

การดูดซับสารตะกั่ว (II) โดยใช้ฟิล์มคอมโพลีเมอร์จากเปลือก
Passiflora edulis

ศุภมิตร คำผา

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



ADSORPTION OF LEAD (II) USING COMPOSITE PECTIN FILMS
FROM *PASSIFLORA EDULIS* PEEL

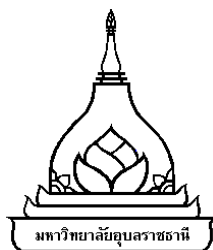
SUPAMITTRA KHAMPALA

AN INDEPENDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING

UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2021

COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การดูดซับสารตะกั่ว (II) โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์จากเปลือก *Passiflora edulis*

ผู้วิจัย นางสาวศุภมิตรา คำผาลา

คณะกรรมการสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ สมองราษฎร์	ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพูช	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย กันยารุณ	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพูช)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล ปุษยตานนท์)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2564

กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าอิสระนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ของอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพูช ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา แนะนำการแก้ไขปัญหา และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยนี้จนสำเร็จ รวมทั้งคณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ สอนงราษฎร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย กันยาวัธ ที่สละเวลาช่วยเหลือในการให้คำแนะนำ คำปรึกษา และการแก้ไขการค้นคว้าอิสระนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่อำนวยความสะดวก ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือและให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อน ๆ นักศึกษาปริญญาโทที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณงานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา ในด้านการเรียนและงานเอกสารต่างๆจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจเคียงข้างอยู่เสมอ ขอบพระคุณหน่วยงานต้นสังกัด โรงพยาบาลป่าดัวที่ให้ความอนุเคราะห์เวลาออกราชการเพื่อมาศึกษาต่อ รวมทั้ง อาสาสมัครสาธารณสุขประจำหมู่บ้านตำบลโพธิ์ไทรที่คอยให้กำลังใจและอยู่เคียงข้างเสมอ ขอขอบคุณหนังสือจากนี้วกลมที่ทำให้ผ่านพ้นความเหน็ดเหนื่อยในการฟันฝ่าอุปสรรคทุก ๆ ประการ ตลอดจนผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านในความกรุณาให้ความช่วยเหลือ ขอขอบพระคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ศุภมิตรา คำผาลา

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : การดูดซับสารตะกั่ว (II) โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตเพคตินจากเปลือก *Passiflora edulis*

ผู้วิจัย : ศุภมิตร คำผา

ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพช

คำสำคัญ : ตะกั่ว, การดูดซับ, ฟิล์มคอมโพสิตเพคติน, ฟิล์มเพคติน, แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือการดูดซับตะกั่ว (II) โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตเพคติน (CN film) ที่ประกอบด้วยเพคตินจากเปลือกเสาวรส (*Passiflora edulis*) และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของตัวดูดซับ พบว่า ลักษณะพื้นผิวของ CN film มีความราบเรียบ ขณะที่พื้นผิวของ MMT มีความพรุนสูง พื้นที่ผิวจำเพาะของ CN film มีค่าน้อยกว่า MMT ขณะที่มีความหนาแน่นรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่า มีการพบหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนพื้นผิวของ MMT บนพื้นผิว CN film ปริมาณธาตุคาร์บอนของ CN film สูงกว่า MMT CN film มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าฟิล์มเพคติน (PN film) เช่น มีความทนแรงดึงสูงกว่า และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดสูงกว่า ส่วนที่ 2 การหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่ว (II) ของ CN film พบว่า ปริมาณการดูดซับเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 109.15 mg/g ภายใต้สภาวะเวลาสัมผัส 150 นาที อุณหภูมิ 40 °C ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) 100 mg/L และ pH เริ่มต้น 5 นอกจากนี้ ผลการทดลองสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอร์มฟรุนดลิช ซึ่งเห็นว่าการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ข้อมูลสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงว่า ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นขั้นกำหนดอัตรา การใช้ 0.1 M HCl เป็นสารชะละลาย ทำให้เกิดการคายซับสูงสุดถึงร้อยละ 90.54 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า CN film เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่ว (II) ในน้ำเสียสังเคราะห์

ABSTRACT

TITLE : ADSORPTION OF LEAD (II) USING COMPOSITE PECTIN FILMS
FROM *PASSIFLORA EDULIS* PEEL

AUTHOR : SUPAMITTRA KHAMPALA

DEGREE : MASTER OF ENGINEERING

MAJOR : ENVIRONMENTAL ENGINEERING

ADVISOR : ASSOC. PROF. CHAKKRIT UMPUCH, Ph.D.

KEYWORDS : LEAD, ADSORPTION, PECTIN COMPOSITE FILMS, PECTIN FILM,
MONTMORILLONITE CLAY

The purpose of this study is to adsorb lead (II) using a composite pectin film (CN film) containing pectin derived from passion fruit peel (*Passiflora edulis*) and montmorillonite clay (MMT). The research was divided into 2 parts. First, the physical and mechanical properties of the adsorbents were determined. The CN film has a smooth, flat surface, whereas the MMT film is highly porous. CN film has a smaller specific surface area than MMT, but its average pore size is larger. Functional groups discovered on the surface of MMT can also be found on CN film. CN film has a higher carbon content than MMT. The mechanical properties of the CN film are superior to those of the pectin film (PN film), such as higher tensile strength and a higher percent elongation at break. Second, the optimum condition for lead (II) adsorption on CN film was determined. A contact time of 150 minutes with a temperature of 40 °C and an initial lead (II) concentration of 100 mg/L, with an initial pH of 5.0 was found to have the highest adsorption capacity of 109.15 mg/g. In addition, the results were more consistent with the Langmuir isotherms than the Freundlich isotherm, indicating monolayer adsorption. The data correspond to the pseudo-second order equation, indicating that the rate of reaction on the adsorbent surface is a rate-determining step. Using 0.1 M HCl as an eluent, the highest percent desorption of lead (II) was recorded at 90.54 percent. The findings indicate that CN film is an effective adsorbent for adsorbing lead (II) in synthetic wastewater.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความรู้ทั่วไปของสารโลหะหนัก (Heavy Metals)	5
2.2 ความรู้ทั่วไปของสารตะกั่ว (Lead)	5
2.3 ความรู้ทั่วไปของเสารส	6
2.4 ความรู้ทั่วไปของสารเพคติน	7
2.5 ความรู้ทั่วไปของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์	9
2.6 กระบวนการดูดซับ	10
2.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	13
2.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	18
2.9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	19
2.10 การคายซับ	20
2.11 หลักการทำงานของเครื่องสเปกโตรสโกปีการดูดกลืนแสงของอะตอม	20
2.12 หลักการทำงานของเครื่องสเปกโตรสโคปีแบบแยกกระจายพลังงาน	21
2.13 การศึกษาคุณสมบัติเชิงกล	23
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 กรอบงานวิจัย	27
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	28
3.3 การเตรียมเปลือกเสาวรศ	29
3.4 การสกัดสารเพคตินจากเปลือกเสาวรศ	29
3.5 การเตรียมฟิล์มคอมโพสิตเพคตินและฟิล์มเพคติน	30
3.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ	30
3.7 การวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสารตะกั่ว (II)	32
3.8 การศึกษาการดูดซับแบบกะ	33
3.9 การศึกษาการคายซับ	36
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ	38
4.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบกะ	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	53
5.2 ข้อเสนอแนะ	54
เอกสารอ้างอิง	55
ภาคผนวก	
ก การเตรียมสารละลายตะกั่ว (II) มาตรฐาน	61
ข ภาพฟิล์มเพคติน (PN film) และฟิล์มคอมโพสิตเพคติน (CN film)	63
ค สเปกตรัมที่แสดงธาตุต่างๆที่ปรากฏโดยเทคนิค FESEM ที่เชื่อมต่อกับ EDS	65
ง ผลการศึกษาสมดุลการดูดซับ	68
จ ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	73
ฉ ผลงานการนำเสนอในการประชุมวิชาการ	80
ประวัติผู้วิจัย	90

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี	12
4.1	ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	39
4.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง FESEM ที่เชื่อมต่อกับ EDS	41
4.3	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยและปริมาตรรูพรุนรวม	42
4.4	คุณสมบัติเชิงกลของตัวดูดซับ	44
4.5	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดและปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับ	44
4.6	งานวิจัยที่สนับสนุนข้อมูลเวลาในการสัมผัสที่เข้าสู่จุดสมดุล	45
4.7	ค่าคงที่สมการอัตราการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 – 60 °C	50
4.8	ค่าคงที่ไอโซเทอรั่มการดูดซับช่วงอุณหภูมิ 30 – 60 °C	51
4.9	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการคายซับสารตะกั่ว (II)	52

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	เสารสสายพันธุ์ผลสีเหลืองและสายพันธุ์ผลสีม่วง	6
2.2	โครงสร้างโมเลกุลของสารเพคตินในเนื้อเยื่อของพืช	7
2.3	สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของแรมอนต์มอริลโลไนต์	9
2.4	ประเภทของไอโซเทอร์มสำหรับดูดซับทางกายภาพตามการจำแนกของ IUPAC	14
2.5	ไอโซเทอร์มการดูดซับเชิงเส้นของ Langmuir	16
2.6	ไอโซเทอร์มการดูดซับเชิงเส้นของ Freundlich	17
2.7	ส่วนประกอบของเครื่อง AAS	21
2.8	สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FESEM	22
3.1	แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	27
4.1	ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ	38
4.2	ภาพสเปกตรัม FTIR ของ MMT, CN film และ PN film	40
4.3	ผลการวิเคราะห์จุด Point zero charge (pH_{pzc}) ของ CN film	43
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารตะกั่ว (II) ด้วย CN film กับเวลาสัมผัส ($C_0 = 120 \text{ mg/L}$, $pH_0 = 4.7 \pm 0.5$, อุณหภูมิ $30 - 60^\circ\text{C}$)	45
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารตะกั่ว (II) ด้วย CN film กับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ($C_0 = 120 \text{ mg/L}$, $pH_0 = 4.7 \pm 0.5$, เวลาสัมผัส 150 นาที, อุณหภูมิช่วง $30 - 60^\circ\text{C}$)	47
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับและค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่ว (II) ด้วย CN film กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) ที่แตกต่างกัน ($C_0 = 40 - 120 \text{ mg/L}$, $pH_0 = 4.7 \pm 0.5$, อุณหภูมิ 40°C)	48
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับและค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่ว (II) ด้วย CN film กับค่าพีเอชเริ่มต้นที่แตกต่างกัน ($pH = 2 - 6$, เวลาสัมผัส 150 นาที, อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นสารตะกั่ว (II) เริ่มต้น 100 mg/L)	49
4.8	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir โดยใช้ CN film อุณหภูมิ $30 - 60^\circ\text{C}$, $pH_0 = 4.7 \pm 0.5$	51

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ความหมาย
%	เปอร์เซ็นต์
%EI	ค่าเปอร์เซ็นต์การดั่งยัดที่จุดขาด
A	พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ (m^2/g)
AAS	Atomic Absorption Spectrophotometer
a_m	พื้นที่การดูดซับของหนึ่งโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ($\text{m}^2/\text{molecule}$)
BET	Brunauer Emmett and Teller
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
C	ค่าคงที่ของ BET
cm^3	ลูกบาศก์เซนติเมตร
cm^{-1}	จำนวนคลื่น (wave number) ต่อระยะทาง 1 หน่วย
C_0	ความเข้มข้นของสารโลหะหนักเริ่มต้น (mg/L)
C_e	ความเข้มข้นของสารโลหะหนักที่ภาวะสมดุล (mg/L)
CN film	ฟิล์มคอมโพสิต (Composite pectin film)
DI water	น้ำปราศจากไอออน
EDL	Electrodeless discharge lamp (หลอดที่ไม่มีขั้วไฟฟ้า)
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectrometer
g	กรัม
HCL	Hollow cathode lamp (หลอดฮอลโลว์แคโทด)
hr	ชั่วโมง (hour)
K	องศาเคลวิน (degrees Kelvin)
K_F	ค่าคงที่ของ Freundlich isotherm (L/g)
K_L	ค่าคงที่การดูดซับของ Langmuir isotherm (L/mg)
k_1	ค่าคงที่ของ Pseudo-first-order rate (min^{-1})
k_2	ค่าคงที่ของ Pseudo-second-order rate (g/mg.min)
L	ลิตร
m	น้ำหนักของตัวดูดซับ (adsorbent) (g)
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ความหมาย
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
MMT	แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite clay)
n	ความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity)
nm	นาโนเมตร
N_A	เลขอาโวกาโดร (6.023×10^{23} molecules/mole)
M^2	ตารางเมตร
ρ	ความหนาแน่นของแก๊สที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ (kg/m^3)
P	ความดันที่สมดุลของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิใดๆ (mmHg)
Pa	ปาสคาล (หน่วยของค่าความดัน)
P_0	ความดันที่อิ่มตัวของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิใดๆ (mmHg)
pH	ค่าพีเอช
pH_0	ค่าพีเอชเริ่มต้น
PN film	ฟิล์มเพคติน (Pectin film)
q_e	ปริมาณของสารโลหะหนักบนผิวของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
q_m	ปริมาณการดูดซับสูงสุดแบบชั้นเดียวของสารโลหะหนักบนผิวของตัวดูดซับต่อ หน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)
q_t	ปริมาณการดูดซับของสารโลหะหนักบนผิวของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (mg/g)
R^2	ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination)
$\bar{r}_p$	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
rpm	รอบต่อนาที (Revolutions per minute)
FESEM	Field Emission Scanning Electron Microscope
t	เวลา
$t_{1/2}$	ค่าครึ่งชีวิต
V	ปริมาตรของสารละลาย (mL)

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ความหมาย
V	ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับ (mL)
V _m	ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับสูงสุดแบบชั้นเดียว (cm ³ /g)
V _p	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)
V _s	ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับที่ ความดันสัมพัทธ์ (m ³)
w/w	เปอร์เซ็นต์โดยมวล (g/g)
v/v	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (mL/mL)
v/w	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรต่อมวล (mL/g)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ตะกั่ว (Lead) เป็นสารโลหะหนักลำดับต้น ๆ ที่สร้างปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหามลพิษทางน้ำซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กระบวนการผลิต การปศุสัตว์ และบ่อบำบัดน้ำเสีย ฯลฯ หากมีการปล่อยน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนของสารตะกั่วลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อาจเกิดการสะสม ตกค้างและปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมในระดับที่อันตรายได้ ดังเช่นปัญหาการปนเปื้อนของสารตะกั่วในน้ำใต้ดินรอบ ๆ บริเวณระบบกำจัดขยะมูลฝอยเทศบาลตำบลไผ่คำ จังหวัดอำนาจเจริญ ซึ่งสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 12 จังหวัดอุบลราชธานีได้ดำเนินการตรวจวัดคุณภาพน้ำใต้ดิน ณ วันที่ 1-2 สิงหาคม 2562 จำนวน 4 จุด พบว่ามีสารตะกั่วปนเปื้อนเกินค่ามาตรฐานของแหล่งน้ำใต้ดิน (ไม่เกิน 0.01 mg/L) จำนวน 2 จุด คือ 0.445 และ 0.021 mg/L (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 12 จังหวัดอุบลราชธานี, 2562) จากสภาพปัญหาดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เช่น น้ำที่มีการปนเปื้อนของสารตะกั่วไหลเข้าไปในพื้นที่เกษตรกรรม จนนำไปสู่ผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหารและผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ที่อาศัยอยู่รอบๆ ได้

การปนเปื้อนของตะกั่วในแหล่งน้ำธรรมชาติส่งผลให้สัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำกลายเป็นแหล่งสะสมของตะกั่วโดยส่งผลกระทบต่อระบบเจริญพันธุ์ ระบบโลหิต และระบบประสาทของสัตว์น้ำในแหล่งน้ำนั้น นำไปสู่ผลกระทบของห่วงโซ่อาหารและอันตรายต่อการอุปโภคบริโภคได้ เมื่อมนุษย์รับประทานสัตว์น้ำหรืออุปโภคบริโภคน้ำที่มีสารตะกั่วปนเปื้อน จะเกิดการสะสมสารตะกั่ว (II) ในร่างกายและส่งผลกระทบต่อสุขภาพคือ ร่างกายอ่อนเพลีย ปวดท้อง เบื่ออาหาร ปวดกล้ามเนื้อ ปวดข้อและกระดูก ความดันโลหิตสูง โลหิตจาง ความจำเสื่อม และภูมิคุ้มกันต่ำลง (ชนัญญา ภิราญคำ, 2553) โดยมีผลกระทบต่อกลุ่มเปราะบางคือทารกและเด็กมากที่สุด เนื่องจากเนื้อเยื่อของเด็กมีความไวต่อการทำลายของตะกั่วมากกว่าผู้ใหญ่ (วิภาดา เดชะปัญญา, 2560)

เพื่อเป็นการลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมและผลกระทบต่อสุขภาพ จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดสารตะกั่ว (II) ออกจากน้ำทิ้ง ก่อนที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการบำบัดสารโลหะหนักจำพวกตะกั่ว (II) ในน้ำประกอบด้วย 3 วิธีหลัก ๆ ได้แก่ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ ซึ่งการเลือกใช้กระบวนการในการบำบัดสารตะกั่ว ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย และกลไก

การกำจัดสารโลหะหนัก เป็นต้น ตัวอย่างของการบำบัดสารตะกั่ว (II) ในน้ำที่ใช้โดยทั่วไปและเป็นที่ยอมรับ คือ วิธีทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ วิธีออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) การแยกกรองด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) การกรอง (Filtration) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange) ซึ่งข้อจำกัดของการเลือกใช้วิธีข้างต้น ไม่สามารถกำจัดสารตะกั่ว (II) ที่ปนเปื้อนออกจากน้ำได้อย่างสมบูรณ์ (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2563) ทั้งนี้เพื่อให้การบำบัดสารตะกั่วเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงสนใจใช้กระบวนการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งเป็นวิธีทางเคมีกายภาพที่สามารถกำจัดสารตะกั่ว (II) ที่ปนเปื้อนในน้ำได้ แม้จะมีปริมาณสารตะกั่ว (II) ปนเปื้อนในระดับความเข้มข้นที่น้อยมาก อีกทั้งยังใช้ต้นทุนในการบำบัดน้อย รวดเร็ว ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง นอกจากนี้ยังเป็นการสร้างมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติในการนำมาบำบัดสารโลหะหนัก และยังเป็นการแก้ไขปัญหาการบำบัดน้ำเสียด้วยจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถแยกเอาโลหะหนักออกจากตะกอนจุลินทรีย์ได้ (อาภาภรณ์ ภูมิคุ้ม และคณะ, 2558)

สารดูดซับ (Adsorbent) ที่นิยมใช้ในกระบวนการบำบัดสารตะกั่ว (II) และสารโลหะหนักอื่นๆ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซิลิกาเจล อลูมินากัมมันต์ และซีโอไลต์ เป็นต้น ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี แต่มีข้อจำกัดคือ มีราคาสูง ถ่านกัมมันต์ที่มีการกระตุ้นทางเคมี จะต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นออกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี อีกทั้งสารเคมีบางชนิดที่ใช้กระตุ้นมีความเป็นกรด ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนในวัสดุและเครื่องมือที่ใช้ ซึ่งเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของเครื่องมือสั้นลง (คณิตตา ธรรมจริยวงศ์, 2550) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำตัวดูดซับที่เป็นวัสดุที่มีรูปพหุโนตามธรรมชาติ โดยใช้ตัวดูดซับสารเพคตินธรรมชาติ (Natural Pectin) ที่สกัดจากเปลือกเสาวรสขึ้นรูปเป็นฟิล์มเพคติน เพื่อลดการนำเข้าสารเพคตินทางการค้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง และเปลือกเสาวรสเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น แต่จากการศึกษาวิจัยพบว่า ฟิล์มเพคตินธรรมชาติมีราคาถูกง่าย จึงมีความแข็งแรงทนทานต่อแรงภายนอกที่มากกระทำน้อย ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มความทนทานของตัวดูดซับ จึงนำมาดัดแปรเป็นฟิล์มคอมโพสิตเพคตินจากเปลือกเสาวรส โดยการเติมแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ซึ่งมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ยึดเกาะได้ดี ทำให้ตัวดูดซับมีความเหนียวและแข็งแรงทนทานมากขึ้น อีกทั้งแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศไทย หากได้มีการศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ฟิล์มคอมโพสิตเพคตินจากเปลือกเสาวรสในการกำจัดสารตะกั่ว (II) จะเป็นการสร้างมูลค่าของวัสดุท้องถิ่นในการนำมาใช้ประโยชน์และใช้ทดแทนเพคตินทางการค้า เป็นการช่วยลดต้นทุนการใช้เพคตินได้อีกทางหนึ่ง

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมโพสิตเปรียบเทียบกับฟิล์มเพคตินและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ และศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการดูดซับสารตะกั่ว (II) นอกจากนี้ ศึกษาความสอดคล้องของผลการทดลองกับสมการแบบจำลอง

การดูดซับเชิงสมดุลและเชิงจลนศาสตร์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมและกลไกการดูดซับ และศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของตัวดูดซับ

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลและหาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 เลือกเสาวรสที่ใช้เป็นพันธุ์สีเหลือง (*Passiflora edulis*) เก็บรวบรวมจากพื้นที่จังหวัดอำนาจเจริญ

1.3.2 เตรียมเปลือกเสาวรสและสกัดสารเพคติน โดยดัดแปลงจากงานวิจัยขององอาจ เต็ดดวง (2553); Fernanda L. et al. (2015) นำสารเพคตินมาดัดแปรเป็นและฟิล์มเพคตินและฟิล์มคอมโพสิตเพคตินโดยใช้วิธี crosslinking ของ Mariana Altenhofen da Silva. (2009)

1.3.3 ตัวดูดซับที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย ฟิล์มเพคติน (PN film) ฟิล์มคอมโพสิต (CN film) และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) และเลือกใช้ฟิล์มคอมโพสิต (CN film) ไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป

1.3.4 สารตะกั่ว (II) เตรียมจากตะกั่วไนเตรท ($Pb(NO_3)_2$)

1.3.5 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ ประกอบด้วย การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิว การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวมและขนาดรูพรุนเฉลี่ย การวิเคราะห์จุด Point zero charge (pH_{pzc}) และการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester)

1.3.6 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด ภายใต้อิทธิพลเวลา 24 hr, อุณหภูมิ 30 °C, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว (II) 120 mg/L และค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว (II) 4.7 ± 0.5

1.3.7 การศึกษาหาอิทธิพลที่เหมาะสมของการดูดซับ ประกอบด้วย อิทธิพลเวลาในการสัมผัส อิทธิพลของอุณหภูมิ (30 ,40 , 50 และ 60 °C) อิทธิพลความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว (II) (40, 60, 80, 100 และ 120 mg/L) และอิทธิพลค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย (pH 2, 3, 4, 5 และ 6) โดยอิทธิพลและสภาวะที่เหมาะสมพิจารณาเริ่มจาก ค่าปริมาณของสารตะกั่ว (II) ที่ถูกดูดซับ (q_e) ได้สูงสุด จากนั้นจึงพิจารณาค่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว (II) สูงสุด (%Heavy metal removal)

1.3.8 การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ ประกอบด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order equation) และสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order equation)

1.3.9 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ ประกอบด้วยสมการไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (Langmuir) และสมการไอโซเทอร์มฟรอนด์ลิช (Freundlich)

1.3.10 การศึกษาการคายซับจากตัวดูดซับที่ได้จากการทดลองข้อ 1.3.6 โดยใช้ตัวชะละลาย (Eluent) 3 ชนิด ประกอบด้วย น้ำปราศจากไอออน (DI water) สารละลาย 0.1 M HCl และ 0.1 M NaOH ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

1.3.11 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารตะกั่ว (II) ด้วยการวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) และเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยการสร้างกราฟมาตรฐาน (Standard curve)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงประสิทธิภาพของฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์จากเปลือกเสาวรสในการกำจัดสารตะกั่ว (II) ที่ปนเปื้อนแหล่งน้ำ

1.4.2 ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับสารตะกั่ว (II)

1.4.3 เพื่อแปรรูปเปลือกเสาวรสและสร้างมูลค่าในการนำมาใช้ประโยชน์ในการกำจัดสารโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ รวมทั้งสามารถใช้ทดแทนพืชน้ำทางการค้าได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปของสารโลหะหนัก (Heavy Metals)

โลหะหนัก (Heavy Metal) หมายถึง ธาตุที่มีน้ำหนักมากกว่าน้ำ 5 เท่า หรือมีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป ซึ่งมีเลขอะตอมตั้งแต่ 23-92 จำนวนทั้งหมด 72 ธาตุ ในคาบที่ 4-7 อาทิ แคดเมียม โครเมียม โปรท ตะกั่ว เป็นต้น ซึ่งธาตุโลหะหนักเหล่านี้ บางชนิดมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม บางชนิดมีประโยชน์ต่อร่างกาย แต่บางชนิดก็เป็นพิษต่อร่างกาย

คุณสมบัติของโลหะหนัก ได้แก่ สามารถละลายน้ำได้ สามารถเปลี่ยนเป็นสารประกอบเชิงซ้อน และตกตะกอนหรือเป็นอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำได้ ซึ่งช่องทางการแพร่กระจายของสารโลหะหนักมีหลายช่องทาง เช่น การชะล้างหน้าดินที่เกิดจากการเปิดหน้าดินของอุตสาหกรรมเหมืองแร่ การปล่อยสารโลหะหนักปนเปื้อนจากกระบวนการผลิตอุตสาหกรรม รวมทั้งการปนเปื้อนในแหล่งกำจัดขยะและสิ่งปฏิกูล ซึ่งมักเป็นแหล่งรวบรวมและกำจัดขยะในปริมาณมาก โดยเฉพาะพื้นที่กำจัดขยะขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นต่างๆ โดยกองขยะที่รวบรวมไว้มักมีขยะหลายชนิดที่มีโลหะหนักปนเปื้อน อาทิ แบตเตอรี่ ถ่านไฟฉาย และสีฟัน เป็นต้น ทั้งนี้หากมีการรวบรวม และกำจัดไม่ถูกสุขลักษณะย่อมเสี่ยงต่อการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมโดยง่าย โดยเฉพาะการชะล้างของฝนและการซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ม.ป.ป)

2.2 ความรู้ทั่วไปของสารตะกั่ว (Lead)

สารตะกั่ว (Lead, Pb) จัดเป็นโลหะหนักที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพลำดับต้นๆ โดยมีเลขเชิงอะตอม (atomic number) คือ 82 และน้ำหนักเชิงอะตอม (atomic weight) คือ 207.2 ซึ่งในตารางธาตุจัดอยู่ในกลุ่มที่ IVa ลักษณะทางกายของตะกั่วจะมีสีเทาอมฟ้าที่มีคุณสมบัติอ่อนตัว และดัดแปลงรูปร่างต่างๆได้ง่าย ดังนั้นสารตะกั่วจึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่น โรงพิมพ์ ผลิตสีทาบ้าน เซรามิก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และการชุบโลหะ เป็นต้น ซึ่งสารตะกั่วที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมสามารถส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศวิทยา ห่วงโซ่อาหาร จนอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์จากการอุปโภคบริโภคได้ โดยช่องทางการสัมผัสสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย ได้แก่ ทางเดินหายใจ ที่เกิดจากการหายใจเอาฝุ่นละอองที่มีสารตะกั่วปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ประกอบการอาชีพที่ทำงานสัมผัสสารตะกั่ว การสัมผัสตะกั่วจากทางเดินอาหาร จากการรับประทานอาหารหรือดื่มน้ำที่มีสารตะกั่วปนเปื้อน รวมทั้งการได้รับสัมผัสตะกั่วทางผิวหนัง ซึ่ง

โดยปกติแล้วตะกั่วจะถูกดูดซึมเข้าสู่ผิวหนังได้น้อย แต่มักจะเกิดการได้รับผ่านการสัมผัสอุปกรณ์หรือวัสดุที่มีสารตะกั่วปนเปื้อน เช่น หม้อแบตเตอรี่ โรงกลึง โรงพิมพ์ สีทาบ้าน เป็นต้น หากได้รับสัมผัสแบบต่อเนื่อง จะส่งผลกระทบต่อระบบประสาท คือ กล้ามเนื้อไม่มีเรี่ยวแรง โดยเฉพาะในเด็กซึ่งเป็นกลุ่มเปราะบาง สารตะกั่วจะไปทำลายระบบประสาท ส่งผลให้เด็กมีพัฒนาการทางสติและปัญญาที่ลดลง อีกทั้งมีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของร่างกาย เนื่องจากสารตะกั่วไปขัดขวางการดูดซึมของแคลเซียมในร่างกาย นอกจากนี้สารตะกั่วยังไปทำลายเม็ดเลือดแดงในร่างกาย ส่งผลให้เกิดภาวะซีดและโลหิตจาง รวมทั้งส่งผลต่อการทำงานของไตอีกด้วย (กรมควบคุมโรค, 2558)

2.3 ความรู้ทั่วไปของเสาวรส

เสาวรส (*passion fruit*) ที่เป็นสายพันธุ์สีเหลืองมีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Passiflora edulis* มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า กะทกรกฝรั่ง ลักษณะลำต้นเป็นเถาไม้เลื้อย อายุประมาณ 4-5 ปี เติบโตได้ดีในเขตร้อนและที่ราบต่ำ เป็นพืชที่ปลูกได้ง่าย ดูแลไม่ยุ่งยาก ถิ่นกำเนิดมาจากประเทศบราซิล และมีผู้นำเข้ามาปลูกในไทยเป็นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ.2498 ซึ่งทดลองปลูกในภาคเหนือเป็นภาคแรก ส่วนใหญ่ในประเทศไทยพบ 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์ผลสีเหลือง และพันธุ์ผลสีม่วง ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 เสาวรสสายพันธุ์ผลสีเหลืองและสายพันธุ์ผลสีม่วง
ที่มา: เชียงใหม่นิวส์ (2555: เว็บไซต์)

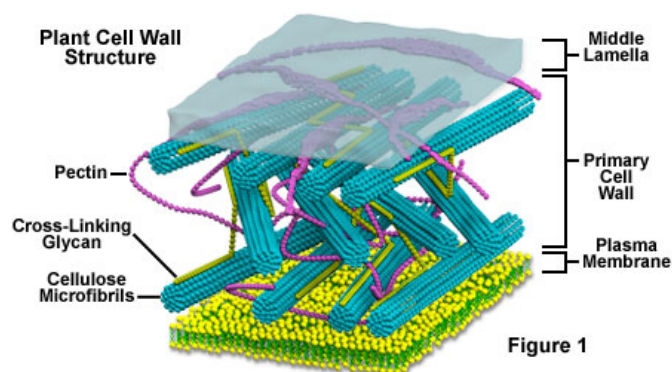
ลักษณะของผลเสาวรสพันธุ์สีเหลือง (*Passiflora edulis*) เปลือกมีสีเหลืองสดเมื่อสุกแล้ว ผิวเป็นมัน มีน้ำหนักประมาณ 11 กรัม น้ำคั้นของสายพันธุ์นี้มีความเป็นกรดสูง คือ pH ต่ำกว่า 3 และมีรสชาติเปรี้ยวมากกว่าสายพันธุ์สีม่วง ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับแปรรูปมากกว่าการรับประทานผลสด ภายในผลจะมีเมล็ดสีดำหรือน้ำตาลแก่ห่อหุ้มและส่วนที่เป็นเนื้อมีสีเหลืองปนส้ม ลักษณะคล้ายวุ้น (ประเสริฐ สายสิทธิ์, 2531)

เปลือกเสาวรสมีความหนาและคิดเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักผล โดยเปลือกเสาวรสพันธุ์สีเหลืองจะมีสารเพคตินประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสด หรือคิดเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก

แห้ง เพคตินที่ได้จากเปลือกเสาวรสมีคุณภาพในการเกิดเจลได้ดีเทียบเท่ากับเพคตินจากเปลือกผลไม้ตระกูลส้ม (Citrus) คือ ประกอบด้วยกรดกาแลคทูโรนิกถึง 76-78 เปอร์เซ็นต์ และมีกลุ่มเมทอกซิลถึง 8.9 - 9.2 เปอร์เซ็นต์และเนื่องจากในเปลือกเสาวรสมิเอนไซม์เพคตินเอสเทอเรส (pectinesterase) รวมอยู่ด้วย ดังนั้นเพื่อให้เอนไซม์ดังกล่าวเกิดปฏิกิริยา จะต้องทำการอบไอน้ำหรือผ่านกระบวนการความร้อน เพื่อให้ได้เพคตินในปริมาณสูงสุด (ประเสริฐ สายสิทธิ์, 2531; อ้างอิงจาก Sherman et al., 1958)

2.4 ความรู้ทั่วไปของสารเพคติน

เพคติน (Pectin) มาจากภาษากรีก แปลว่า สารประสานหรือสารทำให้แข็งตัว (congeal or solidity) คุณสมบัติโดยทั่วไปเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่มีขี้ ละลายได้ง่ายในน้ำ และเกิดการละลายตัวได้ดีขึ้นในสภาวะอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น และเมื่อละลายน้ำแล้วสามารถขยายหรือพองตัวเพิ่มปริมาตร ทำให้เกิดความหนืด โครงสร้างหลักของสารเพคตินประกอบไปด้วย กรดกาแลคทูโรนิก (D-galacturonic acid) ประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ต่อเชื่อมกันด้วยพันธะแอลฟา 1-4 ไกลโคซิดิก (α -1,4 glycosidic) ประกอบด้วย หมู่คาร์บอกซิลอิสระ (COOH) และหมู่คาร์บอกซิลที่รวมอยู่กับเมทิล (COOCH₃) ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) นอกจากนี้แล้วในโครงสร้างของสารเพคติน ยังพบสารเมทิลกาแลคทูโรเนต และน้ำตาลหลากหลายชนิด เช่น galactose rhamnose arabinose เป็นต้น โดยสารประกอบเพคตินส่วนใหญ่พบมากในบริเวณผนังเซลล์ของพืชที่มีอายุน้อย โดยเฉพาะผลไม้จำพวกตระกูลส้ม เช่น ส้มโอ ส้มเขียวหวาน รวมทั้งผลไม้ชนิดอื่นจำพวก ฝรั่ง แอปเปิ้ล มะม่วง ซึ่งในกระบวนการผลิตสารเพคตินจากธรรมชาติส่วนใหญ่จะสกัดจากเปลือกผลไม้หรือพืชด้านในที่อยู่ในชั้น middle lamella และผนังเซลล์ของพืชชั้นแรก ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของสารเพคตินในเนื้อเยื่อของพืช

ที่มา: Florida State University (2015: website)

ปริมาณและคุณภาพของสารเพคตินที่สกัดได้จะขึ้นอยู่กับระดับของการเกิดเอสเทอร์ฟิเคชัน (Degree of esterification: DE) ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ของกรดกาแลคทูโรนิกที่ถูกเอสเทอร์ฟิเคตต่อจำนวนกรดกาแลคทูโรนิกทั้งหมด ซึ่งมีผลต่อการเกิดเจลเพคติน ทำให้สามารถแบ่งเพคตินออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ตามระดับการเกิดเอสเทอร์ฟิเคชัน ได้แก่ ประเภทที่ 1 เพคตินที่มีเมทอกซิลสูง (High methoxyl pectin, HM) ซึ่งเป็นเพคตินที่มีปริมาณเมทอกซิลตั้งแต่ 8.16 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปและระดับเมทิลเอสเทอร์ฟิเคชัน (degree of methyl esterification: %DM) มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ สามารถเกิดเจลได้ในสภาวะที่มีน้ำตาลและกรดในปริมาณที่เหมาะสม โดยผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้เพคตินชนิดนี้ ได้แก่ แยมและเยลลี่ และประเภทที่ 2 เพคตินที่มีเมทอกซิลต่ำ (low methoxyl pectin) เป็นเพคตินที่มีปริมาณเมทอกซิลน้อยกว่า 8.16 เปอร์เซ็นต์ และระดับเมทิลเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดขึ้นน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพคตินชนิดนี้จะเกิดเจลได้ดีถ้ามีการเติมสารโลหะบางชนิดเข้าไปร่วมด้วย เช่น แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เจลที่ได้จะมีคุณสมบัติคือ มีความอ่อนนุ่ม เป็นเนื้อสัมผัสที่ดี และยืดหยุ่นมากกว่าเจลที่ได้จากเพคตินที่มีเมทอกซิลสูง (HM)

ประโยชน์ของสารเพคตินถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในทางอุตสาหกรรมอาหาร ยา ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ รวมทั้งนำมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับ (adsorbent) ในการดูดซับสารโลหะหนักจากน้ำเสียหรือน้ำที่มาจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติทั่วไป ซึ่งพบว่าประเทศไทยต้องสั่งนำเข้าสารเพคตินจากต่างประเทศ จำนวน 1,379,768 กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่ากว่า 414 ล้านบาท ในช่วงปี พ.ศ.2550 (สุธิดา ทองคำ, 2552) ซึ่งสารเพคตินที่นำเข้าและวางจำหน่ายในประเทศไทยค่อนข้างมีราคาสูง ประมาณ 500 - 10,616 บาท/กิโลกรัม โดยราคาขึ้นอยู่กับเกรดของเพคติน (ปรีชา สุขเกษม, 2549)

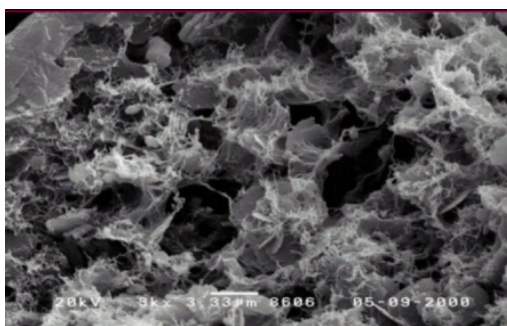
ปัจจุบันในกระบวนการอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร ยา รวมทั้งด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมเริ่มมีการนำส่วนเหลือทิ้งของผลไม้หรือพืชผักมาสกัดสารเพคติน เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย อีกทั้งในประเทศไทยยังไม่มีโรงงานที่ผลิตสารเพคตินเองได้ ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยกระบวนการสกัดสารเพคตินจากเยื่อพืชที่ส่วนใหญ่เป็นเปลือกผลไม้หรือเปลือกพืชชนิดต่าง ๆ จะใช้วิธีไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรด ซึ่งกรดที่นิยมใช้ในการสกัดสารเพคติน ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก กรดซัลฟิวริก กรดทาร์ทาริก สารละลายโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต ฯลฯ ซึ่งในกระบวนการสกัดสารเพคตินบางครั้งในเนื้อเยื่อของพืชอาจจะมีสารเพคตินที่อยู่ในรูปของ calcium pectate ส่งผลให้ไม่สามารถถูกไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดได้ จึงมีการใช้สารจำพวก chelating agent เติมลงไปในการสกัด เพื่อกำจัดแคลเซียมที่ทำการสกัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในขั้นตอนการสกัด โดยจะมีผลทำให้ calcium pectate สามารถแปรสภาพในรูปของสารละลายเพคตินได้มากขึ้น นอกจากนี้หลังผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดแล้ว พบว่าการใช้เอทานอลในการตกตะกอนของสารเพคตินอย่างเดียวไม่เพียงพอเนื่องจากอาจจะได้สารอื่นๆที่ไม่ใช่สารเพคตินปนออกมาด้วย ดังนั้นจึงอาจจะมีการเติมสารอื่น ๆ ร่วมด้วย ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส หรือการเติมกรดไฮโดรลิกลงไปในสารละลาย เพื่อลดปริมาณเถ้าที่ปนมา

ในตะกอนสารพัดดินได้ ดังนั้นในขั้นตอนการตกตะกอนพัดดินด้วยเอทานอล อาจจะต้องมีการเติมกรดไฮโดรคลอริกร่วมกับการคนอย่างแรง หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนแล้วทำการตกตะกอนด้วยเอทานอลซ้ำ ๆ เพื่อให้สารพัดดินที่สกัดได้มีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น (องอาจ เต็ดดวง, 2553)

2.5 ความรู้ทั่วไปของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) จัดอยู่ในกลุ่มสเมคไทต์ (Smectite) โดยชื่อเดิมดัดแปลงมาจาก Montmorillon เป็นภาษาฝรั่งเศส แหล่งที่พบแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ส่วนใหญ่จะพบในทวีปยุโรป ได้แก่ ฝรั่งเศส อิตาลี อังกฤษ รัสเซีย ฯลฯ แต่ก็พบตามแหล่งอื่น ๆ บ้าง เช่น ประเทศญี่ปุ่น อินเดีย ออฟริกาใต้ ฯลฯ แหล่งที่พบในประเทศไทยส่วนใหญ่จะพบตามพื้นที่ที่เคยเป็นแอ่งภูเขาไฟและมีการแผ่กระจายของหินภูเขาไฟ หินไรโอไลต์หรือหินปูน ได้แก่ จังหวัดสระบุรี ลพบุรี นครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ กำแพงเพชร เป็นต้น อีกทั้งแร่ดินที่สะสมในชั้นหินอาจเกิดการผุสลายและถูกพัดพามาสะสมตัวใหม่ตามบริเวณที่ราบลุ่ม รวมตัวกันกับชั้นดิน หิน กรวด เมื่อเปียกน้ำจะมีความเหนียว หนืดตัว และบวมเล็กน้อย (ชาญ จรรย์าณิษฐ์, 2535)

ลักษณะพื้นฐานของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ประกอบเป็นผลึกบริสุทธิ์ที่ขูดมาจากเปลือกโลก ซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ผลึกของแร่ดินนี้จะมีลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยมที่มีชั้นซ้อนกันซ้ำ ๆ เหมือนขนมชั้น ในแต่ละชั้นจะมีความหนาประมาณ 200 – 300 nm ดังแสดงด้วยภาพสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของแร่มอนต์มอริลโลไนต์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของแร่มอนต์มอริลโลไนต์
ที่มา: นิวัติ องค์กรักษ์ (2561: เว็บไซต์)

หากคลี่แผ่นออกและกระจายพื้นที่ที่เกิดชั้นซ้อนกัน ใน 1 ผลึกคริสตัลจะมีความกว้างเท่ากับสนามเทนนิส 3 สนาม โดยโครงสร้างทางกายภาพของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จะประกอบด้วย 2 tetrahedral sheet กับ octahedral sheet อยู่ตรงกลาง T-O-T และเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างพื้นฐานของ pyrophyllite ด้วย โดยเกล็ดหรือผลึกจะมีระนาบฐานที่แตกต่างกันและความยาวอยู่

ในช่วง 0.2-2.0 ไมครอน โดยธรรมชาติแร่มอนต์มอริลโลไนต์จะมีประจุเป็นขั้วลบ เนื่องจากอะตอมของอลูมิเนียมบางส่วนถูกแทนที่ด้วยอะตอมแมกนีเซียมหรืออะตอมธาตุเหล็ก ส่งผลให้สามารถดึงดูดสิ่งแปลกปลอมที่มีประจุบวก ได้แก่ ฝุ่น สารอินทรีย์วัตถุ และสารที่ถูกดึงดูดจะถูกเก็บไว้ในชั้นผลึกที่ซ้อนกันไปมาเพื่อรอการล้างออก นอกจากนี้แร่มอนต์มอริลโลไนต์บางตัว จะมีอลูมินาที่แทนที่ด้วยซิลิกาใน Tetrahedral และ Al ถูกแทนที่ด้วย Fe^{2+} และ Mg และในกลุ่มนี้แรงยึดเหนี่ยวกันเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ จะเป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน ทำให้สามารถรวมตัวกับน้ำได้ง่าย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Swells out จะขยายจากเดิมถึง 6 เท่า

ประโยชน์ของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้เป็นตัว plasticizer ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใส่แร่ดินลงไปในโพลิเมอร์หรือผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อลดจุดหลอมเหลวที่ทำให้เกิดการไหล และเม็ดพลาสติกมีความยืดหยุ่นหรืออ่อนนุ่มขึ้น แต่มีข้อจำกัดคือไม่ควรเติมเข้าไปมาก เนื่องจากแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดมาก เมื่อเกิดการรวมตัวกับน้ำแล้ว น้ำจะเกิดการแทรกตัวในโครงสร้างแบบ T-O-T ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Swells out ที่ทำให้เกิดการบวมได้ ส่วนประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรม แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางในการอุ้มซับสารเคมีกำจัดศัตรูพืชและยาฆ่าแมลงไว้ที่ผิว แล้วค่อยๆ ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกอย่างช้าๆ ทำให้กลไกการออกฤทธิ์ของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังช่วยปรับสภาพดินให้มีความอุดมสมบูรณ์ กระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช ดังนั้นแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จึงเหมาะสำหรับนำมาปรับปรุงดินให้กลับมามีความอุดมสมบูรณ์อีกครั้ง จากหน้าดินที่ถูกทำลาย

2.6 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์ของการสะสมหรือการเคลื่อนย้ายมวลสารซึ่งอยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลว มาสะสมหรือเกาะติดบริเวณผิวของของแข็ง ทำให้สามารถแยกมวลสารดังกล่าวออกจากวัฏภาคแก๊สหรือของเหลวได้ โดยโมเลกุลของมวลสารที่สะสมหรือถูกดูดติดบริเวณพื้นผิวจะเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนมวลสารหรือของแข็งที่ทำการดูดซับจะเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) (ปราโมทย์ เชี่ยวชาญ, 2561) ดังนั้นตัวดูดซับโดยส่วนใหญ่จึงเป็นของแข็งที่มีรูพรุนจำนวนมาก เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้มากขึ้น จะส่งผลต่อความสามารถของการดูดซับที่มากขึ้นตามสัดส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น แม้การเพิ่มจำนวนของรูพรุนขนาดเล็กในตัวดูดซับจะส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น แต่รูพรุนขนาดเล็กอาจจะเป็นอุปสรรคต่อการแพร่กระจายของสารถูกดูดซับภายในตัวดูดซับดังกล่าวได้ ดังนั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับ รูพรุนส่วนใหญ่ของตัวดูดซับจึงควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือไอ เพื่อให้สารถูกดูดซับดังกล่าวนั้น สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับได้อย่างสะดวก (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

ขั้นตอนที่สำคัญในการเกาะติดผิวของตัวดูดซับไปยังตัวดูดซับ มี 5 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอน ที่ 1 Bulk Transport เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวดูดซับที่อยู่ในวัฏภาคของเหลวหรือแก๊ส เคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับ ขั้นตอน ที่ 2 Film Diffusion เมื่อโมเลกุลของตัวดูดซับเคลื่อนที่มาถึงตัวดูดซับแล้ว ตามปกติจะมีชั้นฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายๆเยื่อบาง โดยโมเลกุลจะต้องแทรกตัวผ่านฟิล์มน้ำให้ได้ จึงจะเข้าไปถึงตำแหน่งตัวดูดซับ ทั้งนี้การใช้เวลาและระยะทางในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นฟิล์ม ความปั่นป่วนของการไหล ซึ่งชั้นฟิล์มจะมีความหนาลดลง เมื่อมีอัตราการไหลของของไหลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ตัวดูดซับแพร่ผ่านชั้นฟิล์มได้ดียิ่งขึ้น ขั้นตอน ที่ 3 Pore Diffusion เนื่องจากตัวดูดซับมีช่องว่างหรือรูพรุนที่มากมาย โมเลกุลของตัวดูดซับจึงต้องแทรกตัวให้เข้าไปให้ถึงช่องว่างภายในตัวดูดซับ จึงจะมีการดูดติดผิวเกิดขึ้น ขั้นตอน ที่ 4 Surface Diffusion การแพร่ของสารที่ถูกดูดซับไปยังพื้นผิวภายในรูพรุน และขั้นตอน ที่ 5 Adsorption เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวดูดซับถูกยึดเกาะบนตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

ประเภทของการดูดซับ เมื่อพิจารณาจากแรงระหว่างโมเลกุลระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้ (จักรกฤษณ์ อัมพู, 2562)

(1) การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน นั่นก็คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals forces) ซึ่งการดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนชนิดนี้จะส่งผลให้การดูดซับมีพลังงานความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 kJ/mol สามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย เพราะสามารถฟื้นฟูตัวดูดซับนำมาใช้ซ้ำได้อีก ซึ่งลักษณะสำคัญของการดูดซับทางกายภาพคือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิบรรยากาศทั่วไป และจะเกิดการดูดซับที่ดียิ่งขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศทั่วไป เช่น การดูดซับกลิ่นต่างๆในตู้เย็นหรือในห้องที่เปิดเครื่องปรับอากาศ ฯลฯ โดยสารดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) รวมทั้งจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของตัวดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายนั้นๆ

(2) การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) จะเกิดขึ้นเมื่อมีการทำปฏิกิริยากันระหว่างตัวดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารที่ถูกดูดซับเดิม นั่นก็คือ เกิดการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม แล้วมีการจัดเรียงเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง จะมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นการดูดซับประเภทดังกล่าว ส่วนใหญ่จะเกิดได้ดีหรือเร็วที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้เกิดความร้อนของการดูดซับที่สูงขึ้น ประมาณ 50-400 kJ/mol ซึ่งจะทำให้การกำจัดตัวดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับทำได้ยากขึ้น ดังนั้นการดูดซับทางเคมีนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะผิวของตัวดูดซับเท่านั้น จะไม่เกิดขึ้นในชั้นของรูพรุนของตัวดูดซับ และจะเกิดการดูดซับได้เพียง

ชั้นเดียวเท่านั้น (monolayer) ซึ่งจะแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	- น้อยกว่า 20 kJ/mol	- ระหว่าง 50-400 kJ/mol
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	- มีค่าต่ำ (เนื่องจากการดึงดูดด้วยแรงที่อ่อน)	- มีค่าสูง (เนื่องจากมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง)
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	- แรงแวนเดอร์วาลส์	- พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	- ผันกลับได้	- ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. การดูดซับของแก๊ส-ของแข็ง	- เกิดได้เกือบทุกชนิด	- เกิดเฉพาะบางระบบ
6. พลังงานก่อกัมมันต์	- ไม่เกี่ยวข้อง	- เกี่ยวข้อง
7. รูปแบบของการดูดซับ	- Monolayer และ Multilayer	- Monolayer

ใน ค.ศ.1938 Brunauer, Emmett และ Teller ได้ร่วมมือกันพัฒนาแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบหลายชั้น โดยกำหนดเพิ่มเติมจากแบบจำลองของ Langmuir (การดูดซับแบบชั้นเดียว) เพื่อให้สามารถอธิบายการดูดซับของโมเลกุลที่เรียงตัวกันหลายชั้น โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเป็นพื้นผิวในการเกาะของตัวถูกดูดซับในชั้นต่อไป ดังนั้นโมเลกุลจะถูกยึดเกาะที่ผิวของตัวถูกดูดซับและไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลแต่ละชั้น จึงเสมือนอยู่ในภาวะอิมมัตวของของเหลว จะแตกต่างจากชั้นแรกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับสัมผัสกับผิวการดูดซับโดยตรง (สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล, 2555) สมการของ BET แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{V \left[\left(\frac{P_0}{P} \right) - 1 \right]} = \frac{C-1}{CV_m} \left(\frac{P}{P_0} \right) + \frac{1}{CV_m} \quad (2.1)$$

เมื่อ

P = ความดันที่สมดุลของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิใดๆ (mmHg)

P_0 = ความดันที่อิมมัตวของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิใดๆ (mmHg)

V = ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับ (mL)

V_m = ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับสูงสุดแบบชั้นเดียว (mL/g)

C = ค่าคงที่ของ BET

พบว่า สมการ BET สามารถอธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับได้ดีจนถึงค่าความสัมพันธ์ที่อยู่ในช่วง 0.05 - 0.35 ซึ่งสมการของ BET เมื่อนำมา plot ระหว่าง $\frac{1}{V\left[\left(\frac{P}{P_0}\right)^{-1}\right]}$ และ $\frac{P}{P_0}$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $\frac{C-1}{CV_m}$ และมีค่า Y-intercept เท่ากับ $\frac{1}{CV_m}$

ดังนั้นค่าคงที่ C และ V_m หาได้จากสมการดังนี้ (จักรกฤษณ์ อัมพช, 2562)

$$C = \frac{\text{Slope}}{\text{Y-intercept}} + 1 \quad (2.2)$$

$$V_m = \frac{1}{\text{slope} + \text{Y-intercept}} \quad (2.3)$$

เมื่อทราบค่า V_m นำมาคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (A) ได้จากสมการ 2.4

$$A = V_m N_A a_m \quad (2.4)$$

เมื่อ N_A = เลขอาโวกราโดร 6.023×10^{23} molecules/mole

a_m = พื้นที่การดูดซับของหนึ่งโมเลกุลของสารถูกดูดซับ

ปริมาตรของรูพรุนรวม (V_p) ของตัวดูดซับ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.5

$$V_p = \frac{V_s}{\rho} \quad (2.5)$$

และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ($\bar{r}_p$) ของตัวดูดซับ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.6

$$\bar{r}_p = \frac{2V_p}{A} \quad (2.6)$$

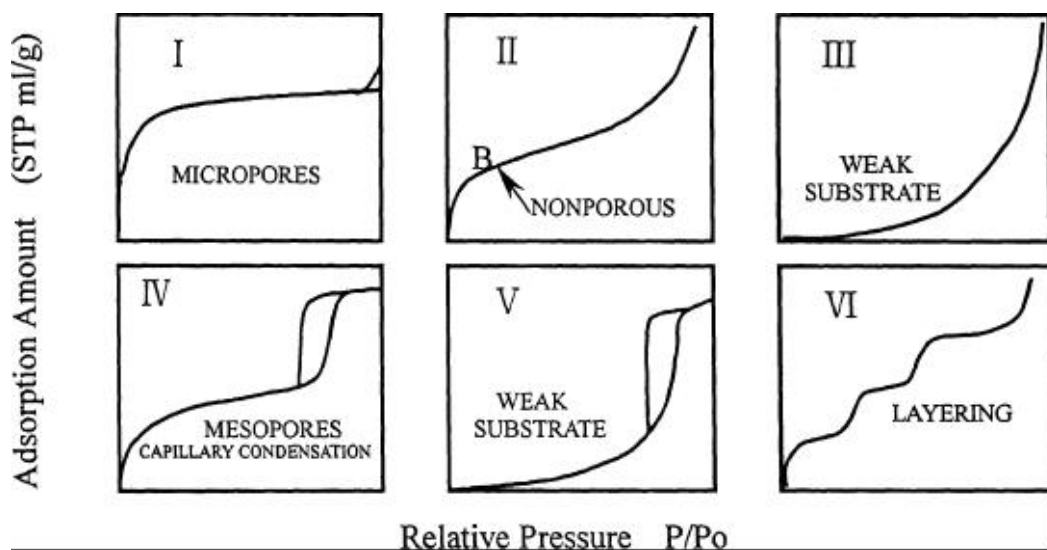
เมื่อ V_s = ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ (cm^3/g)

ρ = ความหนาแน่นของแก๊สที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ (kg/m^3)

A = พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ (m^2/g)

2.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารถูกดูดซับ (adsorbate) ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ (adsorbent) กับความดันแก๊สหรือความเข้มข้นของสารละลาย ณ อุณหภูมิคงที่ โดยไอโซเทอมสำหรับการดูดซับทางกายภาพของระบบการดูดซับแก๊สสามารถแบ่งออกเป็น 6 แบบ ตามการจำแนกของ IUPAC รายละเอียดดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ประเภทของไอโซเทอรั่มสำหรับดูดซับทางกายภาพตามการจำแนกของ IUPAC
ที่มา: จักรกฤษณ์ อัมพู (2562: 5)

ไอโซเทอรั่ม Type I ถึง Type V ได้ถูกจำแนกไว้โดยนักวิทยาศาสตร์ ได้แก่ S.Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming และ E. Teller ในช่วงปี ค.ศ.1940 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Type I เป็นไอโซเทอรั่มสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) สามารถพบได้ในการดูดซับบนของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งขนาดรูพรุนน้อยกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางโมเลกุลของสารถูกดูดซับ รวมทั้งสามารถพบได้ในปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุนเลย ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความดันสัมพัทธ์ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ลักษณะของไอโซเทอรั่ม จะเป็นลักษณะโค้งรูปตัว S (S-shaped Isotherm) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่หรือแทบไม่มีรูพรุนเลย โดยการดูดซับในช่วงแรกจะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวก่อน หลังจากนั้นจำนวนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความดัน จนกระทั่งความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้ 1 ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

Type III ลักษณะของไอโซเทอรั่มมีลักษณะโค้งหงายหาแกนความดันสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ส่งผลให้ตัวดูดซับมีค่าน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ทำให้เกิดความดันต่ำ ปริมาณการดูดซับเกิดขึ้นได้น้อย ซึ่งไอโซเทอรั่มนี้ไม่ค่อยพบมากนัก

Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบบ่อยในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลางเป็นส่วนใหญ่ (2-50 nm) โดยในช่วงแรกจะมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำ และเส้นไอโซเทอร์มจะเหมือนกับชนิดไอโซเทอร์ม Type II หลังจากนั้นการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นจากการควบแน่นแคปิลลารี (Capillary condensation) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาหาค่าการกระจายรูพรุนได้ (Pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้

Type V ลักษณะไอโซเทอร์มเหมือนกันกับแบบ Type III จะต่างกันที่การเกิดการควบแน่นในรูพรุน จะมีวงแหวนฮีสเทอรีซิส (hysteresis loop) ร่วมด้วย โดยที่เส้นไอโซเทอร์มที่ความดันสัมพัทธ์สูงอาจมีลักษณะเพิ่มขึ้นหรือคงที่ได้

Type VI เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (Stepped Isotherm) เป็นการดูดซับแบบขั้นตื้นต่อขั้นของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับของแข็ง ที่มีความสม่ำเสมอของแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูด

ปริมาณของสารโลหะหนักบนผิวของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่ภาวะสมดุลและประสิทธิภาพของการกำจัดสารโลหะหนัก (%Heavy metal removal) คำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q_e = \frac{V (C_0 - C_e)}{m} \quad (2.7)$$

เมื่อ

q_e = ปริมาณของสารโลหะหนักบนผิวของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ
ที่ภาวะสมดุล (mg/g)

C_0 = ความเข้มข้นของสารโลหะหนักเริ่มต้น (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นของสารโลหะหนักที่ภาวะสมดุล (mg/L)

V = ปริมาตรของสารละลาย (L)

m = น้ำหนักของตัวดูดซับ (adsorbent) (g)

$$\% \text{Heavy metal removal} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (2.8)$$

เมื่อพิจารณาสมการไอโซเทอร์มตามแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ สามารถแบ่งได้ดังนี้

(1) ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ถูกนำเสนอโดย เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ใน ค.ศ. 1916 โดยมีสมมติฐาน คือ 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)

2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น และ 4) ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน (จักรกฤษณ์ อัมพูข, 2562)

จากการศึกษาของไอโซเทอร์มแลงเมียร์ที่ภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ ดังสมการที่ 2.9

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.9)$$

เมื่อ

q_m = ปริมาณการดูดซับสูงสุดแบบชั้นเดียวของสารโลหะหนักบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับ (mg/g)

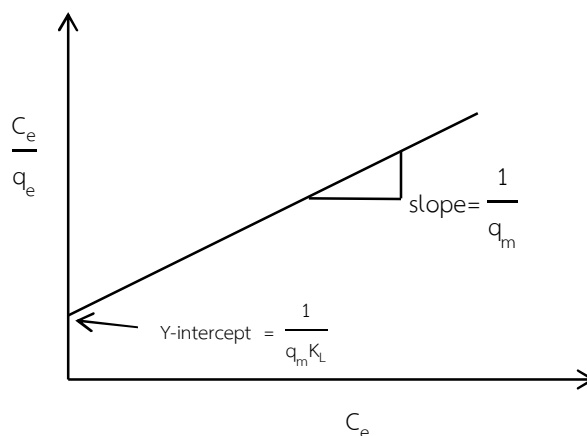
K_L = ค่าคงที่การดูดซับของ Langmuir isotherm (L/mg)

โดยสมการที่ 2.9 สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรง ดังต่อไปนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (2.10)$$

เมื่อ plot ระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ และ C_e จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$

และมีค่า Y-intercept เท่ากับ $\frac{1}{q_m K_L}$ รายละเอียดดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับเชิงเส้นของ Langmuir

(2) ไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

นักฟิสิกส์ชื่อ Herbert Max Finlay Freundlich ได้อธิบายสมมติฐานของตัวดูดซับว่า พื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด ดังของในสมการที่ 2.11 (ศุภกิจ แซ่เจียม, 2560)

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

โดยสมการที่ 2.11 สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรง จะได้สมการที่ 2.12 ดังต่อไปนี้

$$\ln q_e = \ln K_F + (1/n) \ln C_e \quad (2.12)$$

เมื่อ

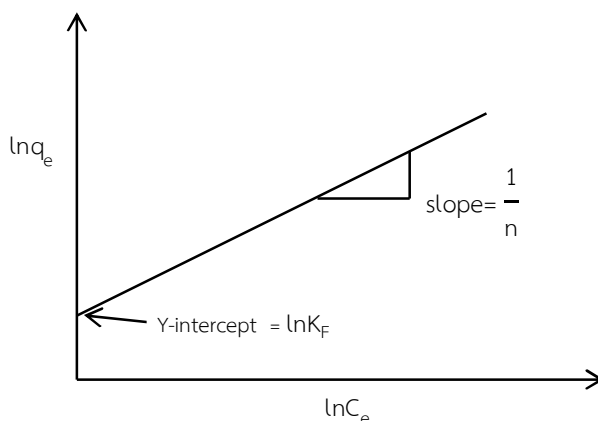
q_e = ปริมาณของสารโลหะหนักบนผิวของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่
สภาวะสมดุล (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นของสารโลหะหนักที่ภาวะสมดุล (mg/L)

n = ความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity)

K_F = ค่าคงที่ความสามารถในการดูดซับของแบบหลายชั้น (L/g)

เมื่อ plot ระหว่าง $\ln q_e$ และ $\ln C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และมีค่า Y-intercept เท่ากับ $\ln K_F$ รายละเอียดดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับเชิงเส้นของ Freundlich

การอธิบายความเป็นเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับ คือ

ถ้า $1/n = 1$ แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

$1/n > 1$ แสดงว่า ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากหรือมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก

$1/n < 1$ แสดงว่าตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยหรือมีพื้นที่ผิวจำกัดต่อ

การดูดซับนั้นๆ

2.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

นอกจากลักษณะสมดุลการดูดซับแล้ว อัตราการดูดซับยังมีผลต่อการการกระจายตัวของสารถูกดูดซับภายในพื้นที่ของตัวดูดซับ นั่นคือ เมื่อตัวดูดซับดูดสารถูกดูดซับได้ช้าลงแล้ว สารถูกดูดซับจะกระจายตัวตามทิศทางการไหลทั่วพื้นที่ตัวดูดซับได้เร็วขึ้น และตัวดูดซับต้องมีปริมาณตัวดูดซับที่มากพอหรือมีขนาดใหญ่ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับที่เพียงพอสำหรับตัวถูกดูดซับที่แพร่เข้ามา ดังนั้นการดูดซับสารชนิดหนึ่ง จึงประกอบด้วย ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นของไฮดรอลิก ๆ ตัวดูดซับ การแพร่ผ่านในโพรงตัวดูดซับไปยังพื้นผิวตัวดูดซับหรือวฏภาคดูดซับ และการดูดซับ-คายซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับ active sites (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552) ดังนั้นจลนพลศาสตร์การดูดซับ จึงเป็นการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบทางกายภาพและทางเคมีที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับจึงถูกนำมาใช้เพื่อให้ทราบกลไกดังกล่าว แบบจำลองที่ใช้ประกอบด้วย Pseudo-first-order rate equation และ Pseudo-second-order rate equation ซึ่งอัตราการดูดซับจะขึ้นอยู่กับว่าขั้นตอนใดเกิดช้าที่สุด แล้วกำหนดขั้นตอนนั้นเป็นอัตราการดูดซับ รายละเอียดดังต่อไปนี้

2.8.1 สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order rate equation) ถูกนำเสนอโดย Lagergren ได้นำเสนอแบบจำลองนี้ไว้ในปี ค.ศ.1898 โดยมีสมมติฐานว่า ถ้าขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของตัวถูกดูดซับมายังชั้นของไฮดรอลิกตัวดูดซับเกิดขึ้นช้าที่สุดและกำหนดเป็นขั้นตอนอัตราการดูดซับ คำนวณได้จากสมการที่ 2.13 ดังต่อไปนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_{p1}(q_e - q_t) \quad (2.13)$$

เมื่อ

q_e = ปริมาณการดูดซับของสารโลหะหนักบนผิวของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล (mg/g)

q_t = ปริมาณการดูดซับของสารโลหะหนักบนผิวของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (mg/g)

k_{p1} = ค่าคงที่ของ Pseudo-first-order rate (min^{-1})

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.13 ด้วย boundary conditions ที่ $q_t = 0, t=0$ และ $q_t = q_t$ ที่ $t=t$ จะได้สมการที่ 2.14

$$\ln \left[\frac{q_e}{q_e - q_t} \right] = k_1 t \quad (2.14)$$

จัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการที่ 2.15 ดังต่อไปนี้

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_{p1} t \quad (2.15)$$

2.8.2 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (Pseudo-second-order rate equation) ถูกนำเสนอแบบจำลองโดย Ho ในปี ค.ศ.1995 โดยมีสมมติฐานว่า ถ้าขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นช้าที่สุดและกำหนดเป็นขั้นตอนอัตราการดูดซับดังแสดงในสมการที่ 2.16

$$\frac{dq_t}{dt} = k_{p2}(q_e - q_t)^2 \quad (2.16)$$

เมื่อ

K_{p2} = ค่าคงที่ของ Pseudo-second-order rate (g/mg·min)

จัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการที่ 2.17

$$\frac{dq_t}{(q_e - q_t)^2} = k_{p2} dt \quad (2.17)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.17 ด้วย boundary conditions ที่ $q_t = 0, t=0$ และ $q_t = q_e$ ที่ $t=t$ จะได้สมการที่ 2.18 ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + k_{p2} t \quad (2.18)$$

จัดรูปสมการใหม่ ได้สมการที่ 2.19

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_{p2} q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.19)$$

เมื่อ

ค่า q_e และค่าคงที่ k_{p2} สามารถหาได้จากการ plot กราฟระหว่าง t/q_t เทียบกับ t (mg/(g·min))

2.9 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ ประกอบด้วยปัจจัยดังต่อไปนี้

2.9.1 ขนาดพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ รวมทั้งหากมีโครงสร้างรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้น จะเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดี

2.9.2 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ เมื่อมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนหรือโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย จะทำให้การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่ามากที่สุด

ดังนั้นเมื่อโมเลกุลที่มีขนาดเล็กเข้าไปในโพรงตัวดูดซับก่อน หลังจากนั้นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จึงจะหลุดเข้าไป

2.9.3 ความดันของน้ำ ถ้ามีความดันสูง น้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้ตัวดูดซับเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มเพื่อไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับได้ง่ายกว่าน้ำที่มีความดันต่ำ ดังนั้นความหนาแน่นของชั้นฟิล์มของน้ำจึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับอีกด้วย

2.9.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับ ถ้ามีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยหรือไม่ละลายน้ำเลย จะมีประสิทธิภาพในการเกาะติดผิวตัวดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่ละลายน้ำ เนื่องจากสารที่ละลายน้ำได้จะแตกตัวเป็นไอออนและยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของน้ำได้อย่างหนาแน่น ทำให้ยากต่อการดูดซับ

2.9.5 ค่าพีเอช ที่มีต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เช่น ถ้าตัวดูดซับมีประจุเป็นลบและตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวกแล้ว สารละลายมีค่าพีเอชสูง จะส่งผลต่อประสิทธิภาพที่การดูดซับที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีไฮโดรเนียมไอออนน้อยจึงลดการแข่งขันดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ตรงกันข้ามถ้าสารละลายมีค่าพีเอชต่ำ ประสิทธิภาพการดูดซับจะน้อยลง เนื่องจากการแข่งขันดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับและไฮโดรเนียมไอออนที่มีประจุบวก

2.9.6 อุณหภูมิ จะพิจารณาตามกระบวนการคายความร้อนหรือดูดความร้อน ถ้าเป็นกระบวนการคายความร้อน ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ตรงกันข้ามกับการดูดซับที่เป็นแบบดูดความร้อน ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีขึ้น

2.9.7 ระยะเวลาสัมผัส ยิ่งยาวนานจะเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ เมื่อถึงภาวะสมดุล อัตราการดูดซับจะเท่ากับอัตราการคายซับ และมีค่าคงที่เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น

2.10 การคายซับ (Desorption)

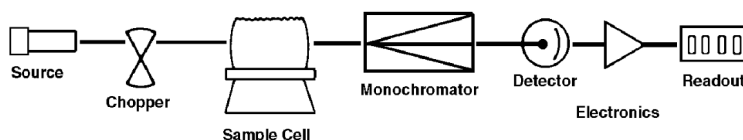
การคายซับ เป็นกระบวนการคืนสภาพของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง ซึ่งเป็นกระบวนการผันกลับของกระบวนการดูดซับ ดังนั้นกระบวนการคายซับจึงเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายสารของตัวถูกดูดซับออกจากพื้นผิวตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง ซึ่งใช้ทั้งวิธีทางกายภาพหรือทางเคมีในการคายซับ โดยเป็นการฟื้นฟูของตัวดูดซับ (Regeneration) ที่หมดสภาพแล้วให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งวิธีทางเคมี วิธีการเผาหรือใช้ความร้อน

2.11 หลักการทำงานของเครื่องสเปกโตรสโกปีการดูดกลืนแสงของอะตอม

เครื่องสเปกโตรสโกปีการดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic Absorption Spectro photometer: AAS) เป็นเทคนิคสำหรับใช้วิเคราะห์หาปริมาณสารโลหะหนักได้มากถึง 70 ธาตุ โดยที่ระบบความเข้มข้นที่วัดได้ในระดับ ppm (part per million)

หลักการทำงานของเครื่อง AAS คือ เมื่อของเหลวตัวอย่างถูกความร้อนที่มาจากเปลวไฟส่วนสร้างอะตอม (atomizer) ความร้อนจะทำให้ของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สผสมของแข็ง (solid-gas aerosol) กลายเป็นแก๊สและโมเลกุลของสารตัวอย่าง เมื่อโมเลกุลได้รับความร้อนที่เหมาะสม โมเลกุลดังกล่าวก็จะแตกตัวเป็นอะตอมอิสระ เกิดการดูดกลืนพลังงานแสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสง (radiation source) หลังจากนั้นแสงที่ผ่านการดูดกลืนจะถูกเลือกเฉพาะความยาวคลื่นที่จำเพาะกับสารแต่ละชนิด และถูกตรวจจับด้วยเครื่องดีเทคเตอร์ (detector) เพื่อเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นกระแสไฟฟ้า แล้วไปยังหน่วยขยายสัญญาณ (amplifier) สิ้นสุดด้วยกระบวนประมวลผลจากคอมพิวเตอร์ค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของโลหะ เมื่อโลหะมีความเข้มข้นที่สูงมาก โดยค่าการดูดกลืนพลังงานแสงก็จะมากตามไปด้วย เป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต

องค์ประกอบของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ที่สำคัญ ประกอบด้วย 5 ส่วนหลักๆ รายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ส่วนประกอบของเครื่อง AAS

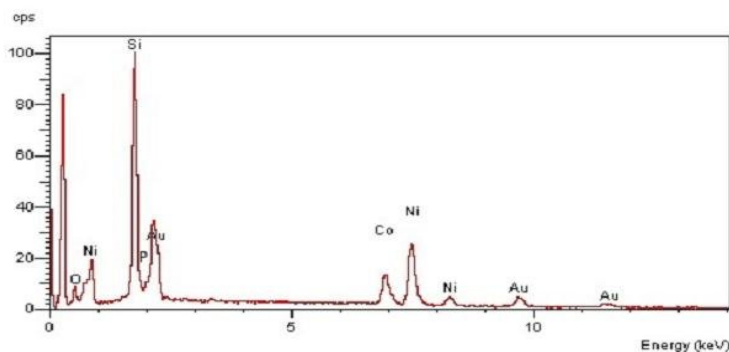
ที่มา: Beaty and Kerber (1993: 9)

- (1) แหล่งกำเนิดแสง (light source) ส่วนใหญ่เป็น Hollow cathode lamp (HCL) และ Electrodeless discharge lamp (EDL) มีหน้าที่ทำให้สารตัวอย่างที่เข้ามาในเครื่องเกิดการแตกตัวเป็นไอออนด้วยความร้อน ทำให้อะตอมของธาตุถูกกระตุ้นและเปล่งแสงเป็นสเปกตรัม
- (2) ส่วนที่ทำให้เกิดอะตอมอิสระเสรี (Atomizer) เป็นส่วนที่สำคัญของเครื่องที่จะทำให้เกิดความแม่นยำในการวิเคราะห์ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของอะตอมเสรี
- (3) ส่วนแยกแสงหรือโมโนโครเมเตอร์ ทำหน้าที่แยกแสงให้ได้ช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ
- (4) ส่วนวัดสัญญาณ (detector) โดย detector ส่วนใหญ่จะใช้ photomultiplier tube (PMT) ซึ่งใช้คู่กับไฟฟ้ากระแสสลับกำลัง 400 – 500 โวลต์
- (5) ส่วนประมวลผลและอ่านผล (Data system and readout unit)

2.12 หลักการทำงานของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน

Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบของธาตุ ส่วนใหญ่ใช้ร่วมกับเครื่อง SEM หลักการทำงานของเครื่องคือ ตัวอย่างที่ศึกษาถูกทำให้แตกตัว

เป็นไอออน (Ionization) จากการถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคพลังงานสูงจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) ทำให้อิเล็กตรอนของสารตัวอย่างที่อยู่ชั้นใน หลุดออกมาจากวงโคจรของอะตอมและเกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระ แล้วอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกจะเข้ามาแทนที่และเกิดการปลดปล่อยพลังงานที่มีความถี่สูงที่เรียกว่า รังสีเอกซ์ โดยพลังงานจากรังสีเอกซ์จะมีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุนั้นๆ จากนั้นเมื่อรังสีเอกซ์เข้าสู่หัววัดชนิด Silicon drift detectors (SDD) จะเกิดการสร้างสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าพลังงานรังสีที่ตกกระทบ เกิดเป็นความสูงของสัญญาณ แล้วส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลเป็นค่าสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ จากนั้นจะนำสเปกตรัมของรังสีเอกซ์มาแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแกน X คือค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ใน (หน่วย keV) หรือตำแหน่งของพีค (peak) ตามแนวนอนซึ่งจะระบุชนิดของธาตุ ส่วนแกน Y คือ จำนวนสัญญาณของรังสีเอกซ์ที่ตรวจจับได้จะสัมพันธ์กับปริมาณของธาตุแต่ละชนิด รายละเอียดดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS

ที่มา: Do Quang Ngoc and et al. (2017: 20)

ข้อดีของการใช้เทคนิค EDS คือ สามารถตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้คร่าวๆธาตุพร้อมกันและใช้เวลาน้อย รวมทั้งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างในสภาพของแข็งได้และไม่ทำลายตัวอย่างให้สูญเสียจากสภาพเดิม

การวิเคราะห์ธาตุจากเครื่อง EDS ด้วยรังสีเอกซ์ สามารถวิเคราะห์ได้ 3 วิธี ดังต่อไปนี้

(1) Point analysis เป็นการวิเคราะห์ให้ลำของอิเล็กตรอนอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างในจุดบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ เพื่อหาค่ารังสีเอกซ์เฉพาะจุดที่ต้องการ

(2) Line scan analysis เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดตรงตำแหน่งตัวอย่าง นิยมใช้ในกรณีหาขอบเขตของรอยต่อหรือโครงสร้าง

(3) Mapping analysis เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่าง ภาพที่ได้จะเป็นภาพในลักษณะการกระจายตัวของธาตุนั้นๆ (ดลฤดี โตเย็น, ม.ป.ป)

2.13 การศึกษาคุณสมบัติเชิงกล

ทดสอบจากเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) แล้วนำมาคำนวณหาค่าคุณสมบัติเชิงกล ประกอบด้วยค่าความเครียดแรงดึง (Tensile Strain: ϵ) คำนวณได้จากสมการที่ 2.20 และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด (%Elongation a break: %EI) จากสมการที่ 2.21

$$\text{Tensile Strain: } \epsilon = \Delta L / L_0 \quad (2.20)$$

$$\% \text{Elongation a break: } \%EI = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 \quad (2.21)$$

โดย ΔL คือระยะความยาวที่เปลี่ยนไปจากความยาวเดิมของตัวฟิล์ม (mm) L_0 คือระยะความยาวเริ่มต้นของฟิล์ม (mm) L_f คือ ระยะความยาวของฟิล์มหลังจากดึงจนขาด (mm)

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการดูดซับ กระบวนการที่เกี่ยวข้องเริ่มตั้งแต่ การเตรียมเปลือกเสาวรส การสกัดสารเพคติน สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ได้แก่ เวลาสัมผัส ค่าพีเอชเริ่มต้น ฯลฯ ซึ่งเป็นสภาวะที่กล่าวถึงในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รายละเอียดดังต่อไปนี้

2.14.1 การเตรียมเปลือกเสาวรส

การเตรียมเปลือกเสาวรสโดยนำมาล้างในแอลกอฮอล์ 95% ร่วมกับการให้ความร้อนเป็นเวลา 12 – 18 นาที จะสามารถทำลายเอนไซม์ที่ย่อยสลายสารเพคตินได้ ซึ่งงานวิจัยของ งามอาจเด็ดดวง (2553) ได้ศึกษาการสกัดสารเพคตินธรรมชาติจากฝรั่งสามชนิด เปรียบเทียบคุณภาพของเพคตินที่สกัดได้กับเพคตินมาตรฐาน โดยพิจารณาจากปริมาณเพคตินที่สกัดได้ ปริมาณเมทอกซิล และปริมาณกรดกาแลคทูโรนิก (ค่าที่ใช้บอกความบริสุทธิ์ของเพคติน) พบว่า พบว่าการเตรียมเปลือกฝรั่งโดยนำไปต้มกับเอทานอลที่อุณหภูมิ 80 °C ที่เวลา 10 นาที จะช่วยกำจัดสารแปลกปลอม เช่น เอนไซม์ที่ย่อยสลายสารเพคติน น้ำตาล สี สารที่ให้รสขม ฯลฯ ส่งผลให้ได้เพคตินที่มีคุณภาพดี

2.14.2 การสกัดสารเพคติน

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดสารเพคตินธรรมชาติ โดยทดลองสภาวะที่แตกต่างกัน ได้แก่ ชนิดของกรด อุณหภูมิ เวลา ฯลฯ พบว่า การใช้อุณหภูมิที่สูงร่วมกับการใช้กรด โดยใช้เวลาในการสกัดนาน จะทำให้ได้ปริมาณสารเพคตินมาก รายละเอียดดังต่อไปนี้

วาสนา อ่อนหวาน (2534) ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสกัดสารเพคตินจากเปลือกเสาวรส ได้แก่ ความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ อัตราส่วนเปลือกเสาวรสต่อน้ำ เพื่อศึกษาจลนศาสตร์ในการสกัดสารเพคตินและสภาวะที่เหมาะสมที่สุด จากการทดลองพบว่า สภาวะที่

เหมาะสมที่สุดที่สามารถทำให้สกัดสารเพคตินได้สูงสุดถึง 81% คือ อัตราส่วนเปลือกเสาวรสต่อน้ำเป็น 1:10 โดยน้ำหนักแห้ง อุณหภูมิที่ใช้ 80 °C และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ใช้คือ 1.5%

สมฤทัย จิตภักดีดินทร์ และอมราวดี จางวาง (2552) ได้ศึกษาการสกัดสารเพคตินจากเปลือกมะนาว พบว่าเมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบการสกัดสารเพคตินด้วยสารละลายกรด 3 ชนิด ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก และกรดฟอสฟอริก ภายใต้การปรับค่า pH สารละลายที่สกัดให้ มีค่า pH 2 ใช้เวลาสกัดนาน 60 นาที ผลการทดลองพบว่า การใช้กรดไฮโดรคลอริกเหมาะสมมากที่สุด ในการสกัดสารเพคตินจากมะนาว คือให้ปริมาณเพคตินสูงสุด 15.26% ต่อน้ำหนักแห้ง

2.14.3 สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ดังต่อไปนี้

พัฒนัชวัลพร สินรัมย์ (2549) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผลตะแบกซึ่งเป็นกระบวนการดูดซับทางชีวภาพ ในการทดลองแบบกะ ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ขนาดของตัวดูดซับ (แบบบดและไม่บด) ปริมาณของตัวดูดซับ ระยะเวลาการสัมผัส และค่า pH โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่ว ผลการศึกษาพบว่า ตัวดูดซับผลตะแบกแบบบดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตะกั่วมากกว่าตัวดูดซับแบบไม่บด คือ 89.74% และ 76.09% ตามลำดับ โดยสภาวะที่มีความเหมาะสมที่สุดของกระบวนการดูดซับคือ ที่ pH 2, ปริมาณตัวดูดซับที่ 1 g และการดูดซับเข้าสู่จุดสมดุลที่เวลา 30 นาที ส่วนไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องทั้งแบบ Langmuir isotherm ที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุด 18.761 mg/g และ Freundlich isotherm ที่มีค่าคงที่ $(1/n) = 0.7516$

Hosam A. Shawky. (2010) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยการใช้เม็ดคอมโพสิตที่ดัดแปรมาจากโซเดียมอัลจิเนตผสมกับแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับสารตะกั่ว (II) โดยบรรจุตัวดูดซับเม็ดคอมโพสิตในคอลัมน์ ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ค่าพีเอชเริ่มต้น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารตะกั่วเริ่มต้น สัดส่วนของโซเดียมอัลจิเนตต่อแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ในตัวดูดซับเม็ดคอมโพสิต และอัตราการป้อนเข้าสู่ระบบ (feed flow rate) ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่ว (II) จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของโซเดียมอัลจิเนตที่ใส่ในตัวดูดซับ การดูดซับเข้าสู่จุดสมดุลที่เวลา 100 นาที ที่ค่า pH 6 ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดคือ 244.6 mg/g ส่วนค่าความสามารถในการดูดซับน้อยที่สุดคือ 76.6 mg/g ที่ค่า pH 1 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับสารตะกั่ว (II) จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารตะกั่วเริ่มต้นที่ป้อนเข้าสู่ระบบ แต่จะแปรผกผันกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และไอโซ เทอร์มการดูดซับสอดคล้องทั้งแบบ Langmuir isotherm ที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุด 243.5 mg/g และ Freundlich isotherm มีค่า $K_F = 7.75$ L/g และ $n = 1.02$

พัชรภรณ์ จันทวี (2559) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตจากเปลือกเสาวรส ตัวดูดซับที่ใช้ทดลองการดูดซับแบบกะประกอบด้วย ฟิล์มเพคตินธรรมชาติ (PN film) ฟิล์มคอมโพสิตทางการค้า (CC film) ฟิล์มเพคตินทางการค้า (PC film) และฟิล์มคอมโพสิตเพคติน (CN film) ผลการทดลองพบว่า การดูดซับของสีย้อมของ CN film มากที่สุดคือ 75.0% รองลงมาคือ CC film 68.45%, PN film 2.03% และ PC film 1.33% โดยสภาวะที่มีการดูดซับสีย้อมสูงสุดที่ pH 2 และการดูดซับเข้าสู่สมดุลภายใน 180 นาที ส่วนไอโซเทอร์มการดูดซับมีความสอดคล้องกับ Langmuir isotherm ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวที่มีปริมาณการดูดซับสูงสุดคือ 54.98 mg/g และอัตราการดูดซับสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม

ปริญญา ทับเที่ยง และสมรักษ์ รอดเจริญ (2560) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำชะขยะบริเวณหลุมฝังกลบเทศบาลเมืองสงขลาด้วยตัวดูดซับสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Oscillatoria sp.* โดยสุมเก็บตัวอย่างน้ำชะขยะจำนวน 3 สถานี แล้วศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารตะกั่ว ได้แก่ ความเป็นกรดต่าง ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับ จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ pH 5, ระยะเวลาในการสัมผัสในการดูดซับสารตะกั่วที่ 150 นาทีและแคดเมียม 90 นาที, ปริมาณของตัวดูดซับสาหร่าย 0.1 g ส่วนไอโซเทอร์มการดูดซับมีความสอดคล้องกับ Langmuir isotherm ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวที่มีปริมาณการดูดซับตะกั่วสูงสุด 31.04 mg/g และดูดซับแคดเมียมสูงสุด 26.43 mg/g

ณัฐกานต์ ภูโหม (2562) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารแมงกานีส (II) โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตเพคตินจากเปลือกแก้วมังกร โดยมีวัตถุประสงค์การวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับเดิมที่เป็นฟิล์มเพคตินธรรมชาติ (PN film) ด้วยการดัดแปรด้วยแรดดินมอนต์มอริลโลไนต์ได้เป็นฟิล์มคอมโพสิตเพคติน (CN film) ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดแมงกานีส (II) ของ CN film มากกว่า PN film คือ 22.21% และ 10.0% ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสารแมงกานีส (II) สูงสุดของ CN film ที่ 39.69%, pH 6 และอุณหภูมิ 65 °C ไอโซเทอร์มการดูดซับมีความสอดคล้องกับ Freundlich isotherm แสดงว่าเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น และอัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 50 นาทีแรกจนเข้าสู่ภาวะสมดุลที่ 180 นาที รวมทั้งอัตราการดูดซับสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม

อุษารัตน์ คำทับทิม และรัฐพล หงส์เกรียงไกร (2562) ได้ศึกษาการกำจัดสารโลหะหนักตะกั่วและสีย้อมคริสตัลไวโอเลตในน้ำเสียตัวดูดซับไบบิวหลวง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว ค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสีย น้ำหนักตัวดูดซับไบบิวหลวง และเวลาที่ใช้ดูดซับ ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารตะกั่วที่ ค่า pH 5, ปริมาณตัวดูดซับไบบิวหลวง 0.05 g, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว 1,800 mg/L, เวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงภาวะสมดุล 30 นาที และค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 76 mg/g ส่วนสภาวะที่

เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตที่ pH 8, ปริมาณตัวดูดซับ 0.05 g, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 1,400 mg/L, เวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงภาวะสมดุล 30 นาที และค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 214 mg/g ไอโซเทอร์มการดูดซับมีความสอดคล้องกับ Freundlich isotherm แสดงว่าเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น

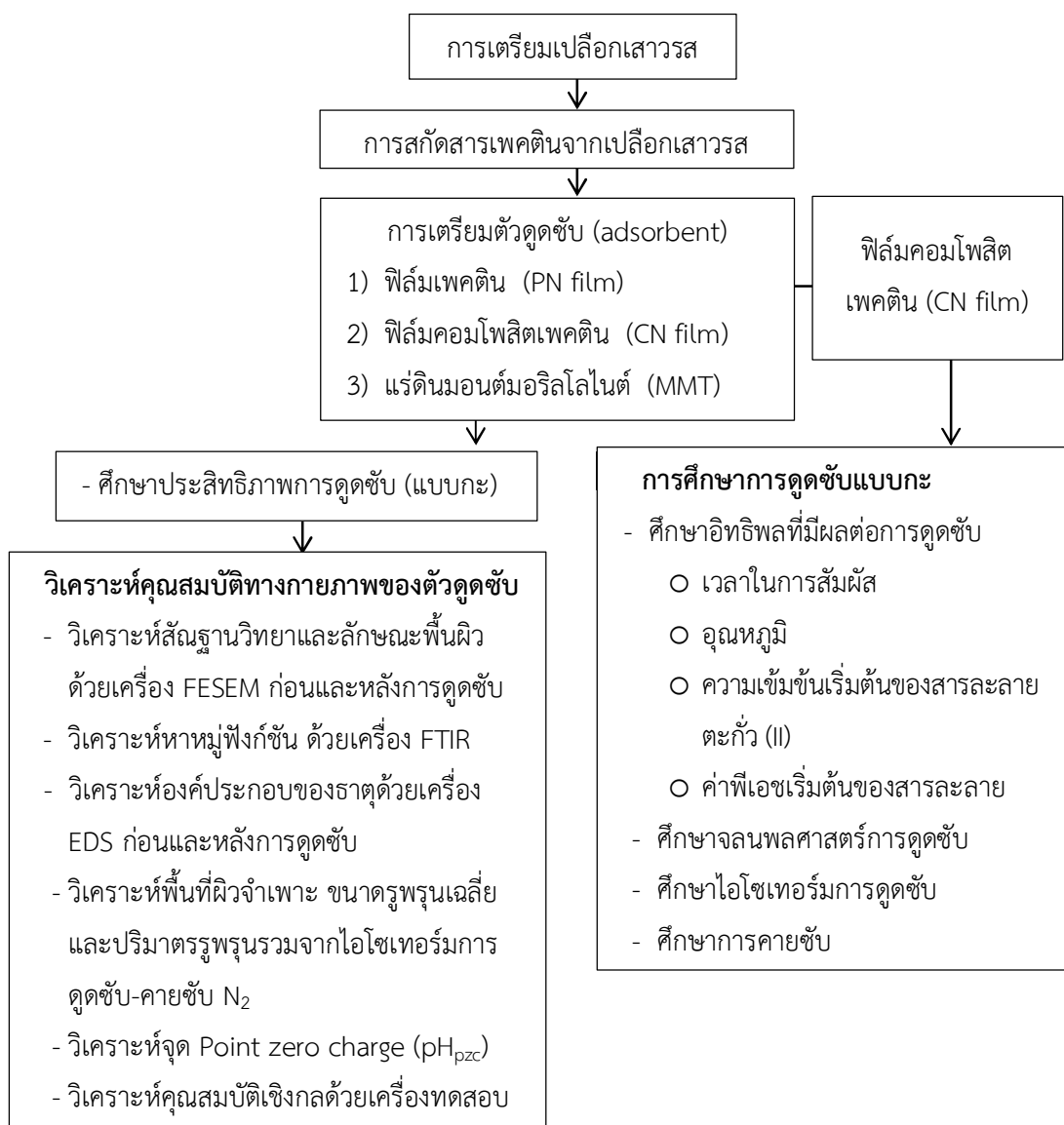
Hung Nguyen Van et al. (2020) ได้นำแป้ง (starch) มาดัดแปรด้วยเรตินมอนต์มอริลไลต์เพื่อเป็นตัวดูดซับสำหรับทดลองกำจัดสารตะกั่ว (II) แคดเมียม (II) และนิกเกิล (II) จากน้ำ โดยกำหนดอิทธิพลในการทดลองแบบกะ ประกอบด้วย ค่า pH เริ่มต้น เวลาการสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารโลหะหนัก และปริมาณของตัวดูดซับ ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการดูดซับประกอบด้วย ปริมาณของตัวดูดซับ จำนวน 20 g adsorbent/L ค่า pH 5 เวลาการสัมผัสของสารตะกั่ว (II) 45 นาที ค่าการดูดซับสูงสุด 21.5 mg/g เวลาสัมผัสของแคดเมียม (II) 60 นาที ค่าการดูดซับสูงสุด 4.2 mg/g และเวลาสัมผัสของนิกเกิล 90 นาที ค่าการดูดซับสูงสุด 2.7 mg/g อีกทั้งยังพบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Langmuir isotherm และแบบจำลองอัตราการดูดซับเป็นสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 กรอบงานวิจัย

เริ่มต้นด้วยการเตรียมเปลือกเสาวรสแล้วนำมาสกัดสารเพคติน จากนั้นนำมาผลิตฟิล์มคอมโพสิต แล้วนำตัวดูดซับแต่ละชนิดไปวิเคราะห์คุณสมบัติและประสิทธิภาพการดูดซับแบบกะ หลังจากนั้นนำฟิล์มคอมโพสิตเพคตินไปศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการดูดซับแบบกะ กระบวนการดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์

3.2.1.1 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

3.2.1.2 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

3.2.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FESEM)

3.2.1.4 เครื่องอโตเมติกเซอร์เฟกอนาไลเซอร์ (Automatic Surface Analyzer)

3.2.1.5 เครื่องสเปกโตรสโคปีแบบแยกกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy: EDS)

3.2.1.6 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester)

3.2.1.7 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)

3.2.1.8 ตู้อบแห้ง

3.2.1.9 เครื่องเขย่าแนวราบ

3.2.1.10 เครื่องชั่งละเอียด 3 ตำแหน่ง

3.2.1.11 เครื่องบดละเอียด

3.2.1.12 ผ้าขาวบาง

3.2.2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.2.2.1 ตะกั่วไนเตรท ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)

3.2.2.2 กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

3.2.2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.2.2.4 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

3.2.2.5 โพแทสเซียมออกไซด์ (KOH)

3.2.2.6 แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)

3.2.2.7 โซเดียมอัลจิเนต

3.2.2.8 อะซิโตน

3.2.2.9 กลีเซอรอล (Glycerol)

3.2.2.10 แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite clay)

3.2.2.11 สารละลายตะกั่วมาตรฐาน

3.2.2.12 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water: DI water)

3.2.2.13 เอทานอล (Ethanol: $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$)

3.3 การเตรียมเปลือกเสาวรศ

ขั้นตอนการเตรียมเปลือกเสาวรศ ดัดแปลงจากงานวิจัยของ งามอาจ เต็ดดวง (2553) พบว่าการเตรียมเปลือกฝรั่งโดยนำไปต้มกับเอทานอลที่อุณหภูมิ 80 °C ที่เวลา 10 นาที จะช่วยกำจัดสารแปลกปลอม เช่น เอนไซม์ที่ย่อยสลายสารเพคติน น้ำตาล สี สารที่ให้รสขม ฯลฯ ส่งผลให้ได้เพคตินที่มีคุณภาพดี การเตรียมเปลือกเสาวรศมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 นำเปลือกเสาวรศที่เตรียมไว้ล้างด้วยน้ำเปล่าให้สะอาด แยกเยื่อสีขาวที่อยู่ภายในเปลือกเสาวรศออก จากนั้นนำเปลือกเสาวรศไปบดให้ละเอียดแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

3.3.2 นำเปลือกเสาวรศที่บดเรียบร้อยแล้วต้มด้วยเอทานอล 95% ในอัตราส่วนเอทานอลต่อตัวอย่างเปลือกเสาวรศที่บดแล้ว 1:1 (w/v) ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 12 นาที เพื่อกำจัดสารที่ละลายในแอลกอฮอล์และเอนไซม์ที่ย่อยสลายสารเพคตินในตัวอย่าง

3.3.3 นำมากรองด้วยผ้าขาวบาง เพื่อแยกตะกอนกับสารละลาย

3.3.4 นำตัวอย่างตะกอนที่แยกได้ล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วบีบน้ำออก ทำการล้าง 3 ครั้ง

3.3.5 นำตัวอย่างตะกอนที่แยกได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างตะกอนคงที่ แล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

3.3.6 นำตัวอย่างตะกอนไปบดให้ละเอียดอีกครั้ง แล้วนำไปร่อนในตะแกรงให้ได้ขนาด 500 μm แล้วนำตัวอย่างที่ได้เก็บไว้ในถุงพลาสติกที่มีซิปล็อค แล้วนำไปแช่เย็นเพื่อเตรียมทดลองในขั้นตอนต่อไป

3.4 การสกัดสารเพคตินจากเปลือกเสาวรศ

ขั้นตอนในการสกัดสารเพคตินจากเปลือกเสาวรศ ดัดแปลงจากงานวิจัยของ งามอาจ เต็ดดวง (2553) พบว่าการสกัดด้วยกรด HCl ได้ปริมาณสารเพคตินสูงสุดเมื่อเทียบกับกรดชนิดอื่น ซึ่งได้นำเปลือกฝรั่งที่บดแล้วมาสกัดเพคตินในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 98 °C โดยเติมอัตราส่วนระหว่าง 0.05 M HCl และเปลือกฝรั่งบด 12:1 (v/w) นำไปกรองแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 12 hr เพื่อให้เพคตินตกตะกอน การสกัดสารเพคตินจากเปลือกเสาวรศมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.1 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.3 ใส่ในบีกเกอร์ จำนวน 10 g

3.4.2 เติมกรด HCl ที่มีความเข้มข้น 0.05 M ปริมาตร 200 mL โดยกำหนดอัตราส่วนของกรด HCl ต่อตัวอย่างเปลือกเสาวรศที่บดแล้ว 20:1 (v/w) จากนั้นนำส่วนผสมไปกวนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 70 นาที

3.4.3 นำไปกรองด้วยผ้าขาวบาง แล้วปล่อยให้สารละลายที่กรองได้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

3.4.4 ทำการตกตะกอนสารเพคติน โดยการเติมเอทานอล 95% ในอัตราส่วนเอทานอล:ตัวอย่างสารละลายเพคติน 2:1 (v/v) จากนั้นคนสารละลายให้เข้ากันด้วยความเร็วสม่ำเสมอ แล้วเก็บสารละลายดังกล่าวไว้ในห้องมืดหรือห้องที่ไม่มีแสงรบกวน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 hr

3.4.5 ทำการแยกตะกอนของสารเพคตินออกจากสารละลายด้วยการกรองผ่านผ้าขาวบาง จากนั้นนำตะกอนเพคตินที่แยกได้มาล้างด้วยเอทานอลที่มีความเข้มข้น 70% จำนวน 3 ครั้ง เพื่อให้สารเพคตินมีความบริสุทธิ์ ลดการปนเปื้อนจากเถ้าและสารเจือปนอื่นๆ ที่มาจากการตกตะกอนของเพคติน จากนั้นล้างด้วยอะซิโตน เพื่อกำจัดสีที่ไม่พึงประสงค์จากเพคติน

3.4.6 นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 65 °C จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ แล้วเก็บไว้ในถุงพลาสติกที่มีซิปปิด หลังจากนั้นก็นำตัวอย่างไปแช่เย็นเพื่อเตรียมทดลองในขั้นตอนต่อไป

3.5 การเตรียมฟิล์มเพคตินและฟิล์มคอมโพสิต

นำสารเพคตินมาดัดแปรเป็นฟิล์มเพคตินและฟิล์มคอมโพสิตเพคตินโดยใช้วิธี crosslinking ของ Mariana Altenhofen da Silva. (2009) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.5.1 นำแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) จำนวน 0.5 g ผสมกับน้ำ DI 100 mL แล้วนำไปกวนผสมกันจนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์กระจายตัวทั้งหมด

3.5.2 เติมเพคตินที่ได้จากการสกัดในข้อ 3.4 และโซเดียมอัลจิเนต ในอัตราส่วน 1 g : 1 g (w/w) และ glycerol 0.6 mL/g pectin กวนส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 65 °C

3.5.3 เติมสารละลาย CaCl_2 ที่มีความเข้มข้น 0.4 g/L ปริมาณ 30 mL ในส่วนผสมที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นกวนต่อไปจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.5.4 เทสารละลายลงในจานเลี้ยงเชื้อ ประมาณ 15 g/dish หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 20 hr

3.5.5 นำตัวอย่างฟิล์มที่ได้มาทำการ Crosslinking ด้วยสารละลายที่ประกอบด้วย 7% CaCl_2 (g/mL) glycerol 5% (g/mL) ปริมาณ 100 mL เป็นเวลา 30 นาที

3.5.6 นำฟิล์มตัวอย่างออกจากสารละลาย แล้วผึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกว่าฟิล์มจะแห้ง แล้วบรรจุฟิล์มลงในถุงพลาสติกที่มีซิปปิด ปัดปากถุงให้มิดชิดแล้วเก็บไว้ในตู้เย็นเพื่อเตรียมทดลองในขั้นตอนต่อไป

3.5.7 วิธีการเตรียมฟิล์มเพคติน ใช้วิธีการเดียวกันกับการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตเพคติน แต่ไม่มีการผสมแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ลงไป

3.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ

3.6.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิว

การวิเคราะห์ศึกษาสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ (ฟิล์มเพคติน, ฟิล์มคอมโพสิต และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่อบแห้งแล้ว) ก่อนการดูดซับและหลังการดูดซับที่ได้จากการ

ทดลองข้อ 3.8.1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FESEM)

3.6.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับในช่วงก่อนการดูดซับและหลังการดูดซับที่ได้จากการทดลองข้อ 3.8.1 วิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR) โดยเทคนิค ATR-FTIR วิเคราะห์ด้วยรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นในช่วง $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ (อรรถย ลีลาพจนานพร, 2547)

3.6.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ

วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในช่วงก่อนการดูดซับและหลังการดูดซับที่ได้จากการทดลองข้อ 3.8.1 ด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FESEM) เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) ก่อนและหลังการดูดซับ หลักการทำงานคือวิเคราะห์ตามค่าพลังงานจากรังสีเอ็กซ์ ที่มีค่าเฉพาะตัวในแต่ละชนิดของธาตุนั้น ๆ

3.6.4 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยและปริมาตรรูพรุนรวม

นำตัวดูดซับไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวมและขนาดรูพรุนเฉลี่ย โดยใช้หลักการการดูดซับและการคายซับของก๊าซไนโตรเจนบนตัวดูดซับ (N_2 -adsorption-desorption) ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและคุณสมบัติของรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer) ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Quadrasorb-EVO อุณหภูมิที่ใช้ 77.4 K

3.6.5 การวิเคราะห์จุด Point zero charge (pH_{pzc})

นำฟิล์มคอมโพสิต 0.1 g ใส่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความเข้มข้น 0.1 M และ 0.01 M ที่ค่าพีเอช 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยปรับค่าพีเอชด้วยสารละลาย 0.1 M HCl และ 0.1 M KOH วัดค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0) แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ $30 \text{ }^\circ\text{C}$ หลังจากนั้นวัดค่าพีเอชสุดท้าย (pH_f) นำไปสร้างกราฟ โดย plot ระหว่าง $\text{pH}_0 - \text{pH}_f$ และ pH_0 หาจุดที่มีประจุเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) จากค่า X-intercept

3.6.6 วิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester)

นำฟิล์มคอมโพสิตและฟิล์มเพคติน ตัดขนาด $1 \times 7 \text{ ซม.}$ ทำการทดสอบแรงดึงของฟิล์มด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) โดยใช้แรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D882 คำนวณหาค่าความเครียดแรงดึง (Tensile Strain: ϵ) และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด (%Elongation at break: %EI)

3.7 การวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสารตะกั่ว (II)

3.7.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II)

สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) สักเคราะห์ 1,000 mg/L เตรียมจากตะกั่วไนเตรท ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) จำนวน 1.599 g ละลายในน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน (Deionized water: DI water) ปริมาตร 1,000 mL

3.7.2 การเตรียมสารละลายตะกั่ว (II) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

นำสารละลายตะกั่ว (II) มาตรฐาน (Standard solution Lead) 1,000 mg/L เตรียมความเข้มข้นที่ต่างกันคือ 40, 60, 80, 100 และ 120 mg/L และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ให้ได้ปริมาตร 100 mL แล้วนำไปวัดค่า pH เริ่มต้น โดยสูตรที่ใช้เตรียมความเข้มข้น

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (3.1)$$

เมื่อ

C_1 = ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) ที่มีค่าเท่ากับ 1,000 mg/L

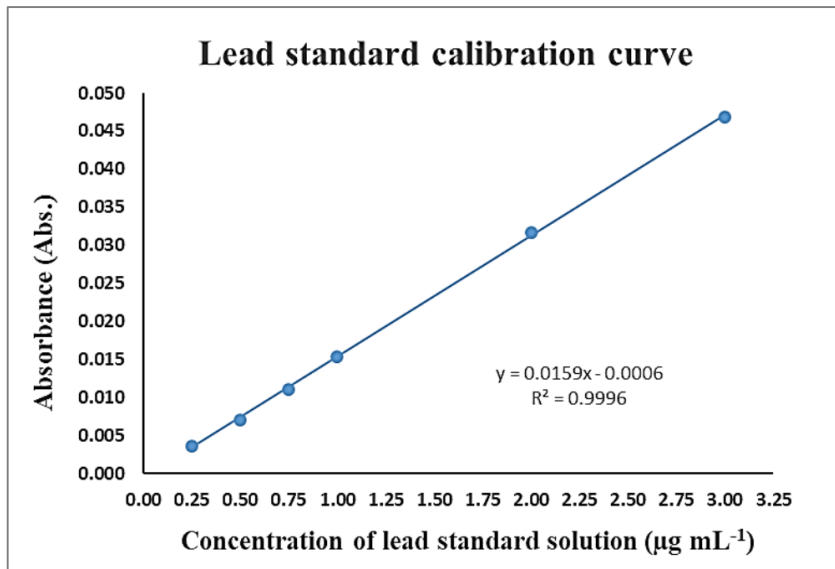
C_2 = ค่าความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) ที่ต้องเตรียม (mg/L)

V_1 = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) 1,000 mg/L ที่ต้องใช้ (mL)

V_2 = ปริมาตรของสารละลายตะกั่ว (II) ที่ต้องการเตรียมก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่อง AAS (mL)

3.7.3 การทำกราฟมาตรฐานด้วยเครื่อง AAS

นำสารละลายตะกั่ว (II) ที่เตรียมได้วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่อง AAS โดยใช้ lamp สำหรับสารตะกั่ว (Lead hollow cathode lamp) จะได้กราฟมาตรฐาน (Standard curve) ซึ่งถูกคำนวณอัตโนมัติโดยซอฟต์แวร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ (ศิริลักษณ์ มินะกนิษฐ์, 2550) กราฟจะแสดงค่า Correlation Coefficient (R^2) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) แสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของสารตะกั่ว (II)

ที่มา: อุดสี บุญมีชัย และวิรัช เรืองศรีตระกูล (2562: เว็บไซต์)

3.8 การศึกษาการดูดซับแบบกะ

3.8.1 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับที่ทดสอบ 3 ชนิด คือ พิล์มเพคติน พิล์มคอมโพสิต และแรดดินมอนต์มอริลโลไนต์ มีวิธีการดังต่อไปนี้

3.8.1.1 เตรียมสารละลายตะกั่ว (II) ความเข้มข้น 120 mg/L ปริมาตร 100 mL เพื่อเป็นสารละลายตะกั่ว (II) สังเคราะห์เริ่มต้น และนำไปวัดค่าพีเอชเริ่มต้น (pH₀)

3.8.1.2 นำสารละลายตะกั่ว (II) สังเคราะห์เริ่มต้นดังกล่าว ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อหาค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) เริ่มต้น

3.8.1.3 เติมตัวดูดซับลงไปในสารละลายตะกั่ว (II) จำนวน 0.1 g แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบ ที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 30 °C

3.8.1.4 แยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย โดยฟิล์มเพคตินและฟิล์มคอมโพสิตเพคตินใช้ฟอรัเซปคิบบอก ส่วนแรดดิน MMT ใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) นำตัวดูดซับทั้งสามชนิดไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เพื่อเตรียมสำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพต่อไป ส่วนสารละลายนำไปวัดค่าพีเอชที่สมดุล และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อทดสอบหาค่าการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) ด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณของสารตะกั่ว(II) ที่ถูกดูดซับที่ภาวะสมดุล ในสมการที่ 2.7 และเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่ว (II) ที่ภาวะสมดุล ในสมการที่ 2.8

3.8.2 การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการสัมผัส

3.8.2.1 เตรียมสารละลายตะกั่ว (II) สังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ปริมาตร 100 mL ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL แล้ววัดค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0)

3.8.2.2 นำสารละลายตะกั่ว (II) ที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อหาความเข้มข้นเริ่มต้น

3.8.2.3 เติมฟิล์มคอมโพสิต จำนวน 0.1 g ในสารละลายตะกั่ว (II) ที่เตรียมไว้

3.8.2.4 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 30 °C เก็บตัวอย่างทุก ๆ 10 นาทีใน 1 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที จนถึงชั่วโมงที่ 3 แล้วเก็บตัวอย่างทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าความเข้มข้นคงที่

3.8.2.5 แยกตัวดูดซับออกจากสารละลายและวัดค่าพีเอชที่สมดุล แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อทดสอบหาค่าการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) ด้วยกราฟมาตรฐาน

3.8.2.6 สร้างกราฟระหว่างค่าปริมาณการดูดซับที่เวลาใด ๆ (q_t) และ เวลา

3.8.2.7 อิทธิพลของเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม พิจารณาจากปริมาณการดูดซับของสารตะกั่ว (II) เริ่มคงที่และเข้าสู่สมดุล และกำหนดเป็นอิทธิพลในการทดลองขั้นต่อไป

3.8.3 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ

3.8.3.1 เตรียมสารละลายตะกั่ว (II) สังเคราะห์ความเข้มข้น 120 mg/L จากสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) ปริมาตร 100 mL แล้ววัดค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0)

3.8.3.2 นำสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อหาความเข้มข้นเริ่มต้น

3.8.3.3 เติมฟิล์มคอมโพสิตเพคติน จำนวน 0.1 g ในสารละลายตะกั่ว (II) ที่เตรียมไว้

3.8.3.4 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบ ที่ความเร็วรอบ 200 rpm อุณหภูมิในการทดลองที่ 30, 40, 50 และ 60 °C โดยระยะเวลาในการเขย่าสารละลายที่จุดสมดุลการดูดซับได้มาจากการทดลองในข้อ 3.8.2 (อิทธิพลเวลาการสัมผัส)

3.8.3.5 แยกตัวดูดซับออกจากสารละลายและวัดค่าพีเอชที่สมดุล แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อทดสอบหาค่าการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) ด้วยกราฟมาตรฐาน

3.8.3.6 ผลการทดลองที่ได้คำนวณหาปริมาณของสารตะกั่ว (II) ที่ถูกดูดซับได้สูงสุด ในสมการที่ 2.7 และประสิทธิภาพของการกำจัดสารตะกั่ว (II) สูงสุด (%Heavy metal removal) ในสมการที่ 2.8 เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทดลองขั้นต่อไป

3.8.4 การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II)

3.8.4.1 ทำการทดลองเหมือนข้อ 3.8.2, 3.8.3 โดยอุณหภูมิในการทดลองได้มาจากการทดลองในข้อ 3.8.3 (อิทธิพลของอุณหภูมิ) เลือกใช้สารละลายตะกั่ว (II) สี่ความเข้มข้น 40, 60, 80, 100 และ 120 mg/L

3.8.4.2 ผลการทดลองที่ได้คำนวณหาปริมาณของสารตะกั่ว (II) ที่ถูกดูดซับได้สูงสุด ในสมการที่ 2.7 และประสิทธิภาพของการกำจัดสารตะกั่ว (II) สูงสุด (%Heavy metal removal) ในสมการที่ 2.8 เพื่อหาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) ที่เหมาะสมในการทดลองขั้นต่อไป และหาไอโซเทอร์มการดูดซับว่าสอดคล้องกับสมการ Langmuir หรือสมการ Freundlich

3.8.5 การศึกษาอิทธิพลค่าพีเอชของสารละลาย

3.8.5.1 เตรียมสารละลายตะกั่ว (II) สี่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ได้จากอิทธิพลการทดลองในข้อ 3.8.4 (ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II)) ปริมาตร 100 mL นำสารละลายมาปรับค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0) ที่มีค่าแตกต่างกัน คือ 2, 3, 4, 5 และ 6 ปรับค่าพีเอชด้วยสารละลาย 0.5 M HNO_3 และ 0.5 M NaOH

3.8.5.2 นำสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อหาความเข้มข้นเริ่มต้น

3.8.5.3 เติมฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์จำนวน 0.1 g ในสารละลายตะกั่ว (II) ที่เตรียมไว้

3.8.5.4 นำสารละลายที่เติมฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์แล้วไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบด้วยความเร็วรอบ 200 rpm ระยะเวลาสัมผัสและอุณหภูมิในการเขย่าสารละลายได้มาจากการทดลองในข้อ 3.8.2 (อิทธิพลของเวลาการสัมผัส) และข้อ 3.8.3 (อิทธิพลอุณหภูมิ)

3.8.5.5 แยกตัวดูดซับออกจากสารละลายและวัดค่าพีเอชที่สมดุล แล้วนำสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อทดสอบหาค่าการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) ด้วยกราฟมาตรฐาน

3.8.5.6 นำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณของสารตะกั่ว (II) ที่ถูกดูดซับสูงสุดในสมการที่ 2.7 และประสิทธิภาพของการกำจัดสารตะกั่ว (II) สูงสุด (%Heavy metal removal) ในสมการที่ 2.8 เพื่อหาค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสม

3.8.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

ทำการทดลองเหมือนข้อ 3.8.2 โดยนำผลการทดลอง ประกอบด้วย เวลาในการดูดซับ, ปริมาณสารตะกั่ว (II) ที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ (คำนวณจากสมการที่ 3.2) และปริมาณสารตะกั่ว (II) ที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล (คำนวณจากสมการที่ 2.7) ไปศึกษาจลนพลศาสตร์แบบจำลองอัตราการดูดซับว่าสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order equation) หรือสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order equation) โดยพิจารณาจากค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด ได้จากการ plot กราฟระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับเวลา ดังสมการที่ 2.15 สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

และการ plot กราฟระหว่าง t/q_t กับเวลา ดังสมการที่ 2.19 สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม รวมทั้งพิจารณาค่า q_e ที่ได้จากการคำนวณ plot กราฟในสมการที่ 2.15 และ 2.19 เทียบกับค่า q_e ที่ได้จากการทดลองว่ามีความใกล้เคียงกันหรือไม่ ถ้าใกล้เคียงแสดงว่าสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยานั้น ๆ

$$q_t = \frac{V(C_0 - C_t)}{m} \quad (3.2)$$

เมื่อ

q_t = ปริมาณของสารโลหะหนักบนผิวของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ
ที่เวลาใดๆ (mg/g)

C_0 = ความเข้มข้นของสารโลหะหนักเริ่มต้น (mg/L)

C_t = ความเข้มข้นของสารโลหะหนักที่เวลาใดๆ (mg/L)

V = ปริมาตรของสารละลาย (L)

m = น้ำหนักของตัวดูดซับ (adsorbent) (g)

3.9 การศึกษาการคายซับ

ศึกษาการคายซับตัวดูดซับหลังการดูดซับที่ได้มาจากการทดลองข้อ 3.8.1 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.9.1 เตรียมสารละลายตะกั่ว (II) สังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ปริมาตร 100 mL แล้วทำการวัดค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0)

3.9.2 นำสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อหาความเข้มข้นเริ่มต้น

3.9.3 เติมฟิล์มคอมโพสิตเพคติน จำนวน 0.1 g ในสารละลายตะกั่ว (II) ที่เตรียมไว้

3.9.3 นำสารละลายที่เติมฟิล์มคอมโพสิตเพคตินแล้วไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบ ที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 30 °C เพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับ

3.9.4 แยกฟิล์มคอมโพสิตเพคตินออกจากสารละลายแล้วนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 hr

3.9.5 นำฟิล์มคอมโพสิตเพคตินที่อบแห้งแล้วมาผสมกับตัวชะละลาย (eluent) แต่ละชนิด ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน (DI water), สารละลาย 0.1 M HCl และสารละลาย 0.1 M NaOH ปริมาตร 100 mL แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบ ที่ความเร็วรอบ 200 rpm อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 24 hr

3.9.6 แยกฟิล์มคอมโพสิตเพคตินออก และนำสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อทดสอบหาค่าการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) ด้วยกราฟ

มาตรฐาน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การคายซับ (%Desorption) ดังสมการที่ 3.3 และหาปริมาณการคายซับ (mg/g) ดังสมการที่ 3.4 ดังต่อไปนี้

$$\% \text{Desorption} = \frac{(C_e)}{q_e} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{ปริมาณการคายซับ (mg/g)} = \frac{(\% \text{Desorption}) (q_e)}{100} \quad (3.4)$$

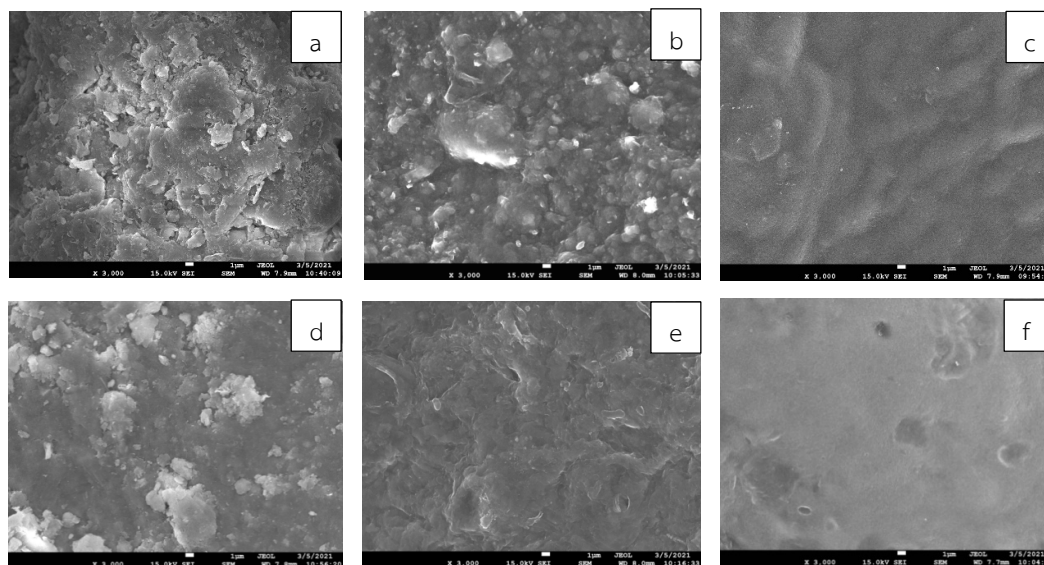
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิว

ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเปรียบเทียบก่อนและหลังการดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FESEM) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่า ลักษณะผิวของ MMT, CN film และ PN film ก่อนการดูดซับ (ภาพที่ 4.1d, 4.1e, 4.1f ตามลำดับ) มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระกว่า MMT, CN film และ PN film หลังดูดซับ (ภาพที่ 4.1a, 4.1b, 4.1c ตามลำดับ) เนื่องจากมีโมเลกุลของสารตะกั่ว (II) เข้ามาดูดซับบนพื้นผิวภายนอกและภายในของตัวดูดซับ ส่วนที่ขรุขระของตัวดูดซับจึงถูกเติมเต็มด้วยโมเลกุลของสารตะกั่ว (II) จึงเป็นสาเหตุให้พื้นผิวของตัวดูดซับเรียบขึ้นหลังการดูดซับ



ภาพที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ (กำลังขยาย 3,000 เท่า) (a) MMT ก่อนดูดซับ (b) CN film ก่อนดูดซับ (c) PN film ก่อนดูดซับ (d) MMT หลังดูดซับ (e) CN film หลังดูดซับ (f) PN film หลังดูดซับ

4.1.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

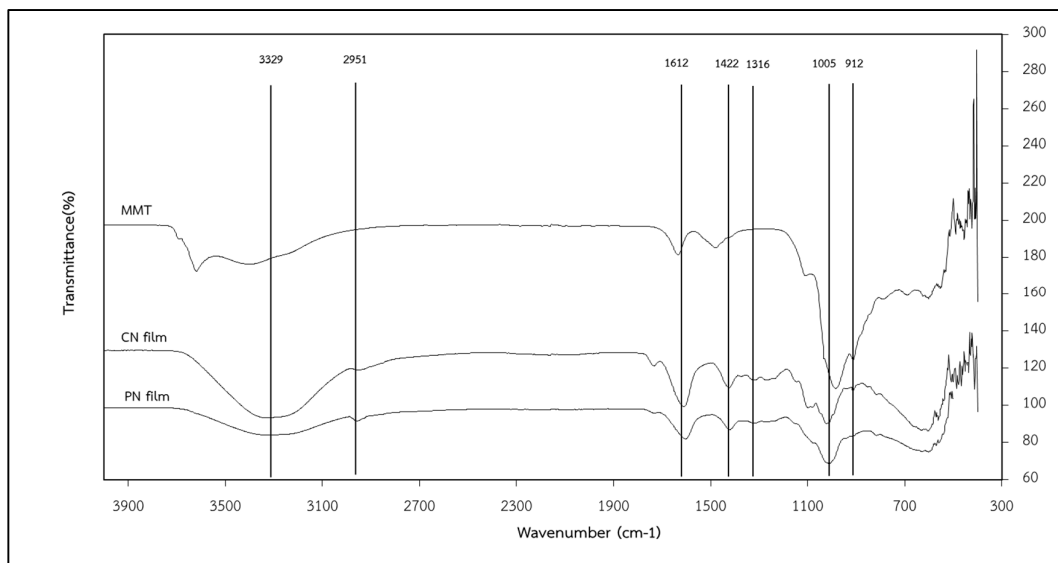
จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันจากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR) ของตัวดูดซับชนิดทั้งสามชนิดหลังการดูดซับที่ได้มาจากการทดลองข้อ 3.8.1 ดังแสดงในภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.1 โดย IR-spectra ของ MMT ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน Al-OH stretching ที่พิกัด $1,612\text{ cm}^{-1}$ หมู่ O-H stretching ที่พิกัด $3,329\text{ cm}^{-1}$ หมู่ Si-O stretching ที่พิกัด $1,005\text{ cm}^{-1}$ หมู่ Si-O-Si stretching ที่พิกัด 912 cm^{-1} ตัวดูดซับทั้งสามชนิดมีหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน ได้แก่ หมู่ O-H stretching ที่พิกัด $3,329\text{ cm}^{-1}$ หมู่ Al-OH stretching ที่พิกัด $1,612\text{ cm}^{-1}$ และหมู่ Si-O stretching ที่พิกัด $1,005\text{ cm}^{-1}$ ส่วนหมู่ฟังก์ชัน C-H ($-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3$) stretching ที่พิกัด $2,951\text{ cm}^{-1}$ หมู่ C-H stretching ที่พิกัด $1,316\text{ cm}^{-1}$ และหมู่ CO-CH₂ stretching ที่พิกัด $1,422\text{ cm}^{-1}$ จะพบใน PN film และ CN film เท่านั้น

การปรากฏของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si stretching ที่พิกัด 912 cm^{-1} หมู่ Si-O stretching ที่พิกัด $1,005\text{ cm}^{-1}$ และหมู่ Al-OH stretching ที่พิกัด $1,612\text{ cm}^{-1}$ ของ CN film นั้น เป็นการยืนยันว่ามีส่วนประกอบของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์อยู่ภายในโครงสร้าง

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นชี้ให้เห็นว่า หมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic group) และหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) เป็นหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ในการยึดเหนี่ยวกับตะกั่ว (II)

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

Band range (cm^{-1})			Functional group
PN film	CN film	MMT	
3,329	3,329	3,329	O-H stretching
2,951	2,951	-	C-H ($-\text{CH}_2-$, $-\text{CH}_3$) stretching
1,612	1,612	1,612	Al-OH stretching
1,422	1,422	-	CO-CH ₂ stretching
1,316	1,316	-	C-H stretching
1,005	1,005	1,005	Si-O stretching
-	912	912	Si-O-Si stretching



ภาพที่ 4.2 สเปกตรัม FTIR ของ MMT, CN film และ PN film

4.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุจากตัวดูดซับทั้งสามชนิดด้วยเครื่อง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FESEM) เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับก่อนการดูดซับไม่มีองค์ประกอบของสารตะกั่ว (II) หลังจากการดูดซับแล้วเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนโดยน้ำหนัก (%wt) ของสารตะกั่ว (II) บนพื้นผิวตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิ 30 °C เวลา 24 hr พบว่ามีปริมาณสารตะกั่ว (II) ที่ถูกดูดซับใน PN film มีค่า %wt สูงสุดคือ 24.92% รองลงมาคือ CN film (23.56%) และ MMT (7.61%) จากข้อมูลตารางดังกล่าว เป็นการยืนยันว่าตัวดูดซับหลังจากที่ผ่านการดูดซับแล้ว มีสารตะกั่ว (II) เป็นองค์ประกอบอยู่จริง การที่ MMT มีค่า %wt ของสารตะกั่ว (II) น้อยที่สุดเนื่องจากการวิเคราะห์ EDS เป็นการประมาณธาตุองค์ประกอบเฉพาะพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับเท่านั้น ไม่ได้แสดงองค์ประกอบทั่วทั้งก้อน อีกทั้งสารตะกั่ว (II) ส่วนใหญ่แพร่เข้าไปและเกิดการดูดซับภายในรูพรุนของ MMT นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบของธาตุชนิดอื่นๆ เพิ่มเติมคือ Si, Al ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีองค์ประกอบของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ภายในโครงสร้าง CN film อยู่จริง

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง FESEM ที่เชื่อมต่อกับ EDS

องค์ประกอบ ของธาตุ	เปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนโดยน้ำหนัก (%wt)					
	ก่อนการดูดซับ			หลังการดูดซับ		
	MMT	CN film	PN film	MMT	CN film	PN film
C	9.93	27.57	34.98	6.34	26.75	37.61
O	42.32	47.36	41.37	46.53	37.41	33.80
Mg	1.71	-	-	1.92	-	-
Na	1.82	-	-	-	-	-
Cl	-	6.88	9.51	-	-	-
Al	9.05	2.23	-	8.21	2.00	-
Si	22.36	5.42	-	19.69	5.20	-
Ca	-	7.69	10.60	0.88	1.53	-
Ti	-	-	-	1.10	-	-
Fe	11.73	-	-	4.74	-	-
Pt	1.07	2.85	3.54	2.97	3.54	3.67
Pb	N.D.	N.D.	N.D.	7.61	23.56	24.92

4.1.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยและปริมาตรรูพรุนรวม

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวมและขนาดรูพรุนเฉลี่ย ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและคุณสมบัติของรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer) ด้วย BET-method ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของ MMT ($38.34 \text{ m}^2/\text{g}$) มีค่ามากที่สุด เมื่อเทียบกับ CN film ($1.55 \text{ m}^2/\text{g}$) และ PN film ($0.27 \text{ m}^2/\text{g}$) แร่ดิน MMT มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเนื่องจากมีโครงสร้างพื้นฐานที่มีผลึกเล็กๆเรียงกันหลายชั้นและความพรุนสูง ดังนั้นเมื่อเติมแร่ดิน MMT เข้าไปในฟิล์มเพคตินเพื่อดัดแปรเป็น CN film จะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของ CN film ลดลงเนื่องจากแร่ดิน MMT แทรกอยู่ในโครงสร้างภายในของ CN film ทำให้ชั้นของเพคตินบดบังรูพรุนของ MMT บางส่วน ส่งผลให้สูญเสียพื้นที่ผิวภายในของ MMT ไป เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย พบว่า ตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด เป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2-50 nm) ซึ่งขนาดรูพรุนเฉลี่ยของ PN film มีขนาดใหญ่ที่สุดคือ 31.18 nm ส่วนขนาดรูพรุนของ CN film และ MMT มีขนาดใกล้เคียงกันคือ 5.44 nm และ 3.96 nm ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การดัดแปร MMT ไปเป็น CN film จะทำให้ขนาดรูพรุนของ CN film

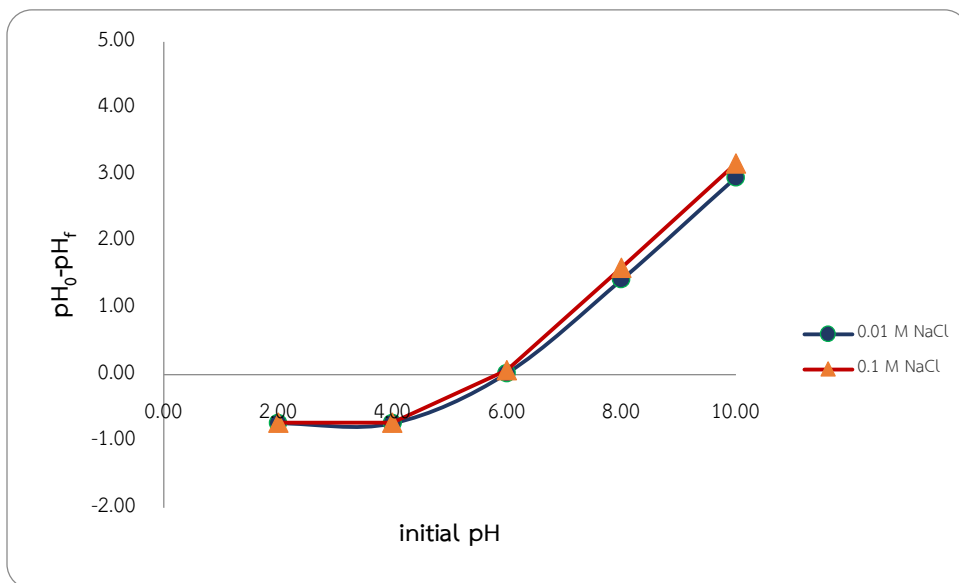
เพิ่มขึ้น เนื่องจากชั้นเพคตินไปบดบังรูพรุนขนาดเล็กของ MMT ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาตรรูพรุนรวม พบว่า ตัวดูดซับทั้งสามชนิดมีปริมาตรรูพรุนรวมใกล้เคียงกัน โดยแร่ดิน MMT มีปริมาตรรูพรุนรวมมากที่สุด คือ $8.95 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{g}$ รองลงมาคือ PN film $1.77 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{g}$ และ CN film $1.26 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{g}$ แร่ดิน MMT มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจึงทำให้ปริมาตรรูพรุนรวมสูงตามไปด้วย ส่วน CN film มีปริมาตรรูพรุนรวมน้อยกว่า MMT เนื่องจากรูพรุนขนาดเล็กของ MMT ใน CN film ถูกบดบังด้วยชั้นของเพคติน หลงเหลือไว้เพียงรูพรุนที่มีขนาดใหญ่บางส่วน นอกจากนี้ ขนาดรูพรุนรวมของ CN film มีค่าใกล้เคียงกับ PN film เนื่องจากพื้นผิวภายนอกของ CN film ประกอบด้วยชั้นของเพคตินและมีแร่ดิน MMT แทรกอยู่ภายในโครงสร้างด้านใน จึงทำให้ปริมาตรรูพรุนของ CN film ใกล้เคียงกับ PN film

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยและปริมาตรรูพรุนรวม

ตัวแปร	ชนิดของตัวดูดซับ		
	MMT	CN film	PN film
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	38.4	1.55	0.27
เส้นผ่าศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (nm)	7.92	10.88	31.18
ปริมาตรรูพรุนรวม (cm^3/g)	8.95×10^{-2}	1.77×10^{-2}	1.26×10^{-2}

4.1.5 ผลการวิเคราะห์จุด Point zero charge (pH_{pzc})

การวิเคราะห์จุด Point zero charge (pH_{pzc}) คือ ค่าความเป็นกรด-เบส ที่ทำให้ประจุผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นกลางหรือบริเวณพื้นผิวมีประจุรวมเป็นศูนย์ เมื่อสารละลายมีค่า pH น้อยกว่าค่า pH_{pzc} ประจุผิวตัวดูดซับจะมีค่าเป็นบวก ตรงกันข้ามเมื่อสารละลายมีค่า pH สูงกว่าค่า pH_{pzc} ผิวของตัวดูดซับจะมีค่าเป็นลบ ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 4.3 พบว่า CN film ซึ่งถูกนำไปศึกษาการทดสอบแบบกะในปัจจัยต่างๆ มีค่า pH_{pzc} คือ 6 ดังนั้นสารละลายที่มีค่า pH 3, 4 และ 5 มีโอกาสที่พื้นผิวเป็นบวกหรือลบก็ได้ แต่จากการวัดค่า pH_{pzc} เฉลี่ยในช่วง pH 3 – 5 พบว่าประจุสุทธิมีค่าลบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ในสารละลายที่มีค่า pH 3, 4 และ 5 พื้นผิวตัวดูดซับมีประจุสุทธิเป็นลบและจะดูดซับไอออนโลหะหนักซึ่งมีประจุบวกได้ดี



ภาพที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์จุด Point zero charge (pH_{pzc}) ของ CN film

4.1.6 คุณสมบัติเชิงกลของ CN film และ PN film

ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มตัวดูดซับ 2 ชนิด คือ CN film และ PN film นำไปทดสอบค่าความเครียดแรงดึง (Tensile Strain: ϵ) และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด (%Elongation a break: %EI) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าค่าคุณสมบัติเชิงกลของ CN film ดีกว่า PN film โดยค่าความเครียดแรงดึง ของ CN film เท่ากับ 8.13 Pa และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด เท่ากับ 34.28% ขณะที่ค่าความเครียดแรงดึง ของ PN film เท่ากับ 4.45 Pa และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด เท่ากับ 23.87% ค่าความเครียดแรงดึงที่สูงกว่าของ CN film จะส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่น แข็งแรงทนทานต่อแรงดึงภายนอกที่มากระทำและฉีกขาดได้ยากกว่า ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดที่สูงกว่า แสดงถึงความเหนียวของตัวดูดซับและความทนทานต่อการดึงยืดเมื่อมีแรงหรือปัจจัยภายนอกมากระทำ และเมื่อพิจารณาค่าคุณสมบัติเชิงกลของ CN film ที่สูงกว่า PN film อาจจะเป็นผลมาจากการที่ CN film มีส่วนผสมของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มแร่ดินสเมกไทต์ (Smectite) มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ยึดเกาะได้ดี และมีความชอบน้ำ (hydrophilic (กรมทรัพยากรธรณี, ม.ป.ป) คุณสมบัติของแร่ดินดังกล่าวเมื่อนำมา crosslinking กับ CaCl_2 และ glycerol จึงช่วยในการเชื่อมโครงสร้างของฟิล์มให้ประสานกันดีและส่งผลให้ฟิล์มมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ CN film มีค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติเชิงกลของตัวดูดซับ

ตัวแปร	CN film	PN film
ความเครียดแรงดึง (Tensile Strain: ϵ) (-)	8.61	4.45
เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด (%Elongation a break: %EI)	34.28%	23.87%

4.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบกะ

4.2.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

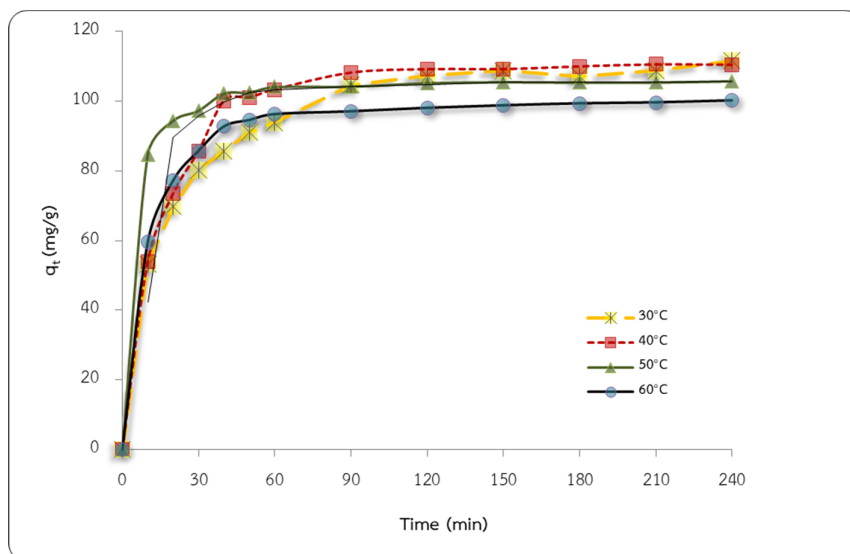
ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารตะกั่ว (II) ด้วยตัวดูดซับ CN film, PN film และ MMT พบว่า ตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงและใกล้เคียงกัน ซึ่ง PN film มีค่า %Removal สูงสุด คือ 96.24% รองลงคือ CN film 92.67% และ MMT 91.89% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และเลือกใช้ CN film ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อการดูดซับแบบกะ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตะกั่ว (II) ที่ไม่แตกต่างกันและมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับ PN film

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดและปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับ

ตัวแปร	MMT	CN film	PN film
%removal Pb^{2+}	91.89	92.67	96.24
q_e (mg/g)	113.26	114.22	118.62

4.2.2 ผลการศึกษาอิทธิพลเวลาในการสัมผัส

อิทธิพลของเวลาสัมผัสที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่ว (II) ดังแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่าที่ทุกอุณหภูมิ ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรก หลังจากนั้น ปริมาณการดูดซับค่อยๆ เพิ่มขึ้นช้าลงและเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 150 นาที เนื่องจากในช่วงแรกตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวว่าง ทำให้ดูดซับสารตะกั่ว (II) ได้เร็ว จากนั้นเกิดการดูดซับภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ทำให้การดูดซับช้าลงจนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับคงที่



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารตะกั่ว (II) ด้วย CN film กับเวลาสัมผัส ($C_0 = 120 \text{ mg/L}$, $\text{pH}_0 = 4.7 \pm 0.5$, อุณหภูมิ $30 - 60^\circ\text{C}$)

ยังมีงานวิจัยที่สนับสนุนข้อมูลเวลาในการสัมผัสต่อการดูดซับสารตะกั่ว และเวลาในการสัมผัสของตัวดูดซับคือฟิล์มคอมโพสิต ที่เข้าสู่จุดสมดุลโดยใช้เวลาไม่เกิน 24 hr งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 งานวิจัยที่สนับสนุนข้อมูลเวลาในการสัมผัสที่เข้าสู่จุดสมดุล

ปีที่วิจัย	รายละเอียดงานวิจัย	เวลาที่เข้าสู่จุดสมดุล
2549	พัฒนัชวัลพร สินรัมย์ ได้ศึกษาการดูดซับสารตะกั่ว (II) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผลตะแบก	30 นาที
2553	Hosam A. Shawky. ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยการใช้เม็ดคอมโพสิตที่ดัดแปรจากโซเดียมอัลจิเนตผสมกับแร่อินมอนด์มอริโลไนต์ในการดูดซับสารตะกั่ว (II) โดยบรรจุตัวดูดซับเม็ดคอมโพสิตในคอลัมน์	100 นาที
2557	ยุพดี เส้นขาว ได้ศึกษาการกำจัดไอออนแคดเมียมและตะกั่วออกจากน้ำเสียด้วยมะขามและเปลือกทับทิม	120 นาที

ตารางที่ 4.6 งานวิจัยที่สนับสนุนข้อมูลเวลาในการสัมผัสที่เข้าสู่จุดสมดุล

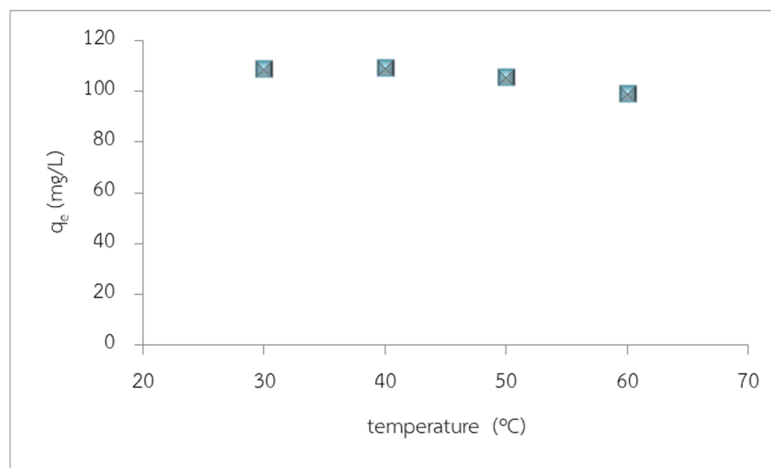
ปีที่วิจัย	รายละเอียดงานวิจัย	เวลาที่เข้าสู่จุดสมดุล
2559	พัชรภรณ์ จันทวี ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมมาลาโคห์กรีนโดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ที่สกัดจากเปลือกเสาวรส	180 นาที
2559	พรวิวัฒน์ พาพรมพิภ, ปานใจ สื่อประเสริฐสิทธิ์ และธายุกร พระบำรุง ได้ศึกษาการดูดซับสารตะกั่ว (II) โดยใช้ซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพ	120 นาที
2560	ปริญญ์ ทับเที่ยง และสมรักษ์ รอดเจริญ ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำชะขยะบริเวณหลุมฝังกลบเทศบาลเมืองสงขลาด้วยตัวดูดซับสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน <i>Oscillatoria sp.</i>	ตะกั่ว 150 นาที, แคดเมียม 90 นาที
2562	อุษารัตน์ คำทับทิม และรัฐพล หงส์เกรียงไกร ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารตะกั่วและสีย้อมคริสตัลไวโอเลตออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไบบิวหลวง	30 นาที
2562	ณัฐกานต์ ภูโหม ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารแมงกานีส (II) โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์จากเปลือกแก้วมังกร	180 นาที

จึงสรุปได้ว่า เวลาที่ใช้ในการดูดซับสารตะกั่วแล้วเข้าสู่จุดสมดุลอยู่ในช่วง 30 - 180 นาที และตัวดูดซับฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ใช้เวลาในการดูดซับแล้วเข้าสู่จุดสมดุลในช่วงเวลาไม่เกิน 180 นาที

4.2.3 ผลการศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิ

อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่ว (II) ที่จุดสมดุล โดยทดลองที่อุณหภูมิช่วง 30, 40, และ 60 °C และเวลาสัมผัสที่ 150 นาที ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.5 พบว่าปริมาณการดูดซับของสารตะกั่ว (II) ในทุกๆอุณหภูมิแทบจะไม่แตกต่างกันมาก แสดงว่าอิทธิพลอุณหภูมิส่งผลต่อปริมาณการดูดซับที่น้อยมาก โดยสภาวะที่ดีที่สุดคืออุณหภูมิ 40 °C เกิดปริมาณการดูดซับสูงสุด คือ 109.15 mg/g และถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 50 และ 60 °C ปริมาณการดูดซับของสารตะกั่ว (II) จะลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงหนึ่งๆ สารตะกั่ว (II) จะดูดติดผิวตัวดูดซับได้ไม่ค่อยดี จากการเกิดการคายซับของตัวดูดซับบางส่วน ดังนั้นการดูดซับจึงเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic reaction) โดยมีผลการทดลองที่สอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐกานต์ ภูโหม (2562) ซึ่งใช้ฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์จากเปลือกแก้วมังกรในการดูดซับสาร

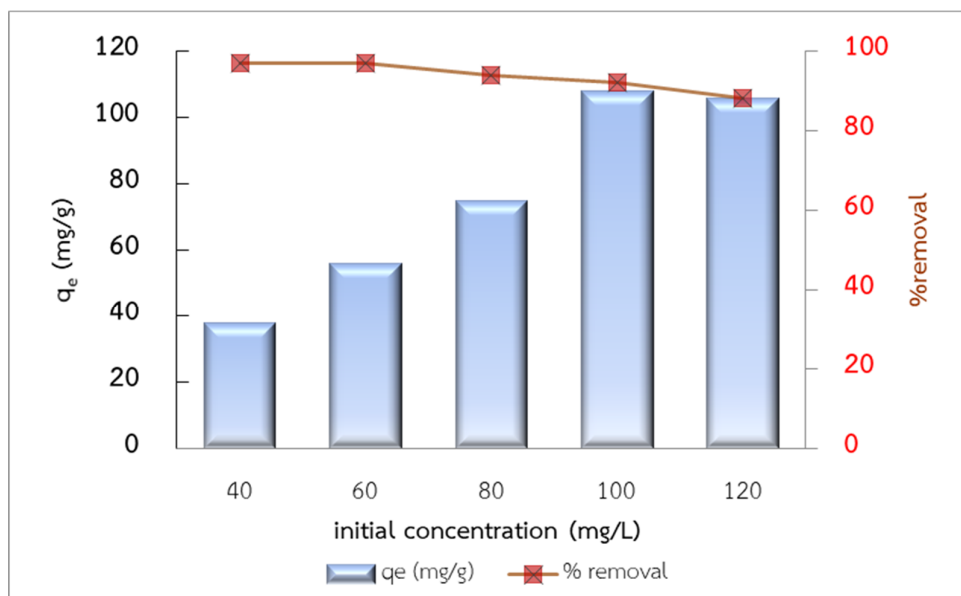
แคดเมียม พบว่า ที่อุณหภูมิ 35 – 40 °C ปริมาณการดูดซับเพิ่ม และถ้าเพิ่มอุณหภูมิเป็น 55 °C และ 65 °C ปริมาณการดูดซับจะลดลง



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารตะกั่ว (II) ด้วย CN film กับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ($C_0 = 120$ mg/L, $pH_0 = 4.7 \pm 0.5$, เวลาสัมผัส 150 นาที, อุณหภูมิ ช่วง 30 - 60 °C)

4.2.4 ผลการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II)

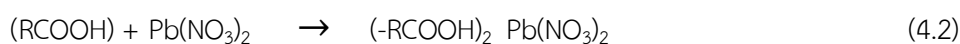
อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารตะกั่ว (II) โดยทดลองที่ความเข้มข้น 40 - 120 mg/L เวลาสัมผัส 150 นาที และอุณหภูมิ 40 °C ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.6 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) 100 mg/L ($q_e = 108.0$ mg/L) เกิดปริมาณการดูดซับสูงสุด เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) เพิ่มสูงขึ้น ปริมาณการดูดซับจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้น 40 - 100 mg/L และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) เพิ่มจาก 100 mg/L เป็น 120 mg/L ปริมาณการดูดซับจะเริ่มคงที่ เนื่องจากพื้นที่ผิวตัวดูดซับเกิดการอิ่มตัวจากการถูกดูดซับจนเต็มรูพรุน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) เพิ่มสูงขึ้น ตัวดูดซับจะสามารถดูดซับสารตะกั่ว (II) ได้มากขึ้นจนถึงจุดสมดุล ถ้าความเข้มข้นสูงกว่านี้ สารตะกั่ว (II) จะไม่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น (อุซารัตน์ คำทับทิม และรัฐพล หงส์เกรียงไกร, 2562) ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่ว (II) (%removal) พบว่าทุกความเข้มข้นไม่แตกต่างกันมาก ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่ว (II) จะลดลงตามความเข้มข้นของสารตะกั่ว (II) ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่ว (II) สูงสุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) 40 mg/L (96.92%) รองลงมาคือ 60 mg/L (96.85%)



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ และค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่ว(II) ด้วย CN film กับเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) ที่แตกต่างกัน ($C_0 = 40 - 120$ mg/L, $pH_0 = 4.7 \pm 0.5$, อุณหภูมิ 40°C)

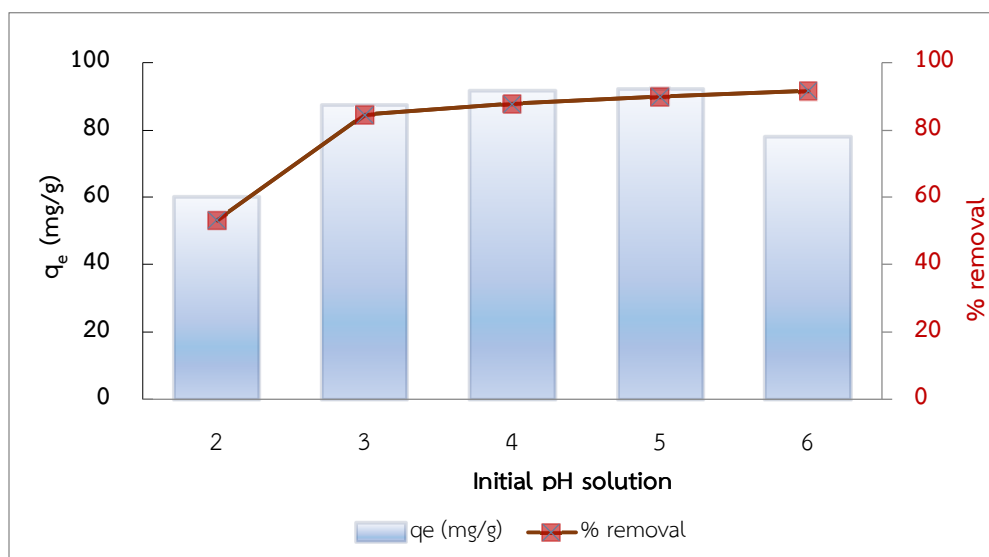
4.2.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้น

ผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว (II) ต่อปริมาณการดูดซับที่ค่า pH 2, 3, 4, 5 และ 6 ทดลองภายใต้อิทธิพลที่ได้จากการทดลองก่อนหน้านี้คือ เวลาสัมผัส 150 นาที, อุณหภูมิ 40°C และความเข้มข้นของสารตะกั่ว (II) เริ่มต้น 100 mg/L ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.7 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือค่า pH 5 ($q_e = 92.12$ mg/g) เกิดปริมาณการดูดซับสูงสุด เนื่องจากที่ pH 5 สารละลายตะกั่ว (II) มีค่า pH น้อยกว่าค่า pH_{pzc} ประจุผิวตัวดูดซับจะมีค่าเป็นลบ แล้วเกิดการดูดซับของสารโลหะหนักบริเวณ active site ได้ดี เกิดการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิลกลายเป็นคาร์บอกซิเลตไอออนส่งผลให้ไอออนบวกสามารถยึดเหนี่ยวกับประจุลบของหมู่คาร์บอกซิเลตบนพื้นผิวตัวดูดซับด้วยพันธะไฮโดรเจนได้ดีขึ้น ซึ่งสมการพันธะไฮโดรเจนของหมู่คาร์บอกซิเลตและไฮดรอกซิล เป็นไปตามสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ (Umpuch et al., 2017)



ที่ค่า pH 6 ซึ่งเป็นจุด pH_{pzc} มีค่า %removal สูงสุดคือ 91.7% แต่กลับมีปริมาณการดูดซับที่น้อยเมื่อเทียบกับค่า pH เริ่มต้นต่างๆ แสดงให้เห็นว่า ที่ค่า pH 6 สารละลายตะกั่ว (II) เริ่มเกิดการตกตะกอนจากการถูกไฮดรอลิซิสในรูปของ $Pb(OH)_2$ ทำให้สารละลายตะกั่วมีความเข้มข้นลดลง ส่งผลให้ค่า %removal สูงเกินจริงได้ (Fen Li et al, 2019) และเมื่อพิจารณาที่ค่า pH 2 พบว่าค่าปริมาณการดูดซับสารตะกั่ว (II) (59.99 mg/g) และค่า %removal (53.35%) น้อยที่สุด อาจเกิดจากการที่ช่วงพีเอชต่ำ ๆ สารละลายจะมีความเป็นกรดสูง มีความเข้มข้นของโปรตอน (H^+) ซึ่งโปรตอนจะเกิดการแข่งกันการดูดซับกับไอออนของโลหะหนัก แล้วเกิดการดูดซับของสารโลหะหนักบริเวณ active site น้อยลง แต่เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 3, 4 และ 5 โปรตอนจะเริ่มลดลง ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นคือ 87.45, 91.48 และ 92.12 mg/g ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.7

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของปริญญา ทับเที่ยง และสมรักษ์ รอดเจริญ (2560) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่วและแคดเมียมด้วยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Oscillatoria* sp. จากน้ำชะขยะบริเวณหลุมฝังกลบเทศบาลเมืองสงขลา และสอดคล้องกับงานของอุษารัตน์ คำทับทิม และรัฐพล หงส์เกรียงไกร (2562) ได้ศึกษาการกำจัดสารตะกั่วและสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตในน้ำเสียโดยใช้ตัวดูดซับไบโพลาลอง พบว่าสภาวะการดูดซับที่เหมาะสมที่สุด คือ pH 5



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ และค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่ว(II) ด้วย CN film กับค่าพีเอชเริ่มต้นที่แตกต่างกัน (pH = 2 - 6, เวลาสัมผัส 150 นาที, อุณหภูมิ 40 °C และความเข้มข้นสารตะกั่ว (II) เริ่มต้น 100 mg/L)

4.2.6 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

ค่าคงที่ของสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ พบว่าสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมากกว่า โดยพิจารณาจากค่า R^2 แสดงว่าขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (rate of limiting step) โดยค่า q_e ที่ได้จากการคำนวณตามแบบจำลองของสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีค่าใกล้เคียงกับค่า q_e ที่ได้จากการทดลองมากกว่าสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่สมการอัตราการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 - 60 °C

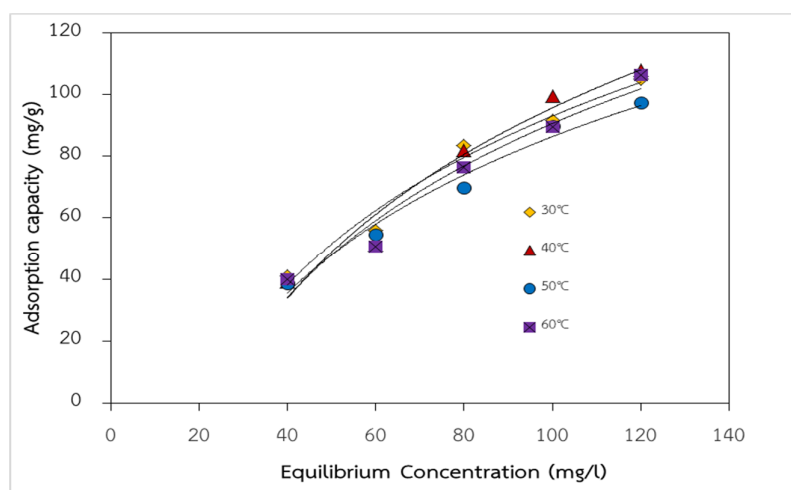
อุณหภูมิ (°C)	$q_{e,exp}$ (mg/g)	สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order reaction rate)			สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order reaction rate)		
		$k_1 \times 10^{-3}$ (min ⁻¹)	q_e (mg/g)	R^2	$k_2 \times 10^{-3}$ (g/mg-min)	q_e (mg/g)	R^2
30	108.71	11.3	12.35	0.9855	1.6	109.89	0.9928
40	109.15	43.7	68.22	0.7521	1.2	114.94	0.9952
50	105.51	16.1	5.88	0.7456	8.9	105.26	0.9996
60	98.79	14.3	7.64	0.8429	4.2	100.00	0.9979

4.2.7 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ภาพที่ 4.8 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับในช่วงอุณหภูมิ 30 - 60 °C เมื่อนำมาพล็อตกับสมการของ Langmuir โดยค่าคงที่ของสมการทั้ง 2 แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า มีความสอดคล้องกับสมการของ Langmuir มากกว่า Freundlich ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) โดยผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัย Yaoning Chen et al. (2020) ซึ่งได้ศึกษาการนำแป้ง (starch) มาดัดแปรด้วยแรดิมอนต์มอร์ไลโนต์เพื่อเป็นตัวดูดซับสำหรับทดลองกำจัดสารตะกั่ว (II) พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Langmuir isotherm และแบบจำลองอัตราการดูดซับเป็นสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับช่วงอุณหภูมิ 30 - 60 °C

อุณหภูมิ (°C)	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	q_m (mg/g)	k_L (L/g)	R^2	k_F (L/g)	n	R^2
30	117.64	55.86	0.9796	4.99	2.62	0.8739
40	128.21	46.94	0.9863	4.91	2.43	0.9447
50	105.26	45.66	0.9839	4.71	2.87	0.8323
60	120.48	43.67	0.9774	4.66	2.33	0.8591



ภาพที่ 4.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir โดยใช้ CN film ที่อุณหภูมิ 30 - 60 °C , $pH_0 = 4.7 \pm 0.5$

4.2.8 ผลการศึกษาการคายซับ

ผลการศึกษาการคายซับของ CN film หลังจากนำไปดูดซับที่สภาวะอุณหภูมิ 30 °C ค่าพีเอชเริ่มต้น 4.7 ± 0.5 ความเข้มข้นของสารตะกั่ว (II) เริ่มต้น 120 mg/L และเวลา 24 hr ด้วยตัวชะละลาย (Eluent) ชนิดต่างๆ แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.9 พบว่า ตัวทำละลาย 0.1 M HCl ทำให้เกิดการคายซับสูงสุด คือ 90.54% รองลงมาคือ 0.1 M NaOH 68.26% และน้ำปราศจากไอออน (DI water) มีค่าเปอร์เซ็นต์การคายซับน้อยสุด 2.23% จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า 0.1 M HCl เป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุด และมีประสิทธิภาพสูงในการชะละลายไอออนของสารตะกั่ว (II) ออกมาได้เกือบหมด เนื่องจากการเติม CN film ที่ดูดซับตะกั่วไว้แล้วในตัวชะละลาย HCl ซึ่งมีค่าพีเอช เท่ากับ

1.0 และมีค่า pH ต่ำกว่าค่า pH_{pzc} มาก ส่งผลให้อำนาจของประจุลบที่พื้นผิว CN film มีค่ามากขึ้น และมีความเข้มข้นของโปรตอน (H^+) ในสารละลายสูง ลักษณะเช่นนี้ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างโปรตอน (H^+) ในสารละลายและประจุบวกของสารตะกั่ว (II) ที่ดูดซับบนพื้นผิวของ CN film ก่อนหน้านั้นแล้ว มีสัดส่วนที่เพิ่มสูงขึ้น จึงเกิดการคายซับสูง ส่วน 0.1 M NaOH แม้จะเป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพรองลงมา แต่ไม่เหมาะสำหรับนำมาคายซับ CN film เนื่องจาก ทำให้ CN film เกิดการเปื่อยยุ่ยและเปลี่ยนสภาพหลังการคายซับและอาจทำให้สารตะกั่ว (II) เกิดการตกตะกอนได้ถ้า ณ สภาวะ pH 6 เป็นต้นไป

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การดูดซับสารละลายตะกั่ว (II) โดยใช้ CN film เกี่ยวข้องทั้งกระบวนการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี ซึ่ง CN film เป็นตัวดูดซับที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ หลังจากเกิดการคายซับแล้ว

ตารางที่ 4.9 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการคายซับสารตะกั่ว (II)

ตัวทำละลาย	%Desorption	ปริมาณการคายซับ (q_e : mg/g)
น้ำปราศจากไอออน (DI water)	2.2	2.47
0.1 M HCl	90.54	100.24
0.1 M NaOH	68.26	75.58

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของตัวดูดซับ 3 ชนิด พบว่า ลักษณะพื้นผิวของ MMT มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก และมีพื้นผิวขรุขระมากกว่า CN film เนื่องจากมีชั้นของเพคตินห่อหุ้มอนุภาคของ MMT ไว้ CN film มีหมู่ฟังก์ชัน Si-O stretching, Al-OH stretching และ Si-O-Si stretching เป็นการยืนยันว่า มีส่วนประกอบของ MMT อยู่ในโครงสร้าง เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุเพื่อยืนยันว่ามีสารตะกั่ว (II) ในตัวดูดซับหลังการดูดซับ พบว่า CN film มีปริมาณธาตุคาร์บอนสูงกว่า MMT และตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดหลังการดูดซับมีสารตะกั่ว (II) เป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์จากไอโซเทอร์มการดูดซับ-คายซับแก๊สไนโตรเจนที่ 77.4 K CN film มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าและมีปริมาตรรูพรุนรวมน้อยกว่า MMT แต่เมื่อเปรียบเทียบพื้นผิวจำเพาะ พบว่า PN film มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า CN film และ CN film มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า PN film โดยเฉพาะความสามารถในการทนต่อแรงดึงที่มากกว่า

ผลการศึกษาการดูดซับแบบกะ ตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดมีประสิทธิภาพการกำจัดสารตะกั่ว (II) สูงและมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับตะกั่ว (II) ของ CN film พบว่า การดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรกและเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 150 นาที การเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 °C เป็น 40 °C ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 40 °C เกิดปริมาณการดูดซับสารตะกั่ว (II) สูงสุด คือ 109.15 mg/g แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 50 °C และ 60 °C ปริมาณการดูดซับจะมีค่าลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) 100 mg/L มีปริมาณการดูดซับสูงสุดคือ 108.0 mg/g รวมทั้งที่ค่า pH 5 ($q_e = 92.12$ mg/g) มีปริมาณการดูดซับสารตะกั่ว (II) สูงสุด ไอโซเทอร์มการดูดซับมีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดลิช แสดงว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ส่วนอัตราการดูดซับสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงว่าขั้นตอนการใช้ไอเล็กตรอนร่วมกันระหว่างสารตะกั่ว (II) และตัวดูดซับเป็นขั้นกำหนดอัตรา ผลการศึกษาพฤติกรรมการคายซับ พบว่า 0.1 M HCl ทำให้เกิดการคายซับสูงสุดถึง 90.54% ($q_e = 100.24$ mg/g) เมื่อใช้น้ำปราศจากไอออนเกิดการคายซับเล็กน้อย 2.2% ($q_e = 2.47$ mg/L) แสดงว่าการดูดซับสารตะกั่ว (II) และโดยใช้ CN film เกี่ยวข้องแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไอออนบวกของสารตะกั่ว (II) และประจุลบของ CN film เมื่อทำการชะละลายด้วย

สารละลาย 0.1 HCl จึงทำการคายซับ เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างประจุบวกของไอออนบวกของตะกั่ว (II) และไฮโดรเจนไอออนของกรด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ขั้นตอนการทำฟิล์มตัวดูดซับ ควรเพิ่มขนาดของฟิล์มเพื่อใช้ในการทดสอบ tensile เนื่องจากต้องใช้พื้นที่ของฟิล์มค่อนข้างมากในการทดสอบดึงยึด

5.2.2 ขั้นตอนการสกัดเพคตินโดยการกวนผงเสาวรสผ่านความร้อนกับกรด HCl ควรทดสอบเปลี่ยนอุณหภูมิหรือเวลาที่ใช้ในการกวน เพื่อให้ได้ปริมาณสารเพคตินมากขึ้นและเพคตินมีคุณภาพดีขึ้น จากการที่มีหมู่คาร์บอกซิลเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น อีกทั้งในขั้นตอนการสกัดสารเพคตินอาจจะเพิ่มขั้นตอนการเติมสาร Chelating agent ได้แก่ สาร polyphosphate และ Oxalate ทำให้สารเพคตินในพืชส่วนใหญ่ที่อยู่ในรูปของ Calcium pectate ที่ไม่สามารถถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรด สามารถสกัดเพคตินได้เพิ่มขึ้นจากการที่ Calcium pectate ถูกแปรสภาพในรูปของสารเพคตินเพิ่มขึ้น

5.2.3 ควรศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับเพิ่มเติม เช่น Thermogravimetric Analysis (TGA)

5.2.4 ควรศึกษาตัวดูดซับกับสารโลหะหนักอื่นๆ เช่น ปปรอท แคดเมียม ทองแดง ฯลฯ

5.2.5 อาจพัฒนาฟิล์มตัวดูดซับให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดีขึ้น โดยปรับสัดส่วนของโซเดียมอัลจิเนตและกลีเซอรอล หรืออาจจะใช้ส่วนประกอบอื่นแทนแร่ดินมอนต์มอริลโลน

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. งานสำรวจแหล่งวัสดุทางธรณีวิทยาที่ใช้ปรับปรุงพื้นที่ดินเค็มในพื้นที่เลือกสรร.
http://www.dmr.go.th/ewt_news.php?nid=48446&filename=index.
 13 มีนาคม, 2564.
- จักรกฤษณ์ อัมพูช. เอกสารประกอบวิชาเรียน 1303 716 กระบวนการดูดซับขั้นสูง (Advanced Adsorption Process). อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2562.
- จักรี ศรีแสง, กาญจนา เชื้อคำ และศุภมิตรา คำผาลา. พืชร้ายใกล้ตัว...สารตะกั่วในศูนย์พัฒนา
 ชูชาติ อารีจิตราอนุสรณ์. เครื่องมือวิทยาศาสตร์. ขอนแก่น: คลังนานาวิทยา, 2544.
- เด็กเล็ก. กรุงเทพฯ: สำนักโรคจากการประกอบอาชีพฯ กรมควบคุมโรค, 2559.
- ณัฐมณฑน์ สมราชสีจินดา, เพ็ญธนา สมานพันธุ์ และปวีณา วัดบัว. คู่มือความรู้เรื่อง คู่มือการ
 วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักและทองแดงในน้ำประปาด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (Flame). นครนายก: โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, 2557.
- ณัฐกานต์ ภูใหม่. การดูดซับแมงกานีส (II) โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตเพคตินจากเปลือก *Hylocercus undatus*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2562.
- ดลฤดี โตเย็น. การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ม.ป.ป.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ = Adsorption processes. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- ปริญญา ทับเที่ยง และสมรักษ์ รอดเจริญ. การดูดซับตะกั่วและแคดเมียมด้วยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Oscillatoria* sp. TISTR 8491 ในน้ำชะขยะบริเวณหลุมฝังกลบของเทศบาลเมือง
 สงขลา. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. 9(1): 76-88; มกราคม-
 มิถุนายน, 2560.
- ประเสริฐ สายสิทธิ์. “น้ำเสาวรส: น้ำผลไม้ของโลกเขตร้อน”, *อาหาร*, 18(3): 165-177, 2531.
 อ้างอิงจาก Sherman et al. Commercial Passion Fruit processing in Hawaii. 1954.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- พรลวัฒน์ พาพรมพีก, ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ์ และธายุกร พระบำรุง. การดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}) โดยใช้ซีลี้อยและซีลี้อยปรับสภาพ, J Sci Technol MSU. 36(3): 348-359; พฤษภาคม-มิถุนายน, 2560.
- พัชรภรณ์ จันทวี. การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยใช้ฟิล์มคอมโพสิต. วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2559.
- พัฒนชวัลพร สินรัมย์. การดูดซับตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผลตะแบก. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2549.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. “Pectin/เพกทิน”, Food Network Solution ศูนย์เครือข่ายข้อมูล อาหารครบวงจร. <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0430/pectin-%E0%B9%80%E0%B8%9E%E0%B8%84%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%99>. 27 กันยายน, 2563
- วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วออกจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2558.
- วาสนา อ่อนหวาน. การศึกษาจลนศาสตร์ในการสกัดเพคตินจากเปลือกเสาวรส. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2534.
- ศิริลักษณ์ มานะกนิษฐ์. คู่มือการใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) และวิธีทดสอบหาปริมาณตะกั่วและแคดเมียมที่ละลายในภาชนะเซรามิกส์. กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2550.
- ศุภกิจ แซ่เจียม. การดูดซับสี Malachite Green และ Reactive Red 31 จากน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยเปลือกกล้วย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2560.
- สุพจนา เจริญสิน. บทปฏิบัติการที่ 6 Determination of heavy metal in sample by flame atomic absorption spectrophotometry. <http://www.vettech.ku.ac.th/vtqa/2556/files/8-1-2.pdf>. 21 สิงหาคม, 2563.
- สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 12 อุบลราชธานี. รายงานผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำจาก

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ระบบกำจัดขยะมูลฝอยแบบถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary landfill) องค์การบริหารส่วน
จังหวัดอำนาจเจริญ ประจำปี พ.ศ.2561, อุบลราชธานี: สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 12
อุบลราชธานี, 2561.
- องอาจ เต็ดดวง. การเปรียบเทียบเพคตินสกัดจากฝรั่งสามชนิดกับเพคตินมาตรฐาน. วิทยานิพนธ์
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2553.
- อุษารัตน์ คำทับทิม และรัฐพล หงส์เกรียงไกร. การกำจัดโลหะหนักและสีย้อมในน้ำเสียด้วยตัวดูดซับ
ไบบิวหลวง. **Science and Technology RMUTT Journal**. 9(2): 39-53; กรกฎาคม-
ธันวาคม, 2562.
- Chakkrit Umpuch and et al. “Adsorption of Cadmium from aqueous solutions by
pomelo peel (*Citrus grandis*)”, **Journal of Science and Technology**. 19(1):
138-151; January-April, 2017.
- 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, 2015.
- Hung Nguyen Van et al. “The starch modified montmorillonite for the removal of
Pb (II), Cd (II) and Ni (II) ions from aqueous solutions”, **Arabian Journal of
Chemistry**. 13: 7212-7223; September, 2020.
- Hosam A. Shawky. “Improvement of water quality using Alginate/Montmorillonite
Composite Beads”, **Journal of Applied Polymer Science**. 119: 2371-2378;
September, 2011.
- Lao and et al. “Sorption of Cd (II) and Pb (II) from aqueous solution by a low-rank
coal (leonardite)”, **Separation and purification Technology**. 45: 79-85;
October, 2005.
- Shan Qin Liew et al. “Extraction and Characterization of Pectin from Passion Fruit
Peels”, **Agriculture and Agricultural Science Procedia**. 2: 231-236;
December, 2014.
- Siamchemi.com. “เพคติน (Pectin) ประโยชน์ และสรรพคุณเพคติน”, **เคมีอุตสาหกรรม**.
<https://www.siamchemi.com/เพคติน>. 27 กันยายน, 2563.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Yaoning Chen et al. “Adsorption of Pb(II) by tourmaline-montmorillonite composite in aqueous phase”, *Journal of Colloid and Interface Science*. 575: 367-376; April, 2020.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II)

การเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II)

การเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้น 1,000 mg/L (mg Pb²⁺/L) มีวิธีการดังต่อไปนี้

จาก มวลโมเลกุลของ Pb(NO₃)₂ = 331.2 g/mole

มวลโมเลกุลของ Pb อะตอม = 207.2 g/mole

ดังนั้น Pb(NO₃)₂ จำนวน 331.2 mg จะประกอบด้วย Pb 207.2 mg

หากต้องการใช้ Pb จำนวน 1,000 mg จะต้องใช้ Pb(NO₃)₂

$$= \frac{1,000 \times 331.2}{207.2} = 1598.45 \text{ mg}$$

ตอบ จะต้องใช้ Pb(NO₃)₂ = 1.5999 g

การเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II)

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) 1,000 mg/L, สารละลายกรด 1% HNO₃, DI water
2. ปิเปตต์สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) 1,000 mg/L จำนวน 2 mL เพื่อเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 20 mg/L ปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI ให้ได้ปริมาตร 100 mL และเตรียมความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) ในความเข้มข้นที่แตกต่างกันในช่วง 20, 30, 40, 50 และ 60 mg/L ด้วยวิธีการเดียวกัน รายละเอียดดังตารางต่อไปนี้

ขวดที่	สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) (mg/L)	ปริมาตรของสารละลายตะกั่ว (II) 1,000 mg/L (mL)
1	20	2
2	30	3
3	40	4
4	50	5
5	60	6

3. นำสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) ที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง AAS

ภาคผนวก ข

ภาพฟิล์มเพคติน (PN film) และฟิล์มคอมโพสิตเพคติน (CN film)



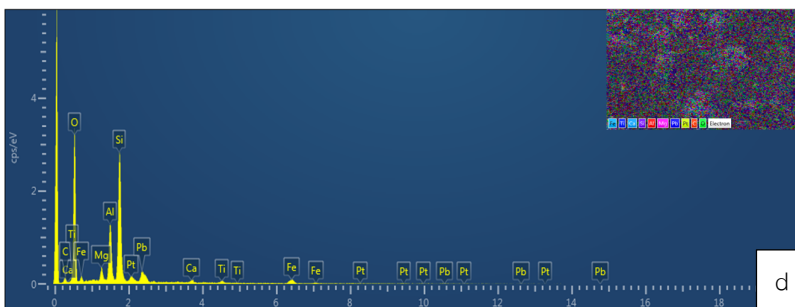
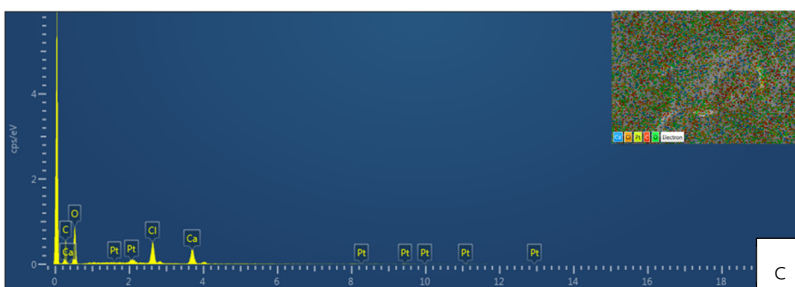
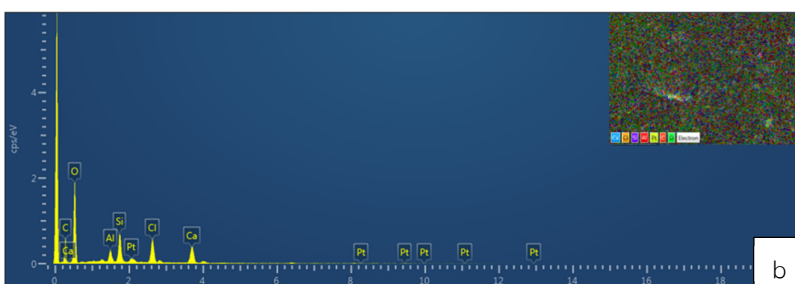
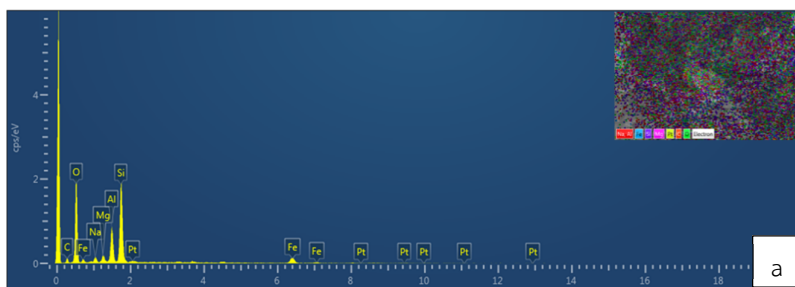
ภาพที่ ข.1 ฟิล์มเพคติน (PN film)

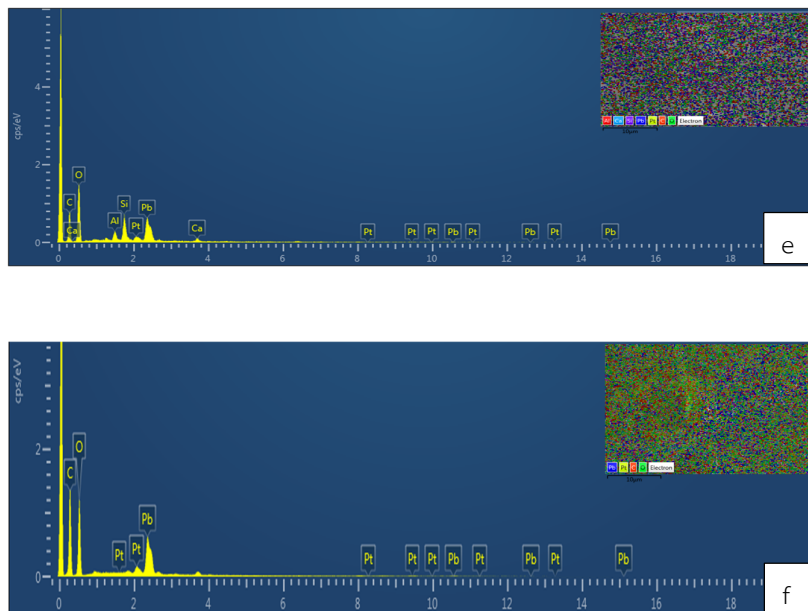


ภาพที่ ข.2 ฟิล์มคอมโพสิตเพคติน (CN film)

ภาคผนวก ค

ภาพสเปกตรัมที่แสดงธาตุต่าง ๆ ด้วยเครื่อง FESEM ที่เชื่อมต่อกับ EDS

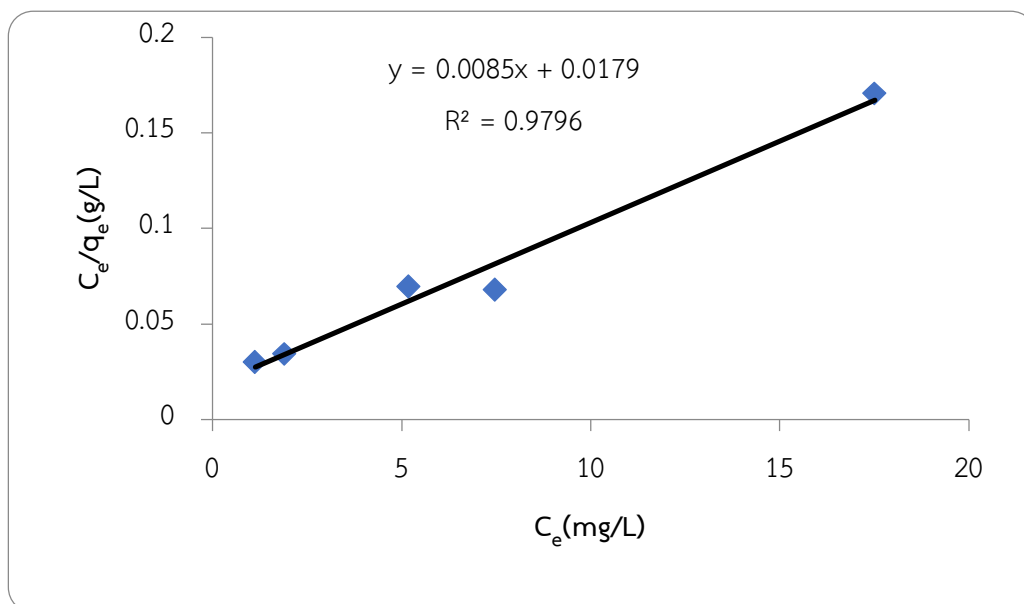




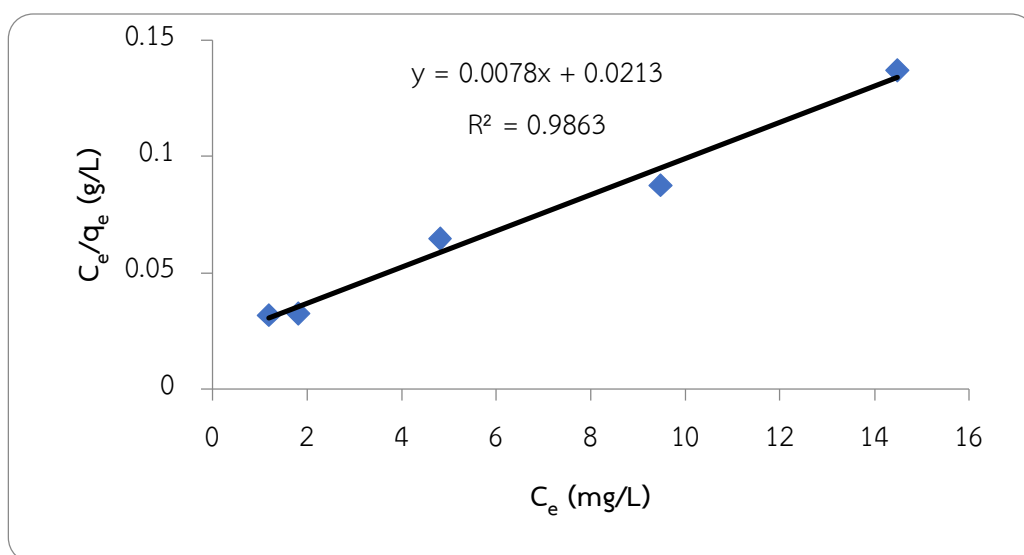
ภาพที่ ค.1 ภาพถ่าย FESEM และ EDS mapping

(a) MMT ก่อนดูดซับ (b) CN film ก่อนดูดซับ (c) PN film ก่อนดูดซับ
 (d) MMT หลังดูดซับ (e) CN film หลังดูดซับ (f) PN film หลังดูดซับ

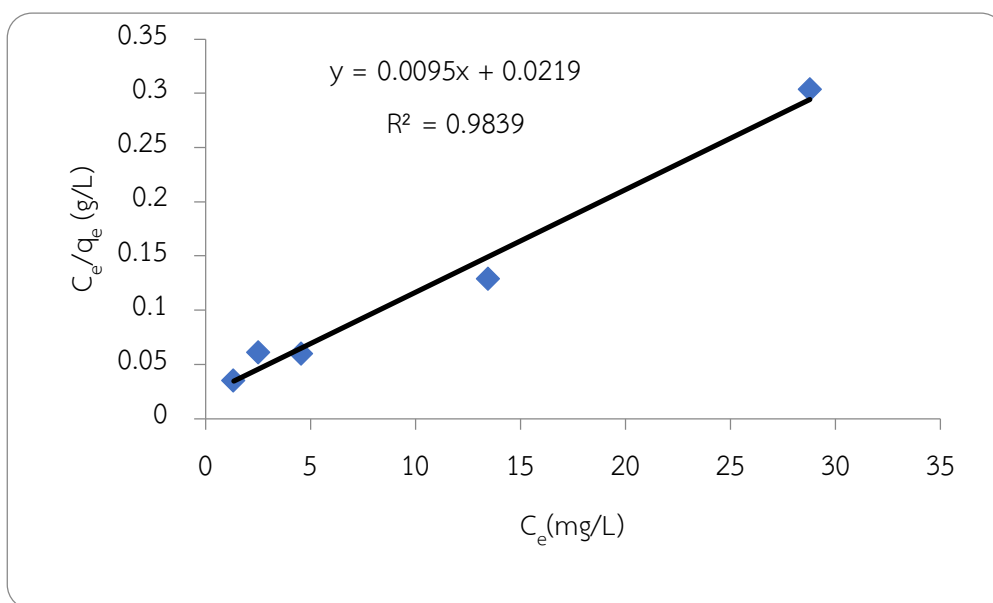
ภาคผนวก ง
ผลการศึกษามูลการดูฉบับ



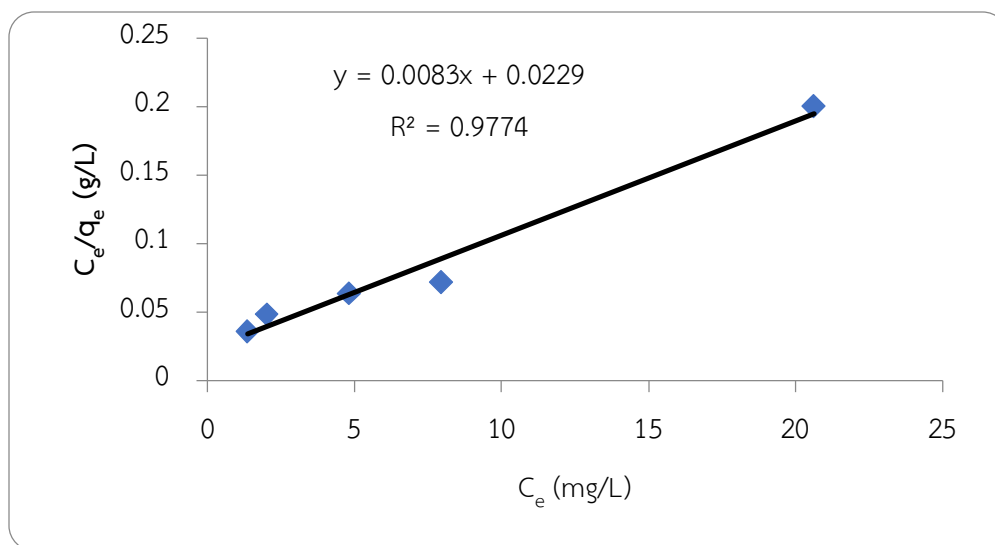
ภาพที่ ง.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์จากสารละลายตะกั่ว (II) อุณหภูมิ 30 °C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



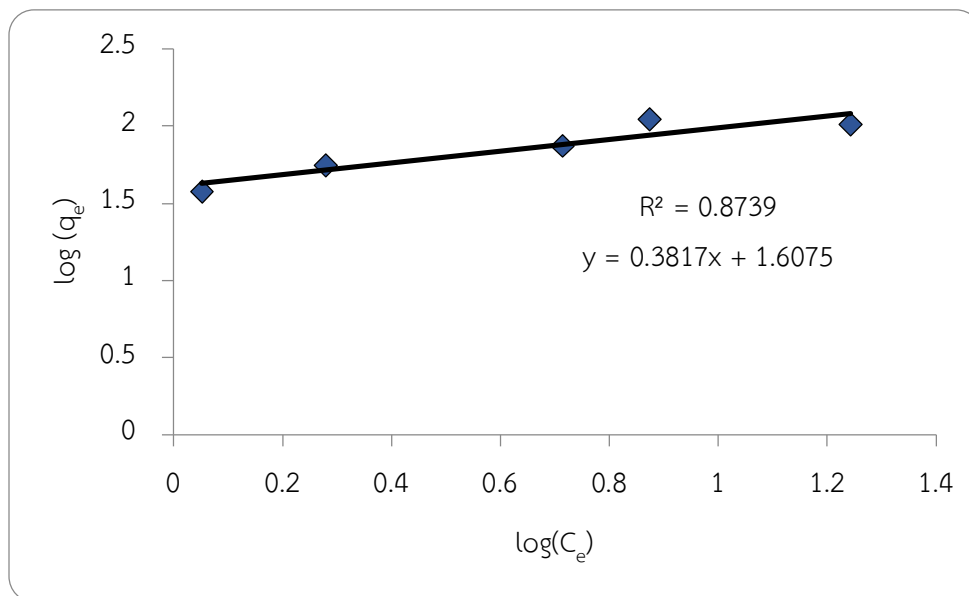
ภาพที่ ง.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์จากสารละลายตะกั่ว (II) อุณหภูมิ 30 °C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



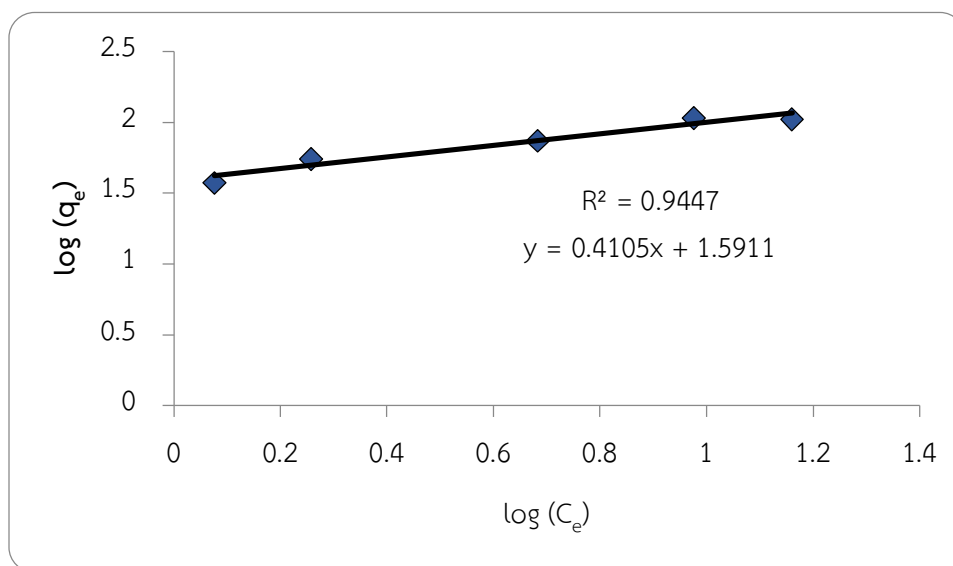
ภาพที่ ง.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์จากสารละลายตะกั่ว (II) อุณหภูมิ 30 °C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



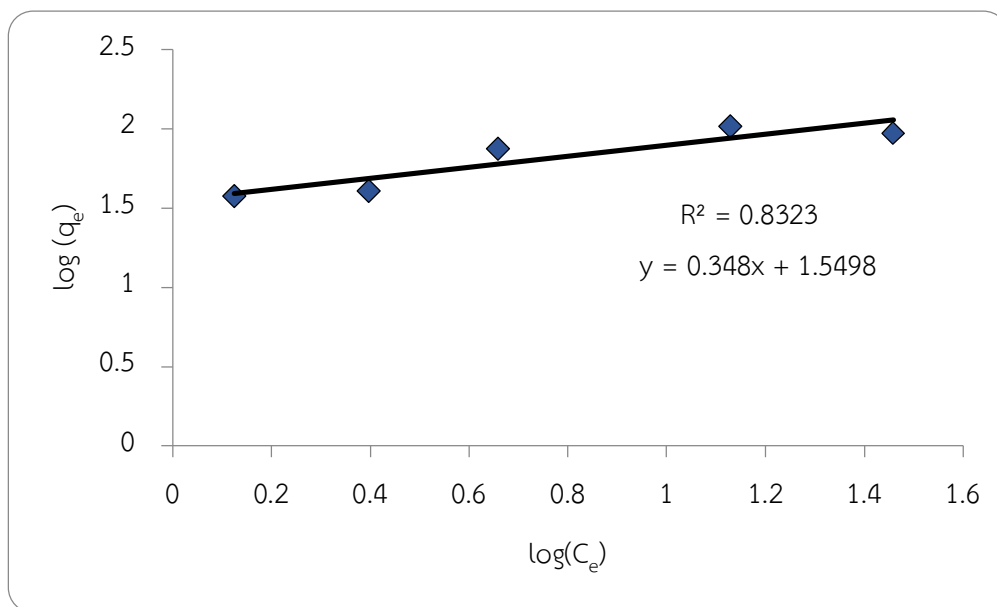
ภาพที่ ง.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์จากสารละลายตะกั่ว (II) อุณหภูมิ 30 °C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



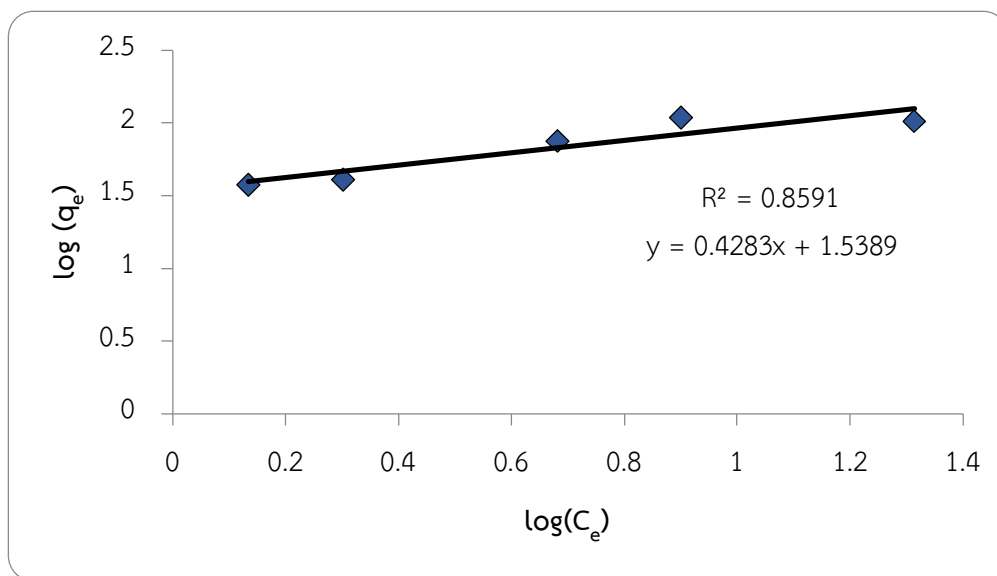
ภาพที่ ง.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนดิชจากสารละลายตะกั่ว (II) อุณหภูมิ 30 °C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



ภาพที่ ง.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนดิชจากสารละลายตะกั่ว (II) อุณหภูมิ 40 °C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5

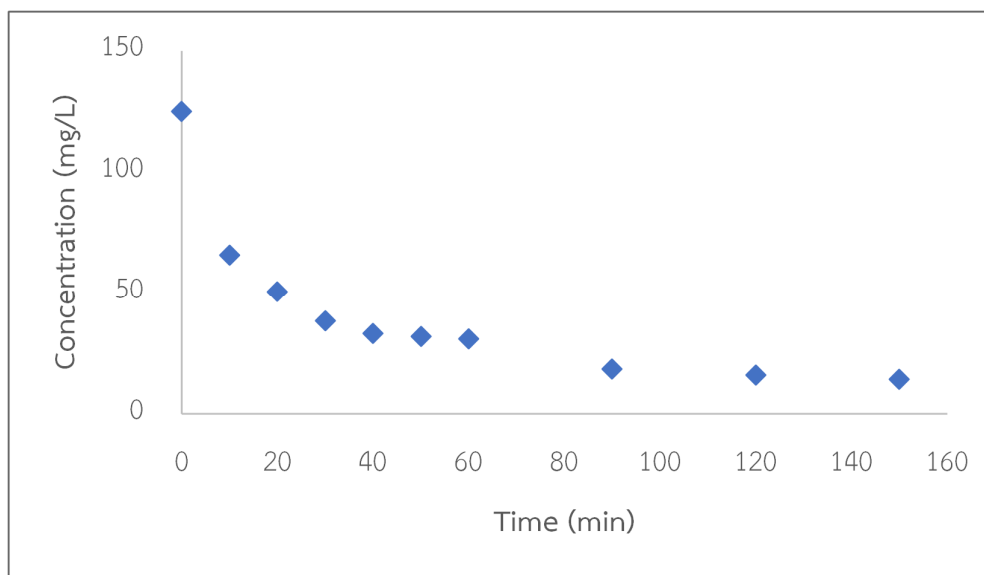


ภาพที่ ง.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิชจากสารละลายตะกั่ว (II) อุณหภูมิ 50 °C
โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5

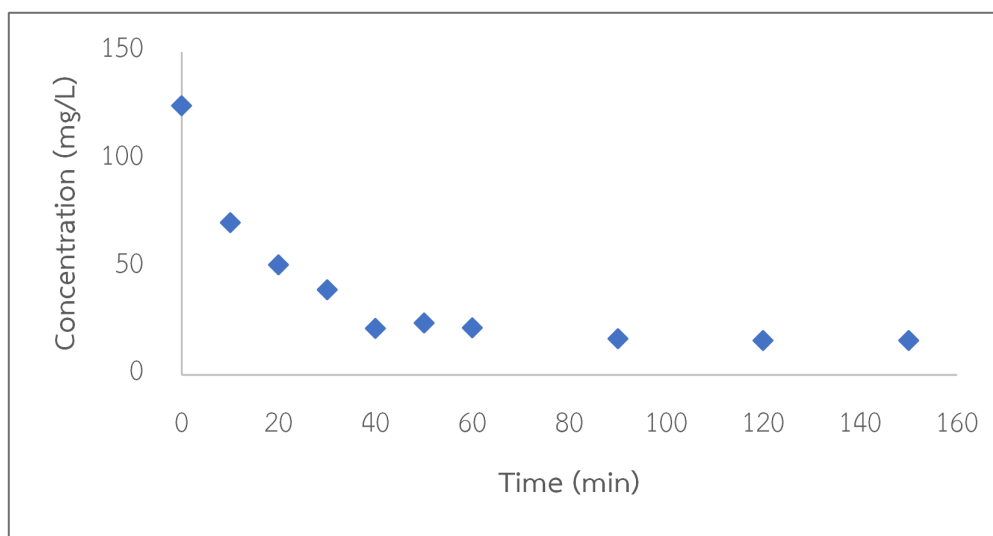


ภาพที่ ง.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิชจากสารละลายตะกั่ว (II) อุณหภูมิ 60 °C
โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5

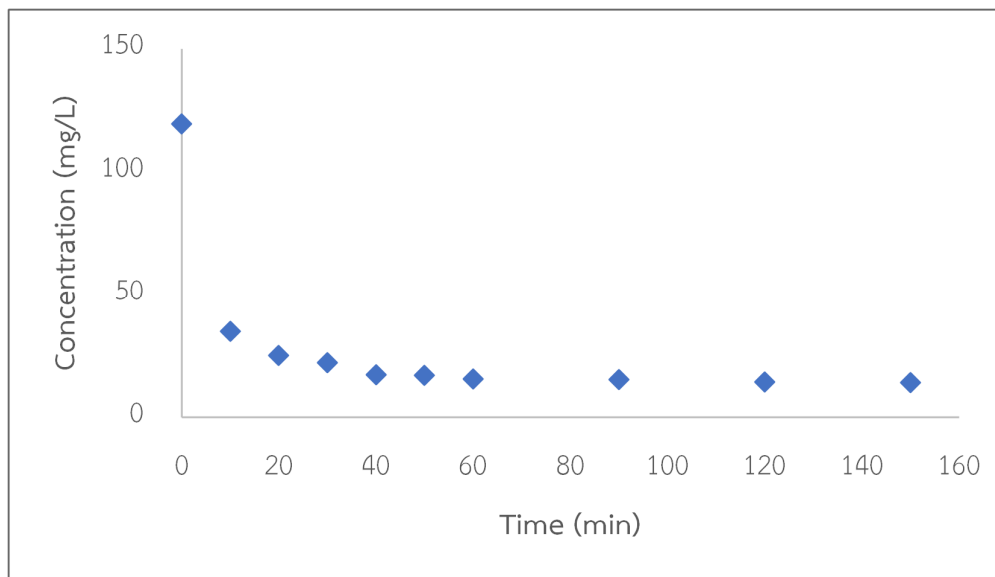
ภาคผนวก จ
ผลการศึกษาจนพลาสตร์การดูดซับ



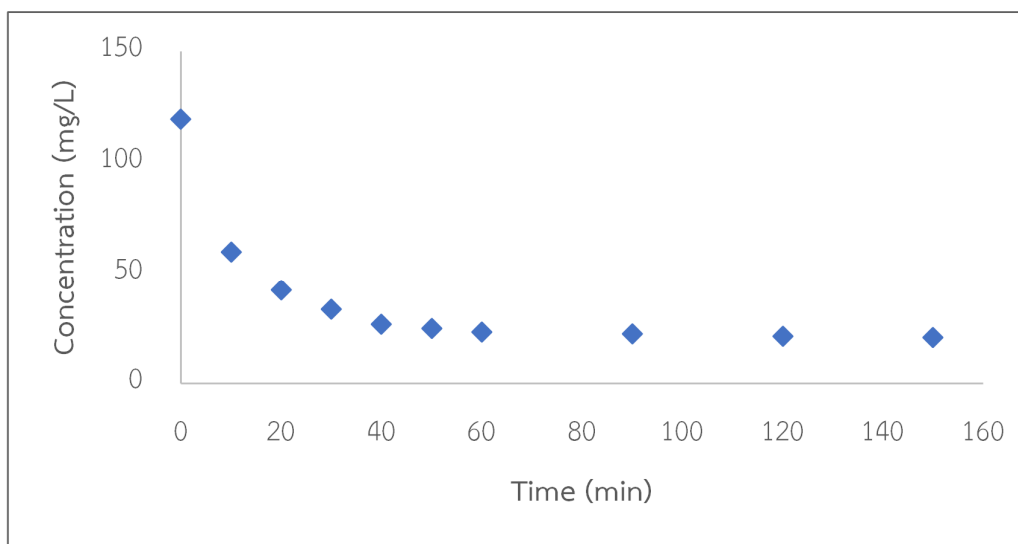
ภาพที่ จ.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) กับเวลาสัมผัส ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ที่อุณหภูมิ 30°C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



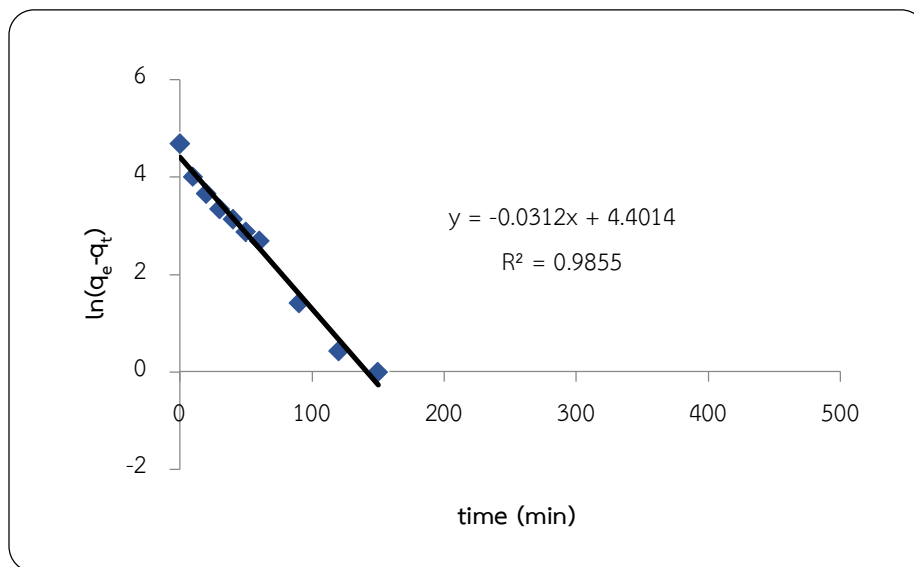
ภาพที่ จ.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) กับเวลาสัมผัส ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ที่อุณหภูมิ 40°C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



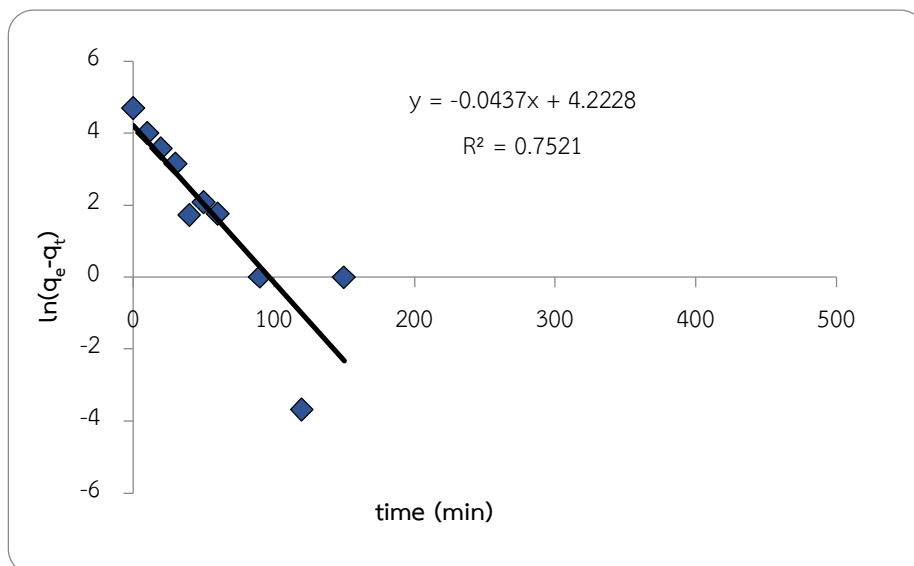
ภาพที่ จ.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) กับเวลาสัมผัส ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ที่อุณหภูมิ 50°C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



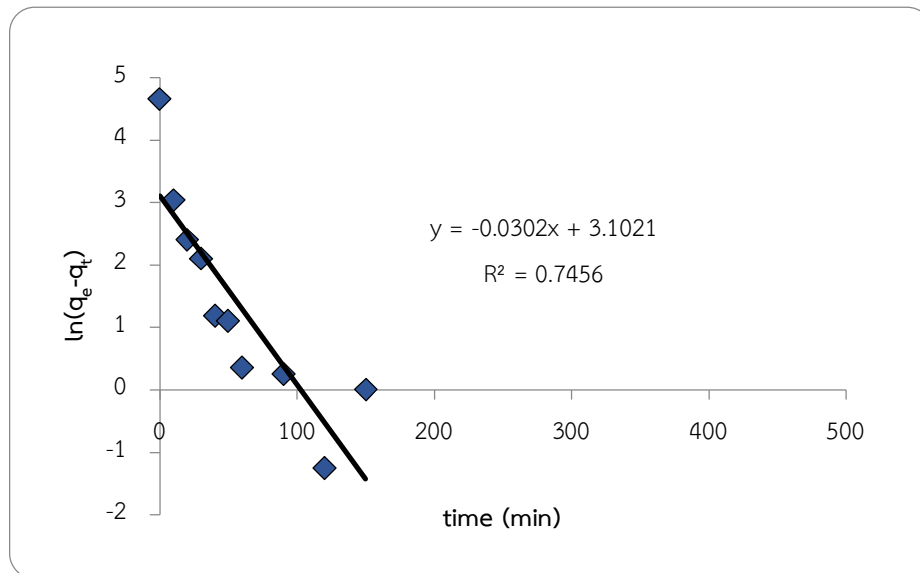
ภาพที่ จ.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) กับเวลาสัมผัส ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ที่อุณหภูมิ 60°C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



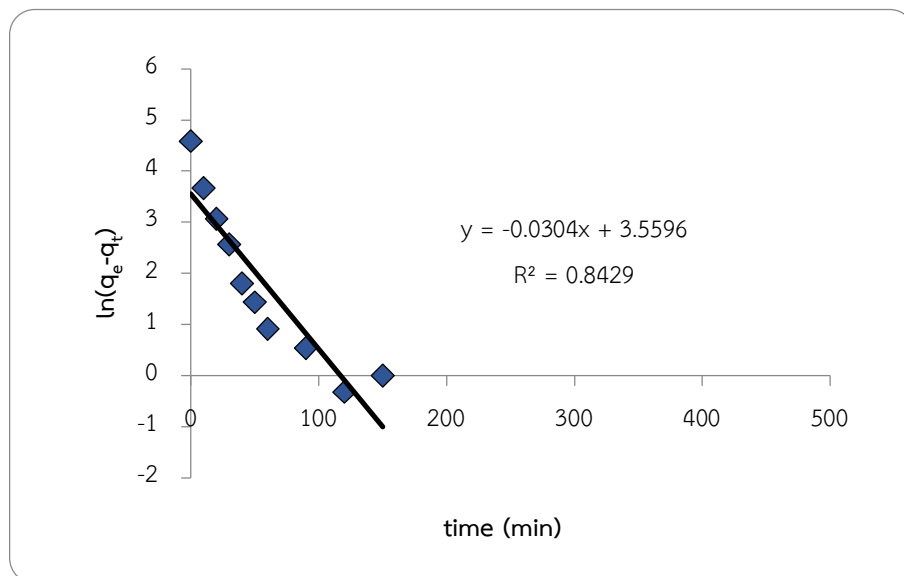
ภาพที่ จ.5 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของ การดูดซับสารตะกั่ว (II) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ที่อุณหภูมิ 30°C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



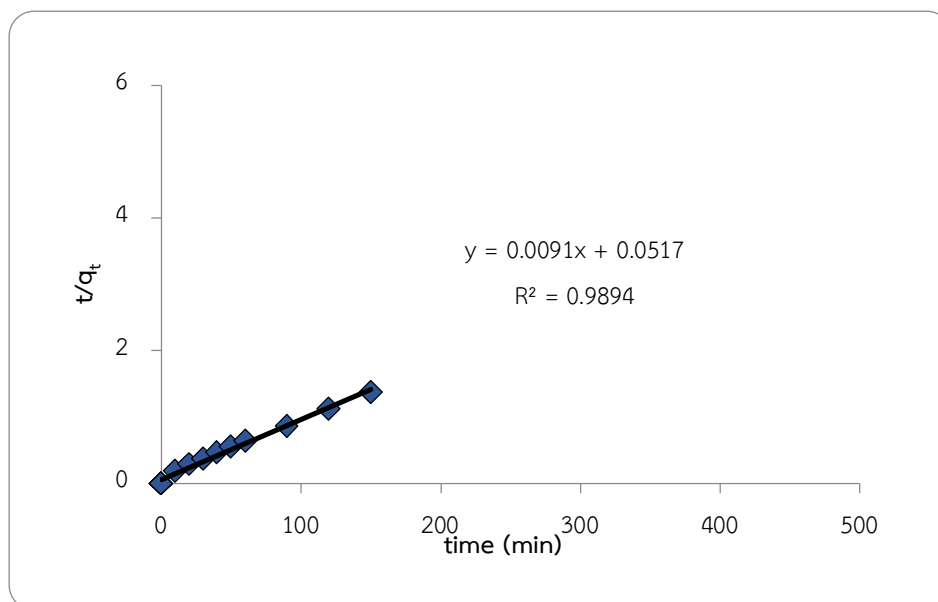
ภาพที่ จ.6 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของ การดูดซับสารตะกั่ว (II) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ที่อุณหภูมิ 40°C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



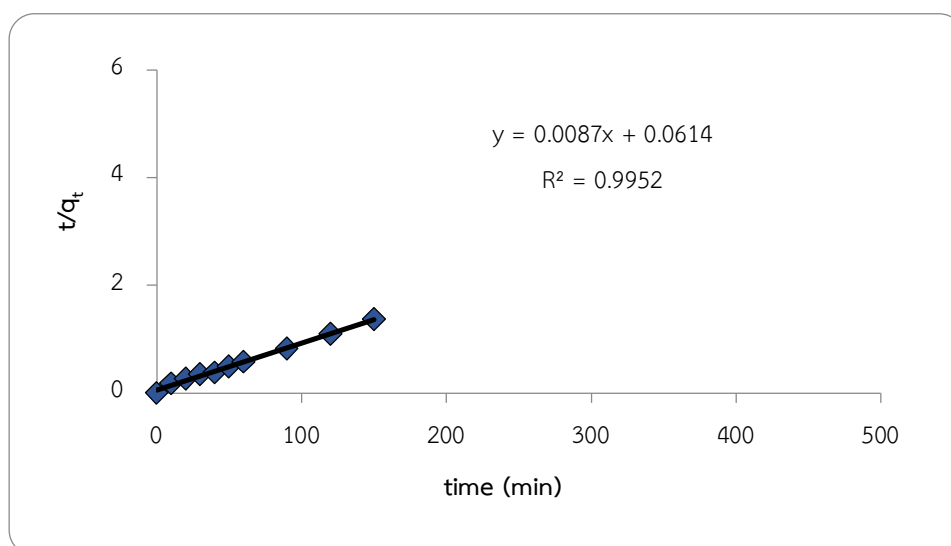
ภาพที่ จ.7 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของ การดูดซับสารตะกั่ว (II) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ที่อุณหภูมิ 50°C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



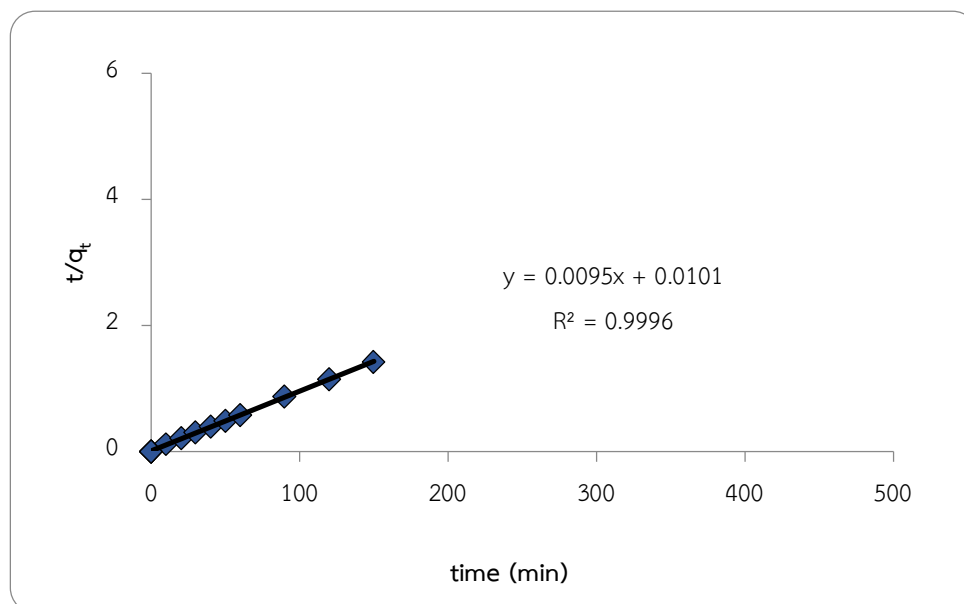
ภาพที่ จ.8 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของ การดูดซับสารตะกั่ว (II) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ที่อุณหภูมิ 60°C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



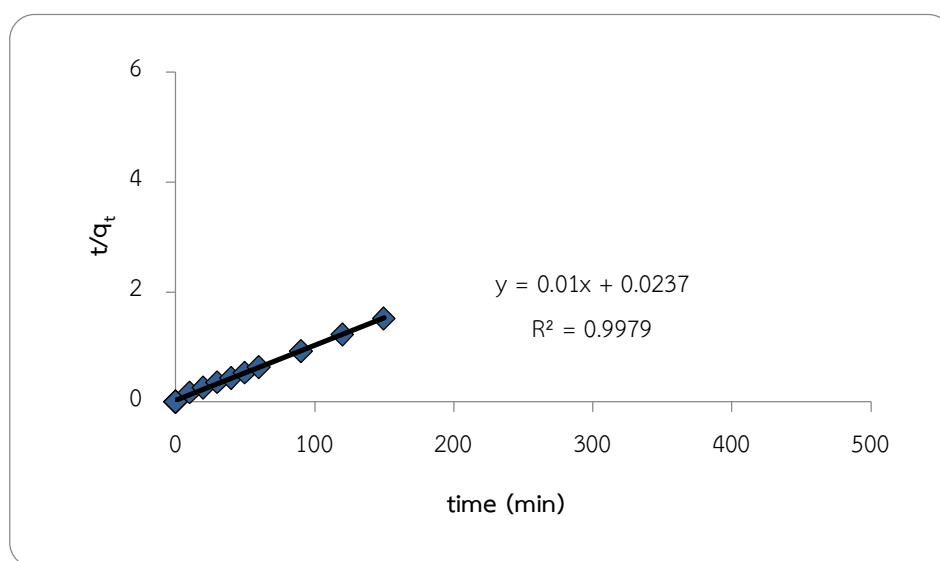
ภาพที่ จ.9 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสารตะกั่ว (II) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ที่อุณหภูมิ 30°C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



ภาพที่ จ.10 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับสารตะกั่ว (II) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ที่อุณหภูมิ 40°C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



ภาพที่ จ.11 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของ การดูดซับสารตะกั่ว (II) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ที่อุณหภูมิ 50°C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5



ภาพที่ จ.12 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของ การดูดซับสารตะกั่ว (II) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 120 mg/L ที่อุณหภูมิ 60°C โดยใช้ CN film ปริมาณ 0.1 g และ pH เริ่มต้น 4.7 ± 0.5

ภาคผนวก ฉ
ผลงานการนำเสนอในการประชุมวิชาการ

การดูดซับสารตะกั่ว (II) โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตเพคติน
จากเปลือกเสาวรสพันธุ์สีเหลือง (*Passiflora edulis*)
Adsorption of Lead (II) using Pectin Composite Films
from Yellow Passion Fruit Peel (*Passiflora edulis*)

ศุภมิตร คำพาลา^{1*} และ จักรกฤษณ์ อัมพูช²

Supamittra Khampala^{1*} and Chakkrit Umpuch²

^{1*}บัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี 34190

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี 34190

โทรศัพท์ : 091-4739334, โทรสาร : 045-353333, E-mail : supamittra.kh.62@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารตะกั่ว (II) ของฟิล์มคอมโพสิตเพคติน (CN film) เปรียบเทียบกับตัวดูดซับอีก 2 ชนิด ได้แก่ ฟิล์มเพคติน (PN film) และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) การดัดแปร PN film เป็น CN film ส่งผลให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อการดูดซับแบบกะ ได้แก่ เวลาสัมผัส อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารตะกั่ว (II) เริ่มต้น ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสารตะกั่ว (II) ของฟิล์ม CN film คือ 92.67% เวลาการสัมผัสเข้าสู่สมดุลที่เวลา 150 นาที สภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) 100 mg/L และอุณหภูมิ 40 °C ข้อมูลอัตราการดูดซับสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ จากผลการศึกษาข้างต้น CN film เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพที่สามารถกำจัดสารตะกั่ว (II) จากน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดี

คำสำคัญ : ตะกั่ว; การดูดซับ; ฟิล์มคอมโพสิตเพคติน; ฟิล์มเพคติน; แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

Abstract

The purposes of this research was to study the removal efficiency of lead (II) using pectin composite films (CN film) compared with other 2 adsorbents, pectin film (PN film) and montmorillonite clay (MMT). The modification of PN film to CN film causes better mechanical properties. The influences of affecting factors including contact time, initial concentrations of lead (II), and temperature on the adsorption of lead (II) onto CN film were studied in batch tests. The result showed that the percent of lead (II) removal is 92.67%. The sorption contact time reached equilibrium within 150 min. The optimum condition was observed at initial concentration of 100 mg/L and temperature of 40 °C. The adsorption rate data were better fitted to Pseudo-second-order reaction model and the adsorption isotherm follows Langmuir equation. From above results, the CN film is an effective adsorbent for removal of Lead (II) from synthetic wastewater.

Keywords: Lead Adsorption; Pectin Composite Films; Pectin film; Montmorillonite clay

บทนำ

การปนเปื้อนของสารตะกั่ว (Lead) ซึ่งเป็นสารโลหะหนักในแหล่งน้ำ กลายเป็นปัญหามลพิษที่มีความสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำที่ลดลง ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ การสะสมสารตะกั่วในร่างกายในปริมาณเพียงเล็กน้อย สามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์คือ ร่างกายอ่อนเพลีย ปวดกล้ามเนื้อ ปวดข้อและกระดูก โลหิตจาง ความจำเสื่อม และภูมิคุ้มกันต่ำลง [1]

เพื่อเป็นการลดมลพิษดังกล่าว จำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำทิ้งที่เหมาะสมก่อนปล่อยสู่แหล่งรองรับธรรมชาติ ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการดูดซับ เนื่องจากสามารถกำจัดสารตะกั่ว (II) ที่ปนเปื้อนจากน้ำได้อย่างรวดเร็ว ต้นทุนต่ำ และไม่ซับซ้อน ตัวดูดซับที่ใช้คือ แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) เนื่องจากมีคุณสมบัติในการดูดซับอนุภาคประจุบวกของสารโลหะหนักได้เป็นอย่างดี อีกทั้งมีราคาถูก ไม่เป็นพิษและหาได้ง่ายในประเทศไทย แต่มีข้อจำกัดคือเมื่อทดลองดูดซับในสารละลาย จะแยกตัวดูดซับแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ออกจากสารละลายได้ยาก เพื่อเป็นการลดข้อจำกัดดังกล่าว จะต้องมีการดัดแปรตัวดูดซับให้อยู่ในรูปของฟิล์ม โดยผู้วิจัยเลือกทำฟิล์มคอมโพสิตเพคติน (CN film) ซึ่งจะช่วยให้ตัวดูดซับมีความแข็งแรง ทนทาน และสามารถกำจัดออกได้ง่ายหลังจากดูดซับแล้ว เพคตินที่ใช้สกัดจากธรรมชาติคือเปลือกเสาวรสพันธุ์สีเหลือง (*Passiflora edulis*) เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น อีกทั้งเป็นการสร้างมูลค่าของวัสดุในการนำมาใช้ประโยชน์และใช้ทดแทนพืชน้ำทางการค้าได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารตะกั่ว (II) ของฟิล์มคอมโพสิตเพคติน (CN film) เปรียบเทียบกับตัวดูดซับอีก 2 ชนิด ได้แก่ ฟิล์มเพคติน (PN film) และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) รวมทั้งเพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลตัวดูดซับ อิทธิพลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ จลนพลศาสตร์ และไอโซเทอร์มการดูดซับ

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมเปลือกเสาวรสมและสกัดสารเพคติน ดัดแปลงจากงานวิจัยขององอาจ เต็ดดวง [2] และ Fernanda L. et al. [3] นำเพคตินมาดัดแปรเป็นฟิล์มคอมโพสิตเพคตินและฟิล์มเพคติน โดยใช้วิธี crosslinking ของ Mariana Altenhofen da Silva. [4] จากนั้นนำฟิล์มคอมโพสิตเพคติน (CN film) ฟิล์มเพคติน (PN film) มาศึกษาคุณสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D882 ด้วยเครื่อง Texture analyzer [5] แล้วนำตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ CN film PN film และแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) มาศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่ว (II) เลือก CN film ศึกษาคุณสมบัติตัวดูดซับและทดลองเพื่อหาอิทธิพลที่ส่งผลต่อการดูดซับแบบกะ ได้แก่ เวลาสัมผัส อุณหภูมิ และความเข้มข้นสารตะกั่ว (II) เริ่มต้น ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ ประกอบด้วยสมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดลิช รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ ประกอบด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม โดยทำการทดลองในลักษณะเดียวกันกับ [6] วิธีการศึกษาดังต่อไปนี้

1. การศึกษาคุณสมบัติเชิงกล

ประกอบด้วยการศึกษาค่าความเครียด (Tensile Strain ; ϵ) คำนวณได้จากสมการที่ 1 และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด (%Elongation a break ; %EI) จากสมการที่ 2

$$\text{Tensile Strain; } \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

$$\% \text{Elongation a break ; } \% \text{EI} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ ΔL คือระยะความยาวที่เปลี่ยนไปจากความยาวเดิมของตัวฟิล์ม (mm) L_0 คือระยะความยาวเริ่มต้นของฟิล์ม (mm) L_f คือ ระยะความยาวของฟิล์มหลังจากดึงจนขาด (mm)

2. การศึกษาการดูดซับแบบกะ

ประกอบด้วยการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่ว (II) และอิทธิพลที่ส่งผลต่อการดูดซับ ได้แก่ เวลาสัมผัส ความเข้มข้นของสารตะกั่ว (II) เริ่มต้น อุณหภูมิ และ pH เริ่มต้น ค่าความสามารถในการดูดซับสารตะกั่ว (II) ณ เวลาใดๆ (q_t ; mg/g) คำนวณได้จากสมการที่ 3 และค่าเปอร์เซ็นต์กำจัดสารตะกั่ว (II) ณ เวลาใดๆ (%removal) คำนวณได้จากสมการที่ 4

$$q_t = \frac{V(C_0 - C_t)}{m} \quad (3)$$

$$\% \text{ removal} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นของสารตะกั่ว (II) เริ่มต้น (mg/L) C_t คือ ความเข้มข้นของสารตะกั่ว (II) ณ เวลาใดๆ (mg/L) V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L) และ m คือ ปริมาณของตัวดูดซับ (g)

3. ไอโซเทอร์มการดูดซับ

ประกอบด้วยไอโซเทอร์มแลงเมียร์ คำนวณได้จากสมการที่ 5 และไอโซเทอร์มฟรุนดลิช จากสมการที่ 6

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (5)$$

$$\ln q_e = \ln K_F + (1/n) \ln C_e \quad (6)$$

เมื่อ q_e คือความสามารถในการดูดซับสารตะกั่ว (II) ณ จุดสมดุล (mg/g) C_e คือความเข้มข้นของสารตะกั่ว (II) ณ จุดสมดุล (mg/L) q_m คือ ความสามารถของสารตะกั่ว (II) ในการดูดซับสูงสุดแบบชั้นเดียว (mg/g) K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับของไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (L/mg) n คือ ความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity)

4. จลนพลศาสตร์การดูดซับ

ประกอบด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม คำนวณจากสมการที่ 7 และสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม จากสมการที่ 8

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (7)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (8)$$

เมื่อ t คือ เวลาใดๆ (min) k_1 คือ ค่าคงที่ของ Pseudo-first-order reaction (min^{-1}) K_2 คือค่าคงที่ของ Pseudo-second-order reaction rate ($\text{g/mg} \cdot \text{min}$)

ผลการทดลองและวิจารณ์

คุณสมบัติของตัวดูดซับ

ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มตัวดูดซับ 2 ชนิด คือ CN film และ PN film นำไปทดสอบค่าความเครียด (Tensile Strain ; ϵ) และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด (%Elongation a break ; %EI) ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าค่าคุณสมบัติเชิงกลของ CN film ดีกว่าเมื่อเทียบกับ PN film โดยค่าความเครียด ของ CN film เท่ากับ 8.13 Pa และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด เท่ากับ 34.28 % จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การที่ CN film มีค่าคุณสมบัติเชิงกลที่สูงกว่า ได้แก่ ค่าความเครียด จะส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่น แข็งแรงทนทานต่อแรงภายนอกที่มากระทำหรือสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ปฏิกริยาทางเคมี ฯลฯ และฉีกขาดได้ยากกว่า PN film ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด แสดงถึงความเหนียวของตัวดูดซับและความทนทานต่อการดึงยืดเมื่อมีแรงหรือปัจจัยภายนอกกระทำ และเมื่อพิจารณาค่าคุณสมบัติเชิงกลของ CN film ที่สูงกว่า PN film อาจจะเป็นผลมาจากการที่ CN film มีส่วนผสมของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มแร่ดินสมกไทต์ (Smectite) มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ยึดเกาะได้ดี และมีความชอบน้ำ (hydrophilic) คุณสมบัติของแร่ดินดังกล่าวเมื่อนำมา crosslinking กับ CaCl_2 และ glycerol จึงช่วยในการเชื่อมโครงสร้างของฟิล์มให้ประสานกันดีและส่งผลให้ฟิล์มมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ CN film มีค่าคุณสมบัติเชิงกลที่มากขึ้น [7]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกลของตัวดูดซับ

ตัวแปร	CN film	PN film
ความเครียด (Tensile Strain ; ϵ)	8.61	4.45
เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด (%Elongation a break ; %EI)	34.28 %	23.87 %

ผลของประสิทธิภาพตัวดูดซับ

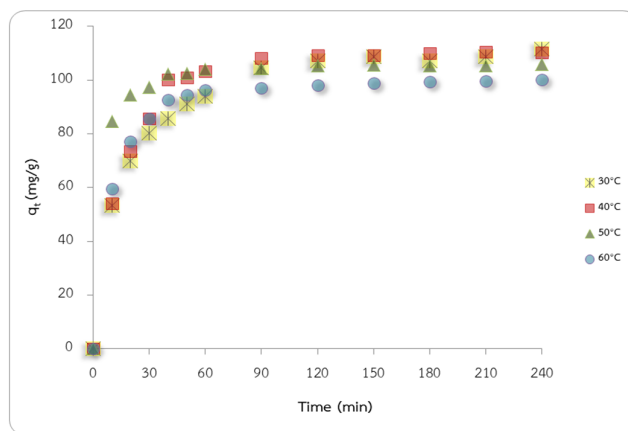
ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารตะกั่ว (II) ด้วยตัวดูดซับ CN film, PN film และ MMT พบว่า ตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีประสิทธิภาพสูงและใกล้เคียงกัน ซึ่ง PN film มีค่า %Removal สูงสุด คือ 96.24% รองลงคือ CN film 92.67% และ MMT 91.89% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 และเลือกใช้ CN film ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อการดูดซับแบบกะ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตะกั่ว (II) ที่ไม่แตกต่างกันและมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับ PN film

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพตัวดูดซับ

ตัวแปร	CN film	PN film	MMT
% removal Pb^{2+}	92.67	96.24	91.89
q_e (mg/g)	114.22	118.62	113.26

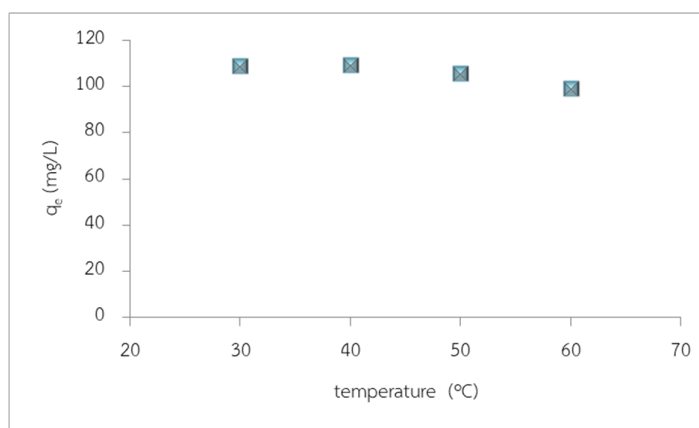
ผลการศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อการดูดซับ

อิทธิพลของเวลาสัมผัสที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่ว (II) ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าที่ทุกอุณหภูมิ ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรก หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับค่อยๆ เพิ่มขึ้นช้าลง และเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 150 นาที เนื่องจากในช่วงแรกตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวว่าง ทำให้ดูดซับสารตะกั่ว (II) ได้เร็ว จากนั้นเกิดการดูดซับภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ทำให้การดูดซับช้าลงจนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับคงที่ โดยมีผลการทดลองที่สอดคล้องกับ [8] ซึ่งได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่วจากน้ำชะขยะบริเวณหลุมฝังกลบเทศบาลเมืองสงขลาด้วยตัวดูดซับสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Oscillatoria* sp. พบว่าอิทธิพลเวลาสัมผัสสู่สมดุลมีค่าเท่ากันคือ 150 นาที



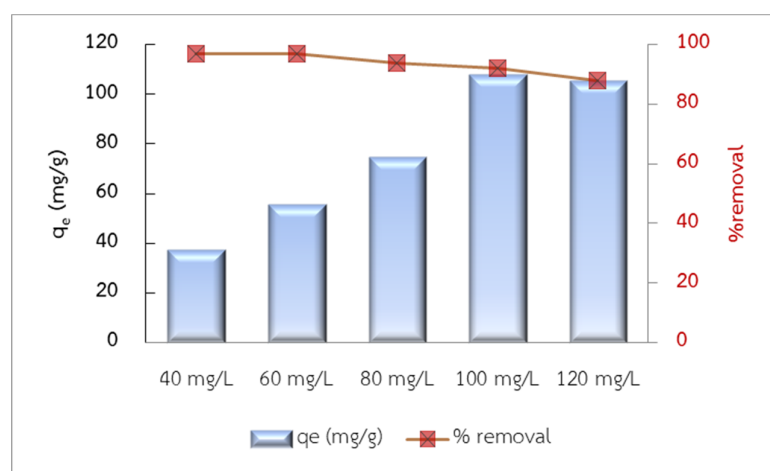
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารตะกั่ว (II) ด้วย CN film กับเวลาสัมผัส
($C_0 = 120 \text{ mg/L}$, $\text{pH}_0 = 4.7 \pm 0.5$, อุณหภูมิ 30 - 60 °C)

อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่ว (II) ที่จุดสมดุล โดยทดลองอุณหภูมิช่วง 30 - 60 °C และเวลาสัมผัสที่ 150 นาที ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าปริมาณการดูดซับสูงสุดที่อุณหภูมิ 40 °C (109.15 mg/g) และการเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 °C เป็น 40 °C ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 50 และ 60 °C ปริมาณการดูดซับจะมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงหนึ่งๆ อาจเกิดการคายซับของตัวถูกดูดซับบางส่วน ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับลดลง [9] ดังนั้นการดูดซับจึงเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic reaction) โดยมีผลการทดลองที่สอดคล้องกับ [6] ที่พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก 35 °C เป็น 45 °C ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 55 °C และ 65 °C ปริมาณการดูดซับจะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจส่งผลให้ CN film เสื่อมสภาพและมีประสิทธิภาพการดูดซับที่ลดลง



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารตะกั่ว (II) ด้วย CN film กับอุณหภูมิที่ต่างกัน
($C_0 = 120$ mg/L, $pH_0 = 4.7 \pm 0.5$, เวลาสัมผัส 150 นาที, อุณหภูมิช่วง 30 - 60 °C)

อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่ว (II) โดยทดลองที่ความเข้มข้น 40 - 120 mg/L เวลาสัมผัส 150 นาที และอุณหภูมิ 40 °C ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) เพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้น 40 - 100 mg/L และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) เพิ่มขึ้นจาก 100 mg/L เป็น 120 mg/L ปริมาณการดูดซับจะเริ่มคงที่ เนื่องจากพื้นที่ผิวตัวดูดซับเกิดการอิ่มตัวจากการถูกดูดซับจนเต็มรูพรุน โดยผลการทดลองสอดคล้องกับ [10] ซึ่งพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) เพิ่มขึ้น ตัวดูดซับจะสามารถดูดซับสารตะกั่ว (II) ได้มากขึ้นจนถึงจุดสมดุล ถ้าความเข้มข้นสูงกว่านี้ สารตะกั่ว (II) จะไม่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่ว (II) (%removal) พบว่าทุกความเข้มข้นไม่แตกต่างกันมาก ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่ว (II) จะลดลงตามความเข้มข้นของสารตะกั่ว (II) ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่ว (II) สูงสุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) 40 mg/L (96.92 %) รองลงมาคือ 60 mg/L (96.85 %)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ และค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารตะกั่ว(II) ด้วย CN film กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) ที่แตกต่างกัน ($C_0 = 40 - 120$ mg/L, $pH_0 = 4.7 \pm 0.5$, อุณหภูมิ 40 °C)

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

ตารางที่ 3 แสดงค่าคงที่ของสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ พบว่าสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมมากกว่า โดยพิจารณาจากค่า R^2 แสดงว่าขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (rate of limiting step) โดยค่า q_e ที่ได้จากการคำนวณตามแบบจำลองของสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีค่าใกล้เคียงกับค่า q_e ที่ได้จากการทดลองมากกว่าสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

ตารางที่ 3 ค่าคงที่สมการอัตราการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 - 60 °C

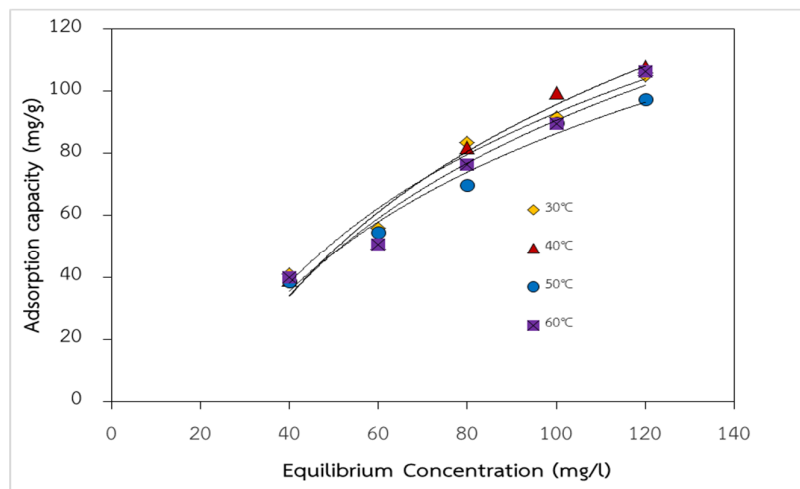
อุณหภูมิ (°C)	$q_{e,exp}$ (mg/g)	สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order reaction rate)			สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order reaction rate)		
		$k_1 \times 10^{-3}$ (min ⁻¹)	q_e (mg/g)	R^2	$k_2 \times 10^{-3}$ (g/mg-min)	q_e (mg/g)	R^2
30	108.71	-11.3	12.35	0.0995	1.6	109.89	0.9894
40	109.15	-43.7	68.22	0.7521	1.2	114.94	0.9952
50	105.51	-16.1	5.88	0.2462	8.9	105.26	0.9996
60	98.79	-14.3	7.64	0.1898	4.2	100.00	0.9979

ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

รูปที่ 4 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับในช่วงอุณหภูมิ 30 - 60 °C เมื่อนำมาพล็อตกับสมการของ Langmuir โดยค่าคงที่ของสมการทั้ง 2 แสดงในตารางที่ 4 พบว่า มีความสอดคล้องกับสมการของ Langmuir มากกว่า Freundlich ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) โดยผลการทดลองสอดคล้องกับ [11] ซึ่งได้ศึกษาแป้ง (starch) มาตัดแปรรูปด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อเป็นตัวดูดซับสำหรับทดลองกำจัดสารตะกั่ว (II) พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Langmuir isotherm และแบบจำลองอัตราการดูดซับเป็นสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับช่วงอุณหภูมิ 30 - 60 °C

อุณหภูมิ (°C)	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	q_m (mg/g)	k_L (L/g)	R^2	k_F (L/g)	n	R^2
30	117.64	55.86	0.9796	4.99	2.62	0.8739
40	128.21	46.94	0.9863	4.91	2.43	0.9447
50	105.26	45.66	0.9839	4.71	2.87	0.8323
60	120.48	43.67	0.9774	4.66	2.33	0.8591



รูปที่ 4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir โดยใช้ CN film ที่อุณหภูมิ 30 - 60 °C , $\text{pH}_0 = 4.7 \pm 0.5$

สรุปผล

คุณสมบัติเชิงกลของ CN film ดีที่สุด ซึ่งมีค่าความเค้น 8.13 Pa และเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด 34.28% ประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่ว (II) ของ CN film คือ 92.67% โดยที่ตัวดูดซับทั้งสามชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกัน การดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรกและเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 150 นาที การเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 °C เป็น 40 °C ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 40 °C เกิดปริมาณการดูดซับสารตะกั่ว (II) สูงสุด คือ 109.15 mg/g แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 50 °C และ 60 °C ปริมาณการดูดซับจะมีค่าลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว (II) 100 mg/L มีปริมาณการดูดซับสูงสุดคือ 108.0 mg/g และการดูดซับเริ่มคงที่ ไอโซเทอร์มการดูดซับมีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดริช แสดงว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ส่วนอัตราการดูดซับสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือในการวิจัย ตลอดจนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] จักรี ศรีแสง, กาญจนา เชื้อคำ และศุภมิตรา คำผาสา. พืชรายใกล้ตัว...สารตะกั่วในศูนย์พัฒนาเด็กเล็ก. กรุงเทพฯ : สำนักโรคจากการประกอบอาชีพฯ กรมควบคุมโรค, 2559.
- [2] งามอาจ เต็ดดวง. การเปรียบเทียบเพคตินสกัดจากฝรั่งสามชนิดกับเพคตินมาตรฐาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2553.
- [3] 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, 2015.
- [4] Mariana Altenhofen da Silva et al. “ Alginate and pectin composite films crosslinked with Ca^{2+} ions: Effect of the plasticizer concentration”, Carbohydrate Polymers. 77: 736-742, 2009.
- [5] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. การทดสอบแรงดึง http://eng.sut.ac.th/me/2014/laboratory/document/Tensile_Test.pdf. 13 มีนาคม 2564.
- [6] ณัฐกานต์ ภูไธม. การดูดซับแมงกานีส (II) โดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตเพคตินจากเปลือก *Hylocercus undatus*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2562.
- [7] กรมทรัพยากรธรณี. งานสำรวจแหล่งวัสดุทางธรณีวิทยาที่ใช้ปรับปรุงพื้นที่ดินเค็มในพื้นที่เลือกสรร. http://www.dmr.go.th/ewt_news.php?nid=48446&filename=index. 13 มีนาคม 2564.
- [8] ปริญญ์ ทับเที่ยง และสมรักษ์ รอดเจริญ. การดูดซับตะกั่วและแคดเมียมด้วยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Oscillatoria* sp. TISTR 8491 ในน้ำชะขยะบริเวณหลุมฝังกลบของเทศบาลเมืองสงขลา. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. 9(1): 76-88, 2560.
- [9] Lao and et al. “Sorption of Cd (II) and Pb (II) from aqueous solution by a low-rank coal (leonardite)”, Separation and purification Technology. 45: 79-85.
- [10] อุษารัตน์ คำทับทิม และรัฐพล หงส์เกรียงไกร. การกำจัดโลหะหนักและสีย้อมในน้ำเสียด้วยตัวดูดซับไบโวลวง. Science and Technology RMUTT Journal. 9(2): 39-53, 2562.
- [11] Yaoning Chen et al. “Adsorption of Pb(II) by tourmaline-montmorillonite composite in aqueous phase”, Journal of Colloid and Interface Science. 575 : 367-376, 2020.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวศุภมิตรา คำผาลา
วัน เดือน ปี เกิด	22 กรกฎาคม 2532
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2550 - 2553 มหาวิทยาลัยขอนแก่น วิทยาศาสตรบัณฑิต (สาธารณสุขศาสตร์) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์อนามัยสิ่งแวดล้อม
ประวัติการวิจัย	ผลของการใช้โปรแกรมการส่งเสริมสุขภาพ (Health Promotion Model) ที่มีผลต่อ KAP และค่ามวลกายของเจ้าหน้าที่โรงพยาบาลป่าติ้ว จังหวัดยโสธร, พ.ศ.2563
ประวัติการทำงาน	พ.ศ.2559 - ปัจจุบัน โรงพยาบาลป่าติ้ว จังหวัดยโสธร
ตำแหน่ง	นักวิชาการสาธารณสุขปฏิบัติการ