

การดูดซับสี้อมเบสิคเรด 9 ในน้ำเสีสังเคราะห์โดยใช้  
ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก

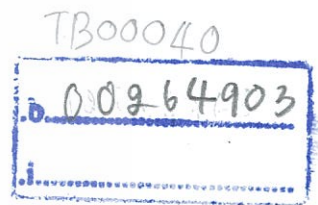
Treatment of Basic Red 9 in Synthetic Wastewater  
Using HCl Modified Water Hyacinth



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้  
ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก

Treatment of Basic Red 9 in Synthetic Wastewater  
Using HCl Modified Water Hyacinth



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Treatment of Basic Red 9 in Synthetic Wastewater Using HCl Modified Water Hyacinth



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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก

Treatment of Basic Red 9 in Synthetic Wastewater Using HCl Modified Water Hyacinth

ชื่อนักศึกษา

นางสาวไพลิน เมฆสุวรรณ รหัสนักศึกษา 56050736

นางสาวภัทริยา แซ่มโสภา รหัสนักศึกษา 56050739

นางสาวสุชานันท์ มีแสงพันธ์ รหัสนักศึกษา 56050773

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน กรรมการ	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก
ชื่อนักศึกษา	นางสาวไพลิน เมฆสุวรรณ รหัสนักศึกษา 56050736 นางสาวภัทริยา แซ่มโสภา รหัสนักศึกษา 56050739 นางสาวสุชานันท์ มีแสงพันธ์ รหัสนักศึกษา 56050773
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

### บทคัดย่อ

น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นหนึ่งในแหล่งที่มาหลักที่ทำให้เกิดมลพิษทางน้ำ ผลกระทบของน้ำเสียสีย้อมนั้นก่อให้เกิดความน่ารังเกียจ ทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนในน้ำลดลงและมีความเป็นพิษ ซึ่งการดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการนำมาบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดที่สุดและมีประสิทธิภาพ ผักตบชวาเป็นวัชพืชที่สามารถพบได้ง่ายในแหล่งน้ำซึ่งก่อให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น การคมนาคมทางน้ำ จึงมีหลายงานวิจัยที่เลือกใช้ผักตบชวาเป็นตัวดูดซับ แต่ความสามารถในการดูดซับอาจไม่เพียงพอจึงมีงานวิจัยที่นำผักตบชวาไปปรับปรุงคุณภาพด้วยกรด โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 โดยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการแบบแบตช์ (Batch Reactor) ทำการศึกษาอิทธิพลของ pH (pH 3-9), เวลาการปั่นกว (0-180 นาที), ปริมาณตัวดูดซับ ( $1-5 \text{ kg/m}^3$ ), ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $50-300 \text{ g/m}^3$ ), และอุณหภูมิของสีย้อม ( $25-55^\circ\text{C}$ ) ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม นอกจากนี้ยังทำการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Langmuir, Freundlich, Tempkin และ Dubinin-Radushkevich (D-R) isotherm) ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ (the pseudo first-order kinetic, the pseudo second-order kinetic, Elovich model และ the intraparticle diffusion model) รวมทั้งศึกษาค่าทางอุณหพลศาสตร์ ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาที่ยังไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพแล้วโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ FTIR โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 545 นาโนเมตร ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการปั่นกว ปริมาณตัวดูดซับและ pH ของสารละลายมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารละลาย ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมลดลง ซึ่งการดูดซับจะเข้าสู่สมดุลที่นาที่ 40 และให้ประสิทธิภาพการดูดซับอยู่ในช่วง 88-91 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich และ Tempkin ค่า E จากไอโซเทอร์มการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ซึ่งให้เห็นว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Temkin ซึ่งให้เห็นว่าการดูดซับความร้อนของโมเลกุลทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในช่องทางอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อยู่ในพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเป็นเส้นตรง ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich ให้ผลการศึกษาที่ดีกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir จากค่า  $1/n$  ของไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich แสดงให้เห็นว่าการดูดซับได้ดี ซึ่งไอโซเทอร์มนี้อธิบายการดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด มีลักษณะขรุขระ พื้นผิว และพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) การศึกษาจลนศาสตร์สอดคล้องกับแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่สองและสมการของ Elovich ซึ่งอธิบายการดูดซับที่เกิดจากการให้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างจำกัด สมการของ Elovich อธิบายการดูดซับทางเคมี ซึ่งสมการนี้เหมาะสำหรับการพิจารณาการดูดซับที่พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน การศึกษาค่าทางอุณหพลศาสตร์พบว่า ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน ( $\Delta G^0$ ) ค่อยๆลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายจาก  $25^\circ\text{C}$  จนถึง  $55^\circ\text{C}$  ค่าพลังงานอิสระมาตรฐานที่ได้มีค่าลบ แสดงว่าโดยธรรมชาติแล้วการดูดซับสีย้อมด้วยฝักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพสามารถเกิดขึ้นได้เอง ค่าเอนทัลปีมาตรฐานมีค่าเป็นลบ ( $\Delta H^0 = \text{ลบ}$ ) แสดงว่าการดูดซับเป็นการดูดซับแบบคายความร้อน ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) ของการดูดซับสีย้อมมีค่าน้อยกว่า 0 เมื่อ  $\Delta S < 0$  และ  $\Delta H < 0$  ซึ่งอธิบายว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้เองที่อุณหภูมิต่ำและไม่สามารถเกิดขึ้นได้เองที่อุณหภูมิสูง ในการศึกษาวิจัยสามารถยืนยันได้ว่าตัวดูดซับทางธรรมชาติที่ใช้ฝักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งเป็นวัสดุที่มีต้นทุนต่ำสามารถหาได้ง่ายและเป็นพืชที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเบสสีครีต 9 ในน้ำเสีย

**คำสำคัญ :** เบสสีครีต 9, การดูดซับ, สีแคทไอออนิก, การกำจัดสีย้อม, การปรับปรุงคุณภาพฝักตบชวา

Title	Treatment of Basic Red 9 in Synthetic Wastewater Using HCl Modified Water Hyacinth
Students	Miss Pailin Meksuwan Student ID 56050736 Miss Pattriya Chamsopar Student ID 56050739 Miss Suchanan Meesangpan Student ID 56050773
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Assist. Prof. Dr.Chompoonut Chaiyaraksa

### Abstract

Effluent from textile industry is one of the major sources of water pollution. The color of textile wastewater causes aesthetic problems, stop the reoxygenation in water and toxication Adsorption has received considerable attention for color removal from wastewater as it offers the most economical and effective treatment method. Water hyacinth is a weed that can be easily found in water. It creates many problems such as obstruction of traffic on the water. Many researchers use water hyacinth to absorb various kinds of dye. Adsorption efficiencies of some dyes are not good enough. Some researchers work on modification of water hyacinth using acid but there is limited information on this subject. The objective of this study was to investigate the adsorption capacity of HCl modified water hyacinth for removal of basic red 9 from aqueous solution in a batch system. The effect of the process variables including solution pH (pH 3-9), contact time (0-180 min), initial dye concentration (50- 400 g/m<sup>3</sup>), adsorbent dosage (1-5 kg/m<sup>3</sup>) and system temperature (25-55°C) on the adsorption process were evaluated. Adsorption isotherm (Langmuir, Freundlich, Tempkin, and Dubinin-Radushkevich (D-R) isotherm), kinetic (the pseudo first-order kinetic, the pseudo second-order kinetic, Elovich model and the intraparticle diffusion model) and thermodynamic study were included. Scanning electron microscope (SEM) and Fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR) were used to investigate physical characteristic of water hyacinth before and after

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

modified and also after adsorption. UV spectrophotometer at the wavelength of 545 nm was used to determine concentrations of dye in solutions. The results indicated that the percentage of dye adsorption increased with increased in agitation time, adsorbent dosage and solution pH but decreased with increased in initial dye concentration and system temperature. The agitation time to reach equilibrium was 40 minutes. The dye removal efficiency was in the range of 88-91 percent. The best-fitting of the used isotherms were the Dubinin-Radushkevich (D-R) and Temkin. The E value from Dubinin-Radushkevich isotherm indicated that the adsorption process was physical in nature. Temkin suggested that the heat of adsorption of all the molecules in the layer would decrease linearly with coverage. Freundlich isotherm exhibited better fit to the dye sorption data than the Langmuir isotherm. The  $1/n$  value of Freundlich isotherm indicated that this isotherm was favorable. The sorption was on a heterogeneous surface by a multilayer mechanism of adsorption with a non-uniform heat distribution of the sorption along the surface. The best-fitting of the kinetic models were the pseudo-second order kinetic and Elovich model. The forming of interaction between adsorbate and adsorbent on the external surface of adsorbent was the rate of limiting step. The best fit of the Elovich equation indicated that the adsorption could be chemisorption kinetic and the adsorbing surface was heterogeneous. The  $\Delta G^\circ$  was slightly decreasing with the increasing temperature from 25 to 55° C. The negative values of  $\Delta G^\circ$  at different temperatures indicated the feasibility of the process and the spontaneous nature of the adsorption. The negative  $\Delta H^\circ$  revealed the adsorption was exothermic and chemisorption in nature. The  $\Delta S^\circ$  of basic red 9 adsorption process was less than zero. When  $\Delta S < 0$  and  $\Delta H < 0$ , the process will be spontaneous at low temperatures and non-spontaneous at high temperatures. This study confirmed that the biosorbent prepared from HCl modified water hyacinth, a low cost, easily available and environmentally problematic plant, could effectively remove basic red 9 from wastewater.

**Keywords:** basic red 9, adsorption, cationic dye, dye removal, modified water hyacinth

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สามารถเสร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือมาจากบุคคลหลายฝ่ายเป็นอย่างดี ผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ คอยช่วยเหลือ แนะนำทางแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดการทดลอง ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้ออกมาสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน ที่ช่วยชี้แนะข้อบกพร่องและแนวทางการแก้ไขปัญหา รวมทั้งตรวจสอบและติชมโครงการพิเศษเพื่อให้ความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี เจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ และช่วยอำนวยความสะดวกต่างๆ จนทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคุณแม่เนาวรัตน์ เมฆสุวรรณ และคุณปู่เสงี่ยม มีแสงพันธ์ ที่คอยช่วยเหลือสรรหา และเก็บผักตบชวาใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ บุคคลในครอบครัว ตลอดจนเพื่อนๆ ในสาขาเคมีสิ่งแวดล้อม พี่ๆ เพื่อนๆ ในคณะวิทยาศาสตร์ ที่คอยให้ความรัก ความเข้าใจ เป็นกำลังใจ และเป็นທີ່ปรึกษาที่ติดตามการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำสำนึกในพระคุณทุกท่านและถือโอกาสนี้กราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความกรุณา ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ทำให้คณะผู้จัดทำมีแรงใจในการทำโครงการพิเศษเล่มนี้ออกมาสมบูรณ์ที่สุด

ไพลิน เมฆสุวรรณ  
ภัทริยา แซ่มโสภา  
สุชานันท์ มีแสงพันธ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป .....	ฐ
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ฒ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ประเภทของตัวดูดซับ.....	4
2.1.1 การดูดซับทางกายภาพ.....	4
2.1.2 การดูดซับทางเคมี.....	4
2.2 กลไกการดูดซับ.....	5
2.3 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ .....	5
2.3.1 แรงแวนเดอร์วาลส์.....	5
2.3.2 ไฟฟ้าสถิตย์.....	5
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	6
2.5 สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	6
2.5.1 สมดุลของการดูดซับ .....	6
2.5.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	7
2.5.2.1 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm).....	7
2.5.2.2 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm).....	8
2.5.2.3 ไอโซเทอร์มแบบเทมกิน (Temkin isotherm).....	8
2.5.2.4 ไอโซเทอร์มแบบ Dubinin-Radushkevich (D-R isotherm).....	9
2.6 แบบจำลองในการศึกษาอัตราในการดูดซับ .....	10
2.6.1 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first Order).....	10
2.6.2 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second Order).....	10
2.6.3 แบบจำลองของ Elovich (Elovich model).....	10
2.6.4 แบบจำลองการแพร่กระจายภายในสารดูดซับ (Intraparticle diffusion model).....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7 ค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส .....	12
2.8 อุณหพลศาสตร์และสมดุลเคมี.....	13
2.8.1 ความหมายของเอนทัลปีและเอนโทรปี.....	13
2.8.2 การหาค่าเอนทัลปีโดยใช้สมการของแวนท์ฮอฟฟ์.....	14
2.9 พลังงานอิสระและสมดุลเคมี.....	15
2.10 สีย้อม.....	17
2.10.1 โครงสร้างสีย้อมเบสิคเรด 9 .....	17
2.10.2 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม .....	17
2.10.3 แหล่งกำเนิดของสีย้อม.....	18
2.10.4 การจำแนกประเภทของสีย้อม .....	19
2.11 น้ำเสีย.....	20
2.11.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย .....	21
2.11.2 ปัญหามลพิษในอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	21
2.11.3 ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยทั่วไป.....	22
2.11.4 ประเภทสิ่งสกปรกของกระบวนการฟอกย้อม .....	23
2.11.5 การลดของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม .....	23
2.11.6 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า.....	23
2.12 องค์ประกอบของเซลล์พืช.....	25
2.13 ผักตบชวา.....	27
2.14 Scanning Electron Microscope (SEM).....	28
2.15 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR).....	30
2.16 UV-VIS Spectrophotometer.....	31
2.16.1 หลักการของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer.....	31
2.16.2 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer .....	31
2.17 American Dye Manufacturers Institute (ADMI).....	32
2.18 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	33
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>36</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	36
3.1.1 อุปกรณ์.....	36
3.1.2 สารเคมี.....	36
3.2 วิธีการทดลอง.....	37
3.2.1 การเตรียมตัวกลางในการดูดซับ.....	37
3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.2.1 การเตรียมสื่อน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีเบสิคเรด 9.....	37
3.2.2.2 การสแกนหาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายสีย้อม สังเคราะห์สีเบสิคเรด 9 .....	37
3.2.3 การปรับปรุงคุณภาพผักตบชวาด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 1 M.....	37
3.2.4 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับทั้งก่อนการ ปรับปรุงคุณภาพและหลังการปรับปรุงคุณภาพ .....	37
3.2.5 ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ผลต่อสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ ...	38
3.2.5.1 อิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสีย สีย้อมสังเคราะห์.....	38
3.2.5.2 อิทธิพลของปริมาณที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสีย สีย้อมสังเคราะห์.....	39
3.2.5.3 อิทธิพลของความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย น้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์.....	39
3.2.5.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสีย สีย้อมสังเคราะห์.....	39
3.2.5.5 การวัดค่า ADMI โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์.....	40
3.2.6 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของความสัมพันธ์ในการดูดซับที่สภาวะสมดุล โดยใช้ไอโซเทอร์มของ Langmuir, Freundlich, Temkin และ Dubinin-Radushkevich.....	40
3.2.7 ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ที่สภาวะเหมาะสม โดยศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับ 4 แบบ .....	40
3.2.8 ศึกษาทางอุณหพลศาสตร์.....	40
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>41</b>
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผักตบชวา.....	41
4.1.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM).....	41
4.1.2 การวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). .....	42
4.2 การศึกษาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายสีย้อมสีเบสิคเรด 9 .....	44
4.3 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ .....	44
4.3.1 อิทธิพลของค่า pH .....	44
4.3.2 อิทธิพลของปริมาณผักตบชวา.....	45
4.3.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 .....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.4 อิทธิพลอุณหภูมิของสีย้อมเบสิคเรด 9.....	48
4.4 การวัดค่า ADMI โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสีย สีย้อมสังเคราะห์.....	50
4.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวา.....	50
4.6 จลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย กรดไฮโดรคลอริก.....	56
4.6.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ( $C_0$ ) 50, 100, 200 และ 300 $g/m^3$ .....	56
4.6.2 อุณหภูมิของสารละลายสีย้อม (T) 25, 33, 35, 45 และ 55 °C.....	58
4.7 พลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ.....	64
4.8 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุง คุณภาพทางเคมี.....	65
4.8.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ( $\Delta H^0$ ) ของการดูดซับสีย้อม.....	65
4.8.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) ของการดูดซับสีย้อม.....	67
4.8.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^0$ ) ของการดูดซับสีย้อม.....	67
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>68</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
เอกสารอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก.....	75
ภาคผนวก ข.....	77
ภาคผนวก ค.....	98
ภาคผนวก ง.....	109
ภาคผนวก จ.....	110
ภาคผนวก ฉ.....	112
ภาคผนวก ช.....	113
ภาคผนวก ซ.....	114
ภาคผนวก ฌ.....	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางเคมี.....	4
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อเครื่องหมายของ G ในทั้ง 4 กรณี.....	16
3.1 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของผักตบชวา.....	38
4.1 ความยาวคลื่นที่หมู่ฟังก์ชันต่างๆ.....	43
4.2 ค่า ADMI ของน้ำสีย้อมสังเคราะห์ ก่อนและหลังการดูดซับด้วยผักตบชวาที่สภาวะสมดุล....	50
4.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin และ D-R สำหรับ การดูดซับสีย้อมเบสิค 9 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ.....	55
4.4 ค่าคงที่ต่างๆที่ได้จากแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Model) แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo Second Order Model) สมการของ Elovich และ การแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion).....	63
4.5 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิต่างๆ.....	64
4.6 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ.....	66
4.7 ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์.....	67
ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9.....	76
ข.1 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส .....	77
ข.2 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 4 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส .....	78
ข.3 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 5 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส .....	79
ข.4 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส .....	80
ข.5 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส .....	81
ข.6 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส .....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.18 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส .....	94
ข.19 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส .....	95
ข.20 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส .....	96
ข.21 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส .....	97
ค.1 การวัดค่าทราสนสมิตแดนซ์ (%T) ของแต่ละความยาวคลื่น .....	99
ค.2 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสังเคราะห์ก่อนการบำบัดและความเข้มข้นที่เหลือของ สีย้อมสังเคราะห์หลังการบำบัดในหน่วยวัดค่าสี ADMI.....	108
ง.1 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่ใช้ใน การหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH 6 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....	109
จ.1 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่ใช้ใน การหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH เท่ากับ 6 ควบคุม อุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส.....	110
จ.2 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่ใช้ใน การหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH เท่ากับ 6 ควบคุม อุณหภูมิที่ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	111
ฉ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับ ในการดูดซับสารละลาย สีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพที่ อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	112
ข.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหาค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการดูดซับในการดูดซับสารละลาย สีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพที่ อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุม pH เท่ากับ 6 ควบคุมที่อุณหภูมิ	25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่อนุญาตให้แก้ไขโดยไม่ระบุโทษปรับค่า 113 คำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับอุณหภูมิ.....	10
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับการเปลี่ยนสถานะกับพลังงาน .....	13
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K$ และ $1/T$ .....	15
2.4 โครงสร้างสี่เหลี่ยมเบสิกเรด 9.....	17
2.5 โครงสร้างและองค์ประกอบของเซลล์พีซ.....	25
2.6 หลักการทำงานของเครื่อง SEM.....	29
2.7 พื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	30
2.8 หลักการทำงานของเครื่อง FT-IR .....	30
2.9 แผนภาพเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์อย่างง่าย.....	31
4.1 ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวา .....	41
4.2 สเปกตรัมของผักตบชวา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	42
4.3 ผลของ pH ต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่างๆ.....	44
4.4 ผลของ pH ต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล.....	45
4.5 ผลของปริมาณผักตบชวาต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่างๆ.....	46
4.6 ผลของปริมาณผักตบชวา ต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล.....	46
4.7 ผลของปริมาณผักตบชวาต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่างๆ.....	47
4.8 ผลของความเข้มข้นต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล.....	48
4.9 ผลของอุณหภูมิต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่างๆ .....	49
4.10 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล .....	49
4.11 สมการการดูดซับของ Langmuir เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50, 100, 200 และ 300 $g/m^3$ .....	50
4.12 สมการการดูดซับของ Freundlich เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50, 100, 200 และ 300 $g/m^3$ .....	52
4.13 สมการการดูดซับของ Temkin เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50, 100, 200 และ 300 $g/m^3$ .....	53
4.14 สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50, 100, 200 และ 300 $g/m^3$ .....	54
4.15 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Model) เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อม เป็น 50, 100, 200 และ 300 $g/m^3$ .....	56
4.16 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo Second Order Model) เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อม เป็น 50, 100, 200 และ 300 $g/m^3$ .....	57
4.17 สมการของ Elovich เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50, 100, 200 และ 300 $g/m^3$ .....	57
4.18 การแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50, 100, 200 และ 300 $g/m^3$ .....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด 58

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Model) เมื่อใช้ข้อมูลหมู่ในการดูดซับที่ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส .....	58
4.20 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo Second Order Model) เมื่อใช้ข้อมูลหมู่ในการดูดซับที่ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส .....	59
4.21 สมการของ Elovich เมื่อใช้ข้อมูลหมู่ในการดูดซับที่ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	60
4.22 การแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) เมื่อใช้ข้อมูลหมู่ในการดูดซับที่ 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	60
4.23 กราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่อุณหภูมิต่างๆ.....	64
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสที่อุณหภูมิ 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	65
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส .....	66
ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีย้อมเบสิคเรด 9.....	75
ก.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 .....	76
ซ.1 ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวา .....	114
ฉ.1 สเปกตรัมของผักตบชวา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	116

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$C_0$	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับในก๊าซหรือของเหลว
$C_e$	ความเข้มข้นหลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุลของสารที่ถูกดูดซับ
$C_t$	ความเข้มข้นที่เวลานั้นๆของสารที่ถูกดูดซับในก๊าซหรือของเหลว
$q_e$	จำนวนการดูดซับสีย้อมต่อปริมาณตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล
$q_D$	ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ
$q_m$	ปริมาณสูงสุดของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว
$q_t$	จำนวนการดูดซับสีย้อมต่อปริมาณตัวดูดซับที่เวลานั้นๆ
$k_1$	ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง
$k_2$	ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง
$k_l$	ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์
$K_F$	ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น
$K_{DR}$	ค่าคงที่การดูดซับของ Dubinin-Radushkevich
$k_{id}$	ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน
$b_0$	ค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ
$A$	ค่าคงที่สมดุลของการยึดเกาะ
$A$	แฟกเตอร์ความถี่
$E$	พลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยของการดูดซับ
$E_a$	พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy) ของปฏิกิริยา
$K$	เคลวิน
$R$	ค่าคงที่ของแก๊ส ( $8.314 \text{ Jmol}^{-1}/\text{K}^{-1}$ )
$T$	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
$t$	เวลา (นาที)
$V$	ปริมาณของสารละลายหรือก๊าซ
$W$	น้ำหนักแห้งของสารดูดซับที่ใช้
$1/n$	ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ
$\mu\text{g}$	ไมโครกรัม
$\text{mg}$	มิลลิกรัม
$\text{kg}$	กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์(ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
g	กรัม
L	ลิตร
kJ	กิโลจูล
J	จูล
mol	โมล
min	นาที
$\alpha$	อัตราเร็วในการดูดซับ
$\beta$	สัมประสิทธิ์ของการคายซับ
$-\Delta H$	ความร้อนคายออกมาจากระบบ (Exothermic)
$+\Delta H$	ความร้อนจะถูกดูดเข้าไปในระบบ (Endothermic)
$S_1$	เอนโทรปี ณ สภาวะเริ่มต้น
$S_2$	เอนโทรปี ณ สภาวะสุดท้าย
$\Delta S$	การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี
$\Delta G$	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ
nm	นาโนเมตร
mm	มิลลิเมตร
pH	ค่าความเป็นกรดและด่าง
s	น้ำตัวอย่าง
$m^3$	ลูกบาศก์เมตร
$^{\circ}C$	องศาเซลเซียส
ln	ลอการิทึมธรรมชาติ
log	ลอการิทึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันประเทศไทยมีอุตสาหกรรมต่างๆมากมายที่กำลังเติบโตทางเศรษฐกิจ หนึ่งในนั้นคือ อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มไทยซึ่งคาดว่าจะปรับตัวดีขึ้นตามการฟื้นฟูของเศรษฐกิจโลก (หนังสือพิมพ์แนวหน้า, 2558) หลังจากปี 2558 มูลค่าส่งออกอยู่ที่ 2,700 ล้านดอลลาร์สหรัฐ หรือ ประมาณ 8 หมื่นล้านบาท (หนังสือพิมพ์โพสต์ทูเดย์, 2559) ส่งผลให้กลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการขยายตัวมากขึ้น ซึ่งแต่ละกระบวนการของการผลิตสิ่งทอประเภทหนึ่งๆ มีการใช้สารเคมีจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งขั้นตอนการเตรียม ย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จสิ่งทอ น้ำจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องใช้ร่วมกับวัตถุดิบในทุกขั้นตอนการผลิตซึ่งก่อให้เกิดน้ำเสีย ทำให้มีสภาพที่แปรเปลี่ยนไป เช่น อุณหภูมิสูงขึ้น มีกลิ่น มีสี (จันทร์ทิพย์, 2554) นอกจากนี้ยังพบว่าสีย้อมที่พบบ่อยในน้ำเสียมักมีลักษณะเป็นอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านลงสู่ผิวน้ำ ส่งผลกระทบให้พืชที่อยู่ในน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนในน้ำลดลงจนทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำ และผลกระทบของน้ำเสียนี้อย่างยิ่งเป็นตัวบ่งชี้ยังการทำงานของจุลินทรีย์ต่างๆ ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

สีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีหลายประเภท เช่น สีไดเร็กต์ สีรีแอคทีฟ สีสเฟิร์ส สีเบสิก และ สีแอซิด เป็นต้น ซึ่งสีแต่ละประเภทจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับเส้นใย สำหรับสีเบสิกซึ่งเหมาะสมกับการใช้ย้อมเส้นใยสังเคราะห์ อะคริลิก และพอลิเอสเตอร์ ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเซลลูโลสจะทำให้ทนต่อแสงแดด สีเบสิกเป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในสวนประกอบที่ให้สี บางครั้งเรียกสีประเภทนี้ว่า สีแคทไอออนิก (Cationic Dyes) ซึ่งเป็นสารที่สลายตัวได้ยากทางชีวภาพ ดังนั้นเมื่อมีการปนเปื้อนของสีย้อมในน้ำเสียจะก่อให้เกิดความน่ารังเกียจ จึงควรมีการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนทิ้งลงแหล่งน้ำสาธารณะ (บุญรักษ์ กาญจนวรวณิษฐ์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2554) ซึ่งวิธีการในการบำบัดน้ำเสียมียหลายวิธี เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การใช้ระบบเยื่อกรอง การสร้างและรวมตะกอนทางเคมี การออกซิโดซ์ด้วยโอโซน รวมทั้งการใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพ เป็นต้น แต่วิธีดังกล่าวมีกระบวนการบำบัดที่ซับซ้อนและค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง อย่างไรก็ตาม วิธีการดูดซับโดยใช้วัสดุธรรมชาติเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง มีข้อดี ได้แก่ เป็นกระบวนการบำบัดที่ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย ใช้เงินลงทุนน้อย ใช้เวลาในการบำบัดไม่นานนัก ใช้สถานที่ไม่มากนัก ประหยัดค่าใช้จ่ายและเป็นมิตรต่อระบบนิเวศน์ นอกจากนี้ยังสามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศปกติ และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบได้อีกด้วย (รัชนิย์ รุกขชาติ, 2555)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ผักตบชวาเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากผักตบชวาเป็นวัชพืชน้ำที่มีความสามารถสูงในการขยายพันธุ์ ถูกจัดเป็นวัชพืชที่ร้ายแรงอันดับ 8 ของโลก จากการสำรวจในประเทศไทยพบว่าการแพร่ระบาดของผักตบชวาในแหล่งน้ำต่างๆถึง 64 จังหวัด คิดเป็นปริมาณชีวมวลกว่า 5 ล้านตันต่อปี (ห้องสมุดกรมควบคุมมลพิษ, 2557) จากการศึกษาพบว่าผักตบชวามีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดี มีองค์ประกอบที่สำคัญคือ เซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันไวแลกเปลี่ยนไอออนหรือโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้ (รัชนิย์ รุกขชาติ, 2555) จึงได้เลือกนำมาบำบัดสีย้อมสีเบสิกเรด 9 เคยมีนักวิจัยที่นำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผักตบชวาไปดูดซับแคดเมียมและสังกะสีได้ประสิทธิภาพ 80-90 เปอร์เซ็นต์ (Hafidzatul Husna Mohamad, 2010) นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยที่นำผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกมาดูดซับสีเมทิลีนบลู ซึ่งจากการปรับปรุงคุณภาพทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพที่มากขึ้น (Md. Nasir Uddin, 2014) จึงเลือกใช้ตัวกลางในการดูดซับเป็นผักตบชวาที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ก่อนทำการทดลองเพื่อให้ผักตบชวามีประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยทำการศึกษาพื้นที่ผิว และองค์ประกอบต่างๆของตัวผักตบชวาทั้งก่อนการปรับปรุงคุณภาพและหลังการปรับปรุงคุณภาพ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับ ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ รวมทั้งศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีการแบบแบตช์ (Batch Reactor) ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับ เพื่อนำค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับที่เหมาะสมไปหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับ และทางอุณหพลศาสตร์มีการพิจารณาค่าของเอนทัลปีมาตรฐาน ( $\Delta H^\circ$ ) ค่าเอนโทรปีมาตรฐาน ( $\Delta S^\circ$ ) และพลังงานอิสระมาตรฐานของกิบส์ ( $\Delta G^\circ$ ) ที่มีผลต่อการดูดซับ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาคคุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีและไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของ pH ของน้ำเสีย, ความเข้มข้นของน้ำเสีย, ปริมาณตัวดูดซับ และอุณหภูมิในการดูดซับ ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดที่สูงที่สุดโดยวัดในหน่วย ADMI
4. เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ
5. เพื่อศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9
6. เพื่อศึกษาหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส
7. เพื่อศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมผักตบชวาซึ่งเป็นตัวกลางในการดูดซับ โดยปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 1 M
2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีและไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี โดยใช้เครื่อง FT-IR และ SEM
3. ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ โดยทำการแปรผันพารามิเตอร์ดังนี้
  - แปรผันค่า pH ดังนี้ 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9
  - แปรผันปริมาณของตัวดูดซับที่อัตราส่วน w/v ดังนี้ 1, 2, 3, 4 และ 5  $\text{kg/m}^3$
  - แปรผันความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อม ดังนี้ 50, 100, 200 และ 300  $\text{g/m}^3$
  - แปรผันอุณหภูมิในการดูดซับ ดังนี้ 25, 33 (อุณหภูมิห้อง), 35, 45 และ 55  $^\circ\text{C}$
4. ศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดสีย้อม โดยวัดค่า ADMI ของน้ำเสียก่อนและหลังการดูดซับด้วยสภาวะที่ดีที่สุด
5. ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับทั้งแบบ Langmuir, Freundlich, Temkin และ Dubinin-

Radushkevich โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองแปรผันปริมาณความเข้มข้น

6. ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับ 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), Elovich model และ Intraparticle diffusion model โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการแปรผันความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์และอุณหภูมิตั้งแต่ 20-40°C
7. ศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการแปรผันอุณหภูมิตั้งแต่ 20-40°C
8. ศึกษาค่าทางอุณหพลศาสตร์ คือ เอลทัลปี ( $\Delta H^\circ$ ) จากสมการของแวนฮอฟฟ์ โดยใช้ข้อมูลจากค่าเอนโทรปี ( $\Delta S^\circ$ ) และการแปรผันอุณหภูมินำไปหาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^\circ$ )

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเป็นแนวทางในการช่วยลดปริมาณฝักตบขวา ซึ่งเป็นการนำวัสดุที่เหลือทิ้งมาประยุกต์ใช้
2. เป็นสารดูดซับที่มีราคาถูก โดยมีการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม ซึ่งสามารถลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม
3. เป็นแนวทางสำหรับนำไปใช้การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนของสีย้อม
4. เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สำหรับศึกษาการดูดซับน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมชนิดอื่นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ประเภทของตัวดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกลักษณะของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waals forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

#### 2.1.1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waals forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

#### 2.1.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลายกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกละลายเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกละลายออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

ตารางที่ 2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1.ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
2.อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3.แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4.การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5.การดูดซับบนแก๊ส-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
6.พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7.รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer, multilayer	Monolayer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 กลไกการดูดซับ (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, 2554)

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ แพร่กระจายเข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้น ควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

## 2.3 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

### 2.3.1 แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waals forces)

เป็นแรงระหว่างโมเลกุลมีความแข็งแรงน้อยจึงต้องการพลังงานในการสลายพันธะหรือแรงระหว่างโมเลกุลน้อยมาก โมเลกุลที่ยึดจับกันด้วยแรงชนิดนี้มีจุดเดือด และจุดหลอมเหลวต่ำมาก โดยปกติโมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะประพืดตัวเป็นกลาง ในบางครั้งอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปรวมอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของอะตอมหรือโมเลกุล ทำให้เกิดสภาพขั้วชั่วคราวขึ้น โดยตำแหน่งที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปรวมกันจะเกิดสภาพที่เป็นประจุลบ (d-) และตำแหน่งที่ไม่มีอิเล็กตรอนจะเกิดสภาพประจุที่เป็นบวก (d+) โมเลกุลที่มีสภาพขั้วแบบชั่วคราวสามารถเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลในสภาวะปกติมีสภาพขั้วโดยที่ตำแหน่งที่มีอิเล็กตรอนหนาแน่นมีประจุเป็นลบจะไปผลักอิเล็กตรอนของอีกโมเลกุลให้ไปอยู่ด้านตรงข้าม ทำให้เกิดอีกโมเลกุลมีสภาวะขั้วชั่วคราวอีกโมเลกุล ทำให้โมเลกุลทั้งสองมีประจุบวกและลบ เรียกว่า Polarizability และเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกและลบ

### 2.3.2 ไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force)

เกิดจากความไม่สมดุลของประจุไฟฟ้าภายในหรือบนพื้นผิวของวัสดุหนึ่ง ประจุยังคงอยู่กับที่จนกระทั่งมันสามารถจะเคลื่อนที่โดยอาศัยการไหลของอิเล็กตรอน (กระแสไฟฟ้า) หรือมีการปลดปล่อยประจุ ไฟฟ้าสถิตย์มีชื่อที่ขัดกับไฟฟ้ากระแสที่ไหลผ่านเส้นลวดหรือตัวนำอื่นและนำส่งพลังงาน ประจุไฟฟ้าสถิตย์สามารถสร้างขึ้น เมื่อไรก็ตามที่สองพื้นผิวสัมผัสกันและแยกจากกัน และอย่างน้อยหนึ่งในพื้นผิวนั้นมีความต้านทานสูงต่อกระแสไฟฟ้า (และดังนั้นมันจึงเป็นฉนวนไฟฟ้า)

แรงนั้นเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, 2550)

1) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ เนื่องจากตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะสามารถดูดซับโมเลกุลของสารที่ดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่วนอัตราการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ

2) ขนาดและลักษณะของสารดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถของตัวถูกละลายลดลง เพราะในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี นอกจากนี้แล้ว ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับการดูดซับ คือ ถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในรูพรุนเป็นอัตราควบคุมกลไกแล้วความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของโมเลกุลของตัวดูดซับ คือเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง (ประรัฐกรณ์, 2555)

3) พีเอช มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลต่อการดูดซับด้วย โดยทั่วไปไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดกับพื้นผิวของตัวดูดซับได้ดี

4) อุณหภูมิกระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลงแต่การดูดซับของเหลวนั้น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีน้อยมาก เนื่องจากของเหลวมียุณหภูมิความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการกระตุ้นหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่แอลกอฮอล์ิก (Alcoholic) คาร์บอนิลิก (Carbonylic) และฟีนอลิก (Phenolic) ซึ่งอยู่บนพื้นผิวของการดูดซับทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนตัวดูดซับกับประจุบวกบนโมเลกุลของสีย้อมบางชนิด นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficient) มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (พรสวรรค์ และคณะ, 2553)

5) เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยเวลาที่สัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาที่สัมผัสเลยจากช่วงนี้ไปแล้วก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

6) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ Film diffusion หรือ Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนาแน่นมาก ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่จะเข้าไปในตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ความปั่นป่วนในถังการดูดซับ คือความเร็วของน้ำที่ผ่านถึงต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น (ประรัฐกรณ์, 2555)

## 2.5 สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ

### 2.5.1 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในการละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกละลายเข้มข้น  $C_0$  ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกละลายบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกละลายไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลตัวถูกละลายบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา อัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับเมื่อปล่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กระบวนการดูดซับดำเนินไป จนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ณ สภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่

### 2.5.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ในการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของสารที่ถูกดูดซับและพื้นผิวสารดูดซับ รวมทั้งเพื่อให้ได้ข้อมูลของ ขั้นตอนดูดซับที่เกิดขึ้น มักดำเนินการโดยการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับซึ่งเป็นการคำนวณความเข้มข้นของสาร ถูกดูดซับที่อยู่ในรูปของก๊าซหรือสารละลายก่อนและหลังเกิดการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ ในกระบวนการดูดซับ นั้น เมื่อโมเลกุลของสารดูดซับมาสัมผัสกับพื้นผิวของสารดูดซับในช่วงเวลาหนึ่ง จะเกิดสภาพสมดุลขึ้นระหว่าง มวลของสารที่ถูกดูดซับกับมวลของสารเดียวกันที่เหลืออยู่ในก๊าซหรือสารละลาย ภายใต้สภาวะสมดุลนี้ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของแข็งนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการมวล คือ

$$q_t = ((C_0 - C_t)V)/W \quad (2.1)$$

$$q_e = ((C_0 - C_e)V)/W \quad (2.2)$$

$$\text{dye removal (\%)} = ((C_0 - C_e)100)/C_0 \quad (2.3)$$

โดย  $q_e$  = จำนวนการดูดซับที่ยึดต่อปริมาณตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล  
 $q_t$  = จำนวนการดูดซับที่ยึดต่อปริมาณตัวดูดซับที่เวลานั้นๆ  
 $C_t$  = ความเข้มข้นที่เวลานั้นๆของสารที่ถูกดูดซับในก๊าซหรือของเหลว  
 $C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับในก๊าซหรือของเหลว  
 $C_e$  = ความเข้มข้นหลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุลของสารที่ถูกดูดซับ  
 $V$  = ปริมาณของสารละลายหรือก๊าซ  
 $W$  = น้ำหนักแห้งของสารดูดซับที่ใช้

#### 2.5.2.1 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่ายๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้

ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$C_e/q_e = (1/K_L q_m) + C_e/q_m \quad (2.4)$$

โดย  $q_m$  = ปริมาณสูงสุดของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ( $\mu\text{g}/\text{mg}$ )

$q_e$  = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ ( $\text{mg}$ ) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ ( $\text{g}$ ) ที่ภาวะสมดุล  
 เรียกว่า ค่าการดูดซับที่สมดุล

$K_L$  = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ ( $\text{L}/\text{mg}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

จากสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (สมการ 2.4) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  ค่า  $q_m$  และ  $K_L$  หาได้จากความชัน (Slope) และจุดตัดแกน (Intercept) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (Separation factor or equilibrium parameter,  $R_L$ ) ดังสมการ

$$R_L = 1/(1+K_L C_0) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $C_0$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) โดยค่า  $R_L$  จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอร์มว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า  $R_L > 1$  การดูดซับไม่ดี (Unfavorable),  $R_L = 1$  การดูดซับ เป็นเส้นตรง (Linear),  $0 < R_L < 1$  การดูดซับดี (Favorable) และ  $R_L = 0$  การดูดซับเกิดผันกลับได้ (Irreversible)

### 2.5.2.2 ไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอร์มแบบ Freundlich เป็นไอโซเทอร์มที่พัฒนาจากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer)

$$\log q_e = \log K_F + 1/n \log C_e \quad (2.6)$$

โดย  $C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

$q_e$  = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

$K_F$  = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

$1/n$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K_F$  จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง  $\log C_e$  กับ  $\log q_e$  โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมากหรือค่า  $n$  น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ค่า  $1/n$  อธิบายถึงไอโซเทอร์มของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้าน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

### 2.5.2.3 ไอโซเทอร์มแบบเทมกิน (Temkin isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Temkin จะแตกต่างจากของ Langmuir และ Freundlich ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับของ Temkin สามารถนำไปใช้ได้กับการดูดซับทางเคมี

เนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ ไอโซเทอร์มนี้มีสมมติฐานว่าพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ เว้นแต่การนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับจะลดลงเป็นเส้นตรง เมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ (Adsorbent-adsorbate interactions) สมการของ Temkin เขียนได้เป็น

$$q_e = (RT/b_0) \ln A + (RT/b_0) \ln C_e \quad (2.7)$$

- เมื่อ  $b_0$  = ค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ (J/mol)  
 $A$  = ค่าคงที่สมดุลของการยึดเกาะ (L/g) ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานยึดเกาะสูงสุด (Maximum binding energy)  
 $R$  = ค่าคงที่ของแก๊ส ( $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )  
 $T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

จากสมการ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $q_e$  กับ  $\ln C_e$  ค่าคงที่  $A$  และ  $B$  หาได้จากจุดตัดแกนและความชันของเส้นกราฟตามลำดับ

#### 2.5.2.4 ไอโซเทอร์มแบบ Dubinin-Radushkevich (D-R isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ได้เสนอไอโซเทอร์มการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับของตัวดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมีหรือทางกายภาพ สมการของไอโซเทอร์มของ Dubinin-Radushkevich เขียนได้เป็น

$$\ln q_e = \ln q_D - K_{DR} [RT \ln (1 + (C_e)^2)]^2 \quad (2.8)$$

- เมื่อ  $q_D$  = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)  
 $K_{DR}$  = ค่าคงที่การดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ( $\text{mol}^2/\text{kJ}^2$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานอิสระการดูดซับเฉลี่ยต่อสารที่ถูกดูดซับ 1 โมล  
 $C_e$  = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย ณ ภาวะสมดุล (mol/L)  
 $R$  = ค่าคงที่ของแก๊ส ( $8.134 \text{ J/mol K}$ )  
 $T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

จากสมการ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $q_e$  กับ  $\ln C$  สามารถหาค่า  $n$  และ  $K_{DR}$  ได้จากจุดตัดแกนและค่าความชัน ตามลำดับค่า  $n$  และ  $K_{DR}$  จากสมการ Dubinin-Radushkevich เกี่ยวข้องกับพลังงานดูดซับอิสระ ( $E$ ) ของการดูดซับต่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ เมื่อเกิดการเคลื่อนที่จากสารละลายสู่พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งพลังงานดูดซับอิสระ หาได้จากสมการ

$$E = \frac{1}{\sqrt{2\beta}} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $E$  = พลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยของการดูดซับ (kJ/mol)

จากผลพบว่า ค่าพลังงานดูดซับอิสระ ( $E$ ) สามารถบ่งบอกกลไกการดูดซับได้ ถ้าหากค่า  $E = 8-16 \text{ kJ/mol}$  เป็นกระบวนการดูดซับโดยการแลกเปลี่ยนไอออนทางเคมี ถ้าค่า  $E < 8 \text{ kJ/mol}$  จะเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่า  $E > 16 \text{ kJ/mol}$  จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 แบบจำลองในการศึกษาอัตราในการดูดซับ (Model for adsorption Rate) (สันทัด และคณะ, 2542)

### 2.6.1 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order)

สมการแบบจำลองอันดับหนึ่งแสดงในสมการ

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - (k_1/2.303)t \quad (2.10)$$

โดยที่  $q_e$  = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวที่ถูกดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (กรัม/กิโลกรัม)

$q_t$  = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (กรัม/กิโลกรัม)

$k_1$  = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/นาที)

$t$  = เวลา (นาที)

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

### 2.6.2 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order)

สมการแบบจำลองอันดับสองแสดงในสมการ

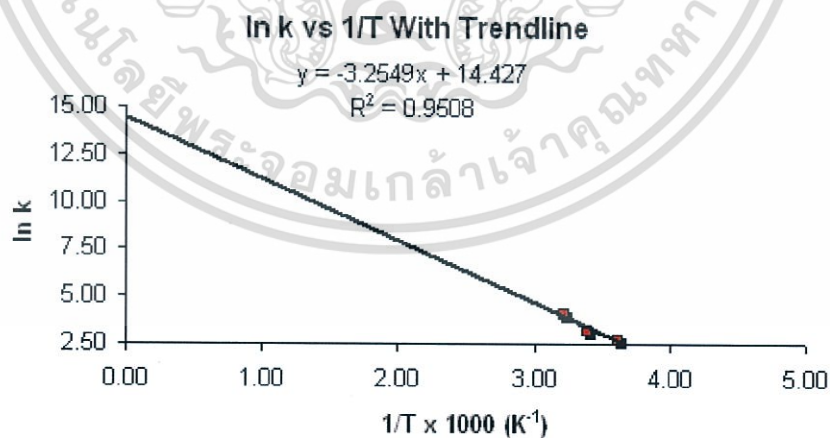
$$t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + t/q_e \quad (2.11)$$

โดย  $q_e$  = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวที่ถูกดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (กรัม/กิโลกรัม)

$q_t$  = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (กรัม/กิโลกรัม)

$k_2$  = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (g/(mg min))

$t$  = เวลา (นาที)



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับอุณหภูมิ

ที่มา : <http://mmsphyschem.com/actEnergy.htm>

### 2.6.3 แบบจำลองของ Elovich (Elovich model)

สมการนี้ได้นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งมาจากสมมติฐานของสมการนี้ว่า พื้นที่ผิวของแข็งหรือสารดูดซับต่างชนิดกัน และพลังงานจากการดูดซับนั้นต่างกัน และการดูดซับที่พื้นผิวของแข็งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารดูดซับมีการใช้งานหรือถูกใช้ไปในการดูดซับน้อย จะทำให้การคายซับและแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับไม่ส่งผลต่อจลนศาสตร์ของการดูดซับนี้ (Gupta and Bhattacharyya, 2011) สมการของ Elovich แสดงได้ดังนี้ (Araroni and Tompkins, 1970)

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

$$q_t = 1/\beta \ln(\alpha\beta) + 1/\beta \ln t \quad (2.12)$$

โดย  $\alpha$  = อัตราเร็วในการดูดซับ

$\beta$  = สัมประสิทธิ์ของการคายซับ

สมการนี้จำกัดการใช้งานเฉพาะช่วงเริ่มต้นของการดูดซับในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับและสารดูดซับเท่านั้น โดยกระบวนการดูดซับนั้นยังไม่เข้าสู่ภาวะสมดุล นอกจากนี้พฤติกรรมของการดูดซับที่อธิบายโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสอง และสมการของ Elovich นี้สามารถใช้อธิบายการดูดซับได้ดีเมื่อสัดส่วนของพื้นผิวบนสารดูดซับถูกใช้งานได้ไม่เกินร้อยละ 70 ของพื้นผิวทั้งหมด (Rudzinski and Plazinski, 2009)

พื้นฐานของกระบวนการดูดซับ ได้แก่ ประเภทการดูดซับ ขั้นตอนของกลไก ไอโซเทอร์ม และจลนศาสตร์ของการดูดซับจะถูกนำมาใช้กันมากในการอธิบายกลไกการบำบัดและกำจัดมลพิษของวัสดุนาโนโดยเฉพาะอนุภาคนาโนที่เป็นรูพรุน (Nanoporous materials) อนุภาคนาโนไอออน และอนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีกระบวนการดูดซับเป็นกลไกหลักในการกำจัดมลพิษ เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง  $t/q_t$  กับ  $t$  จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า  $k_2$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$

#### 2.6.4 แบบจำลองการแพร่กระจายภายในสารดูดซับ (Intraparticle diffusion model)

จลนพลศาสตร์การดูดซับนอกจากจะสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่ผิวตัวดูดซับแล้ว จลนพลศาสตร์การดูดซับอาจจะสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วย ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่ถูกใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับ สมการการแพร่ภายในรูพรุนของ Weber และ Morris สามารถเขียนในรูปของสมการเชิงเส้นได้ดังนี้ (Banerjee et al., 1997; Manju et al., 2002)

$$q_t = k_{id}(t)^{1/2} + C \quad (2.13)$$

โดย  $k_{id}$  = ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (mg/g min)

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

## 2.7 ค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) (ปองพล สุริยะกันธร, 2556)

จากกฎอัตราสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับสถานะต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงจากกฎอัตรา

$$\text{rate} = k [A]^m [B]^n \quad (2.14)$$

บอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่ค่าคงที่อัตราอาจเปลี่ยนแปลงไปได้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปหรือมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิและพลังงานก่อกัมมันต์ (ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา) เปลี่ยนไปสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) สามารถบอกความสัมพันธ์ของสามตัวแปรนี้ได้

เห็นได้ว่าค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเป็นไปตาม สมการของอาร์เรเนียส

$$K = Ae^{-E_a/RT} \quad (2.15)$$

ถ้าเราเขียนสมการให้อยู่ในรูปล็อกกาลีทิมีธรรมชาติ จะได้ว่า

$$\ln k = \ln Ae^{-E_a/RT} \quad (2.16)$$

$$\ln k = \ln A - (E_a/RT) \quad (2.17)$$

ถ้ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  จะได้กราฟเป็นเส้นตรง และมีค่าความชันเท่ากับ  $-E_a/R$  และมีจุดตัดแกน  $\ln k$  ที่จุด  $\ln k = \ln A$

เมื่อ  $A$  = แฟกเตอร์ความถี่ (Frequency factor) ซึ่งมีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างพอสมควรสำหรับแต่ละปฏิกิริยา

$E_a$  = พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ของปฏิกิริยา (kJ/mol)

$R$  = ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/K.mol)

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (หน่วย K)

เรียกแฟกเตอร์ความถี่และพลังงานก่อกัมมันต์ ว่าเป็นพารามิเตอร์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius parameter) จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตรา  $k_1$  กับอุณหภูมิ  $T_1$  และค่าคงที่อัตรา  $k_2$  กับอุณหภูมิ  $T_2$  เราก็สามารถคำนวณหาพลังงานก่อกัมมันต์ หรือคำนวณหาค่าคงที่อัตราที่อุณหภูมิอื่นเมื่อทราบค่าพลังงานก่อกัมมันต์ได้

$$\ln k_1 = \ln A - (E_a/RT_1)$$

$$\ln k_2 = \ln A - (E_a/RT_2)$$

นำ  $\ln k_2$  ไปลบออกจาก  $\ln k_1$  จะได้ว่า

$$\ln k_1 - \ln k_2 = (E_a/R)((1/T_2)-(1/T_1))$$

$$\begin{aligned} \ln (k_1/k_2) &= (E_a/R)((1/T_2)-(1/T_1)) \\ &= (E_a/R)((T_1-T_2)/(T_1T_2)) \end{aligned}$$

สำหรับปฏิกิริยาต่างๆ อาจถือว่าแฟกเตอร์ความถี่เท่ากับค่าคงที่ของการชนระหว่างอนุภาคของสารตั้งต้น แต่สำหรับปฏิกิริยาซับซ้อนมากขึ้นเราจะต้องคำนึงถึงการจัดตัวของโมเลกุลขณะเข้าชนด้วย

## 2.8 อุณหพลศาสตร์และสมดุลเคมี (นภดล ไชยคำ และคณะ, 2542)

### 2.8.1 ความหมายของเอนทัลปีและเอนโทรปี

ความร้อนของปฏิกิริยาหรือเอนทัลปี (Heat or enthalpy of reaction) เป็นเทอร์มที่ใช้บอกถึงปริมาณความร้อนที่ถูกดูดเข้าไป หรือถูกคายออกมาต่อโมลของสารที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ถ้าปฏิกิริยาเกิดที่ความดันคงที่และงานที่เกี่ยวข้องเป็นแบบขยายตัวหรือหดตัวเท่านั้น ให้เอนทัลปี คือ  $H$

การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี คือ  $\Delta H = H_2 - H_1$

$\Delta$  อ่านว่า เดลต้า (Delta)  $H_2$  และ  $H_1$  เป็นสถานะสุดท้าย (Final state) และสถานะเริ่มต้น (Initial state) ตามลำดับ

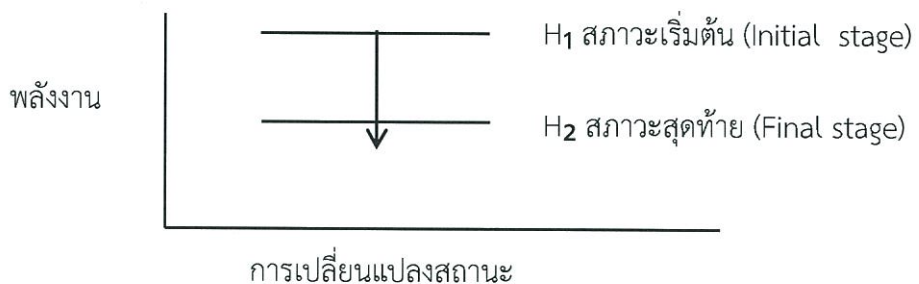
เครื่องหมายบวกของเอนทัลปี เมื่อสารเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี

$$\Delta H = H_2 - H_1 \quad (2.18)$$

โดยที่  $H_2 =$  สถานะสุดท้าย (Final state)

$H_1 =$  สถานะเริ่มต้น (Initial state)

ในกรณีที่  $H_2$  มีค่าน้อยกว่า  $H_1$  หรือ  $H_2$  มีเสถียรภาพมากกว่า  $H_1$  (ระบบที่มีเสถียรมากกว่า จะมีพลังงานน้อยกว่า) การเปลี่ยนแปลงสถานะนี้



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนสถานะกับพลังงาน (Chang, 1996)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta H = \text{ลบ} = \text{ความร้อนคายออกมาจากระบบ (Exothermic)}$

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

$\Delta H = \text{บวก} = \text{ความร้อนจะถูกดูดเข้าไปในระบบ (Endothermic)}$

เอนโทรปี (Entropy, S) คือ ปริมาณที่บอกถึงความไม่เป็นระเบียบของระบบหรืออาจกล่าวได้ว่าเอนโทรปีบอกให้ทราบว่าอะตอม โมเลกุล หรือไอออนกระจายตัวอยู่ในระบบอย่างไม่เป็นระเบียบมากน้อยเพียงใด ยิ่งระบบมีความเป็นระเบียบมากเพียงใด เอนโทรปีก็จะลดลงเพียงนั้น

ให้  $S_1 = \text{เอนโทรปี ณ สภาวะเริ่มต้น}$

$S_2 = \text{เอนโทรปี ณ สภาวะสุดท้าย}$

และ  $\Delta S = S_2 - S_1$

$\Delta S = \text{การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี}$

$\Delta S$  เป็นปริมาณการวัดได้โดยให้ความร้อนแก่ระบบ เมื่อให้ความร้อนแก่ระบบ อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความเป็นระเบียบเริ่มลดลงหรือไม่เป็นระเบียบสูงขึ้น เอนโทรปี  $S_2$  มีค่าสูงขึ้น ( $\Delta S > 0$ ) และถ้าเพิ่มความร้อนขึ้นไปอีก ความไม่เป็นระเบียบมากขึ้นตามลำดับ  $S_2$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนั้นเห็นได้ว่า  $\Delta S = \text{แปรผันโดยตรงกับปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นให้กับระบบ}$

ถ้า  $\Delta S = \text{บวก}$  (ระบบมีความไม่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น)

ถ้า  $\Delta S = \text{ลบ}$  (ระบบมีความไม่เป็นระเบียบลดลงหรือความเป็นระเบียบเพิ่มขึ้น)

2.8.2 การหาค่าเอนทัลปีโดยใช้สมการของแวนท์ฮอฟฟ์

จากสมการของกิบส์และเฮลโมทซ์ นำไปสู่การคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่สมดุล (K) ตามสมการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (T) ได้ดังนี้คือ

$$d(\Delta G^0/T) = (\Delta H^0/T^2) / dT \quad (2.19)$$

ที่สภาวะสมดุล

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

ดังนั้น

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

$$d(\ln K) = (-\Delta H^0/RT^2) / dT \quad (2.20)$$

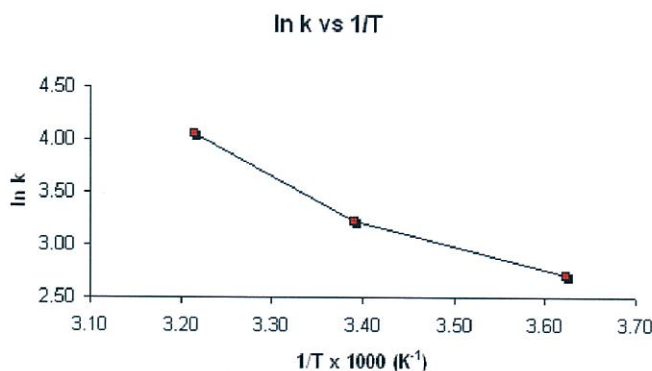
หรือ

$$d(\ln K) = (-\Delta H^0/R)d(1/T) \quad (2.21)$$

เรียกสมการที่ (2.19) ว่า สมการของแวนท์ฮอฟฟ์ (Van't Hoff equation) เมื่ออินทิเกรต สมการ (2.21) และสมมติว่า  $\Delta H^0$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนั้น

$$\ln K = (-\Delta H^0/R)d(1/T) + \text{ค่าคงที่} \quad (2.22)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง  $\ln K$  และ  $1/T$  จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในรูป (2.3) และจากค่าความชันของกราฟ สามารถนำไปคำนวณหา  $\Delta H^0$  ได้



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln K และ 1/T

ที่มา : <http://mmsphyschem.com/actEnergy.htm>

## 2.9 พลังงานอิสระและสมดุลเคมี (Thermodynamic and equilibrium)

กิบส์ (Josiah W. Gibbs) เป็นนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน ได้นำฟังก์ชันทางเทอร์โมไดนามิกส์อีกฟังก์ชันหนึ่งมาใช้ คือ G เรียกว่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) หรือ เรียกสั้นลงว่า พลังงานอิสระ มีนิยามดังนี้

$$G = H - TS \quad (2.23)$$

สังเกตว่าปริมาณทั้งหมดในสมการ (2.23) เป็นสมบัติของระบบ รวมทั้งอุณหภูมิ T ด้วยและจะเห็นว่า G มีหน่วยเป็นพลังงาน (ทั้ง H และ TS ก็มีหน่วยเป็นพลังงาน) และเป็นฟังก์ชันสถานะเช่นเดียวกับ H และ S

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ ( $\Delta G$ ) ของระบบในกระบวนการที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิคงที่ คือ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.24)$$

สรุปสถานะการเกิดปฏิกิริยาและสถานะที่ระบบจะอยู่ในสมดุลที่อุณหภูมิและความดันคงที่โดยอาศัยค่าของ  $\Delta G$  ได้ดังนี้

$\Delta G < 0$  ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางที่ไปข้างหน้า

$\Delta G > 0$  ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้ แต่เกิดขึ้นได้เองในทิศทางย้อนกลับ

$\Delta G = 0$  ระบบอยู่ในสมดุล ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

ในสมการ (2.24) ทำนายเครื่องหมายของ  $\Delta G$  นั้น เราจำเป็นต้องทราบค่าของ  $\Delta H$  และ  $\Delta S$  ถ้า  $\Delta H$  มีค่าเป็นลบ (ปฏิกิริยาคายความร้อน) และ  $\Delta S$  มีค่าเป็นบวก (ปฏิกิริยาทำให้ระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูงขึ้น)  $\Delta G$  มีแนวโน้มที่จะเป็นลบ แต่อุณหภูมิก็อาจมีผลต่อทิศทางของปฏิกิริยาด้วยว่าจะเกิดขึ้นได้เองในทิศทางใด ความสัมพันธ์ที่เป็นได้ 4 แบบ คือ

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

-ถ้าทั้ง  $\Delta H$  เป็นบวก และ  $\Delta S$  เป็นลบ  $\Delta G$  จะเป็นบวกเสมอไม่ว่าอุณหภูมิจะเป็นเท่าใดก็ตาม

-ถ้าทั้ง  $\Delta H$  เป็นลบ และ  $\Delta S$  เป็นบวก  $\Delta G$  จะเป็นลบเสมอไม่ว่าอุณหภูมิจะเป็นเท่าใดก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปโดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ถ้าทั้ง  $\Delta H$  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 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อเครื่องหมายของ  $G$  ในทั้ง 4 กรณี

H	S	G
+	+	ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองที่อุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิต่ำ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองได้ในทิศทางตรงกันข้าม
+	-	$G$ มีค่าเป็นบวกเสมอ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางตรงกันข้ามที่ทุกอุณหภูมิ
-	+	$G$ มีค่าเป็นลบเสมอ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองที่ทุกอุณหภูมิ
-	-	ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองที่อุณหภูมิต่ำ ที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นได้เอง

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐานของปฏิกิริยา คือ

$$\Delta G^{\circ} = G^{\circ} (\text{สำหรับผลิตภัณฑ์}) - G^{\circ} (\text{สารตั้งต้น})$$

$\Delta G^{\circ}$  ในสมการนี้ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อสารตั้งต้นในสภาวะมาตรฐานกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ในสภาวะมาตรฐานเช่นกัน สมมติว่าเราเริ่มปฏิกิริยาในสารละลายโดยให้สารตั้งต้นทุกชนิดอยู่ในสภาวะมาตรฐาน (คือความเข้มข้นเท่ากับ 1 M) ทันทีที่เกิดปฏิกิริยาขึ้น ทั้งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ก็จะไม่อยู่ในมาตรฐานอีกต่อไป เพราะต่างก็จะไม่มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 1 M ภายใต้สภาวะที่ไม่ใช่มาตรฐาน เราจะต้องทำนายทิศทางของปฏิกิริยาจาก  $\Delta G$  ไม่ใช่จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta G$  และ  $\Delta G^{\circ}$  คือ

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT \ln Q \quad (2.25)$$

เมื่อ  $R$  เป็นค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/K.mol)  $T$  เป็นอุณหภูมิสมบูรณ์ของปฏิกิริยา และ  $Q$  เป็นอัตราส่วนของปฏิกิริยา จากสมการนี้จะเห็นว่า  $\Delta G$  มีค่าขึ้นอยู่กับ  $\Delta G^{\circ}$  และ  $RT \ln Q$  สำหรับปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $T$  ใดๆ  $\Delta G^{\circ}$  จะมีค่าที่แน่นอนแต่ค่าของ  $RT \ln Q$  มีค่าที่ไม่แน่นอน เพราะ  $Q$  อาจเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบของสารในปฏิกิริยา เราพิจารณากรณีพิเศษ 2 วิธี ดังนี้คือ

กรณีที่ 1 ถ้า  $\Delta G^{\circ}$  มีค่าเป็นลบมาก พจน์  $RT \ln Q$  จะมีค่าไม่เป็นบวกมากพอที่จะหักล้างกับพจน์  $G^{\circ}$  ได้จนกว่าจะเกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้นมากพอ

กรณีที่ 2 ถ้า  $\Delta G^{\circ}$  มีค่าเป็นบวกมาก พจน์  $RT \ln Q$  จะมีค่าไม่เป็นลบมากกว่าความเป็นบวกของ  $G^{\circ}$  เฉพาะเมื่อมีสารผลิตภัณฑ์เพียงเล็กน้อยและสารตั้งต้นมีความเข้มข้นสูงมากเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ โดยนิยามแล้วที่สมดุล  $\Delta G = 0$  และ  $Q = K$  เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงที่สมดุลดังนั้นจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

หรือ

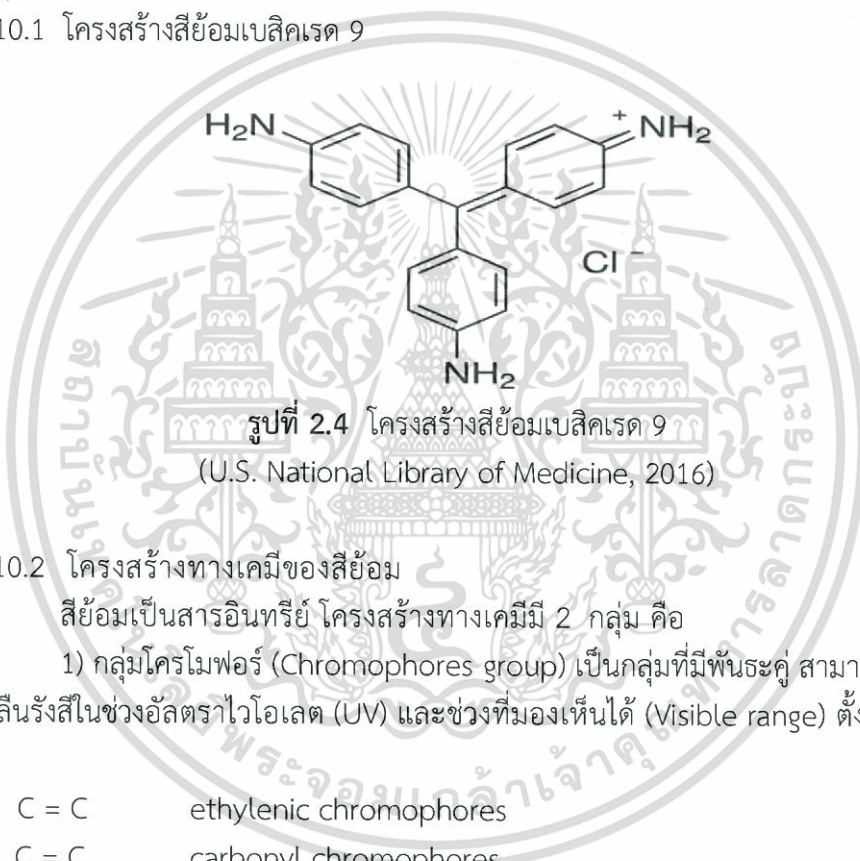
$$\Delta G^0 = -RT \ln K \quad (2.26)$$

สมการที่ (2.26) เป็นสมการที่สำคัญที่สุดสมการหนึ่งเพราะเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ ดังนั้น ถ้าทราบค่าของ K เราจะคำนวณค่า  $\Delta G^0$  ได้ หรือถ้าทราบค่าของ  $\Delta G^0$  ก็จะคำนวณหา K ได้เช่นกัน

## 2.10 สีย้อม (Dyestuff) (ชัยยุทธ์ ช่างสาร และเลิศณรงค์ ศรีพนม, 2543)

สีย้อม (Dyestuff) หมายถึง สารเคมีที่มีสี (Dyes) ที่สามารถเกาะติดเส้นใยได้ไม่หลุดออกง่าย ทำให้วัสดุนั้นมีสีเหมือนย้อม

### 2.10.1 โครงสร้างสีย้อมเบสิคเรด 9



รูปที่ 2.4 โครงสร้างสีย้อมเบสิคเรด 9  
(U.S. National Library of Medicine, 2016)

### 2.10.2 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารอินทรีย์ โครงสร้างทางเคมีมี 2 กลุ่ม คือ

1) กลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophores group) เป็นกลุ่มที่มีพันธะคู่ สามารถให้สีได้โดยการดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และช่วงที่มองเห็นได้ (Visible range) ตั้งแต่ 200-800 nm.

ตัวอย่าง	C = C	ethylenic chromophores
	C = O	carbonyl chromophores
	-N = O	nitroso chromophores
	-NO <sub>2</sub>	nitro chromophores
	-N = N-	azo chromophores

2) กลุ่มออกโซโครม (Auxochrome group) เป็นกลุ่มที่ทำให้สีเกาะติดกับเส้นใยปกติแล้ว หมายถึง ซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว และไม่สามารถดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นเกิน แต่เมื่อไปเกาะในตำแหน่งที่ติดกับโครโมฟอร์จะทำให้เกิด ทำให้โครโมฟอร์ดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น

ตัวอย่าง	-OH	hydroxyl
	-NH <sub>2</sub>	amino
	-COOH	carboxylic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้าอาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำ โมเลกุลสามารถกระจายตัว หรือสามารถเปลี่ยนเป็นสารที่ละลายในตัวกลางที่ใช้ให้สีสิ่งทอได้ บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยภายใต้สภาวะการย้อมและหลังจากซึมเข้าไป จะต้องอยู่ภายในเส้นใยได้ ซึ่งสีสามารถติดติดกับเส้นใยได้โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิด

1. พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond)
2. แรงไอออน (Ionic forces)
3. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds)
4. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waal's forces)

แรงดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลของสารอาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แต่แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดการยึดติดที่ดีที่สุด คือ พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างของโมเลกุลของสีย้อมก็มีผลต่อการย้อมอย่างมาก ถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีที่มีความคงทนสูงมากขึ้น (ชนิษฐา, 2558)

### 2.10.3 แหล่งกำเนิดของสีย้อม

1) สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyestuffs) สีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติเป็นหนึ่งในภูมิปัญญาไทยที่สืบทอดมาแต่โบราณ สีที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้ในยุคแรกของการใช้สีนั้นเป็นสีจากธรรมชาติที่ได้มาจากพืช สัตว์ ดิน และแร่ธาตุ ซึ่งใช้ย้อมผ้าใยธรรมชาติ ได้แก่ ลินิน ฝ้าย ขนสัตว์ และไหม มีการคัดสรรพันธุ์พืชหรือสัตว์ที่มีหลากหลายในท้องถิ่น ใช้เป็นวัตถุดิบให้สีแต่ละพันธุ์พืชที่ได้รับการพัฒนาจนใช้ย้อมได้สีคุณภาพดีสีไม่ตกและไม่ซีดจางง่าย โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ซึ่งต้นไม้อะไรก็ให้โทนสีต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของต้นไม้นั้นๆ และผ้าย้อมสีธรรมชาติมีลักษณะเด่นที่สีนุ่มนวล ไม่ฉูดฉาด ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้ไผ่ สีแดงจากดอกกรรณิการ์ สีแดงจากรากต้นเข็ม ส่วนสีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หามา เป็นต้น (ดร.ศรัณยา เกษมบุญญากร, 2555)

2) สีสังเคราะห์ (Synthetic dyestuff) หรือที่เรียกกันว่าสีเคมี เป็นสีที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารเคมีเพื่อให้ได้สีที่มีคุณสมบัติตามต้องการ มนุษย์เพิ่งรู้จักการใช้สีย้อมผ้าสังเคราะห์เมื่อปี ค.ศ. 1856 โดยนายวิลเลียม เพอร์กิน (William Perkin) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ พบวิธีสังเคราะห์สีม่วงโดยบังเอิญ ส่งผลให้ในเวลาต่อมา นักวิทยาศาสตร์สามารถค้นพบวิธีสังเคราะห์สีใหม่ๆ นับร้อยสี ปัจจุบันมีการผลิตสีสังเคราะห์ออกมามากมาย และสามารถแบ่งสีออกได้หลายประเภท เพื่อให้เหมาะกับเส้นใยแต่ละชนิด และกระบวนการย้อมซึ่งมีลักษณะต่างกัน จึงมีการจำแนกสีย้อมด้วยวิธีต่างๆ โดยวิธีที่นิยมมากที่สุด คือ การจำแนกสีตามการนำไปใช้ เพราะสีย้อมผ้าที่มีคุณภาพต้องมีความคงทนในการซัก มีความคงทนต่อแสงและต้องมีความคงทนต่อความร้อน (บุญรักษ์ กาญจนวรวณิษฐ์, 2553) ดังนั้นสีสังเคราะห์จึงเป็นสีที่มีคุณสมบัติเหมาะสำหรับการใช้ย้อมเส้นใยแต่ละประเภทและมีคุณสมบัติแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามสีที่ชาวบ้านส่วนใหญ่นิยมใช้กันเป็นสีสำเร็จรูป เช่น สีตราแมววิ่งรอบโลก ตราสิงโตเหยียบโลก เป็นต้น ซึ่งเป็นสีที่ย้อมง่าย หาซื้อสะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมนับทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูง ทำให้มีการพัฒนาทั้งทางด้านกระบวนการผลิตและการแข่งขันที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องใช้ร่วมกับวัตถุดิบในทุกขั้นตอนการผลิตไม่ว่าจะเป็นการผลิตเส้นใย การปั่น การทอ การถักผ้า และการฟอกย้อมก็ตาม โดยวัตถุดิบที่ใช้ เช่น สีย้อมผ้า สารเคมี เป็นต้น บางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดละลายน้ำไม่ได้ จึงทำให้น้ำมีสภาพที่แปรเปลี่ยนไปที่เราเรียกว่าน้ำเสีย เช่น อุณหภูมิสูงขึ้น มีกลิ่น มีสี ตลอดจนจนทำให้สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำตายเนื่องจากมีสารอินทรีย์ในน้ำปริมาณที่สูง ทำให้ขาดออกซิเจนและผลกระทบของน้ำเสียนี้ยังเป็นตัวยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ต่างๆ ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2559)

#### 2.10.4 การจำแนกประเภทของสีย้อม (Classification of dyes) (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2556)

สีย้อมสามารถจำแนกออกได้เป็นลักษณะใหญ่ได้ดังนี้ คือ

1. สีดิสเพอร์ส (Disperse dyes) เป็นสีที่ผลิตขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด (Cellulose acetate) และนำมาย้อมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ได้ด้วย เนื่องจากเส้นใยทั้งสองประเภทสามารถดูดน้ำได้น้อย สีดิสเพอร์สมีสมบัติทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีซีดง่ายหากถูกควั่นหรือกำขางชนิด สีประเภทนี้มีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่จะแขวนตัวเป็นละอองขนาดเล็กมากลอยตัวในน้ำเมื่อมีสารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) ที่เหมาะสมสามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดา ไม่ต้องใช้สารเคมีชนิดอื่นช่วย นอกจากสารพา (Carrier) ให้ตัวสีเข้าไปใกล้เส้นใยเท่านั้น

2. สีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำมีฤทธิ์เป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกซิล (OH-) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสถานะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 °C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ สมบัติการละลายและดูดติดเส้นใยของตัวสีทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใย และเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะยึดติดเส้นใย

3. สีเบสิก (Basic dyes) เป็นเกลือของด่างอินทรีย์ละลายน้ำได้ ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย มีโครโมฟอร์ (Chromophore) ให้ประจุบวก (Cation) บางครั้งเรียก สีแคทไอออน ถ้าย้อมเส้นใยเซลลูโลส เส้นใยต้องย้อมด้วยสารประกอบที่สามารถก่อรูปเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำกับตัวสีได้ก่อน เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นเสมือนหนึ่งสะพานเชื่อมโยงระหว่างตัวสีกับเส้นใย สารประกอบนี้เรียกว่า สารช่วยติด (Mordant) สีในกลุ่มนี้มีสีสดใส แต่ไม่ทนแสง

4. สีแอซิด (Acid dyes) คือ ตัวสีที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน ย้อมติดเส้นใยโปรตีนได้ในน้ำย้อมที่มีฤทธิ์กรดเจือจาง ใช้ย้อมเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน และเส้นใยโพลิเอไมด์ (Polyamide) เป็นต้น

5. สีมอร์แดนท์และพรีเมทัลไลซ์ (Mordant and premetallized dyes) เป็นสีแอซิดที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex) กับโลหะบางชนิดได้ โดยสารประกอบเชิงซ้อนที่ก่อรูปใหม่นี้ไม่ละลายน้ำ ตามทฤษฎีเชื่อกันว่า โครงสร้างของเส้นใยจะสามารถรวมตัวกับไอออนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะ ก่อรูปเป็นสารประกอบภายในทำให้สีมีความคงทนดีขึ้น ตัวสีเหล่านี้ยังคงเรียกว่า สีไดเรกต์ ส่วนที่เรียกว่า สีมอร์แดนที่ต้องเป็นกลุ่มสีซึ่งใช้ย้อมเฉพาะเส้นใยโปรตีน

6. สีไดเรกต์ (Direct dyes) เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่ติดเส้นใยฝ้ายได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยติด บางครั้งเรียกสีย้อมฝ้าย ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซ (AZO) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิค ซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ต้องการความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนัก

7. สีเอโซอิก (Azoic dyes) เป็นสีในกลุ่มสารประกอบเอโซเหมือนกัน แต่ตัวสีไม่ละลายน้ำ ก่อรูปเป็นสีบนเส้นใยได้โดยการย้อมด้วยสารประกอบฟินอล (Phenol) ซึ่งละลายน้ำได้ก่อน สีในกลุ่มนี้ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้น เพราะสารประกอบฟินอลเป็นอันตรายต่อเส้นใยโปรตีน

8. สีวัต (Vat dyes) เป็นสีที่มีความคงทนดีที่สุดในบรรดาสีที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยอาศัยสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมจึงจะติดเส้นใยเซลลูโลสได้ อย่างไรก็ตามไม่ใช่สีวัตทุกตัวจะมีความคงทนเหมือนกัน นอกจากนี้สีวัตสามารถใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน เส้นใยสังเคราะห์บางชนิดได้ด้วย

9. สีกำมะถัน (Sulphur or sulphide dyes) สีประเภทนี้ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้ดีเมื่อละลายในน้ำที่มีสภาพเป็นด่าง สีชนิดนี้ไม่สโตส

10. สีออกซิไดซ์ (Oxidation colorants) เป็นสีที่มีความคงทน แต่ไม่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม

11. สีโอเนียม (Onium dyes) เป็นสีพิกเมนต์ที่ละลายน้ำได้ โดยเลือกพิกเมนต์ที่มีสมบัติคงทนต่อสารเคมีและแสงนำมาปรับปรุงให้มีกลุ่มเคมีที่ละลายน้ำได้ นิยมใช้พิมพ์ผ้ามากกว่าย้อม

12. สีมินอรัล (Mineral colorants) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ไม่ละลายน้ำหลายชนิด นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

## 2.11 น้ำเสีย (Water Pollution) (วรภาสดี, 2558)

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมประเภทที่มีการใช้น้ำและสารเคมีจำนวนมาก ปัญหาใหญ่ที่พบและนับว่ามีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมคือ การปล่อยน้ำเสียจากโรงงานลงสู่สิ่งแวดล้อม น้ำเสียที่ปล่อยออกมาประกอบด้วยสี, คาบิโอดี, ค่าซีโอดี, กรด-ด่าง, สารแขวนลอย, ความร้อน และอื่นๆ ซึ่งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดการทำลายทัศนียภาพและเป็นที่น่ารังเกียจ มลสารส่วนใหญ่ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมนั้นมาจากกระบวนการย้อมสี (Dyeing) และการตกแต่งสำเร็จ (Finishing) โดยส่วนมากแล้วมลสารเหล่านี้และสีบางประเภทสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีต่างๆไป แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการดังกล่าว ซึ่งสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอกทีฟ, สีเอซิด, สีเบสิก, สีไดเรกต์, สีแวต, สีดีสเพอร์ส เป็นต้น ผลเสียที่เกิดขึ้นจากสีนอกจากจะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงามแล้วยังลดอัตราการนำเข้าสู่ของออกซิเจนที่เข้าสู่ผิวหน้าของแหล่งน้ำ และบดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ จะส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงทำให้สัตว์น้ำอาจตายได้ ดังนั้นการวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อมของโรงงานจึงมีความจำเป็นในการป้องกันปัญหามลพิษที่แหล่งกำเนิดและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้าย โดยมีการศึกษาเทคโนโลยีที่ใช้ในระบบบำบัด น้ำเสียเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งที่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนด และจากที่ทราบกันเป็นอย่างดีแล้วว่า สีที่อยู่ในน้ำทิ้งแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ยังสามารถมองเห็นได้ชัดเจนและทำความรำคาญให้ผู้ใช้แหล่งน้ำ สีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากมายหลายชนิดและแต่ละชนิดยากต่อการย่อยสลายโดยธรรมชาติ ปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีทั้งกระบวนการทางกายภาพและเคมีซึ่งบำบัดได้ไม่น้อย รวมทั้งมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ค่าใช้จ่ายในการบำบัด ตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัด เป็นต้น

### 2.11.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย (สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2552)

แหล่งที่มาของน้ำเสียนอกจากจะเกิดขึ้นจากน้ำใช้ในการกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีน้ำเสียที่เกิดจากน้ำหล่อเย็น น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อมหรือการพิมพ์

คือกระบวนการต้มแป้ง กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการฟอกขาว

กระบวนการชุบมัน กระบวนการย้อมสี การตกแต่งพิเศษ และกระบวนการพิมพ์ผ้า ซึ่งมีปริมาณน้ำเสียไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนค่อนข้างสูง

น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม

ซึ่งมีปริมาณมาก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยส่วนรวมแล้วต่ำกว่าน้ำเสีย

ในประเภทแรก

น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต

ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม ไม่ว่าจะเป็ขั้นตอนการเตรียมผ้าหรือเส้นใย ก่อนย้อม ขั้นตอนการฟอกย้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ ซึ่งน้ำใช้ในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างในระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต นอกจากนี้ น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตประเภทใหญ่ๆ คือ

1) น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ

มักจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการและเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนแก่สารละลายสีย้อมโดยตรง ก็จะเป็นการเพิ่มปริมาตรของสารละลายสีย้อม และจะถูกรวมเป็นน้ำเสียในที่สุด

2) น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น

มีบ่อยครั้งที่ทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมลงในเวลาอันสั้นซึ่งจะทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำหล่อเย็นนี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

3) น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน

ซึ่งในบางกรณีอาจเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงมาด้วย เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม

เป็นต้น

4) น้ำเสียจากแหล่งอื่น เช่น น้ำใช้ของคนงาน น้ำจากโรงอาหารและห้องน้ำ เป็นต้น

### 2.11.2 ปัญหามลพิษในอุตสาหกรรมฟอกย้อม (สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2552)

โครงสร้างของอุตสาหกรรมสิ่งทอมีลักษณะเป็นเครือข่ายเกี่ยวโยงกันจากอุตสาหกรรมต้นน้ำไปจนถึงปลายน้ำ ดังนั้นเมื่อส่วนหนึ่งส่วนใดมีปัญหาหรือเป็นจุดอ่อนก็จะกระทบกับโครงสร้างอุตสาหกรรมทั้งระบบในภาพรวม ฉะนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการแก้ไขปัญหาเพื่อให้การพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอดำเนินไปได้ด้วยดีทั้งระบบ ปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วยปัญหาอากาศเสีย น้ำเสีย กลิ่นเหม็น เสียงดัง สารเคมี รวมถึงของเสียที่เป็นของแข็ง เช่น เศษด้าย เศษผ้า เป็นต้น

กระบวนการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อให้ผ้าและเส้นด้ายมีสีสันทสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม และให้ความรู้สึกสบายต่อผู้สวมใส่ ซึ่งกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีและสีย้อมเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใย กระบวนการเหล่านี้มักอาศัยน้ำเป็นตัวกลางเกือบทุกขั้นตอน อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก

นอกจากนี้ในน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการฟอกย้อมแล้วจะมีสารเคมีปนเปื้อนอยู่ เนื่องจากมีการใช้สารเคมีต่างๆในกระบวนการผลิต เช่น สารทำความสะอาด สีย้อม สารช่วยย้อม ซึ่งสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมแต่ละแห่งหรือแม้แต่การฟอกย้อมประเภทเดียวกันแต่ต่างกันที่ขั้นตอน ก็จะมี ความแตกต่างของลักษณะน้ำเสียอย่างเห็นได้ชัด ขึ้นอยู่ประเภทของการผลิต การเลือกใช้สารเคมี เป็นต้น

### 2.11.3 ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยทั่วไป

มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ซึ่งมีสาเหตุจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใยและเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจะเป็นฝ้าคลุมผิวน้ำ และสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียนี้นักมีค่าบีโอดี ประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัม/ลิตร และค่า ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัม/ลิตร

มีค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) และค่าสภาพด่าง (Alkalinity) สูง โดยมีค่า pH ประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพความเป็นด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูน/ลิตร สารที่ทำให้ น้ำเสียฟอกย้อมมีค่า pH และค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน (Scouring)

มีอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในขั้นตอนที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการย้อม และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ

มีปริมาณทีเอส (หรือของแข็งละลายน้ำ) สูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือ โซเดียมและกรดต่างๆ

มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากในการย้อมสีของเส้นใย เส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อม และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสีย ในที่สุด ปริมาณของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

มีโลหะหนักเจือปน เนื่องจากการเจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

มีปริมาณทีเอสเอส (หรือของแข็งแขวนลอยทั้งหมด) สูง โดยเฉพาะเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งเศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมาก อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้

มีการปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายประเภทตามชนิดที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่จะมีคั่ง เหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.11.4 ประเภทสิ่งสกปรกของกระบวนการฟอกย้อม (ชนิษฐา, 2558)

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

##### 1. สารเคมีที่ใช้ในการขจัดสิ่งสกปรก อาทิเช่น

โซดาไฟ (Sodium hydroxide : NaOH) ทำปฏิกิริยากับไขมันโดยเปลี่ยนไขมันเป็นสบู่ที่ละลายน้ำได้ นอกจากนี้ยังทำให้เส้นใยขยายตัว สิ่งสกปรกต่างๆ ถูกขจัดออกง่ายขึ้น ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ได้แก่ ความร้อน นอกจากนี้ตัวยังช่วยกำจัดสารอื่นๆ อีก เช่น โปรตีน เพกทิน สารลงแป้งที่ตกค้าง เกลือแร่ต่างๆ ให้ละลายหลุดออกมา

น้ำสบู่ (Detergent) ทำหน้าที่กำจัดไขมันในลักษณะที่ทำให้เกิดอิมัลชัน (Emulsion) การกำจัดสิ่งสกปรกอื่นๆ ออกจากวัสดุรวมทั้งป้องกันมิให้ย้อมกลับไปติดบนวัสดุอีก น้ำสบู่แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ พวกไม่มีประจุไฟฟ้า พวกมีประจุลบ พวกมีประจุบวก และพวกมีทั้งประจุบวกและประจุลบ แต่ละกลุ่มจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป ได้แก่ ความสามารถในการแทรกซึม ความสามารถในการซักล้าง ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน

สารจับโลหะ (Complexing agent) เป็นพวกลิแกนด์ หรือคีเลต สารนี้สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะ เช่น  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  เป็นสารที่ละลายน้ำได้ในสภาวะต่าง ไอออนเหล่านี้จะเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำในสภาวะต่างปกติ ตะกอนไฮดรอกไซด์เหล่านี้มีผลเสียต่อการฟอกผ้าด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ไอออนเหล่านี้ นอกจากจะพบในน้ำแล้วยังพบว่ามาจากวัสดุด้วย เช่น ฝ้าย เป็นต้น

##### 2. สารเคมีที่ใช้ในการฟอกขาว อาทิเช่น

สารออกซิไดซ์ เป็นสารที่ทำให้สารอื่นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ สารประกอบเปอร์ออกไซด์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) โซเดียมเปอร์ออกไซด์ ( $Na_2O_2$ ) เป็นต้น สารประกอบไฮโปคลอไรท์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ( $NaClO$ ) และแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ ( $CaOCl_2$ ) เป็นต้น สารประกอบคลอไรท์ เช่น โซเดียมคลอไรท์ ( $NaOCl_2$ ) เป็นต้น

สารรีดิวซ์ เป็นสารที่ทำให้สารอื่นเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ ( $Na_2S_2O_4$ ) โซเดียมเมทาไบซัลไฟท์ ( $Na_2S_2O_6$ ) โซเดียมฟอร์แมลดีไฮด์ซัลฟอกซิเลต ( $HCHSO_2Na \cdot 2H_2O$ ) การฟอกขาวด้วยสารกลุ่มนี้จะได้ความขาวที่ไม่ถาวรเรียกว่า temporary white

#### 2.11.5 การลดของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

การลดของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นการลดปริมาณน้ำ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตและการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ จึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตอันเป็นผลให้เกิดการเสริมสร้างความสามารถในการแข่งขัน ให้แก่ผู้ประกอบการทั้งในส่วนของอุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ และส่งผลถึงอุตสาหกรรมสิ่งทอในภาพรวมด้วย นอกจากการเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันให้แก่ผู้ผลิตแล้ว การลดการใช้น้ำและการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานยังส่งผลดีต่อสภาวะสิ่งแวดล้อมอีกด้วย จึงนับได้ว่าวิธีการนี้เป็นกลยุทธ์ที่เป็นผลดีต่อทั้งผู้ประกอบการและส่วนรวม

#### 2.11.6 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า (นภา ศิวรังสรรค์, 2555)

วิธีการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียแต่ละวิธีจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีแตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อม และการเลือกใช้วิธีการกำจัดที่เหมาะสม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. โคนอกกุลเลชันด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสปีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักจะใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งสามารถใช้เป็นกระบวนการกำจัดขั้นต้นก่อนการบำบัดทางชีวภาพหรือวิธีการบำบัดอื่น ๆ สารช่วยสร้างตะกอนที่นิยมใช้ ได้แก่ ไอออนของอลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) แคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) และเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) (Mishra and Bajpai, 2016) เป็นต้น โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับสารช่วยสร้างตะกอนแต่ละชนิด ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นปัจจัยที่สำคัญเนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อความสามารถในการตกตะกอน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2552) โดยหากค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในสถานะที่เหมาะสมอาจไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยสร้างตะกอนมากเกินไป

### 2. ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation and Reduction)

การออกซิเดชัน-รีดักชันด้วยสารเคมีเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของกลุ่มโครโมฟอร์ที่ทำให้เกิดสีไปอยู่ในอีกรูปหนึ่งซึ่งมองไม่เห็นสีสารเคมีที่ใช้ในการออกซิเดชัน-รีดักชัน จะเสียดังจากศักยภาพในการออกซิไดซ์และรีดิวซ์ทางเคมี ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถ ในการเกิดการออกซิเดชัน จากการศึกษาที่ผ่านมาสารที่ใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ถูกนำมาใช้ ได้แก่ คลอรีน โอโซน และเพนตันรีเอเจนต์ เป็นต้น

คลอรีเนชัน (Chlorination) การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีนสามารถกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ เช่น สีย้อมรีแอคทีฟ สีย้อมแอซิด และสีย้อมไดเรกต์ แต่ไม่สามารถกำจัดสีย้อมดิสเพอร์ส ซึ่งเป็นสีที่ละลายน้ำได้ ถึงแม้ว่าการใช้คลอรีนในการบำบัดสีย้อมจะเป็นวิธีการที่มีราคาถูกแต่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษ

โอโซนเนชัน (Ozonation) การออกซิไดซ์ด้วยโอโซนเป็นการกำจัดสีย้อมที่เกิดจากการที่โอโซนไปออกซิไดซ์พันธะคู่ของหมู่โครโมฟอร์ในโมเลกุลของสีย้อม แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำที่อย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อมซึ่งส่วนใหญ่มักจะประกอบด้วยไนโตรเจน คลอรีน หรือซัลเฟอร์จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารตั้งต้นเดิม แต่มีข้อดีคือ สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมากได้และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย

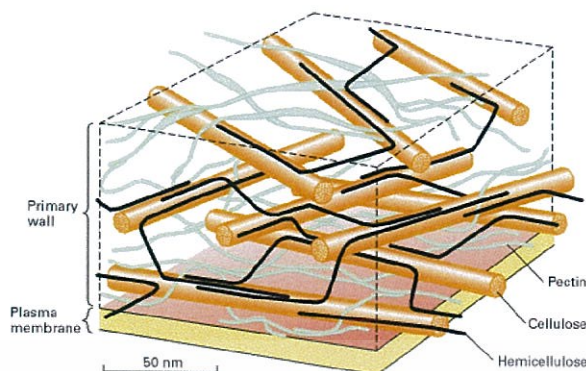
เพนตันรีเอเจนต์ (Fenton's reagent) เพนตันรีเอเจนต์เป็นสารเคมีที่เกิดจากการผสมกันระหว่างเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) การกำจัดสีย้อมโดยเพนตันรีเอเจนต์เกิดจากการที่เพนตันรีเอเจนต์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เมื่อทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ( $OH\cdot$ ) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงมาก (Meric, 2013)

### 3. เทคโนโลยีเยื่อกรอง (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีย้อมด้วยเยื่อกรองสามารถใช้ในการกำจัดสีย้อมที่ละลายและไม่ละลายน้ำได้ (Cheremisinoff, 2014) อีกทั้งสามารถนำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ กระบวนการกำจัดสีย้อมด้วยเยื่อกรอง เช่น ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) และนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) โดยทั่วไปแล้วเทคนิคการกำจัดสีย้อมโดยใช้เยื่อกรองนี้ จะเป็นการทำให้โมเลกุลของสีย้อมรวมกันอย่างหนาแน่นบนด้านหนึ่งของเยื่อกรองในขณะที่น้ำจะผ่านทะลุเยื่อกรองไปได้ ซึ่งสามารถแยกขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ได้ไม่เพียงเฉพาะโมเลกุลสีย้อมเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.12 องค์ประกอบของเซลล์พืช



รูปที่ 2.5 โครงสร้างและองค์ประกอบของเซลล์พืช (G. R. Kantharaj, 2008)

ส่วนประกอบของเซลล์ที่พบเฉพาะในพืช (ชุติกาญณ์ โภคินพลวัฒน์, 2554)

2.12.1 ผนังเซลล์ (Cell wall) เป็นส่วนที่อยู่ภายนอกเยื่อหุ้มเซลล์ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นจำนวนมาก เมื่อสร้างใหม่ๆผนังเซลล์จะมีลักษณะบาง ต่อมาจะหนาขึ้นเพราะมีการสะสมสารต่างๆ โดยชั้นใหม่ที่เกิดขึ้นจะติดกับส่วนของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้ชั้นเก่าถูกดันห่างออกจากโปรโตพลาสต์ ชั้นใหม่นี้เรียกว่าผนังเซลล์ชั้นที่สอง (Secondary cell wall) ซึ่งจะมีความหนาไม่เท่ากันตลอด ทำให้เกิดลักษณะที่เป็นรูเปิด เพื่อให้สารต่างๆ เคลื่อนผ่านได้เรียกว่า พิต (Pit) ผนังเซลล์มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ

2.12.1.1 ไมโครไฟบริลลา โพลีแซคคาไรด์ (Microfibrillar Polysaccharides) ซึ่งกลุ่มที่พบมากที่สุด คือ เซลลูโลส (Cellulose) และไคติน (Chitin)

2.12.1.1.1 เซลลูโลส เป็นลูกโซ่ของ ดี-กลูโคส (D-glucose) ซึ่งเรียงตัวเกาะกันแบบ b-1, 4-glycosidic bond ซึ่งมีความยาวต่างกันไป แต่โดยปกติจะมีกลูโคสอยู่ประมาณ 2,000-14,000 หน่วย ยาวประมาณ 1-7gmm. และจับกับลูกโซ่ข้างเคียงด้วยแขนแบบไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ทำให้เกิดเป็นลักษณะที่เรียกว่า ไฟบริล (Fibrils) ซึ่งหนาไม่เกิน 2500 A และยาวหลายไมโครเมตร แต่ละไฟบริลจะเรียงต่อกันด้วยไฮโดรเจนบอนด์ ซึ่งทำให้เกิดการติดกันขึ้นมา เซลลูโลสจะฝังตัวอยู่ในของเหลวที่มีรูปร่างไม่แน่นอนเรียกแมทริกซ์โพลีแซคคาไรด์ ส่วนของไฟบริลจะทนต่อการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์และสารเคมี ผนังเซลล์จึงมีหน้าที่ป้องกันอันตรายและเพิ่มความแข็งแรงให้กับเซลล์ พืชในพืชชั้นต่ำที่มีเซลลูโลสน้อย เช่น เชื้อราจะมีไคติน (Chitin) ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

2.12.1.1.2 ไคติน เป็นส่วนประกอบที่พบมากในผนังเซลล์ของเชื้อรา และเป็นส่วนประกอบของสัตว์ที่ไม่มีกระดูกสันหลัง โมเลกุลของไคตินจะเรียงต่อกันยาว โดยไม่แตกสาขาสารประกอบทางเคมีเป็นพวก N-acetyl-D-glucosamine โดยเกาะกันแบบ b-1, 4-glycosidic bond ทำให้เกิดเป็นไฟบริลเช่นเดียวกับเซลลูโลส

2.12.1.2 แมทริกซ์ โพลีแซคคาไรด์ (Matrix polysaccharides) ส่วนนี้จะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และเพคติน (Pectin) ซึ่งแยกออกจากกันโดยคุณสมบัติในการละลายน้ำ เพราะเพคตินนั้นสามารถแยกได้โดยการต้มกับน้ำเป็นเวลานาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เอมิเซลลูโลสนั้นต้องแยกโดยใช้โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์แมทริกซ์โพลีแซคคาไรด์มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ทำหน้าที่หุ้มห่อส่วนของไมโครไฟบริลลาโพลีแซคคาไรด์

2.12.1.2.1 เอมิเซลลูโลส ชื่อของเอมิเซลลูโลสนั้นใช้เรียกเมื่อพบโพลีแซคคาไรด์ชนิดนี้ใหม่ ๆ ซึ่งเข้าใจว่าเป็นสารเริ่มต้นที่จะทำให้เกิดเซลลูโลส ซึ่งในปัจจุบันพบว่าไม่จริงเอมิเซลลูโลสประกอบด้วยไซแลนซ์ (Xylans) ซึ่งมีน้ำตาลไซโลส (Xylose) แมนแนน (Mannans) ซึ่งมีน้ำตาลแมนโนส (Mannose) และ กาแลกแตน (Galactans) ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) นอกจากนี้ยังมีกลูโคแมนแนน ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลแมนโนส ไซโลกลูแคน ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคส และแคลโลส (Callose) จัดเป็นเอมิเซลลูโลสซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่เกาะกันแบบ b-1, 3-glycosidic bond ซึ่งจะพบบริเวณปลายเซลล์ของท่ออาหาร (Sieve tubes)

2.12.1.2.2 เพคติน ทำหน้าที่เชื่อมให้เซลลูโลสติดกัน เป็นส่วนประกอบที่มีมากในส่วนมิดเดิลลามেলা (Middle lamella) นอกจากนี้เพคตินยังเกิดในน้ำผลไม้ต่างๆ สารเคมีที่พบในเพคตินคือ กรดแอลฟา ดี กาแลคตูโรนิก ( $\mu$ -D-galacturonic acid) อะราบิแนนส์ (Arabinans) และกาแลคแตนส์ (Galactans)

2.12.1.3 ลิกนิน (Lignins) การเกิดลิกนินในพืชผักจะควบคู่ไปกับเนื้อเยื่อที่ทำหน้าที่ค้ำจุน และท่อลำเลียงอาหาร จะพบในผนังเซลล์ทุติยภูมิ ซึ่งตายแล้วการเกิดลิกนินทำให้เซลล์แข็งแรง ทำให้ไฟบริลไม่เคลื่อนที่และป้องกันอันตรายให้ไฟบริลด้วย อาจพบลิกนินในเนื้อผลไม้บางชนิด เช่นฝรั่งและละมุด ลิกนินประกอบด้วยสารเคมีที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง พวกฟีนอลิกส์ (Phenolics) ลิกนินทำให้เซลล์เกิดความแข็งแรงมากขึ้นและต้านทานต่อสารเคมีและการกระทบกระเทือนต่างๆ

2.12.1.4 โปรตีน ในการพบโปรตีนในผนังเซลล์นั้นระยะแรกเข้าใจว่าเกิดจากการปนเปื้อนมาจากส่วนของไซโตพลาสต์ (Cytoplasm) แต่ในปัจจุบันได้มีการสรุปแน่ชัดแล้วว่า ในเซลล์ที่กำลังเจริญเติบโตจะมีโปรตีนในผนังเซลล์ ประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประกอบด้วยเอนไซม์พวกไฮโดรเลส (Hydrolases) กลูคาเนส (Glucanase) เพคติน เมทิลเอสเตอเรส (Pectin Methylsterase) และเอทีพีเอส (ATPase) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีโปรตีนที่เป็นโครงสร้างเป็นพวกไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) ซึ่งประกอบด้วยไฮดรอกซีโพรลีนเป็นส่วนใหญ่ (Hydroxyproline) โดยเกาะกับโพลีแซคคาไรด์แบบ Non covalent bond

2.12.1.5 น้ำ เป็นส่วนประกอบที่พบในส่วนของเพคตินที่มีลักษณะเป็นวุ้น (Gel) และยังทำหน้าที่ลดปริมาณของไฮโดรเจนบอนด์ที่เกาะกันระหว่างไฟบริลและเอมิเซลลูโลส ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำจะทำให้การติดกันของไฟบริลกับเอมิเซลลูโลสเปลี่ยนไปและน้ำยังเป็นตัวทำลายสารเคมีในผนังเซลล์ด้วย โดยเฉพาะขณะที่เซลล์ขยายตัว

2.12.1.6 ส่วนที่หุ้มห่อภายนอก (Incrusting substances) สิ่งที่หุ้มห่อข้างนอกของผนังเซลล์ของเซลล์ผิว (Epidermis) จะเป็นสารพวกคิวติเคิล (Cuticle) เพื่อช่วยลดการสูญเสียน้ำหรือรับน้ำเพิ่มมากขึ้นและยังป้องกันอันตรายจากสารเคมีและเชื้อจุลินทรีย์ได้ด้วย นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอินทรีย์บางชนิดพบในผนังเซลล์ของพืชบางชนิด สารเหล่านี้ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมซิลิเกต เป็นต้น สามารถแบ่งผนังเซลล์ออกได้เป็น 3 ชนิด ด้วยกันคือ

2.12.1.6.1 ผนังเซลล์ชั้นที่หนึ่งหรือผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary cell wall) เกิดขึ้นหลังจากที่เซลล์หยุดการขยายตัวแล้ว จะทำหน้าที่หุ้มห่อเยื่อหุ้มเซลล์อยู่อีกที่หนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.1.6.2 ผนังเซลล์ชั้นที่สองหรือผนังเซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell wall) คือผนังเซลล์ที่อยู่ระหว่างผนังชั้นที่หนึ่ง และเยื่อหุ้มเซลล์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนินเป็นส่วนใหญ่

2.12.1.6.3 มิติเตลามาเลลา คือ ส่วนที่เป็นผนังร่วมของเซลล์สองเซลล์ที่อยู่ติดกันเป็นส่วนของผนังเซลล์ที่เกิดขึ้นในขณะที่เซลล์แบ่งเป็นสองเซลล์ ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมเซลล์สองเซลล์ให้ติดกัน ประกอบด้วยสารเพคติน

2.12.2 คลอโรพลาสต์ (Chloroplast) เป็นพลาสติก ที่มีสีเขียวพบเฉพาะในเซลล์พืช และสาหร่าย เกือบทุกชนิด พลาสติกมีเยื่อหุ้มสองชั้นภายในโครงสร้างพลาสติก จะมีเม็ดสีหรือรงควัตถุบรรจุอยู่ ถ้ามีเม็ดสีคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) เรียกว่า คลอโรพลาสต์ ถ้ามีเม็ดสีชนิดอื่นๆ เช่น แคโรทีนอยด์ เรียกว่า โครโมพลาสต์ ถ้าพลาสติกนั้นไม่มีเม็ดสี เรียกว่า ลิวโคพลาสต์ (Leucoplast) ทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บสะสมโปรตีนหรือเก็บสะสมแป้งที่เรียกว่า เม็ดสี (Starch grains) เรียกว่า Amyloplast ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารคลอโรฟิลล์ ภายในคลอโรพลาสต์ประกอบด้วยส่วนที่เป็นของเหลว เรียกว่า สโตรมา (Stroma) มีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสงแบบที่ไม่ต้องใช้แสง (Dark reaction) มี DNA RNA และไรโบโซม และเอนไซม์อีกหลายชนิดปะปนกันอยู่ในของเหลว เป็นเยื่อลักษณะคล้ายเหรียญที่เรียงซ้อนกันอยู่ เรียกว่า กรานา (Grana) ระหว่างกรานาจะมีเยื่อเมมเบรนเชื่อมให้กรานาติดต่อกัน เรียกว่า อิกเตอร์กรานา (Intergrana) หน่วยย่อย ซึ่งเปรียบเสมือนเหรียญแต่ละอันเรียกเหรียญแต่ละอันว่า กรานาลาเมลลา (Grana lamella) หรือ กรานาไทลาคอยด์ (Grana thylakoid) ไทลาคอยด์ในตั้งเดียวกัน ส่วนที่เชื่อมติดกัน เรียกว่า สโตรมา ไทลาคอยด์ (Stroma thylakoid) ไม่มีทางติดต่อกันได้ แต่อาจติดกับไทลาคอยด์ในตั้งอื่น หรือกรานาอื่นได้ทั้งกรานา และอินเตอร์กรานา เป็นที่อยู่ของคลอโรฟิลล์ รงควัตถุอื่นๆ และพวกเอนไซม์ ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง แบบที่ต้องใช้แสง (Light reaction) บรรจุอยู่ หน้าที่สำคัญของคลอโรพลาสต์ คือ การสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) โดยแสงสีแดง และแสงสีน้ำเงินเหมาะสม ต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงมากที่สุด

## 2.13 ผักตบชวา (Water Hyacinth)

ผักตบชวาถูกนำเข้ามาในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2444 ในสมัยรัชกาลที่ 5 โดยนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซียในฐานะเป็นไม้ประดับสวยงาม โดยเจ้านายฝ่ายในที่ตามเสด็จประพาสประเทศอินโดนีเซีย ได้เห็นพืชชนิดนี้มีดอกสวยงาม จึงนำกลับมาปลูกในประเทศไทย และใส่อ่างดินเลี้ยงไว้หน้าสนามวังสระปทุม จนกระทั่งเกิดน้ำท่วมวังสระปทุมขึ้น ทำให้ผักตบชวาลุดลอยกระจายไปตามแม่น้ำลำคลองทั่วไป และแพร่พันธุ์อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

ลักษณะ ใต้น้ำ มีไหลทอดเลื้อยไปตามผิวน้ำ ต้นอวบน้ำ ใบรูปไข่ค่อนข้างกลม สีเขียวเป็นมัน ก้านใบพองออกเพื่อช่วยให้ลอยน้ำได้ ดอกออกเป็นช่อที่ปลายยอด กลีบดอกบาง 6 กลีบ สีฟ้าอมม่วง กลีบบนขนาดใหญ่ และมีแต้มสีเหลืองกลางกลีบ ออกดอกปลายฤดูหนาวถึงต้นฤดูร้อน ขยายพันธุ์ แยกต้นอ่อนที่ปลายไหลไปปลูก

ผักตบชวาที่พบขึ้นตามแหล่งน้ำแฉะ หรือมีโคลนตม ก้านใบจะไม่มีลักษณะพองโป่ง รากจะยึดติดกับผิวดินแน่น ผักตบชวาสามารถสืบพันธุ์ได้ 2 วิธี คือ โดยอาศัยเพศ และไม่อาศัยเพศ

2.13.1. การสืบพันธุ์โดยอาศัยเพศ จะต้องอาศัยเมล็ดที่เกิดจากการผสมเกสรของดอก เมื่อเมล็ดหลุดลอยออกจากกระเปาะแล้วจะถูกกระแส น้ำพัดไป หรือจมอยู่ในโคลนใต้น้ำ เนื้อที่ 1 ไร่ มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผักตบชวาถึง 18 ล้านเมตร มีชีวิตอยู่ได้นานถึง 15 ปี หากสภาพแวดล้อม เหมาะสมก็งอกได้ทันทีและเจริญเป็นผักตบชวา แต่ก้านไม่พองโป่ง รากฝอยจะยึดกับโคลนตมแน่น เมื่อถูกน้ำท่วมอย่างฉับพลัน จะตายได้ เมล็ดที่อยู่ในระดับความลึกจากผิวน้ำ 2-3 เซนติเมตร เมื่องอกแล้วจะค่อยๆ ลอยสู่ผิวน้ำในเวลา 5 สัปดาห์ จะเห็นก้านใบพองโป่งอย่างชัดเจน ระบบรากเจริญอย่างรวดเร็วในเวลาต่อมา การงอกของเมล็ดต้องอาศัยอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 2 องศาเซลเซียส และอาศัยแสงสว่างช่วย

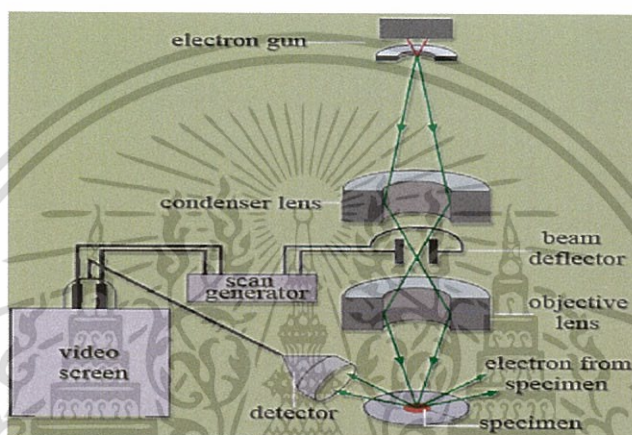
2.13.2. การสืบพันธุ์โดยไม่อาศัยเพศ จะต้องอาศัยไหลที่แตกต้นแม่ ทำให้ได้ต้นใหม่จำนวนมากมาย ผักตบชวาเพียง 10 ต้น สามารถแตกไหลได้ถึง 600,000 ต้น ภายในเวลา 6 เดือน นับว่าขยายพันธุ์ด้วยวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพดียิ่ง

ผักตบชวามีความสามารถพิเศษในการเจริญเติบโตและแพร่ระบาดอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีรากหุ้มลำต้น ทำให้ปลอดภัยจากความหนาวเย็น อยู่บนบกได้นาน 3 สัปดาห์ ถึงแห้งตาย ลำต้นแตกไหลได้ดีมาก รากมีประสิทธิภาพสูงในการดูดอาหารผลิตเม็ดได้มากมาย มีใบใหญ่เรียงตัวอย่างมีระเบียบเพื่อรับแสงแดด และนำมาปรุงอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ผักตบชวาสามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทั้งในน้ำสกปรกและน้ำสะอาด เจริญเติบโตได้ดีที่ pH 4-10 และอุณหภูมิของน้ำไม่สูงกว่า 34 °C และในต้นพืชจะมีน้ำเกลือประมาณร้อยละ 95 (ในใบร้อยละ 89 และในก้านใบร้อยละ 96.7) ผักตบชวาช่วยในการบำบัดน้ำเสีย โดยอาศัยคุณสมบัติทำหน้าที่เป็นตัวกรอง ผักตบชวาที่ขึ้นอยู่อย่างหนาแน่น เปรียบได้กับการบรรจุวัสดุพรุน ซึ่งกรองน้ำที่ไหลผ่านกอผักตบชวาอย่างช้าๆ จึงทำให้ของแข็งแขวนลอยต่างๆ ที่ปนอยู่ในน้ำถูกสกัดกั้น นอกจากนั้น ระบบรากที่มีจำนวนมาก ช่วยกรองสารอินทรีย์ที่ละเอียด และจุลินทรีย์ที่อาศัยเกาะอยู่ที่ราก ช่วยดูดสารอินทรีย์ไว้ด้วยอีกทางหนึ่ง รากผักตบชวาจะดูดสารอาหารที่อยู่ในน้ำ ถ้าเลี้ยงไปยั้งใบเพื่อสังเคราะห์แสง ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจึงถูกกำจัดไป อย่างไรก็ตามไนโตรเจนในน้ำเสียนั้น ส่วนมากจะอยู่ในรูปสารประกอบทางเคมี เช่น สารอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน พบว่า ผักตบชวาสามารถดูดไนโตรเจนได้ทั้ง 3 ชนิด แต่ในปริมาณที่แตกต่างกันคือ ผักตบชวาสามารถดูดอินทรีย์ไนโตรเจนได้สูงกว่าไนโตรเจนในรูปอื่นๆ คือ ประมาณร้อยละ 95 ขณะที่ไนเตรทไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนจะลดลงประมาณร้อยละ 80 และร้อยละ 77 ตามลำดับ แต่การใช้ผักตบชวาบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง จะส่งผลให้ผักตบชวาเจริญเร็วขึ้น และปกคลุมพื้นที่ผิวน้ำมากขึ้น จึงควรมีการดูแลระบบเก็บต้นที่เจริญเต็มที่ขึ้นจากน้ำอย่างสม่ำเสมอ ไมเช่นนั้น เมื่อผักตบชวาตาย จะเน่าอยู่ในน้ำ ทำให้น้ำเสียนั้นมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นอีก นอกจากนี้รากของผักตบชวามีแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนแแกรมลบ คือ *Azospirillum* spp. และมีคุณสมบัติพิเศษ สามารถตรึงไนโตรเจนได้ประมาณ 2.5 กิโลกรัม/เฮคเตอร์/วัน

ผักตบชวาทำความเสียหายให้กับนาข้าว โดยบดบังแสง เป็นที่อาศัยของศัตรูข้าวสร้างปัญหาทางการประมง ชลประทาน การไฟฟ้าพลังน้ำ การคมนาคม การท่องเที่ยวและการสาธารณสุข รัฐบาล ต้องจ่ายเงินปีละมาก ๆ เพื่อกำจัด อย่างไรก็ตามผักตบชวายังใช้เป็นอาหารสัตว์ ผลิตภัณฑ์ หุงต้ม เป็นวัสดุเพาะเห็ดฟาง ที่สำคัญมีความสามารถในการดึงดูดสารประกอบอินทรีย์ และอนินทรีย์ที่เป็นตัวทำให้น้ำเสีย จึงใช้ผักตบชวาเป็นตัวแก้ปัญหาน้ำเสียได้เป็นอย่างดี

## 2.14 Scanning Electron Microscope (SEM) (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2556)

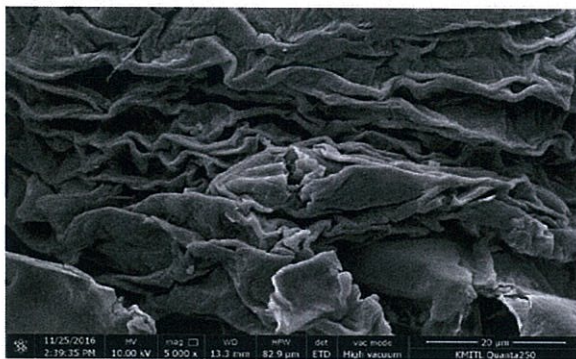
Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัญญาณและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของเครื่อง SEM

ที่มา <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scanning-eletron-microscopysem-.html>

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

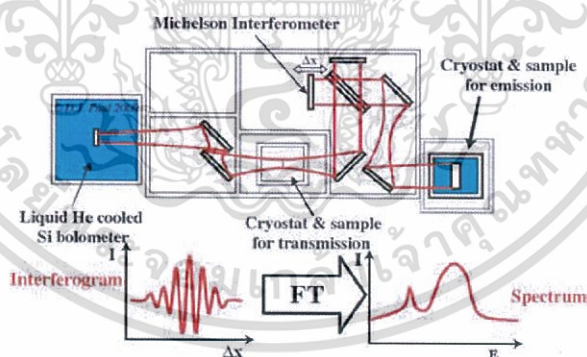


รูปที่ 2.7 พื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่มา <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/41-sem-th>

ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่อง SEM จะมีความรวดเร็วและใช้งานง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก

## 2.15 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) (ศูนย์นวัตกรรมวัสดุ, 2557)

เป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันในสาร นิยมใช้เป็นเทคนิคสำหรับหาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น สารที่วิเคราะห์อาจจะมี หมู่ hydroxyl (-OH), methyl (-CH<sub>3</sub>) หรือ carbonyl (-CO) จะใช้ช่วงค่า Wave number ที่ 4000-600 cm<sup>-1</sup>



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของเครื่อง FT-IR

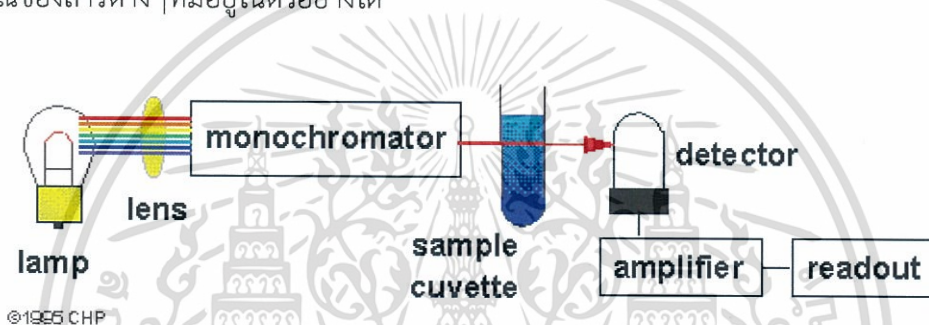
ที่มา <http://www.internetdict.com/th/answers/what-is-ftir.html>

หลักการทำงานของเครื่องรังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดจะถูกฉายไปยัง Interferometer ซึ่งตัวที่นิยมใช้ คือ Michelson Interferometer ซึ่งประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ กระจกที่ตรึงอยู่กับที่ โดยทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์กึ่งสะท้อนแสง โดยส่วนใหญ่ทำมาจากการนำฟิล์มบางของ เจอร์มาเนียม วางลงบน KBr ที่ตัวแยกแสง ลำรังสี หนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นลำรังสีก็จะสะท้อนจากกระจกกลับมาวมกันที่ตัวแยกแสง เกิดการแทรกสอดขึ้น หลังจากนั้นลำรังสีก็จะผ่านไปอย่าง และในที่สุดก็จะตกลงบนเครื่องตรวจจับ โยขนด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.16 UV-VIS Spectrophotometer (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2556)

### 2.16.1 หลักการของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า Intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



รูปที่ 2.9 แผนภาพเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์อย่างง่าย  
ที่มา <http://elchem.kaist.ac.kr/vt/chem-ed/spec/uv-vis/uv-vis.htm>

### 2.16.2 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

#### 1) แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย แหล่งกำเนิดแสงมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ซึ่งต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าดูดกลืนแสง

ตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสง ช่วง UV ใช้หลอด H<sub>2</sub> and D<sub>2</sub> lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm. ชนิดของสเปกโทรสโกปี UV molecular absorption และช่วง Visible ใช้หลอด Tungsten/Halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm. ชนิดของสเปกโทรสโกปีเป็นแบบ UV/Visible/Near-IR molecular absorption

#### 2) Monochromator

ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสงซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว ใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี) ปริซึม (Prism) หรือ เกรตติ้ง (Grating)

#### 3) เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง

เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (Cell sample) บางครั้งอาจเรียกว่า คิวเวตต์ (Cuvettes)

รูปแบบที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้ว ค้ำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธรรมดาถูกดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอตซ์ (Quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวี และวิสิเบิล

#### 4) Detector

ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (Silicon diode detector)

### 2.17 American Dye Manufacturers Institute (ADMI) (ญาติา มุขแจ้จ, 2555)

ADMI ย่อมาจาก American Dye Manufacturers Institute ถือเป็นหน่วยมาตรฐานในการวัดค่าสี เพื่อตรวจสอบการปนเปื้อนของสีย้อมและเม็ดสีในน้ำเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเสียจากกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอกระดาษ อาหาร พลาสติก และเครื่องสำอาง เนื่องจากกลุ่มอุตสาหกรรมเหล่านี้มีการใช้สีย้อมสังเคราะห์และเม็ดสีจำนวนมาก ซึ่งสีเหล่านี้อาจประกอบไปด้วยสารต่อต้านจุลินทรีย์และสารออกซิไดซ์ นอกจากนี้สีย้อมบางชนิด อาจก่อให้เกิดการระคายเคือง การกลายพันธุ์ และโรคมะเร็งในมนุษย์ได้

คุณลักษณะของสีสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

1. Hue คือ สีที่ตามองเห็นไม่ว่าจะเป็นสีเหลือง แดง น้ำเงิน เขียว หรืออื่นๆ
2. Chroma คือ เฉดสี แบ่งเป็นมืด/สว่างเช่น สีน้ำเงินเป็นสีในเฉดมืด และสีเหลืองเป็นสีที่สว่าง
3. Color Value คือ ปริมาณของสี (Amount of color) แบ่งเป็นเข้ม/จาง (Dark/Light) ถ้ามีปริมาณเนื้อสีมาก ก็จะมีความเข้มสีมาก เป็นต้น

การวัดค่าสีในหน่วย Platinum-Cobalt จะวัดค่าสีเฉพาะหน่วยสีที่เป็นสีเหลือง (Yellow) เท่านั้น ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดค่าสีในแหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติมักจะมีเฉดเป็นสีเหลืองถึงสีส้ม ในขณะที่การวัดค่าสีในหน่วย ADMI จะตรวจวัดปริมาณของสี (Color value) ในทุกหน่วยสี ไม่นับที่สีใดสีหนึ่ง โดยการตรวจวัดจะเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน EPA เลขที่ 110.1 หลักการตรวจวัดค่าสีในหน่วย ADMI เนื่องจากการวัดค่าสีในหน่วย ADMI มีการตรวจวัดค่าสีในทุกๆ หน่วยสี ดังนั้นจึงมีความสลับซับซ้อนกว่าการวัดค่าสีในหน่วย Platinum-Cobalt การวัดค่าสีในหน่วย ADMI มีการพัฒนามาจากหลักการวัดค่าสีแบบ Tristimulus filter method โดยจะมีการตรวจวัดค่าแสงส่องผ่าน (Transmittance) ที่ 3 ความยาวคลื่นตามหลักการของ Tristimulus filter method เพื่อให้ได้ค่า Tristimulus value (X, Y และ Z) ตามสมการที่ 1 เมื่อ T1, T2 และ T3 คือค่าการส่องผ่านแสงที่ความยาวคลื่นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากนั้นจะมีการแปลงค่า Tristimulus value ที่ได้ให้กลายเป็นค่าสีชนิดตัวเลขเดียวโดยใช้ Adam Nickerson Chromatic Value Formula ดังสมการที่ 2 ได้เป็นค่า Intermediate value (DE) ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณค่า Calibration factor (F) ดังสมการที่ 3 และนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณค่าสีในหน่วย ADMI ตามสมการที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สมการที่ 1  $X = (T3 \times 0.1899) + (T1 \times 0.791)$   
 $Y = (T2)$   
 $Z = (T3 \times 1.1835)$
- สมการที่ 2  $DE = \{(0.23 \text{ } V_y)^2 + [(V_x - V_y)]^2 + [0.4 \text{ } (V_y - V_z)]^2\}^{1/2}$   
 $V_y = V_{ys} - V_{yc}$   
 $(V_x - V_y) = (V_{xs} - V_{ys}) - (V_{xc} - V_{yc})$   
 $(V_y - V_z) = (V_{ys} - V_{zs}) - (V_{yc} - V_{zc})$   
 $s = \text{Sample (น้ำตัวอย่าง)}$   
 $c = \text{Blank (distilled water)}$
- สมการที่ 3  $F_n = (APHA)_n(b)/(DE)_n$
- สมการที่ 4  $ADMI = (F)(DE)/b$

เห็นได้ว่าตัวเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้ในการวัดค่าสี ถูกกำหนดให้มีการใช้สารมาตรฐาน Platinum-Cobalt ในการตรวจสอบความแม่นยำของตัวเครื่องได้ เนื่องจากในการคำนวณค่าสีในหน่วย ADMI จะมีการนำค่าสีในหน่วย Platinum-Cobalt หรือที่บางครั้งเรียกว่า APHA มาใช้ในการคำนวณ ดังที่เห็นในสมการที่ 3 นอกจากนี้ค่าสีในหน่วย ADMI จะขึ้นอยู่กับระยะทางเดินแสงหรือ Light path (b) ดังสมการที่ 4 ดังนั้นจึงมีข้อกำหนดในการตรวจวัดที่ว่า

หากค่าสีในน้ำตัวอย่างอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 250 ADMI ให้ใช้ Sample cell ที่มีทางเดินแสงขนาด 5 เซนติเมตร

หากค่าสีในน้ำตัวอย่างอยู่ในช่วงที่สูงกว่า 250 ADMI ให้ใช้ Sample cell ที่มีทางเดินแสงขนาด 1 เซนติเมตร

ในการวัดค่าสีในหน่วย ADMI นอกจากผู้ใช้งานจะต้องเลือกใช้ Sample cell ตามข้อกำหนดที่ได้กล่าวถึงข้างต้นแล้ว ยังต้องมีการปรับค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างและกรองน้ำตัวอย่างก่อนการตรวจวัด เนื่องจากค่าสีสามารถมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามค่าพีเอช โดยค่าพีเอชที่สูงขึ้น อาจส่งผลทำให้ค่าสีมีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้นในการรายงานค่าสีในหน่วย ADMI ผู้ใช้งานจะต้องปรับพีเอชของน้ำตัวอย่างให้อยู่ที่ 7.6 ด้วยกรดซัลฟูริก หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ พร้อมทั้งกรองน้ำตัวอย่างก่อนการตรวจวัดด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน เพื่อลดการรบกวนของความขุ่นในน้ำตัวอย่าง

## 2.18 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.18.1 พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และ วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์ (2553) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนในสีย้อมด้วยการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับจากธรรมชาติ ซึ่งตัวดูดซับที่ใช้ คือ ตัวดูดซับที่ได้จากธรรมชาติโดยตรง ตัวดูดซับที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้จากวัสดุธรรมชาติ โดยจะกล่าวถึงเรื่องปัจจัยและตัวแปรที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับแบบกะ และมีแนวโน้มการนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม

2.18.2 รวิรินทร์ และคณะ (2554) ได้ศึกษาการใช้แกลบดัดแปรทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ทำการทดลองแบบแบดซ์ ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของสีย้อมเมทิลีนบลู นอกจากนั้นยังทำการศึกษาไอโซเทอร์ม จลนศาสตร์ และข้อมูลเทอร์โมเคมี ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของสีย้อมเมทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางอื่น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นบลู มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ไอโซเทอร์มของการดูดซับ ศึกษาจากแบบจำลองแลงเมียร์ และฟรุนดิช พบว่าสอดคล้องกับสมการฟรุนดิชมากกว่าสมการแลงเมียร์ จลนศาสตร์ของการดูดซับศึกษาจากแบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order พบว่าจลนศาสตร์ในการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second order อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้น มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.308 ถึง 0.965 มิลลิกรัมต่อกรัม/นาที่ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู จาก 20 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ กลไกการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบดัดแปรเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ข้อมูลทางเทอร์โมเคมี พบว่า การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน มีค่าเท่ากับ -23.322 กิโลจูลต่อโมล การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมีค่าเท่ากับ 67.585 จูลต่อโมล-เคลวิน และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ -44.856 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้

2.18.3 อคปภา สุขอัจจะสกุล (2555) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา และกกกลม ในการกำจัดสีจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม และน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง สีย้อมที่ทำการศึกษาคือสีย้อมรีแอคทีฟ 9 ชนิด ได้แก่ 6% Super Black G, 2% Turquoise H-GN, 2% Yellow LS-4G, 2% Yellow LS-R-01, 2% Orange LS-BR, 4% Navy LS-G, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R และ 2% Br.Blue LS-G โดยทำการทดลองแบบแบตช์เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ได้แก่ พีเอช (4-8) ความเร็วรอบการเขย่า (0-240 นาที) ความเข้มข้นสีย้อม (10-80 มิลลิกรัม/ลิตร) และปริมาณตัวดูดซับ (1-5 กรัม) ผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวามีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมทั้ง 9 ชนิด ให้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 76.21 (หรือคิดเป็น 0.953 มิลลิกรัม/กรัมของตัวดูดซับ) ภายใต้สภาวะที่ พีเอช 4 ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม ความเร็วรอบเขย่า 50 รอบ/นาที ระยะเวลาเขย่า 30 นาที ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 90 นาที และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมผสม 50 มิลลิกรัม/ลิตร กลไกการดูดซับจากลำต้นผักตบชวาสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ โดยประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง จากลำต้นผักตบชวา เฉลี่ยร้อยละ 56.48

2.18.4 Dada และคณะ (2555) ได้ศึกษาสภาวะสมดุลของการดูดซับโดยใช้แกลบที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดฟอสฟอริก ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของแกลบที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว โดยเลือกวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของ Langmuir, Freundlich, Temkin และ Dubinin-Radushkevich (DRK) พบว่าไอโซเทอร์มของแลงเมียร์มีค่า  $R^2$  สูงสุด ความสามารถในการดูดซับมีค่าเท่ากับ 101.01 มิลลิกรัม/กรัม จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงค่าการแยกของแฟคเตอร์เท่ากับ 0.133 สำหรับไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช แสดงให้เห็นความสามารถในการดูดซับที่ดีที่ความสัมพันธ์ 1.6 และ 0.89 ตามลำดับ ความร้อนของกระบวนการดูดซับได้จากไอโซเทอร์มของเทมกิน เป็น 25.34 จูล/โมล และได้พลังงานจากไอโซเทอร์มของ DRK เป็น 0.7 กิโลจูล/โมล ซึ่งได้จากการทดลองตามกระบวนการทางกายภาพ

2.18.5 อุษณีย์ และคณะ (2557) ได้ศึกษาการดูดซับไอออนเงินโดยใช้ไคโตซานผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เรซินเป็นตัวดูดซับ ทำการทดลองแบบแบตช์ ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ 0.1 - 0.5 กรัม และความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนเงิน 20 - 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนเงิน มีผลทำให้ร้อยละการดูดซับและความสามารถในการดูดซับไอออนเงินเพิ่มสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับไอออนเงินของไคโตซานผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เรซินมีค่าเท่ากับ 18.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับสมการฟรุนดิชแบบจำลองทางจลนศาสตร์มีการอธิบายโดยใช้สมการ Pseudo-first order และ Pseudo-second

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

order พบว่าการดูดซับไอออนเงินสอดคล้องกับ Pseudo-second order กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน โดยการแพร่ที่ผิวเป็นขั้นตอนการกำจัดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.18.6 Mohammadine El Haddad (2558) ศึกษาสภาวะสมดุล จลนศาสตร์และข้อมูลเทอร์โมเคมี ของการดูดซับสีย้อมเบสิกโดยใช้เปลือกหอยเป็นตัวดูดซับ ทำการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของ Langmuir, Freundlich และ Dubinin-RADushkevich (DRK) พบว่าจลนศาสตร์ในการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second order ผลของข้อมูลเทอร์โมเคมีแสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมเบสิกโดยใช้เปลือกหอยมีความเป็นไปได้เองโดยธรรมชาติ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) และค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (MSE) ประเมินได้ว่าวิธีนี้เป็นแบบการทดลองที่ดี

2.18.7 Suman Mor และคณะ (2559) ศึกษาการปล่อยฟอสเฟตลงสู่แหล่งน้ำจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ เช่น การซักผ้า และโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น จึงเลือกใช้แกลบซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น เพื่อนำมาบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสีย โดยทำการทดลองแบบแบตช์ซึ่งใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ X-ray fluorescence โดยวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของแสง ซึ่งจะศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น ระยะเวลาในการดูดซับและอุณหภูมิ จากการทดลองสามารถกำจัดฟอสเฟตได้ถึง 89% ภายใต้สภาวะพีเอช 6 ตัวดูดซับ 2 กรัม/ลิตร ระยะเวลาเขย่า 120 นาที กลไกการดูดซับจากแกลบสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ ที่  $R^2 = 0.991$  อุณหพลศาสตร์ ( $\Delta G$ ,  $\Delta H$ ,  $\Delta S$ ) ที่  $R^2 = 0.978$  นอกจากนี้ยังมีการคำนวณและยังแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับเป็น exothermic กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเผยให้เห็นพื้นผิวขรุขระของตัวดูดซับซึ่งอาจจะเพิ่มรพุนและความสามารถในการดูดซับ ในปัจจุบันนิยมใช้แกลบเพื่อบำบัดมลพิษในสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เนื่องจากแกลบสามารถกำจัดอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดค่าใช้จ่าย

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น Genesys 105 ยี่ห้อ Thermo scientific ประเทศ USA
2. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น T60 ยี่ห้อ PG INSTRUMENTS นำเข้าโดย บริษัท บางกอกไฮแล็บ จำกัด ประเทศ Thailand
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น 1455 VP ยี่ห้อ Leo บริษัท ซายน์ เอ็นจิเนียร์ อินเตอร์เนชันแนล จำกัด ประเทศ USA
4. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) รุ่น Genesys 105 ยี่ห้อ Thermo scientific ประเทศ USA
5. เครื่องบดสับ รุ่น CP-390 ยี่ห้อ OTTO ประเทศ Thailand
6. เครื่องกรองลดความดัน (Filter pressure) รุ่น Aspirator A-35 ยี่ห้อ EYELA ประเทศ Japan
7. เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter) รุ่น C860 ยี่ห้อ Consort ประเทศ Belgium
8. เครื่องกวนมอเตอร์ รุ่น MR Hei-Tec ยี่ห้อ Heiolph ประเทศ Japan
9. เทอโมมิเตอร์ขนาด 100 C (Thermometer)
10. ตู้อบสาร (Oven) รุ่น UM400 ยี่ห้อ Memmert ประเทศ Germany
11. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด รุ่น ML204 ยี่ห้อ Mettler Toledo ประเทศ Switzerland
12. กระดาษกรอง (Filter papers) ยี่ห้อ Whatman เบอร์ 42
13. ตะแกรงร่อน (Sieved) 35 mesh มาตรฐาน ASTM E11 ประเทศ England
14. กรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
15. ขวดน้ำกลั่น (Wash bottle)
16. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

##### 3.1.2 สารเคมี

1. สีเบสิคเรด 9 (Basic Red 9) เกรด RPE, บริษัท พี.เค.เอส.2000 จำกัด ประเทศ Thailand
2. กรดไฮโดรคลอริก (HCl conc.) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Merck ประเทศ Germany
3. น้ำกลั่น (Distilled water)
4. ผักตบชวาส่วนลำต้น จากคลองพานทอง อำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 วิธีการทดลอง

### 3.2.1 การเตรียมตัวกลางในการดูดซับ

1. นำผักตบชวาที่เก็บได้มาล้างด้วยน้ำทำความสะอาด แล้วตัดเป็นชิ้นเล็กๆ
2. นำผักตบชวามาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมงจากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
3. นำผักตบชวาที่ได้ไปบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 35 mesh
4. นำผักตบชวาที่ผ่านการร่อนแล้ว ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อีกครั้ง
5. ปลอ่ยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์

### 3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

#### 3.2.2.1 การเตรียมสต็อกน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีเบสิคเรด 9 (Basic Red 9)

ชั่งสีเบสิคเรด 9 (Basic Red 9) มา 0.05 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร จะได้สารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีเบสิคเรด 9 (Basic Red 9) ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (A.K. Inengite, 2014)

#### 3.2.2.2 การสแกนหาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายสีย้อมสังเคราะห์สีเบสิคเรด 9 (Basic Red 9)

นำสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มาเจือจางจนได้สารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มาสแกนหาความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงสูงสุดโดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (สแกนจาก 200-800 นาโนเมตร)

### 3.2.3 การปรับปรุงคุณภาพผักตบชวากับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 1 M

1. ชั่งผักตบชวาที่เตรียมไว้เบื้องต้นในข้อ 3.2.1 มา 50 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. เติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 1 M ในอัตราส่วน 10 : 1 (Md.Nasir Uddin, 2014) ผสมให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
3. นำไปกรอง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจน pH ของสารละลายเท่ากับ 7
4. นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ เพื่อเก็บไว้ใช้ในการทดลองต่อไป

### 3.2.4 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับทั้งก่อนการปรับปรุงคุณภาพ และหลังการปรับปรุงคุณภาพ

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของผักตบชวา

พารามิเตอร์	เครื่องมือในการวิเคราะห์	อ้างอิง
พื้นที่ผิว	Scanning Electron Microscope	Susan Swapp, 2011
หมู่ฟังก์ชัน	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	Nancy Birkner, Qian Wang, 2015

### 3.2.5 ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

#### 3.2.5.1 อิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

- นำสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีเบสิคเรด 9 (Basic Red 9) ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งปรับค่า pH ให้ได้ค่าเท่ากับ 3 ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
- นำมาใส่เครื่องกวนมอเตอร์ ควบคุมที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที (Siti Maryam Rusly and Shaliza Ibahim, 2010)
- ชั่งผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ (จากการทดลอง 3.2.3) มา 2.5 กรัม ( $w/v = 5 \text{ kg/m}^3$ ) ใส่ลงในบีกเกอร์
- เก็บสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ 5 มิลลิลิตร โดยในช่วง 60 นาทีแรก ให้เก็บสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ทุกๆ 10 นาที หลังจากนั้นเก็บสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ทุกๆ 30 นาที จนครบที่เวลา 180 นาที
- นำสารละลายที่ได้ไปกรองแบบลดความดันจนครบ จากนั้นนำสารละลายส่วนใส่ไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
- ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนค่า pH ของสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์จาก pH 3 เป็น 4, 5, 6, 7, 8, และ 9 ตามลำดับ

#### 3.2.5.2 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

- นำสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีเบสิคเรด 9 (Basic Red 9) ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งปรับค่า pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.5.1) ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
- นำมาใส่เครื่องกวนมอเตอร์ ควบคุมที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที
- ชั่งผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ (จากการทดลอง 3.2.3) มา 0.5 กรัม ( $w/v = 1 \text{ kg/m}^3$ ) ใส่ลงในบีกเกอร์ (A.K. Inengite, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เก็บสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ 5 มิลลิลิตร โดยในช่วง 60 นาทีแรก ให้เก็บสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ทุกๆ 10 นาที หลังจากนั้นเก็บสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ทุกๆ 30 นาที จนครบที่เวลา 180 นาที
5. นำสารละลายที่ได้ไปกรองแบบลดความดันจนครบ จากนั้นนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
6. ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนปริมาณของตัวดูดซับจาก 0.5 กรัม ( $w/v = 1 \text{ kg/m}^3$ ) เป็น 1.0 กรัม ( $w/v = 2 \text{ kg/m}^3$ ), 1.5 กรัม ( $w/v = 3 \text{ kg/m}^3$ ), 2.0 กรัม ( $w/v = 4 \text{ kg/m}^3$ ) และ 2.5 กรัม ( $w/v = 5 \text{ kg/m}^3$ ) ตามลำดับ

### 3.2.5.3 อิทธิพลของความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

1. นำสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีเบสิคเรด 9 (Basic Red 9) ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งปรับค่า pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.5.1) ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. นำมาใส่เครื่องกวนมอเตอร์ ควบคุมที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที
3. ชั่งผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ (จากการทดลอง 3.2.3) ที่ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.5.2) ใส่ลงในบีกเกอร์
4. เก็บสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ 5 มิลลิลิตร โดยในช่วง 60 นาทีแรก ให้เก็บสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ทุกๆ 10 นาที หลังจากนั้นเก็บสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ทุกๆ 30 นาที จนครบที่เวลา 180 นาที
5. นำสารละลายที่ได้ไปกรองแบบลดความดันจนครบ จากนั้นนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
6. ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายจาก  $50 \text{ g/m}^3$  เป็น  $100 \text{ g/m}^3$ ,  $200 \text{ g/m}^3$  และ  $300 \text{ g/m}^3$  ตามลำดับ

### 3.2.5.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

1. นำสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีเบสิคเรด 9 (Basic Red 9) ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งปรับค่า pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.5.1) ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. นำมาใส่เครื่องกวนมอเตอร์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที
3. ชั่งผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ (จากการทดลอง 3.2.3) ที่ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.5.2) ใส่ลงในบีกเกอร์
4. เก็บสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ 5 มิลลิลิตร โดยในช่วง 60 นาทีแรก ให้เก็บสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ทุกๆ 10 นาที หลังจากนั้นเก็บสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ทุกๆ 30 นาที จนครบที่เวลา 180 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำสารละลายที่ได้ไปกรองแบบลดความดันจนครบ จากนั้นนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
6. ทำการทดลองเช่นเดิม แต่เปลี่ยนอุณหภูมิในการทดลองจาก 25 องศาเซลเซียส เป็น 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส
7. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1-6 ซ้ำอีก 2 ซ้ำ

### 3.2.5.5 การวัดค่า ADMI โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

1. เตรียมกราฟมาตรฐานจากสารละลายมาตรฐานสี
2. นำสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีเบสิคเรด 9 (Basic Red 9) ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งปรับค่า pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.5.1) ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
3. นำมาใส่เครื่องกวนมอเตอร์ ควบคุมที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที
4. ชั่งผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ (จากการทดลอง 3.2.3) ที่ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.5.2) ใส่ลงในบีกเกอร์
5. เก็บสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ 5 มิลลิลิตร ก่อนการดูดซับ และสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์หลังการดูดซับที่สภาวะที่เหมาะสม
6. นำสารละลายมาตรฐานสีที่เตรียมไว้ทั้งหมด และสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ ก่อนการดูดซับ และสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์หลังการดูดซับที่สภาวะที่เหมาะสม มาทำการกรองด้วยฟیلเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร วัดค่าทรานส์ มิตแดนซ์ (%T) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer แล้วคำนวณหาค่าสีใน หน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI) จากโปรแกรมการคำนวณ

3.2.6 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยใช้ไอโซเทอร์มของ Langmuir, Freundlich, Temkin และ Dubinin-Radushkevich โดยนำข้อมูลจากการทดลอง 3.2.5.3 มาวิเคราะห์

3.2.7 ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ที่สภาวะเหมาะสม โดยศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับ 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), Elovich model และ Intraparticle diffusion model และหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส โดยนำข้อมูลจากการทดลอง 3.2.5.3 และ 3.2.5.4 มาวิเคราะห์

3.2.8 ศึกษาทางอุณหพลศาสตร์ คือ เอลทัลปี ( $\Delta H^\circ$ ) จากสมการของแวนฮอฟฟ์ โดยใช้ข้อมูลจากการแปรผันอุณหภูมิไปหาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^\circ$ ) และหาค่าเอนโทรปี ( $\Delta S^\circ$ ) โดยนำข้อมูลจากการทดลอง 3.2.5.4 มาวิเคราะห์

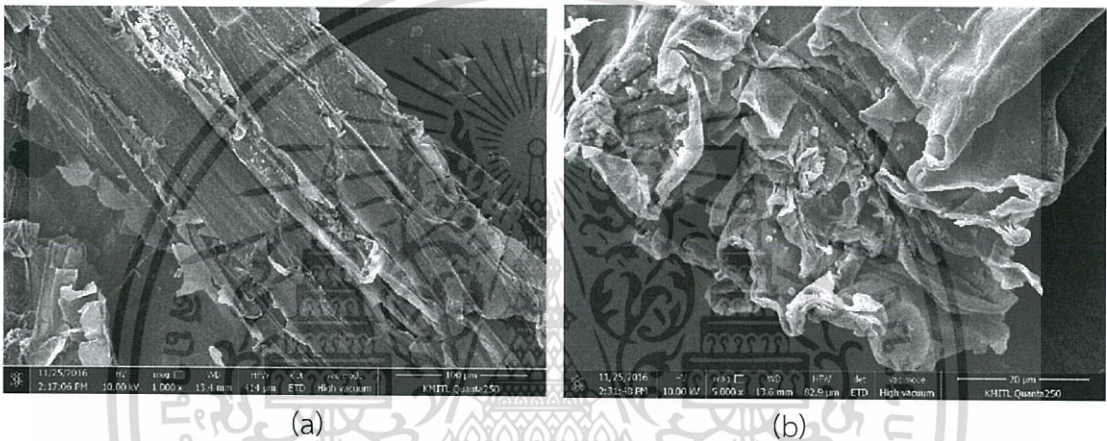
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผักตบชวา

##### 4.1.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

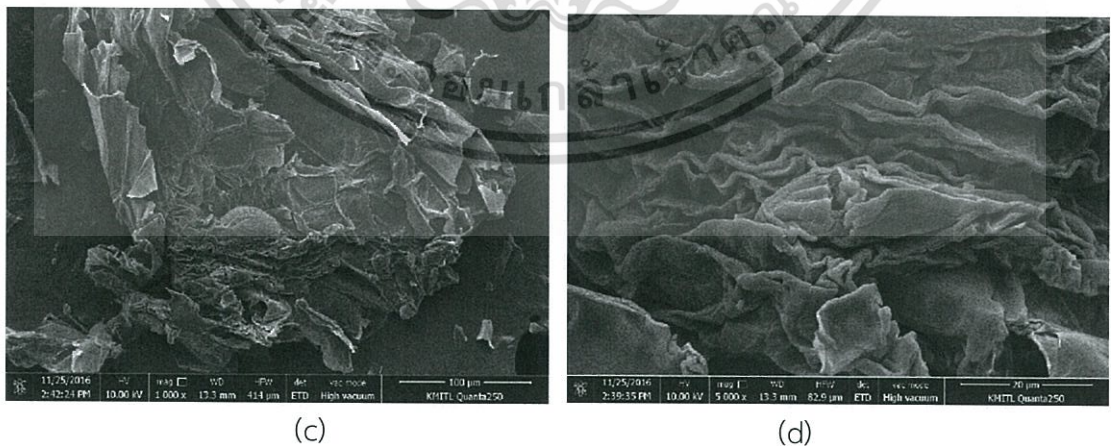
นำผักตบชวาไปปั่นละเอียดเป็นผงขนาด 500 ไมครอน หรือขนาด 35 mesh ทำให้พื้นที่ผิวดูดซับมีมากขึ้น จากการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ถ่ายภาพพื้นผิวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับสีเบสสิคเรด 9 ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวา

(a) ผักตบชวาไม่ปรับสภาพ ไม่ได้ดูดซับสีย้อม กำลังขยาย 1000 เท่า

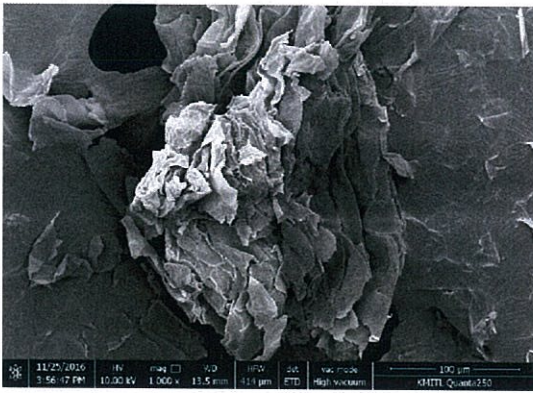
(b) ผักตบชวาไม่ปรับสภาพ ไม่ได้ดูดซับสีย้อม กำลังขยาย 5000 เท่า



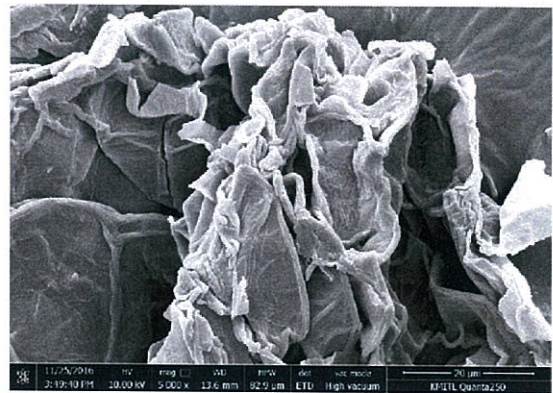
(c) ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกก่อนดูดซับสีย้อม กำลังขยาย 1000 เท่า

(d) ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกก่อนดูดซับสีย้อม กำลังขยาย 5000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e)



(f)

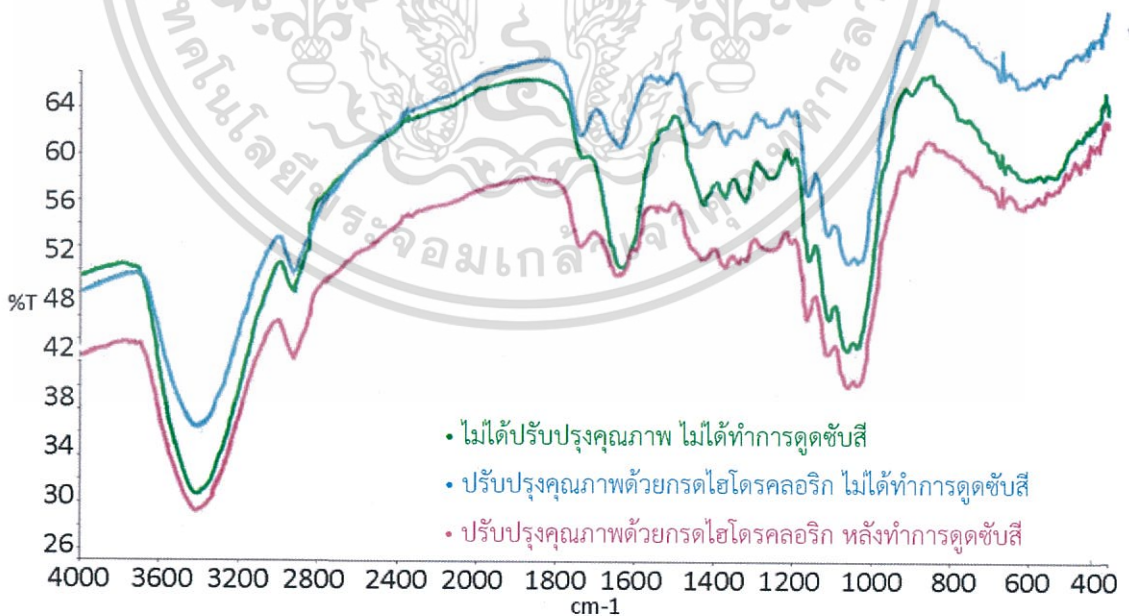
(e) ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกหลังดูดซับสีย้อม กำลังขยาย 1000 เท่า

(f) ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกหลังดูดซับสีย้อม กำลังขยาย 5000 เท่า

จากรูปที่ 4.1 พบว่า ตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพลักษณะพื้นผิวจะเรียบ แต่เมื่อผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก จะมีผลทำให้ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสละลายออกมา รวมทั้งทำให้เกิดการพองตัว (Swelling) ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณา ผักตบชวาที่ผ่านการดูดซับแล้วพบว่า มีพื้นที่ผิวลดลงเนื่องจากโมเลกุลของสีเข้าไปยังรูพรุน

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

นำผักตบชวาทั้งที่ยังไม่ปรับปรุงคุณภาพ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และหลังการดูดซับสีย้อมเบสิค มาศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ผลการทดลอง แสดงสเปกตรัมดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของผักตบชวา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าผักตบชวาประกอบไปด้วยเส้นใยธรรมชาติซึ่งจะมีเซลลูโลส ลิกนิน และแวกซ์ เป็นองค์ประกอบเมื่อนำผักตบชวาไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดของผักตบชวาและจะแสดงสเปกตรัมในความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งโมเลกุลต่างชนิดกันจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความยาวคลื่นที่หมู่ฟังก์ชันต่างๆ

Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )			หมู่ฟังก์ชัน
ไม่ปรับปรุงคุณภาพ	ปรับปรุงคุณภาพ	ผ่านการดูดซับ	
3408.12	3411.99	3408.12	-OH
2924.56	2920.69	2916.82	C-H
1733.33	1741.06	1737.19	C=O
		1640.57	C=O
1634.78	1636.71		C-O symm
		1592.27	N-H
	1518.84	1513.04	C-O of CHO
1424.15	1433.81	1431.88	C-O cellulose
1370.04	1371.98	1371.98	-OH phenol
		1315.94	N-O
1319.80	1319.80		C-H
1062.80	1058.93	1058.93	-OH

จากตารางแสดงให้เห็นว่า ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ %T เริ่มต้นอยู่ที่ 49 จะพบพีคของหมู่ฟังก์ชัน -OH ที่ความยาวคลื่น 3408.12 cm<sup>-1</sup>, หมู่ C-H ที่ (2924.56 cm<sup>-1</sup>), หมู่ C=O เกิดพีค 2 พีค คือ (1733.33 cm<sup>-1</sup> กับ 1634.78 cm<sup>-1</sup>) แต่จะเห็นได้ว่าช่วงพีคจะสั้นในพีคแรกและพีคถัดมาจะยืดยาวออก หลังจากนั้นจะพบหมู่ C-O ของ cellulose ที่ (1424.15 cm<sup>-1</sup>), หมู่ -OH phenol ที่ (1370.04 cm<sup>-1</sup>), หมู่ C-H ที่ (1319.80 cm<sup>-1</sup>) และหมู่ -OH ที่ (1062.80 cm<sup>-1</sup>) และเมื่อนำผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) พบว่า %T ลดลงอยู่ที่ 47 พบว่าหมู่ C=O ที่มีอยู่นั้นพีคทั้ง 2 พีค คือ (1741.06 cm<sup>-1</sup> กับ 1636.71 cm<sup>-1</sup>) หดสั้นลงเนื่องจากหมู่ C=O เกิดปฏิกิริยาไฮเดรตกับน้ำทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันของ -OH เพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกทำให้เกิดปฏิกิริยา dehydration ซึ่งกรดจะดึงน้ำออกจากโครงสร้างของตัวดูดซับทำให้ปริมาณหมู่ฟังก์ชันของ -OH ลดลงและเปลี่ยนเป็นหมู่ฟังก์ชันของ C=C แทนซึ่งทำให้เกิดพีคในช่วงความยาวคลื่นที่ (1545.89 cm<sup>-1</sup> กับ 1518.84 cm<sup>-1</sup>) เพิ่มขึ้นมา 2 พีค และเมื่อนำผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพไปดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 จะพบว่า %T ลดลงอยู่ที่ 43 ซึ่งจะมีหมู่ฟังก์ชันเหมือนกับผ่านการปรับปรุงคุณภาพแต่พบหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นจากการดูดซับสีย้อม คือหมู่ N-H (1592.27cm<sup>-1</sup>) ของสียเบสิคเรด 9 และหมู่ N-O (1315.94 cm<sup>-1</sup>) ของสียเบสิคเรด 9 ที่จับกับตัวดูดซับ (Medhat Ibrahim, 2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

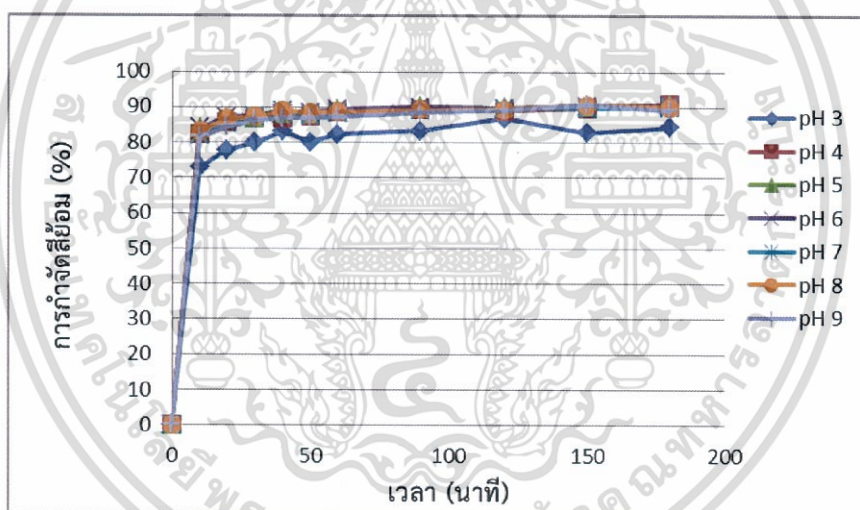
## 4.2 การศึกษาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายสี้อมเบสิคเรด 9 (Basic Red 9)

เมื่อทำการสแกนสารละลายสี้อมเข้มข้น 0.01 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร จะพบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดคือ 545 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohammadine El Haddad, 2016 (ภาคผนวก ก.)

## 4.3 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ผลต่อการดูดซับน้ำเสียสี้อมสังเคราะห์

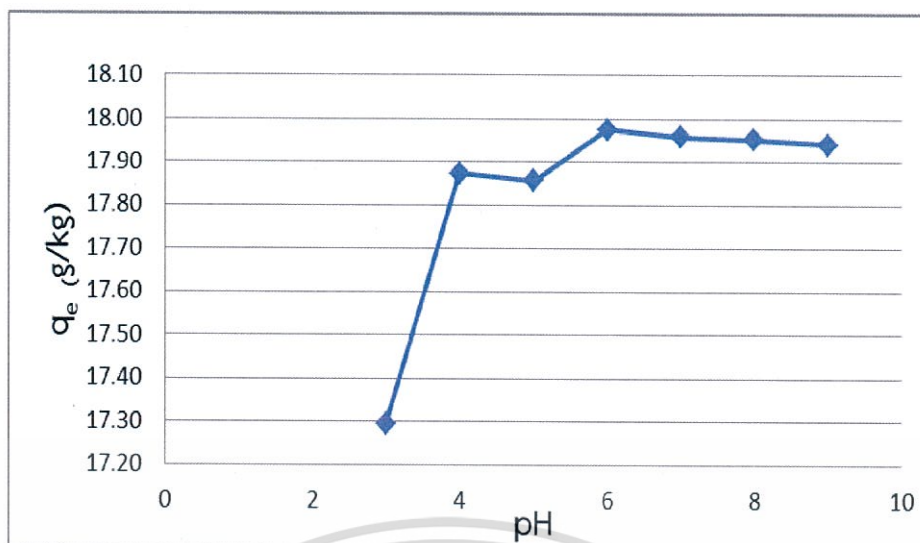
### 4.3.1 อิทธิพลของค่า pH

การศึกษาผลของ pH ของสารละลายเริ่มต้นในการดูดซับสี้อมเบสิคเรด 9 โดยใช้ปริมาณผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นของสี้อมเริ่มต้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิห้อง (33 องศาเซลเซียส) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำสี้อมเริ่มต้นดังนี้ 3, 4, 5, 6, 7, 8, และ 9 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดสี้อมที่เวลาต่างๆ กับค่า pH ของน้ำเสีย ได้ดังรูปที่ 4.3 และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสี้อมกับค่า pH ของน้ำเสีย ได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ผลของ pH ต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสี้อมที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก หลังจากนั้นจะค่อยๆเกิดการดูดซับอย่างช้าๆ จนเข้าสู่สมดุลในช่วงนาที่ที่ 40 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า pH จาก 3 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสี้อมเท่ากับ 83.203, 86.786, 87.978, 88.146, 87.636, 87.456 และ 86.879

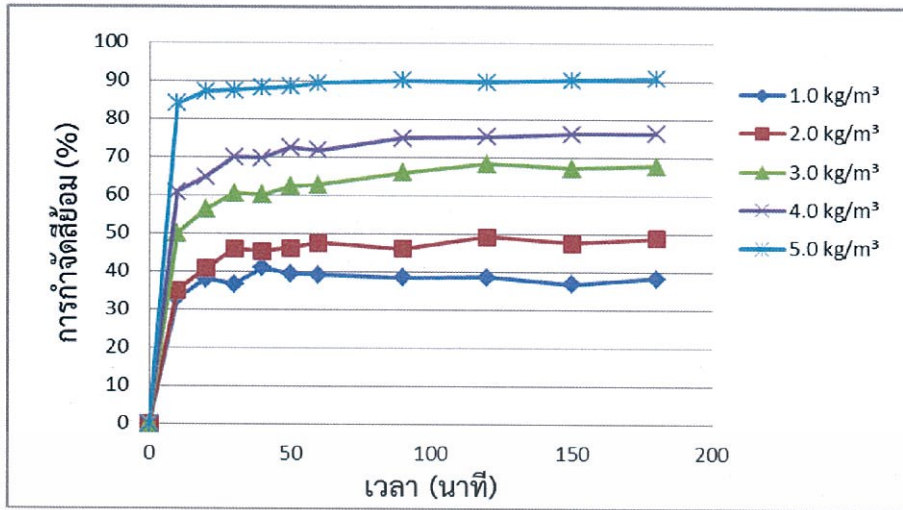


รูปที่ 4.4 ผลของ pH ต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล

จากการศึกษาอิทธิพลของ pH ต่อการดูดซับ ในช่วง pH 3-9 พบว่าความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) เพิ่มสูงสุดที่ pH เท่ากับ 6 โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับ (Removal efficiency) ร้อยละ 88.146 ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับขึ้นอยู่กับประจุบนผิวของตัวดูดซับและประจุของสีย้อมเมื่อละลายน้ำ ซึ่งสภาพประจุบนผิวของตัวดูดซับขึ้นกับความเป็นกรดของสารละลายในขณะนั้น (Moreno-Castilla, 2004; Attia et al., 2006; Kumar et al., 2010; Sun et al., 2010) ที่ pH ต่างกันจะมีปริมาณประจุบวกและประจุลบในสารละลายแตกต่างกันด้วย ถ้า pH ของ สารละลายต่ำมาก ประจุรวมบนตัวดูดซับจะเป็นบวกเนื่องจากไฮโดรเจนไอออน ที่สภาวะนี้ตัวดูดซับจะสามารถดูดซับสีย้อมที่เป็นประจุลบได้ดี แต่ถ้า pH สูงประจุรวมบนผิวตัวดูดซับจะเป็นลบ เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ทำให้สามารถดูดซับสีย้อมที่เป็นประจุบวกได้ดีกว่า ซึ่งสีเบสิคเรด 9 เมื่อละลายน้ำจะได้ประจุบวก การดูดซับจึงเกิดขึ้นได้ดีที่ pH สูงๆ (Lorenz-Grabowska and Gryglewicz, 2007) ดังนั้น การปรับสภาพ pH ของสารละลายให้เหมาะสมกับโครงสร้างของสีย้อมจึงเป็นการช่วยให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นด้วย

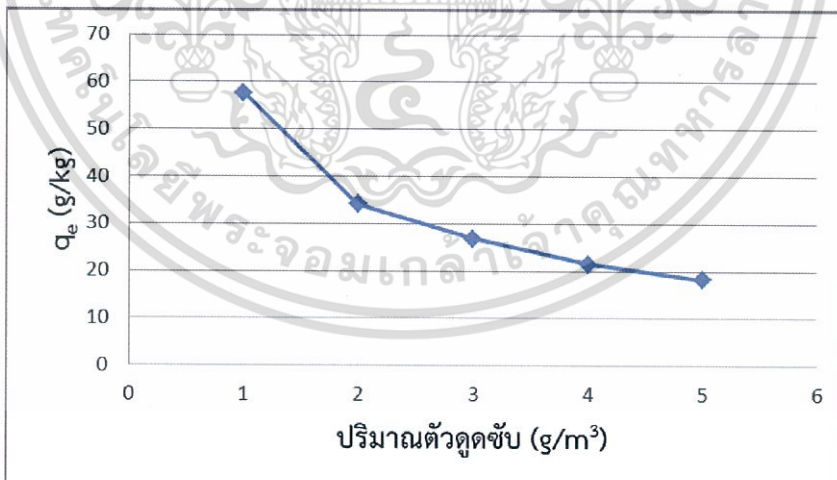
#### 4.3.2 อิทธิพลของปริมาณผักตบชวา

การศึกษาผลของปริมาณผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกในการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH ของสารละลายเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณของผักตบชวาดังนี้คือ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่างๆ กับปริมาณตัวดูดซับ ได้ดังรูปที่ 4.5 และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อมกับปริมาณตัวดูดซับ ได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณผักตบชวาต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่างๆ

จะเห็นได้ว่าการดูดซับในช่วง 10 นาทีแรก จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะค่อยๆเกิดการดูดซับอย่างช้าๆ จนเข้าสู่สมดุลในช่วงนาที่ที่ 40 เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสีย้อมไปยังพื้นที่ผิวของผักตบชวาและผ่านเข้าไปในรูพรุนภายในเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นเข้าสู่สมดุลอย่างช้าๆ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/v จาก 1.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไปเป็น 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จาก 40.933 ไปเป็น 45.254, 60.176, 69.763 และ 88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซับสีเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของผักตบชวามากขึ้น โดยพื้นที่ผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณผักตบชวา



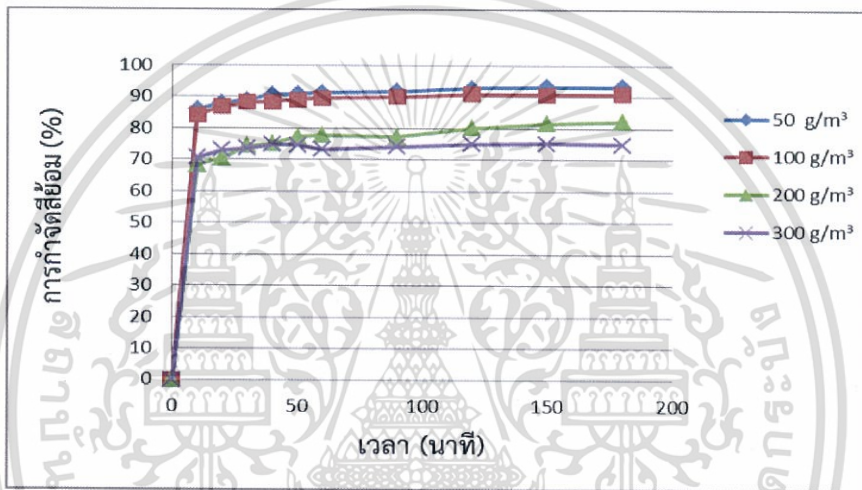
รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณผักตบชวาต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับสีย้อม ในปริมาณ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลง เมื่อปริมาณผักตบชวาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.0-5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลการศึกษาสรุปได้ว่าเมื่อค่าความเข้มข้นของสีย้อมคงที่ ถ้าอัตราส่วนของปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นที่เวลาต่างๆมีค่าลดลง

น้อยกว่าจำนวนเท่าของน้ำหนักตัวดูดซับที่มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลง ในการทดลองนี้จึงเลือกปริมาณผักตบชวาเท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในการทดลองต่อไป

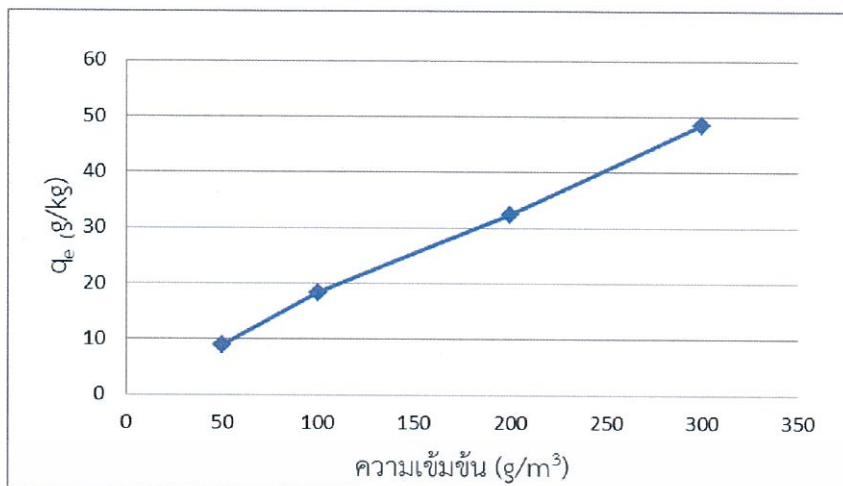
#### 4.3.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายในการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ใช้ปริมาณผักตบชวา 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH ของสารละลายเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเป็นดังนี้คือ 50, 100, 200 และ 300 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่างๆ กับความเข้มข้นของสารละลาย ได้ดังรูปที่ 4.7 และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อมกับความเข้มข้นของสารละลาย ได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณผักตบชวาต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่างๆ

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมจาก 50 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไปเป็น 100, 200 และ 300 ตามลำดับ พบว่าการดูดซับลดลงเรื่อยๆจาก 90.821 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 88.38, 75.07 และ 74.807 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง เนื่องจากเมื่อมีการแพร่ของโมเลกุลสารละลายไปดูดซับที่รูพรุนของผักตบชวาจนถึงจุดสมดุลที่ไม่สามารถดูดซับได้แล้ว ความเข้มข้นของสีย้อมที่มากขึ้นจะคงเหลืออยู่ในสารละลายมาก ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

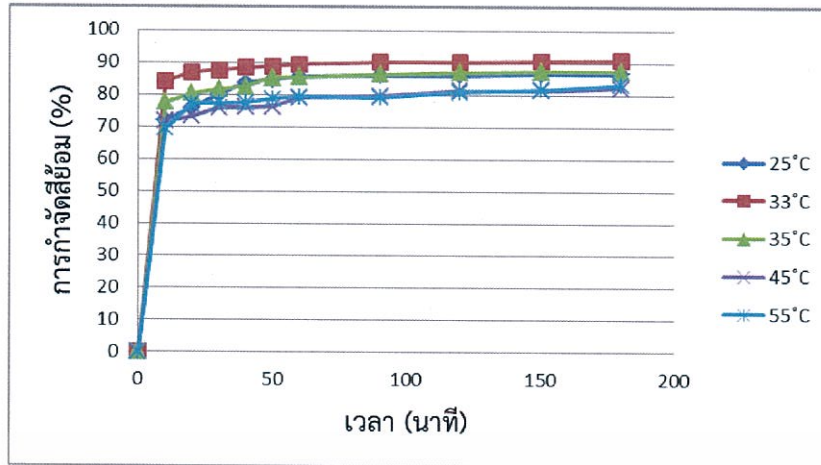


รูปที่ 4.8 ผลของความเข้มข้นต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล

การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม โดยความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น ตั้งแต่ 50-300 g/m<sup>3</sup> สภาวะการทดลองอื่นคงที่คือ pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.0 kg/m<sup>3</sup> พบว่า ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นเป็นผลทำให้เกิดความแตกต่าง ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลาย กับบริเวณผิวของตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เกิดแรงขับเคลื่อน (Driving Force) ที่เพิ่มสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจึงสูงขึ้น (รวินทร์ สุทธะนันท์, 2554) เมื่อพิจารณาที่ตัวดูดซับจะเห็นได้ว่า มีตำแหน่งที่เกิดการดูดซับเหลือพอที่จะสามารถดูดซับสีย้อมได้เรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น

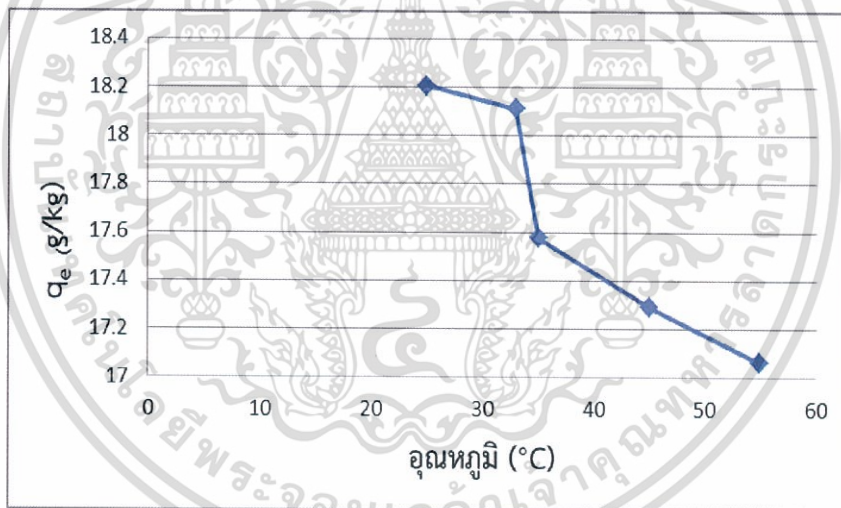
#### 4.3.4 อิทธิพลอุณหภูมิของสีย้อมเบสโครต 9

การศึกษาผลอุณหภูมิในการดูดซับสีย้อมเบสโครต 9 โดยใช้ปริมาณผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH ของน้ำสีย้อมเท่ากับ 6 เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำสีย้อมดังนี้ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่างๆ กับอุณหภูมิ ได้ดังรูปที่ 4.9 และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อมกับอุณหภูมิ ได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีที่ยอมที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.9 ทำการดูดซับที่อุณหภูมิห้องคือ 33 องศาเซลเซียส ให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสียอม สูงสุด 88.167 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์การกำจัดสียอมลดลงเป็น 83.713, 82.878 และ 81.406 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับสีที่ยอมที่สภาวะสมดุล

จากรูปที่ 4.10 พบว่าความสามารถในการดูดซับ (กรัมของสีต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) สูงสุดที่ อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส โดยจะมีค่า 18.10 กรัมต่อกิโลกรัม (เปอร์เซ็นต์การกำจัดสียอม 88.1601 เปอร์เซ็นต์) เนื่องจากอุณหภูมิมิผลต่อกระบวนการดูดซับ ในกระบวนการดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการดูดซับเกิดได้ดีขึ้น แต่ในกระบวนการคายความร้อนการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การดูดซับลดลง และในผลการทดลองนี้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจะน้อยลง อาจมีสมมติฐานได้ว่ากระบวนการดูดซับสียอมนี้เป็นการคายความร้อน อีกทั้ง ปัจจัยด้านอุณหภูมิเป็นส่วนหนึ่งของการทำให้เกิดกระบวนการคายซับ (Desorption) โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับ (Reversible process) ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การวัดค่า ADMI โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

ตารางที่ 4.2 ค่า ADMI ของน้ำสีย้อมสังเคราะห์ ก่อนและหลังการดูดซับด้วยผักตบชวาที่สภาวะสมดุล

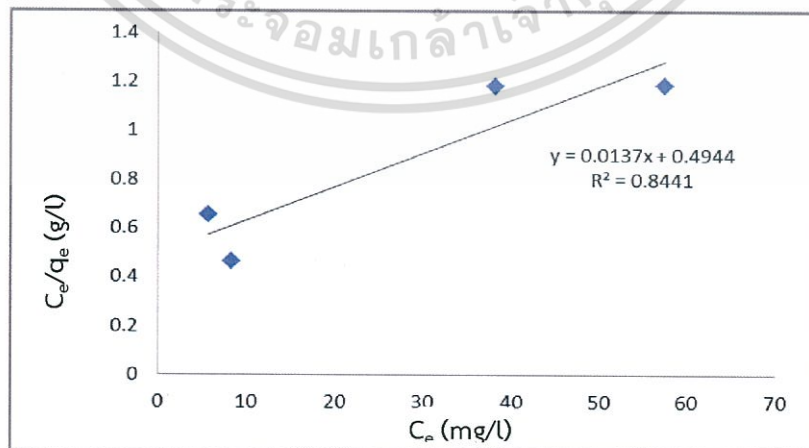
	Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI
ก่อนดูดซับ	95.9517	96.88	115.2574	9.82	9.78	9.81	0.050058	28,833
หลังดูดซับ	96.128	98.09	114.584	9.83	9.83	9.79	0.022698	3,268

จากตารางที่ 4.3 พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อม  $100 \text{ g/m}^3$  มีค่าหน่วยสีย้อมที่ 28,833 ADMI และจากการทดลองการดูดซับน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ด้วยผักตบชวาที่สภาวะสมดุลแล้ว มีปริมาณอยู่ในช่วง 3,268 ADMI คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม 89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่วัดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ควบคุมมาตรฐานค่าสีจริงในน้ำทิ้งให้จำกัดอยู่ที่ 300 ADMI (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) หากจะบำบัดไม่ให้เกิดค่ามาตรฐานที่กำหนด ต้องบำบัดได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์

#### 4.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวา

จากข้อมูลการดูดซับสามารถนำไปแทนค่าในสมการโดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin และ Dubinin-Radushkevich

โดยสมการการดูดซับของ Langmuir จะเป็นสมการง่าย ๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่มีผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น (Monolayer) จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $C_e/q_e$ ) กับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่เหลือ ( $C_e$ ) กราฟที่ได้ดังแสดงรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สมการการดูดซับของ Langmuir เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50, 100, 200 และ

$300 \text{ g/m}^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการดูดซับของ Langmuir คือ

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

โดย  $q_m$  = ปริมาณสูงสุดของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)

$K_L$  = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

จากความชัน (Slope) = 0.0137 และจุดตัดแกน  $y = 0.4944$  ทำให้สามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $q_m$ ) และค่าคงที่สมการแลงเมียร์ ( $K_L$ ) ได้ดังนี้

$$\text{ความชัน} = 1/q_m$$

$$\text{จุดตัดแกน } y = 1/ K_L q_m$$

$$0.0137 = 1/q_m$$

$$0.4944 = 1/ K_L (72.9927 \text{ g/kg})$$

$$q_m = 72.9927 \text{ g/Kg}$$

$$K_L = 0.0277 \text{ m}^3/\text{g}$$

$$R_L = 1/(1+K_L C_0)$$

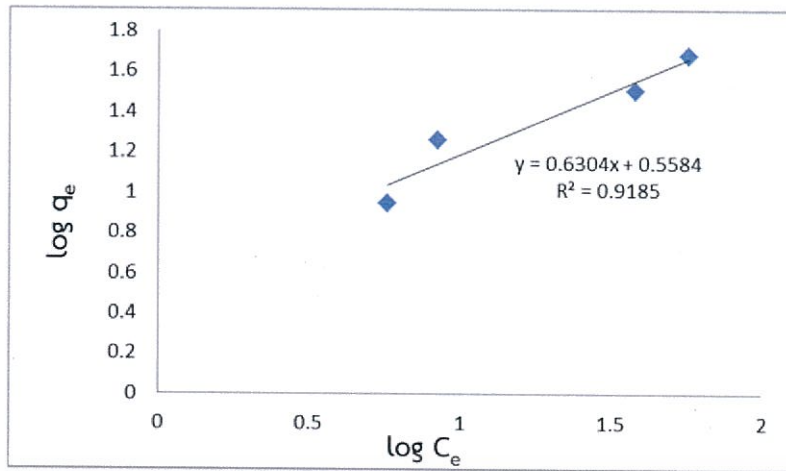
$$R_L = 1/(1+(0.0277 \text{ m}^3/\text{g}) \cdot (100 \text{ mg/L}))$$

$$R_L = 0.2653$$

จากค่า  $R_L$  จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอร์มว่าสอดคล้องกับการดูดซับแบบแลงเมียร์หรือไม่ ถ้า  $R_L > 1$  การดูดซับไม่เป็นแบบแลงเมียร์ (Unfavorable),  $R_L = 1$  การดูดซับ เป็นเส้นตรง (Linear),  $0 > R_L < 1$  การดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ (Favorable) และ  $R_L = 0$  การดูดซับเกิดผันกลับได้ (Irreversible) ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการดูดซับที่ดี

จากผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Samera Salimpour Abkenar และคณะ, 2015 ได้ศึกษาไอโซเทอร์มและจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเบสิคบลู 9 โดยใช้สำลี ผลการทดลองไอโซเทอร์มของ Langmuir ค่า  $K$  เท่ากับ 0.0282 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลอง

ส่วนสมการการดูดซับของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Heterogeneous) พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ พื้นผิว และพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $\log q_e$ ) กับลอการิทึมของความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่เหลือ ( $\log C_e$ ) กราฟที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 สมการการดูดซับของ Freundlich เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50, 100, 200 และ 300 g/m<sup>3</sup>

สมการการดูดซับของ Freundlich คือ

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

โดย  $K_F$  = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (L/g)

$1/n$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

จากความชัน (Slope) = 0.6304 และจุดตัดแกน  $y = 0.5584$  ทำให้สามารถหาค่าคงที่  $1/n$  และ  $K_F$  ได้ดังนี้

ความชัน =  $1/n$

$$0.6304 = 1/n$$

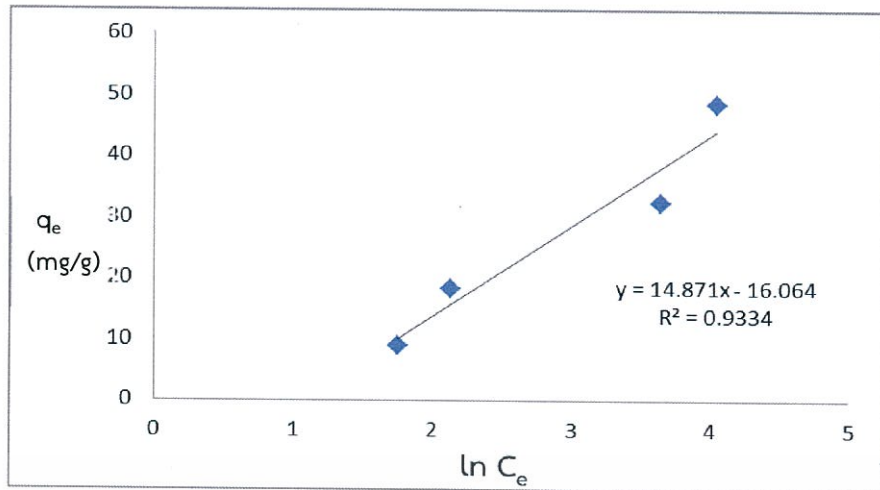
จุดตัดแกน  $y = \log K_F$

$$0.5584 = \log K_F$$

$$K_F = 3.6174 \text{ L/g}$$

จากผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ รวิรินทร์ และคณะ, 2015 ได้ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมเมทีลีนบลูโดยใช้เกล็ดตัดแปรร จากผลการทดลองเป็นไปตามไอโซเทอร์มของ Freundlich ค่า  $K_F$  เท่ากับ 1.50 L/g และค่า  $1/n$  เท่ากับ 0.687 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

ส่วนสมการการดูดซับของ Temkin จะแตกต่างจากของ Langmuir และ Freundlich ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับของ Temkin สามารถนำไปใช้ได้กับการดูดซับทางเคมี เนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ ไอโซเทอร์มนี้มีสมมติฐานว่าพลังงานการดูดซับจะลดลงเป็นเส้นตรงเมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ (dsorbent-adsorbate interactions) จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $q_e$ ) กับลอการิทึมธรรมชาติของความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่เหลือ ( $\ln C_e$ ) กราฟที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 สมการการดูดซับของ Temkin เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50, 100, 200 และ 300 g/m<sup>3</sup>

สมการการดูดซับของ Temkin คือ

$$q_e = (RT/b_0) \ln A + (RT/b_0) \ln C_e$$

โดย  $b_0$  = ค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ (J/mol)

$A$  = ค่าคงที่สมดุลของการยึดเกาะ (L/g) ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานยึดเกาะสูงสุด (maximum binding energy)

จากความชัน (Slope) = 14.871 และจุดตัดแกน  $y = -16.064$  ทำให้สามารถหาค่าคงที่  $n$  และ  $K_F$  ได้ดังนี้

$$\text{ความชัน} = (RT/b_0)$$

$$14.871 = (RT/b_0)$$

$$b_0 = 0.171 \text{ J/mol}$$

$$\text{จุดตัดแกน } y = (RT/b_0) \ln A$$

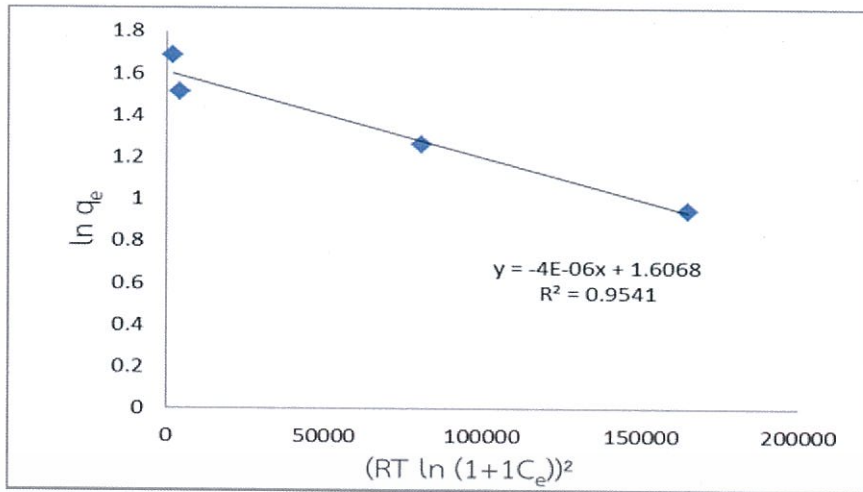
$$-16.064 = 0.171 \ln A$$

$$\ln A = -0.0939 \text{ L/g}$$

$$A = 0.9989 \text{ L/g}$$

จากผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Davoud Balarak และคณะ, 2015 ศึกษาไอโซเทอร์ม จลนศาสตร์ และเทอร์โมไดนามิก ของการดูดซับสีย้อมเมทีลีนบลูโดยใช้ฟางข้าว ผลการทดลองไอโซเทอร์มของ Temkin ค่า  $A$  เท่ากับ 0.93 L/g ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลอง

ส่วนสมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ไอโซเทอร์มได้เสนอการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับของตัวดูดซับ เป็นการดูดซับทางเคมีหรือทางกายภาพที่เกิดบนผิวของตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการที่มธรรมชาติของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $\ln q_e$ ) กับ  $[(RT \ln (1+1/C_e))]^2$  กราฟที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50, 100, 200 และ 300 g/m<sup>3</sup>

สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich คือ

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

โดย  $q_D$  = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

$K_{DR}$  = ค่าคงที่การดูดซับของ Dubinin-Radushkevich (mol<sup>2</sup>/kJ<sup>2</sup>) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังอิสระการดูดซับเฉลี่ยต่อสารที่ถูกดูดซับ 1 โมล

จากความชัน (Slope) = 0.000004 และจุดตัดแกน y = 1.6068 ทำให้สามารถหาค่าคงที่ n และ  $K_F$  ได้ดังนี้

$$\text{ความชัน} = K_{DR}$$

$$K_{DR} = 0.000004$$

$$\text{จุดตัดแกน y} = \ln q_D$$

$$1.6068 = \ln q_D$$

$$q_D = 4.9868 \text{ mg/g}$$

จากผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fatih Deniz และคณะ ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมเบสสีครีต 46 ด้วยไบสน โดยจากผลการทดลองไอโซเทอร์มของ Dubinin-Radushkevich ได้ค่า  $K_{DR}$  เท่ากับ 0.000007 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลอง

ตารางที่ 4.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin และ D-R สำหรับการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

Isotherms	Room Temp
<b>Langmuir isotherm</b>	
$q_{max}$ (mg/g)	72.9927
$K_L$ (L/mg)	0.0277
$R_L$	0.2653
$R^2$	0.8441
<b>Freundlich isotherm</b>	
$K_F$ (L/g)	3.6174
$1/n$	0.6304
$R^2$	0.9185
<b>Temkin isotherm</b>	
$b_0$ (kJ/mol)	0.171
$A$ (L/g)	0.9989
$R^2$	0.9334
<b>Dubinin-Radushkevich isotherm</b>	
$K_{Dr}$	$4 \times 10^{-6}$
$q_D$ (mg/g)	4.9868
$E$ (kJ/mol)	0.3536
$R^2$	0.9541

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของสมการแบบจำลองการดูดซับของ Langmuir และสมการแบบจำลองการดูดซับของ Freundlich จากตารางพบว่า จากสมการแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ดังนั้นแสดงว่าการดูดซับของสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ พื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด มีลักษณะขรุขระ พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอร์มแบบ Freundlich เป็นไอโซเทอร์มที่พัฒนาจากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของ Dubinin-Radushkevich เนื่องจากไอโซเทอร์มนี้ได้เสนอการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

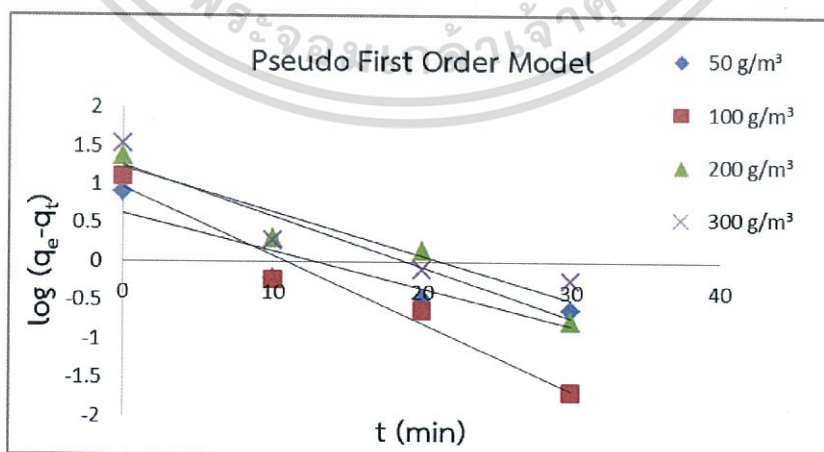
ของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นได้ทั้งการดูดซับทางเคมีหรือทางกายภาพ ที่เกิดบนผิวของตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) และค่าพลังงานดูดซับอิสระ (E) สามารถบ่งบอกกลไกของการดูดซับได้ ถ้าหากค่า  $E = 8-16 \text{ kJ/mol}$  เป็นกระบวนการดูดซับโดยการแลกเปลี่ยนไอออนทางเคมี ถ้าค่า  $E < 8 \text{ kJ/mol}$  จะเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่า  $E > 16 \text{ kJ/mol}$  จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี ดังนั้นในการทดลองนี้ การดูดซับสีย้อมเบสสีครด 9 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ (Mediterr.J.Chem, 2015) โดยเกิดจากแรงดึงดูดของตัวถูกละลายในของเหลวกับสารดูดซับที่มีแรงดึงดูดมากกว่าตัวถูกละลายกับตัวทำละลาย ทำให้เกิดการดูดซับของตัวถูกละลายบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับในแบบหลายชั้น จากงานวิจัยของ รวิรินทร์ และคณะ, 2015 ได้ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แคลบตัดแปร จากผลการทดลองเป็นไปตามไอโซเทอร์มของ Freundlich ค่า  $K_F$  เท่ากับ  $1.50 \text{ L/g}$  และค่า  $1/n$  เท่ากับ  $0.687$  ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

#### 4.6 จลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก

จลนศาสตร์ของการดูดซับสารละลายสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม และอุณหภูมิในการดูดซับที่แตกต่างกัน โดยใช้แบบจำลองในการพิจารณา 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion)

##### 4.6.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ( $C_0$ ) 50, 100, 200 และ $300 \text{ g/m}^3$

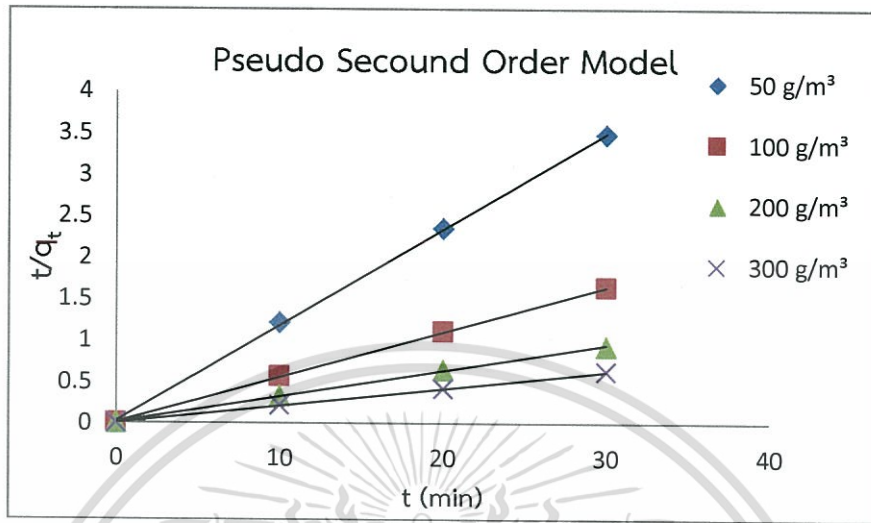
จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่เวลาต่างๆ ( $q_t$ ) และความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $q_e$ ) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาทำให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลา มาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ  $\log(q_e - q_t)$  กับเวลา ( $t$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Model) เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเป็น 50, 100, 200 และ  $300 \text{ g/m}^3$

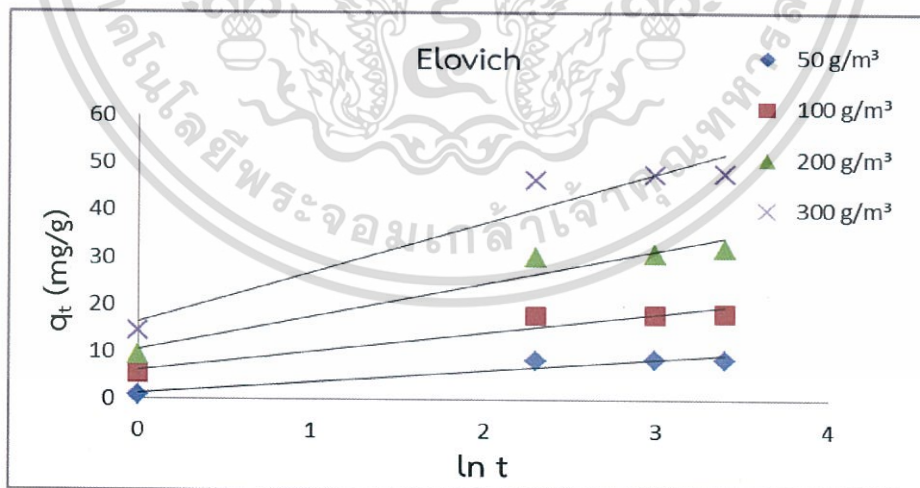
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $t/q_t$ ) กับเวลา ( $t$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo Second Order Model) เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเป็น 50, 100, 200 และ 300 g/m<sup>3</sup>

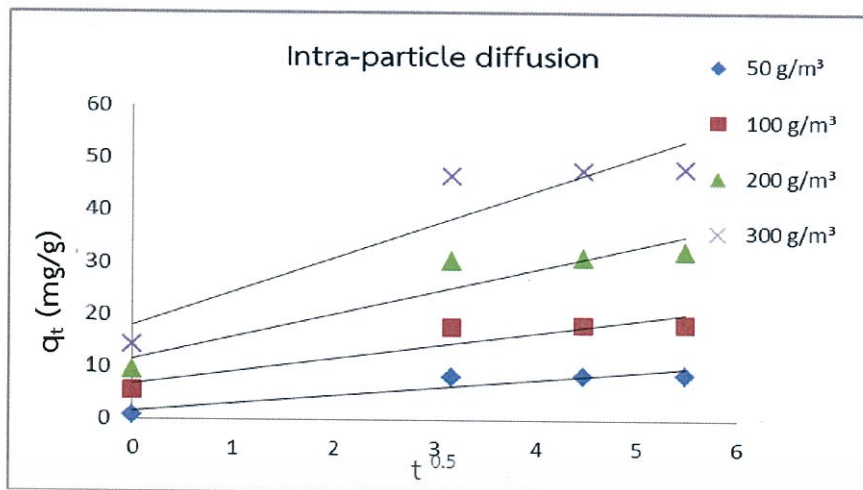
เมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในสมการของ Elovich จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $q_t$ ) กับเวลา ( $\ln t$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 สมการของ Elovich เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50, 100, 200 และ 300 g/m<sup>3</sup>

เมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในสมการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $q_t$ ) กับ ( $t^{0.5}$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.18

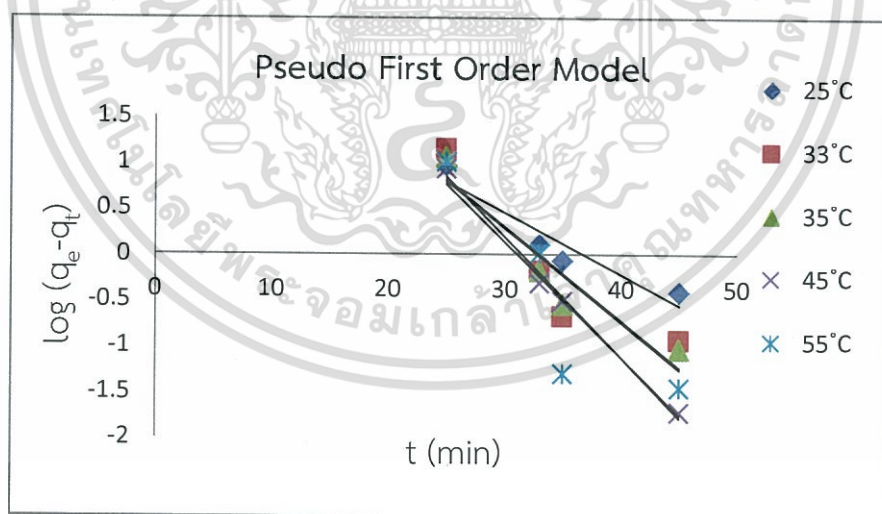
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 การแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50, 100, 200 และ 300 g/m<sup>3</sup>

#### 4.6.2 อุณหภูมิของสารละลายสีย้อม (T) 25, 33, 35, 45 และ 55 °C

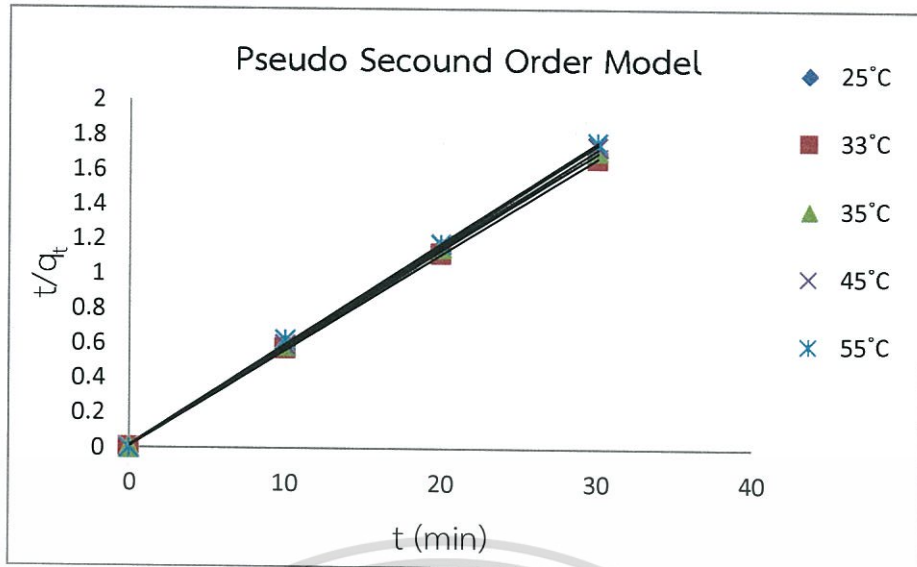
จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่เวลาต่างๆ ( $q_t$ ) และความสามารถในการดูดซับที่สภาวะ ( $q_e$ ) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $\log(q_e - q_t)$ ) กับเวลา ( $t$ ) แสดงได้ดังรูป 4.19



รูปที่ 4.19 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Model) เมื่อใช้อุณหภูมิในการดูดซับที่ 25, 33, 35, 45 และ 55 °C

เมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $t/q_t$ ) กับเวลา ( $t$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.20

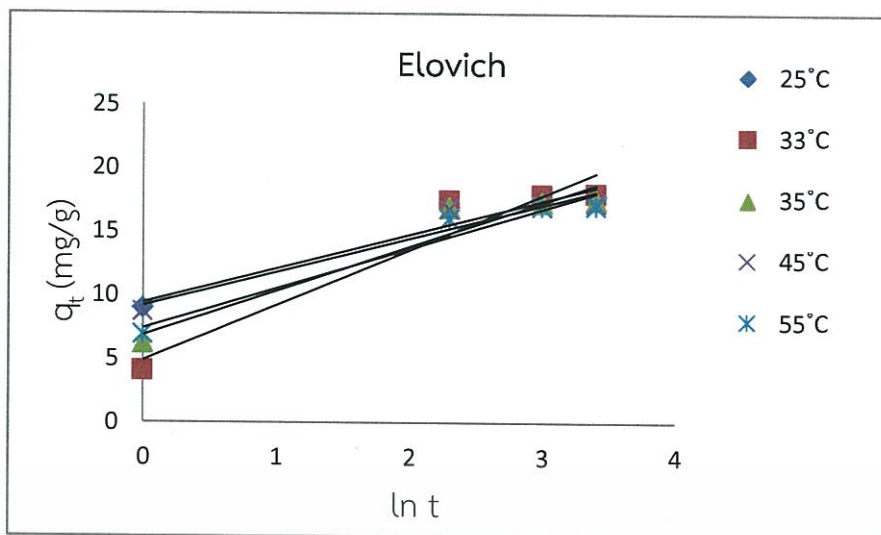
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo Second Order Model) เมื่อใช้อุณหภูมิในการดูดซับที่ 25, 33, 35, 45 และ 55 °C

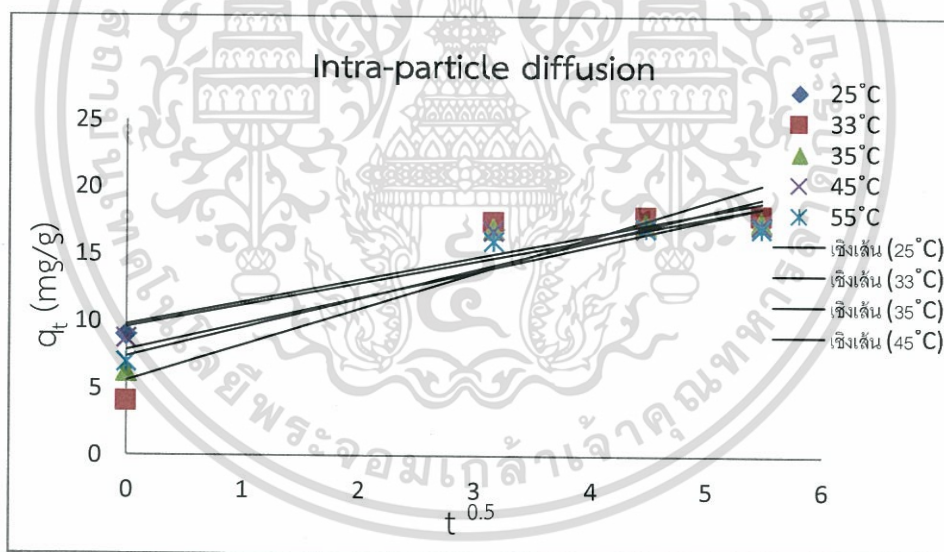
จากรูปที่ 4.20 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อมเบสลิครด 9 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีค่าเท่ากับ  $-16.90$  KJ/mol แสดงให้เห็นถึงการดูดซับที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งจากการทดลอง จากงานวิจัยของ M. Hamdi Karao glu และคณะ ได้ศึกษาการดูดซับโครเมียม (III) โดยใช้กิ่งไม้จากการตัดแต่งไร่องุ่น จากการทดลองพิจารณาว่า  $E_a$  มีค่าเท่ากับ  $-15.65$  ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง พลังงานกระตุ้นเป็นพลังงานที่น้อยที่สุดที่อนุภาคของสารจะต้องได้รับเพิ่มเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ ซึ่งพลังงานกระตุ้นจะส่งผลให้อนุภาคของสารเคลื่อนที่เร็วขึ้นเนื่องจากได้รับพลังงานมากขึ้น อนุภาคชนกัน ในตำแหน่งที่เหมาะสมมากขึ้น ทำให้มีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี โดยปฏิกิริยาเคมีที่ต้องใช้พลังงานกระตุ้นมากเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ยาก แต่ปฏิกิริยาที่ใช้พลังงานกระตุ้นน้อยเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่าย ค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) สามารถบ่งบอกกลไกการดูดซับได้ ถ้าหากค่า  $E_a$  อยู่ในช่วง 5-50 KJ/mol เป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่า  $E_a$  อยู่ในช่วง 60-800 KJ/mol จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี (Fatih Deniz, 2011) ดังนั้นในการทดลองนี้ การดูดซับสีย้อมเบสลิครด 9 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพและเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

เมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในสมการของ Elovich จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $q_t$ ) กับเวลา ( $\ln t$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 สมการของ Elovich เมื่อใช้ข้อมูลหมุ่ในการดูดซับที่ 25, 33, 35, 45 และ 55 °C

เมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในสมการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $q_t$ ) กับ  $(t^{0.5})$  แสดงได้ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 การแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) เมื่อใช้ข้อมูลหมุ่ในการดูดซับที่ 25, 33, 35, 45 และ 55 °C

จากกราฟแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) สามารถนำไปแทนค่าในสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Model) อธิบายได้ว่าหากสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งในปฏิกิริยามีปริมาณมากเกินไป การเกิดปฏิกิริยาจะถือว่าความเข้มข้นของสารนั้นคงที่ตลอดเวลา แสดงให้เห็นว่าการถ่ายโอนมวลผ่านพื้นที่ผิวภายนอกมีขอบเขตอย่างจำกัดจากสมการ

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

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

แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo Second Order Model) อธิบายได้ว่าการดูดซับเกิดจากแรงทางเคมี ที่เกิดจากการให้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพื้นที่ผิวตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างจำกัด

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

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

สมการของ Elovich อธิบายการดูดซับทางเคมี ซึ่งสมการนี้เหมาะสำหรับการพิจารณาการดูดซับที่พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

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

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) อธิบายถึงอัตราเร็วของการแพร่ของสารเข้าไปในรูพรุน จากสมการ

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

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

จากสมการแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) การเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order) และสมการของ Elovich สามารถหาค่าคงที่แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) พบว่าการดูดซับสารละลายสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกันและที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิแตกต่างกัน แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order) มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumar Mahapatra, 2012 ได้ศึกษาการดูดซับฟีนอลจากถ่านที่ได้มาจากรากผักตบชวา ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับเป็นไปตามสมการการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) ได้ค่า  $q_e$  เท่ากับ 9.1586 mg/g และ  $K_1$  เท่ากับ 0.21 1/min ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลอง และสมการของ Elovich ซึ่งค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Samera Salimpour Abkenar และคณะ, 2015 ได้ศึกษาการดูดซับแคดเมียมด้วยถ่านที่ได้มาจากรากผักตบชวา ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับด้วยสมการของ Elovich ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการคายซับ ( $\beta$ ) เท่ากับ 56.734 mg/g และอัตราเร็วในการดูดซับ ( $\alpha$ ) เท่ากับ 1.26 mg/g min ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลอง

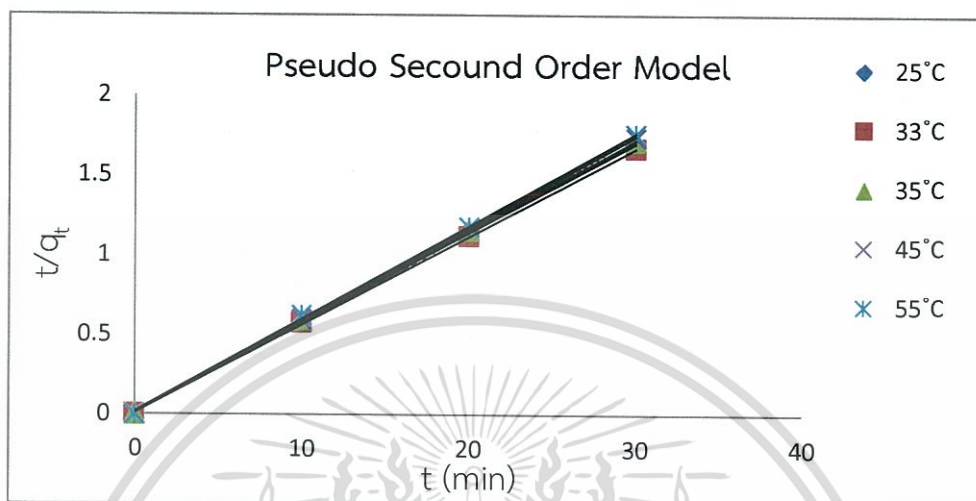
จากแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-Second Order Model) สามารถอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับทางเคมี ที่เกิดจากการใช้ไอเล็กตรอนร่วมกันของพื้นผิวผักตบชวา และโมเลกุลของสีย้อม เมื่อพิจารณาการดูดซับด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50, 100, 200 และ 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.0 kg/m<sup>3</sup> พบว่ามีอัตราเร็ว ดังนี้ 0.1117, 0.2019, 0.1506 และ 0.1317 g/mg min และมีอัตราเร็วในการแพร่ของสีย้อมเข้าไปในรูพรุนเพิ่มมากขึ้นด้วย (Intra-particle diffusion) เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมากขึ้นจะมีค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว ( $q_e$ ) เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัวมีค่าสูงขึ้นจึงต้องใช้เวลาเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวมากขึ้น ทำให้ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับมีค่าลดลง สำหรับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 25, 33, 35, 45 และ 55 มีอัตราเร็วลดลง ดังนี้ 0.0615, 0.0763, 0.0532, 0.0472 และ 0.0436 g/mg min และมีอัตราเร็วในการแพร่ของสีย้อมเข้าไปในรูพรุนลดลง (Intra-particle diffusion) เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้โมเลกุลของสีย้อมมีโอกาสมาเกิดการดูดซับได้ลดลง เพราะกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นนี้ จะเป็นลักษณะของการคายความร้อน (exothermic) การดูดซับนี้จึงเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ (Oubagaranadin และคณะ, 2014) จากงานวิจัยของ Sankar และคณะ, 2013 ได้ศึกษาการดูดซับ Malachite Green จากปูนปลาสเตอร์ และศึกษาทางอุณหพลศาสตร์ ผลการทดลองพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง และค่า  $K_2$  มีค่าเท่ากับ 0.00016 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ต่างๆที่ได้จากแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Model) แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo Second Order Model) สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion)

	Concentration (g/m <sup>3</sup> )				Temperature (C°)				
	50	100	200	300	25	33	35	45	55
<b>First order kinetics</b>									
K <sub>1</sub> (1/min)	0.1117	0.2019	0.1506	0.1317	0.0990	0.1552	0.1525	0.1877	0.1999
q <sub>e</sub> (mg/g)	4.24	9.17	17.78	16.79	6.22	7.10	6.98	6.64	7.45
R <sup>2</sup>	0.8196	0.9629	0.9394	0.8338	0.9004	0.8821	0.9201	0.9399	0.9301
<b>Second order kinetic</b>									
K <sub>2</sub> (g/mg min)	0.5550	0.3507	0.0957	0.1664	0.0615	0.0763	0.0532	0.0472	0.0436
q <sub>e</sub> (mg/g)	8.63	18.32	32.15	48.08	18.62	18.55	18.35	18.05	17.79
R <sup>2</sup>	0.9997	0.9998	0.9990	0.9999	0.9994	0.9999	0.9998	0.9998	0.9994
<b>Elovich model</b>									
α (mg/g min)	1.6669	4.6979	4.4864	4.7112	32.4414	3.0438	7.6352	32.1290	10.4946
β (mg/g)	0.4109	0.2502	0.1430	0.0952	0.3703	0.2292	0.2851	0.3778	0.3176
R <sup>2</sup>	0.9331	0.9312	0.9449	0.9295	0.9530	0.9292	0.9337	0.9345	0.9543
<b>Intra particle diffusion model</b>									
K <sub>id</sub> (mg/g min)	1.4990	2.4616	4.3210	6.4656	1.6729	2.6848	2.1616	1.6320	1.9488
R <sup>2</sup>	0.8704	0.8682	0.8883	0.8655	0.8991	0.8652	0.8714	0.8734	0.8986

#### 4.7 พลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

จากแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order model) ทำให้สามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส ได้ ดังรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	$R^2$	ค่าคงที่อัตราเร็ว ( $k_2$ ) (g/mg min)
33	0.9997	0.0763
35	0.9998	0.0532
45	0.9999	0.0472
55	0.9990	0.0436

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 33 องศาเซลเซียสไปเป็น 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับลดลงดังนี้ 0.0763, 0.0532, 0.0472 และ 0.0436 g/mg min ตามลำดับ การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้การดูดซับลดลง เนื่องจากกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นนี้เป็นลักษณะของการคายความร้อน (Exothermic) การดูดซับนี้จึงเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ (Oubagaranadin และคณะ, 2014)

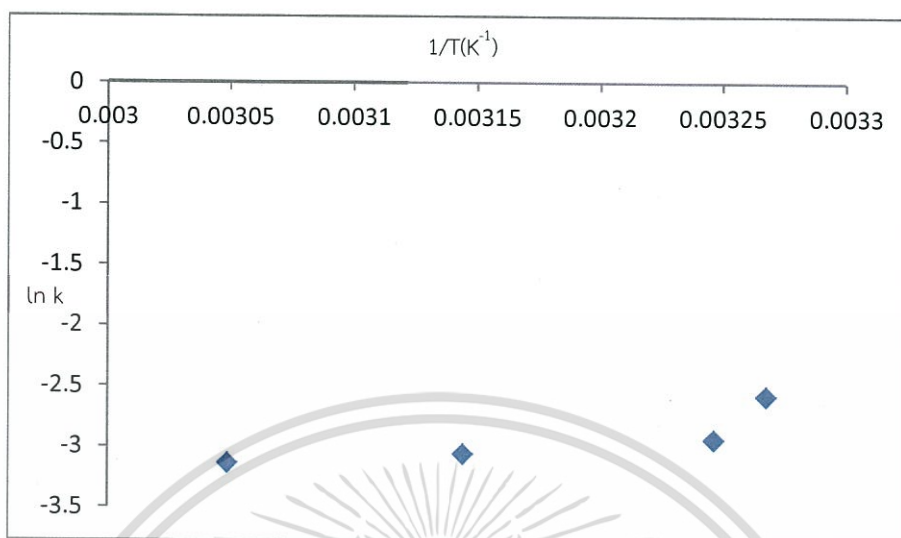
จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) คือ

$$\ln k = \ln A - E_a/RT$$

โดยที่ความชันของกราฟ คือ  $-E_a/R$  และจุดตัดแกน y คือ  $\ln A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการพลอตกราฟระหว่างล็อกการีที่มธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็ว ( $\ln k$ ) และหนึ่งส่วนอุณหภูมิ ( $1/T$ ) ทำให้สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ได้



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสที่อุณหภูมิ 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.24 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อมเบสึคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีค่าเท่ากับ  $-16.90$  KJ/mol ซึ่งพลังงานกระตุ้นเป็นพลังงานที่น้อยที่สุดที่อุณหภูมิของสารจะต้องได้รับเพิ่มเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ ซึ่งพลังงานกระตุ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของสารเคลื่อนที่เร็วขึ้นเนื่องจากได้รับพลังงานมากขึ้น อุณหภูมิชนกันในแต่ละตำแหน่งที่เหมาะสมมากขึ้น ทำให้มีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี โดยปฏิกิริยาเคมีที่ต้องใช้พลังงานกระตุ้นมากเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ยาก แต่ปฏิกิริยาที่ใช้พลังงานกระตุ้นน้อยเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่าย ค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) สามารถบ่งบอกกลไกการดูดซับได้ ถ้าหากค่า  $E_a$  อยู่ในช่วง 5-50 KJ/mol เป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่า  $E_a$  อยู่ในช่วง 60-800 KJ/mol จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี (Fatih Deniz, 2011) ดังนั้นในการทดลองนี้ การดูดซับสีย้อมเบสึคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ

#### 4.8 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี

การศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ  $5.0$  kg/m<sup>3</sup> และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม  $100$  g/m<sup>3</sup> pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง ค่าอุณหพลศาสตร์ที่ใช้ในศึกษา ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับ ( $\Delta H^0$ ) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^0$ )

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

การคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี สามารถหาค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (K) คำนวณได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_c = q_e/c_e$$

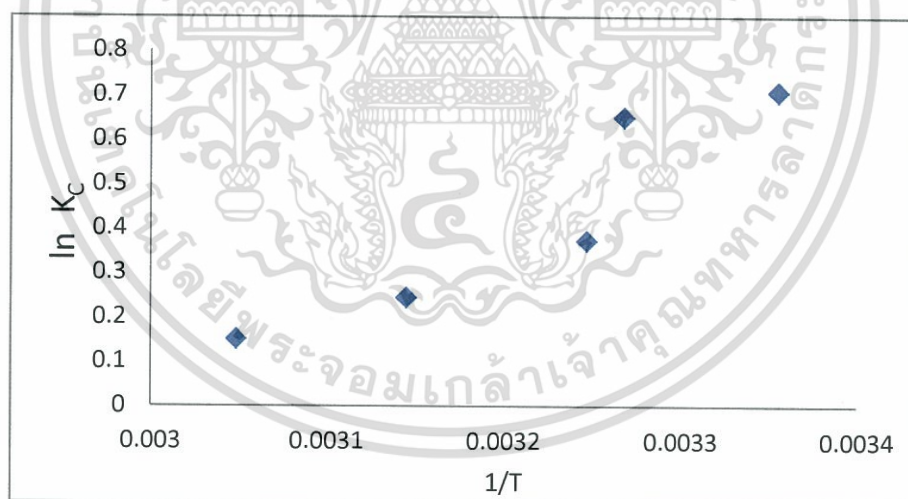
$$\ln K_c = \Delta S^0/R - \Delta H^0/RT$$

ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (K)
25	2.03
33	1.92
35	1.45
45	1.28
55	1.16

เมื่อนำผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในช่วง 25 ถึง 55 องศาเซลเซียส ของการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln K_c$  กับ  $1/T$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชัน เท่ากับ  $-\Delta H^0/R$  และจุดตัดแกนตั้ง เท่ากับ  $\Delta S^0/R$



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

จากความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการของแวนฮอฟฟ์จะได้ค่าเอนทัลปีมาตรฐาน ( $\Delta H^0$ ) เท่ากับ  $-16.03$  KJ/mol จะเห็นได้ว่าค่าเอนทัลปีมาตรฐานมีค่าเป็นลบ ( $\Delta H^0 =$  ลบ) แสดงว่าการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเป็นการดูดซับแบบคายความร้อน คือ เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพลดลง และเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับน้อยลงจะทำให้การดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเพิ่มมากขึ้น จากงานวิจัยของ Giwa, 2013 ได้ศึกษาเทอร์โมไดนามิกของการกำจัดสีย้อมเบสิคโดยใช้แต่งโมโน Binary จากผลการทดลอง ค่า  $\Delta H^0$  เท่ากับ  $-14.82$  KJ/mol ซึ่งให้เห็นว่าผลการดูดซับที่ได้เป็นการคายความร้อนในธรรมชาติ และจะดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

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

จากจุดตัดแกนตั้งที่ได้จากสมการของแวนท์ฮอฟฟ์เท่ากับ  $\Delta S^0 / R$  ได้ค่าเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) เท่ากับ  $-47.98$  J/mol.K โดยทั่วไปค่าเอนโทรปีของการดูดซับบอถึงความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับ (Absorbent) และตัวถูกดูดซับ (Absorbate) โดยที่ถ้าค่าเอนโทรปีมีค่าเป็นบวก ( $\Delta S^0 = +$ ) แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมาก บอถึงมีการเกิดพันธะหรือมีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่ถ้าค่าเอนโทรปีมีค่าเป็นลบ ( $\Delta S^0 = -$ ) แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับน้อย บอถึงไม่มีการเกิดพันธะหรือไม่มีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ จากนั้นจากค่าเอนโทรปีที่คำนวณได้มีค่าเป็นลบ แสดงว่า โมเลกุลของสีย้อมที่เป็นประจุบวก ( $dye^+$ ) เกิดการแลกเปลี่ยนกับชั้นในของผักตบชวาที่เป็นประจุลบของคาร์บอกซิลิก ( $COO^-$ ) โดยไม่เกิดพันธะต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูด งานวิจัยของ Okoli, 2015 ศึกษาการดูดซับสีย้อม orange G และ safranin O โดยใช้แอกทิเวเตดคาร์บอนจากเมล็ดมะขาม ผลการทดลองได้ค่า  $\Delta S^0$  เท่ากับ  $-24.87$  J/mol.K แสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นระเบียบขอบพื้นที่ผิวตัวดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

#### 4.8.3 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 ( $\Delta G^0$ ) ของการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่อุณหภูมิ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $-1.7343$ ,  $-1.3505$ ,  $-1.2545$ ,  $-0.7747$  และ  $-0.2949$  KJ/mol ค่าพลังงานอิสระมาตรฐานที่ได้มีค่าลบ แสดงว่าโดยธรรมชาติแล้ว การดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพสามารถเกิดขึ้นได้เอง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dragan DJORDJEVIC และคณะ ทำการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้ซีลีไธได้ค่า  $\Delta G^0$  เท่ากับ  $-1.686$  แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ว่าที่การดูดซับสามารถเกิดได้เองในธรรมชาติ โดยอุณหภูมิที่ใช้มีความสัมพันธ์กับโมเลกุลของพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

ตารางที่ 4.7 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
-16.03	-47.98	-1.7343	-1.3505	-1.2545	-0.7747	-0.2949

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมที่เริ่มต้นเท่ากัน ความสามารถในการดูดซับเกิดได้ดีที่ pH สูงๆ เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน w/v สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน w/v เดียวกัน แต่ความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น พบว่าความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลง การวัดค่าหน่วยสี ADMI พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อม 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าหน่วยสีอยู่ที่ 28,833 ADMI และจากการทดลองการดูดซับน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ด้วยผักตบชวาที่สภาวะสมดุลแล้ว มีปริมาณอยู่ในช่วง 3,268 ADMI ซึ่งเป็นไปตามเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม 89 เปอร์เซ็นต์

จากไอโซเทอร์มในการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) พบว่า เป็นไปตามไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของ Dubinin-Radushkevich เนื่องจากไอโซเทอร์มนี้ได้เสนอการดูดซับที่เกิดบนผิวของตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous)

จากแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) พบว่าการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกเป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order) สามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วได้ดังนี้ เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นต่างกันจาก 50 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 100, 200 และ 300 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนี้ 0.1117, 0.2019, 0.1506 และ 0.1317 g/mg min ผลการทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียส ไปเป็น 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีอัตราเร็ว ดังนี้ 0.0615, 0.0763, 0.0532, 0.0472 และ 0.0436 g/mg min จากค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีค่าเท่ากับ -16.90 กิโลจูล/โมล บอกลักษณะการดูดซับการดูดซับทางกายภาพและเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จากค่าทางอุณหพลศาสตร์พบว่าการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีค่าเอนทัลปีมาตรฐาน ( $\Delta H^\circ$ ) เท่ากับ -16.03 กิโลจูล/โมล แสดงว่าเป็นการดูดซับแบบคายความร้อน ส่วนค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน ( $\Delta G^\circ$ ) เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียส ไปเป็น 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส ที่ค่าเท่ากับ -1.7343, -1.3505, -1.2545, -0.7747 และ -0.2949 กิโลจูล/โมล แสดงว่าโดยธรรมชาติแล้ว ขบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ และค่าเอนโทรปี ( $\Delta S^\circ$ ) มีค่าเท่ากับ -47.98 จูล/โมล.เควิน บอกลักษณะการดูดซับและตัวถูกดูดซับไม่เกิดพันธะระหว่างกัน มีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับน้อย จากนั้นจากค่าเอนโทรปีที่คำนวณได้มีค่าเป็นลบ แสดงว่า โมเลกุลของสีย้อมที่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุบวก ( $\text{dye}^+$ ) เกิดการแลกเปลี่ยนกับชั้นในของผักตบชวาที่เป็นประจุลบของคาร์บอกซิลิก ( $\text{COO}^-$ ) โดยไม่เกิดพันธะต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของผักชวาในสภาวะทั้งกรดและเบสร่วมกัน เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการปรับปรุงคุณภาพในสภาวะที่เป็นเบส แล้วให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสี ย้อมน้อยกว่าในสภาวะที่เป็นกรด
2. ควรมีการศึกษากับน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรม
3. ควรมีการศึกษการดูดซับเทียบกับสีย้อมชนิดอื่นๆ เช่น สีย้อมเอซิด สีย้อมรีแอคทีฟ เป็นต้น
4. ควรมีการศึกษการนำผักตบชวาที่ผ่านการดูดซับไปใช้ให้เกิดประโยชน์
5. ควรมีการศึกษการนำผักตบชวาที่ผ่านการดูดซับแล้วนำมาใช้ซ้ำอีกครั้ง เพื่อบำบัดค่าหน่วยสี ADMI ที่ยังเกินมาตรฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. **ของเสียอันตราย**. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรังสิต.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2556. **คู่มือแนวทางการจัดการน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ**. [Online]. Available : [http://www.diw.go.th/hawk/job/1\\_8.pdf](http://www.diw.go.th/hawk/job/1_8.pdf)
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2559. **ปัญหามลพิษจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ**. [Online]. Available : [http://www.thaiwasteexchange.net/detail\\_knowledge.php?kid=37](http://www.thaiwasteexchange.net/detail_knowledge.php?kid=37) เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 กันยายน 2559
- ชินขรรุา. 2007. **ประเภทของสีย้อม**. [Online]. Available : [http://www.tpa.or.th/writer/read\\_this\\_book\\_topic.php?pageid=6&bookID=370&read=true&count=true](http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=6&bookID=370&read=true&count=true) เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 กันยายน 2559
- จันทร์ทิพย์ ชื่อสัตย์. 2553. **อุตสาหกรรมสิ่งทอ**. [Online]. Available : <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=24> เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 กันยายน 2559
- จินตนา จุลอุล. 2551. “การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไคเรกท์จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ.” *วารสารสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, หน้า 32 - 41
- ชัยยุทธ ช่างสาร และ เลิศณรงค์ ศรีพนม. 2543. **เคมีประยุกต์**. สำนักพิมพ์. เพ็ชรสกุล, กรุงเทพฯ.
- ญาดา มุกแจ่ม 2555. [Online]. Available <http://yadaidea.blogspot.com/2012/03/colormeasurement-in-admi-authorinfo.html> เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 กันยายน 2559
- เดชา ฉัตรศิริเวช. 2552. **แบบจำลองสมดุลของเหลว. หนังสือกระบวนการดูดซับ**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 75-79.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์. 2550. “ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าด้วยตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ผสมดินเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดแบบหมุนน้ำเสีย.” *วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*.
- นภา ศิวรังสรรค์. 2555. **ระบบบำบัดน้ำเสียเคมี**. [Online]. Available : <http://www.greenwater.net>
- นภดล ไชยคำ, พีรพรรณ พันธมนาวิน และลัดดา ผดุงทรัพย์. 2542. **เคมี**. 1, แมคกรอ-ฮิล, กรุงเทพฯ.
- ประรัชกรณ์ สาธิตคุณ. 2546. “การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานสีอ้อมโดยใช้ซีโอไลต์.” *ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*.
- ปองพล สุริยะกันธร, ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2557. “อิทธิพลของอุณหภูมิและความหนาของชั้นวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของดอกคาโมมาลัยอบแห้ง.” *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*. 45 (3/1) (พิเศษ). 228-231.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พรชกร ใจประดับเพชร. 2549. “การกำจัดแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และ วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์. 2553. การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ. *วิศวกรรมลาดกระบัง*. 27 (4) : 61 – 66.
- พลวัฒน์ พาพรหมพิง. 2558. “การดูดซับกับการบำบัดน้ำเสีย.” สารวิจัยเพื่อชุมชน, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 5(3) : 52-53.
- รวินทร์ สุทธะนันท์ และ โกวิท พิชะมังคลา. 2554. “จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบดัดแปร.” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือปีที่ 21*
- ศรันยา เกษมบุญญากร. 2012. แหล่งกำเนิดสีย้อม. [Online]. Available : [http://www.pirun.ku.ac.th/~agrsyp/?page\\_id=86](http://www.pirun.ku.ac.th/~agrsyp/?page_id=86) เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 กันยายน 2559
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. [Online]. Available [https://www.mtec.or.th/mcu/p\\_hcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/41-sem-th](https://www.mtec.or.th/mcu/p_hcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/41-sem-th) เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 กันยายน 2559
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2556. [Online]. Available : <https://mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/1427->เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 กันยายน 2559
- ศูนย์นวัตกรรมวัสดุ. 2557. [Online]. Available <http://www.mic.eng.ku.ac.th/services.php> เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 กันยายน 2559
- สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ 2558. [Online]. Available <http://wqm.pcd.go.th/water/images/industry/media/2558/industryspecification.pdf> เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 กันยายน 2559
- สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2552. *อุตสาหกรรมฟอกย้อม*. [Online]. Available : [https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiL3s\\_xxa3RAhVKMY8KHTnXCDUQFggYMAA&url=http%3A%2F%2Fscience.buu.ac.th%2Fojs246%2Findex.php%2Fsci%2Farticle%2FviewFile%2F773%2F715&usq=AFQjCNHhmYorRDaoWn0zdjZNI54jL4XvQ&sig2=qGfrmudJ43iJLbTI6eol7Q](https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiL3s_xxa3RAhVKMY8KHTnXCDUQFggYMAA&url=http%3A%2F%2Fscience.buu.ac.th%2Fojs246%2Findex.php%2Fsci%2Farticle%2FviewFile%2F773%2F715&usq=AFQjCNHhmYorRDaoWn0zdjZNI54jL4XvQ&sig2=qGfrmudJ43iJLbTI6eol7Q)
- Arunadevi K. and Venkatachalam R. 2016. “A study on the preparation of adsorbent from Ananas comosus leaves plant by thermo chemical activation and its adsorption behavior of the removal of malachite green.” [Online]. Available : <http://www.imedpub.com/articles/a-study-on-the-preparation-of-adsorbent-from-ananas-comosus-leaves-plant-bythermo-chemical-activation-and-its-adsorption-behavior.pdf>
- Brian M. Tissue 1996. [Online]. Available <http://elchem.kaist.ac.kr/vt/chem-ed/spec/uv-vis/uv-vis.htm> เข้าถึงเมื่อวันที่ 18 กันยายน 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Cheremisinoff, Nicholas P. 2002. **Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology**. Butterworth-Heinemann.
- C.Aharoni and F.C. Tompkins, Adv. Catalysis, 21. 1970. Rudzinski. W., Plazinski, W. 2009. On the applicability of the pseudo-second order equation to represent the kinetics of adsorption at solid/solution interfaces: a theoretical analysis based on the statistical rate theory. **Adsorption** 15. Pages 181-192. [treat.com/15414825](http://treat.com/15414825)
- Dada, A.O, Olalekan, A.P and Olatunya, A.M 2012. Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Rudushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of  $Zn^{2+}$  Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk. **IOSR Journal of Applied Chemistry**. Volume 3 Pages : 38-45
- Davoud Balarak และคณะ. 2015. The use of low-cost adsorbent (Canola residues) for the adsorption of methylene blue from aqueous solution: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies. **Colloids and Interface Science Communications**. Volume 7, July 2015, Pages 16-19
- Fatih Deniz and Sengul Karaman. 2011. Removal of Basic Red 46 dye from aqueous solution by pine tree leaves. **Chemical Engineering Journal**. Volume 170 Pages 6-74
- Giwa. 2013. "Removal of Basic Dye From Aqueous Solution By Adsorption On Melon Husk In Binary And Ternary Systems." Department of Pure and Applied Chemistry, Ladoke Akintola University of Technology, Ogbomoso – Nigeria. **Chemical and Process Engineering Research**.
- Hamdi Karaoğlu และคณะ. 2010. Biosorption of Cr(III) solution using vineyard pruning waste. **Chemical Engineering Journal**.
- Lorenc-Grabowska and Gryglewicz. 2007. Adsorption characteristics of Congo Red on coal-based mesoporous activated carbon. **Dyes and Pigment** 74 , Pages 34-40
- Medhat Ibrahim และคณะ. 2015. Spectroscopic analyses of water hyacinth: FTIR and modeling approaches. **Der Pharma Chimica** 7(9). Pages 182-188
- Meric S, Kaptan D, Olmez T. 2004. Color and COD removal from wastewater containing Reactive Black 5 using Fenton oxidation process. **J. Chemosphere** 54:435-441.
- Mishra, A., Agarwal, M., Bajpai, M., Rajani, S., Mishra, R.P., 2002. Plantago psylliummucilage for sewage and tannery effluent treatment. **Iran. Polym. J.** 11, 381–386.

- Mohammadine El Haddad และคณะ. 2012. Removal of a cationic dye (Basic Red 12) from aqueous solution by adsorption onto animal bone meal. **Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences**
- Mohammadine El Haddad. 2013. "Use of Fenton reagent as advanced oxidative process for removing textile dyes from aqueous solutions" [Online]. Available : [http://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol5/vol5\\_N3/82-JMES-594-2014-ElHaddad.pdf](http://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol5/vol5_N3/82-JMES-594-2014-ElHaddad.pdf)
- Mohammadine El Haddad 2015. Removal of Basic Fuchsin dye from water using mussel shell biomass waste as an adsorbent: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. **Journal of Taibah University for Science**. Volume 10 (2016) Pages 664-674
- Moreno-Castilla. 2004. Adsorption of organic molecules from aqueous solution on carbon materials. **Carbon**. Volume 42, Issue 1, Pages 83-94
- Nasir Uddin, Tariqul Islam and Sreejon Das 2014. A Novel Biosorbent, Water-Hyacinth, Uptaking Methylene Blue from Aqueous Solution : Kinetics and Equilibrium Studies. **Hindawi Publishing Corporation International Journal of Chemical Engineering**. Volume 2014, 13 Pages
- OkOli และคณะ. 2015. Adsorptive removal of dyes from synthetic wastewater using activated carbon from tamarind seed. **European Scientific Journal**. Volume 11, No 18
- Pradthana. 2008. กระบวนการดูดซับ. [Online]. Available : <https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/> เข้าถึงเมื่อวันที่ 18 กันยายน 2559
- Samera Salimpour, Abkenar และ คณะ. 2015. Dye adsorption of cotton fabric grafted with PPI dendrimers: Isotherm and kinetic studies. **Journal of Environmental Management**. Volume 163, 1 November 2015, Pages 53-61
- Siti Maryam Rusly and Shaliza Ibrahim. 2010. Adsorption of textile Reactive Dye by Palm Shell Activated Carbon : Response Surface Methodology. **World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemistry, Molecular, Nuclear, Material and Metallurgical Engineering**. Volume 4, No 7
- Wan Ngah, W.S., Kamari, A. and Koay, Y.J. 2004. "Equilibrium and kinetics studies of adsorption of copper (II) on chitosan and chitosan/PVA beads." **International Journal of Biological Macromolecules** 34 , Pages 155-161.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม Basic Red 9

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

1. นำสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นเจือจางมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นนำเสปคตรัมที่ได้มาหาค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด
2. เตรียมสารละลายสีที่ความเข้มข้นต่าง คือ 20, 40, 60, 80, 100, 120 และ 140 กรัม/ลูกบาศก์เมตร
3. นำสารละลายสีย้อมที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่  $\lambda_{\max}$
4. นำข้อมูลที่ได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมก็จะได้กราฟมาตรฐาน

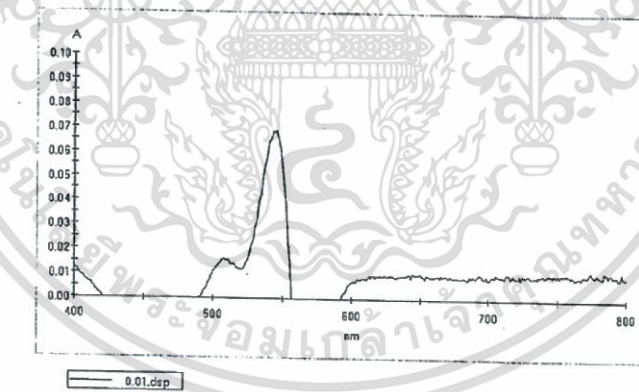
#### ก.2 วิธีการหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม

1. นำสารละลายสีย้อมที่ต้องการหาความเข้มข้น มาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่  $\lambda_{\max}$  ของแต่ละความเข้มข้นโดยวิธีการเทียบมาตรฐาน

#### ก.3 กราฟมาตรฐาน

ความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ( $\lambda_{\max}$ ) คือ 545 นาโนเมตร

#### รูปที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีย้อมเบสิคเรด 9

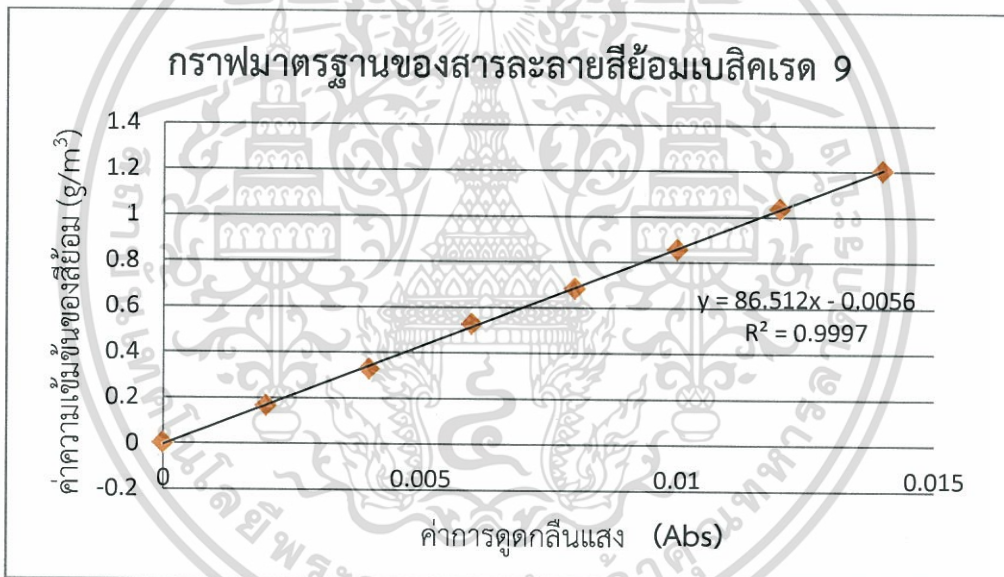


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายสี้อมเบสิคเรด 9

ค่าความเข้มข้นของสี้อม (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
20	0.165
40	0.328
60	0.526
80	0.683
100	0.857
120	1.036
140	1.205

รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายสี้อมเบสิคเรด 9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการละลาย

ข.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสีย สีย้อมสังเคราะห์

ตารางที่ ข.1 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วย ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 3 ที่ อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	80.56	3.89	1.13	0.26
10	21.83	15.63	0.22	0.6
20	17.85	16.43	-0.07	0.6
30	16.17	16.77	-0.28	0.6
40	13.53	17.29		0.6
50	16.04	16.79	-0.30	0.6
60	14.21	17.16	-0.88	0.6
90	13.48	17.30		0.6
120	10.57	17.89		0.6
150	13.82	17.24	-1.26	0.6
180	12.50	17.50		0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 4 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	80.46	3.91	1.14	0.26
10	14.29	17.14	-0.14	0.06
20	11.37	17.73	-0.84	0.06
30	10.66	17.87	-2.59	0.06
40	10.63	17.87		0.06
50	10.20	17.96		0.06
60	9.04	18.19		0.05
90	8.66	18.27		0.05
120	8.80	18.24		0.05
150	8.34	18.33		0.05
180	7.32	18.54		0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 5 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	81.29	3.74	1.15	0.27
10	13.24	17.35	-0.29	0.06
20	10.87	17.83	-1.35	0.06
30	10.86	17.83	-1.37	0.06
40	10.72	17.86	-1.88	0.06
50	9.75	18.05		0.06
60	8.79	18.24		0.05
90	8.02	18.40		0.05
120	8.22	18.36		0.05
150	7.94	18.41		0.05
180	7.60	18.48		0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	85.38	2.92	1.17	0.34
10	13.62	17.28	-0.23	0.06
20	10.96	17.81	-1.21	0.06
30	10.68	17.86	-2.23	0.06
40	10.12	17.98		0.06
50	9.88	18.02		0.06
60	9.08	18.18		0.05
90	8.49	18.30		0.05
120	8.79	18.24		0.05
150	8.29	18.34		0.05
180	8.03	18.39		0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสสีครีต 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	82.54	3.49	1.16	0.29
10	14.82	17.04	-0.08	0.06
20	11.99	17.60	-0.57	0.06
30	10.30	17.94		0.06
40	10.21	17.96		0.06
50	10.14	17.97		0.06
60	9.53	18.09		0.06
90	9.13	18.17		0.06
120	8.47	18.31		0.05
150	8.45	18.31		0.05
180	8.31	18.34		0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	78.31	4.34	1.13	0.23
10	13.17	17.37	-0.30	0.06
20	10.39	17.92		0.06
30	10.16	17.97		0.06
40	10.24	17.95		0.06
50	10.08	17.98		0.06
60	8.90	18.22		0.05
90	8.44	18.31		0.05
120	8.34	18.33		0.05
150	7.29	18.54		0.05
180	7.85	18.43		0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ควบคุม pH เท่ากับ 9 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	67.47	6.51	1.06	0.15
10	12.45	17.51	-0.44	0.06
20	10.47	17.91		0.06
30	9.26	18.15		0.06
40	10.29	17.94		0.06
50	8.82	18.24		0.05
60	8.60	18.28		0.05
90	7.71	18.46		0.05
120	7.38	18.52		0.05
150	6.16	18.77		0.05
180	7.23	18.55		0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของผักตบชวาที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

ตารางที่ ข.8 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	71.63068	5.444794	1.109372	0.183662
10	48.0511	17.70991	-0.22275	0.056466
20	44.36038	18.06593	-0.61486	0.055353
30	45.38558	18.28787	-1.6818	0.054681
40	42.30998	18.30867		0.054619
50	43.33518	18.40808		0.054324
60	43.54022	18.489		0.054086
90	44.05282	18.55835		0.053884
120	43.9503	18.6855		0.053517
150	45.28306	18.66932		0.053564
180	44.15534	18.67856		0.053537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 33 องศา เซลเซียส

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> )	1/q
0	57.73509	5.444794	1.109372	0.183662
10	37.5273	17.70991	-0.22275	0.056466
20	34.26139	18.06593	-0.61486	0.055353
30	31.30167	18.28787	-1.6818	0.054681
40	31.60785	18.30867		0.054619
50	31.09755	18.40808		0.054324
60	30.28107	18.489		0.054086
90	31.19961	18.55835		0.053884
120	29.36254	18.6855		0.053517
150	30.28107	18.66932		0.053564
180	29.56666	18.67856		0.053537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 3.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	39.43942	5.444794	1.109372	0.183662
10	24.16395	17.70991	-0.22275	0.056466
20	21.19087	18.06593	-0.61486	0.055353
30	19.07589	18.28787	-1.6818	0.054681
40	19.25837	18.30867		0.054619
50	18.18191	18.40808		0.054324
60	17.97687	18.489		0.054086
90	16.43907	18.55835		0.053884
120	15.31135	18.6855		0.053517
150	15.87521	18.66932		0.053564
180	15.56765	18.67856		0.053537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสึครด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	27.54711	5.444794	1.109372	0.183662
10	18.01275	17.70991	-0.22275	0.056466
20	16.20533	18.06593	-0.61486	0.055353
30	13.78586	18.28787	-1.6818	0.054681
40	13.87812	18.30867		0.054619
50	12.63763	18.40808		0.054324
60	12.92469	18.489		0.054086
90	11.50991	18.55835		0.053884
120	11.27412	18.6855		0.053517
150	10.94605	18.66932		0.053564
180	10.9153	18.67856		0.053537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสึคเรต 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	51.64761	5.444794	1.109372	0.183662
10	13.61544	17.70991	-0.22275	0.056466
20	10.95856	18.06593	-0.61486	0.055353
30	10.67922	18.28787	-1.6818	0.054681
40	10.12053	18.30867		0.054619
50	9.882572	18.40808		0.054324
60	9.075578	18.489		0.054086
90	8.485852	18.55835		0.053884
120	8.785888	18.6855		0.053517
150	8.289276	18.66932		0.053564
180	8.030624	18.67856		0.053537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

ตารางที่ ข.13 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 50 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	46.000000	0.8	0.905538	1.25
10	8.852095	8.229581	-0.21068	0.121513
20	7.475528	8.504894	-0.46811	0.117579
30	6.959315	8.608137	-0.62511	0.116169
40	5.773937	8.845213		0.113056
50	5.697461	8.860508		0.11286
60	5.429795	8.914041		0.112183
90	5.085653	8.982869		0.111323
120	4.473845	9.105231		0.109827
150	4.206179	9.158764		0.109185
180	4.206179	9.158764		0.109185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.14 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสึคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	72.77603	5.4447	1.109372	0.183662
10	11.45043	17.7099	-0.22275	0.056466
20	9.670335	18.0659	-0.61486	0.055353
30	8.560662	18.2878	-1.6818	0.054681
40	8.45663	18.3086		0.054324
50	7.959589	18.4080		0.054086
60	7.555021	18.4890		0.054619
90	7.208249	18.5583		0.053884
120	6.572499	18.6855		0.053517
150	6.653412	18.6693		0.053564
180	6.607176	18.6785		0.053537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสึคเรต 9 ความเข้มข้น 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	153.2353	9.352947	1.361856	0.106918
10	48.42407	30.31519	0.310602	0.032987
20	45.19579	30.96084	0.145792	0.032299
30	39.06208	32.18758	-0.76403	0.031068
40	38.20121	32.35976	1.361856	0.030903
50	34.5963	33.08074		0.030229
60	34.05826	33.18835		0.030131
90	34.75772	33.04846		0.030259
120	30.34575	33.93085		0.029472
150	28.08596	34.38281		0.029084
180	27.22509	34.55498		0.028939

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.16 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสึครด 9 ความเข้มข้น 300 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 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> )	1/q
0	228.431	14.3138	1.148387	0.069863
10	67.06093	46.58781	-0.17786	0.021465
20	61.53559	47.69288	-0.67764	0.020967
30	60.37502	47.925	-0.93268	0.020866
40	57.54927	48.49015		0.020623
50	57.75111	48.44978		0.02064
60	60.77869	47.84426		0.020901
90	58.96215	48.20757		0.020744
120	56.74192	48.65162		0.020554
150	56.641	48.6718		0.020546
180	57.1456	48.57088		0.020588

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

ตารางที่ ข.17 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสสีครีต 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ควบคุมอุณหภูมิที่ 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> )	1/q
0	55.05609	8.988782	0.964543	0.11125
10	15.36766	16.92647	0.106642	0.059079
20	13.2912	17.34176	-0.06397	0.057664
30	10.91105	17.81779	-0.41228	0.056124
40	8.97602	18.2048	0.964543	0.054931
50	8.421793	18.31564		0.054598
60	7.93195	18.41361		0.054308
90	7.7173	18.45654		0.054181
120	7.663623	18.46728		0.05415
150	7.429541	18.51409		0.054013
180	7.332177	18.53356		0.053956

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.18 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสสีครีต 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ความเข้มข้นอนุภาคน้ำที่ 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> )	t/q
0	79.81514	4.036971	1.148387	0.24771
10	12.76982	17.44604	-0.17786	0.05732
20	10.5004	17.89992	-0.67764	0.055866
30	10.0339	17.99322	-0.93268	0.055576
40	9.450063	18.10999	1.148387	0.055218
50	8.998083	18.20038		0.054944
60	8.473173	18.30537		0.054629
90	7.906255	18.41875		0.054293
120	7.860656	18.42787		0.054266
150	7.627867	18.47443		0.054129
180	7.411076	18.51778		0.054002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.19 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ความคุมอุณหภูมิที่ 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> )	t/q
0	68.96076	6.207849	1.055697	0.161086
10	15.42644	16.91471	-0.17948	0.05912
20	13.54914	17.29017	-0.5436	0.057836
30	12.58757	17.48249	-1.02822	0.0572
40	12.11903	17.57619	1.055697	0.056895
50	10.17234	17.96553		0.055662
60	10.03782	17.99244		0.055579
90	9.369227	18.12615		0.055169
120	8.982119	18.20358		0.054934
150	8.718127	18.25637		0.054775
180	8.77904	18.24419		0.054812

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.20 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ความเข้มข้นอนุภาคน้ำที่ 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> )	t/q
0	56.46229	8.707542	0.933658	0.114843
10	15.9924	16.80152	-0.31033	0.059518
20	15.09894	16.98021	-0.50764	0.058892
30	13.64142	17.27172	-1.71654	0.057898
40	13.54538	17.29092		0.057834
50	13.40429	17.31914		0.05774
60	11.82007	17.63599		0.056702
90	11.51611	17.69678		0.056507
120	10.5104	17.89792		0.055872
150	10.53123	17.89375		0.055885
180	10.12352	17.9753		0.055632

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.21 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH เท่ากับ 6 ควบคุมอุณหภูมิที่ 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> )	t/q
0	65.30426	6.939148	1.005381	0.14411
10	19.90314	16.01937	0.018892	0.062424
20	14.93409	17.01318	-1.29543	0.058778
30	14.85798	17.0284	-1.45067	0.058725
40	14.68084	17.06383		0.058603
50	13.87084	17.22583		0.058052
60	13.48773	17.30245		0.057795
90	13.62191	17.27562		0.057885
120	12.52929	17.49414		0.057162
150	11.94824	17.61035		0.056785
180	10.92258	17.81548		0.056131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีเขียวสังเคราะห์ โดยการวัดค่า ADMI

#### ค.1 การวิเคราะห์หีสี่ (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 วัดค่าทรานส์มิตแดนซ์ (%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

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

โดยที่

$$\Delta Vy = Vyc - Vys$$

$$\Delta(Vx - Vy) = (Vxc - Vyc) - (Vxs - Vys)$$

$$\Delta(Vy - Vz) = (Vyc - Vzc) - (Vys - Vzs)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

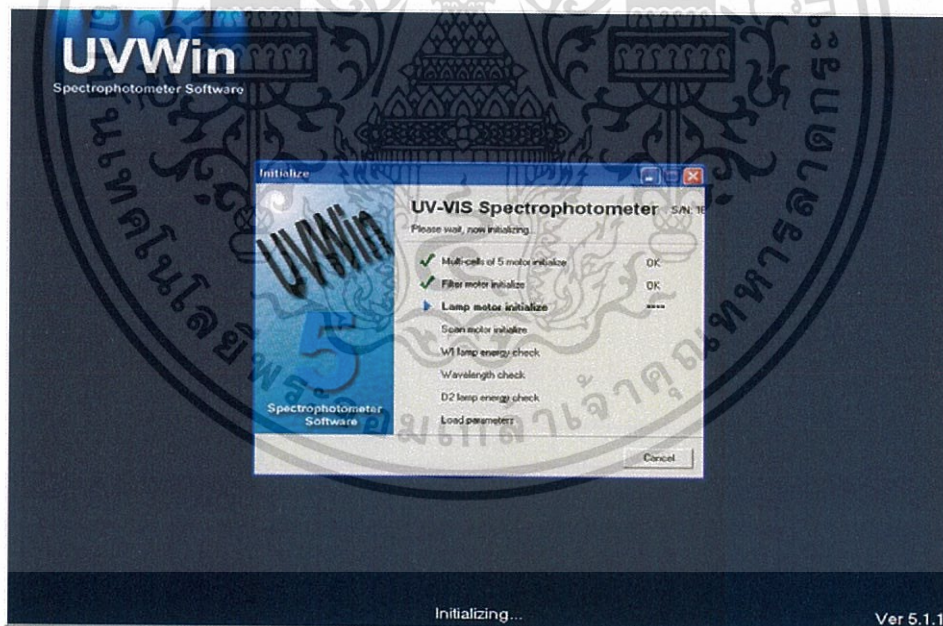
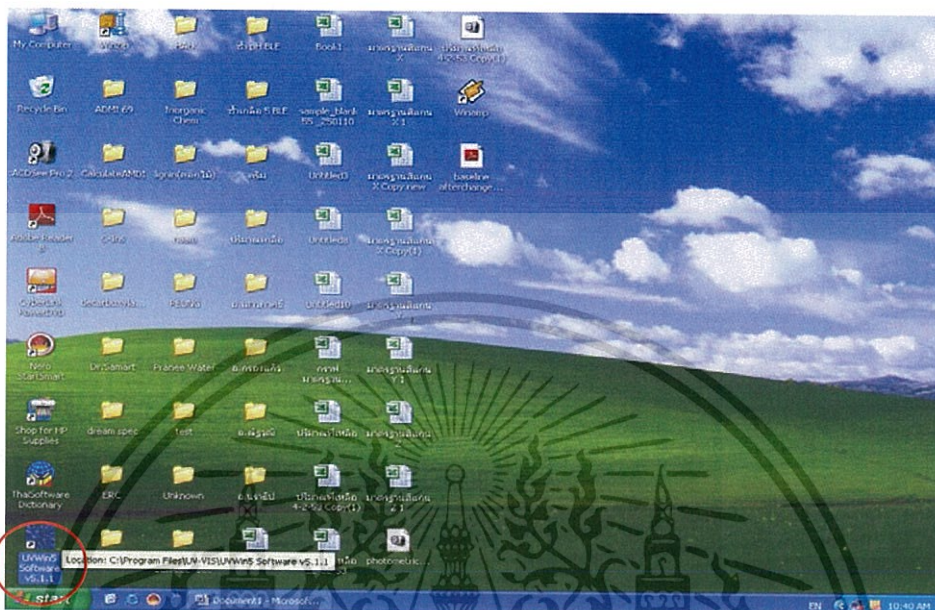
ที่มา : Andrew. et al. (1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การใช้โปรแกรมช่วยคำนวณค่าสี (ADMI)

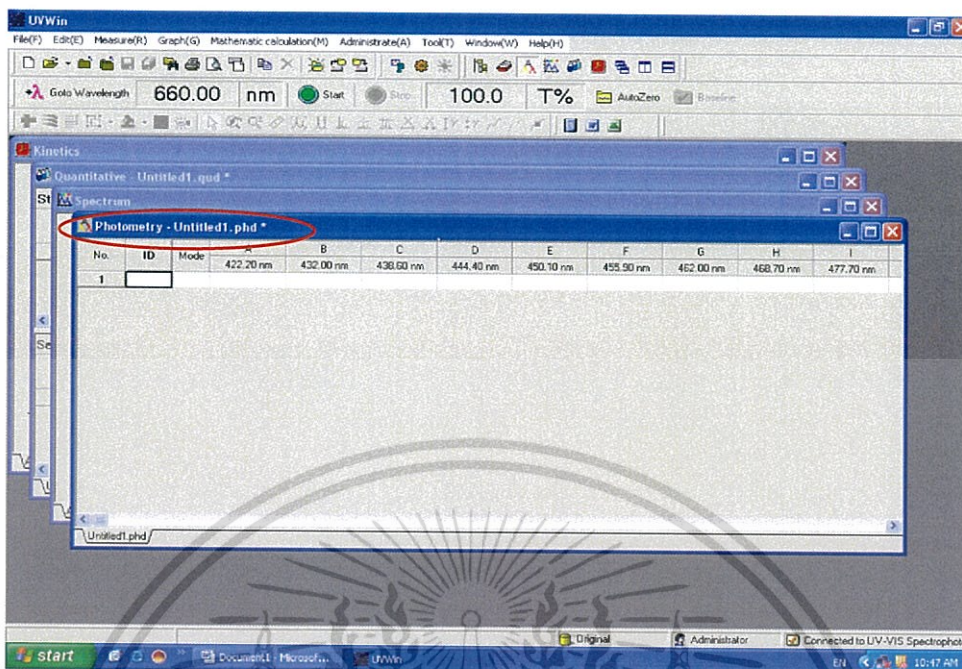
ขั้นตอนการดำเนินงานบนคอมพิวเตอร์ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. เปิดโปรแกรม UVWin5 Software v5.1.1 พอหน้าจอเปิดออกมา โปรแกรมจะทำการตรวจเช็คสภาพการใช้งานต่างๆ

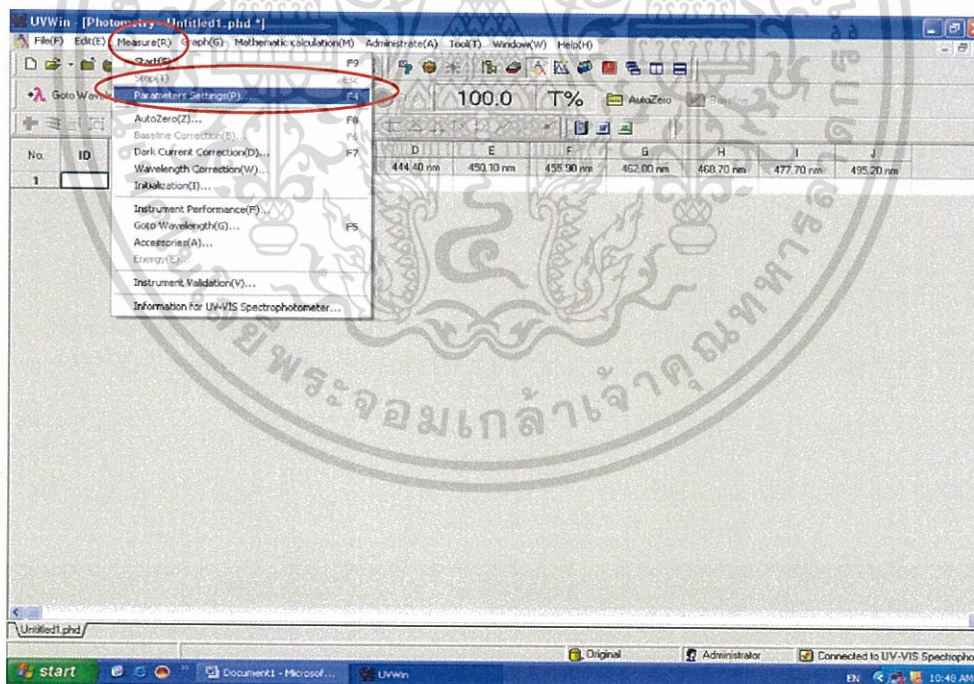


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เมื่อเข้าโปรแกรมเรียบร้อยแล้วให้เลือกโปรแกรมหน้า Photometry ส่วนหน้าต่างอื่นปิดให้หมด

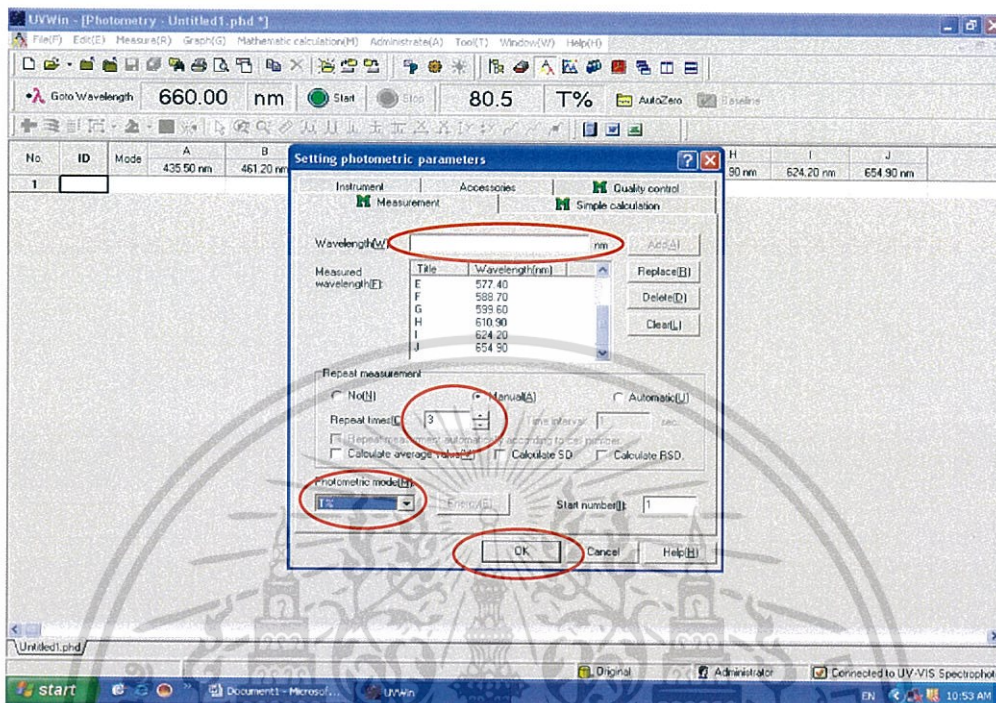


3. จากนั้นไปที่ Measure (R) → Parameters Settings (P)

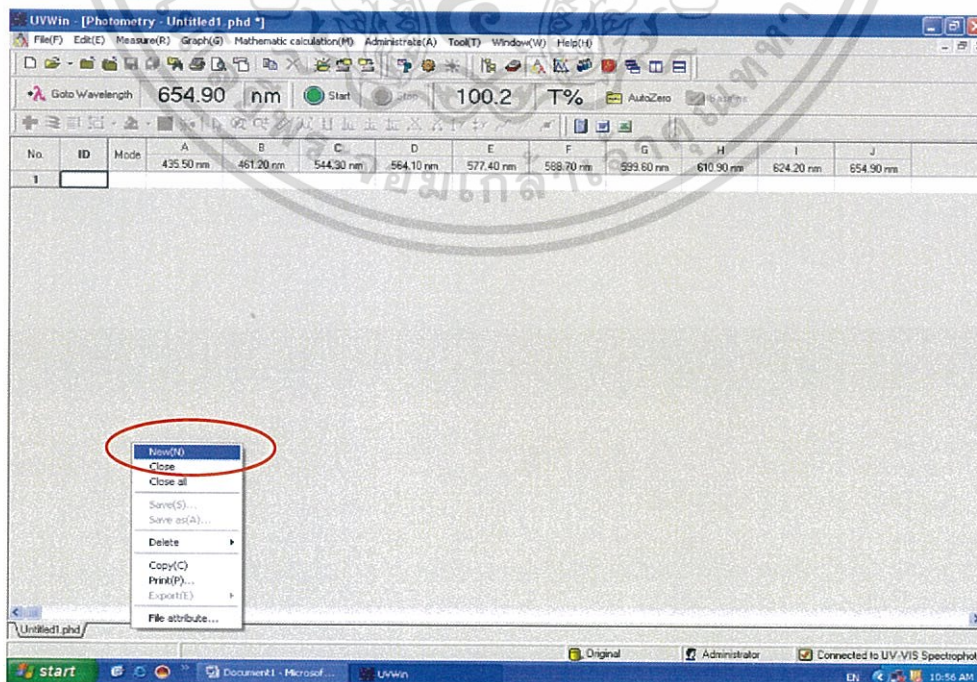


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จากนั้นจะขึ้นหน้าต่าง Setting photometric parameters แล้วใส่ความยาวคลื่นแกน x ลงในช่อง Wavelength (W) → เลือก Manual (A) 3 ครั้ง → เลือก Photometric mode (M) T% → OK

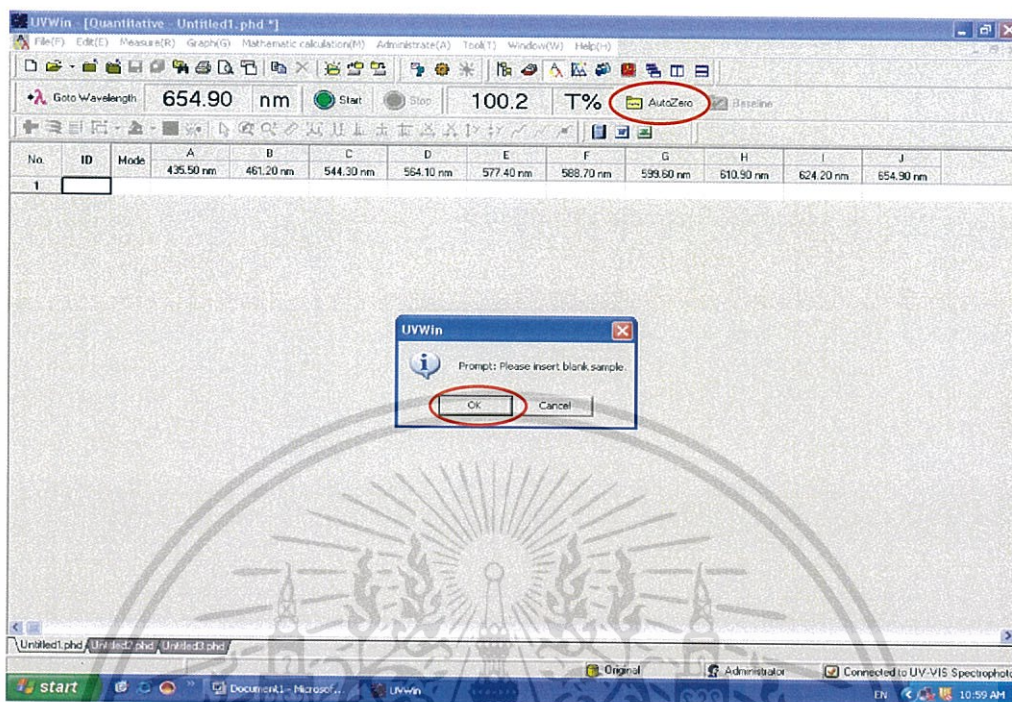


5. คลิกขวาข้าง Untitled1.phd New (N) → ทำทั้งหมด 2 ครั้ง ก็จะขึ้น Untitled2.phd และ Untitled3.phd ตามลำดับ จากนั้นทำตามข้อ 3. และ 4. ทั้ง Untitled2.phd และ Untitled3.phd แต่เปลี่ยนจากใส่แกน x เป็นแกน y และแกน z ตามลำดับ

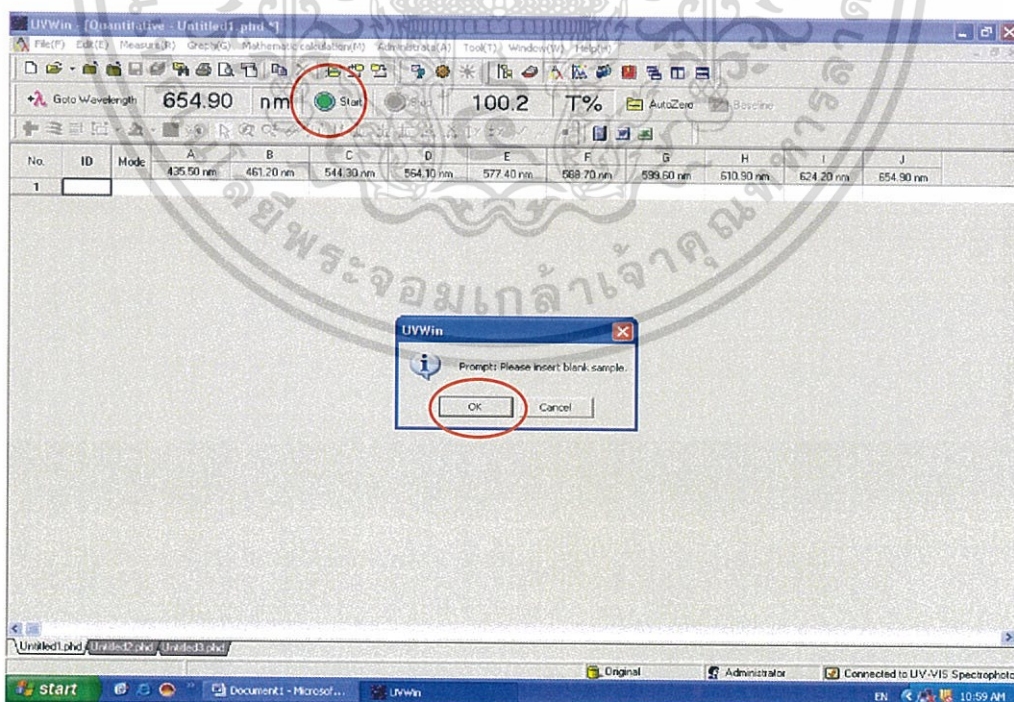


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เปิดฝาใส่น้ำกลั่นลงเครื่อง จากนั้นกด AutoZero จะขึ้นหน้าต่าง UVWin แล้วกด OK ทำทั้ง 3 แกน

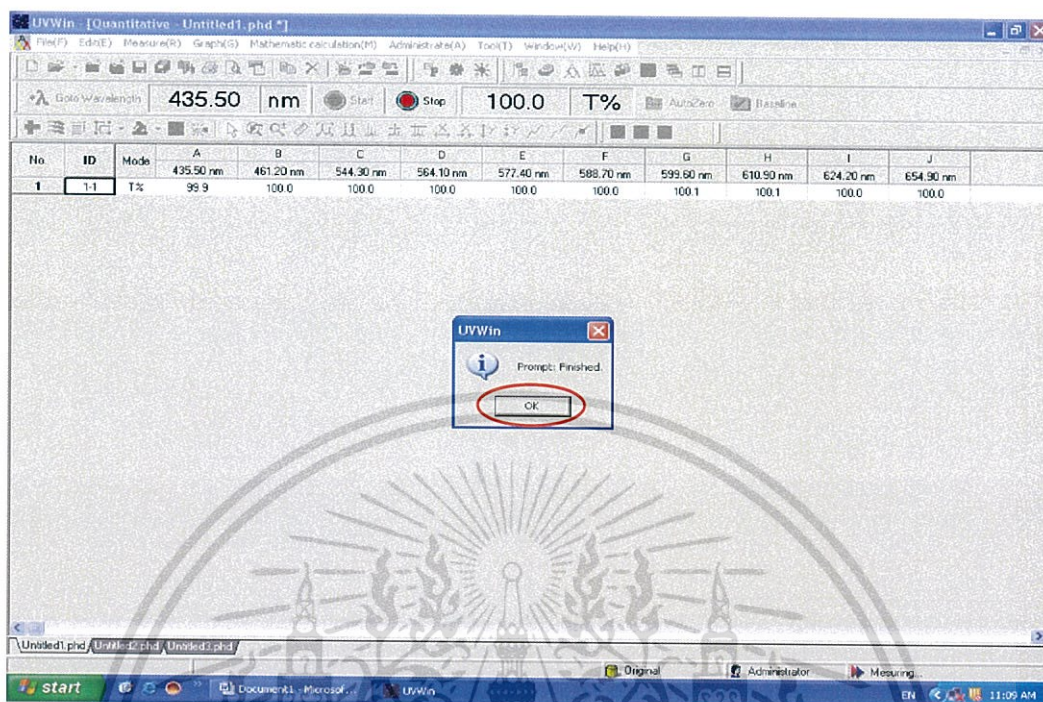


7. นำน้ำกลั่นออกจากเครื่อง แล้วนำตัวอย่างน้ำใส่แทน จากนั้นกด Start จะขึ้นหน้าต่าง UV Win แล้วกด OK

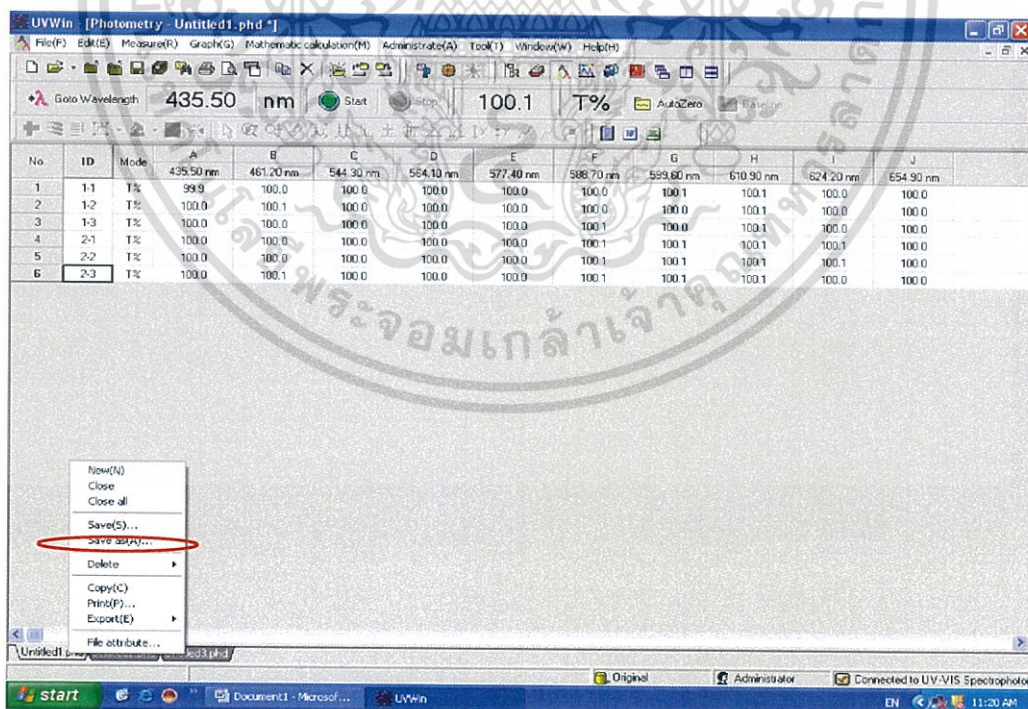


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เมื่อวัดตัวอย่างน้ำเสร็จจะขึ้นหน้าต่าง UVWin อีกครั้ง แล้วกด OK วัดให้ครบทั้ง 3 แกน และแกนละครั้ง

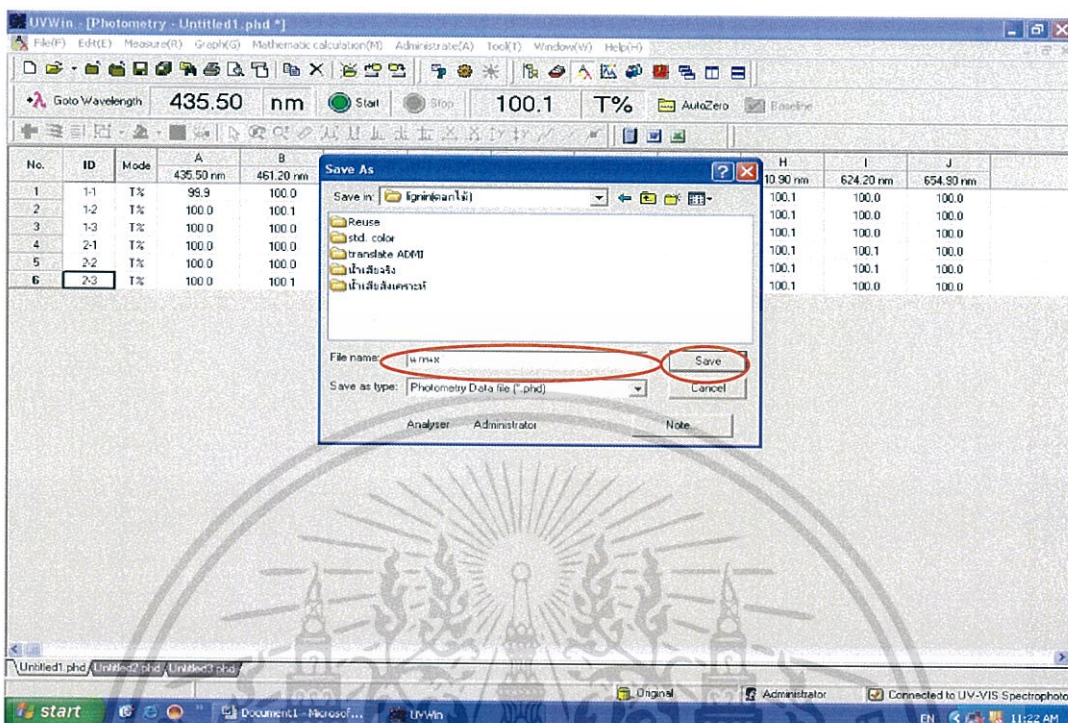


9. เมื่อวัดตัวอย่างน้ำเสร็จทั้งหมดแล้ว คลิกขวา → Save as (A)

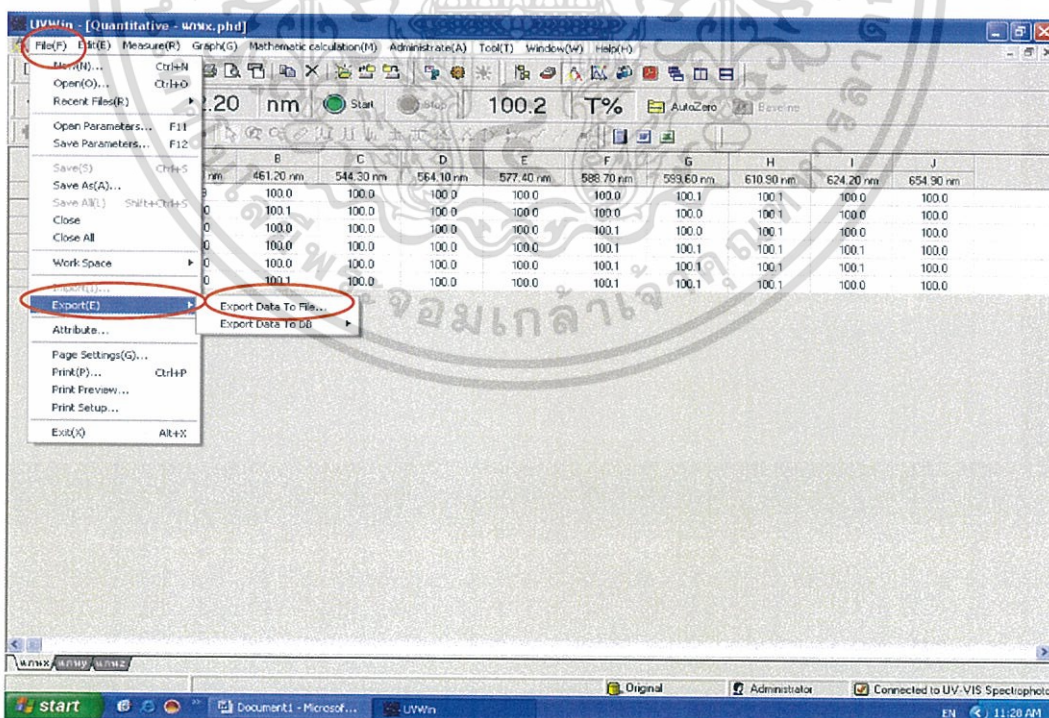


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. จะขึ้นหน้าต่าง Save as (A) เลือกเก็บข้อมูลตามโฟลเดอร์ของตัวเองแล้วตั้งชื่อ แกน x ตรงช่อง File name จากนั้นกด Save ทำให้ครบทั้ง 3 แกน

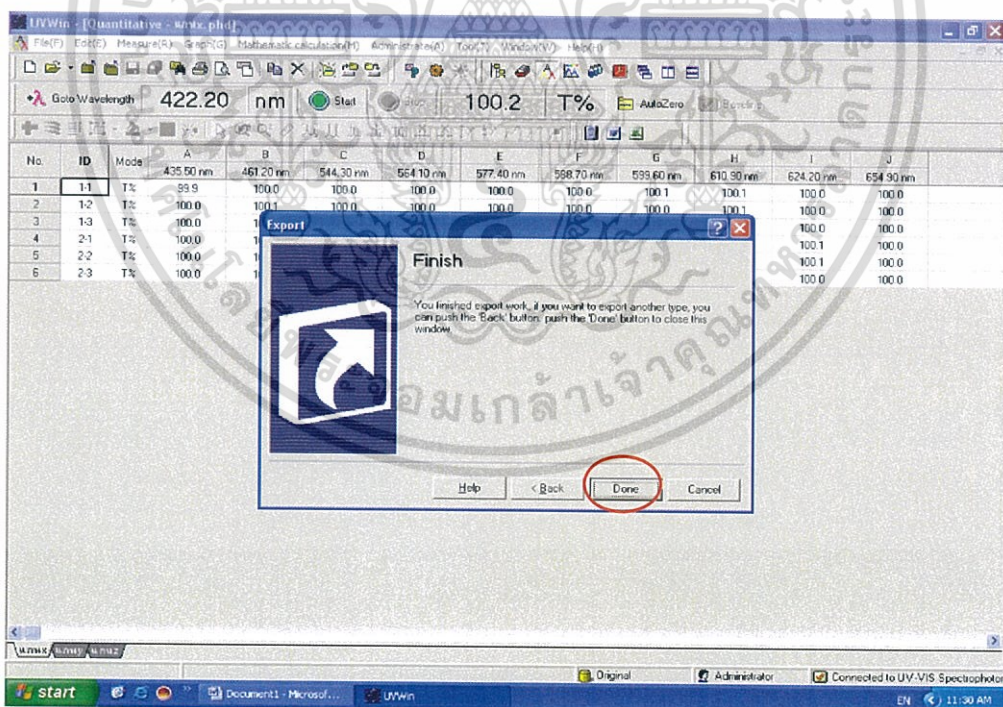
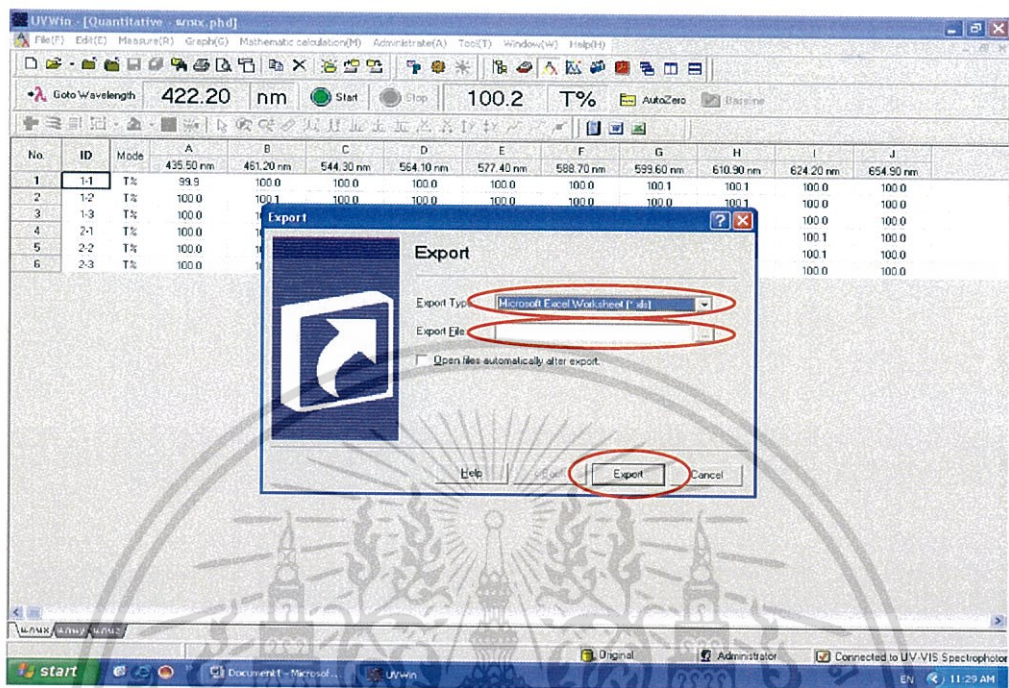


11. กด File (F) → Export (E) → Export Data To File



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. จะขึ้นหน้าต่าง Export ตรงช่อง Export Type เลือก Microsoft Excel Worksheet → (\*.xls) ช่อง Export File แล้วเลือกโฟลเดอร์ที่เราต้องการจะเก็บข้อมูล จากนั้นกด Export เมื่อเรียบร้อยแล้วกด Done ทำให้ครบทั้ง 3 แขน ข้อมูลทั้งหมดก็จะไปเก็บอยู่ที่ไฟล์ Excel



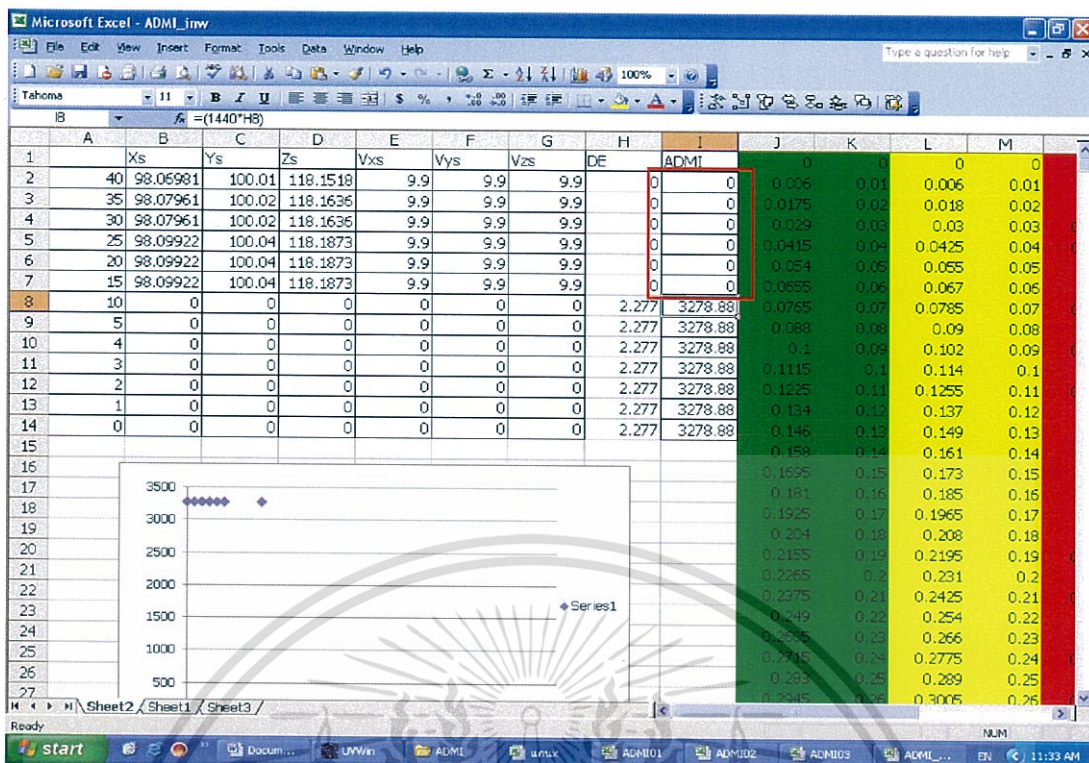
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	No.	ID	Mode	435.50 nm	461.20 nm	544.30 nm	564.10 nm	577.40 nm	588.70 nm	599.60 nm	610.90 nm	624.20 nm	654.90 nm
2	1	1-Jan	T%	99.9	100	100	100	100	100	100.1	100.1	100	100
3	2	2-Jan	T%	100	100.1	100	100	100	100	100	100.1	100	100
4	3	3-Jan	T%	100	100	100	100	100	100.1	100	100.1	100	100
5	4	1-Feb	T%	100	100	100	100	100	100.1	100.1	100.1	100.1	100
6	5	2-Feb	T%	100	100	100	100	100	100.1	100.1	100.1	100.1	100
7	6	3-Feb	T%	100	100.1	100	100	100	100.1	100.1	100.1	100	100

13. เปิดไฟล์ Excel ทั้ง 3 แกนขึ้นมา และเปิดไฟล์ Excel ชื่อ ADMI01, ADMI02 และ ADMI03 ขึ้นมาทั้ง 3 ไฟล์ จากนั้น copy ข้อมูลจากแกน x ใส่ ADMI01, แกน y ใส่ ADMI02 และแกน z ใส่ ADMI03 เมื่อครบแล้วเปิดไฟล์ ADMI\_inw ขึ้นมาก็จะได้ค่า ADMI ของแต่ละตัวอย่างนี้

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	No.	ID	Mode	435.50 nm	461.20 nm	544.30 nm	564.10 nm	577.40 nm	588.70 nm	599.60 nm	610.90 nm	624.20 nm	654.90 nm
2	1	1-Jan	T%	99.9	100	100	100	100	100	100.1	100.1	100	100
3	2	1-Feb	T%	100	100.1	100	100	100	100	100.1	100.1	100	100
4	3	1-Mar	T%	100	100	100	100	100	100.1	100	100.1	100	100
5	4	1-Apr	T%	100	100	100	100	100	100.1	100.1	100.1	100.1	100
6	5	1-Aug	T%	100	100	100	100	100	100.1	100.1	100.1	100.1	100
7	6	1-Jun	T%	100	100.1	100	100	100	100.1	100.1	100.1	100	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ค.2 ค่าความเข้มข้นที่เหลือของสีย้อมสังเคราะห์ก่อนการบำบัดและหลังการบำบัด

ตารางที่ ค.2 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสังเคราะห์ก่อนการบำบัดและความเข้มข้นที่เหลือของสีย้อมสังเคราะห์หลังการบำบัดในหน่วยวัดค่าสี ADMI

	Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI
ก่อนดูดซับ	95.9517	96.88	115.2574	9.82	9.78	9.81	0.050058	72.0829
หลังดูดซับ	96.128	98.09	114.584	9.83	9.83	9.79	0.022698	32.68546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลโดยใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับที่สภาวะเหมาะสม

ตารางที่ ง.1 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

ปริมาณ (kg/m <sup>3</sup> )	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (C <sub>0</sub> ) (g/m <sup>3</sup> )	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลาย (C <sub>e</sub> ) (g/m <sup>3</sup> )	q <sub>e</sub> (g/kg)
1.0	71.6306	42.3099	57.6900
2.0	57.7350	31.6078	34.1961
3.0	39.4394	19.2583	26.9139
4.0	27.5471	13.8781	21.5305
5.0	51.6476	10.1205	17.9759

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

### ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับโดยศึกษาอัตรา การเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับที่สภาวะเหมาะสม

ตารางที่ จ.1 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่ใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วย ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH 6 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้น ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	ความเข้มข้นเริ่มต้น ของสีย้อม ( $C_0$ ) ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	ความเข้มข้นของสีย้อมที่ เหลือในสารละลาย ( $C_e$ ) ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	$q_e$ (g/kg)
50	46.0000	5.7739	8.8452
100	72.7760	8.4566	18.3086
200	153.235	38.2012	32.3597
300	228.4310	57.5492	48.4901

ตารางที่ จ.2 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่ใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ด้วย ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH เท่ากับ 6 ความเข้มข้นของสีย้อมที่ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

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 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
	298.15	57.84	53.15	54.17	55.05	10.82	9.92	9.49	
306.15	72.78	85.38	81.29	79.81	8.46	10.12	9.77	9.45	18.1099
308.15	78.17	65.52	63.19	68.96	11.12	9.91	12.33	11.12	17.5761
318.15	72.55	57.06	37.78	56.46	11.51	9.61	7.24	9.45	17.2909
328.15	60.64	59.78	75.49	65.30	14.14	9.98	11.91	12.01	17.0638

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

### ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของค่าพลังงานกระตุ้นจาก สมการอาร์เรเนียส (Ea)

ตารางที่ ฉ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับ ในการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสึครีด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรด้วยผักตบชวาที่ ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (K)	Concentration in solution (g/m <sup>3</sup> )	q <sub>e</sub> (g/kg)	1/T
298.15	8.97602	18.2048	0.04
306.15	9.450063	18.10999	0.030303
308.15	12.11903	17.57619	0.028571
318.15	13.54538	17.29092	0.022222
328.15	14.68084	17.06383	0.018182

## ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของค่าเอนทัลปีมาตรฐาน  
( $\Delta H^\circ$ )

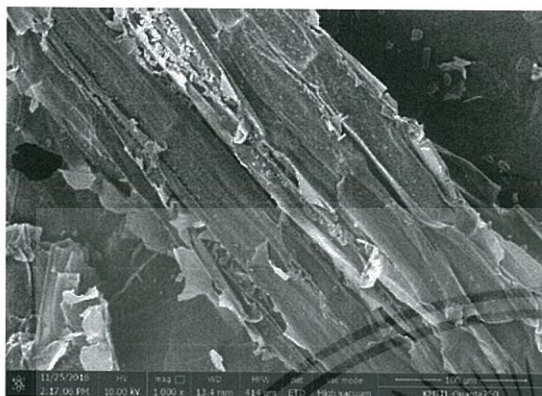
ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหาค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการดูดซับในการดูดซับ สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 9 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วย ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร ควบคุม pH เท่ากับ 6 ควบคุมที่อุณหภูมิ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (K)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ( $C_0$ ) ( $\text{g/m}^3$ )				ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ ในสารละลาย ( $C_e$ ) ( $\text{g/m}^3$ )				$q_e$ (g/kg)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
298.15	57.84	53.15	54.17	55.05	10.82	9.92	9.49	10.08	18.2048
306.15	72.78	85.38	81.29	79.81	8.46	10.12	9.77	9.45	18.10999
308.15	78.17	65.52	63.19	68.96	11.12	9.91	12.33	11.12	17.57619
318.15	72.55	57.06	37.78	56.46	11.51	9.61	7.24	9.45	17.29092
328.15	60.64	59.78	75.49	65.30	14.14	9.98	11.91	12.01	17.06383

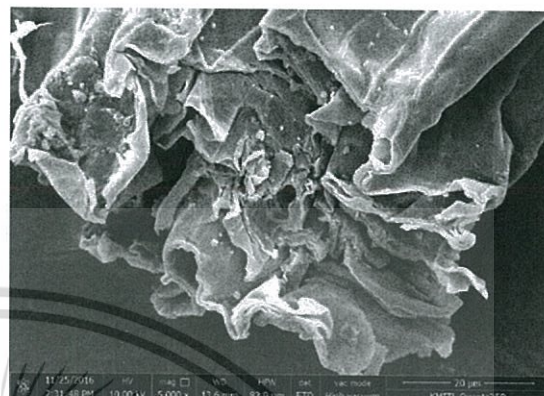
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ซ

### ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาหาขนาดอนุภาคของวัสดุดูดซับโดยใช้ เครื่อง Scanning Electron Microscope



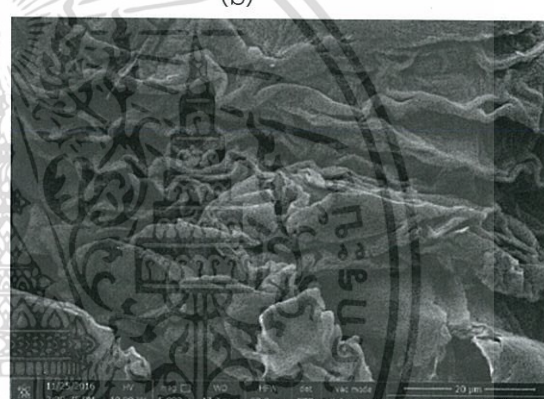
(a)



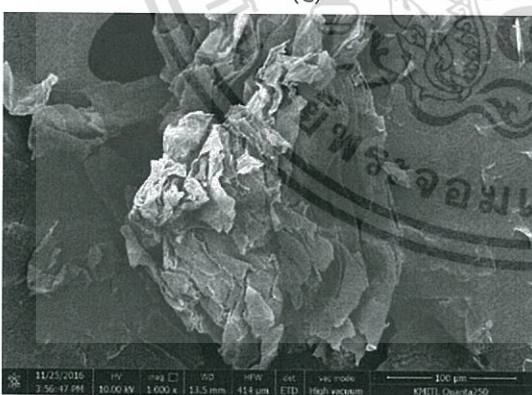
(b)



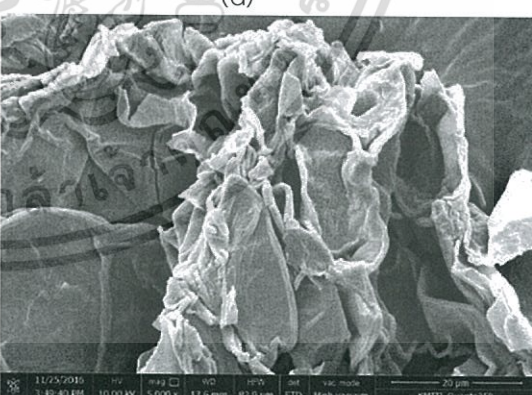
(c)



(d)



(e)



(f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ซ.1 ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวา

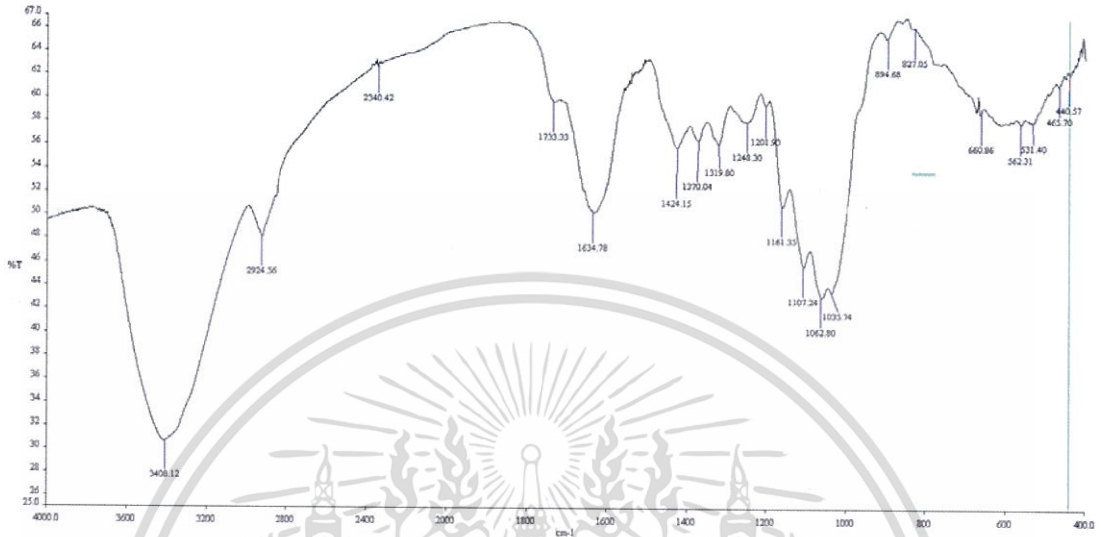
- (a) ผักตบชวาไม่ปรับสภาพ ไม่ได้ดูดซับสีย้อม กำลังขยาย 1000 เท่า
- (b) ผักตบชวาไม่ปรับสภาพ ไม่ได้ดูดซับสีย้อม กำลังขยาย 5000 เท่า
- (c) ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกก่อนดูดซับสีย้อม กำลังขยาย 1000 เท่า
- (d) ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกก่อนดูดซับสีย้อม กำลังขยาย 5000 เท่า
- (e) ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกหลังดูดซับสีย้อม กำลังขยาย 1000 เท่า
- (f) ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกหลังดูดซับสีย้อม กำลังขยาย 5000 เท่า



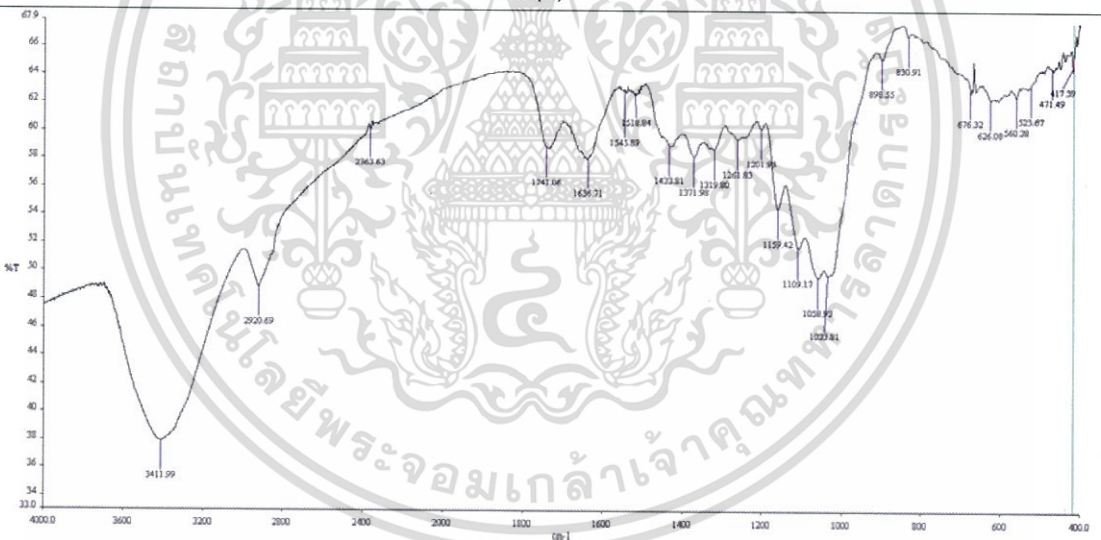
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฅ

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

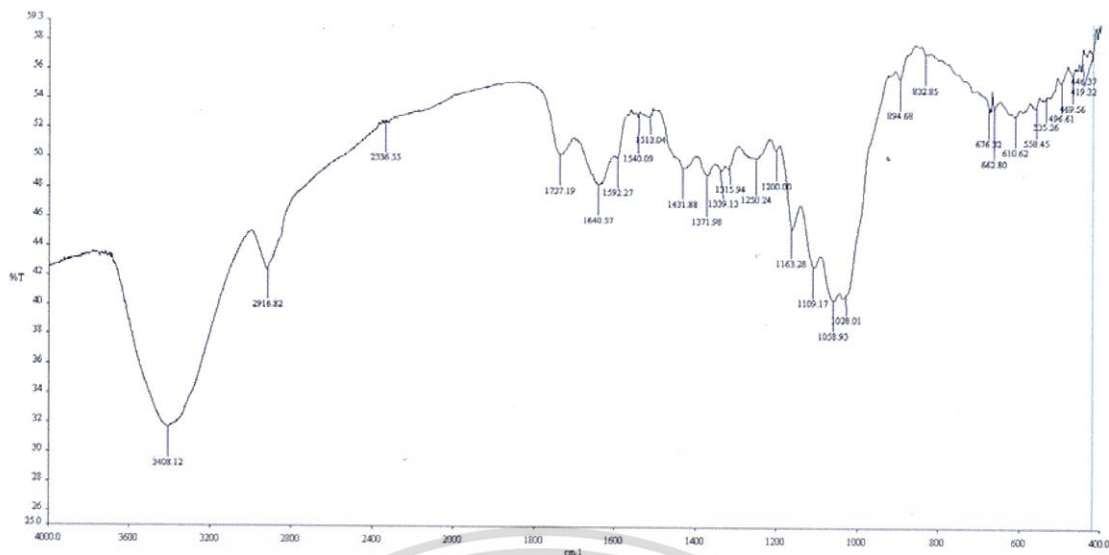


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

รูปที่ ๑.1 สเปกตรัมของผักตบชวา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

- (a) ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ไม่ได้ทำการดูดซับสี
- (b) ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ไม่ได้ทำการดูดซับสี
- (c) ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก หลังทำการดูดซับสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้