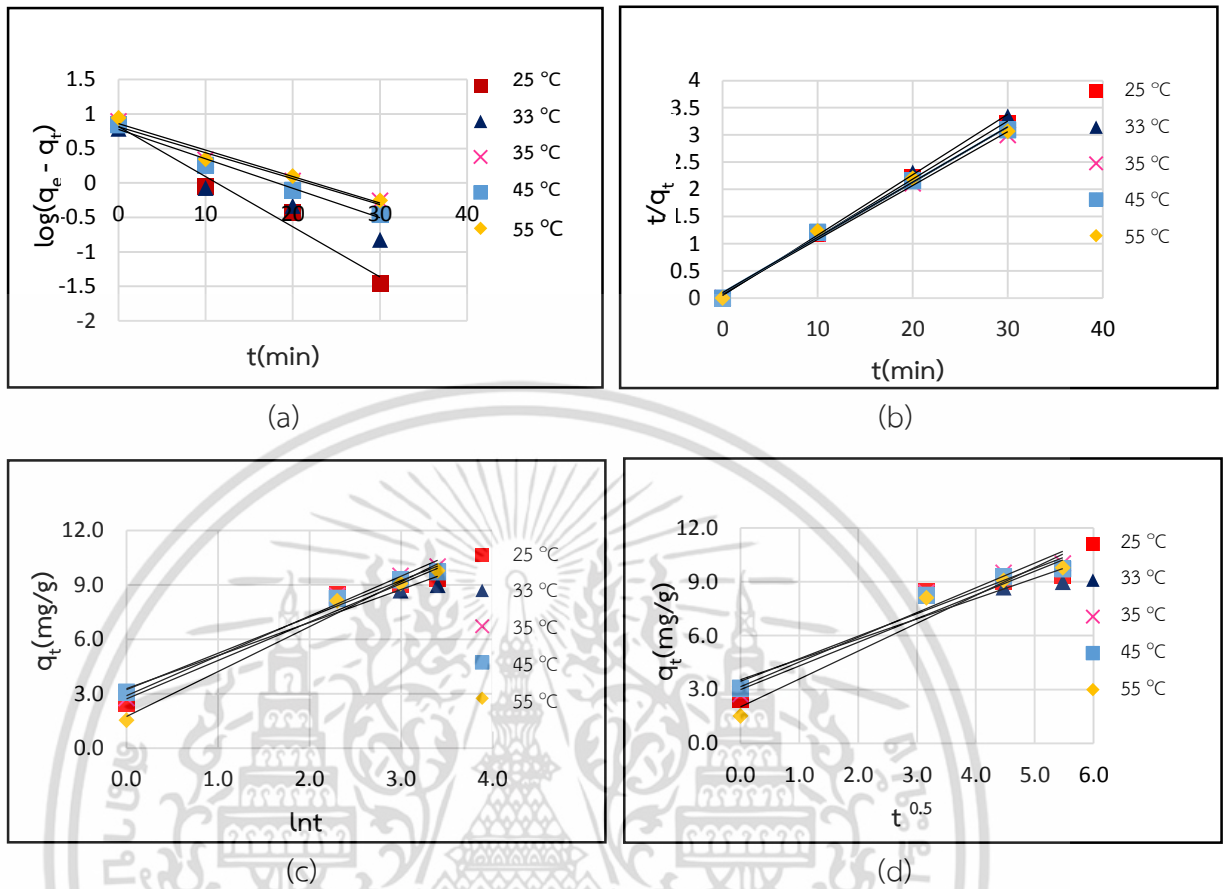


รูปที่ 4.13 จลนศาสตร์การดูดซับที่ความเข้มข้นต่างกัน

- (a) แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Model)
- (b) แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo Second Order Model)
- (c) สมการของ Elovich
- (d) การแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.10.2 จลนศาสตร์การดูดซับ ณ อุณหภูมิ และเวลาที่ต่างกัน



รูปที่ 4.14 จลนศาสตร์การดูดซับที่อุณหภูมิต่างกัน

- (a) แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Model)
- (b) แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo Second Order Model)
- (c) สมการของ Elovich
- (d) การแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในตัวดูดซับ (Intra-particle diffusion) ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม และอุณหภูมิในการดูดซับที่แตกต่างกันในรูปที่ 4.13 และ 4.14 สามารถนำไปแทนค่าในสมการได้ดังนี้

#### แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Model)

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - (k_1 / 2.303)t$$

โดย  $K_1$  = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/min) ที่ความเข้มข้นมีค่าเท่ากับ  $k_1$  และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ  $\log q_e$

#### แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo Second Order Model)

$$t/q_t = [1/k_2 q_e^2] + [1/q_e]t$$

โดย  $K_2$  = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (g/(mg.min)) ที่ความเข้มข้นมีค่าเท่ากับ  $[1/q_e]$  และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ  $[1/k_2 q_e^2]$

#### สมการของ Elovich อธิบายการดูดซับทางเคมี

$$q_t = 1/\beta \ln (\alpha\beta) + 1/\beta \ln t$$

โดย  $\alpha$  = อัตราเร็วในการดูดซับ (mg/g min)

$\beta$  = สัมประสิทธิ์ของการคายซับ (g/mg) ที่ความเข้มข้นมีค่าเท่ากับ  $1/\beta$  และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ  $1/\beta \ln (\alpha\beta)$

#### การแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion)

$$q_t = k_{id}(t)^{1/2} + C$$

โดย  $k_{id}$  = ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (mg/g min) ที่ความเข้มข้นมีค่าเท่ากับ  $k_{id}$  และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ C

จากสมการแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) สามารถหาค่าคงที่ต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.6

**ตารางที่ 4.6** ค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Model) แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo Second Order Model) สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion)

	Concentration (g/m <sup>3</sup> )				Temperature (C°)				
	100	150	200	250	25	33	35	45	55
<b>First order kinetics</b>									
$K_1$ (1/min)	0.0306	0.0277	0.0220	0.0318	0.6590	0.0510	0.0376	0.0427	0.0384
$q_e$ cal (mg/g)	1.6229	3.0220	3.4986	5.9511	5.7214	4.4895	6.5193	5.9607	7.2678
$R^2$	0.8096	0.8419	0.8413	0.9589	0.9565	0.9498	0.9712	0.9832	0.9670
<b>Second order kinetic</b>									
$K_2$ (g/mg min)	0.4421	0.1854	0.1341	0.0679	0.2215	0.2731	0.1117	0.1255	0.1034
$q_e$ cal (mg/g)	5.5066	7.6864	9.3023	11.2867	9.3545	9.0009	10.1010	9.7943	9.8328
$R^2$	0.9997	0.9993	0.9992	0.9978	0.9984	0.9988	0.9948	0.9956	0.9932
<b>Elovich model</b>									
$\alpha$ (mg/g min)	1.9983	4.3440	2.5342	4.1464	4.6209	3.1725	4.2788	3.7282	10.2208
$\beta$ (mg/g)	0.9251	0.5953	0.6223	0.4629	0.4723	0.5489	0.4558	0.4993	0.4037
$R^2$	0.8839	0.9091	0.9332	0.9596	0.9642	0.9592	0.9897	0.9894	0.9850
<b>Intra particle diffusion model</b>									
$K_{id}$ (mg/g min)	0.5663	0.8864	0.8548	1.1606	1.3153	1.1304	1.3754	1.2555	1.5506
$R^2$	0.7620	0.7951	0.8294	0.8701	0.9147	0.9076	0.9565	0.9558	0.9489

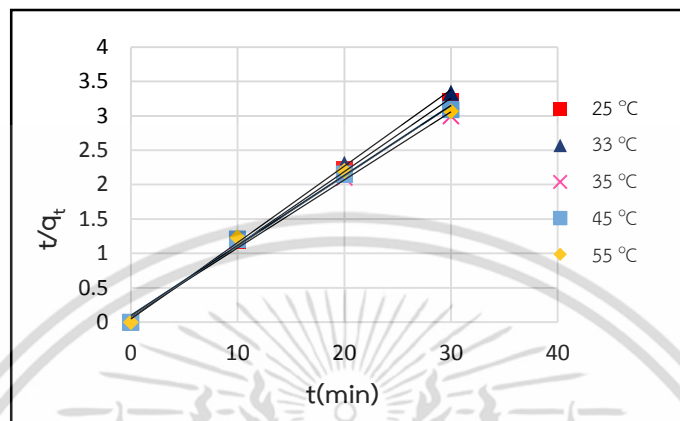
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) และแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order) พบว่าการดูดซับสีย้อมด้วย MRS ที่ค่าความเข้มข้นต่างกันและอุณหภูมิต่างกัน แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order) มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) ดังนั้นแสดงว่าการดูดซับสีย้อมด้วย MRS เป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order)

จากค่าคงที่อัตราเร็วที่ได้จากแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order) การดูดซับสีย้อมด้วย MRS ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ  $16.67 \text{ kg/m}^3$  เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 100, 150, 200 และ  $250 \text{ g/m}^3$  พบว่าค่าคงที่อัตราเร็วลดลง เนื่องจากค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว ( $q_e$ ) เพิ่มขึ้น คือ 5.5066, 7.6864, 9.3023 และ  $11.2867 \text{ mg/g}$  ดังนั้นเมื่อค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัวมีค่าสูงขึ้น จึงต้องใช้เวลาเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวมากขึ้น ทำให้ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับมีค่าลดลง (Ming-Shen Chiou and Guo-Syong Chuang, 2006) สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิจาก 25, 33, 35, 45 และ  $55 \text{ }^\circ\text{C}$  พบว่าค่าคงที่อัตราเร็วเพิ่มขึ้น และอัตราเร็วในการแพร่ของสีย้อมเพิ่มขึ้นเช่นกัน ตามสมการของ Intra-particle diffusion model อธิบายได้ว่าค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุนเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทำให้ของเหลวที่แทรกอยู่ภายในรูพรุนระเหยออก ส่งผลให้โมเลกุลของสีย้อมสามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนมากขึ้น และจากผลการทดลองเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้โมเลกุลของสีย้อมเกิดการดูดซับได้ดีขึ้นเพราะกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการดูดซับแบบดูดความร้อน (endothermic)

#### 4.11 ผลพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19

จากแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order model) ทำให้สามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส ได้ดังรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.16



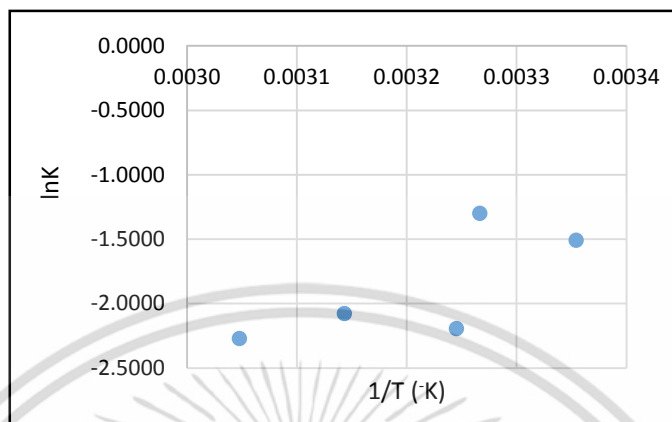
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ(°C)	R <sup>2</sup>	ค่าคงที่อัตราเร็ว (k <sub>2</sub> ) (g/mg min)
25	0.9984	0.2215
33	0.9988	0.2731
33	0.9948	0.1117
45	0.9956	0.1255
55	0.9932	0.1034

จากตารางที่ 4.7 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 25 องศาเซลเซียส เป็น 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับมีค่าลดลงคือ 0.2215, 0.2731, 0.1117, 0.1255 และ 0.1034 g/mg min ตามลำดับ การเพิ่มอุณหภูมิจึงมีผลทำให้อัตราเร็วในการดูดซับลดลงแต่ความสามารถในการดูดซับและประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะดูดความร้อน (Exothermic) การดูดซับนี้จึงเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง

จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) เมื่อทำการพลอตกราฟระหว่าง ล็อกการีทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็ว ( $\ln k$ ) และหนึ่งส่วนอุณหภูมิ ( $1/T$ ) สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ได้ ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียส

จากรูปที่ 4.16 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ด้วย MRS มีค่าเท่ากับ  $-22.51 \text{ KJ/mol}$  เนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) สามารถบ่งบอกกลไกการดูดซับได้ ถ้าหากค่า  $E_a$  อยู่ในช่วง  $5-50 \text{ KJ/mol}$  เป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่า  $E_a$  อยู่ในช่วง  $60-800 \text{ KJ/mol}$  จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี (Fatih Deniz, 2011) ดังนั้นในการทดลองนี้ การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ด้วย MRS เป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A.Safa Ozcan *et al.* ได้ทำการดูดซับสีเอซิคบลู 193 ด้วยเบนโทไนท์และเบนโทไนท์ปรับปรุงคุณภาพด้วย DTMA ซึ่งผลการทดลองค่า  $E_a$  ของเบนโทไนท์ปรับปรุงคุณภาพเท่ากับ  $22.4 \text{ KJ/mol}$  ตามลำดับ

#### 4.12 ผลอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม

การศึกษาการดูดซับสีย้อมเมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม (w/v) เท่ากับ  $16.67 \text{ kg/m}^3$  และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม  $200 \text{ g/m}^3$  ตามลำดับ pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง ค่าอุณหพลศาสตร์ที่ใช้ในศึกษา ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับ ( $\Delta H^0$ ) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^0$ )

##### 4.12.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี ( $\Delta H^0$ ) ของการดูดซับสีย้อม

การคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี สามารถหาค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (K) คำนวณได้จากสมการ

$$K_c = q_e/c_e$$

$$\ln K_c = \Delta S^0/R - \Delta H^0/RT$$

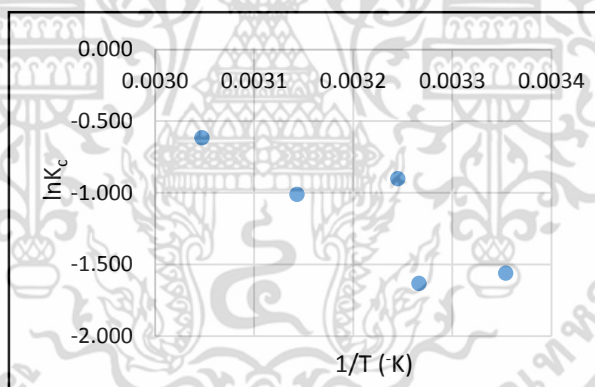
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (K)
25	0.2101
33	0.1954
35	0.4057
45	0.3638
55	0.5409

เมื่อนำผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในช่วง 25 ถึง 55 องศาเซลเซียส ของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 200 g/m<sup>3</sup> มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln K_c$  กับ  $1/T$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชัน เท่ากับ  $-\Delta H^0/R$  และจุดตัดแกนตั้ง เท่ากับ  $\Delta S^0/R$  ได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสมการแวนฮอฟฟ์

สามารถพิจารณาค่าความชันของกราฟได้จากสมการของแวนท์ฮอฟฟ์ จะได้ค่าเอนทัลปีมาตรฐาน ( $\Delta H^0$ ) เท่ากับ 0.37 KJ/mol จะเห็นได้ว่าค่าเอนทัลปีมาตรฐานมีค่าเป็นบวก ( $\Delta H^0 =$  บวก) แสดงว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วย MRS เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน คือ เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นเช่นกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ M Jansi Rani *et al.* ได้ศึกษาเทอร์โมไดนามิกของการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยขี้เลื่อย จากผลการทดลองพบว่าค่า  $\Delta H^0$  เท่ากับ 2.60 KJ/mol ซึ่งให้เห็นว่าผลการดูดซับที่ได้เป็นการดูดความร้อนในธรรมชาติ และดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.12.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) ของการดูดซับสีย้อม

เมื่อเปรียบเทียบจุดตัดแกน y จากสมการของแนวทิสอปฟ์เท่ากับ  $\Delta S^0 / R$  ได้ค่าเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) เท่ากับ  $1.30 \text{ J/mol.K}$  โดยทั่วไปค่าเอนโทรปีของการดูดซับบอถึงความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ จากการคำนวณค่าเอนโทรปีที่ได้มีค่าบวก ( $\Delta S^0 = +$ ) แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมาก มีการเกิดพันธะหรือมีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ A.A. El-Bindary *et al.* ซึ่งทำการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยเถ้าลอยจากฟางข้าว ผลการทดลองพบว่าค่า  $\Delta S^0$  เท่ากับ  $0.039 \text{ J/mol.K}$  แสดงถึงความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมากเช่นกัน

#### 4.12.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^0$ ) ของการดูดซับ

จากค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี ( $\Delta H^0$ ) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) นำมาแทนค่าในสมการ  $\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$

ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน ( $\Delta G^0$ ) ของการดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ -0.0148, -0.0252, -0.0278, -0.0408 และ -0.0539 ตามลำดับ ค่าพลังงานอิสระมาตรฐานที่ได้มีค่าลบ แสดงว่าโดยธรรมชาติแล้ว การดูดซับสีย้อมด้วย MRS สามารถเกิดขึ้นได้เอง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sushmita Banerjee *et al.* ซึ่งทำการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ของการดูดซับสีย้อม โดยใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้ค่า  $\Delta G^0$  เท่ากับ -1.74 แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ว่าที่การดูดซับสามารถเกิดได้เองในธรรมชาติ โดยอุณหภูมิที่ใช้มีความสัมพันธ์กับโมเลกุลของพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์

$\Delta H^0$ (KJ/mol)	$\Delta S^0$ (J/mol.K)	$\Delta G^0$ (KJ/mol)				
		25° C	33° C	35° C	45° C	55° C
0.37	1.30	-0.0148	-0.0252	-0.0278	-0.0408	-0.0539

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วย MRS ที่ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับคือ ขนาด 35 เมช ที่ pH 6 ปริมาณ 0.5 กรัม และที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดเท่ากับ 97.24 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการวัดค่าหน่วยสี ADMI พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสี้อม 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่สภาวะ pH 6 มีค่าหน่วยสีอยู่ที่ 4,587 ADMI จากการทดลองการดูดซับสารละลายสี้อมด้วยตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล มีค่าหน่วยสีอยู่ที่ 143 ADMI ซึ่งเป็นไปตามเปอร์เซ็นต์การกำจัดสี้อม และจากการศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่พบว่า การคายซับด้วยกรดไนตริกให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 20.77 เปอร์เซ็นต์ พบว่าจากประสิทธิภาพการคายซับน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ จึงไม่เหมาะสมในการนำกลับมาใช้ใหม่

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสี้อมรีแอคทีฟบลู 19 พบว่าการดูดซับสี้อมด้วย MRS เป็นไปตามการดูดซับของ Freundlich ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของ Dubinin-Radushkevich เนื่องจากไอโซเทอร์มนี้ได้เสนอการดูดซับที่เกิดบนผิวของตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ดังนั้นลักษณะของการดูดซับเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ

จากแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) พบว่าการดูดซับสี้อมรีแอคทีฟบลู 19 เป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order) แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ

จากการศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสี้อมรีแอคทีฟบลู 19 มีค่าเท่ากับ -22.51 KJ/mol แสดงว่าเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ

จากการศึกษาค่าอุณหพลศาสตร์พบว่า การดูดซับสี้อมรีแอคทีฟบลู 19 มีค่าเอนทัลปีมาตรฐาน ( $\Delta H^\circ$ ) เป็นบวก แสดงว่าเป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน และค่าเอนโทรปี ( $\Delta S^\circ$ ) เป็นบวก แสดงว่าเกิดความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับมาก บ่งบอกถึงมีการเกิดพันธะหรือมีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ส่วนค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน ( $\Delta G^\circ$ ) เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียส เป็น 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียสมีค่าเป็นลบ แสดงว่าโดยธรรมชาติแล้วกระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ด้วยวัสดุทางธรรมชาติชนิดอื่นเพื่อเพิ่มทางเลือกในการนำมาประยุกต์ใช้
2. ศึกษาอัตราส่วนระหว่างปริมาณสารปรับสภาพกับปริมาณตัวดูดซับเพื่อทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสม
3. ศึกษาความเข้มข้นของสารปรับสภาพที่ความเข้มข้นต่างกันเพื่อทราบถึงความเข้มข้นที่เหมาะสมจึงทำให้สามารถควบคุมปริมาณสารปรับสภาพได้
4. ศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิดอื่นๆ โดยใช้ซีลี้อย่างพาราที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย Cetyltrimethyl ammonium chloride



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2559. **ปัญหามลพิษจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ**. [Online]. Available: <http://www.thaitextile.org/index.php/blog/2014/10/uvwxyz> เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 พฤษภาคม 2560.
- กรมวิชาการเกษตร และสหกรณ์. 2546. **คู่มือมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ดินและพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ.
- กรองกาญจน์ ภูระรัตน์. 2530. “การศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดพาราควอทโดยวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีและการดูดซับด้วยถ่าน”. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เกรียงศักดิ์. 2546. **แบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับ**. [Online]. Available: <http://dc.oas.psu.ac.th/dcms/files/04647/Chapter2.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2560.
- จิสสา กรงกรด. 2548. **สารลดแรงตึงผิว**. [Online]. Available: [http://www.dss.go.th/images/starticle/cp\\_7\\_2548\\_surfactant.pdf](http://www.dss.go.th/images/starticle/cp_7_2548_surfactant.pdf). เข้าถึงเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม 2560.
- ชัยยุทธ ช่างสาร และเลิศณรงค์ ศรีพนม. **เคมีประยุกต์**. กรุงเทพฯ : ว. เพ็ชรสกุล. 2543.
- ฐิตาภรณ์ ภูมิไชย กฤษดา สังข์สิงห์ จิรวัดน์ รียาพันธ์ และเฉลิมพล ภูมิไชย. 2558. “คุณสมบัติทางเคมีและเชิงกลของไม้ยางพารา.” **วารสารวิชาการเกษตร ปีที่ 33**.
- ดุขฎี สุริยพรรณพงศ์, สุจิติน ดันวิเชียร, จิตติมา มานะกิจ และดวงรัตน์ ชูวิสิฎกุล, 2557. “การสกัดและประเมินลักษณะของเซลลูโลสจากขานอ้อย ผักตบชวา และธูปฤๅษี.” **คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**.
- ทรงกลด จารุสมบัติ. 2560. **องค์ประกอบของไม้**. [Online]. Available: <http://www.baannat-ura.com/th/mat/content/detail/114.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม 2560.
- เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์. 2544. “การกำจัดน้ำเสียสี้อมรีแอกทีฟในสารละลายสี้อมโดยดูดซับด้วยซิลิกาอลูมินาที่ใช้แล้ว.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธีรยุทธ วิไลวัลย์ และวรวรรณ พันธุ์นาวิณ. 2548. **อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี**. [Online]. Available: [http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course\\_info/2302275/ir-265.pdf](http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302275/ir-265.pdf). เข้าถึงเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม 2560.
- นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์. 2550. “ประสิทธิภาพในการบำบัดสี้อมในน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าด้วยวิธีตัวดูดซับถ่านลอยลิโนต์ผสมดินเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดแบบหมุนำกรองน้ำเสีย.” วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นภดล ไชยคำ และคณะ. 2542. **เคมีเล่ม 1**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พลวัฒน์ พาพรมพิก และปานใจ สื่อประเสริฐสิทธิ์. 2559. “การดูดซับนิกเกิลโดยใช้ขี้เลื่อยและขี้เลื่อยปรับสภาพ.” คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- ยุวรัตน์ ปรมีศนาภรณ์. 2544. “การพัฒนาวัสดุดูดซับจากเปลือกขาเพื่อกำจัดแคดเมียม.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- รวินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิท ปิยะมั่งคณา. 2554. “จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบตัดแปร.” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือปีที่ 21*.
- วรรณวิภา ผลาหาญ. 2547. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก. สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วินัย สมบูรณ์. 2541. “การบำบัดโลหะหนักด้วยโพลีเมอร์ธรรมชาติ.” ในรายงานสัมมนาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, สวลี เสนาพิทักษ์, สรินทร ลิมปนาท, กฤษณา ศิริเลิศมุกด์ และศรีไฉลขุนทด. 2543. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: **ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สกล ศิริวัฒน์. 2546. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเสียดจากสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบด้วยไคโตซาน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สันทัต ศิริอนันท์ และชนิษฐา ชัยรัตนารรรณ. 2542. **เคมีวิทยาศาสตร์**. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- สุนทร พรจำเริญ. 2554. **ค่าคงที่อัตราเร็วกับอุณหภูมิ**. [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/neena988/ate-10248080>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 14 พฤษภาคม 2560.
- อิทธิสุนทร นันทกิจ. 2554. **ส่วนประกอบของขี้เลื่อย**. [Online]. Available: <http://www.kmitl.ac.th/hydro/Substratdoc.htm>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 พฤษภาคม 2560.
- A.A. El-Bindary, M.A. Abd El-Kawi, A.M. Hafez, I.G.A. Rashed and E.E. Aboelnaga. 2016. Removal of reactive blue 19 from aqueous solution using rice straw fly ash. *Environment. Science*. 7(3): 1023-1036.
- A. Safa Ozcan, Bilge Erdem and Adnan Ozcan. 2004. Adsorption of Acid Blue 193 from aqueous solutions onto Na-bentonite and DTMA-bentonite. *Colloid and Interface Science*. 280: 44-54.
- Al-Qodah, Z. (2000). Adsorption of dyes using shale oil ash. *Water Research*. 34(17): 4295-4303.
- Amagan, B., Turan, M., and Celik, M. S. 2004. Equilibrium studies on the adsorption of reactive azo dyes into zeolite. *Desalination*. 170: 33-39.

- Annadurai, G., Chllapandian, M., and Krishnan, M. R. V. 1999. Adsorption of reactive dye on chitin. **Environmental Monitoring and Assessment**. 59(1): 111-119.
- Apache, 2017. **Enthalpy of reaction**. [cited 2017 May 18]. Available: [http://www.chemhume.co.uk/ASCHEM/Unit%203/13%20 Enthalpy/13%20Enthalpy.htm](http://www.chemhume.co.uk/ASCHEM/Unit%203/13%20Enthalpy/13%20Enthalpy.htm).
- APHA, AWWA, and WEF. 2005. **Standard method for the examination of the water and wastewater**. Washington D. C.: American Public Health Association.
- C. Namasivayam and D. Kavitha, 2002. Removal of Congo Red from water by adsorption onto activated carbon prepared from coir pith, an agricultural solid waste. **Dyes and Pigments**. 54: 47-58
- Charler N. and Satterfield. 1991. *Heterrogenous Catalysis in Industrial*, 2<sup>nd</sup> ed. New York : McGraw-Hill.
- Faith, D., Horsfield, C. J., and Nazarov, W. 2006. Characterization of pore size of trimethylolpropane triacrylate (TMPTA) polymer foam by pulsed sputter coating and SEM analysis. **Materials Science**. 41(13): 3973-3977.
- Feng-Chin Wu, Ru-Ling Tseng and Ruey-Shin Juang. 2009. Characteristic of Elovich equation used for the analysis of adsorption kinetics in dye-Chitosan systems. **Chemical Engineering Journal**. 150: 366-373.
- F.Ferrero. 2007. Dye removal by low cost adsorbents: Hazelnut shells in comparison with wood sawdust. **Hazardous Materials**. 142: 144-152.
- Gulnaz, O., Kaya, A., and Dincer, S. 2006. The reuse of dried activated sludge for adsorption of reactive dye. **Hazardous Materials**. 134: 190-196.
- Helena Arkkola, 2016. **Structure and Properties of Hemicellulose**. [cited 2017 May 19]. Available: <https://www.elomatic.com/en/elomatic/expertarticles/towards-a-circular-economy-with-multiple-product-biorefineries.html>.
- Kazi Reja. 2017. **Type of Reactive dye**. [cited 2017 May 18]. Available: [https://www.academia.edu/8824208/Reactive\\_dye](https://www.academia.edu/8824208/Reactive_dye).
- Leechart, P., Nakbanpote, W., and Thiravetyan, P. 2009. Application of 'water' wood-shaving bottom ash for adsorption of azo reactive dye. **Environmental Management**. 90: 912-920.
- M Jansi Rani, M Murugan, P Subramaniam and E Subramanian. 2016. Study of water soluble dyes adsorption from aqueous solution by Prosopis spicigera L. wood (PSLW) carbon. **Chemical Technology**. 23: 22-30.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Ming-Shen Chiou and Guo-Syong Chuang. 2006. Competitive adsorption of dye metanil yellow and RB15 in acid solutions on chemically cross-linked chitosan beads. **Chemosphere**. 62: 731–740.
- Monawar Munjid Mustsfa, Parveen Jamal, Ma'an Fahmi Alkhatib, Safa Senan Mahmud, Dzun Noraini Jimat, Nurul Najhah Ilyas. 2017. *Panus tigrinus* as a potential biomass source for Reactive Blue decolorization: Isotherm and kinetic study. **Electronic Journal of Biotechnonology**. 26: 7-11.
- Nevine Kamal Amin. 2008. Removal of reactive dye from aqueous solutions by adsorption onto activated carbons prepared from sugarcane bagasse pith. **Desalination**. 223: 152-161.
- Rachakornkij, M., Ruangchuay, S., and Teachakulwiroj, S. 2004. Removal of reactive dyes from aqueous solution using bagasse fly ash. **Songlankalin Journal of science and Tecnology**. 26: 13-14.
- Rao, B.V.V., and Rao, M. S. 2006. Adsorption studies on treatment of textile dyeing industrial effluent by fly ash. **Chemical Engineering**. 116: 77-84.
- Reza Ansari, Babak Seyghali, Ali Mohammad-khah M. Ali Zanjanchi. 2012. Highly Efficient Adsorption of Anionic Dyes from Aqueous Solution Using Sawdust Modified by cationic Sufactant of Cetyltrimethylammonium Bromide. **J Surfact Deterg**. 15: 557-565.
- Sohair A. Sayed Ahmed, Laila B. Khalil and Thoria El-Nabarawy. 2012. Removal of Reaction Blue 19 dye from Aqueous Solution Using Natural and Modified Orange Peel. **Carbon Letters**. 13(4): 212-220.
- Sumanjit, Seema, R.K. Mahajan and Vinod Kumar Gpta. 2015. Modification of surface behavior of Eichhornia crassipes using surface active agent: An adsorption study. **Journal of Industrial and Engineering Chemisty**. 21: 189-197.
- Sushmita Banerjee and M.C. Chattopadhyaya. 2013. Adsorption characteristics for the removal of a toxic dye, tartrazine from aqueoue solutions by a low cost aqricultural by-product. **Arabian Journal of Chemistry**.
- University of machigan, 2013. **Hemicellulose**. [cited 2017 May 18]. Available: <http://www.engin.umich.edu/college/research>.
- Weber W.J. Jr. 1972. *Physicochemical Process for Water Quality Control*. USA : Wiley Interscience.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การหาความเข้มข้นของสารละลายสี้อมรีแอคทีฟบลู 19

#### ก.1 วิธีสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

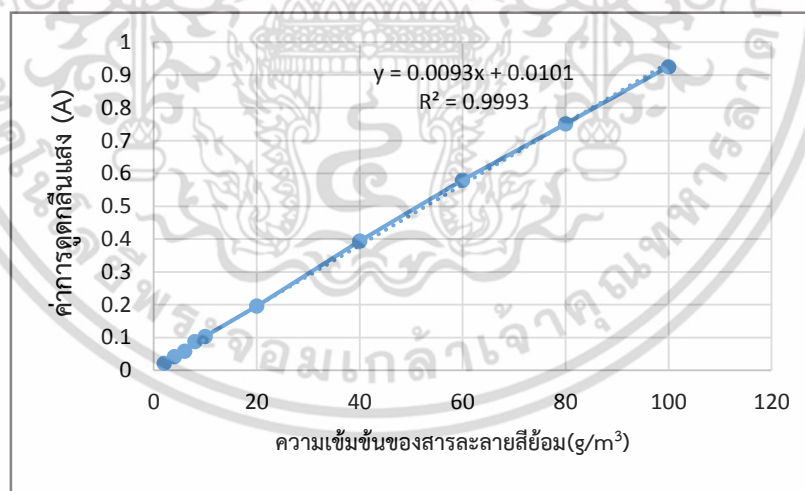
- นำสารละลายสี้อมที่ความเข้มข้นเจือจางมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นนำสเปกตรัมที่ได้มาหาค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด
- เตรียมสารละลายสี้อมที่ความเข้มข้นต่าง คือ 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100g/m<sup>3</sup>
- นำสารละลายสี้อมที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่  $\lambda_{\max}$
- นำข้อมูลที่ได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายสี้อมก็จะได้กราฟมาตรฐาน

#### ก.2 วิธีการหาความเข้มข้นของสารละลายสี้อม

- นำสารละลายสี้อมที่ต้องการหาความเข้มข้น มาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่  $\lambda_{\max}$  ของแต่ละความเข้มข้นโดยวิธีการเทียบมาตรฐาน

#### ก.3 กราฟมาตรฐาน

ความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ( $\lambda_{\max}$ ) คือ 590 นาโนเมตร



รูปที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสี้อมรีแอคทีฟบลู 19

ตารางที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟลู 19

ความเข้มข้น	ค่าการดูดกลืนแสง
2	0.022
4	0.042
6	0.059
8	0.088
10	0.104
20	0.196
40	0.394
60	0.58
80	0.751
100	0.925

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสารละลาย

### สีย้อมรีแอคทีฟบลู 19

ข.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสารละลายน้ำเสียสีย้อม

ตารางที่ ข.1 ผลของขนาดที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 100

กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุม pH 3 ที่อุณหภูมิห้อง

ขนาด (เมซ)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ การกำจัด
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (g/m <sup>3</sup> )			
60	1	0.129	12.78	13.68	8.76	83.66
	2	0.15	15.04			
	3	0.133	13.22			
35	1	0.327	7.19	7.37	5.52	91.20
	2	0.334	7.09			
	3	0.334	7.84			
20	1	0.408	9.45	9.27	2.41	88.93
	2	0.382	9.34			
	3	0.414	9.02			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาค่า pH ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาด 35 เมช ที่อุณหภูมิห้อง

pH	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (g/m <sup>3</sup> )			
3	1	0.082	7.73	26.55	61.39	70.11
	2	0.342	35.69			
	3	0.347	36.23			
4	1	0.054	4.72	4.22	14.49	95.71
	2	0.051	4.40			
	3	0.043	3.54			
5	1	0.119	11.71	13.47	12.43	86.45
	2	0.15	15.04			
	3	0.137	13.65			
6	1	0.135	13.43	14.47	8.35	85.42
	2	0.142	14.18			
	3	0.157	15.80			
7	1	0.133	13.22	12.68	5.94	86.34
	2	0.131	13.00			
	3	0.12	11.82			
8	1	0.144	14.40	14.40	8.96	85.20
	2	0.156	15.69			
	3	0.132	13.11			
9	1	0.125	12.35	12.43	4.36	86.88
	2	0.121	11.92			
	3	0.131	13.00			
10	1	0.075	6.98	7.23	6.01	91.53
	2	0.082	7.73			
	3	0.075	6.98			
11	1	0.095	9.13	9.27	7.09	89.00
	2	0.103	9.99			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	3	0.091	8.70			
12	1	0.069	6.33	6.69	13.67	90.89
	2	0.066	6.01			
	3	0.082	7.73			

ตารางที่ ข.3 ผลของการศึกษาปริมาณที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอดทิฟบลู 19 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาด 35 เมช ที่ pH 6 ที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณ (กรัม)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ การกำจัด
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (g/m <sup>3</sup> )			
0.3	1	0.169	17.09	16.91	3.01	82.89
	2	0.162	16.33			
	3	0.171	17.30			
0.5	1	0.056	4.94	4.68	5.78	95.26
	2	0.051	4.40			
	3	0.054	4.72			
0.7	1	0.042	3.43	3.75	7.58	96.20
	2	0.046	3.86			
	3	0.047	3.97			
0.9	1	0.021	1.17	1.14	5.46	98.85
	2	0.02	1.06			
	3	0.021	1.17			
1.5	1	0.015	0.53	0.60	10.37	99.39
	2	0.016	0.63			
	3	0.016	0.63			
2.1	1	0.014	0.42	0.38	16.19	99.61
	2	0.014	0.42			
	3	0.013	0.31			
2.7	1	0.014	0.42	0.42	25.64	99.58
	2	0.015	0.53			
	3	0.013	0.31			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลของการศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาด 35 เมช ที่ pH 6 ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาท)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ การกำจัด
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (g/m <sup>3</sup> )			
0	1	1.375	148.60	148.79	2.62	25.37
	2	1.413	152.78			
	3	1.342	144.98			
10	1	0.573	60.47	60.84	0.63	69.49
	2	0.576	60.80			
	3	0.58	61.24			
20	1	0.506	53.11	54.50	2.52	72.66
	2	0.519	54.54			
	3	0.531	55.86			
30	1	0.472	49.37	49.26	0.39	75.29
	2	0.472	49.37			
	3	0.469	49.04			
40	1	0.448	46.74	46.77	1.53	76.54
	2	0.455	47.51			
	3	0.442	46.08			
50	1	0.437	45.53	45.16	1.40	77.35
	2	0.427	44.43			
	3	0.437	45.53			
60	1	0.386	39.92	38.86	3.00	80.51
	2	0.378	39.04			
	3	0.365	37.62			
70	1	0.363	37.40	37.40	0.29	81.24
	2	0.362	37.29			
	3	0.364	37.51			
80	1	0.338	34.65	35.49	2.06	82.20
	2	0.35	35.97			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	3	0.349	35.86			
90	1	0.331	33.88	34.10	1.40	82.90
	2	0.338	34.65			
	3	0.33	33.77			
120	1	0.335	34.32	34.06	1.04	82.92
	2	0.329	33.66			
	3	0.334	34.21			
150	1	0.331	33.88	34.17	1.22	82.86
	2	0.338	34.65			
	3	0.332	33.99			
180	1	0.34	34.87	34.10	1.96	82.90
	2	0.33	33.77			
	3	0.329	33.66			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลของการศึกษาความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ขนาด 35 เมช ที่ pH 6 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพการกำจัด
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (g/m <sup>3</sup> )			
100	1	0.084	6.99	6.88	4.13	93.10
	2	0.085	7.10			
	3	0.08	6.56			
150	1	0.168	16.02	15.91	5.77	88.82
	2	0.158	14.95			
	3	0.175	16.77			
200	1	0.338	34.30	35.13	2.04	82.20
	2	0.35	35.59			
	3	0.349	35.48			
250	1	0.499	51.61	52.94	2.90	78.04
	2	0.527	54.62			
	3	0.508	52.58			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ผลของการศึกษาความเร็วรอบที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีข้อมรีแอกทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาด 35 เมช ที่ pH 6 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเร็วรอบ (รอบต่อ นาที)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ การกำจัด
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (g/m <sup>3</sup> )			
150	1	0.103	10.55	11.18	4.97	88.55
	2	0.11	11.38			
	3	0.112	11.61			
200	1	0.026	1.49	1.38	8.55	98.59
	2	0.024	1.26			
	3	0.025	1.38			
250	1	0.03	1.96	1.85	6.37	98.11
	2	0.028	1.73			
	3	0.029	1.85			
300	1	0.021	0.91	0.87	7.84	99.11
	2	0.02	0.79			
	3	0.021	0.91			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ผลของการศึกษาประจุที่ผิวเป็นศูนย์

final	initial	blank
2.06	2.04	2
3.39	3.04	3
4.84	4.00	4
5.20	5.07	5
5.08	6.07	6
5.23	7.07	7
5.86	8.04	8
5.96	9.00	9
6.77	10.00	10
8.20	11.00	11
11.56	12.00	12

ข.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีเขียว

ตารางที่ ข.8 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 16.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีเขียวรีแอกทีฟลู 19 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

t (min)	Concentration in solution (g/m <sup>3</sup> )	q <sub>t</sub> (g/kg)	log(q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )
0	77.99	1.305	0.6
10	12.44	5.230	-0.5
20	10.93	5.321	-0.6
30	10.00	5.376	-0.7
40	8.96	5.439	-0.9
50	7.85	5.505	-1.2
60	6.88	5.563	
70	6.45	5.589	
80	6.24	5.602	
90	6.20	5.604	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 16.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 150 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

t (min)	Concentration in solution (g/m <sup>3</sup> )	q <sub>t</sub> (g/kg)	log(q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )
0	132.11	1.152	0.8237
10	35.10	6.961	-0.0680
20	31.01	7.206	-0.2146
30	26.58	7.471	-0.4625
40	24.99	7.567	-0.6029
50	23.85	7.635	-0.7412
60	20.82	7.816	
70	16.92	8.050	
80	15.18	8.154	
90	15.22	8.152	

ตารางที่ ข.10 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 16.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

t (min)	Concentration in solution (g/m <sup>3</sup> )	q <sub>t</sub> (g/kg)	log(q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )
0	148.788	3.029	0.8184
10	60.839	8.295	0.1193
20	54.502	8.675	-0.0285
30	49.264	8.989	-0.2056
40	46.773	9.138	-0.3244
50	45.161	9.234	-0.4234
60	38.861	9.612	
70	37.396	9.699	
80	35.491	9.813	
90	34.099	9.897	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 16.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 250 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

t (min)	Concentration in solution (g/m <sup>3</sup> )	q <sub>t</sub> (g/kg)	log(q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )
0	197.780	2.800	0.9306
10	88.495	9.344	0.2963
20	73.806	10.224	0.0410
30	66.846	10.640	-0.1661
40	62.487	10.901	-0.3756
50	57.799	11.182	-0.8527
60	55.454	11.322	
70	54.062	11.406	
80	53.696	11.428	
90	51.755	11.544	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำ  
เสียสีย้อม

ตารางที่ ข.12 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 16.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ  
สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุม  
อุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m <sup>3</sup> )	q <sub>t</sub> (g/kg)	log(q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )
0	160.11	2.435	0.8409
10	59.56	8.468	-0.0463
20	50.69	9.000	-0.4353
30	45.16	9.332	-1.4539
40	44.58	9.367	
50	43.92	9.407	
60	42.34	9.501	
70	43.04	9.459	
80	43.43	9.436	
90	43.65	9.423	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 16.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุม อุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m <sup>3</sup> )	q <sub>t</sub> (g/kg)	log(q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )
0	148.788	3.029	0.7859
10	60.839	8.295	-0.0745
20	54.502	8.675	-0.3346
30	49.264	8.989	-0.8264
40	46.773	9.138	
50	45.161	9.234	
60	38.861	9.612	
70	37.396	9.699	
80	35.491	9.813	
90	34.099	9.897	

ตารางที่ ข.14 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 16.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุม อุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m <sup>3</sup> )	q <sub>t</sub> (g/kg)	log(q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )
0	156.44	2.741	0.8934
10	62.16	8.398	0.3359
20	43.81	9.499	0.0277
30	35.23	10.013	-0.2583
40	26.04	10.565	
50	22.85	10.756	
60	23.22	10.734	
70	23.40	10.723	
80	24.25	10.673	
90	23.70	10.705	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 16.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุม อุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m <sup>3</sup> )	q <sub>t</sub> (g/kg)	log(q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )
0	143.92	3.084	0.8436
10	57.84	8.248	0.2579
20	40.80	9.270	-0.1029
30	33.44	9.712	-0.4594
40	27.65	10.059	
50	18.68	10.598	
60	18.75	10.593	
70	19.34	10.558	
80	17.98	10.640	
90	19.12	10.571	

ตารางที่ ข.16 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 16.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุม อุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m <sup>3</sup> )	q <sub>t</sub> (g/kg)	log(q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )
0	165.89	1.534	0.9448
10	56.19	8.116	0.3472
20	40.18	9.077	0.1017
30	28.38	9.785	-0.2549
40	19.12	10.341	
50	14.94	10.591	
60	12.45	10.741	
70	11.24	10.813	
80	10.29	10.870	
90	9.70	10.905	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 โดยการวัดค่า ADMI

#### ค.1 การวิเคราะห์สี (ADMI Tristimulus Filter Method)

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร
2. ฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
3. หลอดฉีดยา
4. เครื่องแก้วต่างๆ

##### สารเคมี

1. โพแทสเซียมคลอโรแพลตตินेट ( $K_2PtCl_6$ ) 1.246 กรัม และโคบอลต์(II)คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ) 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น จากนั้นเติมไฮโดรคลอริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีเข้มข้นเท่ากับ 500 หน่วยสี
2. สารละลายมาตรฐานสี 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60 และ 70 หน่วยสี จากสารละลายสี ข้อ 1 ปริมาตร 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2 และ 1.4 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เป็นปริมาตร 10 มิลลิลิตร (เพื่อป้องกันการระเหยและการปนเปื้อนควรปิดจุกให้สนิท และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง)

##### ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. นำสารละลายมาตรฐานสีที่เตรียมไว้ทั้งหมด และน้ำตัวอย่างที่จะทำการวัดสีมาทำการกรองด้วยฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร วัดค่าทรานส์มิตแตนซ์ (%T) ของแต่ละความยาวคลื่น ดังตารางที่ ค.1 ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วคำนวณหาค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI) จากโปรแกรมการคำนวณ

##### การคำนวณค่าสี (ADMI)

$$ADMI \text{ UNIT} = \frac{(F)(DE)}{b}$$

เมื่อ F = ค่า Calibration Factor ที่ได้จากความชันของการพลอตกราฟของค่า ADMI กับค่า DE ของตัวอย่างสีมาตรฐาน

b = ความกว้างของเซลล์วัดแสง

DE หาจาก

$$DE = [(0.23\Delta Vy)^2 + (\Delta(Vx - Vy))^2 + (0.4\Delta(Vy - Vz))^2]^{1/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\Delta V_y = V_{yc} - V_{ys}$$

$$\Delta(V_x - V_y) = (V_{xc} - V_{yc}) - (V_{xs} - V_{ys})$$

$$\Delta(V_y - V_z) = (V_{yc} - V_{zc}) - (V_{ys} - V_{zs})$$

ตาราง ค.1 การวัดหาค่าทรานส์มิตแตนซ์ (%T) ของแต่ละความยาวคลื่น

Coordinate No.	Wavelength (nm)		
	X	Y	Z
2	435.5	489.5	422.2
5	461.2	515.2	432.0
8	544.3	529.8	438.6
11	564.1	541.4	444.4
14	577.4	551.8	450.1
17	588.7	561.9	455.9
20	599.6	572.5	462.0
23	610.9	584.8	468.7
26	624.2	600.8	477.7
29	654.9	627.3	495.2
Factor when 10 Ordinate Used	0.09806	0.10000	0.11814

ที่มา : Andrew และคณะ. (1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลโดยใช้ ไอโซเทอร์มของการดูดซับที่สภาวะเหมาะสม

ตารางที่ ง.1 ค่าไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ความเข้มข้น (g/m <sup>3</sup> )	C <sub>e</sub>	q <sub>e</sub>	logC <sub>e</sub>	logq <sub>e</sub>	lnC <sub>e</sub>	(RTln(1+C <sub>e</sub> )) <sup>2</sup>	lnq <sub>e</sub>	q <sub>e</sub> /C <sub>e</sub>
100	6.88	5.56	0.84	0.75	1.93	26405865.36	1.72	1.24
150	20.82	7.82	1.32	0.89	3.04	58880965.63	2.06	2.66
200	38.86	9.61	1.59	0.98	3.66	84143181.26	2.26	4.04
250	55.45	11.32	1.74	1.05	4.02	100786002.08	2.43	4.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

### ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับโดยศึกษาอัตรา การเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับที่สภาวะเหมาะสม

ตารางที่ จ.1 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่ใช้  
ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่  
อัตราส่วน w/v เท่ากับ 16.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH 6 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น (g/m <sup>3</sup> )	ความเข้มข้นเริ่มต้น ของสีย้อม (C <sub>0</sub> ) (g/m <sup>3</sup> )	ความเข้มข้นของสีย้อมที่ เหลือในสารละลาย (C <sub>e</sub> ) (g/m <sup>3</sup> )	q <sub>e</sub> (g/kg)
100	99.78	6.88	5.56
150	151.35	20.82	7.82
200	199.37	38.86	9.61
250	244.54	55.45	11.32

ตารางที่ จ.2 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่ใช้  
ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่  
อัตราส่วน w/v เท่ากับ 16.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิต่างกัน

อุณหภูมิ (K)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (C <sub>0</sub> ) (g/m <sup>3</sup> )				ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ ในสารละลาย (C <sub>e</sub> ) (g/m <sup>3</sup> )				q <sub>e</sub> (g/kg)
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย	
	1	2	3		1	2	3		
298.15	200.69	200.58	200.80	200.69	44.54	41.90	47.29	44.58	9.37
306.15	199.70	198.71	199.59	199.34	46.74	47.51	46.08	46.77	9.14
308.15	202.01	201.90	202.45	202.12	27.07	25.75	25.31	26.04	10.56
318.15	195.20	197.73	194.98	195.97	26.96	26.41	29.59	27.65	10.06
328.15	190.80	191.46	192.12	191.46	19.04	19.81	18.49	19.12	10.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

### ค่าพารามิเตอร์ใช้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของค่าพลังงานกระตุ้น จากสมการอาร์เรเนียส (Ea)

ตารางที่ ฉ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับ ในการดูดซับ สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่ความเข้มข้น 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วน w/v เท่ากับ 16.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH 6 ที่อุณหภูมิต่างกัน

อุณหภูมิ (K)	Concentration in solution (g/m <sup>3</sup> )	q <sub>e</sub> (g/kg)	1/t
298.15	44.58	9.37	0.0034
306.15	46.77	9.14	0.0033
308.15	26.04	10.56	0.0032
318.15	27.65	10.06	0.0031
328.15	19.12	10.34	0.0030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของค่าเอนทัลปีมาตรฐาน ( $\Delta H$ ) จากสมการแวนฮอฟฟ์

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการดูดซับในการดูดซับ สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 16.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุม pH เท่ากับ 6 ควบคุมที่อุณหภูมิ ต่างกัน

อุณหภูมิ (K)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ( $C_0$ ) (g/m <sup>3</sup> )				ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ ในสารละลาย ( $C_e$ ) (g/m <sup>3</sup> )				$q_e$ (g/kg)
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย	
	1	2	3		1	2	3		
298.15	200.69	200.58	200.80	200.69	44.54	41.90	47.29	44.58	9.37
306.15	199.70	198.71	199.59	199.34	46.74	47.51	46.08	46.77	9.14
308.15	202.01	201.90	202.45	202.12	27.07	25.75	25.31	26.04	10.56
318.15	195.20	197.73	194.98	195.97	26.96	26.41	29.59	27.65	10.06
328.15	190.80	191.46	192.12	191.46	19.04	19.81	18.49	19.12	10.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS

ตารางที่ ข.1 ผลค่าความเป็นกรด-ด่างที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05

Tukey HSD

treatment	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
4	3	.04933	
7	3	.12800	.12800
5	3	.13533	.13533
8	3	.14400	.14400
6	3	.14467	.14467
3	3		.25700
Sig.		.466	.192

ตารางที่ ข.2 ผลปริมาณที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05

Tukey HSD

treatment	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
2.7	3	.00733			
2.1	3	.02067			
1.5	3		.04300		
0.7	3		.04500		
0.5	3		.05367		
0.9	3			.08833	
0.3	3				.16733
Sig.		.055	.173	1.000	1.000

ตารางที่ ข.3 ผลค่าความเร็วรอบที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05

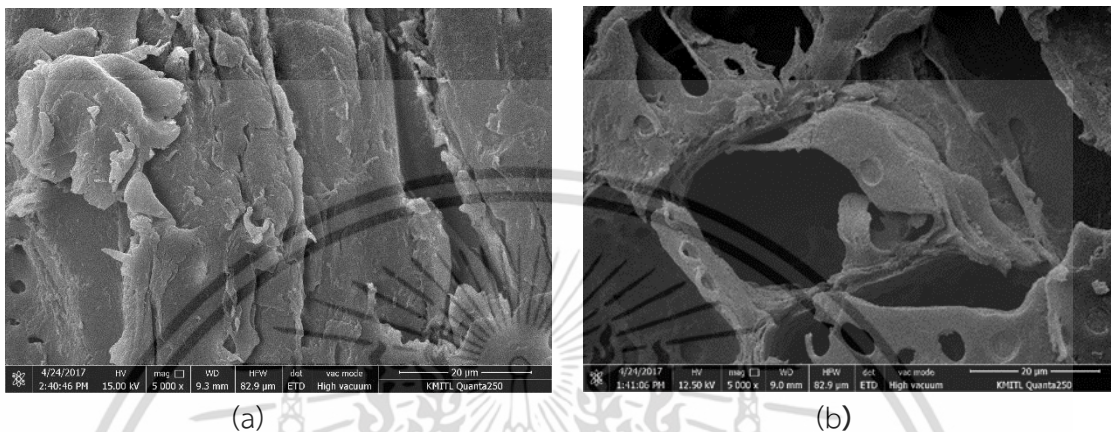
Tukey HSD

treatment	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
300	3	.02067		
200	3	.02500	.02500	
250	3		.03233	
150	3			.10833
Sig.		.536	.163	1.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฅ

### ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาหาขนาดอนุภาคของตัวดูดซับโดยใช้ เครื่อง Scanning Electron Microscope



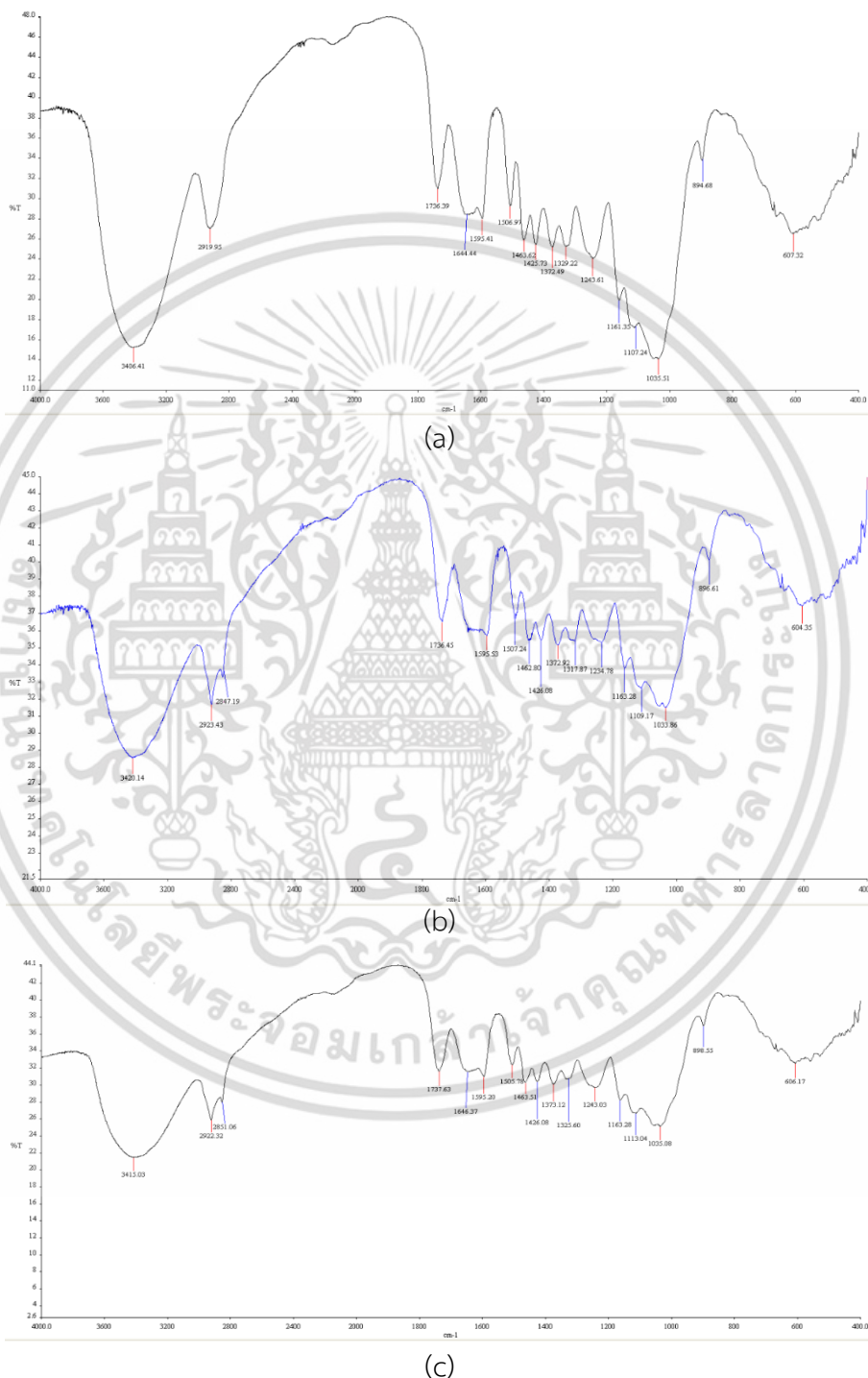
รูปที่ ฅ.1 เปรียบเทียบ MRS หลังการดูดซับที่กำลังขยาย 5000 เท่า

(a) ขนาด 60 เมช และ (b) ขนาด 35 เมช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ญ

### ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)



รูปที่ ญ.1 สเปกตรัมของซีลีเยอเมือวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

(a) RS ก่อนดูดซับ (b) MRS ก่อนดูดซับ และ (c) MRS หลังดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมี

#### ก.1 เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence : XRF)

เทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry หรือเทคนิค XRF เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และสารแขวนลอยได้โดยสามารถใช้ได้กับงานวิจัยในหลายๆ ด้าน เช่น วัสดุศาสตร์, ธรณีวิทยา, สิ่งแวดล้อม, ทางการแพทย์ รวมถึงตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เป็นต้น เทคนิค XRF อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสี X ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา (fluoresced) เนื่องจากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่น (พลังงาน) เฉพาะสำหรับธาตุนั้นๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนเปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่างข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้

#### ก.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะสัณฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจจแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กฎ.3 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR Spectroscopy)

เครื่อง FT-IR Spectroscopy เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ พิสูจน์ เกี่ยวกับ โมเลกุลของสาร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด wave number อยู่ในช่วงประมาณ 12800 ถึง 10  $\text{cm}^{-1}$  แบ่งย่อยได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วง Far IR (200-10  $\text{cm}^{-1}$ ) Mid IR (4000-200  $\text{cm}^{-1}$ ) และ Near IR (12800-4000  $\text{cm}^{-1}$ ) โดยเครื่อง FT-IR Spectroscopy มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ เมื่อรังสีอินฟราเรดที่มีหลายความถี่จากแหล่งคลื่นรังสีอินฟราเรดผ่านเข้าไปยังอินเทอร์โพรมิเตอร์ เมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างไปยังตัววัดสัญญาณที่อ่านได้ทุกความถี่พร้อมกันกับ ช่วงสแกนของกระจกโดยที่อัตราการสุมวัดสัญญาณและความเร็วของกระจกที่เคลื่อนที่ได้จะถูกควบคุมให้มีความถูกต้องและคงที่เรียกสัญญาณอ้างอิงจากตัววัดสัญญาณที่เกิดจากหลอด He – Ne Laser ว่า Internal Reference Laser สัญญาณที่ตัววัดสัญญาณอ่านได้จะอยู่ในรูปอินเทอร์โพแกรมถูกเก็บไว้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้