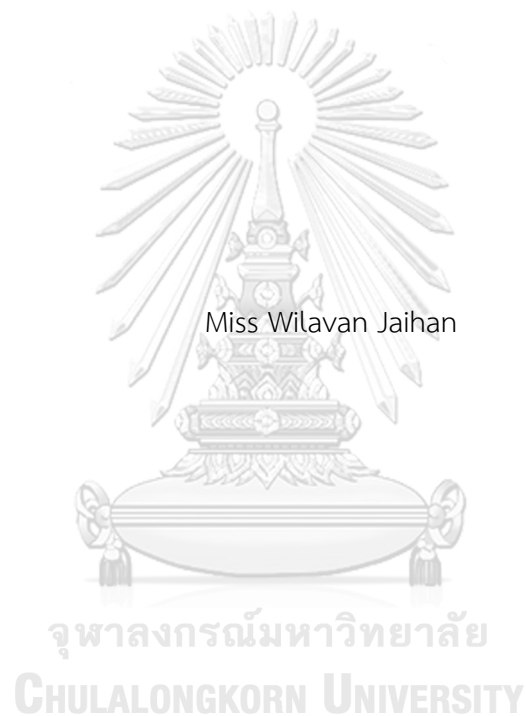


การเพิ่มประสิทธิภาพของผงดปล่อยกมะละกอด้วยสาร PDTC เพื่อดูดซับตะกั่วออกจากน้ำเสีย
สังเคราะห์ และการทำนายค่าสภาวะการดูดซับที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Enhancement of papaya peel powder via PDTC for lead adsorption from synthetic waste water and prediction of its optimal adsorption condition using response surface methodology.



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเพิ่มประสิทธิภาพของผงเปลือกมะละกอด้วยสาร PDTC เพื่อดูดซับตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ และการทำนายค่าสถานะการดูดซับที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการพื้นผิว
ตอบสนอง

โดย

น.ส.วิลาวรรณ ใจหาญ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.วรัญ แต่ไพสิฐพงษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมนึก จารุติลกกุล)

วិลาวรรณ ใจหาญ : การเพิ่มประสิทธิภาพของผงเปลือกมะละกอด้วยสาร PDTC เพื่อดูดซับตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ และการทำนายค่าสภาวะการดูดซับที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง. (Enhancement of papaya peel powder via PDTC for lead adsorption from synthetic waste water and prediction of its optimal adsorption condition using response surface methodology.) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.อุรา ปานเจริญ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนโดยใช้ตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกมะละกอ (PP) โดยใช้วิธีการพื้นผิวการตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วคือ ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นในสารละลาย 96.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 ปริมาณตัวดูดซับ 0.73 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตร และเวลาสัมผัสเท่ากับ 3 ชั่วโมง นอกจากนี้ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวตัวดูดซับ PP ด้วย PDTC (PP-PDTC) เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ พบว่าผลการดูดซับตะกั่วสำหรับ PP และ PP-PDTC ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 97.51 และ 99.12 ตามลำดับ ผลการศึกษาไอโซเทอมของ PP และ PP-PDTC สอดคล้องกับแบบจำลองของฟรุนดลิชและดูบินิน-ราดซ์เควิช ตามลำดับ การศึกษาจลนพลศาสตร์ของทั้งสองตัวดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเทียม การศึกษาอุณหภูมิศาสตร์ของ PP และ PP-PDTC พบว่า เป็นกระบวนการดูดความร้อนและสามารถเกิดขึ้นได้เอง การวิเคราะห์ SEM/EDX พบว่าพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญหลังจากถูกปรับปรุงด้วย PDTC และหลังการดูดซับด้วยตะกั่ว การวิเคราะห์ FTIR พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำปฏิกิริยากับตะกั่วบนตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC และการวิเคราะห์ BET พบว่าปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ PP-PDTC มีขนาดมากกว่า PP การศึกษาค่าร้อยละของการคายซับโดยใช้กรดไนตริกบนตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC มีค่าเท่ากับร้อยละ 75.16 และ 92.79 ตามลำดับ

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170271021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: lead, adsorption, RSM, wastewater, papaya, PDTC

Wilavan Jaihan : Enhancement of papaya peel powder via PDTC for lead adsorption from synthetic waste water and prediction of its optimal adsorption condition using response surface methodology.. Advisor: Prof. URA PANCHAROEN, Ph.D.

In this study, lead removal from synthetically contaminated aqueous solutions by papaya bio-adsorbent (PP) was investigated by response surface methodology method based on Box-Behnken design. Experimental results showed the optimal conditions to be the initial lead concentration in solution at 96.5 mg/L, the pH of solution at 4, the adsorbent dosage at 0.73 g/50 ml and the contact time at 3 h. In addition, the adsorbent surface of PP was modified by PDTC (PP-PDTC) to increase the adsorption capacity. The results of the percentage of lead adsorption for PP and PP-PDTC under optimal conditions were 97.51% and 99.12%, respectively. Furthermore, the data of the isotherm studies with PP and PP-PDTC were consistent with the Freundlich and Dubinin-Radushkevich models, respectively. The kinetic studies of two adsorbents fitted well with pseudo second-order model. Thermodynamic studies of PP and PP-PDTC were found to be an endothermic process and could occur spontaneously. The SEM/EDX showed that the surfaces were significantly changed after treatment with PDTC and after lead adsorption. The FTIR analysis revealed lead-reactive functional groups on both PP and PP-PDTC adsorbents. And BET showed that pore volume and surface area of PP-PDTC adsorbent were larger than PP. The percentage of desorption using nitric acid on PP and PP-PDTC adsorbents were 75.16 % and 92.79 %, respectively.

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือจากหลาย ๆ ท่าน ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์อุรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูงสำหรับการให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือต่องานวิจัย และแนวทางการดำเนินงานวิจัยได้อย่างถูกต้อง

ขอขอบคุณคณะกรรมการซึ่งได้แก่ ดร.วรัญ แต่ไพสิฐพงษ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม และรองศาสตราจารย์ ดร.สมนึก จารุติลกกุล ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ดร.ธิดารัตน์ วงสวา และ ดร.วาณี หมอดี ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านของงานวิจัย

ขอขอบคุณหน่วยปฏิบัติการวิจัยแยกมวลสาร (Mass Separation) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์เครื่องมือ สถานที่ทำงานวิจัย จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (กองทุนรัชดาภิเษกสมโภชน์) ทุนวิศวกรรมเคมี (คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) และกองทุน Cess Fund (องค์การร่วมมาเลเซีย-ไทย) สำนักงานวิจัยวิทยาศาสตร์ประเทศไทย และ กองทุนนวัตกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่เป็นแรงผลักดัน เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนผู้วิจัยในทุก ๆ ด้านตลอดมา จนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2	6
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ของเสียอันตราย.....	6
2.2 ตะกั่ว (Lead, Pb).....	7
2.2.1 การนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์.....	7
2.2.2 ความเป็นพิษของตะกั่ว.....	7
2.2.3 อุตสาหกรรมตะกั่วของประเทศไทย.....	9

2.3	วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำ.....	10
2.3.1	วิธีการกำจัดโลหะทางกายภาพ.....	10
2.3.2	วิธีการกำจัดโลหะทางเคมี.....	11
2.4	การดูดซับ (Adsorption).....	13
2.4.1	การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption).....	14
2.4.2	การดูดซับทางเคมี (Chemisorption).....	15
2.5	มะละกอ.....	16
2.6	แอมโมเนียม ไพโรลิดีน ไดไทโอคาร์บาเมต (Ammonium pyrrolidine dithiocarbamate, PDTC).....	18
2.7	สมมูลของการดูดซับ.....	19
2.7.1	ไอโซเทอมการดูดซับ.....	20
2.7.1.1	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm).....	20
2.7.1.2	ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm).....	21
2.7.1.3	ไอโซเทอมแบบเทมกิน (Temkin isotherm).....	22
2.7.1.4	ไอโซเทอมแบบดูบินิน-ราตซ์เควิช (Dubinin-Radushkevich isotherm หรือ D-R isotherm).....	22
2.7.2	จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	24
2.7.2.1	สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo -first order kinetic model).....	24
2.7.2.2	สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo - second order kinetic model).....	25
2.7.2.3	สมการการแพร่ภายในรูพรุนตัวดูดซับ (Intra-particle diffusion).....	27
2.7.3	อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	28
2.8	การคายซับ (Desorption).....	30

2.9 วิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Response Surface Methodology base on Box-Behnken design).....	31
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
บทที่ 3	38
การดำเนินงานวิจัย	38
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทำการทดลอง.....	38
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	42
3.3.1. เตรียมตัวดูดซับ.....	42
3.3.1.1. ผงเปลือกมะละกอ (Papaya peel, PP).....	42
3.3.1.2. ผงเปลือกมะละกอผสมกับสารละลายไอออนิก (Papaya peel modified by PDTC, PP-PDTC)	43
3.3.2 การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับตะกั่วออกจากสารละลายโดยใช้ผงเปลือกมะละกอ (PP) โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน	45
3.3.2.1 การศึกษาเพื่อเลือกช่วงของแต่ละตัวแปรเข้าโปรแกรม	45
3.3.2.2 การใช้ตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับภายใต้วิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน	47
3.3.2.3 การทดลองดูดซับ	47
3.3.3 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเปลือกมะละกอกับเปลือกมะละกอที่ผสมกับสารละลายไอออนิก.....	49
3.3.4 การศึกษาไอโซเทอม	50
3.3.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์	50
3.3.6 การศึกษาอุณหพลศาสตร์	51
3.3.7. ศึกษาการคายซับ.....	51
บทที่ 4	52

ผลการทดลอง	52
4.1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ	52
4.1.1 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ (SEM) และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (EDX)	52
4.1.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ (FTIR)	54
4.1.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ	56
4.2. การวิเคราะห์ทางสถิติ	58
4.2.1. การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ	58
บ็อกซ์-เบห์นเคน	58
4.2.2. วิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการดูดซับ (Optimization of adsorption process)	62
4.2.2.1. ค่าสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับ	62
4.2.2.2 วิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับจากข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม	65
4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับและกลไกการดูดซับของ PP และ PP-PDTC	68
4.3.1 การเปรียบเทียบค่าร้อยละของการดูดซับของตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC	68
4.3.2 การวิเคราะห์กลไกของการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC	68
4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอม	70
4.5 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์	73
4.6 ผลการศึกษาอุณหพลศาสตร์	75
4.7. ผลการศึกษาคายซับ	77
บทที่ 5	78
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	78
5.1 สรุปผลงานวิจัย	78

5.2. ข้อเสนอแนะ	79
บรรณานุกรม.....	81
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก	96
ภาคผนวก ข	106
ภาคผนวก ค	126
ประวัติผู้เขียน.....	128



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 อาการพิษของตะกั่วตามระดับความเข้มข้นของตะกั่วในเลือด [24]	9
ตารางที่ 2 รายชื่อผู้ประกอบการผลิตตะกั่วในประเทศไทย [25].....	10
ตารางที่ 3 องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกมะละกอดิบ [31]	17
ตารางที่ 4 การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ที่มี 4 ตัวแปร	34
ตารางที่ 5 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	38
ตารางที่ 6 ขอบเขตและช่วงของตัวแปรจากการทดลอง.....	47
ตารางที่ 7 ค่าของตัวแปรและสภาวะที่ใช้ในการทดลองจากการออกแบบของวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ บล็อกซ์-เบห์นเคน.....	48
ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ EDX ของตัวดูดซับชีวภาพจากมะละกอ.....	54
ตารางที่ 9 ค่าทดลองและค่าคาดการณ์โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับการดูด ซับตะกั่วโดยใช้ PP เป็นตัวดูดซับ	59
ตารางที่ 10 แสดงค่าการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (ANOVA)	61
ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ PP และ PP-PDTC เป็นตัวดูดซับ	68
ตารางที่ 12 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทอมของตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC	73
ตารางที่ 13 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์	74
ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์ของอุณหพลศาสตร์สำหรับการดูดซับตะกั่ว	76

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของการดูดซับ [28]	14
รูปที่ 2 (ก) รูปตัดขวางของผลมะละกอดิบ (ข) โครงสร้างโมเลกุลของสารเซลลูโลส [34]	17
รูปที่ 3 โครงสร้างของสาร PDTC [16].....	18
รูปที่ 4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และสเปกตรัมเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน [53]	40
รูปที่ 5 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน [54]	40
รูปที่ 6 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ [55]	41
รูปที่ 7 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ [56].....	41
รูปที่ 8 ขั้นตอนของการเตรียมตัวดูดซับผงเปลือกมะละกอ (PP).....	43
รูปที่ 9 ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับ PP ที่ถูกดัดแปลงด้วยสาร PDTC (PP-PDTC).....	44
รูปที่ 10 ขั้นตอนการดูดซับตะกั่ว.....	50
รูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับของ (ก) PP (ข) PP-Pb (ค) PP-PDTC และ (ง) PP-PDTC-Pb.....	53
รูปที่ 12 สเปกตรัม FTIR ของ (ก) PP (ข) PP-Pb (ค) PP-PDTC และ (ง) PP-PDTC-Pb.....	56
รูปที่ 13 การวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับ-การคายซับด้วยแก๊สไนโตรเจนและกราฟการกระจายตัวของขนาดรูพรุน (ก, ข) PP และ (ค, ง) PP-PDTC	57
รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทดลองและค่าการทำนายของการดูดซับตะกั่ว	60
รูปที่ 15 สภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับตะกั่วด้วยเปลือกมะละกอ (PP) จากโปรแกรม minitab	64
รูปที่ 16 แผนภาพสามมิติของ (ก) ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นและความเป็นกรด-ด่าง (ข) ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นและปริมาณของตัวดูดซับ (ค) ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นและเวลาสัมผัส (ง) เวลาสัมผัสและปริมาณของตัวดูดซับ (จ) ปริมาณของตัวดูดซับและความเป็นกรด-ด่าง และ (ฉ) เวลาสัมผัสและความเป็นกรด-ด่าง	67

รูปที่ 17 กลไกการทำปฏิกิริยาของ (ก) PP กับตะกั่ว (Pb^{2+}) (ข) PP กับ PDTC และ (ค) PP-PDTC
กับตะกั่ว (Pb^{2+}) 69

รูปที่ 18 แบบจำลองไอโซเทอมของตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC (ก) แลงเมียร์ (ข) ฟรอนตลิช (ค) เทม
กิน และ (ง) ดูบินิน-ราดซ์เควิช (D-R) 71

รูปที่ 19 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของ PP และ PP-PDTC ของสมการอันดับสองเทียม..... 74

รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ ของของการดูดซับตะกั่วโดยใช้ PP และ PP-PDTC . 76

รูปที่ 21 การศึกษาการคายซับของตัวดูดซับ PP and PP-PDTC..... 77



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากอดีตจนถึงปัจจุบันการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมยังคงเป็นปัญหาสำคัญและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศ และมนุษย์อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารตะกั่วที่ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ [1] อุตสาหกรรมที่มักมีการปล่อยตะกั่วออกสู่สิ่งแวดล้อม ได้แก่ สี แบตเตอรี่ วัสดุถ่ายภาพ พิโตรเคมี และเหมืองแร่ [2] ตะกั่วมักจะถูกปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมโดยที่ยังไม่ได้รับการบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพ พิษของตะกั่วสามารถทำลายระบบต่าง ๆ ในร่างกายมนุษย์ อาทิเช่น ระบบทางเดินอาหาร ระบบภูมิคุ้มกัน ระบบไหลเวียนโลหิตของมนุษย์ รวมถึงส่งผลกระทบต่อการทำงานของตับและไตด้วย [1] ในบางพื้นที่ของประเทศไทยมีการปนเปื้อนของตะกั่วจากอุตสาหกรรมลงสู่แม่น้ำ เช่น กาญจนบุรี อุทัยธานี เป็นต้น [3-5] นอกจากนี้สารตะกั่วนี้ไม่สามารถย่อยสลายได้เองทางชีวภาพ [1] ดังนั้นสารตะกั่วจึงเป็นสารพิษที่ต้องดำเนินการกำจัดอย่างมีประสิทธิภาพ

การดูดซับเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำ เนื่องจากกระบวนการดูดซับสามารถคัดเลือกจับโลหะที่ความเข้มข้นต่ำได้ ยิ่งไปกว่านั้นกระบวนการนี้ยังใช้ต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [6] อดีตที่ผ่านมาวัสดุจากธรรมชาติ เช่น เปลือกแตงกวา เปลือกกล้วย [7, 8] ได้รับความสนใจอย่างมากเพื่อนำไปทำเป็นตัวดูดซับในการกำจัดสารตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำสังเคราะห์ วัสดุจากธรรมชาติพบว่ามีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (Carboxyl group) และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ซึ่งอยู่ในลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับ นอกจากนี้วัสดุจากธรรมชาติยังใช้ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [7-10]

มะละกอเป็นผลไม้ที่นิยมนำผลมาประกอบเป็นอาหารทั้งคาวและหวาน ทั้งยังเป็นพืชประจำถิ่นที่ทำได้ง่ายในประเทศไทย การผลิตมะละกอในประเทศไทยอยู่ที่ประมาณ 1.3 ถึง 2.0 กิโลตันต่อปี ซึ่งประมาณร้อยละ 90 ของการผลิตทั้งหมดใช้ภายในประเทศ [11] การสำรวจตลาดยังระบุด้วยว่าประมาณร้อยละ 85 ถึงร้อยละ 90 ของมะละกอในประเทศถูกบริโภคเป็นมะละกอดิบ เช่น เมนูส้มตำ [11] ปริมาณเปลือกมะละกอที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมากทำให้เกิดการสะสมของของขยะมูลฝอยที่กลายเป็นปัญหาที่ต้องได้รับการจัดการ [1] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าส่วนที่เป็นขยะทางการเกษตรของมะละกอนั้นสามารถกำจัดปริมาณสารโลหะหนักในสารละลายได้ไม่ว่าจะเป็นส่วนของเมล็ดมะละกอ [12] หรือเปลือกมะละกอ [1]

โดยปกติวิธีการเตรียมตัวดูดซับจะส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับไม่ว่าจะเป็นการปรับปรุงด้วยวิธีการทางกายภาพเพื่อเพิ่มโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับด้วยวิธีการย่อยแห้ง (Dry oxidation) โดยการนำตัวดูดซับไปผ่านความร้อนที่อุณหภูมิสูงโดยป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในพื้นผิวของวัสดุตัวดูดซับ ในขณะที่การปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของตัวดูดซับโดยใช้วิธีย่อยเปียก (Wet oxidation) คือ การนำตัวดูดซับมาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารละลายที่มีประจุลบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการกรดไนตริก (Nitric acid) [13] สารแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulphate) [14] ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ที่อุณหภูมิห้อง [15] สารเหล่านี้ช่วยทำปฏิกิริยากับตัวดูดซับให้เกิดการดูดซับได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันสารประกอบที่นำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติตัวดูดซับโดยส่วนใหญ่แล้วยังเป็นสารที่เป็นอันตรายและมีความเป็นพิษ ดังนั้น การพิจารณาหาสารทางเลือกที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

แอมโมเนียม ไพโรลิดีนไดไทโอคาร์บาเมต (Ammonium pyrrolidine dithiocarbamate, PDTC) เป็นสารไอออนิกที่ไม่เป็นพิษ [16] ถูกนำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพของการกำจัดสารตะกั่วออกจากสารละลาย [17] เนื่องจาก PDTC ประกอบด้วยธาตุกำมะถันและไนโตรเจน จึงสามารถสร้างสารเชิงซ้อนคีเลต (Chelating agent) ที่มีความเสถียรกับไอออนของโลหะหนักได้ [18] ดังนั้น PDTC จึงถูกเลือกมาใช้เพื่อปรับปรุงตัวดูดซับของการดูดซับตะกั่ว

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาวิธีการใหม่ที่จะช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมให้คงอยู่ได้นานยิ่งขึ้นโดยนำสารไอออนิกที่ไม่เป็นพิษมาใช้ในการปรับปรุงตัวดูดซับเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก ทั้งยังใช้ตัวดูดซับที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติ นอกจากจะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ราคาถูก ยังสามารถนำมาใช้งานได้ง่ายอีกด้วย ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการดูดซับตะกั่วด้วยผงเปลือกมะละกอที่ผสมเข้ากับสารละลายไอออนิก โดยการนำโปรแกรมคณิตศาสตร์ทางสถิติที่ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box Behnken design) มาใช้ทำนายแบบจำลอง และออกแบบการทดลอง [19] บ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นรูปแบบของโปรแกรมที่นิยมใช้กับตัวแปรตั้งแต่ 3 ตัวแปรขึ้นไป จึงจะทำให้ผลการทำนายแม่นยำมากที่สุด [20] ซึ่งในงานวิจัยนี้มีตัวแปรต้นที่ต้องการศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายตะกั่ว ปริมาณตัวดูดซับ และเวลาสัมผัสของตัวดูดซับ ซึ่งในการหาสภาวะที่เหมาะสมจะใช้เฉพาะตัวดูดซับผงมะละกอ แล้วนำสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวมาศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างเปลือกมะละกอ (PP) และเปลือกมะละกอที่ผสมกับ PDTC (PP-PDTC) อีกครั้ง รวมถึงศึกษาเกี่ยวกับ ไอโซเทอม จลนพลศาสตร์ อุณหพลศาสตร์ รวมทั้งการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผงเปลือกมะละกอในการดูดซับตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาสภาวะของตัวแปรที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 4 ตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายตะกั่วโดยใช้เปลือกมะละกอ (PP) โดยทำการทดลองแบบกะ ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาได้แก่

- ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่ 10, 55 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายตะกั่วที่ 4, 5 และ 6
- ปริมาณตัวดูดซับที่ 0.1, 0.55 และ 1 กรัม ต่อ 50 มิลลิลิตร
- เวลาสัมผัสของการดูดซับที่ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง

1.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ ได้แก่

- สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes, SEM) ร่วมกับสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray, EDX)

- หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนตัวดูดซับโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์ (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR)

- พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยโดยใช้เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Brunauer-Emmett-Teller, BET)

1.3.3 ศึกษาการดูดซับเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกมะละกอ (PP) กับเปลือกมะละกอผสมสารละลายไอออนิก (PP-PDTC)

1.3.4 ศึกษาไอโซเทอม จลนพลศาสตร์ อุณหพลศาสตร์ ของกระบวนการดูดซับ

1.3.5 ศึกษากระบวนการคายซับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- ได้กระบวนการที่สามารถลดปริมาณการปนเปื้อนสารตะกั่วในสิ่งแวดล้อม
- ช่วยเพิ่มมูลค่าของขยะทางการเกษตร



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ของเสียอันตราย

คำว่าของเสียอันตรายตามความหมายของสำนักคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติของประเทศไทย หมายถึง ของเสียหรือสิ่งที่เป็นอันตรายหรือสิ่งที่เป็นอันตรายซึ่งมีความเข้มข้นหรือมีสมบัติด้านกายภาพ เคมีหรืออื่น ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการตาย หรือเจ็บป่วยทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ ซึ่งจะมีแนวโน้มจะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม หากไม่ได้มีการจัดการในการบำบัดเก็บกัก ขนส่ง และกำจัดที่เหมาะสม [21] ซึ่งของเสียอันตรายสามารถแบ่งได้ตามสมบัติตามประเภทต่าง ๆ [21] ดังนี้

- สารไวไฟ คือ ของเสียที่สามารถติดไฟได้ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน
- สารเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย คือ ของเสียที่ไม่คงตัว สามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้อย่างรวดเร็ว
- สารกัดกร่อน คือ ของเสียที่มีความเป็นกรด-ด่าง มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 หรือค่าความเป็นกรด-ด่าง มากกว่าหรือเท่ากับ 12.5
- สารมีพิษ คือ ของเสียที่มีความเป็นพิษในตัวเอง ได้แก่ สารเคมี หรือ สารกัมมันตรังสี
- สารถูกชะละลายได้ง่ายจากแหล่งต่าง ๆ เช่น แหล่งดิน แหล่งน้ำ เป็นต้น
- สารที่ก่อให้เกิดโรค คือ ของเสียที่มีจุลินทรีย์ปะปนอยู่ เช่น ของเสียจากสถานพยาบาล หรือห้องปฏิบัติการ

นอกจากนี้โลหะหนักบางชนิด เช่น สารหนู (Arsenic) แคดเมียม (Cadmium)ปรอท (Mercury) ตะกั่ว (Lead) จัดเป็นโลหะหนักประเภทที่มีพิษถาวร ซึ่งนอกจากจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลาแล้วยังสามารถสะสมในร่างกายมนุษย์และสัตว์ได้ [21]

2.2 ตะกั่ว (Lead, Pb)

อักษรย่อ Pb มาจากภาษาละตินคำว่า *Plumbum* ซึ่งแปลว่า ธาตุโลหะสีน้ำเงิน-ขาวที่เป็นพิษหนักและอ่อนตัวได้สูง ตะกั่วมีเลขอะตอม 82 น้ำหนักอะตอม 207.19 ระบบผลึกแบบ FCC (Face centered cubic) ความหนาแน่น 11.34 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวที่ 327 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1,749 องศาเซลเซียส ความต้านทานไฟฟ้า 208 นาโนโอห์ม-เมตร สัมประสิทธิ์การขยายตัว 28.9 ไมโครเมตรต่อเมตร-เคลวิน

2.2.1 การนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์

ตะกั่วใช้เป็นส่วนประกอบในแบตเตอรี่ตะกั่วกรด [22] ซึ่งใช้ตะกั่วอยู่ประมาณร้อยละ 60 ของน้ำหนักแบตเตอรี่ทั้งหมด ใช้ตะกั่วเพื่อเพิ่มเลขออกเทนของน้ำมัน โดยใช้ในรูปของเตตระเอทิลเลด (Tetraethyl lead, TEL) ผสมลงในน้ำมันเบนซิน ทำให้น้ำมันมีเลขออกเทนสูงขึ้น งานบัดกรี งานท่อของอุตสาหกรรมเคมี นอกจากนี้ยังใช้ตะกั่วเพื่อผลิตกระสุนปืน ใช้เป็นส่วนผสมของสีทาบ้าน ใช้หุ้มสายไฟฟ้าแรงสูงเพื่อป้องกันการผุกร่อน [23]

2.2.2 ความเป็นพิษของตะกั่ว

สารตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ ระบบทางเดินหายใจ ระบบทางเดินอาหาร และทางผิวหนัง [24] เมื่อตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจะถูกขับออกทางปัสสาวะร้อยละ 76 อุจจาระร้อยละ 16 ผมและเล็บริ้อยละ 8 สารตะกั่วที่เหลืออยู่ในร่างกายส่วนใหญ่จะไปสะสมที่กระดูก [24] หากตะกั่วเข้า

สู่เส้นเลือดสารนี้จะไปจับกับเม็ดเลือดแดง และตะกั่วยับยั้งการสังเคราะห์ฮีม (Heme) ในเม็ดเลือดแดง โดยจะยับยั้งเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ฮีม เช่น *ALA dehydratase* หรือ *PBG synthetase* นอกจากนี้ตะกั่วสามารถเข้าไปรบกวนการสังเคราะห์ฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) โดยจะเข้าไปจับกับหมู่ไทออล (Thiol group) ในโมเลกุลของเอนไซม์ ซึ่งจะสามารถวัดเอนไซม์ *ALA dehydratase* ในเลือดเพื่อวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วได้ โดยผลที่พบคือ หากปริมาณตะกั่วในร่างกายเพิ่มขึ้นจะทำให้เอนไซม์นี้มีปริมาณน้อยลง ซึ่งอาการพิษของตะกั่วจะแปรผันตามระดับของตะกั่วในเลือด [24] ดังแสดงในตารางที่ 1 หากสารตะกั่วสะสมในร่างกายเป็นระยะเวลานานหรือสะสมเป็นปริมาณมาก จะส่งผลเสียต่อสุขภาพอย่างมาก ซึ่งความรุนแรงของตะกั่ว แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- แบบเฉียบพลัน คือ ตะกั่วเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจและทางเดินอาหารในปริมาณมาก ในช่วงสั้น ๆ ส่งผลให้เกิดอาการทางประสาท เช่น นอนไม่หลับ หงุดหงิด คลุ้มคลั่ง เกิดความสับสน และวิกลจริต คอแห้ง ระบายน้ำ เบื่ออาหาร คลื่นไส้ ปัสสาวะไม่ออก มือเท้าเป็นตะคริว ไตถูกทำลาย อาจตายได้ภายใน 1 หรือ 2 วัน [24]

- แบบเรื้อรัง คือ ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายในปริมาณน้อยแต่สะสมเป็นเวลานาน ส่งผลให้มีอาการอ่อนเพลีย เบื่ออาหาร ท้องผูก ซึม โลหิตจาง พบสารตะกั่วบริเวณเหงือกลักษณะเป็นเส้น (Lead line) หากเป็นมากจะเป็นอัมพาตที่กล้ามเนื้อมือและเท้า [24]

ตารางที่ 1 อาการพิษของตะกั่วตามระดับความเข้มข้นของตะกั่วในเลือด [24]

ระดับของตะกั่วในเลือด (มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	อาการพิษ
25-30	โปรโตพอร์ไฟริน (Protoporphyrin) เพิ่มขึ้นในเลือดและ <i>ALA dehydratase</i> เพิ่มขึ้นในปัสสาวะ
40-50	เฮมาโตคริต (Hematocrit) และฮีโมโกลบินลดลงและ <i>ALA dehydratase</i> เพิ่มขึ้น
50-60	เกิดภาวะโลหิตจาง
>60	ตื่นเต้น ไม่อยู่นิ่ง ควบคุมตัวเองไม่ได้ ก้าวร้าว
>120	ปัญญาอ่อน ตาบอด และเสียชีวิต

2.2.3 อุตสาหกรรมตะกั่วของประเทศไทย

ในประเทศไทยมีจำนวนผู้ประกอบการอุตสาหกรรมผลิตตะกั่วจำนวน 7 ราย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยทั้งหมดใช้เศษแบตเตอรี่ภายในประเทศเป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ออกมาได้แก่ โลหะตะกั่วบริสุทธิ์ ตะกั่วผสมพลวง (Antimony) และตะกั่วผสมแคลเซียม (Calcium) ซึ่งในประเทศมีกำลังการผลิตรวม 82,200 ตันต่อปี โดยที่ร้อยละ 90 ของปริมาณการผลิตทั้งหมดส่งไปจำหน่ายให้กับอุตสาหกรรม แบตเตอรี่ในประเทศ จึงคาดว่าจะมีการใช้ตะกั่วเพื่อผลิตแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้นในอนาคต [25]

ตารางที่ 2 รายชื่อผู้ประกอบการผลิตตะกั่วในประเทศไทย [25]

บริษัท	ที่ตั้ง	กำลังการผลิต (ตันต่อปี)
1.บริษัท โลหะตะกั่วไทย จำกัด	กาญจนบุรี	14,000
2.บริษัท ไทย-โซนาโนเพอร์ชเมทัล อินเทอร์เน็ต เนชั่นแนล จำกัด	นครสวรรค์	9,000
3.บริษัท เบอร์โก้ เมทัลส์ จำกัด	สระบุรี	12,000
4.ห้างหุ้นส่วนจำกัด เลียงฮวดหล่อหลอมโลหะ	สมุทรปราการ	6,000
5.ห้างหุ้นส่วนจำกัด วงศ์ตระกูลโลหะกิจ	นครปฐม	12,600
6.บริษัทไทย นันเพอร์ช เมทัล จำกัด	ฉะเชิงเทรา	15,600
7.บริษัท อุตสาหกรรมหลอมโลหะไทย จำกัด	ราชบุรี	14,000
รวม		82,200

2.3 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำ

แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.3.1 วิธีการกำจัดโลหะทางกายภาพ

การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยวิธีทางกายภาพมีหลายวิธี ซึ่งตัวอย่างวิธีการบำบัดที่ใช้โดยทั่วไปมีดังนี้

- การกรอง (Filtration) ใช้หลักการอัดน้ำผ่านรูกรองด้วยความดันสูง ซึ่งของแข็งไม่สามารถทะลุผ่านรูกรองได้ ซึ่งสามารถแบ่งภาพแบบการกรอง ได้แก่ การกรองที่มีช่องแบบละเอียด

(Microfiltration) การกรองที่มีช่องกรองละเอียดมาก (Ultrafiltration) และการกรองโดยออสโมซิสผันทกลับ (Reverse osmosis) [24]

- การดูดซับ (Adsorption) เป็นหลักการที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) เคลื่อนที่ไปเกาะแน่นอยู่บนผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งยึดกันด้วยแรงระหว่างโมเลกุลที่ต่างกัน โดยตัวดูดซับที่นิยมใช้กำจัดกลิ่นและโลหะหนักได้ดี คือ ถ่านกัมมันต์ [24]

- การหมุนเหวี่ยง (Centrifugation) ใช้หลักการให้ของแข็งที่เป็นตะกอนแยกออกจากของเหลวโดยการสร้างแรงหนีศูนย์กลางและเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง ซึ่งเหมาะกับการแยกอนุภาคที่มีความหนาแน่น และขนาดต่างกันเพื่อให้เกิดการแยกชั้นอย่างชัดเจน วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง [24]

2.3.2 วิธีการกำจัดโลหะทางเคมี

การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยวิธีทางเคมีมีหลายวิธี ซึ่งตัวอย่างวิธีการบำบัดที่ใช้โดยทั่วไปมีดังนี้

- การกลั่น (Distillation) ใช้เพื่อแยกสารที่เป็นของเหลวผสมตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยมีหลักการของความแตกต่างของจุดเดือดของสารในการระเหยเป็นไอได้ไม่เท่ากัน ณ อุณหภูมิและความดันเดียวกัน ดังนั้นการกลั่นทำให้ของเหลวมีความบริสุทธิ์ขึ้น และแยกสารออกเป็นหลาย ๆ องค์ประกอบได้ [24]

- การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) เป็นการแยกสารออกจากกันโดยใช้คุณสมบัติการละลายของสาร ซึ่งสารที่ใช้เป็นตัวทำละลายควรมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการสกัดสารให้ได้มากที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการแยก โดยนำสารสกัดเติมลงไปลงในน้ำเสีย เพื่อดักจับโมเลกุลของโลหะในน้ำเสีย ซึ่งมักทำควบคู่กับการกลั่น [24]

- การปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง หากน้ำเสียตามธรรมชาติจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างมากเกินไปหรือไม่ตรงค่ามาตรฐานอาจก่อให้เกิดความเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ ซึ่งน้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่างตามมาตรฐานอยู่ที่ 5.5-9 ดังนั้นควรใช้สารปรับสภาพน้ำให้ตรงตามตามสถานะของน้ำเสีย ได้แก่ เมื่อน้ำเสียมีสถานะเป็นกรดมากจะใช้ โซดาไฟ (Caustic soda) และ ปูนขาว (Lime) หากน้ำเสียมีสถานะเป็นด่าง (ค่าความเป็นกรด-ด่าง มากกว่า 7) จะใช้กรดเกลือ (Hydrochloric acid) และกรดกำมะถัน (Sulfuric acid) [24] เป็นต้น

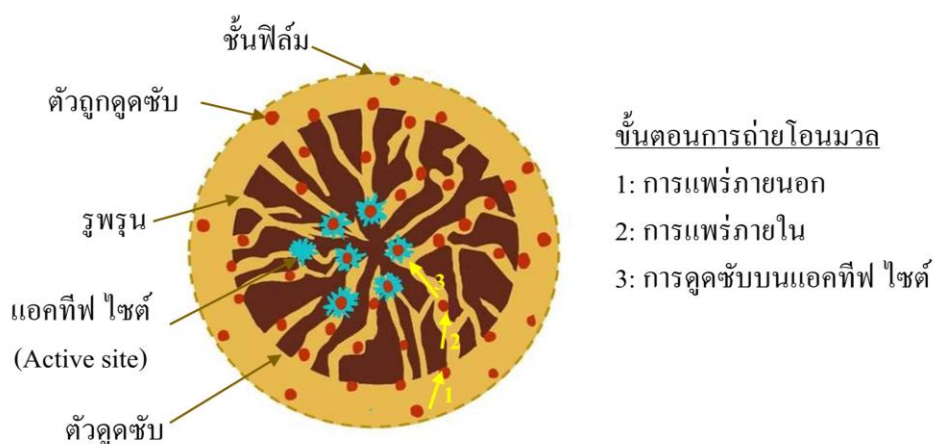
- การตกตะกอนทางเคมี ทำโดยใช้สารเคมีเพื่อให้ไอออนของโลหะจับตัวกันเป็นของแข็งแล้วจมลงเกิดเป็นตะกอนทำให้แยกออกจากน้ำเสียได้ง่ายขึ้น ซึ่งการตกตะกอนขึ้นอยู่กับสารแต่ละชนิดและค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งสารที่นิยมนำมาใช้เติมเพื่อให้โลหะหนักตกตะกอนนั้นได้แก่ โซดาไฟ ปูนขาว โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) เป็นต้น [24]

- การทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน เป็นวิธีที่ใช้สารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) เพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับโลหะหนักในน้ำเสีย เกิดการเปลี่ยนภาพเป็นสารประกอบที่ไม่เป็นพิษหรือสามารถตกตะกอนทำให้สามารถแยกออกจากน้ำเสียได้ง่าย สารเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ ออกซิเจน (Oxygen) โอโซน (Ozone) คลอรีน (Chlorine) และสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ เฟอรัสซัลเฟต (Ferrous sulfate) โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (Sodium metabisulfite) เป็นต้น [24]

- การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange) ใช้หลักการให้ไอออนบวกในน้ำเสียมาจับกับไอออนลบของเรซิน โดยโครงสร้างของเรซินจะไม่เปลี่ยนไป และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการนำมาล้างด้วยกรด [24]

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ หมายถึง กระบวนการแยกสารที่มีโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ไปจับกับผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับโดยเกิดเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (Interface) ของ 2 วัสดุ ประกอบไปด้วย ของแข็งและของเหลว ปริมาณการดูดซับขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่างของของเหลว ระยะเวลาการสัมผัสกัน ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ต่อปริมาณของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิขณะดูดซับ ความดันขณะดูดซับ เป็นต้น รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของการดูดซับ (Mass transfer of adsorption) โดยแบ่งเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะที่ 1 เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์ม (Bulk solution) ไปเกาะที่ผิวนอกของตัวดูดซับ ซึ่งความเข้มข้นที่แตกต่างกันของ ชั้นฟิล์มและพื้นผิวของตัวดูดซับคือแรงขับ (Driving force) ของการแพร่ภายนอก (External diffusion) ในระยะที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแพร่กระจายเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับเรียกว่า การแพร่ภายใน (Internal diffusion) ระยะที่ 3 (สุดท้าย) เป็นระยะการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งเป็นระยะที่เกิดการดูดซับของตัวถูกดูดซับในแอคทีฟ ไซต์ (Active site) ของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับบนผิวของแข็งสามารถแบ่งออกได้ตามแรงดูดซับระหว่างผิวของโมเลกุลซึ่งแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี [24, 26, 27]



รูปที่ 1 ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของการดูดซับ [28]

2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)

การดูดซับแบบนี้จะไม่เกิดพันธะเคมีในขณะดูดซับ แต่จะอาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals) หรือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) มาเกี่ยวข้องโดย จำนวนชั้นของการดูดซับขึ้นกับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ ๆ และจะมีพลังงานในการดูดซับต่ำทำให้เกิดการย้อนกลับของการดูดซับได้ โดยมีปัจจัยคือ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งการดูดติดบนผิวของตัวดูดซับนั้นไม่จำกัดบริเวณที่เกิดการดูดซับ ไม่มีพลังงานกระตุ้นมาเกี่ยวข้อง และบนพื้นผิวตัวดูดซับจะสามารถเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพมักใช้กันมากในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสีย [24]

2.4.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

การดูดซับแบบนี้จะเกิดการดูดซับเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น ซึ่งมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของโมเลกุลเดิม แล้วมีการเรียงตัวของโครงสร้างของโมเลกุลใหม่ และจะไม่เปลี่ยนไปเนื่องจากได้เกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ มักเกิดปฏิกิริยาการดูดซับทางเคมีที่อุณหภูมิสูง และทำให้ค่าความร้อนของการดูดซับ (Heat of adsorption) มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิกวิกฤตของตัวดูดซับ (The critical temperature of the adsorbent) อาจจะต้องมีพลังงานกระตุ้นมาเกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ เนื่องจากความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงทำให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากพื้นผิวตัวดูดซับได้ยาก เกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ยาก และเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว [29]

ตัวดูดซับ (Adsorbent) คือ สารที่มีคุณสมบัติในการดูดซับ แบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท [24] ดังนี้

1. สารอินทรีย์ เช่น กระดูก ซิลิกา หรือดินเหนียว ซึ่งตัวดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์นั้นจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ตัวดูดซับประเภทสารอินทรีย์นั้นจะสามารถดูดซับสารได้เพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้น

2. สารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น เรซิน ซึ่งสารเรซินนั้นจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม

3. สารดูดซับชีวภาพ เช่น เซลล์แบคทีเรียหรือเอนไซม์

4. ถ่านกัมมันต์ จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1,400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น นำไปใช้งานในการฟอกสี การกำจัดกลิ่นในโรงหมักเบียร์ เป็นต้น

5. วัสดุจากการเกษตร ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือจากการเกษตร เช่น ไคโตซาน (Chitosan) กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลือง ชีลื้อย เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้วัสดุชีวภาพมาดัดแปลงให้มีคุณสมบัติเหมือนถ่านกัมมันต์ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในกระบวนการดูดซับ

2.5 มะละกอ

มะละกอ (papaya, pawpaw) ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Carica papaya L.* ชื่อวงศ์คือ *Caricaceae* มีแหล่งกำเนิดอยู่ทางใต้ของประเทศเม็กซิโกและดินแดนแถบอเมริกากลาง มะละกอเป็นไม้ยืนต้นสูง 2-10 เมตร มีกิ่งยื่นตรงกลางและส่วนบนของลำต้น มีก้านใบยาว 25-100 เซนติเมตร พืชชนิดนี้ได้รับความสนใจจากทั่วโลกโดยเฉพาะภูมิภาคเขตร้อนในการปลูกเพื่อทำการค้าเพราะปลูกง่ายและให้ผลเร็ว เช่น อินเดีย ไทย บังคลาเทศ มาเลเซีย เอกวาดอร์ ฟิลิปปินส์ ฯลฯ ในประเทศไทยนั้นมีหลายสายพันธุ์ ได้แก่ แยกดำ แยกนวล โกโก้ เรดเลดี้ ฮอลแลนด์ สายน้ำผึ้ง เป็นต้น [30] มะละกออุดมไปด้วยวิตามิน แร่ธาตุ และสารต้านอนุมูลอิสระ มีอายุหลังการเก็บเกี่ยวสั้น ไม่สามารถทนกับอากาศที่อุณหภูมิต่ำได้ มะละกอใช้เป็นของหวานในสลัดผลไม้ และแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น แยมทาขนมปัง ผลไม้กระป๋อง ผลไม้อบแห้ง เป็นต้น [30]

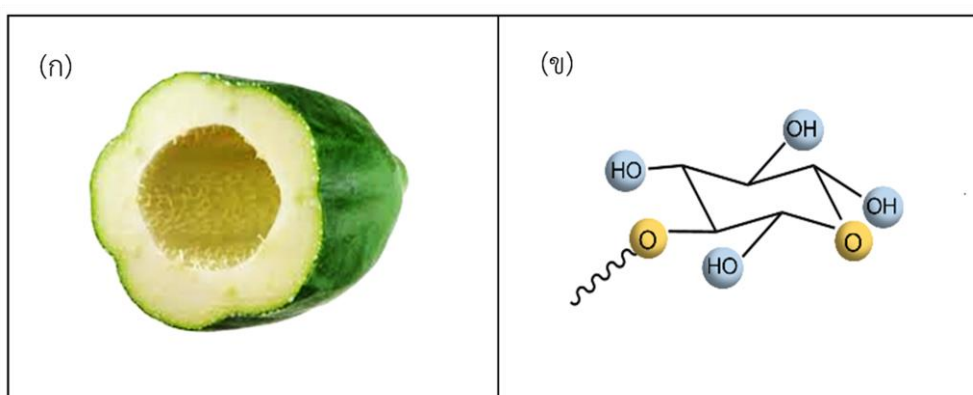
รูป 2(ก) แสดงรูปตัดขวางของมะละกอดิบ ตารางที่ 3 แสดงส่วนประกอบโดยประมาณของเปลือกมะละกอดิบ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ คาร์โบไฮเดรต [31] ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของกลุ่มเซลล์ลูลอสที่ใช้เพื่อจับโลหะ แสดงโมเลกุลของเซลล์ลูลอสในรูปที่ 2(ข) นอกจากนี้จากงานวิจัยของ He

และคณะ และงานวิจัยของ Cahyaningrum และคณะ [32, 33] ได้รายงานว่าเปลือกมะละกอดิบยังมี เอนไซม์คือ ปาเปน (Papain) ซึ่งมีศักยภาพในการจับกับโลหะไอออนในสารละลาย

ตารางที่ 3 องค์ประกอบโดยประมาณของเปลือกมะละกอดิบ [31]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (กรัม ต่อ 100 กรัม ของน้ำหนักแห้ง)
ความชื้น (%)	9.82 ± 0.09
น้ำตาลทั้งหมด	1.78 ± 0.63
น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar)	1.03 ± 0.42
ใยอาหารทั้งหมด	32.51 ± 0.03
เถ้า (Ash)	5.98 ± 0.03
โปรตีน	11.67 ± 0.04
ไขมัน	2.51 ± 0.13
คาร์โบไฮเดรต	47.33 ± 0.08

หมายเหตุ: ± คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของค่าบันทึกผลสามครั้ง



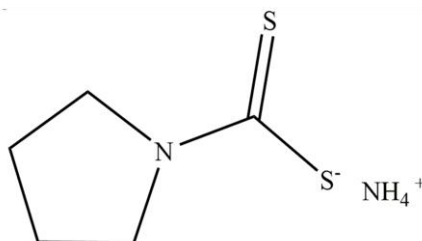
รูปที่ 2 (ก) รูปตัดขวางของผลมะละกอดิบ (ข) โครงสร้างโมเลกุลของสารเซลลูโลส [34]

2.6 แอมโมเนียม ไพร์โรลิดีน ไตไทโอคาร์บาเมต (Ammonium pyrrolidine dithiocarbamate, PDTC)

PDTC ชื่อนี้ใช้สำหรับเรียกเกลือหลายชนิดที่มีประจุลบของไพร์โรลิดีนไตไทโอคาร์บาเมต ($C_4H_8NS_2^-$) โครงสร้างที่พบทั่วไปคือแอมโมเนียมและอนุพันธ์ของโซเดียมดังแสดงไว้ในรูปที่ 3 PDTC เป็นสารที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในวงการแพทย์เพราะเป็นสารที่สร้างสารเชิงซ้อนคีเลต (Chelating agent) ที่มีความเสถียรกับไอออนของโลหะเพื่อช่วยในการเหนี่ยวนำการหยุดวงจรของเซลล์ในระยะเริ่มต้นของการแบ่งตัวของเซลล์ [35] สามารถนำมาใช้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และต้านการอักเสบ [36] ด้วยคุณสมบัติการเป็นสารคีเลตนี้เองทำให้ PDTC ถูกนำมาใช้ในการช่วยดักจับโลหะหนักได้ [17, 18]

2.6.1 คุณสมบัติของสาร PDTC

น้ำหนักโมเลกุล 164.29 กิโลกรัมต่อโมล จุดหลอมเหลว 153-155 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 1.117 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดัชนีการหักเหของแสง 1.530 อุณหภูมิในการเก็บรักษา 2-8 องศาเซลเซียส รูปร่าง (Form) ผงหรือของแข็ง สีขาวนวล ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 6-7 (50 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ที่ 20 องศาเซลเซียส) ค่าการละลายในน้ำ 50 กรัมต่อลิตร (ที่ 20 องศาเซลเซียส) ดูดความชื้น มีความเสถียร แต่เข้ากันไม่ได้กับตัวออกซิไดซ์ที่แรง [37]



รูปที่ 3 โครงสร้างของสาร PDTC [16]

2.7 สมดุลของการดูดซับ

เมื่อเติมตัวดูดซับลงในสารละลายที่ประกอบไปด้วยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะกระจายตัวออกไปเกาะบนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งปริมาณการเกาะบนผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลานานขึ้น ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลของตัวถูกดูดซับอาจมีการหลุดออกจากผิวของตัวดูดซับได้เช่นกัน ซึ่งเรียกว่าการคายซับ หากปฏิกิริยาดำเนินไปจนถึงจุดที่อัตราการดูดซับและอัตราการคายซับมีค่าเท่ากัน นั่นแปลว่าระบบเข้าสู่สมดุล [38] ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (q_e) จากสมการที่ (2.1)

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (2.1)$$

- เมื่อ q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- m คือ ปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม)
- V คือ ปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ (ลิตร)
- C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

หาร้อยละของการดูดซับโลหะจากสมการที่ (2.2)

$$\text{ร้อยละของการดูดซับ} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (2.2)$$

2.7.1 ไอโซเทอมการดูดซับ

ในกระบวนการดูดซับนั้นจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ณ สภาวะสมดุล และปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ติดบนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งจะใช้สมมติฐานของแบบจำลอง ไอโซเทอมเพื่อรูปร่างของปฏิกิริยาที่เกิดบนพื้นผิวตัวดูดซับ แบบจำลองไอโซเทอมที่นิยมใช้ได้แก่ แลงเมียร์ ฟรอนดลิช เทมกิน คูบินิน-ราตซ์เควิช เป็นต้น

2.7.1.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

แบบจำลองของแลงเมียร์นั้นมีสมมติฐาน คือ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปติดบนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งจะสามารถดูดซับบนผิวได้เพียงชั้นเดียว และพลังงานในการดูดซับในแต่ละบริเวณ มีค่าเท่ากัน [39] ซึ่งแบบจำลองของแลงเมียร์แสดงดังสมการที่ (2.3)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.3)$$

เมื่อหารด้วย C_e จะได้

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \left(\frac{1}{K_L q_m C_e} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_L คือ ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

กราฟเส้นตรงระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ จะมีค่าความชันเท่ากับ $1/K_L q_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/q_m$

2.7.1.2 ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

แบบจำลองของฟรอนด์ลิชใช้ในการอธิบายการดูดซับในระบบของของเหลว ซึ่งมีสมมุติฐานว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันและการดูดซับสามารถเกิดได้แบบหลายชั้น รวมทั้งการกระจายของความร้อนที่ใช้ในการดูดซับมีความไม่สม่ำเสมอโดยจะมีการกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) บนพื้นผิวตัวดูดซับ [40] แสดงดังสมการที่ (2.5)

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.5)$$

ใส่ \log ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

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

เมื่อ	q_e	คือ	ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	C_e	คือ	ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	K_F	คือ	ค่าคงที่ของการดูดซับฟรอนด์ลิช (มิลลิกรัมต่อกรัม)(ต่อมิลลิกรัม) ^{1/n}
	n	คือ	ค่าคงที่ที่อธิบายกระบวนการดูดซับ

กราฟเส้นตรงระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K_F$ [24]

2.7.1.3 ไอโซเทอมแบบเทมกิน (Temkin isotherm)

ไอโซเทอมของเทมกินมีปัจจัยที่คำนึงถึงปฏิกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับอย่างชัดเจน โดยมีสมมติฐานว่า ความร้อนของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแปรผกผันกับจำนวนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ และการดูดซับจะทำให้เกิดการกระจายตัวของพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ที่สม่ำเสมอ [39, 41] แสดงไว้ในสมการที่ (2.7)

$$q_e = B \ln K_T + B \ln C_e \quad (2.7)$$

เมื่อ	q_e	คือ	ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	C_e	คือ	ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	K_T	คือ	ค่าคงที่ของเทมกิน (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	B	คือ	ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานของการดูดซับ (จูลต่อโมล)

กราฟเส้นตรงระหว่าง q_e กับ $\ln C_e$ จะมีค่าความชันเท่ากับ B และจุดตัดแกน y เท่ากับ $B \ln K_T$

2.7.1.4 ไอโซเทอมแบบดูบินิน-ราดซ์เควิช (Dubinin-Radushkevich isotherm หรือ D-R isotherm)

ไอโซเทอมแบบดูบินิน-ราดซ์เควิช เป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายลักษณะพลังงานของการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับในรูปของแอดซอร์พชันโพเทนเชียล (Adsorption potential, \mathcal{E}) [41] รวมถึงอธิบายกลไกการดูดซับกับการกระจายพลังงานแบบเกาส์เซียน (Gaussian energy distribution) ภายใต้สมมติฐานพื้นผิวที่มีความไม่สม่ำเสมอ มักถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับ

แยกความแตกต่างระหว่างการดูดซับแบบกายภาพและเคมีของไอออนโลหะ [42] โดยถูกอธิบายด้วยสมการที่ (2.8-2.10)

$$\mathcal{E} = RT \ln \left[1 + \frac{1}{C_e} \right] \quad (2.8)$$

$$\ln q_e = \ln q_s - K_D \mathcal{E}^2 \quad (2.9)$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2K_D}} \quad (2.10)$$

โดย	q_e	คือ	ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_s	คือ	ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	C_e	คือ	ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	K_D	คือ	ค่าคงที่ของการดูดซับของคูบินิน (โมล ² ต่อกิโลจูล ²)
	\mathcal{E}	คือ	Adsorption potential
	T	คือ	อุณหภูมิ (เคลวิน)
	R	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส (จูลต่อโมลเคลวิน)
	E	คือ	พลังงานการดูดซับเฉลี่ย (กิโลจูลต่อโมล)

กราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln q_e$ กับ \mathcal{E}^2 จะมีค่าความชันเท่ากับ K_D และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\ln q_s$

2.7.2 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

สมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับที่นิยมใช้คือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo - first order kinetic model) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo - second order kinetic model) ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ [38] นอกจากนี้สมการของการแพร่ของตัวถูกดูดซับในรูพรุนของตัวดูดซับ (Intra-particle diffusion) มีส่วนที่สำคัญในกระบวนการดูดซับเช่นกัน

2.7.2.1 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo -first order kinetic model)

หากพิจารณาจากสมการพบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของการดูดซับของตัวถูกดูดซับต่อเวลาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างของความเข้มข้นของความอิ่มตัวและปริมาณของการดูดซับของแข็งตามเวลา [1] ซึ่งสามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.11)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.11) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และค่า $q_t = 0$ จนถึง $q_t = q_t$ จะได้สมการที่ (2.12)

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.12)$$

โดย k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ต่อนาที)

q_t คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t คือ เวลา (นาที)

เมื่อเขียนกราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ k_1 และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $\ln q_e$ ตามลำดับ

2.7.2.2 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo - second order kinetic model)

สมการอันดับสองเทียมเกี่ยวข้องกับการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับที่เกิดจากการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากสารละลาย เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีกายภาพ (Physicochemical) ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ [43] นอกจากนี้อัตราการดูดซับยังสัมพันธ์กับการมีอยู่ของแอกทีฟ ไซต์บนตัวดูดซับ [44] สามารถเขียนอัตราเร็วการดูดซับได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.13)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (2.13) ในขอบเขตที่เกิดการดูดซับ (Boundary conditions) ที่เวลา $t = 0$ ถึง $t = t$ และค่า $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ ซึ่งสามารถใช้อธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการดูดซับด้วยปฏิกิริยาเคมี (Chemisorption) โดยจัดรูปสมการที่ (2.13) ใหม่จะได้สมการที่ (2.14)

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (2.14)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.15)$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาท)

q_t คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t คือ เวลาใด ๆ (นาท)

เมื่อเขียนกราฟเส้นตรงระหว่าง t/q_t กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $1/q_e$ และได้จุดตัดแกน y

เท่ากับ $1/k_2 q_e^2$

2.7.2.3 สมการการแพร่ภายในรูพรุนตัวดูดซับ (Intra-particle diffusion)

สำหรับสมการการแพร่ภายในรูพรุนตัวดูดซับ เป็นสมการที่บ่งบอกถึงขั้นตอนกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาและสามารถใช้อธิบายกลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับ ซึ่งมีสมมติฐานว่าการดูดซับแบบแพร่กระจายในรูพรุนเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุดของกระบวนการดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เมื่อเปรียบเทียบกับ การแพร่กระจายบนชั้นฟิล์มและการแพร่กระจายที่พื้นผิวของอนุภาค [45] ซึ่งสมการการแพร่ภายในรูพรุนตัวดูดซับสามารถเขียนได้ดังแสดงในสมการ (2.16)

$$q_t = k_{id}t^{0.5} + C \quad (2.16)$$

เมื่อ	k_{id}	คือ	ค่าคงที่อัตราเร็วที่เกิดจากการแพร่กระจายของอนุภาคภายในโมเลกุล (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที่ ^{0.5})
	q_t	คือ	ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	C	คือ	ค่าคงที่ที่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ไปชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือการแพร่ที่มาจากภายนอก (External diffusion) ในขณะที่เกิดจลนพลศาสตร์การดูดซับ
	t	คือ	เวลาใด ๆ (นาที่)

เมื่อวาดกราฟระหว่างค่า q_t และ $t^{0.5}$ จะได้กราฟเส้นตรง มีความชัน k_{id} และจุดตัดแกน y เท่ากับ C

2.7.3 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ

อุณหพลศาสตร์ คือ การศึกษาที่เกี่ยวกับพลังงาน ความร้อน และงาน รวมถึงสมบัติของสสารซึ่งเป็นตัวกลางในการเปลี่ยนแปลงนั้น ๆ โดยจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG°) การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS°)

ΔG° เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของปฏิกิริยาของสาร หรือการที่สารตั้งต้นเปลี่ยนไปเป็นสารผลิตภัณฑ์

ถ้า ΔG° เป็น - คือ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางไปข้างหน้า

ΔG° เป็น + คือ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้ แต่จะเกิดขึ้นเองในทิศทางย้อนกลับ

ΔG° เป็น 0 คือ ระบบอยู่ในสมดุลไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

ΔH° เป็นการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดจากการที่ธาตุองค์ประกอบทำปฏิกิริยากันเพื่อเกิดเป็นสารประกอบหรือธาตุ

ถ้า ΔH° เป็น + คือ ระบบดูดความร้อน

ΔH° เป็น - คือ ระบบคายความร้อน

ΔS° คือ ปริมาณที่บอกถึงความผิดปกติหรือความไม่เป็นระเบียบของระบบ เมื่อเอนโทรปีมีค่าสูงระบบจะไม่เป็นระเบียบสูงขึ้น

ถ้า ΔS° เป็น + คือ ระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูง

ΔS° เป็น - คือ ระบบมีความไม่เป็นระเบียบต่ำ

ΔS° เป็น 0 คือ ระบบอยู่ในสมดุลไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

การหาค่า ΔG° , ΔH° และ ΔS° สามารถหาได้จากกราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$

โดยใช้สมการของ Van't Hoff [46] ดังแสดงไว้ในสมการดังนี้

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c \quad (2.17)$$

$$K_c = \frac{q_e}{C_e} \quad (2.18)$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta H^\circ}{RT} - \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (2.19)$$

เมื่อ ΔG°	คือ	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์มาตรฐาน (กิโลจูลต่อโมล)
ΔH°	คือ	การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมาตรฐาน (กิโลจูลต่อโมล)
ΔS°	คือ	การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน (จูลต่อโมลเคลวิน)
q_e	คือ	ปริมาณตัวถูกละลายต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
C_e	คือ	ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกละลายในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
K_c	คือ	ค่าคงที่สมดุล (ลิตรต่อกรัม)
R	คือ	ค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมลเคลวิน)
T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลาย (เคลวิน)

2.8. การคายซับ (Desorption)

การคายซับ หมายถึง การทำให้ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) หลุดออกจากผิวหรือรูพรุนของตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยใช้วิธีการฟื้นฟูตัวดูดซับทางความร้อน หรือ ทางเคมี [47] การคายซับสามารถพิจารณาจากอัตราส่วนของสารที่เป็นของแข็งกับของเหลว (Solid : Liquid) โดยที่สถานะของแข็งเป็นตัวดูดซับที่มีโลหะหนักเกาะอยู่ และสถานะของเหลวเป็นตัวชะ (Desorbing agent) สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้การฟื้นฟูด้วยสารเคมี ซึ่งตัวดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์จะใช้สารเคมีจำพวกกรดเป็นหลัก ได้แก่ กรดไนตริก เป็นต้น ซึ่งการคายซับช่วยให้เข้าใจถึงความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับชีวภาพโดยไม่ต้องมีการสูญเสียประสิทธิภาพของตัวดูดซับทางชีวภาพ นอกจากนี้การคายซับยังช่วยลดต้นทุนของกระบวนการดูดซับทางชีวภาพเนื่องสามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ [48]

สามารถคำนวณร้อยละการคายซับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.20-2.22)

$$\text{ร้อยละการคายซับ} = \frac{C_{ad} - C_{de}}{C_{ad}} \times 100 \quad (2.20)$$

$$C_{ad} = C_0 - C_e \quad (2.21)$$

$$C_{de} = C_{ad} - C_d \quad (2.22)$$

เมื่อ	C_0	คือ	ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_e	คือ	ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_d	คือ	ความเข้มข้นของโลหะหนักบนตัวดูดซับหลังจากการทดลองการคายซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_{ad} คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ติดกับตัวดูดซับก่อนการคายซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_{de} คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือบนตัวดูดซับหลังจากการทดลองการคายซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.9 วิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Response Surface Methodology base on Box-Behnken design)

การหาสภาวะที่ดีที่สุด (Optimal condition) ของการทดลองที่ประกอบไปด้วยหลายตัวแปร โดยปกติต้องทำการลองผิดลองถูกโดยปรับค่าตัวแปรทีละค่าจนกว่าจะได้สภาวะที่ดีที่สุด ซึ่งจะใช้เวลาค่อนข้างนาน ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายรวมถึงสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้อาจไม่เหมาะสมกับกระบวนการของแต่ละปฏิกิริยาในแต่ละตัวแปร จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบการทดลองเพื่อใช้ปรับค่าสภาวะของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลลัพธ์และค่าของการทดลองที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) [49]

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมวิธีทางคณิตศาสตร์และสถิติเพื่อใช้สร้างแบบจำลอง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์แบบเหตุและผลของการตอบสนองระหว่างค่าของตัวแปรตอบสนอง (y) และตัวแปรควบคุม (X) [50] โดยผลตอบสนองที่สนใจนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวแปรที่ศึกษา และเป้าหมายของวิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนอง [49]

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design) นิยมใช้กับตัวแปรที่มากกว่า 3 ตัวขึ้นไป และมีช่วงการทดลอง 3 ระดับ เพื่อศึกษาตัวแปรเชิงปริมาณ เช่น เวลา อุณหภูมิ ความเข้มข้น ลักษณะการออกแบบวิธีบ็อกซ์-เบห์นเคนจะใช้หลักการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล (Factorial) กับจุดกึ่งกลาง (Center Point) ซึ่งผลของการออกแบบจะมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนการทดลองที่

ต้องการซึ่งจะทำให้เป็นการรวมปัจจัยระดับ (Factor-level-combination) ในกรณีของตัวแปร จำนวน 4 ตัวแปร มีการทดลอง 3 กลุ่ม ซึ่งการทดลองแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วย 9 การทดลอง แปลว่าจะมีการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยหลักการจะกำหนดให้ตัวแปร 2 ตัว อยู่ในรูปทศออร์ทอกอนัล คือ +1 หรือ -1 ส่วนตัวแปรที่เหลือกำหนดให้เป็น 0 ประโยชน์ คือ สามารถนำไปศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear effect) ผลกระทบกำลังสอง (Quadratic effect) และผลกระทบอันตรกิริยา (Interaction) 2 ปัจจัยได้ ซึ่งจะกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาออก (output) ของสิ่งที่สนใจ (y) และกลุ่มของตัวแปรควบคุม (X_1, X_2, \dots, X_n) [49, 51] ความสัมพันธ์ของ y และ X แสดงดังสมการที่ (2.23)

$$y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + \epsilon \quad (2.23)$$

โดย X_1, X_2, \dots, X_n คือ ตัวแปรควบคุม

ϵ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแปรตอบสนอง y จากผลการทดลอง

y คือ ค่าของตัวแปรตอบสนอง

ถ้าแสดงการตอบสนองโดยกำหนดให้

$$E(y) = f(X_1, X_2, \dots, X_n) = n \quad (2.24)$$

แล้วได้สมการตอบสนองดังแสดงในสมการ (2.25)

$$n = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.25)$$

โดยที่ $n = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ คือ พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) ซึ่งจะปรากฏในรูปของกราฟิกที่เป็นเส้นโครงร่าง (Contour plot) หรือโครงสร้างแบบสามมิติ (Three dimensional plot) โดยการพล็อตระหว่าง ค่าตอบสนอง (y หรือ n) กับระดับของ X ซึ่งความสัมพันธ์ของผลตอบสนองกับตัวแปรอิสระนั้นต้องใช้ตัวประมาณที่เหมาะสมเพื่อใช้แสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริง

ระหว่าง y และกลุ่มของตัวแปรอิสระ (X) ซึ่งความสัมพันธ์จะเป็นแบบเชิงเส้น (Linear) ซึ่งจะออกมาเป็นแบบจำลองของสมการกำลังหนึ่งดังสมการที่ (2.26)

$$y = \beta_0 + \beta_i X_i \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2.26)$$

หากในระบบมีส่วนโค้งโดยทั่วไปจะใช้ฟังก์ชันของพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวตอบสนองกับสมการอันดับสองแสดงดังสมการที่ (2.27)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_i^k \sum_j^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2.27)$$

- เมื่อ β_0 คือ ค่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ของพจน์อินเตอร์เซปต์ (Intercept)
- β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของพจน์เชิงเส้น (Linear)
- β_{ii} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของพจน์กำลังสอง (Square)
- β_{ij} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของพจน์อันตรกิริยา (Interaction)
- X_i, X_j คือ สัญลักษณ์ของตัวแปรตัวแปรอิสระ
- k คือ จำนวนซ้ำ 1, 2, ..., n
- ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแปรตอบสนอง y จากผลการทดลอง

ตารางที่ 4 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ที่มี 4 ตัวแปร

ลำดับ	ระดับ			
	X_1	X_2	X_3	X_4
1	-1	-1	0	0
2	1	-1	0	0
3	-1	1	0	0
4	1	1	0	0
5	0	0	-1	-1
6	0	0	1	-1
7	0	0	-1	1
8	0	0	1	1
9	-1	0	0	-1
10	1	0	0	-1
11	-1	0	0	1
12	1	0	0	1
13	0	-1	-1	0
14	0	1	-1	0
15	0	-1	1	0
16	0	1	1	0
17	-1	0	-1	0
18	1	0	-1	0
19	-1	0	1	0
20	1	0	1	0
21	0	-1	0	-1
22	0	1	0	-1
23	0	-1	0	1
24	0	1	0	1
25	0	0	0	0
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0

ตารางที่ 4 แสดงค่าของแต่ละสภาวะที่โปรแกรมพื้นผิวตอบสนองแสดงออกมาเพื่อใช้ในการทำการทดลอง โดยที่ค่า 3 ระดับแทนด้วย -1, 0 และ 1 เช่น กำหนดให้ -1 คือ 10 เลข 0 คือ 55 แล้ว 1 คือ 100 เป็นต้น

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Abbaszadeh และคณะ [52] ศึกษาการดูดซับตะกั่วโดยใช้เปลือกมะละกอ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารตะกั่ว โดยศึกษาตัวแปรดังนี้ ความเข้มข้นของสารตะกั่ว ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย เวลาสัมผัส และ ปริมาณตัวดูดซับ ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับตะกั่วคือ ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายตะกั่วเท่ากับ 3 เวลาสัมผัส 90 นาที ขนาดของตัวดูดซับ 355 ไมโครเมตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.05 กรัมต่อ 20 มิลลิลิตร ที่ความเร็วรอบการกวนของสารละลาย 150 รอบต่อนาที ได้ผลการดูดซับเท่ากับร้อยละ 85.43 และทำการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของพื้นผิว ปริมาตรของรูพรุน หมู่ฟังก์ชัน ด้วยเทคนิค SEM/EDX BET และ FTIR ตามลำดับ การศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมพบว่า การดูดซับของระบบสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์ลำดับที่สองเทียม และไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มากที่สุด

Abbaszadeh และคณะ [1] ศึกษาการดูดซับตะกั่วโดยใช้เปลือกมะละกอ มีการดัดแปลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นผิวโดยใช้กรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ และหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารตะกั่ว โดยศึกษาตัวแปรดังนี้ ความเข้มข้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง เวลาสัมผัสและ ปริมาณตัวดูดซับ ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับตะกั่วคือ ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 เวลาสัมผัส 120 นาที ขนาดของตัวดูดซับ 355 ไมโครเมตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัมต่อ 20 มิลลิลิตร ที่ความเร็วรอบ 150 รอบ

ต่อมาที่ ได้ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 93.20 และทำการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของพื้นผิว ปริมาตรของรูพรุน หมู่ฟังก์ชัน ด้วยเทคนิค SEM/EDX BET และ FTIR ตามลำดับ ในการศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมพบว่า การดูดซับของระบบสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์ลำดับที่สองเทียม และไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มากที่สุด

Shooto และคณะ [12] ศึกษาการดูดซับโลหะหนักในสารละลาย เช่น ตะกั่ว และทองแดง เป็นต้น โดยใช้ตัวดูดซับคือ เมล็ดมะละกอ ทำการเตรียมโดยการตากแดด และอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาดังนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก ปริมาณตัวดูดซับ เวลาสัมผัส และ อุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับตะกั่วคือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัมต่อ 20 มิลลิลิตร เวลาสัมผัส 60 นาที และ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และได้ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 9.044 มิลลิกรัมต่อกรัม และทำการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของพื้นผิว หมู่ฟังก์ชัน เสถียรภาพทางความร้อน ด้วยเทคนิค SEM FTIR และ Thermogravimetric analyzer (TGA) ตามลำดับ ในการศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมพบว่า การดูดซับของระบบสอดคล้องกับสมการลำดับที่หนึ่งเทียม และไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ รวมถึงทำการศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่า กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นได้เองและเป็นระบบแบบดูดความร้อน

Morita และคณะ [17] ศึกษาชุดของอนุพันธ์เซลลูโลสที่ถูกสังเคราะห์ด้วยกลุ่มไดอัลคิล ไดไทโอคาร์บาเมต (Dialkyl dithiocarbamate, DTC) โดยเปรียบเทียบความสามารถของสาร DTC ที่ได้จาก 2 แหล่ง ได้แก่ เซลลูโลส และ L-proline (กรดอะมิโนชนิดหนึ่ง) เพื่อดูความสามารถในการดูดซับของสารหนู (As^{3+}) และศึกษาความเสถียรในการจัดเก็บในสถานะของแข็ง ผลการทดลองพบว่า

เซลล์โลสที่ถูกปรับปรุงผิวด้วย DTC ที่ได้จาก L-proline มีความสามารถในการดูดซับสารหนูออกจากสารละลายได้สูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า DTC มีความคงตัวในอากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

Weng และ Zhiqiang [18] ศึกษาตัวดูดซับคือ แกรฟีนออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์ด้วยแม่เหล็ก (Magnetic reduced graphene oxide) ที่ถูกสังเคราะห์ด้วยกลุ่มไดอัลคิล ไทโทโอคาร์บาเมต (rGO-PDTC/Fe₃O₄) เพื่อใช้ในการดูดซับโลหะหนักต่าง ๆ ในสารละลายสังเคราะห์ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ เช่น XPS FTIR TEM และ XRD พบว่าสาร DTC นั้นมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารโลหะหนักที่ศึกษาได้ นำสู่ความสามารถในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ การศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่าเหมาะสมกับสมการอันดับสองเทียม การศึกษาไอโซเทอมพบว่าเหมาะสมกับสมการของแลงเมียร์ การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับ พบว่าสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 5 ครั้ง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้วัสดุจากธรรมชาติ ได้แก่ มะละกอ ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพในการใช้ดูดซับสารโลหะหนัก ซึ่งความสามารถในการดูดซับขึ้นกับลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับและสถานะที่ใช้ในการดูดซับด้วย นอกจากนี้สาร DTC เป็นสารที่น่าสนใจเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของตัวดูดซับ เนื่องจากในงานวิจัยได้รายงานว่าสาร DTC สามารถจับกับสารโลหะหนักได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้เปลือกมะละกอที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารกลุ่ม DTC คือสาร PDTC

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล	ยี่ห้อ
1. สารละลายเลด (II) ไนเตรต	$Pb(NO_3)_2$	331.200	PanReac Applichem
2. แอมโมเนียม ไพรอลิดีนไดไทโอคาร์บาเมต	$C_5H_{12}N_2S_2$	164.290	Tokyo Chemical Industry
3. กรดไนตริก	HNO_3	63.013	Merck
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์	$NaOH$	39.997	Ajax Finechem

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทำการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.1 อุปกรณ์

- เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง
- เครื่องปั่นน้ำผลไม้สำหรับบดเปลือกมะละกอ
- ปีกเกอร์ขนาด 100, 250, 500 มิลลิลิตร
- ปีเปตขนาด 1, 5, 10, 20 มิลลิลิตร
- ขวดปรับปริมาตร 100, 250, 500 มิลลิลิตร

- กระบอกตวง 50 มิลลิลิตร
- ซ้อนตักสาร
- แท่งแก้วคนสาร
- เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Stirrer)
- เตาอบ
- ตู้อุณหภูมิ
- เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
- กระดาษกรอง ยี่ห้อ Whatman เบอร์ 42
- กรวยกรอง
- เทอร์โมมิเตอร์

3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์และวัดผลการทดลอง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-JEOL, JSM-IT300)

ร่วมกับสเปกตรัมเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (EDX-Oxford, X-MaxN20) ดังแสดงในรูปที่ 4 ได้ถูกใช้เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวดูดซับชีวภาพที่เตรียมไว้ก่อนและหลังการดูดซับตะกั่ว ก่อนการสแกนตัวอย่างทั้งหมดถูกทำให้แห้งและเคลือบด้วยทองคำเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอน และภาพไมโครกราฟถูกถ่ายด้วยกำลังขยาย 150 เท่า



รูปที่ 4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และสเปกตรัมเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน [53]

3.2.2.2 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET- Micromeritics, 3Flex) ดังแสดงในรูปที่ 5 ถูกใช้เพื่อวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของทั้ง PP และ PP-PDTC กำหนดความดันสัมพัทธ์ (p/p_0) เท่ากับ 0.004-0.99 บาร์ และ 0.99-0.10 บาร์ สำหรับการดูดซับและการคายซับตามลำดับ อุณหภูมิของเหลวไนโตรเจน ที่ 77.376 เคลวิน ซึ่งอุณหภูมิการแยกก๊าซถูกใช้ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,440 นาที



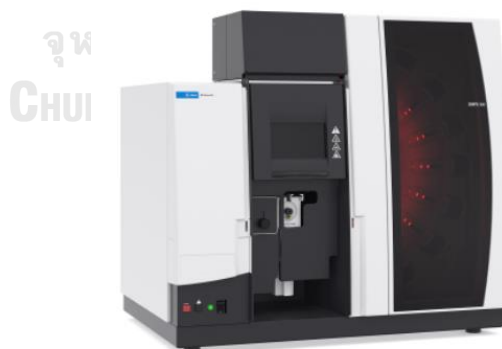
รูปที่ 5 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน [54]

3.2.2.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR- Bruker, INVENIO-S) ดังแสดงในรูปที่ 6 ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ PP และ PP-PDTC ก่อนและหลังการดูดซับตะกั่ว ตัวอย่างถูกวิเคราะห์โดยวิธี ATR diamond ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-4000 cm^{-1}



รูปที่ 6 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ [55]

3.2.2.4 เครื่องอะตอมมิกแอปซอบชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS-AGILENT 280FS AA) ดังแสดงในรูปที่ 7 ถูกใช้เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายตัวอย่างก่อนและหลังการทดลองการดูดซับ



รูปที่ 7 เครื่องอะตอมมิกแอปซอบชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ [56]

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1. เตรียมตัวดูดซับ

3.3.1.1. ผงเปลือกมะละกอ (Papaya peel, PP)

เปลือกมะละกอดิบ (เปลือกสีเขียว) นำมาจากร้านส้มตำ โรงอาหารคณะเศรษฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แล้วนำมาล้างในน้ำกลั่น 2 รอบ หั่นเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 1 ซม. x 1 ซม. นำไปซังน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักเปียกไว้ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนกว่า น้ำหนักจะคงที่ จากนั้นนำเปลือกอบแห้งนั้นมาบดด้วยเครื่องบดน้ำผลไม้จนละเอียดเป็นผงเล็ก ๆ จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 40 เมช (425 มิลลิเมตร) (เนื่องจากขนาดเฉลี่ยของผงเปลือกมะละกอที่ได้จากเครื่องบดนำไปวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเบื้องต้นพบว่าได้เท่ากับ 416 nm (จากเทคนิคการวัดการกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution, PSD)) และทำการทดลองเบื้องต้นพบว่าขนาดไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับจึงเลือกขนาดที่ใกล้เคียงกับผลของเครื่อง PSD) เปลือกมะละกอแต่ละรอบที่อบแห้งและบดตามขนาดเรียบร้อยแล้วนำมารวบรวมใส่ในขวดแก้ว ในโหลดูดความชื้น รวบรวมจนปริมาณมากพอสำหรับการทดลองทั้งหมดแล้วคลุกเคล้ารวมเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 8 เปลือกมะละกอที่ได้นำไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว หมู่ฟังก์ชัน ปริมาตรรูพรุนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) และเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET) ตามลำดับ

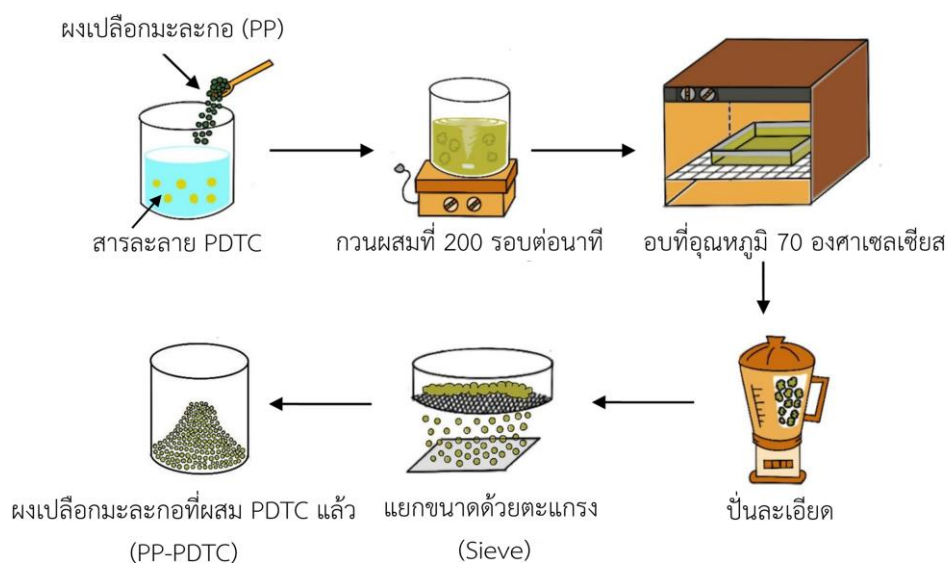


รูปที่ 8 ขั้นตอนของการเตรียมตัวดูดซับผงเปลือกมะละกอ (PP)

3.3.1.2. ผงเปลือกมะละกอผสมกับสารละลายไอออนิก (Papaya peel modified by PDTC, PP-PDTC)

PDTC ถูกใช้ในการปรับเปลี่ยนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกมะละกอ ตามที่เตรียมไว้ในหัวข้อ 3.3.1.1 การศึกษาเพื่อหาปริมาณของ PDTC เบื้องต้น ได้ศึกษาร้อยละโดยน้ำหนักของ PDTC จากร้อยละ 1-100 โดยน้ำหนัก การทดลองใช้สภาวะที่เหมาะสมจากวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบล็อก-เบทเทินเคน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ปริมาณ PDTC เท่ากับร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งเท่ากับ 16.25 กรัม ผลการทดลองเบื้องต้นพบว่า เมื่อปริมาณของ PDTC เพิ่มขึ้น พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับน้อยลง ดังนั้น PDTC 16.25 กรัม จึงถูกนำมาใช้ ซึ่งขั้นตอนการปรับเปลี่ยนพื้นผิวสามารถอธิบายได้ดังนี้ ประการแรก PP ปริมาณ 65 กรัม (เปลือกมะละกอที่ได้จากข้อ 3.3.1.1) และ PDTC ปริมาณ 16.25 กรัม ถูกผสมเข้าด้วยกันในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องกวนแบบแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำส่วนผสมไปตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ PDTC แซ่อยู่บนพื้นผิวของ PP เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้น นำไปกรองเอาเฉพาะกากและทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เมื่อตัวดูดซับ PP-PDTC แห้ง นำมาบดละเอียดด้วยเครื่องปั่นอีกครั้งเนื่องจากหลังจากอบจนแห้งแล้วผงเปลือกเกาะกันเป็นก้อน จากนั้นแยกขนาดด้วยตะแกรงขนาด 40 เมช (425 มิลลิเมตร) เช่นเดียวกับตัวดูดซับ PP เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับทดลอง

การดูดซับ แล้วนำไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว หมู่ฟังก์ชัน ปริมาตรรูพรุนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) และเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET) ตามลำดับ



รูปที่ 9 ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับ PP ที่ถูกดัดแปลงด้วยสาร PDTC (PP-PDTC)

3.3.2 การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับตะกั่วออกจากสารละลายโดยใช้ผงเปลือกมะละกอ (PP) โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

3.3.2.1 การศึกษาเพื่อเลือกช่วงของแต่ละตัวแปรเข้าโปรแกรม

- ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว

ช่วงของความเข้มข้นพิจารณาจากงานวิจัยก่อนหน้า จากผลงานวิจัยของ Boudrahem และคณะ [57] ได้ศึกษาช่วงของความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นในช่วงระหว่าง 10-90 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของตะกั่วที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนงานของ Abbaszadeh และคณะ [52] ได้ศึกษาช่วงของความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นในช่วงระหว่าง 10-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าการใช้ปริมาณตะกั่วเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้น ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10-100 จึงถูกเลือกมาทดลองในงานวิจัยนี้

- ความเป็นกรด-ด่าง

การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าที่สภาวะที่ถูกใช้ทดลองอยู่ในช่วงความเป็นกรด-ด่างที่ 2 ถึง 10 [1, 58-60] และจากการทดลองของ Darvanjooghi และคณะ 2018 [60] ยังเผยให้เห็นถึงปัญหาการตกตะกอนหากใช้สภาวะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเกิน 6 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยใช้สภาวะที่ ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของตัวดูดซับ 0.5 กรัมต่อ 50 มิลลิตร เวลาในการปั่นกวน 3 ชั่วโมง พบว่าความเป็นกรด-ด่างช่วง 4 ถึง 6 คือค่าที่เหมาะสมที่สุด (ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก) ดังนั้นจึงถูกเลือกนำมาทดลองในงานวิจัยนี้

- ปริมาณของตัวดูดซับ

ช่วงของปริมาณตัวดูดซับที่เลือกมา พิจารณาจากการผลการทดลองโดยใช้สภาวะที่ ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง ความเร็วรอบในการปั่นกวน 200 รอบต่อ นาที ผลการทดลองโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ 0.1 ถึง 2 กรัมต่อ 50 มิลลิตร พบว่า ยิ่งเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับเป็นผลทำให้ค่าร้อยละของการดูดซับยิ่งเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม ทำให้การปั่นกวนไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากปริมาณสารละลายที่มีปริมาณน้อยกับปริมาณของตัวดูดซับที่มากเกินไปทำให้แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar) ที่ใช้ในการปั่นกวนหยุดหมุน ดังนั้น ปริมาณตัวดูดซับที่เลือกใช้จึงอยู่ในช่วง 0.1-1 กรัมต่อ 50 มิลลิตร

- เวลาสัมผัส

จากงานวิจัยที่ผ่านมา เวลาสัมผัสของการดูดซับโลหะหนักโดยใช้ตัวดูดซับที่ได้จากวัสดุจากธรรมชาติมักจะใช้อยู่ในช่วง 1-3 ชั่วโมง [1, 52, 61] ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ ดังนั้น จึงเลือกช่วงเวลาที่ 1 ถึง 3 ชั่วโมง สำหรับงานวิจัยนี้

3.3.2.2 การใช้ตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับภายใต้วิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

วิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน จากโปรแกรม Minitab 17 ถูกนำไปใช้เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการดูดซับตะกั่วโดยใช้ผงเปลือกมะละกอ (PP) เป็นตัวดูดซับ ในที่นี้มีการศึกษาตัวแปรจำนวน 4 ตัวแปร ได้แก่

- ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น (X_1) ที่ 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (X_2) ที่ 4-6
- ปริมาณตัวดูดซับ (X_3) ที่ 0.1-1 กรัม ต่อ 50 มิลลิลิตร
- เวลาสัมผัส (X_4) ที่ 1-3 ชั่วโมง

โดยค่าของช่วงตัวแปรมีการตรวจสอบสามระดับคือ -1, 0 และ +1 แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ขอบเขตและช่วงของตัวแปรจากการทดลอง

ตัวแปรที่ศึกษา	สัญลักษณ์	ระดับ		
		-1	0	1
ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	X_1	10	55	100
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	X_2	4	5	6
ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม ต่อ 50 มิลลิลิตร)	X_3	0.1	0.55	1
เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	X_4	1	2	3

3.3.2.3 การทดลองดูดซับ

เมื่อนำตัวแปรไปป้อนเข้าโปรแกรมแล้วจะได้รูปแบบการทดลองของ 4 ตัวแปร จำนวน 27

การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าของตัวแปรและสถานะที่ใช้ในการทดลองจากการออกแบบของวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน

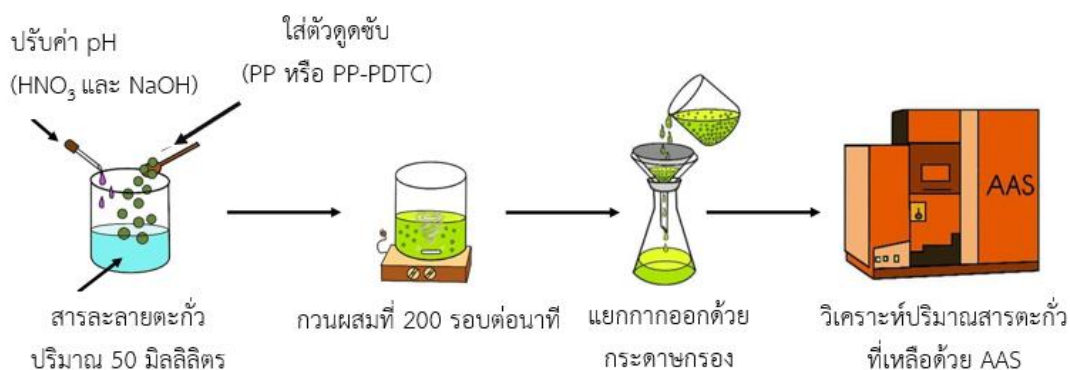
ลำดับ	ระดับ				สถานะในการทดลอง			
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1	X_2	X_3	X_4
1	-1	-1	0	0	10	4	0.55	2
2	1	-1	0	0	100	4	0.55	2
3	-1	1	0	0	10	6	0.55	2
4	1	1	0	0	100	6	0.55	2
5	0	0	-1	-1	55	5	0.1	1
6	0	0	1	-1	55	5	1	1
7	0	0	-1	1	55	5	0.1	3
8	0	0	1	1	55	5	1	3
9	-1	0	0	-1	10	5	0.55	1
10	1	0	0	-1	100	5	0.55	1
11	-1	0	0	1	10	5	0.55	3
12	1	0	0	1	100	5	0.55	3
13	0	-1	-1	0	55	4	0.1	2
14	0	1	-1	0	55	6	0.1	2
15	0	-1	1	0	55	4	1	2
16	0	1	1	0	55	6	1	2
17	-1	0	-1	0	10	5	0.1	2
18	1	0	-1	0	100	5	0.1	2
19	-1	0	1	0	10	5	1	2
20	1	0	1	0	100	5	1	2
21	0	-1	0	-1	55	4	0.55	1
22	0	1	0	-1	55	6	0.55	1
23	0	-1	0	1	55	4	0.55	3
24	0	1	0	1	55	6	0.55	3
25	0	0	0	0	55	5	0.55	2
26	0	0	0	0	55	5	0.55	2
27	0	0	0	0	55	5	0.55	2

จากการออกแบบการทดลองตามตารางที่ 7 จะยกตัวอย่างลำดับที่ 1 เมื่อค่า X_1 เท่ากับ -1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า X_2 เท่ากับ -1 คือค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่าเท่ากับ 4 ค่า X_3 เท่ากับ 0 คือ ปริมาณตัวดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.55 กรัม ค่า X_4 เท่ากับ 0 คือ เวลาสัมผัสมีค่าเท่ากับ 2 ชั่วโมง

การทดลองจะได้ใช้สภาวะของตัวแปรทั้ง 27 การทดลอง โดยใช้ตัวดูดซับเป็นผงเปลือกมะละกอ(PP) ซึ่งจะใช้สารละลายตะกั่วปริมาณ 50 มิลลิลิตร ความเร็วรอบในการปั่นผสมที่ 200 รอบต่อนาที ทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิห้องที่ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงกรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรอง Whatman ที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.5 ไมโครเมตร ปริมาณของตะกั่วในสารละลายถูกวัดโดยเครื่องอะตอมมิกแอปซอบชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) แล้วนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ในโปรแกรมพื้นผิวตอบสนอง จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ออกมาทำให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมที่ในการทดลอง รวมไปถึงตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อการดูดซับ

3.3.3 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเปลือกมะละกอกับเปลือกมะละกอที่ผสมกับสารละลายไอออนิก

เมื่อได้สภาวะที่ดีที่สุดของการดูดซับโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนโดยใช้ตัวดูดซับเป็น PP แล้ว จากนั้นนำสภาวะนั้นมาทดลองการดูดซับต่อโดยเปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับเป็น PP-PDTC ซึ่งรูปที่ 10 แสดงขั้นตอนในการทดลองการดูดซับตะกั่วที่สภาวะเหมาะสมจากโปรแกรมของตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC



รูปที่ 10 ขั้นตอนการดูดซับตะกั่ว

3.3.4 การศึกษาไอโซเทอม

การศึกษาไอโซเทอมดำเนินการโดยการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วในน้ำเสีย สักระยะที่ 10, 30, 50, 70, 90 และ 110 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนตัวแปรอื่น (ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณตัวดูดซับ และ เวลาในการสัมผัส) ได้ศึกษาภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้รับจาก RSM โดยการเติมตัวดูดซับ (PP หรือ PP-PDTC) ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายตะกั่ว ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ส่วนผสมถูกกวนผสมที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้องที่ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงกรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรอง Whatman ที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.5 ไมโครเมตร จากนั้นวัดปริมาณตะกั่วในสารละลายก่อนและหลังการดูดซับโดยใช้เครื่อง AAS

3.3.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์

การศึกษาจลนพลศาสตร์ดำเนินการโดยการทดลองที่เวลาตั้งแต่ 3 ถึง 240 นาที เนื่องจาก ต้องการศึกษช่วงของเวลานอกเหนือจากที่โปรแกรมทำนาย ทั้งยังครอบคลุมช่วงที่สนใจคือ 60-180 นาที ส่วนตัวแปรอื่น (ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว ค่าความเป็นกรด-ด่างและ ปริมาณตัวดูดซับ) ได้

จากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้รับจาก RSM โดยการเติมตัวดูดซับ (PP หรือ PP-PDTC) ลงในปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายตะกั่วปริมาณ 50 มิลลิลิตร ส่วนผสมถูกกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้องที่ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงกรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรอง Whatman ที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.5 ไมโครเมตร แล้ววัดปริมาณตะกั่วในสารละลายก่อนและหลังการดูดซับโดยใช้เครื่อง AAS

3.3.6 การศึกษาอุณหพลศาสตร์

การศึกษาอุณหพลศาสตร์ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30, 50, 70 องศาเซลเซียส โดยศึกษาภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้รับจาก RSM โดยการเติมตัวดูดซับ (PP หรือ PP-PDTC) ลงในปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายตะกั่วปริมาณ 50 มิลลิลิตร ส่วนผสมถูกกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที จากนั้นจึงกรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรอง Whatman ที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.5 ไมโครเมตร แล้ววัดปริมาณตะกั่วในสารละลายก่อนและหลังการดูดซับโดยใช้เครื่อง AAS

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.7. ศึกษาการคายซับ

การศึกษาระบวนการคายซับสำหรับ PP และ PP-PDTC ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไนตริกที่ 0.1, 0.5, 1, 3 และ 5 โมลาร์ [48] (เนื่องจากความเข้มข้นของกรดมีผลต่อปริมาณการคายซับ) หลังจากกระบวนการดูดซับ ตัวอย่างถูกกรองเอาสารละลายออกเหลือแค่กาก (ของแข็ง) นำกากนั้นมาทำการผสมกับกรดไนตริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นห้าครั้ง หลังจากนั้นตัวอย่างถูกทำให้แห้งที่ 70 องศาเซลเซียส ในเตาอบ นำสารออกมาชั่งและบันทึกผล จนผลของน้ำหนักคงที่

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ

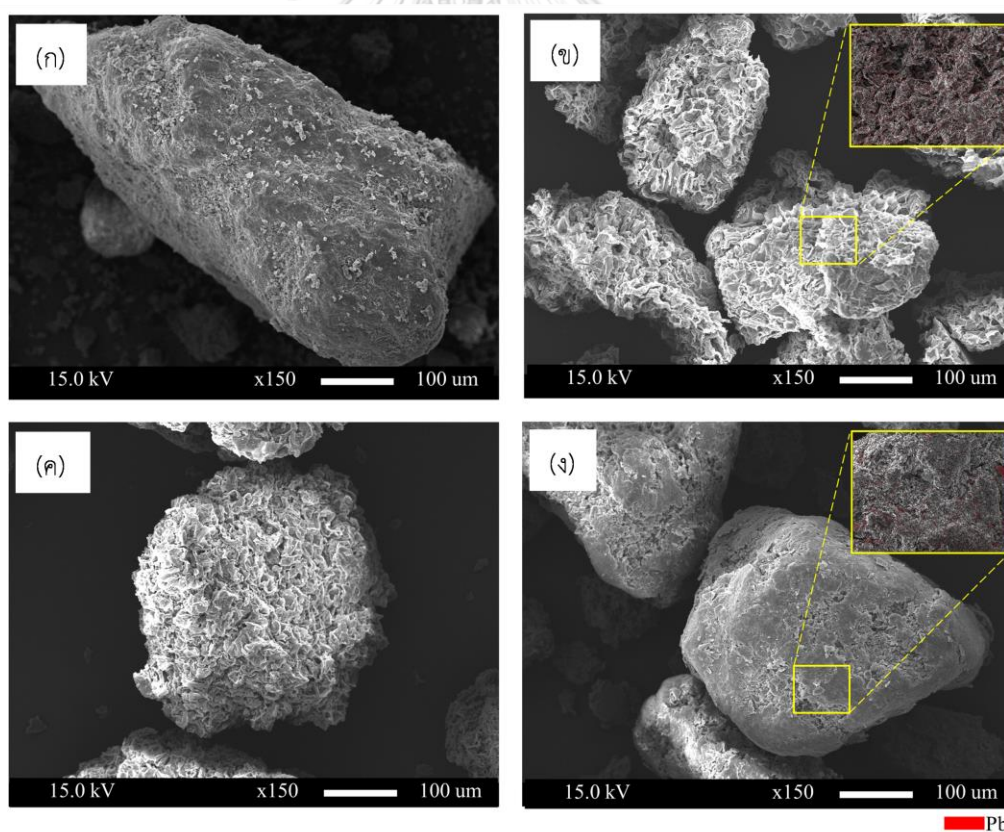
4.1.1 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ (SEM) และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (EDX)

จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยเครื่อง SEM ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่า PP ก่อนดูดซับตะกั่ว (รูปที่ 11(ก)) มีลักษณะพื้นผิวเป็นแผ่นขนาดใหญ่ซึ่งมีความหนาและพื้นผิวเรียบ เมื่อนำไปดูดซับด้วยตะกั่วดังแสดงในรูปที่ 11(ข) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญกล่าวคือ พื้นผิวขรุขระมากขึ้นเนื่องมาจากการก่อตัวของสารตะกั่วที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องบนพื้นผิวหลังจากการดูดซับไอออนของตะกั่ว ซึ่งงานวิจัยของ El-Damarawy และคณะ [62] ได้รายงานถึงลักษณะของพื้นผิวที่เปลี่ยนไปหลังจากดูดซับด้วยสารตะกั่วเช่นเดียวกัน นอกจากนี้การใช้เทคนิค EDX ในรูปแทรกที่ 11(ข) พบจุดสีแดงซึ่งคือสีที่แสดงการเกิดขึ้นของสารตะกั่ว ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า มีการกระจายตัวของตะกั่วบนพื้นผิวของ PP หลังเกิดการดูดซับจริง

ในกรณีของ PP-PDTC แสดงในรูป 11(ค) และ 11(ง) คือ รูป SEM ของ PP-PDTC ก่อนและหลังการดูดซับด้วยตะกั่วตามลำดับ ซึ่งรูปที่ 11(ค) แสดงให้เห็นโครงสร้างที่ขรุขระที่มีรูกลีบบนพื้นผิวชัดเจน แต่หลังจากการดูดซับตามรูปที่ 11(ง) จะสังเกตเห็นโครงสร้างของพื้นผิวที่เรียบและตื้นขึ้น เนื่องจากมีการดูดซับตะกั่วเกิดขึ้น ซึ่งรูปแทรกจากเทคนิค EDX ที่แสดงในรูปที่ 11(ง) สามารถยืนยันว่าตะกั่วถูกดูดซับบนพื้นผิว PP-PDTC จริง

ตารางที่ 8 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่ได้รับจากการวิเคราะห์ EDX ของตัวอย่าง PP และ PP-PDTC ได้แก่ C, O, K, Ca, Cl และ Na ซึ่งธาตุเหล่านี้มักพบในเซลล์พืช [63, 64] ซึ่งการ

หายไปของ Cl หลังจากการดูดซับ เนื่องมาจากขีดจำกัดของการตรวจจับของเครื่องวิเคราะห์ต่อธาตุ Cl ค่อนข้างต่ำ [65] นอกจากนี้ ปริมาณของธาตุ Na และ Ca ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยอาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของเครื่อง EDX และสิ่งเจือปนในน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย รวมถึงสิ่งเจือปนในการใช้รับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายและสิ่งสกปรกใด ๆ บนพื้นผิวของเครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ [60] นอกจากนี้ได้ตรวจพบมวลของตะกั่วบนพื้นผิวของ PP และ PP-PDTC เท่ากับร้อยละ 1.56 และ 6.34 ตามลำดับ แปลว่า PP-PDTC สามารถดูดซับสารตะกั่วได้มากกว่า PP นอกจากนี้การวิเคราะห์ EDX ยังยืนยันว่าพื้นผิวของ PP มี PDTC เกาะอยู่จริง เนื่องจากมีปริมาณของธาตุกำมะถัน (S) ปรากฏถึงร้อยละ 15.32 ในขณะที่พื้นผิว PP ไม่พบค่าของกำมะถัน



รูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับของ (ก) PP (ข) PP-Pb (ค) PP-PDTC และ (ง) PP-PDTC-Pb

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ EDX ของตัวดูดซับชีวภาพจากมะละกอ

ธาตุ	ร้อยละมวลของตัวดูดซับ			
	PP		PP-PDTC	
	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ
C	51.50±0.02	43.67±0.05	53.73±0.08	38.89±0.05
O	43.69±0.03	49.49±0.11	28.71±0.09	46.90±0.11
K	3.54±0.08	1.04±0.03	1.93±0.03	1.40±0.03
Ca	-	0.80±0.02	-	0.83±0.03
Cl	1.27±0.04	-	-	-
Na	-	3.44±0.03	-	5.07±0.04
S	-	-	15.32±0.05	-
Pb	-	1.56±0.08	-	6.34±0.14

4.1.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ (FTIR)

ในกรณีของ PP แสดงในรูปที่ 12(ก) ก่อนการดูดซับพบว่า เกิดพีคที่ 3,293 cm^{-1} ปะการกการสั่นแบบยืด (Stretching) ของหมู่ O-H ซึ่งบ่งชี้ว่ามีปริมาณแอลกอฮอล์และฟีนอลในปริมาณสูง [66] ที่พีค 2,918 และ 2,850 cm^{-1} พบการสั่นแบบยืดของหมู่ฟังก์ชัน C-H แสดงให้เห็นว่ามีสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ [67] ที่พีค 1,729 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของหมู่ C=O [68] พีคที่ 1,238 cm^{-1} เป็นลักษณะเฉพาะของการสั่นแบบยืดของหมู่ C=O ของเอไมด์ตติยภูมิ (Tertiary amide) แสดงว่า PP มีโปรตีนเป็นส่วนประกอบ [67] ส่วนพีคที่ 1,197 cm^{-1} พบการสั่นแบบยืดของหมู่ฟังก์ชัน C-O ที่

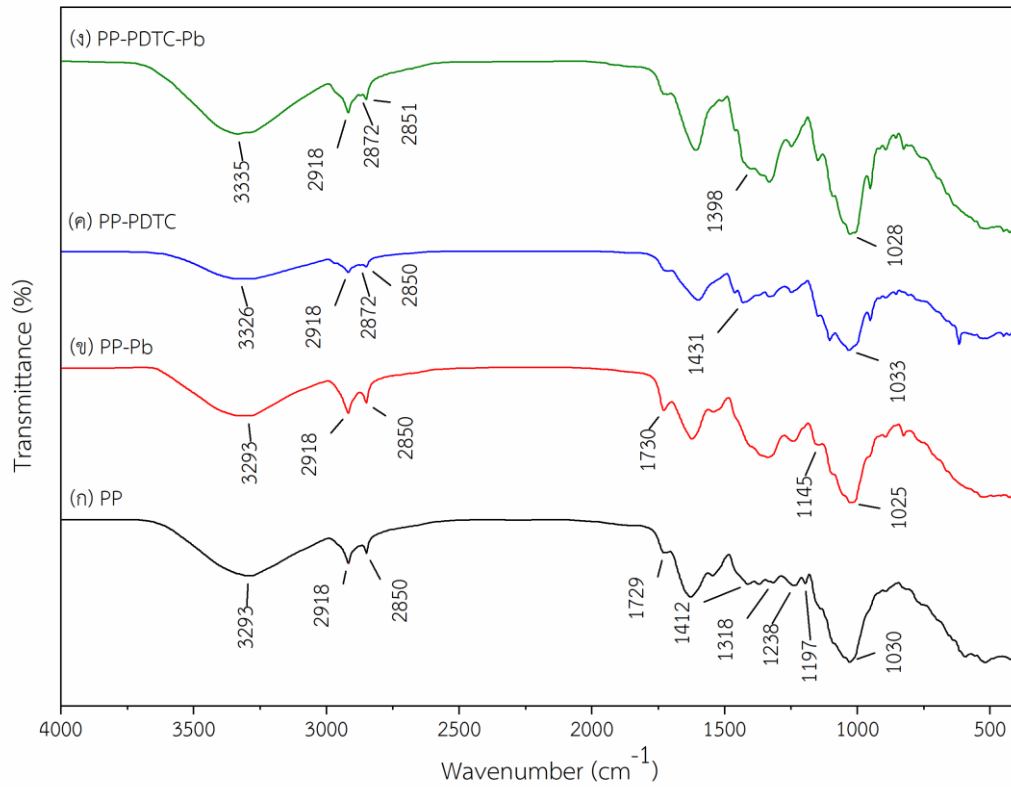
ได้จากพอลิแซคคาไรด์ [69, 70] ที่พีค 1,318 และ 1,030 cm^{-1} พบการสั่นแบบยืดของหมู่ C-N และ C-O ของแอลกอฮอล์และลิกนิน (Lignin) [6, 67, 71] ช่วงคลื่นที่ 950-1,200 cm^{-1} เป็นบริเวณ "ลายนิ้วมือ" ของคาร์โบไฮเดรต เนื่องจากสามารถระบุกลุ่มสารเคมีหลักได้ [66]

หลังจากการดูดซับตะกั่วของ PP แสดงในรูปที่ 12(ข) จะเห็นได้ว่าพีคในสเปกตรัมของ PP-Pb มีการเปลี่ยนแปลงพีคจาก 1,030 เป็น 1,025 cm^{-1} ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากกลุ่มไฮดรอกซิลของแอลกอฮอล์ [71, 72] และพีคที่เปลี่ยนจาก 1,197 เป็น 1,145 เกิดจากหมู่ C-O ของสารพอลิแซคคาไรด์ [69, 70] การเปลี่ยนแปลงของพีคเหล่านี้สามารถบ่งบอกได้ว่าหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีส่วนทำให้เกิดการจับกับโลหะในระหว่างกระบวนการดูดซับทางชีวภาพ [1, 52, 71] นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีคแสดงให้เห็นการทำงานร่วมกันระหว่างกลุ่มฟังก์ชันพื้นผิวของตัวดูดซับและไอออนของโลหะในสารละลาย [52, 71] ดังนั้นผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR จากการเปลี่ยนแปลงของพีคของหมู่ฟังก์ชัน O-H และ C-O หลังทำการดูดซับด้วยสารตะกั่ว เป็นหลักฐานที่สามารถยืนยันว่าตะกั่วถูกดูดซับบนพื้นผิวของ PP จริง

ในรูปที่ 12(ค) สเปกตรัม FTIR ของ PP-PDTC พบหมู่ฟังก์ชันของไดไทโอคาร์บาเมต หรือ PDTC ปรากฏที่ประมาณ 1,000 -1,500 cm^{-1} [73] จากผลการศึกษาพบว่า พีคของ C-N ปรากฏที่ 1,431 cm^{-1} พีคที่ 1,033 cm^{-1} สอดคล้องกับหมู่ C=S ดังนั้นสเปกตรัมจึงพิสูจน์ว่า PDTC ถูกต่อกิ่งลงบนพื้นผิว PP ได้สำเร็จ [18, 74]

ในรูปที่ 12(ง) แสดงสเปกตรัม PP-PDTC หลังจากการดูดซับ สังเกตว่าเมื่อตำแหน่งของพีคที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชัน N-CS₂ เคลื่อนลงจาก 1,431 cm^{-1} เป็น 1,398 cm^{-1} และพีคของหมู่ C=S จะเคลื่อนไปที่ตำแหน่งที่ต่ำลงเท่ากับ 1,028 cm^{-1} ซึ่งยืนยันว่าไดไทโอคาร์บาเมตและตะกั่วรวมตัวกันแล้ว

เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน [18, 75] ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่า PP-PDTC ทำปฏิกิริยากับตะกั่วไอออนโดยสร้างสารเชิงซ้อนที่เป็นคีเลต (Chelate) จริง

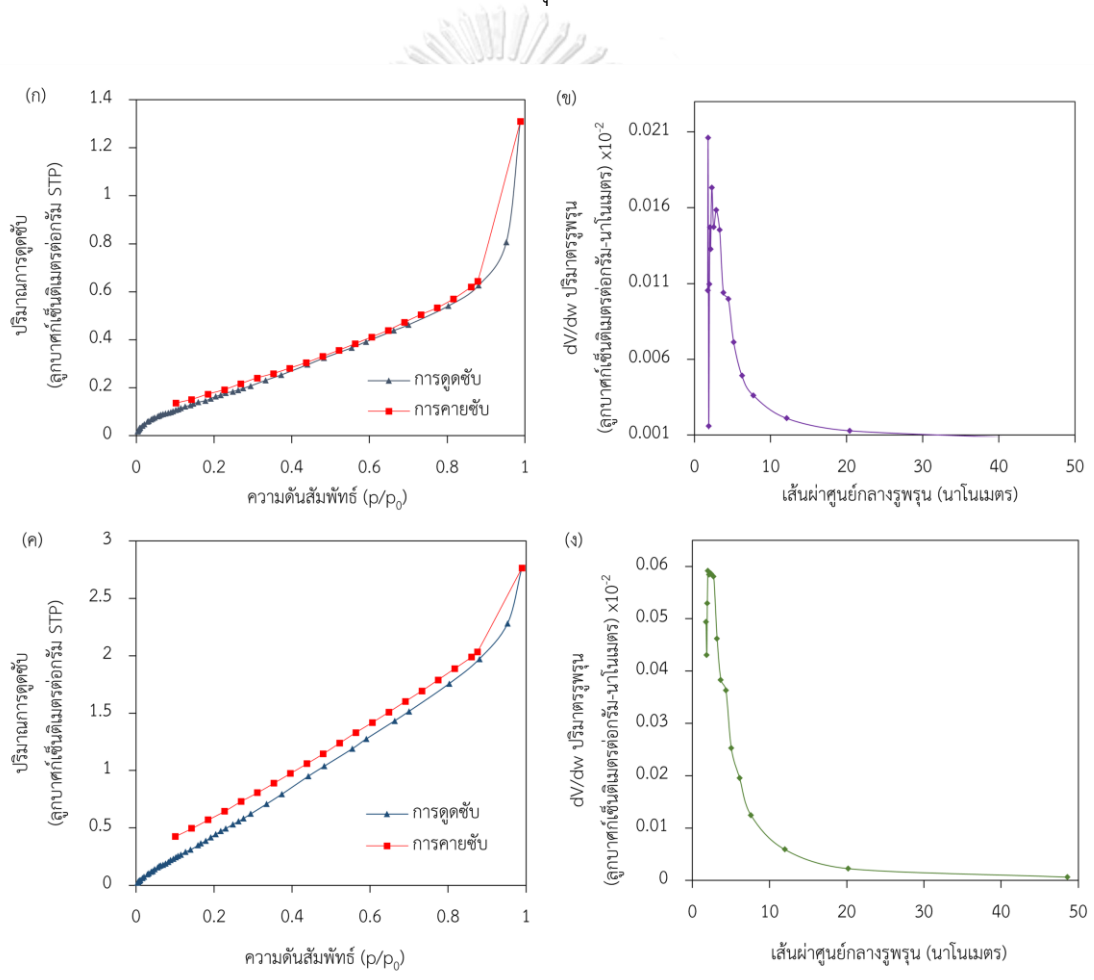


รูปที่ 12 สเปกตรัม FTIR ของ (ง) PP (ข) PP-Pb (ค) PP-PDTC และ (จ) PP-PDTC-Pb

4.1.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ

รูปที่ 13 แสดงรูปไอโซเทอมของการดูดซับ-การคายซับด้วยแก๊สไนโตรเจนไนโตรเจนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ PP และ PP-PDTC ตามระบบ IUPAC พบว่าผลลัพธ์เป็นแบบไอโซเทอมชนิดที่ 4 และแสดงฮิสเทรีซิสลูป (hysteresis loop) แบบ H₃ ในช่วงระหว่าง $0.5 < p/p_0 < 1.0$ บ่งชี้ว่ามีลักษณะของโครงสร้างรูพรุน [18] นอกจากนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) ของ PP และ PP-PDTC เท่ากับ 9.046 และ 5.705 นาโนเมตร

ตามลำดับ ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยระบุว่าทั้ง PP และ PP-PDTC เป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนแบบเมโซพอร์ (Mesopore) ตามการจำแนกประเภทของ IUPAC [67] นอกจากนี้ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของ PP และ PP-PDTC เท่ากับ 0.755 และ 2.381 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุนเฉลี่ยของ PP และ PP-PDTC เท่ากับ 0.0012 และ 0.0035 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์ BET ของ PP-PDTC แสดงคุณสมบัติทางกายภาพที่เหนือกว่า PP อย่างชัดเจน เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนมีมากกว่า PP [76]



รูปที่ 13 การวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับ-การคายซับด้วยแก๊สไนโตรเจนและกราฟการกระจาย

ตัวของขนาดรูพรุน (ก, ข) PP และ (ค, ง) PP-PDTC

4.2. การวิเคราะห์ทางสถิติ

4.2.1. การหาค่าสถานะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน

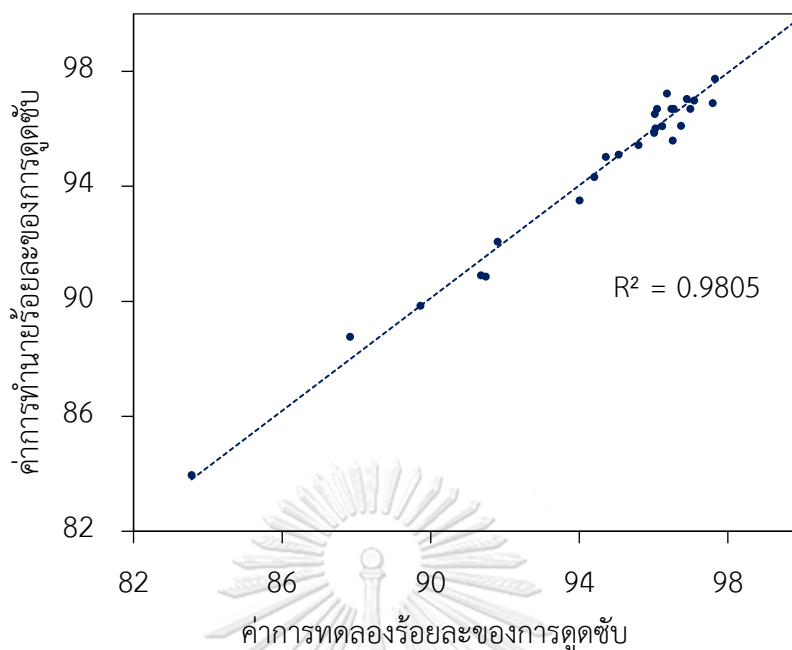
ผลการทดลองทั้งหมด 27 การทดลองเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมโดยใช้วิธี บ็อกซ์-เบห์นเคน จะได้สมการถดถอยที่เป็นฟังก์ชันของการตอบสนอง (% adsorption) และตัวแปรอิสระ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.1)

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละของการดูดซับ} &= 81.4300 - 0.0334X_1 + 3.4700X_2 + 16.1900X_3 + 0.1800X_4 \\
 (\% \text{ adsorption}) &- 0.0004X_1X_1 - 0.2200X_2X_2 - 15.3100X_3X_3 - 0.1580X_4X_4 \\
 &- 0.0221X_1X_2 + 0.2649X_1X_3 + 0.0159X_1X_4 - 0.9020X_2X_3 \\
 &+ 0.2730X_2X_4 - 1.3490X_3X_4
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

ในตารางที่ 9 แสดงค่าการทดลองและค่าการทำนายของร้อยละของการดูดซับ (% adsorption) ในรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทดลอง (Experiment) และค่าการทำนาย (Predict) ของการดูดซับตะกั่ว พบว่าค่า R^2 สำหรับการดูดซับตะกั่วเป็น 0.9805 ซึ่งแปลว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทดลองได้ดีกับกระบวนการดูดซับ

ตารางที่ 9 ค่าทดลองและค่าคาดการณ์โดยใช้วิธีพื้นผิวดตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับการ
ดูดซับตะกั่วโดยใช้ PP เป็นตัวดูดซับ

การทดลอง	ระดับตัวแปร				ร้อยละของการดูดซับ	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	การทดลอง	การทำนาย
1	-1	-1	0	0	94.72	95.02
2	1	-1	0	0	96.75	96.10
3	-1	1	0	0	96.36	97.22
4	1	1	0	0	94.40	94.31
5	0	0	-1	-1	87.83	88.76
6	0	0	1	-1	96.05	96.01
7	0	0	-1	1	91.81	92.06
8	0	0	1	1	97.60	96.89
9	-1	0	0	-1	96.02	95.85
10	1	0	0	-1	94.01	93.51
11	-1	0	0	1	96.04	96.51
12	1	0	0	1	96.90	97.03
13	0	-1	-1	0	89.72	89.84
14	0	1	-1	0	91.49	90.86
15	0	-1	1	0	96.09	96.69
16	0	1	1	0	96.23	96.08
17	-1	0	-1	0	96.51	95.59
18	1	0	-1	0	83.56	83.94
19	-1	0	1	0	91.36	90.90
20	1	0	1	0	99.87	100.00
21	0	-1	0	-1	95.59	95.43
22	0	1	0	-1	95.06	95.09
23	0	-1	0	1	97.10	96.98
24	0	1	0	1	97.66	97.73
25	0	0	0	0	96.48	96.69
26	0	0	0	0	96.99	96.69
27	0	0	0	0	96.54	96.69



รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทดลองและค่าการทำนายของการดูดซับตะกั่ว

ตารางที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA เพื่อวิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปรทั้งหมดในกระบวนการ พบว่าความสำคัญของตัวแปรต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับค่า P และค่า F ซึ่งค่า F ของแบบจำลองเท่ากับ 42.99 ส่วนตัวแปรที่ค่า P ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้น ๆ มีนัยสำคัญทางสถิติ [77, 78] และบ่งชี้ว่าตัวแปรและแบบจำลองนี้มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ใน การดูดซับตะกั่ว [77, 79] ส่วนค่าความคลาดเคลื่อน (lack of fit) ใช้ในการวิเคราะห์ว่าความเหมาะสมของแบบจำลองว่ามีความน่าเชื่อถือในการนำมาประยุกต์ใช้หรือไม่ โดยพิจารณาถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลกับแบบจำลอง [80] ซึ่งจากค่า $P = 0.12$ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แปลว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเกิดจากปัจจัยภายนอกอื่น ๆ (Noise) เท่ากับร้อยละ 12 [81, 82]

ตัวแปรต่าง ๆ ของสมการที่มีนัยสำคัญ (ค่า P น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05) ประกอบไปด้วย X_1 (ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น) X_3 (ปริมาณตัวดูดซับ) X_4 (เวลาสัมผัส) X_1X_1 (ความสัมพันธ์ระหว่าง

ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นเอง) X_3X_3 (ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับเอง) X_1X_2
 (ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นและค่าความเป็นกรด-ด่าง) X_1X_3 (ความสัมพันธ์
 ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นกับปริมาณตัวดูดซับ)

ตารางที่ 10 แสดงค่าการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (ANOVA)

Source	DF	SS	MS	ค่า F	ค่า P
Model	14	307.13	21.94	42.99	0.00
Linear	4	125.35	31.34	61.42	0.00
X_1	1	2.53	2.53	4.96	0.05
X_2	1	0.13	0.13	0.25	0.63*
X_3	1	109.65	109.65	214.90	0.00
X_4	1	13.04	13.04	25.56	0.00
Square	4	58.20	14.55	28.51	0.00
X_1X_1	1	3.46	3.46	6.77	0.02
X_2X_2	1	0.26	0.26	0.50	0.49*
X_3X_3	1	51.26	51.26	100.45	0.00
X_4X_4	1	0.13	0.13	0.26	0.62*
2-Way interaction	6	123.57	20.60	40.36	0.00
X_1X_2	1	3.97	3.97	7.77	0.02
X_1X_3	1	115.12	115.12	225.61	0.00
X_1X_4	1	2.06	2.06	4.03	0.07*
X_2X_3	1	0.66	0.66	1.29	0.28*
X_2X_4	1	0.30	0.30	0.58	0.46*
X_3X_4	1	1.48	1.48	2.89	0.12*
Error	12	6.12	0.51	N/A	N/A
Lack-of-fit	10	5.97	0.60	7.70	0.12*
Pure error	2	0.16	0.08	N/A	N/A
Total	26	313.25	N/A	N/A	N/A

หมายเหตุ: DF คือ Degree of freedom, SS คือ Sum of square, MS คือ Mean square และ *

คือ ค่าที่ไม่มีนัยสำคัญ

4.2.2. วิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมของกระบวนการดูดซับ (Optimization of adsorption process)

4.2.2.1. ค่าสถานะที่เหมาะสมของการดูดซับ

จากรูปที่ 15 ผลจากการหาสถานะที่เหมาะสมจากวิธีตอบสนองแบบบ็อก-เบห์นเคนพบว่าสถานะของการดูดซับที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 96.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 ปริมาณสารดูดซับ 0.73 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตร และเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง เมื่อนำสถานะดังกล่าวมาทดลองซ้ำพบว่าค่าการทำนายและค่าทดลองของร้อยละการดูดซับคือ 100 (คำนวณจากการนำสถานะที่ได้ไปแทนค่าในสมการ 4.1) และ 97.81 ตามลำดับ ในที่นี้ผลการทดลองได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสอดคล้องกับผลที่ทำนายไว้จากแบบจำลอง ดังนั้นผลลัพธ์จึงยืนยันความน่าเชื่อถือของการใช้วิธีตอบสนองแบบบ็อก-เบห์นเคนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ดีในกระบวนการดูดซับ ซึ่งจากสถานะที่เหมาะสมที่ได้นำตัวแปรแต่ละตัวมาวิเคราะห์ได้ดังนี้

- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตะกั่ว

จากผลการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับ PP โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตะกั่วในช่วง 10 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วที่เหมาะสมที่สุด คือ 96.50 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นหมายความว่า ความเข้มข้นของตะกั่วแปรผันตรงกับร้อยละของการดูดซับ แปลว่า ความเข้มข้นของตะกั่วยิ่งมากทำให้ร้อยละการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อโมเลกุลของสารตะกั่วมากขึ้นส่งผลให้เกิดการดูดซับได้มากขึ้น [58] ในทางกลับกัน การลดลงของร้อยละของการดูดซับตะกั่วเกิดจากพื้นที่รูพรุนที่อิ่มตัวและพื้นที่การแลกเปลี่ยนเต็ม จึงไม่สามารถดูดซับตะกั่วได้อีก [58]

- ค่าความเป็นกรด-ด่าง

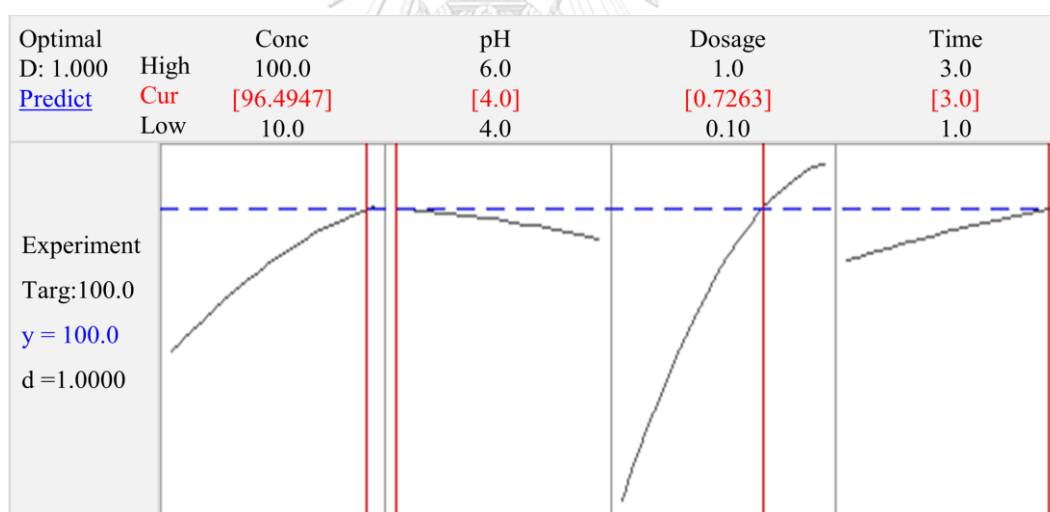
จากผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย พบว่าร้อยละของการดูดซับตะกั่วสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 เนื่องจากการแข่งขันระหว่างไอออนของตะกั่วและไอออนของไฮโดรเจน (H^+) ในการจับกับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ไอออนของตะกั่วจึงสามารถแทนที่การจับไอออนของไฮโดรเจน (H^+) ที่ก่อตัวบนส่วนของพื้นผิวของตัวดูดซับที่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชัน $-OH$ และ $-COOH$ ซึ่งผลการทดลองนี้ ยืนยันได้จากงานวิจัยของ Raju และคณะ [58] และ Darvanjooghi และคณะ [60] ซึ่งทำการทดลองช่วง 2 ถึง 10 พบว่า ผลร้อยละของการดูดซับที่ดีที่สุดคือช่วง 4-6 เนื่องจากในช่วงความเป็นกรดมาก (ช่วงความเป็นกรด-ด่างที่ 2-3) มีการแข่งขันระหว่างไอออนของตะกั่วกับ H^+ ทำให้ไอออนของตะกั่วเข้าไปจับที่พื้นผิวของตัวดูดซับได้น้อย ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 6 ทำให้มีปริมาณของ OH^- เพิ่มขึ้นและเมื่อ OH^- รวมกับไอออนของตะกั่วจะอยู่ในรูป $Pb(OH)_2$ ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการตกตะกอนของสารตะกั่วในสารละลาย ส่งผลให้เห็นว่า ร้อยละของการดูดซับสามารถเพิ่มขึ้นได้ [52, 58, 60] ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวยังบันทึกไว้ว่าที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4 เหมาะสมที่สุดเนื่องจากหลีกเลี่ยงสาเหตุที่เกิดจากการตกตะกอนได้

- ปริมาณของตัวดูดซับ

ผลการศึกษาปริมาณของตัวดูดซับพบว่า ร้อยละของการดูดซับจะมากที่สุดเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.73 กรัมต่อสารละลาย 50 มิลลิลิตร ซึ่งจากงานวิจัยของ Raju และคณะ [58] ได้อธิบายผลไปในทิศทางเดียวกันคือ ยิ่งปริมาณตัวดูดซับมากจะเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับ ส่งผลให้ตำแหน่งที่จะสามารถเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้น

- เวลาการสัมผัสน้ำ

ผลการศึกษาเวลาสัมผัสน้ำ พบว่า เวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับตะกั่วคือ 3 ชั่วโมง จากงานวิจัยของ Abbaszadeh และคณะ [1] มีการอธิบายผลการทดลองไปในทางเดียวกัน ซึ่งได้ทำการทดลองการดูดซับที่เวลาสัมผัสน้ำช่วง 1 ถึง 3 ชั่วโมง และพบว่า การดูดซับในระยะเริ่มแรก ร้อยละของการดูดซับตะกั่วดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่อย ๆ เพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากพื้นผิวที่ไม่อิ่มตัวและตำแหน่งของการดูดซับที่มีอยู่บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับยังว่าง แต่เมื่อเวลาผ่านไป จำนวนไอออนของตะกั่วไปดูดซับบนพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้จำนวนของตำแหน่งที่ว่างลดลง เมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินต่อไปทำให้ตะกั่วไอออนจะถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวมากขึ้นจนไม่สามารถดูดซับได้ [1]



รูปที่ 15 สภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับตะกั่วด้วยเปลือกมะละกอ (PP) จากโปรแกรม minitab

4.2.2.2 วิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับจากข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม

รูปที่ 16 แสดงพื้นผิวสามมิติของประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วตามฟังก์ชันของตัวแปรอิสระ เมื่อพิจารณารูปที่ 16(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น (X_1) กับค่าความเป็นกรดต่าง(X_2) พบว่า ร้อยละของการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น และร้อยละของการดูดซับจะลดลง เมื่อค่าความเป็นกรด-ต่างสูงกว่า 5 หากพิจารณาตารางที่ 10 ค่า X_2 มีค่า P เท่ากับ 0.63 ซึ่งเป็นค่าที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อนำตัวแปร X_1 ซึ่งมีค่านัยสำคัญมาเทียบกับ X_2 พบว่า ค่านัยสำคัญของตัวแปร X_1X_2 เท่ากับ 0.02 ซึ่งแปลว่า ตัวแปร X_2 จะมีนัยสำคัญเมื่อนำไปพิจารณารวมกับ X_1

รูป 16(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น (X_1) กับปริมาณตัวดูดซับ (X_3) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นตะกั่วทำให้ร้อยละของการดูดซับมีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ (X_3) ใด ๆ ร้อยละของการดูดซับกลับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ปริมาณ X_1 ใด ๆ ซึ่งตรงกับผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติตามตารางที่ 10 คือ ค่า X_1 และ X_3 ล้วนเป็นค่าที่ต่างมีความเป็นนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อนำมาพิจารณารวมกับเป็นแบบ 2-way interaction พบว่า ค่า P เท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่านัยสำคัญทางสถิติมาก

รูป 16(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น (X_1) กับเวลาสัมผัส (X_4) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นตะกั่วทำให้ร้อยละของการดูดซับมีค่าลดลง แต่เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง ร้อยละของการดูดซับกลับเพิ่มขึ้น หากพิจารณาตารางที่ 10 ค่านัยสำคัญของตัวแปร X_1X_4 เท่ากับ 0.07 ซึ่งแปลว่า เมื่อสองตัวแปรนี้มารวมกันมีผลทำให้การวิเคราะห์ที่ไม่มีนัยสำคัญต่อการพิจารณาระบบวนการ

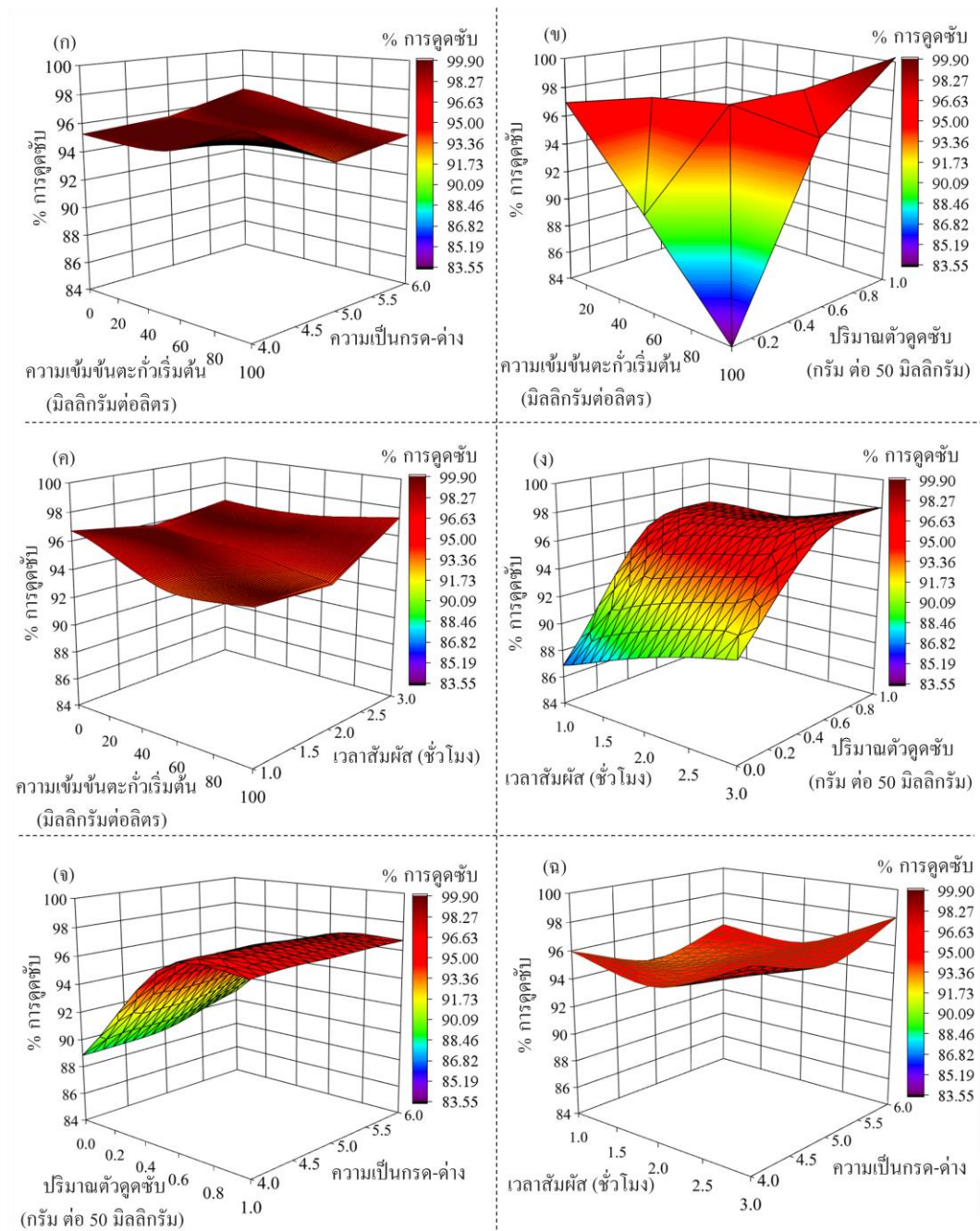
รูป 16(ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมพัทธ์ (X_4) กับปริมาณตัวดูดซับ (X_3) พบว่าเมื่อเวลาสัมพัทธ์และปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นทำให้ร้อยละของการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่การแลกเปลี่ยนและเวลาสัมพัทธ์ส่งผลต่อการดูดซับโดยตรง หากพิจารณาตารางที่ 10 ค่านัยสำคัญของตัวแปร X_4X_3 เท่ากับ 0.12 ซึ่งแปลว่า เมื่อสองตัวแปรนี้มารวมกันมีผลทำให้การวิเคราะห์ไม่มีนัยสำคัญต่อการพิจารณากระบวนการ

รูป 16(จ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับ (X_3) กับความเป็นกรด-ด่าง (X_2) เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มทำให้ร้อยละของการดูดซับเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญ หากพิจารณาตารางที่ 10 ค่านัยสำคัญของตัวแปร X_2X_3 เท่ากับ 0.28 ซึ่งแปลว่า เมื่อสองตัวแปรนี้มารวมกันมีผลทำให้การวิเคราะห์ไม่มีนัยสำคัญต่อการพิจารณากระบวนการ

รูป 16(ฉ) แสดงผลของเวลาสัมพัทธ์ (X_4) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (X_2) จะเห็นได้ว่าสามารถดูดซับตะกั่วได้มากขึ้นในเวลาสัมพัทธ์มากขึ้น หากพิจารณาตารางที่ 10 ค่านัยสำคัญของตัวแปร X_2X_4 เท่ากับ 0.46 ซึ่งแปลว่า เมื่อสองตัวแปรนี้มารวมกันมีผลทำให้การวิเคราะห์ไม่มีนัยสำคัญต่อการพิจารณากระบวนการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ดังนั้นจากผลการพล็อตกราฟสามมิติพบว่า อันตรกิริยาระหว่างปริมาณตัวดูดซับ (X_3) และตัวแปรที่เหลือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว สิ่งนี้ตรงกันข้ามกับความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น (X_1) และ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (X_2) หรือความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น (X_1) และเวลาสัมพัทธ์ (X_4) ซึ่งส่งผลให้กราฟตอบสนองค่อนข้างไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 16 แผนภาพสามมิติของ (ก) ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นและความเป็นกรด-ด่าง (ข) ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นและปริมาณของตัวดูดซึบ (ค) ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นและเวลาสัมผัสดับ (ง) เวลาสัมผัสดับและปริมาณของตัวดูดซึบ (จ) ปริมาณของตัวดูดซึบและความเป็นกรด-ด่าง และ (ฉ) เวลาสัมผัสดับและความเป็นกรด-ด่าง

4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับและกลไกการดูดซับของ PP และ PP-PDTC

4.3.1 การเปรียบเทียบค่าร้อยละของการดูดซับของตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC

ศึกษาภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อก-เบิร์ตเคน ผลการดูดซับตะกั่วโดยใช้ PP-PDTC พบว่าร้อยละการดูดซับของตัวดูดซับ PP-PDTC มีค่าสูงกว่า PP ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ PP และ PP-PDTC เป็นตัวดูดซับ

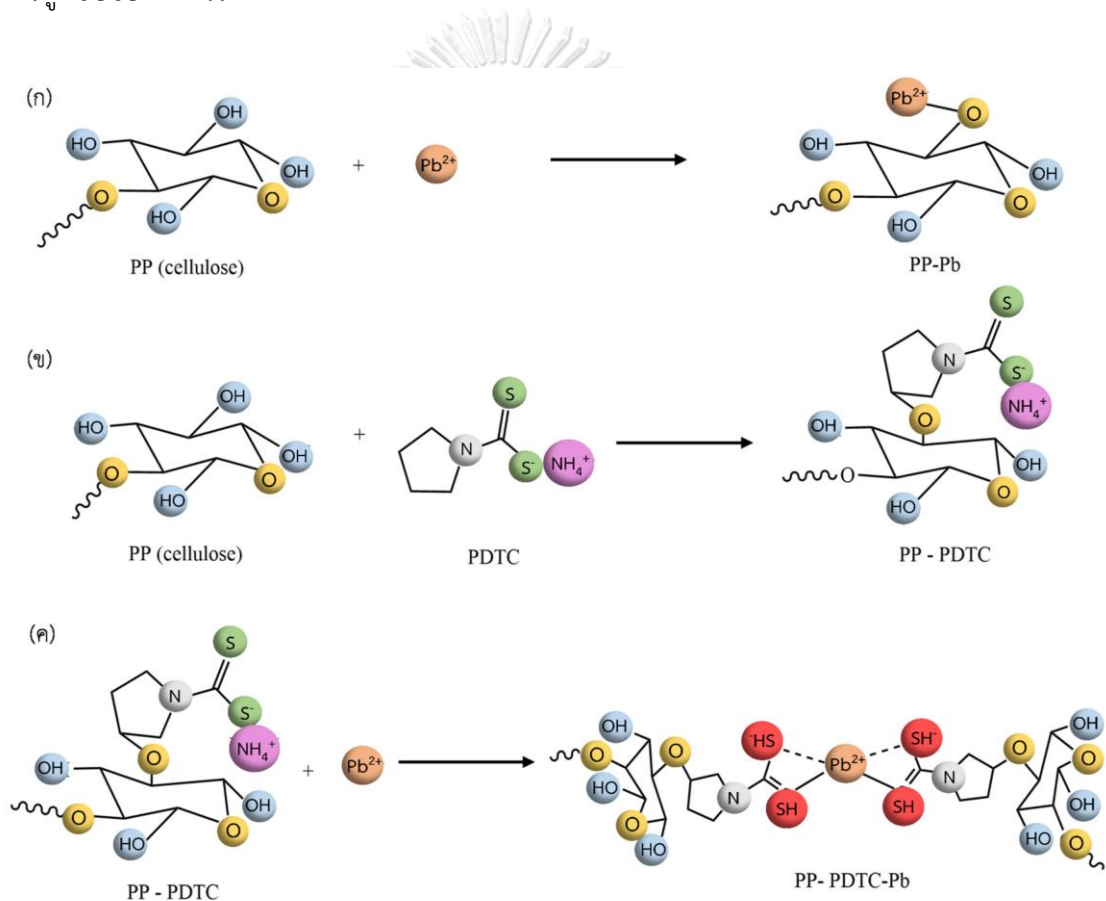
ครั้งที่	C_e (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการดูดซับ		q_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	
	PP	PP-PDTC	PP	PP-PDTC	PP	PP-PDTC
1	2.42	0.80	97.48	99.17	6.444	6.555
2	2.36	1.09	97.49	98.83	6.448	6.535
3	2.35	0.63	97.56	99.35	6.449	6.566
ค่าเฉลี่ย			97.54±0.02	99.13±0.14	6.447±0.001	6.552±0.009

*** หมายเหตุ ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นครั้งที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 96.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของครั้งที่ 3 มีค่าเท่ากับ 96.50 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.2 การวิเคราะห์กลไกของการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC

รูปที่ 17(ก) แสดงการดูดซับตะกั่วบนพื้นผิวของเซลลูโลสที่อยู่ในตัวดูดซับ PP ซึ่งเกิดการดูดซับขึ้นผ่านหมู่-OH [83] ดังนั้น การก่อตัวของพันธะโคเวเลนต์นำไปสู่การดูดซับตะกั่วบนพื้นผิวของเซลลูโลส ในรูปที่ 17(ข) แสดงปฏิกิริยาของ PP กับ PDTC พบว่าหมู่ไพโรลิดีนใน PDTC ทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชัน -OH ของเซลลูโลส [17] รูปที่ 17(ค) แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของตะกั่วที่ดูดซับบนตัวดูดซับ PP-PDTC เนื่องจาก PDTC มีความเป็นต่างอ่อนของลูอิสจึงมีแนวโน้มที่จะจับกับกรดลิวอิส เช่น โลหะหนัก ด้วยเหตุนี้จึงสร้างสารเชิงซ้อนที่เสถียรตามกฎของ HSAB (Hard and soft acids

and bases, HSAB) [17] ซึ่ง HSAB ถูกใช้เพื่ออธิบายความเสถียรของสารเชิงซ้อนของโลหะและกลไกของปฏิกิริยา โดยมีข้อสังเกตว่าตะกั่วสามารถสร้างคีเลตลิแกนด์ที่มีหมู่ซัลเฟอร์ของ $-NH-CS_2$ ในโครงสร้าง PDTC ซึ่งอะตอมของตะกั่วมีประจุเป็นบวกอะตอมของกำมะถัน (S) มีประจุลบ เมื่อใส่ PP-PDTC ลงในสารละลายตัวดูดซับจะเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับตะกั่ว และแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสามารถส่งเสริมการดูดซับตะกั่วออกจากน้ำที่ปนเปื้อนได้ [84, 85] ดังนั้น PP-PDTC จึงสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับของตะกั่วได้



รูปที่ 17 กลไกการทำปฏิกิริยาของ (ก) PP กับตะกั่ว (Pb^{2+}) (ข) PP กับ PDTC และ (ค) PP-PDTC กับตะกั่ว (Pb^{2+})

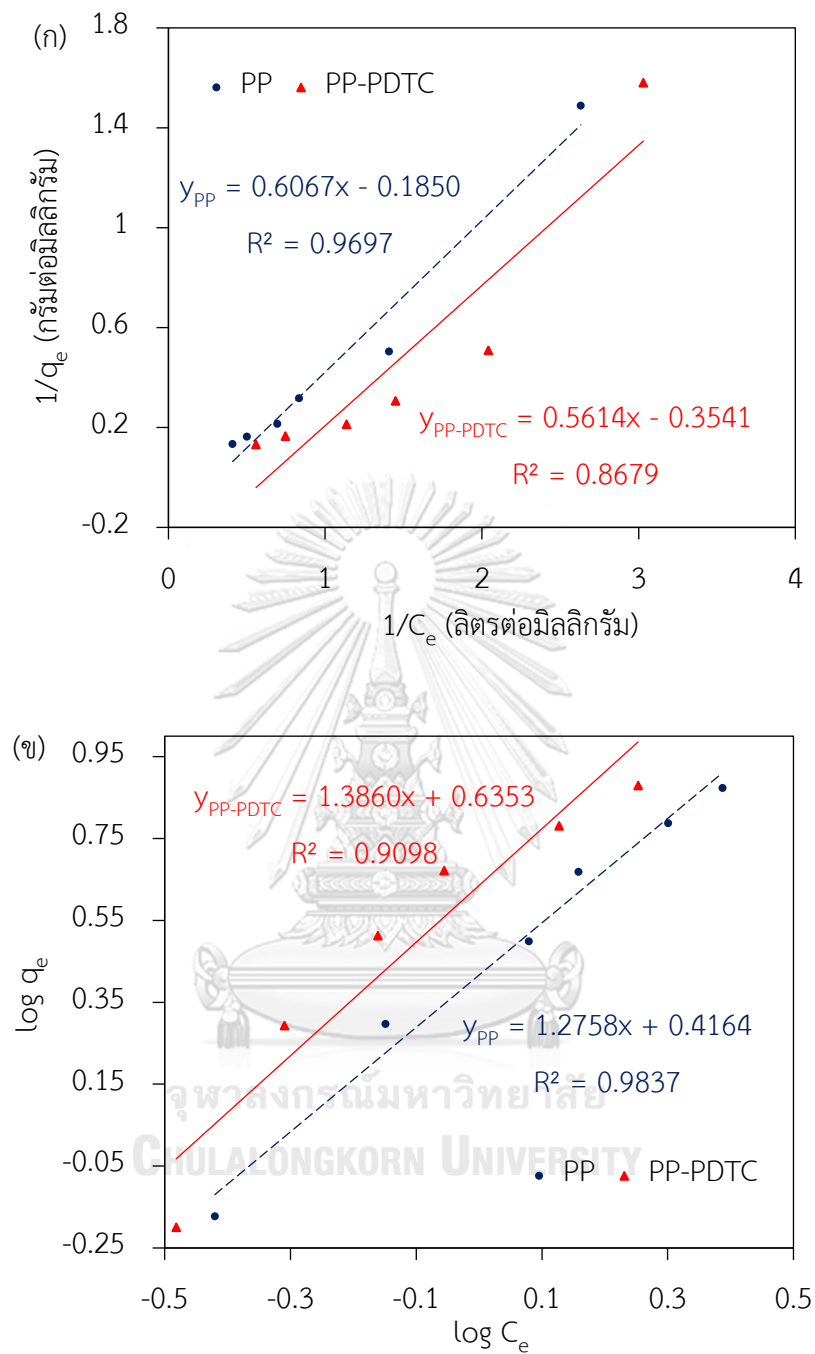
4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอม

ไอโซเทอมการดูดซับของ PP และ PP-PDTC วิเคราะห์ตามสมการไอโซเทอมต่าง ๆ ได้แก่ แลงเมียร์ (รูปที่ 18(ก)) ฟรุนดลิช (รูปที่ 18(ข)) เทมกิน (รูปที่ 18(ค)) และ ดูบินิน-ราตซ์เควิช (D-R) (รูปที่ 18(ง)) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (R^2) เป็นตัวบ่งชี้ถึงความเหมาะสมของแบบจำลอง ซึ่งพารามิเตอร์ และ R^2 ของแบบจำลองไอโซเทอมถูกแสดงไว้ในตารางที่ 12

สำหรับตัวดูดซับ PP จะเห็นว่าค่า R^2 ที่ได้จากแบบจำลองไอโซเทอมฟรุนดลิชมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.984 ดังนั้น แบบจำลองฟรุนดลิชเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับตะกั่วบนตัวดูดซับ PP ซึ่งแสดงว่าการดูดซับเป็นไปตามกลไกของพื้นผิวที่แตกต่างกันสำหรับการดูดซับหลายชั้น [39] นอกจากนี้ ค่าของ K_F เท่ากับ 1.516 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่า n คือ 0.784 ดังนั้นแสดงว่ากระบวนการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับ PP เป็นกระบวนการของการดูดซับทางเคมี [86, 87]

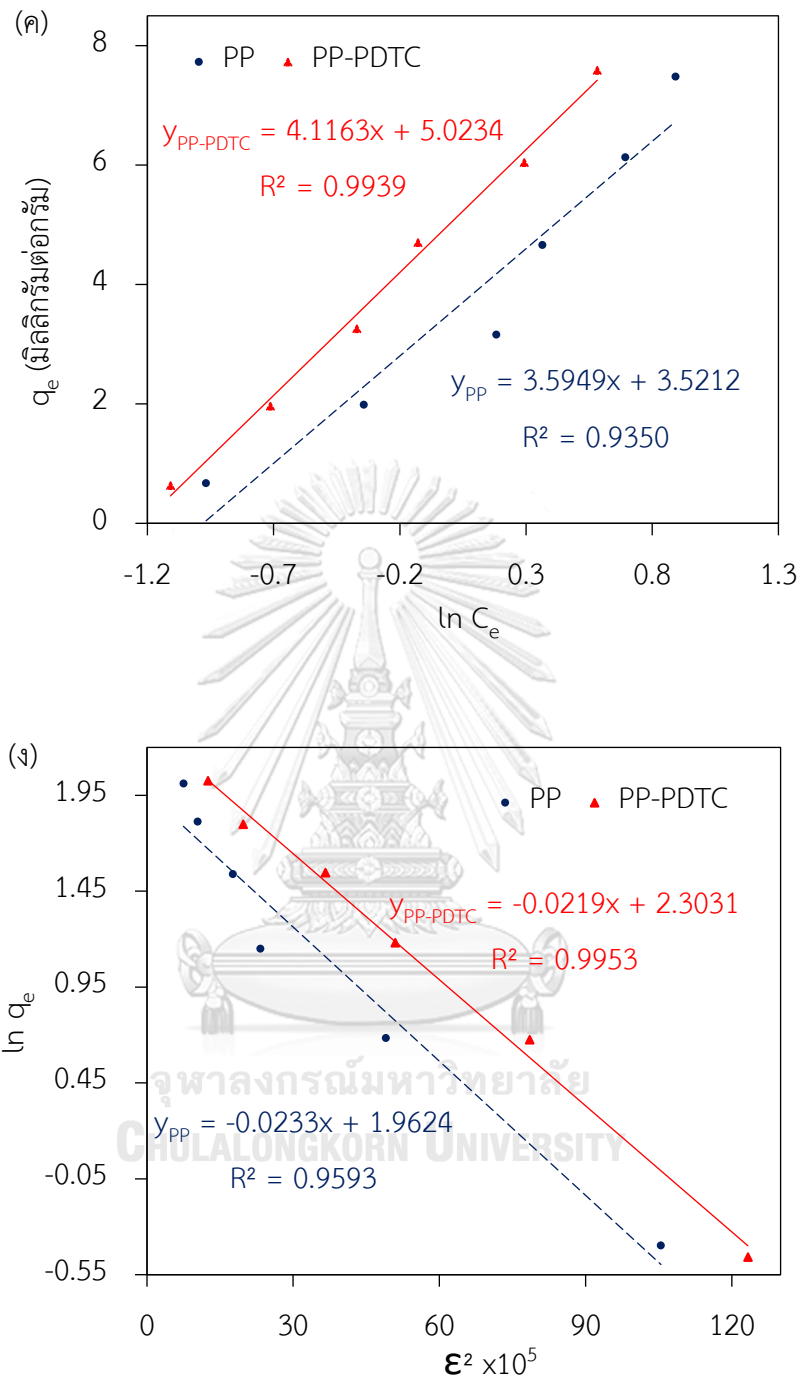
สำหรับตัวดูดซับ PP-PDTC แบบจำลองของ D-R ให้ค่า R^2 สูงสุดเท่ากับ 0.995 ค่าคงที่ไอโซเทอม D-R (K_D) ถูกใช้เพื่อประมาณค่าพลังงานอิสระเฉลี่ย (E) ซึ่งสามารถแยกแยะประเภทของกระบวนการดูดซับได้ เมื่อขนาดของ E น้อยกว่า 8 กิโลจูลต่อโมล กระบวนการดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางกายภาพ เมื่อค่า E อยู่ระหว่าง 8-16 กิโลจูลต่อโมล กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางเคมี [40] ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าของ q_s เท่ากับ 10.005 ลิตรต่อกรัม และพลังงานอิสระเฉลี่ย (E) เท่ากับ 4.778 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งแสดงว่ากระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับ PP-PDTC เป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพ

นอกจากนี้ ค่าของพารามิเตอร์แลงเมียร์ (q_m และ K_L) ของ PP และ PP-PDTC มีค่าเป็นลบ อาจเป็นเพราะลักษณะจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าของกระบวนการดูดซับ [88-90]



รูปที่ 18 แบบจำลองไอโซเทอมของตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC (ก) แลงเมียร์ (ข) ฟรอนดลิช (ค) เทม

กิน และ (ง) ดูบินิน-ราตซ์เควิช (D-R)



รูปที่ 18 แบบจำลองไอโซเทอมของตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC (ก) แลงเมียร์ (ข) ฟรุนดลิช (ค) เทม

กิน และ (ง) ดูบินิน-ราตซ์เควิช (D-R) (ต่อ)

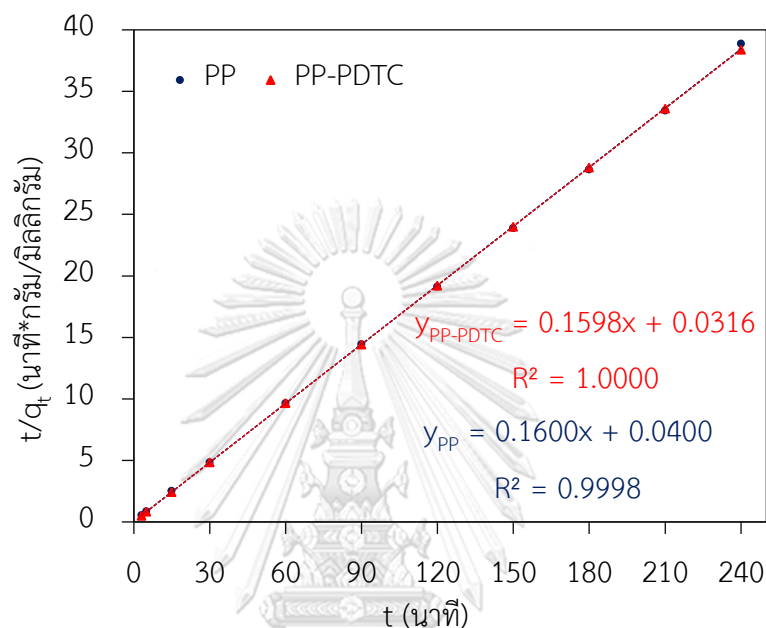
ตารางที่ 12 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทอมของตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC

ตัวดูดซับ	แบบจำลองไอโซเทอม			
	แลงเมียร์	ฟรุนดลิช	เทมกิน	ดูบินิน-ราดซ์เควิช
PP	$q_m = -5.405$	$K_F = 1.516$	$K_T = 2.663$	$q_s = 7.116$
	$K_L = -0.305$	$n = 0.7837$	$B = 3.595$	$K_D = 0.023$
	$R^2 = 0.970$	$R^2 = 0.984$	$R^2 = 0.935$	$E = 4.632$
				$R^2 = 0.959$
PP-PDTC	$q_m = -2.824$	$K_F = 1.888$	$K_T = 3.388$	$q_s = 10.005$
	$K_L = -0.631$	$n = 0.7215$	$B = 4.116$	$K_D = 0.022$
	$R^2 = 0.868$	$R^2 = 0.910$	$R^2 = 0.994$	$E = 4.778$
				$R^2 = 0.995$

4.5 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์

ตารางที่ 13 แสดงค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ของแบบจำลอง ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองลำดับที่สองเทียมนั้นเหมาะสมกับข้อมูลการทดลอง (ค่า R^2 สูงที่สุดสำหรับทั้งตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC) เนื่องจากอัตราการดูดซับของตะกั่วบนทั้ง PP และ PP-PDTC นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ โดยที่กลไกการดูดซับเป็นขั้นตอนการควบคุมอัตราการดูดซับ ซึ่งสนับสนุนสมมุติฐานที่ว่า การมีอยู่ของรูพรุนในช่วงมีโซพอร์ช่วยเพิ่มอัตราเร็วของกระบวนการดูดซับตะกั่วบนตัวดูดซับได้ [40] รูปที่ 19 แสดงแผนภาพเชิงเส้นระหว่าง t/q_t กับ t พบว่า ค่าปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุลจากข้อมูลการทดลอง ($q_{e,exp}$) สำหรับ PP และ PP-PDTC มีค่าเท่ากับ 6.447 และ 6.552 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ค่าปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุลจากที่คำนวณได้ ($q_{e,cal}$) สำหรับ PP และ PP-PDTC คือ 6.250 และ 6.258 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ สำหรับแบบจำลองการแพร่กระจายของอนุภาคในอนุภาค ค่า

R^2 ต่ำ แสดงว่ากระบวนการดูดซับไม่ได้ควบคุมโดยการแพร่กระจายในอนุภาค ซึ่งการดูดซับที่เกิดขึ้น อาจเกิดขึ้นที่ผิวนอกของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการแพร่ของโมเลกุลตะกั่วเข้าไปในรูพรุน ของตัวดูดซับตามที่บันทึกในวัสดุที่มีรูพรุนอื่น ๆ [91, 92]



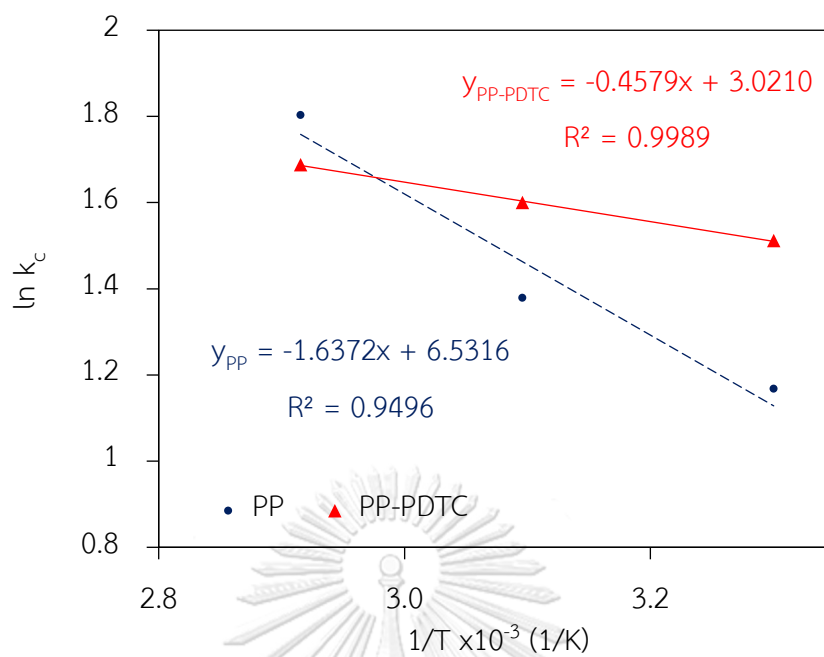
รูปที่ 19 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของ PP และ PP-PDTC ของสมการอันดับสองเทียม

ตารางที่ 13 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์

ตัวดูดซับ	แบบจำลองจลนพลศาสตร์		
	อันดับหนึ่งเทียม	อันดับสองเทียม	การแพร่ภายในรูพรุน
PP	$q_{e,cal} = 0.2778$	$q_{e,cal} = 6.2500$	$k_{id} = 0.035$
	$k_1 = 0.0029$	$k_2 = 0.0010$	$C = 5.8515$
	$R^2 = 0.8825$	$R^2 = 0.9998$	$R^2 = 0.7701$
PP-PDTC	$q_{e,cal} = 0.3540$	$q_{e,cal} = 6.2578$	$k_{id} = 0.006$
	$k_1 = 0.0009$	$k_2 = 0.0008$	$C = 6.1729$
	$R^2 = 0.8306$	$R^2 = 1.0000$	$R^2 = 0.9105$

4.6 ผลการศึกษาอุณหพลศาสตร์

ผลจากการพล็อต $\ln k_c$ เทียบกับ $1/T$ จะได้ค่าความชันและจุดตัดแกน y คือค่า ΔH° และ ΔS° ตามลำดับ ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 20 ส่วนตารางที่ 14 แสดงตัวอย่างพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์สำหรับตะกั่วที่ดูดซับบนตัวดูดซับภายใต้อุณหภูมิที่ศึกษา พบว่าค่าบวกของ ΔH° บ่งชี้ว่าการดูดซับเป็นกระบวนการดูดความร้อน [6] การวิจัยก่อนหน้านี้ยังรายงานปรากฏการณ์เดียวกันของกระบวนการดูดซับตะกั่วดูดความร้อนเมื่อนำเมล็ดมะละกอเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ [93, 94] ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าพลังงานทั้งหมดที่ปล่อยออกมาจากการแตกหักของพันธะนั้นต่ำกว่าพลังงานทั้งหมดที่ดูดซับในการสร้างพันธะระหว่างตะกั่วและตัวดูดซับ [95, 96] ในขณะที่ค่าบวกของ ΔS° บ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของการไม่เป็นระเบียบของระบบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่ไม่เกิดการเกาะกันแบบผลึก [97] ค่าลบของ ΔG° หากพิจารณาเชิงทฤษฎีจากสมการทางอุณหพลศาสตร์ที่กล่าวว่า $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$ จากตารางแสดงค่า ΔH° ซึ่งเป็นค่าบวก ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $T\Delta S^\circ$ จึงส่งผลให้ค่า ΔG° เป็นลบ ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับเป็นไปได้ทางอุณหพลศาสตร์และสามารถเกิดขึ้นได้ทุกอุณหภูมิ เพราะค่า ΔH° ทุกอุณหภูมิจะต่ำกว่าค่า $T\Delta S^\circ$ ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าของ ΔG° จะเป็นค่าลบมากขึ้น ดังนั้นพลังงานที่มากขึ้นสนับสนุนกระบวนการดูดซับมากขึ้น [1] ซึ่งงานวิจัยอื่น ๆ ได้บันทึกผลการทดลองว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบดูดความร้อนและสามารถเกิดขึ้นเองได้เช่นกัน [6, 94]



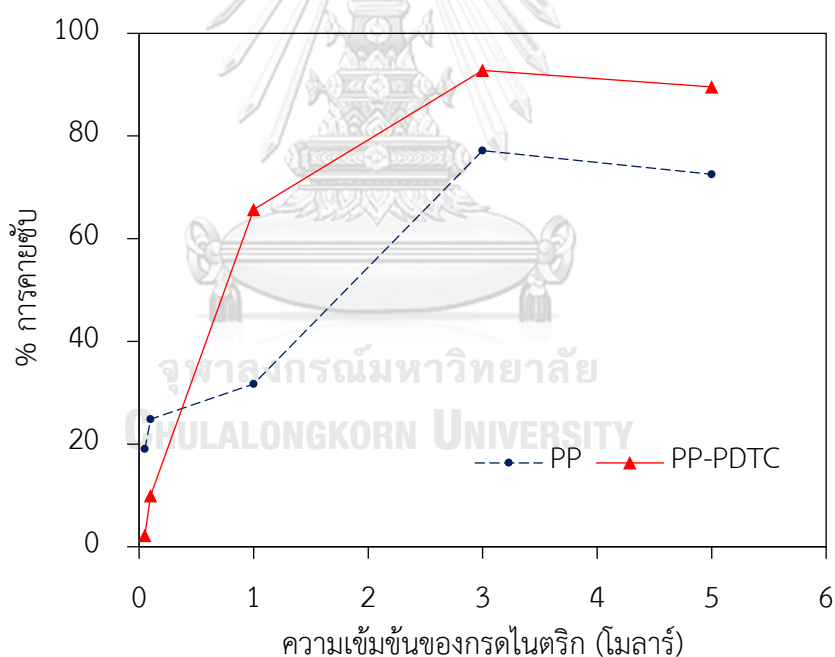
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ ของของการดูดซับตะกั่วโดยใช้ PP และ PP-PDTC

ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์ของอุณหพลศาสตร์สำหรับการดูดซับตะกั่ว

ตัวดูดซับ	ΔG° (kJ/mol)			ΔH° (J/mol)	ΔS° (J/mol-K)
	303 K	323 K	343 K		
PP	-2.941	-3.703	-5.141	13.612	54.304
PP-PDTC	-3.808	-4.297	-4.814	3.807	25.117

4.7. ผลการศึกษาการคายซับ

การทดลองการคายซับถูกประเมินผลโดยการทดลองความเข้มข้นของกรดไนตริกหลาย ๆ ค่า เมื่อโปรตอน (H^+) ในสารละลาย HNO_3 มีปริมาณมากขึ้น จากนั้น H^+ เข้าไปทำปฏิกิริยาในระบบ ทำให้เกิดการรบกวนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพันธะของตัวดูดซับและตัวดูดซับเป็นผลให้ตัวดูดซับหลุดออกจากตัวดูดซับได้ [48] ผลการศึกษาพบว่าร้อยละของการคายดูดซับสูงสุดอยู่ที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกที่ 3 โมลาร์ ดังแสดงในรูปที่ 21 พบว่าร้อยละของการคายซับของ PP และ PP-PDTC เท่ากับร้อยละ 77.16 และ 92.79 ตามลำดับ เนื่องจากตัวดูดซับเป็นตัวดูดซับที่ได้มาจากพืช การคายซับจึงสามารถทำได้ในรอบเดียวเท่านั้น



รูปที่ 21 การศึกษาการคายซับของตัวดูดซับ PP and PP-PDTC

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

ผลการศึกษาพบว่าตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC สามารถดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียที่ปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ การปรับปรุงพื้นผิว PP ด้วย PDTC ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีส่วนช่วยในการปรับปรุงพื้นที่ผิวเพื่อต่อยอดในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ โดยผลจากการศึกษา EDX ยืนยันว่านอกจาก PDTC สามารถจับและยึดเกาะกับ PP ได้แล้ว ยังยืนยันได้ว่าตัวดูดซับ PP-PDTC นั้นสามารถดูดซับปริมาณของตะกั่วได้มากกว่า PP ผลของ FTIR พบว่าหมู่ฟังก์ชันหลักที่ใช้ดูดซับตะกั่วของ PP คือ หมู่ -OH และ C-O ส่วนหมู่ฟังก์ชันหลักที่ใช้ดูดซับตะกั่วของ PP-PDTC คือหมู่ C-N และ C=S จากการศึกษาปริมาณรุกรุนของตัวดูดซับ พบว่า PP-PDTC มีพื้นที่ผิวและปริมาณรุกรุนที่มากกว่า PP ทำให้ดูดซับได้ดีกว่า

จากการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพื้นที่ผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ได้สภาวะการดูดซับที่ดีที่สุดคือ ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น เท่ากับ 96.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4 ปริมาณตัวดูดซับ 0.73 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตร และเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง โดยตัวแปรแต่ละตัวที่มีความสำคัญในกระบวนการถูกประเมินจากผลวิเคราะห์ของข้อมูลทางสถิติ (ANOVA) ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับ (X_3) และตัวแปรที่เหลือ ได้แก่ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (X_1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (X_2) และเวลาสัมผัส (X_4) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวมีความสัมพันธ์ต่อกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งหมายความว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในกระบวนการดูดซับได้ดี

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของทั้งสองตัวดูดซับ PP และ PP-PDTC พบว่าการดูดซับ เหมาะกับแบบจำลองลำดับที่สองเทียม การวิเคราะห์ไอโซเทอมของตัวดูดซับทั้งสองมีความแตกต่างกัน โดยที่ตัวดูดซับที่เป็น PP จะเข้ากับสมมติฐานของฟรุนดลิชมากกว่าโมเดลอื่น ๆ แต่ตัวดูดซับที่เป็น PP-PDTC จะเข้ากับสมมติฐานของดูบิโน-ราดซ์เควิชมากกว่าแบบอื่น นอกจากนี้การวิเคราะห์อุณหภูมิพลศาสตร์ของทั้งสองตัวดูดซับพบว่าการดูดซับเป็นทั้งกระบวนการดูดความร้อนและสามารถเกิดขึ้นได้ทุกอุณหภูมิ และการศึกษาการคายซับพบว่ากรดไนตริกสามารถดึงสารตะกั่วที่ถูกดูดซับในพื้นผิวของตัวดูดซับของทั้ง PP และ PP-PDTC ได้อย่างดี

โดยรวมสรุปได้ว่าตัวดูดซับ PP-PDTC มีคุณสมบัติด้านพื้นผิวที่ดีกว่า PP เมื่อนำมาเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วที่ดูดซับบนพื้นผิว พบว่าบน PP-PDTC มีค่ามากกว่า PP แต่อย่างไรก็ตาม ในทางสถิติ ร้อยละของการดูดซับที่ได้มีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังเน้นย้ำถึงกรณี การเลือกใช้ตัวดูดซับซึ่งเป็นวัสดุต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อใช้ในการกำจัดสารตะกั่ว ออกจากสารละลายปนเปื้อนอีกด้วย

5.2. ข้อเสนอแนะ

การทำการคายซับนั้น คือ การทำเพื่อลดต้นทุนในการผลิตตัวดูดซับ โดยการนำตัวดูดซับ กลับมาใช้ใหม่ แต่ตัวดูดซับที่นำมาใช้ในงานนี้เป็นตัวดูดซับที่ได้จากของเหลือหรือขยะทางการเกษตร อยู่แล้ว ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องนำกลับมาใช้อีกครั้ง

การใช้กรดไนตริกในการคายซับนั้น ถ้ากล่าวถึงควมมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการ นำมาใช้เป็นสารชะตะกั่วออกจากตัวดูดซับนับว่ามีประสิทธิภาพดีมาก แต่มีข้อจำกัดคือ การใช้ต้นทุน เพิ่มขึ้นและต้องมีศึกษาขั้นตอนการกำจัดของเสียจากการใช้กรดเพิ่มเติม

ในการทดลองควรใช้น้ำตะกั่วที่ได้จากธรรมชาติแทนน้ำที่สังเคราะห์ขึ้นมา เนื่องจากอาจมีไอออนอื่น ๆ ปนมาในน้ำ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์และการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการดูดซับได้



บรรณานุกรม

- [1] Abbaszadeh, S.; Wan Alwi, S.R.; Webb, C.; Ghasemi, N.; and Muhamad, I.I. Treatment of lead-contaminated water using activated carbon adsorbent from locally available papaya peel biowaste. J. Clean. Prod. 118(2016): 210-222.
- [2] Suren, S.; Pancharoen, U.; and Kheawhom, S. Simultaneous extraction and stripping of lead ions via a hollow fiber supported liquid membrane: Experiment and modeling. J. Ind. Eng. Chem. 20(2014): 2584-2593.
- [3] Kosanlavit, W. Efficiency and kinetic rate of nanoscale and microscale of zero valent Iron and Zinc oxide particles for Chromium, Cadmium, and Lead removal from Pak Thong Chai silk dyeing effluent, Thailand. TURCOMAT, 12(2021): 2690-2702.
- [4] Kladsomboon, S.; Jaiyen, C.; Choprathumma, C.; Tusai, T.; and Apilux, A. Heavy metals contamination in soil, surface water, crops, and resident blood in Uthai district, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand. Environ. Geochem. Health. 42(2020): 545-561.
- [5] Mingkhwan, R.; and Worakhunpiset, S. Heavy metal contamination near industrial estate areas in Phra Nakhon Si Ayutthaya Province, Thailand and human health risk assessment. Int. J. Environ. Res. Public Health. 15(2018): 1890.
- [6] Li, X.; Wang, Z.; Liang, H.; Ning, J.; Li, G.; and Zhou, Z. Chitosan modification persimmon tannin bioadsorbent for highly efficient removal of Pb(II) from aqueous environment: the adsorption equilibrium, kinetics and thermodynamics. Environ. Technol. 40(2019): 112-124.

[7] Basu, M.; Guha, A.K.; and Ray, L. Adsorption of lead on cucumber peel. J. Clean. Prod. 151(2017): 603-615.

[8] Amin, M.T.; Alazba, A.A.; and Shafiq, M. Removal of copper and lead using banana biochar in batch adsorption systems: Isotherms and kinetic studies. Arab. J. Sci. Eng. 43(2018): 5711-5722.

[9] Dawn, S.S.; and Vishwakarma, V. Recovery and recycle of wastewater contaminated with heavy metals using adsorbents incorporated from waste resources and nanomaterials-A review. Chemosphere. 273(2021): 129677.

[10] Arampatzidou, A.C.; and Deliyanni, E.A. Comparison of activation media and pyrolysis temperature for activated carbons development by pyrolysis of potato peels for effective adsorption of endocrine disruptor bisphenol-A. J. Colloid Interface Sci., 466(2016): 101-112.

[11] Srisompun, O.; Sinsir, N.; Simla, S.; Boontang, S.; and Butso, W. Demands and consumption behavior of papaya salad restaurants in the mid northeastern part. Khon Kaen Agr. J. 46(2018): 702-707.

[12] Shooto, N.D.; and Naidoo, E.B. Detoxification of Wastewater by Paw-Paw (Carica papaya L.) Seeds Adsorbents. Asian J. Chem. 31(2019): 2249-2256.

[13] Ihsanullah; Al-Khalidi, F.A.; Abu-Sharkh, B.; Abulkibash, A.M.; Qureshi, M.I.; Laoui, T.; and Atieh, M.A. Effect of acid modification on adsorption of hexavalent chromium (Cr(VI)) from aqueous solution by activated carbon and carbon nanotubes. Desalination

Water Treat. 57(2015): 7232-7244.

[14] Yang, T.; Hu, X.; Zhang, P.; Chen, X.; Wang, W.; Wang, Y.; Liang, Q.; Zhang, Y.; and Huang, Q. Study of pre-treatment of quinoline in aqueous solution using activated carbon made from low-cost agricultural waste (walnut shells) modified with ammonium persulfate. Water Sci. Technol. 79(2019): 2086-2094.

[15] Xue, Y.; Gao, B.; Yao, Y.; Inyang, M.; Zhang, M.; Zimmerman, A.R.; and Ro, K.S. Hydrogen peroxide modification enhances the ability of biochar (hydrochar) produced from hydrothermal carbonization of peanut hull to remove aqueous heavy metals: Batch and column tests. Chem. Eng. J. 200-202(2012): 673-680.

[16] Al-Rawajfeh, A.E.; and Al-Shamaileh, E.M. Inhibition of corrosion in steel water pipes by ammonium pyrrolidine dithiocarbamate (APDTC). Desalination. 206(2007): 169-178.

[17] Morita, F.; Nakakubo, K.; Yunoshita, K.; Endo, M.; Biswas, F.B.; Nishimura, T.; Mashio, A.S.; Hasegawa, H.; Taniguchi, T.; and Maeda, K. Dithiocarbamate-modified cellulose-based sorbents with high storage stability for selective removal of arsenite and hazardous heavy metals. RSC Adv. 10(2020): 30238-30244.

[18] Fu, W.; and Huang, Z. Magnetic dithiocarbamate functionalized reduced graphene oxide for the removal of Cu(II), Cd(II), Pb(II), and Hg(II) ions from aqueous solution: Synthesis, adsorption, and regeneration. Chemosphere. 209(2018): 449-456.

[19] Londhe, V.; and R. Shirsat. Formulation and characterization of fast-dissolving

Sublingual film of loperidone using Box-Behnken design for enhancement of oral bioavailability. AAPS PharmSciTech. 19(2018): 1392-1400.

[20] Bezerra, M.A.; Santelli, R.E.; Oliveira, E.P.; Villar, L.S.; and Escalera, L.A. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. Talanta. 76(2008): 965-977.

[21] พีรพัฒน์ อันโต. การชะละลายของโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2549.

[22] นรมน อินทรานนท์. การเดินทางของตะกั่วในแบตเตอรี่ตะกั่วกรด, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ: ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีวัสดุเพื่อสิ่งแวดล้อม หน่วยวิจัยด้านสิ่งแวดล้อม. 2560.

[23] เอมมา อาสนจินดา. ผลของสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วจากสารละลายด้วยโคโตนแบบโครมรูปร่างตาข่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.

[24] พิมลพันธ์ อุดทาพันธ์. การกำจัดโลหะหนักโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2553.

[25] กิตติพันธ์ บางยี่ขัน. โลหะกับการพัฒนาประเทศ, สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่: กรุงเทพฯ. 2551.

[26] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ, วิทยานิพนธ์ปริญญาคุษฎีบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. 2558.

[27] สันหัตต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์. ระบบบำบัดน้ำเสีย: Wastewater Treatment System. สำนักพิมพ์ท็อป:กรุงเทพฯ. 2549.

[28] Wang, J.; and Guo, X. Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. J. Hazard. Mater. 390(2020): 122156.

[29] ณัฐ ดิลกเกียรติ. ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินตำผสมกะลามะพร้าวหรือกะลาปาล์มเพื่อการดูดซับเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2546.

[30] Singh, S.P.; and Rao, D.V.S. 6 - Papaya (*Carica papaya* L.). In E.M. Yahia (ed.), Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits, pp. 86-126e. Woodhead Publishing, 2011.

[31] Martial-Didier, A.K.; Hubert, K.K.; Parfait, K.E.J.; and Kablan, T. Phytochemical Properties and Proximate Composition of Papaya (*Carica papaya* L. var solo 8) Peels. TURJAF. 5(2017): 676-680.

[32] He, Z.-Y.; Christopher, B.-W.; Zhou, Y.-T.; Nie, H.-L.; Zhu, L.-M. Papain Adsorption on Chitosan-Coated Nylon-Based Immobilized Metal Ion (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+}) Affinity Membranes. Sep. Sci. Technol. 45(2010): 525-534.

[33] Cahyaningrum, S.E.; Narsito, Santoso, S.J.; and Agustini, R. Preparation and properties of papain immobilized onto metal ions cross-linked chitosan beads. Res. J. Pharm. Biol. Chem. Sci. 4(2013): 120-126.

[34] Yuhai, H.; bin Tuan Chik, S.M.S.; and Chong, F.C. Purification of papain from unclarified papaya juice using reversed phase expanded bed adsorption chromatography (RP-EBAC). J. Ind. Eng. Chem. 20(2014): 4293-4297.

[35] Moon, S.-K.; Jung, S.-Y.; Choi, Y.-H.; Lee, Y.-C.; Patterson, C.; and Kim, C.-H., PDTC, metal chelating compound, induces G1 phase cell cycle arrest in vascular smooth muscle cells through inducing p21Cip1 expression: Involvement of p38 mitogen activated protein kinase. J. Cell. Physiol. 198(2004): 310-323.

[36] Chen, J.; Du, C.; Kang, J.; and Wang, J. Cu^{2+} is required for pyrrolidine dithiocarbamate to inhibit histone acetylation and induce human leukemia cell apoptosis. Chem. Biol. Interact. 171(2008): 26-36.

[37] Ammonium 1-pyrrolidinedithiocarbamate. แหล่งที่มา:

<https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/product/sigma/p8765> [2022, May 25]

[38] Saeed, A.; Akhter, M.W.; and Iqbal, M. Removal and recovery of heavy metals from aqueous solution using papaya wood as a new biosorbent. Sep. Purif. Technol. 45(2005): 25-31.

[39] Dada, A.O.; Olalekan, A.P.; Olatunya, A.M.; and DADA, O. Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich Isotherms studies of equilibrium sorption of Zn^{2+} unto phosphoric acid modified rice husk. J. Appl. Chem. 3(2012): 38-45.

[40] Varank, G.; Demir, A.; Top, S.; Sekman, E.; and Bilgili, M. Removal of 4-nitrophenol from aqueous solution by natural low-cost adsorbents. Indian J. Chem. Technol. 19(2012): 7-25.

[41] Piccin, J.; Dotto, G.; and Pinto, L., Adsorption isotherms and thermochemical data of FD and C Red N° 40 binding by chitosan. Brazilian J. Chem. Eng. 28(2011): 295-304.

[42] Ayawei, N.; Ebelegi, A.N.; and Wankasi, D. Modelling and interpretation of adsorption isotherms. J. Chem. 2017(2017): 1-11.

[43] El-Naas, M., Alhajja, M.A. Chapter-12 Modelling of adsorption processes, In C.R. Brennan (ed.), Mathematical modelling, pp. 579-600. Nova Publishers Inc., UAE, 2013.

[44] Ali, R.M.; Hamad, H.A.; Hussein, M.M.; and Malash, G.F. Potential of using green adsorbent of heavy metal removal from aqueous solutions: Adsorption kinetics, isotherm, thermodynamic, mechanism and economic analysis. Ecol. Eng. 91(2016): 317-332.

[45] Ghasemi, M.; Ghasemi, N.; Zahedi, G.; Wan Alwi, S.R.; Goodarzi, M.; and Javadian, H. Kinetic and equilibrium study of Ni(II) sorption from aqueous solutions onto Peganum

harmala-L. Int. J. Environ. Sci. Technol. 11(2014): 1835-1844.

[46] Salam, M.A.; El-Shishtawy, R.M.; and Obaid, A.Y. Synthesis of magnetic multi-walled carbon nanotubes/magnetite/chitin magnetic nanocomposite for the removal of Rose Bengal from real and model solution. J. Ind. Eng. Chem. 20(2014): 3559-3567.

[47] เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย, กระทรวงการพิมพ์: กรุงเทพฯ, 2539.

[48] Chatterjee, A.; and Abraham, J. Desorption of heavy metals from metal loaded sorbents and e-wastes: A review. Biotechnol. Lett. 41(2019): 319-333.

[49] ธนากร กุณแสง. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับสกัดแพลทินัมด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวไอออนิกที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2561.

[50] Palanikumar, K. and Davim, J.P. 5 - Electrical discharge machining: study on machining characteristics of WC/Co composites, In J.P. Davim(ed.), Machining and machine-tools, pp. 135-168. Woodhead Publishing, 2013.

[51] ธนพงศ์ ปัญจิต. สหสัมพันธ์สำหรับจำลองคุณลักษณะของกระบวนการเชื่อมเลเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554.

[52] Abbaszadeh, S.; Alwi, S.R.W.; Ghasemi, N.; Nodeh, H.R.; Webb, C.; and Muhamad, I.I. Use of pristine papaya peel to remove Pb(II) from aqueous solution. Chem. Eng. Trans.

45(2015): 961-966.

[53] Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer – SEM-EDS (IT300). แหล่งที่มา : <https://strec.chula.ac.th/equipments-rates/scanning-electron-microscope-and-energy-dispersive-x-ray-spectrometer-sem-eds-it300> [2022, May 25]

[54] Micromeritics 3Flex adsorption Analyzer. แหล่งที่มา:
<https://www.micromeritics.com/3flex/> [2022, May 25]

[55] Bruker's INVENIO-S research FT-IR spectrometer. แหล่งที่มา:
<https://www.spectroscopyeurope.com/product/brukers-invenio-s-research-ft-ir-spectrometer> [2022, May 25]

[56] Flame Atomic Absorption Instruments - 280FS AA. แหล่งที่มา:
<https://www.agilent.com/en/product/atomic-spectroscopy/atomic-absorption/flame-atomic-absorption-instruments/280fs-aa> [2022, May 25]

[57] Boudrahem, F.; Aissani-Benissad, F.; and Soualah, A. Adsorption of lead(II) from aqueous solution by using leaves of date trees as an adsorbent. J. Chem. Eng. Data. 56(2011): 1804-1812.

[58] Raju, D.S.S.R.; Rao, V.N.; Prasad, P.R.; and Babu, N.C. Sorption of lead(II) ions from wastewater using carica papaya leaf powder. IJESAT. 2(2012): 1577-1581.

- [59] Chairgulprasert, V.; Japakeya, A.; and Samaae, H. Phytoremediation of synthetic wastewater by adsorption of lead and zinc onto *Alpinia galanga* Willd. Songklanakarin J. Sci. Technol. 35(2013): 227-233.
- [60] Darvanjooghi, M.H.K.; Davoodi, S.M.; Dursun, A.Y.; Ehsani, M.R.; Karimpour, I.; and Ameri E., Application of treated eggplant peel as a low-cost adsorbent for water treatment toward elimination of Pb^{2+} : Kinetic modeling and isotherm study. Adsorp. Sci. Technol. 36(2018): 1112-1143.
- [61] Singanan, M. Removal of lead(II) and cadmium(II) ions from wastewater using activated biocarbon. Sci. Asia. 37(2011): 115-119.
- [62] El-Damarawy, Y.A.; Saleh, M.E.; Assaad, F.F.; Abdel-Salam, A.-S.A.; and Youssef, R.A. Adsorption of lead onto a waste biomaterial-biochar. Nat. Sci. 15(2017): 154-164.
- [63] Zvinowanda, C.M.; Okonkwo, J.O.; Agyei, N.M.; Staden, M.V.; Jordaan, W.; and Kharebe, B.V. Recovery of lead(II) from aqueous solutions by *Zea mays* Tassel biosorption. Am. J. Biochem. Biotechnol. 6(2010): 1-10.
- [64] Oladipo, B.; Ojumu, T.V.; Latinwo, L.M.; and Betiku, E. Pawpaw (*Carica papaya*) peel waste as a novel green heterogeneous catalyst for Moringa oil methyl esters synthesis: Process optimization and kinetic study. Energies. 13(2020): 1-25.
- [65] Scimeca, M.; Bischetti, S.; Lamsira, H.K.; Bonfiglio, R.; and Bonanno, E. Energy Dispersive X-ray (EDX) microanalysis: A powerful tool in biomedical research and diagnosis. Eur. J. Histochem. 62(2018): 2841.

[66] Chen, H.M.; Fu, X.; and Luo, Z.G. Esterification of sugar beet pectin using octenyl succinic anhydride and its effect as an emulsion stabilizer. Food Hydrocoll. 49(2015): 53-60.

[67] Fatombi, J.K.; Ossen, S.A.; Idohou, E.A.; Agani, I.; Neumeyer, D.; Verelst, M.; Mauricot, R.; and Aminou, T. Characterization and application of alkali-soluble polysaccharide of *Carica papaya* seeds for removal of indigo carmine and Congo red dyes from single and binary solutions. J. Environ. Chem. Eng. 7(2019): 103343.

[68] Yargıç, A.Ş.; Şahin, R.Z.Y.; Özbay, N.; and Önal, E. Assessment of toxic copper(II) biosorption from aqueous solution by chemically-treated tomato waste. J. Clean. Prod. 88(2015): 152-159.

[69] Gómez-Ordóñez, E.; and Rupérez, P. FTIR-ATR spectroscopy as a tool for polysaccharide identification in edible brown and red seaweeds. Food Hydrocoll. 25(2011): 1514-1520.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

[70] Fanta, G.F.; Salch, J.H. Analysis of polysaccharide-poly(ethylene-co-acrylic acid) composites by fourier-transform infrared spectroscopy. Carbohydr. Polym. 14(1991): 393-409.

[71] Iqbal, M.; Saeed, A.; and Zafar, S.I. FTIR spectrophotometry, kinetics and adsorption isotherms modeling, ion exchange, and EDX analysis for understanding the mechanism of Cd²⁺ and Pb²⁺ removal by mango peel waste. J. Hazard. Mater. 164(2009): 161-171.

- [72] Oikonomopoulos, I.; Perraki, T.; and Tougiannidis, N. FTIR study of two different lignite lithotypes from Neocene Achlada lignite deposits in NW Greece. BGS. 5(2010): 2284-2293.
- [73] Zheng, L.; Wang, W.; Li, Z.; Zhang, L.; and Cheng, S. Immobilization of heavy metal using dithiocarbamate agent. J. Mater. Cycles Waste Manag. 21(2019): 652-658.
- [74] Abu-El-Halawa, R.; and Zabin, S.A. Removal efficiency of Pb, Cd, Cu and Zn from polluted water using dithiocarbamate ligands. J. Taibah Univ. Sci. 11(2017): 57-65.
- [75] Li, B.; Guo, J.-Z.; Liu, J.-L.; Fang, L.; Lv, J.-Q.; and Lv, K. Removal of aqueous-phase lead ions by dithiocarbamate-modified hydrochar. Sci. Total Environ. 714(2020): 136897.
- [76] Zhang, W.; Lan, Y.; Ma, M.; Chai, S.; Zuo, Q.; Kim, K.-H.; and Gao, Y. A novel chitosan-vanadium-titanium-magnetite composite as a superior adsorbent for organic dyes in wastewater. Environ Int. 142(2020): 105798.
- [77] Singh, R.; and Bhatia, R. Optimization and experimental design of the Pb²⁺adsorption process on a nano-Fe₃O₄-based adsorbent using the response surface methodology. ACS Omega. 5(2020): 28305-28318.
- [78] Alkarkhi, A.F.M. 6 - The observed significance level (P-value) procedure. In A.F.M. Alkarkhi(ed.), Applications of Hypothesis Testing for Environmental Science, pp. 79-119. Elsevier, 2021.

- [79] Uçurum, M.; Özdemir, A.; Teke, C.; Serencam, H.; and İpek, M. Optimization of adsorption parameters for Ultra-Fine calcite using a Box-Behnken experimental design. Open Chem. 16(2018): 992-1000.
- [80] Aliyu, A. Synthesis, electron microscopy properties and adsorption studies of Zinc (II) ions (Zn^{2+}) onto as-prepared carbon nanotubes (CNTs) using Box-Behnken design (BBD). Sci. Afr. 3(2019): e00069.
- [81] Rai, P.; Pandey, A.; and Pandey, A. Optimization of sugar release from banana peel powder waste (BPPW) using box-behnken design (BBD): BPPW to biohydrogen conversion. Int. J. Hydrog. Energy. 44(2019): 25505-25513.
- [82] Sharma, S.; Malik, A.; and Satya, S. Application of response surface methodology (RSM) for optimization of nutrient supplementation for Cr(VI) removal by *Aspergillus lentulus* AML05. J. Hazard. Mater. 164(2009): 1198-1204.
- [83] Adel, A. Incorporation of nano-metal particles with paper matrices. Interdiscip. J. Chem. 1(2016): 36-46.
- [84] Danyang, L.; Yimin, D.; Shengyun, W.; Qi, L.; Ling, C.; Zhiheng, W.; Chengqian, F.; and Pengmian, H. Facile synthesis of layered core-shell structure Fe_3O_4 magnetic composites and its application for the Co^{2+} removal. J. Mol. Liq. 325(2021): 114517.
- [85] Yin, Z.; Qiu, D.; and Zhang, M. Molecular level study of cadmium adsorption on dithiocarbamate modified chitosan. Environ. Pollut. 271(2021): 116322.

[86] Nandiyanto, A.; Girsang, G.; Maryanti, R.; Ragadhita, R.; Anggraeni, S.; Fauzi, F.; Sakinah, P.; Astuti, A.; Usdiyana, D.; Dewi, M.; and Al-Obaidi, A.S. Isotherm adsorption characteristics of carbon microparticles prepared from pineapple peel waste. CST. 5(2020): 31-39.

[87] Desta, M.B. Batch sorption experiments: Langmuir and Freundlich Isotherm studies for the adsorption of textile metal ions onto Teff Straw (*Eragrostis tef*) agricultural waste, J. Thermodyn. 2013(2013): 375830.

[88] Huang, H.; Fan, Y.; Wang, J.; Gao, H.; and Tao, S. Adsorption kinetics and thermodynamics of water-insoluble crosslinked β -cyclodextrin polymer for phenol in aqueous solution. Macromol. Res. 21(2013): 726-731.

[89] Kul, A.R.; and Caliskan, N. Equilibrium and kinetic studies of the adsorption of Zn(II) ions onto natural and activated kaolinites. Adsorp. Sci. Technol. 27(2009): 85-105.

[90] Özcan, A.S.; Erdem, B.; and Özcan, A. Adsorption of Acid Blue 193 from aqueous solutions onto Na-bentonite and DTMA-bentonite. J. Colloid Interface Sci. 280(2004): 44-54.

[91] Carvalho, L.; Chagas, P.; and Pinto, L. *Caesalpinia ferrea* fruits as a biosorbent for the removal of Methylene Blue dye from an aqueous medium. Water Air Soil Pollut. 229(2018): 1-13.

[92] Cheng, C.S.; Deng, J.; Lei, B.; He, A.; Zhang, X.; Ma, L.; Li, S.; and Zhao, C. Toward 3D graphene oxide gels based adsorbents for high-efficient water treatment via the

promotion of biopolymers. J. Hazard. Mater. 263(2013): 467-478.

[93] Yadav, S.K.; Singh, D.K.; and Sinha, S. Chemical carbonization of papaya seed originated charcoals for sorption of Pb (II) from aqueous solution. J. Environ. Chem. Eng. 2(2014): 9-19.

[94] Olu-Owolabi, B.I.; Diagboya, P.N.; Unuabonah, E.I.; Alabi, A.H.; Düring, R.A.; and Adebowale, K.O. Fractal-like concepts for evaluation of toxic metals adsorption efficiency of feldspar-biomass composites. J. Clean. Prod. 171(2018): 884-891.

[95] Mousavi, H.; Hosseynifar, A.; Jahed, V.; and Dehghani, S. Removal of lead from aqueous solution using waste tire rubber ash as an adsorbent. Braz. J. Chem. Eng. 27(2010): 79-87.

[96] Abubakar, A.; Sabo, I.A.; and Yahuza, S. Thermodynamics modelling of lead (II) biosorption using *Cystoseira stricta* biomass. BSTR. 8(2020): 21-23.

[97] Kumar, R.; Ansari, M.O.; Alshahrie, A.; Darwesh, R.; Parveen, N.; Yadav, S.K.; Barakat, M.A.; and Cho, M.H., Adsorption modeling and mechanistic insight of hazardous chromium on para toluene sulfonic acid immobilized-polyaniline@CNTs nanocomposites. J. Saudi Chem. Soc. 23(2019): 188-197.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

1. การศึกษาปริมาณของสารละลาย PDTC ที่เหมาะสมสำหรับใช้ปรับปรุงตัวดูดซับ PP

ตารางที่ 1ก ผลการศึกษาปริมาณของสารละลาย PDTC

ร้อยละโดยน้ำหนักของ ปริมาณผง PDTC ต่อ ปริมาณ PP	ความเข้มข้นตะกั่ว ก่อนดูดซับ (mg/l)	ความเข้มข้นตะกั่ว หลังดูดซับ (mg/l)	ร้อยละการดูดซับ
1	96.88	1.40	98.56
25	96.88	0.78	99.19
50	96.88	0.80	99.17
75	96.88	0.79	99.18
100	96.88	0.74	99.24

***หมายเหตุ ค่าจากการทดลองได้จากการทำการทดลอง 1 ครั้ง

2. ศึกษาขอบเขตการคัดเลือกตัวแปรเข้าโปรแกรม เพื่อออกแบบการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ (ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ปริมาณตัวดูดซับ)

ตารางที่ 2ก การทดลองตัวแปรค่าปริมาณตัวดูดซับของกระบวนการดูดซับ ภายใต้สภาวะ : ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, เวลาในการดูดซับ 3 ชั่วโมง

ปริมาณตัวดูดซับ (g) ต่อ 50 ml	ค่าควบคุม	ค่าการทดลอง		
	C_0 (mg/l)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	ร้อยละการดูดซับ
0.1	50	47.99	17.37	63.81
0.2	50	47.99	13.39	72.10
0.3	50	47.99	10.40	78.33
0.4	50	47.99	8.28	82.75
0.5	50	47.99	6.59	86.27
0.6	50	47.99	5.09	89.39
0.7	50	47.99	3.48	92.75
0.8	50	47.99	2.94	93.87
0.9	50	47.99	2.46	94.87
1.0	50	47.99	2.28	95.25

***หมายเหตุ ค่าจากการทดลองได้จากการทำการทดลอง 1 ครั้ง

ตารางที่ 3ก การทดลองตัวแปรค่าความเป็นกรด-ด่างของกระบวนการดูดซับ ภายใต้สภาวะ : ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตร, เวลาในการดูดซับ 3 ชั่วโมง

ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ค่าควบคุม	ค่าการทดลอง		
	C_0 (mg/l)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	ร้อยละการดูดซับ
1.72	50	47.99	6.59	86.27
4	50	47.99	2.46	94.87
6	50	47.99	2.04	95.75
8	50	47.99	4.22	91.21
10	50	47.99	3.74	92.21

***หมายเหตุ ค่า pH 1.72 เป็นค่า pH ของสารละลายตะกั่วที่ ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ

ค่าจากการทดลองได้จากการทดลอง 1 ครั้ง

3. ผลการทดลองจากวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบล็อก-เบห์นเคน

ตารางที่ 4ก ผลการทดลอง 27 การทดลอง จากวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบล็อก-เบห์นเคน

ลำดับ	ค่าการควบคุม				ค่าการทดลอง			
	C ₀ (mg/l)	pH	ปริมาณตัว ดูดซับ (g/50ml)	เวลา (ชั่วโมง)	C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)	ร้อยละการดูด ซับ	q _e (mg/g)
1	10	4	0.55	2	10.22	0.540	94.72	0.88
2	100	4	0.55	2	99.97	3.254	96.75	8.79
3	10	6	0.55	2	6.91	0.252	96.34	0.61
4	100	6	0.55	2	93.46	5.230	94.40	8.02
5	55	5	0.1	1	54.99	6.690	87.83	24.15
6	55	5	1	1	54.99	2.170	96.05	2.64
7	55	5	0.1	3	52.84	4.330	91.81	24.26
8	55	5	1	3	52.84	1.270	97.60	2.58
9	10	5	0.55	1	10.30	0.410	96.02	0.90
10	100	5	0.55	1	99.90	5.982	94.01	8.54
11	10	5	0.55	3	9.75	0.387	96.04	0.85
12	100	5	0.55	3	98.56	3.060	96.90	8.68
13	55	4	0.1	2	54.78	5.630	89.72	24.58
14	55	6	0.1	2	52.03	4.430	91.49	23.80
15	55	4	1	2	54.78	2.140	96.09	2.63
16	55	6	1	2	52.03	1.960	96.23	2.50
17	10	5	0.1	2	9.75	0.340	96.51	4.71
18	100	5	0.1	2	98.56	16.200	83.56	41.18
19	10	5	1	2	9.75	0.843	91.34	0.45
20	100	5	1	2	98.56	0.133	99.87	4.92
21	55	4	0.55	1	56.06	2.470	95.59	4.87
22	55	6	0.55	1	52.03	2.570	95.06	4.50
23	55	4	0.55	3	54.78	1.590	97.10	4.84
24	55	6	0.55	3	52.03	1.220	97.66	4.62
25	55	5	0.55	2	52.84	1.860	96.48	4.64
26	55	5	0.55	2	51.83	1.560	96.99	4.57
27	55	5	0.55	2	52.84	1.827	96.54	4.64

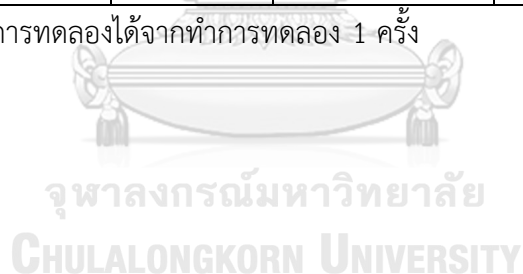
***หมายเหตุ ค่าจากการทดลองได้จากการทำการทดลอง 1 ครั้ง

4. การศึกษาไอโซเทอม

ตารางที่ 5ก ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของตะกั่ว โดยใช้ PP เป็นตัวดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน ทดลองภายใต้สภาวะ: ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4, เวลาในการดูดซับ 3 ชั่วโมง, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ความเร็วรอบในการปั่นกววน 200 รอบต่อนาที

ความเข้มข้น ของตะกั่ว (mg/l)	ค่าการทดลอง				
	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	ปริมาณตัวดูดซับ (g/50 ml)	q_e (mg/g)	ร้อยละการดูดซับ
10	10.20	0.38	0.7304	0.67	96.27
30	29.68	0.71	0.7306	1.98	97.61
50	47.33	1.20	0.7308	3.16	97.47
70	69.52	1.44	0.7302	4.66	97.89
90	91.56	2.00	0.7305	6.13	98.47
110	111.69	2.44	0.7303	7.48	97.59

***หมายเหตุ ค่าจากการทดลองได้จากการทำการทดลอง 1 ครั้ง



ตารางที่ 6ก ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของตะกั่ว โดยใช้ PP-PDTC เป็นตัวดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน ทดลองภายใต้สภาวะ: ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4, เวลาในการดูดซับ 3 ชั่วโมง, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ความเร็วรอบในการปั่นกววน 200 รอบต่อนาที

ความเข้มข้น ของตะกั่ว (mg/l)	ค่าการทดลอง				
	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	ปริมาณตัวดูดซับ (g/50 ml)	q_e (mg/g)	ร้อยละการดูดซับ
10	9.57	0.33	0.7302	0.63	96.55
30	29.2	0.49	0.7305	1.97	98.32
50	48.31	0.69	0.7306	3.26	98.57
70	69.57	0.88	0.7306	4.70	98.74
90	89.63	1.34	0.7304	6.04	98.51
110	112.61	1.79	0.7304	7.59	98.41

***หมายเหตุ ค่าจากการทดลองได้จากการทำการทดลอง 1 ครั้ง



5. การศึกษาจลนพลศาสตร์

ตารางที่ 7ก ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของตะกั่วโดยใช้ PP เป็นตัวดูดซับ ที่เวลาต่างกัน ทดลองภายใต้สภาวะ: ค่าค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ความเร็วรอบในการปั่นกววน 200 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าการทดลอง				
	C_o (mg/l)	C_e (mg/l)	ปริมาณตัวดูดซับ (g/ 50 ml)	q_t (mg/g)	ร้อยละการดูดซับ
3	94.15	12.72	0.7304	5.45	86.23
5	94.15	7.44	0.7307	5.81	91.95
15	94.15	5.83	0.7305	5.92	93.69
30	94.15	3.85	0.7302	6.18	95.91
60	94.15	3.49	0.7304	6.21	96.29
90	94.15	3.16	0.7307	6.23	96.64
120	94.15	2.51	0.7306	6.27	97.33
150	94.15	2.45	0.7305	6.28	97.40
180	94.15	2.36	0.7304	6.28	97.49
210	94.15	2.39	0.7305	6.28	97.46
240	94.15	2.20	0.7304	6.17	97.62

***หมายเหตุ ค่าจากการทดลองได้จากการทำการทดลอง 1 ครั้ง

ตารางที่ 8ก ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของตะกั่วโดยใช้ PP-PDTC เป็นตัวดูดซับ ที่เวลาต่างกัน ทดลองภายใต้สภาวะ: ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส, ความเร็วรอบในการปั่นกววน 200 รอบต่อนาที

เวลา (นาทีก)	ค่าการทดลอง				
	C_o (mg/l)	C_e (mg/l)	ปริมาณตัวดูดซับ (g/ 50ml)	q_t (mg/g)	ร้อยละการดูดซับ
3	92.99	4.67	0.7304	6.05	94.98
5	92.99	4.48	0.7305	6.06	95.18
15	92.99	2.51	0.7306	6.19	97.30
30	92.99	2.36	0.7303	6.21	97.46
60	92.99	2.23	0.7303	6.21	97.60
90	92.99	1.82	0.7307	6.24	98.04
120	92.99	1.72	0.7305	6.25	98.15
150	92.99	1.64	0.7305	6.25	98.24
180	92.99	1.67	0.7305	6.25	98.20
210	92.99	1.69	0.7305	6.25	98.18
240	92.99	1.65	0.7307	6.25	98.23

***หมายเหตุ ค่าจากการทดลองได้จากการทำการทดลอง 1 ครั้ง

6. การศึกษาอุณหพลศาสตร์

ตารางที่ 9ก ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของตะกั่วโดยใช้ PP เป็นตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิต่างกัน ทดลองภายใต้สภาวะ: ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4, ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 96.5 มิลลิกรัมต่อลิตร, ปริมาณตัวดูดซับ 0.73 กรัม ความเร็วรอบในการปั่นกววน 200 รอบต่อนาที

	T (°C)	ค่าการทดลอง					
		C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	ปริมาณตัวดูดซับ (g/ 50 ml)	q_e (mg/g)	q_e/C_e	$\ln K_c$
PP	30	96.81	2.02	0.7305	6.49	3.21	1.17
	50	96.81	1.64	0.7307	6.51	3.97	1.38
	70	96.81	1.08	0.7305	6.55	6.07	1.80
PP-PDTC	30	96.81	1.44	0.7304	6.53	4.53	1.51
	50	96.81	1.32	0.7302	6.54	4.95	1.60
	70	96.81	1.21	0.7304	6.54	5.41	1.69

***หมายเหตุ ค่าการทดลองได้จากการทดลอง 1 ครั้ง



7. การศึกษาการคายซับ

ตารางที่ 10ก ผลการทดลองการคายซับของสารตะกั่ว โดยใช้ PP และ PP-PDTC เป็นตัวดูดซับ และใช้กรดไนตริกเป็นสารชะที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้นของกรดไนตริก (M)	ร้อยละการคายซับ	
	PP	PP-PDTC
0.05	19.02	2.22
0.1	24.85	9.92
1	31.69	65.69
3	77.16	92.79
5	72.54	89.54

***หมายเหตุ ค่าการทดลองได้จากการทำการทดลอง 1 ครั้ง

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณ

1. การคำนวณร้อยละของการดูดซับ

จากสมการที่ 2.2

$$\text{ร้อยละของการดูดซับ} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (2.2)$$

ตัวอย่างการคำนวณ กำหนดให้ C_0 เท่ากับ 96.5 มิลลิกรัมต่อลิตร, C_e เท่ากับ 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร

นำมาแทนค่าในสมการที่ 2.2 จะได้

$$\text{ร้อยละของการดูดซับ} = \frac{(96.5 - 0.8)}{96.5} \times 100$$

ดังนั้น ร้อยละของการดูดซับเท่ากับ 99.17

2. การคำนวณไอโซเทอม

2.1 การคำนวณไอโซเทอมแบบแลงเมียร์

ตารางที่ 1x ตารางแสดงผลการทดลองไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับตะกั่วโดยใช้ตัวดูดซับ

PP (ใช้ตัวหนาเป็นตัวอย่างในการคำนวณ)

ค่าควบคุม	ค่าการทดลอง			ค่าการคำนวณ		
	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	ปริมาณตัวดูดซับ (g/50ml)	q_e (mg/g)	$1/q_e$	$1/C_e$
10	10.20	0.38	0.7304	0.67	1.49	2.63
30	29.68	0.71	0.7306	1.98	0.50	1.41
50	47.33	1.20	0.7308	3.16	0.32	0.83
70	69.52	1.44	0.7302	4.66	0.22	0.69
90	91.56	2.00	0.7305	6.13	0.16	0.50
110	111.69	2.44	0.7303	7.48	0.13	0.41

1. พิจารณาผลการทดลองตาราง ค่า C_0 และ C_e ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อหาปริมาณตะกั่ว มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ปริมาณตัวดูดซับได้จากการชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง หน่วยเป็นกรัม
3. คำนวณค่า q_e
 - หาค่า จากสมการที่ 2.1

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

(2.1)

ตัวอย่างการคำนวณ จากตารางที่ 1x ค่า $C_0 = 10.20$ มิลลิกรัมต่อลิตร $C_e = 0.38$ มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณตัวดูดซับ = 0.7304 กรัม $V = 0.05$ ลิตร และแทนค่า

$$q_e = \frac{0.05(10.20-0.38)}{0.7304}$$

จะได้ q_e เท่ากับ 0.67 มิลลิกรัมต่อกรัม

1. คำนวณค่า $1/q_e$

จะได้ $1/0.67 = 1.49$

2. คำนวณ ค่า $1/C_e$

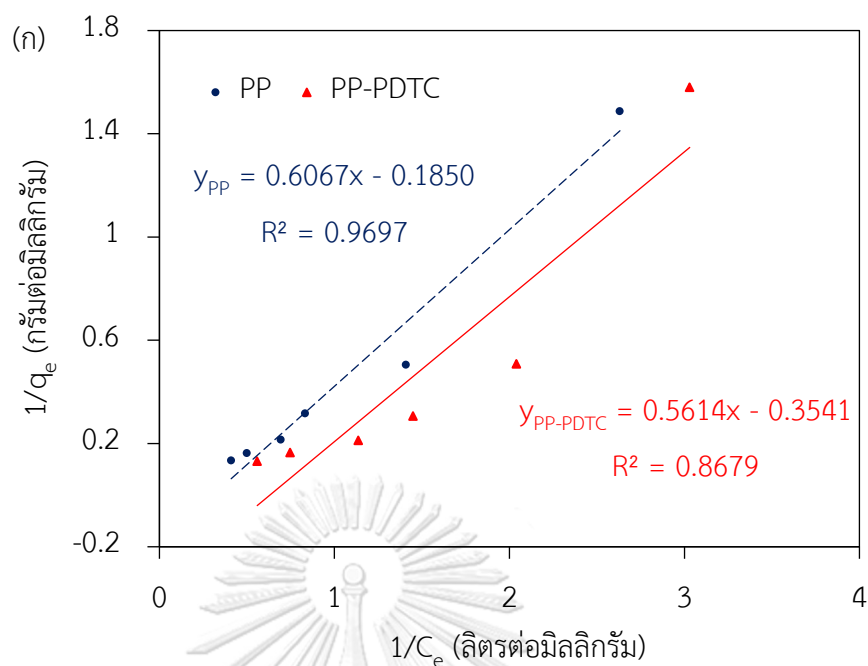
จะได้ $1/0.38 = 2.63$

3. เมื่อได้ค่า $1/q_e$ และ $1/C_e$ จงครบทุกความเข้มข้นแล้วนำมาพล็อตกราฟ เพื่อหาค่าความชันและจุดตัดแกน y ตามสมการที่ (2.4)

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \left(\frac{1}{K_L q_m C_e} \right) \quad (2.4)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะได้กราฟตามภาพ ก **CHULALONGKORN UNIVERSITY**



4. คำนวณค่าจุดตัดแกน y และความชันโดยเทียบกับสมการ $y = mx + c$ จากการพล็อตกราฟ

เส้นตรง โดยพิจารณาสมการของตัวดูดซับ PP

จะได้ $y = 0.6067x - 0.1850$ นำไปเทียบกับสมการที่ (2.4)

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \left(\frac{1}{K_L q_m C_e} \right) \quad (2.4)$$

จะได้

- จุดตัดแกน $y = -0.1850 = 1/q_m$

ดังนั้น $q_m = 1 / -0.1850 = -5.405$

- ค่าความชัน $= 0.6067 = 1/K_L q_m$

- ดังนั้น $K_L = 1 / (0.6067 * (-5.405)) = -0.305$

2.2 การคำนวณไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช

ตารางที่ 2ข ตารางแสดงผลการทดลองไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชของการดูดซับตะกั่วโดยใช้ตัวดูดซับ

PP (ใช้ตัวหนาเป็นตัวอย่างในการคำนวณ)

ค่าควบคุม	ค่าการทดลอง			ค่าการคำนวณ		
	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	ปริมาณตัวดูดซับ (g/50ml)	q_e (mg/g)	$\log C_e$	$\log q_e$
10	10.20	0.38	0.7304	0.67	-0.42	-0.17
30	29.68	0.71	0.7306	1.98	-0.15	0.30
50	47.33	1.20	0.7308	3.16	0.08	0.50
70	69.52	1.44	0.7302	4.66	0.16	0.70
90	91.56	2.00	0.7305	6.13	0.30	0.79
110	111.69	2.44	0.7303	7.48	0.39	0.90

1. พิจารณาผลการทดลองตาราง ค่า C_0 และ C_e ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อหาปริมาณตะกั่ว มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ปริมาณตัวดูดซับได้จากการชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง หน่วยเป็นกรัม
3. คำนวณค่า q_e
 - หาค่า จากสมการที่ 2.1

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (2.1)$$

ตัวอย่างการคำนวณ จากตารางที่ 2ข ค่า $C_0 = 10.20$ มิลลิกรัมต่อลิตร $C_e = 0.38$ มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณตัวดูดซับ = 0.7304 กรัม $V = 0.05$ ลิตร และแทนค่า

$$q_e = \frac{0.05(10.20 - 0.38)}{0.7304}$$

จะได้ q_e เท่ากับ 0.67 มิลลิกรัมต่อกรัม

4. คำนวณค่า $\log q_e$

จะได้ $\log q_e = \log (0.67) = -0.17$

5. คำนวณ ค่า $\log C_e$

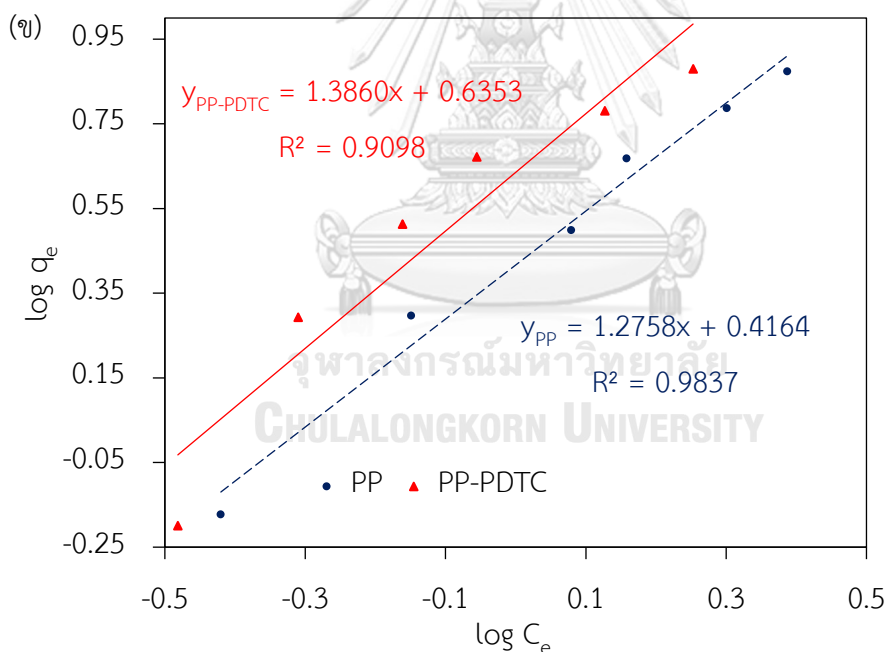
จะได้ $\log C_e = \log (0.38) = -0.42$

6. เมื่อได้ค่า $\log q_e$ และ $\log C_e$ จนครบทุกความเข้มข้นแล้วนำมาพล็อตกราฟ เพื่อหาค่า

ความชันและจุดตัดแกน y ตามสมการที่ (2.6)

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

จะได้กราฟตามภาพ ข



7. คำนวณค่าจุดตัดแกน y และความชันโดยเทียบกับสมการ $y = mx + c$ จากการพล็อตกราฟ

เส้นตรง โดยพิจารณาสมการของตัวดูดซับ PP

จะได้ $y = 1.2758x + 0.4164$ นำไปเทียบกับสมการที่ (2.6)

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

จะได้

- จุดตัดแกน $y = 0.4164 = \log K_F$

ดังนั้น $K_F = e^{(0.4164)} = 1.516$

- ค่าความชัน $= 1.2758 = 1/n$

- ดังนั้น $n = 1/1.2758 = 0.7838$

2.3 การคำนวณไอโซเทมแบบเทมกิน

ตารางที่ 3ข ตารางแสดงผลการทดลองไอโซเทมแบบเทมกินของการดูดซับตะกั่วโดยใช้ตัวดูดซับ

PP (ใช้ตัวหนาเป็นตัวอย่างในการคำนวณ)

ค่าควบคุม	ค่าการทดลอง			ค่าการคำนวณ	
	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	ปริมาณตัวดูดซับ (g/50ml)	q_e (mg/g)	$\ln C_e$
10	10.20	0.38	0.7304	0.67	-0.97
30	29.68	0.71	0.7306	1.98	-0.34
50	47.33	1.20	0.7308	3.16	0.18
70	69.52	1.44	0.7302	4.66	0.37
90	91.56	2.00	0.7305	6.13	0.69
110	111.69	2.44	0.7303	7.48	0.89

1. พิจารณาผลการทดลองตาราง ค่า C_0 และ C_e ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อหาปริมาณตะกั่ว มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ปริมาณตัวดูดซับได้จากการชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง หน่วยเป็นกรัม

3. คำนวณค่า q_e

- หาค่า จากสมการที่ 2.1

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (2.1)$$

ตัวอย่างการคำนวณ จากตารางที่ 3 ค่า $C_0 = 10.20$ มิลลิกรัมต่อลิตร $C_e = 0.38$ มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณตัวดูดซับ = 0.7304 กรัม $V = 0.05$ ลิตร และแทนค่า

$$q_e = \frac{0.05(10.20 - 0.38)}{0.7304}$$

จะได้ q_e เท่ากับ 0.67 มิลลิกรัมต่อกรัม

4. คำนวณ ค่า $\ln C_e$

$$\text{จะได้ } \ln(0.38) = -0.97$$

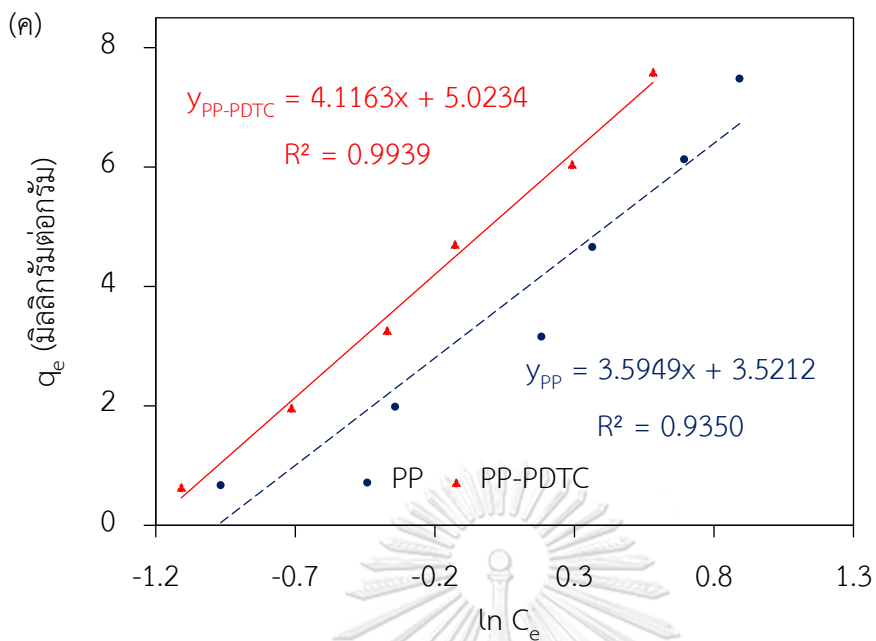
5. เมื่อได้ค่า q_e และ $\ln C_e$ จงครบทุกความเข้มข้นแล้วนำมาพล็อตกราฟ เพื่อหาค่าความชันและ

จุดตัดแกน y ตามสมการที่ (2.7)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$q_e = B \ln K_T + B \ln C_e \quad (2.7)$$

จะได้กราฟตามภาพ ค



6. คำนวณค่าจุดตัดแกน y และความชันโดยเทียบกับสมการ $y = mx + c$ จากการพล็อตกราฟ

เส้นตรง โดยพิจารณา (ตัวดูดซับ PP)

จะได้ $y = 3.5949x + 3.5212$ นำไปเทียบกับสมการที่ (2.7)

$$q_e = B \ln K_T + B \ln C_e \quad (2.7)$$

จะได้

- ค่าความชัน = 3.5949 = B

ดังนั้น B = 3.5949

- จุดตัดแกน y = 3.5212 = B ln K_T

ดังนั้น K_T = e^(3.5212/3.5949) = 2.663

2.4 การคำนวณไอโซเทอมแบบดูบิโน-ราตซ์เควิช

ตารางที่ 4x ตารางแสดงผลการทดลองไอโซเทอมแบบดูบิโน-ราตซ์เควิชของการดูดซับตะกั่วโดยใช้

ตัวดูดซับ PP (ใช้ตัวหนาเป็นตัวอย่างในการคำนวณ)

ค่าควบคุม	ค่าการทดลอง			ค่าการคำนวณ			
	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	ปริมาณตัวดูดซับ (g/50ml)	q_e (mg/g)	$\ln q_e$	ϵ	$\epsilon^2 \times 10^5$
10	10.20	0.38	0.7304	0.67	-0.40	3247.29	105.4
30	29.68	0.71	0.7306	1.98	0.68	2213.22	49.0
50	47.33	1.20	0.7308	3.16	1.15	1526.21	23.3
70	69.52	1.44	0.7302	4.66	1.54	1327.84	17.6
90	91.56	2.00	0.7305	6.13	1.81	1020.93	10.4
110	111.69	2.44	0.7303	7.48	2.01	864.84	7.50

- พิจารณาผลการทดลองตาราง ค่า C_0 และ C_e ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อหาปริมาณตะกั่ว มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร
- ปริมาณตัวดูดซับได้จากการชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง หน่วยเป็นกรัม
- คำนวณค่า q_e

- หาค่า จากสมการที่ 2.1

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (2.1)$$

ตัวอย่างการคำนวณ จากตารางที่ 4x ค่า $C_0 = 10.20$ มิลลิกรัมต่อลิตร $C_e = 0.38$ มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณตัวดูดซับ = 0.7304 กรัม $V = 0.05$ ลิตร และแทนค่า

$$q_e = \frac{0.05(10.20 - 0.38)}{0.7304}$$

จะได้ q_e เท่ากับ 0.67 มิลลิกรัมต่อกรัม

4. คำนวณค่า $\ln q_e$

$$\text{จะได้ } \ln (0.67) = -0.40$$

5. คำนวณ ค่า \mathcal{E} จากสมการที่ (2.8)

$$\mathcal{E} = RT \ln \left[1 + \frac{1}{C_e} \right] \quad (2.8)$$

โดยที่ $R = 8.314$ จูลต่อโมลเคลวิน และ $T = 303$ เคลวิน

แทนค่า

$$\mathcal{E} = (8.314)(303) \ln \left[1 + \frac{1}{0.38} \right]$$

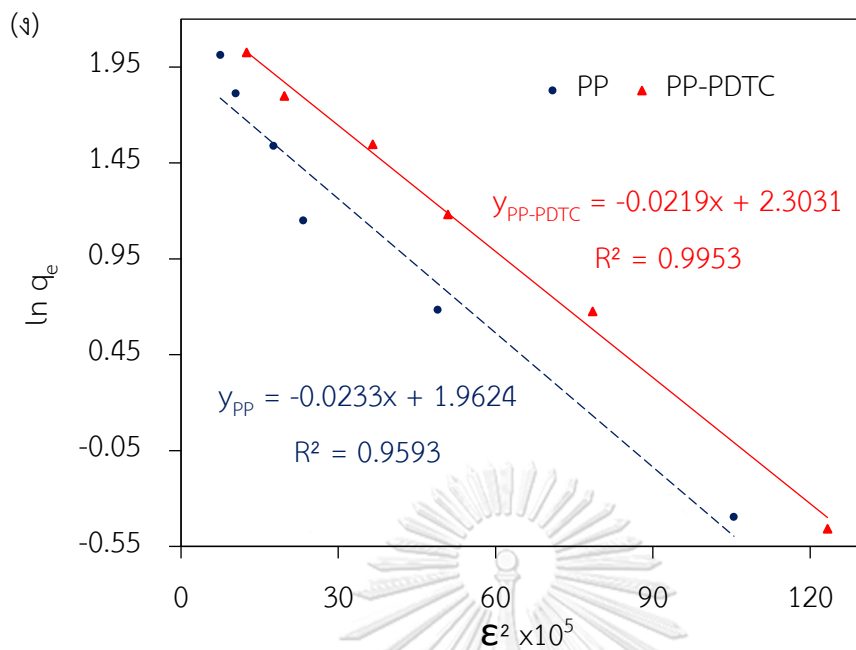
ดังนั้น $\mathcal{E} = 3247.29$

แล้วจะได้ $\mathcal{E}^2 = (3247.293)^2 = 105.4 \times 10^5$

6. เมื่อได้ค่า $\ln q_e$ และ \mathcal{E}^2 จงครบทุกความเข้มข้นแล้วนำมาพล็อตกราฟ เพื่อหาค่าความชันและจุดตัดแกน y ตามสมการที่ (2.9)

$$\ln q_e = \ln q_s - K_D \mathcal{E}^2 \quad (2.9)$$

จะได้กราฟตามภาพ ง



7. คำนวณค่าจุดตัดแกน y และความชันโดยใช้สมการ $y = mx+c$ จากการพล็อตกราฟเส้นตรง

โดยพิจารณาสมการของตัวดูดซับ PP

จะได้ $y = -0.0233x + 1.9624$ นำไปเทียบกับสมการที่ (2.9)

$$\ln q_e = \ln q_s - K_D E^2 \quad (2.9)$$

จะได้

- ค่าความชัน = $-0.0233 = -K_D$

- ดังนั้น $K_D = 0.0233$

- จุดตัดแกน $y = 1.9624 = \ln q_s$

ดังนั้น $q_s = e^{(1.9624)} = 7.116$

8. หาค่าพลังงานการดูดซับเฉลี่ย (E) จากสมการที่ (2.10)

$$E = \frac{1}{\sqrt{2K_D}} \quad (2.10)$$

แทนค่า K_D จะได้

$$E = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 0.0233}}$$

ดังนั้น $E = 4.632$ กิโลจูลต่อโมล

3. การคำนวณจลนพลศาสตร์

ตารางที่ 5x การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ PP และ PP-PDTC

ครั้งที่	C_e (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการดูดซับ		q_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	
	PP	PP-PDTC	PP	PP-PDTC	PP	PP-PDTC
1	2.42	0.80	97.48	99.17	6.444	6.555
2	2.36	1.09	97.49	98.83	6.448	6.535
3	2.35	0.63	97.56	99.35	6.449	6.566
ค่าเฉลี่ย			97.54 ± 0.02	99.13 ± 0.14	6.447 ± 0.001	6.552 ± 0.009

*** หมายถึง ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นครั้งที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 96.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วน

ความเข้มข้นเริ่มต้นของครั้งที่ 3 มีค่าเท่ากับ 96.50 มิลลิกรัมต่อลิตร

- สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.15)$$

1. คำนวณค่า q_e ซึ่งใช้ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากวิธีพื้นผิว

ตอบสนองที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 96.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.73 กรัมต่อ 50

มิลลิลิตร

- หาค่า q_e จาก สมการที่ (2.1)

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (2.1)$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ค่าของตัวเลขตาม ตารางที่ 5x ค่า $C_0 = 96.5$ มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ $V = 0.05$ ลิตร $m = 0.7301$

กรัม แทนค่า

$$q_e = \frac{0.05 (96.5 - 2.42)}{0.7301}$$

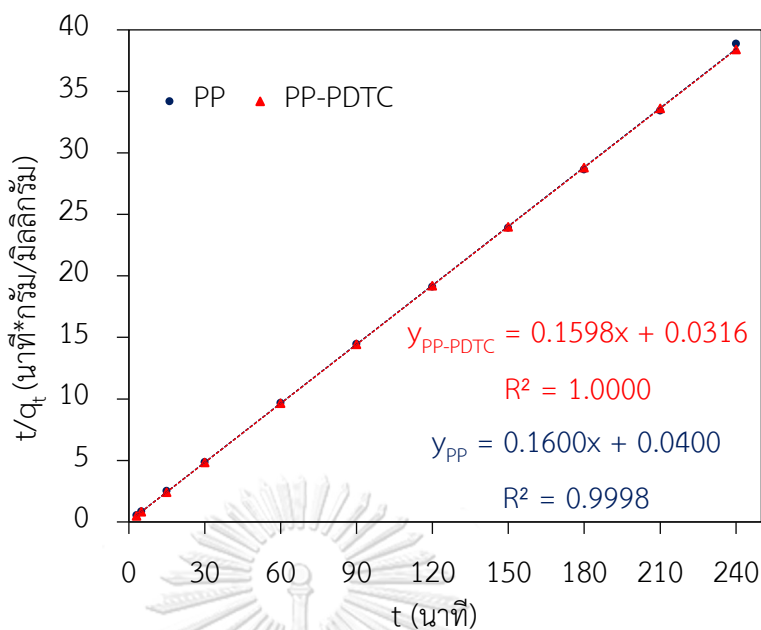
จะได้ q_e เท่ากับ 6.4438 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่า q_e ที่นำมาใช้คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ

จากตารางด้านบน พิจารณา q_e ของตัวดูดซับ PP จะได้เท่ากับ 6.4468 หรือ 6.447 มิลลิกรัมต่อ

กรัม

2. หาค่า q_t จากสมการ (2.1) แต่เป็นค่า q ที่ขึ้นกับเวลา

3. นำข้อมูลของ $\ln(q_e - q_t)$ กับ t มาพล็อตเป็นเส้นตรง ดังรูปด้านล่าง



4. คำนวณค่าความชันและจุดตัดแกน y โดยเทียบจากสมการ $y = mx + c$ จากสมการของตัวดูดซับ PP กับสมการที่ (2.16)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.15)$$

จะได้ $y = 0.1600x + 0.0400$

- ความชัน $= 0.1600 = 1/q_e$

ดังนั้น $q_{e,cal} = 6.2500$ มิลลิกรัมต่อกรัม (เป็นค่า q ที่ได้จากการคำนวณ)

- จุดตัดแกน $y = 0.0400 = 1/k_2 q_e^2$

ดังนั้น $k_2 = 1/(0.04 * 0.3206) = 0.0010$ กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที

4. การคำนวณอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ

4.1 การคำนวณหาค่า ΔG° จากสมการ (2.17)

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c \quad (2.17)$$

1. หาค่า K_c จากสมการ

$$K_c = \frac{q_e}{C_e} \quad (2.18)$$

2. พิจารณาค่า q_e

ตารางที่ 6 แสดงผลการคำนวณของอุณหพลศาสตร์การดูดซับโดยพิจารณาตัวดูดซับ PP

(ใช้ตัวหนาเป็นตัวอย่างในการคำนวณ)

	T (°C)	ค่าการทดลอง					
		C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	ปริมาณตัวดูดซับ (g/ 50 ml)	q_e (mg/g)	q_e/C_e	$\ln K_c$
PP	30	96.81	2.02	0.7305	6.49	3.21	1.17
	50	96.81	1.64	0.7307	6.51	3.97	1.38
	70	96.81	1.08	0.7305	6.55	6.07	1.80

- หาค่า q_e จาก สมการที่ (2.1)

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (2.1)$$

ตัวอย่างการคำนวณ จากตารางที่ 6 ค่า $C_0 = 96.81$ มิลลิกรัมต่อลิตร $C_e = 2.02$ มิลลิกรัมต่อลิตร

ให้ $V = 0.05$ ลิตร $m = 0.7305$ กรัม แทนค่า

$$q_e = \frac{0.05 (96.81 - 2.02)}{0.7305} \quad (2.1)$$

จะได้ $q_e = 6.49$ มิลลิกรัมต่อลิตร

3. หาค่า $K_c = q_e/C_e$ โดยที่ $C_e = 2.02$ มิลลิกรัมต่อลิตร

แทนค่าจะได้ $6.49/2.02$

ดังนั้น $K_c = 3.21$

4. หาค่า $\ln K_c$

จะได้ $\ln (3.21) = 1.17$

5. หา ΔG° จาก สมการ (2.17)

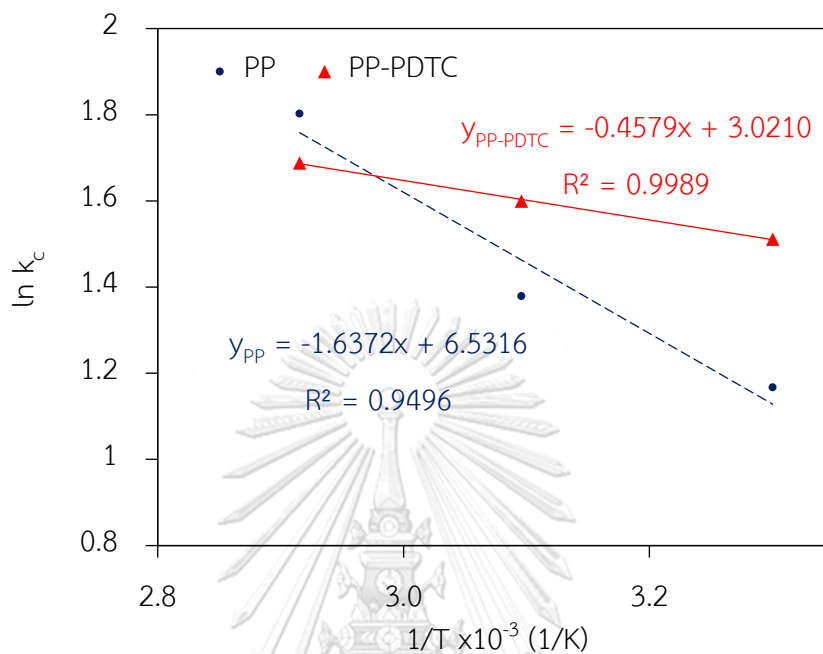
$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c \quad (2.17)$$

แทนค่า $\Delta G^\circ = -8.314 \times 303 \times 1.17$

ดังนั้น $\Delta G^\circ = -2,941 \text{ J/mol} = -2.941 \text{ kJ/mol}$

4.2 หา ΔH° และ ΔS°

จากการพล็อตกราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ แล้วจะได้



- พิจารณากราฟสมการของตัวดูดซับ PP เทียบกับสมการ $y = mx + c$ ของสมการของตัวดูดซับ PP

จะได้ $y = -1.6372x + 6.5316$ นำมาเทียบกับสมการที่ (2.19)

$$\ln K_c = \frac{\Delta H^\circ}{RT} - \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (2.19)$$

จะได้

- ความชัน $= -1.6372 = \Delta H^\circ/R$

จะได้ $\Delta H^\circ = -1.6372 \times 8.314$

ดังนั้น $\Delta H^\circ = 13.612$ จูลต่อโมล

- จุดตัดแกน $y = 6.5316 = \Delta S^\circ/R$

จะได้ $\Delta S^\circ = 6.5316 \times 8.314$

ดังนั้น $\Delta S^\circ = 54.304$ จูลต่อโมล-เคลวิน

ตารางที่ 7ข แสดงผลการคำนวณตัวแปรต่าง ๆ ของอุณหพลศาสตร์การดูดซับ

ตัวดูดซับ	ΔG° (kJ/mol)			ΔH° (J/mol)	ΔS° (J/mol-K)
	303 K	323 K	343 K		
PP	-2.941	-3.703	-5.141	13.612	54.304
PP-PDTC	-3.808	-4.297	-4.814	3.807	25.117

5. การคำนวณร้อยละของการคายซับ

5.1 พิจารณาร้อยละของการคายซับของตัวดูดซับ PP

ตารางที่ 8ข แสดงผลการคำนวณค่าร้อยละของการคายซับ

ความเข้มข้นของกรดไนตริก (M)	ร้อยละของการคายซับ	
	PP	PP-PDTC
0.05	19.02	2.22
0.1	24.85	9.92
1	31.70	65.69
3	77.16	92.79
5	72.54	89.54

- จากสมการ 2.20-2.21

$$\text{ร้อยละของการคายซับ} = \frac{C_{ad} - C_{de}}{C_{ad}} \times 100 \quad (2.20)$$

$$C_{ad} = C_0 - C_e \quad (2.21)$$

$$C_{de} = C_{ad} - C_d \quad (2.22)$$

- พิจารณา ค่า $C_0 = 94.33$ มิลลิกรัมต่อลิตร, $C_e = 2.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร, $C_d = 17.555$

มิลลิกรัมต่อลิตร

- หาค่า C_{ad} จาก สมการ 2.21 แทนค่า

จะได้ $C_{ad} = 94.33 - 2.01 = 92.32$ มิลลิกรัมต่อลิตร

- หาค่า C_{de} จากสมการที่ 2.22

จะได้ $C_{de} = 92.32 - 17.555 = 74.765$ มิลลิกรัมต่อลิตร

- หาค่า ร้อยละของการคายซึบ จากสมการที่ 2.20

จะได้ ร้อยละของการคายซึบ = $((92.32 - 74.765) / 92.32) * 100$

ดังนั้น ร้อยละของการคายซึบ เท่ากับ 19.02 %

1. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Arabian Journal of Chemistry

Arabian Journal of Chemistry (2022) 15, 10383



ORIGINAL ARTICLE

Biosorption of lead (II) from aqueous solution using Cellulose-based Bio-adsorbents prepared from unripe papaya (*Carica papaya*) peel waste: Removal Efficiency, Thermodynamics, kinetics and isotherm analysis



Wilavan Jaihan^a, Vanee Mohdee^a, Sompop Sanongraj^b, Ura Pancharoen^{a,*}, Kasidit Nootong^{c,**}

^a Separation and Mass Transfer Research Laboratory, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

^b Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warin Chantrap, Ubon Ratchathani 34190, Thailand

^c Bio-Circular-Green-economy Technology & Engineering Center (BCGeTEC), Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

Received 28 November 2021; accepted 30 March 2022
Available online 05 April 2022

KEYWORDS

Lead;
Papaya;
Adsorption;
Wastewater;
RSM

Abstract This work focuses on the removal of lead from contaminated aqueous solutions using unripe papaya peel based bio-adsorbents (PP). Response surface methodology (RSM) based on Box-Behnken design (HBD) is employed to determine the independent variables. Optimum conditions proved to be 96.5 mg/L of initial lead concentration in solution, at pH 4 of aqueous solution, having adsorbent dosage of 14.6 g/L and contact time (3 h) which subsequently yielded the predicted and actual lead removal efficiencies of 100% and 97.54%, respectively. Adsorption isotherms and kinetics of lead adsorption using unripe papaya peel followed the Freundlich and pseudo-second-order models, indicating that the process of chemisorption occurred. The magnitude of the adsorption capacity of the pseudo-second-order model ($q_{e,cal} = 6.25$ mg/g) was found to be comparable to the value obtained experimentally ($q_{e,exp} = 6.45$ mg/g). Thermodynamic parameters were calculated in order to identify the phenomena of adsorption. The values of ΔH° and ΔS° are found to be 13.61 J/mol and 54.30 J/molK, respectively. The characteristics of unripe papaya peel

* Corresponding author.

E-mail addresses: ura.p@chula.ac.th (U. Pancharoen), kasidit.n@chula.ac.th (K. Nootong).

Peer review under responsibility of King Saud University.



<https://doi.org/10.1016/j.arjch.2022.103833>

1878-5352 © 2022 The Author(s). Published by Elsevier B.V. on behalf of King Saud University.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

2. การจัดอันดับของวารสาร (Ranking) ในฐานข้อมูล Scopus

วารสารอยู่ในระดับ T1

Category	Rank	Percentile
Chemical Engineering		
General Chemical Engineering	#24/279	91st



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วิลาวรรณ ใจหาญ
วัน เดือน ปี เกิด	17 เมษายน 2539
สถานที่เกิด	ศรีสะเกษ
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	1610/6 ถ.ศรีสุมังค์ ซอย 8 ต.เมืองใต้ อ.เมือง จ.ศรีสะเกษ 33000
ผลงานตีพิมพ์	Biosorption of Lead (II) from Aqueous Solution Using Cellulose-based Bio-adsorbents Prepared from Unripe Papaya (Carica papaya) peel waste: Removal Efficiency, Thermodynamics, Kinetics and Isotherm Analysis.
รางวัลที่ได้รับ	-