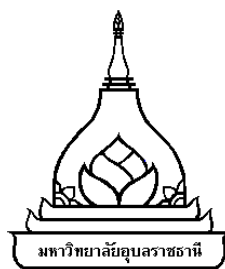


การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต

พัชราภรณ์ จันทวี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



ADSORPTION OF MALACHITE GREEN DYE USING COMPOSITE FILM

PATCHARAPORN CHANTAWEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBONRATCHATHANI UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2015
COPY RIGHT OF UBONRATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต

ผู้วิจัย นางสาวพัชรภรณ์ จันทวี

คณะกรรมการสอบ

ดร.วรรณมา สายแก้ว	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพูช	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ สอนองราชบุรี	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

จักรกฤษณ์ อัมพูช

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพูช)

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2559

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.จักรกฤษณ์ อัมพูช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา ถ่ายทอดความรู้ต่างๆ ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงาน แนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหา ให้ข้อคิดเห็น อบรมสั่งสอน ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิจัยในครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.สมภพ สนองราษฎร์ และ ดร.วรรณ สายแก้ว อาจารย์กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณนายวีระพงษ์ สุวรรณเพ็ญ นายทิวาล ฅนอมวงศ์ และนางศิริณัฐกาญจน์ สิงคบุตร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงให้คำปรึกษาในการทดลองเป็นอย่างดี และ ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาปริญญาโท โดยเฉพาะนายปวิชร นามด้วง รุ่นพี่นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำวิจัยด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวจันทวี ที่คอยสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ทุกๆ เรื่องของชีวิต ให้ความรัก และเป็นกำลังใจที่สำคัญ จนสามารถทำทุกสิ่งทุกอย่างได้ตามที่มุ่งหวัง

(พัชรภรณ์ จันทวี)

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต
 ผู้วิจัย : พิชราภรณ์ จันทวี
 ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชา : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
 อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพูช
 คำสำคัญ : ฟิล์มคอมโพสิต, มาลาไคท์กรีน, เพคติน, แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์, การดูดซับ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน (Malachite green: MG) จากสารละลายโดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ (CN film) ฟิล์มคอมโพสิตทางการค้า (CC film) ฟิล์มเพคตินธรรมชาติ (PN film) ฟิล์มเพคตินทางการค้า (PC film) และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) เป็นตัวดูดซับ ฟิล์มคอมโพสิตเตรียมจากสารแขวนลอยที่มีส่วนผสมของ MMT เพคติน และโซเดียมอัลจิเนต ซึ่งเพคตินธรรมชาติได้จากการสกัดจากเปลือกเสาวรส (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของ CN film และ CC film สูงกว่า PN film แต่ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของ CN film เล็กกว่า ผลการวิเคราะห์ IR spectrum ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แสดงให้เห็นว่าใน IR spectrum ของฟิล์มคอมโพสิต มีการปรากฏหมู่ฟังก์ชันของ MMT ร่วมด้วย ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีอนุภาคของ MMT ปรากฏในฟิล์มคอมโพสิตทั้งสองชนิด

ผลการศึกษาการดูดซับแบบกะ แสดงให้เห็นว่า มีปริมาณการดูดซับสีย้อม MG ของ CN film, CC film, PN film และ PC film เท่ากับร้อยละ 75, 68.45, 2.03 และ 1.33 ตามลำดับ ปริมาณการดูดซับสูงสุด ถูกพบที่ค่าพีเอช 2 และอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณการดูดซับน้อยมาก พฤติกรรมการดูดซับมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม ปริมาณการดูดซับแบบขั้นเดียวสูงสุดเท่ากับ 54.98 mg/g และการดูดซับสีย้อมเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 180 นาที จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่า CN film สามารถใช้เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสำหรับการกำจัดสีย้อม MG จากน้ำเสียได้

ABSTRACT

TITLE : ADSORPTION OF MALACHITE GREEN DYE USING COMPOSITE FILM
AUTHOR : PATCHARAPORN CHANTAWEE
DEGREE : MASTER OF ENGINEERING
MAJOR : ENVIRONMENTAL ENGINEERING
ADVISOR : ASST. PROF. CHAKKRIT UMPUCH, Ph.D.
KEYWORDS : COMPOSITE FILM, MALACHITE GREEN, PECTIN, MONTMORILLONITE CLAY, ADSORPTION

This work aims to study the adsorption of malachite green (MG) dye from aqueous solution using natural composite film (CN film), commercial composite film (CC film), natural pectin film (PN film), commercial pectin film (PC film), and montmorillonite clay (MMT) as the adsorbents. The composite films were prepared from the suspensions containing MMT, pectins, and sodium alginate. The natural pectin was extracted from passion fruit peel (*Passiflora edulis f. flavicarpa*). From the results of adsorbent characterizations found that the specific surface area of CN film and CC film are higher than PN film but the average pore size of CN film is smaller. The IR spectrums analyzed by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Analysis showed that IR spectrums of composite films present functional group of MMT. The morphology of adsorbents analyzed by Scanning Electron Microscopy (SEM) images revealed that the particles of MMT presents in both composite films.

The batch adsorption results showed that the amounts of MG dye adsorbed onto CN film, CC film, PN film, and PC film were 75, 68.45, 2.03 and 1.33% respectively. The maximum adsorption capacity was observed at pH 2 and temperature slightly affected the amount of dye adsorbed. The adsorption behavior agreed well with Langmuir isotherm model and pseudo second order kinetic model. The maximum monolayer adsorption capacity was 54.98 mg/g and the dye adsorption was equilibrated within 180 min. The results showed that CN film can be used as an effective adsorbent for the removal of MG dye wastewater.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมติฐาน	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 สถานที่ทำการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สีมาลาโคท์กรีน	4
2.2 ความรู้ทั่วไปของเสาวรส	5
2.3 ความรู้ทั่วไปของเพคติน	6
2.4 ความรู้ทั่วไปของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์	7
2.5 การดูดซับ	9
2.6 ไอโซเทอมการดูดซับ	13
2.7 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ	14
2.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	16
2.9 พลังงานกระตุ้น	17
2.10 การคายซับ	18
2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	18
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	21
3.2 กรอบงานวิจัย	21
3.3 การเตรียมเปลือกเสาวรส	22
3.4 การสกัดเพคตินจากเปลือกเสาวรส	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การเตรียมฟิล์มคอมโพสิตและฟิล์มเพคตินธรรมชาติ	23
3.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มคอมโพสิตและสีย้อม	23
3.7 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อม	24
3.8 การศึกษาการดูดซับแบบกะ	25
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับและสีย้อม	28
4.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบกะ	32
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	41
5.2 ข้อเสนอแนะ	42
เอกสารอ้างอิง	43
ภาคผนวก	
ก ภาพตัวอย่างฟิล์ม	49
ข ผลการศึกษาสมดุลการดูดซับ	52
ค ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	57
ง ค่าใช้จ่ายในการผลิตฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ	66
จ ผลงานการนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ	68
ประวัติผู้วิจัย	76

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ	28
4.2	ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ	30
4.3	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม MG	32
4.4	พารามิเตอร์ของสมการอันดับหนึ่งเทียมและสมการอันดับสองเทียมของการดูดซับสีย้อม MG จากสารละลายสีสังเคราะห์	34
4.5	พารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนดิชของการดูดซับสีย้อม MG ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	35
4.6	ค่าพลังงานการกระตุ้นของการดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ	37
4.7	พารามิเตอร์ของเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ	39
4.8	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการคายซับสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต 0.3 g อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 24 hr	40
ง.1	ค่าใช้จ่ายในการผลิตฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ	67

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างทางเคมีของสีมาลาโคท์กรีน	4
2.2	โครงสร้างทางเคมีของเพคติน	6
2.3	โครงสร้างแบบ T:O:T ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์	9
2.4	การพล็อตกราฟด้วยสมการ BET	12
3.1	แผนภาพขั้นตอนการวิจัย	22
4.1	สเปกตรัม FTIR ของ MMT, CC film, PC film, CN film และ PN film	29
4.2	ผลการวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ PC film, PN film, CC film, CN film และ MMT	31
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH_f กับค่า pH_0 ของสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 0.01 และ 0.1 M ที่อุณหภูมิ 35 °C	32
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีย้อมกับเวลาสัมผัสของสีย้อม MG ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g $C_0 = 150$ mg/L และ $pH_0 = 3.80 \pm 0.5$ เป็นตัวดูดซับ	33
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t (min*g/mg) และ t (min) แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีย้อม ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยใช้ CN film เป็นตัวดูดซับ	34
4.6	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อม MG จากสารละลายสีสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g และ $pH_0 = 3.78 \pm 0.5$ เป็นตัวดูดซับ	35
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีย้อมกับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม MG ที่ $C_0 = 150$ mg/L โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ	36
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีย้อมกับอุณหภูมิในการดูดซับของสารละลายสีย้อม MG ที่ $C_0 = 150$ mg/L โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ	37
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_2$ กับ $1/T$ ของการดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ	38
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_L$ กับ $1/T$ ของการดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ	39
ก.1	ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ (CN film)	50
ก.2	ฟิล์มเพคตินธรรมชาติ (PN film)	50
ก.3	ฟิล์มคอมโพสิตทางการค้า (CC film)	51
ก.4	ฟิล์มเพคตินธรรมชาติ (PC film)	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ข.1	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากสารละลายสี้อม MG โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 35 °C pH = 3.80 ±0.5	53
ข.2	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชจากสารละลายสี้อม MG โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 35 °C pH = 3.80 ±0.5	53
ข.3	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากสารละลายสี้อม MG โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 45 °C pH = 3.80 ±0.5	54
ข.4	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชจากสารละลายสี้อม MG โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 45 °C pH = 3.80 ±0.5	54
ข.5	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากสารละลายสี้อม MG โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 55 °C pH = 3.80 ±0.5	55
ข.6	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชจากสารละลายสี้อม MG โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 55 °C pH = 3.80 ±0.5	55
ข.7	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากสารละลายสี้อม MG โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 65 °C pH = 3.80 ±0.5	56
ข.8	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชจากสารละลายสี้อม MG โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 65 °C pH = 3.80 ±0.5	56
ค.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสี้อม MG กับเวลาสัมผัส ที่ C ₀ = 148.39 mg/L โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 35 °C pH = 3.80 ±0.5	58
ค.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายสี้อม MG กับเวลาสัมผัส โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 35 °C pH = 3.80 ±0.5	58
ค.3	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo – first order) ของการดูดซับสี้อม MG ที่ C ₀ = 148.39 mg/L โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 35 °C pH = 3.80 ±0.5	59
ค.4	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo – second order) ของการดูดซับสี้อม MG ที่ C ₀ = 148.39 mg/L โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 35 °C pH = 3.80 ±0.5	59
ค.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสี้อม MG กับเวลาสัมผัส ที่ C ₀ = 152.62 mg/L โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 45 °C pH = 3.80 ±0.5	60
ค.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายสี้อม MG กับเวลาสัมผัส โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 45 °C pH = 3.80 ±0.5	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ค.7	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo – first order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 45°C $\text{pH} = 3.80 \pm 0.5$ 61
ค.8	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo – second order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 45°C $\text{pH} = 3.80 \pm 0.5$ 61
ค.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม MG กับเวลาสัมผัส ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 55°C $\text{pH} = 3.80 \pm 0.5$ 62
ค.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม MG กับเวลาสัมผัส โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 55°C $\text{pH} = 3.80 \pm 0.5$ 62
ค.11	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo – first order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 55°C $\text{pH} = 3.80 \pm 0.5$ 63
ค.12	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo – second order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 55°C $\text{pH} = 3.80 \pm 0.5$ 63
ค.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม MG กับเวลาสัมผัส ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 65°C $\text{pH} = 3.80 \pm 0.5$ 64
ค.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม MG กับเวลาสัมผัส โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 55°C $\text{pH} = 3.80 \pm 0.5$ 64
ค.15	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo – first order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 65°C $\text{pH} = 3.80 \pm 0.5$ 65
ค.16	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo – second order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 65°C $\text{pH} = 3.80 \pm 0.5$ 65

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ความหมาย
R^2	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
BET	Brunauer Emmett and Teller
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
SEM	Scanning Electron Microscope
MMT	แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite clay)
MG	สีมาลาไคท์กรีน (Malachite green)
CC film	ฟิล์มคอมโพสิตทางการค้า
PC film	ฟิล์มเพคตินทางการค้า
CN film	ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ
PN film	ฟิล์มเพคตินธรรมชาติ
Abs	Absorbance
$\lambda_{\max}$	ความยาวคลื่นที่สารตัวอย่างสามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุด (nm)
P	ความดันที่สมดุลของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ (mmHg)
P_0	ความดันที่อิ่มตัวของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ (mmHg)
v	ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับ (cc/g)
v_m	ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียว (cc/g)
c	ค่าคงที่ของ BET
C_e	ความเข้มข้นของสีย้อมที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/L)
C_0	ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น (mg/L)
q	ปริมาณการดูดซับสีย้อม (mg/g)
q_e	ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล (mg/g)
q_m	ปริมาณการดูดซับสีย้อมแบบชั้นเดียวสูงสุดจากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (mg/g)
q_t	ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่เวลา t (mg/g)
m	น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)
V	ปริมาตรของน้ำ (L)
K_d	สัมประสิทธิ์การแจกแจงหรือ ค่าคงที่ Henry's Law (L/g)
K_F	ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช (L/g)
K_L	ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (L/g)
a_L	ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (L/mg)
ΔG_{ads}^o	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐานสำหรับการดูดซับ (kJ/mol)

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ความหมาย
ΔH_{ads}°	การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมาตรฐานสำหรับการดูดซับ (kJ/mol)
ΔS_{ads}°	การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐานสำหรับการดูดซับ (kJ/mol*K)
R	ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol*K)
T	อุณหภูมิของสารละลายสีย้อม (K)
k_1	ค่าคงที่ของสมการอันดับหนึ่งเทียม (1/min)
k_2	ค่าคงที่ของสมการอันดับสองเทียม (g/mg*min)
$q_{e, exp}$	ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุลจากการทดลอง (mg/g)
$q_{e, cal}$	ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุลจากการคำนวณ (mg/g)
E_a	พลังงานกระตุ้น (kJ/mol)
%wt	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
E_1	ความร้อนของการดูดซับที่เกิดขึ้นขั้นแรก
E_L	ความร้อนของการดูดซับที่ขั้นที่สองและขั้นที่สูงขึ้นต่อไป
N	เลขอะโวกาโด (Avogadro's number)
s	พื้นที่ที่ตัวถูกดูดซับปกคลุมบนพื้นผิวของของแข็ง (m ²)
V	ปริมาตรเชิงโมลของแก๊สที่ถูกดูดซับ (m ³)
%	เปอร์เซ็นต์
°C	องศาเซลเซียส
g	กรัม
N-m	นิวตัน-เมตร
m ²	ตารางเมตร
m ³	ลูกบาศก์เมตร
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
mL	มิลลิลิตร
rpm	รอบต่อนาที
r_k	รัศมีรูพรุน (mm)
cc/g	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
hr	ชั่วโมง
g/mol	กรัมต่อโมล

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สีย้อมมาลาไคท์กรีน (Malachite green) เป็นสีย้อมประเภทเบสิค สามารถละลายน้ำได้ มีสีเขียวอมฟ้า นิยมนำมาย้อมผ้าฝ้าย ปอ กระดาษ ผ้าไหม ผ้าขนสัตว์และเครื่องหนัง (Wang D et al., 2015; Dahri MK et al., 2014) แต่สีมาลาไคท์กรีนเป็นสีที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ได้ หากสัมผัสหรือสูดดมโดยตรงเป็นเวลานานๆ (Wang D et al., 2015; Soni A et al., 2014) นอกจากนี้สีมาลาไคท์กรีนยังเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากย่อยสลายเองในธรรมชาติได้น้อย และในปัจจุบันการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอมีเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากร ทำให้มีการใช้สีย้อมในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอมากถึง 1 ล้านตันต่อปี (Gupta and Suhas, 2009) ซึ่งน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสีย้อมจะก่อให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ ลดการสังเคราะห์แสง ส่งผลให้ออกซิเจนในน้ำลดลง ไม่เหมาะต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ (Malik R et al., 2007) การกำจัดสีย้อมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจึงมีความจำเป็นอย่างมาก

การกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียที่นิยมนำมาใช้ คือ การตกตะกอน การกรองด้วยเมมเบรน การย่อยสลายทางชีวภาพ วิสซอร์พชัน และวิธีออกซิเดชัน เป็นต้น แต่วิธีที่กล่าวมาข้างต้นยังมีข้อจำกัดในการนำมาใช้ เช่น วิธีการตกตะกอน สามารถใช้กำจัดได้เฉพาะสีย้อมที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ วิธีออกซิเดชัน เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูง แต่เนื่องจากวิธีนี้จำเป็นต้องใช้สารออกซิเดชันจำนวนมาก ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง ส่วนกระบวนการทางชีวภาพนั้นสามารถควบคุม COD และ BOD ได้ดีแต่ไม่สามารถกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียได้ (Mohan et al., 2002) การกำจัดสีย้อมด้วยการดูดซับก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับนิยมนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เพราะมีค่าใช้จ่ายต่ำและสามารถดูดซับสีย้อมและมลพิษอื่นๆได้ดี (Singh V et al., 2009) ซึ่งตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ ชงข้าวโพด แกลบ เปลือกผลไม้ เป็นต้น และในปีที่ผ่านมาพลาสติกชีวภาพถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดสีย้อม ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ (Rahchamani et al., 2011; Sekhar C.P. et al., 2009) และได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์ฟิล์มจากอะมิเตทเพคตินและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อนำมาดูดซับสีย้อมประเภท เบสิค ผลที่ได้คือ ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงเมื่อเทียบกับการใช้ตัวดูดซับอื่นๆ เช่น แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ และ เบนโทไนต์ (Aleksandra R. Nesic et al., 2013) ซึ่งเพคติน (Pectin) มีคุณสมบัติเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ประเภท heteropolysaccharide มีหน่วยย่อย คือกรดกาแล็กทูโรนิก (D-galacturonic acid) ประมาณร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก และเมทิลกาแล็กทูโรเนต และน้ำตาลหลายชนิด เช่น rhamnose, galactose, arabinose พบตามธรรมชาติในผนังเซลล์ของพืช (plant cell wall) และรอยต่อระหว่างผนังเซลล์ โดยรวมตัวอยู่กับเซลลูโลส (cellulose) ทำหน้าที่ยึดเกาะผนังเซลล์ให้ติดกันคล้ายเป็นซีเมนต์ (Christensen, 1986) เพคตินสามารถเกิดเป็นเจลได้ เมื่อรวมตัวกับน้ำตาลและกรดในปริมาณที่เหมาะสม (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 2555) และเมื่อนำไปผสมกับแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite clay) จะทำให้

เกิดการรวมตัวกันกลายเป็นฟิล์มคอมโพสิต เนื่องจากกลุ่มไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเพคติน สามารถทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเพคตินกับชั้นซิลิเกตในโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ได้ ทำให้เกิดเป็นฟิล์มคอมโพสิตที่มีความเสถียรสามารถนำไปดูดซับสีย้อมได้ (Aleksandra R. Nesic et al., 2013) นอกจากนี้หลังการดูดซับ สามารถแยกฟิล์มคอมโพสิตออกจากสารละลายได้ง่าย โดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการกรองเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งในส่วนของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์นั้นสามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย มีราคาถูก และที่สำคัญมีคุณสมบัติในการดูดซับโมเลกุลที่มีประจุบวกสูง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำจึงมีความสนใจในการศึกษาการผลิตฟิล์มคอมโพสิต เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อม โดยผลิตฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ (CN film) ฟิล์มคอมโพสิตทางการค้า (CC film) ฟิล์มเพคตินธรรมชาติ (PN film) ฟิล์มเพคตินทางการค้า (PC film) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ ซึ่งเพคตินธรรมชาตินั้นสกัดจากเปลือกเสาวรสพันธุ์เปลือกสีเหลือง (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) ที่เหลือทิ้งจากการบริโภค

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฟิล์มคอมโพสิต
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต

1.3 สมมติฐาน

- 1.3.1 ฟิล์มคอมโพสิต อาจจะมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน ที่มีประจุบวกได้ดี เนื่องจากเพคตินและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้ในการผลิตฟิล์มคอมโพสิตมีประจุลบ
- 1.3.2 ปัจจัยต่างๆ เช่น ระยะเวลา ค่าพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นและ อุณหภูมิ อาจส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน ด้วยฟิล์มคอมโพสิต

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 สีย้อมที่ใช้ คือ สีมมาลาไคท์กรีน (Malachite green oxalate crystal) จากบริษัท DC Fine Chemicals จำกัด ประเทศอังกฤษ
- 1.4.2 ฟิล์มคอมโพสิตสังเคราะห์จากเพคตินทางการค้า และเพคตินธรรมชาติที่สกัดจากเปลือกเสาวรสและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับ
- 1.4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ ประกอบด้วยการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ย หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ สัณฐานและลักษณะพื้นผิว การศึกษาการดูดซับแบบกะชั่งขั้นตอนเดียว ประกอบด้วย การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ การศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ และ การคายซับ
- 1.4.4 การศึกษาการดูดซับแบบกะจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ และความเร็วรอบในการเขย่า 200 rpm
- 1.4.5 วิเคราะห์ปริมาณการดูดซับด้วยหลักการดูดกลืนแสงเทียบกับความเข้มข้นด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถกำจัดสีย้อมมาลาไคท์กรีนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตจากเพคตินธรรมชาติ/แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

1.5.2 ผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมต่างๆได้

1.5.3 เพิ่มประสิทธิภาพและพัฒนาความสามารถในการใช้เปลือกเสาวรสีที่เป็นวัสดุธรรมชาติและเป็นของเสียจากการบริโภคในประเทศ และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่มีปริมาณมากในประเทศและมีราคาถูก ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น

1.6 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาคาร En2 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
อุบลราชธานี

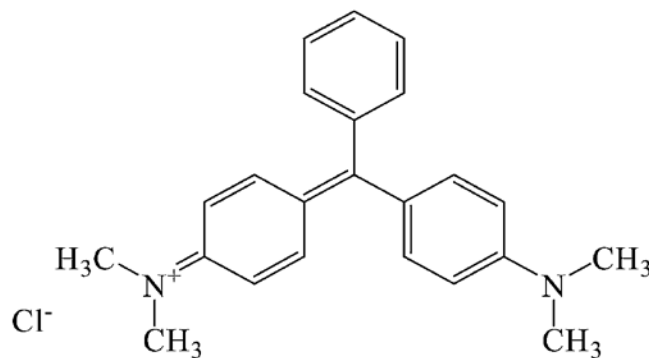
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีมาลาไคท์กรีน (Malachite green)

เป็นสีจำพวกสีเบสิด ที่มีประจุบวก อยู่ในหมวดของสี triphenylmethane มีลักษณะเป็นผง สามารถละลายน้ำได้ เมื่อนำไปละลายน้ำสารละลายที่ได้จะมีสีน้ำเงิน (Dahri MK et al., 2014) นิยมนำมาใช้ในการย้อมสีของผ้าฝ้าย ปอ กระดาษ ผ้าไหม ผ้าขนสัตว์และเครื่องหนัง (Wang D. et al., 2015; Dahri MK et al., 2014) นอกจากนี้ยังนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยง ซึ่งสีมาลาไคท์กรีนสามารถป้องกันเชื้อรา เป็นสารต้านจุลินทรีย์ และสามารถป้องกันปรสิตได้ (K. Helme et al., 2007; K. Mitrowska et al., 2008) แต่สำหรับบางประเทศสีมาลาไคท์กรีน เป็นสีที่ไม่ได้รับอนุญาตให้นำเข้าประเทศ เนื่องจากมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ (Z. Lian et al., 2012; N. Bilandzic et al., 2012)

Malachitegreen (MG) เรียกชื่อตามIUPAC คือ N-[4-[[4-(dimethylamino)phenyl]phenylmethy-lene]-2,5-cyclohexadien-1-ylidene]-N-methyl-oxalate สูตรโมเลกุล คือ $C_{52}H_{54}N_4O_{12}$ มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 926 g/mol มีโครงสร้างโมเลกุล ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของสีมาลาไคท์กรีน

ที่มา: Hong Tian et al., 2014

2.2 ความรู้ทั่วไปของเสาวรส

เสาวรส มีชื่อภาษาอังกฤษคือ Passion Fruit หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “กะทกรกฝรั่ง” มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Passiflora edulis* มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปอเมริกาใต้ บริเวณประเทศบราซิล ปารากวัย อาร์เจนตินา เริ่มมีการแพร่ขยายไปปลูกในภูมิภาคต่างๆ ได้แก่ ใต้หวันและฮาวาย ตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 19 เป็นต้นมา ประเทศไทยได้นำพันธุ์เสาวรสเข้ามาปลูกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2498 (งษ์ชัย, 1990) เสาวรสมีลักษณะผลเป็นรูปกลม ผลอ่อนสีเขียว เมื่อสุกมีหลายสีแล้วแต่พันธุ์ ทั้งสีม่วง เหลือง ส้ม ชั้นในสุดของเปลือกเป็นเยื่อสีขาวที่เรียกรก ภายในมีเมล็ดสีดำจำนวนมาก อยู่ในเยื่อหุ้มเมล็ดเป็นถุง (August, 2011)

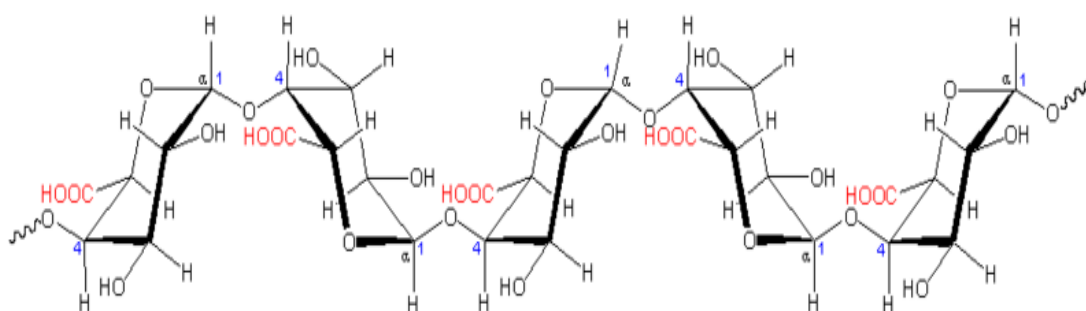
เสาวรสในประเทศไทยที่พบมากในประเทศไทยมี 3 พันธุ์คือ พันธุ์สีม่วง เมื่อสุกเปลือกสีม่วง เนื้อในสีเหลือง รสอมหวานมากกว่าพันธุ์อื่นๆ แต่ไม่ค่อยต้านทานโรคในเขตร้อน พันธุ์สีเหลืองหรือเสาวรสสีทอง ผลแก่สีเหลือง รสเปรี้ยวมาก นิยมปลูกในเขตร้อน พันธุ์ผสม เมื่อสุกเป็นสีม่วงอมแดง รสเปรี้ยวจัด กลิ่นแรง สามารถปักชำและเสียบยอดได้ ซึ่งส่วนใหญ่เสาวรสนิยมปลูกมากทางภาคเหนือของไทย เป็นผลไม้ที่ปลูกง่ายและใช้เวลาเก็บเกี่ยวเพียง 8-9 เดือน เสาวรสมีสวนประกอบที่เป็นเปลือก ร้อยละ 62.1 เมล็ดร้อยละ 9.2 และน้ำรวมเนื้อร้อยละ 28.7 เสาวรสสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ อาทิ เช่น น้ำเสาวรส แยมเสาวรส เป็นต้น ส่วนเปลือกเสาวรสจะนำไปแปรรูปเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์เท่านั้น (ยศยง จันทรวงศา และคณะ, 2545)

เสาวรสชนิดเปลือกสีเหลือง (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) มีงานวิจัยพบว่าเพคตินที่ได้มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ต่ำ นอกจากนี้ปริมาณหมู่แทนที่อื่นๆ เช่น หมู่อะซิติลและน้ำตาลที่เป็นกลางก็มีในปริมาณต่ำด้วยเช่นกัน จากการศึกษาสมบัติเพคติน อาทิ การเกิดเจล ความหนืด เปรียบเทียบกับเพคตินทางการค้าที่ผลิตจากพืชตระกูลส้ม พบว่าเพคตินจากเปลือกเสาวรสมีสสมบัติไม่ต่างจากเพคตินทางการค้า ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเปลือกเสาวรสจัดเป็นแหล่งของเพคตินที่ดี เนื่องจากมีหมู่เมทิลแทนที่อยู่น้อย (Yapo and Koffi, 2006)

2.3 ความรู้ทั่วไปของเพคติน

เพคติน (pectin) เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ของพืชชั้นสูงเกือบทุกชนิด จัดเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตเช่นเดียวกับแป้งและเซลลูโลส ค้นพบในศตวรรษที่ 18 ทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดเจล โดยในปี ค.ศ.1825 Henri Braconnot (เภสัชกรและนักพฤกษเคมีชาวฝรั่งเศส) ได้ตั้งชื่อและริเริ่มศึกษากรรมวิธีการสกัดเพคติน (Nussinovitch, 1997; Rolin, 1993) เพคตินมาจากภาษากรีกว่า “Pektikos” ซึ่งแปลว่าทำให้ข้นแข็ง (to congeal) หรือทำให้กลายเป็นของแข็ง (to solidify) (Sriamornsak, 2003) Kertesz ได้ให้คำจำกัดความของเพคตินว่าเป็นกรดเพคตินิก (pectinic acid) ชนิดละลายน้ำได้ซึ่งมีปริมาณหมู่เมทิลเอสเทอร์หลากหลาย สามารถเกิดเป็นเจลในสภาวะที่มีน้ำตาลและความเข้มข้นที่เหมาะสมหรือสภาวะที่มีเกลือแคลเซียมร่วมอยู่ด้วย (Endress, 1991)

ทางเคมีเพคตินเป็นเฮเทอโรโพลีแซคคาไรด์ที่ซับซ้อน ประกอบด้วย homogalacturonan, rhamnogalacturonan I, และ rhamnogalacturonan II เป็นโครงสร้างหลัก homogalacturonan ประกอบด้วย (1→4)-linked α -D-galacturonic acid หมู่คาร์บอกซิล หมู่เอสเทอร์ที่เติมเมทิลและหมู่ไฮดรอกซิล บางกลุ่มถูกเติมหมู่อะซีลเชื่อมติดกับออกซิเจนตัวที่ 2 หรือ 3 ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของเพคติน rhamnogalacturonan I ประกอบด้วย (1→4)-linked α -D-galacturonic acid และ (1→2)-linked α -L-rhamnose ซึ่งจะรวมตัวซึ่งกันและกันในส่วนที่เป็นสายหลัก และบางส่วนของ rhamnose มีการแตกกิ่งเป็นสายย่อยด้านข้าง ซึ่งมี arabinose, galactan, และ arabinogalactan ที่ออกซิเจนตำแหน่งที่ 4 ของ rhamnose rhamnogalacturonan II มีโครงสร้างที่ซับซ้อนมาก ประกอบด้วย (1→4)-linked α -D-galacturonic acid ในส่วนสายหลัก และมีน้ำตาลชนิดต่างๆ เช่น D-apiose, 2-keto-3-deoxy-D-manno-2-octulosonic acid (Rdo), 3-deoxy-D-lyxo-2-heptulosaric acid (Dha) และอื่นๆซึ่งอยู่ในสายย่อยเชื่อมติดกับออกซิเจนตัวที่ 2 หรือ 3 ของ galacturonic acid ที่สายหลัก



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเพคติน

ที่มา: fr. wikipedia (2005)

ในอนาคตการนำเพคตินไปใช้ประโยชน์อาจใช้เพคตินที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร หรือการพัฒนาเพคตินให้เป็นเกรดที่ใช้ได้ในอุตสาหกรรมยาและ/หรือการรักษา การสกัดและผลิตเพคตินจากมวลชีวภาพ (biomass) หรือของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตร (เช่น เปลือกส้ม เปลือกส้มโอ เปลือกกล้วย เปลือกและกากมะม่วง กากฟักทอง และกากแอปเปิล เป็นต้น) รวมถึงการย่อยเพคตินให้ได้เป็นเพคติกโอลิโกแซคคาไรด์ นับเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัยซึ่งช่วยเพิ่มอรรถประโยชน์ของสารในกลุ่มเพคตินนี้ด้วย อย่างไรก็ตามหากมีการดัดแปรโครงสร้างของเพคตินควรทำการทดสอบความเป็นพิษเพื่อให้แน่ใจว่ามีความปลอดภัยเพียงพอก่อนนำไปใช้ รวมถึงการทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพด้วย (พรศักดิ์ ศรีอมรศักดิ์, 2008)

ปัจจุบันประเทศไทยยังคงต้องนำเข้าเพคตินอยู่ในราคาที่สูง โดยราคาเพคตินขึ้นกับแหล่งวัตถุดิบที่ผลิตและเกรดของเพคติน เพคตินระดับ industrial grade ราคาประมาณ 1,800 บาท/กิโลกรัม (ข้อมูลจากบริษัทนำเข้าและจัดจำหน่ายเพคติน ปี พ.ศ. 2559) และระดับ lab & pharmaceutical grade ราคาตั้งแต่ 6,650 8,840 9,600 และ 10,161 บาท/กิโลกรัม (ข้อมูลจาก Fluka ประเทศเยอรมัน ค.ศ. 2013) การสกัดเพคตินจากวัตถุดิบเหลือใช้จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะเปลือกของผลไม้ อาทิเช่น เปลือกส้ม ส้มโอ เสาวรส และอื่นๆอีกมากมายที่มีปริมาณของเพคตินค่อนข้างสูงเหมาะที่จะนำมาสกัดเพคตินแทนการสั่งซื้อจากต่างประเทศ

2.4 ความรู้ทั่วไปของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

Montmorillonite ดัดแปลงมาจาก Montmorillon เป็นภาษาฝรั่งเศสเป็นแร่ดินที่พบเป็นครั้งแรก bentonite เป็นดินที่เปลี่ยนแปลงมาจากกลุ่ม Montmorillonite ซึ่งสามารถที่จะบวมได้ถ้าสัมผัสกับน้ำ ชื่อของ Bentonite มาจากชื่อสถานที่ Fort Benton (รัฐ Wyoming U.S.A.) ซึ่งเป็นแหล่งที่มีวัตถุดิบชนิดนี้อยู่มาก ส่วน Smectite เป็นชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งของ Montmorillonite แหล่งสำคัญที่พบ คือ Deposit ในยุโรปได้แก่ อังกฤษ ฝรั่งเศส เยอรมนี อิตาลี เชค และสโลวาเกีย กรีซ และยูโกสลาเวีย ใน U.S.A. มี Gretaceous deposit ที่ Wyoming ซึ่งเป็น Bentonite ที่รู้จักกันดีส่วนแหล่งอื่นๆ ก็มีที่ Arizona, Oklahoma, Texas และ Nevada นอกจากนี้ก็มีที่คานาดา และ Mexico แหล่งอื่นๆ ที่สำคัญก็มีที่ แอฟริกาใต้ อินเดีย อาร์เจนตินา ญี่ปุ่น และไทย ผังของแหล่ง montmorillonite นั้น จะทำเป็นเหมือนเปิดเรียก openwork ซึ่งจะสามารถเคลื่อนย้ายวัตถุดิบได้สะดวก และใช้วิธีแบบเก่าดั้งเดิมได้ แต่ปัญหาที่พบก็มีนั่นคือ แหล่งของแร่ที่ผิวหน้าค่อนข้างมีคุณสมบัติเรื่องความเหนียวสูง ซึ่งลำบากในการปฏิบัติงาน (คชินท์ สายอินทวงศ์, 2555)

แร่มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) อยู่ในกลุ่มดินสเมคไทต์ (Smectite) เป็นแร่ดินเหนียวประกอบด้วยอนุภาคพิเศษที่ดี ลักษณะของดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดีที่สุด จะประกอบด้วยสารผลึกกลั่นสูงและบริสุทธิ์จากแร่ดินที่ได้รับการขุดขึ้นมาจากเปลือกโลก (500 ล้าน - 200 ล้านปีที่ผ่านมา) ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ผลึกมอนต์มอริลโลไนต์มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยมที่มีชั้นที่ซ้อนกันซ้ำแล้วซ้ำอีก ในหนึ่งแผ่นมีขนาด 200 ~ 300 nm ในขณะที่ความหนาเพียง 1 nm และซ้อนทับกันเข้าไปเข้ามาเช่นชั้นของขนม Mille-feuille หากเราสามารถกระจายพื้นที่ของชั้นที่ซ้ำซ้อนของผลึกเหล่านี้ ในหนึ่งผลึกคริสตัลจะมีความกว้างเท่ากับพื้นผิวของสนามเทนนิส 3 สนาม ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ แร่มอนต์มอริลโลไนท์ คือมีลักษณะเป็นแผ่นหรือเกล็ด

ขนาดเล็กๆ ซ้อนกัน 3 ชั้น มีแผ่นกลางเป็นแผ่นของกลุ่มโมเลกุล อลูมิเนียมไฮดรอกซิลโมเลกุลแปด ระบาย Octahedral Aluminum Hydroxyl อยู่ตรงกลางระหว่าง แผ่นของกลุ่มโมเลกุลซิลิโคน ออกไซด์ โมเลกุลสี่เหลี่ยมปิรามิด Siliconoxygen Tetrahedral โดยที่อะตอมของอลูมิเนียมบางส่วน จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของแมกนีเซียม หรืออะตอมของธาตุเหล็ก ซึ่งจะช่วยสร้างประจุลบ บน ระบายด้านฐานของโมเลกุลซิลิกา และจะมีการสร้างสมดุลโดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับแผ่นที่อยู่ ติดกัน ในแร่มอนต์มอริลโลไนท์ตามธรรมชาติ, ประจุบวกเหล่านี้มักจะเป็นแคลเซียม, โซเดียม หรือ แมกนีเซียม ขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศและสภาวะแวดล้อมในช่วงเวลาที่ก่อตัว และลักษณะการก่อ ตัวขึ้นของแร่ดินในทางเคมี, แร่มอนต์มอริลโลไนท์ สามารถเขียนเป็นสูตรโมเลกุล ได้ดังนี้:



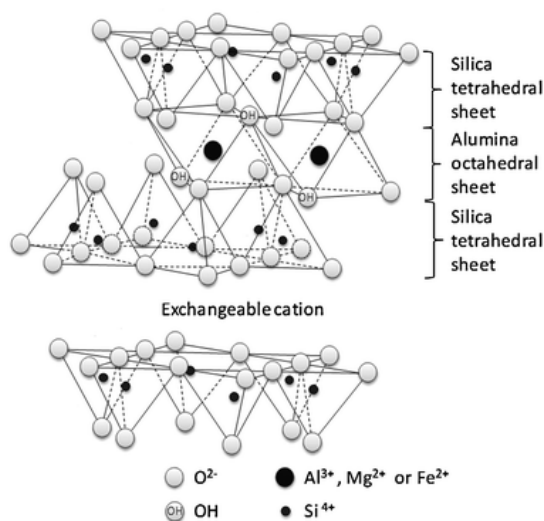
โดยที่ M + หมายถึงประจุบวกที่มาทำการแลกเปลี่ยนประจุกัน อาจเป็นได้ทั้ง แคลเซียม หรือ โซเดียม

โครงสร้างทางกายภาพของแร่มอนต์มอริลโลไนท์ Montmorillonite คือ กลุ่มของเกล็ดหรือผลึก ที่มีระนาบฐานที่กว้าง แตกต่างกันในช่วงความยาวที่ 0.2-2.0 ไมครอน (10-6 เมตร) และความหนา ที่ 6-10 ไมครอน ซึ่งในความเป็นจริง ลักษณะและการก่อตัวของผลึก สามารถแตกต่างกันไปได้ ตาม การกำเนิด และลักษณะเฉพาะที่ ของแหล่งแร่ดิน

แร่มอนต์มอริลโลไนท์ เป็นประจุลบ จากลักษณะเช่นนี้ แร่มอนต์มอริลโลไนท์จึงเสมือนแม่เหล็กที่ จะดึงดูดสารแปลกปลอมที่เป็นประจุบวก เช่น ฝุ่น รวมทั้งอินทรีย์วัตถุ แล้วสารเหล่านี้จะถูกเก็บกักใน พื้นที่ในชั้นที่ซ้อนกันเข้าไปมาของผลึกของแร่ดิน เพื่อรอการล้างออก

ในภาคการเกษตรกรรม แร่มอนต์มอริลโลไนท์สามารถนำมาใช้เป็นตัวช่วยกำหนดการไหลและความชื้น รวมทั้งใช้เป็นตัวกลางในการช่วยอุ้มซับสารเคมีปราบวัชพืชและศัตรูพืชเอาไว้ที่ผิว แล้วจึงค่อยๆ ปลดปล่อยออกสู่สภาพแวดล้อมได้อย่างช้าๆ ทำให้การทำงานของสารเคมีเกิดขึ้นอย่าง สม่ำเสมอ และ แร่ดินมอนต์มอริลโลไนท์เป็นตัวช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช ปรับปรุงและฟื้นฟู สภาพดินให้มีความสมบูรณ์ สามารถเก็บกักแร่ธาตุอาหารสำหรับพืชได้มากขึ้น ช่วยเพิ่มการแทรกตัว ของอากาศให้ดินร่วนซุย (Aeration) ช่วยเก็บกักน้ำให้อยู่ในดิน (Water Filtration & Holding Capacity) รวมถึงช่วยเพิ่มอัตราการดูดใช้แร่ธาตุอาหารของพืช (Nutrient Uptake) เหมาะสมเป็น อย่างยิ่งสำหรับการปรับปรุงสภาพดินที่เสียหายให้กลับมาอุดมสมบูรณ์ - ดินค่าน้ำชุ่ม (Nazagroup, 2008)

ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนท์ ซึ่งประกอบด้วย 2 Tetrahedral sheet กับ Octahedral sheet อยู่ตรงกลาง T-O-T



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างแบบT:O:T ของ แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์
ที่มา: Seiji Kakuta et al., 2011

2.5 การดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) เป็นปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งเป็นอย่างน้อย ณ บริเวณผิวร่วม (interface) ระหว่างวัฏภาค (phase) การดูดซับที่ใช้กันอย่างแพร่หลายจะหมายถึง “ปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดไว้บนผิวของแข็ง โดยไม่เปลี่ยนโครงสร้างของของแข็งนั้น” โดยระบบของแข็งที่เก็บสะสมสารประกอบอื่นๆ ไว้บนผิว จะเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนสารประกอบต่าง ๆ ที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับหรือ ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

ดังนั้นตัวดูดซับจึงมักเป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมากโดยมีขนาดเท่าเดิมเพื่อเพิ่มพื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีผลให้สามารถดูดซับได้มากขึ้นตามสัดส่วนพื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น เมื่อตัวดูดซับมีรูพรุนภายในมาก แต่ตัวดูดซับมีขนาดเท่าเดิม ตัวดูดซับจึงมีความหนาแน่นลดลง แม้ว่าการเพิ่มปริมาณรูพรุนที่มีขนาดเล็กในตัวดูดซับจะทำให้ตัวดูดซับมีพื้นผิวจำเพาะมากขึ้น แต่รูพรุนขนาดเล็กก็อาจเป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของตัวถูกดูดซับภายในรูพรุนของตัวดูดซับไปยังพื้นผิวในรูพรุนที่มีขนาดเล็กดังกล่าว

เมื่อพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพของรูพรุนในตัวดูดซับ รูพรุนส่วนใหญ่ของตัวดูดซับจึงควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสถานะก๊าซหรือไอ เพื่อให้ตัวถูกดูดซับนั้น สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ และสามารถแพร่ต่อไปยังพื้นผิวภายในรูพรุนได้อย่างสะดวก ส่วนการดูดซับตัวถูกดูดซับชนิดต่างๆ ที่อยู่ในสถานะของเหลว เช่น การดูดซับไอออนชนิดต่างๆ หรือสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่ละลายน้ำ รูพรุนส่วนใหญ่ของตัวดูดซับควรมีขนาดใหญ่เพียงพอ เพื่อให้ของเหลวที่มีตัวถูกดูดซับเหล่านั้น สามารถไหลเข้าสู่รูพรุนของ ตัวดูดซับได้อย่างสะดวก โดยที่ตัวถูกดูดซับยังคงอยู่ในลักษณะเดิม นั่นคือ เมื่อดูดซับไอออนชนิดต่างๆ หรือสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่ละลายน้ำได้แล้ว ไอออนหรือสารประกอบอินทรีย์เหล่านั้นยังคงสภาพเป็นสารละลายของไอออนหรือสารละลายของสารประกอบอินทรีย์ดังกล่าวเช่นเดิม การดูดซับตัวถูกดูดซับในระบบของเหลวมักมีผลให้ความ

เข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่อยู่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับชนิดเดียวกันที่อยู่บนผิวภายนอกตัวดูดซับ ดังนั้น สารประกอบทุกชนิดที่อยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับจัดเป็น “ตัวถูกดูดซับ” ของระบบดูดซับของเหลวโดยไม่ต้องเกาะติดผิวในรูพรุนของตัวดูดซับ (ทรงศักดิ์ สระแก้ว, 2555)

การดูดซับสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท (McKay, 1996) ได้ดังนี้

(1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) คือ ตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับจะยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอ่อนๆ เรียกว่า “แรง van der Waals” และเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี ที่อุณหภูมิปกติ หรือ ที่อุณหภูมิบรรยากาศทั่วไป และเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้น ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนชั้นของตัวดูดซับแล้ว โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ซ้อนทับกันจึงเรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่าการดูดซับหลายชั้น (Multilayer adsorption)

(2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) คือ ตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวของตัวดูดซับโดยพันธะเคมี ได้แก่ พันธะไอออนิก และพันธะโควาเลนต์ เป็นต้น ในการสร้างพันธะเคมีต้องใช้พลังงานสูงและเป็นระบบที่ผันกลับไม่ได้ ดังนั้น การดูดซับจึงมักเกิดได้ดีหรือเกิดขึ้นได้เร็วที่อุณหภูมิสูงๆ และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นคือ การดูดซับทางเคมีนี้จะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับเช่นเดียวกับการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้นและเรียกการดูดซับประเภทนี้ว่า การดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ความร้อนของการดูดซับประเภทนี้ จึงมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพ

กลไกในการดูดซับจะเกิดขึ้น 3 ขั้นตอนได้แก่ การถ่ายโอนมหภาค การถ่ายโอนจุลภาคและการดูดซับ การถ่ายโอนมหภาคจะศึกษาการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับผ่านของไหลไปยังรอยต่อระหว่างของเหลวกับของแข็ง (Liquid-solid interface) สำหรับการถ่ายโอนจุลภาคจะศึกษาการแพร่ผ่านของตัวถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับซึ่งรูพรุนจะเชื่อมโยงกันอยู่ภายในตัวดูดซับส่วนการดูดซับจะศึกษาถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ

การเลือกใช้ตัวดูดซับจะพิจารณาถึงความจำเพาะเจาะจงต่อตัวถูกดูดซับและปริมาณ การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับตามการนิยามของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับจะถูกจำแนกเป็นรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนน้อยกว่า 2 nm รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 nm และรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่า 50 nm ตัวดูดซับอาจจะมีรูปร่างเป็นทรงกลมเป็นทรงกระบอกเป็นแผ่นบางขนาดเล็กหรือเป็นผงที่มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 50 μm ถึง 1.2 cm มีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 300 ถึง 1200 m^2/g มีความพรุนภายในตัวดูดซับประมาณ 30-85 % พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับสามารถวัดได้ด้วยโดยใช้วิธี BET (Brunauer Emmett Teller) ซึ่งจะศึกษาการดูดซับและการคายของก๊าซไนโตรเจนบนตัวดูดซับ ดังนั้น ควรเลือกวัสดุตัวดูดซับที่มีรูพรุนสูงและขนาดของรูพรุน

มีขนาดเล็กเชื่อมต่อกันมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากเมื่อเทียบกับหนึ่งหน่วยปริมาตรตัวดูดซับ (จักรกฤษณ์ อัมพข, 2549)

ทฤษฎี BET (Brunauer Emmett and Teller) มีจุดประสงค์เพื่ออธิบายการดูดซับทางกายภาพของโมเลกุลของแก๊สบนพื้นผิวของของแข็ง และใช้เป็นวิธีการหรือเทคนิคพื้นฐานที่สำคัญในการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ แนวคิดของทฤษฎีนี้เป็นการขยายขอบเขตทฤษฎีแลงเมียร์ ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้ อธิบายการดูดซับของโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่เรียงตัวเป็นชั้นเดียว ให้สามารถอธิบายการดูดซับของโมเลกุลที่เรียงตัวกันแบบหลายชั้นโดยอาศัยสมมติฐานต่างๆ คือ โมเลกุลของแก๊สสามารถถูกดูดซับเชิงกายภาพบนพื้นผิวของของแข็งแบบหลายๆ ชั้นจนนับไม่ถ้วน ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลแต่ละชั้น และ ทฤษฎีของแลงเมียร์สามารถอธิบายโมเลกุลที่อยู่ในแต่ละชั้นได้ สมการของ BET แสดงได้ดังนี้

$$\frac{1}{v[(\frac{P_0}{P})-1]} = \frac{c-1}{v_m c} \left(\frac{P}{P_0} \right) + \frac{1}{v_m c} \quad (2.1)$$

โดย	P	คือ ความดันที่สมดุลของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ (mmHg)
	P ₀	คือ ความดันที่อิ่มตัวของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ (mmHg)
	v	คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับ หน่วยเป็นปริมาตร (ml)
	v _m	คือ ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียว (cm ³ /g)
	c	คือ ค่าคงที่ของ BET ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการนี้

$$c = \exp\left(\frac{E_1 - E_L}{RT}\right) \quad (2.2)$$

ที่ซึ่ง	E ₁	คือ ความร้อนของการดูดซับที่เกิดขึ้นชั้นแรก (จูล ,J)
	E _L	คือ ความร้อนของการดูดซับที่ชั้นที่สองและชั้นที่สูงขึ้นต่อ ๆ ไป และมีค่าเท่ากับ ความร้อนของการหลอมละลาย (Liquefaction) (จูล ,J)

สมการที่ 2.1 เป็นไอโซเทอมของการดูดซับชนิดหนึ่ง และสามารถนำข้อมูลการทดลองมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/v[(P_0/P)-1]$ และ $\phi = P/P_0$ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 กราฟนี้จะถูกเรียกว่า BET plot ความสัมพันธ์นี้จะให้เส้นกราฟที่เป็นเส้นตรงเฉพาะ P/P_0 อยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.35 ความชัน A และจุดตัดแกน y หรือ I จะถูกนำมาคำนวณปริมาณการดูดซับแก๊สที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียว (v_m) และค่าคงที่ของ BET(C) โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$v_m = \frac{1}{A+I} \quad (2.3)$$

$$v_m = 1 + \frac{A}{I} \quad (2.4)$$

วิธีการ BET จะถูกใช้ในการหาพื้นที่ผิวของของแข็ง โดยการดูดซับโมเลกุลของแก๊สเชิงกายภาพ ซึ่งสามารถหาพื้นที่ผิวทั้งหมดแทนค่า S_{total} และพื้นที่ผิวจำเพาะ S (Specific surface area) ได้จากสมการ

$$S_{BET, total} = \frac{v_m N_s}{V} \quad (2.5)$$

ที่ซึ่ง v_m คือ ปริมาตรเชิงโมลของแก๊สที่ถูกดูดซับ

$$S_{BET} = \frac{(S_{total})}{a} \quad (2.6)$$

ที่ซึ่ง N คือ เลขอะโวกาโด (Avogadro's number) (6.023×10^{23}) (หน่วยเป็นโมเลกุลต่อโมล)

S คือ พื้นที่ที่ตัวถูกดูดซับปกคลุมบนพื้นผิวของของแข็ง (m^2)

V คือ ปริมาตรเชิงโมลของแก๊สที่ถูกดูดซับ (มวลโมเลกุลต่อโมล)

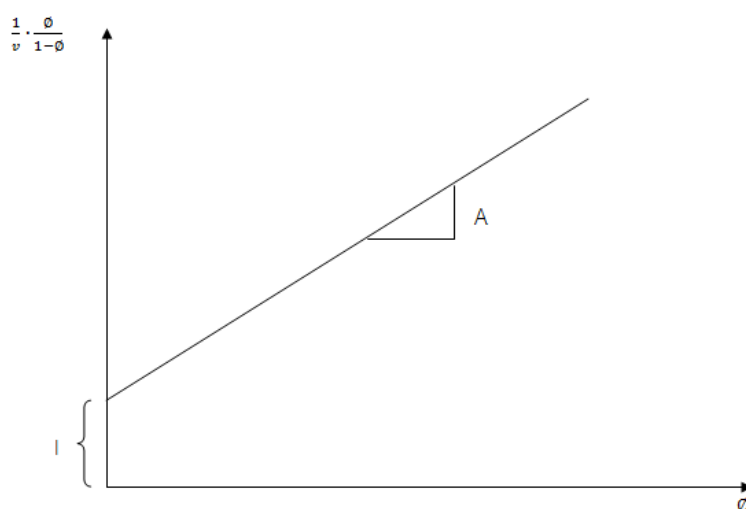
a คือ มวลของตัวดูดซับ (g)

นอกจากนี้ค่าปริมาณการดูดซับแก๊สที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียว (v_m) ยังสามารถนำมาหาค่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยได้โดยอาศัยสมการต่อไปนี้

$$r_k = \frac{2\sigma v_m}{RT \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)} \quad (2.7)$$

โดย r_k คือ รัศมีของรูพรุน (mm)

σ คือ แรงตึงผิว (J/mm)



ภาพที่ 2.4 การพล็อตด้วยสมการ BET จากสมการที่ 2.1

2.6 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับคือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของเหลว ส่วนใหญ่พฤติกรรมของการดูดซับในของเหลวจะมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich) และแลงเมียร์ (Langmuir)

ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมดุลมวลสาร (Seader and Henley, 1998) โดยจะถือว่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่หายไปจากสารละลาย จะถูกดูดซับอยู่บนตัวดูดซับเท่านั้น ซึ่งปริมาณการดูดซับหาได้ตามสมการที่ 2.8 และสำหรับประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมสามารถคำนวณได้จากสมการเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.9

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (2.8)$$

เมื่อ	q_e	คือ ปริมาณสีย้อมในตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
	m	คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)
	V	คือ ปริมาตรของน้ำ (L)
	C_0	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเคมีในน้ำ (mg/L)
	C_e	คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสีย้อมเคมีในน้ำ (mg/L)

$$\% \text{ Dye Removal} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (2.9)$$

รายละเอียดของไอโซเทอมการดูดซับมีดังนี้

(1) ไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear isotherm)

เป็นไอโซเทอมที่ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สภาวะสมดุลโดยทั่วไปแล้วจะเรียกว่า “Henry’s Law” มีรูปแบบสมการเป็นดังนี้

$$q_e = K_d C_e \quad (2.10)$$

เมื่อ	q_e	คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)
	C_e	คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายหลังการดูดซับ (mg/L)
	K_d	คือ สัมประสิทธิ์การแจกแจงหรือค่าคงที่ Henry’s Law (L/g)

(2) ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm)

สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช (Chen et al., 2011) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.11 ซึ่งอธิบายถึงการจับตัวกันเป็นชั้นๆของตัวถูกดูดซับ (Multilayer) บนพื้นผิวของตัวดูดซับเนื่องจากโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันสูง

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.11)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)
 C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายหลังการดูดซับ (mg/L)
 K_F, n คือ ค่าคงที่

ค่าคงที่ในสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดิชสามารถหาได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง q_e กับ C_e โดยใช้สมการที่ 2.12 ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการใหม่ของสมการที่ 2.11

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2.12)$$

โดยค่าคงที่ n หาได้จากค่าเศษหนึ่งส่วนความชัน ($\frac{1}{\text{slope}}$) และค่าคงที่ K_F หาได้จากค่าเอกซ์โพเนนเชียลของจุดตัดแกน y ในสมการที่ 2.12

(3) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Almeida et al., 2009) มีสมมติฐานว่าตัวถูกดูดซับจะปกคลุมผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.13

$$q_e = \frac{K_L C_e}{1 + a_L C_e} \quad (2.13)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)
 C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายหลังการดูดซับ (mg/L)
 a_L, K_L คือ ค่าคงที่

การหาค่าคงที่ในสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์สามารถหาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e โดยใช้สมการที่ 2.14 ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการใหม่ของสมการที่ 2.13

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L} + \frac{a_L}{K_L} C_e \quad (2.14)$$

เมื่อหาค่าเศษหนึ่งส่วนความชัน ($\frac{1}{\text{slope}}$) หรือหาค่า $\frac{K_L}{a_L}$ ในสมการที่ 2.14 จะได้ปริมาณการดูดซับแบบชั้นเดียวของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับสูงสุดและแทนด้วยสัญลักษณ์ q_m (mg/g)

2.7 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

อุณหพลศาสตร์ คือ การศึกษาเกี่ยวกับพลังงาน ความร้อน และงานโดยในการศึกษา อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG_{ads}°) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH_{ads}°) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน (ΔS_{ads}°) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (Standard free energy, ΔG_{ads}°) คือการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะมาตรฐานหรือการที่สารตั้งต้นเปลี่ยนไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่สภาวะมาตรฐาน (25°C และ 1 atm)

ถ้า	$\Delta G_{ads}^{\circ} = -$	คือ ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นได้เองในทิศทางไปข้างหน้า
	$\Delta G_{ads}^{\circ} = +$	คือ ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นเองไม่ได้ แต่จะเกิดได้เองในทิศทางย้อนกลับ
	$\Delta G_{ads}^{\circ} = 0$	คือ ระบบอยู่ในสมดุล ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

สมการการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (Standard Gibbs' free energy change equation) มีรูปแบบสมการเป็นดังนี้ (Almeida et al., 2009)

$$\Delta G_{ads}^{\circ} = -RT \ln K_L \quad (2.15)$$

เมื่อ	ΔG_{ads}°	คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (kJ/mol)
	K_L	คือ ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์ (L/g)
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol*K)
	T	คือ อุณหภูมิของสารละลายสี่ย้อม (K)

การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมาตรฐาน (Standard enthalpy, ΔH_{ads}°) คือ การเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดจากการที่ธาตุองค์ประกอบทำปฏิกิริยากันเพื่อเกิดเป็นสารประกอบหรือธาตุ ชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะมาตรฐาน (25°C และ 1 atm) และปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบจะเกิดขึ้นในกระบวนการที่ความดันคงที่

ถ้า	$\Delta H_{ads}^{\circ} = +$	คือ เป็นระบบดูดความร้อน
	$\Delta H_{ads}^{\circ} = -$	คือ เป็นระบบคายความร้อน

การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน (Standard entropy, ΔS_{ads}°) คือ ปริมาณที่บอกถึงความไม่เป็นระเบียบของระบบ ยิ่งระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูง เอนโทรปีก็จะมีค่าสูง แต่ถ้าระบบมีความไม่เป็นระเบียบน้อย เอนโทรปีก็จะมีค่าต่ำโดยค่าของเอนโทรปีจะมีค่าขึ้นอยู่กับทั้งเอนทัลปีและอุณหภูมิ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะมาตรฐาน (25°C และ 1 atm)

ถ้า	$\Delta S_{ads}^{\circ} = +$	คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในทิศทางไปข้างหน้า
	$\Delta S_{ads}^{\circ} = -$	คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในทิศทางย้อนกลับ
	$\Delta S_{ads}^{\circ} = 0$	คือ ระบบอยู่ในสมดุล ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

การหาค่า (ΔH_{ads}°) และ (ΔS_{ads}°) สามารถหาได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_L$ กับ $1/T$ โดยใช้สมการของ Van't Hoff (Almeida et al., 2009) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.16

$$\ln K_L = -\frac{\Delta G_{ads}^{\circ}}{RT} + \frac{\Delta S_{ads}^{\circ}}{R} \quad (2.16)$$

เมื่อ	ΔH_{ads}°	คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมาตรฐาน (kJ/mol)
	ΔS_{ads}°	คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน (J/mol*K)
	K_L	คือ ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์ (L/g)
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol*K)
	T	คือ อุณหภูมิของสารละลายสี่ย้อม (K)

2.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

การดูดซับสารถูกดูดซับชนิดหนึ่ง จะประกอบไปด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบๆ ตัวดูดซับ การแพร่ในรูพรุนตัวดูดซับไปยังพื้นผิวตัวดูดซับและขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวตัวดูดซับซึ่งขั้นตอนใดที่เกิดขึ้นช้าที่สุดขั้นตอนนั้นจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับของระบบการดูดซับนั้นๆ (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

การแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับ ในหลักของการถ่ายโอนโมเมนตัม ของไหลที่อยู่รอบตัวดูดซับที่หยดหนึ่งจะเคลื่อนที่อย่างช้าๆ จึงเกิดขึ้นของไหลบางๆ ล้อมรอบตัวดูดซับ ชั้นของไหลนี้เป็นอุปสรรคต่อการดูดซับ นอกจากนี้ความหนาของชั้นของไหลรอบตัวดูดซับแปรผกผันกับอัตราการเคลื่อนที่ของของไหล นั่นคือ เมื่อของไหลเคลื่อนที่เร็วมากขึ้น ความหนาของชั้นของไหลรอบตัวดูดซับจะลดบางลง ของไหลในชั้นของไหลรอบตัวดูดซับจะเคลื่อนที่ช้ามาก จึงมักพิจารณาให้เสมือนหยดหนึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจึงแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับได้ การแพร่ของตัวถูกดูดซับจึงเกิดขึ้นจากผลต่างของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับตาม กฎการแพร่ของฟิกค์ (Fick' law of diffusion) เพียงอย่างเดียว ส่วนการแพร่ในรูพรุนของตัวดูดซับนั้น เมื่อตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับถึงผิวนอกของตัวดูดซับแม้ว่าตัวถูกดูดซับอาจเกาะติดผิวนอกของตัวดูดซับซึ่งเป็นพื้นผิวดูดซับส่วนน้อยของตัวดูดซับ แต่ตัวถูกดูดซับส่วนใหญ่จะแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับและแพร่ไปยังพื้นผิวตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับบางส่วนสามารถเกาะติดที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับดังกล่าวและตัวถูกดูดซับอีกบางส่วนยังคงแพร่เข้าสู่ส่วนลึกของรูพรุนต่อไป

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับจะแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อทางกายภาพและทางเคมี คือวัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับจะมีอิทธิพลต่อกลไกการดูดซับด้วยและเพื่อทราบถึงกลไกการดูดซับ เช่นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับและกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบจำลองจลนพลศาสตร์จึงถูกใช้อธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวซึ่งแบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบคือ Pseudo-first order และ Pseudo-second order (Wang and Wang, 2007) โดยอัตราการดูดซับจะขึ้นอยู่กับว่าขั้นตอนใดเกิดขึ้นช้าที่สุดดังกล่าวข้างต้น ขั้นตอนนั้นจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ

ดังนั้นขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของตัวถูกดูดซับผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับเกิดขึ้นช้าที่สุด เป็นอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ส่วนขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าที่สุด เป็นอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ซึ่งขั้นตอนในการหากลไกอัตราการดูดซับของจลนพลศาสตร์มีรายละเอียดแสดงได้ดังนี้

(1) สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order equation) จลนพลศาสตร์ของการดูดซับจะถูกอธิบายโดยสมการเชิงอนุพันธ์แสดงไว้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.17)$$

เมื่อ	q_e	คือ ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับที่สมดุล (mg/g)
	q_t	คือ ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับที่เวลา t (mg/g)
	k_1	คือ ค่าคงที่ของสมการ Pseudo-first order (1/min)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.17 โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่ $t=0; q_t=0$ และ $t=t; q_t=q_t$ จะได้

$$\ln\left[\frac{q_e}{(q_e-q_t)}\right] = k_1 t \quad (2.18)$$

สามารถจัดรูปใหม่ของสมการที่ 2.18 ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.19)$$

ค่าคงที่ k_1 และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับ t

(2) สมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order equation) จลนพลศาสตร์ของการดูดซับจะถูกอธิบายโดยสมการเชิงอนุพันธ์ดังแสดงต่อไปนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (2.20)$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่ของสมการ Pseudo-second order (g/mg*min)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.20 โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่ $t=0; q_t=0$ และ $t=t; q_t=q_t$ จะได้

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

สมการที่ 2.21 สามารถจัดรูปใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.22)$$

ค่าคงที่ k_2 , q_e และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ กับ t

2.9 พลังงานกระตุ้น

พลังงานกระตุ้น (E_a) คือ พลังงานอย่างต่ำที่โมเลกุลของสารตั้งต้นจะต้องมี จึงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ ปฏิกิริยาใดที่เกิดเร็วมากแสดงว่ามีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำ ปฏิกิริยาใดที่เกิดช้าแสดงว่ามีพลังงานกระตุ้นสูงมากถ้าค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าอยู่ในช่วง 5-40 kJ/mol แสดงว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าอยู่ในช่วง 40-800 kJ/mol แสดงว่าเป็นการดูดซับทางเคมี (Alkan et al., 2008)

ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถหาได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ โดยใช้สมการของ Arrhenius (Almeida et al., 2009) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.23

$$\ln k_2 = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (2.23)$$

เมื่อ	E_a	คือ พลังงานกระตุ้น
	k_2	คือ ค่าคงที่ของสมการอันดับสองเทียม(g/mg*min)
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol*K)
	T	คือ อุณหภูมิของสารละลายสีย้อม (K)

2.10 การคายซับ (Desorption)

การคายซับ คือ การคืนสภาพของอนุภาคของแข็งหรือพื้นผิวตัวดูดซับเป็นกระบวนการผันกลับของกระบวนการดูดซับที่เรียกว่า “การคายซับ (Desorption)” คือการทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายมวลสารของ adsorbate ออกจากพื้นผิวของอนุภาคของแข็งโดยใช้วิธีการทางกายภาพหรือทางเคมีในการคายซับของตัวดูด โดยเป็นการฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับ (Regeneration) ที่เริ่มหมดสภาพให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้แทนที่จะนำสารดูดซับไปทิ้งโดยไม่ใช้ประโยชน์ ซึ่งวิธีการฟื้นฟูสภาพอาจใช้วิธีทางเคมี วิธีความร้อน หรือวิธีเฝ้า

2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ประกอบไปด้วยปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้องกับตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้ (นครินทร์ สีนแสงแก้ว และคณะ, 2549)

2.11.1 ตัวดูดซับ

2.11.1.1 พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลง

2.11.1.2 ขนาดของตัวดูดซับ

ในกรณีที่โมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่มีรูพรุนนั้นพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดของตัวดูดซับ

2.11.1.3 เคมีที่ผิวหน้า

หมู่ฟังก์ชันนัลเฉพาะที่อยู่บนผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับจะมีคุณสมบัติที่มีผลกับกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์ และมีหมู่ฟังก์ชันนัลที่เป็นกรดความสามารถในการดูดซับก็จะลดลงด้วย แต่ถ้ามีหมู่ฟังก์ชันนัลที่เป็นหมู่คาร์บอเนล ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

2.11.2 สารที่ถูกดูดซับ

2.11.2.1 ความสามารถในการละลาย

ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงอันตรกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

2.11.2.2 น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล

มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ถ้าจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้น การดูดซับจะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

2.11.2.3 ความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุล

ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

2.11.2.4 ผลของความเข้มข้นของโปรตอน (หรือ pH)

ถ้าความเข้มข้นของโปรตอนในสารละลายลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะเมื่อความเข้มข้นของโปรตอนเพิ่มขึ้นมันจะสามารถไปเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลาง จึงไม่เป็นไปตามธรรมชาติซึ่งคาร์บอนเป็นนอนโพลาร์ที่ค่อนข้างจะมีประจุลบเล็กน้อยจึงทำให้โมเลกุลนอนโพลาร์ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวคาร์บอนได้ดี

2.11.2.5 ผลของอุณหภูมิ

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Aleksandra R. Nesic et al. (2013) ได้ใช้ อะมิเนตเพคตินทางการค้า ผสมกับแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ เพื่อผลิตเป็นฟิล์มสังเคราะห์ จากนั้นนำไปดูดซับสีย้อม Basic yellow 28 จากสารละลาย ซึ่งได้ทำการศึกษาสมดุลการดูดซับและจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม Basic yellow 28 ด้วยวิธีการทดลองแบบกะ พบว่าไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบ Langmuir Freundlich และ Temkin isotherm ความสามารถในการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 571.4 mg/g เมื่อใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ร้อยละ 30 ของเพคติน

S. Nethaji et al. (2010) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีมาลาโคท์กรีนจากน้ำเสีย โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จาก *Borassus aethiopum* flower โดยใช้การกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดซัลฟูริก ซึ่งได้มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH เริ่มต้น ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีมาลาโคท์กรีน และอุณหภูมิ ผลการทดลองปรากฏว่า การดูดซับที่ดีที่สุดคือการใช้ค่า pH ระหว่าง 6-8 และไอโซเทอมของการดูดซับในครั้งนี้คือ Langmeir Freundlich

Amit Kumar Sarkar et al. (2014) ได้ใช้ amylopectin และ poly (กรดอะคริลิก) ในการดูดซับสีมาลาโคท์กรีนจากน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ FTIR GPC SEM และ XRD ซึ่งค่าการดูดซับสูงสุดที่ได้คือ 352.11 mg/g สามารถดูดซับสีมาลาโคท์กรีนได้ 99.05 % ในเวลา 5 นาที และพบว่าไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบ Langmeir Freundlich

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 เปลือกเสาวรสสีเหลือง พันธุ์เปลือกสีเหลือง (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) เก็บรวบรวมจากชุมชนบ้านกุดสมิง อำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ในช่วงเดือน สิงหาคม-ตุลาคม พ.ศ.2558

3.1.2 กรดซิตริก (Analytical reagent grade) จากบริษัท Ajax Finechem Pty Ltd ประเทศนิวซีแลนด์

3.1.3 เอทานอล จากบริษัท Merck ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.4 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) บริษัทนิปปอน-เคมีคอล จำกัด ประเทศไทย

3.1.5 สีมาลาไคท์กรีน (Malachite green oxalate crystal) บริษัท DC Fine Chemical Ltd. ประเทศอังกฤษ

3.1.6 โซเดียมอัลจิเนต จากสาหร่ายสีน้ำตาล จากบริษัท Sigma-Aldrich Co., Ltd ประเทศนอร์เวย์

3.1.7 กลีเซอรอล (Analytical reagent grade) ความเข้มข้น 99.5% จากบริษัท Ajax Finechem Pty Ltd ประเทศออสเตรเลีย

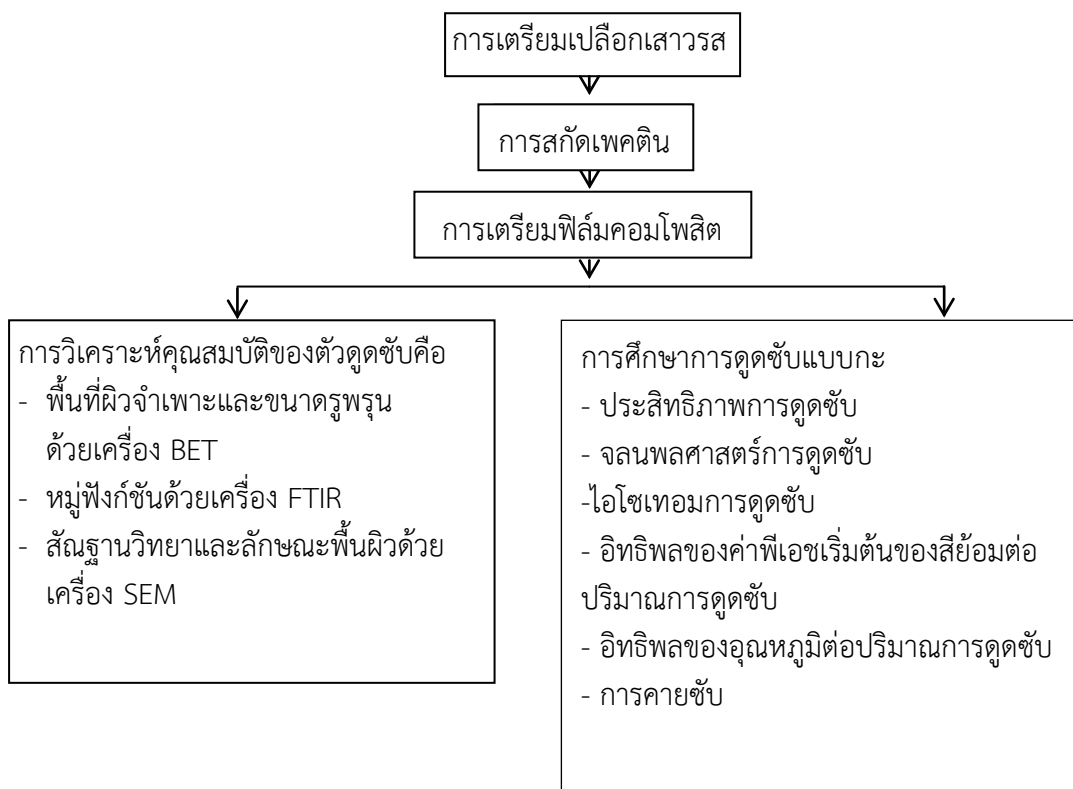
3.1.8 แคลเซียมคลอไรด์ (Laboratory reagent grade) จากบริษัท Ajax Finechem Pty Ltd ประเทศนิวซีแลนด์

3.1.9 เพคตินทางการค้า จากบริษัท Fooding Group Limited ประเทศจีน

3.1.10 กรดแอสติค (Analytical reagent grade) ความเข้มข้น 99.8% จากบริษัท QReC ประเทศนิวซีแลนด์

3.2 กรอบงานวิจัย

เริ่มต้นโดยการเตรียมเปลือกเสาวรสด แล้วทำการสกัดเพคติน จากนั้นทำการผลิตฟิล์มคอมโพสิตนำฟิล์มคอมโพสิตที่ได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฟิล์มคอมโพสิต จากนั้นศึกษาการดูดซับสีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์ (สารละลายสีย้อม) ในการทดลองการดูดซับแบบกะขั้นตอนการวิจัยทั้งหมดสามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการ

3.3 การเตรียมเปลือกเสาวรส

- 3.3.1 ล้างเปลือกเสาวรสดำด้วยน้ำเปล่า เพื่อนำเอาเยื่อสีขาวที่อยู่ภายในเปลือกออก
- 3.3.2 นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกว่าน้ำหนักของเปลือกเสาวรสคงที่
- 3.3.3 นำไปบดจนมีลักษณะเป็นผง และนำไปร่อนด้วยตะแกรงให้มีขนาด 500 ไมโครเมตร บรรจุใส่ถุงพลาสติกที่ปิดมิดชิดแล้วนำไปแช่เย็น เพื่อรอการนำมาใช้ต่อไป

3.4 การสกัดเพคตินจากเปลือกเสาวรส

การสกัดเพคตินจากเปลือกเสาวรสจะใช้วิธีเดียวกับในงานวิจัยของ Shan Qin Liew และคณะ (Shan Qin Liew et al., 2014) ซึ่งมีวิธีดังนี้

- 3.4.1 นำเปลือกเสาวรสที่เตรียมไว้ในบีกเกอร์ 10 กรัม เติมน้ำละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 0.1 N ค่า pH 2 ปริมาตร 250 ml
- 3.4.2 จากนั้นนำไปกวนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่เวลา 90 นาที
- 3.4.3 กรองด้วยผ้าขาวบาง เพื่อแยกกากออกจากสารละลาย วางสารละลายที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิห้องจนสารละลายเย็นตัวลง
- 3.4.4 เติมน้ำตาลความเข้มข้น 95% ลงในสารละลายอัตราส่วน 1:2 (v/v) ใช้แท่งคนสารคนด้วยความเร็วสม่ำเสมอ จนสารละลายเข้ากัน และเก็บไว้ให้พ้นแสงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.5 นำมากรองด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นนำเพคตินที่ได้ไปล้างด้วยน้ำ DI เอทานอลความเข้มข้น 75% และล้างด้วยอะซิโตน เพื่อกำจัดสีที่ไม่พึงประสงค์ออกจากเพคติน

3.4.6 นำเพคตินไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ เก็บไว้ในถุงพลาสติก ปิดปากถุงให้มิดชิดแล้วเก็บไว้ในตู้เย็นเพื่อนำมาใช้ต่อไป

3.5 การเตรียมฟิล์มคอมโพสิตและฟิล์มเพคตินธรรมชาติ

ขั้นตอนการผลิตฟิล์มคอมโพสิตและฟิล์มเพคตินธรรมชาติ ดัดแปลงวิธีทำจากงานวิจัยของ Fernanda L. Seixas และคณะ (Fernanda L. Seixas et al., 2013) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.5.1 นำ MMT 0.5 g ผสมกับน้ำ DI 100 ml กวนผสมกันจน MMT กระจายตัวทั้งหมด

3.5.2 เติมเพคติน โซเดียมอัลจีเนต อัตราส่วน 1 g : 1 g และ glycerol 0.6g/g (เพคติน) กวนต่อไปที่อุณหภูมิ 65 °C จนส่วนผสมทั้งหมดกลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.5.3 เติมสารละลาย CaCl_2 ความเข้มข้น 0.4 g/L 30 ml จากนั้นกวนต่อไปจนสารละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.5.4 เทสารละลายที่ได้ลงในจานเลี้ยงเชื้อ ในปริมาณที่เท่าๆกัน ประมาณ 15 g/dish จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 20 hr.

3.5.5 นำฟิล์มที่ได้มาทำการ Crosslinking ด้วยสารละลายที่ประกอบด้วย CaCl_2 7% (g/ml) glycerol 5% (g/ml) ปริมาณ 100 ml เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำฟิล์มออกจากสารละลาย ผึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนแห้ง บรรจุใส่ถุงพลาสติกที่ปิดมิดชิด และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C

3.5.6 การเตรียมฟิล์มเพคตินธรรมชาติ ใช้วิธีเดียวกันกับการเตรียมฟิล์มคอมโพสิต แต่ไม่มีการผสม MMT ลงไป

3.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มคอมโพสิตและสีย้อม

3.6.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของฟิล์มคอมโพสิต

นำฟิล์มคอมโพสิตไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน โดยใช้หลักการการดูดซับและการคายซับของก๊าซไนโตรเจน (N_2 adsorption-desorption) วิเคราะห์ด้วยเครื่องออโตเมติกเซอร์เฟกอนาไลเซอร์ (Automatic Surface Analyzer) รุ่น ASI-C-8 ยี่ห้อ Quantachrome Instrument อุณหภูมิที่ใช้ 77.4 K (ปิยะมาภรณ์ จารุงค์ และรัตนวรรณ เกียรติโกมล, 2547)

3.6.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มคอมโพสิต

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มคอมโพสิตก่อนการดูดซับสีย้อมและหลังการดูดซับสีย้อม โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer: FTIR) รุ่น Spectrum RX 1 ยี่ห้อ Perkin Elmer ใช้สารKBr ผสมกับตัวอย่าง และสแกนเวฟเนัมเบอร์ (Wave numbers Scan) ในช่วง $4,000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ (Hameed et al., 2008)

3.6.3 การวิเคราะห์พื้นฐานและลักษณะพื้นผิวจำเพาะของฟิล์มคอมโพสิต

นำฟิล์มคอมโพสิตที่ได้ ไปศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิววิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น JSM-5410LV ยี่ห้อ JEOL ใช้กำลังขยาย 2,000 เท่า

3.6.4 การวิเคราะห์จุด Point zero charge (pH_{pzc})

นำฟิล์มคอมโพสิต 0.1 g ใส่ลงไปในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 M และ 0.01 M ที่ค่า pH = 2, 4, 6, 8, และ 10 โดยปรับค่าพีเอชด้วยสารละลาย HCl 0.1 M และ สารละลาย KOH 0.1 M นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr. ที่อุณหภูมิ 35 °C จากนั้นวัดค่า pH สุดท้าย เพื่อนำไปวิเคราะห์หาจุดที่ประจุเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) (Wang et al., 2008)

3.7 การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสีย้อม

การทำกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ของสีย้อม เพื่อจะใช้เป็นวิธีในการวัดความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม ซึ่งจะใช้หลักการดูดกลืนแสงโดยอาศัยกฎของเบียร์ (Beer's Law) ที่กล่าวว่า “เมื่อแสงส่องผ่านสารละลายตัวกลางค่าความเข้มแสงจะลดลงเป็นปฏิกิริยาแบบชี้กำลัง (Exponential) กับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลาย” ซึ่งจะวัดความเข้มของแสงส่องผ่านในรูปของค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Absorbance, Abs) โดยใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) (จักรกฤษณ์ อัมพพ, 2549) ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

3.7.1 เตรียมสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้น 1,000 mg/L เพื่อใช้เป็นสารละลายมาตรฐานโดยการละลายผงสีย้อมจำนวน 0.1 g ในน้ำ DI แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรให้มีปริมาตรเท่ากับ 100 mL

3.7.2 ทำการเตรียมสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นต่างๆ กันโดยใช้วิธีการเจือจางสารในข้อ 3.7.1 ซึ่งใช้หลักการสมมูลมวลสารตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.4 แล้วทำการสแกนหาค่าความยาวคลื่นของสีย้อมที่สามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุดนั่นคือค่า λ_{max}

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (3.4)$$

เมื่อ

C_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมมีค่าเท่ากับ 1,000 mg/L

C_2 คือ ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมที่ต้องการเตรียม (mg/L)

V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายสีย้อมที่ต้องใช้ (mL)

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายสีย้อมที่ต้องการเตรียม (mL)

3.7.3 สร้างกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ของสีย้อม ซึ่งทำได้โดยนำน้ำสีย้อมที่ทราบความเข้มข้นต่าง ๆ แล้ว มาวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) โดยใช้ค่าความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุด (λ_{max}) ที่หาได้จากข้อที่ 3.7.2 แล้วนำข้อมูลไปสร้างกราฟมาตรฐานซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) กับความเข้มข้นของสีย้อม

3.8 การศึกษาการดูดซับแบบกะ

การศึกษาการดูดซับแบบกะ จะใช้ค่าอ้างอิงจากงานวิจัยของ Farnaz Hemmati และคณะ (Farnaz Hemmati et al., 2014)

3.8.1 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ มีวิธีการดังนี้

3.8.1.1 เตรียมสารละลายสีย้อมความเข้มข้น 150 mg/L ปริมาตร 100 mL เพื่อใช้เป็นน้ำสีสังเคราะห์ จากนั้นวัดค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

3.8.1.2 นำสารละลายสีสังเคราะห์ไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อให้ทราบค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

3.8.1.3 เติมฟิล์มคอมโพสิตลงไปในสารละลายสีสังเคราะห์ 0.3 g

3.8.1.4 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 35°C

3.8.1.5 แยกแผ่นฟิล์มคอมโพสิตออก นำสารละลายไปวัดค่าพีเอชที่สมดุลและวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น เปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม โดยใช้สมการที่ 2.9 ในบทที่ 2

3.8.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับจะทำการทดลอง มีวิธีการศึกษาดังนี้

3.8.2.1 เตรียมน้ำสีสังเคราะห์จากสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 mg/L ปริมาตร 100 mL ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL ตามจำนวนที่กำหนด จากนั้นวัดค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

3.8.2.2 นำไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อให้ทราบค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

3.8.2.3 เติมฟิล์มคอมโพสิตจำนวน 0.3 g ลงไปผสมกับสารละลายสีสังเคราะห์ในขวดรูปชมพู่

3.8.2.4 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm อุณหภูมิ 35 °C

3.8.2.5 เก็บตัวอย่างทุก ๆ 10 นาที ใน 1 ชั่วโมงแรก ต่อมาเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที จนถึงชั่วโมงที่ 3 หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าความเข้มข้นจะคงที่

3.8.2.6 แยกแผ่นฟิล์มคอมโพสิตออก แล้วนำสารละลายส่วนที่ใส่ไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงและเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐานและวัดค่าพีเอชที่เวลาใด ๆ

3.8.2.7 วิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับและนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษากับแบบจำลองอัตราการดูดซับ โดยใช้สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order equation) และสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order equation) จากนั้นนำไปศึกษาหา

ค่าพารามิเตอร์ของพลังงานกระตุ้นศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับและศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับต่อไป

3.8.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

3.8.3.1 เตรียมสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันในช่วง 30-150 mg/L ปริมาตร 100 mL เพื่อใช้เป็นสารละลายสีสังเคราะห์จากนั้นวัดค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

3.8.3.2 นำไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อให้ทราบค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

3.8.3.3 เติมฟิล์มคอมโพสิตลงไปในสารละลายสีสังเคราะห์ 0.3 g

3.8.3.4 ทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 35 °C เพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับ

3.8.3.5 แยกแผ่นฟิล์มคอมโพสิตออก

3.8.3.6 นำสารละลายมาวัดค่าพีเอชที่สมดุลและวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงและเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน

3.8.3.7 จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับ และนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาหาพฤติกรรมของการดูดซับว่ามีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบใดบ้าง เช่น ฟรุนดิช (Freundlich) และแลงเมียร์ (Langmuir)

3.8.4 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อปริมาณการดูดซับ

3.8.4.1 เตรียมสารละลายสีย้อมความเข้มข้นเริ่มต้น 150 mg/L ปริมาตร 100 mL เพื่อใช้เป็นสารละลายสีสังเคราะห์

3.8.4.2 ทำการเตรียมสารละลาย ข้างต้น ให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นแตกต่างกัน 5 ค่า (2, 3, 4, 5, 6 และ 7) โดยการปรับค่าพีเอชด้วยสารละลาย 0.1 M KOH หรือ 0.1 M HCl

3.8.4.3 นำสารละลายสีสังเคราะห์ไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อให้ทราบค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

3.8.4.4 เติมฟิล์มคอมโพสิตลงไปจำนวน 0.3 g

3.8.4.5 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 25 °C เพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับ

3.8.4.6 แยกแผ่นฟิล์มคอมโพสิตออก

3.8.4.7 นำสารละลายมาวัดค่าพีเอชที่สมดุลและวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงและเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อปริมาณการดูดซับต่อไป

3.8.5 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับ

ทำการทดลองเหมือนกับการทดลองในหัวข้อ 3.8.2 และ 3.8.3 แต่ใช้อุณหภูมิ 35, 45, 55 และ 65 °C นำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับ จากนั้นนำไปศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับต่อไป

3.8.6 การศึกษาการคายซับ

ในการศึกษาอิทธิพลของการคายซับจะนำตัวดูดซับหลังจากการดูดซับอิ่ม มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.8.6.1 เตรียมสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้น 150 mg/L ปริมาตร 100 mL เพื่อใช้เป็นสารละลายสีสังเคราะห์ จากนั้นวัดค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

3.8.6.2 นำไปวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อให้ทราบค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

3.8.6.3 เติมน้ำฟิล์มคอมโพสิต จำนวน 0.3 g ลงในสารละลายสีย้อมในขวดรูปชมพู่

3.8.6.4 ทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 35 °C เพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับ

3.8.6.5 แยกแผ่นฟิล์มออกมาและนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 hr

3.8.6.6 นำแผ่นฟิล์มคอมโพสิต 0.3 g ที่ดูดซับสีย้อมมาทำการผสมกับน้ำ DI สารละลาย 0.1 M HCl และสารละลายกรดแอสติก 0.1 M ปริมาณ 100 mL เขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 35 °C

3.8.6.7 นำไปแยกแผ่นฟิล์มออก และนำสารละลายมาวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงและเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการคายซับ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับและสีย้อม

4.1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ

จากการวิเคราะห์ตัวดูดซับด้วยเครื่อง Automatic Surface Analyzer ด้วย BET-method เพื่อศึกษาหาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) มีค่ามากที่สุด เมื่อเทียบกับตัวดูดซับอื่นๆ เมื่อพิจารณาที่ฟิล์มเพคตินธรรมชาติ (PN film) จะเห็นได้ว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ (CN film) อาจจะเป็นเพราะว่า MMT ที่ผสมอยู่ใน CN film ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของ CN film เมื่อพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย จะเห็นได้ว่า PN film มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า CN film อาจจะเป็นเพราะว่า MMT เข้าไปคั่งรูพรุนใน CN film ส่งผลให้ CN film มีขนาดของรูพรุนลดลงเมื่อเทียบกับ PN film

ส่วนฟิล์มคอมโพสิตทางการค้า (CC film) เมื่อเทียบกับ CN film จะมีพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนน้อยกว่า อาจเกิดจากเพคตินทางการค้าที่นำมาใช้มีความบริสุทธิ์สูง จึงทำให้การรวมตัวกับ MMT สมบูรณ์มากกว่า CN film ที่อาจจะมีสิ่งปนเปื้อนหรือองค์ประกอบอื่นๆปะปนอยู่ในเพคตินธรรมชาติ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ

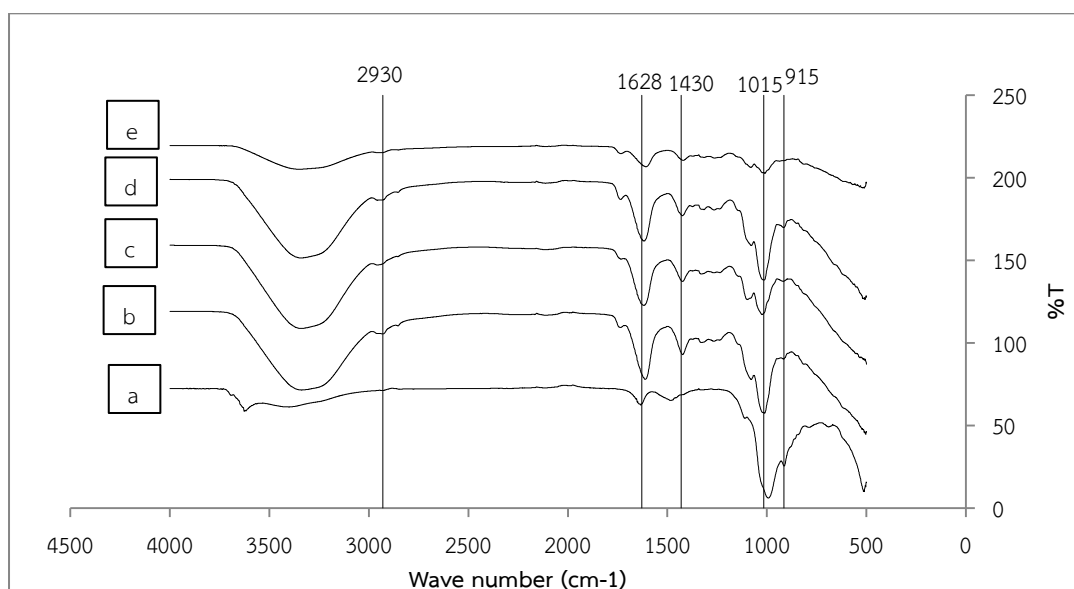
ตัวแปร	ชนิดของตัวดูดซับ				
	PC film	CC film	PN film	CN film	MMT
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	1.076	0.1918	0.3183	0.6197	8.708
เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (nm)	3.524	3.526	4.782	3.747	2.973

หมายเหตุ: PC film คือ ฟิล์มเพคตินทางการค้า, CC film คือ ฟิล์มคอมโพสิตทางการค้า, PN film คือ ฟิล์มเพคตินธรรมชาติ, CN film คือ ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ, MMT คือ แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

4.1.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ

IR Spectra ของ MMT (a) CC film (b) PC film (c) CN film (d) และ PN film (e) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับชนิดต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1 และสรุปไว้ดังตารางที่ 4.2 IR-spectra ของ MMT จะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน Al-OH stretching ที่พิกัด $1,628\text{ cm}^{-1}$ หมู่ Si-O stretching ที่พิกัด $1,015\text{ cm}^{-1}$ และหมู่ Si-O-Si stretching ที่พิกัด 915 cm^{-1} ส่วนฟิล์มทั้ง 4 ชนิดนั้นมีหมู่ฟังก์ชันที่ใกล้เคียงกัน ได้แก่ หมู่ C-H ($-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3$) stretching ที่พิกัด $2,930\text{ cm}^{-1}$ หมู่ Al-OH stretching ที่พิกัด $1,628\text{ cm}^{-1}$ หมู่ CO-CH₂ stretching ที่พิกัด $1,430\text{ cm}^{-1}$ หมู่ Si-O stretching ที่พิกัด $1,015\text{ cm}^{-1}$ และหมู่ Si-O-Si stretching ที่พิกัด 915 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชันนี้จะปรากฏใน CC film และ CN film เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าใน CC film และ CN film มีส่วนประกอบของ MMT (Liudmila Novikova et al., 2016) ส่วนหมู่ฟังก์ชัน Al-OH เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีอยู่ใน MMT ซึ่งสามารถพบในตัวดูดซับทั้งหมด แต่จากกราฟจะเห็นว่า ที่ CN film และ CC film จะมีพิกัดที่ยาวกว่า กราฟของ PN film และ PC film เนื่องจากมี MMT เพิ่มเข้ามา

การปรากฏของหมู่ฟังก์ชัน Si-O stretching, Si-O-Si stretching และ Al-OH stretching ใน IR-spectra ของ CC film และ CN film เป็นการยืนยันได้ว่าฟิล์มคอมโพสิตทั้งสองชนิดมีแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์อยู่ภายใน (Aleksandra R Nesic et al., 2013)



ภาพที่ 4.1 สเปกตรัม FTIR ของ (a) MMT (b) CC film (c) PC film (d) CN film (e) PN film

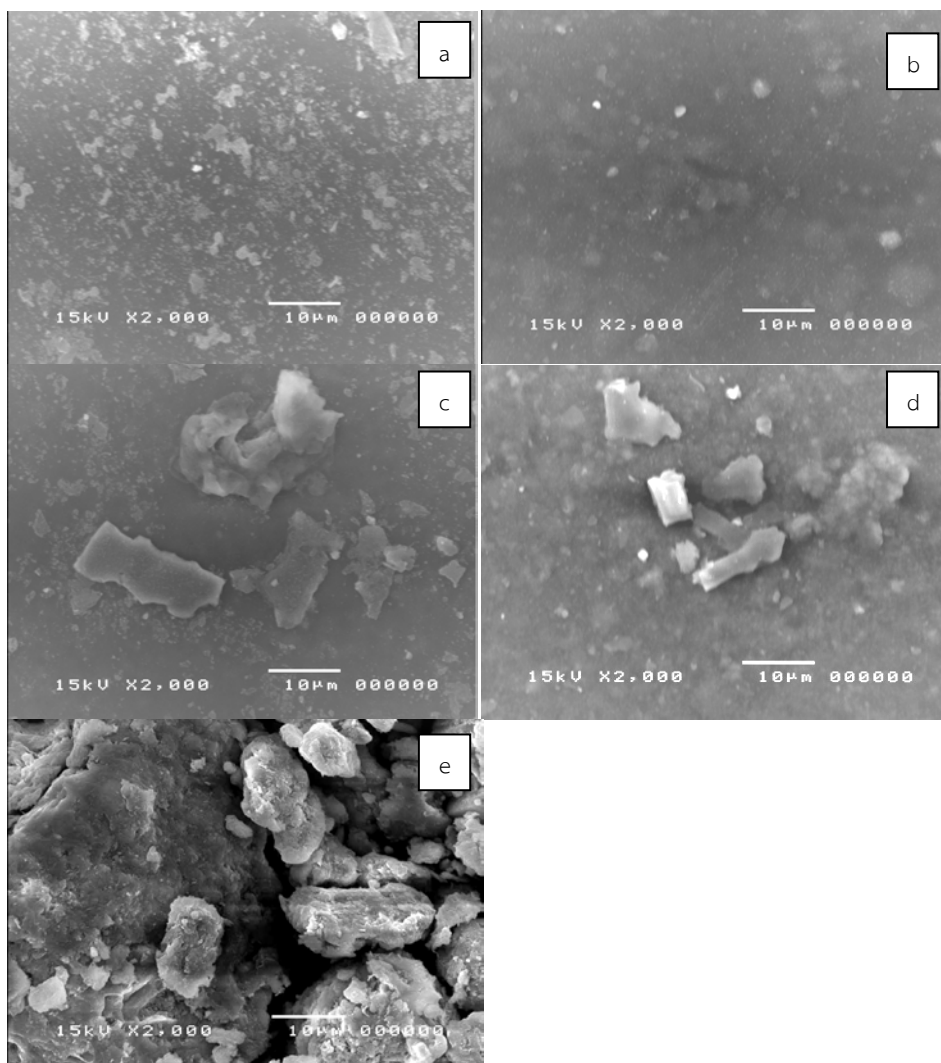
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ

Band range (cm ⁻¹)					Functional groups
MMT	CC film	PC film	CN film	PN film	
-	2930	2930	2930	2930	C-H (-CH ₂ - , -CH ₃) stretching
1628	1628	1628	1628	1628	Al-OH stretching
-	1430	1430	1430	1430	CO-CH ₂ stretching
1015	1015	1015	1015	1015	Si-O stretching
915	915	-	915	-	Si-O-Si stretching

4.1.3 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับด้วยเครื่อง SEM ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า PC film (ภาพที่ 4.2(a)) มีลักษณะค่อนข้างขรุขระ มีกลุ่มของอนุภาคนาขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วทั้งแผ่น เมื่อเปรียบเทียบกับ PN film (ภาพที่ 4.2(b)) ซึ่งมีลักษณะผิวขรุขระน้อยกว่าและมีอนุภาคนาขนาดเล็กจำนวนหนึ่งปรากฏอยู่บนพื้นผิว เมื่อเทียบกับ CC film (ภาพที่ 4.2(c)) และ CN film (ภาพที่ 4.2(d)) เห็นได้ชัดว่าแตกต่างกัน มีกลุ่มอนุภาคนาขนาดใหญ่ ซึ่งคาดว่าจะเป็อนุภาคของ MMT ปรากฏอยู่บนพื้นผิว

เมื่อเปรียบเทียบ CC film (ภาพที่ 4.2(c)) กับ CN film (ภาพที่ 4.2(d)) จะเห็นได้ว่าลักษณะกลุ่มอนุภาคของ MMT ที่อยู่บนพื้นผิวมีขนาดที่แตกต่างกัน คือ CC film จะมีขนาดกลุ่มอนุภาคของ MMT ใหญ่กว่าที่ปรากฏใน CN film ซึ่งอาจเกิดจาก CC film เกิดการแห้งตัวช้า ทำให้อนุภาคของ MMT เกิดการจับตัวกันได้มากกว่า CN film ที่มีการแห้งตัวเร็วกว่า อนุภาคของ MMT จึงมีการจับตัวกันได้น้อยกว่า

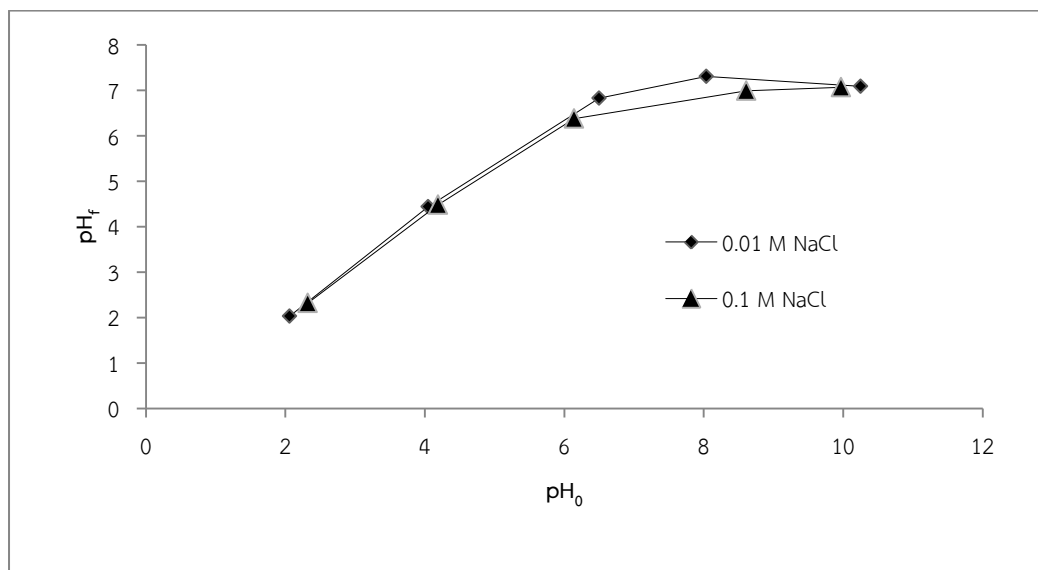


ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (a) PC film (b) PN film (c) CC film (d) CN film (e) MMT

4.1.4 ผลการวิเคราะห์จุดที่ประจุเป็นศูนย์ (pH_{pzc})

จุดที่ประจุเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) คือ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ทำให้ประจุที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นกลาง หรือประจุรวมที่ผิวมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อค่า pH มีค่าน้อยกว่า pH_{pzc} ประจุที่ผิวของตัวดูดซับจะมีประจุเป็นบวก ในทางตรงกันข้าม เมื่อค่า pH มีค่ามากกว่า pH_{pzc} แสดงว่าประจุที่พื้นผิวตัวดูดซับจะมีประจุเป็นลบ (เกษภาพร สุอรุณ และคณะ, 2012)

จากการวิเคราะห์หาจุดที่ประจุเป็นศูนย์ ได้ผลดังภาพที่ 4.3 จากกราฟจะเห็นได้ว่า pH_{pzc} ของฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ ประมาณ $\text{pH}=6$ ซึ่งคือจุดของ pH_i ที่กราฟเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงช้าลง จากภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ที่ $\text{pH}_f = 6.3$ และ $\text{pH}_i = 6$ กราฟเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงช้าลง ดังนั้น $\text{pH}_{\text{pzc}} = 6$



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH_f กับ ค่า pH_0 ของสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 0.01 M และ 0.1 M ที่อุณหภูมิ 35 °C

4.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบกะ

4.2.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม MG ด้วย PC film, CC film, PN film, CN film และ MMT สามารถทำได้โดยการหาเปอร์เซ็นต์การกำจัด (% removal) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า PN film มี % removal เท่ากับ 2.03 แต่เมื่อพิจารณาที่ CN film จะเห็นว่า เมื่อมีการผสมกับ MMT จะทำให้ % removal เพิ่มขึ้นเป็น 75 เนื่องจาก MMT มีคุณสมบัติสามารถดูดซับสีย้อมที่เป็นประจุบวกได้ดี เพราะ MMT มีประจุลบ ซึ่งเมื่อพิจารณา % removal ของ MMT จะเห็นว่า มี % removal ที่ค่อนข้างสูง คือ % removal = 70.09 เมื่อผสมกับเพคตินกลายเป็น CN film จึงส่งผลให้มี % removal สูงที่สุด

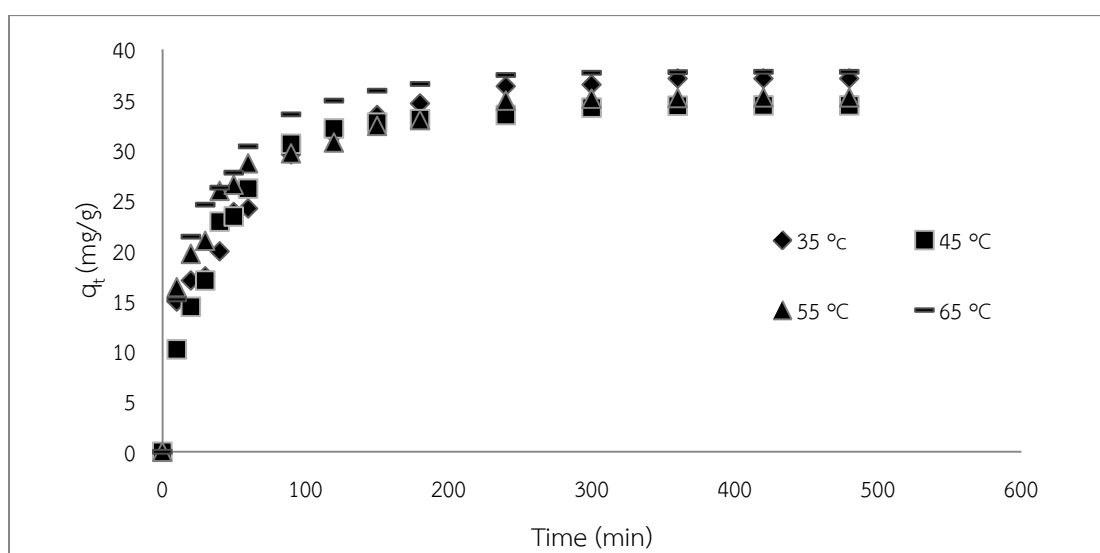
ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม MG

ตัวแปร	ชนิดของตัวดูดซับ				
	PC film	CC film	PN film	CN film	MMT
% removal MG	1.33	68.45	2.03	75	70.09

4.2.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์

4.2.2.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับ

จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับ ได้ผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับเวลาสัมผัส พบว่าที่ทุกอุณหภูมิ ปริมาณการดูดซับของสีย้อมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกๆ และเมื่อผ่านไปถึงช่วงเวลาหนึ่ง ปริมาณการดูดซับสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและคงที่ เนื่องจากในช่วงแรกๆ ตัวดูดซับยังมี active site ที่ปราศจากโมเลกุลของสีย้อม สีย้อมจึงยึดเกาะกับพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับ และเมื่อเวลาผ่านไปขั้นตอนการดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างช้าๆ เนื่องจากสีแพร่เข้าสู่รูพรุนภายในของตัวดูดซับ จนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว และโมเลกุลของสีไม่สามารถเข้าไปในพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้อีก ซึ่งในการทดลองการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลาประมาณ 180 นาที



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีย้อมกับเวลาสัมผัสของสีย้อม MG ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g, $C_0 = 150$ mg/L และ $pH_0 = 3.80 \pm 0.5$ เป็นตัวดูดซับ

4.2.2.2 ผลการหาอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับ

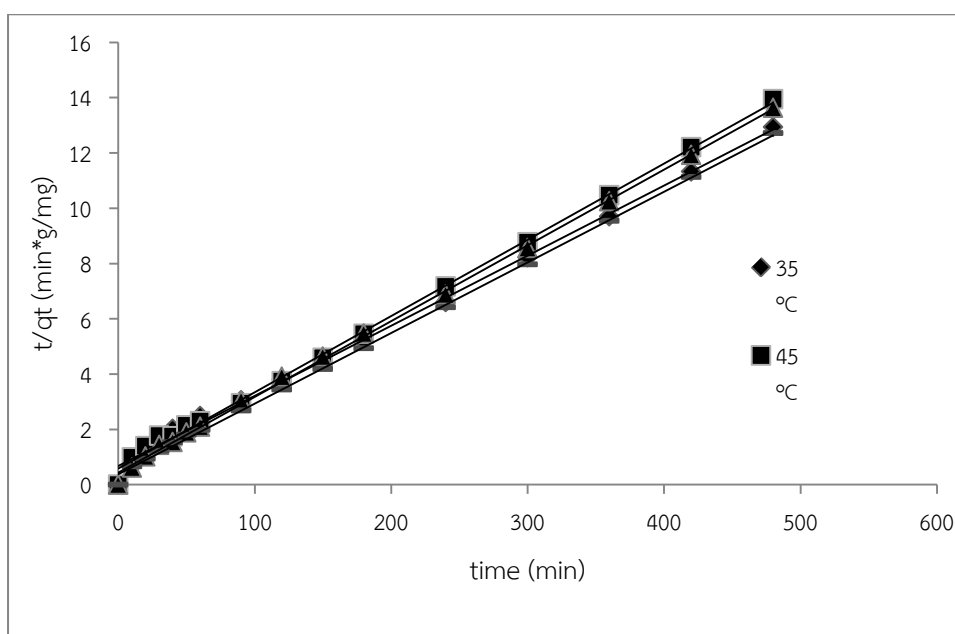
การศึกษาอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับ เพื่อหากลไกของอัตราการดูดซับสีย้อม ซึ่งจะใช้แบบจำลอง 2 แบบ คือ Pseudo-first order และ Pseudo-second order (Wang and Wang, 2007) ซึ่งแบบจำลอง Pseudo-first order บ่งบอกว่าขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของตัวถูกดูดซับผ่านชั้นของไฮดรอลิกของตัวดูดซับเกิดขึ้นช้าที่สุด และแบบจำลอง Pseudo-second order บ่งบอกว่าขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าที่สุด (ศรีภัทรา โสภาสิน, 2013)

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าอัตราการดูดซับสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม มากกว่าสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม เนื่องจากค่า R^2 ของสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม มีค่ามากกว่าค่า R^2 ของสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมและค่า q_e

ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองของสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม มีค่าใกล้เคียงกับค่า q_e ที่ได้จากการทดลอง มากกว่าค่า q_e ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองของสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมซึ่งดูได้จากภาพที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของสมการอันดับหนึ่งเทียมและสมการอันดับสองเทียมของการดูดซับสีย้อม MG จากสารละลายสีสังเคราะห์

อุณหภูมิ (°C)	$q_{e,exp}$ (mg/g)	สมการอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)			สมการอันดับสองเทียม (Pseudo-second order)		
		$k_1 \times 10^{-2}$ (min^{-1})	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2	$k_2 \times 10^{-3}$ ($\text{g/mg} \cdot \text{min}$)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2
35	36.34	1.38	28.58	0.9860	0.96	39.37	0.9963
45	32.13	1.59	24.16	0.9409	1.32	36.23	0.9976
55	34.90	1.58	23.26	0.9363	1.72	36.50	0.9988
65	37.45	1.73	27.57	0.9450	1.77	39.06	0.9991



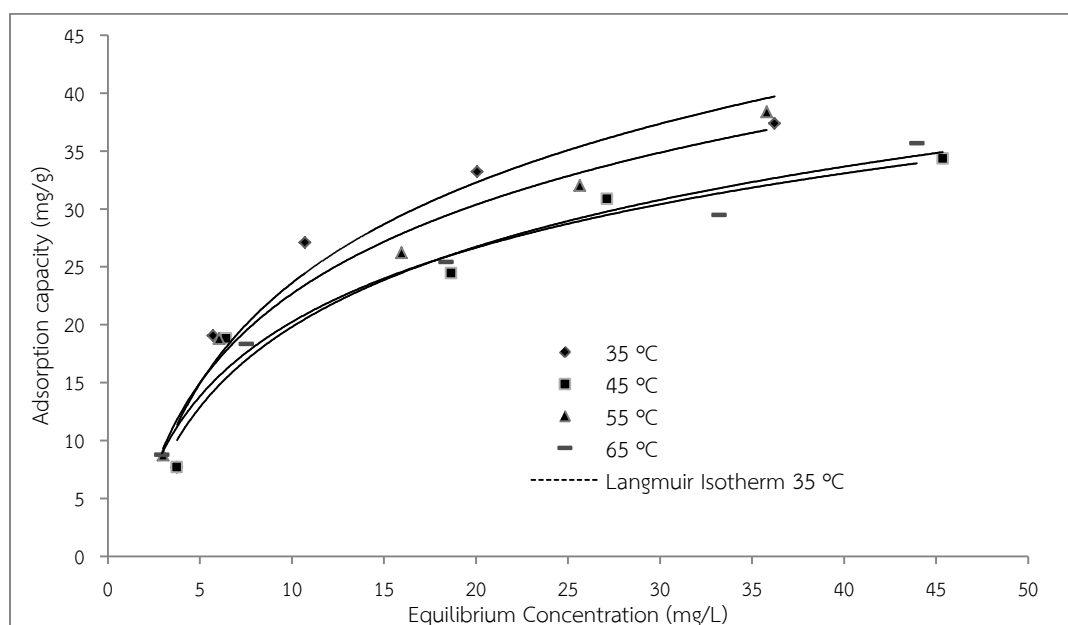
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t ($\text{min} \cdot \text{g/mg}$) และ t (min) แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีย้อม ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยใช้ CN film เป็นตัวดูดซับ

4.2.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ เพื่อทราบพฤติกรรมของการดูดซับสีย้อม ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรูนดิช หรือการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) และไอโซเทอมแบบแลงเมียร์(monolayer) หรือการดูดซับแบบชั้นเดียว จากข้อมูลในตารางที่ 4.5 คือข้อมูลการทดลองจากการพล็อตกราฟกับสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรูนดิช โดยนำข้อมูลที่ได้จากภาพที่ 4.6 ซึ่งพิจารณาจากค่า R^2 และค่าพารามิเตอร์ พบว่าไอโซเทอมการดูดซับของสีย้อมมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรูนดิช แต่มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่า แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นในลักษณะแบบชั้นเดียว

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรูนดิชของการดูดซับสีย้อม MG ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

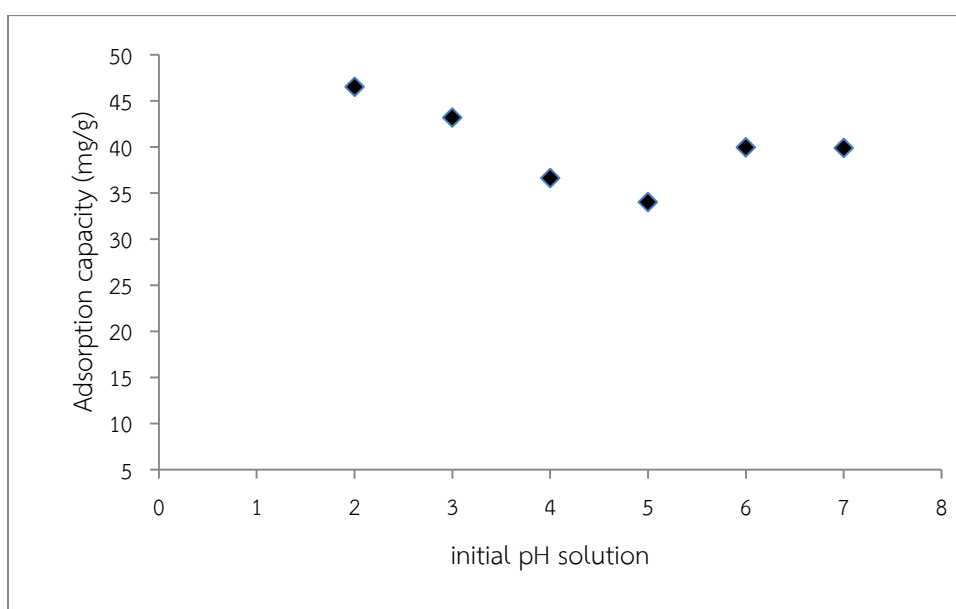
อุณหภูมิ (° C)	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอมแบบฟรูนดิช		
	q_m (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	n	R^2
35	54.95	0.067	0.8686	1.99	1.60	0.8076
45	45.44	0.070	0.9587	2.00	1.86	0.8591
55	50.94	0.075	0.9740	2.11	1.82	0.9420
65	42.86	0.086	0.9811	2.15	2.06	0.9578



ภาพที่ 4.6 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อม MG จากสารละลายสีสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g และ pH เริ่มต้น = 3.80 ± 0.5

4.2.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อการดูดซับ

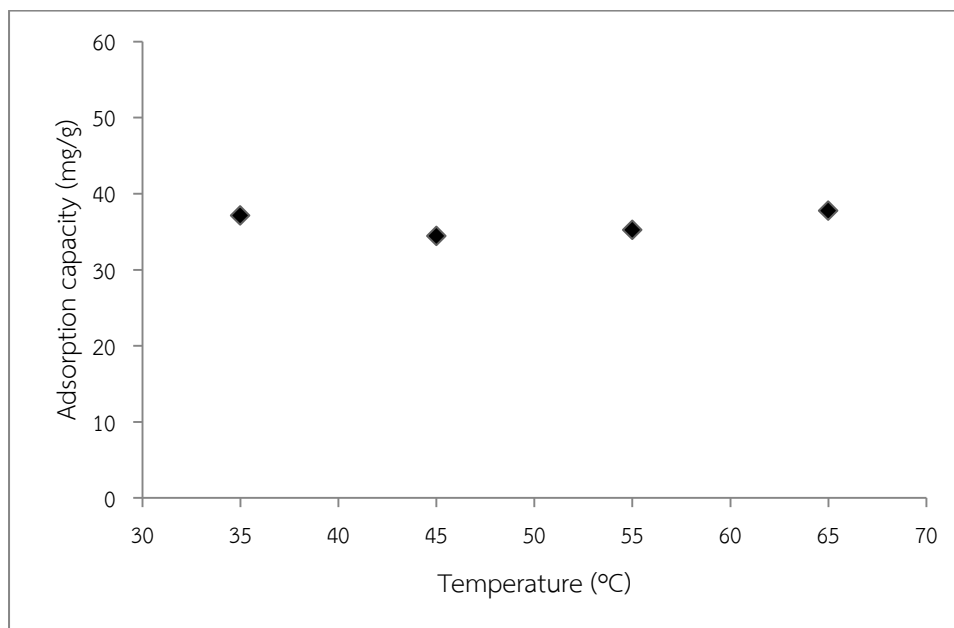
ผลจากการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อปริมาณการดูดซับในช่วงค่าพีเอช 2-7 ซึ่งค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 150 mg/L ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.7 พบว่าปริมาณการดูดซับของสีย้อมที่ค่า pH=2 มีปริมาณการดูดซับที่สูงที่สุด ($q_e = 46.51$ mg/g) อาจจะเป็นเพราะว่าที่ค่า pH=2 สีย้อมมีการแตกตัวน้อยส่งผลให้อนุภาคของสีย้อมมีประจุเป็นกลางเนื่องจากค่า pKa ของสีย้อม = 6.9 ที่ค่าพีเอช 3-5 เป็นช่วงค่าพีเอชที่น้อยกว่า pH_{pzc} ซึ่งเป็นช่วงที่ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นบวก ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับสีย้อม MG ที่มีประจุบวกมีค่าน้อยลง และที่ค่า pH = 6 ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ pH = 6 เป็นจุด pH_{pzc} ซึ่งมีประจุเป็นศูนย์จึงสามารถดูดซับสีย้อมได้ และที่ pH = 7 เป็นค่าพีเอชที่มากกว่าค่า pH_{pzc} พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุลบ จึงสามารถดูดซับสีย้อมที่มีประจุบวกได้



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีย้อมกับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม มีความเข้มข้นเริ่มต้น = 150 mg/L โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ

4.2.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล ได้ผลการศึกษาตามภาพที่ 4.8 พบว่าปริมาณการดูดซับสีย้อมสูงที่สุด คือที่อุณหภูมิ 65°C (37.75 mg/g) และปริมาณการดูดซับต่ำสุด คือที่อุณหภูมิ 45°C (34.42 mg/g) ซึ่งปริมาณการดูดซับมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก บ่งบอกได้ว่าค่าอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณการดูดซับสีย้อม MG ที่ใช้ CN film เป็นตัวดูดซับ



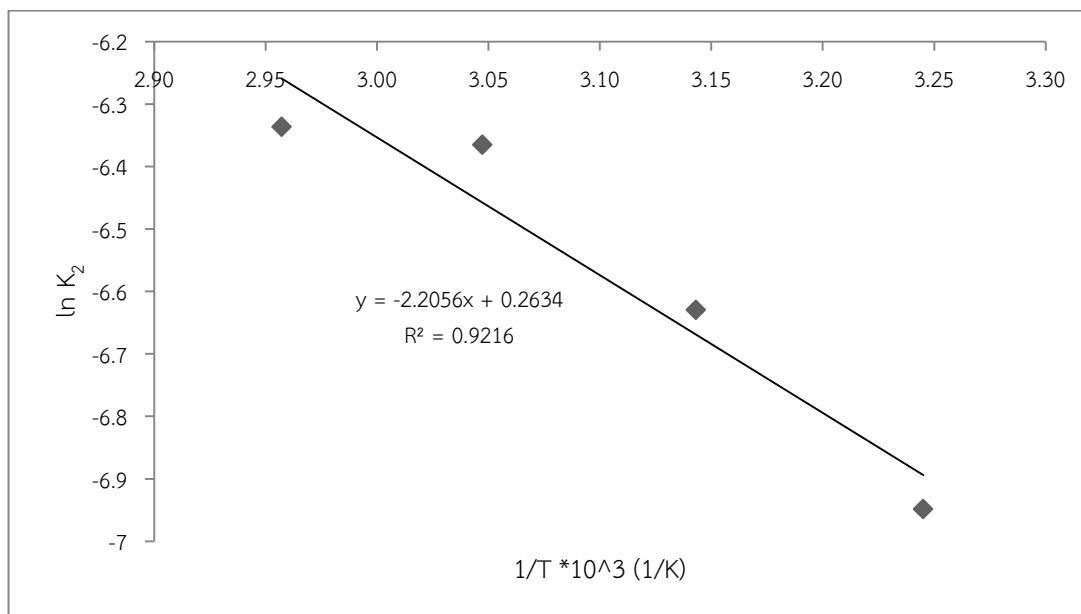
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีย้อมกับอุณหภูมิในการดูดซับของสารละลายสีย้อม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 mg/L โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเมอร์ชนิด CN ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ

4.2.6 ผลพารามิเตอร์ของพลังงานกระตุ้น

พลังงานกระตุ้น คือ พลังงานที่โมเลกุลของสารตั้งต้นสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งค่าพลังงานกระตุ้นหาได้จากการนำผลการทดลองที่ได้ไปพล็อตกราฟตามสมการ Arrhenius ตามสมการที่ 2.23 ถ้าค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าอยู่ในช่วง 5-40 kJ/mol แสดงว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าอยู่ในช่วง 40-800 kJ/mol แสดงว่าเป็นการดูดซับทางเคมี (Alkan et al., 2008)

ตารางที่ 4.6 ค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเมอร์ชนิด CN

ชนิดของตัวดูดซับ	อุณหภูมิ (°C)	E_a (kJ/mol)	R^2
CN film	35-65	0.0183	0.9216

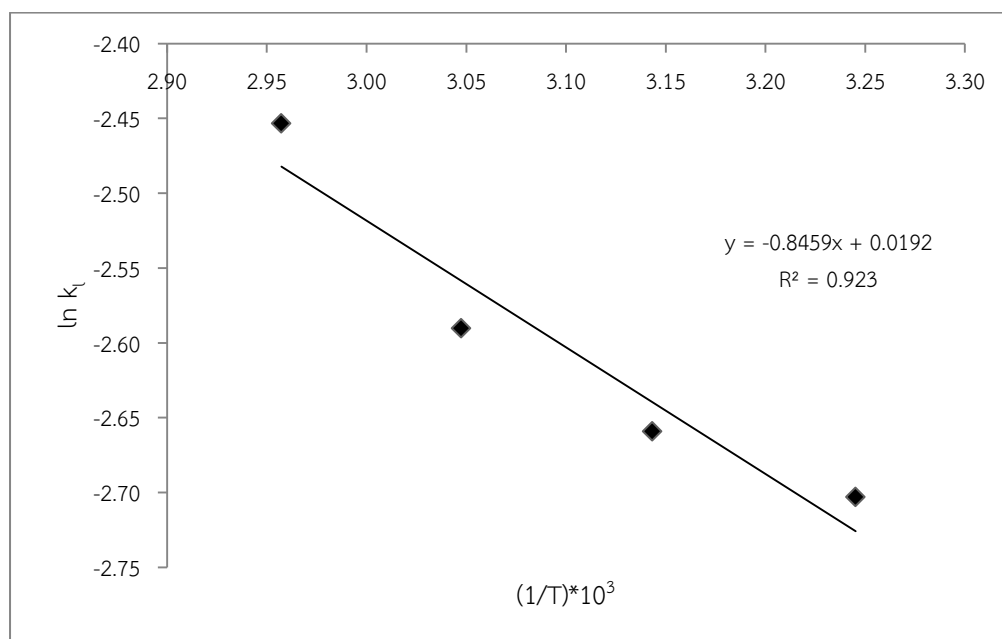


ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$ ของการดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ CS film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ

จากการทดลองนี้ ได้นำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟตามสมการของ Arrhenius ได้ค่าพลังงานกระตุ้น ดังตารางที่ 4.6 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 0.0183 kJ/mol ซึ่งพลังงานกระตุ้นมีค่าน้อยมาก อาจจะเป็นไปได้ว่า กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมีที่เกิดขึ้นเร็วมาก จึงทำให้ค่า E_a มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจะเรียกว่ากระบวนการดูดซับทางเคมีที่ไม่มีพลังงานกระตุ้น (nonactivated chemisorptions) (Papita saha et al., 2011)

4.2.7 ผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ

การศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ สามารถทำได้โดยคำนวณการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (Standard Gibb's free energy change equation, ΔG°) เพื่อให้ทราบว่า กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้เองหรือไม่ และเกิดขึ้นไปในทิศทางใด นอกจากนี้ ยังมีการคำนวณการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมาตรฐาน (ΔH°) เพื่อหาปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบ และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน (ΔS°) เพื่อบ่งบอกถึงความไม่เป็นระเบียบของระบบว่าจะเกิดไปในทิศทางใด ซึ่งค่าเอนทาลปีมาตรฐาน (ΔH°) และค่าเอนโทรปีมาตรฐาน (ΔS°) หาได้จากการพล็อตกราฟตามสมการของ Van' t Hoff ซึ่งแสดงตามภาพที่ 4.10 และค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG°) ค่าเอนทาลปีมาตรฐาน (ΔH°) และค่าเอนโทรปีมาตรฐาน (ΔS°) แสดงในตารางที่ 4.7



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_L$ กับ $1/T$ ของการดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ของเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ΔG° (kJ/mol)	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/K/mol)
35	-42.27	7.03	0.16
45	-43.91		
55	-45.56		
65	-46.95		

จากผลการทดลองที่ได้ จะเห็นได้ว่า ค่า ΔG° มีค่าเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยาอาจเกิดขึ้นได้เองในทิศทางไปข้างหน้า (Spontaneous) ค่า ΔH° มีค่าเป็นบวก แสดงว่ากระบวนการดูดซับอาจจะเป็นระบบดูดความร้อน (Endothermic) และ ค่า ΔS° มีค่าเป็นบวกแสดงให้เห็นว่าจุดสัมผัสระหว่างเฟสของแข็งและของเหลวไม่เป็นระเบียบ

4.2.8 การศึกษาการคายซับ

พฤติกรรมของการคายซับสีย้อม MG ของตัวดูดซับ CS film ด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่า น้ำกลั่น ไม่สามารถเกิดการคายซับได้ แสดงว่ากระบวนการดูดซับไม่ใช่กระบวนการดูดซับทางกายภาพ สารละลาย 0.1 M HCl สามารถทำให้เกิดการคายซับได้ 1.82% ซึ่งถือว่าน้อยมาก แสดงว่ากระบวนการดูดซับมีการแลกเปลี่ยนประจุเข้ามาเกี่ยวข้องเล็กน้อย และเมื่อใช้สารละลาย 0.1 M CH_3COOH สามารถทำให้เกิดการคายซับได้ 48.57% แสดงว่ากระบวนการดูดซับ

เกี่ยวข้องกับกระบวนการการดูดซับทางเคมี ซึ่งตัวดูดซับ CS film เป็นตัวดูดซับที่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ตารางที่ 4.8 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการคายซับสีย้อม MG โดยใช้ตัวดูดซับ 0.3 g อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ชนิดของสารละลาย	Desorption (%)
น้ำกลั่น	0.00
0.1 M HCl	1.82
0.1 M CH ₃ COOH	48.57

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการผลิตฟิล์มคอมโพสิตการค้ำ ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ ฟิล์มเพคตินการค้ำ และฟิล์มเพคตินธรรมชาติ พบว่า ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติมีพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนเฉลี่ยมากกว่าฟิล์มคอมโพสิตการค้ำ และฟิล์มเพคตินธรรมชาติมีพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนเฉลี่ยน้อยกว่าฟิล์มเพคตินการค้ำ จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติและฟิล์มคอมโพสิตการค้ำ พบหมู่ Si-O และ Si-O-Si ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่พบในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ แต่ไม่พบในฟิล์มเพคตินธรรมชาติและฟิล์มเพคตินการค้ำ และผลการวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ พบว่ามีแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์อยู่บนพื้นผิวของฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติและฟิล์มคอมโพสิตการค้ำ

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่า ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ สามารถดูดซับสีย้อม MG ได้ดีกว่า ฟิล์มเพคตินการค้ำ ฟิล์มเพคตินธรรมชาติ และฟิล์มคอมโพสิตการค้ำ จึงเลือกใช้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติในการทดลองต่อไป การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ พบว่า อัตราการดูดซับของสีย้อม MG มีความสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าที่สุด) ไอโซเทอมการดูดซับของสีย้อมมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (การดูดซับแบบชั้นเดียว) มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับ พบว่า ปริมาณการดูดซับของสีย้อมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับเวลา 180 นาที การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อปริมาณการดูดซับ พบว่าปริมาณการดูดซับที่ค่าพีเอช 2 มีค่ามากที่สุด ($q_e = 46.51 \text{ mg/g}$) และการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล พบว่าปริมาณการดูดซับสีย้อม MG มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับสีย้อม MG น้อยมาก พฤติกรรมการคายซับสีย้อม MG ของตัวดูดซับฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติพบว่า น้ำกลั่นไม่สามารถทำให้เกิดการคายซับได้ เมื่อใช้สารละลาย 0.1 M HCl ทำให้เกิดการคายซับได้ 1.82% และเมื่อใช้ 0.1 M CH_3COOH ทำให้เกิดการคายซับเพิ่มขึ้นเป็น 48.57% แสดงว่ากระบวนการดูดซับเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับทางเคมี

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรศึกษาเปรียบเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ในการดูดซับสีย้อม เช่น ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น
- 5.2.2 ควรศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิดอื่นๆ เช่น สีเบสิก สีดิสเพอร์ส และสีซัลเฟอร์ เป็นต้น
- 5.2.3 ควรศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อมจริง เพราะมีสารตัวอื่นๆ อยู่ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับ
- 5.2.4 ควรศึกษาคุณสมบัติกายภาพเพิ่มเติม เช่น Thermogravimetric Analysis (TGA) และ X-Ray Diffraction Analysis (XRD) เป็นต้น
- 5.2.5 ควรศึกษาการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสารละลายสีย้อมเป็นต่างเพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- เกษราพร สุอรุณ และคณะ. “จลนศาสตร์การดูดซับไอออนเงินโดยเรซินไคโตซาน”, **วารสารวิทย มหาวิทยาลัยขอนแก่น**. 40(4): 1285-1300, 2555.
- จักรกฤษณ์ อัมพูช. **การกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าในระดับอุตสาหกรรม**
ครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2549.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. **กระบวนการดูดซับ**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2552.
- ทรงศักดิ์ สระแก้ว. **การกำจัดสีย้อมโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคซาน**.
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2555.
- ธงชัย เนมขุนทด. **แพลตตินัฟรุต: โครงการหนังสือเกษตรชุมชน**. กรุงเทพฯ: เรื่องแสงการพิมพ์,
2553
- นครินทร์ แพรชชา. **การกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำล้างสีย้อมผ้าโดยการใส่เกลือที่ปรับสภาพด้วยวิธี**
ทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี, 2549.
- ยศยง จันทรวงศา, กุลวีน ลีละศุภพงษ์ และนลินี วีระวรรณ. “การสกัดเพคตินจากเปลือกเสาวรส”,
ใน **โครงการพิเศษเรื่องการสกัดเพคตินจากเปลือกเสาวรส**. คณะวิทยาศาสตร์:
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- ศรัภทรา โสภาสิน. **การกำจัดสีย้อมโรห์ตามีนบีโดยใช้เปลือกส้มโอตัดแปร**. วิทยานิพนธ์ปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2556.
- Aleksandra R. Nestic, Sava J. Velickovic and Dusan G. Antonovic. “Novel composite
films based on amidated pectin for cationic dye adsorption”, **Colloids and**
Surfaces B: Biointerfaces. 1(116): 620 – 626; 2013.
- Almeida, C.A.P and et al. “Removal of methylene blue from colored effluents by
adsorption on montmorillonite clay”, **Journal of Colloid and Interface**
Science. 1(332): 46-53; 1 April, 2009.
- Amit Kumar Sarkara and et al. “Efficient removal of malachite green dye using
biodegradable graf copolymer derived from amylopectin and poly (acrylic
acid)”, **Carbohydrate Polymer**. 1(111): 108-115; 1 April, 2014.
- Chen, D. and et al. “Characterization of anion-cationic surfactants modified
montmorillonite and its application for removal of methyl orange”,
Chemical Engineering Journal. 171(3): 1150-1158; 2011.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Dahri MK. and et al. "Water remediation using low cost adsorption walnut shell for removal of malachite green: equilibrium, kinetics, thermodynamic and regeneration studies", **Journal of Environmental Chemical Engineering**. 2(3): 1434-1444; September, 2014.
- Fernanda L. Seixas and et al. "Extraction of pectin from passion fruit peel (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) by microwave-induced heating", **Food Hydrocolloids**. 1(38): 186-192; July, 2014.
- Gupta, V.K., and Suhas. "Application of low-cost adsorbents for dye removal", **Journal of Environmental Management**. 1(90): 2313-2341, 2009.
- Hong Tian and et al. "Anionic surfactant coacervation extraction-magnetic solid phase microextraction for determination of malachite green", **Analytical methods**. 6(19): 7703-7709; July, 2014.
- K. Halme and et al. "A confirmatory analysis of malachite green residues in rainbow trout with liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry", **Journal of Chromatography B**. 1(845): 74-79; January, 2007.
- K. Mitrowska and et al. "Determination of malachite green and leucomalachite green residues in water using liquid chromatography with visible and fluorescence detection and confirmation by tandem mass spectrometry", **Journal of Chromatography A**. 2(1207): 94-100; 17 October, 2008.
- Liudmila Novikova and et al. "Adsorption of Industrial Pollutants by Natural and Modified Aluminosilicates", **Earth and Planetary Sciences**. 953-978; 9 March, 2016.
- Lj. S. Cerovic and et al. "Point of zero charge of different carbides", **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. 1-3(297): 1-6; 5 April, 2007.
- Malik, R. and et al. "Adsorption of malachite green on ground nut shell waste based powdered activated carbon", **Waste Management**. 9(27): 1129-1138; 2007.
- Mckay G. **Use of adsorbents for the removal of pollutants from wastewater**. New York: CRC press, 1996.
- Mohan D. and et al. "Removal of dyes from wastewater using fly ash: A low-cost adsorbent", **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 41(15): 3688-3695; June, 2002.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- N. Bilandzic and et al. “Malachite green residues in farmed fish in Croatia”, **Food Control**. 2(26): 393-396; August, 2012.
- Papita Saha and Shamik Chowdhury. “Chapter 6 Insight Into Adsorption Thermodynamics”, in **Thermodynamics**. Mizutani Tadashi. 349-364. China: Intech, 2011.
- Pinheiro E.R. and et al. “Optimization of extraction of high-ester pectin from passion fruit peel (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) with citric acid by using response surface methodology”, **Bioresource**. 99(13): 5561-5566; 2008.
- Pornsak Sriamornsak. “Chemistry of Pectin and its Pharmaceutical Uses: A Review”, **Silpakorn university journal of social sciences, humanities and art**. 1-2(3): 206-228; 2003.
- Rahchamani J. and et al. “Adsorption of methyl violet from aqueous solution by polyacrylamind as an adsorbent: Isotherm and kinetic studies”, **Desalination**. 2-3(267): 256-260; 15 February, 2011.
- S. Nethaji and et al. “Adsorption of Malachite Green dye onto activated carbon derived from Borassus aethiopum flower biomass”, **Journal of Hazardous Materials**. 1-3(181): 271-280; 15 September, 2010.
- Seader J.D. and et al. **Seperation process principles**. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- Seiji Kakuta and et al. “Clarification of photocatalysis induced by iron ion species natuarally contained in a clay compound”, **Catalysis Science & Technology**. 1: 1671-1676; 2011.
- Sekhar C.P. and et al. “Bio-polymer adsorbent for the removal of malachite green from aqueous solution”, **Chemosphere**. 6(77): 842-847; October, 2009.
- Singh V. and et al. “Poly (methylmethacrylate) grafted chitosan: An efficient adsorbent for anionic azo dyes”, **Journal of Hazardous Material**. 2-3(161): 955-966; 30 January, 2009.
- Soni A and et al. “Removal of malachite green from aqueous solution using nano-iron oxide-loaded alginate microspheres: batch and column studies”, **Res Chem Intermed**. 40(3): 913-930; March, 2014.
- Wang D. and et al. “Adsorption and removal of malachite green from aqueous solution using magnatic β -cyclodextrin-graphene oxide nano composites as adsorbents”, **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. 1(466): 166-173; 5 February, 2015.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Wang L. and Wang A. “Adsorption behaviors of Congo red on the N, O-carboxymethyl- chitosan/montmorillonite nanocomposite”, **Chemical Engineering Journal**. 1-3(143): 43-50; 15 September, 2008.
- Yapo B.M. and et al. “Dietary fiber components in yellow passion fruit rind – a potential fiber source”, **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 56(14): 5880-5883; July, 2008.
- Z. Lian and J. Wang. “Molecularly imprinted polymer for selective extraction of malachite green from seawater and seafood coupled with high-performance liquid chromatographic determination”, **Mar. Pollut. Bull.** 12(64): 2656-2662; December, 2012.

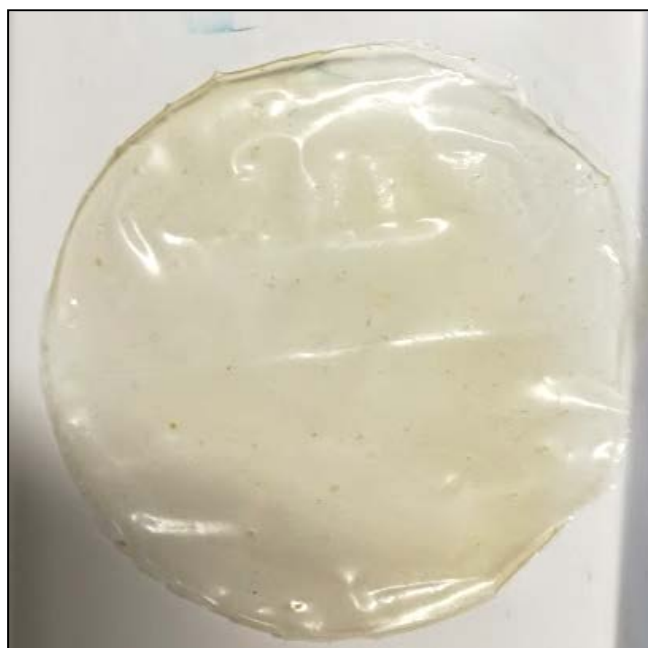
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาพฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ ฟิล์มเพคตินธรรมชาติ ฟิล์มคอมโพสิตทางการค้า
และฟิล์มเพคตินทางการค้า



ภาพที่ ก.1 फिल्मคอมโพสิตธรรมชาติ (CN film)



ภาพที่ ก.2 फिल्मเพคตินธรรมชาติ (PN film)

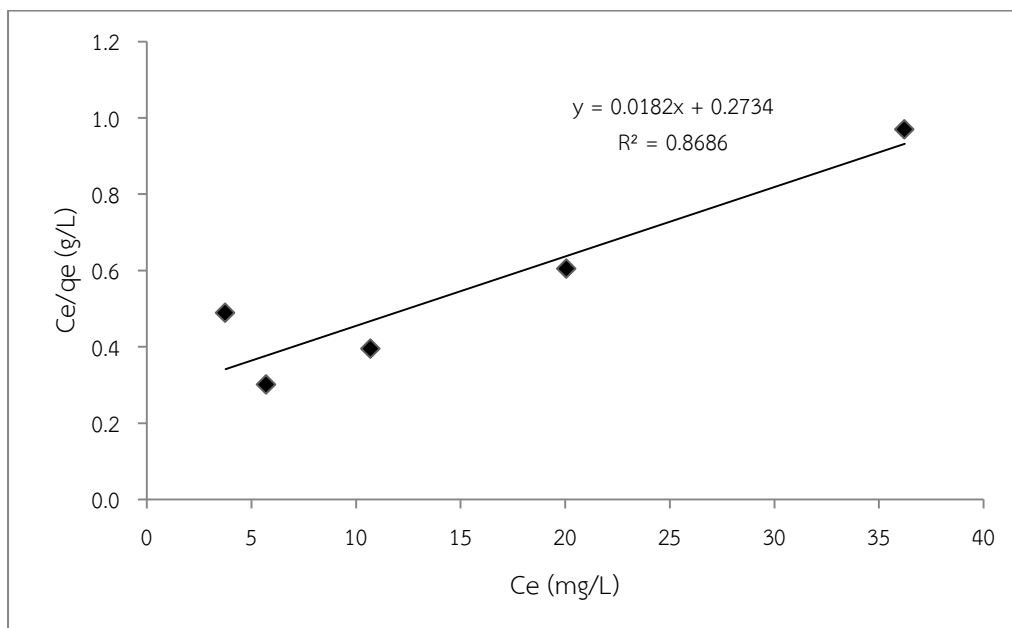


ภาพที่ ก.3 फिल्मคอมโพลิตทางการค้า (CC film)

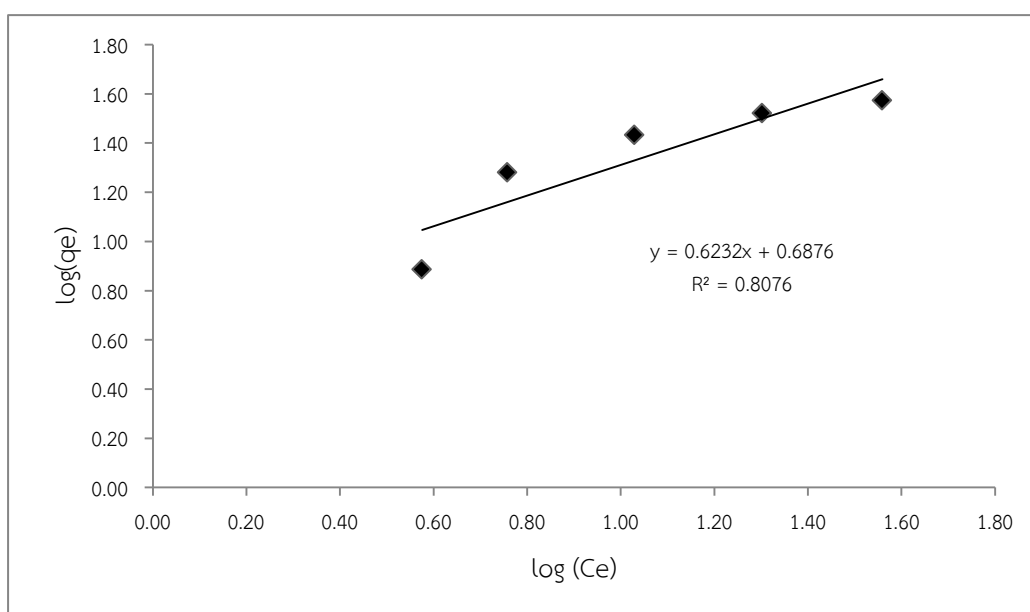


ภาพที่ ก.4 फिल्मเพคตินทางการค้า (PC film)

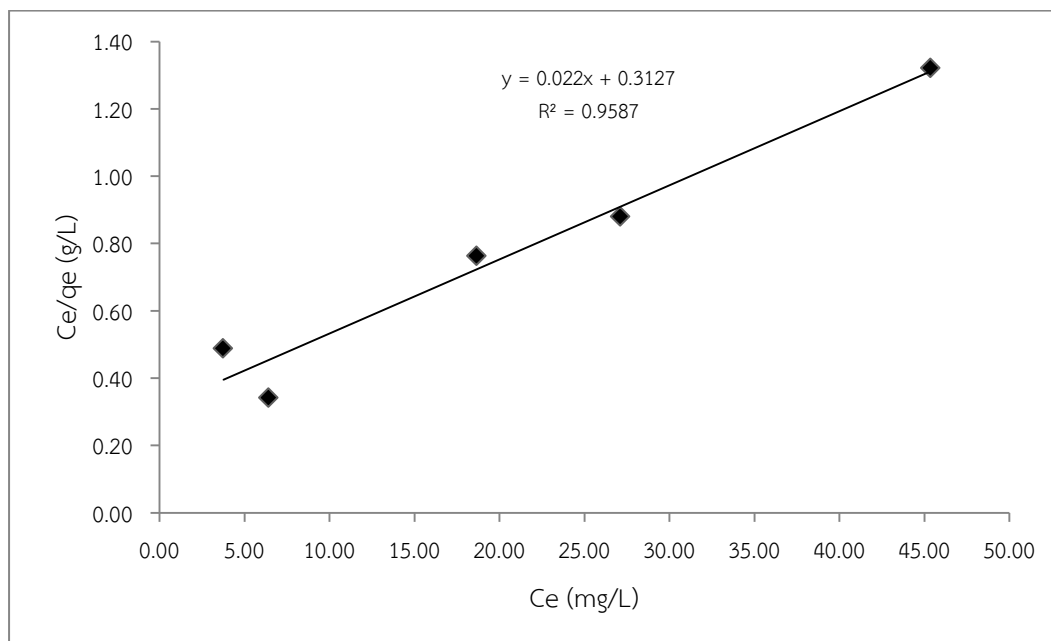
ภาคผนวก ข
ผลการศึกษาสมดุผลการดูฉบับ



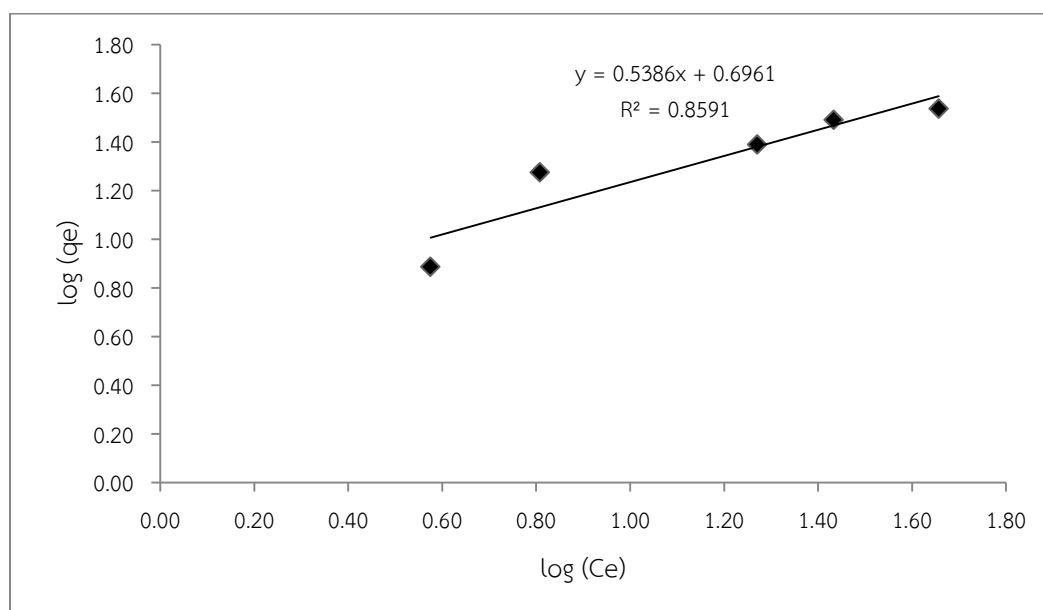
ภาพที่ ข.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากสารละลายสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 35 °C และ pH = 3.80±0.5



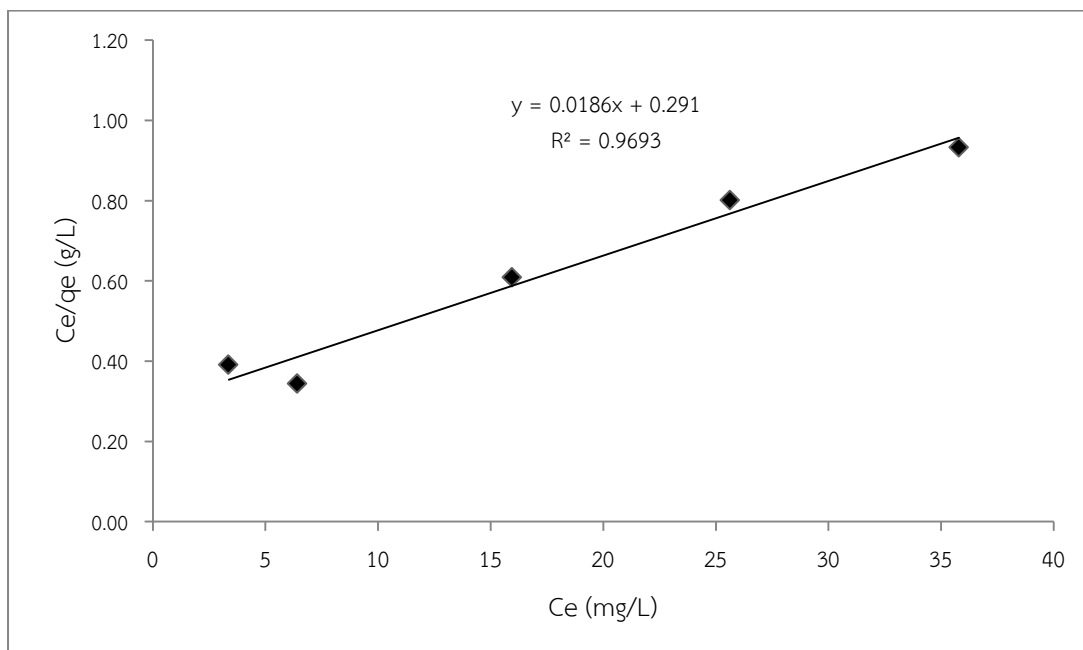
ภาพที่ ข.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชจากสารละลายสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 35 °C และ pH = 3.80±0.5



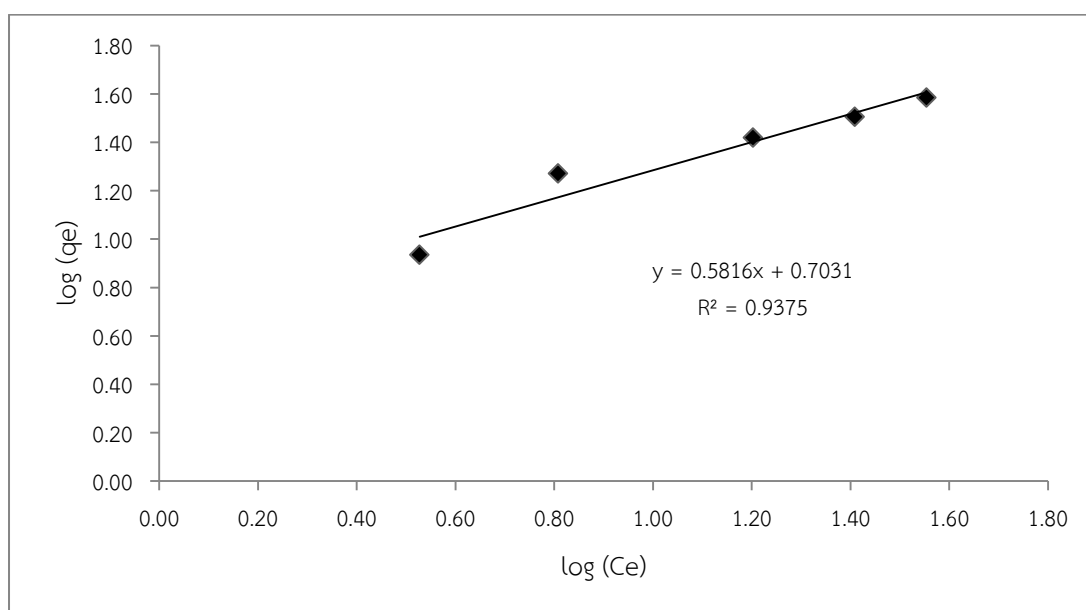
ภาพที่ ข.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากสารละลายสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต
ธรรมชาติปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 45 °C และ pH = 3.80±0.5



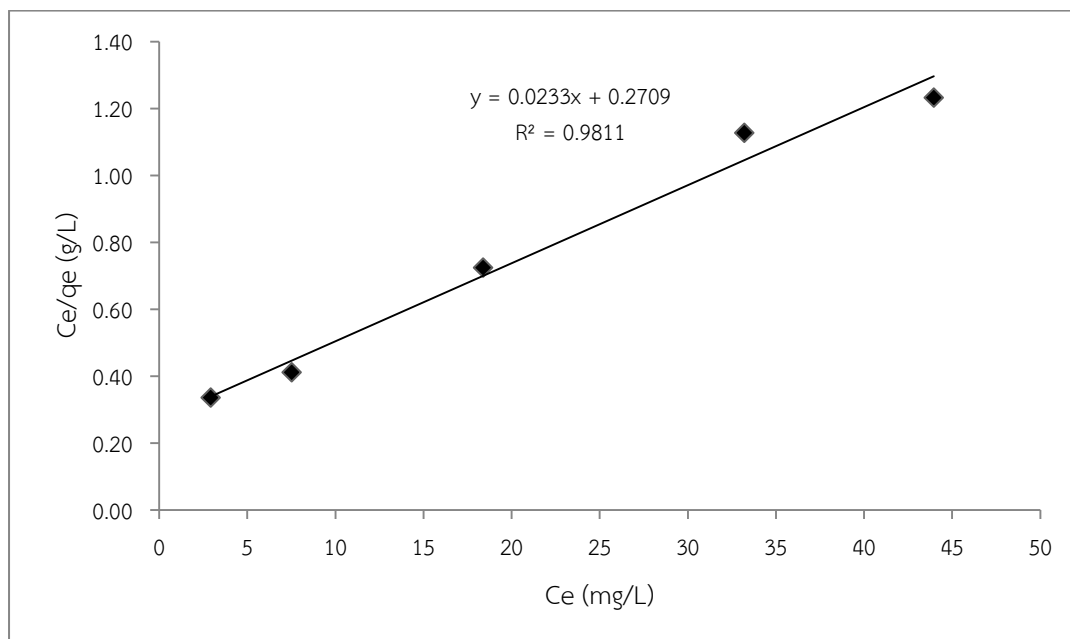
ภาพที่ ข.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชจากสารละลายสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต
ธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 45 °C และ pH = 3.80±0.5



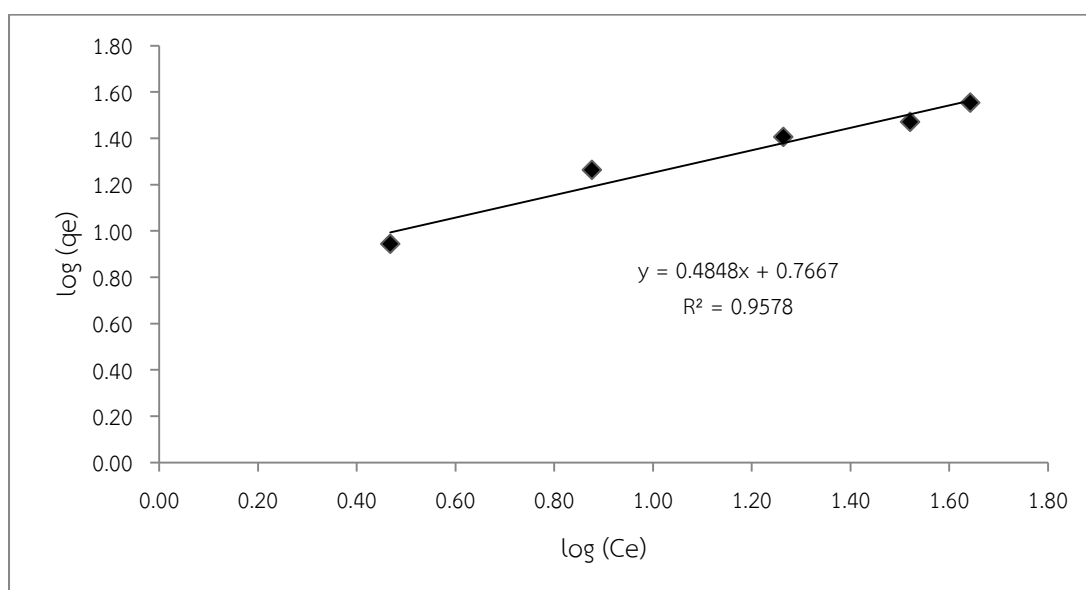
ภาพที่ ข.5 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากสารละลายสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต
ธรรมชาติปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 55 °C และ pH = 3.80±0.5



ภาพที่ ข.6 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชจากสารละลายสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต
ธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 55 °C และ pH = 3.80±0.5

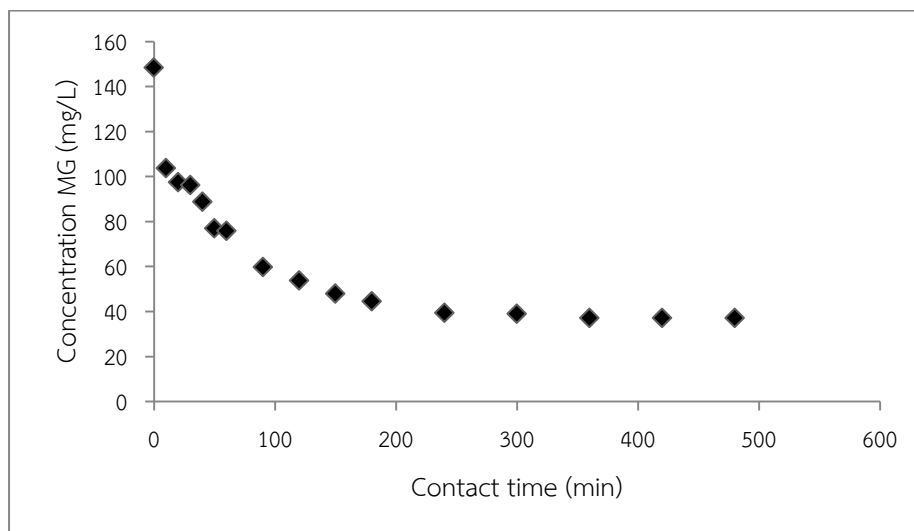


ภาพที่ ข.7 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์จากสารละลายสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต
ธรรมชาติปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 65 °C และ pH = 3.80±0.5

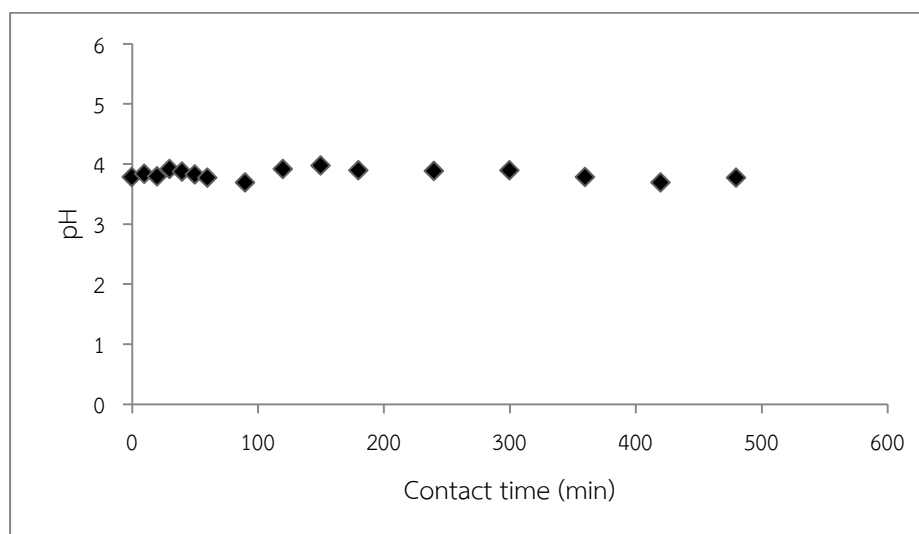


ภาพที่ ข.8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรันทิชจากสารละลายสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต
ธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 65 °C และ pH = 3.80±0.5

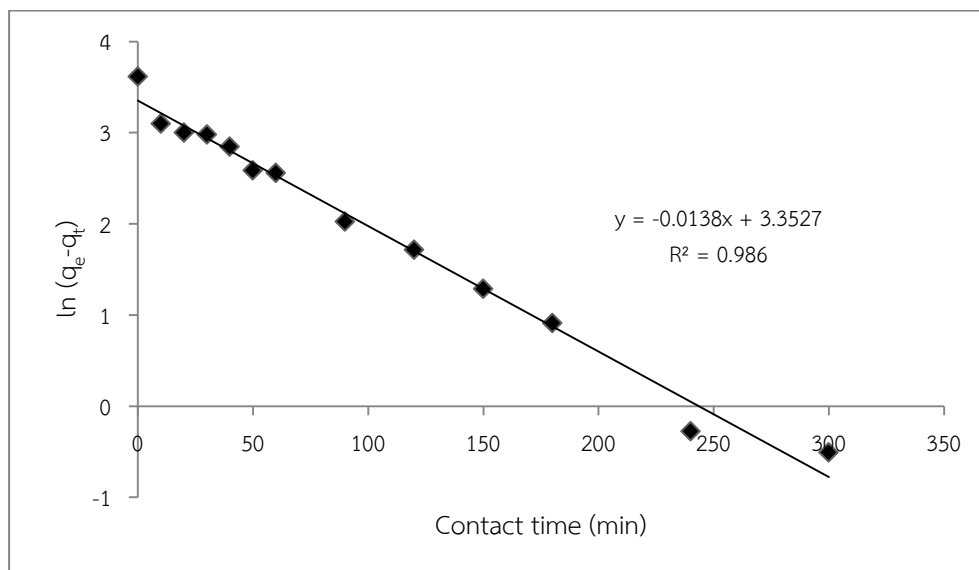
ภาคผนวก ค
ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ



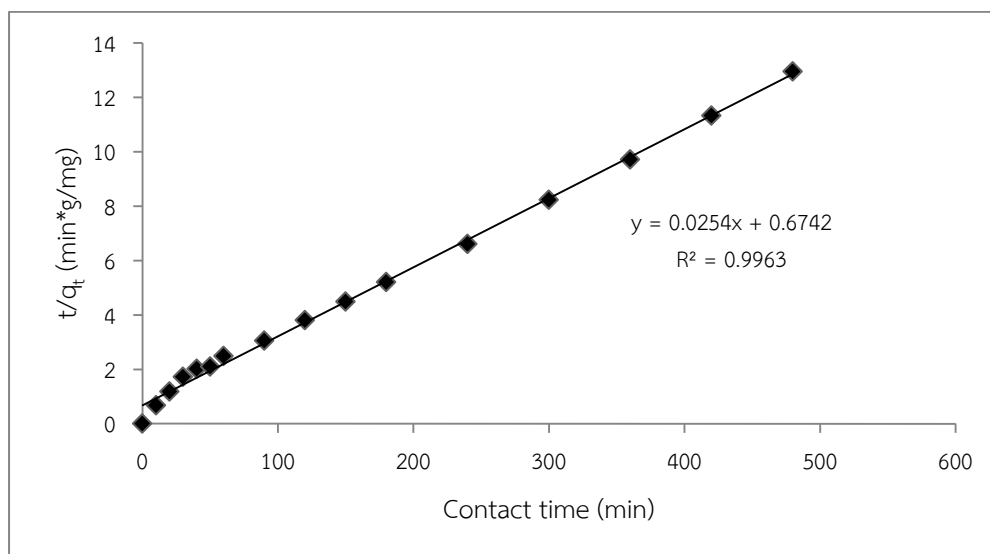
ภาพที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม MG กับเวลาสัมผัส ที่ $C_0 = 148.39 \text{ mg/L}$ โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเอสเตอร์ธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 35°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



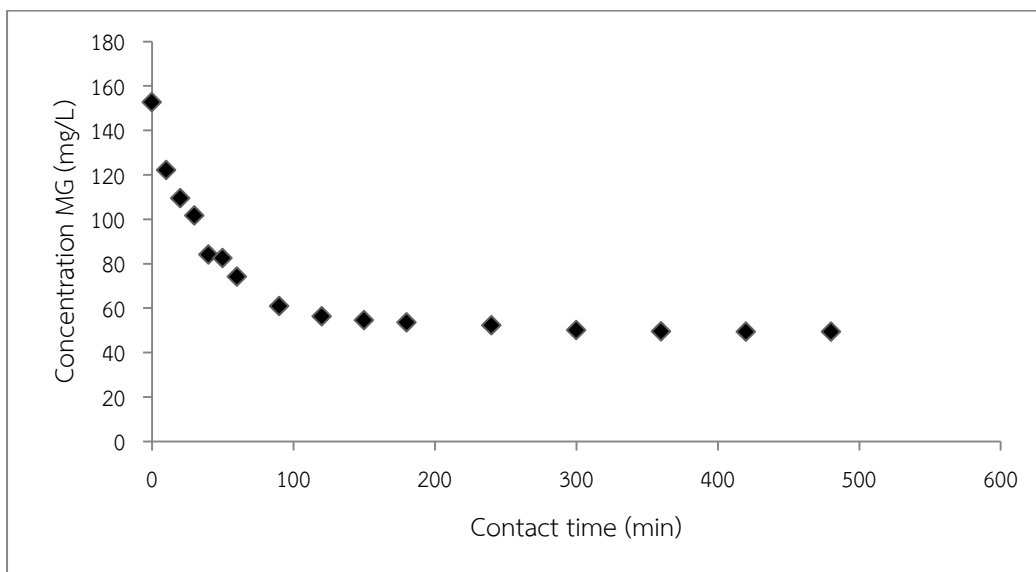
ภาพที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม MG กับเวลาสัมผัส โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเอสเตอร์ธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 35°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



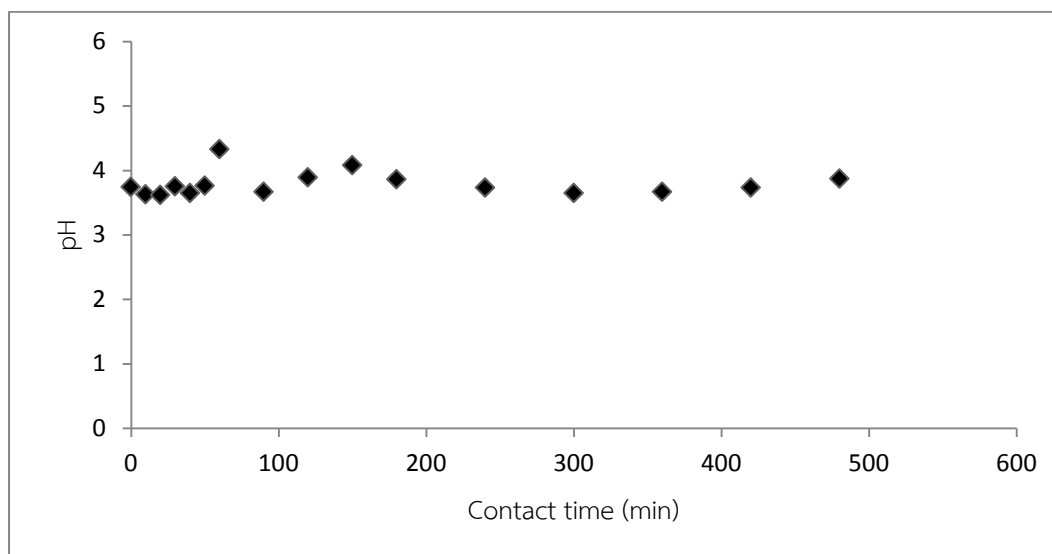
ภาพที่ ค.3 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo – first order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 148.39 \text{ mg/L}$ โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเอทเธอร์มชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 35°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



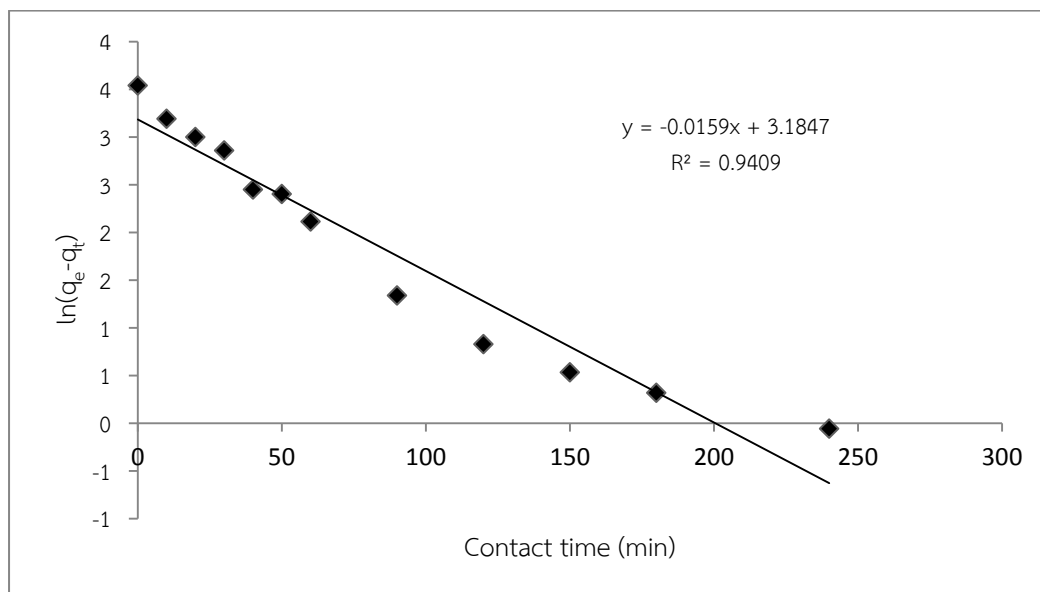
ภาพที่ ค.4 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo – second order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 148.39 \text{ mg/L}$ โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเอทเธอร์มชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็น ตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 35°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



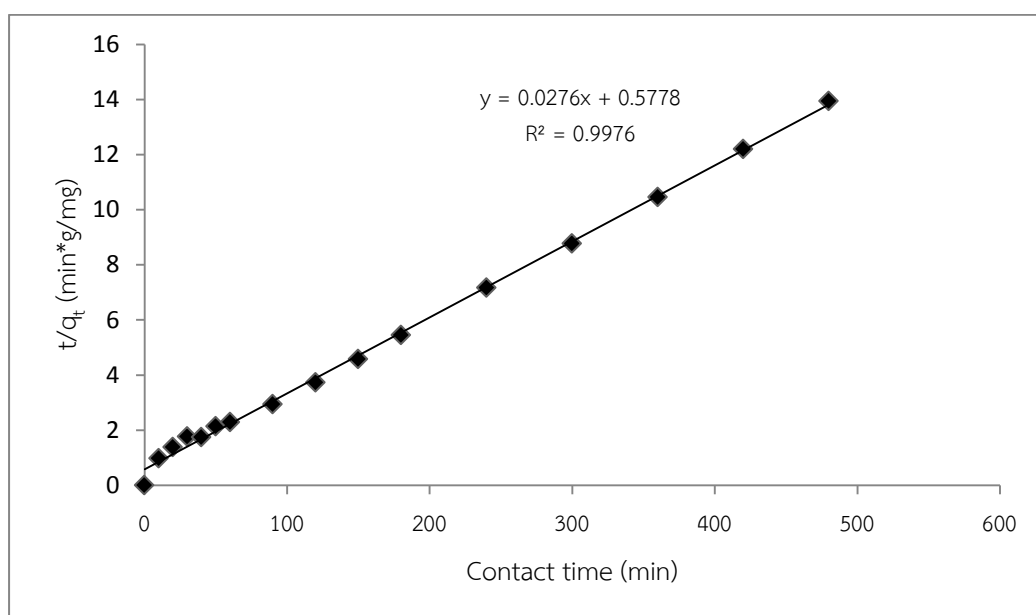
ภาพที่ ค.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม MG กับเวลาสัมผัส ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเมอร์ชนิด ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 45°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



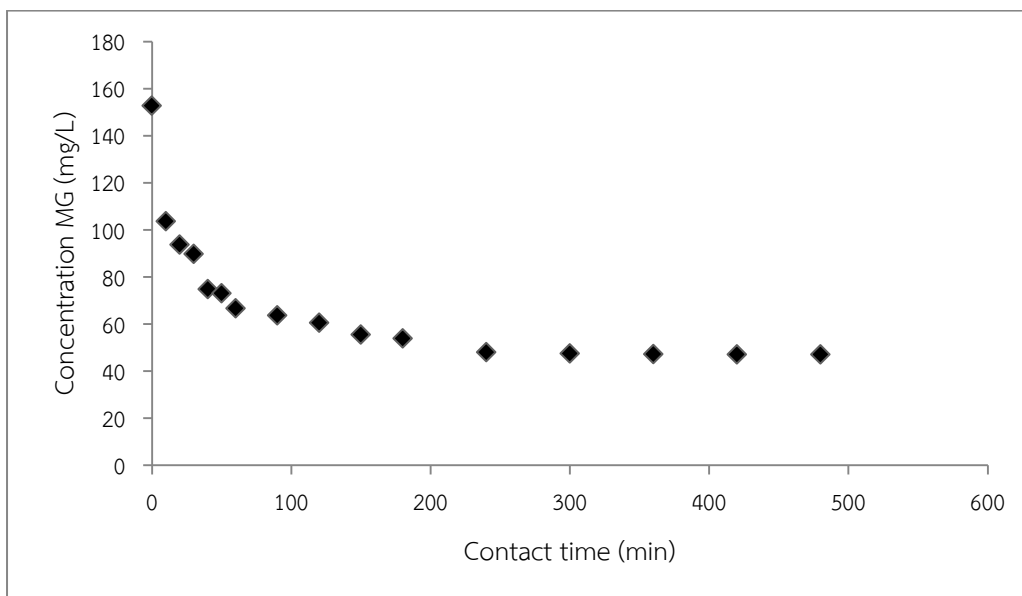
ภาพที่ ค.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม MG กับเวลาสัมผัส โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเมอร์ชนิด ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 45°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



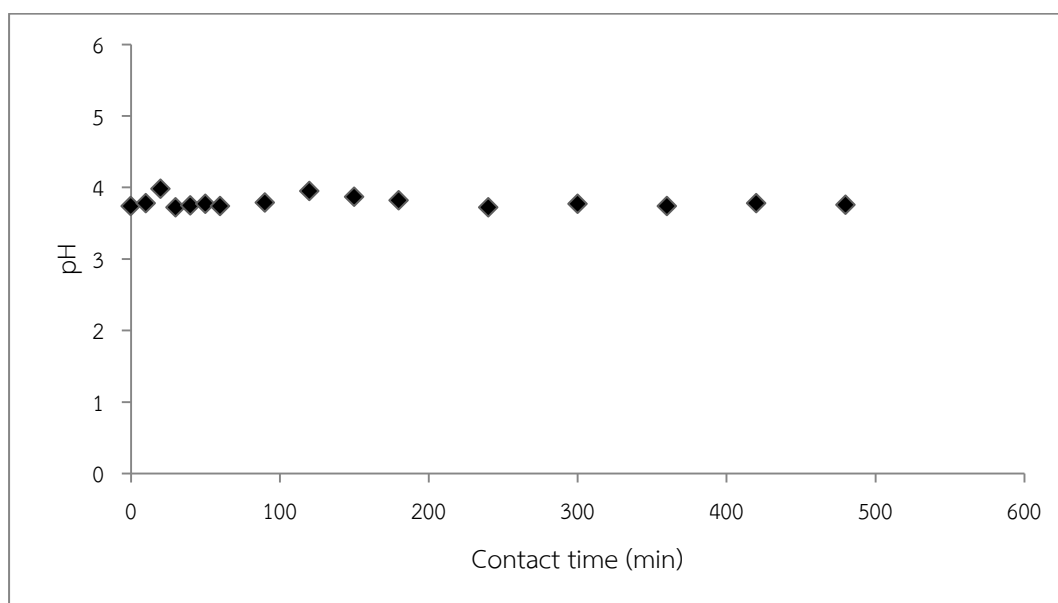
ภาพที่ ค.7 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo – first order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเอทรีเร็นซ์ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 45°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



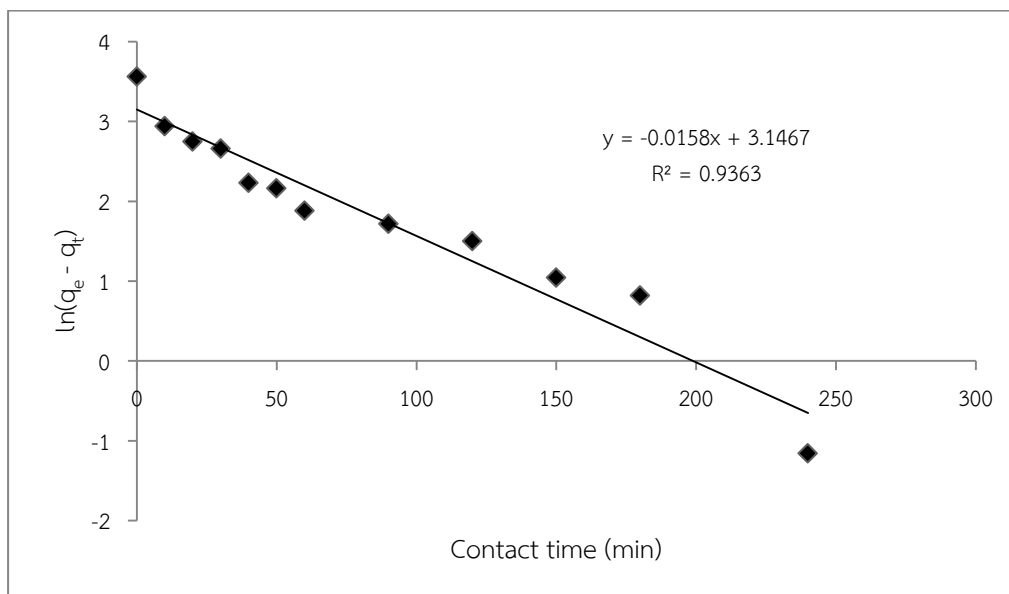
ภาพที่ ค.8 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo – second order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเอทรีเร็นซ์ ปริมาณ 0.3 g เป็น ตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 45°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



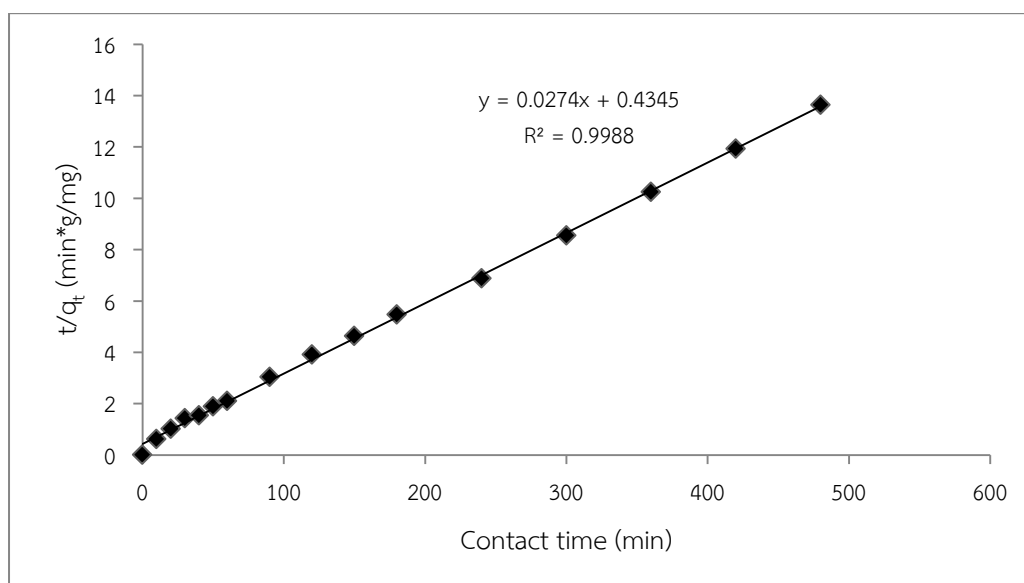
ภาพที่ ค.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม MG กับเวลาสัมผัส ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเอสเตอร์ธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 55°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



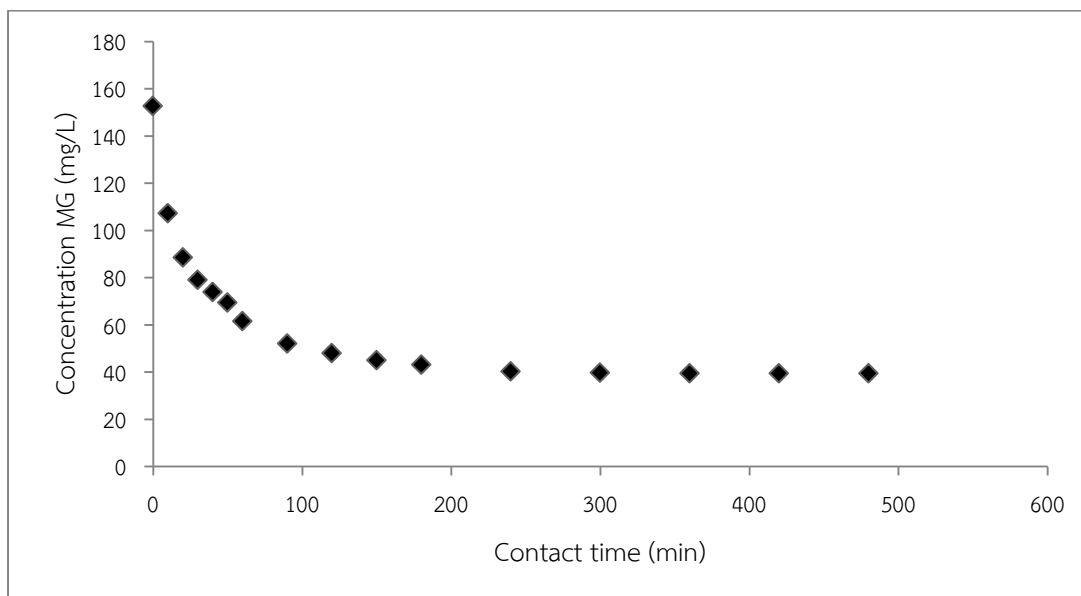
ภาพที่ ค.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม MG กับเวลาสัมผัส โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเอสเตอร์ธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 55°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



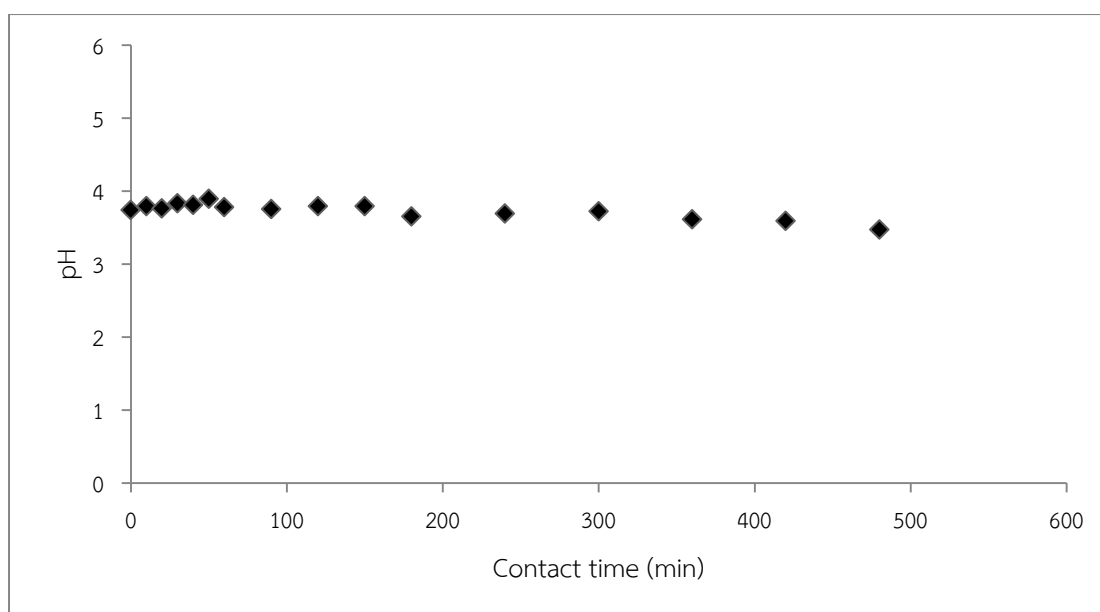
ภาพที่ ค.11 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo – first order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 55°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



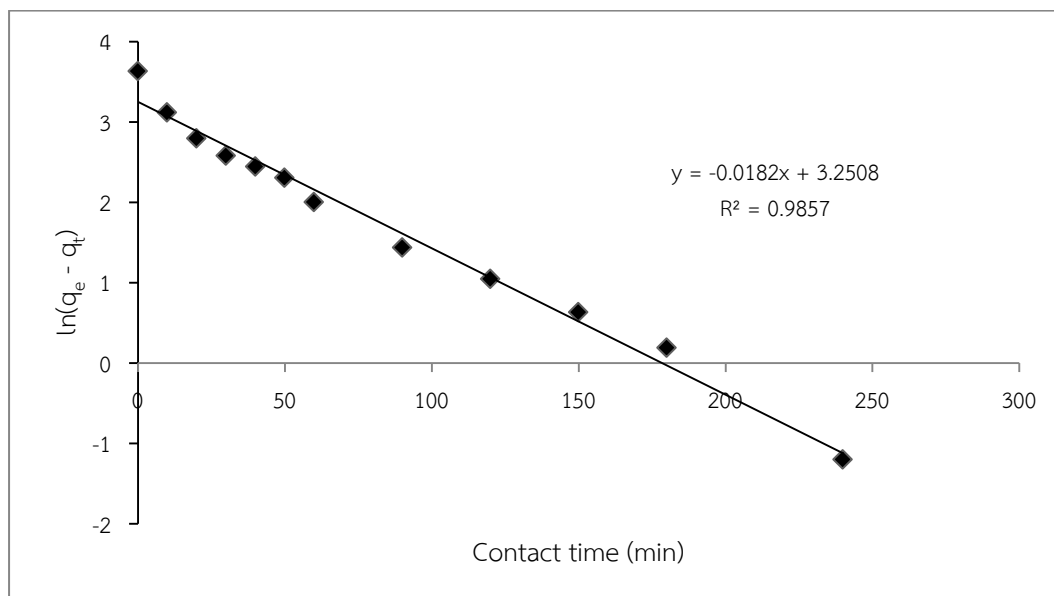
ภาพที่ ค.12 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo – second order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 55°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



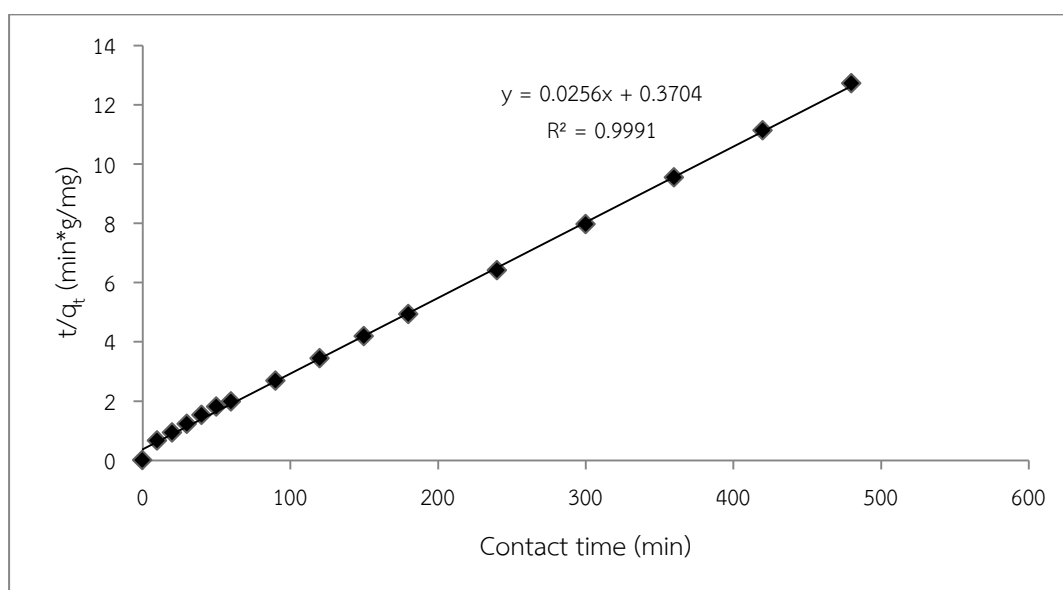
ภาพที่ ค.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม MG กับเวลาสัมผัส ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเอสเตอร์ธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 65°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



ภาพที่ ค.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของสารละลายสีย้อม MG กับเวลาสัมผัส โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเอสเตอร์ธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 65°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



ภาพที่ ค.15 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo – first order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 65°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$



ภาพที่ ค.16 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo – second order) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่ $C_0 = 152.62 \text{ mg/L}$ โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ ปริมาณ 0.3 g เป็นตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ 65°C และ $\text{pH}_0 = 3.80 \pm 0.5$

ภาคผนวก ง
ค่าใช้จ่ายในการผลิตฟิล์มคอมโพสิटरธรรมชาติ

ตารางที่ ง.1 ค่าใช้จ่ายในการผลิตฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ

รายการ	ราคา (บาท)
-การสกัดเพคตินธรรมชาติ	
- กรดซิตริก 0.1 N 250 ml	3.15
- เอทานอล 95% 300 ml	90
- อะซิโตน 99.5% 100 ml	18
รวม	111.15
-การผลิตฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ	
- แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ 0.5 g	0.007
- โซเดียมอัลจิเนต 1 g	21.4
- แคลเซียมคลอไรด์ 7.40 g	9.62
- กลีเซอรอล 5.6 g	3.25
รวม	34.27
รวมทั้งสิ้น	145.42

หมายเหตุ:

- (1) ค่าใช้จ่ายในการผลิตฟิล์มคอมโพสิตต่อครั้ง ได้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติประมาณ 3.37 g สามารถนำไปดูดซับสีย้อมปริมาณ 100 ml ได้ประมาณ 11 ครั้ง เมื่อใช้ตัวดูดซับ 0.3 g
- (2) สารเคมีที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้มีความบริสุทธิ์สูง จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตฟิล์มสูง ถ้าหากใช้สารเคมีที่มีความบริสุทธิ์น้อยลง จะสามารถลดต้นทุนในการผลิตฟิล์มได้

ภาคผนวก จ
ผลงานการนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ

การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ Adsorption of Malachite green dye using natural composite film

พัชราภรณ์ จันทวี¹, จักรกฤษณ์ อัมพข²

¹บัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

85 ถนนสถลมารค ตำบลเมืองศรีโค อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน (Malachite green : MG) จากน้ำสีสังเคราะห์โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต ซึ่งสังเคราะห์จากเพคตินธรรมชาติที่สกัดจากเปลือกเสาวรส (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) กับแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite clay , MMT) ผลการศึกษาการดูดซับแบบกะ พบว่าฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ (CS film) สามารถดูดซับสีย้อม MG ได้มากกว่าฟิล์มเพคตินธรรมชาติ (PS film) และฟิล์มคอมโพสิตทางการค้า (CC film) ปริมาณการดูดซับเข้าสู่สมดุลที่เวลา 180 นาที พฤติกรรมการดูดซับมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และความสามารถในการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดเท่ากับ 39.37 mg/g ข้อมูลอัตราการดูดซับสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติมีประสิทธิภาพในการดูดซับสี MG จากน้ำสีสังเคราะห์ได้ดี

คำสำคัญ : ฟิล์มคอมโพสิต , สีย้อมมาลาไคท์กรีน , เพคติน , แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ , การดูดซับ

Abstract

The purpose of this present work is to study the removal of Malachite green (MG) in aqueous solution by using composite film which was synthesized by mixing natural pectin excreted from passion fruit peel (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) and montmorillonite clay as the adsorbent. Batch adsorption results show that amount of MG adsorbed on natural composite film was higher than that of natural pectin film and commercial composite pectin film. The adsorption was reached equilibrium stage at 180 min. The adsorption isotherm follows Langmuir equation and the maximum monolayer adsorption capacity was 39.37 mg/g. In addition, the kinetic data confirm to pseudo-second order kinetic model. The experiment results shown that the natural composite film has high adsorption efficiency to MG in aqueous solution.

Keywords: composite film, Malachite green, pectin, montmorillonite clay, adsorption

จนเข้ากันประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.4 g/L 30 mL กวนต่อไปจนกระทั่งสารละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 30 นาที เทสารละลายที่ได้ลงในจานเลี้ยงเชื้อ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง นำฟิล์มที่ได้มา Crosslinking ด้วยสารละลายที่ประกอบไปด้วยแคลเซียมคลอไรด์ 7%

(g/mL) และ กลีเซอรอล 5% (g/mL) ปริมาณ 50 mL เป็นเวลา 30 นาที วางฟิล์มคอมโพสิตที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิห้องจนแห้ง บรรจุใส่ถุงพลาสติกที่ปิดมิดชิด และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C

4. วิธีการเตรียมและวัดความเข้มข้นของสีย้อม

สารละลายสต็อก (Stock solution) ของสีย้อมความเข้มข้น 150 mg/L จะถูกเตรียมโดยทำการละลายสีย้อมมาลาโคท์กรีน จำนวน 0.15 กรัมในน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตร หลังจากนั้นทำการเตรียมสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ในช่วง 30 – 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยวิธีการเจือจาง การวัดความเข้มข้นของสีย้อมผ้าในสารละลาย ทำได้โดยการวัดความเข้มของแสงส่องผ่านในรูปของค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Absorbance, Abs) โดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer แล้วเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน ตามวิธีของ Umpuch and Sakaew [11]

5. การศึกษาการดูดซับแบบกะ

การศึกษาการดูดซับแบบกะของสีย้อมผ้า ประกอบไปกับการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ การศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้น และการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ โดยทำการทดลองในลักษณะเดียวกันกับ Umpuch and Sakaew [11]

ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (q_t : mg/g) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และเปอร์เซ็นต์การกำจัด (%removal) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2

$$q_t = \frac{V(C_0 - C_t)}{m} \quad (1)$$

$$\%removal = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

โดย C_0 คือ ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น (mg/L) C_t คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลาใดๆ (mg/L) m คือ ปริมาณของตัวดูดซับ (g) และ V คือปริมาตรของ

สารละลาย (L)

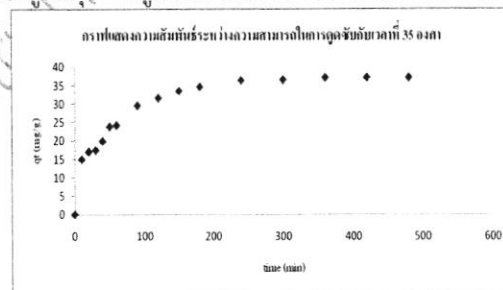
3. ผลการทดลอง

1. ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต พบว่า CS film มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม MG มากกว่า PS film และ CC film โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมของ PS film CS film และ CC film ได้แก่ 2.03% 75% และ 68.45% ตามลำดับ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะเลือกใช้ CS film เป็นตัวดูดซับเท่านั้น

2. ผลการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับ

การศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับ ได้ผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลาสัมผัส พบว่า ความสามารถในการดูดซับของสีย้อมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และจะเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับภายในเวลาประมาณ 180 นาที



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อมกับเวลาสัมผัสของน้ำสีสังเคราะห์สีย้อม MG ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ CS film 0.3 g เป็นตัวดูดซับ $C_0 = 150$ mg/L และ pH = 3.48

3. ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

เพื่อศึกษากลไกการดูดซับของสีย้อมมาลาโคท์กรีนบน CS film ผลการทดลองจะถูกนำมาพล็อตกับสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order model) สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order model) [11]

แบบจำลองการดูดซับเชิงพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมเป็นแบบจำลองอย่างง่าย [12] โดยมีสมมติฐานว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของพื้นผิวของตัวดูดซับ

ที่ว่างจากตัวถูกดูดซับ ถ้าข้อมูลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียมแสดงว่า

ขั้นตอนการซึมผ่านชั้น Boundary layer ที่ห่อหุ้มตัวดูดซับของสีย้อมเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (Rate of limiting step) ซึ่งเป็นไป

ตามสมการที่ 3

$$\frac{dq_e}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (3)$$

ที่ซึ่ง $k_1(\text{min}^{-1})$ คือ ค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่งเทียมของ Lagergren q_e คือ ปริมาณสีย้อมในตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g) เมื่อจัดรูปของสมการให้เป็นเส้นตรง จะได้

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (4)$$

แบบจำลองการดูดซับเชิงพลศาสตร์อันดับสองเทียม [7] มีสมมติฐานว่า อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ว่างจากตัวถูกดูดซับถ้าข้อมูล

การทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเทียม แสดงว่าขั้นตอนการสร้างความยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (Rate of limiting step) ซึ่งมีสมการเป็นไปตามสมการที่ 5

$$\frac{dq_e}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (5)$$

ที่ซึ่ง $k_2(\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min}))$ คือ ค่าคงที่อัตราอันดับสองเทียม เมื่อจัดรูปของสมการให้เป็นเส้นตรง จะเป็นไปตามสมการที่ 6

$$\frac{t}{q_e} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

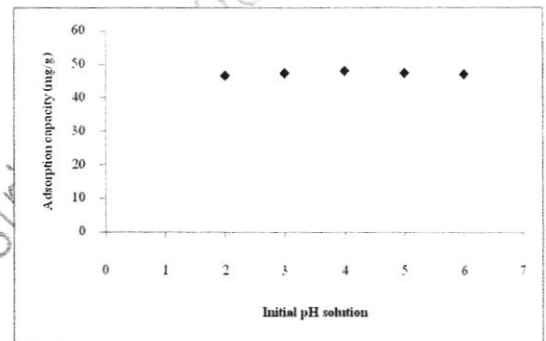
เมื่อนำผลการทดลองมาพล็อตกับสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม และสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้ แสดงในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 และพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะพบว่า อัตราการดูดซับกับสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9860 และค่า q_e ที่คำนวณจากแบบจำลองเท่ากับ 28.58 mg/g และสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม ค่า R^2 เท่ากับ 0.9963 และค่า q_e ที่คำนวณจากแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 39.37 mg/g

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสมการอันดับหนึ่งเทียมและสมการอันดับสองเทียมของการดูดซับสีย้อม MG จากน้ำสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิห้อง

$Q_{e,exp}$ (mg/g)	Pseudo-first order			Pseudo-second order		
	$k_1 \times 10^2$ (min^{-1})	$Q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2	$k_2 \times 10^3$ ($\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$)	$Q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2
36.34	1.38	28.58	0.9860	0.96	39.37	0.9963

4. ผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

ภาพที่ 2 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อความสามารถในการดูดซับ ในช่วงค่า พีเอช 2-6 ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเริ่มต้น 150 mg/L พบว่าความสามารถในการดูดซับมีค่าใกล้เคียงกันมาก



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อมกับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ที่ $C_0 = 150 \text{ mg/L}$ โดยใช้ CS flm 0.3 g เป็นตัวดูดซับ $C_0 = 150 \text{ mg/L}$ และที่อุณหภูมิห้อง

5. ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับศึกษาเพื่อทราบกลไกของการดูดซับสีย้อม ไอโซเทอมของการดูดซับ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่อยู่บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับกับความ

เข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของเหลวที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบจำลองที่อธิบายได้โดยสมการซึ่งมีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์กลไกการดูดซับ ส่วนใหญ่พฤติกรรมของการดูดซับในของเหลวจะมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

(Langmuir) และแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich)

ไอโซเทอมแลงเมียร์ [14] มีสมมติฐานว่าตัวถูกดูดซับจะเข้าไปปกคลุมพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer) และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกิดขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 8

$$q_e = \frac{k_L q_{\max} C_e}{1 + k_L C_e} \quad (8)$$

โดย $q_{\max}$ คือ ปริมาณการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุด (mg/g) และ k_L คือค่าคงที่ของแลงเมียร์

สำหรับการหาค่าคงที่ในสมการที่ 8 สามารถทำได้โดยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e โดยจัดรูปสมการที่ 8 ให้อยู่ในรูปเส้นตรงใช้สมการที่ 9 ได้แก่

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_{\max}} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (9)$$

เมื่อหาค่า $1/\text{ความชัน}$ จะได้ค่า $q_{\max}$ และทำการหาค่า k_L จาก $1/\text{จุดตัดแกน } C_e/q_e$ แล้วแทนค่า $q_{\max}$ ที่ได้นอกจากนี้ ยังมีตัวแปรที่มีความสำคัญของไอโซเทอมแลงเมียร์ ได้แก่ ค่าปัจจัยการแยก (Separation factor) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ R_L ซึ่งนิยามในสมการที่ 10

$$R_L = \frac{1}{1 + k_L C_0} \quad (10)$$

ค่า R_L มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แสดงว่า การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี

(Favorable) ขณะที่ค่า $R_L = 1$ หรือ $R_L = 0$ จะชี้ให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมเกิดขึ้นได้ไม่ดีหรือเป็นไอโซเทอมที่ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible adsorption isotherms) ค่า R_L ในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าค่า R_L ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี (favorable)

ไอโซเทอมฟรอนดิช [14] มีสมมติฐานว่า ตัวถูกดูดซับจะเข้าไปยึดจับกันเป็นชั้น ๆ (Multilayer) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous surface) ดังสมการที่ 11

$$q_e = k_f C_e^{1/n} \quad (11)$$

ค่าคงที่ k_f คือค่าคงที่ของการดูดซับ ((mg^{1-1/n} · L^{1/n})/g) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานพันธะและ n เป็นค่าคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันเอง ถ้า $n > 1$ แสดงว่า มีแรงผลักระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันเอง ถ้า n เข้าใกล้ 0 แสดงว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันสูง

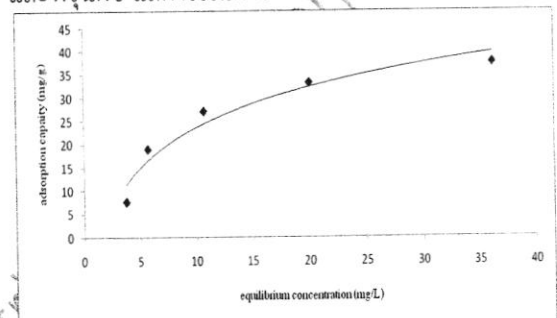
ค่าคงที่ของไอโซเทอมฟรอนดิช สามารถหาได้ โดย

การพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e)$ กับ $\ln(C_e)$ โดยใช้สมการที่ 12 ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการที่ 11 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (12)$$

เมื่อหาค่า $1/\text{ความชัน}$ จะได้ค่า n และค่าคงที่ k_f หาได้จากค่าเอกซ์โพเนนเชียลของค่าจุดตัดแกน $\ln(q_e)$

ไอโซเทอมการดูดซับของสี MG ด้วยฟิล์มคอมโพสิต แสดงไว้ในภาพที่ 3 ค่า R^2 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการนำผลการทดลองการดูดซับสีย้อมมาพล็อตกับสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรอนดิช แสดงไว้ในตาราง 2



ภาพที่ 3 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์ของสีย้อม MG ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตจากพอลิไธโอเซน 0.3 g เป็นตัวดูดซับ $C_0 = 150$ mg/L และที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรอนดิชของการดูดซับสีย้อม MG ที่อุณหภูมิห้อง

ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอมแบบฟรอนดิช		
q_m (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	N	R^2
54.95	0.067	0.868	1.99	1.6	0.8076
		6		0	

4. อภิปรายผลการทดลอง (Discussion)

1. ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

จากผลการทดลอง พบว่า CS film มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด เนื่องจาก MMT ที่ผสมอยู่ใน CS film ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้มากขึ้น เมื่อเทียบกับ PS film ส่วน CC film อาจจะมีความบริสุทธิ์มากกว่า CS film ทำให้มีรูพรุนขนาดเล็กกว่า CS film ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับน้อยกว่า CS film

2. ผลการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับ

จากผลการทดลอง พบว่า ความสามารถในการดูดซับ

จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับเริ่มต้นไม่มีสีย้อมยึดเกาะอยู่ โมเลกุลของสีย้อมจึงสามารถเข้าไปยึดจับกับพื้นผิวของตัวดูดซับได้ง่ายและรวดเร็ว เมื่อระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง พื้นที่ผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมไปด้วยสีย้อมจนเต็ม และจะเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับภายในเวลาประมาณ 180 นาที

3. ผลการศึกษาจากจลนพลศาสตร์การดูดซับ

จากผลการทดลอง พบว่าอัตราการดูดซับของงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม แสดงว่าขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าที่สุด

4. ผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

จากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าต่างกันน้อยมาก แสดงให้เห็นว่า ค่า pH มีผลต่อการดูดซับน้อยมาก

5. ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

จากผลการทดลอง พบว่า มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ มากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นในลักษณะแบบชั้นเดียว

5. สรุปผลการทดลอง

ฟิล์มคอมโพสิตที่ใช้เทคนิคธรรมชาติจากเปลือกเสาวรส สามารถดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนได้ มีประสิทธิภาพการดูดซับประมาณ 75% และกระบวนการดูดซับจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 180 นาที ไอโซเทอมการดูดซับมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ แสดงว่า สีย้อมปกคลุมพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว โดยอัตราการดูดซับ มีความสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม แสดงว่าขั้นตอนการสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสีย้อมกับตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นขั้นกำหนด และจากการทำการทดลองพบว่า การใช้ฟิล์มคอมโพสิตเป็นตัวดูดซับ สามารถลดช่วงเวลาในการแยกตัวดูดซับออกจากสารที่ถูกดูดซับได้มากสะดวกในการใช้งาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลองเป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang D, Liu L, Yu J, Chen X. Adsorption and removal of malachite green from aqueous solution using magnetic β -cyclodextrin-graphene oxidenano composites as adsorbent. Coll Surf a Physicochem Eng Asp (2015). And Dahrir MK, Kooch MRR, Lim LBL. Water remediation using low cost adsorbent walnut shell for removal of malachite green : equilibrium, kinetics, thermodynamic and regeneration studies. J Environ Chem Eng (2014).
- [2] Gupta V.K., Suhas. Application of low-cost adsorbents for dye removal. Journal of Environmental Management (2009).
- [3] Malik R., Ramteke D.S., & Wate S.R. Adsorption of malachite green on ground nut shell waste based powdered activated carbon. Waste Management (2007).
- [4] Mohan D., Singh K.P., Singh G., & Kumar K.. Removal of dyes from waste water using fly ash : A low-cost adsorbent. Industrial and Engineerin Research (2002).
- [5] Singh V., Sharma A.K., Tripathi D.N., & Sanghi R. Poly (methylmethacrylate) grafted chitosan : An efficient adsorbent for anionic azo dyes. Journal of Hazardous Material (2009).

- [6] Rahchamani J., Mousavi H.Z., & Behzad M. Adsorption of methyl violet from aqueous solution by polyacrylamide as an adsorbent : Isotherm and kinetic studies. Desalination (2011). And Sekhar C.P., Kalidhasan S., Rajesh V., & Rajesh N. Bio-polymer adsorbent for the removal of malachite green from aqueous solution. Chemosphere (2009).
- [7] Aleksandra R. Nesic, Sava J. Velickovic, Dusan G. Antonovic. Novel composite films based on amidated pectin for cationic dye adsorption. Colloids and Surfaces B : Biointerfaces (2013).
- [8] Pinheiro E.R., Silva Iolanda M.D.A., Gonzaga L.V., Amante E.R., Teoflo R.F., Ferreira Marcia, M.C., et al. Optimization of extraction of high-ester pectin from passion fruit peel (*Passiflora edulis flavicarpa*) with citric acid by using response surface methodology. Bioresource (2008).
- [9] Shan Qin Liew, Nyuk Ling Chin, Yus Aniza Yusof. Extraction and characterization of pectin from passion fruit Peels. Agriculture and Agricultural Science Procedia 2 (2014).
- [10] Fernanda L. Seixas , Franciele R. B. Turbiani , Patricia G. Salomão , Renata P. Souzaa, Marcelino L. Gimenesa. Biofilms composed of alginate and pectin: Effect of concentration of crosslinker and plasticizer agents. Chemical Engineering Transactions (2013).
- [11] Umpuch C. and Sakaew S. Removal of methyl orange from aqueous solution by adsorption using chitosan intercalated montmorillonite clay. Songklanakarin J. Sci. Technol. (2013).
- [12] Lagegren, S. and Svenska, B.K.. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe. Vaternskapsakad Handlingar (1898).
- [13] Lijian Leng , Xingzhong Yuan, Guangming Zeng , Jianguang Shao , Xiaohong Chen , Zhibin Wu , Hou Wang , Xin Peng . Surface characterization of rice husk bio-char produced by liquefaction and application for cationic dye (Malachite green) adsorption. Fuel (2015).
- [14] R. Wibulswas. 2004. Batch and fixed bed sorption of methylene blue on precursor and QACs modified montmorillonite. Separation and Purification Technology, 39. 3-12.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวพัชรภรณ์ จันทวี
วัน เดือน ปี เกิด	12 พฤษภาคม 2534
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมีและชีวภาพ) มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พ.ศ. 2555
นำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการ	พัชรภรณ์ จันทวี และจักรกฤษณ์ อัมพูช. “การดูดซับสี ย้อมมาลาไคท์กรีนโดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตธรรมชาติ”, ใน การประชุมวิชาการ และนำเสนอผลงานทางวิศวกรรม นวัตกรรม และการจัดการอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน ครั้งที่ 5: สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย, 2559