

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างแป้งแคทไอออนิกและมอนต์มอริลโลไนต์
เพื่อประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อม**

**PREPARATION OF NANOCOMPOSITES BETWEEN CATIONIC
STARCH AND MONTMORILLONITE FOR DYE ADSORPTION
APPLICATION**



**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

พ.ศ.2555

KMITL-2013-NT-M-001-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREPARATION OF NANOCOMPOSITES BETWEEN CATIONIC
STARCH AND MONTMORILLONITE FOR DYE ADSORPTION
APPLICATION**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE PROGRAM
IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **KMITL-2013-NT-M-001-002** มอนูญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้องานวิจัย	การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างแป้งแคโทไอออนิกและมอนต์-มอริลโลไนต์เพื่อประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อม
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศิรินันท์ เหล่าชูชัยสกุล
รหัสนักศึกษา	52670205
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.)
สาขาวิชา	นาโนวิทยาและเทคโนโลยี
ปีการศึกษา	2555
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ปยุตมา ศิริพันธ์โนน ศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างแป้งแคโทไอออนิก (CST) และมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) เพื่อใช้ในงานด้านการดูดซับสีย้อม โดย CST สังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LMW-ST) และแคโทไอออนิกมอนอเมอร์ (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล-N,N,N-ไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (CHPTAC)) จากนั้นทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนโดยใช้เทคนิคเจลดาคัท (Kjeldahl method) และตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR และ $^{13}\text{C-NMR}$ แล้วนำ CST ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (AGU):CHPTAC เป็น 1:2 และ 1:4 ซึ่งเรียกว่า CST12 และ CST14 ตามลำดับมาเตรียมวัสดุประกอบ CST-MMTs ทั้งหมด 6 ตัวอย่างคือ CST-MMT1, CST-MMT2, CST-MMT3, CST-MMT4, CST-MMT5 และ CST-MMT6 แล้วนำวัสดุประกอบ CST-MMTs มาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR, TGA, XRD, XRF พบว่าวัสดุประกอบ CST-MMTs ที่เตรียมขึ้นเป็นวัสดุประกอบนาโนแบบแทรกสอด (Intercalated Nanocomposites) นอกจากนี้ได้ทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับของสีย้อม 3 ชนิด คือ Basic Blue66 (BB66), Basic Yellow1 (BY1) และ Acid Red91 (AR91) ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อ 1 กรัมของตัวดูดซับ (MMT และ วัสดุประกอบนาโน CST-MMTs) โดยใช้เวลาในการดูดซับ 24 ชั่วโมง พบว่าวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมทั้ง 3 ชนิดสูงกว่า MMT นอกจากนี้ยังทำการศึกษาไอโซเทอมและจลนศาสตร์ของการดูดซับในระบบสีย้อมเบสิก โดยเลือกสี BY1 เป็นตัวแทนของสีย้อม

เบสิก และใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 เป็นตัวแทนของวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs และในระบบสีย้อมแอซิด (AR91) โดยใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT6 เป็นตัวแทน พบว่าไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม BY1 และสีย้อม AR91 เป็นไปตามสมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการดูดซับสีย้อมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs เป็นการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) และเป็น การดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) โดยสามารถคำนวณค่าความสามารถสูงสุดของการดูดซับของสีย้อม BY1 เท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับและ 111.11 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับสำหรับสีย้อม AR91 อีกทั้งจากการศึกษาจลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมทั้งสองพบว่าเป็นไปตามสมการ Pseudo-second order ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับของสีย้อมทั้ง 2 ชนิดของวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs ที่เตรียมขึ้นจาก CST และ MMT เป็นการดูดซับแบบ Chemical Adsorption

คำสำคัญ: แป้งแคะไอออนิก, มอนต์มอริลโลไนต์, วัสดุประกอบนาโน, สีย้อม, การดูดซับ

Thesis Title	Preparation of nanocomposites between cationic starch and montmorillonite for dye adsorption application
Student Name	Miss Sirinan Lawchoochaisakul
Student ID	52670205
Degree	Master of Science
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Academic Year	2012
Advisor	Asst. Prof. Dr. Pathavuth Monvisade
Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Punnama Siriphannon Prof. Dr. Jiti Nukaew

Abstract

This research studied the preparation of nanocomposites from montmorillonite (MMT) and cationic starch (CST) for dyes adsorption application. CSTs were synthesized by the reaction of low molecular weight starch (LMW-ST) with 3-chloro-2-hydroxypropyl trimethyl ammonium chloride (CHPTAC) as cationizing agent. The synthesized CSTs was determined for nitrogen content by Kjeldahl method and characterized by FTIR and ^{13}C -NMR techniques. CST12 and CST14 (molar ratio of anhydroglucose unit (AGU):CHPTAC are 1:2 and 1:4 respectively) were applied to prepare CST-MMT composites, i.e. CST-MMT1, CST-MMT2, CST-MMT3, CST-MMT4, CST-MMT5 and CST-MMT6. The composites were then characterized by FTIR, TGA, XRD, and XRF techniques and also subjected for dye removal testing (Basic Blue (BB66), Basic Yellow1 (BY1) and Acid red91 (AR91)). From the XRD result, it could be said that the CST-MMT composites have the intercalated nanostructure. The dye adsorption of MMT and CST-MMT nanocomposites were measured at initial concentration of 500 mg/L·g adsorbent for 24 hrs. The CST-MMT nanocomposites showed better adsorption efficiency than the neat MMT. The adsorption isotherms and the adsorption kinetic of dyes were investigated. The BY1 (CST-MMT1 was a representative for the CST-MMT nanocomposites) and AR91 (CST-MMT6 was a

respectively. It results that the adsorption isotherms of the both dyes of CST-MMT nanocomposites obeyed the Langmuir isotherm. This result suggested that the adsorption behavior of the dyes on the CST-MMT nanocomposites is chemical adsorption and, thus, the coverage of the dyes on the surface of the nanocomposites is monolayer. The maximum value for adsorption capacity of BY1 and AR91 on CST-MMT nanocomposites are 500 and 111.11 mg/g adsorbent, respectively. The adsorption kinetics of for both BY1 and AR91 on the CST-MMT nanocomposite fitted the Pseudo-Second order, implying the chemical adsorption of the dyes on the CST-MMT nanocomposites.

Keywords: Cationic Starch, Montmorillonite, Nanocomposites, Dyes, Adsorption



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือ คำแนะนำ คำปรึกษาและความเอาใจใส่ของอาจารย์ที่ปรึกษาได้แก่ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์ โนน ศ.ดร.จิต หนูแก้ว ดร.ปีติพร ถนอมงาม ดร.คารินี พรหมโยธิน และ ดร.วิทวัส มิ่งวานิช ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง และอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีและศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ต่างๆ ท่านที่เอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนเครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่เอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยและการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบ GPC

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบ XRF

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกท่านสำหรับกำลังใจ ความหวังใจ ความปรารถนาดี และทุกๆ ความช่วยเหลือในขณะทำการวิจัย ทำให้งานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับกำลังใจ ความรัก ความเอาใจใส่จากบิดามารดา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบให้ทุกๆ ความปรารถนาดีและความหวังใจจากทุกๆ ท่านที่มีต่อผู้เขียนตลอดมา

ศรินันท์ เหล่าชูชัยสกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	XIII
สารบัญรูปภาพ	XVI
สัญลักษณ์และคำย่อ	XIX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 โครงสร้างของแป้ง	6
2.2 การใช้แป้งตัดแปรทางเคมีและกายภาพในอุตสาหกรรม	8
2.2.1 แป้งเม็ดและแป้งฝุ่น	8
2.2.2 แป้งพรีเจลาติไนซ์	8
2.2.3 แป้งที่ตัดแปรโดยใช้กรด	9
2.2.4 แป้งตัดแปรโดยเอนไซม์	9
2.2.5 White dextrins	9
2.2.6 Yellow dextrin	9
2.2.7 แป้งออกซิไดซ์	10
2.2.8 แป้งอีเทอร์และเอสเทอร์	10
2.2.9 Cationic starch ethers	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 แร่ดินเหนียว	11
2.3.1 ซิลิเกตเคลย์	11
2.3.2 โครงสร้างและชนิดของซิลิเกตเคลย์	13
2.3.3 โครงสร้างผลึกของซิลิเกตเคลย์	14
2.3.4 การคัดแปรแรมอนต์มอริลโลไนต์	18
2.3.5 วัสดุนาโนคอมโพสิต	19
2.3.5.1 คอมโพสิตทั่วไป	19
2.3.5.2 นาโนคอมโพสิตแบบแทรกสอด	19
2.3.5.3 นาโนคอมโพสิตแบบแยกจากกัน	20
2.3.6 สมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนในดิน	20
2.3.6.1 การแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน	20
2.3.6.2 ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก	21
2.3.6.3 ปัจจัยที่ควบคุมค่า CEC	22
2.3.6.4 ประโยชน์และความสำคัญของการแลกเปลี่ยนแคทไอออนในดิน	23
2.4 สีย้อม	24
2.4.1 ประวัติสีย้อม	24
2.4.2 ความหมายของสีย้อม	25
2.4.3 ประเภทของสีย้อม	27
2.4.3.1 การจำแนกตามลักษณะการเกิด	27
2.4.3.2 การจำแนกตามการแตกตัวให้ประจุ	28
2.4.3.3 การจำแนกตามเส้นใยที่ใช้ย้อม	28
2.4.3.4 การจำแนกตามหมู่ช่วยละลาย	28
2.4.3.5 การจำแนกตามชื่อสีที่เรียก	28
2.4.3.6 การจำแนกตามโครงสร้างทางเคมีของสี	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3.7 การจำแนกตามสีที่มองเห็น	28
2.4.3.8 การจำแนกสีเชื่อมตามการนำไปใช้	28
2.4.4 อันตรายจากสีเชื่อม	32
2.4.4.1 ความเป็นพิษของสีเชื่อม	32
2.4.4.2 สีของน้ำเสีย	33
2.5 การบำบัดน้ำเสีย	33
2.5.1 ประเภทของการบำบัดน้ำเสีย	33
2.6 กระบวนการดูดซับ	38
2.6.1 กลไกของกระบวนการดูดซับ	38
2.6.2 ประเภทของการดูดซับ	38
2.6.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ	40
2.6.4 สมการไอโซเทอมของการดูดซับ	40
2.6.5 แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับ	42
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	44
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	49
3.1 สารเคมี	49
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	49
3.3 วิธีการทดลอง	51
ตอนที่ 1 การสังเคราะห์เป็้่งน้ำหน้กโมเลกุลต่ำ	51
ตอนที่ 2 การสังเคราะห์เป็้่งแคทไอออนิก	51
ตอนที่ 3 การคัดแปร โครงสร้างมอนค้่มอริลโตไนค้ด้วยสารละลายเป็้่งแคทไอออนิก (CST-MMT)	53
ตอนที่ 4 การทดสอบและการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์	54
4.1 การทดสอบความสามารถในการละลายน้ำของเป็้่งน้ำหน้กโมเลกุลต่ำ	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โมเลกุลต่ำและเป็้่งแคทไอออนิก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การทดสอบหาปริมาณไนโตรเจนและค่าองศาการแทนที่ของแป้งแคทไอออนิกโดยใช้เทคนิคเจลดาคาล์	55
4.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ด้วยเทคนิค XRD	56
4.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ CST, MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ด้วยเทคนิค TGA	56
4.5 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ CST, MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ด้วยเทคนิค FTIR	56
ตอนที่ 5 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ด้วยเทคนิค UV – VIS spectrophotometry	57
ตอนที่ 6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีของ BY1 และ AR91	58
6.1 การศึกษาระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT	58
6.2 การศึกษาระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT	58
6.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสีของ BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT	59
6.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสีของ BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT	60
ตอนที่ 7 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีของ BY1 และ AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	62
4.1 การวิเคราะห์แป้งน้ำหนักริมเลกุลต่ำ (LMW-ST)	62
4.1.1 ผลการทดสอบความสามารถในการละลายน้ำของแป้งน้ำหนักริมเลกุลต่ำ	62
4.1.2 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักริมเลกุลเฉลี่ยด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC) ของแป้งมันสำปะหลังและ แป้งน้ำหนักริมเลกุลต่ำ (LMW-ST)	63
4.2 การวิเคราะห์แป้งแคทไอออนิก (CST)	64
4.2.1 การทดสอบความสามารถในการละลายน้ำของแป้งแคทไอออนิก	64
4.2.2 การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนและค่าองค์การแทนที่ของ แป้งแคทไอออนิกโดยใช้เทคนิคเจลดาคาล์	66
4.2.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์แป้งน้ำหนักริมเลกุลต่ำและ แป้งแคทไอออนิกด้วยเทคนิค FTIR	67
4.2.4 การวิเคราะห์แป้งแคทไอออนิกด้วยเทคนิค $^{13}\text{C-NMR}$	70
4.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอนอเมอร์โกลีโนต์ (MMT) และ วัสดุประกอบนาโน CST-MMT	71
4.3.1 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD	71
4.3.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF	75
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการสลายตัวขององค์ประกอบด้วยเทคนิค TGA	77
4.3.4 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR	79
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม	81
4.4.1 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1	81
4.4.2 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BB66 และ BY1 ที่ความเข้มข้น 500 mg/L โดยใช้ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT เป็นตัวดูดซับ	86
4.4.4 ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม AR91 ที่ความเข้มข้น 500 mg/L โดยใช้ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT เป็นตัวดูดซับ	87
4.4.5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT	88
4.4.6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT	90
4.5 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม	92
4.5.1 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT	92
4.5.2 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT	94
4.5.3 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT	97
4.5.4 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT	99
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	102
5.1 สรุปงานวิจัย	102
5.2 ข้อเสนอแนะ	103
บรรณานุกรม	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	107
ภาคผนวก ข	110
ภาคผนวก ค	113
ภาคผนวก ง	115
ภาคผนวก จ	120
ภาคผนวก ฉ	125
ภาคผนวก ช	134
ภาคผนวก ซ	137
ประวัติผู้จัดทำ	141



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin)	6
2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของดินเหนียวซิลิเกตบางชนิด	17
2.3 ค่า CEC ของดินแต่ละชนิด	22
2.4 เปรียบเทียบสมบัติระหว่างสีย้อมธรรมชาติและสีย้อมสังเคราะห์	27
2.5 การเปรียบเทียบความแตกต่างของกระบวนการดูดซับทางกายภาพและเคมี	39
3.1 การสังเคราะห์ CST	52
3.2 การสังเคราะห์วัสดุประกอบนาโน CST-MMT	54
4.1 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยด้วยเทคนิค GPC	64
4.2 ผลทดสอบการละลายของ CST	65
4.3 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจน (%N)	66
4.4 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ MMT และ CST-MMT ด้วยเทคนิค XRD	73
4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ด้วยเทคนิค XRF	76
4.6 ผลการวิเคราะห์ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ด้วยเทคนิค TGA	77
4.7 ค่าคงที่ไอโซเทอมของสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชซ์ของการดูดซับสีย้อม BY1	94
4.8 ค่าคงที่ไอโซเทอมของสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชซ์ของการดูดซับสีย้อม AR91	96
4.9 ค่าคงที่จลนศาสตร์ของ Pseudo-First order และ Pseudo-Second order ของการดูดซับสีย้อม BY1	99
4.10 ค่าคงที่จลนศาสตร์ของ Pseudo-First order และ Pseudo-Second order ของการดูดซับสีย้อม AR91	101
ก.1 ค่าน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ ของ ST และ LMW-ST ด้วยเทคนิค GPC	110
ข.1 ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไทเทรตเพื่อหาปริมาณไนโตรเจนที่อยู่ใน CST	112
ค.1 ค่า 2θ ของ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ที่ได้จาก XRD pattern	115

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BB66 ที่ λ_{\max} เท่ากับ 615 นาโนเมตร	122
จ.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BB66 ที่ λ_{\max} เท่ากับ 412 นาโนเมตร	123
จ.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BB66 ที่ λ_{\max} เท่ากับ 514 นาโนเมตร	124
ฉ.1 ผลการดูดซับสีย้อม BY1 ที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1	127
ฉ.2 ผลการดูดซับสีย้อม AR91 ที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6	128
ฉ.3 ผลการดูดซับสีย้อม BB66 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร	128
ฉ.4 ผลการดูดซับสีย้อม BY1 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร	129
ฉ.5 ผลการดูดซับสีย้อม AR91 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร	129
ฉ.6 ผลการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	130
ฉ.7 ผลการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	130
ฉ.8 ผลการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT3 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	131
ฉ.9 ผลการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT4 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	131
ฉ.10 ผลการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	132
ฉ.11 ผลการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	132
ฉ.12 ผลการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT 4	133

เอกสารที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ฉ.13 ผลการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	133
ฉ.14 ผลการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	134
ช.1 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ในการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1	136
ช.2 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมของฟรุนดลิชในการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1	136
ช.3 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ในการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6	137
ช.4 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมของฟรุนดลิชในการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6	137
ช.1 พารามิเตอร์แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-First order ในการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1	139
ช.2 พารามิเตอร์แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-Second order ในการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1	139
ช.3 พารามิเตอร์แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-First order ในการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6	140
ช.4 พารามิเตอร์แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-Second order ในการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6	140

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
2.1 ส่วน reducing end ในโมเลกุลของแป้ง	7
2.2 โครงสร้างของอะไมโลส (Amylose) ในแป้ง	7
2.3 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน (Amylopectin) ในแป้ง	7
2.4 กลไกในการย่อยสลายและการกลับมาสร้างพันธะใหม่ในระหว่างการผลิต Dextrin	10
2.5 โครงสร้างของซิติกาเตระซีดรัล	13
2.6 โครงสร้างของอลูมินาออกตะซีดรัล	14
2.7 แบบจำลองแสดง โครงสร้างพื้นฐานของ โครงสร้างเค โอลิไนต์	14
2.8 แบบจำลองพื้นฐาน โครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์	15
2.9 โครงสร้างอิตไลต์	16
2.10 แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ยึดแผ่น โครงสร้างของเคลย์	18
2.11 แบบจำลองประจุบวกบนพื้นผิวเคลย์	19
2.12 ชนิดของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต	20
2.13 การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง H^+ และ Na^+ ของแร่ดินเหนียว	21
2.14 การแลกเปลี่ยนไอออนของดิน	21
2.15 โครงสร้างสีย้อม Acid Red 91	29
2.16 โครงสร้างสีย้อม Basic Yellow 1	30
2.17 โครงสร้างสีย้อม Basic Blue 66	30
2.18 โครงสร้างของ 2-naphthylamine	32
2.19 ไอโซเทอมของการดูดซับพื้นฐาน	40
4.1 ปฏิกริยาการสังเคราะห์แป้งแคทไอออนิก (CST)	67
4.2 FTIR spectra ของการดูดกลืนคลื่นแสงของแป้งน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LMW-ST) และแป้งแคทไอออนิก (CST)	69
4.3 ^{13}C -NMR spectra ของแป้งแคทไอออนิก (CST)	70

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 XRD pattern ของ MMT และ CST-MMT	72
4.5 แบบจำลองการแทรกตัวของแป้งแคทไอออนิก (CST) ในมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT)	74
4.6 แบบจำลองการแทรกตัวของ CST ใน MMT	78
4.7 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR	80
4.8 ค่าร้อยละของการกำจัดสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 กับเวลา	83
4.9 ค่าร้อยละของการกำจัดสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6 กับเวลา	84
4.10 ร้อยละการกำจัดสีย้อม BB66 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร	85
4.11 ร้อยละการกำจัดสีย้อม BY1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร	87
4.12 ร้อยละการกำจัดสีย้อม AR91 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร	88
4.13 การดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT 1, CST-MMT2 และ CST-MMT3 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	89
4.14 การดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT 1, CST-MMT2 และ CST-MMT3 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	90
4.15 การดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT4, CST-MMT5 และ CST-MMT6 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	91
4.16 ความสามารถในการดูดซับสีย้อม BY1 กับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม BY1 pH~3-6 โดยใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 เป็นตัวดูดซับ	92
4.17 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1	93
4.18 ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชซ์ของการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1	93
4.19 ความสามารถในการดูดซับสีย้อม AR91 กับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม AR91 pH~3-6 โดยใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 เป็นตัวดูดซับ	95
4.20 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6	95

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ไอโซเทอมแบบฟรอนคลิกซ์ของการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6	96
4.22 แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-first order ในการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1	98
4.23 แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-second order ในการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1	98
4.24 แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-first order ในการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6	100
4.25 แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-second order ในการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6	100
ก.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC ของ ST	109
ก.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC ของ LMW-ST	109
ง.1 เทอร์โมแกรมของ MMT	117
ง.2 เทอร์โมแกรมของ CST12	117
ง.3 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1	118
ง.4 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT2	118
ง.5 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT3	119
ง.6 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT4	119
ง.7 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT5	120
ง.8 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6	120
จ.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม BB66	124
จ.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม BY1	125
จ.3 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม AR91	125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์และคำย่อ

CST	: Cationic Starch
MMT	: Montmorillonite
BB66	: Basic Blue66
BY1	: Basic Yellow1
AR91	: Acid Red91
GPC	: Gel permeation chromatography
Mn	: Number average molecular weight
Mw	: Weight average molecular weight
PDI	: Polydispersity index
TGA	: Thermogravimetric analyze
XRD	: X-ray diffractrometer
XRF	: X-ray fluorescence spectrometer
FTIR	: Fourier transform infrared spectrophotometer
NMR	: Nuclear magnetic resonance spectrometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อประเทศไทย เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้ให้กับประเทศไทยเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดน้ำเสียมากที่สุดอุตสาหกรรมหนึ่ง จากสารเคมีหลักที่ใช้ในการย้อม คือ สีย้อม (Dyes) และสารช่วยย้อม (Auxiliaries) เนื่องจากเส้นใยสิ่งทอแต่ละชนิดมีสมบัติการย้อมติดสีแตกต่างกันและในการย้อมสีแต่ละประเภทจำเป็นต้องใช้สารช่วยที่แตกต่างกันด้วย สีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีหลายประเภทหลักๆ ได้แก่ สีไครเร็กซ์ สีรีแอคทีฟ สีแว็ต สีซัลเฟอร์ สีเอโซอิก สีดีสเพิร์ส สีเบสิก และสีแอซิด สีย้อมที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเอโซเป็นกลุ่มที่ใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมการย้อมสีสิ่งทอแต่พบว่ากลุ่มสีดังกล่าวมีสารที่ระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อมนุษย์ สหภาพยุโรปกำหนดห้ามใช้สีย้อมที่ใส่สารต้องห้ามในปริมาณที่มากกว่า 30 ppm สำหรับผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่สัมผัสกับร่างกายโดยตรง โดยสีย้อมที่มีสารฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง ก่อให้เกิดสารประกอบ absorbable organic halogen (AOX) ซึ่งเป็นสารที่สลายตัวได้ยากมาก ทำให้เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนสีย้อมที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง โลหะหนักเหล่านี้ อาจเจือปนออกมากับน้ำทิ้งได้ โดยจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับการย้อมติดของสีย้อมเส้นใย ซึ่งหากไม่มีการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อมขึ้น

สำหรับอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอที่อยู่ในรูปเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปที่สามารถนำไปผลิตหรือจำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคต่อไปได้ กระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้นต้องใช้วัตถุดิบที่เป็นสารเคมี ไม่ว่าจะเป็นสีย้อม กรด ด่าง สารปรับปรุงคุณภาพต่าง ๆ เช่น สารตกแต่ง สารฟอกขาว เป็นต้น และสิ่งที่ไม่ได้ก็คือน้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมที่ต้องใช้ในปริมาณที่มาก เพื่อให้ได้ผ้าหรือเส้นด้ายที่มีสีสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม ตลอดจนความพอใจ

ความรู้สึกของผู้บริโภค ดังนั้นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเกิดขึ้นจากน้ำและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจึงมีทั้งสารพิษ สารแขวนลอย น้ำมัน ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และของเสียไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ชนิดต่างๆ ปนเปื้อนออกมา นอกจากนี้ยังมี อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง มีสภาพเป็นด่าง มีกลิ่นที่แรงและยังทำให้สมดุลทางธรรมชาติเสียไปอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าสีที่พบในน้ำเสียซึ่งเป็นอนุภาคคอลลอยด์จะไปบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านลงสู่ ผิวน้ำ ส่งผลกระทบให้พืชที่อยู่ในน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ส่งผลให้ปริมาณก๊าซออกซิเจน ในน้ำลดลง ซึ่งมีผลให้สิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อยู่ในน้ำตายได้ ดังนั้นก่อนที่จะปล่อยน้ำเสีกลงสู่แหล่งน้ำ สาธารณะควรจะต้องมีกระบวนการกำจัดหรือบำบัดก่อนเพื่อลดความเป็นพิษเนื่องมาจากสี ใน ปัจจุบันมีการกำหนดข้อบังคับเกี่ยวกับการปล่อยน้ำเสียซึ่งเป็นที่ยอมรับในหลายๆ ประเทศ อาทิเช่น สมบัติทางเคมีของน้ำทิ้ง ระดับของสีในน้ำทิ้ง เป็นต้น ซึ่งการบำบัดน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมมีอยู่ หลากหลายวิธี เช่น การบำบัดด้วยโอโซน (Ozone Treatment) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) การกรองด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane Filtration) เป็นต้น แต่วิธีการเหล่านี้มีความยุ่งยากและค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงมีการ นำเทคโนโลยีที่ง่ายและประหยัดมาใช้ คือการนำวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก มาประยุกต์ใช้ในงานดูด ซับเพื่อให้ประหยัดต้นทุนและยังคงประสิทธิภาพสูง

ในธรรมชาติมีวัสดุหลายประเภทสามารถใช้งานด้านการดูดซับ เช่น แร่ดินเหนียว เนื่องจากแร่ดินเหนียวสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกและไอออนลบได้ โดยลักษณะของแร่ดิน เหนียวเป็นแผ่นบางประกบซ้อนกันอยู่ จึงมีคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการที่สำคัญคือ มีพื้นที่ผิว ต่อหน่วยน้ำหนักสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากรูปร่างที่เป็นแผ่นบางๆ ซ้อนกันเป็นชั้น ทำให้พื้นที่ผิวของ แร่ดินเหนียวเป็นแหล่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ได้ คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ การ มีประจุลบอยู่บริเวณพื้นผิวเป็นจำนวนมาก ทำให้สามารถยึดไอออนที่มีประจุบวกหรือที่เรียกว่า แคตไอออน (Cation) ของธาตุต่างๆ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ เป็นต้นไว้ที่บริเวณพื้นผิวได้ ไอออนเหล่านี้จะถูกยึดเอาไว้อย่างหลวมๆ และสามารถถูกไอออนบวกชนิดอื่นเข้ามาแทนที่ได้ กระบวนการแลกเปลี่ยนนี้ เรียกว่า กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) ส่วน กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวกจะเรียกว่า Cation Exchange

ในงานวิจัยนี้จึงมีการนำแร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์มาใช้เพื่องานดูดซับสีข้อม โดยนำแป้งมันสำปะหลังมาคัดแปรให้เป็นแป้งแคตไอออนิกก่อน แล้วนำมอนต์มอริลโลไนต์มา ปรับปรุงด้วยแป้งแคตไอออนิกที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งเป็นแป้งที่มีประจุบวก จึงเกิดการแลกเปลี่ยน

ไอออนบวก (Cation Exchange) ระหว่างแป้งแคตไอออนิกกับคอลลอยด์ประจุบวกที่อยู่ในแต่ละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ชนของมอนต์มอริลโลไนต์ แล้วนำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับสีข้อมประเภทสีเบสลิค
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Basic Dyes) และสีแอซิด (Acid Dyes) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบพื้นฐาน เนื่องจากมีราคาถูกและสามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะสามารถเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีสีข้อมเงิปนได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะดวก ราคาถูก ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์ในการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อม รวมไปถึงอุตสาหกรรมอื่นๆ ด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์วัสดุประกอบนาโนระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) และแป้งแคทไอออนิก (CST)
2. เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสีข้อมประเภทสีเบสิก (Basic Blue66; BB66 และ Basic Yellow1; BY1) และสีแอซิด (Acid Red91; AR91) โดยใช้วัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมในการดูดซับสีข้อมของวัสดุประกอบนาโนโดยใช้ไอโซเทอมของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และไอโซเทอมของฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ตัดสายโซ่ของแป้งมันสำปะหลัง (LMW-ST)
2. สังเคราะห์แป้งแคทไอออนิก (CST) จากแป้งมันสำปะหลังที่ตัดสายโซ่โมเลกุลแล้ว (LMW-ST) โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างหน่วยแอนไฮโดรคลอไรด์ (AGU): 3-chloro-2-hydroxypropyl-N,N,N trimethylammonium chloride (CHPTAC) เป็น 1:2 (CST12) และ 1:4 (CST14)
3. ตรวจสอบคุณสมบัติของ CST12 และ CST14 ด้วยเทคนิค Kjeldahl Method, $^{13}\text{C-NMR}$ และ FTIR
4. เตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์และแป้งแคทไอออนิก (CST-MMT)
5. ตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT โดยใช้เทคนิคต่างๆ เช่น XRD, XRF, TGA และ FTIR
6. ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีข้อมประเภทสีเบสิก (BB66 และ BY1) และสีแอซิด (AR91)
7. ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีข้อมเบสิก (BY1) และสีข้อมแอซิด (AR91)
8. ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีข้อมเบสิก (BY1) และสีข้อมแอซิด (AR91)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. นำแป้งมันสำปะหลังและเคลย์ซึ่งเป็นวัตถุดิบภายในประเทศและราคาถูกมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
2. สามารถพัฒนากระบวนการดูดซับสีย้อมประเภทสีเบสิก (BB66 และ BY1) และสีแอซิด (AR91) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้
3. ทราบถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อมประเภทสีเบสิก (BB66 และ BY1) และสีแอซิด (AR91) ของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกคัดแปรด้วยแป้งแคทไอออนิก
4. เป็นทางเลือกในการเลือกตัวดูดซับเพื่อใช้ในงานด้านการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ
5. เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนา ออกแบบ ในระบบบำบัดน้ำเสียจริงในอนาคต
6. เพื่อเป็นองค์ความรู้ใหม่ในการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดสีย้อมโดยใช้วัสดุประกอบนาโนระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์และแป้งแคทไอออนิก



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

อุตสาหกรรมเป็งมันสำปะหลัง เป็นอุตสาหกรรมทางการเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย นิยมปลูกมากทางภาคอีสานตอนใต้และภาคตะวันออกของประเทศ เนื่องจากมันสำปะหลังเป็นพืชที่ทนต่อความแห้งแล้งได้ดี ในปัจจุบันมีโรงงานผลิตเป็งมันสำปะหลังมากกว่า 50 โรงงานสามารถผลิตเป็งมันสำปะหลังได้ประมาณ 2 ล้านตันต่อปี และร้อยละ 54 ของเป็งมันสำปะหลังที่ผลิตได้จะถูกลงไปยั้งต่างประเทศ ประโยชน์ของเป็งมันสำปะหลังนอกจากจะนำมาใช้ในการบริโภคแล้ว ยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในหลายๆ อุตสาหกรรมได้อีก เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น

มันสำปะหลังเป็นพืชล้มลุกประเภทหนึ่ง แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดขมและชนิดหวาน โดยชนิดขมไม่เหมาะสำหรับนำมาบริโภคโดยตรงเนื่องจากมีกรดไฮโดรไซยานิกสูงเป็นพิษต่อร่างกาย แต่เหมาะสำหรับนำมาแปรรูปเป็นมันอัดเม็ดหรือมันเส้นเพื่อเลี้ยงสัตว์หรือผลิตเป็นเป็งมันเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ส่วนชนิดหวานส่วนใหญ่ปลูกไว้เพื่อการบริโภค

ในการผลิตเป็งมันสำปะหลัง ส่วนที่ถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการนำมาสกัดเอาเป็งออกจากเซลล์ของพืช คือ รากของมันสำปะหลังซึ่งมีลักษณะเป็นรากฝอย (Fibrous Root System) แต่รากมีจำนวนน้อยเส้นและแผ่กระจายไม่ลึกจากผิวดินรวมทั้งมีการสะสมอาหารทำให้มีลักษณะโตกว่ารากธรรมดา โดยรากมันส่วนนี้ เราจะเรียกว่า หัวมันสำปะหลัง ซึ่งเป็งมันสำปะหลังเป็นเป็งที่ได้จากหัวมันสำปะหลัง ประกอบด้วยเม็ดเป็งตั้งแต่ 2-8 เม็ดมารวมตัวกัน แต่ละเม็ดจะมีความยาวตั้งแต่ 5-35 ไมครอน เม็ดเป็งมีลักษณะเป็นรูปไข่ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออกและผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านแบนไม่สม่ำเสมอกัน เม็ดเป็งเหล่านี้จะแสดงให้เห็นรอยบวมอย่างชัดเจน และในบางครั้งอาจเห็นชั้นของเป็งด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

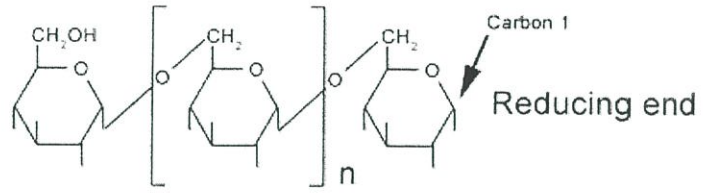
2.1 โครงสร้างของแป้ง [1]

แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ มีหน่วยพื้นฐานเป็น Anhydroglucose Unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glycosidic Linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป โดยทางด้านปลายโมเลกุลของแป้งจะมีคาร์บอนซึ่งจับกับออกซิเจนสองอะตอม เรียกว่า “Anomeric Carbon” เป็นส่วนที่ไม่เกาะกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลายที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง Reducing End 1 ตำแหน่ง (ดังรูปที่ 2.1) โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส (Amylose) ซึ่งมีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย และอะไมโลเพกติน (Amylopectin) ซึ่งมีขนาดใหญ่ มีกิ่งก้านสาขามากมาย อะไมโลสและอะไมโลเพกตินมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1

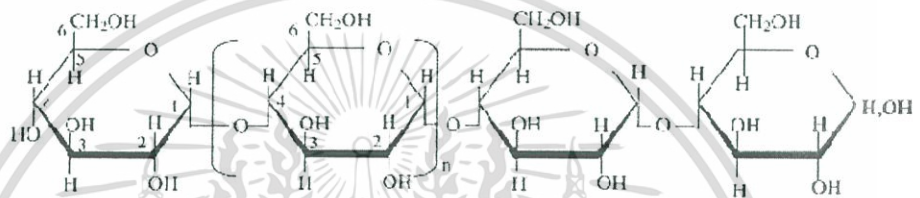
ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกติน (Amylopectin) [2]

อะไมโลส	อะไมโลเพกติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -D-(1,4)-Glycosidic Linkage	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α -D-(1,4)-Glycosidic Linkage และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ (1,6)-Glycosidic Linkage
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 10-60 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อย	3. ละลายน้ำได้ดี
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

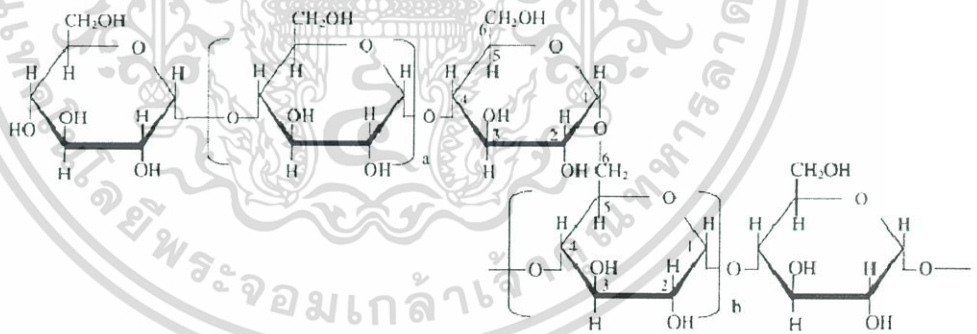
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ส่วน Reducing End ใน โมเลกุลของแป้ง [3]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส (Amylose) ในแป้ง [4]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน (Amylopectin) ในแป้ง [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การใช้แป้งดัดแปรทางเคมีและกายภาพในอุตสาหกรรม [5]

การใช้แป้งในผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่จะใช้แป้งเพื่อเป็นสารให้ความข้นหนืด และผู้บริโภคจะรับประทานแป้งในรูปของแป้งสุก แต่ในการใช้แป้งในอุตสาหกรรมอื่นๆ ลักษณะการใช้จะแตกต่างจากการใช้ในอาหารกล่าวคือ แป้งจะถูกทำให้สุกก่อน จากนั้นจะทำให้แป้งอยู่ในรูปของฟิล์มหรือสารเคลือบ เช่น การใช้แป้งสุกเคลือบกระดาษหรือเส้นด้ายในสิ่งทอ หรือใช้แป้งในรูป Adhesive Film เพื่อเชื่อมพื้นผิวเข้าด้วยกัน ความแตกต่างที่เด่นชัดอีกประการคือ การใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ นอกเหนือจากอาหารจะมีการใช้แป้งที่ผ่านการดัดแปรที่มีความหลากหลาย ตัวอย่างเช่น

2.2.1 แป้งเม็ดและแป้งฝุ่น (Pearl and Powdered Starches)

ลักษณะทางกายภาพของแป้งเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการนำไปใช้งาน ในบางกรณีอาจต้องการใช้แป้งในรูปที่เป็นเม็ดหรือที่เกาะตัวกันเป็นก้อนเล็กๆ เนื่องจากมีข้อดีคือกระจายตัวได้เร็วในน้ำ ส่วนแป้งฝุ่นมีการใช้งานคือ

- ใช้เพื่อเป็นตัวหล่อลื่นในแม่พิมพ์ต่างๆ
- ใช้ในเครื่องสำอางค์
- ใช้เพื่อเคลือบกระดาษเพื่อป้องกันการซึมของหมึก
- ใช้เคลือบกระดาษที่ไม่มีคาร์บอน

การใช้ในลักษณะนี้ต้องการแป้งฝุ่นที่เป็นเม็ดแป้งขนาดเล็ก สามารถกระจายตัวเป็นเม็ด (Granule) เดี่ยวๆ ในน้ำได้ดี ไม่มีส่วนที่จับกันเป็นก้อนเจือปนอยู่ เช่น แป้งข้าวเจ้า เป็นต้น

2.2.2 แป้งพรีเจลาติไนซ์ (Pregelatinized Starches)

แป้งพรีเจลาติไนซ์เป็นแป้งดัดแปรแบบง่าย สามารถทำได้โดยการให้ความร้อนกับแป้งที่แขวนลอยในน้ำ จากนั้นทำให้แห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray-dryer) ซึ่งแป้งพรีเจลาติไนซ์เป็นแป้งที่สะดวกสำหรับผู้ใช้ที่ไม่มีอุปกรณ์ในการเตรียมแป้งสุก ตัวอย่างการใช้งาน เช่น

- ใช้เป็น Bodying Agent ในการขูดเจาะน้ำมัน
- ใช้เป็น Sizing Agent ในสิ่งทอ
- ใช้เป็น Binder
- แป้งพรีเจลาติไนซ์จะมีความหนืดและความสามารถในการยึดติด (Adhesiveness)

เอกสารตัวแก้วแป้งสุกที่เตรียมใหม่ ๆ กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 แป้งที่ดัดแปรโดยใช้กรด (Acid-Modified Thin-Cooking Starches)

เตรียมโดยใช้กรดอินทรีย์เจือจางทำปฏิกิริยากับแป้งในน้ำอุ่น ซึ่งทำให้พันธะบางส่วนในเม็ดแป้งถูกทำลาย ทำให้ได้แป้งที่มีคุณสมบัติดังนี้

- มีความหนืดลดลงทำให้สามารถใช้แป้งในความเข้มข้นที่สูงขึ้นประมาณ 5 เท่าของแป้งที่ไม่ดัดแปร
- มีความหนืดของแป้งสุกต่ำและเกิดการแตกสายโซ่ได้ง่าย

น้ำแป้งที่มีความเข้มข้นสูงพบว่าสามารถเกิดการคืนตัวสูงมากและเริ่มเกิดที่อุณหภูมิ 95 °C ทั้งนี้อาจเนื่องจากการจับตัวกันของโมเลกุลแป้งอยู่ใกล้ชิดกันมาก แป้งดัดแปรด้วยกรดมักใช้เป็นสารเคลือบ เช่น ในสิ่งทอจะใช้เคลือบเส้นด้ายเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและป้องกันการพันกันของด้ายระหว่างการทอ นอกจากนี้แป้งดัดแปรด้วยกรดมีคุณสมบัติในการละลายได้ดีและให้ความหนืดต่ำจะทำให้ได้ฟิล์มที่แข็งแรงเคลือบบนผิวด้าย

2.2.4 แป้งดัดแปรโดยเอนไซม์ (Enzyme-Thinned Starches)

เตรียมได้โดยใช้เอนไซม์ α -Amylase ในการย่อยแป้งสุกทำให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ทำให้ความหนืดลดลงและละลายได้ง่ายขึ้น มีการใช้แป้งดัดแปรนี้ในอุตสาหกรรมกระดาษและอุตสาหกรรมสิ่งทอ

2.2.5 White Dextrins

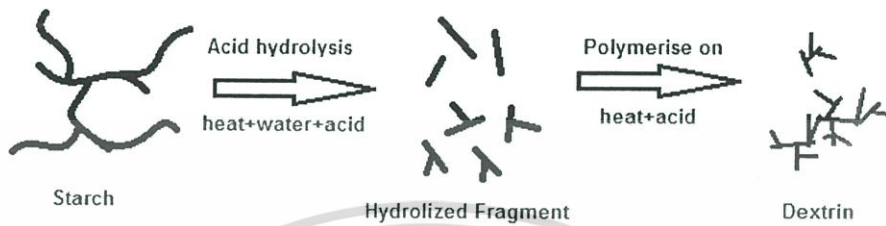
มีลักษณะคล้ายกับแป้งดัดแปรด้วยกรดแต่ระดับการย่อยสลายพันธะกลูโคซิดิกจะสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะละลายได้ดีในน้ำเย็น การเตรียม White Dextrin จะไม่ทำในสภาพที่เป็นสารแขวนลอยของแป้ง เนื่องจากจะมีการสูญเสียแป้งบางส่วนไปในขณะกรอง แต่จะให้ความร้อนกับแป้งในสภาพแห้งโดยมีกรดอินทรีย์อยู่ด้วยและทำในภาชนะที่มีการหมุนวนตลอดเวลา แป้ง White Dextrin ที่ได้จะมีความหนืดต่ำและละลายได้อย่างสมบูรณ์ในน้ำร้อน โดยการใช้งานหลักๆ คือใช้เป็น Paste Adhesives

2.2.6 Yellow dextrin

วิธีการจะเตรียมคล้ายๆ กับ White dextrin แต่ใช้อุณหภูมิสูงกว่า เมื่อความเข้มข้นลดลงต่ำกว่า 3% จะไม่เกิดการตัดพันธะอีกต่อไป สิ่งที่เกิดขึ้นคือโมเลกุลที่ถูกตัดออกจะกลับมารวมตัวกันมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านเป็นพุ่มๆ ดังรูปที่ 2.4 โดยการสร้างพันธะใหม่จะเป็นแบบสุ่มคือเกิดได้ทั้งที่

ตำแหน่ง 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 และ 1-6 พบว่า Yellow dextrin ที่ได้มีขนาดโมเลกุล (DP) ใหญ่กว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โมเลกุลแป้งเดิม แต่ปริมาตรของโมเลกุลเล็กกว่ามากเนื่องจากการจัดตัวกันแน่นและเป็นพุ่มไม่ว่ากรณีใดๆ พงสน อีทิงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนืดต่ำมาก Yellow dextrin จะไม่เกิดการคืนตัวหรือคืนตัวน้อยมากแม้ในสภาวะที่มีความเข้มข้นสูงๆ เนื่องจากสายกิ่งสั้นมาก แป้งคัดแปรชนิดนี้มักจะใช้เพื่อเป็น Remoistening adhesive ในแสดมปี กระดาษกาวและบนซองจดหมาย



รูปที่ 2.4 กลไกในการย่อยสลายและการกลับมาสร้างพันธะใหม่ในระหว่างการผลิต Dextrin [5]

2.2.7 แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized Starches)

สามารถเตรียมได้โดยใช้ Alkaline Hypochlorite ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารแขวนลอยของแป้งทำให้โมเลกุลของแป้งเปลี่ยนแปลงไปโดยมีการเติมหมู่คาร์บอกซิลและคาร์บอนิลเข้าไป ทำให้แป้งที่ได้เกิดการคืนตัวน้อยมากหรือไม่เกิดการคืนตัวเลย ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลของแป้งจะถูกตัดทำให้แป้งมีความหนืดลดลง แป้งออกซิไดซ์สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 70°C ซึ่งบ่งชี้ว่าพันธะภายในเม็ดแป้งมีความแข็งแรงลดลงมาก แป้งออกซิไดซ์มักใช้ในการเคลือบกระดาษที่มีคุณภาพสูง นอกจากนี้แป้งออกซิไดซ์ยังมีคุณสมบัติเป็น Polyelectrolyte ดังนั้นจึงสามารถใช้เพื่อช่วยในการกระจายตัวของสารได้

2.2.8 แป้งอีเทอร์และเอสเทอร์

แป้งไฮดรอกซีเอทิลและแป้งอะซีเทตเตรียมโดยทำปฏิกิริยาระหว่างสารแขวนลอยแป้งในสภาวะที่เป็นเบสกับ Ethylene Oxide หรือ Acetic Anhydride ที่ระดับการแทนที่ต่ำ (0.03-0.10) ทำให้โมเลกุลแป้งไม่ถูกทำลายดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความหนืดสูง ซึ่งถ้าต้องการให้ความหนืดลดลงอาจคัดแปรด้วยกรด ซึ่งแป้งอีเทอร์และเอสเทอร์จะให้ฟิล์มที่แข็งแรง ใส มักใช้เป็นสารเคลือบผ้าฝ้ายและเคลือบกระดาษ โดยความใสของแป้งสูงจะไม่เท่ากับแป้ง Waxy แต่หากทำให้ระดับการแทนที่สูงขึ้น ($DS \sim 0.2$) จะทำให้สามารถยับยั้งการคืนตัวได้อย่างสมบูรณ์และได้สารละลายที่ใส ในทางการแพทย์ใช้แป้งไฮดรอกซีเอทิลเป็นตัวเพิ่มพลาสมาในเลือด (Blood

Plasma Extender) โดยหน้าที่ของ Extender คือรักษาความหนืดและแรงดันออสโมติกในเลือด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอนไซม์ย่อยแป้งที่อยู่ในเลือดจะย่อยแป้งไฮดรอกซีเอทิลได้ช้า ดังนั้นแป้งคัดแปรนี้จะอยู่ได้นาน และยังคงมีประสิทธิภาพที่ดี

2.2.9 Cationic Starch Ethers

แป้งเคทไอออนิกเป็นแป้งที่มีประจุบวกโดยการเติมหมู่ Quaternary Ammonium เข้าไปทำให้แป้งมีลักษณะเป็น Polyelectrolyte สามารถนำไปใช้งานคือ

- การตกตะกอน (Flocculation)
- สารช่วยการกระจายตัว (Dispersion)
- การดูดซับ (Adsorption) ตัวอย่างเช่น ใช้เติมลงในถังดีเยื่อกระดาษในกระบวนการกระดาษเพื่อใช้เป็นตัวช่วยให้ไททาเนียมไดออกไซด์จับตัวกันหรือดูดซับบนกระดาษที่มีประจุลบ

2.3 แร่ดินเหนียว (Mineral Clay)

แร่ดินเหนียวเป็นส่วนที่ได้จากการสลายตัวของแร่ธาตุ ซึ่งจะอยู่ในรูปของไอออนและอนุภาคต่างๆ โดยไอออนเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยารวมตัวกันใหม่เป็นผลึกต่างๆ มีขนาดเล็กมาก โดยมีขนาดของอนุภาคประมาณ 2 ไมครอน โดยทั่วไปแร่ดินเหนียวแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

1. Silicate Clay คือแร่ประเภทที่มีอะลูมิเนียมและซิลิกอนเป็นส่วนประกอบหลัก มีโครงสร้างเป็นแผ่นซ้อนๆ กัน โดย Silicate clay ที่สำคัญมี 3 ชนิด คือ Kaolinite, Montmorillonite และ Illite
2. Iron and Aluminum Clay คือแร่ดินเหนียวประเภทที่มีเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก

2.3.1 ซิลิเกตเคลย์ (Silicate Clay)

ซิลิเกตเคลย์หรืออะลูมิโนซิลิเกตเคลย์เป็นคอลลอยด์ที่มีอยู่ในดินมากที่สุด ภายในโครงสร้างของแร่ดินเหนียวมีสมบัติที่สำคัญดังต่อไปนี้

● รูปร่าง (Shape)

ซิลิเกตเคลย์มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ซ้อนกัน มีรูปร่างเป็นรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal) ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope)

- **พื้นที่ผิว (Surface Area)**

ซิลิเกตเคลย์มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ขนาดเล็กมาก จึงทำมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ประกอบด้วย

- **พื้นผิวภายนอก (External Surface)** เป็นพื้นผิวบริเวณด้านนอกของแร่ดินเหนียว
- **พื้นผิวภายใน (Internal Surface)** เป็นพื้นผิวที่อยู่ระหว่างแผ่นผลึกของแร่ดินเหนียว ซึ่งซ้อนทับกันจนเกิดเป็นอนุภาค (Micelle) ทำให้แร่ดินเหนียวชนิดนี้มีพื้นที่ผิวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเคลย์ที่มีรูปทรงกลมและรูปลูกบาศก์

- **ความเหนียว (Cohesion) และอ่อนตัว (Plasticity)**

ความเหนียวและความอ่อนตัวของดินเหนียวขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของดินเหนียว คือเมื่อดินเหนียวสัมผัสกับความชื้นที่เหมาะสมจะมีความอ่อนนุ่ม สามารถบีบปั้นให้เป็นรูปต่างๆ ได้ เนื่องจากดินเหนียวมีพื้นที่ผิวมาก น้ำจึงสามารถเกาะยึดได้มาก ทำให้อนุภาคของดินเหนียวเกาะติดกันได้ดี และมีความอ่อนตัว แต่ดินเหนียวที่มีพื้นที่ผิวน้อย ถึงแม้จะมีความชื้นมาก ก็ไม่สามารถทำให้อนุภาคของดินเกาะติดกันได้ดี ทำให้ดินมีสภาพร่วน ดังนั้นความเหนียวจึงหมายถึงความสามารถในการเกาะยึดกันได้ระหว่างอนุภาคของดินเหนียว

- **การขยายตัว (Swelling) และการหดตัว (Shrinking)**

การขยายตัวและการหดตัวขึ้นอยู่กับช่องว่างระหว่างแผ่นเคลย์ (Inter Layer) ที่ซ้อนทับกัน เมื่อน้ำเข้าไปอยู่ช่องว่างเหล่านั้นมากขึ้นทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคมีมากขึ้น ทำให้ดินเหนียวเกิดการการพองตัวหรือขยายตัวได้ แต่เมื่อน้ำในช่องว่างชั้นของดินเหนียวระเหยไป จะทำให้ช่องชั้นดินเหนียวยุบตัวลงและเกิดการหดตัวในที่สุด

- **ประจุลบและการดูดซับไอออนบวก (Adsorption of Cation)**

บริเวณผิวของอนุภาคดินเหนียวมีประจุลบอยู่จำนวนมาก ซึ่งเมื่อดินเหนียวอยู่ในสภาพแขวนลอยจะมีอนุภาคของน้ำและแคทไอออน (Cation) มาเกาะ สภาพเช่นนี้เราเรียกว่าเคลย์ไมเซลล์ (Clay Micelle) โดยแคทไอออนที่ถูกยึดอยู่ที่ผิวของดินเหนียวจะถูกยึดแบบหลวมๆ สามารถถูกแลกเปลี่ยนได้ด้วยแคทไอออนชนิดอื่นๆ ได้ ซึ่งเรียกแคทไอออนเหล่านี้ว่า “แคทไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable cation)” ดินเหนียวส่วนใหญ่มีแคทไอออนในกลุ่มไฮโดรเจนไอออน (H^+) โพแทสเซียมไอออน (K^+) โซเดียมไอออน (Na^+) แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เกาะอยู่บริเวณที่ผิวของดินเหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดประจุลบในแร่ดินเหนียว

1) เกิดจากการแตกหักบริเวณขอบของผลึก (Exposed Crystal Edges)

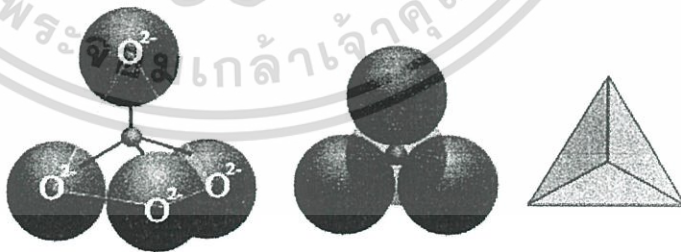
- เกิดจากบริเวณขอบของผลึกที่แตกหักออกไป ทำให้แผ่นซิลิกาและแผ่นอะลูมินาบางส่วนหลุดไป ทำให้ออกซิเจนมีประจุไฟฟ้าลบตกค้างอยู่
- เกิดในสภาพแวดล้อมที่เป็นเบส โดย H^+ ที่เกาะอยู่กับผิวของแผ่นอะลูมินาทำปฏิกิริยากัน OH^- ของค่างกลายเป็นน้ำ พบในพวก 1:1 type clay

2) เกิดจากกระบวนการ Isomorphous Substitution คือการมีอะตอมของธาตุอื่นเข้าไปแทนที่อะตอมที่มีอยู่เดิมใน โครงสร้างของแร่ดินเหนียว โดยอะตอมที่เข้าไปแทนที่จะมีขนาดใกล้เคียงกับอะตอมใน โครงสร้าง แต่วาเลนซ์อิเล็กตรอนต่ำกว่า ทำให้เกิดประจุลบเกินมา เช่น Mg^{2+} แทนที่ Al^{3+} ในแผ่นอะลูมินา

2.3.2 โครงสร้างและชนิดของซิลิเกตเคลย์ [6]

นักวิทยาศาสตร์สามารถหาโครงสร้างของซิลิเกตเคลย์โดยใช้รังสีเอกซ์ ซึ่งซิลิเกตเคลย์ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญของผลึกของเคลย์ มีดังนี้

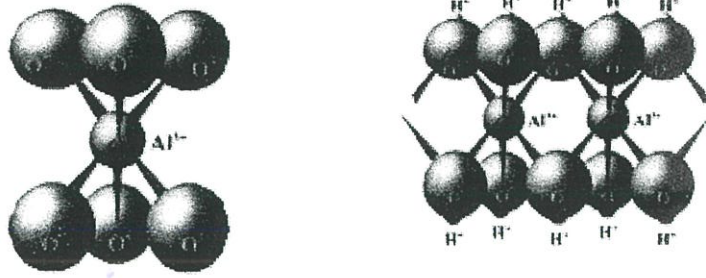
- หน่วยของซิลิกาเตตระฮีดรัล (Silica Tetrahedral Unit) ประกอบด้วยซิลิกอน 1 อะตอมถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจน 4 อะตอมเกิดเป็นรูปทรงสี่หน้าเรียกว่า หน่วยของเตตระฮีดรัล (Tetrahedral Unit) ทำให้เกิดเป็นแผ่นคล้ายรังผึ้ง คือจะเป็นแผ่นที่มีรูปหกเหลี่ยม เรียกว่า แผ่นของซิลิกาเตตระฮีดรัล (Silica Tetrahedral Sheet) หรือเรียกว่าแผ่นซิลิกา (Silica Sheet) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของซิลิกาเตตระฮีดรัล (Silicon Tetrahedral) [6]

- หน่วยของอะลูมินาออกตะฮีดรัล (Alumina Octahedral Unit) ประกอบด้วยอะลูมิเนียม 1 อะตอม อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอม ทำให้เกิดเป็นรูปทรงแปดหน้า เรียกว่าแผ่นอะลูมินาออกตะฮีดรัล (Alumina Octahedral Sheet) หรือแผ่นอะลูมินา (Alumina Sheet)

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

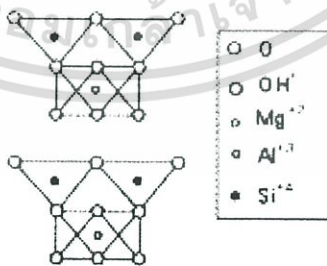


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะลูมินาออกตะฮีดรัล [10]

2.3.3 โครงสร้างผลึกของซิลิเกตเคลย์

Silicate clay อาจแบ่งออกได้อีก 2 ชนิดคือ ชนิดที่มีโครงสร้างมี 2 ชั้น เรียกว่า “1:1 Type Clay” เป็นแร่ดินเหนียวที่มี ซิลิกาและอลูมิเนียมในอัตราส่วน 1:1 แผ่นในหนึ่งหน่วย เช่น เคโอลิไนต์ (Kaolinite) และโครงสร้างเป็น 3 ชั้น เรียกว่า “2:1 Type Clay” เป็นแร่ดินเหนียวที่มีการจัดเรียงตัวของ ซิลิกาและอลูมิเนียมในอัตรา 2:1 แผ่นในหนึ่งหน่วยเช่น มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) อิลไลต์ (Illite) เป็นต้น

- **เคโอลิไนต์ (Kaolinite)** มีสูตรคือ $Si_4Al_4O_{10}(OH)_8$ พบอยู่ในดินมากที่สุด ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา (Silica Sheet) 1 แผ่น ประกบทับกับแผ่นของอะลูมินา (Alumina Sheet) 1 แผ่น โดยทั้งซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) จะเกาะกับออกซิเจนตัวเดียวกันในด้านที่ประกบเข้าหากัน จึงทำให้แผ่นทั้งสองประสานกันรวมกันเข้าเป็นผลึกของแร่เคโอลิไนต์ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แบบจำลองแสดง โครงสร้างพื้นฐานของ โครงสร้างเคโอลิไนต์ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกของ Kaolinite จะเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ มีระยะกว้าง 7 Å คงที่ เนื่องจากแต่ละชั้นถูกยึดไว้ด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างออกซิเจนอะตอมของ Silica Sheet และไฮโดรเจนอะตอมของ Alumina Sheet ดังนั้นดินเหนียวชนิดนี้จึงมีโครงสร้างที่แข็งแรง การขยายตัวและหดตัวน้อยมาก จึงไม่แตกร้าว จัดเป็นพวกดินไม่กระจายตัว (Non Dispersive Clay)

- มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) มีสูตรคือ $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา (Silica Sheet) 2 แผ่นและแผ่นอะลูมินา (Alumina Sheet) 1 แผ่น เรียกว่า 2:1 Type Clay โดยมีอะตอมของซิลิกอนและอะลูมิเนียม ซึ่งอะตอมเหล่านี้ต่างยึดเกาะกับออกซิเจนร่วมกัน ประกอบกันเป็นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ ดังรูปที่ 2.8



ในปัจจุบันนี้แรมอนต์มอริลโลไนต์กำลังเป็นที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากผลึกของแรมอนต์มอริลโลไนต์จะเรียงต่อกันเป็นชั้นๆ ซ้อนกัน ซึ่งแต่ละชั้นบางมากโดยมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตรและมีความยาวประมาณ 1000 เท่าของความหนา ทำให้แรมอนต์มอริลโลไนต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะปฐมภูมิ (Primary Specific Surface) สูงมากประมาณ 50 ถึง 120 ตารางเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะทุติยภูมิ (Secondary Specific Surface) สูงถึง 840 ตารางเมตรต่อกรัม และมีระยะห่างระหว่างชั้น 9-21 Å ระยะห่างนี้สามารถทำให้กว้างขึ้นได้เนื่องจากไม่มีพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) ระหว่างแต่ละแผ่นของชั้นเคลย์ โดยช่องว่างเหล่านี้จะมีโมเลกุลของน้ำหรือไอออนบวกต่างๆ (Cation) แทรกอยู่ทำให้เกิดการพองตัวได้เมื่อดินชนิดนี้เปียกน้ำและสามารถหดตัวได้เมื่อดินชนิดนี้แห้งลง ดังนั้นโครงสร้างดินเหนียวประเภทนี้จึงจัดเป็นดินกระจายตัว (

Dispersive Clay) อีกทั้งพื้นผิวของชั้นอะลูมิโนซิลิกेटมีประจุลบ โดยแต่ละชั้นสามารถยึดกันได้อีกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

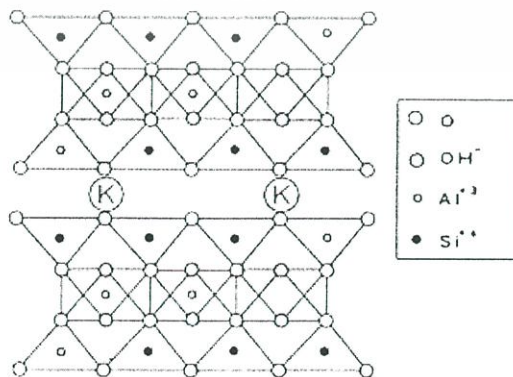
ด้วยประจุบวกที่มีขนาดเล็กเช่น โซเดียมไอออน (Na^+) แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เป็นต้น โดยประจุบวกเหล่านี้สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) กับเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม ทำให้ได้แรมอนต์มอริลโลไนต์คัดแปรที่เรียกว่า ออร์กาโนเคลย์

■ การใช้งานของแรมอนต์มอริลโลไนต์

• การทำโคลนเจาะต่างๆ ใช้ผสมกับน้ำเพื่อช่วยหล่อเลี้ยงหัวเจาะในการเจาะบ่อน้ำบาดาลหรือเจาะบ่อน้ำมัน

- การขจัดสีในน้ำมัน อุตสาหกรรมฟอกสี
- ใช้ผสมอาหารสัตว์ให้สัตว์กินเพื่อเพิ่มแร่ธาตุเสริม
- การผลิตเครื่องสำอางค์
- การขจัดคราบไขมัน ในบ่อน้ำบาดาลเสีย
- อุตสาหกรรมเซรามิก
- ทำบ่อเก็บกักน้ำ ในพื้นที่ที่เก็บกักน้ำไม่อยู่
- การเลี้ยงกุ้งและปลา ช่วยดูดซับสารพิษและช่วยให้กุ้งลอกคราบง่ายขึ้น
- บำบัดน้ำเสีย กำจัดแก๊สพิษ โดหะหนักและกลิ่นไม่พึงประสงค์
- ช่วยปรับปรุงคุณภาพดิน โดยปรับสภาพดินทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์
- ใช้ในฟาร์มปศุสัตว์โดยใช้ผสมกับมูลสัตว์เพื่อลดกลิ่นและลดปริมาณเชื้อโรคได้ดี
- ใช้ผสมดินหรือคอนกรีตในการก่อสร้างเขื่อนหรือคลองเพื่อป้องกันการรั่วซึม

• **อิลไลต์ (Illite)** มีองค์ประกอบของผลึกคล้ายกับมอนต์มอริลโลไนต์มาก จึงเป็นพวก 2:1 Type Clay เช่นเดียวกัน แต่สมบัติต่างๆ ของอิลไลต์จะอยู่ระหว่างของมอนต์มอริลโลไนต์และเคโอลิไนต์ ดังรูปที่ 2.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในที่วารสารวิชาการนี้จะไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 โครงสร้างอิลไลต์ [7]

ระยะห่างระหว่างผลึกของอิลไลต์มีระยะเท่ากับ 10 Å พื้นที่ผิวภายในช่องว่างมีลักษณะแคบคล้ายกับเคโอลิไนต์ โมเลกุลของน้ำและไอออนบวกต่างๆ (Cation) สามารถแทรกเข้าไปอยู่ภายในช่องว่างได้บ้างแต่ไม่มากเท่ากับมอนต์มอริลโลไนต์ ดังนั้นอิลไลต์จึงจัดอยู่ในกลุ่มของดินกระจายตัว (Dispersive Clay) เช่นเดียวกับมอนต์มอริลโลไนต์

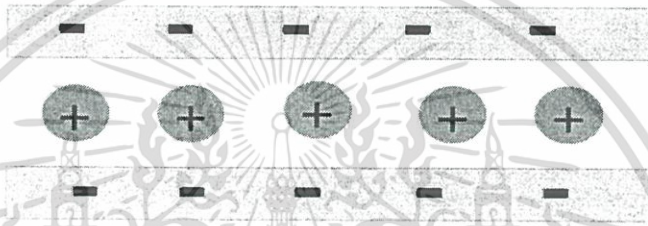
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของดินเหนียวซิลิเกตบางชนิด [8]

สมบัติ	ชนิดของแร่		
	มอนต์มอริลโลไนต์	อิลไลต์	เคโอลิไนต์
ขนาดของผลึก (µm)	0.01-1.0	0.1-2.0	0.1-5.0
รูปร่าง	แผ่นบางมีขอบ ไม่สม่ำเสมอ	แผ่นบางมีขอบ ไม่สม่ำเสมอ	แผ่นบาง รูปหกเหลี่ยม
พื้นที่ผิวภายนอก	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
พื้นที่ผิวภายใน	สูงมาก	ปานกลาง	ต่ำ
การขยายตัว	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (me/100 gm Soil)	80-100	15-40	3-15

จากตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติดินเหนียวซิลิเกตบางชนิดจะเห็นได้ว่าดินเหนียวประเภทมอนต์มอริลโลไนต์มีขนาดของผลึกเล็กที่สุด แต่มีพื้นที่ผิวภายนอก พื้นที่ผิวภายใน การหดหรือการขยายตัวและความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูงกว่าอิลไลต์และเคโอลิไนต์ตามลำดับ

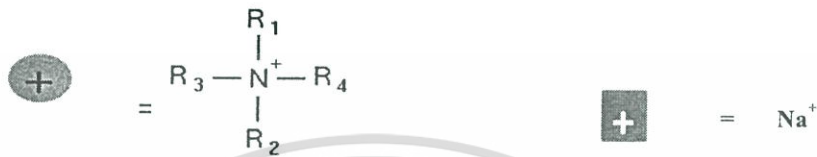
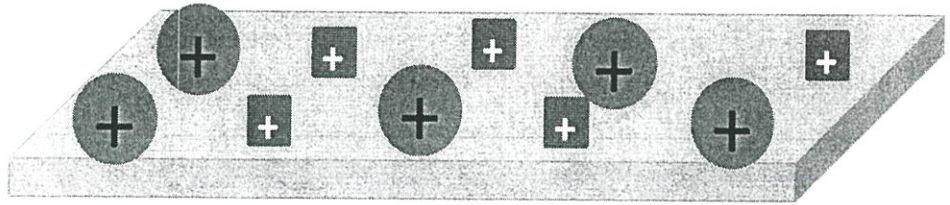
2.3.4 การตัดแปรแร่มอนต์มอริลโลไนต์ [9]

มอนต์มอริลโลไนต์และแร่ในกลุ่มของอะลูมิโนซิลิเกตอื่นๆ มีสมบัติในการชอบน้ำและแต่ ละชั้นของแร่ดินเหนียวที่ซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบซึ่งยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงทางไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.10 จึงทำให้แร่กลุ่มนี้นำไปผสมและเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ได้ยาก ดังนั้นจึงต้องนำแร่ดินเหนียว เหล่านี้มาทำการตัดแปรก่อนที่จะนำแร่ดินเหนียวนั้นไปสังเคราะห์เป็นวัสดุประกอบเนื่องจากหาก นำแร่ดินเหนียวไปเตรียมวัสดุประกอบโดยไม่ผ่านการตัดแปรก่อนอนุภาคของแร่ดินเหนียวทั้งหมด จะเกาะติดอยู่ภายในเนื้อพอลิเมอร์ทำให้ได้วัสดุประกอบที่ไม่มีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.10 แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตที่ยึดแผ่น โครงสร้างของเคลย์

โดยวิธีการที่นิยมในการตัดแปรแร่ดินเหนียวชนิดนี้ที่สามารถทำให้เข้ากับเนื้อพอลิเมอร์ได้ มากขึ้นก็คือการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) ซึ่งประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของแร่ดิน เหนียวเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรงมาก ดังนั้นจึงสามารถนำสารที่เป็นประจุบวกมาแทนที่ประจุบวกเดิม ที่มีอยู่ระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียวได้แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งโซเดียมไอออน (Na^+) ถูกแทนที่ด้วย ประจุบวกชนิดอื่นได้ ดังนั้นกระบวนการดังกล่าวจะช่วยให้เกิดการแทรกสอด (Intercalation) หรือ การแยกออกจากกัน (Exfoliation) ของแผ่นเคลย์ได้



รูปที่ 2.11 แบบจำลองประจุบวกบนพื้นผิวเคลย์

2.3.5 วัสดุประกอบนาโน (Nanocomposite Material)

วัสดุประกอบนาโนคือวัสดุที่เตรียมขึ้นจากการนำสารตั้งแต่ 2 ชนิดมาผสมกัน โดยมีสารอย่างหนึ่งชนิดที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร (10^{-9} m) โดยสารที่นำมาผสมกันนี้อาจเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ อัดแน่น ผลึกหรือกึ่งผลึก ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งสมบัติทางกายภาพและทางเคมี แต่เมื่อนำมาผสมกันแล้ววัสดุที่ได้จะมีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น ปัจจุบันได้มีการนำวัสดุประกอบนาโนมาใช้ในการค้าเพิ่มมากขึ้นทั้งในด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร เครื่องสำอางค์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สารช่วยดูดซับ ขวดและภาชนะเป่าขึ้นรูป

วัสดุประกอบนาโนที่กำลังได้รับความสนใจอีกชนิดหนึ่งคือเคลย์หรือแร่ดินเหนียว เช่น แร่มอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งวัสดุประกอบนาโนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเคลย์ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งแสดงดังรูป 2.13

2.3.5.1 วัสดุประกอบทั่วไป (Conventional Composite)

วัสดุประกอบนาโนที่ประกอบด้วยอนุภาคเคลย์กระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ โดยที่ชั้นแต่ละชั้นในโครงสร้างยังรวมกลุ่มกันอยู่ไม่แยกออกจากกัน

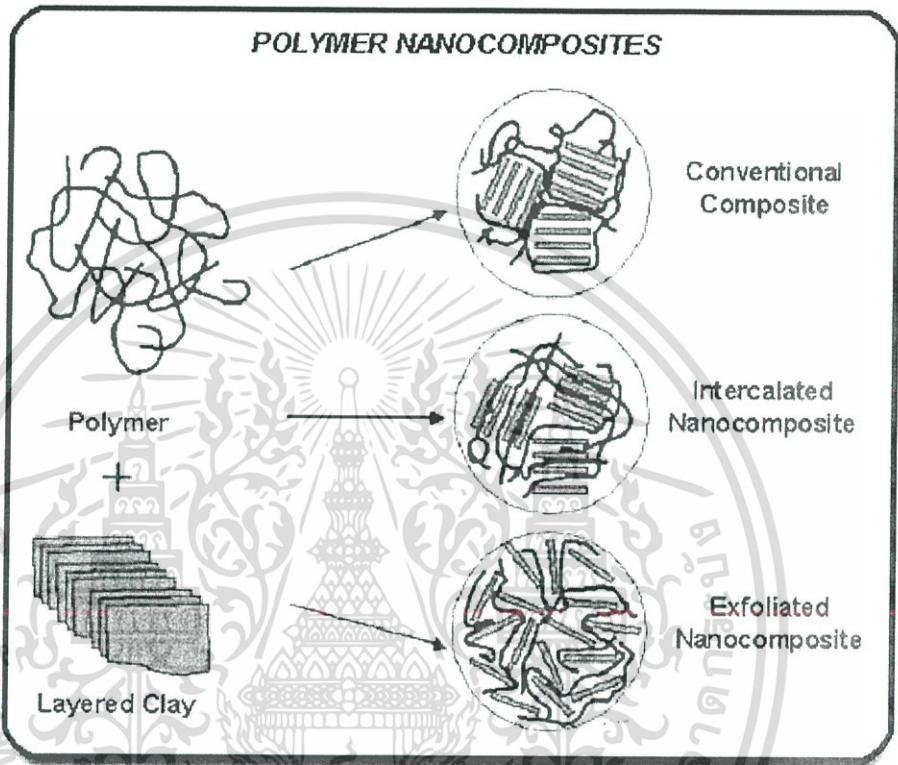
2.3.5.2 วัสดุประกอบนาโนแบบแทรกสอด (Intercalated Clay Nanocomposite)

โครงสร้างของเคลย์ถูกแทรกสอดด้วยเนื้อพอลิเมอร์ตั้งแต่ 1 โมเลกุลขึ้นไปทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้างของเคลย์เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5.3 วัสดุประกอบนาโนแบบแยกจากกัน (Exfoliated Clay Nanocomposite)

วัสดุประกอบนาโนแบบแยกจากกันมักเกิดจากมีปริมาณเคลย์ต่ำ โครงสร้างเป็นแบบ Monolithic เกิดการแยกออกจากกันของแต่ละชั้นในโครงสร้างเคลย์ ซึ่งการแยกของแต่ละชั้นในโครงสร้างขึ้นอยู่กับปริมาณของพอลิเมอร์ในนาโนคอมโพสิตนั้น



รูปที่ 2.12 ชนิดของวัสดุประกอบแบบต่างๆ [10]

2.3.6 สมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนในดิน (Ionic Exchange) [11]

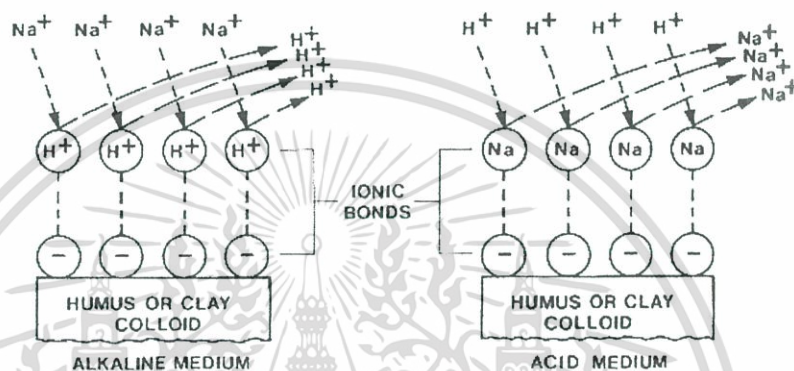
การแลกเปลี่ยนไอออนในดินเกิดเนื่องจากในดินมีสารคอลลอยด์ต่างๆ ที่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกและไอออนลบได้

2.3.6.1 การแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (Cation Exchange)

การแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน(CEC) แสดงถึงความสามารถของดินในการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนบวก (+) หรือที่เรียกว่า Cation โดยอนุภาคของดินเหนียวเป็นอนินทรียสารที่มีรูปร่างแบนบางจึงทำให้มีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักสูงมากและมีประจุบริเวณพื้นผิวเป็นลบ (-)

จึงสามารถดูดซับประจุบวก (+) ไว้ได้อย่างหลวมๆ จึงทำให้บริเวณพื้นที่ผิวนี้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ง่ายๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนบวก (Cation exchange) ที่อยู่ระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียวเช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ และ Na^+ เป็นต้นกับประจุบวกอื่นที่อยู่ในสารคอลลอยด์ต่างๆ ในดินได้ ตัวอย่างกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange) เช่น อนุภาคดินเหนียวชนิดหนึ่งดูดซับไอออนบวกพวกแคลเซียม (Ca^{2+}) ไว้เมื่อใส่ปุ๋ยโปแตสเซียมคลอไรด์ (KCl) ลงไปในดินมากเกินไปก็จะเกิดการแทนที่ซึ่งกันและกันแสดงดังรูปที่ 2.13 และ 2.14



รูปที่ 2.13 การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง H^+ และ Na^+ ของแร่ดินเหนียว [12]



รูปที่ 2.14 การแลกเปลี่ยนไอออนของดิน [12]

2.3.6.2 ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Capacity: CEC)

ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกหรือซีอีซี (Cation Exchange Capacity, CEC) หมายถึงผลรวมของประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดของดิน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมสมมูล (Milliequivalent) ต่อ 100 กรัมของดินแห้งสนิท (me/100 gms) เมื่อวัดที่พีเอชเท่ากับ 7 ซึ่งค่า CEC ของดินจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของคอลลอยด์ที่อยู่ในดิน โดยค่า CEC ของดินบางชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่า CEC ของดินแต่ละชนิด [11]

ชื่อ	CEC (me / 100 gms)
Humus	100-300
Vermiculite	100-150
Montmorillonite	60-100
Illite	20-40
Kaolinite	2-16
Iron and aluminum oxide	4

2.3.6.3 ปัจจัยที่ควบคุมค่า CEC

ปัจจัยที่ควบคุมค่า CEC ของดินประกอบด้วยปัจจัยใหญ่ ๆ ดังนี้

- ชนิดของคอลลอยด์และเคลย์ที่เป็นองค์ประกอบของดิน

เคลย์และคอลลอยด์ต่างชนิดกันจะมีค่า CEC ต่างกัน เช่น มอนต์มอริลโลไนต์ > อิลไลต์ >

เคโอลิไนต์ เป็นต้น

- ประเภทของเนื้อดิน

เนื้อดินที่ละเอียดกว่าจะมีค่า CEC สูงกว่า ตัวอย่างเช่นค่า CEC ของดินเหนียวจะสูงกว่าดิน

ทราย

- ปริมาณของอินทรีย์วัตถุ

เนื่องจากฮิวมัสหรืออินทรีย์วัตถุมีค่า CEC สูง ดังนั้นดินที่มีฮิวมัสหรืออินทรีย์วัตถุก็จะมีค่า

CEC สูงไปด้วย

2.3.6.4 ประโยชน์และความสำคัญของการแลกเปลี่ยนแคทไอออนในดิน [13]

คุณสมบัติของดินเกี่ยวกับการแลกเปลี่ยนแคทไอออน (CEC) ในดินนั้น มีความสำคัญอย่างมากในด้านปฐพีวิทยา ธรณีวิทยา วิศวกรรมก่อสร้าง และวิชาการสาขาอื่นๆ อีกมากดังนี้

▪ ด้านปฐพีวิทยา

การแลกเปลี่ยนไอออนบวกมีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางเคมีของดินในด้านปฐพีวิทยาคือ จะช่วยรักษาไอออนบวกในดินไม่ให้ถูกชะล้างสูญหายไป เนื่องจากไอออนบวกเหล่านี้จะดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาคดิน จึงเป็นแหล่งธาตุอาหารซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ได้ในด้านเกี่ยวกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น ความซุยและความเหนียวของดินเช่น ในดินที่มี Na^+ มากๆ จะมีความเหนียวทำให้น้ำซึมผ่านได้ยาก มักทำให้น้ำขังได้ง่าย ไถพรวนลำบาก เมื่อแห้งก็จะทำให้ดินแข็งและแตกกระแหงไม่เหมาะกับการปลูกพืช แต่หากแลกเปลี่ยน Na^+ โดยใช้ Ca^{2+} (จากปูน) จะเป็นผลให้ดินรวมกลุ่มและตกตะกอน ทำให้ความเหนียวลดลงทำให้ร่วนซุย ไถพรวนง่าย น้ำซึมผ่านสะดวกขึ้น นอกจากนี้ในดินที่เป็นกรดจัด จะมี H^+ ดูดซับอยู่ที่ผิวของดินมากไม่เหมาะสมแก่การปลูกพืช เราสามารถปรับปรุงแก้ไขดินกรดนี้ได้ด้วยการใส่ปูนซึ่งจะมี Ca^{2+} เข้าไปแลกเปลี่ยนกับ H^+ ทำให้ความเป็นกรดลดลงด้วย

▪ ด้านธรณีวิทยา

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวกมีส่วนเกี่ยวข้องกับการสลายตัวผุพังของแร่และหินต่างๆ ในดิน โดยธาตุต่างๆ จำพวกไอออนบวกจะหลุดออกมาและถูกชะล้างไปรวมตัวกันเกิดเป็นแร่ทุติยภูมิ เนื่องจาก Na^+ สามารถถูกแทนที่ได้ง่ายและเนื่องจากเป็นธาตุที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในหินและแร่ ดังนั้นระหว่างการสลายตัวผุพังจึงถูกชะล้างพัดพาลงมาสะสมอยู่ในทะเลได้ง่าย จึงทำให้น้ำทะเลมี Na^+ สูงมาก

นอกจากนี้ในการทำเครื่องปั้นดินเผาจำเป็นต้องควบคุมเกี่ยวกับความเหนียวและความซุยของดินที่จะใช้ปั้น ซึ่งควบคุมได้โดยการเพิ่ม Na^+ เพื่อให้มีความเหนียวและความอ่อนตัวสูง แต่หากต้องการทำให้ดินร่วนซุยสามารถใช้ Ca^{2+} ไปแทนที่ Na^+ ได้

▪ ด้านวิศวกรรมก่อสร้าง

การแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินมีความสำคัญต่อการก่อสร้างตึกและถนน การยึดตัวรวมทั้งการหดตัวของดินเมื่อเปียกน้ำและแห้ง จะเป็นอันตรายต่อฐานของตึกและถนนเป็นอย่างมาก หากไม่มีการควบคุม ตึกอาจทรุด ถนนแตกชำรุดทำให้เกิดความเสียหายได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมการยึดหดของดินโดยอาศัยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวก เช่นถ้าดินที่ใช้เป็นฐานของถนนหรือตึกเป็นดินที่มีแร่ประเภท 2:1 มาก จะต้องใส่ปูนลงไปผสมคลุกเคล้าเสียก่อนเพื่อลด Zeta Potential ของดินลง กล่าวคือเป็นการลดความแตกต่างของประจุไฟฟ้าระหว่างชั้นของไอออนที่อยู่รอบๆ อนุภาคและประจุในของเหลวที่อยู่ล้อมรอบบริเวณนั้น ทำให้เกิดการตกตะกอนและลดการยึดหรือหดตัวของดินด้วย

2.4 สีย้อม

2.4.1 ประวัติสีย้อม [14]

ในสมัยโบราณ มนุษย์ตกแต่งผ้าจากวัสดุธรรมชาติชนิดต่างๆ เช่น การใช้ใบไม้ ดอกไม้ หรือกิ่งไม้ยึดติดกับผ้าด้วยไขขาวหรือเลือด และอีกวิธีหนึ่งคือการถั่วสตุที่มีสีต่างๆ ลงบนผ้า ซึ่งมีข้อเสียคือไม่ทนต่อการซักล้าง จนกระทั่งมนุษย์สามารถค้นพบวิธีการย้อมผ้าด้วยสีธรรมชาติโดยการนำผลไม้ไปตำให้ละเอียดแล้วนำมาต้มรวมกับผ้า ทำให้เส้นใยผ้าเปลี่ยนสีและทนต่อการซักล้างมากขึ้น สีย้อมธรรมชาติโดยส่วนใหญ่จะได้อาจมาจากพืชหรือสัตว์เช่น สีแดงได้จากครั่งซึ่งเป็นแมลงตัวเล็กๆ สีนํ้าเงินได้จากคราม สีดำได้จากผลของมะเกลือ สีเหลืองได้จากขมิ้น เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 1856 วิลเลียม เพอร์คิน (William Perkin) ได้ค้นพบสีสังเคราะห์โดยบังเอิญจากการพยายามสังเคราะห์ยาควินินเพื่อใช้รักษาโรคมาลาเรีย ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาถือเป็นยุคที่ 2 ของสีย้อมผ้าซึ่งเป็นจุดสำคัญของการแบ่งแยกยุคสมัยของสีย้อมผ้าจากยุคสีย้อมธรรมชาติมาสู่ยุคสีย้อมสังเคราะห์

สีย้อมสังเคราะห์สามารถใช้ย้อมเส้นใยที่ได้จากพืช (Cellulose) เช่น ฝ้ายและเส้นใยโปรตีนที่ได้จากสัตว์ (Protein) เช่น ไหมและขนสัตว์ จนกระทั่งในช่วงทศวรรษ 1920 ได้มีการคิดค้นผ้าเส้นใยสังเคราะห์ขึ้น ซึ่งเป็นผลผลิตจากอุตสาหกรรมน้ำมันเช่น ไนลอน (Nylon) และพอลิเอสเตอร์ (Polyester) สีย้อมสังเคราะห์ที่ใช้อยู่ในสมัยนั้นไม่สามารถย้อมเส้นใยสังเคราะห์ชนิดใหม่นี้ได้ แต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นไม่นานได้มีการคิดค้นสีที่สามารถย้อมเส้นใยสังเคราะห์ได้ คือ สีดิสเพอร์อะโซ (Disperse Azo) และใช้มาจนถึงปัจจุบันนี้ โดยส่วนมากใช้ย้อมผ้าพอลิเอสเตอร์

ช่วงทศวรรษ 1950 ถือเป็นช่วงที่สำคัญที่สุดของการคิดค้นสีย้อมสังเคราะห์ เพราะเป็นช่วงที่รีแอคทีฟ (Reactive Dye) กำเนิดขึ้น ซึ่งเป็นสีที่สามารถยึดเกาะกับเส้นใยสูงโดยอาศัยพันธะทางเคมีทำให้ได้ผลลัพธ์คือความคงทนของสีย้อมและสีที่สดใส

2.4.2 ความหมายของสีย้อม [15]

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน โดยผ่านกระบวนการสกัดจะได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวเช่น เบนซีน ไซลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟิน ซึ่งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้สามารถถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ได้ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาหลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใยและกระบวนการย้อมที่แตกต่างกัน การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาย้อมเส้นใยให้ได้ผลดีนั้นจะต้องมีการรวมตัวระหว่างสีกับเส้นใยที่ดีกว่าการรวมตัวของสีย้อมกับน้ำ โดยจะสามารถทำให้เกิดสถานะเช่นนี้ขึ้นได้ โมเลกุลของสีย้อมจะต้องมีหมู่อะตอมที่เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการยึดติดกับเส้นใยได้เอง (Substantivity) แล้วเกิดพันธะกันซึ่งอาจเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond), แรงแวนเดอวาลส์ (Van Der Waals' Force) แรงดึงดูดระหว่างไอออน (Ionic Force) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) โดยการยึดติดของสีมักไม่เกิดจากการยึดติดเพียงพันธะชนิดเดียวแต่มักประกอบด้วยพันธะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปหรือบางครั้งอาจเกิดพันธะทั้ง 4 ชนิด

การเกิดสีของสีย้อมที่ปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์มองเห็นได้เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมดังกล่าวเรียกว่า “โครโมฟอร์” ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม [16] คือ

- กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso Group)
- กลุ่มไนโตร (Nitro Group)
- กลุ่มอะโซ (Azo Group)
- กลุ่มเอทิลีน (Ethylene Group)
- กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group)
- กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen Group)
- กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur Group)

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวไว้บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีของมีโทนสีที่แตกต่างกัน

สี้อมเป็นสารที่จัดได้ว่ามีความเป็นพิษต่ำ โดยไม่พบว่ามีอัตราการตายหรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมสูงกว่าบุคคลอาชีพอื่น โดยสี้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทาง คือทางจมูก โดยการสูดดม ทางผิวหนัง โดยการสัมผัส และทางระบบทางเดินอาหาร โดยปนเข้าไปกับอาหารการกิน แต่เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์สี้อม มีสารอยู่หลายชนิดที่มีความเป็นพิษสูงมากและมีสารหลายประเภทที่เป็นสารก่อมะเร็งเช่น 2-naphthylamine และ benzidine นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เนื่องจากพบว่าเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำค่อนข้างต่ำ แต่ปัญหาสำคัญของสี้อมในน้ำที่ปัจจุบันไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเป็นพิษของสี้อม แต่ขึ้นอยู่กับสีของน้ำที่ เนื่องจากสี้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้นแม้มีสีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อยก็สามารถทำให้น้ำมีสีได้ จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำที่ก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม

ปัญหาที่เกิดจากสี้อมในน้ำที่จากโรงงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ก่อให้เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ
2. สี้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง
3. ขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช
4. การผลิตออกซิเจนลดลง เนื่องจากผลกระทบจากข้อ 3 ซึ่งส่งผลต่อสัตว์น้ำ
5. ความเป็นพิษของตัวสี้อม บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง
6. ทั้งหมดข้างต้นส่งผลให้สถานะของแหล่งน้ำไม่เหมาะต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตใน

แหล่งน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ประเภทของสีย้อม [15]

2.4.3.1 การจำแนกตามลักษณะการเกิด

สีย้อมธรรมชาติ (Natural Dyes) เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติโดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้นซึ่งต้นไม้แต่ละชนิดให้โทนสีต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของต้นไม้ต่างๆ ซึ่งจะขอยกมาเป็นตัวอย่าง เป็นบางส่วน ดังนี้

สีแดง	ได้จาก รากข่อย แก่นฝาง เปลือกสมอ ฝรั่ง
สีคราม	ได้จาก ต้นคราม
สีเหลือง	ได้จาก แก่นขนุน ต้นหม่อน ขมิ้น ดอกดาวเรือง
สีทองอ่อน	ได้จาก เปลือกผลทับทิม ใบหูกวาง
สีดำ	ได้จาก ผลมะเกลือ ผลกระจาก ผลและเปลือกสมอ
สีส้ม	ได้จาก เปลือกและรากข่อย ดอกกรรณิการ์ (ส่วนที่เป็นหลอดสีส้ม)
สีเหลืองอมส้ม	ได้จาก ดอกคำฝอย
สีม่วงอ่อน	ได้จาก ลูกหว่า
สีชมพู	ได้จาก ต้นฝาง
สีน้ำตาล	ได้จาก เปลือกไม้โกงกาง เปลือกผลมังคุด
สีเขียว	ได้จาก เปลือกต้นมะริดไม้ ใบหูกวาง เปลือกสมอ

สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic Dyes) เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี ตัวอย่างเช่น Direct Dye, Reactive Dye, Acid Dye, Disperse Dye, Basic Dye, Vat Dye และ Sulphur Dye เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบสมบัติระหว่างสีย้อมธรรมชาติและสีย้อมสังเคราะห์ [15]

สีย้อมธรรมชาติ	สีย้อมสังเคราะห์
1.ความสดใสน้อย	1.ความสดใสมาก
2.สีตกง่าย, ซีดจางไว	2.สีไม่ตก, ทนทาน
3.มีจำนวนสีให้เลือกน้อย	3.มีจำนวนสีให้เลือกมากกว่า
4.กระบวนการย้อมยุ่งยาก	4.กระบวนการย้อมง่าย

2.4.3.2 การจำแนกตามการแตกตัวให้ประจุ

- ประจุลบ (Anionic) ได้แก่ สีไคเร็กซ์ (Direct Dye) สีรีแอคทีฟ (Reactive Dye) สีแอซิด (Acid Dye), สีเว็ต (Vat Dye) และ สีซัลเฟอร์ (Sulfer Dye)
- ประจุบวก (Cationic) ได้แก่ สีเบสิก (Basic Dye)
- ไม่มีประจุ (Non-Ionic) ได้แก่ สีดีสเพอร์ส (Disperse Dye)

2.4.3.3 การจำแนกตามเส้นใยที่ใช้อย้อม

- เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เช่น ฝ้าย ลินิน ปอ ป่าน สีที่ใช้อย้อมได้แก่ สีไคเร็กซ์ (Direct Dye) สีรีแอคทีฟ (Reactive Dye) สีเว็ต (Vat Dye) สีซัลเฟอร์ (Sulfer Dye)
- เส้นใยโปรตีน (Protein) เช่น ไหม ขนสัตว์ สีที่ใช้อย้อมได้แก่ สีแอซิด (Acid Dye) สีเบสิก (Basic Dye)
- เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic) เช่น โพลีเอสเตอร์ ไนลอน อะคริลิก สีที่ใช้อย้อมได้แก่ สีดีสเพอร์ส (Disperse Dye) สีเบสิก (Basic Dye) สีแอซิด (Acid Dye)

2.4.3.4 การจำแนกตามหมู่ช่วยละลาย

- หมู่ช่วยละลายถาวร (Permanent Solubilising) เช่น $-\text{SO}_3\text{Na}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NHR}$, $-\text{NR}_2$, $-\text{N}^+\text{R}_4$, $-\text{NH}_2$ และ $-\text{OH}$ เป็นต้น
- หมู่ช่วยละลายชั่วคราว (Temporary Solubilising) เช่น Phenoxide, Sulfate, Thiol, Thiosulfate, Alcian เป็นต้น

2.4.3.5 การจำแนกตามชื่อสีที่เรียก เช่น สีไคเร็กซ์, สีแอซิด, สีรีแอคทีฟ, สีดีสเพอร์ส, สีมอดแทนท์ เป็นต้น

2.4.3.6 การจำแนกตามโครงสร้างทางเคมีของสี เช่น โครงสร้างเอโซ โครงสร้างแอนทราควิโนน เป็นต้น

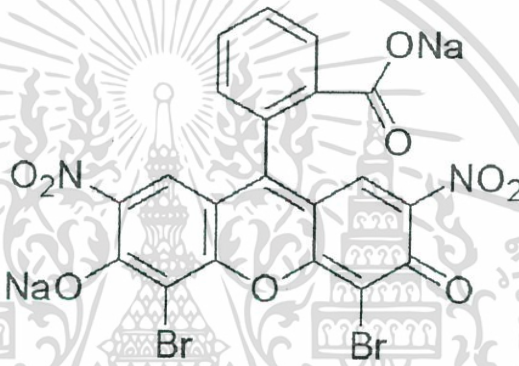
2.4.3.7 การจำแนกตามสีที่มองเห็น เช่น สีน้ำเงิน สีแดง สีส้ม สีดำ สีเหลือง สีชมพู สีฟ้า สีน้ำตาล เป็นต้น

2.4.3.8 การจำแนกสี้อย้อมตามการนำไปใช้ เนื่องจากจะต้องมีความคงทนการซัก มีความคงทนต่อแสงและความร้อน ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสี้อย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีแอซิด (Acid Dye)

สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ (-) ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน สีแอซิดมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับสีไคเร็กซ์ แต่ต่างกันตรงหมู่ที่แสดงประจุลบ และสีแอซิดบางตัวมีขนาดโมเลกุลเล็กมาก ซึ่งกลไกในการติดสีเป็นพันธะไอออนิก ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีแอซิดบางชนิดสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ไชขนแกะและใยไหม แต่สีประเภทนี้ไม่ทนต่อการซักล้างและเหงื่อ ส่วนมากสีแอซิดสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ง่าย การเก็บจึงจำเป็นต้องระมัดระวังเป็นอย่างดี ถ้าสีมีการดูดความชื้นเข้าไปจะทำให้สีเสื่อมสภาพรวดเร็ว



รูปที่ 2.15 โครงสร้างสีย้อม Acid red 91

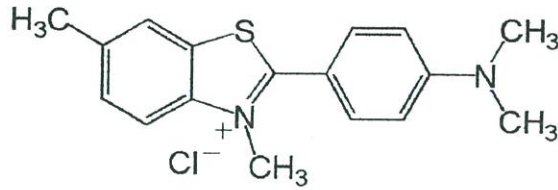
สีไคเร็กซ์ (Direct Dye)

สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้มีประจุลบและจะยึดติดกับเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของเส้นใยและยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีไคเร็กซ์ทนต่อแสงแดดแต่ไม่ทนต่อการซักล้าง

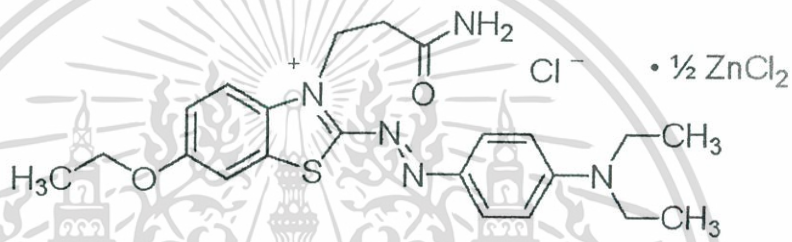
สีเบสิค (Basic หรือ Cationic Dye)

สีเบสิคหรือบางครั้งเรียกสีแคทไอออนิก (Cationic Dyes) คือเมื่อสีละลายน้ำจะแสดงประจุบวก (+) โครงสร้าง และใช้ส่วนประจุบวกนี้ให้เกิดพันธะกับเส้นใยที่แสดงประจุลบเกิดเป็นพันธะไอออนิก เริ่มแรกสีเบสิคถูกใช้เพื่อย้อมเส้นใยไหมและขนแกะ ต่อมาใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิกเป็นหลัก ปัจจุบันสามารถใช้ย้อมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ชนิด Cationic Dyeable Polyester ที่ถูกตัดแปรโครงสร้างให้มีหมู่แสดงประจุลบ (-) อยู่บนสายโซ่พอลิเมอร์ของพอลิเอสเตอร์ การย้อมด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีเบสิกจะให้เฉดสีที่สดใสมากสีมักมีความคงทนต่อแสงต่ำ แต่ปัจจุบันได้ปรับปรุงให้มีความคงทนต่อแสงได้มากขึ้น



รูปที่ 2.16 โครงสร้างสีย้อม Basic Yellow 1



รูปที่ 2.17 โครงสร้างสีย้อม Basic Blue 66

สีดิสเพอร์ส (Disperse Dye)

เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายตัวได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตด เส้นใยพอลิเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพาเพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมได้โดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนต่อแสงและการซักฟอกได้ค่อนข้างดี แต่สีจะซีดหากถูกควันทหรือแก๊สบางชนิดเช่น แก๊สไนโตรสออกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณากลุ่มเคมีในตัวสีย้อมได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo Dyes) และสีย้อมอะมิโน แอนทราควิโนน (Amino Anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (Ethanalamine; $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

สีรีแอกทีฟ (Reactive Dye)

เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ (-) เมื่อละลายน้ำจะมีสมบัติเป็นเบส สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โดยโมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสถานะที่เป็นเบส เกิดเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง $70-75^\circ\text{C}$ และกลุ่มที่

ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอกทีฟจะให้สีที่สดใสและติดทนนาน ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีอะโซอิก (Azoic Dye)

สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะเกาะเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสีแล้วย้อมทับด้วยสารโคอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตต สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซักล้างแต่ไม่ทนต่อการขจัด

สีแควีต (Vat Dye)

เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแควีตละลายน้ำโดยทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแควีตจะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นเกลือ จากนั้นจึงสามารถซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแควีต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิดคือ สีอินดิโก (Indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (Antraquinoid)

สีมอร์แดนท์หรือโครม (Mordant หรือ Chrome Dye)

สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะเช่น โครเมียม ดิบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

สีซัลเฟอร์ (Sulfer Dye)

เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้เลย สีซัลเฟอร์นิยมนำมาย้อมผ้าฝ้าย สีจะติดทนและยังเป็นสีที่มีราคาถูกแต่หากสีอ่อนจะไม่ทนต่อการซักล้าง

สีออกซิเดชัน (Oxidation Dye)

เป็นสีที่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ โดยอาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย สีจะติดแน่น นิยมใช้สำหรับย้อมผ้าฝ้ายและขนสัตว์

สีอินเกรน (Ingrain Dye)

เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ นิยมใช้สำหรับย้อมผ้าฝ้าย

2.4.4 อันตรายจากสีย้อม [16]

2.4.4.1 ความเป็นพิษของสีย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่ได้ชื่อว่ามีความเป็นพิษต่ำ จากประวัติที่มีการรวบรวมในต่างประเทศ ไม่พบว่าผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมพิมพ์ มีอัตราการตายหรือการเจ็บป่วยสูงกว่าบุคคลในอาชีพอื่นแต่อย่างใด สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทาง คือ โดยทางจมูก ด้วยการสูดดมสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ โดยการสัมผัสทางผิวหนัง และโดยการปะปนเข้าไปกับอาหารการกิน จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าแม้ย้อมมีความเป็นพิษต่ำแต่ก็เป็นที่น่าทราบดีว่าสารวัตถุเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อมมีจำนวนมากที่มีความเป็นพิษสูงและมีสารหลายชนิดเป็นสารที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นสารก่อมะเร็ง ตัวอย่างเช่น 2-naphthylamine ซึ่งมีโครงสร้างคือ



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของ 2-naphthylamine [16]

ผลจากการค้นพบทำให้มีการห้ามผลิตสีย้อมที่ต้องใช้สารวัตถุเคมีดังกล่าวแล้วในหลายประเทศ โดยเฉพาะประเทศในยุโรปและประเทศสหรัฐอเมริกา

ผลกระทบของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อมนั้นพบว่า สีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางด้านชีวภาพ แต่ความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำแต่อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำที่ปัจจุบันไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อมแต่อยู่ที่สีของน้ำที่ เนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้มดังนั้นแม้มีอยู่ในน้ำเพียงเล็กน้อยก็ทำให้น้ำมีสีเป็นที่น่าสนใจของผู้ที่พบเห็น อีกทั้งยังเป็นตัวขัดขวางการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ ส่งผลให้ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำลดลงอีกด้วย จึงทำให้โรงงานมีความจำเป็นต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้งแม้สีนั้นจะมีความเป็นพิษต่ำก็ตาม

2.4.4.2 สีของน้ำเสีย

สีของน้ำที่ปรากฏให้เห็น โดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ

1. **สีแท้หรือสีจริง (True Color)** หมายถึง สีที่ละลายจนกลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ เกิดจากการละลายของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำซึ่งสารที่ทำให้เกิดสีแท้ได้แก่ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรตและสารอินทรีย์ต่างๆ

2 **สีปรากฏ (Apparent Color)** หมายถึง สีของน้ำที่สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีกายภาพ เกิดจากการสะท้อนของสิ่งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหรืออาจเกิดจากการสะท้อนของท้องฟ้า สิ่งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำที่ทำให้เกิดสีปรากฏได้แก่ พืชเล็กๆ ในน้ำเช่น แพลงตอนพืช (Phytoplankton) และแพลงตอนสัตว์ (Zooplankton) รวมทั้งสิ่งที่ไม่มีชีวิตบางประเภท เช่น เกล็ดของซากพืชซากสัตว์ ตะกอนของดินและทราย

สีทั้งสองรูปแบบนี้อาจจะแยกจากกัน โดยใช้วิธีหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ซึ่งสีปรากฏจะตกตะกอน ส่วนสีแท้จะไม่ตกตะกอนและเมื่อสามารถกำจัดสีปรากฏออกไปได้จะทำให้เห็นสีแท้ของน้ำ แล้วจึงกำจัดต่อไป

2.5 การบำบัดน้ำเสีย (Waste Water Treatment) [16-18]

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การดำเนินการเปลี่ยนสภาพของเสียในน้ำเสียให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมพอที่จะไม่ทำให้เกิดปัญหาต่อแหล่งรับน้ำเสียนั้น ๆ

2.5.1 ประเภทของการบำบัดน้ำเสีย

ซึ่งวิธีการบำบัดน้ำเสียแบ่งได้ 4 ประเภท คือ

1 การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical Wastewater Treatment)

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ เป็นการใช้หลักการทางกายภาพ เช่น แรงแม่เหล็ก แรงแเหวี่ยง แรงแหนีศูนย์กลาง เป็นต้น เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกจากน้ำเสียโดยเฉพาะสิ่งสกปรกที่ไม่ละลายน้ำ จึงนับเป็นหน่วยบำบัดน้ำเสียขั้นแรกที่ถูกนำมาใช้ก่อนที่น้ำเสียจะถูกนำไปบำบัดขั้นต่อไปจนกว่าจะมีคุณภาพดีพอที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งมีหลายวิธีได้แก่

1.1 การกรองด้วยตระแกรง (Screening) เป็นการดักเศษอาหารต่าง ๆ จำพวกเศษไม้ เศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า กระจาย ฝ่าหรือพลาสุติกที่ไหลมากับน้ำเสีย ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 การทำให้ลอย (Flotation) เป็นการแยกของแข็งที่ตกตะกอนได้ยากหรือมีลักษณะครึ่งจมครึ่งลอยหรือมีน้ำหนักเบาออกจากส่วนที่เป็นของเหลวโดยใช้ฟองอากาศเป็นตัวพาหรือยกสิ่งสกปรกให้ลอยสูงขึ้นสู่ผิวของของเหลวหลังจากนั้นคัดออกโดยใช้คนหรือเครื่องมือกล

1.3 การตัดย่อย (Comminution) เป็นการลดขนาดหรือปริมาตรของของแข็งให้มีขนาดเล็กลงและมีขนาดสม่ำเสมอ มักเป็นของแข็งที่เน่าเปื่อยได้เช่น เศษเนื้อ กระดูกหมูหรือกระดูกไก่ เป็นต้น

1.4 รางดักกรวดทราย (Grit Chamber) เป็นเครื่องมือที่ใช้แยกเอาของแข็งที่น้ำหนักมากออกจากรน้ำเสียเช่น กรวดทราย เศษโลหะ เศษไม้หรือเศษกระดูก เป็นต้น

1.5 การปรับสภาพการไหล (Flow Equalization) การปรับสภาพการไหลเป็นการเก็บกักน้ำเสียไว้ระยะหนึ่ง เพื่อปรับอัตราการไหลของน้ำเสียซึ่งไหลเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียให้มีความสม่ำเสมอและต่อเนื่องและทำให้ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกที่อยู่ในน้ำเสียมีค่าคงที่และสม่ำเสมอ

1.6 การตกตะกอน (Sedimentation) การตกตะกอนเป็นการแยกเอาของแข็งที่มีน้ำหนักมากกว่าน้ำออกจากน้ำเสียโดยอาศัยแรงดึงดูดของโลก

2. การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Wastewater Treatment) [16]

2.1 การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) วิธีนี้ใช้น้ำบำบัดน้ำเสียที่มีลักษณะสมบัติเป็นกรด-เบสอย่างแรงโดยใช้สารเคมีเช่น ใช้สารแคลเซียมไฮดรอกไซด์มาสะเทินกับน้ำเสียที่มีกรดกำมะถันดังสมการ



2.2 การตกตะกอน (Sedimentation) วิธีนี้ใช้ในการกำจัดพวกตะกอนของสารต่างๆ ออกจากน้ำเสีย โดยลดความเร็วของการไหลของน้ำเสียลงจนถึงค่าหนึ่งที่ตะกอนหนักทั้งหลายสามารถแยกตัวออกจากน้ำเสียจมลงสู่ก้นถังแยกตะกอน

2.3 การสร้างตะกอนและการรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation) เป็นวิธีที่ใช้สารเคมีบางชนิดเติมลงในน้ำเสียเพื่อรวมตะกอนหรือของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กให้มีขนาดโตพอที่จะตกตะกอนได้โดยเรียกตะกอนดังกล่าวว่า “ Floc ” ซึ่งมีคุณสมบัติคือ เมื่อถูกพัดไปสัมผัสกับตะกอนทั้งหลาย จะทำการยึดตะกอนเหล่านั้นให้ติดบริเวณพื้นผิวไว้ เมื่อตะกอนรวมตัวกันมากๆ จะมีน้ำหนักมากจนกระทั่งสามารถแยกตัวออกจากน้ำจมลงสู่ก้นถังแยกตะกอนได้

2.4 การทำให้เกิดตะกอน (Precipitation) ใช้สำหรับกำจัดสารละลายที่มีอยู่ในน้ำเช่น สารอนินทรีย์หรือโลหะหนัก โดยใส่สารเคมีบางชนิดลงในน้ำเสีย สารเคมีจะทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการกำจัดกลายเป็นตะกอน หากตะกอนนั้นมีน้ำหนักมากพอก็จะสามารถแยกออกจากน้ำได้ แต่ถ้าตะกอนที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดเล็กก็จะต้องผ่านการรวมตะกอนก่อน

3. การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biological Wastewater Treatment)

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพเป็นการใช้สิ่งมีชีวิตเป็นตัวช่วยในการเปลี่ยนสภาพของเสียในน้ำให้อยู่ในสภาพที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะมลพิษต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งสิ่งมีชีวิตที่มีบทบาทในการช่วยเปลี่ยนสภาพสิ่งสกปรกในน้ำเสียคือจุลินทรีย์ได้แก่ แบคทีเรีย โปรโตซัว สาหร่ายและรา เป็นต้น

3.1 ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ (Activated Sludge) เป็นวิธีที่ใช้แบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถบำบัดได้ทั้งน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่ระบบประเภทนี้จะมีความยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากจำเป็นจะต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมและลักษณะทางกายภาพต่างๆ ให้เหมาะสมแก่การทำงานและการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด

3.2 ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) เป็นระบบที่น้ำเสียถูกฉีดเป็นฝอยตกลงมายังก้อนหินที่เรียงเชื่อมจุลินทรีย์อยู่ และจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่กับก้อนหินเหล่านี้จะย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในน้ำ ขณะที่น้ำไหลผ่านก้อนหินออกไป การทำน้ำให้เป็นฝอยเพื่อต้องการให้น้ำเสียมีออกซิเจนอย่างเพียงพอที่จะทำให้จุลินทรีย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขั้นตอนนี้จะได้ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ซึ่งละลายในอากาศออกไป น้ำที่ผ่านออกไปจะไปสู่ถังตกตะกอนจะคล้ายกับถังในการบำบัดในขั้นที่หนึ่ง สิ่งเจือปนในน้ำเสียประมาณ 85 - 90 % จะถูกทำให้เป็นตะกอนและกำจัดออกต่อไป

3.3 Oxidation Pond บางที่เรียกว่า Stabilization pond หรือ Lagoon เป็นระบบที่ทำให้น้ำเสียได้พักตัวอยู่ในสระ ซึ่งในสระนี้จะมีปฏิกิริยาการย่อยสลายของสารอินทรีย์เกิดขึ้นเป็นการอาศัยซึ่งกันและกันระหว่างแบคทีเรียและสาหร่ายในภาวะที่มีออกซิเจนเพียงพอ แบคทีเรียจะย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้ได้คาร์บอน ไดออกไซด์ แอมโมเนียและแร่ธาตุอื่นๆ เมื่อมีแสงแดดสาหร่ายจะเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงทำให้ได้ออกซิเจนออกมาช่วยในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่อไปอีก ระบบนี้สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดหรือยังไม่ผ่านการบำบัดในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่หนึ่งก็ได้และสามารถลดค่า BOD ของน้ำเสียได้ถึงมากกว่า 90% เช่นเดียวกับระบบเลี้ยงตะกอน

4. กระบวนการกายภาพ – เคมี (Physicochemical Unit Processes)

คือใช้หลักการบำบัดทางกายภาพและเคมีรวมกันในการกำจัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ เครื่องมือและอุปกรณ์มากกว่ากระบวนการอื่นๆ แต่ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้สามารถบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้นถึงระดับที่ดื่มได้ นิยมใช้กระบวนการนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการอื่นๆ มาแล้ว ตัวอย่างเช่น

4.1 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) วิธีการนี้ใช้หลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารปนเปื้อนที่มีในน้ำเสียบกับตัวกลางที่บรรจุอยู่ในถังแลกเปลี่ยนประจุ ซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบภายในถังแลกเปลี่ยนประจุนั้น เมื่อมีการผ่านน้ำเสียเข้าไปบำบัดภายในถังแล้วจะมีตะกอนขังอยู่ในถังและประสิทธิภาพของตัวกลางในการแลกเปลี่ยนประจุจะลดลง ดังนั้นควรทำการล้างถังอย่างสม่ำเสมอและทำการเปลี่ยนแปลงตัวกลางให้บ่อยครั้ง โดยถังกว้างตัวกลางเป็นชนิดประจุบวก (+) จะใช้กรดแก่ทำการเปลี่ยนแปลงตัวกลางแต่หากถังกว้างตัวกลางเป็นชนิดประจุลบ (-) จะใช้เบสทำการเปลี่ยนแปลงตัวกลางของระบบเพื่อให้ประสิทธิภาพของตัวกลางกลับมาเหมือนเดิม

4.2 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดคือจะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ส่งผลให้ pH ของน้ำทิ้งสูงดังนั้น ต้องมีการปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้งด้วย การกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมากเพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงรวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับ pH ก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone Treatment) โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์กลุ่มที่มีวงแหวนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น จึงต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่นานนัก ซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนชัน (Ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อมซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยไนโตรเจน คลอรีนหรือซัลเฟอร์จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

4.4 เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

- **ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)** ใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากถังย้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภทสีย้อมสีดิสเพอร์สที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทพอลิเอสเตอร์และสีย้อมประเภทสีย้อมซัลเฟอร์ สีแวนด์และสีเอโซที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายและวิสคอส (Viscose) สีย้อมดิสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
- **ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)** เหมาะสำหรับการกำจัดไอออนในสีย้อมและโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish Water) และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (Sea Water) ซึ่งเยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือ จะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตามสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้ายไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้
- **ไดนามิกเมมเบรน (Dynamic Membrane)** ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก แสตนเลส วัสดุคาร์บอนหรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ Hydrous Zirconium (IV) Oxide และกรดพอลิอะคริลิก (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) [19]

2.6.1 กลไกของกระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติดเรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆ ทั้งสามสถานะคือ ของแข็ง (Solid) ของเหลว (Liquid) และก๊าซ (Gas) ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง โดยในกรณีนี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบของเหลว-ของแข็ง (Liquid-Solid Interface) ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุลความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ โดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และกาดูดซับทางเคมี

2.6.2 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

2.6.2.1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิดคือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) เป็นการดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีการคายความร้อนค่อนข้างน้อยคือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่ายซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับ

สามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2.6.2.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลายกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกละลายเดิมคือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล กล่าวคือการทำตัวถูกละลายออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยากคือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่างดังตารางที่ 2.5

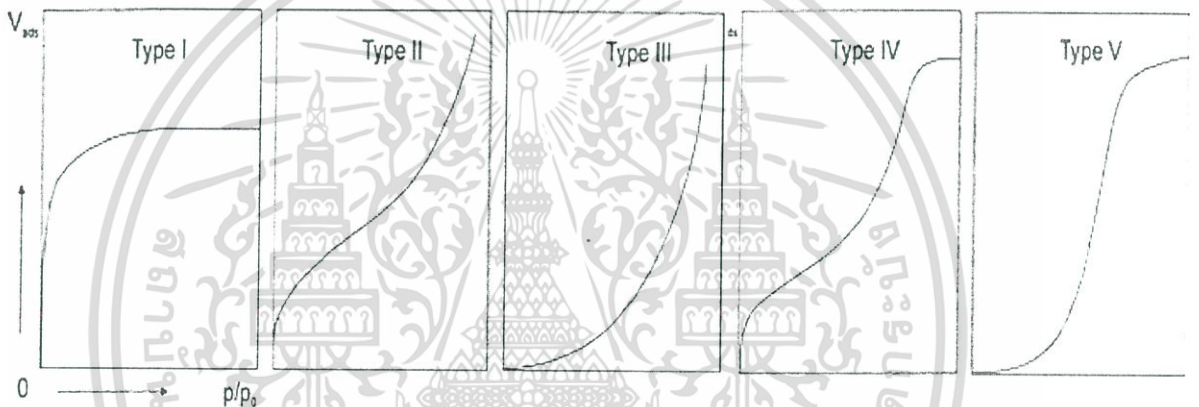
ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบความแตกต่างของกระบวนการดูดซับทางกายภาพและเคมี [18]

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ความร้อนของการดูดซับ	≤ 20 kJ/mol	50-400 kJ/mol
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการดูดซับ	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
6. ชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) [20]

ไอโซเทอมของการดูดซับคือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ ซึ่งใช้อธิบายปรากฏการณ์ของกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ ไอโซเทอมการดูดซับ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของตัวดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอม การดูดซับมี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งจำแนกลักษณะความโค้งของความชันของไอโซเทอม ในช่วงแรก



รูปที่ 2.19 ไอโซเทอมของการดูดซับพื้นฐาน [20]

- แบบ I เป็นการดูดซับของสารประเภท Microporous Solid
- แบบ II เป็นการดูดซับของสารประเภท Non-porous Solid
- แบบ III และ V เป็นการดูดซับของสารประเภท Vapor Adsorption
- แบบ IV เป็นการดูดซับของสารประเภท Mesoporous Solid

2.6.4 สมการไอโซเทอมของการดูดซับ (Isotherm Equation)

1. สมการการดูดซับของฟรุนดริช (Freundlich Adsorption Isotherm) ใช้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Adsorption Surface) คือพื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$x/m = q = KC_c^{1/n} \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	K	คือ	ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ
	1/n	คือ	ค่าคงที่ที่แสดงถึงพลังงานของการเกิดปฏิกิริยา
	x	คือ	ปริมาณของตัวดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม)
	m	คือ	ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (มิลลิกรัม)
	C_e	คือ	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเมื่ออยู่ในภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	q	คือ	ปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.1 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\log q = \log K + (1/n) \log C_e \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

เมื่อนำค่า $\log q$ และ $\log C_e$ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเป็น $1/n$ และจุดตัดแกน y เป็น $\log K$ เมื่อ $1/n$ มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมาก เป็นการแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก คือเมื่อความเข้มข้นต่ำ อัตราการดูดซับก็จะต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น แต่หาก $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 มากๆ หรือมีความชันน้อยมากหรือเกือบจะขนานกับแกน x แสดงว่าอัตราการดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำหรือสูงไม่แตกต่างกันมากนัก หรืออาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ และสมการของฟรอนดลิชจะใช้ได้ดีในสารละลายที่มีความเข้มข้นปานกลางในการพิจารณาว่าตัวดูดซับใดมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่ากัน

2. สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Homogeneous Adsorption Surface) โดยมีกลไกการดูดซับเหมือนกันและการดูดซับของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) จากสมดุลการดูดซับถือว่าการดูดซับเกิดได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะต้องคูณปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับแทนด้วย q_m ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$x/m = q = \frac{bQ^0C_e}{(1+bC_e)} \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	x	คือ	ปริมาณของตัวดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม)
	m	คือ	ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (มิลลิกรัม)
	C_e	คือ	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเมื่ออยู่ในภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	Q^0	คือ	ปริมาณสูงสุดของตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแบบ Monolayer ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ)
	b	คือ	ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความแข็งแรงของพันธะ

เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.3) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$C_e/q = (1/bQ^0) + (C_e/Q^0) \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

เมื่อ	q	คือ	ปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)
	q_m	คือ	ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
	K	คือ	ค่าคงที่การดูดซับ C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q และ C_e จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $1/Q^0$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bQ^0$

2.6.5 แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic Adsorption) [21]

แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic Adsorption) เป็นแบบจำลองที่ทำให้ทราบกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสารที่ถูกดูดซับและวัสดุดูดซับ โดยแบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ Pseudo-first order และ Pseudo-second order โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบตั้งอยู่บนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและการคายซับเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (Chemical Reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุที่ใช้ดูดซับที่ยังไม่ถูกดูดซับ สมการ Pseudo-first order (สมการที่ 2.5) แสดงถึงอัตราการดูดซับที่ตัวถูกละลายยึดกับตัวดูดซับที่บริเวณผิวแปรผันตรงกับความเข้มข้น

$$\frac{dq_t}{dt} = k_t(q_e - q_t) \quad \text{สมการที่ 2.5}$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.5 ที่สภาวะ $t = 0$ ถึง $t > 0$ ($q_t = 0$ ถึง $t > 0$) จะได้สมการเส้นตรงของเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำค่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า Pseudo-first order แสดงดังสมการที่ 2.6

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแบบสงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad \text{สมการที่ 2.6}$$

เมื่อ	q_e	คือ	ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_t	คือ	ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	t	คือ	เวลาต่างๆ ที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)
	k_1	คือ	ค่าคงที่อัตราการดูดซับสีย้อมแบบ Pseudo-first order (นาที ⁻¹)

สำหรับสมการ Pseudo-second order (สมการที่ 2.7) หมายถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับแปรผันตรงกับกำลังสองของตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.7 ที่เวลา $t=0$ ถึง $t=t$ และ $q_t=0$ ถึง $q_t=q_t$ จะได้สมการเส้นตรง Pseudo-second order แสดงดังสมการที่ 2.8

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad \text{สมการที่ 2.8}$$

เมื่อ	q_e	คือ	ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_t	คือ	ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	t	คือ	เวลาต่างๆ ที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)
	k_2	คือ	ค่าคงที่อัตราการดูดซับสีย้อมแบบ Pseudo-second order (นาที ⁻¹)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jheng-Hua Lin, Shyh-Yang Lee และ Yung-Ho Chang [22] ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่งที่ถูก treat ด้วยกรดและแอลกอฮอล์ โดยใช้กรด HCl เข้มข้น ในเมทานอลที่ 25 °C ซึ่งใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาตั้งแต่ 1 วันถึง 15 วัน แล้วทำการศึกษาผลของปัจจัยดังกล่าวที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของแป้ง พบว่าการย่อยแป้งมันฝรั่งเป็นเวลา 15 วัน ขนาดโดยเฉลี่ยของเม็ดแป้งลดลงจาก 47.2 μm เป็น 44.8 μm แต่สำหรับขนาดเม็ดของแป้งข้าวโพดลดลงน้อยมากเมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อยเท่ากัน และผลการศึกษาสัณฐานวิทยาจากเทคนิค SEM พบว่าแป้งทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการย่อยด้วยกรดแล้วมีลักษณะพื้นผิวขรุขระเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ยังไม่ผ่านการย่อย นอกจากนี้ยังศึกษาความสามารถในการละลายน้ำของแป้งที่ถูกย่อย โดยใช้ช่วงอุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 65-95 °C พบว่าแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่งที่ยังไม่ย่อยด้วยกรดมีความสามารถในการละลายน้ำน้อยกว่า 10% และ 22% ตามลำดับ แต่เมื่อทำการย่อยด้วยกรดแล้วพบว่าความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการย่อย ซึ่งแนวโน้มความสามารถในการละลายน้ำของแป้งข้าวโพดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นและคงที่เมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อยมากกว่า 11 วัน แต่สำหรับสำหรับแป้งมันฝรั่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อให้อุณหภูมิมากกว่า 75 °C และคงที่เมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อยมากกว่า 3 วัน

ปฐมา จาตุกานนท์และ ล้าณรงค์ ศรีรอด [23] ศึกษาผลของการย่อยแป้งมันสำปะหลังด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ในน้ำและแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ เป็นเวลา 1 วันที่มีต่อโครงสร้างทางโมเลกุลและสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งที่ได้ โดยเตรียมสารแขวนลอยของแป้งมันสำปะหลังในตัวทำละลายชนิดต่างๆ คือ น้ำ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล และบิวทานอล หลังจากนั้นจึงเติมกรดไฮโดรคลอริกลงไป เก็บตัวอย่างในภาชนะปิดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน นำตัวอย่างที่ได้มาปรับ pH ให้เป็นกลาง กรอง และอบให้แห้ง พบว่าการย่อยแป้งด้วยกรดในแอลกอฮอล์ทุกชนิดเกิดได้ดีกว่าการย่อยแป้งด้วยกรดที่ความเข้มข้นเดียวกันในน้ำ โดยเฉพาะการย่อยด้วยกรดในโพรพานอล และบิวทานอล แป้งที่ย่อยด้วยกรดในแอลกอฮอล์ที่ได้ยังคงอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง ความหนืดของแป้งดัดแปรที่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อโมเลกุลในเม็ดแป้งมีขนาดเล็กลงเนื่องจากถูกย่อยด้วยกรด แป้งที่ย่อยด้วยกรดในแอลกอฮอล์ทุกชนิดมีความสามารถในการละลายเพิ่มสูงขึ้นมากที่อุณหภูมิสูงเมื่อเทียบกับแป้งดิบและแป้งที่ย่อยด้วยกรดในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wan-Yuan Kuo และ His-Mei Lai [24] ศึกษาผลของสภาวะต่อการเกิดปฏิกิริยาและสมบัติของแป้งแคทไอออนิกซึ่งอธิบายในเชิงวิธีทางคณิตศาสตร์และสถิติเพื่อใช้ในการกำหนดวิธีการของพื้นที่ (response surface methodology, RSM) โดยการเตรียมแป้งแคทไอออนิกสามารถทำได้โดยนำแป้งข้าวโพดที่แห้งสนิทปริมาณ 50g มาแขวนลอยในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1 mM แล้วนำมาผสมกับสารละลายแคทไอออนิกมอนอเมอร์ (CHPTAC) ที่ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 12 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 5 N จากนั้นปรับค่า pH ของสารละลายผสมให้เท่ากับ 11 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 2 N แล้วเจือจางสารละลายที่ได้ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1 mM ปริมาตร 600 cm³ เพิ่มอุณหภูมิเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพร้อมกับปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที จากนั้นแบ่งสารละลายออกเป็น 3 ส่วนแล้วนำแต่ละส่วนไปทดลองเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ 2, 5 และ 24 ชั่วโมง หลังจากครบตามเวลาเจือจางสารละลายด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้น 95% ด้วยปริมาตรเท่าๆ กัน แล้วนำสารที่ได้ไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูงที่ความเร็วรอบ 1000g เป็นเวลา 10 นาที เพื่อแยกตะกอนออก หลังจากนั้นนำตะกอนที่แยกได้มาแขวนลอยอีกครั้งด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้น 63% ปริมาตร 300 cm³ แล้วทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 4.8 N แป้งแคทไอออนิกที่ได้นำไปล้างหลายๆ ครั้งด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้น 63% หลายๆ ครั้งจนกระทั่งปราศจากคลอไรด์ไอออน แล้วอบที่อุณหภูมิ 40°C จนกว่าจะแห้ง นำแป้งแคทไอออนิกที่ได้มาหาปริมาณ N โดยวิธีหาลดค่า แล้วคำนวณหาปริมาณการแทนที่ด้วย N (DS) จากสูตร

$$DS = \frac{162.15 \times \%N}{1401 (154.64 \times \%N)}$$

นำแป้งแคทไอออนิกไปหาค่า %การเกิดปฏิกิริยา (%RE) จากสูตร

$$\%Re = \frac{DS \times 100}{\text{Added CHPTAC mol/Starch mol}}$$

จากการศึกษาพบว่าแป้งแคทไอออนิกที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแป้งข้าวโพดและ CHPTAC ที่สภาวะ pH = 11 และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา คือ 2, 5 และ 24 ชั่วโมงจะมีค่า DS อยู่ในช่วง 0.003-0.121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S.Pal, D.Mal และ R.P.Singh [25] ศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติการเป็นตัวตกตะกอนของ แป้งแคทไอออนิกที่มีปริมาณแคทไอออนิกมอนอเมอร์ (CHPTAC) ต่างๆกันและแป้งที่ถูกต่อกิ่ง ด้วยพอลิอะคริลาไมด์อีกทั้งยังเปรียบเทียบกับสารตกตะกอนที่ใช้ในทางการค้าอีกด้วยโดยใช้ Jar Test ในการทดสอบ ซึ่งในการสังเคราะห์แป้งแคทไอออนิกทั้งหมด 4 อนุกรมคือ Cat St1, Cat St2, Cat St3 และ Cat St4 โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ CHPTAC 0.0039, 0.0053, 0.0066 และ 0.0079 โมลตามลำดับ พบว่าแป้งแคทไอออนิกที่มีปริมาณของ CHPTAC มาก จะสามารถใช้เป็นตัวตกตะกอนได้ดีกว่าแป้งแคทไอออนิกที่มีปริมาณ CHPTAC น้อย หลังจากนั้นนำแป้งแคทไอออนิกมาเปรียบเทียบกับแป้งที่ถูกต่อกิ่งด้วยพอลิอะคริลาไมด์พบว่า แป้งแคทไอออนิกมีความสามารถในการเป็นตัวตกตะกอนได้ดีกว่าแป้งที่ถูกต่อกิ่งด้วยพอลิอะคริลาไมด์ และเมื่อทำแป้งแคทไอออนิกมาเปรียบเทียบกับสารตกตะกอนทางการค้า (Mag LT22, Mah156, Mag351, Rish 226 LV และ Rish 226 HV) ก็พบว่าแป้งแคทไอออนิกสามารถให้ผลการตกตะกอนได้ดีกว่าเพียงแค่ Mag 351 เท่านั้น

รัตนวรรณ เกียรติโกลม [26] ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยใช้ แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวมาดูดซับสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินในกลุ่มสเมคไทต์ (Smectite) ที่มีลูมินา-ซิลิกาเป็นส่วนประกอบในลักษณะโครงสร้างซ้อนกันเป็นชั้นๆ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้มอนต์มอริลโลไนต์มีคุณสมบัติคล้ายกับซีโอไลต์ กล่าวคือมีพื้นที่ผิวสูง จากคุณสมบัตินี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย การปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อให้เหมาะกับการดูดซับสารอินทรีย์สามารถทำได้โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในโครงสร้างตามธรรมชาติของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารอินทรีย์ประเภทควอเทอร์นารีแอมโมเนียมซึ่งบางครั้งจะเรียกสารประเภทนี้ว่า สารลดแรงดึงผิวที่มีประจุบวก สารที่ใช้ได้แก่ tetramethylammonium chloride ($C_4H_{12}ClN$), hexadecyltrimethyl ammonium bromide ($C_{19}H_{42}BrN$), tetradecyltrimethylammonium bromide ($C_{17}H_{38}NBr$) และ benzyldimethylhexadecylammonium chloride ($C_{25}H_{46}ClN$) ซึ่งสารเหล่านี้จะมีความยาวของหมู่อัลคิลและขนาดโมเลกุลต่างกัน ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวแล้วในการดูดซับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารอินทรีย์ 6 ชนิด คือ humic acid, methylene blue, methyl orange, naphthalene, phenol และ 3-monochlorophenol โดยทำการทดลองเป็นแบบกะ สารอินทรีย์แต่ละชนิดที่เลือกมาศึกษามีสมบัติเฉพาะสารที่แตกต่างกัน เช่น humic acid เป็นสารอินทรีย์ที่พบทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ methylene blue เป็นสีอินทรีย์ (Dye) ที่มีประจุบวก methyl orange เป็นสีที่มีประจุลบ phenols และ naphthalene เป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์ จากการทดลองพบว่าการดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำโดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวแล้ว ได้แก่ TMA-clays, BDHMA-clays, HDTMA-clays และ TDMA-clays จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งานจริง นอกจากนี้จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ (เช่น ระยะห่างระหว่างชั้น โครงสร้างและพื้นที่ผิว) ระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวแล้วพบว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างลักษณะทางกายภาพและความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ

Kitea Baek, Jung-Seok Yang, Tea Soon Kwon และ Ji-Won Yang [27] ศึกษาการปรับปรุงกระบวนการกรองอย่างละเอียดสำหรับการกำจัด Cr(IV) ซึ่งอยู่ในน้ำ (aqueous stream) ของแป้งแคทไอออนิก โดยแป้งแคทไอออนิกสามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับ CHPTAC พบว่าแป้งแคทไอออนิกมีองศาการแทนที่ (DS) ได้เท่ากับ 0.2 หลังจากนั้นนำมาทดสอบการกำจัด Cr(IV) เข้มข้น 0.5 mM โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแป้งแคทไอออนิกคือ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 g/L พบว่า สามารถกำจัด โครเมตได้ 35%, 62%, 95% และ 98% ตามลำดับ

Shizhang Qiao, Qihong Hua, Fouad Haghsereshta, Xijun Hu และ Gao Qing (Max) Lu [28] ศึกษาการดูดซับสีย้อมแอซิดของวัสดุประกอบระหว่างเบนโทไนท์กับ layer double hydroxyl (LDH) ซึ่งเป็นชั้นของวัสดุที่มีประจุเป็นบวก โดยสีย้อมแอซิดที่ใช้ในงานวิจัย คือ Acid Red 18 (AR18) และ Acid Yellow 23 (AY23) พบว่าความจุในการดูดซับที่ได้จากแลงเมียร์โอโซเทอมเป็น 69.8 และ 75.4 mg/g ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pathavuth Monvisade และ Punnama Siriphannon [29] ศึกษาการเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Na^+ -MMT) ที่ถูกดัดแปรด้วยไคโตซาน (Chi-MMT) เพื่อปรับปรุงความสามารถด้านการดูดซับสีย้อมเบสิก 3 ประเภท คือสีเบสิกบลู 9 (BB9) สีเบสิกบลู 66 (BB66) และสีเบสิกเชลโล 1 (BY1) โดยได้ทำการเตรียม Chi-MMT โดยการกระจายโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Na^+ MMT) เข้าไปในโครงสร้างของไคโตซานโดยใช้อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของ Na^+ กับ NH_3^+ ของไคโตซาน โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสามารถของการดูดซับสีย้อมเบสิกทั้ง 3 ประเภทของ Ma^+ -MMT เปรียบเทียบกับ Chi-MMT โดยใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 500 mg/L ปริมาตร 100 mL ต่อตัวดูดซับ 1 กรัม ค่าการดูดซับสีย้อมสามารถวัดได้ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 665 nm , 615 nm และ 412 nm สำหรับสีย้อม BB9, BB66 และ BY1 ตามลำดับ



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. แป้งมันสำปะหลัง บริษัท Thai Wash Food Products Public company Limited
2. เมทานอล (Methanol) Commercial Grade บริษัท Carlo Erba
3. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) AR Grade บริษัท Carlo Erba
4. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) AR Grade บริษัท Lab-scan Asia
5. เอทานอล (ethanol) AR Grade บริษัท Carlo Erba
6. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) เข้มข้น 0.1 โมลาร์
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade บริษัท Lab-scan Asia
8. 3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล-เอ็น-เอ็น-เอ็น-ไตรแอม โมเนียมคลอไรด์ (CHPTAC) เข้มข้น 60 %wt บริษัท SIGMA-ALDRICH
9. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) บริษัท SIGMA-ALDRICH
10. มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) บริษัท Thai Nippon Chemical Industry
11. สีย้อมเบสิกบลู 66 (BB666) บริษัท Acros
12. สีย้อมเบสิกเฮลโล 1 (BY1) บริษัท Acros
13. สีย้อมแอซิดเรด 91 (AR91) บริษัท Acros

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver INSTRUMENT รุ่น SI-234
2. บริภัณฑ์เครื่องแก้วต่างๆ
3. โถรงบดสาร
4. เดซิเคเตอร์
5. เครื่องกรองแบบสุญญากาศ (Vacuum pump) บริษัท SIBATA CIRCULATING ASPIRATOR รุ่น

WJ-20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กระดาษยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ (Universal indicator)
7. ตู้อบ รุ่น Isotemp บริษัท Fisher Scientific
8. เครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง (centrifuge) บริษัท Hettich ZEN ZENTRIFUGATION รุ่น Universal 320
9. เครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA) บริษัท Parkin Elmer รุ่น Pyris1 TGA
10. เครื่อง Gel permeation chromatography รุ่น Waters 600E
11. เครื่อง X-ray diffraction spectrometer (XRD) บริษัท BRUKER AG รุ่น D8 ADVANCE
12. เครื่อง X-ray fluorescent spectrometer (XRF) บริษัท Philips รุ่น PW2400
13. เครื่อง UV-VIS spectrometer บริษัท PG Instruments Ltd รุ่น T90 UV/VIS spectrometer
14. เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) บริษัท Parkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum GX
15. เครื่อง Nuclear magnetic resonance (NMR) บริษัท Bruker AG รุ่น NMR 300 ULTRA SHIELD spectrometer
16. เครื่องอัดตัวอย่าง IR บริษัท Shimadzu Corporation รุ่น SSP-10A
17. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) บริษัท Cole-Parmer รุ่น 8892 Power 50/60 Hz, 335/100 watt
18. เครื่อง Total organic carbon Analyzer บริษัท SHIMADZU รุ่น TOC-VCPH
19. เครื่องย่อยเจ็ดศาล บริษัท Garhardt รุ่น Vapordest 30
20. เครื่องกลั่นเจ็ดศาล บริษัท Garhardt รุ่น Kjeldatherm

3.3 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การสังเคราะห์แป้งน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Low molecular weight starch, LMW-ST)

1. ชั่งแป้งมันสำปะหลังปริมาณ 25 กรัม แล้วนำไปแขวนลอยในเมทานอล 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที
2. ใส่กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาตร 1 มิลลิลิตรโดยปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เมื่อครบเวลาหยุดปฏิกิริยาโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) เข้มข้น 1 โมลาร์ จนกระทั่งสารละลายเป็นกลาง
4. รองตะกอนและล้างตะกอน LMW-ST ที่ได้ด้วยเอทานอลเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จนกระทั่งไม่มีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) เหลืออยู่ (ทดสอบโดยการหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ประมาณ 2-3 หยดลงในน้ำที่ได้จากการล้างตะกอนหลังจากนั้นสังเกตว่ามีตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) เกิดขึ้นหรือไม่ หากมีตะกอนสีขาวให้ล้างตะกอนนั้นด้วยเอทานอลอีกจนกระทั่งการทดสอบดังกล่าวไม่มีตะกอนเกิดขึ้น)
5. นำตะกอนที่กรองได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50°C

ตอนที่ 2 การสังเคราะห์แป้งแคทไอออนิก (Cationic Starch, CST)

1. นำ LMW-ST ปริมาณ 10 กรัม แขวนลอยในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
2. นำแคทไอออนิกมอนอเมอร์ (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล-เอ็น-เอ็น-เอ็น-ไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (CHPTAC)) ที่มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (AGU) ต่อ CHPTAC ต่างๆ ตามตารางที่ 3.1 มาปรับ pH ให้เท่ากับ 12 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 5 โมลาร์
3. เทสารละลายข้อ 2 ลงในสารละลายข้อ 1 หลังจากนั้นเจือจางสารละลายผสมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 60 มิลลิลิตร หลังจากนั้นปั่นกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
4. ตกตะกอนด้วยเอทานอลเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยให้มีปริมาตรเท่ากับสารละลายเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำตะกอนที่ได้ไปแขวนลอยอีกครั้งในสารละลายเอทานอลเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แล้วปรับ pH ให้เป็นกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 โมลาร์
6. กรองตะกอนที่ได้และล้างตะกอนด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หลายๆ ครั้งจนกระทั่งจะไม่มีคลอไรด์ไอออนเหลืออยู่ (ทดสอบโดยการหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ประมาณ 2-3 หยดลงในน้ำที่ได้จากการล้างตะกอนหลังจากนั้นสังเกตว่ามีตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) เกิดขึ้นหรือไม่ หากมีตะกอนสีขาวให้ล้างตะกอนนั้นด้วยเอทานอลอีกจนกระทั่งการทดสอบดังกล่าวไม่มีตะกอนเกิดขึ้น)
7. นำตะกอนแป้งแคปไซซิน (CST) ที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 50°C
8. นำ CST ที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค ^{13}C -Nuclear magnetic resonance (^{13}C -NMR)
9. วิเคราะห์ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยด้วยเทคนิค Gel permeation chromatography (GPC) โดยมีสถานะในการทดสอบ ดังนี้

Eluent:	โซเดียมไนเตรต 0.1 M
Flow rate:	0.6 ml/min
Injection volume:	20 μL
Temperature:	30°C
Column set:	Ultrahydrogel linear 1 column (MW resolving range = 1,000-20,000,000) 1 column + guard column
Standard:	Dextrans (MW 4,400-401,000)
Detector:	Refractive Index Detector

ตารางที่ 3.1 การสังเคราะห์ CST

สูตร	อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง AGU:CHPTAC	อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)
CST11	1:1	60
CST12	1:2	60
CST13	1:3	60
CST14	1:4	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 การดัดแปรโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ด้วยแปงแคทไอออนิก (CST)

3.1 การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT)

1. เตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) และน้ำในอัตราส่วน 1:120 โดยน้ำหนัก แล้วใช้เครื่องอัลตราโซนิกช่วยในการกระจายตัวเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. เทของผสมระหว่างน้ำและ MMT ส่วนที่บวมน้ำลงในบีกเกอร์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C จนกว่า MMT จะแห้งดี แล้วนำไปบดให้ละเอียด

3.2 การดัดแปรโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ด้วยแปงแคทไอออนิก (CST)

1. นำมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.1 ปริมาณ 2 กรัมมากระจายตัวในน้ำด้วยอัตราส่วน 1:40 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. ชั่ง CST มา 1, 2 และ 3 กรัมละลายในน้ำ 100 มิลลิลิตร โดยให้ความร้อนประมาณ 80 °C จนกระทั่งแปงละลายหมด
3. ค่อยๆ เทสารละลายแปงในข้อ 2 ลงในสารแขวนลอยในข้อ 1 อย่างช้าๆ โดยทำการผสมที่อุณหภูมิ 60 °C พร้อมปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที
4. แยกวัสดุประกอบ CST-MMTs ออกมาด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง โดยใช้ความเร็ว 5000g เป็นเวลา 5 นาที
5. นำตะกอนที่แยกได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C จนกว่าจะแห้ง
6. นำวัสดุประกอบ CST-MMTs ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray Fluorescent (XRF)

ตารางที่ 3.2 การสังเคราะห์วัสดุประกอบ CST-MMT

สูตร	สูตร CST	สารละลายแป้ง		สารละลาย MMT	
		แป้ง (กรัม)	น้ำ (กรัม)	MMT (กรัม)	น้ำ (กรัม)
CST-MMT1	CST12	1	100	2	80
CST-MMT2	CST12	2	100	2	80
CST-MMT3	CST12	3	100	2	80
CST-MMT4	CST14	1	100	2	80
CST-MMT5	CST14	2	100	2	80
CST-MMT6	CST14	3	100	2	80

ตอนที่ 4 การทดสอบและการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ LMW-ST, CST, MMT และวัสดุประกอบ CST-MMT

4.1 การทดสอบความสามารถในการละลายน้ำของแป้งน้ำหนักรีด (LMW-ST) และแป้งแคโทอนิก (CST)

1. ชั่ง LMW-ST ปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในน้ำปริมาตร 100 มิลลิลิตรพร้อมกับปั่นกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก
2. ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C พร้อมทั้งสังเกตการละลาย
3. ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อสังเกตว่ามีการตกตะกอนหรือไม่
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเป็น 80 และ 90°C ตามลำดับ
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็น CST และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเป็น 50, 60 และ 70°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบหาปริมาณไนโตรเจน (%N) และค่าองศาการแทนที่ (DS) ของแป้งแคทไอออนิก (CST) โดยใช้เทคนิคเจลดดาห์ล (Kjeldahl Method)

1. ชั่งตัวอย่าง CST ประมาณ 1 กรัมใส่ลงใน Digestion tube
2. เติมกะตะลิสต์ผสม 1 เม็ด ซึ่งประกอบด้วยโซเดียมซัลเฟตปราศจากน้ำ 96 เปอร์เซ็นต์ คอปเปอร์ซัลเฟต 3.5 เปอร์เซ็นต์ และเซลเนียมไดออกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ พร้อมกับเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงใน digestion tube
3. นำ Digestion tube ใส่ลงในเครื่องกลั่น (Digest unit) ย่อยเป็นเวลา 3 ชั่วโมงจนกระทั่งได้สารละลายสีฟ้าใส
4. รอจนกระทั่งสารละลายเย็นลงและหมักวันของไอกรด หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 40 มิลลิลิตร
5. นำขวดรูปชมพู่ใส่กรดบอริก 25 มิลลิลิตร เพื่อนำไปรอรับสารละลายที่กลั่นได้จากเครื่องกลั่น
6. นำ Digestion tube มาเข้าเครื่องกลั่น (Digestion unit) หลังจากนั้นเปิดชุดกลั่นและกลั่นเป็นเวลา 3-5 นาที
7. นำขวดรูปชมพู่ที่เก็บสารที่ได้จากการกลั่นออกมาหยดอินดิเคเตอร์ผสมประมาณ 2-3 หยด แล้วไทเทรตกับสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นใสไม่มีสี
8. สารละลายเบสองค์สามารถเตรียมได้โดยทำตามขั้นตอนที่ 2-7 โดยไม่ใส่สารตัวอย่าง
9. นำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณไนโตรเจน (%N) และองศาการแทนที่ (DS) ตามสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 [31] ตามลำดับ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน ; } \%N = \frac{M \times V \times 1.4}{\text{Sample weight (g)}} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

$$\text{องศาการแทนที่ ; } DS = \frac{162.15 \times \%N}{1401 - (154.64 \times \%N)} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

เมื่อ	M	คือ	ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (โมลาร์)
	V	คือ	ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้ (มิลลิลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ MMT และวัสดุประกอบ CST-MMT ด้วยเทคนิค X-ray diffraction; XRD

นำตัวอย่าง MMT และ CST-MMT ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้

ช่วงมุม 2θ ที่ใช้วิเคราะห์	: 1° - 25°
Step size	: 0.04°
Step time	: 5 วินาที

4.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ CST, MMT และวัสดุประกอบ CST-MMT ด้วยเทคนิค

Thermal gravimetric analysis; TGA

1. นำ CST เข้าเครื่อง TGA โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 50 - 900°C และใช้อัตราเร็วในการให้ความร้อน $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$
2. ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (% weight loss) จากกราฟที่ได้

4.5 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ CST, MMT, วัสดุประกอบ CST-MMT ด้วยเทคนิค

Fourier transform infrared spectrometer; FTIR

1. นำ CST ปริมาณเล็กน้อยบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ซึ่งใช้เป็นสารอ้างอิงสำหรับเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) โดยบดให้เป็นผงละเอียด
2. นำไปอัดให้เป็นแผ่นบางๆ ด้วยเครื่องอัดตัวอย่าง
3. นำแผ่นตัวอย่างไปเข้าเครื่อง FTIR โดยทำการวิเคราะห์ในช่วงเลขคลื่น (Wave Number) ตั้งแต่ 4000 cm^{-1} – 400 cm^{-1}
4. ศึกษาลักษณะ peak ที่ได้เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

ตอนที่ 5 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีของวัสดุประกอบ CST-MMT ด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometry

5.1 การทำกราฟมาตรฐานของสี BB66, BY1 และ AR91

1. เตรียมสารละลายสีเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งสี BB66, BY1 และ AR91 มาสีละ 500 มิลลิกรัมละลายน้ำ 1000 มิลลิตรในขวดวัดปริมาตร
2. นำสารละลายสีจากข้อที่ 1 มาเจือจางให้มีความเข้มข้นเป็น 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 4, 6, 10, 30, 50, 70 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ
3. นำสีที่มีความเข้มข้นดังกล่าวมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-VIS spectroscopy ที่ λ_{\max} เท่ากับ 615 นาโนเมตรสำหรับสี BB66, 412 นาโนเมตรสำหรับ BY1 และ 514 นาโนเมตรสำหรับ AR91
4. นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มา plot กราฟเส้นตรง

5.2 ทดสอบการดูดซับสีของ MMT และวัสดุประกอบ CST-MMT ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. นำ MMT ที่ได้จากข้อ 3.1 ปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีที่มีความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ml
2. นำไปปั่นกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน
4. นำสารที่ได้ไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง โดยใช้ความเร็ว 5000g เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อแยกตะกอนออก
5. นำสารละลายที่แยกได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ λ_{\max} เท่ากับ 615 นาโนเมตร, 412 นาโนเมตร และ 514 นาโนเมตร สำหรับสี BB66, BY1 และ AR91 ตามลำดับ
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนตัวดูดซับเป็นวัสดุประกอบ CST-MMT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม BY1 และ AR91

6.1 การศึกษาระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบ CST-MMT

1. นำวัสดุประกอบ CST-MMT1 ปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีย้อม BY1 ที่มีความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. นำไปปั่นกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 5 นาที
3. นำสารที่ได้ไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง โดยใช้ความเร็ว 5000g เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อแยกตะกอนออก
4. นำสารละลายที่แยกได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ λ_{\max} เท่ากับ 412 นาโนเมตร
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับ (ข้อ 2) เป็น 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120 และ 1440 นาทีตามลำดับ

6.2 การศึกษาระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบ CST-MMT

1. นำวัสดุประกอบ CST-MMT6 ปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีย้อม AR91 ที่มีความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. นำไปปั่นกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 5 นาที
3. นำสารที่ได้ไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง โดยใช้ความเร็ว 5000g เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อแยกตะกอนออก
4. นำสารละลายที่แยกได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ λ_{\max} เท่ากับ 514 นาโนเมตร
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับ (ข้อ 2) เป็น 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120 และ 1440 นาทีตามลำดับ

6.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบ CST-MMT

1. นำวัสดุประกอบ CST-MMT1 ปริมาณ 1 กรัมใส่ลงในสารละลายสีย้อม BY1 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. นำไปปั่นกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 2 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน
3. นำสารที่ได้ไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง โดยใช้ความเร็ว 5000g เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อแยกตะกอนออก
4. นำสารละลายที่แยกได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ λ_{\max} เท่ากับ 412 นาโนเมตร
5. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 และ 6000 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำข้อมูลผลการดูดซับที่ได้มาสร้างกราฟตามสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ (สมการที่ 3.3) และฟรุนดลิช (สมการที่ 3.4)

$$C_e/q = (1/bQ^0) + (C_e/Q^0) \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

$$\log q = \log K + (1/n) \log C_e \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

เมื่อ	C_e	คือ	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเมื่ออยู่ในภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	Q^0	คือ	ปริมาณสูงสุดของตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแบบ Monolayer ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ)
	q	คือ	ปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

$$x/m = q = bQ^0C_e/(1+bC_e)$$

เมื่อ	x	คือ	ปริมาณของตัวดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม)
	m	คือ	ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (มิลลิกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเมื่ออยู่ในภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสีของ AR91 ของวัสดุประกอบ CST-MMT

1. นำวัสดุประกอบ CST-MMT 6 ปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีของ AR91 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. นำไปปั่นกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 2 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน
3. นำสารที่ได้ไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูงโดยใช้ความเร็ว 5000g เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อแยกตะกอนออก
4. นำสารละลายที่แยกได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ λ_{\max} เท่ากับ 514 นาโนเมตร
6. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเป็น 1000, 1500 และ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำข้อมูลผลการดูดซับที่ได้มาสร้างกราฟตามสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ (สมการที่ 3.3) และฟรุนดลิช (สมการที่ 3.4)

ตอนที่ 7 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสี (Adsorption Kinetic)

7.1 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสี (Adsorption Kinetic) ของสีของ BY1 โดยใช้วัสดุประกอบ CST-MMT

1. นำวัสดุประกอบ CST-MMT 1 ปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีของ BY1 ที่มีความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. นำไปปั่นกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 5 นาที
3. นำสารที่ได้ไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง โดยใช้ความเร็ว 5000g เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อแยกตะกอนออก
4. นำสารละลายที่แยกได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ λ_{\max} เท่ากับ 412 นาโนเมตร
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับ (ข้อ 2) เป็น 10, 15, 30, 45, 60, 90, 240 และ 1440 นาทีตามลำดับ
6. นำค่าการดูดซับสีที่ได้มาสร้างกราฟตามสมการ Pseudo-first order (สมการที่ 3.5) และ Pseudo-second order (สมการที่ 3.6)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad \text{สมการที่ 3.5}$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad \text{สมการที่ 3.6}$$

เมื่อ	q_e	คือ	ปริมาณการดูดซับที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_t	คือ	ปริมาณการดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	t	คือ	เวลาต่างๆ ที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)
	k_1	คือ	ค่าคงที่อัตราการดูดซับสีย้อมแบบ Pseudo-First order (นาที ⁻¹)
	k_2	คือ	ค่าคงที่อัตราการดูดซับสีย้อมแบบ Pseudo-Second order (นาที ⁻¹)

7.2 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม (Adsorption Kinetic) ของสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบ CST-MMT

- นำวัสดุประกอบ CST-MMT6 ปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีย้อม AR91 ที่มีความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- นำไปปั่นกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 5 นาที
- นำสารที่ได้ไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง โดยใช้ความเร็ว 5000g เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อแยกตะกอนออก
- นำสารละลายที่แยกได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ λ_{\max} เท่ากับ 514 นาโนเมตร
- ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับ (ข้อ 2) เป็น 10, 15, 30, 45, 60, 90, 240 และ 1440 นาทีตามลำดับ
- นำค่าการดูดซับสีย้อมที่ได้มาสร้างกราฟตามสมการสมการ Pseudo-first order (สมการที่ 3.5) และ Pseudo-second order (สมการที่ 3.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์แป้งน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LMW-ST)

4.1.1 ผลการทดสอบความสามารถในการละลายน้ำของแป้งน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LMW-ST)

ผลการทดสอบความสามารถในการละลายน้ำของแป้งน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LMW-ST) ที่สังเคราะห์ได้จากการนำแป้งมันสำปะหลังมาตัดสายโซ่โมเลกุลด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น โดยใช้เวลาในการย่อย 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ได้ผลิตภัณฑ์ LMW-ST ซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว เปรอร์เซ็นผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ 99 เปรอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นนำ LMW-ST 1 กรัมใส่ลงในน้ำ 100 มิลลิลิตรแล้วสังเกตการละลายที่อุณหภูมิ 70 และ 95 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส LMW-ST ไม่สามารถละลายน้ำ โดยลักษณะทางกายภาพที่สังเกตคือสารละลายขุ่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบเป็น 95 องศาเซลเซียสพบว่าความขุ่นของสารละลายลดลง แสดงให้เห็นว่าสายโซ่ LMW-ST เกิดการละลายได้บางส่วน นอกจากนี้เมื่อตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงสามารถสังเกตเห็นตะกอนของแป้งที่ไม่ละลายน้ำ แสดงให้เห็นว่าการตัดสายโซ่โมเลกุลของแป้งในสภาวะที่กำหนดในการทดลองยังไม่สามารถทำให้แป้งละลายได้อย่างสมบูรณ์ เป็นผลมาจากการตัดสายโซ่โมเลกุลของแป้งเป็นอิสระ (Random) จึงส่งผลให้บางสายโซ่โมเลกุลยังไม่เกิดการตัดหรือสายโซ่อาจถูกตัดได้ไม่สั้นพอที่จะทำให้แป้งนั้นละลายได้อย่างสมบูรณ์

4.1.2 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโตกราฟี (Gel Permeation Chromatography; GPC) ของแป้งมันสำปะหลัง (ST) และแป้งน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LMW-ST)

นำแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ (ST) และแป้งน้ำหนักโมเลกุลต่ำ LMW-ST ที่สังเคราะห์ได้ มาวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยด้วยเทคนิคเจลเพอมีเอชันโครมาโตกราฟี (GPC) โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังภาคผนวก ก รูปที่ ก.1-ก.2 พบว่าแป้งมันสำปะหลังที่ตัดสายโซ่โมเลกุลแล้ว (LMW-ST) ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงมีน้ำหนักโมเลกุลลดลงจากแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติ (ST) ซึ่งข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ST มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (M_w) และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (M_n) เป็น 1,600 และ 210 kDaltons ตามลำดับ สำหรับพีคที่ตำแหน่งประมาณ 20 นาทีเป็นโมเลกุลของอากาศที่อยู่ใน ST ซึ่งเกิดขึ้นในขั้นตอนของการเตรียมตัวอย่างและหลังจากตัดสายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นแล้ว (LMW-ST) พบว่า M_w และ M_n มีค่าลดลงโดยปรากฏเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกเป็น 3,300 และ 2,200 kDaltons ตามลำดับซึ่งมีค่าสูงกว่า M_w และ M_n ของ ST เนื่องจากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของ ST มีค่า Polydispersity Index (PDI) สูงถึง 7.62 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ST มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลสูงหรือกล่าวได้ว่าโมเลกุลของ ST มีขนาดแตกต่างกันมาก และช่วงที่สองเป็น 310 และ 80 kDaltons ตามลำดับ เนื่องจากการตัดสายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังด้วยกรดเข้มข้นเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบอิสระ (Random) ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.1.1 จึงทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยทั้งแบบน้ำหนัก (M_w) และแบบจำนวน (M_n) ปรากฏเป็นสองช่วง และจากผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลแสดงให้เห็นว่าสายโซ่โมเลกุลของ ST ถูกตัด ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของ LMW-ST มีค่าลดลง โดยสายโซ่โมเลกุลของ LMW-ST ที่สามารถละลายน้ำได้ บางส่วนนั้นคาดว่ามือน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 310 kDaltons แต่สำหรับสายโซ่ที่ไม่สามารถละลายน้ำได้คาดว่ามือน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 3,300 kDaltons ซึ่งยังคงเป็นสายโซ่ที่มีความยาวค่อนข้างมาก จึงทำให้เมื่อตั้งสารละลายทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โมเลกุลของ LMW-ST จึงตกลงสู่ก้นบีกเกอร์

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยด้วยเทคนิค GPC

ตัวอย่าง	M_w (kDaltons)	M_n (kDaltons)	Polydispersity (M_w/M_n)
ST	1,600	210	7.62
LMW-ST	3,300	2,200	1.50
	310	80	3.88

4.2 การวิเคราะห์เป็งแคทไอออนิก (CST)

4.2.1 การทดสอบความสามารถในการละลายของเป็งแคทไอออนิก (CST)

นำเป็งแคทไอออนิก (CST) ที่สังเคราะห์ได้จากการนำ LMW-ST มาทำปฏิกิริยากับแคทไอออนิกมอนอเมอร์ (CHPTAC) โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (AGU) ต่อแคทไอออนิกมอนอเมอร์ (CHPTAC) และสถานะในการสังเคราะห์ตามตารางที่ 3.1 แล้วนำเป็งแคทไอออนิก (CST) ที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบความสามารถในการละลายน้ำโดยนำ CST ปริมาณ 1 กรัมละลายในน้ำ 100 มิลลิลิตรแล้วสังเกตการละลายที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า CST11 ยังไม่สามารถละลายน้ำได้โดยสังเกตเห็นสารละลายมีความขุ่นและเมื่อตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจะเกิดตะกอนขึ้น แต่ CST12, CST13 และ CST14 สามารถละลายน้ำได้อย่างสมบูรณ์ถึงแม้จะตั้งสารละลายทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงสารละลายยังคงใสไม่มีตะกอนเกิดขึ้น ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจึงเลือก CST12 และ CST14 ไปสังเคราะห์เป็นวัสดุประกอบนาโน (CST-MMT) เนื่องจาก CST12 สามารถละลายน้ำได้อย่างสมบูรณ์โดยเป็น CST ที่ใช้ปริมาณแคทไอออนิกมอนอเมอร์ในการสังเคราะห์น้อยที่สุด คือใช้อัตราส่วนระหว่างหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสของเป็งต่อแคทไอออนิกมอนอเมอร์ (AGU:CHPTAC) เป็น 1:2 โดยโมลและเพื่อให้การทดลองสามารถเปรียบเทียบผลได้อย่างชัดเจนจึงเลือกใช้ CST14 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง AGU:CHPTAC เป็น 1:4 โดยโมลเป็นตัวเปรียบเทียบ เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวมีผลทำให้ปริมาณประจุบวกที่เกิดขึ้นบนสายโซ่ของเป็งแตกต่างกันอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบการละลายของ CST

สูตร	ลักษณะ CST ที่ได้	% ผลผลิต	ผลการสังเกตการละลาย	
			ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	หลังตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
CST11	แป้งมีลักษณะเป็นแผ่น แข็ง สีขาวขุ่น	78.60	สารละลายขุ่น	มีตะกอนเกิดขึ้น
CST12	แป้งมีลักษณะเป็นแผ่น แข็ง สีขาวขุ่น	80.15	สารละลายใส ไม่มีสี	ไม่มีตะกอนเกิดขึ้น
CST13	แป้งมีลักษณะเป็นแผ่น แข็ง สีขาวขุ่น	80.24	สารละลายใส ไม่มีสี	ไม่มีตะกอนเกิดขึ้น
CST14	แป้งมีลักษณะเป็นแผ่น แข็ง สีขาวขุ่น	79.71	สารละลายใส ไม่มีสี	ไม่มีตะกอนเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน (%N) และค่าองศาการแทนที่ (Degree of substitution, DS) ของแป้งแคทไธออนิก (CST) โดยใช้เทคนิคเจลดาค์ (Kjeldahl method)

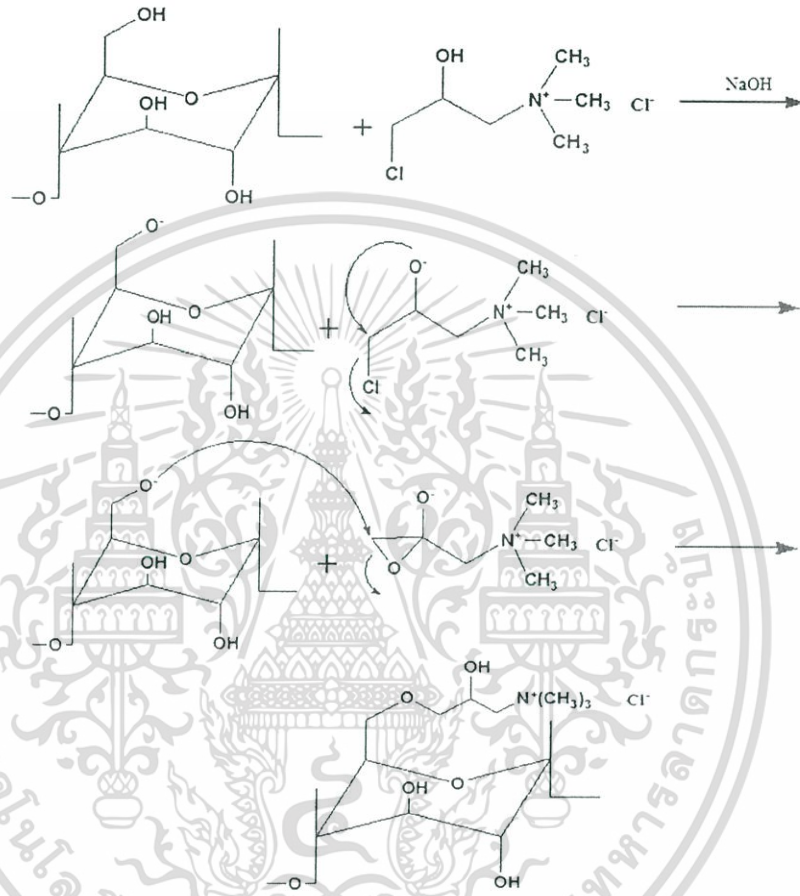
ผลการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน (%N) ของแป้ง CST12 และ CST14 ด้วยเทคนิคเจลดาค์ (Kjeldahl Method) แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าผลการวิเคราะห์ค่า %N ของ LMW-ST ได้เท่ากับ 0% แสดงให้เห็นว่า LMW-ST ไม่มีธาตุ N เป็นองค์ประกอบ แต่เมื่อเปลี่ยนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็น CST12 ซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลในการทำปฏิกิริยาระหว่าง AGU:CHPTAC เป็น 1:2 พบว่า %N ที่คำนวณจากสมการที่ 3.1 ได้เท่ากับ 1.25 % และเมื่อนำ CST14 ซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง AGU:CHPTAC เพิ่มมากขึ้นเป็น 1:4 ส่งผลทำให้ค่า %N ที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 เพิ่มขึ้นเป็น 5.51 % หรือประมาณ 4.5 เท่าของ CST12 หลังจากนั้นนำค่า %N ที่ได้มาคำนวณหาค่าองศาการแทนที่ (Degree of Substitution, DS) ดังสมการที่ 3.2 พบว่า CST12 มีค่าองศาการแทนที่ 0.17 ในขณะที่ CST14 มีค่าองศาการแทนที่ 1.62 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า CST14 มีการเข้าทำปฏิกิริยาของแคทไธออนิกมอนอเมอร์ (CHPTAC) กับสายโซ่โมเลกุลของแป้งมากกว่า CST12 ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนโดยโมล ของ AGU:CHPTAC ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ CST14 ที่สังเคราะห์ได้มีหมู่ควอเตอร์นารีแอมโมเนียม (NR_4^+) เกาะอยู่บนสายโซ่ปริมาณมากกว่า CST12 ดังนั้นประจุบวกที่เกิดขึ้นบนสายโซ่ของ CST14 จึงมีปริมาณมากกว่า CST12 ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจน (%N)

สูตร CST	% ไนโตรเจน	องศาการแทนที่ (DS)
LMW-ST	0	0
CST12	1.25	0.17
CST14	5.51	1.62

4.2.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์แป้งนำหนักโมเลกุลต่ำ (LMW-ST) และแป้งแคโทอิก (CST) ด้วยเทคนิค FTIR

แป้งแคโทอิก (CST) สังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง LMW-ST และ CHPTAC ในสถานะที่เป็นเบส โดยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แป้งแคโทอิก (CST) [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

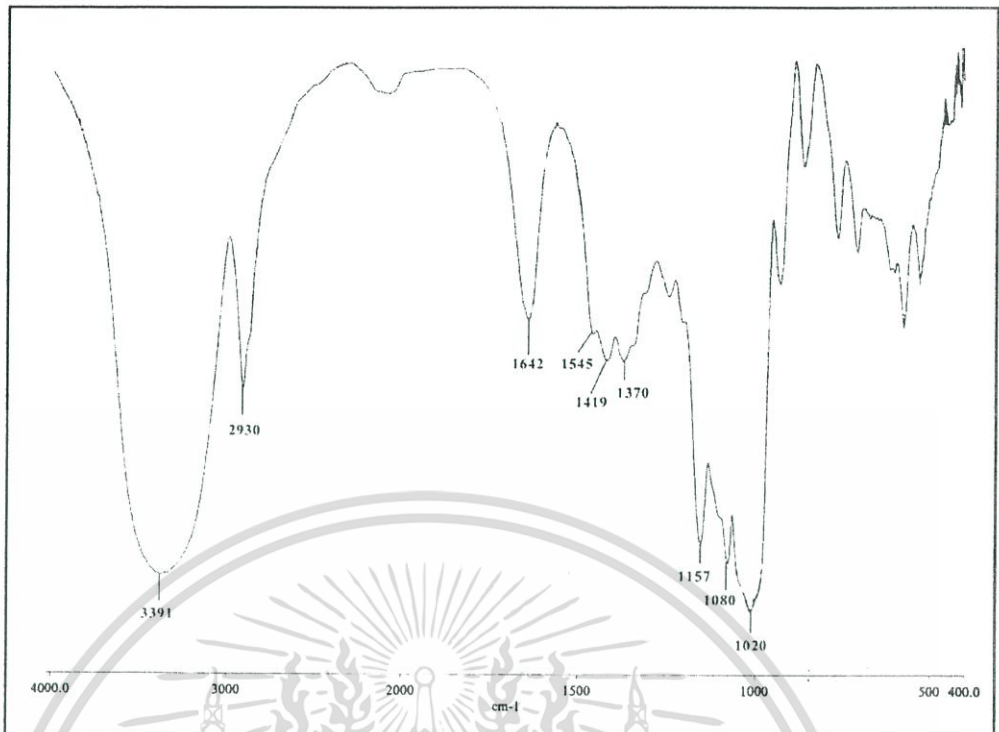
หลังจากนั้นนำ LMW-ST และ CST12 ที่สังเคราะห์ได้มาตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR แสดงดังรูปที่ 4.2(ก) พบแถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่สำคัญของแป้งน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LMW-ST) ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

ตำแหน่ง 3391 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิล
 ตำแหน่ง 2930 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-H ของ Aliphatic hydrocarbon
 ตำแหน่ง 1642 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบงอของพันธะ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิล
 ตำแหน่ง $1157, 1080\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-O-C ของพันธะ Glucosidic bond ของแป้งมันสำปะหลัง

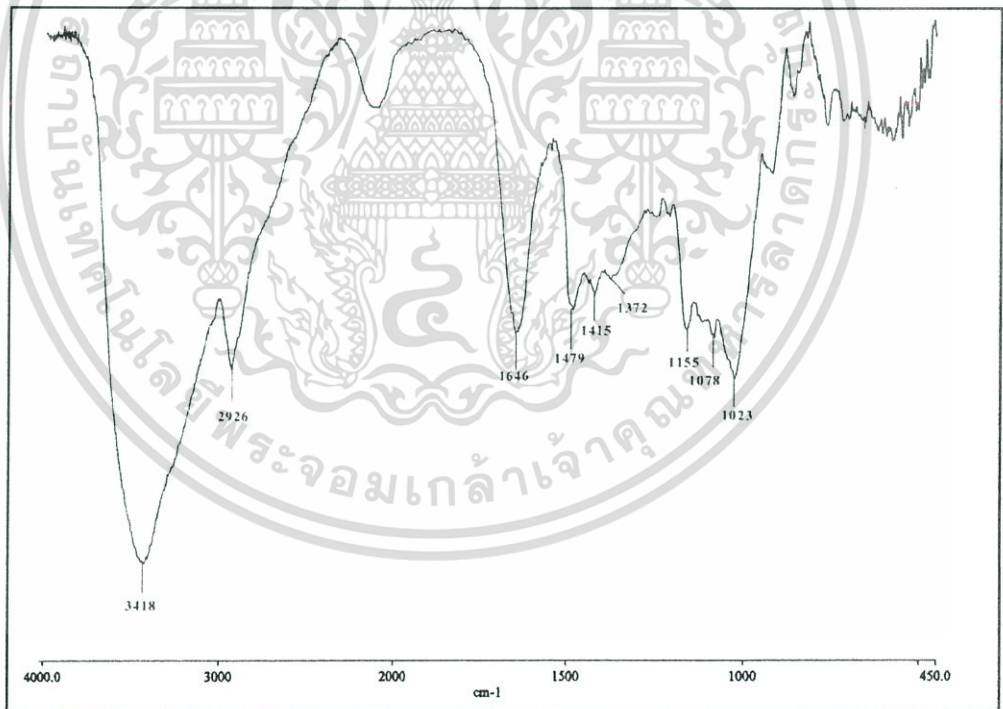
และสำหรับ CST พบแถบการดูดกลืนแสงที่สำคัญ ณ ตำแหน่งต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.2(ข) ดังนี้

ตำแหน่ง 3418 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิล
 ตำแหน่ง 2926 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-H ของหมู่ Aliphatic hydrocarbon
 ตำแหน่ง 1646 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบงอของพันธะ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิล
 ตำแหน่ง 1479 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-N ของ CHPTAC
 ตำแหน่ง $1155-1078\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-O-C ของพันธะ Glucosidic bond ของแป้งมันสำปะหลัง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า CST มีแถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่คล้ายกับแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของ LMW-ST แต่มีแถบการดูดกลืนคลื่นแสงใหม่เกิดขึ้นคือ ณ ตำแหน่ง 1479 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-N ในโครงสร้างของ CHPTAC [27] แสดงให้เห็นว่าอะตอมของไฮโดรเจนสามารถเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยหมู่ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (NR_4^+) ของ CHPTAC



(ก)



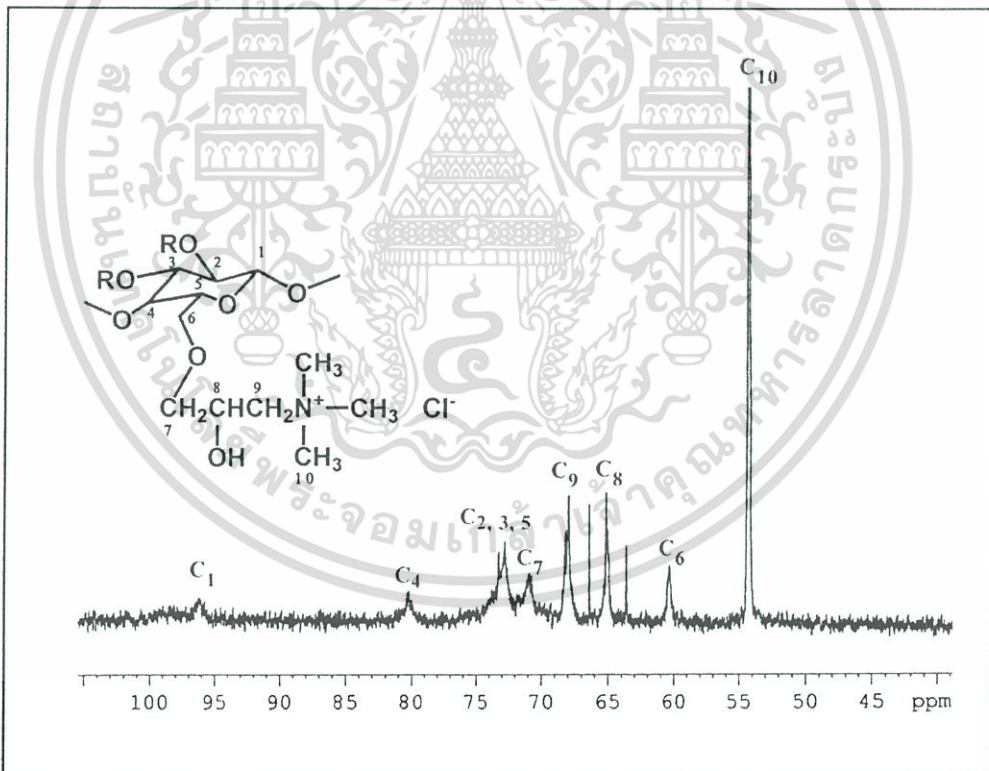
(ข)

รูปที่ 4.2 FTIR สเปกตรัมของการดูดกลืนคลื่นแสงของ (ก) แป้งน้ำหนักรโมเลกุลต่ำ (LMW-ST) และ (ข) แป้งแคทไอออนิก (CST12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การวิเคราะห์แป้งแคโทไออนิกด้วยเทคนิคคาร์บอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Carbon Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy; ^{13}C -NMR)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของ CST ด้วยเทคนิคคาร์บอน-13นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (^{13}C -NMR) พบว่า ^{13}C -NMR สเปกตรัมของ CST12 และ CST14 พบสัญญาณที่ตำแหน่งคล้ายกัน โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.3 พบสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้ ตำแหน่ง C_1 96.26 ppm ซึ่งเป็นสัญญาณของพันธะ C-O สัญญาณที่ตำแหน่ง 80.32 เป็นสัญญาณของ C_4 สำหรับสัญญาณของ C_2 , C_3 และ C_5 ทั้งที่ถูกแทนที่และไม่ถูกแทนที่ด้วย CHPTAC ปรากฏที่ตำแหน่ง 72.77-73.27 ppm ส่วน C_7 และ C_8 เกิดสัญญาณที่ตำแหน่ง 70.99 ppm และ 65.15 ppm ตามลำดับ ส่วนสัญญาณของ C_6 ปรากฏที่ตำแหน่ง 60.37 ppm ซึ่งเป็นสัญญาณของพันธะ C-O และตำแหน่งสัญญาณของ C_9 และ C_{10} ที่ 67.96 และ 54.31 ppm ตามลำดับเป็นสัญญาณของพันธะ C-N [31]



รูปที่ 4.3 ^{13}C -NMR สเปกตรัมของแป้งแคโทไออนิก (CST12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

4.3.1 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)

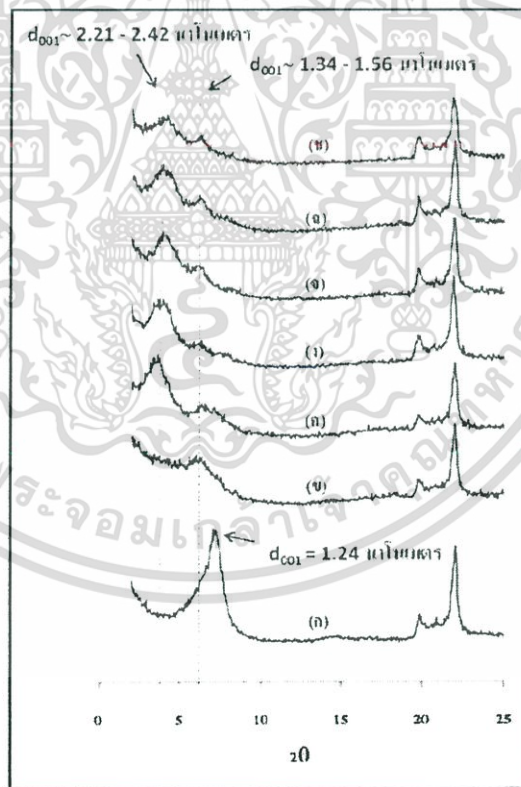
นำวัสดุประกอบ CST-MMT ซึ่งเตรียมจากการนำมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ปริมาณ 2 กรัม มากระจายตัวในน้ำด้วยอัตราส่วน 1:40 โดยมวล แล้วนำ CST ปริมาณ 1, 2 และ 3 กรัมที่ละลายในน้ำแล้ว 100 กรัมมาทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เกิดเป็นวัสดุประกอบ CST-MMT1, CST-MMT2 และ CST-MMT3 สำหรับ CST12 และ CST-MMT4, CST-MMT5 และ CST-MMT6 สำหรับ CST14 แล้วนำ MMT และวัสดุประกอบ CST-MMTs ที่สังเคราะห์ได้มาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs จากสมการของ Braggs

สมการของ Braggs ;
$$n\lambda = 2d\sin\theta$$
 สมการที่ 4.1

โดยที่ λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์เท่ากับ 15.4 นาโนเมตร
 θ = มุมตกกระทบ (องศา)
 d = ระยะห่างระหว่างระนาบของวัสดุประกอบ CST-MMT
 n = ค่าคงที่จำนวนเต็ม

ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุประกอบ CST-MMTs ด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่า MMT ปรากฏพีกการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 7.12 (รูปที่ 4.4 (ก)) ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) จากสมการที่ 4.1 ได้เท่ากับ 1.24 นาโนเมตร และสำหรับวัสดุประกอบ CST-MMTs ที่สังเคราะห์ได้แสดงดังรูปที่ 4.4 (ข-ช) พบว่าตำแหน่ง 2θ ของวัสดุประกอบ CST-MMTs ทุกตัวอย่างจะปรากฏที่ตำแหน่งต่ำกว่าของ MMT เมื่อนำมาคำนวณระยะ d_{001} จากสมการที่ 4.1 พบว่าระยะ d_{001} ของวัสดุประกอบ CST-MMTs มีค่ามากกว่า MMT แสดงให้เห็นได้ว่าหลังจากดัดแปรโครงสร้าง MMT ด้วย CST แล้วสามารถทำให้ช่องว่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างชั้นแต่ละชั้นขยายกว้างมากขึ้นเนื่องจาก CST ที่แทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของ MMT ส่งผลให้วัสดุประกอบ CST-MMTs มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งจากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าระนาบอื่นๆ ของ MMT ยังคงอยู่เช่นเดิมเนื่องจากพิกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 19.8 และ 22 ยังคงปรากฏอยู่ ตำแหน่งเดิมทั้งใน MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs ทั้ง 6 ตัวอย่าง จึงเป็นการยืนยันได้ว่า ตำแหน่ง 2θ ของพิกที่เกิดการเลื่อน (Shift) เป็นตำแหน่งของระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) เท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวัสดุประกอบ CST-MMTs ที่เตรียมขึ้นเป็นวัสดุประกอบนาโนแบบแทรกสอด (Intercalated Nanocomposites) นอกจากนี้พิกของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ที่ปรากฏหลายตำแหน่งนั้นเป็นการแสดงให้เห็นถึงค่าระยะห่างระหว่างชั้น (d_{001}) ของ MMT ที่แตกต่างกันหลายค่า เนื่องจากการแทรกตัวของ CST ใน MMT ที่เตรียมขึ้นอาจมีการแทรกตัวของ CST แบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ อาจมีทั้งการแทรกตัวแบบชั้นเดียว (Monolayer intercalation) และมีการแทรกตัวแบบสองชั้น (Bilayer Intercalation) ซึ่งผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ MMT และ CST-MMT ของ (ก) มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) (ข) วัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 (ค) วัสดุประกอบนาโน CST-MMT2 (ง) วัสดุประกอบนาโน CST-MMT3 (จ) วัสดุประกอบนาโน CST-MMT4 (ฉ) วัสดุประกอบนาโน CST-MMT5 (ช) วัสดุประกอบนาโน CST-MMT6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

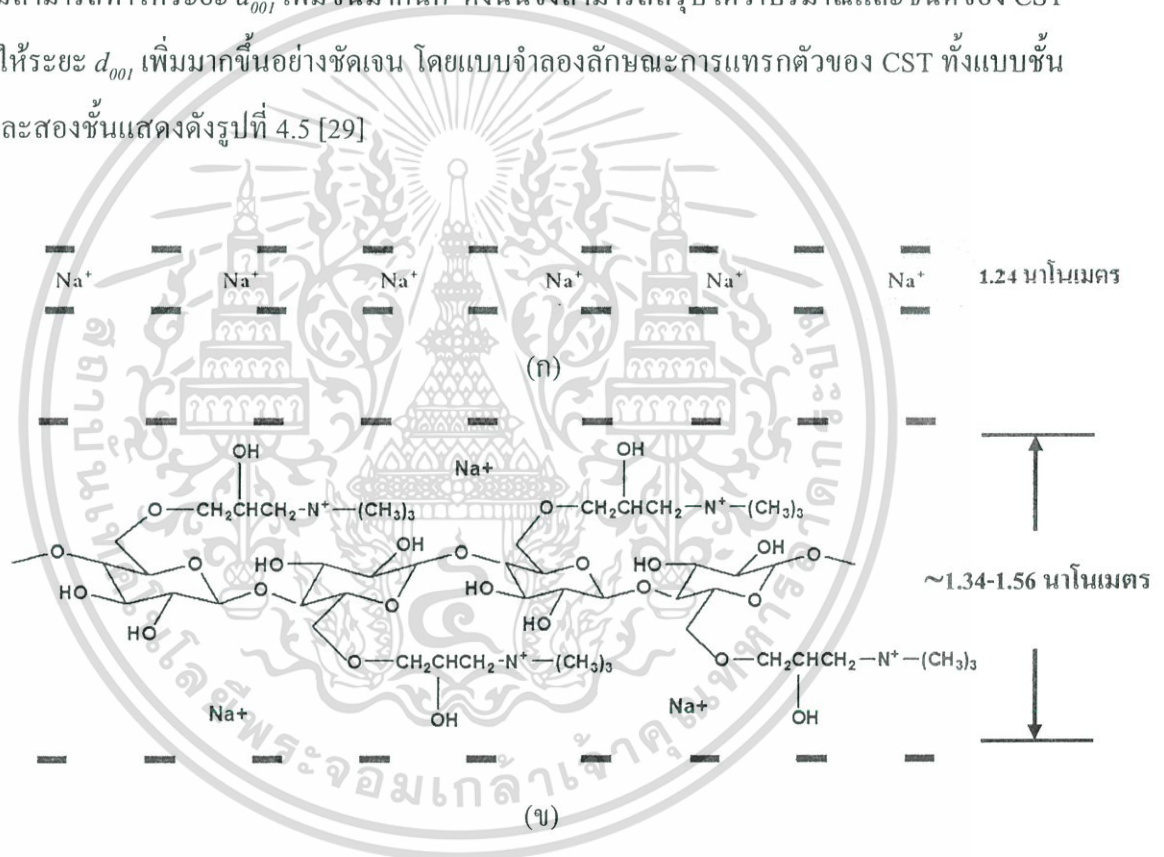
ตารางที่ 4.4 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ MMT และ CST-MMT ด้วยเทคนิค XRD

สูตร	ค่า 2θ	ระยะห่างระหว่างระนาบ d_{001} (นาโนเมตร)	ค่า 2θ	ระยะห่างระหว่างระนาบ d_{001} (นาโนเมตร)
MMT	7.120	1.24	-	-
CST-MMT 1	5.650	1.56	-	-
CST-MMT 2	6.550	1.34	3.635	2.42
CST-MMT 3	6.350	1.39	3.645	2.42
CST-MMT 4	6.250	1.41	4.00	2.21
CST-MMT 5	6.200	1.42	3.85	2.29
CST-MMT 6	6.300	1.40	3.70	2.38

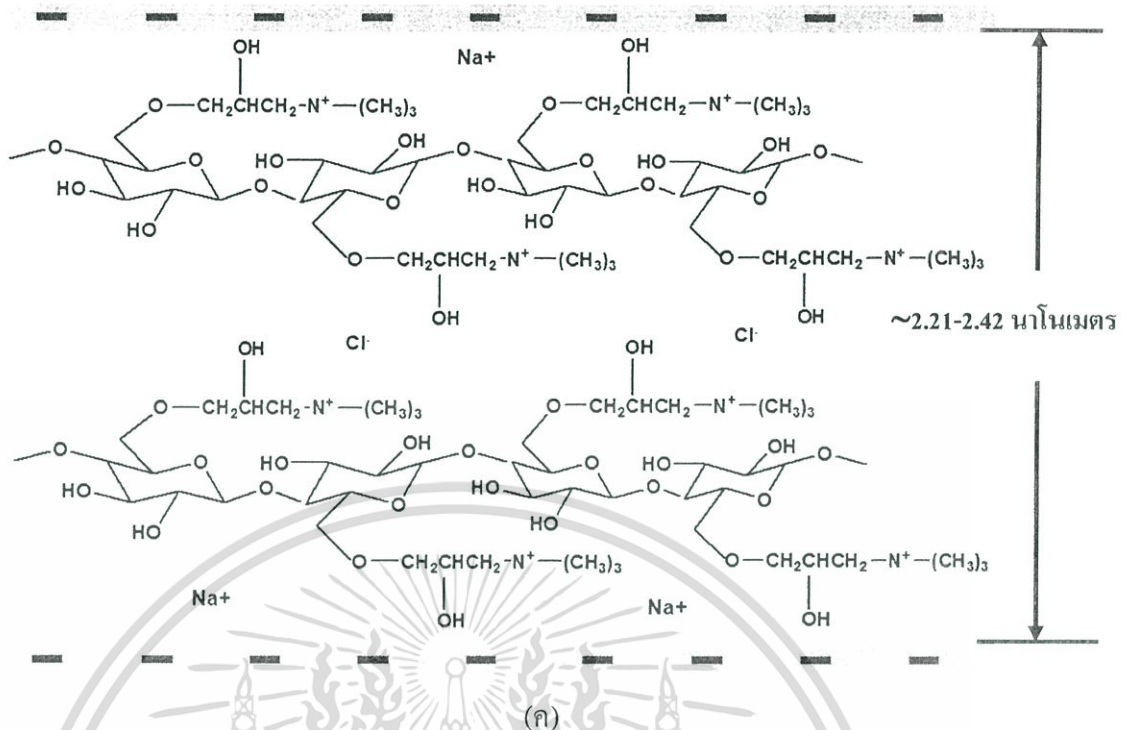
จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าระยะ d_{001} ภายในโครงสร้างของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ที่เตรียมขึ้นเปรียบเทียบกับมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ (MMT) พบว่าวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 ซึ่งใช้ CST12 ปริมาณ 1 กรัมในการดัดแปรมีพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 7.12 เพียงตำแหน่งเดียวและเมื่อนำมาคำนวณระยะ d_{001} ตามสมการที่ 4.1 ได้เท่ากับ 1.56 นาโนเมตร ทำให้สามารถอธิบายถึงรูปแบบการแทรกตัวของ CST12 ในชั้นของ MMT ได้ว่าเป็นการแทรกตัวแบบชั้นเดียว (Monolayer Intercalation) เท่านั้น แต่เมื่อปริมาณ CST12 ที่ใช้ในการดัดแปร MMT เพิ่มมากขึ้นเป็น 2 กรัม (CST-MMT2) และ 3 กรัม (CST-MMT3) ตามลำดับพบว่าพีกที่ตำแหน่ง 2θ ต่างกัน 2 ช่วง โดยช่วงแรกมีพีกที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 6.3-6.5 (ระยะ d_{001} ประมาณ 1.3 นาโนเมตร) ซึ่งแสดงถึงการแทรกตัวของ CST12 เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer Intercalation) และช่วงที่สองมีพีกที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 3.6 (ระยะ d_{001} ประมาณ 2.4 นาโนเมตร) ซึ่งแสดงถึงรูปแบบการแทรกตัวของ CST12 เป็นแบบสองชั้น (Bilayer Intercalation) และเมื่อพิจารณาระยะ d_{001} ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs ที่ใช้ CST14 ในการดัดแปรปริมาณ 1 กรัม (CST-MMT 4) 2 กรัม (CST-MMT 5) และ 3 กรัม (CST-MMT 6) พบว่ามีพีกที่ตำแหน่ง 2θ ต่างกัน 2 ช่วงโดยช่วงแรกมีพีกที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 6.2-6.3 (ระยะ d_{001} ประมาณ 1.4 นาโนเมตร) และช่วงที่สองมีค่า 2θ ประมาณ 3.7-4.0 (ระยะ d_{001} ประมาณ 2.21-2.38 นาโนเมตร) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการแทรกตัวของ CST14 ที่เข้าไปใน

โครงสร้างของ MMT กล่าวคือมีรูปแบบการแทรกตัวทั้งแบบชั้นเดียว (Monolayer Intercalation) และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้ณาเบเซประยชนดานการคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองชั้น (Bilayer Intercalation) เช่นเดียวกันกับ CST-MMT(2-3) จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ปริมาณของ CST12 ในการตัดแปรรูป MMT มากขึ้นสามารถส่งผลให้ระยะ d_{001} เพิ่มขึ้นได้เล็กน้อยและเมื่อเปรียบเทียบระยะ d_{001} ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs ที่ใช้ CST ในการตัดแปรรูปต่างชนิดกันเช่นในกรณีของ CST-MMT2 และ CST-MMT5 ซึ่งใช้ CST12 และ CST14 ปริมาณ 2 กรัมต่อ MMT 2 กรัมเช่นเดียวกัน พบว่าวัสดุประกอบนาโน CST-MMT2 ซึ่งใช้ CST12 ในการตัดแปรรูปมีระยะ d_{001} ที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับระยะ d_{001} ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT5 ที่ใช้ CST14 ในการตัดแปรรูป แสดงให้เห็นว่าวัสดุประกอบนาโนที่ถูกตัดแปรรูปด้วย CST ที่มีประจุบวก (+) มากไม่สามารถทำให้ระยะ d_{001} เพิ่มขึ้นมากนัก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณและชนิดของ CST ไม่ทำให้ระยะ d_{001} เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยแบบจำลองลักษณะการแทรกตัวของ CST ทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้นแสดงดังรูปที่ 4.5 [29]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แบบจำลองการแทรกตัวของแป้งแคทไอออนิก (CST) ในมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ของ (ก) มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) (ข) การแทรกตัวของ CST ใน MMT แบบชั้นเดียว (Monolayer Intercalation) (ค) การแทรกตัวของ CST ใน MMT แบบสองชั้น (Bilayer Intercalation) [30]

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการคายรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescent; XRF)

นำ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs ที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการคายรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescent; XRF) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs ทั้ง 6 ตัวอย่างมีปริมาณธาตุองค์ประกอบแตกต่างจาก MMT โดยเฉพาะปริมาณของ Na_2O ลดลงจาก 2.2% โดยน้ำหนักเหลือเพียงประมาณ 0.6% โดยน้ำหนักเท่านั้น ซึ่งปริมาณของ Na_2O ที่ลดลงแสดงให้เห็นว่าภายในโครงสร้างของ MMT ที่ผ่านการตัดแปรด้วย CST แล้วสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (+) ระหว่างไอออนบวกขนาดเล็ก (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) ที่อยู่ระหว่างชั้นของ MMT กับหมู่ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (NR_4^+) บนสายโซ่ของ CST ที่ใช้ในการตัดแปร MMT [30] และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT(1-3) ซึ่งใช้ CST12 ในการตัดแปร MMT เปรียบเทียบกับวัสดุประกอบนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้งานในทางอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST-MMT (4-6) ซึ่งใช้ CST14 ในการตัดแปร MMT พบว่าปริมาณ Na_2O , K_2O , MgO และ CaO ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT(1-3) ใกล้เคียงกับ CST-MMT(4-6) ซึ่งให้เห็นว่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (+) ระหว่าง Na^+ , K^+ , Ca^{2+} หรือ Mg^{2+} กับหมู่หมู่ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (NR_4^+) ของ CST ได้ใกล้เคียงกันทั้ง 6 ตัวอย่าง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในกลุ่มของวัสดุประกอบนาโนที่ใช้ CST12 ในการตัดแปรด้วยปริมาณที่แตกต่างกันคือ 1 กรัม, 2 กรัมและ 3 กรัมเป็นวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1, CST-MMT2 และ CST-MMT3 และกลุ่มของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ที่ใช้ CST14 ในการตัดแปรด้วยปริมาณ 1 กรัม, 2 กรัมและ 3 กรัมเป็นวัสดุประกอบนาโน CST-MMT4, CST-MMT5 และ CST-MMT 6 ตามลำดับพบว่าปริมาณของ Na_2O , K_2O , MgO และ CaO ของทั้ง 3 ตัวอย่างในแต่ละกลุ่มไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ CST ที่ใช้ในการตัดแปรไม่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (+) ได้มากขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ในหัวข้อ 4.3.1

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs ด้วยเทคนิค XRF

ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)							
	Na_2O	K_2O	MgO	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	other
MMT	2.231	1.497	2.963	4.86	11.832	72.179	2.439	1.999
CST-MMT1	0.873	1.413	2.712	5.353	11.622	72.87	2.978	2.179
CST-MMT2	0.415	1.259	2.566	4.689	11.371	75.364	3.13	1.206
CST-MMT3	0.673	1.399	2.562	4.821	11.317	73.57	3.241	2.417
CST-MMT4	0.552	1.281	2.778	3.644	11.563	73.556	3.036	3.59
CST-MMT5	0.672	1.441	2.577	5.167	11.027	73.009	3.515	2.592
CST-MMT6	0.465	1.452	2.541	4.886	10.682	73.614	3.658	2.702

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการสลายตัวขององค์ประกอบด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกซ์ (Thermogravimetric Analysis; TGA)

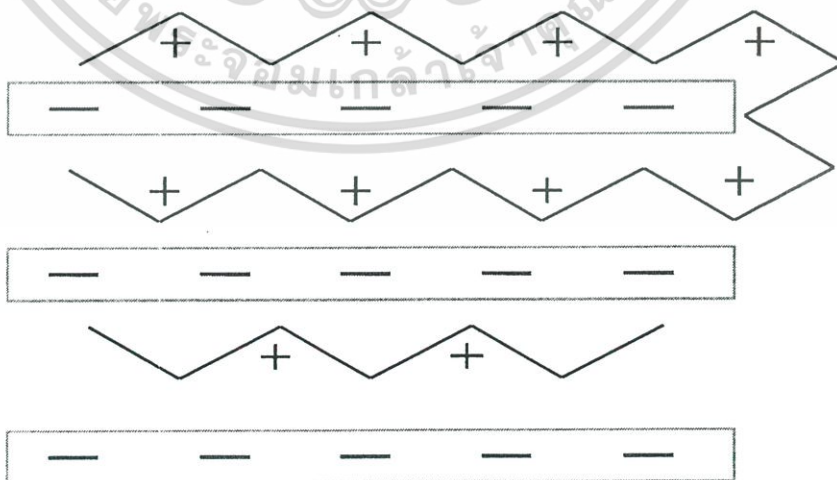
นำ CST12, MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs มาตรวจวิเคราะห์ปริมาณการสลายตัวขององค์ประกอบด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกซ์ (TGA) โดยทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 900 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ง พบว่าที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส CST12 สามารถสลายตัวได้ทั้งหมด 100% โดยน้ำหนัก แสดงในภาคผนวก ง รูปที่ ง.2 เนื่องจากในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 900 องศาเซลเซียสเป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของสารอินทรีย์จึงทำให้ CST สลายตัวได้ทั้งหมด สำหรับผลการสลายตัวทางความร้อนของ MMT แสดงในภาคผนวก ง รูปที่ ง.1 พบว่าเมื่อให้ความร้อนถึง 900 องศาเซลเซียส มีสารอินทรีย์ที่แทรกอยู่ใน MMT สลายตัวไปประมาณ 14% โดยน้ำหนัก และอีก 86% โดยน้ำหนักที่เหลือจากการเผาเป็นส่วนของ MMT บริสุทธิ์ แสดงให้เห็นว่า MMT ในธรรมชาติจะเป็น MMT บริสุทธิ์อยู่เพียง 86% โดยน้ำหนักเท่านั้น หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs ที่เตรียมขึ้นดังกล่าวแสดงในภาคผนวก ง.3-ง.8 แล้วนำไปคำนวณเป็นปริมาณของ CST ที่แทรกตัวเข้าไปใน MMT ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ด้วยเทคนิค TGA

ตัวอย่าง	% ความชื้น	% สารอินทรีย์	% สารอนินทรีย์
MMT	8	86	6
CST12	0	0	100
CST-MMT 1	3	71	26
CST-MMT 2	5	62	33
CST-MMT 3	4	54	42
CST-MMT 4	4	72	26
CST-MMT 5	2	70	28
CST-MMT 6	6	45	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 พบว่าปริมาณการแทรกตัวของ CST เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ CST ในการดัดแปร โครงสร้าง MMT ในปริมาณมากขึ้น กล่าวคือเมื่อใช้ CST12 ในการดัดแปรโครงสร้าง MMT เพิ่มขึ้นจาก 1 กรัมเป็น 2 และ 3 กรัมต่อ MMT ปริมาณ 2 กรัม เกิดเป็นวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1, CST-MMT2 และ CST-MMT3 ทำให้ปริมาณการแทรกตัวของ CST ที่คำนวณได้เพิ่มขึ้น จาก 26% เป็น 33% และ 42% ตามลำดับ และสำหรับวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมขึ้นจาก CST14 ก็ ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกันคือเมื่อเพิ่มปริมาณ CST14 ที่ใช้ดัดแปรโครงสร้างจาก 1 กรัมเป็น 2 และ 3 กรัมต่อ MMT ปริมาณ 2 กรัม เกิดเป็นวัสดุประกอบนาโน CST-MMT4, CST-MMT5 และ CST-MMT6 จะมีปริมาณการแทรกตัวเพิ่มขึ้นจาก 26% เป็น 28% และ 49% ตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่า วัสดุประกอบนาโนที่มีปริมาณ CST มากส่งผลให้ประจุบวกที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับ Na^+ ไอออนมีปริมาณมากด้วยเช่นกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณการแทรกตัวของ CST สำหรับ วัสดุประกอบนาโนที่ใช้ CST12 และ CST14 ในการดัดแปร MMT เช่นกรณีของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT4 ซึ่งใช้ CST12 และ CST14 ในการดัดแปร ปริมาณ 1 กรัมต่อ MMT 2 กรัมเท่ากัน พบว่าปริมาณของ CST ที่แทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของ MMT มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ CST ที่มีปริมาณประจุบวก (+) มากขึ้นไม่ทำให้ ปริมาณการแทรกตัวของ CST มากขึ้นจนแตกต่างกันอย่างชัดเจนซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ ในหัวข้อ 4.3.1 และ 4.3.2 นอกจากนี้ยังมี CST ซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่เกาะอยู่บริเวณโดยรอบของ MMT จึงทำให้ผลการคำนวณปริมาณ CST ที่แทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของ MMT มีปริมาณสูง โดยแบบจำลองการแทรกตัวของ CST ในชั้นของ MMT แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แบบจำลองการแทรกตัวของ CST ใน MMT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR ของ MMT และวัสดุประกอบนาโน

CST-MMT

นำ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ที่สังเคราะห์ได้มาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR ผลการตรวจวัดของ MMT แสดงดังรูปที่ 4.7 (ก) พบแถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่สำคัญของ MMT ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

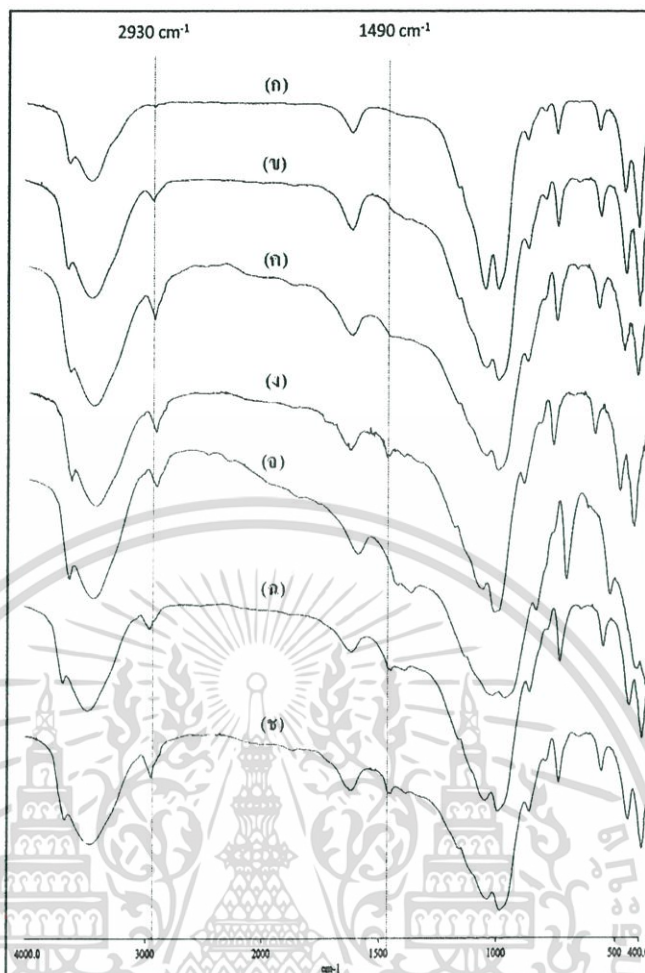
ตำแหน่ง 3619, 3441 cm^{-1}	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H
ตำแหน่ง 1091, 1038 cm^{-1}	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ Si-O
ตำแหน่ง 914, 625 cm^{-1}	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ Al-O
ตำแหน่ง 843, 795 cm^{-1}	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ (Al, Mg)-O
ตำแหน่ง 522, 468 cm^{-1}	แสดงการสั่นแบบหดของพันธะ Si-O

และผลการตรวจวัดด้วยเทคนิค FTIR ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT แสดงดังรูปที่ 4.7 (ข-ช) ซึ่งให้สเปกตรัมที่เหมือนกันโดยปรากฏแถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่สำคัญ ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

ตำแหน่ง 3619, 3441 cm^{-1}	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H
ตำแหน่ง 2930 cm^{-1}	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-H ของ Aliphatic hydrocarbon
ตำแหน่ง 1475 และ 1490 cm^{-1}	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-N ของ CHPTAC
ตำแหน่ง 1200-1038 cm^{-1}	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ Si-O
ตำแหน่ง 468 cm^{-1}	แสดงการสั่นแบบหดของพันธะ Si-O
ตำแหน่ง 520 cm^{-1}	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ Al-O

จากผลการตรวจวัดข้างต้นจะเห็นได้ว่าแถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่สำคัญของ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs มีตำแหน่งที่คล้ายกัน และมีแถบการดูดกลืนคลื่นแสงใหม่ 2 ตำแหน่งคือ ตำแหน่ง 2930 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-H และอีกตำแหน่งหนึ่งคือ ตำแหน่ง 1475 และ 1490 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-N จากหมู่ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (NR_4^+) ของ CHPTAC ที่เกาะอยู่ในสายโซ่ของ CST ปรากฏขึ้นใน FTIR สเปกตรัมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs โดยเป็นแถบการดูดกลืนคลื่นแสงช่วงเดียวกันกับที่ปรากฏใน FTIR สเปกตรัมของ CST จากผลการตรวจวัดในหัวข้อที่ 4.2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR ของ (ก) MMT (ข) วัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 (ค) วัสดุประกอบนาโน CST-MMT2 (ง) วัสดุประกอบนาโน CST-MMT3 (จ) วัสดุประกอบนาโน CST-MMT4 (ฉ) วัสดุประกอบนาโน CST-MMT5 (ช) วัสดุประกอบนาโน CST-MMT6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม

การศึกษาศักยภาพในการดูดซับสีข้อมเบสิกบลู66 (BB66) เบสิกเยลโล1 (BY1) และ แอซิดเรด 91 (AR91) สามารถทำได้โดยนำ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT มาดูดซับสีข้อมที่สภาวะต่างๆ ที่ต้องการศึกษา แล้วนำสารละลายสีข้อมที่ถูกดูดซับแล้วมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น (λ_{max}) ต่างๆ กัน คือ 615, 412 และ 514 นาโนเมตรสำหรับสีข้อม BB66, BY1 และ AR91 ตามลำดับ หลังจากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาหาค่าความเข้มข้นหลังการดูดซับโดยใช้สมการที่สร้างจากกราฟมาตรฐานของสีข้อมแต่ละชนิดซึ่งแสดงในภาคผนวก จ รูปที่ จ.1-จ.3

4.4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม BB66 และ BY1 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยใช้ MMT และ CST-MMT เป็นตัวดูดซับ

การศึกษาศักยภาพในการดูดซับสีข้อม BB66 (pH~5) และ BY1 (pH~4) ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT เป็นตัวดูดซับเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีข้อมแต่ละชนิด ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ ตาราง ฉ.3-ฉ.4 แล้วนำมาสร้างกราฟร้อยละการกำจัดได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.8-4.9 พบว่า MMT มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม BB66 และ BY1 ได้ประมาณ 87.0% และ 75.4% ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า MMT มีความสามารถในการดูดซับสีข้อมเบสิกทั้งสองชนิดค่อนข้างสูง เนื่องจากสีข้อมเบสิกเป็นสีที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวให้ประจุบวก (+) และ MMT ซึ่งมีประจุสุทธิในโครงสร้างเป็นลบ (-) ดังนั้นเมื่อนำ MMT มาดูดซับสีข้อมจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุบวก (+) ของสีข้อมและประจุลบ (-) ของ MMT แต่หลังจากคัดแปร โครงสร้างของ MMT ด้วย CST เกิดเป็นวัสดุประกอบนาโน CST-MMT แล้วพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม BB66 และ BY1 สามารถเพิ่มขึ้นได้สูงสุด 99.4 และ 99.7% ตามลำดับ เนื่องจากวัสดุประกอบนาโน CST-MMT มีระยะห่างระหว่างระนาบ 001 มากกว่า MMT ทำให้โมเลกุลของสีข้อมซึ่งมีขนาดใหญ่สามารถแทรกตัวเข้าไปภายในช่องว่างได้ ส่งผลให้วัสดุประกอบนาโน CST-MMTs มีความสามารถในการดูดซับสีข้อมได้สูงขึ้น โดยแนวโน้มของการดูดซับสีข้อมแต่ละชนิดเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BB66 เมื่อใช้วัสดุประกอบนาโนกลุ่ม CST-MMT (1-3) (ใช้ CST12 ปริมาณ 1, 2 และ 3 กรัมในการตัดแปร MMT) เป็นตัวดูดซับสีย้อม BB66 พบว่า

$$\text{CST-MMT1} \sim \text{CST-MMT2} \sim \text{CST-MMT3}$$

และเมื่อใช้วัสดุประกอบนาโนกลุ่ม CST-MMT (4-6) (ใช้ CST14 ปริมาณ 1, 2 และ 3 กรัมในการตัดแปร MMT) เป็นตัวดูดซับสีย้อม BB66 พบว่า

$$\text{CST-MMT4} > \text{CST-MMT5} > \text{CST-MMT6}$$

สำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BY1 เมื่อใช้วัสดุประกอบนาโนกลุ่ม CST-MMT (1-3) (ใช้ CST12 ปริมาณ 1, 2 และ 3 กรัม ในการตัดแปร MMT) เป็นตัวดูดซับสีย้อม BY1 พบว่า

$$\text{CST-MMT1} > \text{CST-MMT2} > \text{CST-MMT3}$$

และเมื่อใช้วัสดุประกอบนาโนกลุ่ม CST-MMT (4-6) (ใช้ CST14 ปริมาณ 1, 2 และ 3 กรัมในการตัดแปร MMT) เป็นตัวดูดซับสีย้อม BY1 พบว่า

$$\text{CST-MMT4} > \text{CST-MMT5} > \text{CST-MMT6}$$

จากแนวโน้มของการดูดซับข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT ที่มีปริมาณ CST ในการตัดแปรมากเป็นตัวดูดซับสีย้อม BB66 และ BY1 พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเนื่องจากวัสดุประกอบนาโนที่มีปริมาณ CST มากส่งผลให้วัสดุประกอบนาโนนั้นมีประจุบวก (+) ของ CST อยู่ภายในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก เมื่อนำไปดูดซับสีย้อมเบสิกจึงทำให้เกิดการผลักกันระหว่างประจุบวก (+) ของ CST และประจุบวก (+) ของสีย้อม และเมื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BB66 และ BY1 ของวัสดุประกอบทั้ง 6 สูตร ได้ผลการทดลองดังนี้

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BB66 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT (1-6) พบว่า

$$\text{CST-MMT1} \sim \text{CST-MMT2} \sim \text{CST-MMT3} > \text{CST-MMT4} > \text{CST-MMT5} > \text{CST-MMT6}$$

และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT (1-6) สามารถสรุปได้ดังนี้

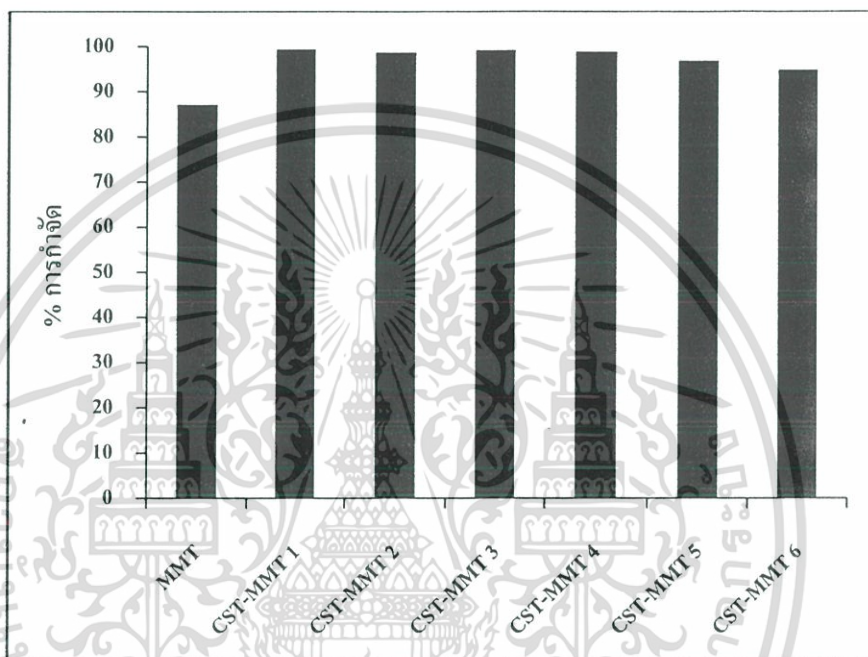
$$\text{CST-MMT1} > \text{CST-MMT4} > \text{CST-MMT2} > \text{CST-MMT5} > \text{CST-MMT3} > \text{CST-MMT6}$$

จากผลการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีย้อม BB66 และ BY1 ของวัสดุประกอบนาโนที่ใช้ CST12 (CST-MMT(1-3)) และ CST14 (CST-MMT(4-6)) ในการตัดแปรพบว่า

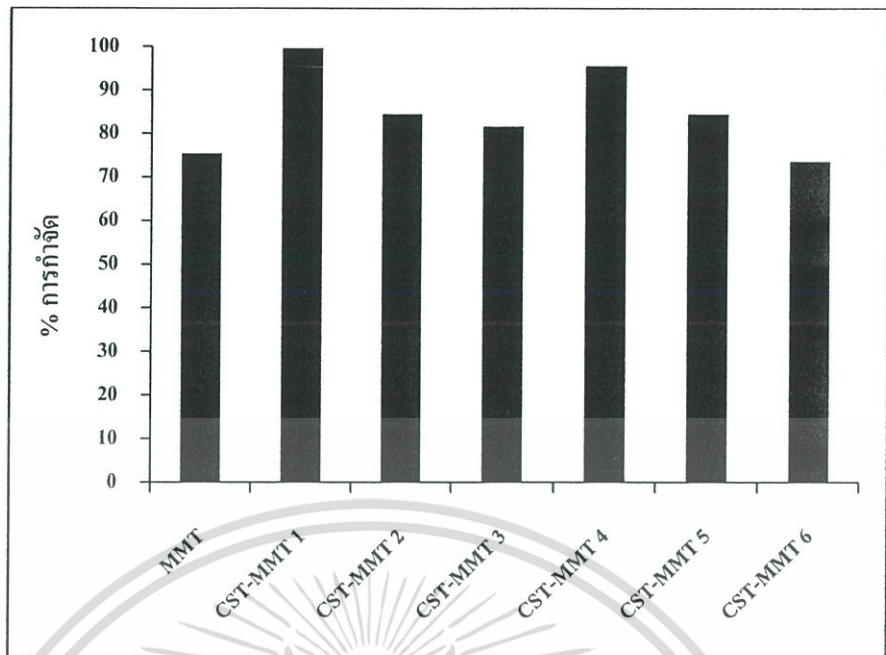
ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BB66 และ BY1 มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้วัสดุประกอบนาโนที่ตัดแปรด้วยปริมาณ CST มากเกินไป ซึ่งอาจเกิดจากการที่วัสดุประกอบนาโนที่มีปริมาณ CST มากเกินไป ทำให้เกิดประจุบวก (+) ของ CST อยู่ภายในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก เมื่อนำไปดูดซับสีย้อมเบสิกจึงทำให้เกิดการผลักกันระหว่างประจุบวก (+) ของ CST และประจุบวก (+) ของสีย้อม และเมื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BB66 และ BY1 ของวัสดุประกอบทั้ง 6 สูตร ได้ผลการทดลองดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปรรด้วย CST14 เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากเป็นวัสดุประกอบนาโนที่มีประจุบวก (+) อยู่บนโครงสร้างมากกว่าวัสดุประกอบนาโนที่ถูกดัดแปรรด้วย CST12 ทำให้เกิดการผลักกันระหว่างประจุบวก (+) ของ CST ที่อยู่ในโครงสร้างของวัสดุประกอบกับประจุบวก (+) ของสีย้อมในระหว่างการดูดซับ ทำให้วัสดุประกอบนาโนในกลุ่มของ CST-MMT(4-6) ดูดซับสีย้อม BB66 และ BY1 ได้ต่ำกว่ากลุ่มของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT(1-3)



รูปที่ 4.8 ร้อยละการกำจัดสีย้อม BB66 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร pH~5 โดยใช้ MMTและวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ปริมาณ 1 กรัมเป็นตัวดูดซับ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.9 ร้อยละการกำจัดสีย้อม BY1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร pH~4 โดยใช้ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ปริมาณ 1 กรัมเป็นตัวดูดซับ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.4.2 ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม AR91 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยใช้ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT เป็นตัวดูดซับ

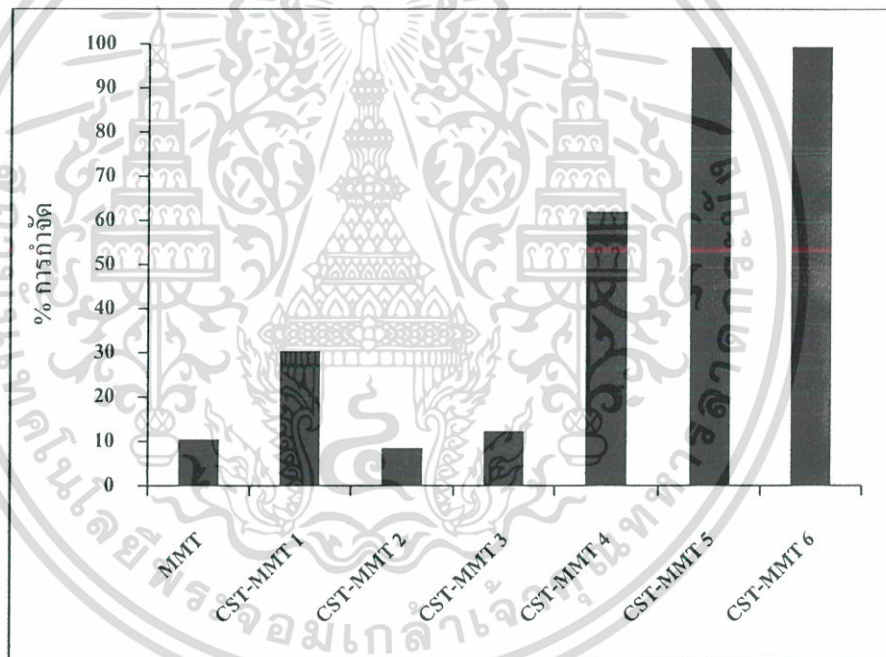
การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม AR91 (pH~6) ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT เป็นตัวดูดซับ ผลแสดงในภาคผนวกตารางที่ ๓.5 และกราฟร้อยละการกำจัดแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่า MMT สามารถดูดซับสีย้อม AR91 ได้เพียง 10.5 % เท่านั้น เนื่องจากสีย้อม AR91 เป็นสีที่เมื่อละลายน้ำแล้วจะเกิดการแตกตัวให้ประจุลบ (-) และประจุสุทธิในโครงสร้างของ MMT เป็นลบ (-) เช่นเดียวกัน ดังนั้นเมื่อนำ MMT มาดูดซับสีย้อม AR91 จึงเกิดการผลักกันระหว่างประจุลบ (-) ของ MMT และประจุลบ (-) ของสีย้อม อีกทั้งระยะห่างระหว่างชั้นของ MMT น้อยมาก ทำให้โมเลกุลของสีย้อมไม่สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างชั้นของ MMT ได้ แต่เมื่อนำ MMT ที่ถูกดัดแปรด้วย CST เป็นวัสดุประกอบนาโน CST-MMT มาทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับ พบว่าวัสดุประกอบนาโน CST-MMT(1-3) มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม AR91 ได้ต่ำ แต่สำหรับวัสดุประกอบนาโน CST-MMT(4-6) พบว่ามีความสามารถในการกำจัดสีย้อม AR91 ได้สูงสุด 99.4% ซึ่งแนวโน้มในการดูดซับเป็นดังนี้

$$\text{CST-MMT4} < \text{CST-MMT5} < \text{CST-MMT6}$$

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากลุ่มของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT(4-6) มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม AR91 สูงเนื่องจากมีประจุบวก (+) ภายในโครงสร้างมาก อีกทั้งระยะ d_{001} มากกว่ากลุ่มของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT(1-3) ทำให้โมเลกุลของสีย้อมสามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างชั้นเคลย์ได้ อีกทั้งยังเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุบวก (+) ของวัสดุประกอบ CST-MMT และประจุลบ (-) ของสีย้อม จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT เพิ่มขึ้น

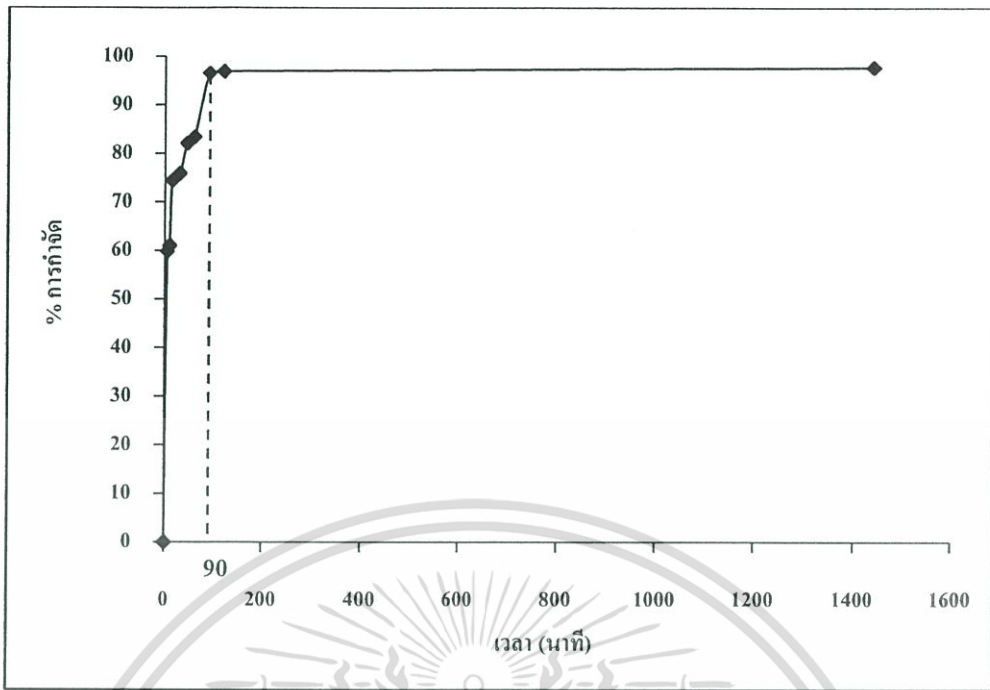


รูปที่ 4.10 ร้อยละการกำจัดสีย้อม AR91 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร pH~6 โดยใช้ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ปริมาณ 1 กรัมเป็นตัวดูดซับ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการดูดซับสีของ BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

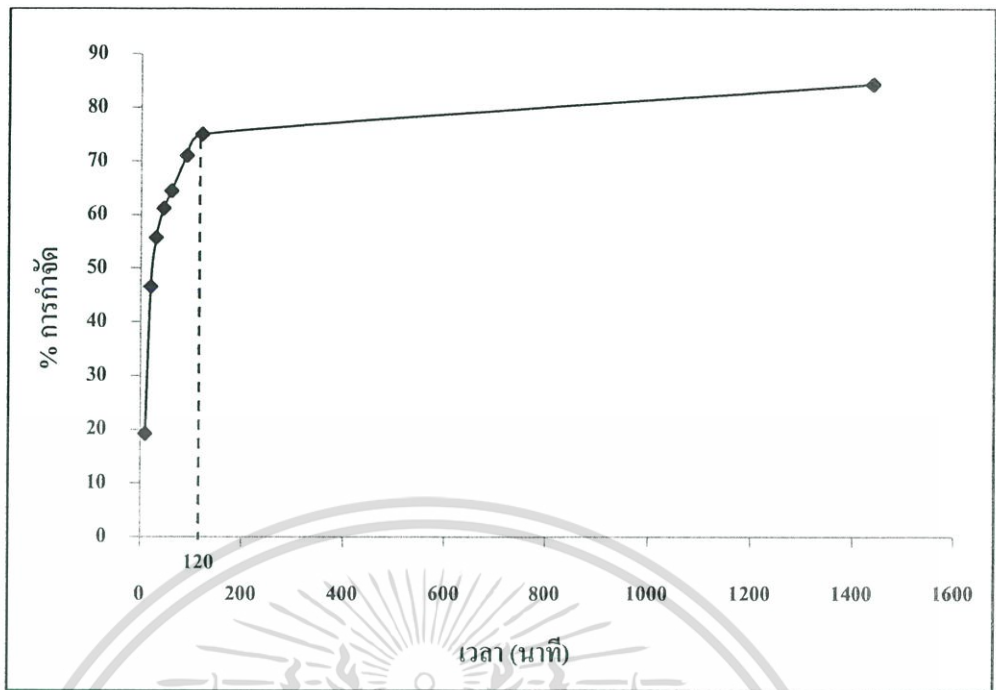
จากการศึกษาการดูดซับสีของ BB66 และ BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs จะเห็นว่าผลการดูดซับสีของ BB66 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs มีค่าใกล้เคียงกันและได้ค่าความสามารถในการดูดซับเข้าใกล้ 100% ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกสีของ BY1 เป็นตัวแทนของสีของเบสิกในการศึกษาระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุล จลศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับต่อไป โดยผลการศึกษาระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารละลายสีของ BY1 (pH~4) โดยใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 เป็นตัวแทนของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ทั้งหมด เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับสีของ BY1 สูงที่สุด ซึ่งใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีของ BY1 เป็น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อปริมาณของตัวดูดซับ 1 กรัม มาดูดซับสีของ BY1 ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน คือ 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120 และ 1440 นาทีตามลำดับ หลังจากนั้นนำสารละลายที่ดูดซับแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณร้อยละของการกำจัดสี ซึ่งตารางผลการทดลองแสดงในภาคผนวกตารางที่ จ.1 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดและเวลาแสดงดังรูปที่ 4.11 ตามลำดับ พบว่าเมื่อทำการทดลองให้ระยะเวลาในการดูดซับมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของ BY1 เพิ่มขึ้น จนกระทั่งระยะเวลาของการดูดซับประมาณ 90 นาทีเป็นต้นไป ค่าร้อยละของการกำจัดจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีของ BY1 โดยใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 เป็น 90 นาที



รูปที่ 4.11 ค่าร้อยละของการกำจัดสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 กับเวลา เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร pH~4 และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม

4.4.4 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

การศึกษาระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารละลายสีย้อม AR91 โดยใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT6 เป็นตัวแทนของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT เนื่องจากสามารถดูดซับสีย้อม AR91 ได้ดี โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเป็น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อ 1 กรัมของตัวดูดซับ โดยทำการดูดซับที่ระยะเวลาต่างๆ กันคือ 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120 และ 1440 นาทีตามลำดับ หลังจากนั้นนำสารละลายที่ทำการดูดซับแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณร้อยละของการกำจัดสีย้อม ซึ่งผลการทดลองแสดงในภาคผนวกตารางที่ ฉ.2 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดและเวลาแสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อทำการทดลองให้ระยะเวลาในการดูดซับมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม AR91 เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งระยะเวลาของการดูดซับประมาณ 120 นาทีเป็นต้นไป ค่าร้อยละของการกำจัดจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีย้อม AR91 เป็น 120 นาที



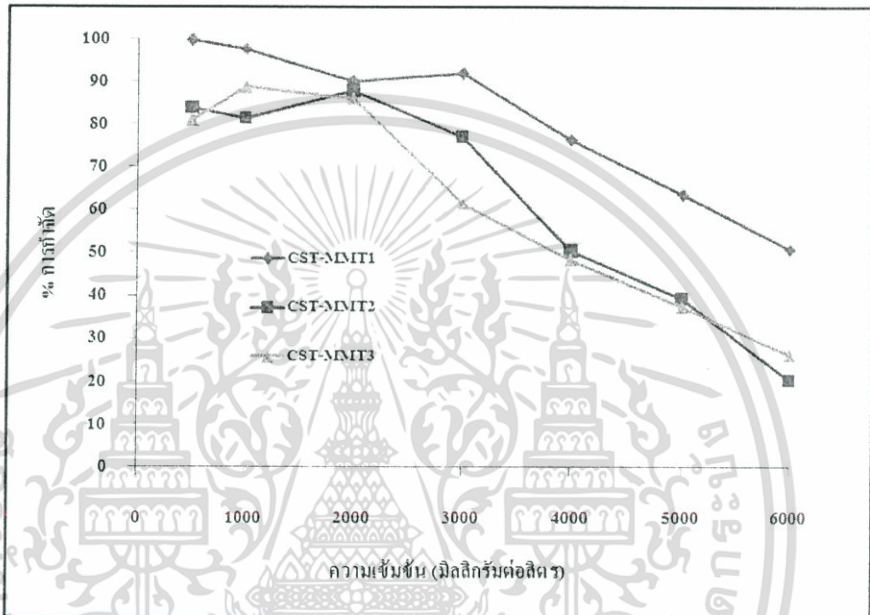
รูปที่ 4.12 ค่าร้อยละของการกำจัดสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6 กับเวลา เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร pH~6 และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม

4.4.5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน

CST-MMT

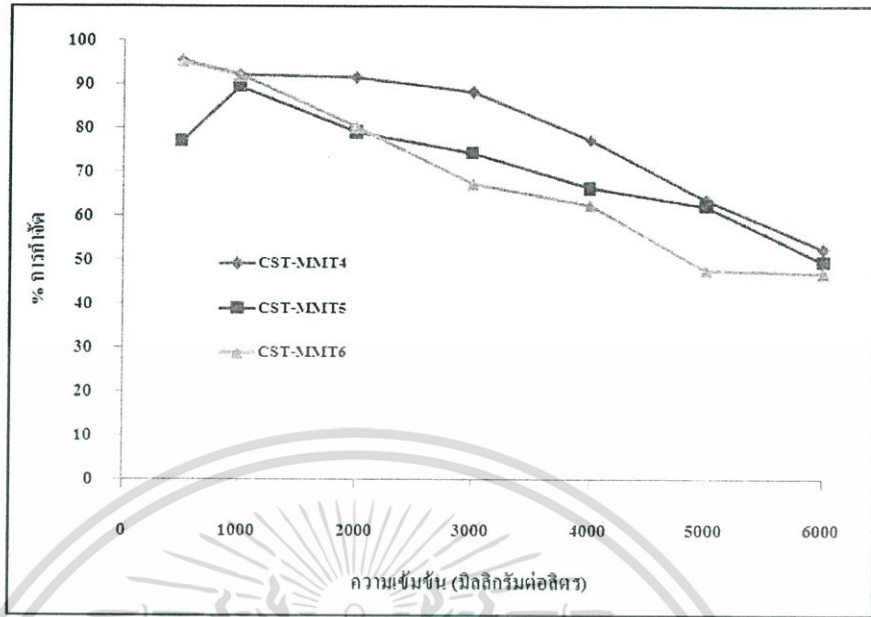
การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BY1 (pH~4) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ คือ 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 และ 6000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับทำได้โดยการนำวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ที่เตรียมขึ้นปริมาณ 1 กรัมต่อสารละลายสีย้อมปริมาตร 100 มิลลิลิตร บั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำสารละลายสีย้อมที่ถูกดูดซับแล้วมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ ตารางที่ ฉ.6 - ฉ.11 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการกำจัดกับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมแสดงดังรูปที่ 4.13 -4.14 พบว่าวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1, CST-MMT2 และ CST-MMT3 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BY1 โดยเฉลี่ยสูงกว่าวัสดุประกอบนาโน CST-MMT4, CST-MMT5, CST-MMT6 เนื่องจากประจุบวก (+) ที่เกิดจาก

การมีหมู่ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (NR_4^+) ภายในโมเลกุลของ CST มีปริมาณมากกว่าวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1, CST-MMT2 และ CST-MMT3 และสีย้อม BY1 เป็นสีที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวให้ประจุบวก (+) ดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.4.1 ดังนั้นเมื่อเกิดการดูดซับทำให้โมเลกุลของสีย้อม BY1 แทรกเข้าไปในโครงสร้างของวัสดุประกอบนาโนและเกิดการผลักกันระหว่างประจุไฟฟ้าจึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BY1 ค่อยลงเล็กน้อย



รูปที่ 4.13 การดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT 1, CST-MMT2 และ CST-MMT3 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ pH ~3-6 และใช้เวลาในการดูดซับ 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



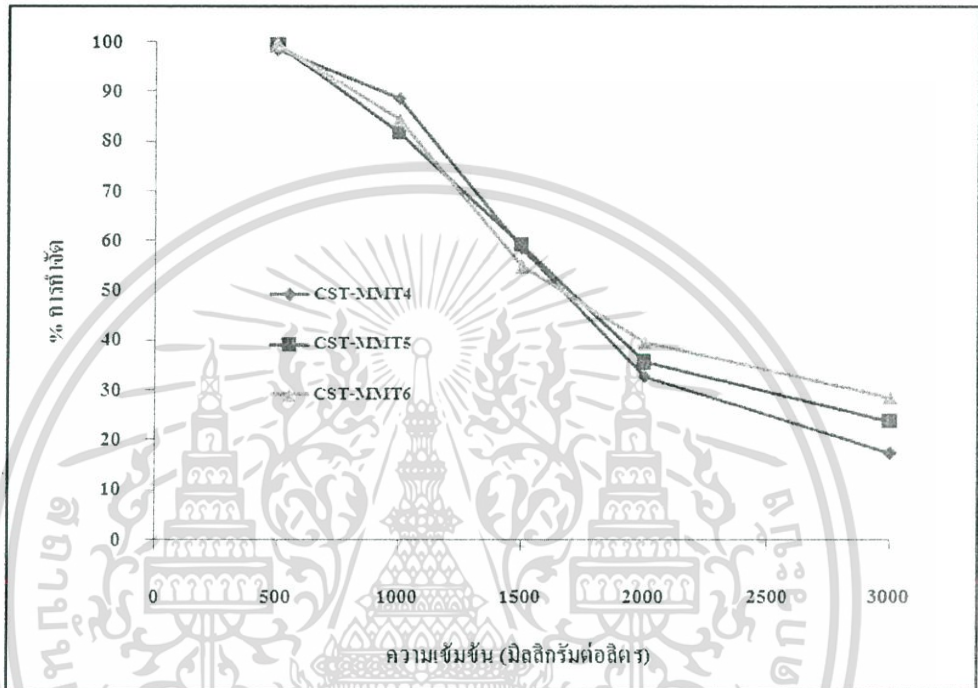
รูปที่ 4.14 การดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT 1, CST-MMT2 และ CST-MMT3 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ และ pH ~3-6 และใช้เวลาในการดูดซับ 24 ชั่วโมง

4.4.6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

จากการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม AR91 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ คือ 500, 1000, 1500, 2000 และ 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร pH~6 โดยใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT เป็นตัวดูดซับทำได้โดยการนำสารละลายสีย้อมปริมาตร 100 มิลลิลิตรต่อปริมาณของตัวดูดซับ 1 กรัมและใช้เวลาในการดูดซับ 24 ชั่วโมง พบว่าวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1, CST-MMT2 และ CST-MMT3 ให้ผลการกำจัดสีย้อมประเภทนี้ได้้น้อย เนื่องจากปริมาณการแทรกตัวของ CST12 น้อยเกินไป ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้น MMT ไม่กว้างมากพอที่จะทำให้สีย้อมซึ่งมีโครงสร้างขนาดใหญ่สามารถแทรกตัวเข้าไปได้ และผลการดูดซับที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยอาจเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุลบ (-) ของสีย้อมและประจุบวก (+) ของ CST12 ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวรอบนอกของ MMT เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่สำหรับวัสดุประกอบนาโน CST-MMT4, CST-MMT5 และ CST-MMT6 สามารถดูดซับสีย้อม AR91 ได้สูงใกล้เคียงกันทั้ง 3 สูตร เนื่องจากวัสดุประกอบนาโนทั้ง 3 สูตรดังกล่าวมีประจุบวก (+) ของ CST14 ปริมาณมากอีกทั้งระยะห่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในพ็อกเก็ตบุ๊กของท่าน เมื่อผู้ญาติเห็นใบเขียวระลอกต้นในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างชั้น MMT กว้าง ดังนั้น โมเลกุลของสีย้อมจึงสามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของวัสดุประกอบนาโนได้ ส่งผลให้วัสดุประกอบนาโนสูตรดังกล่าวสามารถดูดซับสีย้อมประเภทนี้ได้ดี โดยผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ ดังตารางที่ ฉ.12-ฉ.14 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการกำจัดกับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมแสดงดังรูปที่ 4.15

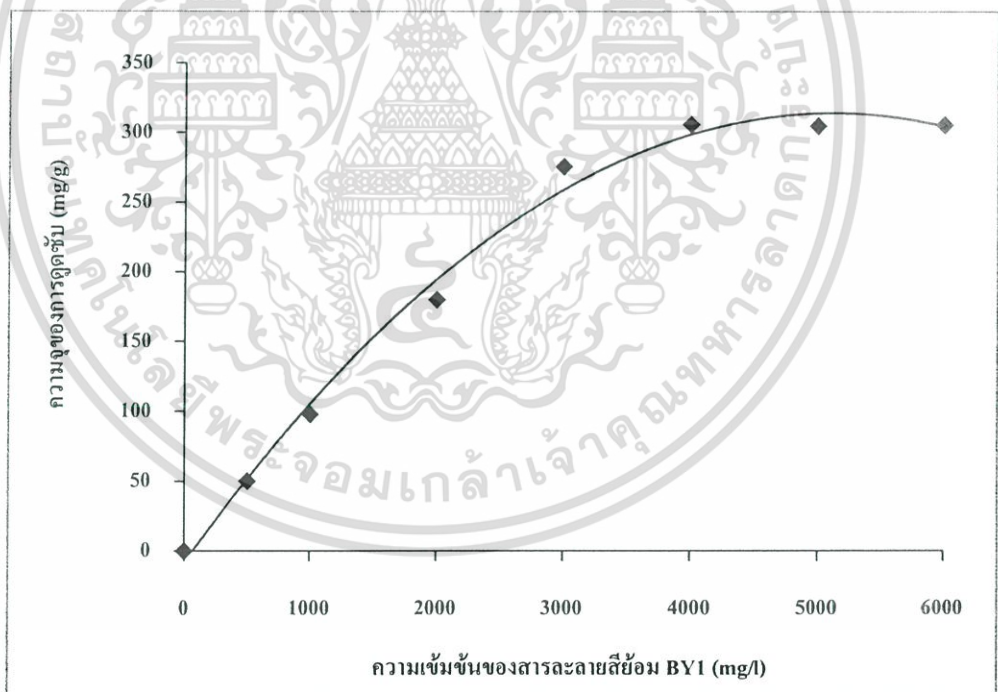


รูปที่ 4.15 การดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT4, CST-MMT5 และ CST-MMT6 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ และ pH~6

4.5 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม

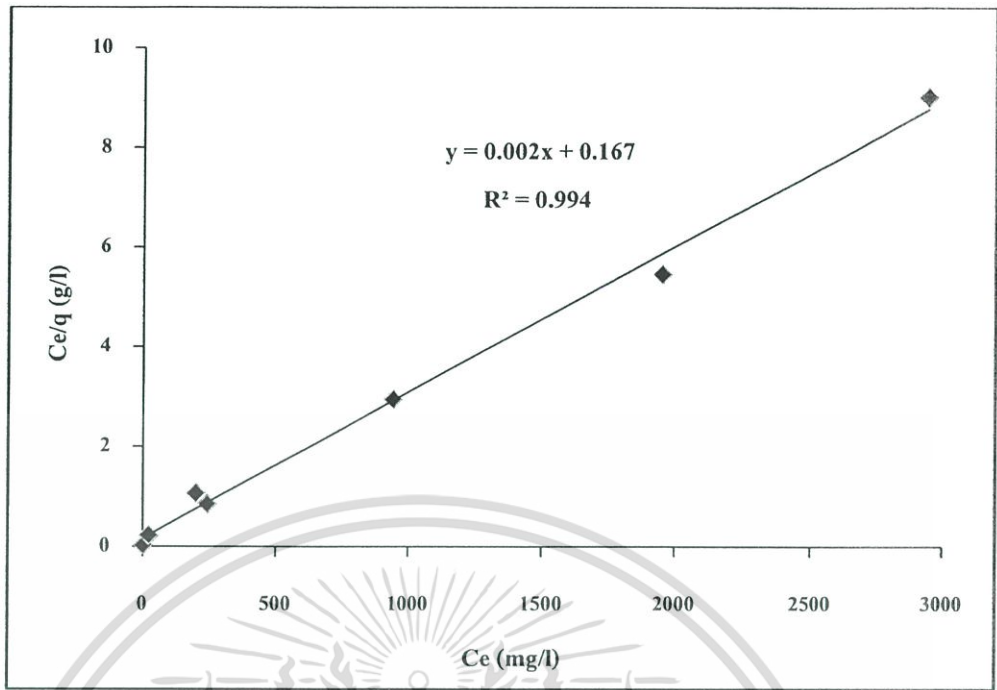
4.5.1 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BY1 pH~4 โดยใช้ CST-MMT เป็นตัวดูดซับ จะเห็นได้ว่า CST-MMT มีความสามารถในการดูดซับสีย้อม BY1 ได้ดีที่สุดในครั้งนี้ จึงทำการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม BY1 ด้วยวัสดุประกอบนาโน CST-MMT โดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (จากผลการทดลองที่ 4.4.3) คือเลือกเวลาในการดูดซับที่ 90 นาที แล้วนำค่าการดูดซับที่ได้มาสร้างกราฟเส้นตรงตามสมการแลงเมียร์ (สมการที่ 3.3) และสมการฟรุนดลิช (สมการที่ 3.4) เพื่อศึกษาแบบรูปแบบของการดูดซับที่เกิดขึ้นของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ข ดังตารางที่ ข.1-ข.2 และกราฟแสดงไอโซเทอมของแลงเมียร์แสดงดังรูปที่ 4.17 และสมการฟรุนดลิชแสดงดังรูปที่ 4.18

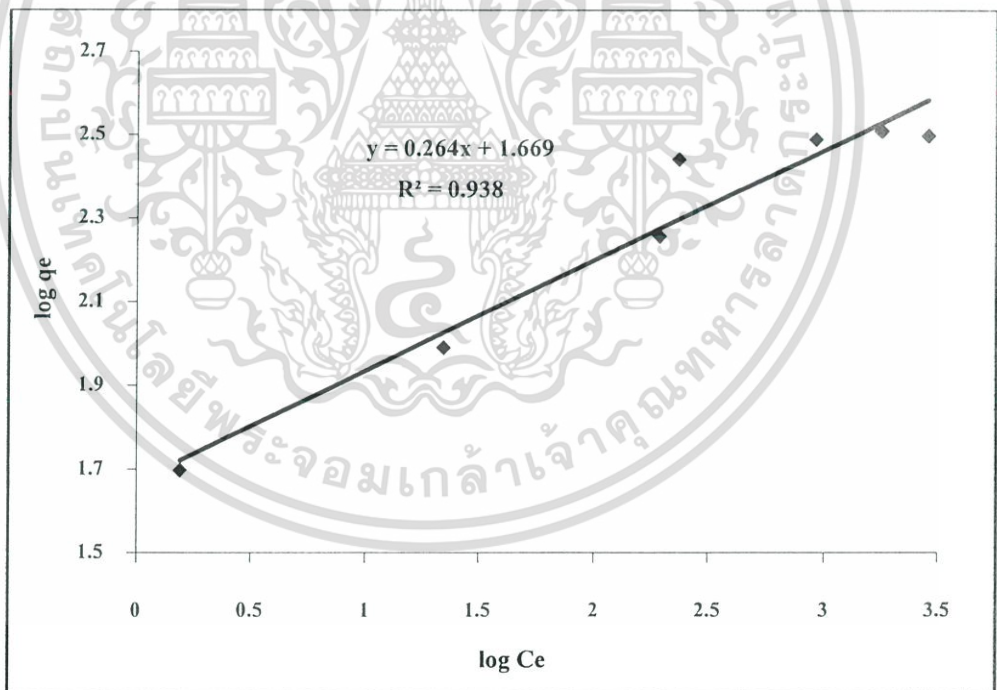


รูปที่ 4.16 ความสามารถในการดูดซับสีย้อม BY1 กับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม BY1 pH~3-6 โดยใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT เป็นตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1



รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชซ์ของการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1

โดยค่าคงที่ Q_0 และ b ของสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์และค่าคงที่ K และ n ของสมการไอโซ

เทอมของฟรุนดลิชซ์ พร้อมค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จากกราฟแสดงดังตารางที่ 4.7 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้หาประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

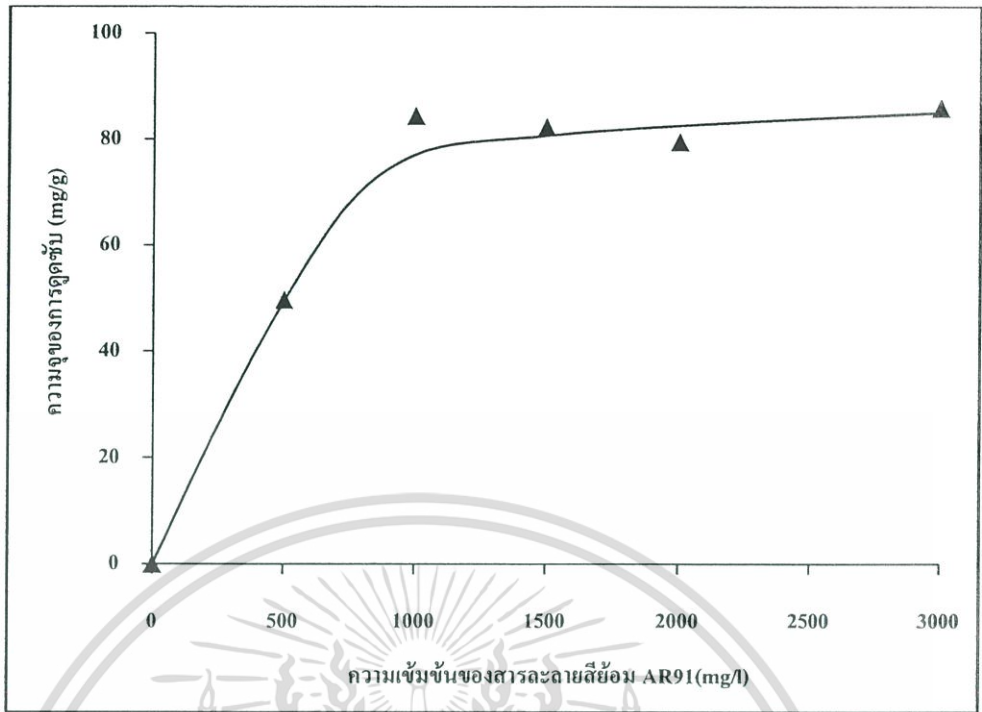
ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ไอโซเทอมของสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชซ์ของการดูดซับสีย้อม BY1

ตัวดูดซับ	สมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์			สมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชซ์		
	Q_0 (mg/g)	B (l/mg)	R^2	K (mg/g)	n	R^2
CST-MMT1	500	0.012	0.994	46.66	3.79	0.938

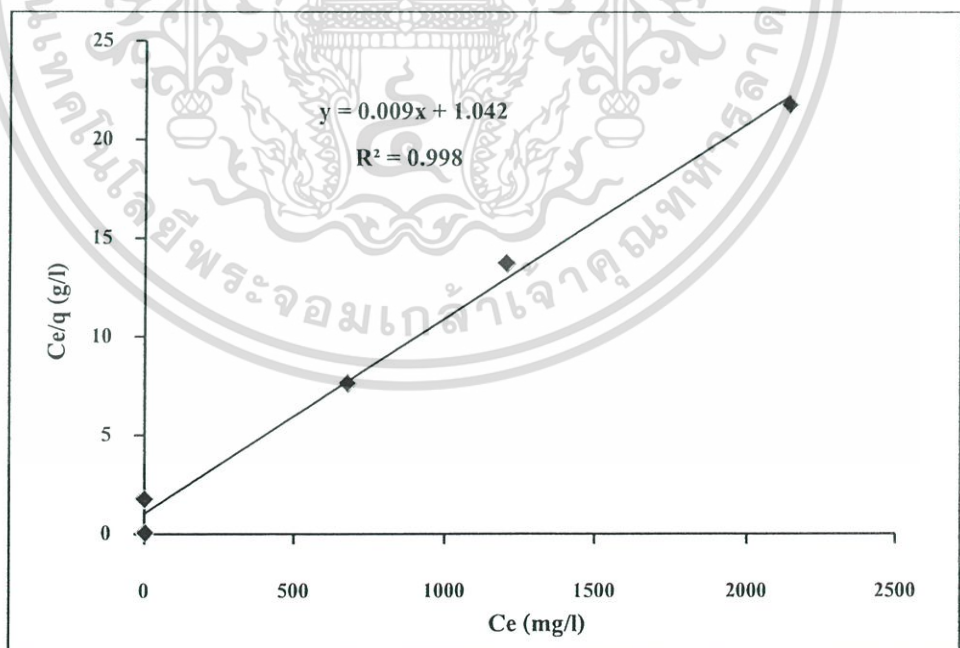
จากตารางที่ 4.7 พบว่ารูปแบบของการดูดซับสีย้อม BY1 เมื่อใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 เป็นตัวดูดซับสามารถพิจารณาได้จากค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ที่ได้จากรูปไอโซเทอม พบว่าค่า R^2 ของกราฟไอโซเทอมของแลงเมียร์มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่า R^2 ที่ได้จากรูปไอโซเทอมของฟรุนดลิชซ์ ดังนั้นจึงสามารถอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับสีย้อม BY1 เมื่อใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT เป็นตัวดูดซับได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงดึงดูดทางเคมีที่ไม่สามารถผันกลับได้และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q^0) ได้เท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ

4.5.2 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม AR91 โดยใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT เป็นตัวดูดซับ พบว่า CST-MMT6 มีความสามารถในการดูดซับสีย้อม AR91 ได้ดีที่สุดใน ดังนั้นจึงทำการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม AR91 ด้วยวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6 โดยเลือกใช้ระยะเวลาในการดูดซับที่สถานะสมดุล (จากผลการทดลองที่ 4.4.4) โดยเลือกที่ 120 นาที แล้วนำค่าการดูดซับที่ได้มาสร้างกราฟเส้นตรงตามสมการแลงเมียร์ (สมการที่ 3.3) และสมการฟรุนดลิชซ์ (สมการที่ 3.4) เพื่อศึกษาแบบรูปแบบพฤติกรรมของการดูดซับที่เกิดขึ้นของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6 ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ข ดังตารางที่ ข.3 - ข.4 และกราฟแสดงไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนดลิชซ์แสดงดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ

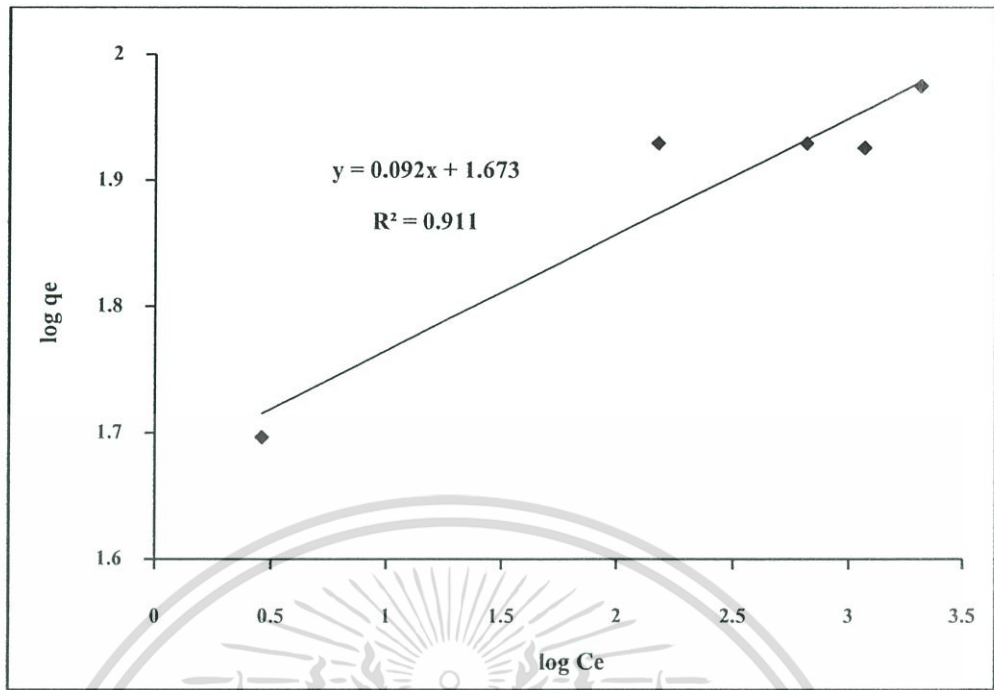


รูปที่ 4.19 ความสามารถในการดูดซับสีย้อม AR91 กับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม AR91 pH~3-6 โดยใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 เป็นตัวดูดซับ



รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อม AR91 (pH~6) ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ไอโซเทอมแบบฟรอนดลิชของการดูดซับสีเขียว AR91 (pH~6) ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6

โดยค่าคงที่ Q_0 และ b ของสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์และค่าคงที่ K และ n ของสมการไอโซเทอมของฟรอนดลิช พร้อมค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จากกราฟแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ไอโซเทอมของสมการแลงเมียร์และฟรอนดลิชของการดูดซับสีเขียว AR91

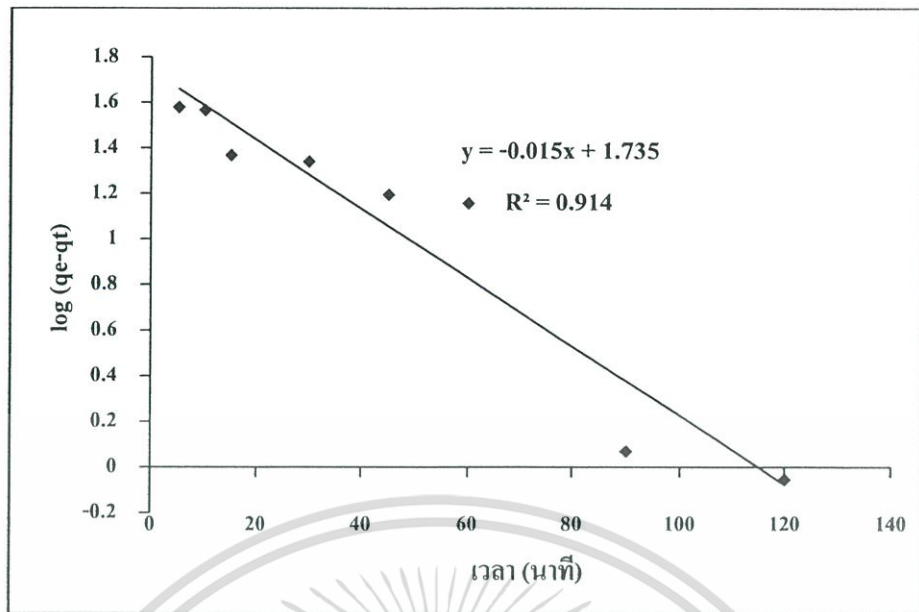
ตัวดูดซับ	สมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์			สมการไอโซเทอมแบบฟรอนดลิช		
	Q_0 (mg/g)	b (l/mg)	R^2	K (mg/g)	n	R^2
CST-MMT6	111.11	0.009	0.998	47.09	10.86	0.911

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

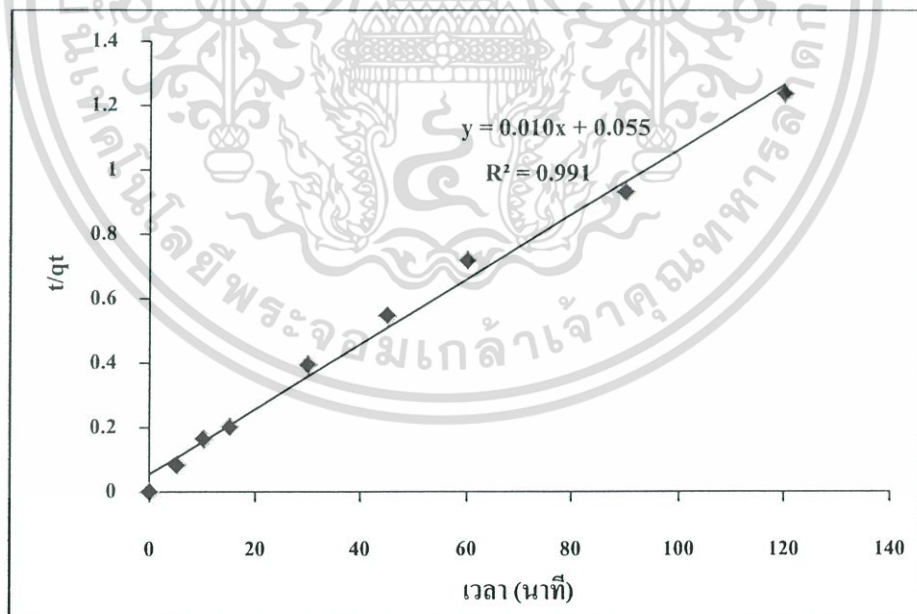
จากตารางที่ 4.8 สามารถทำนายพฤติกรรมการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6 ได้โดยพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ (R^2) โดยสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าไอโซเทอมของฟรุนคลิช์ แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโนเป็นไปตามสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าพฤติกรรมการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs ที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงดึงดูดทางเคมีที่ไม่สามารถผันกลับได้และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เช่นเดียวกับการดูดซับสีย้อม BY1 และค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับเท่ากับ 90.90 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ

4.5.3 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 โดยนำผลการทดลองที่ 4.4.3 มาคำนวณตามสมการจลนศาสตร์ของ Pseudo-First order (สมการที่ 3.5) และสมการจลนศาสตร์ของ Pseudo-second order (สมการที่ 3.6) ได้ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ซ ตารางที่ ซ.1 – ซ.2 และสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามสมการจลนศาสตร์ของ Pseudo-first order และ Pseudo-second order ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.22 - 4.23 พบว่าจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 เป็นไปตามสมการจลนศาสตร์ของ Pseudo-second Order ซึ่งเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมี เนื่องจากค่า R^2 ของกราฟที่ได้จากสมการจลนศาสตร์ของ Pseudo-second Order มีค่าเท่ากับ 0.995 ซึ่งเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการจลนศาสตร์ Pseudo-first order ซึ่งได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.950 โดยค่าคงที่ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.22 แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-first order ในการดูดซับสีย้อม BY1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH~4 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1



รูปที่ 4.23 แสดงแบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-second order ในการดูดซับสีย้อม BY1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH~4 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1

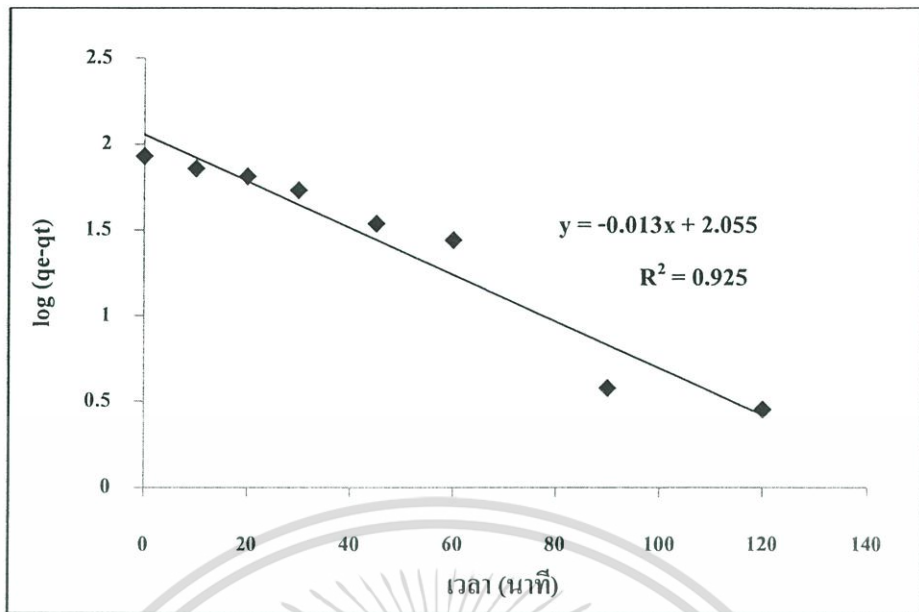
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่จลนศาสตร์ของ Pseudo-first order และ Pseudo-second order ของการดูดซับสีย้อม BY1

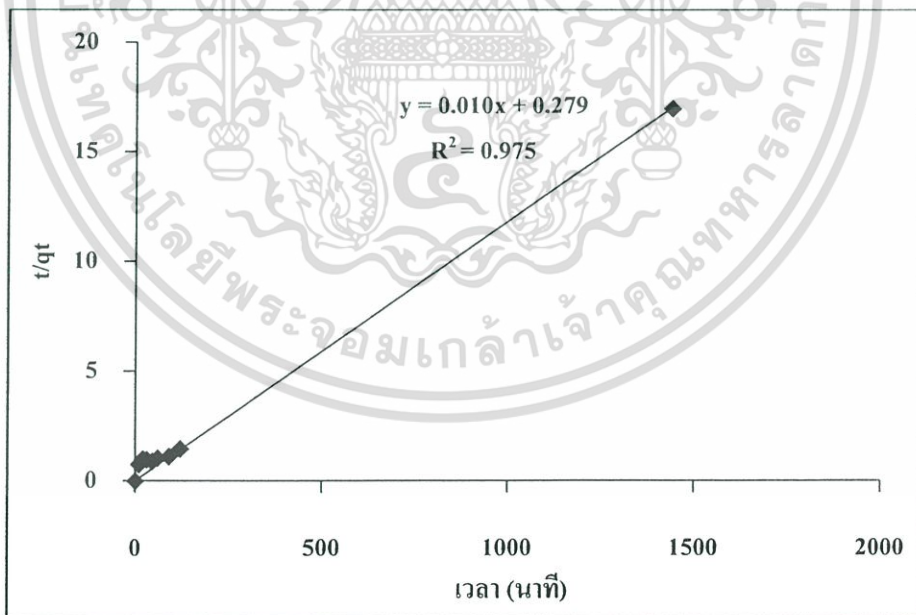
ตัวดูดซับ	Pseudo-first order			Pseudo-second order		
	k_1	q_c (mg/g)	R^2	k_2	q_c (mg/g)	R^2
CST-MMT 1	0.034	54.32	0.914	0.0018	100	0.991

4.5.4 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม AR91 (pH~6) ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT114 โดยนำผลการทดลองที่ 4.4.4 มาคำนวณตามสมการจลนศาสตร์ของ Pseudo-first order (สมการที่ 3.5) และสมการจลนศาสตร์ของ Pseudo-second order (สมการที่ 3.6) ได้ผลการทดลองแสดงในภาคผนวกตารางที่ ข.3 - ข.4 และสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามสมการจลนศาสตร์ของ Pseudo-first order และ Pseudo-second order ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 พบว่ากราฟที่ได้จากสมการจลนศาสตร์ของ Pseudo-second order ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.975 ซึ่งเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการจลนศาสตร์ Pseudo-first order ซึ่งได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.925 ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT เป็นไปตามสมการจลนศาสตร์ของ Pseudo-second order ซึ่งเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมี โดยค่าคงที่ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.24 แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-first order ในการดูดซับสีข้อม AR91 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH~4 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6



รูปที่ 4.25 แสดงแบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-second order ในการดูดซับสีข้อม AR91 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH~4 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่จลนศาสตร์ของ Pseudo-first order และ Pseudo-second order ของการดูดซับดี

ย้อม AR91 โดยใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT6 เป็นตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ	Pseudo-first order			Pseudo-second order		
	k_1	q_c (mg/g)	R^2	k_2	q_c (mg/g)	R^2
CST-MMT 6	0.029	113.50	0.925	0.00035	100	0.975



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลงานวิจัย

แป้งแคทไอออนิก (CST) ที่สังเคราะห์ขึ้นจากแป้งน้ำหนักโมเลกุลต่ำมี 4 ตัวอย่างคือ CST11, CST12, CST13 และ CST14 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง AGU:CHPTAC เป็น 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยโมลตามลำดับ หลังจากนั้นเลือก CST12 และ CST14 ซึ่งวิเคราะห์ค่า % ในโตรเจนเป็น 1.25 และ 5.51 % และองศาการแทนที่เป็น 1.17 และ 1.62 ตามลำดับ มาดัดแปรโครงสร้าง MMT เป็นวัสดุประกอบนาโน CST-MMT 2 กลุ่ม ก็คือกลุ่มที่ใช้ CST12 ในการดัดแปรมีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง คือ CST-MMT1, CST-MMT2 และ CST-MMT3 และกลุ่มที่ใช้ CST14 ในการดัดแปรมีทั้งหมด 3 ตัวอย่างคือ CST-MMT4, CST-MMT5 และ CST-MMT6 เมื่อนำวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs ทั้งหมดมาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs มีระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) กว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ MMT โดยมีรูปแบบของการแทรกตัวทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้น หลังจากนั้นนำวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs ที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบความสามารถในการกำจัดสีย้อม BB66, BY1 และ AR91 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงมากขึ้นถึง 99.40%, 99.68% และ 99.40 % สำหรับสีย้อม BB66, BY1 และ AR91 ตามลำดับและเมื่อทำการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม BY1 ของโดยใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 เป็นตัวแทนของวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs ทั้งหมด พบว่าเป็นไปตามสมการของแลงเมียร์ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวและเป็นการดูดซับทางเคมีที่ไม่ผันกลับโดยคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ 500 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ และจากการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม AR91 โดยใช้วัสดุประกอบนาโน CST-MMT6 เป็นตัวแทนของวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs ทั้งหมดพบว่าเป็นไปตามสมการของแลงเมียร์เช่นเดียวกันโดยสามารถคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ 111.11 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ หลังจากนั้นทำการศึกษาจลนศาสตร์ในการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 พบว่าพฤติกรรมของการดูดซับเป็นไปตามสมการ Pseudo-Second order และจลนศาสตร์ในการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6 พบว่าพฤติกรรมของการดูดซับเป็นไปตามสมการ Pseudo-Second order เช่นเดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีเขียวแต่ละชนิดมีหลายปัจจัยด้วยกัน โดยในงานวิจัยนี้ เลือกศึกษา 2 ปัจจัยคือ ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของการดูดซับ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการดูดซับเช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม


- [1] โสภิตา บุญเอกทรัพย์ สุชาดา ไชยสวัสดิ์ สุวิทย์ เตีย และจิระพันธุ์ เนื่องจากนิล. 1999. การสกัดแป้งจากหัวมันสำปะหลัง. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [2] รศ.ดร.ศุภฎี อุตภาพ. (2011, January). เคมีและสมบัติของแป้ง. [online].
Available: <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>
- [3] Extracellular Polysaccharides & Caries. (2013, March). [online].
Available: http://www.ncl.ac.uk/dental/oralbiol/oralenv/tutorials/polysaccharides/eps_reactions.htm
- [4] Richard F. Tester, John Karkalas, Xin Qi. (2011, January). Starch-composition, fine structure and architecture. Journal of Cereal Science. 39: 151–165. 2004
- [5] รศ.ดร.ศุภฎี อุตภาพ. (2011, January). เคมีและสมบัติของแป้ง [online].
Available: http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_4.html
- [6] บุญแสน เตียนกุลธรรม. (2011, January). สมบัติทางเคมีของดิน1. [online].
Available: http://www.nsr.u.ac.th/e-learning/soil/lesson_7_2.php
- [7] Prof. Stephen A. Nelson. Mineralogy. (2011, January). [online].
Available: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/weathering&clayminerals.htm>
- [8] ดร. นิวัตติ อนงศ์รักษ์. (2011, January). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. [online].
Available: <http://203.158.184.2/elearning/SoilScience/unit605.htm>
- [9] วลัยกร นิตยพัฒน์. 2547. การเตรียมฟิล์มนาโนคอมโพสิตออร์กาโนเคลย์/พอลิพรอพิลีนที่ ย้อมสีได้. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [10] Ottawa และ Ontario. (2011, January). Polymer nanocomposite. [online].
Available: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/news/nrc/2003/07/03/nanocomposites.html>.
2003
- [11] เสาวลักษณ์ พิมพดี. (2013, March). ดิน. [online].
Available: <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups.2011>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Carl A. 1976. Salt Damage and Its Interdependence with pH. Journal American Rhododendron Society. 30.
- [13] Ketsinee_geo26. (2011, January). แร่ดินเหนียว. [online].
Available: <http://ketsinee.blogspot.com/2009/11/blog-post.html>. 2009
- [14] บุญเสริม โตร์น. (2011, January). ประวัติสีย้อมผ้า. [online].
Available: <http://www.learners.in.th/blogs/posts/316855>. 2009
- [15] ขนิษฐา. (2011, January). ประเภทของสีย้อม. [online].
Available: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=6&bookID=370&read=true&count=true. 2007
- [16] ร.อ. หลิง รัชนีย์ รุขชาติ. (2011, January). สีย้อมและการบำบัดสีในน้ำทิ้ง. [online].
Available: http://www.navy.mi.th/science/BrithDay46/Brithday_data/biology.htm
- [17] St. Francis Xavier Convent School. (2011, January). สีย้อม. [online].
Available: <http://pil.numplus.com/Upload/images/Contents/Content268/04/lightcolorvision/subllghtclr4.htm>
- [18] อ.เทอดพงศ์ ศรีสุขพันธุ์. (2011, January). กระบวนการบำบัดทางเคมี. [online].
Available: health.hcu.ac.th/Sewage/subject/subject3.pdf
- [19] PradThaNa P. (2011, January). กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process). [online].
Available: <http://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process>. 2008
- [20] ปัทมา ภิรมย์รัตน์ และอารีย์ ปันปีติ. 2552. การศึกษาระบบการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟด้วยมอนตม์อริลโคลไนด์ที่ปรุงด้วยโครงสร้างด้วยโคลโคซาน. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [21] รวิินทร์ สุทธะนันท์ และ โกวิทป์ ปิยะมังกลา. 2011. จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้เกลบคัตแปร์. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 21(2): 337-348.
- [22] Jheng-Hua Lin, Shyh-Yang Lee, Yung-Ho Chang. 2003. Effect of acid-alcohol treatment on the molecular structure and physicochemical properties of maize and potato starches. Carbohydrate Polymers. 53 : 475-482

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

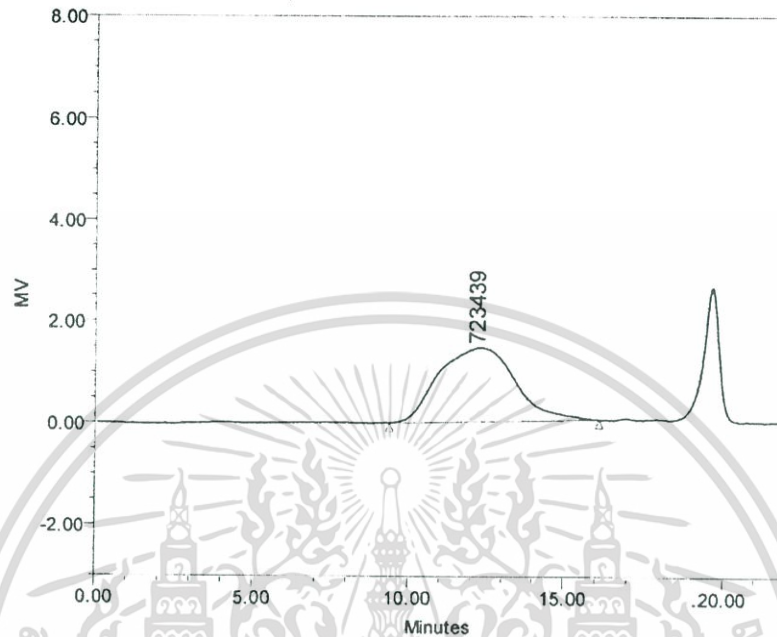
- [23] ปฐมมา จาดกานนท์ และกล้าณรงค์ ศรีรอด. 2004. “ย่อยแป้งมันสำปะหลังด้วยกรดในแอลกอฮอล์ต่างๆ.” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : หน้า 631-637. คณะอุตสาหกรรมเกษตร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [24] Wan-Yuan Kuo, Hsi-Mei Lai. 2009. Effects of reaction conditions on the physicochemical properties of cationic starch studied by RSM. *Carbohydrate Polymers*. 75: 627–635
- [25] S. Pala, D. Mal, R.P. Singh. 2005. Cationic starch: an effective flocculating agent. *Carbohydrate Polymers*. 59: 417–423
- [26] รัตนวรรณ เกียรติโกมล. 2548. การกำจัดสารอนินทรีย์น้ำโดยใช้ Montmorillonite Clay. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [27] Kitea Baek, Jung-Seok Yang, Tea Soon Kwon, Ji-Won Yang. 2007. Cationic starch-enhanced ultrafiltration for Cr(IV) removal. *Desalination*. 206: 245-250
- [28] Shizhang Qiao, Qiuhong Hua, Fouad Haghsereshta, Xijun Hu, Gao Qing (Max) Lu. 2009. An investigation on the adsorption of acid dyes on bentonite based composite adsorbent. *Separation and Purification Technology*. 67: 218–225
- [29] Pathavuth Monvisade, Punnama Siriphannon. 2009. Chitosan intercalated montmorillonite: Preparation, characterization and cationic dye adsorption. *Applied Clay Science*. 42 : 427-431
- [30] Heinze, T., Haack, V., & Rensing, S. 2004. Starch derivatives of high degree of functionalization. 7. Preparation of cationic 2-hydroxypropyltrimethylammonium chloride starch. *Starch/Starke*. 56: 288–296
- [31] Pi-xin Wang, Xiu-li Wu, Xue Dong-hua, Xu Kun, Tan Ying, Du Xi-bing, Li Wen-bo. 2009. Preparation and characterization of cationic corn starch with a high degree of substitution in dioxane–THF–water media. *Carbohydrate Research*. 344: 851–855.



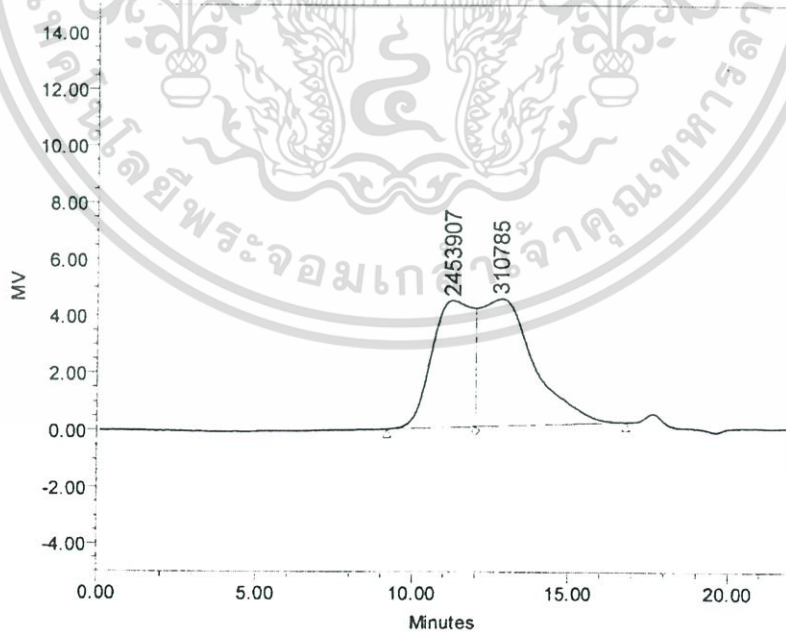
ภาคผนวก ก
**การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของ ST และ LMW-ST ด้วยเทคนิค Gel Permeation
Chromatography (GPC)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของ ST และ LMW-ST ด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC)



รูปที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC ของ ST



รูปที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC ของ LMW-ST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ค่าน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ ของ ST และ LMW-ST ด้วยเทคนิค GPC

ตัวอย่าง	Mn (KDaltons)	Mw (KDaltons)	MP (KDaltons)	Mz (KDaltons)	Mz+1 (KDaltons)	polydispersity
ST	211.58	1575.14	723.44	4332.60	6758.86	7.44
LMW-ST	2224.36	3322.57	2453.91	4976.44	6769.44	1.49
	79.31	307.89	310.79	515.23	640.99	3.88



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน (%N) และองศาการแทนที่ (DS) ด้วยเทคนิคเจลดดาห์ล (Kjeldahl method)

การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน (%N) และองศาการแทนที่ (DS) ด้วยเทคนิคเจลดดาห์ล (Kjeldahl method) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ ข.1 และ ข.2

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน ; \%N} = \frac{M \times V \times 1.4}{\text{Sample weight (g)}} \quad (\text{ข.1})$$

$$\text{องศาการแทนที่ ; DS} = \frac{162.15 \times \%N}{1401 - (154.64 \times \%N)} \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อ M คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (โมลาร์)

V คือ ปริมาตรกรดซัลฟูริกที่ใช้ (มิลลิลิตร)

ตารางที่ ข.1 ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไทเทรตเพื่อหาปริมาณ ไนโตรเจนที่อยู่ใน CST

สารตัวอย่าง	ปริมาณเริ่มต้น (กรัม)	ปริมาณกรดที่ใช้ (มิลลิลิตร)
LMW-ST	1.0116	0
CST12	1.0078	1.8
CST14	1.0041	7.9

ตัวอย่าง การคำนวณค่า %N และ DS ของ CST12

$$\%N = \frac{M \times V \times 1.4}{\text{Sample weight (g)}}$$

$$= \frac{0.5 \times 1.8 \times 1.4}{1.0078}$$

$$= 1.25$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 DS &= \frac{162.15 \times \%N}{1401 - (154.64 \times \%N)} \\
 &= \frac{162.15 \times 1.25}{1401 - (154.64 \times 1.25)} \\
 &= 0.167
 \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
การคำนวณค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d_{001}) ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d_{001}) ด้วยเทคนิค XRD

ค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d_{001}) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Braggs แสดงดัง
สมการ ค.3

$$\text{สมการของ Braggs ;} \quad n\lambda = 2d\sin\theta \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ λ = ความยาวของคลื่นของรังสีเอ็กซ์เท่ากับ 15.4 นาโนเมตร

θ = มุมตกกระทบ (องศา)

d_{001} = ระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ของ CST-MMT

n = ค่าคงที่จำนวนเต็ม

ตารางที่ ค.1 ค่า 2θ ของ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMT ที่ได้จาก XRD pattern

สารตัวอย่าง	ค่า $2\theta_1$	ค่า $2\theta_2$
MMT	7.120	-
CST-MMT 1	5.650	-
CST-MMT 2	6.550	3.635
CST-MMT 3	6.350	3.645
CST-MMT 4	6.250	4.00
CST-MMT 5	6.200	3.85
CST-MMT 6	6.300	3.70

ตัวอย่าง การคำนวณค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d_{001}) ด้วยเทคนิค XRD ของ CST-MMT1

$$\begin{aligned} n\lambda &= 2d\sin\theta \\ 1 \times 15.4 \times 10^{-10} &= 2 \times d \times \sin 7.12^\circ \\ d &= 1.24 \text{ นาโนเมตร} \end{aligned}$$

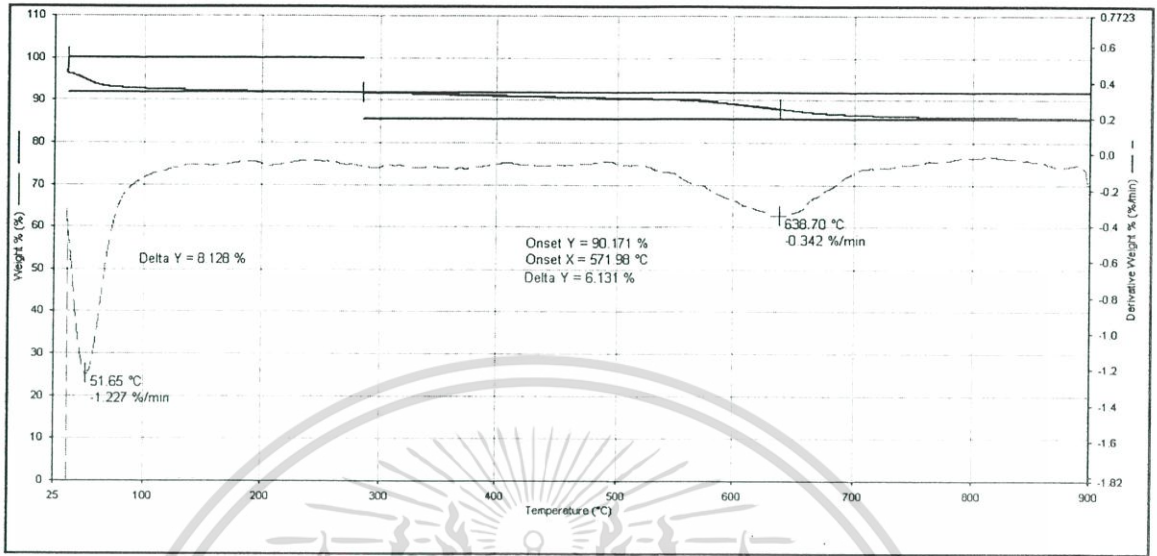
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



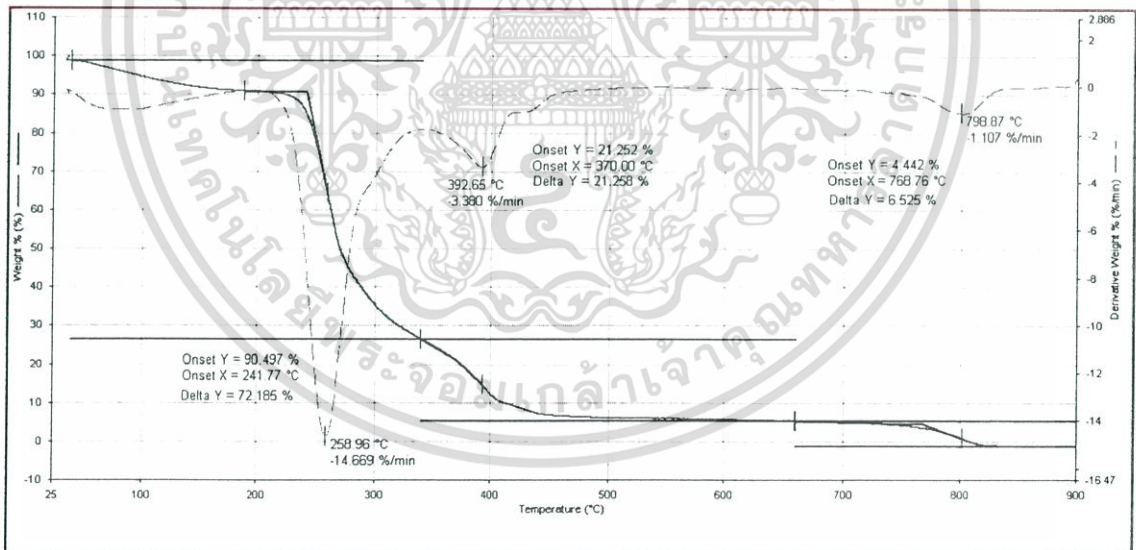
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมแกรมของการวิเคราะห์ปริมาณการสลายตัวขององค์ประกอบด้วยเทคนิค

Thermogravimetric analysis (TGA)

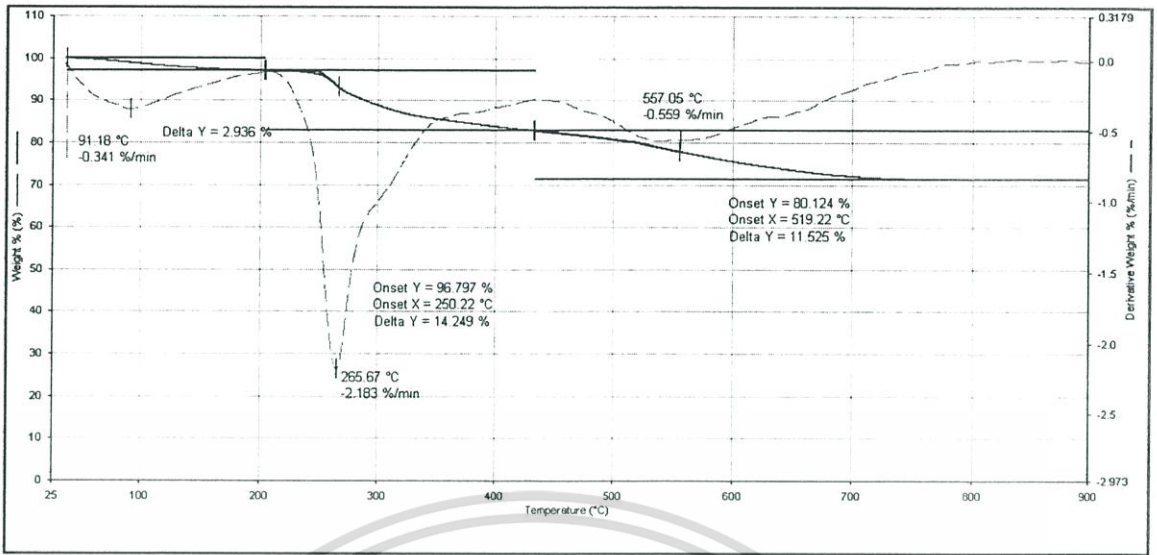


รูปที่ ง.1 เทอร์โมแกรมของ MMT

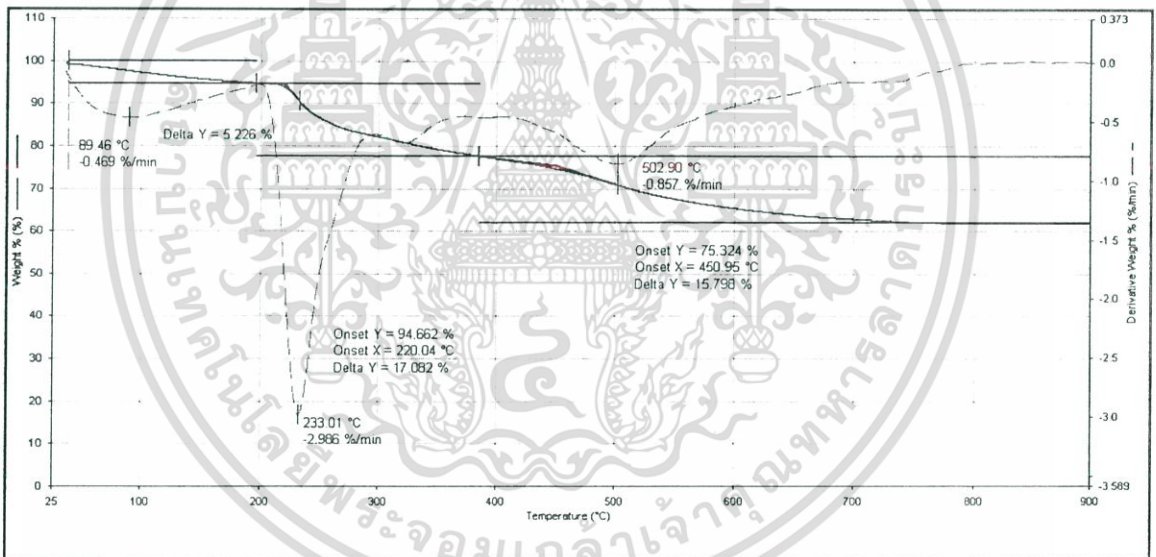


รูปที่ ง.2 เทอร์โมแกรมของ CST12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

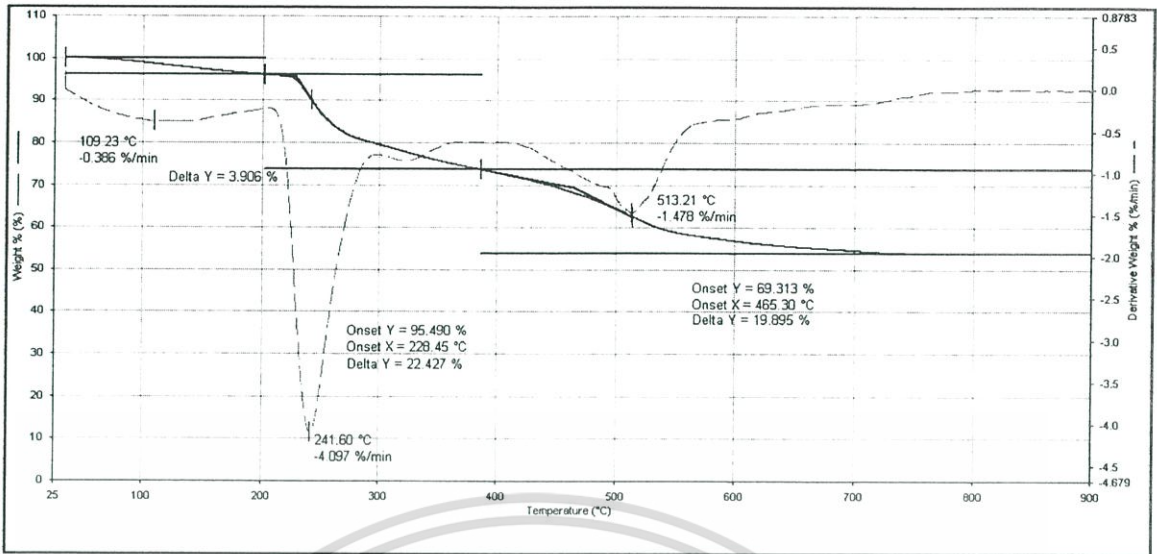


รูปที่ 3.3 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1

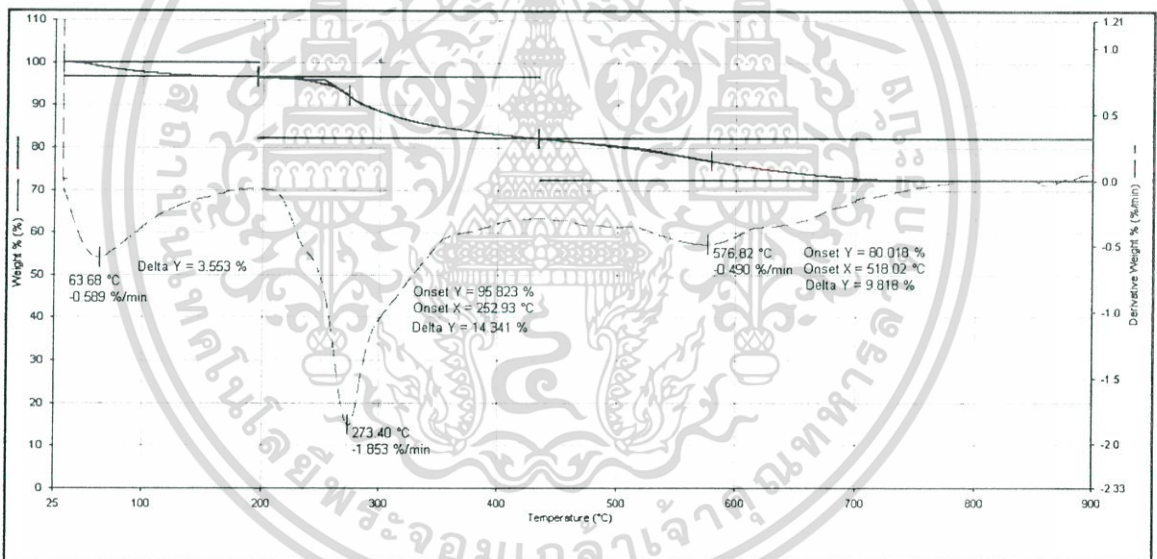


รูปที่ 3.4 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

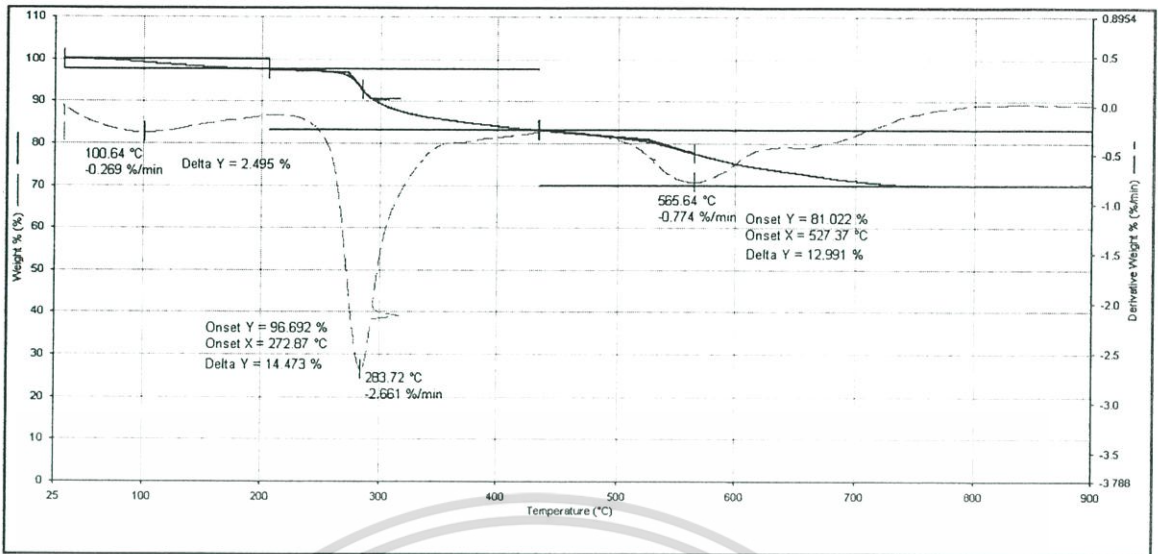


รูปที่ 5.5 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT3

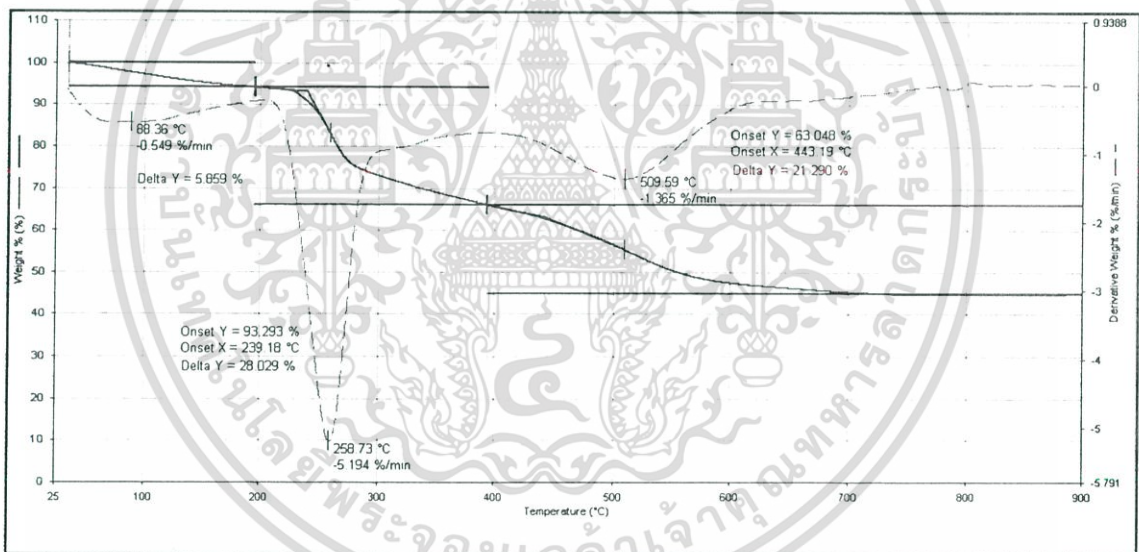


รูปที่ 5.6 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.๗ เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT5



รูปที่ ๓.๘ เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม BB66

ตารางที่ จ.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BB66 ที่ λ_{\max} เท่ากับ 615 นาโนเมตร

ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม AR91 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0
0.4	0.010
0.6	0.013
0.8	0.017
1	0.018
2	0.037
4	0.043
6	0.057
10	0.091
30	0.33
50	0.536
70	0.722
90	0.915

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม BY1

ตารางที่ จ.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม BY1 ที่ λ_{\max} เท่ากับ 412 นาโนเมตร

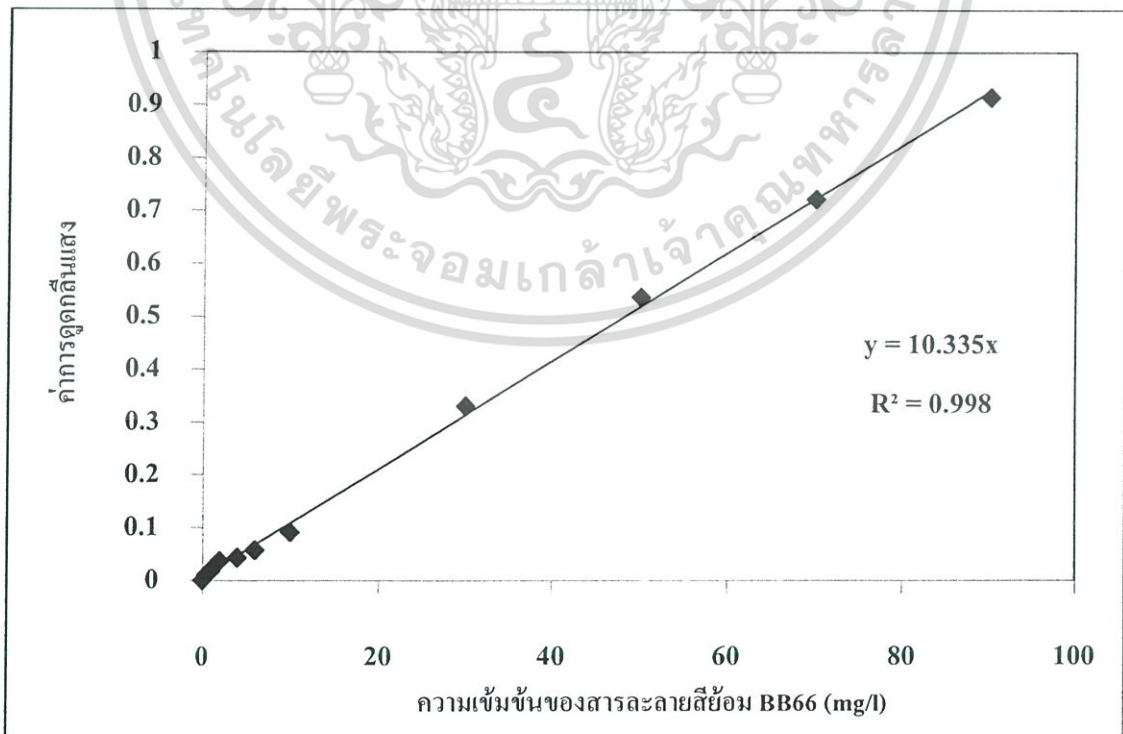
ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม AR91 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0
0.4	0.022
0.6	0.045
1	0.048
2	0.066
4	0.136
6	0.197
8	0.265
10	0.334
20	0.652
30	0.914

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

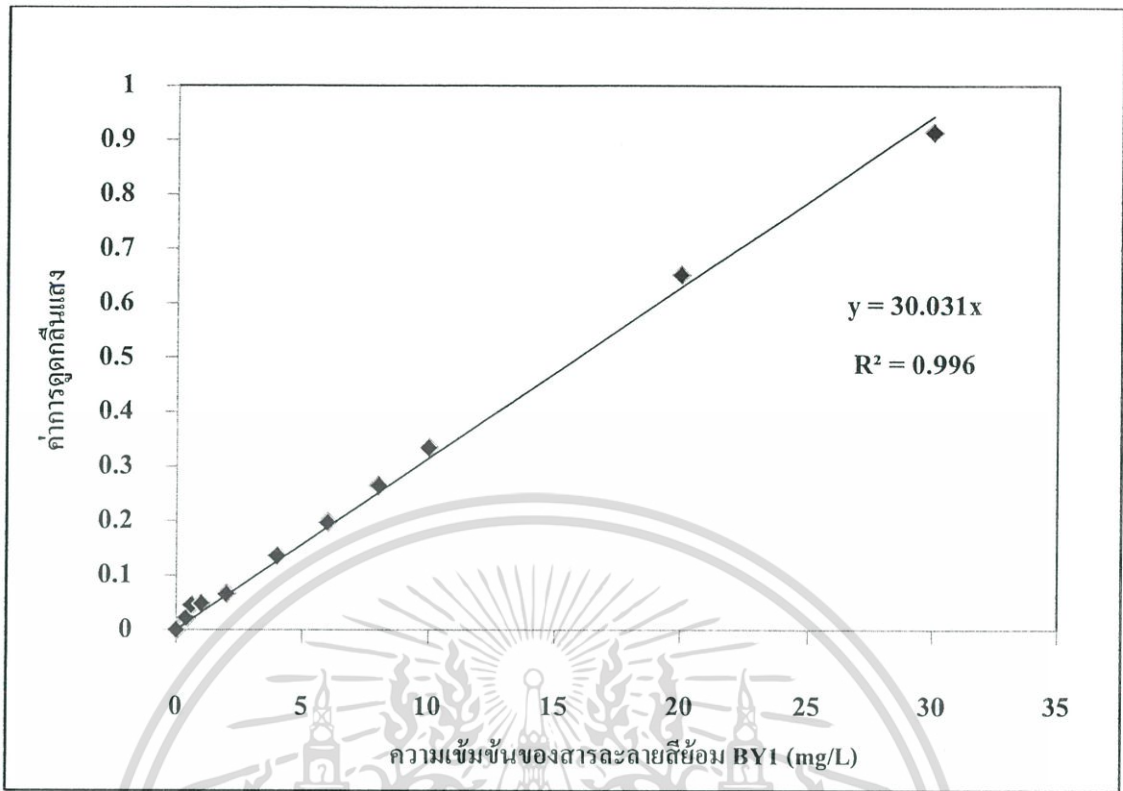
3. การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม AR91

ตารางที่ จ.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม AR91 ที่ λ_{\max} เท่ากับ 514 นาโนเมตร

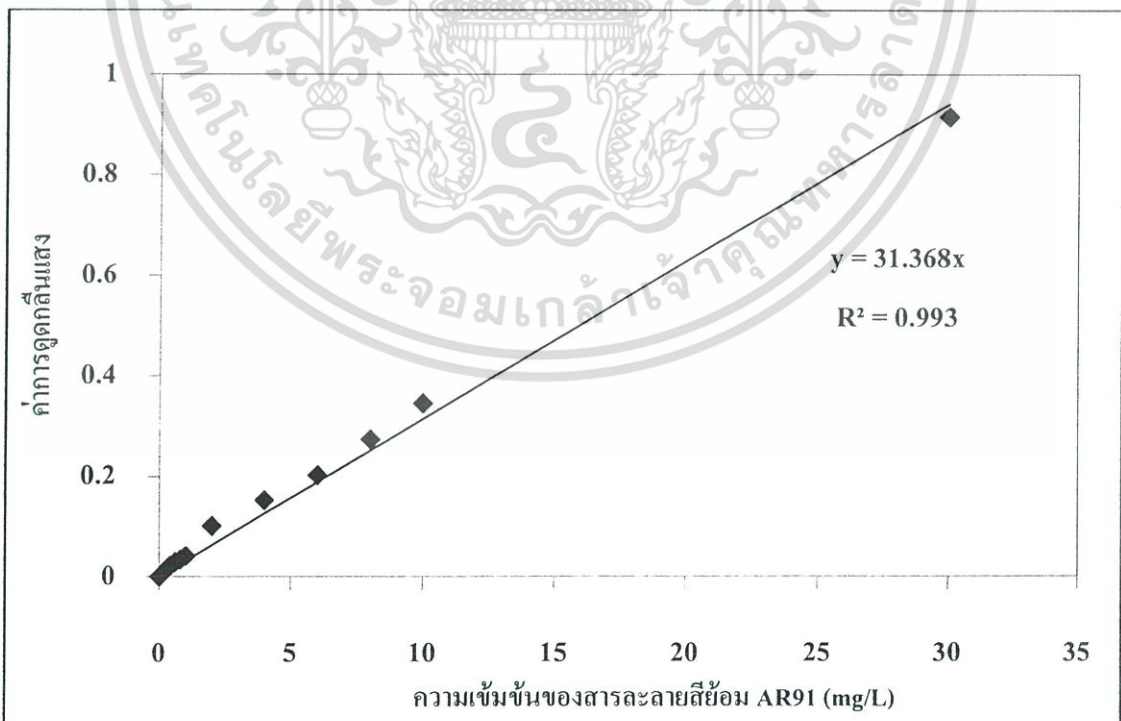
ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม AR91 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0
0.4	0.021
0.6	0.029
0.8	0.034
1	0.041
2	0.101
4	0.152
6	0.202
8	0.273
10	0.345
30	0.915



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ จ.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม BB66 ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๒.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม BY1



รูปที่ ๒.3 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม AR91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ผลของระยะเวลาที่มีต่อการดูดซับสีของ BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1

การคำนวณค่า %การกำจัดสารละลายสีสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ๑.1

$$\% \text{ Removal} = \frac{(C_0 - C_e) \times 100}{C_0} \quad \text{สมการที่ ๑. 1}$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นของสารละลายก่อนการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ๑.1 ผลการดูดซับสีของ BY1 ที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100 มิลลิลิตร ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1

เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)	% การกำจัด	ความจุของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0	0	0
5	59.86	59.86
10	61.02	61.02
15	74.47	74.47
30	75.91	75.91
45	82.11	82.11
60	83.46	83.46
90	96.61	96.61
120	96.90	96.90
1440	97.78	97.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ.2 ผลการดูดซับสีย้อม AR91 ที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100 มิลลิลิตร ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6

เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาท)	% การกำจัด	ความจุของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0	0	0
10	13.13	13.13
20	20.14	20.14
30	31.14	31.14
45	50.58	50.58
60	57.44	57.44
90	81.19	81.19
120	82.14	82.14
1440	84.97	84.97

2. การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BB66 และ BY1 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยใช้ MMT และวัสดุประกอบนาโน CST-MMTs เป็นตัวดูดซับ

ตารางที่ ฉ.3 ผลการดูดซับสีย้อม BB66 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ตัวดูดซับ	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	% การดูดซับ
MMT	64.28	87.14
CST-MMT 1	2.97	99.41
CST-MMT 2	6.53	98.69
CST-MMT 3	4.05	99.19
CST-MMT 4	5.74	98.85
CST-MMT 5	15.53	96.89
CST-MMT 6	25.61	94.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.4 ผลการดูดซับสีข้อม BY1 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ตัวดูดซับ	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	%การกำจัด
MMT	122.85	75.43
CST-MMT 1	1.58	99.68
CST-MMT 2	77.29	84.54
CST-MMT 3	91.81	81.64
CST-MMT 4	21.90	95.62
CST-MMT 5	77.30	84.54
CST-MMT 6	132.05	73.59

ตารางที่ ๓.5 ผลการดูดซับสีข้อม AR91 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ตัวดูดซับ	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	%การกำจัด
MMT	447.61	10.48
CST-MMT 1	347.45	30.51
CST-MMT 2	457.43	8.51
CST-MMT 3	438.30	12.34
CST-MMT 4	189.63	62.07
CST-MMT 5	3.28	99.34
CST-MMT6	2.88	99.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

ตารางที่ ๓.6 ผลการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น
ต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	%การกำจัด	ความจุของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
500	1.55	99.69	49.845
1000	22.15	97.79	97.79
2000	193.24	90.34	180.68
3000	235.03	92.17	276.51
4000	909.92	77.25	309
5000	1765.11	64.69	323.45
6000	2846.41	52.56	315.36

ตารางที่ ๓.7 ผลการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น
ต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	%การกำจัด	ความจุของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
500	77.28	84.54	42.27
1000	178.83	82.12	82.12
2000	235.03	88.25	176.5
3000	666.78	77.77	233.31
4000	1916.18	52.09	208.36
5000	2931.04	41.38	206.9
6000	4629.70	22.84	137.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๘.8 ผลการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT3 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น
ต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	%การกำจัด	ความจุของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
500	91.79	81.64	40.82
1000	107.84	89.22	89.22
2000	267.33	86.63	173.26
3000	1115.93	62.80	188.4
4000	2000.13	49.99	199.96
5000	2882.68	42.35	211.75
6000	4178.80	30.35	182.10

ตารางที่ ๘.9 ผลการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT4 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น
ต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	%การกำจัด	ความจุของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
500	21.86	95.63	47.815
1000	76.79	92.32	92.32
2000	166.94	91.65	183.3
3000	347.32	88.42	265.26
4000	876.27	78.09	312.36
5000	1752.53	64.95	324.75
6000	2769.81	53.84	323.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.10 ผลการดูดซับสีของ BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น
ต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	%การกำจัด	ความจุของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
500	111.12	77.78	38.89
1000	102.62	89.74	89.74
2000	407.00	79.65	159.3
3000	748.32	75.06	225.18
4000	1307.61	67.31	269.24
5000	1829.37	63.41	317.05
6000	2930.85	51.15	306.90

ตารางที่ ๑.11 ผลการดูดซับสีของ BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น
ต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	%การกำจัด	ความจุของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
500	23.22	95.36	47.68
1000	77.29	92.27	92.27
2000	383.27	80.84	161.68
3000	950.11	68.33	204.99
4000	1452.54	63.69	254.76
5000	2531.48	49.37	246.85
6000	3085.44	48.58	291.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของการดูดซับสีย้อม AR91 ของ MMT-CST

ตารางที่ ๑๒.12 ผลการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT 4 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	%การกำจัด	ความจุของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
500	7.97	98.41	49.205
1000	108.48	89.15	89.15
1500	597.74	60.15	90.225
2000	1291.13	35.44	70.88
3000	2378.22	20.73	62.19

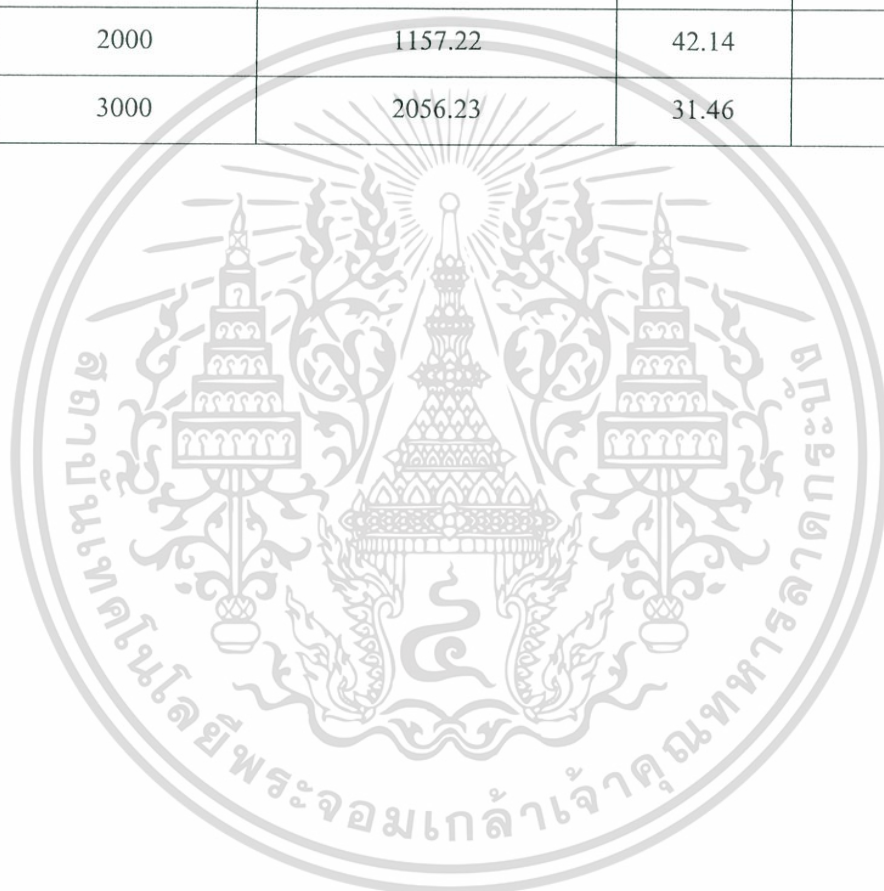
ตารางที่ ๑๒.13 ผลการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	%การกำจัด	ความจุของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
500	3.28	99.34	49.67
1000	175.34	82.47	82.47
1500	586.59	60.89	91.335
2000	1236.93	38.15	76.30
3000	2196.50	26.78	80.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.14 ผลการดูดซับสีข้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT 6 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	%การกำจัด	ความจุของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
500	2.88	99.42	49.71
1000	150.32	84.97	84.97
1500	650.30	56.65	84.975
2000	1157.22	42.14	84.28
3000	2056.23	31.46	94.38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม BY1 และ AR91 ของวัสดุประกอบนาโน
CST-MMT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

ตารางที่ ข.1 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ในการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1

C_0 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C_e (มิลลิกรัมต่อลิตร)	q (มิลลิกรัมต่อกรัม)	C_e/q (กรัมต่อลิตร)
500	1.55	49.85	0.03
1000	22.15	97.79	0.23
2000	193.24	180.68	1.07
3000	235.03	276.50	0.85
4000	909.92	309.01	2.94
5000	1765.11	323.49	5.46
6000	2846.41	315.36	9.03

ตารางที่ ข.2 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมของฟรุนดลิชในการดูดซับสีย้อม BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1

C_0 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C_e (มิลลิกรัมต่อลิตร)	q (มิลลิกรัมต่อกรัม)	$\log C_e$	$\log q_e$
500	1.55	49.85	0.19	1.70
1000	22.15	97.79	1.35	1.99
2000	193.24	180.68	2.29	2.26
3000	235.03	276.50	2.37	2.44
4000	909.92	309.01	2.96	2.49
5000	1765.11	323.49	3.25	2.51
6000	2846.41	315.36	3.45	2.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

ตารางที่ ข.3 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ในการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6

C_0 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C_e (มิลลิกรัมต่อลิตร)	q (มิลลิกรัมต่อกรัม)	C_e/q (กรัมต่อลิตร)
500	2.88	49.71	0.058
1000	150.32	84.97	1.77
1500	650.3	84.97	7.65
2000	1157.22	84.28	13.73
3000	2056.23	94.38	21.79

ตารางที่ ข.4 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมของฟรุนดลิชในการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6

C_0 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C_e (มิลลิกรัมต่อลิตร)	q (มิลลิกรัมต่อกรัม)	$\log C_e$	$\log q_e$
500	2.88	49.71	0.46	1.70
1000	150.32	84.97	2.18	1.93
2000	650.3	84.97	2.81	1.93
3000	1157.22	84.28	3.06	1.93
4000	2056.23	94.38	3.31	1.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การศึกษาดนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม BY1 และ AR91 ของวัสดุประกอบนาโน

CST-MMT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีเขียว BY1 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

ตารางที่ ข.1 พารามิเตอร์แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-First order ในการดูดซับสีเขียว BY1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH~4 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1

เวลา (t)	q_t	$q_c - q_t$	$\log (q_c - q_t)$
0	0	97.78	1.99
5	59.86	37.92	1.58
10	61.02	36.76	1.57
15	74.47	23.31	1.37
30	75.91	21.87	1.34
45	82.11	15.67	1.19
60	83.46	14.32	1.16
90	96.61	1.17	0.07
120	96.9	0.88	-0.06
1440	97.78	0	-

ตารางที่ ข.2 พารามิเตอร์แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-Second order ในการดูดซับสีเขียว BY1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH~4 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT1

เวลา (t)	q_t	t/q_t
0	0	0
05	59.86	0.08
10	61.02	0.16
15	74.47	0.20
30	75.91	0.39
45	82.11	0.55
60	83.46	0.72
90	96.61	0.93
120	96.9	1.24
1440	97.78	14.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม AR91 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT

ตารางที่ ข.3 พารามิเตอร์แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-First order ในการดูดซับสีย้อม AR91 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH~4 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6

เวลา (t)	q_t	$q_c - q_t$	$\log (q_c - q_t)$
0	0	84.97	1.93
10	13.13	71.84	1.86
20	20.14	64.83	1.81
30	31.14	53.83	1.73
45	50.58	34.39	1.54
60	57.44	27.53	1.44
90	81.19	3.78	0.58
120	82.14	2.83	0.45
1440	84.97	0	-

ตารางที่ ข.4 พารามิเตอร์แบบจำลองจลนศาสตร์ Pseudo-Second order ในการดูดซับสีย้อม AR91 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร pH~4 ของวัสดุประกอบนาโน CST-MMT6

เวลา (t)	q_t	t/q_t
0	0	0
10	13.13	0.76
20	20.14	0.99
30	31.14	0.96
45	50.58	0.89
60	57.44	1.04
90	81.19	1.11
120	82.14	1.46
1440	84.97	16.94716

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้ทำงานวิจัย

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวศรินันท์ เหล่าชูชัยสกุล
วัน เดือน ปีเกิด	9 พฤษภาคม 2530
ที่อยู่	94 ม.11 ต.ดอนกรวย อ.ดำเนินสะดวก จ.ราชบุรี 70130
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนถาวรานุกูล
ระดับปริญญาตรี	(วท.บ.เคมี) สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิจัย	
ระดับปริญญาตรี	การศึกษาความเป็นไปได้ของการเตรียมโฟมลิกนินพอลิยูรีเทนที่ย่อยสลายได้จากน้ำค้ำเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษ Feasibility study of lignin-polyurethane foam made of lignin from waste black liquor of paper industries
ระดับปริญญาโท	การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างแป้งแคทไอออนิกและมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อม Preparation of nanocomposites between cationic starch and montmorillonite for dye adsorption application
ผลงานที่เผยแพร่	- การประชุมวิชาการระดับชาติตามรอยพระยุคลบาท เกษตรศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9 ในหัวข้อ “การดูดซับสีย้อมเบสิกเซลโล 1 ด้วยวัสดุประกอบนาโนระหว่างแป้งแคทไอออนิกและมอนต์มอริลโลไนต์” - การประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อการพัฒนาด้านวิจัยอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ครั้งที่ 1 ในหัวข้อ “ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมแอซิดเรด 91 ของวัสดุประกอบนาโนระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์และแป้งแคทไอออนิก”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้