

การจัดสํ่ยมในนํ้าเสียมจากอุตสาหกรรมกระดาษไหว้เจ้าโดยการดูดซับบนคอมพอสิตแร่ดิน-ไคโตซาน



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF DYE IN WASTEWATER FROM JOSS PAPER INDUSTRY BY ADSORPTION ON
CLAY MINERAL-CHITOSAN COMPOSITE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

วิศรุต ม่วงรักษ์ : การขจัดสีย้อมในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษให้เจ้าโดยการดูดซับบนคอมพอสิตแร่ดิน-ไคโตซาน (REMOVAL OF DYE IN WASTEWATER FROM JOSS PAPER INDUSTRY BY ADSORPTION ON CLAY MINERAL-CHITOSAN COMPOSITE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. ญัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี, 97 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการขจัดสีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 ในน้ำ โดยการดูดซับบนตัวดูดซับคอมพอสิตแร่ดิน-ไคโตซาน และเปรียบเทียบกับตัวดูดซับไคโตซาน ซึ่งการทดลองนี้จะศึกษาการดูดซับแบบกะ โดยตัวแปร ที่ศึกษาในการทดลอง คือ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ค่าความเป็นกรดต่าง โดยเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ตั้งแต่ 15 นาทีถึง 420 นาที จากการศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) พบว่าตัวดูดซับคอมพอสิตแร่ดิน-ไคโตซานจะมีลักษณะสเปกตรัมเฉพาะที่สะท้อนถึงตัวดูดซับไคโตซานและตัวดูดซับแร่ดินอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวการดูดซับโดยใช้เทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน พบว่าแนวโน้มของการเพิ่มสัดส่วนของแร่ดินจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับตัวดูดซับคอมพอสิตแร่ดิน-ไคโตซาน ส่งผลให้ตัวดูดซับคอมพอสิตแร่ดิน-ไคโตซาน มีพื้นที่ผิวที่สูงกว่าตัวดูดซับไคโตซาน เนื่องจากไคโตซานเข้าไปแทรกในโครงสร้างของแร่ดิน สามารถอธิบายด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ทำให้โครงสร้างของแร่ดินเกิดการขยายขนาดขึ้น สำหรับผลจากการศึกษาตัวแปรต่างๆ พบว่า ตัวดูดซับคอมพอสิตแร่ดิน-ไคโตซาน มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีกว่าตัวดูดซับไคโตซานและตัวดูดซับแร่ดิน ถึง 1.17 เท่า และ 1.88 เท่า ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะช่วยลดระยะเวลาในการดูดซับให้เร็วยิ่งขึ้น สำหรับตัวดูดซับคอมพอสิตแร่ดิน-ไคโตซาน พบว่าสามารถกำจัดสีย้อมได้หมดสมบูรณ์ทุกความเข้มข้น และสามารถกำจัดสีย้อมได้ดีสำหรับทุกช่วงของค่าความเป็นกรดต่างที่ได้ศึกษาในงานวิจัย แบบจำลองสมดุลการดูดซับของตัวดูดซับคอมพอสิตแร่ดิน-ไคโตซาน สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของโกเบิลคอรีรีแกน จลนพลศาสตร์การดูดซับของตัวดูดซับคอมพอสิตแร่ดิน-ไคโตซาน มีอัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับสารละลายสีย้อมเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม นอกจากนี้ยังพบว่ากลไกในการควบคุมขั้นตอนการดูดซับคือ ขั้นตอนการของการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และขั้นตอนของการแพร่ภายในรูพรุน สำหรับการศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับพบว่าตัวดูดซับคอมพอสิตแร่ดิน-ไคโตซาน สามารถเกิดขึ้นได้เองและเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5772249923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: ADSORPTION, CLAY MINERAL-CHITOSAN COMPOSITE, REACTIVE RED 120, DIFFUSION COEFFICIENT

WITSARUT MUANGRAK: REMOVAL OF DYE IN WASTEWATER FROM JOSS PAPER INDUSTRY BY ADSORPTION ON CLAY MINERAL-CHITOSAN COMPOSITE. ADVISOR: PROF. NATTAYA PONGSTABODEE, Ph.D., 97 pp.

The objective of this research was to investigate in an adsorption of reactive dye (Reactive Red 120, RR120) on clay mineral-chitosan composites. The composites were characterized by means of Fourier Transform Infrared Spectrometry (FT-IR), N₂ adsorption/desorption, X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) and zeta potential. Effects of pH, amount of adsorbent, initial concentration of RR120 and operating time on the removal of dye were investigated in batch mode experiments. From the characterization, it was obvious from FT-IR results that the spectra of the composites exhibited the instinct of chitosan and clay mineral. The removal of dye by adsorption on the composites was higher 1.17-fold than that of chitosan and 1.88-fold than the clay mineral, respectively. However the specific surface area of the clay mineral was higher about 19.6-fold than that of composites and about 75.3-fold than that of chitosan, respectively. This was due to the insertion of chitosan into the lamellar of the clay mineral which confirmed by the XRF analysis. The equilibrium adsorption capacity increased with initial dye concentration. Complete dye removal with shorter adsorption time was obtained when increasing the dosage of adsorbents. This was due to its higher diffusion coefficient. The dye could be adsorbed on the composites in whole range of pH. The sorption kinetics of RR120 onto composites were described by the pseudo-second-order kinetic equation. The adsorption of RR120 on the composite was controlled by film diffusion and intraparticle diffusion. Equilibrium adsorption data followed a Koble-Corrigan sorption model. Thermodynamic parameters suggested that the adsorption process was endothermic and spontaneous.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ใหญ่ชिरะนันท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรัตน์ ปัตตประกร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้ออำนวยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer และเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Incubator shaker) สำหรับใช้ศึกษาและวิเคราะห์ในงานวิจัย

ขอขอบคุณทุนพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (RRI) ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริษัท ไทยแม่คืออุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเรื่องเงินทุนในงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท เอส.วาย.เค. เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด ที่เอื้อเพื่อวัสดุดิบโคโตะซาน และบริษัท ฮวงฮัว จำกัด ที่เอื้อเพื่อให้การสนับสนุนเรื่องเงินทุนในงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้ความช่วยเหลือเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ และเป็นกำลังใจเสมอมา อีกทั้งยังสนับสนุนด้านทุนทรัพย์ตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญรูป | ฅ |
| สารบัญตาราง..... | ๗ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 2 |
| 1.3 สมมติฐาน | 2 |
| 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 ความหมายและการจำแนกประเภทของสี | 4 |
| 2.1.1 สีคัลเลอแรนท์อินทรีย์ (Organic colorant)..... | 6 |
| 2.1.2 สีคัลเลอแรนท์อนินทรีย์ (Inorganic colorant)..... | 10 |
| 2.2 ปัญหาการปนเปื้อนของสีย้อมในน้ำจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม..... | 11 |
| 2.3 เทคโนโลยีการบำบัดการกำจัดสีในน้ำ [18] | 12 |
| 2.3.1 เทคโนโลยีการบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment) | 12 |
| 2.3.2 เทคโนโลยีการบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment)..... | 14 |
| 2.3.3 เทคโนโลยีการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment)..... | 17 |
| 2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)..... | 19 |

| | |
|--|----|
| 2.4.1 ประเภทของกระบวนการดูดซับ..... | 20 |
| 2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)..... | 20 |
| 2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)..... | 21 |
| 2.4.2 ตัวดูดซับ (Adsorbent) | 21 |
| 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ | 22 |
| 2.4.3.1 ขนาดและพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ..... | 22 |
| 2.4.3.2 ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น..... | 22 |
| 2.4.3.4 อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ | 23 |
| 2.5 แร่ดิน (Clay mineral)..... | 23 |
| 2.6 ไคโตซาน (Chitosan) | 24 |
| 2.7 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (Thermodynamics of adsorption)..... | 25 |
| 2.8 ไอโซเทอมแบบจำลองสมดุลการดูดซับ..... | 26 |
| 2.8.1 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's isotherm) [27, 35] | 26 |
| 2.8.2 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm) [27, 36]..... | 27 |
| 2.8.3 แบบจำลองการสมดุลดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน (Koble-Corrigan's isotherm) [27, 36, 37] | 28 |
| 2.9 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic model of adsorption)..... | 29 |
| 2.9.1 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order) [35, 38] | 30 |
| 2.9.2 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) [39-42]..... | 31 |
| 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 32 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 36 |
| 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย | 36 |
| 3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย..... | 37 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.3 | วิธีการเตรียมตัวดูดซับ..... | 37 |
| 3.3.1 | การเตรียมตัวดูดซับโคโคซาน..... | 37 |
| 3.3.2 | การเตรียมตัวดูดซับคอมพอสิตแร่ดิน-โคโคซาน | 38 |
| 3.4 | ขั้นตอนการทดลอง | 38 |
| 3.5 | การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ..... | 39 |
| 3.5.1 | การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)..... | 39 |
| 3.5.2 | การศึกษาหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน | 40 |
| 3.5.3 | การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุของตัวดูดซับสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X – ray Fluorescence: XRF)..... | 40 |
| 3.5.4 | การศึกษาศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของตัวดูดซับสังเคราะห์และสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟ เรด 120 ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคและศักย์ไฟฟ้า (Zetasizer) | 40 |
| 3.6 | การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (Thermodynamics study)..... | 41 |
| 3.7 | การศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) | 41 |
| 3.8 | การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetics adsorption)..... | 42 |
| บทที่ 4 | ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง | 43 |
| 4.1 | การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ | 43 |
| 4.1.1 | ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ..... | 43 |
| 4.1.2 | การศึกษาหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน | 44 |
| 4.1.3 | การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)..... | 46 |
| 4.1.4 | การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุของตัวดูดซับสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X – ray Fluorescence: XRF)..... | 47 |

| | |
|---|----|
| 4.1.5 การวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวดูดซับสังเคราะห์ และสารละลายสี้อมรีแอคทีฟเรด 120 ด้วยเครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า (Zetasizer)..... | 49 |
| 4.2 ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละการกำจัดสี้อมรีแอคทีฟเรด 120 | 51 |
| 4.2.1 สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน..... | 51 |
| 4.2.2 ปริมาณตัวดูดซับ..... | 52 |
| 4.2.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี้อมรีแอคทีฟเรด 120 | 56 |
| 4.2.4 ความเป็นกรดต่าง | 60 |
| 4.3 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (Thermodynamics of adsorption)..... | 62 |
| 4.4 แบบจำลองสมดุลของการดูดซับ (Isotherm adsorption)..... | 65 |
| 4.4.1 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's isotherm)..... | 65 |
| 4.4.2 แบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm)..... | 66 |
| 4.4.3 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน (Koble-Corrigan isotherm)..... | 66 |
| 4.5 การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (kinetic adsorption) | 68 |
| 4.6 การศึกษากลไกการดูดซับของสารละลายสี้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับในขั้นตอนของการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion)..... | 72 |
| 4.7 การศึกษากลไกการดูดซับสารละลายสี้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดยใช้สมการของบอยและคณะ [54]..... | 77 |
| 4.8 การศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำ (Reusability) ของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5..... | 85 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ..... | 87 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 87 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 89 |
| รายการอ้างอิง | 90 |
| ภาคผนวก ก..... | 95 |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 97



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ทฤษฎีสี 5

รูปที่ 2.2 คำจำกัดความของสีย้อมและฟิกเมนต์..... 6

รูปที่ 2.3 โครงสร้างสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 9

รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการดูดซับ ประกอบด้วย ขั้นตอน 3 ขั้นตอน คือ (ก) การแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ต้องการบำบัดไปยังผิวภายนอกของตัวดูดซับ (ข) การเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ (ค) โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะติดที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ โดยเรียงตัวกัน เป็นชั้น ๆ..... 20

รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของแร่ดิน (Clay mineral) 24

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของไคโตซาน (Chitosan) 24

รูปที่ 2.7 แสดงการโปรโตเนตหมู่เอมิโนอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) 25

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ (ก) ตัวดูดซับไคโตซาน (ข) ตัวดูดซับคอมพอสิต ไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1:0.5 (ค) ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1:1 (ง) ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1:2 (จ) ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1:3 (ฉ) ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1:5 44

รูปที่ 4.2 แสดงหมู่ฟังก์ชันเฉพาะบนตัวดูดซับด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทร สโกปี (FTIR) โดย (ก) ตัวดูดซับไคโตซาน (ข) ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซาน ต่อแร่ดิน เท่ากับ 1 ต่อ 0.5 (ค) ตัวดูดซับแร่ดิน..... 46

รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน 48

รูปที่ 4.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวดูดซับไคโตซานและตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1:0.5 และสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ที่ช่วงค่าความเป็นกรดต่างๆ 50

รูปที่ 4.5 แสดงผลของสัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่มีต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ในช่วงเวลาการดูดซับ เมื่อใช้จำนวนตัวดูดซับ 0.3 กรัม

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ระดับความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.5 โดย (ก) สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 0.5 (ข) สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 1 (ค) สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 2 (ง) สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 3 และ (จ) สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 5 51

รูปที่ 4.6 แสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซาน ปริมาณตัวดูดซับที่ 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 กรัม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 5.5 ช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 นาที ถึง 420 นาที..... 54

รูปที่ 4.7 แสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ปริมาณตัวดูดซับที่ 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 กรัม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 5.5 ช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 นาที ถึง 420 นาที 55

รูปที่ 4.8 แสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซาน เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ต่างๆ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณ ตัวดูดซับ 0.6 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 5.5..... 57

รูปที่ 4.9 แสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ต่างๆ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.6 กรัม ณ อุณหภูมิ การดูดซับ ที่อุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 5.5 58

รูปที่ 4.10 แสดงความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ต่างๆ เมื่อความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.5 ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.6 กรัม ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 420 นาที 59

รูปที่ 4.11 แสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซาน ที่ค่าความเป็นกรดต่างต่างๆ โดยที่ ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ

| | |
|---|----|
| 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.6 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง 120 ในช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 นาที ถึง 420 นาที | 61 |
| รูปที่ 4.12 แสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตโคโคซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนโคโคซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่ค่าความเป็นกรดต่างๆ โดยที่ ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.6 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง 120 ในช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 นาที ถึง 420 นาที | 62 |
| รูปที่ 4.13 แสดงผลของอุณหภูมิสำหรับตัวดูดซับคอมพอสิตโคโคซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนโคโคซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.6 กรัม ณ ที่ค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.5 ในช่วงเวลาการดูดซับ 420 นาที..... | 64 |
| รูปที่ 4.14 แสดงผลของอุณหภูมิสำหรับตัวดูดซับโคโคซาน ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.6 กรัม ณ ที่ค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.5 ในช่วงเวลาการดูดซับ 420 นาที..... | 65 |
| รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง q_t และ $t^{0.5}$ ของตัวดูดซับโคโคซาน โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ หนัก 0.6 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 10 30 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ต่าง เท่ากับ 5.5 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส..... | 74 |
| รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง q_t และ $t^{0.5}$ ของตัวดูดซับคอมพอสิตโคโคซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนโคโคซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ หนัก 0.6 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 10 30 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ต่าง เท่ากับ 5.5 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส..... | 75 |
| รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Bt และ t ของตัวดูดซับโคโคซาน (ก) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ (ง) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร | 80 |

รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Bt และ t ของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 (ก) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม รีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม รีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม รีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ (ง) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม รีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 82

รูปที่ 4.19 แสดงผลการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ หนัก 0.6 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.5 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส..... 85



สารบัญตาราง

| | |
|--|----|
| ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับ ไนโตรเจน..... | 45 |
| ตารางที่ 4.2 แสดงชนิดและปริมาณธาตุที่ประกอบในตัวดูดซับสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) (ร้อยละโดยน้ำหนัก)..... | 48 |
| ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ระดับต่างๆ..... | 56 |
| ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวดูดซับ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลาย สีย้อมที่ระดับต่างๆ..... | 60 |
| ตารางที่ 4.5 แสดงค่าทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ | 64 |
| ตารางที่ 4.6 แสดงแบบจำลองสมดุลการดูดซับทั้ง 3 ชนิด..... | 68 |
| ตารางที่ 4.7 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ของตัวดูดซับไคโตซาน..... | 70 |
| ตารางที่ 4.8 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 | 71 |
| ตารางที่ 4.9 แสดงค่าอัตราการแพร่ (k_p) ของตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโต ซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5..... | 76 |
| ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิต ไค โตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 แตกต่างกัน | 83 |
| ตารางที่ 4.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิต ไค โตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่ปริมาณตัวดูดซับ แตกต่างกัน | 83 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ชาวไทยเชื้อสายจีนจำนวนมากที่อาศัยอยู่ในประเทศไทยยังคงนิยมประกอบพิธีกรรมต่างๆ ตามประเพณีวัฒนธรรม และความเชื่อทางศาสนาของจีนที่ได้รับการถ่ายทอดจากบรรพบุรุษ นอกจากนี้ยังคงสืบสานสิ่งเหล่านี้สู่คนรุ่นหลังต่อไป การประกอบพิธีกรรมต่างๆ ของชาวจีนนั้นมักจะมีการใช้ของเช่นไหว้ต่างๆ และแตกต่างกันตามแต่เทศกาลและประเภทของพิธีกรรม หนึ่งในเครื่องเช่นไหว้ที่ขาดไม่ได้ คือ กระดาษไหว้เจ้า ซึ่งจะมีรูปทรงคล้ายกับของใช้ต่างๆ ในชีวิตประจำวัน เงินเงินโบราณ และเครื่องทรงต่างๆ นอกจากนี้ยังมีการเติมแต่งสีเพื่อให้มีสภาพเสมือนจริง ทำให้ความต้องการกระดาษไหว้เจ้ายังคงมีอย่างต่อเนื่อง จากศูนย์วิจัยของกสิกร [1] พบว่า อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษไหว้เจ้าในประเทศไทยมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นทุกปีโดยเฉพาะการส่งออกกระดาษไหว้เจ้าของไทย เนื่องจากกระดาษไหว้เจ้าที่ผลิตในประเทศไทยมีคุณภาพและมาตรฐานการผลิตที่เป็นที่ยอมรับจากหลายประเทศที่มีคนเชื้อสายจีนอาศัยอยู่ เช่น สหรัฐอเมริกา ไต้หวัน ฮองกง และมาเลเซีย ในขณะที่มูลค่าการใช้กระดาษไหว้เจ้าภายในประเทศสูงกว่า 300 ล้านบาทต่อปี หรือคิดเป็นปริมาณกระดาษไหว้เจ้า 3,000 ตัน อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษไหว้เจ้าจัดเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีความต้องการการใช้น้ำในขั้นตอนการผลิตเป็นปริมาณมาก เนื่องจากต้องใช้เกือบทุกขั้นตอนของการผลิต ตั้งแต่ขั้นตอนการล้างเยื่อ การตีกระจายเยื่อ การเตรียมเยื่อเพื่อขึ้นรูป โดยทั่วไปการผลิตกระดาษไหว้เจ้า 1 ตัน จะใช้น้ำประมาณ 25,000 – 31,500 ลิตร ซึ่งจะอยู่ในรูปของน้ำในกระบวนการผลิต คิดเป็นร้อยละ 93.4 โดยปริมาตร และในรูปของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตคิดเป็นร้อยละ 6.6 โดยปริมาตร อีกทั้งขั้นตอนการผลิตกระดาษไหว้เจ้าจะมีความซับซ้อนในกระบวนการผลิตต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทผลิตภัณฑ์กระดาษไหว้เจ้า แต่อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะผลิตผลิตภัณฑ์กระดาษไหว้เจ้าประเภทใด จะมีการใช้สีเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์กระดาษไหว้เจ้าที่มีลักษณะเสมือนจริงมากที่สุด ดังนั้นน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตจึงมักปนเปื้อนสี หากน้ำในกระบวนการผลิตปนเปื้อนด้วยสีและยังคงถูกใช้งานต่อไปจะทำให้กระดาษไหว้เจ้าที่ผลิตออกมานั้นมีคุณภาพต่ำลง แต่ถ้าปล่อยน้ำในกระบวนการผลิตสู่หน่วยบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยสู่ภายนอกยิ่งทำให้ต้นทุนการผลิตมีค่าสูงมากขึ้น จึงจำเป็นต้องกำจัดสีออกจากน้ำในกระบวนการผลิตก่อนที่จะนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต ในขณะเดียวกันหากปล่อยน้ำเหล่านี้สู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ได้ทำการกำจัดสีออกไปก่อนก็จะก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศจากปัญหาสีอันไม่พึงประสงค์ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ [2, 3] ถึงแม้สีบางชนิดจะมีความเป็นพิษต่ำ แต่ส่งผลกระทบต่อแหล่ง

น้ำที่รองรับน้ำ โดยทำให้แหล่งน้ำเกิดสภาพไม่น่าดู และกั้นขวางปริมาณแสงส่องผ่านสู่แหล่งน้ำซึ่งส่งผลต่อการลดลงของการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ เป็นผลลูกโซ่ตามต่อมา คือ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลงจนไม่เพียงพอและไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ แต่หากสามารถนำน้ำเหล่านี้บำบัดจนมีคุณลักษณะที่สามารถนำน้ำไปใช้หมุนเวียนในกระบวนการผลิตย่อมต้องส่งผลความคุ้มค่าของการใช้น้ำ และต่อต้นทุนการผลิต จึงมีความจำเป็นต้องทำการกำจัดสีอันไม่พึงประสงค์ออกจากน้ำ

การบำบัดน้ำสีในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมียุทธศาสตร์หลายวิธี เช่น การโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี [4-6] มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมชนิดไม่ละลายน้ำได้ดีแต่ไม่สามารถกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ การออกซิเดชันด้วยโอโซน [4, 7] และ กระบวนการกรองโดยใช้เยื่อแผ่น [6] มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ดี แต่มีต้นทุนค่าก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบค่อนข้างสูง ส่วนวิธีทางชีวภาพมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีค่อนข้างต่ำ ดังนั้นกระบวนการดูดซับ [4, 8] จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาใช้กำจัดสี เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีต้นทุนต่ำ และมีความทนทานต่อความเป็นพิษของสี อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ละลายน้ำ โดยสารดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการดูดซับสีมีอยู่หลากหลายชนิดด้วยกัน เช่น ถ่านกัมมันต์ [9] แต่ถ่านกัมมันต์มีราคาค่อนข้างแพงเพราะต้องผ่านกระบวนการกระตุ้น ไคโตซาน เป็นอีกตัวดูดซับประเภทหนึ่งที่มีประสิทธิภาพแต่มีข้อจำกัดในสภาพการใช้งานที่ค่อนข้างแคบ [10] เนื่องจากคุณสมบัติการชอบน้ำของไคโตซานทำให้เกิดการบวมตัวของไคโตซานในขณะใช้งานไปได้ระยะเวลาหนึ่ง จึงจำเป็นต้องนำไคโตซานผ่านการเชื่อมขวาง ดินเบนไดไนท์ [5] หินดินดาน [7] ต่างสามารถดูดซับสีแต่ประสิทธิภาพไม่ค่อยสูง จึงเป็นเหตุให้เกิดการศึกษาหาตัวดูดซับสีที่มีประสิทธิภาพแต่ราคาต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยจะสังเคราะห์ตัวดูดซับคอมโพสิตแรดดิน-ไคโตซานซึ่งเป็นตัวดูดซับชนิดใหม่โดยใช้วัตถุดิบที่มีภายในประเทศ และทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีออกจากน้ำที่ปนเปื้อนสีของโรงงานผลิตกระดาษไหว้เจ้าโดยวิธีการดูดซับบนตัวดูดซับคอมโพสิตไคโตซาน-แรดดิน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาการกำจัดสีย้อมในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษไหว้เจ้าโดยวิธีการดูดซับบนคอมโพสิตไคโตซาน-แรดดิน

1.3 สมมติฐาน

สีย้อมในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษไหว้เจ้าสามารถถูกกำจัดได้ด้วยกระบวนการดูดซับบนคอมโพสิตไคโตซาน-แรดดิน

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งที่อยู่ภายในประเทศและต่างประเทศ

1.4.2 จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นในการดำเนินงานวิจัย

1.4.3 เตรียมตัวดูดซับคอมโพสิตแร่ดิน-ไคโตซาน ในสัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ต่าง ๆ กัน

1.4.4 ศึกษาผลของตัวแปรต่อการขจัดสีย้อมในน้ำด้วยวิธีการดูดซับแบบกะบนคอมโพสิตไคโตซาน-แร่ดิน ได้แก่

- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย Reactive red 120 ในช่วงความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ค่าความเป็นกรดต่าง ในช่วง 3-10

- ปริมาณตัวดูดซับ ในช่วง 0.3 กรัม ถึง 1.2 กรัม

- ช่วงเวลาในการดูดซับ ในช่วง 15 นาที ถึง 420 นาที

1.4.5 ศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ ในช่วง 30 องศาเซลเซียส ถึง 60 องศาเซลเซียส

1.4.6 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับและแบบจำลองจลนพลศาสตร์

1.4.7 วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลาย Reactive red 120 ก่อนและหลังการดูดซับ โดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี และ วิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) การหาพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน โดยเทคนิคการดูดซับ/การคายดูดซับไนโตรเจน

1.4.8 ประมวลผล วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลการทดลองพร้อมเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถกำจัดสีย้อมในน้ำจากอุตสาหกรรมกระดาษให้สะอาดด้วยวิธีการดูดซับบนคอมโพสิตไคโตซาน-แร่ดิน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ จะกล่าวถึง ความหมายและการจำแนกประเภทของสี สีคัลเลอร์แรนท์อีนินทรีย์ เทคโนโลยีในการกำจัดสีในน้ำ กระบวนการดูดซับ แร่ดิน ไคโตซาน อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ ไอโซเทอมแบบจำลองสมดุลการดูดซับ แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายและการจำแนกประเภทของสี

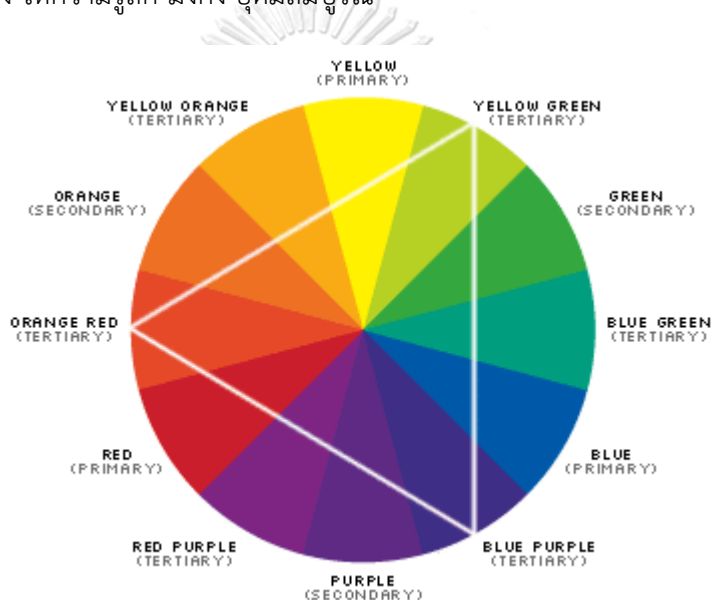
สี หมายถึง ลักษณะของแสงสว่างปรากฏแก่ตาให้เห็นเป็นขาว ดำ แดง เขียว อื่นๆ หรือสิ่งที่ทำให้ตาเห็นเป็นขาว ดำ แดง เขียว อื่นๆ เช่น สีทาบ้าน สีย้อมผ้า สีวาดภาพ ตามบัญญัติในพจนานุกรม

ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน สี หมายถึง ลักษณะของแสงที่ปรากฏแก่สายตา หรือการสะท้อนรังสีของแสงมาสู่ตา แล้วเห็นเป็นสีขาว ดำ แดง เขียว ฯลฯ สีที่ปรากฏอยู่ในโลกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ (ก) สีที่เกิดในธรรมชาติสีที่เป็นแสงโดยเกิดจากการหักเหของแสง (Spectrum) เช่น สีรุ้ง สีจากแท่งแก้วปริซึม และสีที่เกิดในธรรมชาติที่เป็นสีอยู่ในวัตถุหรือเนื้อสี (Pigment) ซึ่งเป็นสีที่มีอยู่ในวัตถุธรรมชาติทั่วไป เช่น สีที่มาจากส่วนประกอบพืช (สีดำจากถั่วลิสง สีน้ำเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้ไผ่ สีแดงจากดอกกรรณิการ สีแดงจากรากต้นเข็ม) สีที่มาจากสัตว์ (สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม) หรือแร่ธาตุต่างๆ เป็นต้น (ข) สีที่มนุษย์สร้างขึ้น คือ สีที่ได้จากการสังเคราะห์ เพื่อใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ เช่น งานศิลปะ อุตสาหกรรม การพาณิชย์ และในชีวิตประจำวัน โดยสังเคราะห์จากวัสดุธรรมชาติและจากสารเคมี ที่เรียกว่า สีวิทยาศาสตร์ ซึ่งสีที่ได้จาก การสังเคราะห์สามารถนำมาผสมกัน ให้เกิดเป็นสีต่างๆอีกมากมาย

การศึกษาค้นคว้า ทดลองเกี่ยวกับสีมานานแล้ว เพื่อค้นหาคุณสมบัติที่แท้จริงและเพื่อนำสีมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เริ่มต้นจาก เมื่อประมาณปี ค.ศ. 1731 เจ ซี ลี โบลน (J.C.Le Blon) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ธรรมชาติหรือคุณลักษณะเฉพาะของสี และได้กำหนดสีขั้นต้น (Primary Colours) เป็น แดง เหลือง และน้ำเงิน ซึ่งจัดเป็นแม่สี แล้วนำสีทั้งสามมาจับคู่ผสมกันเป็นคู่ๆ จะได้สีเพิ่มขึ้นอีก 3 สี สีเหล่านี้ เรียกว่า สีขั้นสอง (Secondary Colours) ต่อมาจึงนำแม่สีผสมกับสีขั้นที่ 2 จะได้สีเพิ่มขึ้นอีก 6 สี เรียกว่า สีขั้นที่สาม (Tertiary Colours) การค้นพบคุณสมบัติเกี่ยวกับสีนี้ ได้ถูกกำหนดเป็น "ทฤษฎีสี" ขึ้นมา (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) และต่อมาได้มีผู้นำหลักทฤษฎีสีนี้

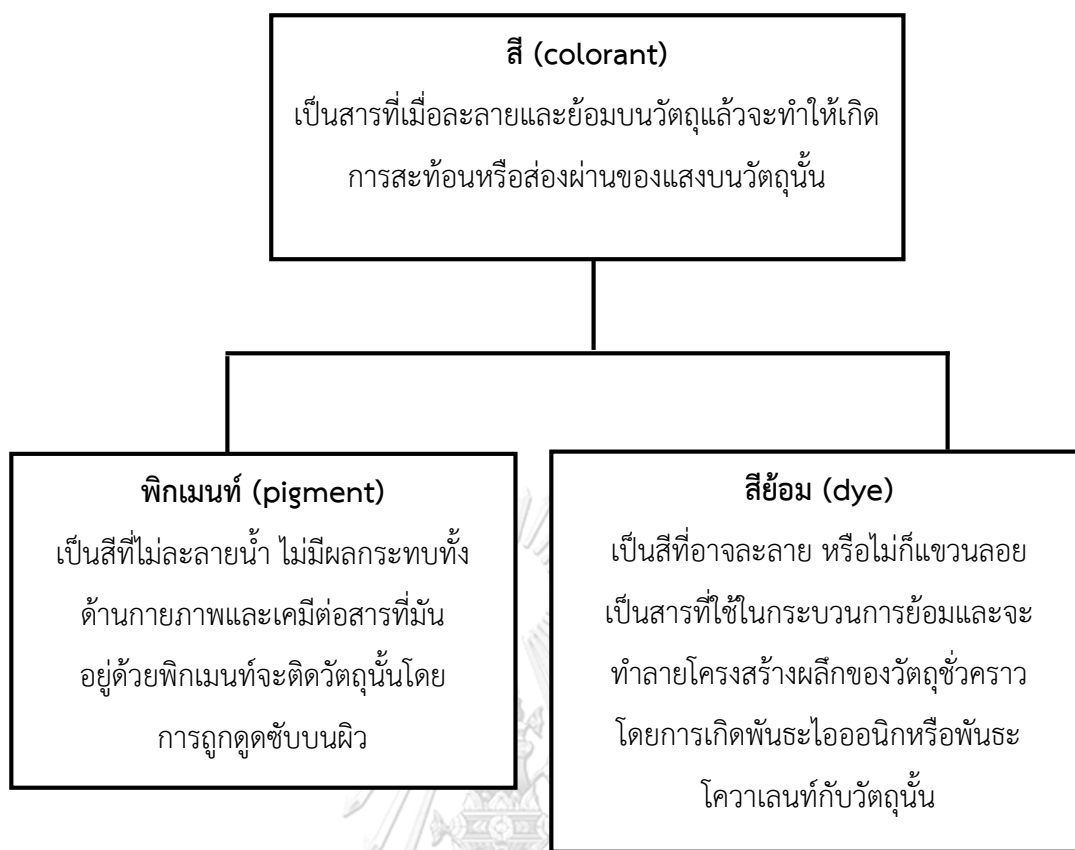
ไปศึกษาค้นคว้าต่อ และได้ค้นพบคุณสมบัติของสีอีกหลายประการด้วยกัน ซึ่งความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีสีสามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้ เกิดประโยชน์ในงานด้านต่างๆได้อีกมากมายตามมา สีเป็นตัวกระตุ้นความรู้สึกและมีผลต่อจิตใจและความรู้สึก สีที่นิยมใช้ในกระดาษไหว้เจ้า ได้แก่ สีแดง สีเหลือง สีแสด สีทอง เนื่องจาก

- สีแดง ให้ความรู้สึกเร่าร้อน รุนแรง อันตราย ตื่นเต้น
- สีเหลือง ให้ความรู้สึก สว่าง อบอุ่น แจ่มแจ้ง ร่าเริง ศรัทธา มั่งคั่ง
- สีแสด ให้ความรู้สึก สดใส ร้อนแรง เจิดจ้า มีพลัง อำนาจ
- สีทอง ให้ความรู้สึก มั่งคั่ง อุดมสมบูรณ์



รูปที่ 2.1 ทฤษฎีสี [11]

บางครั้งสิ่งที่มีสีหรือสิ่งที่ทำให้เกิดสี อาจเรียกว่า คัลเลอร์แรนท์ (Colorant) หากต้องใช้ตัวกลางในการนำสีสร้างพันธะหรือติดบนผิววัสดุที่ต้องการ จะเรียกว่า สีย้อม (Dye) หากไม่ต้องใช้ตัวกลางในการนำสีสร้างพันธะหรือติดบนผิววัสดุที่ต้องการ จะเรียกว่า พิกเมนต์ (Pigment) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 คำจำกัดความของสีย้อมและพิกเมนต์ [12]

หากใช้องค์ประกอบเป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภทสีแล้วสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ สีออร์แกนิก (Organic colorant) และ สีอนินทรีย์ (inorganic colorant)

2.1.1 สีออร์แกนิก (Organic colorant)

สีออร์แกนิก เป็นสารให้สีที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้ย้อมวัสดุ (Substrate) เช่น ผ้า กระดาษ ผนัง ผนัง โดยการละลายสีในตัวกลาง เช่น น้ำ เป็นต้น ซึ่งจัดเป็นสีย้อม (dye) ที่เป็นสีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของวัสดุ มีทั้งที่เป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ แต่ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำ บางชนิดไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยโดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) หรือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400 ถึง 700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุล

ต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กันไป ซึ่งสายตาสถาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีให้เห็นด้วยสายตาสถาออกมาต่างกันไป ทั้งนี้สามารถแบ่งสีย้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ สีย้อมธรรมชาติ (Natural dye) และ สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dye) [13]

สีย้อมธรรมชาติมาจากแหล่งธรรมชาติ โดยสามารถจำแนกสีย้อมธรรมชาติตามแหล่งที่มาได้ดังนี้ **สีจากสัตว์ (Animal dyes)** เป็นสีที่ได้จากสัตว์ เช่น กรดแลคคาอิก (Laccaic acid) สกัดได้จากแมลงคอคคัสแลคซี (Coccus laccae) ที่อาศัยอยู่ในเปลือกต้นไม้ กิ่งต้นไม้ที่มีแมลงชนิดนี้อาศัยอยู่จะปกคลุมไปด้วยเรซินสีน้ำตาล-แดง ที่เรียกว่า ครั่ง (lac) โครงสร้างทางเคมีของกรดแลคคาอิกเป็นอนุพันธ์ของแอนทราควิโนน สารละลายกรดแลคคาอิกให้หลายเฉดสี ได้แก่ สีส้ม แดง แดงอมม่วง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช **สีจากพืช (Vegetable dyes)** เป็นแหล่งใหญ่ของสีย้อมธรรมชาติ ทุกส่วนของพืช เช่น ราก ลำต้น ใบ ดอก ผล ให้เฉดสีหลากหลายอีกทั้งการมอร์แดนท์ด้วยโลหะคนละชนิดจะทำให้เฉดสีแตกต่างกันได้

สีย้อมสังเคราะห์เป็นสีย้อมที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี เนื่องจากสีย้อมประเภทนี้มีคุณสมบัติในการย้อมติดที่ดีจึงนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอ การพิมพ์ และการถ่ายภาพ สีย้อมในปัจจุบันมีใช้กันมากกว่า 10,000 สี [14] ในระหว่างการผลิตสีย้อมรวมทั้งในอุตสาหกรรมที่ใช้สีย้อมในการผลิต จะมีสีย้อมที่ถูกปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมถึงประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 เนื่องจากโครงสร้างที่ซับซ้อนของสีย้อมสังเคราะห์ทำให้สารประกอบประเภทนี้มีความคงทนต่อแสงและมีความคงทนต่อความร้อน กล่าวคือ สามารถทนต่อการย่อยสลายตามธรรมชาติและทนต่อการย่อยของจุลินทรีย์ได้ดี [12] สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้งานที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญอย่างมากในการย้อมสี เพราะวัสดุที่ต้องการย้อมอาจจะสามารถย้อมด้วยสีย้อมเพียงชนิดเดียวหรือย้อมด้วยสีย้อมหลายชนิดที่แตกต่างกันได้ ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อม ได้ 2 ประเภทใหญ่ คือ สีย้อมสังเคราะห์ที่ละลายน้ำได้ (Water soluble dyes) และ สีย้อมสังเคราะห์ที่ไม่ละลายน้ำ (Water insoluble dyes)

สีย้อมสังเคราะห์ที่ละลายน้ำ เช่น สีย้อมแอซิด (Acid dye) สีย้อมไดเร็กต์ (Direct dye) สีย้อมเบสิก (Basic dye) สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dye) และสีย้อมมอร์แดนท์ หรือโครม (Mordant or chrome dye) มีรายละเอียด ดังนี้

สีย้อมแอซิด (Acid dye) เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ โดยเมื่อละลายน้ำแล้วจะแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุลบ บางทีเรียกสีย้อมชนิดนี้ว่า สีแอนไอออนิก (Anionic dye) ส่วนใหญ่จะเป็นเกลือโซเดียมของกรดซัลโฟนิก (Sulphonic acid) และกลไกในการติดสีจะเกิดเป็นพันธะไอออนิก โดยทั่วไปใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีน

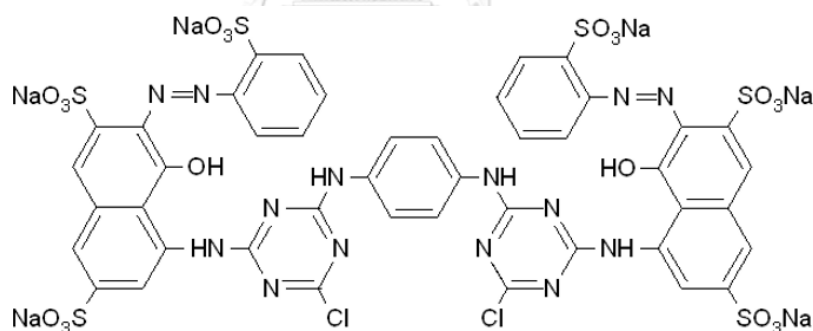
สีย้อมไคเร็กต์ (Direct dye) เป็นสีย้อมที่มีการดูดซึมและย้อมติดเส้นใยฝ้ายหรือใยเซลลูโลสโดยตรงซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิกที่ทำให้ตัวสี ย้อมละลายน้ำได้และแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุลบ การย้อมติดสีจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีสารอเล็กโตรไลต์อยู่ด้วย โดยทั่วไปนิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

สีย้อมเบสิค (Basic dye) เป็นเกลือของต่างอินทรีย์ที่สามารถละลายน้ำได้ โดยเมื่อละลายน้ำแล้วจะแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุบวก บางทีเรียกสีย้อมชนิดนี้ว่า สีแคทไอออนิก (Cationic dye) เป็นสีย้อมที่สามารถเกาะเส้นใยโปรตีนได้ดี แต่เกาะติดเส้นใยเซลลูโลสได้เล็กน้อยหรือไม่ติดเลย โดยทั่วไป สามารถย้อมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี

สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dye) สีย้อมชนิดนี้ละลายน้ำได้ง่ายมีคุณสมบัติเป็นประจุลบเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่างซึ่งจะเหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โดยการเกิดพันธะโควาเลนต์กับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยกลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส คุณสมบัติการละลายและการดูดติดเส้นใยของตัวสีย้อมทำให้สีย้อมเข้าไปอยู่ภายในเส้นใย เมื่อเกิดปฏิกิริยานั้นสีย้อมจะเกิดการยึดติดเส้นใยทำให้สีย้อมมีความคงทนต่อการซักล้าง นอกจากนี้ยังใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอน และสำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกใช้สีย้อมรีแอคทีฟ ซึ่งประเภทของสีย้อมรีแอคทีฟ สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทโดยแบ่งตามปฏิกิริยาเคมี ดังนี้ สีย้อมรีแอคทีฟชนิดการแทนที่ด้วยหมู่นิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic substitution type) โดยสีย้อมจะเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยนิวคลีโอฟิลิกกับเส้นใย และสีย้อมรีแอคทีฟชนิดการเติมของหมู่นิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic addition type) โดยสีย้อมจะเกิดปฏิกิริยาการเติมของนิวคลีโอฟิลิกกับเส้นใย ประเภทของสีย้อมรีแอคทีฟ สามารถแบ่งได้อีก 2 ประเภทโดยแบ่งตามอุณหภูมิการใช้งาน ดังนี้ สีย้อมเย็น คือ สีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้อุณหภูมิในการย้อมอยู่ในช่วง 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส สีชนิดนี้เนื่องจากการย้อมที่อุณหภูมิต่ำนั้น สีย้อมจะมีการเคลื่อนตัวจากน้ำย้อมเข้าไปในเส้นใยได้ง่าย ดังนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะใช้สีที่มีแรงดึงดูดกับเส้นใยมากนัก และสีย้อมร้อน คือ สีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้อุณหภูมิในการย้อมอยู่ในช่วง 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส สีชนิดนี้เนื่องจากการย้อมอุณหภูมิสูงนั้น สีย้อมจะมีการเคลื่อนตัวจากน้ำย้อมเข้าไปในเส้นใยได้น้อย ดังนั้นจึงควรเลือกใช้สีที่มีแรงดึงดูดสูงกับเส้นใย อย่างไรก็ตามข้อดีของสีย้อมร้อนคือจะสามารถทำให้ย้อมได้อย่างสม่ำเสมอดีกว่าและสีมีการแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยอย่างทั่วถึงกว่าสีย้อมเย็น **โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟ**

แบ่งออกเป็น 4 ส่วน [15] ดังนี้ ส่วนของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกว่า กลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore) ส่วนที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟนิคซึ่งติดอยู่กับกลุ่มโครโมฟอร์ ส่วนรีแอคทีฟ (Reactive group) ซึ่งจะเป็นกลุ่มที่ทำให้สีเกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย และส่วนอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อม (Bridging Group) ระหว่างกลุ่มรีแอคทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์ เช่น กลุ่ม $-NH-$ $-NHCO-$ $-SO_2-$ และ $-NCH_3-$ เป็นต้น ในบางกรณีกลุ่มรีแอคทีฟอาจอยู่ติดกับกลุ่มโครโมฟอร์โดยตรงโดยไม่ต้องมีตัวเชื่อมก็ได้ และกลุ่มรีแอคทีฟส่วนใหญ่อาจเป็นเฮเทอโรไซคลิกแอโรแมติก (Heterocyclic Aromatic) ดังนั้น ลักษณะของกลุ่มตัวเชื่อมและส่วนประกอบของเฮเทอโรไซคลิกแอโรแมติก จะมีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาและคุณสมบัติอื่นๆของสีย้อม

สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 มีลักษณะเป็นของแข็งสีแดง มีโมเลกุลเท่ากับ 1,469.98 กรัมต่อโมล มีสูตรโครงสร้าง คือ $C_{44}H_{24}Cl_2N_{14}Na_6O_{20}S_6$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งโครงสร้างสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 แสดงดังรูปที่ 2.2 และมีความสามารถในการละลายน้ำ โดยที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สามารถละลายน้ำได้ประมาณ 60 ถึง 70 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร อีกทั้งมีจุดหลอมเหลวมากกว่า 350 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.3 โครงสร้างสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 [16]

สีย้อมมอร์แดนต์ หรือโครม (Mordant or chrome dye) เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ ซึ่งเกิดจากสีย้อมแดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้ จึงทำให้ย้อมได้ง่าย และสีมีความสม่ำเสมอมากขึ้น โดยทั่วไปใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

สีย้อมสังเคราะห์ที่ไม่ละลายน้ำ (Water insoluble dyes) เช่น สีย้อมดิสเพอร์ส (Disperse dye) สีย้อมอะโซอิก (Azoic acid) สีย้อมแว็ต (Vat dye) สีย้อมอินเกรน (Ingrain dye) สีย้อมออกซิเดชัน (Oxidation dye) และสีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfur dye) มีรายละเอียด ดังนี้ **สีย้อมดิสเพอร์ส (Disperse dye)** เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติการกระจายได้ดี สามารถย้อม

เส้นใยพอลีเอสเตอร์ (Polyester) ไนลอน (Nylon) และอะคริลิก (Acrylic) ได้ดี ปัจจุบันสีย้อมชนิดนี้ มักใช้พิมพ์หรือย้อมผ้าจำพวกพอลีเอสเตอร์

สีย้อมอะโซอิก (Azoic acid) สีย้อมกลุ่มนี้เป็นสีย้อมที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อนแล้วย้อมทับด้วยเกลือไดอาโซเนียม (Diazonium salt) จึงจะเกิดเป็นสีได้ โดยทั่วไปนิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

สีย้อมแว็ต (Vat dye) เป็นสีย้อมที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่สามารถเปลี่ยนเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้เมื่อทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไดไธโอนิต (Sodium dithionite) สารประกอบที่เกิดขึ้นสามารถเกาะติดเส้นใยเซลลูโลสได้ดีและเมื่อดูดซึมเข้าเส้นใยแล้วจะสามารถทำให้เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำเหมือนเดิมได้ โดยการออกซิไดส์ด้วยออกซิเจนในอากาศหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สีย้อมชนิดนี้มีความคงทนต่อการซักและมีความคงทนต่อแสงแดดสูง

สีย้อมอินเกรน (Ingrain dye) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ โดยเกิดเป็นคอลลอยด์ (Colloid) หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ โดยทั่วไปใช้สำหรับย้อมผ้า

สีย้อมออกซิเดชัน (Oxidation dye) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอน ผลึกภายในเส้นใย โดยทั่วไปใช้ย้อมผ้าและขนสัตว์

สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfur dye) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ โดยทั่วไปนิยมนำมาย้อมผ้า

2.1.2 สีคัลเลอร์แรนท์อนินทรีย์ (Inorganic colorant)

สีคัลเลอร์แรนท์อนินทรีย์ เป็นสารให้สีของสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น พิกเมนต์ (Pigment) มักทำให้เกิดสีในวัสดุโดยไม่ต้องใช้ตัวกลางเช่นน้ำ เพื่อทำให้เกิดสีในสีทาบ้าน หรือ สีในพลาสติก สีคัลเลอร์แรนท์อนินทรีย์มีทั้งที่ได้จากการสังเคราะห์และที่มาจากแหล่งธรรมชาติ สีคัลเลอร์แรนท์อนินทรีย์ที่มาจากแหล่งธรรมชาติ เช่น **สีจากแร่ธาตุ (Mineral dyes)** จัดเป็นสีอนินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นออกไซด์ของโลหะหรือสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ สีชนิดนี้มีความคงทนสูงและมีเฉดสีต่างๆ เช่น เลดโครเมตมีสีเหลือง ออกไซด์ของเหล็กผสมกับออกไซด์ของโครเมียมให้สีกากี

จากลักษณะที่สีพิกเมนต์ เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งสีจะกระจายตัวอยู่ในน้ำและไม่รวมกับน้ำ สีที่พิมพ์จะเกาะเส้นใยไว้เท่านั้นไม่ซึมเข้าสู่เส้นใยของวัสดุ ดังนั้นสีพิมพ์ประเภทนี้จึงต้องมีสารมาช่วยในการยึดติด นั่นก็คือ ไบเดอร์ (Binder) การเตรียมแป้งพิมพ์จึงต้องมี ไบเดอร์และสีพิกเมนต์เป็น

องค์ประกอบหลัก สีพิกเมนต์ยังมีการแบ่งย่อยออกมาอีกตามลักษณะของแป้งพิมพ์ เช่น **แป้งจม (Pigment Print Paste)** เมื่อพิมพ์แล้วเนื้อสีจะแทรกอยู่ระหว่างเส้นใย **แป้งยาง (Elastic Print Paste)** เนื้อสีจะมีลักษณะเป็นฟิล์มเงายืดหยุ่นได้ ลอยตัวอยู่บนผิวเส้นใย **แป้งลอย (Matt Paste)** เนื้อสีจะลอยตัวบนเส้นใยสีเข้มได้ดี พื้นผิวด้านไม่มีความเงา การยืดหยุ่นมีน้อยมากหรืออาจจะไม่มีเลย **แป้งนูน (Puff Paste)** เนื้อสีจะฟูตัวได้เมื่อใช้ความร้อนอบหรือรีด ทำให้ดูมีเนื้อหนาขึ้น พื้นผิวจะด้านไม่เงางามความยืดหยุ่นมีเพียงเล็กน้อย

สีพิกเมนต์ (Pigment) สามารถแบ่งชนิดของสีตามเคมีที่เตรียมขึ้นมา ดังนี้

เคมีสูตรน้ำ (Water Based System) หมายถึง แป้งพิมพ์ที่เตรียมขึ้นมาโดยใช้เคมีที่มีฐานน้ำ โดยมีทั้งแป้งจม แป้งยาง แป้งลอย และแป้งนูน เป็นต้น เป็นสีที่นิยมในการพิมพ์ตรง สำหรับเคมีฐานน้ำที่ใช้ในการพิมพ์เราจะเรียกว่า สีระเหิด (Sublimation)

เคมีสูตรพลาสติกซอล (Plastisol System) หมายถึง สีพิมพ์ที่เตรียมขึ้นมาโดยใช้เคมีที่มีฐานน้ำมันที่มีพลาสติกเป็นองค์ประกอบ รวม แป้งพิมพ์ของพลาสติกซอล เรียกว่า Extender Base มีลักษณะดูเหมือน จม ลอย ยืดหยุ่น และนูน ได้เหมือนกับเคมีฐานน้ำ เป็นสีที่ใช้ในงานพิมพ์ตรงและพิมพ์อ้อม

เคมีสูตรน้ำมัน (Solvent Based System) หมายถึง สีที่เตรียมขึ้นมาจากเคมีฐานน้ำมัน เรียกว่าสีน้ำมัน ใช้พิมพ์ผ้าที่ต้องการการยัดเกาะสูง เช่น ผ้าร่ม ผ้ากระเป่า เป็นต้น ใช้ในการพิมพ์ตรงและพิมพ์อ้อม [17]

2.2 ปัญหาการปนเปื้อนของสีย้อมในน้ำจากระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม

โดยทั่วไปแล้วสีย้อมนั้นมักจะถูกนำมาใช้ในการตกแต่งวัสดุ กระดาษ เสื้อผ้า สิ่งทอ หรือสิ่งของต่างๆ เพื่อให้มีสีสันสวยงาม เชิญชวนน่าดู น่าสนใจ นอกจากนี้ยังสามารถตกแต่งให้เป็นไปตามแฟชั่นเพื่อให้ตรงกับความต้องการและการนำไปใช้งานของผู้บริโภค แต่จะพบว่าในกระบวนการผลิตสิ่งของเหล่านี้จะมีการใช้น้ำในกระบวนการค่อนข้างมาก และมีการปนเปื้อนของสีที่ไม่พึงประสงค์ออกมาจากกระบวนการผลิต ทั้งที่อยู่ในรูปของน้ำหมุนเวียนในกระบวนการหรืออยู่ในรูปของน้ำทิ้งที่จะมีการปลดปล่อยออกสู่ธรรมชาติหรือสิ่งแวดล้อม มักจะก่อให้เกิดผลกระทบต่างๆ ตามมามากมาย

อุตสาหกรรมผลิตกระดาษไหว้เจ้าถือเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีการใช้สีย้อมในกระบวนการผลิตค่อนข้างสูง และพบว่า การปนเปื้อนของสีในน้ำส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของน้ำหมุนเวียนในกระบวนการ ดังนั้นควรกำจัดการปนเปื้อนของสีในน้ำออกก่อน เพื่อลดผลกระทบต่อคุณภาพของกระดาษที่จะผลิตในครั้งถัดไป อีกทั้งสิ่งแวดล้อมของโรงงานก็ยังคงความจำเป็นในการป้องกันปัญหา

มลพิษที่แหล่งกำเนิดและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำขั้นสุดท้าย โดยมีการศึกษาเทคโนโลยีที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งที่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนด และจากที่ทราบกันในเบื้องต้นแล้วว่า สีที่อยู่ในน้ำทิ้งแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ยังสามารถมองเห็นได้ชัดเจนและทำความรำคาญให้ผู้ใช้น้ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำจัดสีในน้ำออกก่อนที่จะมีการปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมและธรรมชาติ

2.3 เทคโนโลยีการบำบัดการกำจัดสีในน้ำ [18]

เทคโนโลยีในการกำจัดสีในน้ำในปัจจุบันที่ได้รับความนิยมนั้นมีอยู่หลากหลายวิธีด้วยกันดังนี้

2.3.1 เทคโนโลยีการบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment)

เทคโนโลยีการบำบัดทางกายภาพเป็นวิธีการแยกเอาสิ่งเจือปนออกจากน้ำเสีย เช่น ของแข็งขนาดใหญ่ กระจาด ขยะพลาสติก เศษอาหาร กรวด ทราย ไขมันและน้ำมัน โดยใช้อุปกรณ์ในการบำบัดทางกายภาพ คือ ตะแกรงดักขยะ ถังดักกรวดทราย ถังดักไขมันและน้ำมัน และถังตกตะกอน ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีในน้ำเสียเป็นหลัก ตัวอย่างเทคโนโลยีการกำจัดสีทางกายภาพ ดังนี้

การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในของเหลว หรือก๊าซเอาไว้ได้ในปริมาณสูง เนื่องจากมีรูขนาดเล็ก (Microporosity) ทำให้สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยนำวัตถุดิบพวกสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเช่น ไม้ ถ่านหิน พีโตรเลียม กะลามะพร้าว เปลือกถั่วเมล็ดแข็ง กากขานอ้อย ชี้อ้อย กระดุกสัตว์ เป็นต้น นำมาเผาด้วยความร้อนในเตาอบอากาศ และเผาเร่งที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดความพรุน (Porosity) แล้วอัดด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 200 ถึง 1600 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับให้มากที่สุด ความพรุนมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวล (Surface area per mass ratio) ระหว่าง 500 ถึง 1600 ตารางเมตรต่อกรัม จากนั้นนำไปบดเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 ถึง 2 มิลลิเมตร เรียกว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon) ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powered activated carbon) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ถึง 50 ไมครอน ในการกำจัดสี นิยมใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด โดยบรรจุในรูปทรงกระบอก (Fixed bed system) แล้วปล่อยให้สีไหลผ่านชั้นถ่านด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสม คือ ระหว่าง 5 ถึง 25 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อหนึ่งตารางเมตรของพื้นที่หน้าตัดถัง และมีระยะเวลาสัมผัส (Contact time) ประมาณ 10 ถึง 15 นาที ซึ่งจะเกิดกลไกการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ โดยโครงสร้างมีความพรุนสูงทำให้เกิดผิวสัมผัสโมเลกุลภายในจะถูกกระทำด้วยแรงเท่าๆกันทุกทิศทาง ส่วนโมเลกุลที่อยู่บนผิวหน้า

ของถ่านกัมมันต์จะถูกกระทำด้วยแรงที่ไม่สมดุล ซึ่งแรงนี้สามารถทำให้สมดุลได้โดยทำให้โมเลกุลอื่นมาเกาะติดที่ผิวสัมผัสด้วยแรง ยึดเหนี่ยวแวนเดอวาล์ว (Van der wals force) โมเลกุลของสารละลายจะถูกยึดไว้ในสภาวะที่ความเป็นกรดต่างต่ำจะดูดซับได้ดี เนื่องจากถ่านกัมมันต์จะมีสภาพเป็นประจุบวกอันเนื่องมาจากดูดซับประจุบวกของไฮโดรเจนไว้ ในขณะที่เดียวกันสารคอลลอยด์ และสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสปีปะจุลบ แรงดึงดูดระหว่างกันจึงมีมาก แต่การเกาะยึดกันเป็นแรงอ่อนๆ ดังนั้นสามารถเกิดการเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ ทำให้การฟื้นฟูของตัวดูดติดผิวทำได้ง่าย แต่มักเกิดปัญหาสารแขวนลอยติดค้างอุดตันผิวหน้าของชั้นถ่าน จนทำให้อัตราการไหลผ่านลดลง สามารถแก้ไขได้โดยการอัดน้ำล้างเข้าทางด้านล่าง (Backwashing) เมื่อรูพรุนของเม็ดถ่านจะถูกอุดตันด้วยโมเลกุลของสิ่งสกปรกทำให้ถ่านหมดประสิทธิภาพการดูดซับ สามารถฟื้นฟูสภาพโดยการเผาในเตาอบออกซิเจนที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส และผ่านไอน้ำเพื่อเร่งคุณสมบัติของถ่าน การกำจัดสปีด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นเพียงวิธีการเคลื่อนย้ายสารอินทรีย์ออกจากน้ำโดยโมเลกุลของสิ่งสกปรกจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของเม็ดถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของสปีจะฟุ้ง กระจายเข้าไปในรูของเม็ดถ่านจนเต็ม ถ่านกัมมันต์จะเสื่อมสภาพ แต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ซึ่งมีต้นทุนสูง เพราะการเผาและการกำจัดกากทำให้ไม่เป็นที่นิยม

การกรองโดยใช้เยื่อแผ่น (Membrane filtration)

กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น สามารถแบ่งได้ 3 วิธี คือ ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) อัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration) และนาโนฟิวเตรชัน (Nanofiltration) แต่วิธีอัลตราฟิวเตรชันไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีขนาดรูเปิดของเยื่อกรองใหญ่ ไม่สามารถกรองอนุภาคของสปีออกจากน้ำเสียได้ ส่วนวิธีออสโมซิสย้อนกลับเหมาะสำหรับการกำจัดสปีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เป็นการกรองแยกน้ำออกจากของแข็งแขวนลอยหรือของแข็งที่ละลายน้ำ โดยผ่านรูพรุนขนาดเล็กและใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลผ่านตัวกรองเป็นกระบวนการที่ต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือ เยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล ซึ่งเยื่อแผ่นแรกสามารถกำจัดสปีปรากฏซึ่งมาจากโรงฟอกย้อมได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสปีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สองและสามารถกำจัดสปีได้ถึงร้อยละ 94 สำหรับกระบวนการกำจัดสปีโดยใช้แผ่นกรองนาโนใช้หลักการเหมือนออสโมซิสผันกลับ แต่การกรองผ่านแผ่นนาโนมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากมีรูขนาดที่เล็กกว่า ทำให้แยกสปีออกจากน้ำได้ดีกว่าโดยสามารถแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกจากสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น สารอนินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์ กรดอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งขนาดของแผ่นกรองส่วนใหญ่เป็นแบบเชิงประกอบที่มีรูพรุนประมาณ 1.5 ถึง 2.5 นาโนเมตรและมีช่วงความดันที่ใช้ประมาณ 10 ถึง 34 บาร์ เยื่อแผ่นนาโนสามารถกำจัดสปียอมที่ความดัน 10 บาร์ อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส มากกว่าร้อยละ 97 และจะลดลงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งปัจจัยที่มี

ผลต่อสมรรถนะการกรองผ่านด้วยแผ่นนาโน ได้แก่ อัตราการไหลและลักษณะการไหล ความดัน ความเป็นกรดต่าง และอุณหภูมิ นอกจากนี้มีกระบวนการกำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อมโดยการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้แผ่นกรองร่วมกับไฟฟ้ากระแสตรงแยกสารประจุบวกและประจุลบออกจากน้ำ โดยมีแผ่นกรองที่มีประจุบวก (Cation) และประจุลบ (Anion) ติดตั้งวางสลับกันเป็นชั้นๆ จากนั้นกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งเข้าไปในช่องระหว่างแผ่นกรอง และขณะเดียวกันก็มีการปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงผ่านแผ่นกรอง โดยแผ่นกรองประจุบวกยอมให้ประจุบวกไหลผ่านไปพร้อมกับน้ำส่วนหนึ่ง และแผ่นกรองประจุลบยอมให้สารประจุลบไหลผ่าน โดยน้ำที่มีประจุบวกและประจุลบรวมกันแล้วไหลทิ้งออกไป แต่มักเกิดปัญหาตะกรันเกาะติดแผ่นกรองทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก และต้องทำล้างทำความสะอาดบ่อยครั้งจึงไม่ได้รับความนิยม

2.3.2 เทคโนโลยีการบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางเคมี เพื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนในน้ำเสีย วิธีการนี้จะใช้สำหรับน้ำเสียที่มีส่วนประกอบอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้ คือ ค่าความเป็นกรดต่างสูงหรือต่ำเกินไป มีสารพิษ มีโลหะหนัก มีของแข็งแขวนลอยที่ตกตะกอนยาก มีไขมันและน้ำมันที่ละลายน้ำ มีไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสที่สูงเกินไป และมีเชื้อโรค ทั้งนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ถังกวนเร็ว ถังกวนช้า ถังตกตะกอน ถังกรอง และถังฆ่าเชื้อโรค ตัวอย่างเทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี ดังนี้

การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-flocculation)

การรวมตะกอนด้วยสารเคมีเป็นกระบวนการกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดต่าง สารที่นิยมใช้เป็นสารเคมีสร้างตะกอน (Coagulant) คือสารส้ม (Aluminium Sulfate; Alum) ปูนขาว (Calcium oxide) และเหล็กในรูปเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) หรือเฟอร์รัสคลอไรด์ (FeCl_2) โดยถ้าโมเลกุลของสีมีขนาดเล็ก ละลายน้ำได้ดี การเกิดตะกอนของสีจะไม่สามารถทำได้ แต่ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของการรวมตะกอนให้เป็นอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) การกำจัดสีโดยการสร้างและรวมตะกอนเป็นการทำให้ตะกอนหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก (Colloid) รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอน เนื่องจากอนุภาคของสารแขวนลอยมีประจุไฟฟ้าลบเป็นส่วนใหญ่ เมื่ออนุภาคเหล่านั้นมาพบกันก็จะผลักรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำลายประจุของอนุภาคหรือทำให้อนุภาคเป็นกลางโดยการเติมสารเคมีสร้างตะกอนเรียกว่า กระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) หลังจากนั้นเกิดกระบวนการรวมกัน (Flocculation) ได้มากขึ้นโดยการเติมสารเคมีรวมตะกอน (Flocculants) ลงไปช่วยยึดหรือจับให้กลุ่มตะกอนที่รวมตัวกันเข้ามาจับเป็น

กลุ่มตะกอนใหญ่ขึ้น เรียกว่า ฟล็อก (Floc) เมื่อตะกอนกลุ่มใหญ่ขึ้นก็มีน้ำหนักมากขึ้นก็จะสามารถตกตะกอนออกจากน้ำเสียได้ ซึ่งสารส้มมีคุณสมบัติทำหน้าที่เป็นทั้งสารสร้างและรวมตะกอน ในขั้นแรกจะเติมปริมาณน้อยเพื่อให้ประจุบวกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกอน (Coagulant) ไปทำลายประจุลบ และเมื่อเติมสารส้มมากขึ้นจะเกิดเป็นตะกอนเบาของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ซึ่งจะเป็นที่เกาะของอนุภาคต่างๆ ทำหน้าที่เป็นสารรวมตะกอน โดยสามารถละลายน้ำได้ดีถึง 71 ส่วนในน้ำ 100 ส่วน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เมื่อละลายน้ำจะทำปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.1



จากสมการที่ 2.1 อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นเม็ดเหนียวๆ (คล้ายเม็ดแมงลัก แต่เล็กกว่า) ไม่ละลายน้ำและจะตกตะกอนช้าๆ และระหว่างที่ตกตะกอนก็จะดึงเอาสารแขวนลอยต่างๆ มาเกาะเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น จะมีประสิทธิภาพที่ความเป็นกรดต่างระหว่าง 5.0 ถึง 7.0 ถ้าน้ำมีค่าสภาพต่างต่ำ เติมสารส้มมากทำให้สภาพต่างจะถูกทำลายหมด และจะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำลดลงจนเป็นกรด ดังนั้นในบางกรณีจำเป็นต้องมีการเติมต่างไปพร้อมกับสารส้มเพื่อชดเชย ซึ่งปริมาณสารส้มที่ต้องใช้นั้นจะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับลักษณะของน้ำ จึงจำเป็นต้องหาปริมาณที่ถูกต้องด้วยวิธีทดสอบการตกตะกอน (Jar Test) โดยการเติมสารเคมีในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แล้วเริ่มการกวนเร็วไม่เกิน 1 นาที แล้วเปลี่ยนความเร็วไปพัดมาจนช้า ประมาณ 5 ถึง 20 นาที และหยุดให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมี ทำให้มีกากตะกอน (Sludge) จำนวนมากต้องกำจัดต่อไป สำหรับปูนขาว (CaO) มีประสิทธิภาพไม่เท่าสารส้ม การใช้งานส่วนใหญ่มักจะเติมพร้อมกับสารส้ม เพื่อให้สารส้มตะกอนและปูนขาวปรับค่าความเป็นกรดต่างให้กับน้ำ ส่วนสารประกอบเหล็กในรูปต่างๆไม่ค่อยได้รับความนิยม เพราะมีราคาแพงกว่าสารส้ม และตะกอนของเหล็ก ($Fe(OH)_3$) ที่เกิดขึ้นอาจจะถูกจัดอยู่ในกลุ่มสารพิษ

การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี ใช้สารเคมีเป็นปัจจัยสำคัญในการออกซิไดส์สารประกอบต่างๆ ในน้ำเสีย โดยสารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวออกซิเดชันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ สารเคมีเฟนตัน (Fenton's reagent) และโอโซน (O_3)

กระบวนการเฟนตัน (Fenton process) คือ การออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนไดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์สารอินทรีย์ ซึ่งไอออนบวกของเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาเป็นตัวกลางสำคัญ ซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีค่าศักย์ไฟฟ้า

ออกซิเดชันสูง แสดงถึงความสามารถในการในการรับอิเล็กตรอน ถ้าตัวออกซิไดซ์ที่แรงจะรับอิเล็กตรอนได้ง่ายมาก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากจนเปลี่ยนเป็นรูปคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีของโรงงานย้อมสิ่งทอ ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลอนุมูล ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (Ozone oxidation) คือ การกำจัดสีด้วยโอโซนทำให้พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี (Chromophores) แตกออกกลายเป็นโมเลกุลเล็กและเสียหายไปโดยสามารถแยกสลายโมเลกุลของสีที่มีความยาวมากให้มีขนาดสั้นลง ทำให้สีของน้ำเสียลดลงซึ่งโอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงมีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสีในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าของการละลายในน้ำของออกซิเจน สามารถกำจัดสีแท้จริง ทำลายโครงสร้างโมเลกุลแบบโครงสร้างแบบโซ่ของสารอินทรีย์ ความสามารถในการกำจัดสีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับโอโซนให้นานขึ้น และสีของน้ำลดลงมากที่สุดเมื่อผ่านน้ำทิ้งเข้าระบบเป็นเวลา 60 นาที ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนออกซิเดชันในการกำจัดสีโดยความเป็นกรดต่างเท่ากับ 12 ± 0.1 เป็นสภาวะที่สามารถกำจัดสีด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชันได้ดีที่สุด ก๊าซโอโซนไม่เสถียรสามารถสลายตัวกลายเป็นออกซิเจนได้ง่าย จึงต้องผลิตขึ้นมาใช้ ณ สถานที่ใช้งานเลย หรือเป็นแบบติดอยู่กับที่ (Generated on-site) โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซนคืออากาศหรือออกซิเจน โดยออกซิเจน 2 โมเลกุลจะผลิตก๊าซโอโซนได้ 1 โมเลกุล ดังสมการ (2.2) และ (2.3) การผลิตก๊าซโอโซนโดยอากาศด้วยเครื่องผลิตโอโซนจะได้ก๊าซโอโซนประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 3 ในขณะที่การผลิตก๊าซโอโซนโดยใช้ออกซิเจนจะได้ก๊าซโอโซนประมาณร้อยละ 1 ถึง 6 การผลิตโอโซนจะอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีในการเปลี่ยนออกซิเจนเป็นก๊าซโอโซน โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีบางชนิดที่เป็นสารให้ออกซิเจน หรือปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยป้อนออกซิเจนเข้าไปในห้องปฏิกิริยาที่มีขั้วประจุไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงมาก แล้วทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลของออกซิเจนเป็นอนุมูลออกซิเจนอิสระและไปรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจนเป็นก๊าซโอโซน ซึ่งการผลิตที่เป็นที่นิยมก็คืออาศัยหลักการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการผลิต



โอโซนมีสถานะเป็นก๊าซที่ความดันและอุณหภูมิปกติความสามารถในการละลายของโอโซนในน้ำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันรวมทั้งค่าความเป็นกรดต่างเป็นสำคัญ โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรอัตราการสลายตัวจึงเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดต่างและอุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้

ไอโซนอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น กรณีที่ก๊าซไอโซนเป็นสารให้ออกซิเจนอย่างแรง (Strongly oxidizing agent) อาจจะมีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ รวมทั้งอาจมีการทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดในน้ำ และเกิดสารบางชนิดขึ้นโดยสารเหล่านั้นเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic compounds หรือ Mutagenic compound)

กระบวนการกำจัดสีแบบไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) ซึ่งสามารถกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม โดยเป็นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาเคมีและพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารที่เกิดออกซิเดชันไปยังสารที่เกิดรีดักชันผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปไอออนของโลหะที่ก่อให้เกิดสี ทำให้เลขออกซิเดชันของไอออนของโลหะเปลี่ยนไป และสามารถดูดซับกับสารแขวนลอยต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดสีด้วยตะกอนเบาในรูปของออกไซด์ที่ได้จากการแตกตัวของอิเล็กโตรดให้เกิดการตกตะกอนขึ้น กระบวนการไฟฟ้าเคมีมีกลไกการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยกระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) การดูดซับ (Adsorption) การตกตะกอน (Precipitation) และการลอยตัว (Floatation) ทำให้สามารถกำจัดสีออกจากน้ำเสีย ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและระยะเวลาการตกตะกอน เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเมื่อใช้ระดับกระแสไฟฟ้าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาการตกตะกอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดสี

2.3.3 เทคโนโลยีการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment)

เทคโนโลยีการบำบัดทางชีวภาพเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพหรือจุลินทรีย์ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียโดยเฉพาะสารคาร์บอนอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยความสกปรกเหล่านี้จะถูกใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในถังเลี้ยงเชื้อเพื่อการเจริญเติบโตทำให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกตกลงโดยจุลินทรีย์เหล่านี้อาจเป็นแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Organisms) หรือไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Organisms) ระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยหลักการทางชีวภาพ ได้แก่ ระบบแอกทีเวตเต็ดสลัดจ์ (Activate Sludge, AS) ระบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor, RBC) ระบบคลอง วนเวียน (Oxidation Ditch, OD) ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon, AL) ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) ระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย (Stabilization Pond) ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) และระบบกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter, AF) เป็นต้น เทคโนโลยีทางชีวภาพสามารถนำมากำจัดสีในน้ำจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม เยื่อกระดาษ และอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

การดูดซับด้วยสาหร่าย (Algae absorption)

สาหร่ายสามารถกำจัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมโดยการดูดซับสีเหล่านั้นภายใต้สภาวะที่มีแสงโดยเปลี่ยนโมเลกุลที่มีสีเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี ซึ่งสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) สามารถดูดซับสีเบสิคจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมได้ โดยสมมูลของการดูดซับเป็นไปตามทั้งโมเดลของ Langmuir และ Freundlich นอกจากนี้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และกลุ่มสาหร่ายสีเขียวมีประสิทธิผลกำจัดสีของโรงงานผลิตสุราที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ โดยมีปัจจัยด้านปริมาณความเข้มข้นของอาหาร ปริมาณความเข้มข้น ปริมาณความเข้มข้นของเซลล์ตั้งต้น รวมทั้งค่าความเป็นกรดต่าง และเมื่อนำปฏิกิริยาเฟนตันและโอโซนมาบำบัดร่วมกับการใช้สาหร่ายทั้งสองสายพันธุ์ พบว่าสาหร่ายทั้งสองสามารถกำจัดสีได้เพิ่มขึ้น

การย่อยสลายโดยเชื้อรา (Fungi decomposition)

กระบวนการกำจัดสีในน้ำทิ้งโดยเชื้อราเป็นการสร้างเอนไซม์นอกเซลล์กลุ่มลิกนินโอไลติก (Ligninolytic enzyme) [18] ย่อยสลายเนื้อไม้โดยเฉพาะเห็ดราในกลุ่มเชื้อราขาวหรือเห็ดราขาว (White or brown rot fungi) ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ดีบนขอนไม้ โดยในเนื้อไม้มีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ลิกนินเซลลูโลส ทำให้สามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษได้ นอกจากนี้เชื้อรา *Aspergillus fumigates* สามารถผลิตสารแลคเคส เพอร์แมงกานีสและโซลานีสซึ่งมีประสิทธิผลกำจัดสีโดยย่อยสลายลิกนินในช่วงความเป็นกรดต่าง 6.0 ถึง 9.0 นอกจากนี้รา *Isolate A19* ที่แยกได้จากเห็ดและรา *Isolate B7* ที่แยกได้จากเห็ดและกิ่งไม้ผู้สามารถกำจัดสีและลิกนินของน้ำทิ้งในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเป็นอาหาร คาร์บอนและโซเดียมไนเตรตเป็นแหล่งอาหารไนโตรเจนที่ความเป็นกรดต่าง 5 รวมทั้งเชื้อราเส้นใยสีขาว *Datronia sp. KAPI0039* สามารถผลิตเอนไซม์ย่อยสลายลิกนินแลคเคสและแมงกานีสเปอร์ออกซิเดส ซึ่งทำให้สีรีแอกทีฟของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอลดลง การใช้ราในการกำจัดสีย้อมผ้าไม่ค่อยเป็นที่นิยมเนื่องจากมีข้อด้อยในด้านความสะดวกในการใช้งาน การเก็บรักษา รวมถึงการขนส่งจึงมีการทดลองนำราชนิด *Lentinus polychrous Lev.* ซึ่งอยู่ในรูปของเส้นใยแห้งที่ได้จากการทำแห้งแบบฟลูอิดไรซ์ (Fluidized bed drying) กำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อม พบว่าสามารถกำจัดสีได้รวมทั้งการทำแห้งเป็นวิธีง่ายและสะดวก อีกทั้งสามารถประหยัดพลังงานให้มีต้นทุนต่ำ โดยปัจจัยที่มีผลต่อกิจกรรมเอนไซม์และการเจริญเติบโต ได้แก่ สารอาหาร คือ ระดับความเข้มข้นไนโตรเจน และคาร์บอน อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง สารยับยั้ง จากกระบวนการแคทาไลซิสหรือไฮโดรไลซิสของเอนไซม์ และอ็อกซิเจน ได้แก่ แมงกานีส

การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (Bacteria decomposition)

การย่อยสลายสียด้วยแบคทีเรียสามารถลดสีหลายประเภท จากศึกษาการดูดซับสีกลุ่มแอนทราควิโนนโดยเชื้อ *Bacillus gordonae*, *B. benzeovorans* และ *Ps. putida* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับ ร้อยละ 13 19 และ 18 ตามลำดับ และการย่อยสลายสี รีแอกทีฟเรด 2 พบว่า สามารถกำจัดได้ดีโดยกระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก แบคทีเรียที่มีความสำคัญในการกำจัดสี 3 สกุล คือ *Pseudomonas sp.*, *Proteus sp.* และ *Klebsiella sp.* นอกจากนี้ วิจารณ์ หลาง และคณะ [18] ศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรียสายพันธุ์ *Burkholderia glumae* ในการย่อยสลายสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า กระบวนการบำบัดแบบไม่เติมอากาศให้ผลเร่งการกำจัดสีได้ดีกว่าการบำบัดแบบเติมอากาศ โดยสามารถจัดสีในน้ำทิ้งได้ร้อยละ 76 ในเวลา 7 วัน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลาย คือ ค่าความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม สารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญ รวมถึงความต้องการอากาศในการเจริญของเชื้อแบคทีเรียและการย่อยสลายสี

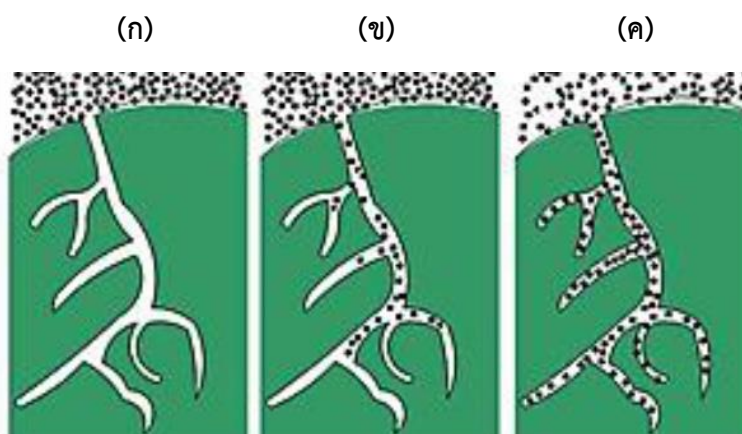
สำหรับในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ได้สังเกตเห็นว่าจากหลากหลายเทคโนโลยีการบำบัดการกำจัดสีในน้ำ กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) ถือเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม ต้นทุนต่ำ อีกทั้งยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกกระบวนการดูดซับมาใช้ในการกำจัดสีในน้ำ

2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการกักพวงสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กที่อยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับผิวนี้จะเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆ ทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะการดูดซับแบบระหว่างของเหลว-ของแข็ง (Liquid –Solid Interface) ในการดูดซับผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวนอก การถ่ายเทโมเลกุลสารละลายหรือสารแขวนลอยจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลสารละลายหรือสารแขวนลอยในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุล

สารละลายหรือสารแขวนลอยส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะติดตัวดูดซับ แรงขับเคลื่อน (Driving force) ระหว่างการเกาะติดผิวตัวดูดซับ มี 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี [19]

โดยปกติแล้วขั้นตอนการดูดซับจะมีขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 โมเลกุลตัวถูกดูดซับแพร่ไปยังผิวภายนอกของตัวดูดซับ ขั้นตอนที่ 2 โมเลกุลตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ และขั้นตอนที่ 3 โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะติดที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ โดยเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการดูดซับ ประกอบด้วย ขั้นตอน [20] 3 ขั้นตอน คือ (ก) การแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ต้องการบำบัดไปยังผิวภายนอกของตัวดูดซับ (ข) การเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ (ค) โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะติดที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ โดยเรียงตัวกันเป็นชั้น ๆ

2.4.1 ประเภทของกระบวนการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) [21]

2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูล

ต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50 ถึง 400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น

2.4.2 ตัวดูดซับ (Adsorbent)

ตัวดูดซับ คือ สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่ **สารอนินทรีย์** เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์ อะลูมิเนียมแกมมันต์ ถ่านกระดูก สินแร่จำพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต เช่น kaolinite เป็นต้น ตัวดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 ถึง 200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับสารอนินทรีย์มีขีดจำกัด **ถ่านแกมมันต์** มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500 ถึง 1400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น **สารอินทรีย์สังเคราะห์** เช่น สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 ถึง 500 ตารางเมตรต่อกรัม **วัสดุชีวภาพ (Biomaterials)** ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางด้านการเกษตร เช่น ชี้อัลไคโตซาน กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลือง ฟางข้าวเปลือกไม้ แถ้วกลบดำ เป็นต้น **สารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent)** ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย

ปัจจัยสำคัญของตัวดูดซับที่ควรได้รับการพิจารณาเพื่อความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพต่อกระบวนการดูดซับ มีดังต่อไปนี้ (ก) ประเภทของตัวดูดซับสามารถเลือกดูดสารที่ต้องการแยก ออกจากสารผสมนั้นๆ (ข) ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ ควรมีขนาดพอดีหรือใหญ่

กว่า เพื่อที่จะให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับสามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนได้ (ค) ตัวดูดซับมีความแข็งแรง และทนทานต่อการนำไปใช้งาน เช่น ทนทานต่อการกัดกร่อน และอุณหภูมิ เป็นต้น (ง) ตัวดูดซับจะต้องไม่เกิดปฏิกิริยากับสารประกอบในของผสมนั้นๆ (จ) ตัวดูดซับที่มีความพรุนสูง มีความหนาแน่นต่ำ แต่มีความแข็งแรงและไม่แตกง่าย (ฉ) ตัวดูดซับควรเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่าย และราคาไม่แพง

งานวิจัยนี้จะสังเคราะห์ตัวดูดซับที่มีองค์ประกอบอนินทรีย์ธรรมชาติและอินทรีย์ เพื่อนำมาใช้ในการศึกษา โดยเลือกใช้แร่ดิน (Clay mineral) เป็นสารอนินทรีย์ธรรมชาติ และไคโตซาน (Chitosan) เป็นตัวสารอินทรีย์ เนื่องจากสารทั้งสองตัวดูดซับมีต้นทุนต่ำ หาได้ง่าย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

การศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับพบว่ามีหลากหลายปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ที่พึงควรได้รับการพิจารณาสำหรับแต่ละกระบวนการเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้ออกมามีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยปัจจัยหลักๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับที่ควรได้รับการพิจารณา เช่น ขนาดและพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ เป็นต้น

2.4.3.1 ขนาดและพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ

ขนาดและพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับนั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับด้วยเช่นกัน โดยตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน จะมีความสามารถในการดูดซับ แปรผกผันกับขนาดและพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ ส่วนตัวดูดซับที่มีรูพรุน ค่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผันตามขนาด และพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ แต่อย่างไรก็ตามก็ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวที่ถูกดูดซับด้วย กล่าวคือ ตัวที่ถูกดูดซับที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะดูดซับก่อน และตัวที่ถูกดูดซับที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะถูกดูดซับในภายหลังตามลำดับ [22]

2.4.3.2 ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

ความเข้มข้นของสารละลายเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นของสารละลายสูงจะมีค่ามากกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำ อันเป็นผลเนื่องมาจากแรงกระทำและการชนกันของโมเลกุล (Driving force) [23]

2.4.3.3 ค่าความเป็นกรด-ต่างของสารละลาย

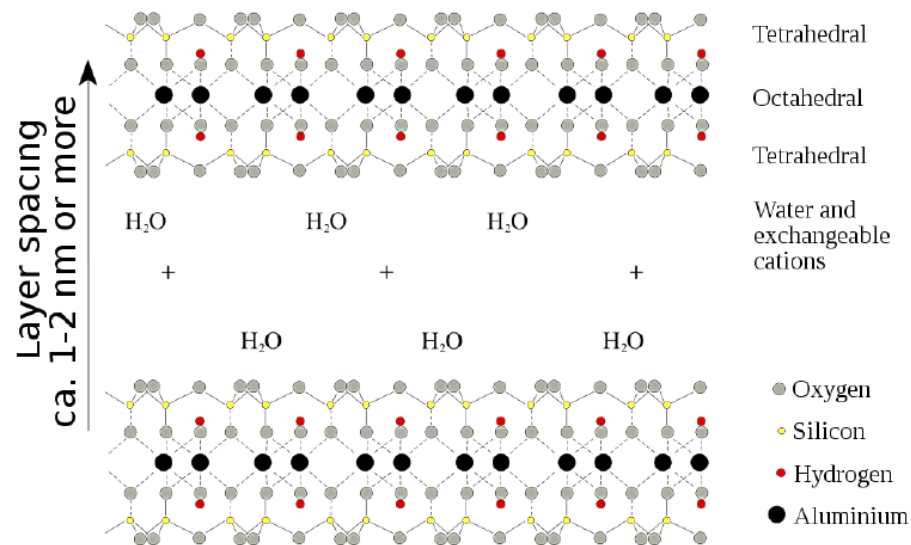
สำหรับค่าความเป็นกรด-ต่างของสารละลาย นั้นจะมีผลต่อการแตกตัวของไอออนในสารละลาย โดยในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ต่างต่ำ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) สูง และปริมาณไฮดรอกไซด์ (OH^-) จะแปรผันตามค่าความเป็นกรด-ต่างที่เพิ่มสูงขึ้น จากปัจจัยข้างต้นที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับและธรรมชาติของตัวที่ถูกดูดซับ เช่น ตัวดูดซับไคโตซาน เมื่อที่ระดับค่าความเป็นกรด-ต่างต่ำๆ จะเกิดการโปรตอนเตหมู่เอมีน ($-NH_2$) ทำให้หมู่เอมีน ($-NH_2$) บนพื้นผิวของไคโตซานปรับเปลี่ยนตัวเองให้อยู่ในรูปของแอมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) มากขึ้น ดังนั้นตัวดูดซับไคโตซานจึงสามารถดูดซับสารที่เป็นประจุลบได้ [24-26]

2.4.3.4 อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ

ในส่วนของการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้สมดุลของระบบเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ค่าพลังงานจลน์จะมากขึ้นเป็นเหตุให้อนุภาคของตัวดูดซับสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ส่งผลทำให้อัตราการแพร่ผ่านของตัวถูกดูดซับเข้าสู่ตัวดูดซับไปยังบริเวณกระตุ้น (Active site) ได้เร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลจากประเภทปฏิกิริยาของตัวดูดซับเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย คือ ปฏิกิริยาดูดความร้อนและปฏิกิริยาคายความร้อน [27]

2.5 แร่ดิน (Clay mineral)

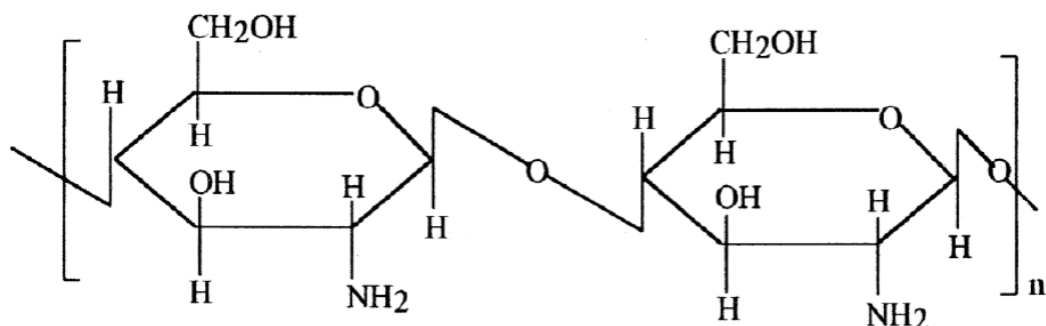
แร่ดิน (Clay mineral) เป็นแร่ที่เกิดจากการผุพังของหิน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วขนาดอนุภาคของดินชนิดนี้จะเล็กมากถึงระดับไมครอน [28] ซึ่งโครงสร้างจะมีลักษณะเป็นผลึกโดยจะพบอลูมินา โมเลกุลแปดระนาบอยู่ระหว่างในชั้นของซิลิกาออกไซด์ โดยที่อะตอมของซิลิกาบางส่วน จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมอลูมิเนียมในชั้นของโมเลกุลสี่เหลี่ยมปิรามิดและอะตอมอลูมิเนียมถูกแทนที่ด้วยแมกนีเซียมในชั้นโมเลกุลแปดระนาบ จึงเป็นผลให้พื้นของแร่ดินมีประจุเป็นลบ ซึ่งการเสียสมดุลจึงทำให้สามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผิวของแร่ดินได้ [29] จากโครงสร้างดังกล่าวส่งผลให้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น (Hydrophobic) จากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าการศึกษาที่ความยาวของสายโซ่เพิ่มขึ้น ทำให้มีความไม่ชอบน้ำสูงขึ้นเนื่องจาก Phthalate ester ที่อยู่ในสายโซ่ [30] ซึ่งโครงสร้างของแร่ดินแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของแร่ดิน (Clay mineral) [31]

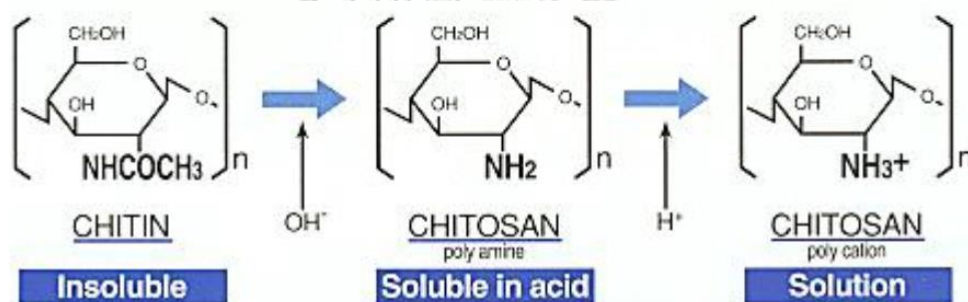
2.6 ไคโตซาน (Chitosan)

ไคโตซาน เป็นสารโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ซึ่งเป็นของอนุพันธ์ของไคติน ที่ได้รับการผ่านปฏิกิริยา Deacetylation โดยไคโตซานถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1859 ด้วยความบังเอิญ โดย Rouget เขาพบได้จากการที่เอาไคตินไปต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น [32] ไคโตซานจะมีปริมาณของหมู่อะซีทิล (Acetyl) ต่ำ เนื่องจากผ่านปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซีทิล (Deacetylation) ของไคตินด้วยสารละลายด่างเข้มข้น ดังนั้นจึงทำให้โครงสร้างของไคตินเปลี่ยนไปโดยมีการแทนที่หมู่อะซีตามิโด (-NHCOCH₃) ด้วยหมู่อะมิโน (-NH₂) บริเวณคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ดังนั้นโครงสร้างของไคโตซาน คือ โพลีเมอร์ของ D-glucosamine (Poly(1, 4-2 amino-2-deoxy-β-D-glucosamine)) ซึ่งโครงสร้างของ ไคโตซานแสดงดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของไคโตซาน (Chitosan) [32]

ไคโตซานไม่ละลายน้ำ ต่าง และตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ละลายได้ดีในสารละลายกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มีค่าความเป็นกรดต่างน้อยกว่า 6 ซึ่งตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการละลายไคโตซานคือ กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก นอกจากนี้ยังสามารถละลายในกรดอินทรีย์บางชนิด ได้แก่ กรดไนตริก กรดเปอร์คลอริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดฟอสฟอริก ความสามารถในการละลายของไคโตซานจะขึ้นกับระดับการกำจัดหมู่อะซีทิล (Degree of deacetylation, %DD) ไคโตซานเป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์ประจุบวก (Cationic polyelectrolyte) เนื่องจากหมู่เอมีนในสารละลายกรดมีการรับโปรตอนอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) แสดงดังรูปที่ 2.7 จึงทำให้ไคโตซานสามารถดูดซับโลหะ สีย้อม และสารอินทรีย์ได้ นอกจากนี้ไคโตซานยังมีคุณสมบัติอย่างอื่นที่โดดเด่นอีกมากมาย เช่น สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ (Biodegradability) มีความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Anti-bacterial) [25] และมีความเหนียว และมีความยืดหยุ่นสูง เป็นต้น



รูปที่ 2.7 แสดงการโปรโตเนตหมู่เอมีนอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) [33]

2.7 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (Thermodynamics of adsorption)

อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นการศึกษาเกี่ยวกับพลังและการเปลี่ยนแปลงพลังงานโดยพารามิเตอร์ของอุณหพลศาสตร์นี้ [34] ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) ซึ่งพิจารณาดังสมการ 2.4

$$\Delta G^\circ = -RT \ln \left(\frac{C_{Ae}}{C_e} \right) = -RT \ln (K_c) \quad (2.4)$$

- เมื่อ K_c = ค่าคงที่การดูดซับ
 ΔG° = ค่าพลังงานอิสระของกิบส์
 R = ค่าคงที่ของแก๊ส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.314 จูลต่อโมล
 T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

จากผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าคงที่สมดุล สามารถพิจารณาได้ดังสมการ 2.5

$$\log K_c = \frac{\Delta S^\circ}{2.303R} - \frac{\Delta H^\circ}{2.303RT} \quad (2.5)$$

โดยที่ K_c สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.6

$$K_c = \frac{C_{Ae}}{C_e} \quad (2.6)$$

- เมื่อ C_{Ae} = ความสามารถในการดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 C_e = ความเข้มข้นของสารละลายสี่อ้อมรีแอคทีฟเรด 120 ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

จากสมการ 2.6 นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log K_c$ กับ $1/T$ โดยที่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) ได้จากความชัน และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) หาได้จากจุดตัดแกน y

2.8 ไอโซเทอมแบบจำลองสมดุลการดูดซับ

สำหรับการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ เพื่อคุณลักษณะการดูดซับบนพื้นผิว โดยในงานวิจัยได้เลือกแบบจำลองสมดุลการดูดซับมาศึกษา 3 แบบจำลองด้วยกันคือ แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's isotherm) แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm) และ แบบจำลองการสมดุลดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน (Koble-Corrigan's isotherm) โดยทั้ง 3 แบบจำลอง จะให้รายละเอียดและคำอธิบายที่แตกต่างกันดังนี้

2.8.1 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's isotherm) [27, 35]

แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ได้ถูกนำมาอธิบายลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของคอลลอยด์ โดยแบบจำลองนี้สามารถอธิบายได้ดีที่ความเข้มข้นต่ำ โดยการดูดซับจะเป็นแบบการดูด

ชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โดยแบบจำลองแลงเมียร์จะไม่นิยมนำมาอธิบายการดูดซับบนตัวดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) แต่จะสามารถอธิบายได้ดีกับตัวดูดซับที่มีพื้นผิวเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous) ซึ่งสมการการดูดซับของแลงเมียร์ แสดงดังสมการที่ 2.7

$$q_e = \frac{q_0 K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.7)$$

- เมื่อ q_e = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- q_0 = จำนวนสารมากที่สุดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- K_L = ค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์
- C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- C_0 = ความเข้มข้นที่สภาวะเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากสมการ 2.7 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_0} + \left(\frac{1}{K_L q_0}\right) \left(\frac{1}{C_e}\right) \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่าง $1/C_e$ กับ $1/q_e$ ซึ่ง q_0 สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y และ K_L หาได้จากความชัน และเมื่อ q_0 มีค่ามาก แสดงว่าตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับมาก และ K_L มีค่ามาก นั้นหมายถึงตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับที่ดี

2.8.2 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm) [27, 36]

แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช ได้ถูกนำมาอธิบายการดูดซับพื้นผิวที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณของตัวดูดซับกับสารถูกดูดซับไม่เท่ากัน โดยความสัมพันธ์ที่สมดุลของการดูดซับของแบบจำลองฟรุนดลิช สามารถแสดงได้ดังสมการ 2.9

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.9)$$

เมื่อ q_e = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ ที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_o = จำนวนสารมากที่สุดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ ที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_F = ค่าคงที่การดูดซับของฟรุนดลิช

n = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_o = ความเข้มข้นที่สภาวะเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากสมการ 2.9 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังนี้

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.10 สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$ ซึ่ง K_F สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y และ n หาได้จากความชัน และเมื่อ n มีค่ามาก แสดงว่าตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับมาก และ K_F มีค่ามาก หมายถึงตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับดี

2.8.3 แบบจำลองการสมดุลดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน (Koble-Corrigan's isotherm) [27, 36, 37]

แบบจำลองสมดุลการดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน (Koble-Corrigan's isotherm) เป็นการนำแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์และแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิชมาทำการผสมกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบผสมที่มีทั้งการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) และหลายชั้น (Multilayer) ผสมกัน โดยความสัมพันธ์ที่สมดุลของการดูดซับของแบบจำลองการสมดุลดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน สามารถแสดงได้ดังสมการ 2.11

$$q_e = q_0 \left(\frac{(K_{KC} C_e)^n}{1 + (K_{KC} C_e)^n} \right)^n \quad (2.11)$$

เมื่อ q_e = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_0 = จำนวนสารมากที่สุดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_{KC} = ค่าคงที่การดูดซับของของโกเบิล (Koble) และคอร์ริแกน (Corrigan)

n = ดัชนีชี้กำลังของแบบจำลองที่มีผลต่อจำนวนสารมากที่สุดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล

C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากสมการ 2.11 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{q_0 K_{KC}^n} \right) \left(\frac{1}{C_e^n} \right) + \frac{1}{q_0} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่าง $1/C_e^n$ กับ $1/q_e$ ซึ่ง $1/q_0$ สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y และ K_{KC} หาได้จากความชัน และเมื่อ $1/q_0$ มีค่ามาก แสดงว่าตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับมาก และ K_{KC} มีค่ามาก หมายถึงตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับที่ดี

2.9 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic model of adsorption)

สำหรับการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่เลือกมาศึกษาในงานวิจัยมี 2 ประเภท แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) เป็นการศึกษาเพื่อสามารถทำให้เราทราบถึงอัตราการดูดซับที่เกิดขึ้น โดยจะวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นเริ่มต้นเทียบกับเวลา อีกทั้งยังทำให้ทราบถึงลักษณะรูปแบบในการเข้าทำปฏิกิริยาของตัวสารถูกดูดซับไปยังบริเวณตัวรับอิสระ (Active site) ของตัวดูดซับ

2.9.1 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order) [35, 38]

แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ถูกอธิบายในปี ค.ศ. 1989 โดย Lagergren ซึ่งเป็น การอธิบายการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้น A และ B แล้วได้ผลิตภัณฑ์ P ดังสมการ 2.13



โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับสารตั้งต้น B เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น A นั้นมากกว่า B มากๆ โดยที่กฎอัตราปฏิกิริยาสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.14

$$-\frac{d[B]}{dt} = k'[B] \quad \text{เมื่อ} \quad k' = k[A] \quad (2.14)$$

จากสมการ 2.14 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังสมการ 2.15

$$\ln[B] = -k't + C \quad (2.15)$$

และจากสมการ 2.15 สามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของการดูดซับได้ดังสมการ 2.16

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.16)$$

อินทิเกรตสมการที่ 2.16 โดยที่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะทำให้ได้ดังสมการ 2.17

$$\ln\left(\frac{q_e}{q_e - q_t}\right) = kt \quad (2.17)$$

สมการ 2.17 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังสมการ 2.18

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.18)$$

เมื่อ q_e = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t = ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 = ค่าคงที่ของอัตราเร็วอันดับหนึ่งเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาท)

t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาท)

จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับ t ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่าความชันเท่ากับ k_1 และ จุดตัดแกน y เท่ากับ $\ln(q_e)$

2.9.2 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) [39-42]

แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม สามารถอธิบายถึงอัตราของปฏิกิริยาการดูดซับอันดับสอง ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับค่าความสามารถในการดูดซับบนตัวดูดซับ โดยตั้งสมมติฐานว่ากระบวนการเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และขึ้นกำหนดอัตราคือ ขั้นตอนการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยปฏิกิริยาอันดับสองเทียมขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับและปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ ณ สภาวะสมดุล ซึ่งกฎอัตราสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.19

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.19)$$

อินทิเกรตสมการที่ 2.19 โดยที่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะทำให้ได้ดังสมการ 2.20

$$\ln\left(\frac{q_e}{q_e - q_t}\right) = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (2.20)$$

สมการ 2.20 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังสมการ 2.21

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.21)$$

เมื่อ q_e = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t = ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_2 = ค่าคงที่ของอัตราเร็วอันดับสองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาทึ)

t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาทึ)

จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับ t ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่าความชันเท่ากับ $1/q_e$ และ จุดตัดแกน y เท่ากับ $1/(q_e^2 k_2)$ และในการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และ ค่า error function เพื่อยืนยันความแม่นยำและถูกต้องของข้อมูลจากการทดลองในงานวิจัย

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lain และ คณะ [8] ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม Congo Red ด้วยแคลเซียมเบนโตไนท์ (Ca-bentonite) รวมทั้งมีการศึกษาถึงผลของปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสี จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการดูดซับ ทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะ ณ เวลาใดๆ มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกๆ เนื่องจากแรงขับเคลื่อนที่มากอันเนื่องมาจากผลต่างของความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับปริมาณสีย้อมบนตัวดูดซับ หลังจากนั้นปริมาณดูดซับจำเพาะ ณ เวลาใดๆ จะค่อยเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลซึ่งภายหลังจากการเข้าสู่สมดุลแล้วระยะเวลาจะไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อระบบ สำหรับผลของอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส พบว่าในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส ต้องใช้เวลาเพื่อให้การดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลที่ 480 นาทีซึ่งให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าให้ค่าความสามารถในการกำจัดสีสูงสุดร้อยละ 95.92 เข้าสู่สมดุลที่เวลา 180 นาที แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาในการเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น ในส่วนของผลของความเข้มข้นได้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 50 ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้ปริมาณการดูดซับจำเพาะที่สมดุลเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย จะเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนให้กับการถ่ายเทมวลซึ่งเกิดขึ้น เนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณของสีย้อมบนตัวดูดซับกับสารละลาย นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นในขณะที่ปริมาณตัวดูดซับคงที่นั้น ทำให้ร้อยละของการกำจัดสีย้อมนั้นมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นทำให้ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณสีย้อมทั้งหมดในสารละลายที่เพิ่มขึ้น

Sairoong และ คณะ [43] ทำการทดลองการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ 3 ชนิด Red Blue และ Yellow โดยใช้ดินดานเป็นตัวดูดซับ โดยได้มีการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของดินดาน พบว่าในช่วงระยะเวลาสัมผัส 48 ชั่วโมงแรกการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรกมีพื้นที่ผิวของการดูดซับมีปริมาณมาก ทำให้อัตราการดูดซับเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นการดูดซับจะค่อยเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยจะเริ่มคงที่และเข้าสู่ภาวะสมดุลภายในระยะเวลา 72 ชั่วโมง และมีค่าปริมาณสีย้อมรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของดินดานสูงสุดที่ระยะเวลาสัมผัส 120 ชั่วโมง โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับที่ระยะเวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง สำหรับผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 ชนิดของดินดาน โดยศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นเริ่มต้น และ อุณหภูมิ พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ลดลง มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 ชนิดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีผลต่อประจุที่ผิวหน้าของดินดาน โดยในภาวะที่สารละลายสีย้อมรีแอกทีฟอยู่ในภาวะที่เป็นกรด ที่ผิวหน้าของดินดานจะถูกเติมโปรตอนด้วยไฮโดรเจนไอออนทำให้ผิวหน้าของดินดานแสดงประจุเป็นบวก ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลของสีย้อมรีแอกทีฟที่มีประจุเป็นลบได้เพิ่มมากขึ้น และเมื่อความเข้มข้นเริ่มขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 ชนิดมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความต้านทานการดูดซับมีค่าลดลงส่งผลให้แรงขับเคลื่อนมวลเพิ่มมากขึ้น ทำให้โมเลกุลสีย้อมกระจายตัวเข้าสู่ภายในรูพรุนของดินดานได้เพิ่มมากขึ้น ในส่วนของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีผลทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง ส่งผลทำให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลสีย้อมในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น เพิ่มโอกาสให้โมเลกุลสีย้อมเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับบนสารดูดซับได้มากยิ่งขึ้น และการที่อุณหภูมิสูงขึ้นยังช่วยเร่งให้เกิดการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับสารดูดซับอีกด้วย โดยที่ค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 2 อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และค่าความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร แพลตินัมโคบอลต์จะให้ความสามารถในการดูดซับสูงสุดและเมื่อมีการ

เปลี่ยนแปลงปัจจัยสภาวะแวดล้อม ได้แก่ ความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นเริ่มต้น และอุณหภูมิ จะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue มากที่สุด

Ahmad และ คณะ [25] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ไคโตซานชนิดผง และเกล็ดไคโตซาน เป็นตัวดูดซับ สำหรับดูดซับน้ำมันจากน้ำทิ้งของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม โดยศึกษาผลของปริมาณไคโตซาน ชนิดผง และเกล็ด ต่อร้อยละการกำจัดด้วยการดูดซับ แสดงให้เห็นผลของปริมาณไคโตซานที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับน้ำมันคงค้าง เมื่อน้ำหนักของไคโตซานเพิ่มขึ้น ร้อยละการกำจัดด้วยการดูดซับน้ำมันก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน และจะเห็นว่าปริมาณของผงและเกล็ดไคโตซานที่ต้องใช้ในการทำให้ร้อยละการกำจัดด้วยการดูดซับน้ำมันออกจากน้ำเสียของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที โดยมี contact time 60 นาที เป็น 99 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือ 0.5 กรัม และ 2 กรัม ตามลำดับ ผงไคโตซานสามารถดูดซับน้ำมันทั้งหมดในน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มได้โดยใช้ปริมาณที่น้อยกว่า โดยประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำมันในน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มจะถูกดูดซับเมื่อเติมผงไคโตซานปริมาณ 0.1 กรัม ในขณะที่ในรูปแบบเกล็ดนั้น ต้องใช้ 0.8 กรัม โดยไคโตซานนั้นมีหมู่อะมิโน ซึ่งมีประจุบวกในโครงสร้างที่สามารถดึงดูดประจุลบจากน้ำมันได้ ปัจจัยนี้จึงทำให้น้ำมันนั้นสามารถยึดเกาะหรือเกาะติดกับผงและเกล็ดไคโตซานได้ เห็นได้ว่าไคโตซานนั้นเหมาะกับการใช้เป็นตัวดูดซับมากๆ แต่ที่ปริมาณไคโตซานสูงๆ ไม่ได้มีข้อได้เปรียบที่เห็นชัดสำหรับชนิดผงและเกล็ด แต่สำหรับที่ปริมาณต่ำๆ มีประสิทธิภาพยอดเยี่ยมมาก ไคโตซานนั้นมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง ดังนั้นการใช้ไคโตซานในปริมาณน้อยๆ ก็เพียงพอในการกำจัดน้ำมันคงค้างที่อยู่ในน้ำเสียที่มาจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มได้ จากภาพกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) สามารถยืนยันได้ว่า ไคโตซานชนิดผงมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าแบบเกล็ด เป็นผลเนื่องมาจากไคโตซานแบบผงนั้นมีอนุภาคขนาดเล็กมีการกระจายได้อย่างสม่ำเสมอส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงกว่าไคโตซานแบบเกล็ด และสำหรับการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับบ่งบอกให้เห็นข้อมูลจากการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองของฟรอนด์ลิช (Freundlich model) อีกทั้งข้อมูลการศึกษาก็เป็นไปตาม แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสอง (Second-order kinetic model) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการดูดซับทางเคมีเป็นขั้นกำหนดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันกับไคโตซาน

Chiou และ คณะ [44] เป็นการศึกษาการดูดซับสีย้อม Reactive Red 189 ด้วยเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางโดยทำการศึกษาในระบบแบบกะ และศึกษาความแตกต่างของขนาดอนุภาค (2.3 ถึง 2.5 2.5 ถึง 2.7 และ 3.5 ถึง 3.8 มิลลิเมตร) ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ผลของสัดส่วน ECH ต่อ Chitosan จากการทดลองพบว่า เม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางที่มีขนาดอนุภาค 2.3 ถึง 2.5 2.5 ถึง 2.7 และ 3.5 ถึง 3.8 มิลลิเมตร มีค่าการดูดซับสูงสุด 1936 1686 และ 1642 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ที่สัดส่วนน้ำหนัก ECH ต่อ Chitosan เท่ากับ 0.2 เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กนั้นมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสีย้อมได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับตัวดูดซับไคโตซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง พบว่าเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่า นอกจากนี้การลดลงของค่าความเป็นกรดต่างจะนำไปสู่การเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีย้อมบนเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง และจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองก็ได้เป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์(Langmuir model) มากกว่า แบบจำลองของฟรุนดลิช(Freundlich model) สามารถยืนยันได้จากค่า R^2 ที่สูงกว่าสำหรับทุกข้อมูล จะเห็นได้ว่าค่าความเป็นกรดต่างและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมนั้นมีส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิและสัดส่วนน้ำหนัก ECH ต่อ Chitosan นั้นส่งผลกระทบบค่อนข้างน้อยมาก



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้ กล่าวถึง เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย วิธีการเตรียมตัวดูดซับ ขั้นตอนการทดลอง การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ การศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ และ การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ เช่น ปีกเกอร์ แท่งแก้วคนสาร กระจกบดวง ขวดวัด ปริมาตร หลอดหยด เป็นต้น
- 3.1.2 เครื่องชั่งละเอียด
- 3.1.3 เครื่องปั่นสารละลาย (Overhead stirrer) รุ่น RW20 digital ยี่ห้อ IKA
- 3.1.4 เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Incubator shaker)
- 3.1.5 เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) รุ่น SLR บริษัท Scientific Promotion Co. LTD
- 3.1.6 ตู้อบ (Oven)
- 3.1.7 ครกบดสาร
- 3.1.8 เครื่องปั๊ม (Peristaltic Pump) รุ่น 77200-60 ยี่ห้อ Masterflex
- 3.1.8 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความพรุน (Surface area and porosity analyzer, BET) ยี่ห้อ Micromeritic รุ่น ASAP2020
- 3.1.9 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ยี่ห้อ UNICO รุ่น SQ-2800
- 3.1.10 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum one
- 3.1.11 เครื่องวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิว (Zetasizer) ยี่ห้อ MALVERN รุ่น ZSP
- 3.1.12 เครื่อง XRF (X-Ray Fluorescence Spectrometer) รุ่น PW2400

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.2.1 สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 (Reactive red 120) จากบริษัท Sigma-Aldrich
- 3.2.2 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) จากบริษัท RCI Labscan
- 3.2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) จากบริษัท Merck
- 3.2.4 โซเดียมลอริลซัลเฟต (Sodium lauryl sulfate) จากบริษัท Ajax Finechem
- 3.2.6 ไคโตซาน (poly- β -(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose: $C_6H_{12}O_4N$)_n มีร้อยละการกำจัดหมู่อะซิทิล (%DD) มากกว่าร้อยละ 95 จากบริษัท S.Y.K . Enterprise
- 3.2.7 แร่ดิน (Clay mineral) มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 90 จากบริษัท Dhenkaset Industrial

3.3 วิธีการเตรียมตัวดูดซับ

สำหรับในงานวิจัยนี้จะมีการเตรียมตัวดูดซับ 2 ชนิด คือ ตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตแร่ดิน-ไคโตซาน โดยตัวดูดซับแต่ละชนิดจะมีการเตรียมหลักๆ อยู่ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมสารละลายไคโตซาน และ ขั้นตอนการขึ้นรูปของตัวดูดซับแต่ละชนิด

3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับไคโตซาน

3.3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายไคโตซาน

ละลายไคโตซานจำนวน 2 กรัม ลงในสารละลายกรดแอซิติก ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร จำนวน 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนด้วยเครื่องปั่นสารละลาย (Overhead stirrer) ด้วยอัตราการกวน เท่ากับ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายไคโตซานที่มีลักษณะใส

3.3.1.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปตัวดูดซับไคโตซาน

ทำการหยดสารละลายไคโตซานที่เตรียมได้ในขั้นตอน 3.3.1.1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องปั๊ม (Peristaltic Pump) ผ่านเข็มฉีดยาลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร จากนั้นตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการขึ้นรูป โดยแช่ไว้เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง เมื่อครบตามช่วงเวลาที่กำหนด จากนั้นนำตัวดูดซับมาล้างด้วยน้ำปราศจากประจุจนกระทั่งมีค่าความเป็นกรดต่างเป็นกลาง ก่อนนำไปใช้งาน

3.3.2 การเตรียมตัวดูดซับคอมพอลิเมอร์ดิน-ไคโตซาน

3.3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายไคโตซาน

ละลายไคโตซานจำนวน 2 กรัม ลงในสารละลายกรดแอซิดิก ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร จำนวน 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนด้วยเครื่องปั่นสารละลาย (Overhead stirrer) ด้วยอัตราการกวน เท่ากับ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายไคโตซานที่มีลักษณะใส

3.3.2.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปตัวดูดซับคอมพอลิเมอร์ดิน-ไคโตซาน

ทำการเติมแร่ดินตามปริมาณสัดส่วนที่ต้องการศึกษา ลงในสารละลายไคโตซานที่เตรียมได้จากขั้นตอน 3.3.2.1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และทำการกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ที่อัตราการกวน 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นฉีดลงในสารละลายผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และสารละลายโซเดียมลอริลซัลเฟต ที่ระดับความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จะได้ตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นเส้นใย จากนั้นทำการแช่ตัวดูดซับทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เมื่อครบตามช่วงเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นทำการล้างตัวดูดซับด้วยน้ำปราศจากประจุจนกระทั่งมีค่าความเป็นกรดต่างเป็นกลางก่อนนำไปใช้งาน

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 นำสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.4.2 ทำการปรับค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ที่ต้องการศึกษาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร

3.4.3 เติมตัวดูดซับที่สังเคราะห์ตามขั้นตอนที่ 3.3 จำนวน 0.3 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่

3.4.4 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 420 นาที

3.4.5 ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ทั้งก่อนและหลังการดูดซับ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ตามช่วงเวลาที่กำหนด

3.4.6 นำตัวอย่างที่เก็บได้ไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 โดยใช้เทคนิคทางยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ที่ความยาวคลื่น 512 นาโนเมตร

3.4.7 นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละของการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 (% Removal) ดังสมการ 3.1

$$\% \text{ Removal} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3.4.8 ทำการศึกษาผลของตัวแปรที่ต้องการศึกษา ในขณะที่กำหนดให้ค่าตัวแปรอื่นๆ คงที่ และดำเนินการทดลองตามขั้นตอน 3.4.1 ถึง 3.4.6

สำหรับตัวแปรที่ได้ทำการศึกษามีอิทธิพลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ด้วยกระบวนการดูดซับ ดังนี้

- ปริมาณของตัวดูดซับ (0.3 0.6 0.9 และ 1.2 กรัม)
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม (10 30 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร)
- ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม (3 5.5 7 และ 10)
- อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส)
- ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (15 30 45 60 90 120 180 240 300 และ 420 นาที)

3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ

3.5.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

นำตัวดูดซับที่สังเคราะห์ จำนวน 0.5 กรัม บดกับโพแทสเซียมโบรมาไนด์ (KBr) จากนั้นทำการอัดขึ้นรูปเป็นลักษณะแผ่นใส แล้วนำไปใส่ใน sample holder หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer)

3.5.2 การศึกษาหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน

นำตัวดูดซับที่สังเคราะห์ ประมาณ 0.1 กรัม มาทำให้แห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dryer) ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนโดยใช้เทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน

3.5.3 การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุของตัวดูดซับสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X – ray Fluorescence: XRF)

นำตัวดูดซับที่สังเคราะห์ มาทำให้แห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze dryer) ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาบดให้ละเอียด เตรียมตัวอย่างประมาณ 1 กรัม เพื่อนำไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุที่ประกอบในตัวดูดซับสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

3.5.4 การศึกษาศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของตัวดูดซับสังเคราะห์และสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคและศักย์ไฟฟ้า (Zetasizer)

3.5.4.1 ตัวดูดซับที่ได้ทำการสังเคราะห์

ทำการบดตัวอย่างตัวดูดซับคอมพอสิตโคโตซาน-แรดดิน อย่างละเอียด จากนั้นชั่งตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร นำตัวอย่างมาทำการกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ประมาณ 30 นาที และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 3 5 7 และ 10 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และนำไปวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวดูดซับด้วยเครื่องวัดขนาดศักย์ไฟฟ้า

3.5.4.2 สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120

ทำการเตรียมสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ประมาณ 30 นาที นำตัวอย่างสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 มาปรับค่าความเป็นกรดต่างตั้งแต่ 3 5 7 และ 10 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์และกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ แล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวดูดซับด้วยเครื่องวัดขนาดศักย์ไฟฟ้า (Zetasizer)

3.6 การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (Thermodynamics study)

งานวิจัยได้ทำการศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับหนัก 0.6 กรัม ที่ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 5.5 ขณะทำการทดลองสารเหล่านี้จะถูกวางไว้ในเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Incubator shaker) เป็นเวลา 420 นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองจะมี 4 ระดับ ได้แก่ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด จึงทำการเก็บตัวอย่างสารละลายทั้งก่อนและหลังการดูดซับปริมาตร 15 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 โดยใช้เทคนิคทางยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ที่ความยาวคลื่น 512 นาโนเมตร และทำการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) ดังแสดงในสมการ 2.4 สำหรับในส่วนของค่าการเปลี่ยนแปลงค่าเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) จะสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.5

3.7 การศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

สำหรับในการศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ จะทำการทดลองโดยการนำตัวดูดซับจำนวน 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 กรัม ลงในในขวดรูปชมพู่ที่อยู่ในบรรจุสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 5.5 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 420 นาที ทำการเก็บตัวอย่างของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ทั้งก่อนและหลังการดูดซับปริมาตร 15 มิลลิลิตร มาทดสอบหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 โดยใช้เทคนิคทางยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ที่ความยาวคลื่น 512 นาโนเมตร นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับคอมพอสิตโคโตซาน-แรดดิน จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการสร้างกราฟและวิเคราะห์ผล ซึ่งแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับที่ได้เลือกนำมาใช้ในการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้ ได้แก่ แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir) แบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich) และแบบจำลองการดูดซับของโกเบลคอร์ริแกน (Koble-Corrigan) โดยเราจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า error function ในการพิจารณาความเข้ากันของข้อมูลการทดลองกับแบบจำลองไอโซเทอม

3.8 การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetics adsorption)

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่ทำในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองโดยใช้สารละลาย สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ที่ระดับความเข้มข้นของเริ่มต้นเท่ากับ 10 30 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับตัวแปรหรือปัจจัยอื่นๆ จะกำหนดให้คงที่ โดยกำหนดให้ปริมาณของตัวดูดซับจำนวน 0.6 กรัม ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.5 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 420 นาที ซึ่งแบบจำลอง ที่ได้เลือกใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ แบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order) และแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) โดยจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า error function ในการพิจารณาความเข้ากันของข้อมูล การทดลองกับจลนพลศาสตร์



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทนี้เกี่ยวข้องกับผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง โดยแบ่งเป็นหัวข้อย่อย ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ ผลของอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อร้อยละการกำจัด สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ในช่วงเวลาต่างๆ ด้วยการดูดซับบนตัวดูดซับไคโตซานและตัวดูดซับ คอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาอุณหภูมิศาสตร์ของการดูดซับ การศึกษา แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ และแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ โดยรายละเอียด แสดงดังนี้

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับสังเคราะห์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีอยู่ 2 ชนิดหลัก คือ ตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนต่างๆ ของไคโตซานและแร่ดิน แสดงดังรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณารูปที่ 4.1 พบว่า ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับไคโตซานมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมสีขาวนูนและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงความยาวประมาณ 1.5-2 มิลลิเมตร ดังรูป 4.1ก ในขณะที่ตัวดูดซับคอมพอสิตแร่ดิน-ไคโตซานที่สัดส่วนต่างๆ ของไคโตซานและแร่ดิน มีลักษณะเป็นเส้นใยสีเทาอมน้ำตาลดำ ดังรูป 4.1ข ถึง 4.1ฉ ที่มีความเหนียวแข็ง จากการสังเกตภายนอกจะเห็นชัดว่าความเข้มของสีเทาอมน้ำตาลดำมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนแร่ดินจาก 0.5 ถึง 5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ (ก) ตัวดูดซับไคโตซาน (ข) ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดิน เท่ากับ 1:0.5 (ค) ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดิน เท่ากับ 1:1 (ง) ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดิน เท่ากับ 1:2 (จ) ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดิน เท่ากับ 1:3 (ฉ) ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดิน เท่ากับ 1:5

4.1.2 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน แสดงผลดังตารางที่ 4.1

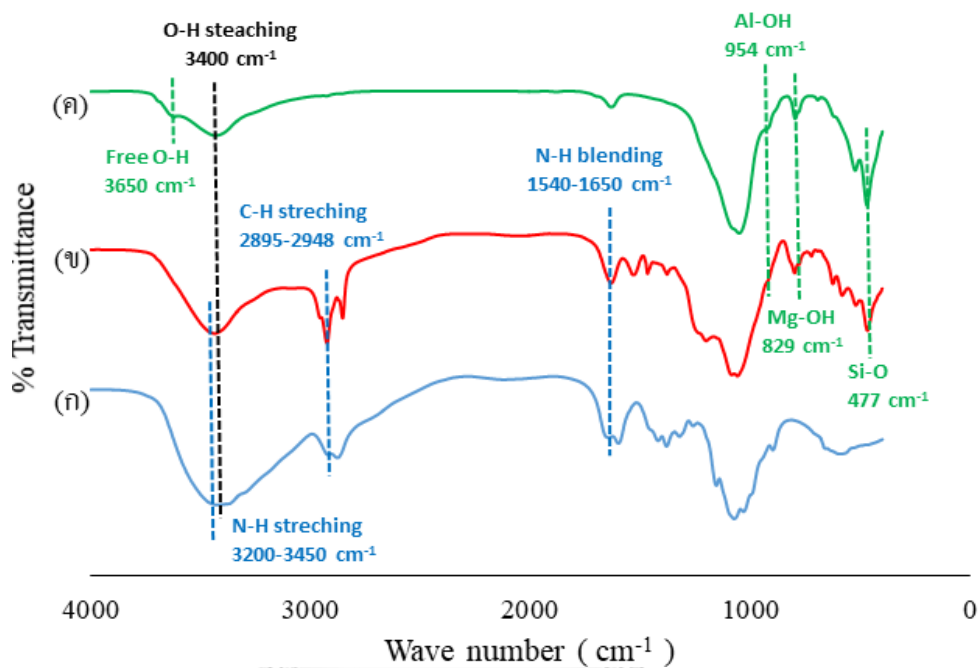
ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน

| ตัวดูดซับ | พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม) | ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อกรัม) | เส้นผ่านศูนย์กลาง ของรูพรุน (อังสตรอม) |
|------------------------|--|---|--|
| แร่ดิน | 98.84 | 0.1363 | 47.98 |
| ไคโตซาน | 1.22 | 0.0022 | 49.43 |
| ไคโตซาน-แร่ดิน (1:0.5) | 4.61 | 0.0075 | 60.14 |
| ไคโตซาน-แร่ดิน (1:1) | 23.58 | 0.0158 | 49.72 |
| ไคโตซาน-แร่ดิน (1:2) | 33.74 | 0.0665 | 51.75 |
| ไคโตซาน-แร่ดิน (1:3) | 70.59 | 0.1146 | 52.60 |
| ไคโตซาน-แร่ดิน (1:5) | 107.27 | 0.1682 | 49.81 |

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน ให้ผลการวิเคราะห์ดังตาราง 4.1 พบว่า ตัวดูดซับไคโตซานมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนต่ำกว่าแร่ดิน ในขณะที่ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่แต่ละสัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินพบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของแร่ดินที่มีในตัวดูดซับคอมพอสิต อีกทั้งตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนต่างๆ ระหว่างไคโตซาน-แร่ดิน มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนสูงกว่าตัวดูดซับไคโตซาน อย่างไรก็ตามค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของทั้งตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน และตัวดูดซับไคโตซานมีค่าน้อยกว่าของแร่ดิน ยกเว้นตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนระหว่างไคโตซาน-แร่ดินที่ 1:5 ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากไคโตซานเข้าไปแทรกในโครงสร้างของแร่ดิน ทำให้โครงสร้างของแร่ดินเกิดการขยายขนาด ส่งผลให้ค่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น

4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเฉพาะบนพื้นผิวของบนตัวดูดซับด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) โดยเลือกวิเคราะห์ตัวดูดซับไคโตซาน ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดิน เท่ากับ 1:0.5 แสดงผลดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงหมู่ฟังก์ชันเฉพาะบนตัวดูดซับด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) โดย (ก) ตัวดูดซับไคโตซาน (ข) ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดิน เท่ากับ 1 ต่อ 0.5 (ค) ตัวดูดซับแรดดิน

จากการพิจารณาสเปกตรัมของตัวดูดซับไคโตซาน แสดงดังรูป 4.2ก พบว่า แถบการสั่นที่ความถี่ 3200-3450 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันเอมีน (N-H stretching) และ หมู่ O-H stretching เนื่องจากหมู่เอมีนซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของไคโตซาน [45] แถบการดูดกลืนของหมู่ O-H stretching ในช่วงความถี่ประมาณ 3400 cm⁻¹ ซึ่งเกิดการซ้อนทับกันกับหมู่เอมีน (N-H stretching) [46] แถบการสั่นที่ช่วงความถี่ 2895-2948 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นของหมู่ฟังก์ชัน C-H stretching และแถบการสั่นที่ความถี่ 1659 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน N-H bending จากรูปที่ 4.2ค ที่แสดงสเปกตรัมของแรดดิน พบแถบการสั่นที่ความถี่ 3650 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน free O-H และที่ความถี่ 3400 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching แถบการสั่นของหมู่ (Al,Mg)-OH ที่ความถี่ 829 เซนติเมตร⁻¹ แถบการสั่นของหมู่ Al-OH ที่ความถี่

954 เซนติเมตร⁻¹ แถบการสั่นของหมู่ Si-O ที่ความถี่ 477 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของแร่ดิน [45]

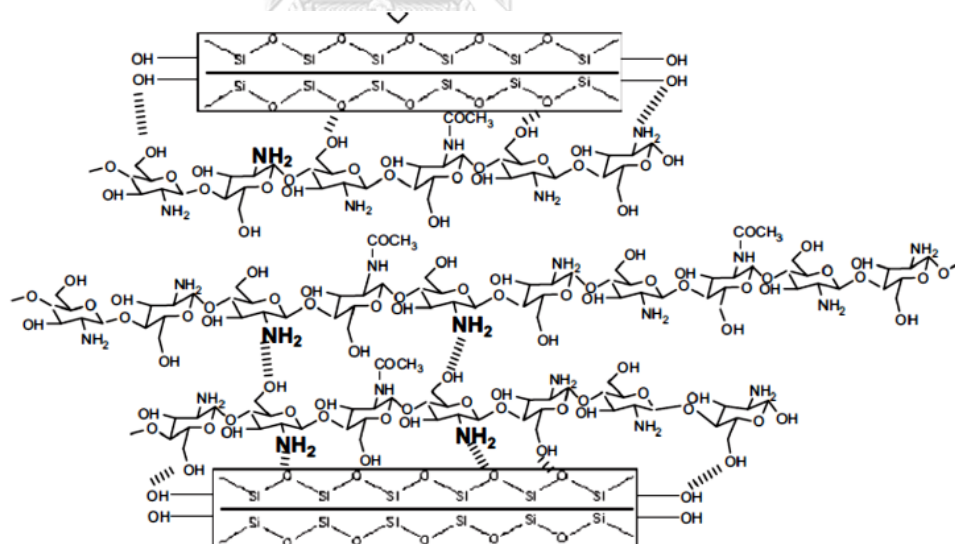
จากรูปที่ 4.2x ที่แสดงสเปกตรัมของตัวดูดคอมพอสิตโคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนโคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1:0.5 จะพบว่าลักษณะสเปกตรัมของตัวดูดคอมพอสิตโคโตซาน-แร่ดินจะมีลักษณะสเปกตรัมเฉพาะที่สะท้อนถึงตัวดูดซับโคโตซานและตัวดูดซับแร่ดินอย่างชัดเจน กล่าวคือพบแถบการสั่นที่ความถี่ 3200-3450 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันเอมีน (N-H stretching) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของโคโตซาน และแถบการสั่นที่ความถี่ 3400 เซนติเมตร⁻¹ ของหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching ซึ่งแถบการสั่นที่ความถี่ช่วงนี้ยังเกิดการซ้อนทับกันกับแถบการสั่นของหมู่เอมีน แถบการสั่นที่ความถี่ 2895-2948 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน C-H stretching และแถบการสั่นของหมู่ N-H bending ที่ความถี่ 1659 เซนติเมตร⁻¹ นอกจากนี้ยังพบแถบการสั่นที่แสดงฟังก์ชันเฉพาะของแร่ดิน ได้แก่ แถบการสั่นของหมู่ O-H stretching ในช่วงความถี่ 3400 เซนติเมตร⁻¹ แถบการสั่นของหมู่ (Al,Mg)-OH ที่ความถี่ 829 เซนติเมตร⁻¹ แถบการสั่นของหมู่ Al-OH ที่ความถี่ 954 เซนติเมตร⁻¹ และแถบการสั่นของหมู่ Si-O ที่ความถี่ 477 เซนติเมตร⁻¹

4.1.4 การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุของตัวดูดซับสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X – ray Fluorescence: XRF)

จากผลการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุที่ประกอบในตัวดูดซับสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X – ray Fluorescence: XRF) ซึ่งจะรายงานผลวิเคราะห์ในรูปออกไซด์ แสดงดังตาราง 4.2 พบว่า ธาตุที่ประกอบในตัวดูดซับคอมพอสิตโคโตซาน-แร่ดินเป็นชนิดเดียวกันกับธาตุที่ประกอบในแร่ดิน แต่เมื่อทำการเติมโคโตซานลงในแร่ดินเพื่อสังเคราะห์ตัวดูดซับคอมพอสิตโคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วน 1:5 พบว่า ปริมาณธาตุต่างๆ จะมีค่าลดลง และยิ่งลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนโคโตซานต่อแร่ดินเป็น 1:3 1:1 และ 1:0.5 ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากโมเลกุลของโคโตซานแทรกเข้าไปในโครงสร้างของแร่ดินแล้ว จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับแร่ดิน โดยหมู่ฟังก์ชันเอมีนประจุบวกบนโมเลกุลของโคโตซาน หรือที่เรียกว่าแอมโมเนียมไอออน (NH₃⁺) ได้ทำการแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนประจุบวกภายในชั้นของแร่ดิน จึงทำให้ปริมาณธาตุไอออนประจุบวกลดลง นอกจากนี้ แอมโมเนียมไอออนยังจับกับหมู่ฟังก์ชันที่แสดงประจุลบบนแร่ดินด้วยแรงดึงดูดระหว่างประจุ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ด้วยเหตุนี้จึงยืนยันได้ว่าการแทรกตัวของโคโตซานภายในโครงสร้างของแร่ดิน นั้นแสดงว่าตัวดูดซับคอมพอสิตโคโตซาน-แร่ดิน สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 4.2 แสดงชนิดและปริมาณธาตุที่ประกอบในตัวดูดซับสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

| ตัวดูดซับ | ชนิดและปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | | | | | | | |
|----------------------------|--------------------------------------|------------------|------|-------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| | Na ₂ O | K ₂ O | MgO | CaO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ |
| แรม์ดิน | 0.493 | 1.070 | 1.59 | 2.450 | 9.78 | 67.7 | 2.95 | 0.656 |
| ไคโตซาน-แรม์ดิน (1:5) | 0.242 | 0.575 | 1.06 | 0.780 | 6.39 | 42.7 | 1.67 | 0.442 |
| ไคโตซาน-แรม์ดิน (1:3) | 0.236 | 0.546 | 0.97 | 0.851 | 5.95 | 38.0 | 1.49 | 0.434 |
| ไคโตซาน-แรม์ดิน (1:1) | 0.191 | 0.231 | 0.60 | 0.444 | 2.81 | 16.9 | 0.73 | 0.209 |
| ไคโตซาน-แรม์ดิน (1:0.5) | 0.163 | 0.152 | 0.42 | 0.252 | 1.67 | 10.3 | 0.49 | 0.159 |



รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรม์ดิน [47]

4.1.5 การวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวดูดซับสังเคราะห์ และสารละลายสี่อ้อมรีแอคทีฟเรด 120 ด้วยเครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า (Zetasizer)

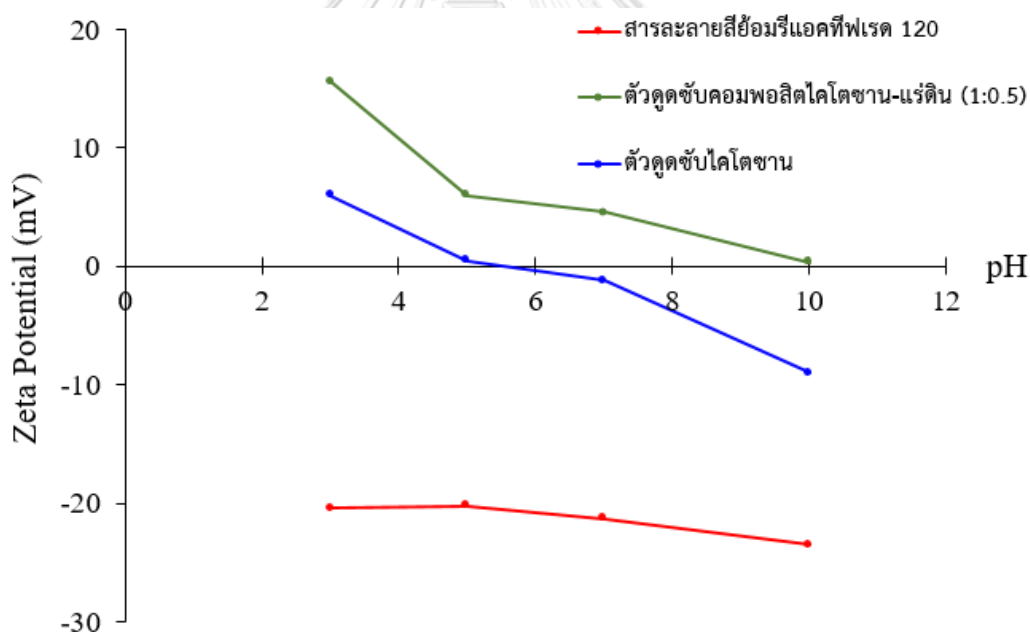
ผลการวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวดูดซับสังเคราะห์และสารละลายสี่อ้อมรีแอคทีฟเรด 120 ด้วยเครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า (Zetasizer) แสดงดังรูปที่ 4.4 จากผลการวิเคราะห์ พบว่าเมื่อทำการปรับความเป็นกรดต่างจากภาวะกรดสู่ภาวะต่าง ค่าความศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวดูดซับไคโตซานและตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1:0.5 มีค่าลดลง

ค่าความศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1:0.5 มีค่าเท่ากับ 15.6 ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 และมีค่าความศักย์ไฟฟ้าลดลงเป็น 5.97 4.57 และ 0.325 ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 7 และ 10 ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงแสดงว่า ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1:0.5 เป็นประจุบวก ในทุกช่วงค่าความเป็นกรดต่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ณ ค่าความเป็นกรดต่างในภาวะกรด หมู่อะมิโนของไคโตซานที่แทรกตัวในแร่ดินสามารถแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) โดยที่โปรตอนจะเข้าไปจับกับหมู่อะมิโน ($-NH_2$) เกิดการโปรตอนเนตทำให้หมู่อะมิโน ($-NH_2$) เปลี่ยนมาอยู่ในรูปของแอมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) [48] จึงเป็นเหตุให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวก และเมื่อทำการปรับค่าความเป็นกรดต่างเป็นภาวะด่าง ไอออนไฮดรอกไซด์ (OH^-) จะจับกับไอออนบวกที่มีอยู่ในแร่ดิน จึงเป็นเหตุให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกลดลง

ค่าความศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวดูดซับไคโตซานมีค่าเป็นศูนย์ (Point of zero charge) เมื่อค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.5 หากค่าความเป็นกรดต่างสูงกว่าค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้เกิดสมดุลของประจุบนพื้นผิว ค่าความศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวดูดซับไคโตซานจะมีค่าเป็นลบ แต่ถ้าหากค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่าค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้เกิดสมดุลของประจุบนพื้นผิว ค่าความศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวดูดซับไคโตซานมีค่าเป็นบวก ด้วยเหตุนี้จึงแสดงว่า ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับไคโตซานเป็นประจุลบเมื่อค่าความเป็นกรดต่างสูงกว่าค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้เกิดสมดุลของประจุบนพื้นผิว แต่ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับไคโตซานเป็นประจุบวกเมื่อค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่าค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้เกิดสมดุลของประจุบนพื้นผิว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าความเป็นกรดต่างในภาวะกรด หมู่อะมิโนของไคโตซานสามารถแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) โดยที่โปรตอนจะเข้าไปจับกับหมู่อะมิโน ($-NH_2$) เกิดการโปรตอนเนตทำให้หมู่อะมิโน ($-NH_2$) บนพื้นผิวไคโตซานเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของแอมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) [26] จึงเป็นเหตุให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวก ในขณะที่ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในภาวะด่าง หมู่อะมิโนจะไม่เกิดการโปรตอนเนต ซึ่งจะอยู่ในรูปของ $-NH^-$ [48] จึงเป็นเหตุให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ

สำหรับสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวจะมีประจุเป็นลบในทุกช่วงค่าความเป็นกรดต่าง เนื่องมาจากประจุลบของหมู่ SO_3^- บนโครงสร้างของโมเลกุลสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120

จากค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวซึ่งจะเป็นตัวที่จะบ่งบอกว่าหากตัวดูดซับมีประจุบนพื้นผิวเป็นบวกจะสามารถดึงดูดสารที่มีประจุตรงข้ามได้ค่อนข้างดี เนื่องจากอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุ [25] ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซาน จะสามารถกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ในสภาวะความเป็นกรดได้ดีกว่าในสภาวะความเป็นด่าง ส่วนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1:0.5 จะสามารถกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ทั้งในสภาวะความเป็นกรดและสภาวะความเป็นด่าง โดยความไวในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ในสภาวะความเป็นกรด จะไวกว่าการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ในสภาวะความเป็นด่าง

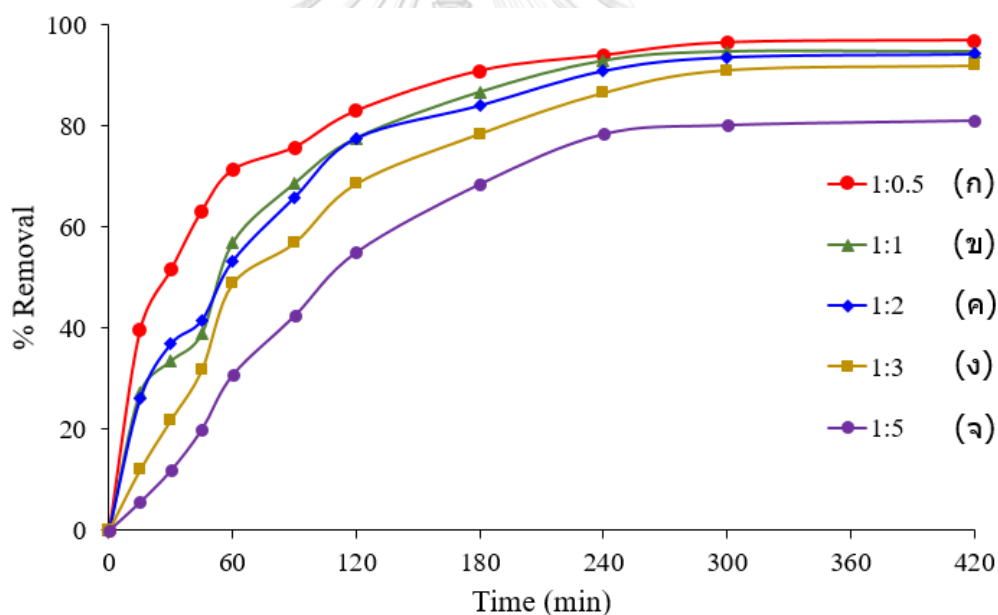


รูปที่ 4.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวดูดซับไคโตซานและตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1:0.5 และสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ช่วงค่าความเป็นกรดต่างๆ

4.2 ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละการกำจัดสีของมริแอคทีฟเรด 120

4.2.1 สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน

การศึกษาผลของสัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่มีต่อร้อยละการกำจัดสารละลายสีของมริแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ในช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 ถึง 420 นาที สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินสำหรับตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่ใช้ในงานวิจัยส่วนนี้ได้แก่ สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 0.5 สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 1 สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 2 สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 3 และสัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 5 ส่วนผลของสัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่มีต่อร้อยละการกำจัดสีของมริแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ในช่วงเวลาการดูดซับ เมื่อใช้จำนวนตัวดูดซับ 0.3 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีของมริแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ระดับความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.5 แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงผลของสัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่มีต่อร้อยละการกำจัดสีของมริแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ในช่วงเวลาการดูดซับ เมื่อใช้จำนวนตัวดูดซับ 0.3 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีของมริแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ระดับความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.5 โดย (ก) สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 0.5 (ข) สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 1 (ค) สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 2 (ง) สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 3 และ (จ) สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินที่ 1 ต่อ 5

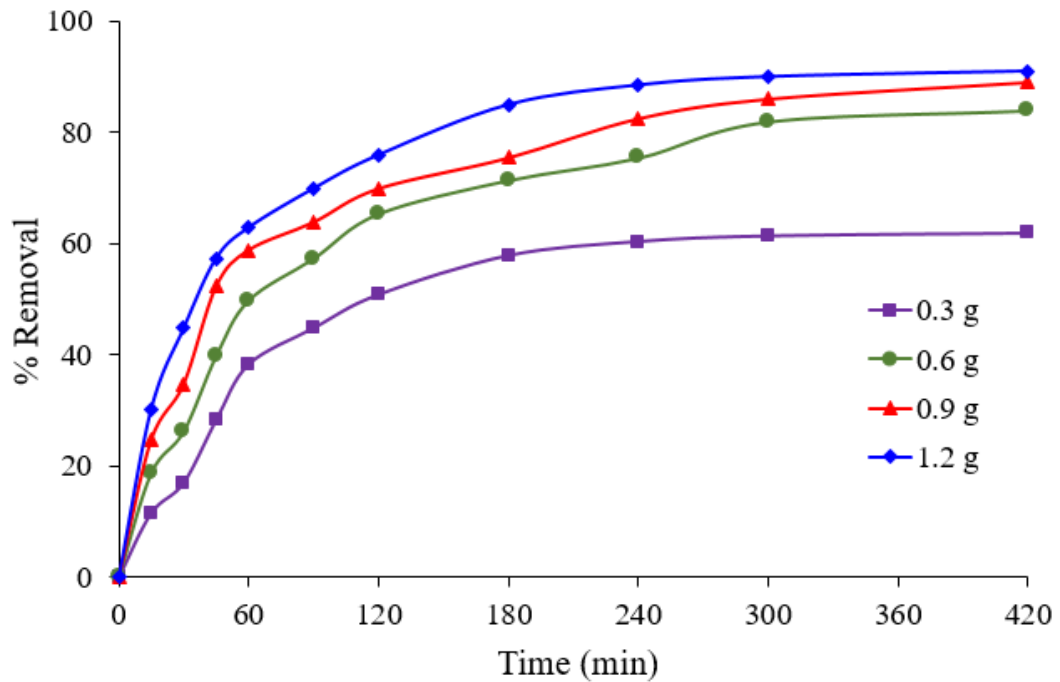
จากผลการทดลอง พบว่า ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่แต่ละสัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินแสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 สูงขึ้น ตามเวลาการดูดซับจนถึง 300 นาที แรก หลังจากนั้นค่าร้อยละการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 จึงมีค่าคงที่ เมื่อทำการเปรียบเทียบร้อยละการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนต่างๆ ระหว่างไคโตซานต่อแร่ดิน พบว่า เมื่อใช้จำนวนตัวดูดซับ 0.3 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ระดับความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.5 ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 96.85 ในขณะที่ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 1 ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 2 ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 3 และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 5 ให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 94.60 94.15 91.91 และ 81.12 ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่า การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ด้วยการดูดซับบนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน จะมีค่าลดลง เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของแร่ดินในตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจาก ประจุลบของแร่ดินเกิดการผลักกันกับประจุลบของหมู่ SO_3^- บนโครงสร้างของสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ดังนั้นการที่ปริมาณสัดส่วนของแร่ดินเพิ่มสูงขึ้นเปรียบเสมือนการเพิ่มประจุลบในระบบ ส่งผลยิ่งทำให้มีแรงผลักกันระหว่างประจุมากขึ้น เป็นเหตุทำให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 มีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อประมาณสัดส่วนดินเพิ่มขึ้น จากความสามารถในการกำจัดสีย้อมบนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ซึ่งให้ค่าสูงสุดเทียบกับตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินอื่น ๆ จึงเลือกใช้ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 สำหรับงานวิจัยขั้นต่อไป และจะทำการเปรียบเทียบกับตัวดูดซับไคโตซาน

4.2.2 ปริมาณตัวดูดซับ

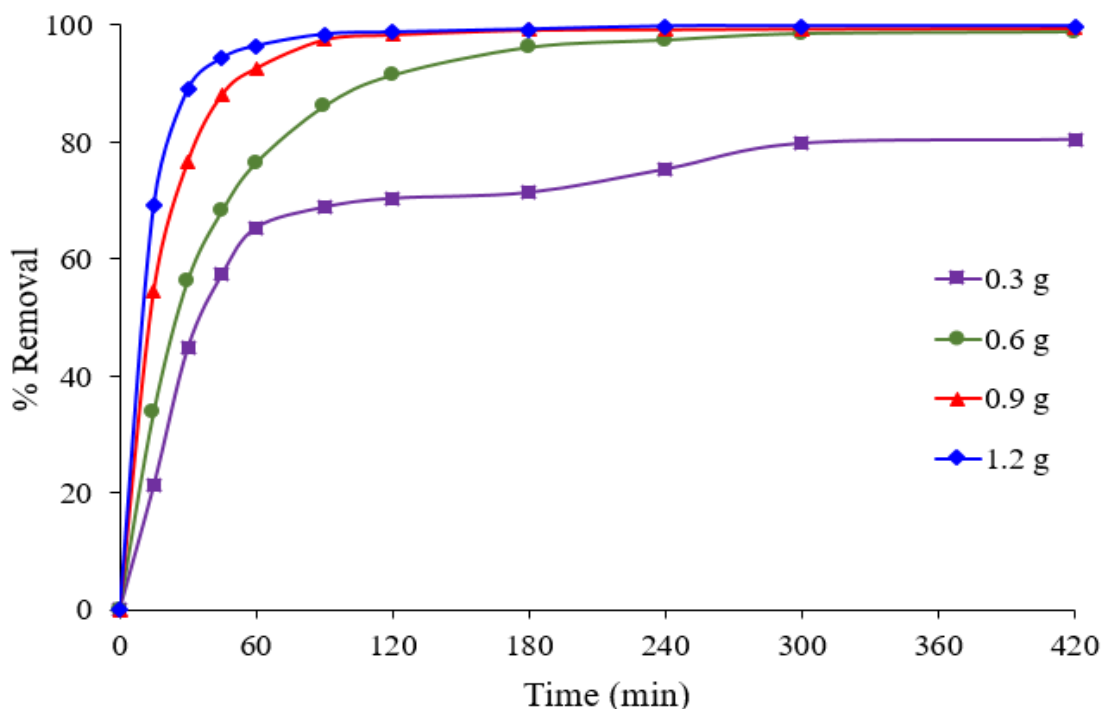
ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ในช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 นาที ถึง 420 นาที โดยใช้ตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่ 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 กรัม โดยใช้ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 5.5 ร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซานและตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน

ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

จากรูป 4.6 เมื่อใช้ตัวดูดซับไคโตซาน ที่ปริมาณตัวดูดซับ จาก 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 กรัม จะให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เวลาการดูดซับ 420 นาที มีค่าเท่ากับ 61.67 83.94 88.96 และ 90.97 ตามลำดับ แต่เมื่อใช้ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่ปริมาณตัวดูดซับ 0.3 กรัม ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 มีค่าเท่ากับ 80.48 เวลาการดูดซับ 420 นาที เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ เป็น 0.6 กรัม สีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 สามารถถูกกำจัดได้หมดสมบูรณ์ ภายในเวลา 300 นาที เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ เป็น 0.9 กรัม และ 1.2 กรัม สีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 สามารถถูกกำจัดได้หมดสมบูรณ์ ภายในเวลา 120 นาที และ 90 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จึงกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะยิ่งให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 สูงกว่าจนได้การกำจัดอย่างสมบูรณ์ และความเร็วในการดูดซับมีค่ามากกว่า ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับนั้นเป็นการเพิ่มตำแหน่งว่องไวในการจับกับโมเลกุลของสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 มากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซานและตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.6 แสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซาน ปริมาณตัวดูดซับที่ 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 กรัม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 เท่ากับ 5.5 ช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 นาที ถึง 420 นาที



รูปที่ 4.7 แสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ปริมาณตัวดูดซับที่ 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 กรัม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 เท่ากับ 5.5 ช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 นาที ถึง 420 นาที

เมื่อทำการเปรียบเทียบร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 ในช่วงเวลาการดูดซับ 420 นาที โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากันและภาวะการดูดซับเหมือนกัน พบว่า ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ให้ผลร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 สูงกว่าตัวดูดซับไคโตซาน ร้อยละการกำจัดสูงสุดเมื่อใช้ตัวดูดซับไคโตซาน ปริมาณ 1.2 กรัม มีค่าเท่ากับ 90.97 แต่เมื่อใช้ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 จะใช้เพียง 0.6 กรัม ก็สามารถกำจัดสีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 อย่างสมบูรณ์ และใช้เวลาการดูดซับลดลงจากเดิม 120 นาที ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจาก ณ ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 เท่ากับ 5.5 ดังรูปที่ 4.4 พบว่า สีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ในขณะที่ตัวดูดซับไคโตซานมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ แต่ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก เมื่อความต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวดูดซับกับสีย้อมยังมีความต่างมากโดยเฉพาะความต่างของประจุ จะส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุ ยิ่งทำให้การกำจัดมีค่ามากขึ้น ด้วยเหตุนี้ร้อยละการกำจัดสีย้อม

รีแอกทีฟเฟรต 120 เมื่อใช้ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดินที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 จึงมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้ตัวดูดซับไคโตซาน นอกจากนี้ ยังสามารถพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ดังตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะแปรผันตามปริมาณตัวดูดซับ กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเปรียบเสมือนการเพิ่มจำนวนของตำแหน่งว่างไว้อยู่บนผิวตัวดูดซับซึ่งจะส่งแรงดึงดูดไปยังโมเลกุลสีย้อมรีแอกทีฟเฟรต 120 ให้สามารถวิ่งแพร่ผ่านและเข้าหาตัวดูดซับได้มากขึ้น

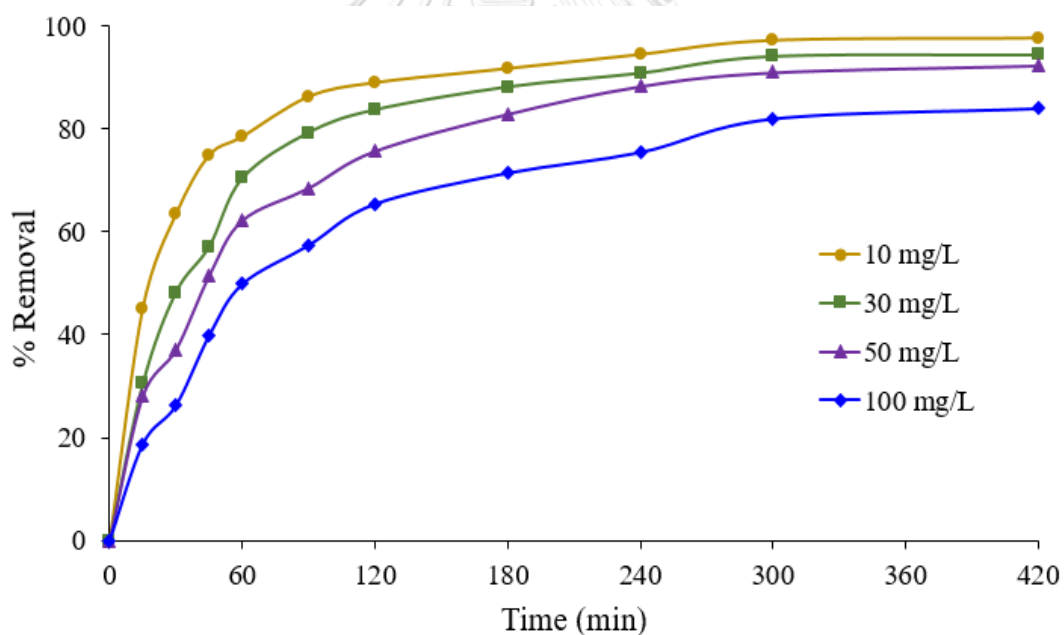
ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ระดับต่างๆ

| ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม) | ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ $\times 10^{-18}$ (ตารางเซนติเมตร/วินาที) | |
|---------------------------|---|------------------|
| | ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแรดดิน เท่ากับ 1 ต่อ 0.5 | ตัวดูดซับไคโตซาน |
| 0.3 | 1.78 | 1.27 |
| 0.6 | 2.66 | 2.54 |
| 0.9 | 3.26 | 2.95 |
| 1.2 | 4.32 | 3.16 |

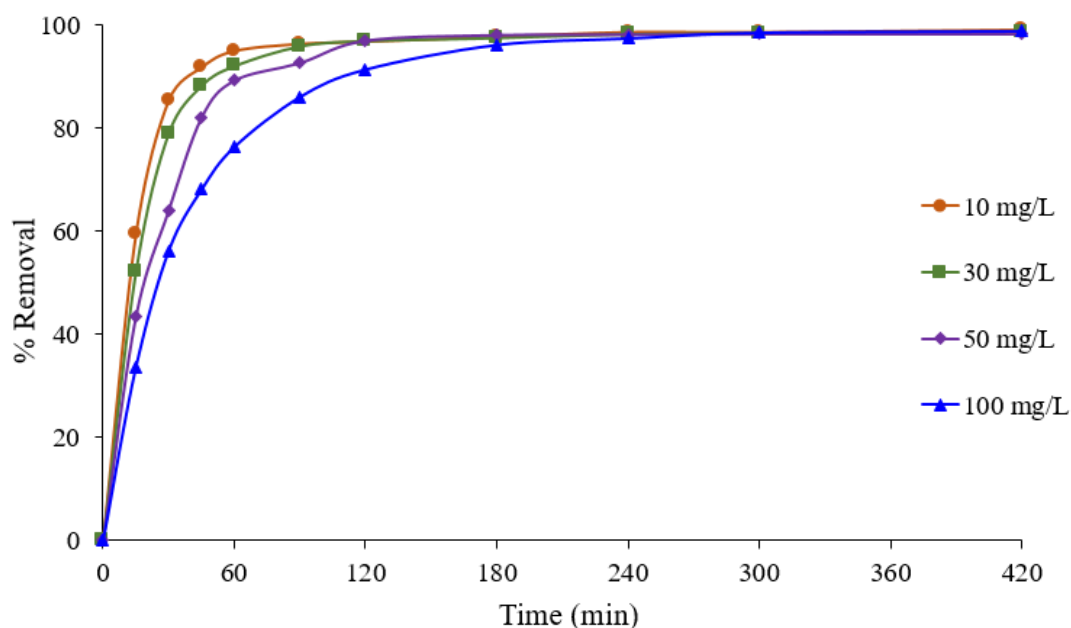
4.2.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเฟรต 120

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเฟรต 120 ต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเฟรต 120 ในช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 นาที ถึง 420 นาที โดยใช้ตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดินที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเฟรต 120 ที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 10 30 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.6 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเฟรต 120 เท่ากับ 5.5 ร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเฟรต 120 บนตัวดูดซับไคโตซานและตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดินที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเฟรต 120 แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 ต่างพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 จะให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 สูงขึ้น โดยหากใช้ตัวดูดซับ ไคโตซาน และเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ตั้งแต่ 10 30 50 เป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 มีค่าเท่ากับ 97.72 94.38 92.36 และ 83.94 ตามลำดับ แต่เมื่อใช้ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สกัดส่วนไคโตซาน ต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 จำนวน 0.6 กรัม พบว่า สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 สามารถถูกกำจัดได้อย่างสมบูรณ์ ภายในเวลา 300 นาที เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ระยะเวลาที่ใช้การกำจัดเพื่อให้เกิดการกำจัดอย่างสมบูรณ์ที่ค่า ลดลงเมื่อลดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 หากพิจารณาจากความเร็ว ในการกำจัดสีย้อม จะพบว่า เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม รีแอคทีฟเรด 120 เท่ากัน ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1 ต่อ 0.5 มีความเร็วในการกำจัดสีย้อมสูงกว่าตัวดูดซับไคโตซาน



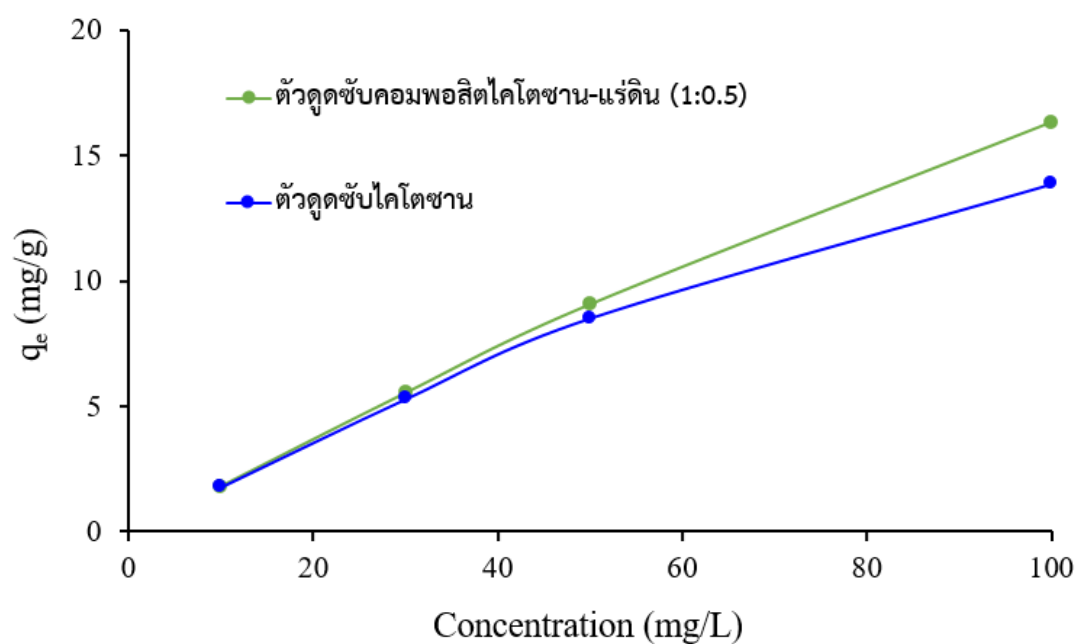
รูปที่ 4.8 แสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซาน เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ต่างๆ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.6 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 5.5



รูปที่ 4.9 แสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 เมื่อใช้ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ต่างๆ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.6 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 5.5

เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากันแต่เพิ่มระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 และตัวดูดซับไคโตซานต่างแสดงให้เห็นในลักษณะเดียวกันว่า ความเร็วในการกำจัดสีย้อมมีค่าลดลงที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับในปริมาณที่เท่ากัน แต่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ระดับต่ำกว่า จะมีโมเลกุลของสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่น้อยกว่า ส่งผลให้กำจัดสีย้อมได้เร็วกว่า เมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ระดับสูงกว่า เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 โดยแสดงอยู่ในรูปของน้ำหนักของสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม แสดงผลดังรูปที่ 4.10 เมื่อระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ในสารละลายและบริเวณผิวหน้าตัวดูดซับ ดังนั้นทำให้เกิดแรงกระทำและการชนกันของโมเลกุล (Driving force) ที่มากขึ้น โดยความสามารถในการดูดซับสารละลาย

สีย้อมรีแอคทีฟเฟรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 มีค่าสูงกว่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเฟรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซาน



รูปที่ 4.10 แสดงความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเฟรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเฟรด 120 ต่างๆ เมื่อความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.5 ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.6 กรัม ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 420 นาที

นอกจากนี้ ยังสามารถพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ดังตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากทดลองนั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าแปรตามระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเฟรด 120 ที่เพิ่มสูงขึ้น เป็นผลที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเฟรด 120 ในสารละลายและบริเวณผิวหน้าตัวดูดซับ ทำให้โมเลกุลสีย้อมนั้นมีแรงเคลื่อนที่วิ่งแพร่ผ่านบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวดูดซับ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมที่ระดับต่างๆ

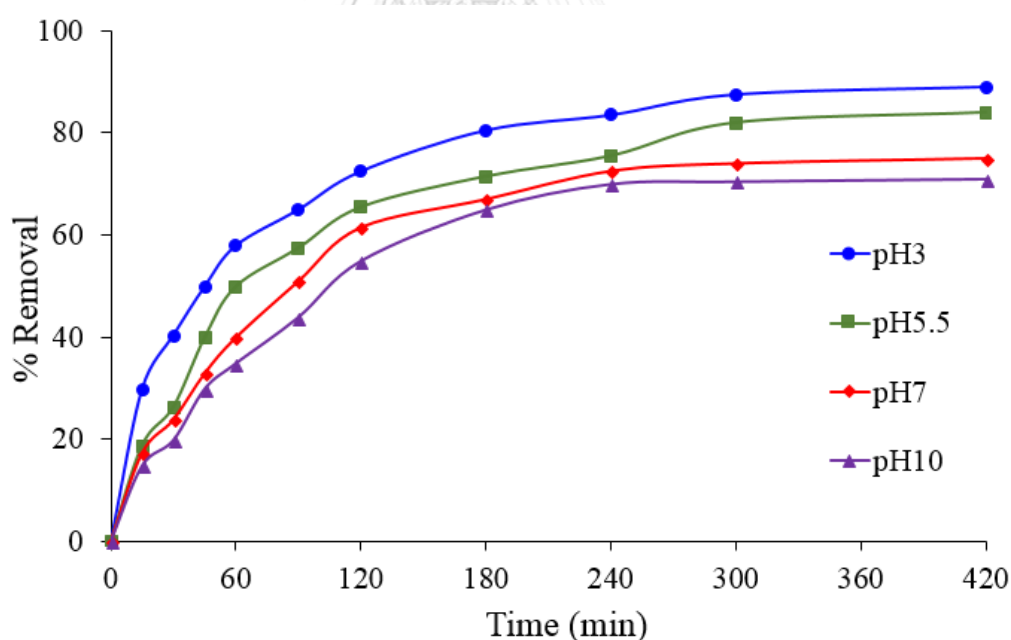
| ความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารละลายสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ $\times 10^{-18}$ (ตารางเซนติเมตร/วินาที) | |
|--|---|------------------|
| | ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1 ต่อ 0.5 | ตัวดูดซับไคโตซาน |
| 10 | 2.19 | 2.15 |
| 30 | 3.05 | 2.41 |
| 50 | 3.41 | 2.43 |
| 100 | 4.09 | 3.31 |

4.2.4 ความเป็นกรดต่าง

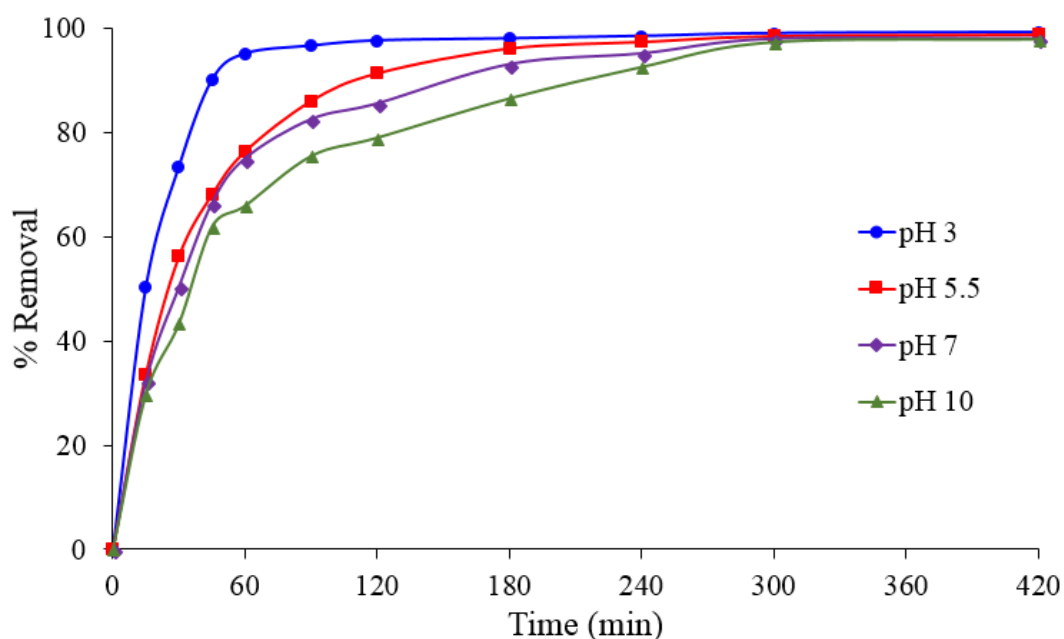
ผลของความเป็นกรดต่าง ที่ต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ในช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 นาที ถึง 420 นาที โดยใช้ตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ 3 5.5 7 และ 10 โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.6 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง ร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซานและตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่ระดับค่าความเป็นกรดต่างต่างๆ ของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

จากรูป 4.11 และ 4.12 พบว่า ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 สามารถกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้สมบูรณ์สำหรับทุกช่วงค่าความเป็นกรดต่างที่ได้ทำการศึกษา ในขณะที่ตัวดูดซับไคโตซาน เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ 3 5.5 7 และ 10 จะแสดงร้อยละของการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 89.21 84.33 74.52 และ 70.89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่า ตัว

ดูดซับคอมพอสิตโคโตซาน-แรดดินที่สกัดส่วนโคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 สามารถกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ในทุกภาวะความเป็นกรดต่าง แต่ตัวดูดซับโคโตซาน สามารถกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ในภาวะกรดได้ดีกว่าในภาวะต่าง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากแรงดึงดูดระหว่างประจุ สามารถอธิบายได้โดยใช้ผลจากการศึกษาศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวตัวดูดซับ ดังรูปที่ 4.4 นั่นคือ เนื่องมาจากในภาวะกรด หมู่อะมิโนของโคโตซานสามารถแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) โดยที่โปรตอนจะเข้าไปจับกับหมู่อะมิโน ($-NH_2$) เกิดการโปรโตเนตทำให้ หมู่อะมิโน ($-NH_2$) บนพื้นผิวโคโตซานเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของแอมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) [26] จึงเป็นเหตุให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวก ในขณะที่ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในภาวะต่าง หมู่อะมิโนจะไม่เกิดการโปรโตเนต ซึ่งจะอยู่ในรูปของ $-NH$ [49] จึงเป็นเหตุให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ สำหรับสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 พบว่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวจะมีประจุเป็นลบในทุกช่วงค่าความเป็นกรดต่าง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี เป็นผลมาจากประจุลบของหมู่ SO_3^- บนโครงสร้างของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ดังนั้นจากค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวซึ่งจะเป็นตัวที่จะบ่งบอกว่าหากตัวดูดซับมีประจุบนพื้นผิวเป็นบวก จะสามารถดึงดูดสารที่มีประจุตรงข้ามได้ค่อนข้างดี เนื่องจากอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุ [25]



รูปที่ 4.11 แสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับโคโตซาน ที่ค่าความเป็นกรดต่างต่างๆ โดยที่ ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.6 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง 120 ในช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 นาที ถึง 420 นาที



รูปที่ 4.12 แสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตโคโตซาน-แร่ดินที่สัดส่วนโคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่ค่าความเป็นกรดต่างๆ โดยที่ ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.6 กรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง 120 ในช่วงเวลาการดูดซับ ตั้งแต่ 0 นาที ถึง 420 นาที

4.3 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (Thermodynamics of adsorption)

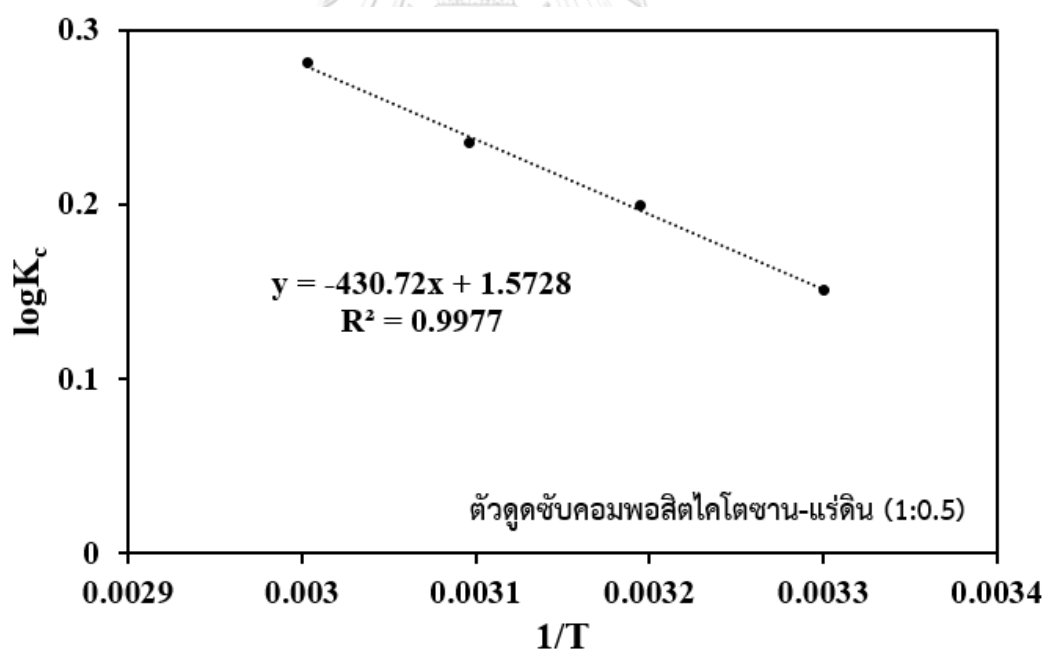
สำหรับการศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานและการเปลี่ยนแปลงพลังงาน โดยพารามิเตอร์ของอุณหพลศาสตร์นี้ [49] ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) ซึ่งได้จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 โดยจะทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเป็นกรดต่าง 5.5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 0.6 กรัม จากการทดลอง พบว่า ตัวดูดซับคอมพอสิตโคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนโคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 มีร้อยละการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้ดีทุกอุณหภูมิ และสามารถกำจัดสีย้อมได้สมบูรณ์สำหรับทุกช่วงที่ได้ทำการศึกษา ในขณะที่ตัวดูดซับโคโตซาน มีค่าการกำจัดลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นลักษณะการดูดซับจึงเป็นแบบคายความร้อน (Exothermic process) ซึ่งสอดคล้องกับค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของ

การดูดซับ (ΔH°) มีค่าเป็นลบ [50] นั้นหมายถึงการให้พลังงานแก่ระบบจะทำให้การดูดซับลดลง ในขณะที่ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) เป็นบวก ดังนั้นลักษณะการดูดซับจึงเป็นแบบดูดความร้อน (Endothermic process) ซึ่งการให้พลังงานหรือการเพิ่มความร้อนแก่ระบบส่งผลให้การดูดซับเกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัย

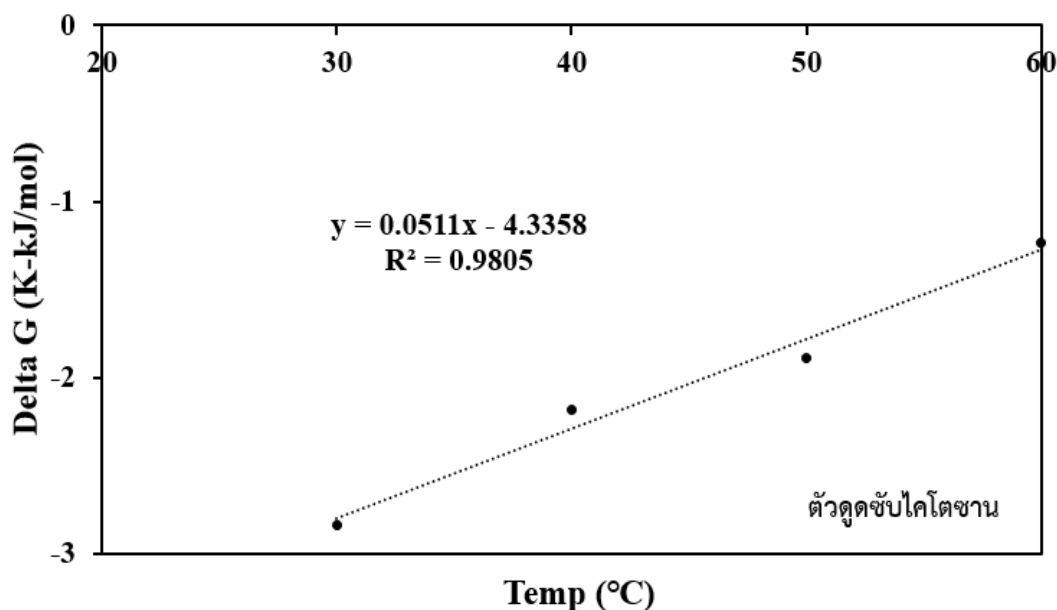
จากผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังรูป 4.13 และ 4.14 โดยรายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔS°) ของตัวดูดซับไคโตซาน มีค่าเป็นลบ แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นมีความเป็นระเบียบมากที่บริเวณผิวระหว่างของแข็งกับของเหลวระหว่างเกิดการดูดซับ ในขณะที่ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดิน เท่ากับ 1 ต่อ 0.5 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับมีค่าเป็นบวก จึงหมายความว่า ระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูง ดังนั้นการกระจายตัวของโมเลกุลสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 จึงมาก่ามากขึ้น ทำให้ลักษณะบนพื้นผิวการดูดซับมีความไม่เป็นระเบียบ [50] และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) ของตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 พบว่า มีค่าเป็นลบ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส ดังนั้นสามารถบ่งบอกได้ว่ากระบวนการดูดซับนี้เป็นกระบวนการดูดซับที่สามารถเกิดขึ้นได้เอง และในส่วนของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 เมื่อทำการพิจารณาทั้ง 3 ค่าพารามิเตอร์ สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นได้เอง และเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ

| ตัวดูดซับ | (ΔH°) (kJ/mol) | (ΔS°) (kJ/mol.K) | (ΔG°) (kJ/mol) | | | |
|---|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|
| | | | 30 | 40 | 50 | 60 |
| ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโต ซาน-แรดดินที่สัดส่วนไคโต ซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 | 8.24 | 0.03 | -0.87 | -1.19 | -1.46 | -1.79 |
| ตัวดูดซับไคโตซาน | -4.33 | -0.05 | -2.84 | -2.18 | -1.88 | -1.23 |



รูปที่ 4.13 แสดงผลของอุณหภูมิสำหรับตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.6 กรัม ณ ที่ค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.5 ในช่วงเวลาการดูดซับ 420 นาที



รูปที่ 4.14 แสดงผลของอุณหภูมิสำหรับตัวดูดซับโคโคซาน ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.6 กรัม ณ ที่ค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.5 ในช่วงเวลาการดูดซับ 420 นาที

4.4 แบบจำลองสมดุลของการดูดซับ (Isotherm adsorption)

สำหรับในส่วนของการศึกษาแบบจำลองสมดุลการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลการทดลอง ในงานวิจัย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบจำลองสมดุลการดูดซับมาทำการศึกษา 3 ชนิด คือ แบบจำลองสมดุลการดูดซับของ แลงเมียร์ (Langmuir's isotherm) แบบจำลองสมดุลการดูดซับ ของฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm) และแบบจำลองสมดุลการดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน (Koble-Corrigan isotherm) มาทำนายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นสำหรับกระบวนการดูดซับใน งานวิจัย โดยแบบจำลองสมดุลการดูดซับแต่ละชนิดก็จะให้คำอธิบายลักษณะการดูดซับที่แตกต่างกัน ออกไป ดังนี้

4.4.1 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's isotherm)

จะบ่งบอกถึงลักษณะการดูดซับที่มีลักษณะเป็นแบบการดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โดยสามารถหาความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่าง $1/C_e$ กับ $1/q_e$ ซึ่งมีค่าความชัน เท่ากับ $1/K_L q_0$ และจุดตัดแกนในแนวตั้ง เท่ากับ $1/q_0$ สำหรับในกรณีที่เป็นแบบจำลองสมดุล การดูดซับของแลงเมียร์ ได้มีการคำนวณหาปัจจัยของการแยก (R_L) ซึ่งจะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซ เทอมนการดูดซับว่าสอดคล้องหรือไม่สอดคล้องกับลักษณะของการดูดซับ โดยปัจจัยของการแยก สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.1

$$R_L = \frac{1}{1 + K_i C_o} \quad (4.1)$$

| | | | | |
|--------|-------|---|-----|--|
| เมื่อ | R_L | = | คือ | ปัจจัยของการแยก |
| | K_i | = | คือ | ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) |
| | C_o | = | คือ | ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี่อ้อมรีแอคทีฟเฟรด 120 (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| โดยที่ | R_L | > | 1 | แสดงถึงลักษณะของการดูดซับที่ไม่ดี |
| | R_L | = | 1 | แสดงถึงลักษณะของการดูดซับคงที่ $0 < R_L < 1$ แสดงถึงการดูดซับที่ดี |
| | R_L | = | 0 | แสดงถึงปฏิกิริยาย้อนกลับ |

4.4.2 แบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm)

ได้บ่งบอกถึงลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นแบบหลายๆชั้น (Multilayer adsorption) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณมีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$ ซึ่ง K_F สามารถหาได้จากจุดตัดแกนในแนวตั้ง และ $1/n$ หาได้จากความชัน เมื่อ $1/n > 1$ แสดงว่าตัวดูดซับมีพื้นที่ในการดูดซับมาก $1/n = 1$ แสดงว่าตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันมาก (Heterogeneous) และถ้า $1/n < 1$ แสดงว่าตัวดูดซับมีพื้นที่ในการดูดซับน้อยและพื้นผิวมีลักษณะเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) โดยที่แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm) จะสามารถดูดซับได้เรื่อยๆ จนเกิดเป็นหลายๆชั้น (Multilayer) [45]

4.4.3 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกน (Koble-Corrigan isotherm)

บ่งบอกถึงลักษณะการดูดซับที่เป็นแบบผสมระหว่างแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์และแบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิช นั่นคือมีลักษณะการดูดซับที่เป็นทั้งแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) และแบบหลายๆชั้น (Multilayer adsorption) ผสมกัน โดยมี q_o จะแสดงถึงค่าการดูดซับจำเพาะสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม) K_{KC} เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับโกเบิลคอร์ริแกนและ ค่า n แสดงถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ นั่นหมายถึง n มีค่ามากแสดงว่าตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับมาก [27]

ซึ่งในงานวิจัยจะทำการศึกษาการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.5 ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 0.6 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอดทีฟเรด 120 ที่ใช้ในการทดลองคือ 10 30 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาการดูดซับ 420 นาที นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการคำนวณสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.6

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า error function ซึ่งมีค่า เท่ากับ 0.99 และ 2.14 ตามลำดับ พบว่าตัวดูดซับไคโตซานมีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิชมากที่สุด ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่าลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะของการเกิด การดูดซับได้หลายชั้น การดูดซับแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณของตัวดูดซับมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่า มีค่า K_F และ $1/n$ เท่ากับ 3.52 และ 0.262 ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าถ้า K_F มีค่ามาก หมายถึง ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับดี และถ้า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 นั้นหมายความว่า ตัวดูดซับไคโตซานนั้นมีพื้นที่ในการดูดซับน้อย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลได้ทำการศึกษาในส่วนของ ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 พบว่ามีความสอดคล้องกัน ซึ่งมีค่า K_F และ $1/n$ ที่มากกว่า คือ 10.27 และ 0.651 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีกว่าตัวดูดซับไคโตซาน ในขณะที่ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 พบว่ามีความสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุผลการดูดซับของโกเบิลคอร์ริแกนมากที่สุด โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า error function ซึ่งมีค่า เท่ากับ 0.99 และ 2.14 ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบผสมกันระหว่างแบบจำลองสมดุผลการดูดซับของแลงเมียร์และแบบจำลองสมดุผลการดูดซับของฟรุนดลิช อาจกล่าวได้ว่า ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 มีลักษณะการดูดซับเป็นทั้งชั้นเดียว (Monolayer adsorption) และการดูดซับหลายๆชั้น (Multilayer adsorption) ผสมกัน

ตารางที่ 4.6 แสดงแบบจำลองสมดุลการดูดซับทั้ง 3 ชนิด

| แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ | q_0 (มิลลิกรัมต่อกรัม) | R_L | K_L (ลิตรต่อมิลลิกรัม) | R^2 | %ERR |
|--|-----------------------------|-------|--|-------|-------|
| คอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน | 20.20 | 0.086 | 1.05 | 0.98 | 6.11 |
| ไคโตซาน | 13.87 | 0.176 | 0.73 | 0.94 | 9.72 |
| แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช | q_0 (มิลลิกรัมต่อกรัม) | $1/n$ | K_F [(มิลลิกรัมต่อกรัม) (ลิตรต่อมิลลิกรัม) ($1/n$)] | R^2 | %ERR |
| คอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน | 18.50 | 0.651 | 10.27 | 0.97 | 15.71 |
| ไคโตซาน | 15.75 | 0.262 | 3.52 | 0.99 | 2.14 |
| แบบจำลองสมดุลการดูดซับของโกเบิลคอรีแกน | q_0 (มิลลิกรัมต่อกรัม) | n | K_{KC} (ลิตรต่อมิลลิกรัม) | R^2 | %ERR |
| คอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน | 21.01 | 0.992 | 1.21 | 1.00 | 1.18 |
| ไคโตซาน | 12.32 | 0.742 | 0.93 | 0.92 | 8.72 |

4.5 การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (kinetic adsorption)

สำหรับการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ จะสามารถทำให้เราทราบถึงลักษณะการเข้าทำของโมเลกุลสารละลายสีย้อมกับบริเวณตำแหน่งว่างในการเกิดปฏิกิริยาได้ รวมถึงสามารถบอกอัตราเร็วของปฏิกิริยาของการดูดซับได้จากการพิจารณาสมการของจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกสมการแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ แบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order) และแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) โดยแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม สามารถบอกถึงลักษณะการเข้าทำของโมเลกุลสารละลายสีย้อมกับบริเวณตำแหน่งว่างในการเกิดปฏิกิริยาในรูปแบบที่เป็นแบบ

1 ต่อ 1 ในขณะที่แบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม จะเป็นการบอกถึงลักษณะการเข้าทำของโมเลกุลสารละลายสีย้อมกับบริเวณตำแหน่งว่างในการเกิดปฏิกิริยาในรูปแบบที่เป็นแบบ 1 ต่อ 2 [53]

ในงานวิจัยจะทำการศึกษาการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.5 ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 0.6 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ใช้ในการทดลองคือ 10 30 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาการดูดซับ 420 นาที นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการคำนวณสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8

จากข้อมูลการทดลองสามารถนำมาคำนวณหาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่เหมาะสมได้โดยการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่า error function เพื่อดูความถูกต้องและความแม่นยำของข้อมูลการทดลอง และจากผลการทดลองพบว่า ตัวดูดซับไคโตซานมีความสอดคล้องกับแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) พบว่ามีความเป็นเส้นตรงมากกว่าแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order) และเมื่อพิจารณาค่า error function พบว่ามีค่าที่น้อยกว่า ในขณะที่ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 มีความสอดคล้องกับแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) เช่นเดียวกัน หลังจากทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่พบว่ามีความเป็นเส้นตรงมากกว่าแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order) และมีค่า error function น้อยกว่า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าทั้ง ตัวดูดซับไคโตซาน และ ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 นั้นมีลักษณะการเข้าทำของโมเลกุลสารละลายสีย้อมกับบริเวณตำแหน่งว่างในการเกิดปฏิกิริยาที่หลากหลายหรืออยู่ในรูปแบบที่เป็นแบบ 1 ต่อ 2 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาในส่วนของแบบจำลองสมดุลของการดูดซับ (Isotherm adsorption) ในก่อนหน้านี้นี้ที่บอกว่าในส่วนของตัวดูดซับไคโตซานมีลักษณะการดูดซับที่เป็นแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) และ ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่มีลักษณะการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) และ การดูดซับที่เป็นแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) ผสมกัน ซึ่งเป็นผลทำให้มีลักษณะการเข้าทำของโมเลกุลสารละลายสีย้อมกับบริเวณตำแหน่งว่างในการเกิดปฏิกิริยาที่หลากหลายหรืออยู่ในรูปแบบที่เป็นแบบ 1 ต่อ 2 นั้นเอง

ตารางที่ 4.7 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ของตัวดูดซับไคโตซาน

| แบบจำลอง จลนพลศาสตร์ | พารามิเตอร์ | ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่ย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | |
|--|-----------------------------------|---|-------|-------|-------|
| | | 10 | 30 | 50 | 100 |
| แบบจำลองของ ปฏิกิริยาอันดับ หนึ่งเทียม (Pseudo first order) | k_1 (นาที ⁻¹) | 0.040 | 0.035 | 0.029 | 0.020 |
| | $q_{e,cal}$ (มิลลิกรัมต่อกรัม) | 1.54 | 4.85 | 7.87 | 11.54 |
| | $q_{e,exp}$ (มิลลิกรัมต่อกรัม) | 1.77 | 5.29 | 8.51 | 13.87 |
| | R^2 | 0.969 | 0.982 | 0.989 | 0.992 |
| | %ERR | 12.99 | 8.31 | 7.52 | 4.25 |
| | | | | | |
| แบบจำลองของ ปฏิกิริยาอันดับ สองเทียม (Pseudo second order) | k_1 (นาที ⁻¹) | 0.107 | 0.020 | 0.009 | 0.002 |
| | $q_{e,cal}$ (มิลลิกรัมต่อกรัม) | 1.72 | 5.45 | 8.78 | 14.69 |
| | $q_{e,exp}$ (มิลลิกรัมต่อกรัม) | 1.77 | 5.29 | 8.51 | 13.87 |
| | R^2 | 0.999 | 0.993 | 0.995 | 0.995 |
| | %ERR | 1.82 | 4.83 | 3.64 | 3.42 |
| | | | | | |

ตารางที่ 4.8 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5

| แบบจำลอง จลนพลศาสตร์ | พารามิเตอร์ | ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | | |
|--|-----------------------------------|--|-------|-------|-------|
| | | 10 | 30 | 50 | 100 |
| แบบจำลองของ ปฏิกิริยาอันดับ หนึ่งเทียม (Pseudo first order) | k_1 (นาที่ ⁻¹) | 0.054 | 0.046 | 0.041 | 0.025 |
| | $q_{e,cal}$ (มิลลิกรัมต่อกรัม) | 1.59 | 5.09 | 9.36 | 15.71 |
| | $q_{e,exp}$ (มิลลิกรัมต่อกรัม) | 1.79 | 5.52 | 9.05 | 16.32 |
| | R^2 | 0.983 | 0.988 | 0.995 | 0.994 |
| | %ERR | 11.73 | 7.79 | 3.47 | 3.79 |
| | k_1 (นาที่ ⁻¹) | 0.116 | 0.022 | 0.012 | 0.003 |
| | $q_{e,cal}$ (มิลลิกรัมต่อกรัม) | 1.83 | 5.75 | 9.28 | 16.69 |
| แบบจำลองของ ปฏิกิริยาอันดับ สองเทียม (Pseudo second order) | $q_{e,exp}$ (มิลลิกรัมต่อกรัม) | 1.79 | 5.52 | 9.05 | 16.32 |
| | R^2 | 0.999 | 0.998 | 0.999 | 0.993 |
| | %ERR | 1.78 | 4.18 | 2.54 | 2.25 |

อย่างไรก็ตามในการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ จะสามารถทำให้เราทราบถึงลักษณะการเข้าทำของโมเลกุลสารละลายสีย้อมกับบริเวณตำแหน่งว่างในการเกิดปฏิกิริยาได้ รวมถึงสามารถบอกอัตราเร็วของปฏิกิริยาของการดูดซับได้จากการพิจารณาสมการของจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ แต่ไม่สามารถบอกถึงขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ (Rate limiting step) ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้ทำการศึกษากลไกการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับโคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตโคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนโคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 เพื่อที่จะทำให้ทราบถึงขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ (Rate limiting step)

4.6 การศึกษากลไกการดูดซับของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับในขั้นตอนของการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion)

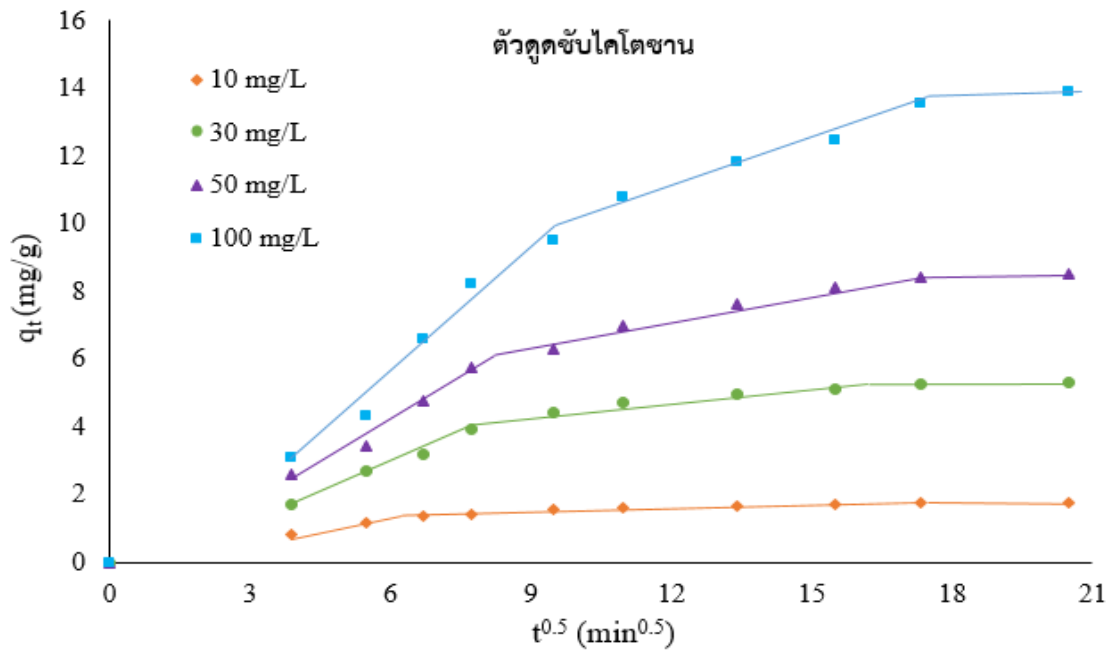
เป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการดูดซับบนตัวดูดซับที่มีรูพรุน โดยทั่วไปแล้วจะสามารถอธิบายได้ด้วยขั้นตอนในการดูดซับ 4 ขั้นตอน นั่นคือ การแพร่กระจายของโมเลกุล (Bulk diffusion) การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) การแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion) และขั้นตอนการเกิดการดูดซับ (Sorption) [51] จากหลากหลายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าในหนึ่งกระบวนการดูดซับนั้น อาจจะมีขั้นตอนในการควบคุมอัตราการดูดซับเพียงหนึ่งขั้นตอนหรือมากกว่าหนึ่งขั้นตอนที่สามารถเกิดขึ้นควบคู่กันไปได้ จากผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าในส่วนของขั้นตอนการแพร่กระจายของโมเลกุล (Bulk diffusion) ไม่ถือเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ (Rate limiting step) เนื่องจากสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนั้นสามารถละลายในน้ำได้เป็นอย่างดี ดังนั้นผลที่เกิดจากการแพร่กระจายของโมเลกุล นั้นจึงส่งผลน้อยมากหรือแทบจะไม่ส่งผลเลย ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการศึกษาแบบจำลองการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion model) เพื่อดูกลไกการดูดซับของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับในขั้นตอนของการแพร่ภายในรูพรุน ซึ่งมีความสำคัญโดยสามารถนำไปศึกษาเพื่อหาขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับภายในรูพรุน เป็นการอธิบายถึงการถ่ายโอนหรือการขนส่งโมเลกุลของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เข้าสู่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ดังนั้นในการศึกษาเราจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการของเว็บเบอร์ (Webber's Interparticle diffusion equation) ดังสมการ 4.2

$$q_t = k_{it}t^{0.5} + C \quad (4.2)$$

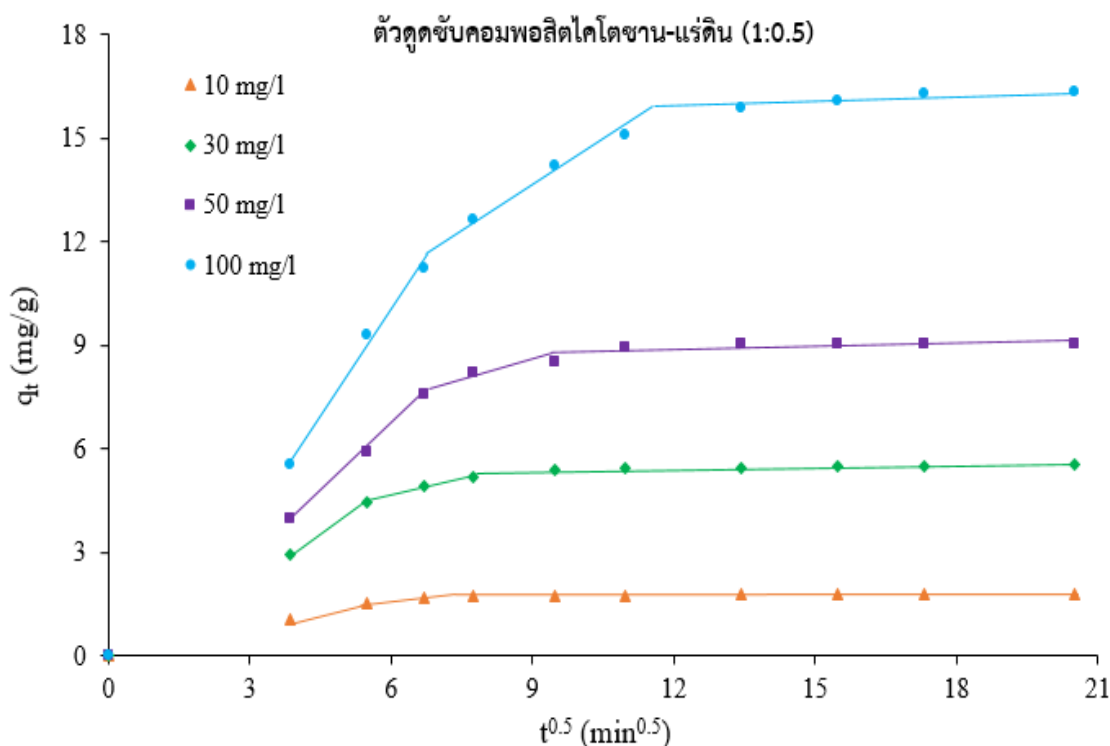
- เมื่อ q_t = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- k_i = ค่าคงที่อัตราเร็วของการแพร่ของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เข้าไปยังภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที่^{-0.5})
- t = เวลาในการดูดซับ (นาที่)
- C = เปรียบเสมือนความหนาของชั้นฟิล์ม

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลอง มาสร้างกราฟระหว่าง q_t และ $t^{0.5}$ จะแสดงค่าความชันของแต่ละช่วง (k_i) ซึ่งแสดง ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ โดยจากหลากหลายงานวิจัยที่ผ่านมา ก่อนหน้านี้ พบว่ากราฟที่สร้างได้จากข้อมูลการทดลอง ได้ลักษณะกราฟที่มีความชันหลายค่า (Multi-linearity) เป็นการบ่งบอกว่าลักษณะการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยความชันแต่ละช่วงจะให้คำนิยามในการอธิบายที่แตกต่างกัน ความชันในช่วงแรก (k_{i1}) จะแสดงถึงอัตราการแพร่ภายนอก (External diffusion) ซึ่งเป็นผลมาจาก boundary layer หรือที่เรียกว่า การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) นั่นเอง สำหรับ (k_{i2}) จะแสดงถึงอัตราการแพร่ที่เกิดขึ้นภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion) และความชันในช่วงที่สาม (k_{i3}) จะแสดงถึงลักษณะการแพร่ไปยังตำแหน่งว่างไวของตัวดูดซับและเกิดการดูดซับ (Sorption) ซึ่งจะมีลักษณะค่อนข้างช้าลงและคงที่ ซึ่งเป็นอัตราการแพร่ในสภาวะสมดุล [51-53]

จากผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณโดยการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง q_t และ $t^{0.5}$ ของตัวดูดซับไคโตซาน และ ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ หนัก 0.6 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 10 30 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.5 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 และสามารถสรุปค่าอัตราการแพร่ ได้ดังตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง q_t และ $t^{0.5}$ ของตัวดูดซับไคโตซาน โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ หนัก 0.6 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 10 30 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.5 ที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง q_t และ $t^{0.5}$ ของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ หนัก 0.6 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอดทีฟเฟรด 120 เท่ากับ 10 30 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.5 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

โดยปกติแล้วสำหรับการศึกษาแบบจำลองการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion model) หากสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง q_t และ $t^{0.5}$ แล้วได้กราฟเส้นตรงลากผ่านจุดกำเนิด (0,0) เป็นการบ่งบอกให้เห็นว่ามีขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion) เป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ (Rate limiting step) เพียงขั้นตอนเดียว แต่ถ้าหากกระบวนการดูดซับใดที่มีขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับมากกว่าหนึ่งขั้นตอน หลังจากสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง q_t และ $t^{0.5}$ แล้วจะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันที่หลากหลาย (Multi-linearity) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าในหนึ่งกระบวนการดูดซับสามารถมีขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นได้มากกว่าหนึ่งขั้นตอน นั่นคือสามารถเกิดขึ้นควบคู่กันได้ เมื่อพิจารณาอัตราเร็วของการแพร่ภายในรูพรุนบนตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 พบว่ามีลักษณะการแพร่ที่เป็นแบบ Multi-linearity ซึ่งจะเห็นว่ามี ความชันของกราฟที่หลากหลาย นั่นแสดงว่านอกจากขั้นตอนของการแพร่ภายในรูพรุน

(Intraparticle diffusion) แล้ว ยังคงมีขั้นตอนอื่นที่เป็นขั้นตอนในการควบคุมกลไกการดูดซับ เมื่อเราทำการพิจารณาความชันในช่วง K_{i3} ซึ่งเป็นการแพร่ในส่วนของการ Sorption จะพบว่ามีอัตราการแพร่คงที่ เนื่องจากเป็นอัตราการแพร่ในสภาวะสมดุล จึงไม่ถือว่าเป็นขั้นตอนในการควบคุมกลไกการดูดซับ ดังนั้นเหลือเพียงความชันในช่วง K_{i1} และ K_{i2} ซึ่งเป็นอัตราการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) และอัตราการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion) ตามลำดับ นอกจากนี้ อัตราการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion) ที่เป็นขั้นตอนในการควบคุมกลไกการดูดซับ แล้ว อัตราการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) จะเป็นขั้นตอนในการควบคุมกลไกการดูดซับ ที่เกิดควบคู่กันไปจริงหรือไม่ จึงใช้สมการของบอยด์ (Boyd kinetic model) ดังขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าอัตราการแพร่ (k_i) ของตัวดูดซับโคโคซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตโคโคซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนโคโคซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5

| ชนิดตัวดูดซับ | ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ค่าคงที่อัตราเร็วของการแพร่ (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที ^{-0.5}) | | |
|---------------------------|---|---|----------|----------|
| | | K_{i1} | K_{i2} | K_{i3} |
| ตัวดูดซับโคโคซาน | 10 | 0.207 | 0.072 | 0.011 |
| | 30 | 0.561 | 0.127 | 0.036 |
| | 50 | 0.827 | 0.282 | 0.039 |
| | 100 | 1.129 | 0.479 | 0.104 |
| ตัวดูดซับคอมพอสิต | 10 | 0.282 | 0.073 | 0.006 |
| | 30 | 0.798 | 0.325 | 0.018 |
| โคโคซาน-แร่ดิน (1:0.5) | 50 | 1.114 | 0.299 | 0.021 |
| | 100 | 1.672 | 0.565 | 0.062 |

4.7 การศึกษากลไกการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเฟรด 120 บนตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดยใช้สมการของบอยและคณะ [54]

สำหรับการศึกษากลไกการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเฟรด 120 บนตัวดูดซับชนิดต่างๆ ปัจจัยสำคัญของการดูดซับนั้นก็คือการทำนายถึงขั้นตอนในการกำหนดอัตราการดูดซับ (Rate limiting step) เนื่องจากเป็นขั้นควบคุมอัตราเร็วของกระบวนการดูดซับทั้งหมด โดยการศึกษาขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ จะสามารถหาได้โดยใช้สมการของบอยและคณะ [54] ซึ่งแสดงดังสมการ 4.3

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-n^2 Bt) \quad (4.3)$$

และสามารถคำนวณค่า F ได้จากสมการ 4.3

$$F = \frac{q_t}{q_e} \quad (4.4)$$

เมื่อ F = เศษส่วนการดูดซับของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเฟรด 120 บนตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ

q_e = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t = จำนวนสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t = เวลา (นาที)

B = ค่าคงที่ของบอย (Boyd's constant) นาที⁻¹

ซึ่งจะคำนวณหาค่า Bt ได้จากสมการ 4.4 และ 4.5 โดยมีเงื่อนไข ดังนี้

$$\text{ถ้า } F > 0.85 ; \quad Bt = -0.4977 - \ln(1 - F) \quad (4.5)$$

$$\text{ถ้า } 0 < F < 0.85 ; \quad Bt = \left(\sqrt{\pi} - \sqrt{\pi - \frac{\pi^2 F}{3}} \right)^2 \quad (4.6)$$

เมื่อทำการพิจารณาค่า F ดังสมการ 4.5 และ 4.6 จะทำให้ทราบค่า Bt ในช่วงเวลาต่างๆ จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้มาเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bt กับ t ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และสามารถหาค่าคงที่ของบอย (Boyd's constant) ได้จากความชันของกราฟ จากสมการแสดงความสัมพันธ์ข้างต้น เราสามารถทำนายกลไกการควบคุมปฏิกิริยาได้ ซึ่งจากทฤษฎีของบอยและคณะบ่งบอกไว้ว่า หากกราฟเส้นตรงที่ได้ไม่ได้ลากผ่านจุดกำเนิด (0,0) จะแสดงว่าขั้นกำหนดอัตราการดูดซับจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) และจากค่าคงที่ของบอย (Boyd's constant) จะทำให้ทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) โดยจะคำนวณได้จากสมการ 4.7

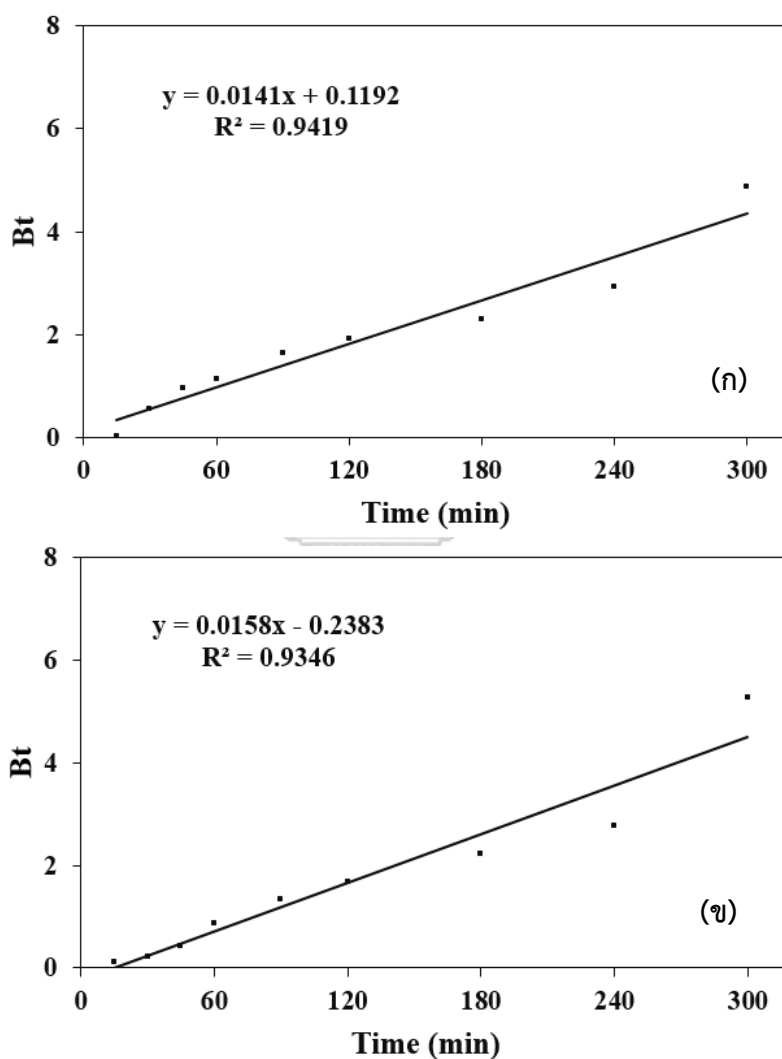
$$B = \frac{\pi^2 D_i}{r^2} \quad (4.7)$$

เมื่อ D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
 r = รัศมีของรูพรุนของตัวดูดซับ (นาโนเมตร)

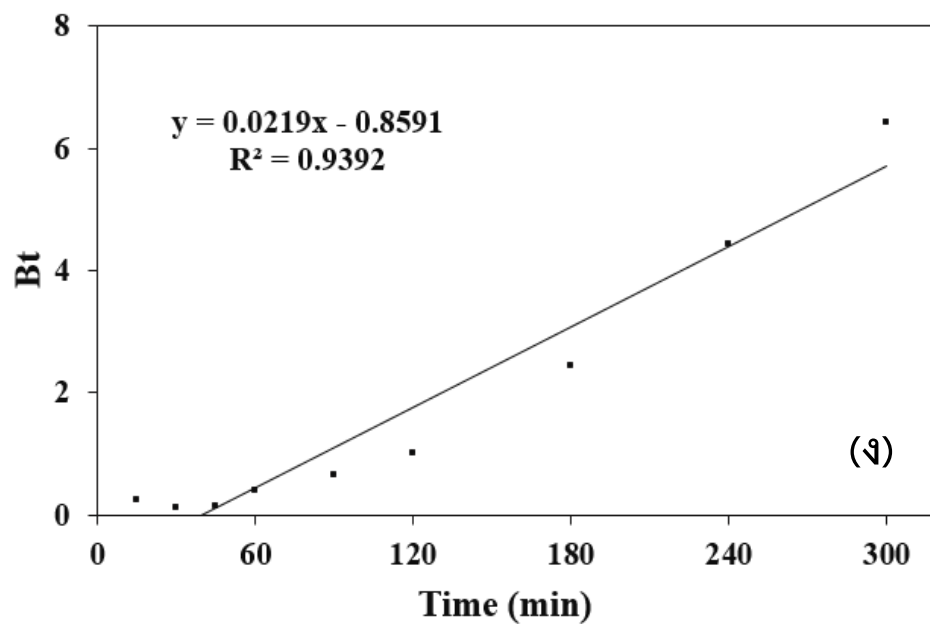
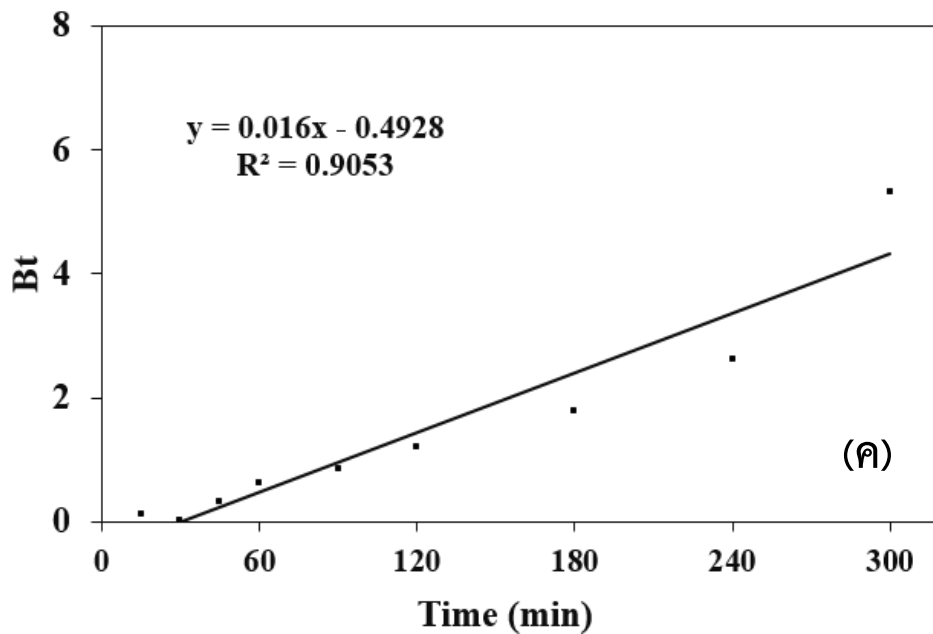
สำหรับในงานวิจัยนี้เราจะพบว่าเมื่อทำการนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษามาสร้างกราฟระหว่าง Bt และ t ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ จะพบว่าเส้นกราฟของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดคือ ตัวดูดซับไคโตซาน และ ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ไม่ผ่านจุดกำเนิด (0,0) ดังนั้นเป็นการบ่งบอกได้ว่าขั้นกำหนดอัตราการดูดซับทั้ง ตัวดูดซับไคโตซาน และ ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 จึงเกิดขึ้นในขั้นตอนของการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film transport) [54, 55] นั้นแสดงให้เห็นว่าจากการศึกษากลไกในการดูดซับ โดยใช้แบบจำลองการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion model) และสมการของบอย (Boyd's equation) เพื่อดูขั้นกำหนดอัตราการดูดซับของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ

เรต 120 บนตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด พบว่ากลไกหรือขั้นตอนในการควบคุมการดูดซับในงานวิจัยนี้สามารถเกิดขึ้นได้ 2 ขั้นตอน ควบคู่กัน คือ ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) และ ขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (Intraparticle diffusion)

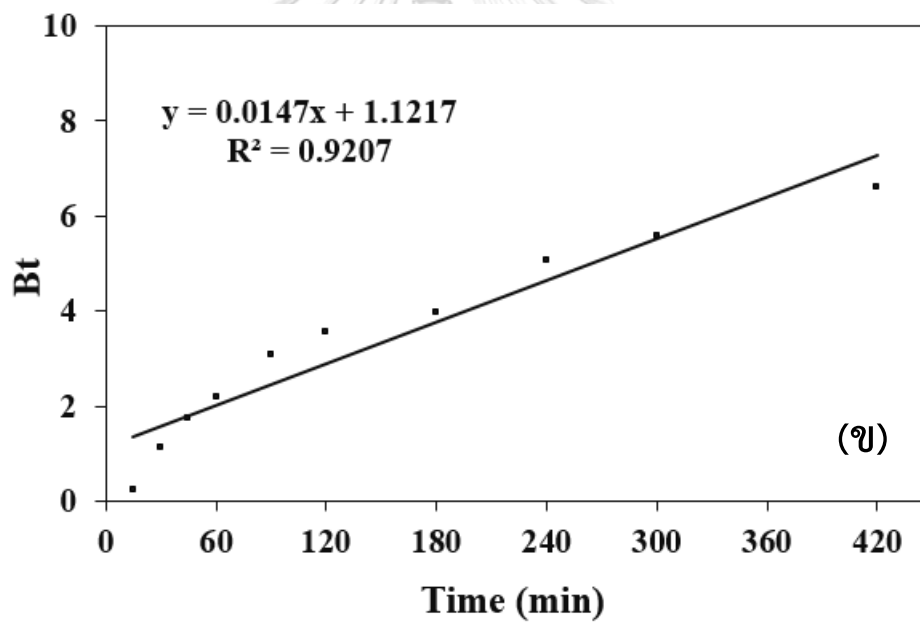
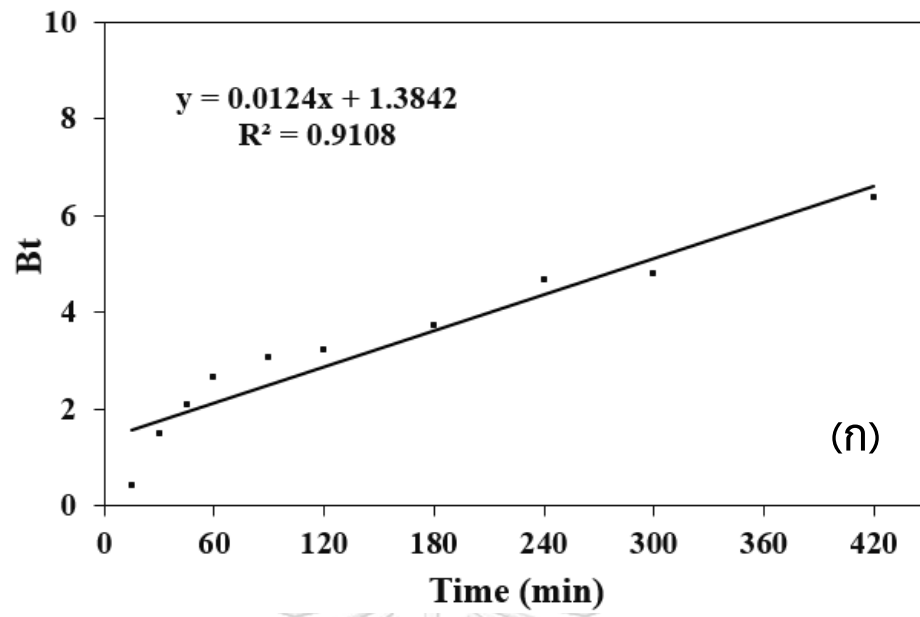
นอกจากนี้จากความชันของกราฟ เราสามารถนำไปคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวดูดซับตัวดูดซับโคโคซาน และ ตัวดูดซับคอมพอสิตโคโคซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนโคโคซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ซึ่งแสดงดังตาราง 4.10 และ ตาราง 4.11



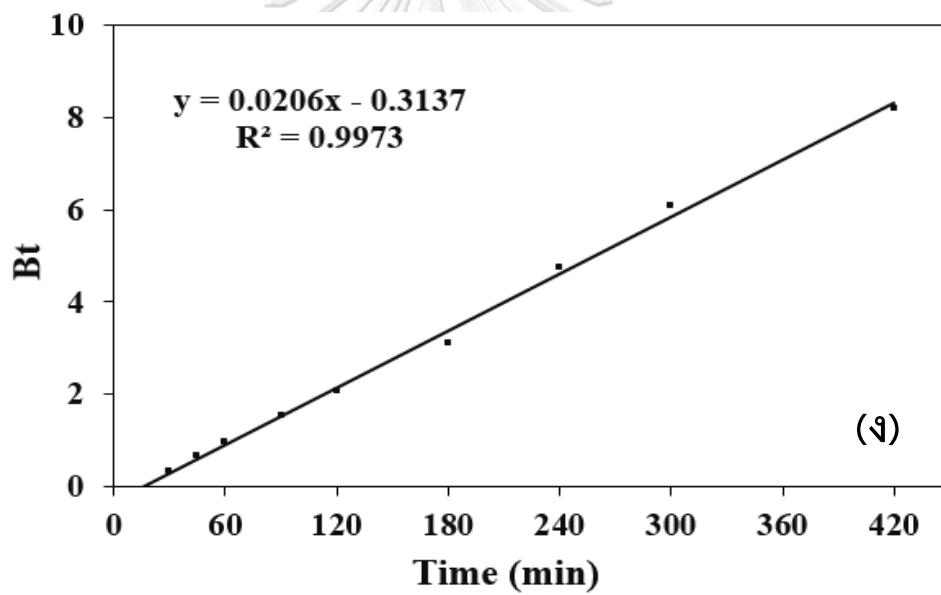
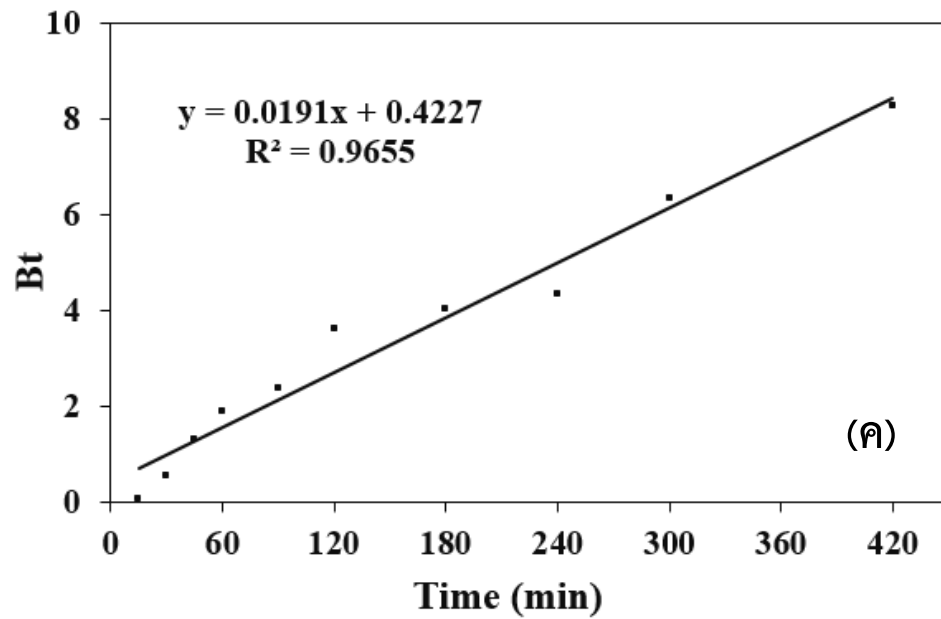
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Bt และ t ของตัวดูดซับโคโคซาน (ก) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรต 120 เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรต 120 เท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรต 120 เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ (ง) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรต 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.17 (ต่อ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Bt และ t ของตัวดูดซับโคโตซาน (ก) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ (ง) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Bt และ t ของตัวดูดซับคอมพอสิตโคโคซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนโคโคซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 (ก) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ (ง) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.18 (ต่อ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Bt และ t ของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 (ก) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ (ง) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอลิไตไคโตซาน-แร้ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร้ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายซีอีเอ็มรีแอกทีฟเรด 120 แตกต่างกัน

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ $\times 10^{-18}$ (ตารางเซนติเมตร/วินาที) | | | |
|---|--|----------------|------------------|----------------|
| | ตัวดูดซับคอมพอลิไตไคโตซาน-แร้ดิน | R ² | ตัวดูดซับไคโตซาน | R ² |
| 10 | 2.19 | 0.911 | 2.15 | 0.942 |
| 30 | 3.05 | 0.921 | 2.41 | 0.924 |
| 50 | 3.41 | 0.965 | 2.43 | 0.905 |
| 100 | 4.09 | 0.997 | 3.31 | 0.939 |

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอลิไตไคโตซาน-แร้ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร้ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่ปริมาณตัวดูดซับ แตกต่างกัน

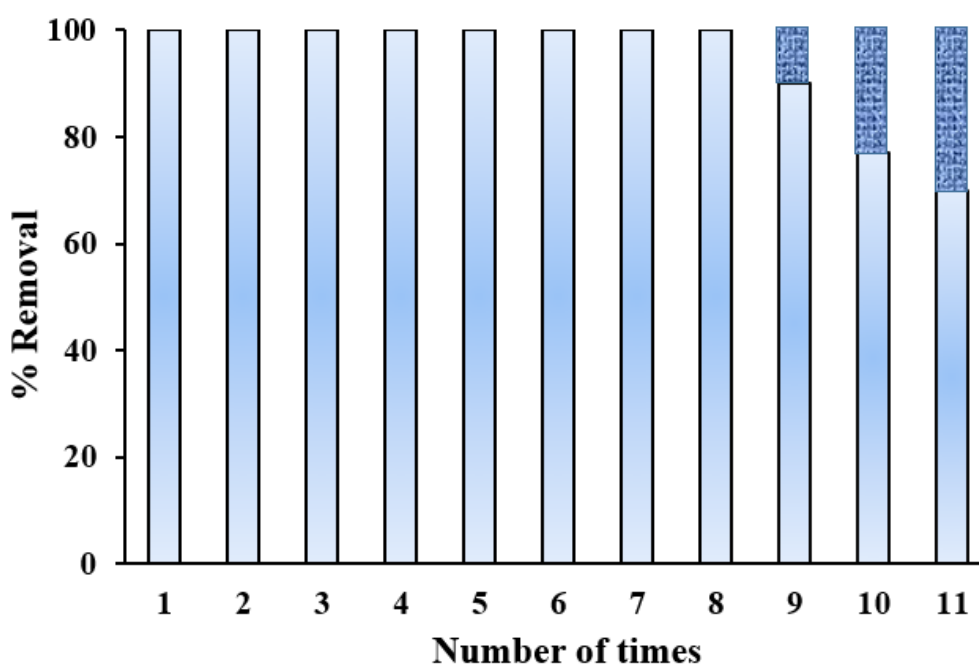
| ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม) | ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ $\times 10^{-18}$ (ตารางเซนติเมตร/วินาที) | | | |
|---------------------------|--|----------------|------------------|----------------|
| | ตัวดูดซับคอมพอลิไตไคโตซาน-แร้ดิน | R ² | ตัวดูดซับไคโตซาน | R ² |
| 0.3 | 1.78 | 0.869 | 1.27 | 0.977 |
| 0.6 | 2.66 | 0.993 | 2.54 | 0.966 |
| 0.9 | 3.26 | 0.957 | 2.95 | 0.987 |
| 1.2 | 4.32 | 0.897 | 3.16 | 0.950 |

เมื่อทำการพิจารณาผลการคำนวณที่ได้จากตาราง 4.10 แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวดูดซับโคโคซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตโคโคซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนโคโคซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 นั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากเกิดแรงกระทำและการชนกันของโมเลกุล (Driving force) ที่มากขึ้น ซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของโมเลกุลสีย้อมที่มีอยู่ในสารละลายและความเข้มข้นของโมเลกุลสีย้อมที่มีอยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้

สำหรับในส่วนของตารางที่ 4.11 จะเป็นการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวดูดซับโคโคซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตโคโคซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนโคโคซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ที่ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกัน พบว่าให้ผลในการทำงานเดียวกัน นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการคำนวณของตัวดูดซับโคโคซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตโคโคซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนโคโคซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 นั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเปรียบเสมือนการเพิ่มจำนวนของตำแหน่งว่างไวในการเกิดปฏิกิริยา (Active site) บนพื้นผิวตัวดูดซับ ส่งผลให้สามารถส่งแรงดึงดูดไปยังโมเลกุลของสารละลายสีย้อมให้สามารถวิ่งแพร่ผ่านพื้นผิวตัวดูดซับได้เร็วขึ้น

4.8 การศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำ (Reusability) ของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดินที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5

สำหรับการศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ หนัก 0.6 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.5 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงผลการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ หนัก 0.6 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.5 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองพบว่า ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ได้ดีมาก เนื่องจากจะเห็นได้ว่า เมื่อนำตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สกัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 จำนวน 0.6 กรัม มาทำการกำจัดสารละลายสีย้อมที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง

เท่ากับ 5.5 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส หลังจากผ่านการทดลองการนำกลับมาใช้ซ้ำถึง 8 ครั้ง ในระยะเวลาในการดูดซับ 420 นาที ยังคงสามารถกำจัดสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้หมดสมบูรณ์ ในขณะที่การทดลองการนำกลับมาใช้ซ้ำในครั้งที่ 9 ครั้งที่ 10 และ ครั้งที่ 11 พบว่าในช่วงที่ได้ทำการศึกษาการดูดซับ คือ 420 นาที นั้นไม่สามารถกำจัดสี้อมได้หมดสมบูรณ์ นั่นคือสามารถกำจัดสี้อมได้ ร้อยละ 90 77 และ 70 ตามลำดับ แต่เมื่อได้ทำการทดลองทิ้งไว้ เป็นเวลา 10 15 และ 23 ชั่วโมง ตามลำดับ ตัวดูดซับคอมพอสิตโคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนโคโตซาน ต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้หมด สมบูรณ์ ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับคอมพอสิตโคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนโคโตซานต่อแรดดิน เท่ากับ 1 ต่อ 0.5 นั้นยังคงสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก เพียงแต่ต้องใช้เวลาในการดูดซับ ที่เพิ่มขึ้นเพื่อที่จะทำให้สามารถกำจัดสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้หมดสมบูรณ์



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้พบว่าจากการศึกษาการดูดซับสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 โดยตัวแปรที่ได้ทำการศึกษาทดลองในงานวิจัยนี้ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ปริมาณตัวดูดซับ ค่าความเป็นกรดต่าง และอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ โดยใช้เวลาในการดูดซับ 420 นาที

จากการทดลองพบว่า ตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 มีความสามารถในการดูดซับสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 เพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการเพิ่มระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากเกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้น ของสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ในสารละลายและบริเวณผิวหน้าตัวดูดซับ ดังนั้นทำให้เกิดแรงกระทำและการชนกันของโมเลกุล (Driving force) ที่มากขึ้น [56] สำหรับผลของปริมาณตัวดูดซับปริมาณตัวดูดซับไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตแรดดิน-ไคโตซาน พบว่า ร้อยละการกำจัดสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน และตัวดูดซับไคโตซาน มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับนั้นเป็นการเพิ่มตำแหน่งว่างไว้ในกาจับกับโมเลกุลของสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 มากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการกำจัดสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน และตัวดูดซับไคโตซาน มีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบร้อยละในการกำจัดสี้อมระหว่างตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 และตัวดูดซับไคโตซาน จะเห็นว่าตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่ปริมาณตัวดูดซับเพียง 0.6 กรัม จะมีร้อยละในการกำจัดสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้หมดสมบูรณ์ ในขณะที่ตัวดูดซับไคโตซาน จะมีร้อยละในการกำจัดสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 เพียง ร้อยละ 83.94 ในส่วนของผลของค่าความเป็นกรดต่าง ทั้งในส่วนของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 และตัวดูดซับไคโตซาน พบว่าที่ระดับค่าความเป็นกรดต่างเมื่ออยู่ในสภาวะกรดจะสามารถกำจัดสี้อมได้เร็วกว่าในสภาวะต่าง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างประจุ สามารถอธิบายได้โดยใช้ผลจากการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวตัวดูดซับ นั่นคือ เนื่องมาจากในภาวะกรด หมู่อะมิโนของไคโตซานสามารถแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) โดยที่โปรตอนจะเข้าไปจับกับหมู่อะมิโน ($-NH_2$) เกิดการโปรตอนेटทำให้ หมู่อะมิโน ($-NH_2$) บนพื้นผิวไคโตซานเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของแอมเนียมไอออน

(-NH₃⁺) [26] จึงเป็นเหตุให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวก ในขณะที่ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในภาวะต่าง หมู่อะมิโนจะไม่เกิดการโปรตอนเตต ซึ่งจะอยู่ในรูปของ -NH⁻ [48] จึงเป็นเหตุให้มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ สำหรับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 พบว่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวจะมีประจุเป็นลบในทุกช่วง ค่าความเป็นกรดต่าง ดังนั้นจากค่าศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวซึ่งจะเป็นตัวที่จะบ่งบอกว่าหากตัวดูดซับ มีประจุบนพื้นผิวเป็นบวกจะสามารถดึงดูดสารที่มีประจุตรงข้ามได้ค่อนข้างดี เนื่องจากอาศัยแรงดึงดูด ระหว่างประจุ [25] ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับ ไคโตซาน และตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 จะสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ในสภาวะความเป็นกรดได้ดีกว่าในสภาวะความเป็นด่าง และจะพบว่าสำหรับตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 จะสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ได้หมดสมบูรณ์สำหรับทุกช่วงค่าความเป็นกรด ต่างที่ได้ทำการศึกษา ในขณะที่ตัวดูดซับไคโตซาน เมื่อทำการปรับเปลี่ยนเพิ่มค่าความเป็นกรดต่าง ของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีร้อยละของการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ลดลง

จากการศึกษาแบบจำลองสมดุลการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลการทดลองในงานวิจัย พบว่า ตัวดูดซับไคโตซาน มีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิชมากที่สุด ดังนั้นจึง สามารถอธิบายได้ว่าลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะของการเกิดการดูดซับได้หลายชั้น ดูดซับ แบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณของตัวดูดซับมีค่าไม่ เท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับผลของอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ของการดูดซับ (ΔH°) มีค่าเป็นลบ แสดงว่าลักษณะการดูดซับดังกล่าวเป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่ง จะเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิปกติ [52] ในขณะที่ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซาน ต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 พบว่ามีความสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของโกเบิล คอร์ริแกนมากที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบผสมกัน ระหว่างแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์และแบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิช อาจกล่าวได้ว่า ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แร่ดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแร่ดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 มีลักษณะการดูดซับเป็นทั้งชั้นเดียว (Monolayer adsorption) และการดูดซับหลายๆชั้น (Multilayer adsorption) ผสมกัน พลังงานที่ใช้ในการดูดซับสำหรับแต่ละบริเวณบนพื้นผิวตัวดูดซับ มีค่าที่หลากหลาย ซึ่งสอดคล้องกับผลของอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลง เอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) มีค่าเป็นบวก ดังนั้นลักษณะการดูดซับจึงเป็นแบบดูดความร้อน (Endothermic process) ซึ่งการให้พลังงานหรือการเพิ่มความร้อนแก่ระบบส่งผลให้การดูดซับเกิด ดีขึ้น ดังนั้นลักษณะการดูดซับดังกล่าวจึงมีการดูดซับทางเคมีมาเกี่ยวข้อง [52] เมื่อพิจารณา

จลนพลศาสตร์การดูดซับของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด พบว่ามีความสอดคล้องกับแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม จึงสามารถสรุปได้ว่าทั้ง ตัวดูดซับไคโตซาน และ ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 นั้นมีลักษณะการเข้าทำของโมเลกุลสารละลายสีย้อมกับบริเวณตำแหน่งว่างในการเกิดปฏิกิริยาที่หลากหลายหรืออยู่ในรูปแบบที่เป็นแบบ 1 ต่อ 2 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาในส่วนของแบบจำลองสมดุลของการดูดซับ (Isotherm adsorption) และนอกจากนี้ จากการศึกษาชั้นกำหนดอัตราการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด พบว่ากลไกหรือขั้นตอนในการควบคุมการดูดซับในงานวิจัยนี้สามารถเกิดขึ้นได้ 2 ขั้นตอน ควบคู่กัน คือ ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

จากการศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 พบว่า ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้ดีมาก เนื่องจากจะเห็นได้ว่า เมื่อนำตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 หลังจากผ่านการทดลองการนำกลับมาใช้ซ้ำถึง 8 ครั้ง ในระยะเวลาในการดูดซับ 420 นาที ยังคงสามารถกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้หมดสมบูรณ์ ในขณะที่การทดลองการนำกลับมาใช้ซ้ำในครั้งที่ 9 ครั้งที่ 10 และครั้งที่ 11 พบว่า ในช่วงที่ได้ทำการศึกษการดูดซับ คือ 420 นาที นั้นไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้หมดสมบูรณ์ แต่เมื่อได้ทำการทดลองทิ้งไว้เป็นเวลา 10 15 และ 23 ชั่วโมง ตามลำดับ ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน ที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 นั้นก็ยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้หมดสมบูรณ์ ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดินที่สัดส่วนไคโตซานต่อแรดดินเท่ากับ 1 ต่อ 0.5 นั้นยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก เพียงแต่ต้องใช้เวลาในการดูดซับที่เพิ่มขึ้นเพื่อที่จะทำให้สามารถกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้หมดสมบูรณ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรรศึกษาวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-แรดดิน

รายการอ้างอิง

1. Kausar, A., et al., *Dyes adsorption using clay and modified clay: A review*. Journal of Molecular Liquids, 2018. 256: p. 395-407.
2. Radha, K.V., V. Sridevi, and K. Kalaivani, *Electrochemical oxidation for the treatment of textile industry wastewater*. Bioresour Technol, 2009. 100(2): p. 987-990.
3. Mahesh, S., et al., *Electrochemical Degradation of Pulp and Paper Mill Wastewater. Part 1. COD and Color Removal*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006. 45(8): p. 2830-2839.
4. Salgot, M. and M. Folch, *Wastewater treatment and water reuse*. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2018. 2: p. 64-74.
5. Irfan, M., et al., *The removal of COD, TSS and colour of black liquor by coagulation–flocculation process at optimized pH, settling and dosing rate*. Arabian Journal of Chemistry, 2017. 10: p. S2307-S2318.
6. Zahrim, A.Y. and N. Hilal, *Treatment of highly concentrated dye solution by coagulation/flocculation–sand filtration and nanofiltration*. Water Resources and Industry, 2013. 3: p. 23-34.
7. de Souza Sartori, J.A., et al., *Criegee mechanism as a safe pathway of color reduction in sugarcane juice by ozonation*. Food Chem, 2017. 225: p. 181-187.
8. Lian, L., L. Guo, and C. Guo, *Adsorption of Congo red from aqueous solutions onto Ca-bentonite*. J Hazard Mater, 2009. 161(1): p. 126-31.
9. Nigam, P., et al., *Physical removal of textile dyes from effluents and solid-state fermentation of dye-adsorbed agricultural residues*. Bioresource Technology, 2000. 72(3): p. 219-226.
10. Aksu, Z., *Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review*. Process Biochemistry, 2005. 40(3-4): p. 997-1026.
11. https://www.novabizz.com/CDC/Interior/Interior_Colour01.htm.
12. http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/a_kongdee.

13. http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=3%20&%20read=true&count=true.
14. Spadaro, J., M. Gold, and V. Renganathan, *Degradation of Azo Dyes by the Lignin-degrading Fungus Phanerochaete chrysosporium*. Vol. 58. 1992. 2397-401.
15. <http://repository.rmutp.ac.th/handle/123456789/953>.
16. Errais, E., et al., *Anionic RR120 dye adsorption onto raw clay: Surface properties and adsorption mechanism*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2012. 403: p. 69-78.
17. <https://kundoc.com/queue/pdf-high-solids-low-voc-solvent-based-coatings.html>.
18. เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. Available from: science.buu.ac.th/ojs246/index.php/sci/article/viewFile/773/715.
19. Dąbrowski, A., *Adsorption — from theory to practice*. Advances in Colloid and Interface Science, 2001. 93(1-3): p. 135-224.
20. Kim, M.-J. and G.-H. Chea, *Study on the PV Driven Dehumidifying System with Oyster Shell and Thermoelectric Device*. Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, 2012. 18(3): p. 287-293.
21. Wang, X., et al., *Carbon composite lignin-based adsorbents for the adsorption of dyes*. Chemosphere, 2018. 206: p. 587-596.
22. Tokumasu, F., et al., *Modifications in erythrocyte membrane zeta potential by Plasmodium falciparum infection*. Exp Parasitol, 2012. 131(2): p. 245-51.
23. Shavandi, M.A., et al., *Removal of Residual Oils from Palm Oil Mill Effluent by Adsorption on Natural Zeolite*. Water, Air, & Soil Pollution, 2012. 223(7): p. 4017-4027.
24. Srinivasan, A. and T. Viraraghavan, *Oil removal from water using biomaterials*. Bioresour Technol, 2010. 101(17): p. 6594-600.
25. Ahmad, A.L., S. Sumathi, and B.H. Hameed, *Adsorption of residue oil from palm oil mill effluent using powder and flake chitosan: equilibrium and kinetic studies*. Water Res, 2005. 39(12): p. 2483-94.

26. Ahmad, A.L., S. Sumathi, and B.H. Hameed, *Residual oil and suspended solid removal using natural adsorbents chitosan, bentonite and activated carbon: A comparative study*. Chemical Engineering Journal, 2005. 108(1-2): p. 179-185.
27. เดชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ = Adsorption processes, ก.ส.ม., 2552. .
28. <https://www.amazon.com/Introduction-Rock-Forming-Minerals-Howie-Zussman/dp/0903056275>.
29. Dias, M.V., et al., *Development of chitosan/montmorillonite nanocomposites with encapsulated alpha-tocopherol*. Food Chem, 2014. 165: p. 323-9.
30. Wu, Y., et al., *Adsorption of diethyl phthalate ester to clay minerals*. Chemosphere, 2015. 119: p. 690-696.
31. Wikipedia. Montmorillonite. [Online]. 2015. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Montmorillonite> [2015,October 23]
32. Ravi Kumar, M.N.V., *A review of chitin and chitosan applications*. Reactive and Functional Polymers, 2000. 46(1): p. 1-27.
33. Jalal, A.F., *Optimization of Chitin Extraction from Chicken Feet*. Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques, 2012. 03(05).
34. Annadurai, G., L.Y. Ling, and J.F. Lee, *Adsorption of reactive dye from an aqueous solution by chitosan: isotherm, kinetic and thermodynamic analysis*. J Hazard Mater, 2008. 152(1): p. 337-46.
35. Yuh-Shan, H., *Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions*. Scientometrics, 2004. 59(1): p. 171-177.
36. Hamidpour, M., et al., *Sorption of lead on Iranian bentonite and zeolite: kinetics and isotherms*. Environmental Earth Sciences, 2010. 62(3): p. 559-568.
37. Koble, R.A. and T.E. Corrigan, *Adsorption Isotherms for Pure Hydrocarbons*. Industrial & Engineering Chemistry, 1952. 44(2): p. 383-387.
38. Ho, Y.S. and G. McKay, *Kinetic Models for the Sorption of Dye from Aqueous Solution by Wood*. Process Safety and Environmental Protection, 1998. 76(2): p. 183-191.
39. Ho, Y.S. and G. McKay, *Pseudo-second order model for sorption processes*. Process Biochemistry, 1999. 34(5): p. 451-465.

40. Ho, Y.S., *Second-order kinetic model for the sorption of cadmium onto tree fern: a comparison of linear and non-linear methods*. Water Res, 2006. 40(1): p. 119-25.
41. Wu, F.-C., et al., *Characteristics of pseudo-second-order kinetic model for liquid-phase adsorption: A mini-review*. Chemical Engineering Journal, 2009. 151(1-3): p. 1-9.
42. Ho, Y.S., *Review of second-order models for adsorption systems*. J Hazard Mater, 2006. 136(3): p. 681-9.
43. Wang, M. and Y. Chen, *Generation and characterization of DOM in wastewater treatment processes*. Chemosphere, 2018. 201: p. 96-109.
44. Chiou, M.-S. and H.-Y. Li, *Equilibrium and kinetic modeling of adsorption of reactive dye on cross-linked chitosan beads*. Journal of Hazardous Materials, 2002. 93(2): p. 233-248.
45. Ainurofiq, A., I. Nurcahyo, and R. Yulianto, *Preparation, characterization and formulation of nanocomposite matrix na-montmorillonite intercalated medium molecular weight chitosan for theophylline sustained release tablet*. Vol. 6. 2014. 131-137.
46. Sokker, H.H., et al., *Adsorption of crude oil from aqueous solution by hydrogel of chitosan based polyacrylamide prepared by radiation induced graft polymerization*. J Hazard Mater, 2011. 190(1-3): p. 359-65.
47. Wang, S.F., et al., *Biopolymer chitosan/montmorillonite nanocomposites: Preparation and characterization*. Polymer Degradation and Stability, 2005. 90(1): p. 123-131.
48. Zhang, X. and R. Bai, *Mechanisms and kinetics of humic acid adsorption onto chitosan-coated granules*. Journal of Colloid and Interface Science, 2003. 264(1): p. 30-38.
49. Ho, Y.-S., T.-H. Chiang, and Y.-M. Hsueh, *Removal of basic dye from aqueous solution using tree fern as a biosorbent*. Process Biochemistry, 2005. 40(1): p. 119-124.

50. Chiou, M.S. and H.Y. Li, *Adsorption behavior of reactive dye in aqueous solution on chemical cross-linked chitosan beads*. *Chemosphere*, 2003. 50(8): p. 1095-1105.
51. Yuan, L.Y., et al., *High performance of phosphonate-functionalized mesoporous silica for U(VI) sorption from aqueous solution*. *Dalton Trans*, 2011. 40(28): p. 7446-53.
52. Wu, F.-C., R.-L. Tseng, and R.-S. Juang, *Role of pH in Metal Adsorption from Aqueous Solutions Containing Chelating Agents on Chitosan*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1999. 38(1): p. 270-275.
53. <https://www.slideshare.net/Kamyaparashar/chemical-kinetics-presentation>.
54. Chen, G. and M. Liu, *Adsorption of L-lysine from aqueous solution by spherical lignin beads: Kinetics and equilibrium studies*. Vol. 7. 2011.
55. Wang, S. and H. Li, *Kinetic modelling and mechanism of dye adsorption on unburned carbon*. *Dyes and Pigments*, 2007. 72(3): p. 308-314.
56. H. Hameed, B., A.L. Ahmad, and A.H. Ng, *Removal of Residual Oil from Palm Oil Mill Effluent Using Solvent Extraction Method*. *Jurnal Teknologi*, 2003. 38(1).

ภาคผนวก ก.

การคำนวณหาร้อยละของการกำจัดและการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลาย

สี้อมรีแอกทีฟเรด 120

1. การคำนวณหาร้อยละของการกำจัดสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ในสารละลาย

การคำนวณหาร้อยละของการกำจัดสี้อมรีแอกทีฟเรด 120

$$\% \text{Removal} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

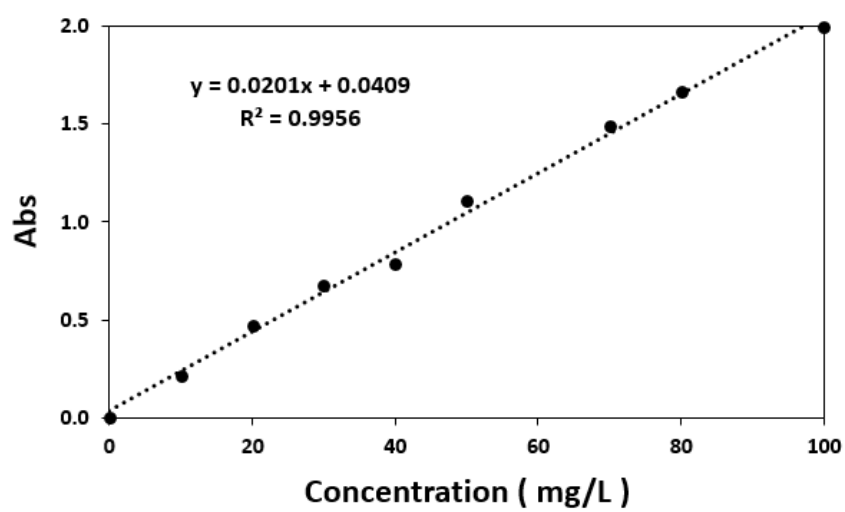
เมื่อ $\% \text{Removal}$ = ร้อยละของการกำจัดสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120

C_t = ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ ของสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120

2. การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 โดยใช้เทคนิคทางยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี โดยการนำสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ต้องการทราบความเข้มข้นของสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 เทียบกับสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน ซึ่งหาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับค่าของสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน ซึ่งใช้กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration Curve) สำหรับหาความเข้มข้นของสารละลายสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ต้องการวิเคราะห์



รูปที่ ก1 กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration Curve) ของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิศรุต ม่วงรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเทพมิตรศึกษา สุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสุราษฎร์พิทยา สุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในปีการศึกษา 2557 ได้เข้าร่วมกิจกรรมนำเสนองานวิจัยในงาน RRI University Forum ที่จัดขึ้นในวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2561 เวลา 08.30 – 16.00 น. ณ ห้องประชุม ชั้น M โรงแรมปทุมวันปริ้นเซส กรุงเทพมหานคร และเข้าร่วมการประชุมวิชาการ The 7th International Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference 2017 (ITICHe 2017) & The 27th National Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference 2017 (TICHe 2017) ในหัวข้อเรื่อง "REMOVAL OF DYE IN WATER FROM JOSS-PAPER PROCESS BY ADSORPTION ON CLAY MINERAL-CHITOSAN COMPOSITES" ณ โรงแรม Shangri-La Hotel จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 18-20 ตุลาคม 2560

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY