



การกำจัดแคดเมียมจากสารละลายโดยใช้เปลือกส้มโอ

ปวิษญาดา ญาวงศ์

การค้นคว้าอิสระเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**REMOVAL OF CADMIUM FROM AQUEOUS SOLUTION USING
POMELO PEEL**

PRAVICHYADA YAWONG

**AN INDEPENDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBONRATCHATHANIUNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2014
COPYRIGHT OF UBONRATCHATHANI UNIVERSITY**



ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การกำจัดแคดเมียมจากสารละลายโดยใช้เปลือกส้มโอ

ผู้วิจัย นางสาวปวีชญาดา ญาวงศ์

คณะกรรมการสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานิศา จางศิริกุล	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพوخ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิกา รัตนพงศ์เลขา	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

จักรกฤษณ์ อัมพوخ
.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพوخ)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)
รักษาราชการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2557

กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าอิสระฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพูช อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา ถ่ายทอดความรู้ต่างๆ ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงาน แนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหา ให้ข้อคิดเห็น อบรมสั่งสอน ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิจัยในครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิกา รัตนพงศ์เสนา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณิศา จางศิริกุล กรรมการการสอบการค้นคว้าอิสระ ที่กรุณาสละเวลาช่วยเหลือในการให้ข้อแนะนำในการแก้ไขค้นคว้าอิสระ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และ คณาจารย์ทุกท่าน ที่ถ่ายทอดวิชาความรู้ต่าง ๆ ให้ความช่วยเหลือ อบรมสั่งสอน รวมถึงเจ้าหน้าที่ธุรการบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่กรุณาช่วยเหลือในระหว่างดำเนินงานค้นคว้าอิสระครั้งนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลองเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยด้วยดี ตลอดจน ขอขอบพระคุณหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ท่านนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน ให้ความรัก และให้กำลังใจที่สำคัญ จนสามารถทำทุกสิ่งทุกอย่างได้ตามที่มุ่งหวัง ตลอดจนจนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

วิษณุภา ญาวงค์
(นางสาววิษณุภา ญาวงค์)

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การกำจัดแคดเมียมจากสารละลายโดยใช้เปลือกส้มโอ
 โดย : ปวีญาดา ญาวงศ์
 ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชา : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
 หน่วยงานที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพข
 ศัพท์สำคัญ : การดูดซับ แคดเมียม เปลือกส้มโอ การตัดแปร

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มโอ (PM) และเปลือกส้มโอตัดแปรด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 M(MPM) การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับแสดงให้เห็นว่า PM มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า และมีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่า MPM ผลการวิเคราะห์ไออาร์สเปกตรัม แสดงให้เห็นว่า PM มีหมู่ free carboxyl groups ซึ่งมีประจุลบและสามารถเกิดพันธะโคเวเลนต์กับไอออนของโลหะแคดเมียมได้

ผลการศึกษาการดูดซับแบบกะ แสดงให้เห็นว่า PM มีปริมาณการดูดซับแคดเมียมสูงกว่า MPM จึงเลือก PM มาศึกษาเพียงเท่านั้น ปริมาณการดูดซับแคดเมียมเกิดขึ้นสูงสุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 และที่อุณหภูมิ 30 °C โดยมีค่าเท่ากับ 43.51 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณการดูดซับของแคดเมียมลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ แสดงว่าการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน ไอโซเทอมการดูดซับของแคดเมียมมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (การดูดซับแบบชั้นเดียว) มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช ปริมาณการดูดซับของแคดเมียมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สมดุลที่ 60 นาที ข้อมูลเชิงจลนพลศาสตร์มีความสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสอง เทียบแคดเมียมเกิดการคายซับจาก PM ร้อยละ 44.18 โดยใช้ น้ำกลั่น และร้อยละ 68.06 โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M ข้อมูลข้างต้นชี้ให้เห็นว่า PM เป็นตัวดูดซับที่มีศักยภาพในการกำจัดแคดเมียมจากน้ำเสีย

ABSTRACT

TITLE : REMOVAL OF CADMIUM FROM AQUEOUS SOLUTION USING POMELO PEEL
BY : PRAVICHYADA YAWONG
DEGREE : MASTER OF ENGINEERING
MAJOR : ENVIRONMENTAL ENGINEERING
CHAIR : ASST.PROF.CHAKKRIT UMPUCH, Ph.D.

KEYWORDS : ADSORPTION / CADMIUM / GRAPEFRUIT PEEL / MODIFICATION

This research work aims to study the removal of cadmium from synthetic wastewater using pomelo peel (PM) and 0.1M nitric acid modified pomelo peel (MPM). Characterization results show that PM has higher surface area and larger average pore size than those of MPM. The IR-spectra analysis result clearly shows that the PM contained free carboxylate groups which is negatively charged and could form covalent bond with cadmium ions.

Batch adsorption experiments results show that PM has higher cadmium uptake than MPM. The maximum adsorption capacity of 43.51 mg/g occurred at pH 5 and 30 °C. The adsorption capacity of cadmium decreased with the increase in temperature which indicates that the adsorption is exothermic process. A adsorption isotherm of cadmium is better fitted by the Langmuir isotherm (monolayer adsorption) than the Freundlich isotherm. The adsorption capacity of cadmium rapidly increased at beginning and slightly increased until reach the equilibrium stage after 60 minutes. The kinetic data conform to the pseudo second order model equation. The cadmium loaded pomelo peel (PM) can be desorbed by distilled water as 44.18% and 0.1M hydrochloric acid as 68.06 %. The above results indicate that the GF is a potential adsorbent for removal of cadmium from wastewater.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฅ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมติฐาน	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 สถานที่ทำวิจัย	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 น้ำเสีย	4
2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	5
2.3 โลหะหนัก (Heavy metals)	7
2.4 เปลือกส้มโอ	10
2.5 การดูดซับ	11
2.6 ไอโซเทอมการดูดซับ	16
2.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	19
2.8 การคายซับ (Desorption)	21
2.9 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย	22
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 กรอบงานวิจัย	24
3.2 ตัวคูณซ้ำและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	25
3.3 การเตรียมตัวคูณซ้ำจากเปลือกส้มโอ	25
3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวคูณซ้ำ	25
3.5 การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม	26
3.6 การศึกษาการคูณซ้ำแบบกะ	26
4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวคูณซ้ำและแคดเมียม	30
4.2 ผลการศึกษาการคูณซ้ำแบบกะ	32
4.3 ผลการศึกษาการคายซ้ำ	39
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	40
5.2 ข้อเสนอแนะ	41
เอกสารอ้างอิง	42
ภาคผนวก	
ก วิธีการเตรียมสารละลายและกราฟมาตรฐานแคดเมียม	47
ข ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การคูณซ้ำ	49
ค ผลการศึกษาไอโซเทอมของการคูณซ้ำ	52
ประวัติผู้วิจัย	54

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ	30
4.2	ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ	31
4.3	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียม ที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 g อุณหภูมิในการดูดซับ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $\text{pH}_0 = 5.5 \pm 0.5$	33
4.4	พารามิเตอร์ของสมการอันดับหนึ่งเทียมและสมการอันดับสองเทียมของการดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสียดังเคราะห์	34
4.5	ค่าคงที่ k_2 (Pseudo-second order) ของการดูดซับ โลหะหนักแคดเมียม โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ	35
4.6	พารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิชของการดูดซับแคดเมียมที่อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$	36
4.7	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการคายซับแคดเมียม โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 g อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ และเวลา 24 hr	39

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะโครงสร้างของเพคติน โดยมีหมู่ Homogalacturonan มาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว	11
2.2	กระบวนการดูดซับ	12
2.3	รูปแบบการดูดซับ	13
3.1	แผนภาพขั้นตอนการวิจัย	24
4.1	สเปกตรัม FTIR ของเปลือกส้มโอ และเปลือกส้มโอคัดแปร	31
4.2	ผลการวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ (a) เปลือกส้มโอ และ (b) เปลือกส้มโอคัดแปร	32
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ โลหะหนักแคดเมียมกับเวลาสัมผัสของน้ำเสียสังเคราะห์ โลหะหนักแคดเมียม ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g, $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ และ $\text{pH}_0 = 5.7 \pm 0.5$	34
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t (min*g/mg) และ t (min) แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับ โลหะหนักแคดเมียม ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยใช้เปลือกส้มโอเป็นตัวดูดซับ	36
4.5	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับ โลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ของแคดเมียมที่อุณหภูมิ 25 °C โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g และ $\text{pH}_0 = 5.7 \pm 0.5$	37
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ โลหะหนักแคดเมียมกับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียม ที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g และอุณหภูมิในการดูดซับ 25 °C	38
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ โลหะหนักแคดเมียมกับอุณหภูมิในการดูดซับของสารละลายแคดเมียมที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g	38
ก.1	กราฟมาตรฐานแคดเมียมที่ความเข้มข้น 100 – 600 mg/L	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ข.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักแคดเมียมกับเวลาสัมผัสที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $\text{pH}_0 = 5.7 \pm 0.5$	50
ข.2	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับแคดเมียมที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $\text{pH}_0 = 5.7 \pm 0.5$	50
ข.3	แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับแคดเมียมที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $\text{pH}_0 = 5.7 \pm 0.5$	51
ค.1	ไอโซเทอมการดูดซับตามสมการของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) จากน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะหนักแคดเมียม โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g และ $\text{pH}_0 = 5.7 \pm 0.5$	53
ค.2	ไอโซเทอมการดูดซับตามสมการของฟรุนดิช (Freundlich Isotherm) จากน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะหนักแคดเมียม โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g และ $\text{pH}_0 = 5.7 \pm 0.5$	53

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
%	= เปอร์เซนต์หรือร้อยละ
°C	= องศาเซลเซียส
g	= กรัม
m ² /g	= ตารางเมตรต่อกรัม
mg/g	= มิลลิกรัมต่อกรัม
mL	= มิลลิลิตร
mg/L	= มิลลิกรัมต่อลิตร
rpm	= รอบต่อนาที
hr	= ชั่วโมง
g/mol	= กรัมต่อโมล
cm ⁻¹	= จำนวนคลื่นต่อหน่วยเซนติเมตร (reciprocal centimeter)
nm	= นาโนเมตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ปัญหาน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมนับวันจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีการนำโลหะหนักมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม ตลอดจนการใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ซึ่งแคดเมียมเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่ใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมการพิมพ์ อุตสาหกรรมไฟฟ้า อุตสาหกรรมอะไหล่รถยนต์ อุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยเคมี และเป็นสารประกอบที่ใช้ในห้องปฏิบัติการหรืองานวิจัยต่าง ๆ

แคดเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายทั้งทางตรงและทางอ้อม แคดเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้จากการปนเปื้อนในอาหาร น้ำ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามห่วงโซ่อาหาร โทษและพิษของแคดเมียมที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายมากเพียงพออาจทำให้เสียชีวิตได้ โรคที่เกิดจากพิษของแคดเมียมเรียกว่า อิตาอิไต (Itai-Itai disease) จึงจำเป็นต้องบำบัดน้ำทิ้งที่มีแคดเมียมปนเปื้อนก่อนที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบันมีความพยายามที่จะพัฒนาเทคนิคและวิธีการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มากับน้ำทิ้ง เทคนิคหรือวิธีการใหม่ ๆ ที่สามารถกำจัดหรือลดปริมาณแคดเมียมให้มีปริมาณต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งหลากหลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน การออสโมซิสย้อนกลับ การทำให้ลอยตัว การใช้ไฟฟ้า การแลกเปลี่ยนประจุ การดูดซับและการดูดซับผิว และการดูดซับด้วยวัสดุธรรมชาติ เป็นต้น

ถึงแม้ว่าวิธีการบำบัดโลหะในน้ำเสียอุตสาหกรรมจะมีอยู่มากมาย แต่สำหรับวิธีการดูดซับด้วยตัวดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมนอย่างกว้างขวาง (Li, Y., et al., 2011) ซึ่งเป็นเหตุให้นักวิชาการจำนวนมากหันมาสนใจและพยายามพัฒนาตัวดูดซับที่มีในการผลิตต้นทุนต่ำ ได้แก่ ไคติน (Benguella and Benaissa, 2002) เปลือกถั่ว (Brown et al., 2000) แกลบ แกลบเผา ชานอ้อย ชังข้าวโพด ชี้อัลจี แพคตบชวา ชูปถาญี ดินมะละกอ ฟางข้าว เปลือกส้ม และเปลือกส้มโอ เป็นต้น เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีองค์ประกอบของเซลลูโลส ลิกนิน (lignin) แทนนิน (tannin) ซึ่งภายในโครงสร้างเหล่านี้มีองค์ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิลิก หมู่ฟีนอลิก หมู่เมทอกซิล ที่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนและสามารถดูดจับกับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสียได้ดี จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียพร้อมทั้งหาได้ง่ายในท้องถิ่น

การวิจัยนี้เลือกใช้เปลือกส้มโอนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้ เนื่องจากเปลือกส้มโอหาง่ายและเหลือทิ้งตามธรรมชาติเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ซึ่งมีศักยภาพดูดซับไอออนของโลหะหนัก เช่น ไอออนของทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี

อย่างไรก็ตามการเตรียมวัสดุดูดซับด้วยวิธีที่แตกต่างกันจะมีปริมาณการดูดซับแคดเมียมที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเตรียมวัสดุดูดซับจากเปลือกส้มโอที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับในการกำจัดแคดเมียม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาการกำจัดแคดเมียม Cd^{2+} จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มโอเป็นตัวดูดซับ โดยศึกษาในประเด็นดังนี้

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแบบกะ

1.3 สมมติฐาน

1.3.1 เปลือกส้มโอจะมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียม Cd^{2+} ได้ดี เนื่องจากเปลือกส้มโอจะมีพื้นผิวจำเพาะและหมู่ฟังก์ชันที่ยึดจับ เพคติน free carboxylate groups (COO^-) ซึ่งมีประจุลบ $2+$ ได้ดี

1.3.2 ปัจจัยต่างๆ เช่น ระยะเวลา ความเข้มข้นของแคดเมียม ค่าพีเอช และ อุณหภูมิ อาจส่งผลต่อความสามารถ ในการดูดซับแคดเมียม ด้วย PM และ MPM

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 โลหะหนักแคดเมียม Cd^{2+} ที่ใช้มีจำนวน 1 ชนิด คือ แคดเมียม $CdCl_2 \cdot 5/2H_2O$ (ASIA PACIFIC SPECIALTY CHEMICALS LIMITED)

1.4.2 ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด ได้แก่ เปลือกส้มโอไม่ดัดแปรและเปลือกส้มโอดัดแปร จากเปลือกส้มโอพันธุ์ทองดี ซึ่งจากร้านขายผลไม้สดตลาดอำเภอสิรินธร จังหวัดอุบลราชธานี จะเก็บผลผลิตในช่วงเดือนสิงหาคม-เดือนกันยายน

1.4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ ประกอบด้วย การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ย หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ สัณฐานและลักษณะพื้นผิว

1.4.4 การศึกษาการดูดซับแบบกะชนิดขั้นตอนเดียว ประกอบด้วย การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ การศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ และ การคายซับ

1.4.5 การศึกษาการดูดซับแบบกะจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ และความเร็วรอบในการเขย่า 200 rpm

1.4.6 วิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy : AAS) อาศัยหลักการวัดการแตกตัวของอะตอมอิสระซึ่งอะตอมเหล่านี้จะดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมของแต่ละธาตุ

1.4.7 การศึกษานี้พิจารณาเฉพาะการกำจัดแคดเมียม Cd^{2+} เพื่อบ่งชี้ประสิทธิภาพและศักยภาพของระบบเท่านั้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถกำจัดแคดเมียม Cd^{2+} ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ โดยใช้เปลือกส้มโอเป็นตัวดูดซับ

1.5.2 ผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดแคดเมียม Cd^{2+} ในน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมได้

1.5.3 เพิ่มประสิทธิภาพและพัฒนาความสามารถในการใช้เปลือกส้ม ที่เป็นของเสียจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น

1.6 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสีย

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีภาวะที่น้ำเสื่อมคุณภาพหรือน้ำที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่เคยเป็นอยู่ตามธรรมชาติ เนื่องจากมีสิ่งเจือปน จะทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจนอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ได้รับผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม (โกศล วงศ์สวรรค์ และสถิต วงศ์สวรรค์, 2543)

แหล่งที่มาของน้ำเสียแบ่งได้เป็น 2 แหล่งใหญ่ ๆ ดังนี้ (ฝ่ายสุขาภิบาลโรงงาน กองอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักอนามัย กรุงเทพมหานคร)

(1) น้ำเสียจากแหล่งชุมชน มาจากกิจกรรมสำหรับการดำรงชีวิตของคนเรา เช่น อาคาร บ้านเรือน หมู่บ้านจัดสรร คอนโดมิเนียม โรงแรม ตลาดสด โรงพยาบาล เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า ความเน่าเสียของคูคลองเกิดจากน้ำเสียประเภทนี้ถึงประมาณ 75%

(2) น้ำเสียจากกิจกรรมอุตสาหกรรม ได้แก่ น้ำเสียจากขบวนการผลิตของโรงงาน อุตสาหกรรมรวมทั้งน้ำหล่อเย็นที่มีความร้อนสูง และน้ำเสียจากห้องน้ำห้องส้วมของคนงาน ความเน่าเสียของคูคลองเกิดจากน้ำเสียประเภทนี้ประมาณ 25% แม้จะมีปริมาณไม่มากนัก แต่สิ่งสกปรกในน้ำเสียจะเป็นพวกสารเคมีที่เป็นพิษและพวกโลหะหนักต่างๆ รวมทั้งพวกสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีความเข้มข้นสูง

ประเภทของน้ำเสีย จำแนกออกเป็น 3 ประเภท คือ

(1) น้ำเสียทางกายภาพ (Physical unit processes) หมายถึง น้ำที่สภาพทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ได้แก่ น้ำที่มีอุณหภูมิร้อนหรือเย็นเกินกว่าที่สิ่งมีชีวิตจะดำรงอยู่ได้ ควรมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 20-35 องศาเซลเซียส น้ำที่มีสีเปลี่ยนไปจากสภาพเดิม น้ำที่มีกลิ่นเหม็น น้ำที่มีรสเปลี่ยนไปจากสภาพเดิม เช่น เปรี้ยวหรือเค็ม และ น้ำที่มีค่าพีเอช (pH) ไม่อยู่ระหว่าง 5.0-9.0 เป็นต้น

(2) น้ำเสียทางเคมี (Chemical wastewater) หมายถึง น้ำที่มีการปนเปื้อนไปด้วยสารมีพิษต่าง ๆ ซึ่งบางครั้งไม่อาจมองเห็นได้ด้วยสายตาหรือการสัมผัส สารพิษต่างๆที่ปนเปื้อนได้แก่ โลหะหนัก (Heavy metals) สารกัมมันตรังสี (Radioactive elements) และ วัตถุมีพิษ (Pesticides) เป็นต้น

(3) น้ำเสียทางชีววิทยา (Biological wastewater) หมายถึง น้ำที่มีการปนเปื้อนของสารที่มีพิษต่อสุขภาพอนามัย ได้แก่ เชื้อโรค พยาธิ เชื้อรา เป็นต้น

2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment processes) (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2539)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นการกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเพื่อให้น้ำมีคุณภาพที่สามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่คือ

2.2.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical unit processes) เป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดสิ่งสกปรกที่มีน้ำหนักมากหรือมีขนาดใหญ่ เช่น ไขมัน ขยะ ทราช ซึ่งเป็นการบำบัดเบื้องต้นก่อนที่จะมีการบำบัดในขั้นตอนต่อไป ข้อดีคือทำได้ง่าย ราคาถูก ข้อเสียคือกำจัดได้เฉพาะสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่เท่านั้น กระบวนการทางกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น

2.2.1.1 กระบวนการกรองด้วยตระแกรงใช้ดักพวกขยะ เศษใบไม้ หรืออื่นๆที่มีขนาดใหญ่กว่ารูของตระแกรง

2.2.1.2 กระบวนการตกตะกอน เป็นการปล่อยน้ำมาเก็บไว้ในถังตกตะกอน ทำการตกตะกอนโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลกสามารถตกตะกอน ทราช หิน หรืออนุภาคที่มีน้ำหนักพอที่จะสามารถตกตะกอนได้

2.2.1.3 กระบวนการดักจับไขมันหรือกวาดไขมันออกจากน้ำเสีย ไขมันหรือน้ำมันจะมีน้ำหนักเบากว่าน้ำจะลอยอยู่ข้างบนสามารถกำจัดออกโดยเปิดส่วนบนของถังพักแล้วกวาดน้ำมันออก

2.2.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical unit processes) เป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดหรือแยกสารต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย วิธีนี้จะต้องมีการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปในน้ำเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ข้อดีคือ สามารถกำจัดสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำได้หลายชนิดด้วยการเติมสารเคมีเพียงชนิดเดียว ข้อเสียคือ เมื่อมีการเติมสารเคมีลงไปแล้ว ก็จะมีสารเคมีผสมอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบในด้านอื่นๆ เช่น การเกิดตะกอนเพิ่มมากขึ้น ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไปจากธรรมชาติ เป็นต้น กระบวนการทางเคมีสามารถแบ่งออกได้เป็น

2.2.2.1 กระบวนการปรับสภาพกรด-ด่าง (pH adjustment) คือกระบวนการที่ทำการปรับสภาพกรด-ด่างของน้ำเสียให้ได้ค่ามาตรฐานน้ำเสีย (ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งพีเอชต้องไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่เกิน 9.0) หรือค่าที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดขั้นต่อไป หลักการทั่วไปถ้าน้ำเสียมีฤทธิ์เป็นกรดก็จะเติมสารเคมีประเภทด่าง เช่น โซดาไฟ ปูนขาว เป็นต้น ถ้าเป็นด่างจะปรับด้วยสารเคมีประเภทกรด เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน เป็นต้น

2.2.2.2 กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) คือ กระบวนการเติมสารเคมีลงในน้ำเพื่อทำให้ไอออนเช่น ไอออนของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนสถานะมาอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำเกิดเป็นตะกอนมีน้ำหนักมากขึ้นทำให้จมตัวลง สารเคมีที่ใช้เติมมีหลายชนิด เช่น ปูนขาว โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต เป็นต้น ปูนขาวนิยมใช้ตกตะกอนโลหะหนัก ซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะสามารถตกตะกอนได้ที่พีเอชต่างกัน ตะกอนที่ได้จะมีองค์ประกอบของโลหะหนักซึ่งจะต้องมีกระบวนการกำจัดต่อไป

2.2.2.3 กระบวนการสร้างรวมตะกอนเคมี (Coagulation -flocculation) คือ กระบวนการที่มีการเติมสารเคมีพวกสารสร้างตะกอน ได้แก่ สารส้ม ปูนขาว ผสมกับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยเล็กๆ แล้วทำการกวนอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดสภาพรวมตะกอน ทำให้เป็นตะกอนใหญ่ขึ้น

2.2.3 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological unit processes) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้จุลินทรีย์ที่เหมาะสมมาย่อยสลายสารต่างๆ ในน้ำเสีย ข้อดีคือมีราคาถูก แต่การควบคุมกระบวนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะต้องควบคุมการทำงานตามปัจจัยต่างๆ ที่จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้เพื่อให้ น้ำเสียมีความสกปรกลดลง จุลินทรีย์อาจเป็นแบบใช้หรือไม่ใช้ออกซิเจนก็ได้

2.2.4 กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical unit processes) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยวิธีทางกายภาพและเคมีผสมผสานกัน เป็นวิธีที่อาศัยเทคโนโลยีขั้นสูง อาศัยเครื่องมือที่มีอุปกรณ์หลายชนิด และมีราคาแพงมากกว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียอื่น แต่สามารถกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ประเภทของกระบวนการทางกายภาพ-เคมี ได้แก่

2.2.4.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption) คือ กระบวนการแยกสารปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำโดยใช้ตัวดูดซับมาทำการดูดซับสารที่ต้องการแยกออกไป ตัวดูดซับที่นิยมใช้มีหลายชนิด เช่น ซิลิกา เบนโซไนต์ ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากสามารถกำจัด สี หรือ โลหะหนักได้เป็นอย่างดี

2.2.4.2 กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) คือ กระบวนการที่ไอออนในน้ำเสียจะมาเกาะแลกเปลี่ยนกับไอออนเรซิน ซึ่งมีทั้งไอออนลบและบวกโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างของตัวกลาง เช่นการใช้เรซินที่มีไอออนลบกับตะกอนโลหะหนักที่มีประจุบวก เป็นต้น เรซินเมื่อใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยล้างด้วยกรด

2.2.4.3 กระบวนการกรองแบบอุลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) คือ กระบวนการกรองโดยใช้เยื่อกรองแบบ porous membrane อัดแรงดันน้ำเข้าไปพอประมาณ ซึ่งทำให้แยกสารปนเปื้อนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กๆ ได้ตั้งแต่ขนาด 2 ถึง 1000 ไมโครเมตร

2.2.4.4 กระบวนการออสโมซิสผกกลับ (Reverse osmosis) คือ กระบวนการที่แยกสารปนเปื้อนขนาดตั้งแต่ 0.4 ถึง 60 ไมโครเมตร กรองผ่านเยื่อกรองแบบเยือกซึมผ่านด้วยความดันสูง

2.3 โลหะหนัก (Heavy metals)

โลหะหนักหมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 อยู่ในคาบที่ 4-7 ของตารางพีริออดิก มีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติของโลหะหนักทางกายภาพคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีมีลักษณะเป็นเงา มีน้ำหนักเหนียวสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้และสะท้อนแสงได้ดี คุณสมบัติทางเคมีคือ โลหะหนักมีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้น โลหะหนักจึงมักจะรวมตัวกับสารอื่นเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex-compound) เพราะเสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบโลหะอินทรีย์ (Organometallic compound) ซึ่งเป็นพิษ หากปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านทางห่วงโซ่อาหาร เมื่อมีการสะสมในร่างกายอาจมีผลทำให้พิการ หรือเสียชีวิตได้ US EPA (United States Environmental Protection Agency) จึงได้กำหนดโลหะหนักที่มีพิษที่ต้องกำจัดออกจากรู้น้ำเสียก่อนปล่อยทิ้ง ได้แก่ แคดเมียม แคลเซียม โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี เงิน อาร์เซนิก แอนติโมนีเซลเลเนียม เทลลูเรียม และปรอท ในจำนวนนี้ปรอท แคดเมียม อาร์เซนิก และ ตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักที่มีพิษถาวร คือ ไม่สามารถเปลี่ยนรูปตามกาลเวลาและยังสามารถสะสมอยู่ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต (อุไรวรรณ อินทร์ม่วง, 2545) อีกทั้ง ปัจจุบันโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดถูกนำมาใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการกำจัดออกจากรู้น้ำเสีย เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม

2.3.1 โลหะหนักที่ทำการศึกษาวิจัยนี้ ได้แก่ แคดเมียม ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี การนำมาใช้ประโยชน์ การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม และความเป็นพิษ ดังนี้

2.3.1.1 แคดเมียม (Cadmium: Cd) (โยธิน เบญจวงษ์, 2541)

1) ที่มาและแหล่งกำเนิดแคดเมียม ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2360 แหล่งที่แพร่กระจายแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อม เช่น โรงงานชุบโลหะแคดเมียม อุตสาหกรรมการผลิตสี

แบตเตอรี่ และปุ๋ยฟอสเฟต ซึ่งมีรายงานการศึกษาพบว่าการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตจะไปเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดินซึ่งสามารถสะสมอยู่ในดินได้เมื่อฝนตกแคดเมียมจะถูกชะล้างลงแหล่งน้ำได้

2) คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ แคดเมียมอยู่ในกลุ่ม IIB ของตารางพีริออดิกเป็นโลหะหนักที่มีสีเงินแกมขาว มีเลขอะตอม 48 น้ำหนักอะตอม 112.40 มีสมบัติเบา อ่อน คัดงอได้ง่ายและทนต่อการกัดกร่อน มีความหนาแน่น 8.65 กรัม/มิลลิลิตร จุดหลอมละลาย 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 767 องศาเซลเซียส ในกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูง เช่น การอบแร่ การบัดกรี การหลอมเศษเหล็ก และการเผาของเสีย จะทำให้มีไอของแคดเมียมออกมาได้ในระหว่างกระบวนการผลิตและไอของแคดเมียมจะถูกออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วไปเป็นแคดเมียมออกไซด์ แคดเมียมเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก และ ละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก อย่างช้าๆ แต่สารประกอบของแคดเมียมสามารถละลายน้ำได้ เช่น แคดเมียมซัลเฟต (CdSO_4) แคดเมียมคลอไรด์ (CdCl_2) และ แคดเมียมไนเตรต ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) เป็นสารประกอบที่ไม่มีสีและละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้แคดเมียมยังสามารถละลายน้ำได้ดีเมื่อรวมตัวกับไซยาไนด์หรือเอมีน

3) การนำมาใช้ประโยชน์

การใช้ประโยชน์ของแคดเมียมซึ่ง แบ่งออกได้เป็น 2 ด้าน คือ

- เกษตรกรรม ใช้เป็นองค์ประกอบของสารกำจัดวัชพืชและสารกำจัดเชื้อรา รวมทั้ง ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต

- อุตสาหกรรม แคดเมียมใช้ประโยชน์กันมากคือใช้เป็นตัวเคลือบผิวของโลหะอื่นๆ เช่น เหล็กและเหล็กกล้าโดยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) เพราะทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เกาะกับผิวหน้าของวัตถุที่จะชุบ ได้แน่นและเรียบสม่ำเสมอ โลหะที่ชุบแคดเมียมแล้วนำไปทำน็อต ตะปู ชิ้นส่วนของแม่เหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์และเครื่องบิน ใช้เป็นส่วนประกอบของสีในอุตสาหกรรมทำสีทาบ้าน สีชุบโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน สีย้อมในเซรามิก เป็นต้น

แคดเมียมยังใช้ทำโลหะผสม (alloy) โดยนำไปผสมกับโลหะอื่น ๆ เช่น ผสมกับบิสมัท ตะกั่วและดีบุก ซึ่งโลหะผสมชนิดนี้มีสมบัติพิเศษ คือ มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะที่ใช้ จึงนำไปใช้ในระบบการดับเพลิง ใช้ทำปลายเครื่องตรวจไฟในระบบฉนวนอัตโนมัติที่ใช้ในโรงแรมและร้านค้า และเนื่องจากสารประกอบแคดเมียมมีคุณสมบัติทนความร้อนได้ดี สามารถใช้ในงานที่มีความเร็วสูง ๆ ได้ โลหะผสมของแคดเมียมกับนิกเกิลและทองแดงหรือเงิน จึงนิยมนำไปทำอัลลอยด์ที่ใช้ทำฝาประทับเพลาอีกด้วย

4) ความเป็นพิษของแคดเมียม ได้แก่ ความเป็นพิษเฉียบพลัน ความเป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหารซึ่งส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการกินอาหารที่มีแคดเมียมปนเปื้อน อาการที่ปรากฏเริ่มแรกคือคลื่นเหียนอย่างรุนแรง ตามด้วยอาการอาเจียน ท้องร่วง เป็นตะคริว และน้ำลายฟูมปากในรายที่เป็นมากจะมีอาการอย่างอื่นตามมาใน 2 ลักษณะ คือ อาจเกิดอาการช็อค เนื่องจากร่างกายสูญเสียน้ำมาก และอาจทำให้ตายได้ภายใน 24 ชั่วโมง หรืออีกลักษณะหนึ่งคือ ระบบการทำงานของไตล้มเหลวและอาจถึงตายได้ภายใน 7 หรือ 14 วัน นอกจากนี้อาจมีผลทำลายไปถึงตับ ความเป็นพิษต่อระบบหายใจ เนื่องจากการสูดหายใจควันของแคดเมียมจะปรากฏอาการหลังสูดหายใจเข้าไปแล้ว 2-3 ชั่วโมง โดยมีอาการระคายเคืองที่หลอดลมและปอด ซึ่งรวมถึงอาการอื่นๆด้วย เช่น ระคายเคืองที่จมูกและคอ ไอ ปวดศีรษะ เวียนศีรษะอ่อนเพลีย หนาวสั่น มีไข้ และเจ็บหน้าอก นอกจากนี้ยังมีอาการอื่นๆร่วมด้วยเช่น คลื่นเหียน อาเจียนและท้องร่วง ส่วนความเป็นพิษแบบเรื้อรังที่มีต่อมนุษย์หลังจากที่ร่างกายได้รับแคดเมียมในปริมาณปานกลางเข้าไปนานติดต่อกัน มักปรากฏอาการที่ปอดและไต

2.3.2 กรณีศึกษาที่เกิดปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในประเทศไทย

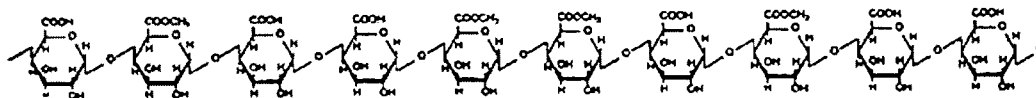
จากรายงานผลการศึกษากการปนเปื้อนของสารแคดเมียมในดินและพืชผลการเกษตร บริเวณห้วยแม่ดาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ของสถาบันจัดการทรัพยากรน้ำนานาชาติ (International Water Management Institute-IWMI) ร่วมกับกรมวิชาการเกษตร ภายใต้โครงการร่วมมือระหว่างปีพุทธศักราช 2541-2546 ได้ทำการตรวจวัดระดับสารแคดเมียมในดินและข้าว เพื่อตรวจสอบและแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของสารแคดเมียมในบริเวณตำบลพระธาตุผาแดงซึ่งคาดว่า จะได้รับผลกระทบ ผลการตรวจสอบพบว่า คุณภาพน้ำใต้ดิน น้ำผิวดิน ยังอยู่ในระดับปลอดภัยต่อการบริโภค ตะกอนดินในท้องน้ำของห้วยแม่ดาวมีระดับการปนเปื้อนของสารแคดเมียมเกินค่ามาตรฐานตลอดลำห้วย (ยกเว้นบริเวณต้นน้ำ) ซึ่งมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานของแคนาดาถึง 100 เท่า ส่วนพื้นที่เกษตรซึ่งใช้น้ำจากห้วยแม่ดาวในการเพาะปลูก พบการปนเปื้อนของสารแคดเมียมสูงเกินมาตรฐาน นอกจากนี้ยังทำการตรวจสอบสารแคดเมียมในร่างกายของประชาชนในเขตตำบลพระธาตุผาแดง ตำบลแม่ดาว และตำบลแม่กุ จำนวน 9,000 ราย พบว่าประมาณร้อยละ 11.2 ของประชากรมีระดับสารแคดเมียมค่อนข้างสูง ซึ่งมีความเสี่ยงที่จะเกิดภาวะพิษจากแคดเมียมในไตเรื้อรังและร้อยละ 2.7 มีระดับสารแคดเมียมสูง ซึ่งมีความเสี่ยงมากที่จะเกิดภาวะพิษจากแคดเมียมในไตเรื้อรัง

2.4 เปลือกส้มโอ

ส้มโอเป็นผลไม้เขตร้อนที่ปลูกกันอย่างกว้างขวางในหลายประเทศในเขตเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และประเทศจีนตอนใต้ มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Citrus maxima* Mer. (*C. grandis* Osbeck; *C. decumana* L.) มีชื่อภาษาอังกฤษคือ pummelo หรือ pomelo ส้มโอเป็นผลไม้ตระกูลส้มที่มีขนาดใหญ่ที่สุด และเป็นต้นตระกูลของผลไม้จำพวกส้ม (grapefruit) ซึ่งเป็นผลไม้พันธุ์ผสมที่มีลักษณะคล้ายกันแต่มีขนาดเล็กกว่าส้มโอ ในประเทศไทยมีส้มโอมากกว่า 20 สายพันธุ์ แบ่งเป็นกลุ่มที่เนื้อส้มโอมีสีขาว เช่น ขาวพวง ขาวแป้น ขาวใหญ่ ขาวน้ำผึ้ง ขาวแตงกวา เป็นต้น หรือ มีสีชมพูหรือแดง เช่น ทองดี ท่าข่อย ทับทิมสยาม เป็นต้น (นันทิศา ศรีเผือก, 2548)

ลักษณะทั่วไปของผลส้มโอจะมีส่วนประกอบคล้ายส้มทั่วไป ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนของเปลือก (Epicarp) ประกอบด้วยเซลล์ที่มีสารคลอโรฟิลล์ แครโรทีนอยด์ มีต่อมไขมัน (Oil Grand) ในบริเวณส่วนนอกของเปลือก ส่วนต่อมาก็คือส่วนของเนื้อเยื่อส่วนกลาง (Mesocarp) มีสีขาว ประกอบด้วยเนื้อเยื่ออ่อน (Spongy Tissue) ของเซลล์เนื้อเยื่อพืชที่มีผนังบาง (Parenchyma) ขนาดใหญ่ ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วย เพคตินและเฮมิเซลลูโลส ส่วนถัดมาก็คือส่วนของเนื้อชั้นในผลไม้ (Endocarp) เป็นส่วนที่รับประทานได้มีลักษณะเป็นกลีบ (Carpels) ซึ่งปกติมีอยู่ 9-13 กลีบต่อผล ภายในประกอบด้วยถุง (Juice Sac หรือ Juice Vesicle) เป็นจำนวนมาก (นันทิศา ศรีเผือก, 2548)

งานวิจัยนี้จะเลือกใช้ส่วนของเนื้อเยื่อส่วนนอกของเปลือก (Epicarp) และส่วนกลาง (Mesocarp) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือทิ้งที่มีปริมาณมากประกอบไปด้วยเซลล์ที่มีสารคลอโรฟิลล์ แครโรทีนอยด์ มีต่อมไขมัน (Oil Grand) ในบริเวณส่วนนอกของเปลือก ส่วนเนื้อเยื่อส่วนกลาง (Mesocarp) จะมีเพคตินและเฮมิเซลลูโลส โดยเพคติน (pectin) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ประเภท heteropolysaccharide มีหน่วยย่อย คือกรดกาแล็กทูโรนิก (D-galacturonic acid) ประมาณ 65% โดยน้ำหนัก และเมทิลการแล็กทูโรเนต และ น้ำตาล หลายชนิด เช่น rhamnose, galactose และ arabinose พบตามธรรมชาติในผนังเซลล์ของพืช (plant cell wall) และรอยต่อระหว่างผนังเซลล์ โดยรวมตัวอยู่กับเซลลูโลส (cellulose) ทำหน้าที่ยึดเกาะผนังเซลล์ให้ติดกัน ส่วนเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส เป็น heteropolysaccharide ที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด มีน้ำตาลไซโลส (xylose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง บีตา (1-4) เป็นโซ่หลัก อาจมีน้ำตาลแมนโนส (mannose) กาแล็กโทส (galactose) หรือกลูโคส (glucose) มาต่อกันเป็นโซ่หลักด้วยและมีน้ำตาลชนิดอื่นมาต่อกันเป็นโซ่สาขา หรือโซ่แขนงได้แก่ น้ำตาลอะราบินโนส (arabinose) และ กรดกลูคูโรนิก (glucuronic acid) (May, 1997)

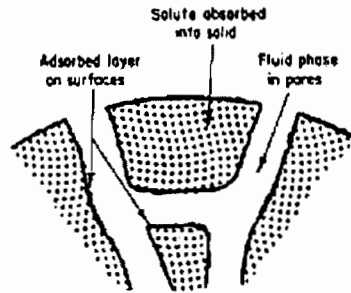


ภาพที่ 2.1 ลักษณะ โครงสร้างของเพคตินโดยมีหมู่ Homogalacturonan มาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว (Seymour and Knox, 2002)

2.5 การดูดซับ

การดูดซับ หมายถึง กระบวนการแยกสารที่จะเรียกสารที่ถูกแยกว่า “ตัวถูกละลายหรือตัวถูกดูดซับ” ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่ง หรือสารประกอบหลายชนิดไว้บนผิวของแข็ง โดยไม่เปลี่ยนโครงสร้างของแข็งนั้น ระบบของแข็งที่เก็บสะสมสารประกอบอื่น ๆ จะมีโมเลกุลหรืออนุภาคในของไหลที่เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่กับพื้นของแข็งด้วยแรงดึงดูดชนิดเดียวกัน สารที่มีพื้นผิวเกาะจับ โมเลกุลหรือแวนดอลอย จะเรียกว่า “ตัวดูดซับ” (Adsorbent) สารที่มาเกาะเรียกว่า “ตัวถูกดูดซับ” (Adsorbate) ไว้บนผิว โดยกระบวนการดูดซับจะเกิดจากการแยกสาร (ตัวถูกดูดซับ) ซึ่งอนุภาคของตัวถูกดูดซับจะละลายอยู่ในของไหล (ของเหลวหรือแก๊ส) และจะไหลเข้าสัมผัสกับของแข็ง (ตัวดูดซับ) โดยอนุภาคของตัวถูกดูดซับจะแพร่ผ่านเข้าไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับผ่านรอยต่อระหว่างของแข็งกับของเหลว (จักรกฤษณ์ อัมพฤษ, 2549) ดังนั้น ตัวดูดซับจึงมักเป็นของแข็งและรูพรุนจำนวนมากและพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ปริมาณการดูดซับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ เมื่อตัวดูดซับมีรูพรุนภายในมาก ตัวดูดซับจะมีความหนาแน่นลดลง แม้ว่าการเพิ่มปริมาณรูพรุนที่มีขนาดเล็กในตัวดูดซับจะทำให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น แต่รูพรุนขนาดเล็กอาจเป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของตัวถูกดูดซับภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ไปยังพื้นผิวในรูพรุนขนาดเล็กดังกล่าว เมื่อพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพของรูพรุนในตัวดูดซับ รูพรุนส่วนใหญ่ของตัวดูดซับควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสถานะก๊าซหรือไอ (ทรงศักดิ์ สระแก้ว, 2555) เพื่อให้ตัวถูกดูดซับนั้นมีความสามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ และสามารถแพร่ต่อไปยังพื้นผิวภายในรูพรุนเหล่านั้นได้อย่างสะดวก ส่วนการดูดซับตัวถูกดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่อยู่ในสถานะของเหลวนั้น เช่น การดูดซับไอออนชนิดต่าง ๆ หรือสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่ละลายน้ำ เป็นต้น รูพรุนส่วนใหญ่ของตัวดูดซับควรมีขนาดใหญ่เพียงพอ เพื่อให้ของเหลวที่มีตัวถูกดูดซับเหล่านั้น สามารถไหลเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับได้อย่างสะดวก โดยที่ตัวถูกดูดซับยังคงอยู่ในลักษณะเดิม ดังนั้น สารประกอบทุกชนิดที่อยู่ในรูพรุนของตัว

ดูดซับจัดเป็น “ตัวถูกดูดซับ” ของระบบดูดซับของเหลวโดยไม่ต้องเกาะติดผิวในรูพรุนของตัวดูดซับ



ภาพที่ 2.2 กระบวนการดูดซับ (P. Vladimir, K. Zlatko, C. Slavoj, 1974)

2.5.1 จากภาพที่ 2.2 สามารถอธิบายกระบวนการดูดซับได้ดังนี้ (P. Vladimir, K. Zlatko, C. Slavoj, 1974)

2.5.1.1 เกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าหาตัวดูดซับ โดยการเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการกวนจนทำให้เกิดการปั่นป่วน หรือการเคลื่อนที่ผ่านของของไหลที่มีตัวถูกดูดซับอยู่ หรือเนื่องจากกลไกการเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน

2.5.1.2 Film diffusion เมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้ามาถึงตัวดูดซับ จะมีฟิล์มของของไหลล้อมรอบตัวดูดซับอยู่โดยล้อมรอบคล้ายเยื่อบางๆซึ่งตัวถูกดูดซับจะต้องแทรกตัวผ่านฟิล์มเข้ามาให้ได้จึงจะเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวของตัวดูดซับได้

2.5.1.3 Pore diffusion เนื่องจากตัวดูดซับมีรูพรุนหรือช่องว่างอย่างมากมาย ตัวถูกดูดซับจะต้องแทรกเข้าไปให้ถึงรูพรุนให้ได้ จึงจะเกิดการดูดซับขึ้น

2.5.1.4 ตัวถูกดูดซับจะเกาะติดภายในตัวดูดซับได้โดยที่ไม่หลุด

2.5.2 ลักษณะการดูดซับ (มันสิน คัมภลเวศม์, 2542)

ลักษณะของการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับสามารถจำแนกได้ 4 ประเภทคือ

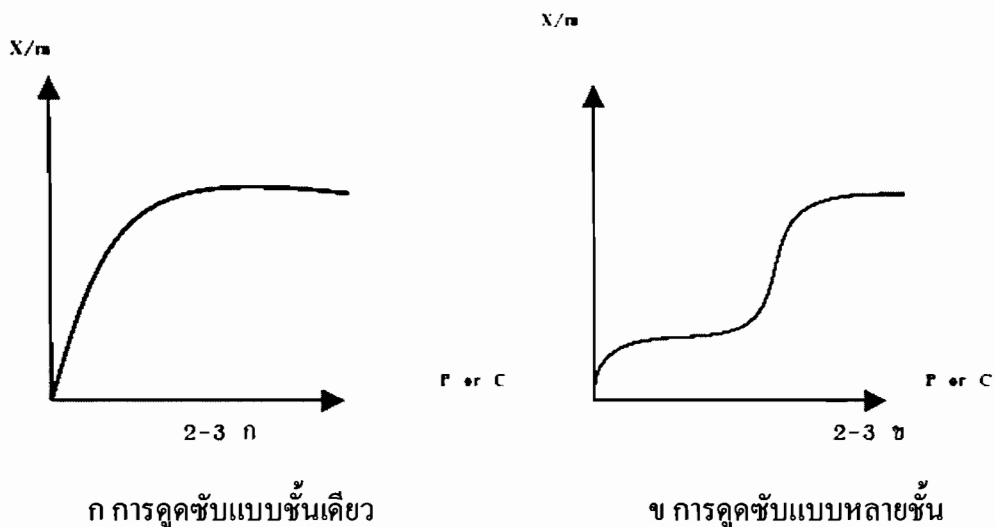
2.5.2.1 การดูดซับแบบกายภาพ (Physical adsorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับโดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอ่อนๆและไม่กำหนดทิศทาง เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ พันธะไฮโดรเจน เป็นต้น ไม่มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการ

ดูดซับมีค่าน้อย การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับทำได้ง่าย และรูปแบบการดูดซับอาจเกิดได้หลายชั้น (Multilayer) ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ข

2.5.2.2 การดูดซับแบบเคมี (Chemical adsorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีต่อกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงตัวใหม่เป็นสารประกอบใหม่ขึ้น ซึ่งพันธะระหว่างอะตอมมักเป็นพันธะที่แข็งแรงมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ความร้อนของการดูดซับมีค่ามาก การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับทำได้ยากและรูปแบบการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ก

2.5.2.3 การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (Exchange adsorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุ และเกิดแรงดึงดูดที่ผิวหน้าระหว่างประจุหรือไอออนของตัวดูดซับกับประจุตรงข้ามของตัวถูกดูดซับ หรือเกิดเนื่องจากการแทนที่ประจุที่ผิวหน้าของตัวดูดซับด้วยไอออนของตัวถูกดูดซับ

2.5.2.4 การดูดซับแบบเจาะจง (Specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่ได้มีผลทำให้โครงสร้างของตัวดูดซับเปลี่ยนไป



ภาพที่ 2.3 รูปแบบการดูดซับ

2.5.3 ตัวดูดซับ (Absorbent) (Duong D. Do, 1998)

ตัวดูดซับ หมายถึง สารที่มีอะตอมหรือโมเลกุลหรือไอออนของสารที่ถูกดูดซับเข้ามาชิด เกาะอยู่บริเวณพื้นผิวอนุภาคด้วยแรงทางเคมีหรือฟิสิกส์

2.5.3.1 คุณสมบัติของตัวดูดซับ

- 1) ตัวดูดซับจะต้องมีพื้นที่ผิวที่มากหรือมีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) ที่มาก
- 2) ตัวดูดซับจะต้องมีความสัมพันธ์เชื่อมกันระหว่างรูพรุนเป็น โครงร่างตาข่าย เพื่อที่จะให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ภายในได้

(Duong D. Do, 1998) ได้แบ่งขนาดของรูพรุนตามระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ไว้ดังนี้

รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) คือ รูพรุนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร

รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) คือ รูพรุนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 2 นาโนเมตร ถึง 50 นาโนเมตร

รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) คือ รูพรุนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร

2.5.3.2 ประเภทของตัวดูดซับ (มันสิน คัมพุลเวศม์, 2542)

ประเภทของตัวดูดซับที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

- 1) สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ถ่านลอยลิกไนต์ ถ่านกระดูก (Bone char) และถ่านกัมมันต์ซิลิกา (Activated silica) เป็นต้น ตัวดูดซับประเภทนี้จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม มีข้อเสียคือสามารถจับ โมเลกุลหรือ คอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด การใช้ประโยชน์จึงมีจำกัด

- 2) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าสารชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตร/กรัม และเมื่อนำมาใช้แล้วสามารถคืนสภาพ (Regenerate) และนำกลับมาใช้ใหม่ได้แต่มีข้อเสียคือ การคืนสภาพต้องทำการเผาไหม้ที่ อุณหภูมิสูง ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายไม่คุ้มทุน และยังมีบางส่วนสูญเสียไปในกระบวนการนี้ และยังมีราคาแพงด้วย

- 3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ที่มีประจุบนพื้นผิว สามารถดูดซับกับสารอื่นๆ ที่มีประจุตรงกันข้าม ทำให้เกิดการเกาะติดกันได้ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่

ตั้งเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆเรียกว่า Macroporous Resin เช่น Styrene Divinylbenzene (SDVB) Phenol-Formaldehyde (PF) Resin เป็นต้น มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตร/กรัม ซึ่งต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อดีก็คือสามารถคืนสภาพ (Regenerate) ได้ง่าย และสารที่นำมาเป็นรีเจนเนอเรนต์ (Regenerant) มักเป็นสารราคาถูก เช่น เกลือแกง

2.5.4 ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)

หมายถึง อะตอม โมเลกุล หรือไอออนของสารที่ถูกดูดซับไว้ด้วยตัวดูดซับอาจจะ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการหรือเป็นสารที่ต้องการกำจัด เช่น โลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียหรือสารละลายที่ต้องการนำกลับมาใช้ใหม่

2.5.5 ปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

มันสิน คัมภูลเวศม์ (2542) ได้กล่าวไว้ว่าในระหว่างที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับส่วนใหญ่จะจับภายในรูพรุนของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจากเฟสของไหลไปยังตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุลแล้วจะหยุดการดูดซับที่จุดสมดุล ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับจะมีค่าเหลือน้อยมากในเฟสของของไหลเพราะส่วนมากจะเคลื่อนที่ไปจับอยู่กับตัวดูดซับหมดแล้ว ณ จุดสมดุล

สมดุลของการดูดซับผิวของตัวดูดซับจึงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญ ซึ่งใช้ในการกำหนดขีดความสามารถของระบบดูดซับเช่นทำให้รู้ว่าระบบดูดซับจะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากน้อยเพียงใด เป็นต้น อย่างไรก็ตามยังมีสิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ต้องกล่าวถึงคือ จลนศาสตร์ของระบบซึ่งอธิบายถึงอัตราเร็วของการดูดซับนั่นคือ เมื่อรู้ว่าการดูดซับจะสามารถเกิดขึ้นได้เท่าใด ยังต้องรู้ว่าอัตราเร็วของการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ภายในเวลาเท่าใดเพื่อนำไปกำหนดเวลาสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับเฟสของของไหลที่มีตัวถูกดูดซับอยู่ อัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

2.5.5.1 ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ Film Diffusion หรือขึ้นอยู่กับ Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าเฟสของไหลมีความปั่นป่วนต่ำ พิล์มของของไหลซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับที่จะเข้าไปหาตัวดูดซับทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าของไหลมีความปั่นป่วนสูงทำให้ของไหลไม่สามารถสะสมเกิดเป็นฟิล์มได้เป็นผลให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ผ่านตัวดูดซับไปอย่างรวดเร็วจนไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ด้วยเหตุนี้อัตราเร็วในการดูดซับจึงขึ้นอยู่กับ Pore diffusion เนื่องจากมีความปั่นป่วนสูง

2.5.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ ขนาดของตัวดูดซับมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับในทางลบ กล่าวคือ อัตราดูดซับเป็น

สัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดซับตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

2.5.5.3 ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับภายในเฟสของของไหล เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น ตัวถูกดูดซับจะถูกแยกออกจากเฟสของของไหล และไปเกาะติดอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่สามารถละลายได้ในเฟสของของไหลได้ดีย่อมจะมีแรงยึดเหนี่ยวที่มาก จึงเป็นการยากที่ตัวถูกดูดซับจะมาเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับ แต่เกณฑ์นี้ไม่แน่นอนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับด้วย

2.5.5.4 ขนาดของตัวถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีอิทธิพลคือ การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อตัวถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนได้หรือมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โดยตัวถูกดูดซับขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในรูพรุนก่อนแล้วตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่กว่าจึงจะถูกดูดเข้าไปบ้าง

2.5.5.5 พิเอช เนื่องจากพิเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็น ไอออนและการละลายในน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลต่อการดูดซับในระบบที่มีการละลายในน้ำด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ด้วย

2.5.5.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคืออัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และลดลงตามอุณหภูมิลดลง แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง

2.6 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของเหลว สามารถอธิบายกระบวนการดูดซับในรูปพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดซับได้ 5 รูปแบบ คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับ แบบที่ I เป็นการดูดซับที่มีโมเลกุลเพียงชั้นเดียวบนสารดูดซับ ซึ่งเป็นสารดูดซับที่เกิดจากการดูดซับทางเคมี ไอโซเทอมแบบที่ II เป็นการดูดซับที่มีโมเลกุลหลายชั้นบนพื้นแบบผิวของสารดูดซับ ไอโซเทอมแบบที่ III เป็นไอโซเทอมที่มีโมเลกุลการดูดซับหลายชั้นบนพื้นผิวของการดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับไม่ค่อยดี ไอโซเทอมแบบที่ IV และ V การวิเคราะห์ระบบการดูดซับโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ให้อยู่ในรูปอย่างง่าย ส่วนใหญ่พฤติกรรมของการดูดซับในของเหลวจะมีความสอดคล้องกับ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

(Freundlich) และแลงเมียร์ (Langmuir) เช่น การดูดซับของถ่านกัมมันต์ในน้ำ และน้ำเสีย เป็นต้น (Rozada et al., 2003)

ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ สามารถคำนวณได้จากสมการมวลสาร (Seader and Henley, 1998) โดยจะถือว่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่หายไปจากสารละลาย จะถูกดูดซับอยู่บนตัวดูดซับเท่านั้น ซึ่งปริมาณการดูดซับหาได้ตามสมการที่ 2.1 และสำหรับประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมสามารถคำนวณได้จากสมการเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.2

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

โดยที่	q_e	คือ ปริมาณแคดเมียมในเปลือกส้มโอที่สภาวะสมดุล (mg/g)
	m	คือ น้ำหนักของเปลือกส้มโอ (g)
	V	คือ ปริมาตรของน้ำ (L)
	C_0	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมในน้ำ (mg/L)
	C_e	คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของแคดเมียมในน้ำ (mg/L)

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

รายละเอียดของไอโซเทอมการดูดซับมีดังนี้

2.6.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear isotherm)

เป็นไอโซเทอมที่ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สภาวะสมดุล โดยทั่วไปแล้วจะเรียกว่ากฎของ เฮนรี (Henry's Law) มีรูปแบบสมการเป็นดังนี้ สมการที่ 2.3

$$q_e = K_d C_e \quad (2.3)$$

โดยที่	q_e	คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)
	C_e	คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายหลังการดูดซับ (mg/L)
	K_d	คือ สัมประสิทธิ์การแจกแจงหรือ ค่าคงที่ Henry's Law (L/g)

2.6.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Chen D., et al., 2011) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.4 ซึ่งจะอธิบายถึงการจับตัวกันเป็นชั้น ๆ ของตัวถูกดูดซับ (Multilayer) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ เนื่องจากโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันสูง

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (2.4)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)

C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายหลังการดูดซับ (mg/L)

K_f, n คือ ค่าคงที่

ค่าคงที่ในสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช สามารถหาได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ $\ln C_e$ โดยใช้สมการที่ 2.5 ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการใหม่ของสมการที่ 2.4

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2.5)$$

โดยค่าคงที่ n หาได้จากค่าเศษหนึ่งส่วนความชัน ($\frac{1}{\text{slope}}$) และค่าคงที่ K_f หาได้จากค่าเอกซ์โพเนนเชียลของจุดตัดแกน y ในสมการที่ 2.5

2.6.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีสมมติฐานว่าตัวถูกดูดซับจะปกคลุมผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer sorption) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.6

$$q_e = \frac{K_L C_e}{1 + a_L C_e} \quad (2.6)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)

C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายหลังการดูดซับ (mg/L)

a_L, K_L คือ ค่าคงที่อย่างง่าย

การหาค่าคงที่ในสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ สามารถหาได้จาก การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e โดยใช้สมการที่ 2.7 ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการใหม่ ของสมการที่ 2.6

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

เมื่อหาค่าเศษหนึ่งส่วนความชัน ($\frac{1}{\text{slope}}$) หรือหาค่า $\frac{K_L}{a_L}$ ในสมการที่ 2.7 จะได้ ปริมาณการดูดซับแบบชั้นเดียวของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับสูงสุด และแทนด้วยสัญลักษณ์ q_m

2.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

การดูดซับสารถูกดูดซับชนิดหนึ่ง จะประกอบไปด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นของไหล รอบ ๆ ตัวดูดซับ การแพร่ในรูพรุนตัวดูดซับ ไปยังพื้นผิวตัวดูดซับ และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมี ที่พื้นผิวตัวดูดซับ ซึ่งขั้นตอนใดที่เกิดขึ้นช้าที่สุด ขั้นตอนนั้นจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ของระบบการดูดซับนั้น ๆ (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552) โดยการแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับ ใน หลักของการถ่ายโอนโมเมนตัม ของไหลที่อยู่รอบตัวดูดซับที่หยุคหนึ่งจะเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ จึงเกิด ชั้นของไหลบาง ๆ ล้อมรอบตัวดูดซับ ชั้นของไหลนี้เป็นอุปสรรคต่อการดูดซับ นอกจากนี้ความหนา ของชั้นของไหลรอบตัวดูดซับแปรผกผันกับอัตราการเคลื่อนที่ของของไหล นั่นคือ เมื่อของไหล เคลื่อนที่เร็วมากขึ้น ความหนาของชั้นของไหลรอบตัวดูดซับจะลดบางลง ของไหลในชั้นของไหล รอบตัวดูดซับจะเคลื่อนที่ช้ามาก จึงมักพิจารณาให้เสมือนหยุคหนึ่ง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจึงแพร่ ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับได้ การแพร่ของตัวถูกดูดซับจึงเกิดขึ้นจาก ผลต่างของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับตามกฎการแพร่ของฟิคค์ (Fick's law of diffusion) เพียงอย่าง เดียว ส่วนการแพร่ในรูพรุนของตัวดูดซับ เมื่อตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับถึงผิว นอกของตัวดูดซับ แม้ว่าตัวถูกดูดซับอาจเกาะติดผิวนอกของตัวดูดซับซึ่งเป็นพื้นผิวดูดซับส่วนน้อย ของตัวดูดซับ แต่ตัวถูกดูดซับส่วนใหญ่จะแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับและแพร่ไปยังพื้นผิวตัวดูด ซับ ตัวถูกดูดซับบางส่วนสามารถเกาะติดที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับดังกล่าว และตัวถูกดูดซับ อีกบางส่วนยังคงแพร่เข้าสู่ส่วนลึกของรูพรุนต่อไป

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับจะแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อทาง กายภาพและทางเคมี คือ วัสดุที่ใช้เป็นตัวดูดซับจะมีอิทธิพลต่อกลไกการดูดซับด้วย และเพื่อทราบ ถึงกลไกการดูดซับ เช่น การถ่ายโอนมวลสารระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และกระบวนการ

เกิดปฏิกิริยาเคมี แบบจำลองจลนพลศาสตร์จึงถูกใช้อธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ซึ่งแบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ Pseudo-first order และ Pseudo-second order (Wang and Wang, 2007) โดยอัตราการดูดซับจะขึ้นอยู่กับว่าขั้นตอนใดเกิดขึ้นช้าที่สุด ดังกล่าวข้างต้น ขั้นตอนนั้นจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ

ดังนั้น จึงสามารถอธิบายได้ว่า ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของตัวถูกดูดซับผ่านชั้นของไฮดรอลิกดูดซับเกิดขึ้นช้าที่สุด เป็นอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ส่วนขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าที่สุด เป็นอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ซึ่งขั้นตอนในการหากลไกอัตราการดูดซับของจลนพลศาสตร์มีรายละเอียดแสดงได้ดังนี้

2.7.1 สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order equation) จลนพลศาสตร์ของการดูดซับจะถูกอธิบายโดยสมการเชิงอนุพันธ์แสดงไว้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (2.10)$$

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

เมื่อทำการหาปริพันธ์สมการที่ 2.10 โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่ $t = 0; q_t = 0$ และ $t = t; q_t = q_t$ จะได้

$$\ln\left[\frac{q_e}{(q_e - q_t)}\right] = k_1 t \quad (2.11)$$

สามารถจัดรูปใหม่ของสมการที่ 2.11 ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

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

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

2.7.2 สมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order equation)
จลนพลศาสตร์ของการดูดซับจะถูกอธิบายโดยสมการเชิงอนุพันธ์ดังแสดงต่อไปนี้

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

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

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.13 โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่ $t = 0; q_t = 0$ และ $t = t; q_t = q_t$ จะได้

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

สมการที่ 2.14 สามารถจัดรูปใหม่ในรูปของสมการเส้นตรง ดังนี้

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

ค่าคงที่ k_2, q_e และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 สามารถหาได้จากกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ กับ t

2.8 การคายซับ (Desorption)

การคายซับ คือ การคืนสภาพของอนุภาคของแข็งหรือพื้นผิวตัวดูดซับเป็นกระบวนการย้อนกลับของกระบวนการดูดซับที่เรียกว่า “การคายซับ (Desorption)” คือการทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายมวลสารของ adsorbate ออกจากพื้นผิวของอนุภาคของแข็ง โดยใช้วิธีการทางกายภาพหรือทางเคมีในการคายซับของตัวดูด โดยเป็นการฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับ (Regeneration) ที่เริ่มหมดสภาพให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แทนที่จะนำสารดูดซับไปทิ้งโดยไม่ใช้ประโยชน์ ซึ่งวิธีการฟื้นฟูสภาพอาจใช้วิธีทางเคมี วิธีความร้อน หรือวิธีเผา (ศรีภัทรา โสภาสิน, 2556)

2.9 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย (มันสิน คัมพุลเวศม์, 2543, สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2540, D.A. Skoog, F. J. Holler, T.A. Nieman, 1998)

การจำแนกประเภทของโลหะในน้ำที่ต้องการวิเคราะห์ นิยมแบ่งโลหะที่ต้องการวิเคราะห์ออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

2.9.1 โลหะละลาย (Dissolved metals) คือ ธาตุโลหะที่หาได้จากส่วนประกอบต่าง ๆ ซึ่งสามารถผ่านเยื่อกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตรได้

2.9.2 โลหะแขวนลอย (Suspended metals) คือ โลหะที่หาได้จากส่วนประกอบต่าง ๆ ซึ่งไม่สามารถผ่านเยื่อกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตรได้

2.9.3 โลหะทั้งหมด (Total metals) คือ ปริมาณธาตุโลหะที่หาได้จากตัวอย่างน้ำที่ไม่ได้กรองและทำการย่อยสลายอย่างรุนแรง หรือ คือปริมาณโลหะที่เท่ากับผลรวมของปริมาณโลหะละลายกับปริมาณโลหะแขวนลอย

2.9.4 โลหะสกัด (Extractable metals) คือ ปริมาณโลหะที่หาได้จากตัวอย่างน้ำที่ไม่ได้กรอง และทำปฏิกิริยาสกัดด้วยกรดแร่ (Mineral acids) ที่เจือจางและร้อน

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโลหะต่าง ๆ นั้น สามารถทำได้ทั้งการวิเคราะห์โดยใช้วิธีทางเคมีธรรมดา (Chemical method of analysis) และโดยใช้เครื่องมือ (Instrument method of analysis) แต่เนื่องจากปริมาณของโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีจำนวนน้อย การวิเคราะห์โดยวิธีการทางเคมีธรรมดาจะให้ผลได้ไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำและรวดเร็วโดยไม่ต้องผ่านกรรมวิธีหลายขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างน้ำก่อนวิเคราะห์จึงใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือคือ อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS)

วิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี สำหรับการวิเคราะห์โลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียอาจจะมีขั้นตอนเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของโลหะหนักที่ต้องการวิเคราะห์ และ/หรือความเข้มข้นหรือปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในตัวอย่าง

การวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุอย่างหนึ่งซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่งเพราะเป็นเทคนิคที่ให้ความเที่ยงตรง และแม่นยำ สามารถใช้วิเคราะห์ธาตุต่างๆ ได้ 67 ธาตุ

อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี เป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมอิสระของธาตุดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นอันหนึ่ง โดยเฉพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับของพลังงานแตกต่างกันจึงมีการดูดกลืนพลังงานที่แตกต่างกัน เช่น อะตอมของโซเดียมดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 589 นาเมตร โน เพราะแสงความยาวคลื่นนี้เป็นแสงที่มีพลังงาน

พอดีที่จะทำให้อิเล็กตรอนของโซเดียม เกิดการเปลี่ยนจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้น ความยาวคลื่นเหล่านี้จัดเป็น spectroscopic line ของอะตอมมิกสเปกตรัมซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด

การทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมอิสระนั้น ต้องมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไป ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปต่างๆกัน เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ หรือความร้อนจากไฟฟ้า ความร้อนจะทำให้เกิดกระบวนการแตกตัว หรือเปลี่ยนเป็น ไอ หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม หรือทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะกระตุ้น หรืออาจกลายเป็นไอออนก็ได้

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

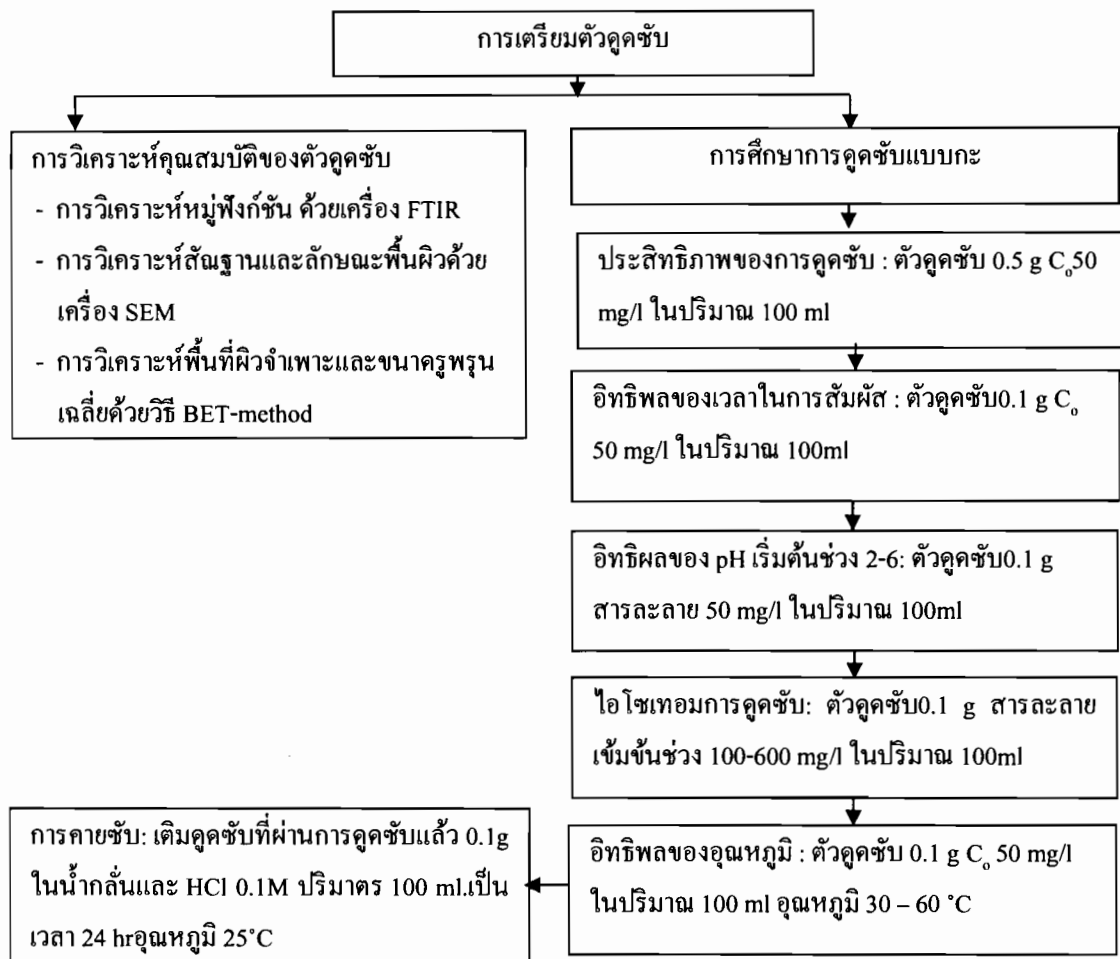
Ningchuan Feng et al. (2011) ได้ศึกษาการดูดซับ โลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้เปลือกส้มคัดแปลงทางเคมี ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับเปลือกส้มธรรมชาติ สามารถดูดซับเพิ่มขึ้น 4.2 4.6 และ 16.5 เท่าสำหรับ Pb^{2+} Cd^{2+} และ Ni^{2+} ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเปลือกส้มคัดแปลงทางเคมีมีประสิทธิภาพมากกว่าเปลือกส้มธรรมชาติ ค่าความเหมาะสมของพีเอชในการกำจัดอยู่ที่ 5.5

Torab-Mostaedi, M. and et al. (2013) ได้ศึกษาการดูดซับ Ni (II) และ Cd (II) โดยใช้เปลือกส้มโอ พบว่าค่าพีเอชที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยค่าการดูดซับของ Cd (II) และ Ni (II) อยู่ที่ 42.09 และ 46.13 มิลลิกรัม/กรัม ได้ศึกษาการคายซับด้วย 0.1 M HCl พบว่าสามารถคายซับได้มากกว่า 97 % และสามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำได้มากกว่า 5 รอบ การทำงานโดยมีเปอร์เซ็นต์การคายซับมากกว่า 95 % ในปัจจุบันเปลือกส้มโอมีจำนวนมาก สามารถนำมาดูดซับ บำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปนได้เพราะมีข้อดีคือ มีในธรรมชาติและมีต้นทุนต่ำ มีอัตราการดูดซับสูง สามารถดูดซับได้รวดเร็ว

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 กรอบงานวิจัย

การเตรียมตัวดูดซับด้วยเปลือกส้มโอและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ (เปลือกส้มโอ) จากนั้นศึกษาการดูดซับ โลหะหนักแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ (สารละลายแคดเมียม) ในการทดลองแบบกะและศึกษาการคายซับของตัวดูดซับขั้นตอนการวิจัยทั้งหมดสามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นแบบแผนภาพได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการวิจัย

3.2 ตัวดูดซับและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 ตัวดูดซับจากเปลือกส้มโอ

3.2.2 แคดเมียม $\text{CdCl}_2 \cdot 5/2\text{H}_2\text{O}$ มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 112.411 g/mol (ASIA PACIFIC SPECIALTY CHEMICALS LIMITED)

3.2.3 กรด HNO_3 , NaOH

3.2.4 น้ำปราศจากไอออน (Deionnized)

3.2.5 Standard Cd Solution

3.3 การเตรียมตัวดูดซับจากเปลือกส้มโอ

3.3.1 วิธีการเตรียมเปลือกส้มโอธรรมชาติ มีวิธีดังนี้

3.3.1.1 นำเปลือกส้มโอจำนวนหนึ่งมาล้างด้วยน้ำสะอาด 1-2 ครั้ง แล้วนำเปลือกส้มโอมาล้างด้วยน้ำ de-ionized

3.3.1.2 นำเปลือกส้มโอไปผึ่งแดดประมาณ 6 วันให้แห้ง

3.3.1.3 บดเปลือกส้มโอจากข้อ 3.3.1.2 ให้ละเอียด

3.3.2.4 ร่อนผ่านร่อนขนาด 100 mesh และเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccators)

3.3.2 วิธีการเตรียมเปลือกส้มโอตัดแปร มีวิธีการดังนี้

3.3.2.1 นำเปลือกส้มโมาชั่ง 40 กรัม

3.3.2.2 นำเปลือกส้มโมาแช่ในกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 MHNO_3 (10 กรัมของเปลือกส้มโอ/ลิตร) แช่ไว้ 6 ชั่วโมง

3.3.2.3 หลังจากนั้นนำเปลือกส้มโอที่ได้ไปล้างน้ำ de-ionized

3.3.2.4 นำเปลือกส้มโอไปผึ่งแดดประมาณ 6 วันให้แห้ง

3.3.2.5 บดเปลือกส้มโอจากข้อ 3.3.2.4 ให้ละเอียด

3.3.2.6 ร่อนผ่านร่อนขนาด 100 mesh และเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccators)

3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ

3.4.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ

นำตัวดูดซับ (เปลือกส้มโอธรรมชาติและเปลือกส้มโอตัดแปร) ไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน โดยใช้หลักการการดูดซับและการคายซับของก๊าซไนโตรเจนบนตัวดูดซับ (N_2 adsorption-desorption) วิเคราะห์ด้วยเครื่องออโตเมติกเซอร์เฟกอนาไลเซอร์ (Automatic Surface

Analyzer) รุ่น ASI-C-8 ยี่ห้อ Quantachrome Instrument อุณหภูมิที่ใช้ 77.4 K (ปริมาณกรด จารวงค์ และ รัตนวรรณ เกียรติโกมล, 2547)

3.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ

หมู่ฟังก์ชันของ PM และ MPM วิเคราะห์โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer: FTIR) รุ่น Spectrum RX 1 ยี่ห้อ Perkin Elmer ใช้สาร KBr ผสมกับตัวอย่าง และสแกนเวฟนัมเบอร์ (Wavenumbers Scan) ในช่วง $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ (Wang and Wang, 2007)

3.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ

นำเปลือกส้มโอธรรมชาติและเปลือกส้มโอคัดแปร ไปศึกษาจุลลักษณะและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิว วิเคราะห์ด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น JSM-5410LV ยี่ห้อ JEOL

3.5 การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม

การทำกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ของโลหะหนักแคดเมียม เพื่อจะใช้เป็นวิธีในการวัดความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS)

3.6 การศึกษาการดูดซับแบบกะ

3.6.1 การหาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียม

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ โลหะหนักแคดเมียม โดยใช้เปลือกส้มโอธรรมชาติ และเปลือกส้มโอคัดแปรเป็นตัวดูดซับมีวิธีการดังนี้

3.6.1.1 เตรียมสารละลายแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L ปริมาตร 100 mL เพื่อใช้เป็นน้ำเสียดังเคราะห์จากนั้นวัดค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0) ของสารละลายแคดเมียม

3.6.1.2 นำน้ำเสียดังเคราะห์ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS) เพื่อให้ทราบค่าความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น

3.6.1.3 เติมตัวดูดซับลงไปใต้น้ำเสียดังเคราะห์ 0.5 g (การเลือกปริมาณของตัวดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมจะได้อาจมาจากการทดลองลุ่มหลายๆครั้ง เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตผล)

3.6.1.4 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 25 °C

3.6.1.5 แยกตัวคูดซับออกโดยกรองผ่าน Micro filter GF/C

3.6.1.6 นำสารละลายส่วนที่ใสไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS) แล้วเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะหนักแคดเมียม โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.2 ในหัวข้อ 2.6 บทที่ 2

3.6.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

3.6.2.1 เตรียมสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันในช่วง 100 - 600 mg/L ปริมาตร 100 mL เพื่อใช้เป็นน้ำเสียดังเคราะห์ จากนั้นวัดค่าพีเอชเริ่มต้น (pH₀) ของสารละลายแคดเมียม

3.6.2.2 นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS) เพื่อให้ทราบค่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

3.6.2.3 เติมตัวคูดซับลงไปใต้น้ำเสียดังเคราะห์ จำนวน 0.1 g โดยเลือกใช้ตัวคูดซับที่สามารถดูดซับแคดเมียมได้มากที่สุดจากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในหัวข้อ 3.6.1

3.6.2.4 ทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 25 °C เพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับ

3.6.2.5 จากนั้นแยกตัวคูดซับออกโดยกรองผ่าน Micro filter GF/C

3.6.2.6 นำสารละลายมาวัดค่าพีเอชที่สมดุลและนำสารละลายมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS) และเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน

3.6.2.7 จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับ และนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาหาพฤติกรรมของการดูดซับว่ามีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบใดบ้าง เช่น แบบเส้นตรง (Linear) ฟรุนดิช (Freundlich) และแลงเมียร์ (Langmuir) โดยสามารถหาได้จากสมการไอโซเทอมการดูดซับ ซึ่งอยู่ในบทที่ 2 ในหัวข้อ 2.6

3.6.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับจะทำการทดลอง มีวิธีการศึกษาดังนี้

3.6.3.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L ปริมาตร 100 mL ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL ตามจำนวนที่กำหนด จากนั้นวัดค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0) ของสารละลายสี่ข้อม

3.6.3.2 นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS) เพื่อให้ทราบค่าความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น

3.6.3.3 เติมตัวดูดซับลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ จำนวน 0.1 g โดยเลือกใช้ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแคดเมียมได้มากที่สุดจากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในหัวข้อ 3.6.1

3.6.3.4 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm

3.6.3.5 เก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 10 นาที ใน 1 ชั่วโมงแรก ต่อมาเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 30 นาที จนถึงชั่วโมงที่ 2 หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าความเข้มข้นจะคงที่

3.6.3.6 จากนั้นแยกตัวดูดซับออกโดยกรองผ่าน Micro filter GF/C

3.6.3.7 นำสารละลายมาวัดค่าพีเอชที่สมดุลและนำสารละลายมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS) และเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน

3.6.3.8 วิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับ และนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษากับแบบจำลองอัตราการดูดซับ โดยใช้สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order equation) และสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order equation) ซึ่งสมการเหล่านี้จะอยู่ในบทที่ 2 ในหัวข้อ 2.6 จากนั้นนำไปศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ของพลังงานกระตุ้น ศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับ และศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับต่อไป

3.6.4 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมต่อปริมาณการดูดซับ

3.6.4.1 เตรียมสารละลายแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L จำนวนปริมาตร 100 mL เพื่อใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์

3.6.4.2 ทำการเตรียมสารละลายดังข้อ 3.6.3.1 ข้างต้น ให้มีค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0) แตกต่างกัน 5 ค่า (2 3 4 5 และ 6) โดยการปรับค่าพีเอชด้วยสารละลาย 0.1 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ 0.1 M กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

3.6.4.3 นำน้ำเสียสังเคราะห์ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS) เพื่อให้ทราบค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (Abs) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

3.6.4.4 เติมตัวดูดซับลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ จำนวน 0.1 g โดยเลือกใช้ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแคดเมียมได้มากที่สุดจากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในหัวข้อ 3.6.1

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

3.6.4.6 จากนั้นแยกตัวดูดซับออกโดยกรองผ่าน Micro filter GF/C

3.6.4.7 นำสารละลายมาวัดค่าพีเอชที่สมดุลและนำสารละลายมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS) และเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายแคะเมียมต่อปริมาณการดูดซับต่อไป

3.6.5 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับ

ทำการทดลองเหมือนกับการทดลองในหัวข้อ 3.6.2 แต่ใช้อุณหภูมิ 30, 40, 50, 60 °C นำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับ

3.6.6 การศึกษาอิทธิพลของการคายซับ

ในการศึกษาอิทธิพลของการคายซับจะนำเปลือกส้มโอธรรมชาติและเปลือกส้มโอตัดแปรหลังจากการดูดแคะเมียมมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.6.5.1 เตรียมสารละลายแคะเมียมที่มีความเข้มข้น 50 mg/L ปริมาตร 100 mL เพื่อใช้เป็นน้ำเสียดังเคราะห์ จากนั้นวัดค่าพีเอชเริ่มต้น (pH_0) ของสารละลายแคะเมียม

3.6.5.2 นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS) เพื่อให้ทราบค่าความเข้มข้นเริ่มต้น

3.6.5.3 เติมตัวดูดซับลงไปในน้ำเสียดังเคราะห์ จำนวน 0.1 g โดยเลือกใช้ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแคะเมียมได้มากที่สุดจากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในหัวข้อ 3.6.1

3.6.5.4 ทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 25 °C เพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับ จากนั้นแยกตัวดูดซับออกโดยกรองผ่าน Micro filter GF/C และนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 hr

3.6.5.6 นำตัวดูดซับ 0.1 g ที่ดูดซับแคะเมียมมาทำการผสมกับน้ำและสารละลาย 0.1 mol L⁻¹ HCl ปริมาตร 100 mL เขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 25 °C

3.6.5.7 จากนั้นแยกตัวดูดซับออกโดยกรองผ่าน Micro filter GF/C เพื่อแยกตัวดูดซับออก และนำสารละลายส่วนที่ใสมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy: AAS) และเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการคายซับ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับและแคดเมียม

4.1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ

จากการวิเคราะห์ตัวดูดซับด้วยเครื่อง Automatic Surface Analyzer วิเคราะห์ด้วย BET-method เพื่อศึกษาหาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับเปลือกส้มโอ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ $1.2026 \text{ m}^2/\text{g}$ มากกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับเปลือกส้มโอคัดแปรมีพื้นที่ผิวจำเพาะ $0.8892 \text{ m}^2/\text{g}$ เล็กน้อย และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับเปลือกส้มโอ มีขนาด 14.5929 nm ขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับเปลือกส้มโอคัดแปรมีขนาด 14.094 nm เล็กน้อย อาจส่งผลให้มีความเป็นไปได้ว่าปริมาณการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมของเปลือกส้มโอสูงกว่าเปลือกส้มโอคัดแปร

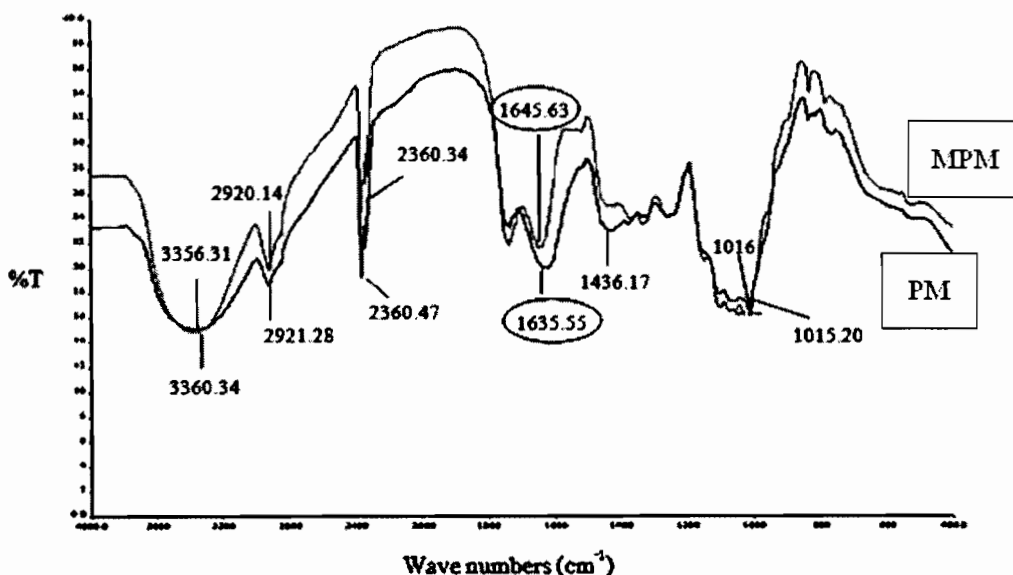
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ

ตัวแปร	ชนิดตัวดูดซับ	
	เปลือกส้มโอ	เปลือกส้มโอคัดแปร
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	1.2026	0.8892
เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (nm)	14.5929	14.0940

4.1.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ

FT-IR spectra ของเปลือกส้มโอและเปลือกส้มโอคัดแปรแสดงในรูปที่ 4.1 ที่ vibration band ในช่วง $1650-1600 \text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง free carboxylate groups (COO^-) และ ที่ $3400-3250 \text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง $-\text{OH}$ group ในผนังเซลล์ (cell wall) ของ PM จะมี α -(1-4)linked D-galacturonic acid ซึ่งมีประจุลบของ free carboxyl groups ในโมเลกุล pectin สามารถเกิดพันธะโควาเลนต์กับไอออนของโลหะหนักที่มี valence electron เท่ากับ 2 (Schiewer and Iqbal, 2010) เมื่อทำการคัดแปร

เปลือกส้มโอด้วยกรดไนตริกแล้ว(Torab-Mostaedi et al., 2013)พบว่า พีคที่ $1,436\text{ cm}^{-1}$ ได้หายไปจาก FT-IR spectra ของเปลือกส้มโอแสดงว่า มีการหายไปของ Cellulose บางส่วนที่มีองค์ประกอบของ C-C stretching (aromatics) หลังจากการตัดแปรด้วยกรดไนตริก

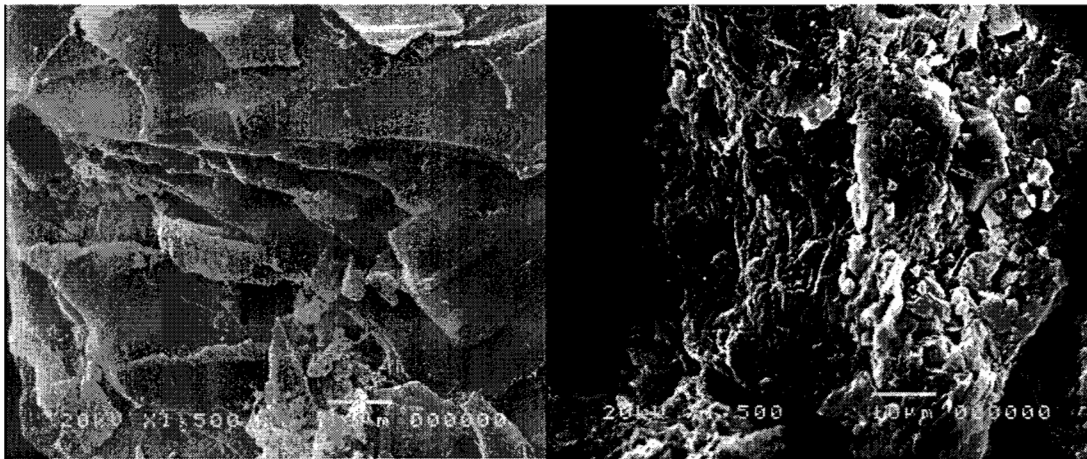


ภาพที่ 4.1สเปกตรัม FTIR ของ PM และ MPM

ตารางที่ 4.2ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ

Band range (cm^{-1})		หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
GF	MGF		
3360	3356	O-H stretching	แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน
2921	2920	C-H stretching	หมู่ CH_3 , CH_2 และ CH ของอัลเคน
2360	2360	$\text{C}\equiv\text{C}$, $\text{C}\equiv\text{N}$ stretching	Amines และ aromatic skeleton mode of lignin
1635	1645	COO^- stretching	Ionic Carboxylic, Pectin
1436	-	C-C stretching (aromatics)	Cellulose
1015	1016	C-O stretching	C-OH (ethanol)

4.1.3 ผลการวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ



(a)

(b)

ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ (a) เปลือกส้มโอและ (b) เปลือกส้มโอคัดแปรร

จากการวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยเครื่อง SEM ผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 4.2 พบว่าลักษณะสัณฐานของเปลือกส้มโอมีลักษณะเป็นแผ่นหยาบไม่เรียบ มีพื้นผิวที่ขรุขระ และมีแผ่นบาง ๆ เกาะติดอยู่ที่พื้นผิว (Torab-Mostaedi et al., 2013) (ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (a)) ส่วนเปลือกส้มโอคัดแปรรเมื่อปรับสภาพด้วยกรดไนตริกมีพื้นผิวเรียบ ละเอียด ซ้อนกันเป็นชั้น ๆ และมีก้อนกลม ๆ เล็ก ๆ เกาะติดอยู่ที่พื้นผิว (ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (b)) ซึ่งอาจเกิดจากกรดไนตริกส่งผลให้เกิดการทำลายพื้นที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนข้างต้น ซึ่งพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเปลือกส้มโอคัดแปรรมีค่าลดลง

4.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบกะ

4.2.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมด้วยเปลือกส้มโอและเปลือกส้มโอคัดแปรรสามารถทำได้โดยการหาเปอร์เซ็นต์การกำจัด (Removal percentage) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 พบว่าเปลือกส้มโอมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียมสูงกว่าเปลือกส้มโอคัดแปรรที่ 89.09% ของเปลือกส้มโอกับ 79.86% ของเปลือกส้มโอคัดแปรรการที่เปลือกส้มโอสามารถดูดซับแคดเมียมได้

มากกว่านั้นอาจเนื่องมาจากเปลือกส้ม โอมิเพคตินเป็นส่วนประกอบแล้วพบว่าเปลือกส้มโอมิประจุลบโดยเทียบได้จากการวัดค่าจากเครื่อง FTIR ที่พีค1635.55 cm^{-1} มีหมู่ฟังก์ชัน COO⁻เกิดขึ้นและแคดเมียมซึ่งมีประจุบวกทำให้เกิดการดูดซับมีประสิทธิภาพมากขึ้น ประกอบกับมีพื้นที่ผิวจำเพาะและเส้นผ่าศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยที่สูงกว่านั่นเอง

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัมในภาชนะในการดูดซับ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $\text{pH}_0 = 5.7 \pm 0.5$

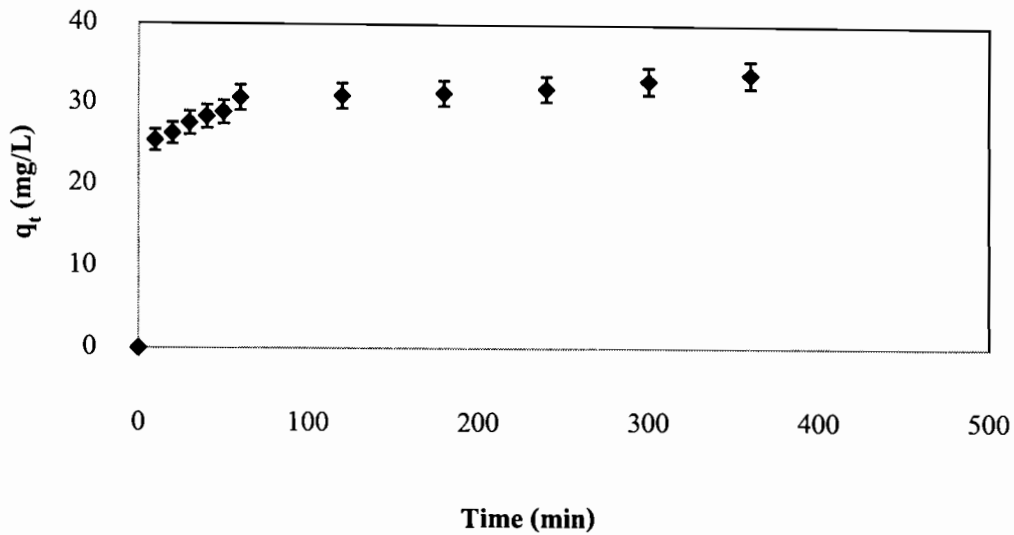
ชนิดของโลหะหนัก	% การกำจัดแคดเมียม	
	เปลือกส้มโอ	เปลือกส้มโอตัดแปร
โลหะหนักแคดเมียม	89.09 ± 4.33	79.86 ± 1.56

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับพบว่า เปลือกส้มโอเป็นตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียดังเคราะห์ได้มากกว่าเปลือกส้มโอตัดแปร ดังนั้น ในการทดลองขั้นตอนต่อไปจะศึกษาเฉพาะการดูดซับแคดเมียมด้วยเปลือกส้มโอเท่านั้น

4.2.2 ผลการศึกษาดนพลศาสตร์การดูดซับ

4.2.2.1 ผลการศึกษาดนพลศาสตร์ของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับ

จากการศึกษาดนพลศาสตร์ของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับ พบว่าที่ทุกอุณหภูมิ ปริมาณการดูดซับของแคดเมียมจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ในช่วงแรก ๆ ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงแรกตัวดูดซับยังมีพื้นที่ผิวว่างทำให้โมเลกุลของแคดเมียมสามารถเข้าไปยึดเกาะได้แต่เมื่อเวลาผ่านไปจนถึงจุด ๆ หนึ่งบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเริ่มเต็มไปด้วยโมเลกุลของแคดเมียมจึงมีปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและจะเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 60 นาที (Torab-Mostaedi et al., 2013)



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมกับเวลาสัมผัสของน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักแคดเมียม ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g, $C_0 = 50$ mg/L และ $pH_0 = 5.7 \pm 0.5$

4.2.2.2 ผลการหาอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับ

การศึกษาอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับเพื่อหากลไกของอัตราการดูดซับแคดเมียม โดยการพิจารณาจากความสอดคล้องของข้อมูลการดูดซับกับแบบจำลองอัตราการดูดซับซึ่งแบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order equation) จะบ่งบอกได้ว่าขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของตัวถูกดูดซับผ่านชั้นของไฮดรอปตัวดูดซับเกิดขึ้นช้าที่สุด และแบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order equation) จะบ่งบอกได้ว่าขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าที่สุด

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของสมการอันดับหนึ่งเทียมและสมการอันดับสองเทียมของการดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์

อุณหภูมิ (°C)	$q_{e,exp}$ (mg/g)	สมการอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)			สมการอันดับสองเทียม (Pseudo-second order)		
		$k_1 \times 10^2$ (min ⁻¹)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2	$k_2 \times 10^3$ (g/mg*min)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2
25	32.03	0.33	2.21	0.8709	4.63	33.67	0.9986

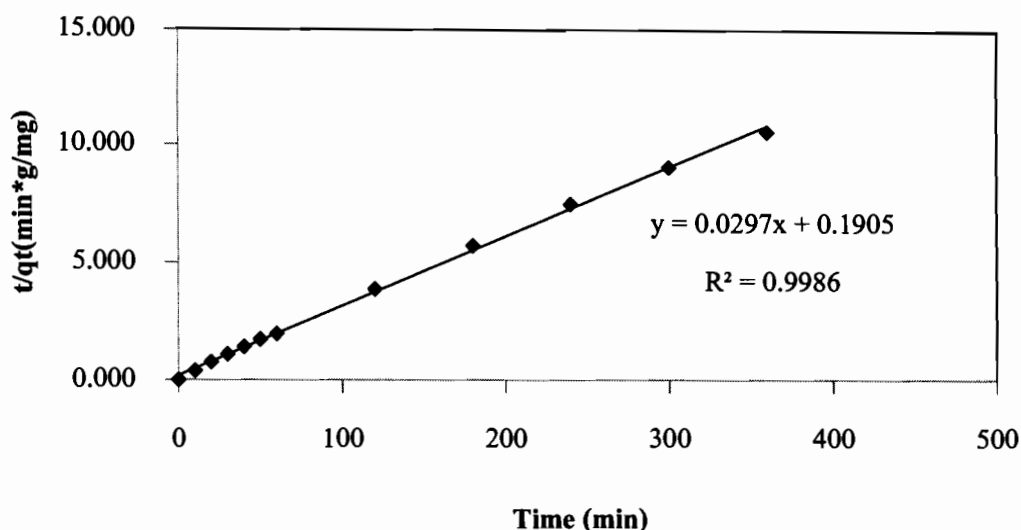
เมื่อนำผลการทดลองมาพล็อตกับสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม และสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม(ตารางที่ 4.4)พบว่าอัตราการดูดซับสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมโดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9986 โดยให้ค่า q_c ที่คำนวณจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่า q_c ที่ได้จากการทดลอง (ภาพที่ 4.4) แสดงว่าอัตราการดูดซับของงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมมากกว่าสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม(Torab-Mostaedi et al., 2013)

ตารางที่ 4.5ค่าคงที่ k_2 (Pseudo-second order)ของการดูดซับโลหะหนักแคดเมียม โดยใช้ตัวดูดซับ

PM

ชนิดของตัวดูดซับ	$k_2 \times 10^3$ (g/mg*min)	R^2 (อันดับหนึ่ง เทียม)	R^2 (อันดับสอง เทียม)	อ้างอิง
PM ดูดซับ Cd	4.63	0.8709	0.9986	งานวิจัยนี้
GF ดูดซับ Cd	7.96	0.885	0.953	(Torab-Mostaedi et al., 2013)
Modified orange peel ดูดซับ Cd	3.05	0.86	1	(Lasheen et al., 2012)

จากงานวิจัยอื่น ๆ(Torab-Mostaedi et al., 2013)ได้มีการศึกษาการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ พบว่า มีอัตราการดูดซับสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้) ดังแสดงในตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t (min*g/mg) และ t (min) แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมที่อุณหภูมิ 25 °C โดยใช้เปลือกส้มโอ เป็นตัวดูดซับ

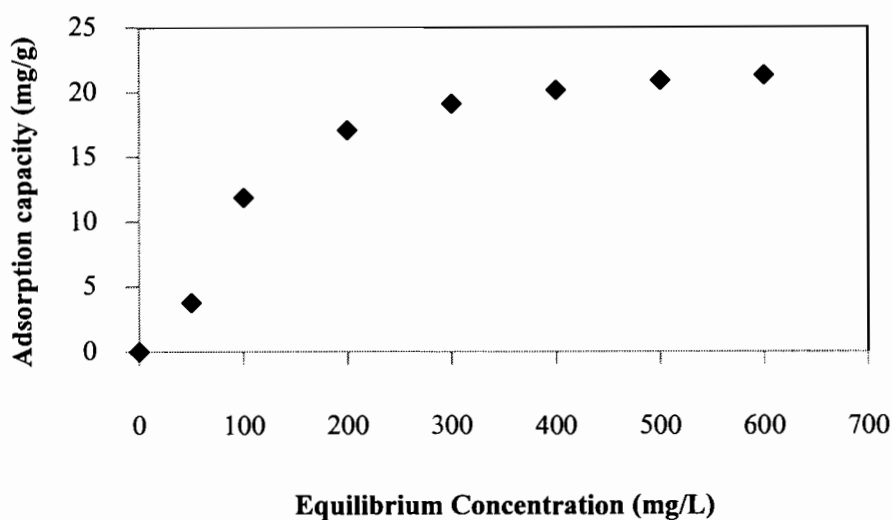
4.2.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับเป็นการศึกษาเพื่อทราบพฤติกรรมของการดูดซับโลหะหนักแคดเมียม งานวิจัยนี้ได้ใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ซึ่งมีสมมุติฐานว่าพฤติกรรมการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมเกิดขึ้นในลักษณะชั้นเดียว (Monolayer sorption) และ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ซึ่งมีสมมุติฐานว่าพฤติกรรมการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) ปริมาณของโลหะหนักแคดเมียมที่ถูกดูดซับสามารถคำนวณได้จากสมการสมดุลมวลสารซึ่งอธิบายไว้ในบทที่ 2 ในหัวข้อ 2.5 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการคำนวณและออกแบบหอดูดซับได้

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิชของการดูดซับโลหะหนักแคดเมียม ที่อุณหภูมิ 25 °C

อุณหภูมิ (°C)	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช		
	q_m (mg/g)	K_L (L/g)	R^2	K_F (L/g)	n	R^2
25	23.41	0.38	0.9152	65.96	8.64	0.3393

ไอโซเทอมการดูดซับของโลหะหนักแคดเมียมด้วยเปลือกส้มโอ แสดงไว้ในภาพที่ 4.5 ค่า R^2 และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการนำผลการทดลองการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมที่อุณหภูมิ 25 °C มาพล็อตกับสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดิชแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ผลการพล็อตข้อมูลการทดลองกับสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดิชโดยพิจารณาจากค่า R^2 และค่าพารามิเตอร์ พบว่าไอโซเทอมการดูดซับของโลหะหนักแคดเมียมมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่า (ศรีภัทธา โสภาสิน, 2556) แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นในลักษณะแบบชั้นเดียว

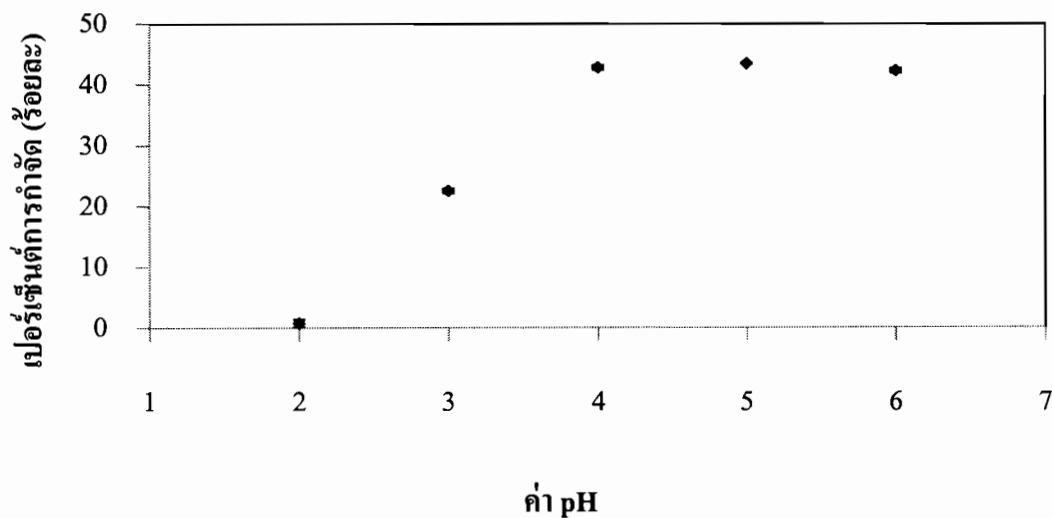


ภาพที่ 4.5 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะหนักแคดเมียมที่อุณหภูมิ 25 °C โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอปริมาณ 0.1 g และ $pH_0 = 5.7 \pm 0.5$

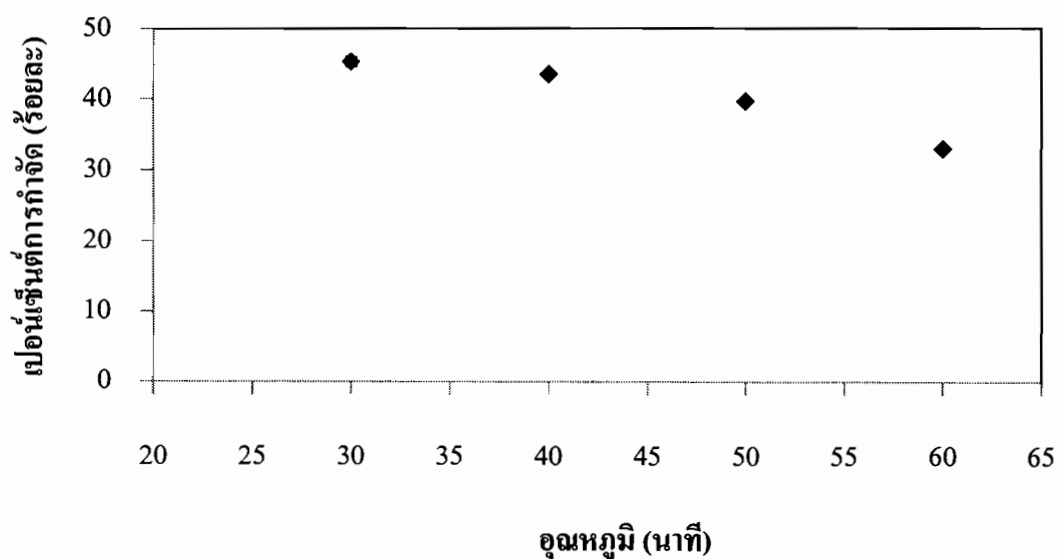
4.2.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายน้ำเสียโลหะหนักแคดเมียมต่อปริมาณการดูดซับ

จากผลการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักแคดเมียมต่อปริมาณการดูดซับในช่วงค่าพีเอช 2-6 ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักแคดเมียมเริ่มต้น 50 mg/L ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.6 พบว่ามีปริมาณการดูดซับที่น้อยสุดที่ค่าพีเอช 2 (0.72%) และปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าพีเอช 5 (43.52%) ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่มีปริมาณการดูดซับสูงสุด (Khan et al., 2015) เนื่องจากที่ pH ต่ำ มีความเข้มข้นของ H^+ สูง จึงเกิดการแข่งขันระหว่าง Cd^{2+} กับ H^+ ในการจับกับ active site ที่มีประจุลบของเปลือกส้มโอ แต่เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นปริมาณของ H^+ ลดลง จึงทำ

ให้ Cd^{2+} สามารถยึดติดผิวกับเปลือกส้มโอได้มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับสูงขึ้น (Torab-Mostaedi et al., 2013)



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมกับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอปริมาณ 0.1 g และอุณหภูมิในการดูดซับ $25 \text{ }^\circ\text{C}$



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมกับอุณหภูมิในการดูดซับของสารละลายแคดเมียมที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอปริมาณ 0.1g

4.2.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล ได้ผล การศึกษาดังภาพที่ 4.7 พบว่าที่อุณหภูมิ 30 °C ปริมาณการดูดซับโลหะแคดเมียมมีค่ามากที่สุด แต่ ช่วงอุณหภูมิ 40 – 60 °C ปริมาณการดูดซับของโลหะหนักแคดเมียมจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลกระทบต่อตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ทำให้เกิด การเสื่อมสภาพหรือทำงานได้น้อยลง ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมลดลงในช่วง อุณหภูมิ 40 °C ถึง 60 °C เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองสูงขึ้น พบว่าอัตราการดูดซับใน ระบบการทดลองกลับลดลง (Sari et al., 2007) แสดงว่า การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic process) (Liang et al., 2010)

4.3 การศึกษาการคายซับ

พฤติกรรมของการคายซับโลหะหนักแคดเมียมของตัวดูดซับเปลือกส้มโอด้วยตัวทำละลาย ชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่า น้ำกลั่นทำให้เกิดการคายซับได้ 44.18% แต่เมื่อใช้สารละลาย 0.1 M HCl ทำให้เกิดการคายซับเพิ่มขึ้นเป็น 68.06% จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นว่าน้ำกลั่น สามารถทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับได้ในระดับหนึ่ง แต่สารละลาย 0.1 M HCl สามารถทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับได้มากกว่า ซึ่งให้เห็นว่าการดูดซับ โลหะหนักแคดเมียมโดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ เป็นทั้งกระบวนการดูดซับทางกายภาพและ กระบวนการดูดซับทางเคมีแสดงว่าตัวดูดซับเปลือกส้มโอ เป็นตัวดูดซับที่มีศักยภาพสูง เนื่องจาก สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลังการดูดซับแคดเมียมซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Torab-Mostaedi et al., 2013) ซึ่งศึกษาการคายซับแคดเมียมด้วยเปลือกส้มโอโดยใช้ 0.1 M HCl ผลการศึกษาพบว่า สามารถคายซับได้มากกว่า 97 % และสามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำได้มากกว่า 5 รอบการทำงาน โดยมีเปอร์เซ็นต์การคายซับมากกว่า 95 %

ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการคายซับโลหะหนักแคดเมียม โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ

0.1 g อุณหภูมิ 25 °C และเวลา 24 hr

ชนิดสารละลาย	Desorption (%)
น้ำกลั่น	44.18 ± 0.26
HCl	68.06 ± 1.03

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับพบว่าเปลือกส้มโอมีพื้นที่ผิวมากกว่า และมีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าเปลือกส้มโอคัดแปร จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับเปลือกส้มโอ พบว่าที่พีค 3,400-3,250 cm^{-1} แสดงถึง -OH group ในผนังเซลล์ (cell wall) ของเปลือกส้มโอ จะมี α -(1-4) linked D-galacturonic acid ซึ่งมีประจุลบของ free carboxyl groups ในโมเลกุล pectin สามารถเกิดพันธะโควาเลนต์กับไอออนของโลหะหนักที่มี valence electron เท่ากับ 2 (Schiewer and Iqbal, 2010) เมื่อทำการคัดแปรเปลือกส้มโอด้วยกรดไนตริกแล้ว (Torab-Mostaedi et al., 2013) พบว่า พีคที่ 1,436 cm^{-1} ได้หายไปจาก FT-IR spectra ของเปลือกส้มโอ แสดงว่า มีการหายไปของ Cellulose บางส่วนที่มีองค์ประกอบของ C-C stretching (aromatics) หลังจากการคัดแปรด้วยกรดไนตริก ซึ่งไม่พบในเปลือกส้มโอคัดแปร

จากการศึกษาการดูดซับแบบกะ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ พบว่า อัตราการดูดซับของโลหะหนักแคดเมียมมีความสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าสุด) มากกว่าสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมี (k_2) ของการดูดซับแคดเมียมที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าเท่ากับ $4.63 \times 10^3 \text{ g/mg} \cdot \text{min}$ สำหรับการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับ พบว่า ปริมาณการดูดซับของโลหะหนักแคดเมียมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะเข้าสู่สมดุลการดูดซับภายในเวลา 60 นาที

การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาสมดุลการดูดซับ พบว่าเปลือกส้มโอสามารถดูดซับโลหะแคดเมียมได้ดีกว่าเปลือกส้มโอคัดแปรจึงเลือกใช้เปลือกส้มโอในการทดลองต่อไป สำหรับการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมต่อปริมาณการดูดซับพบว่าปริมาณการดูดซับที่น้อยที่สุดที่ค่าพีเอช 2 และปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่าพีเอช 5 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่มีปริมาณการดูดซับสูงสุด ที่ค่าพีเอช 6 จะมีปริมาณการดูดซับลดลงเล็กน้อยและการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล พบว่าที่อุณหภูมิ 30 °C จะมีปริมาณการดูดซับที่สูงที่สุด ปริมาณการดูดซับของแคดเมียมจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิช่วงอุณหภูมิ 40-60 °C แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปริมาณการดูดซับของแคดเมียมจะ

ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไอโซเทอมการดูดซับของแคดเมียมมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (การดูดซับแบบชั้นเดียว) มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และปริมาณการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุด (q_m) ของการดูดซับแคดเมียม ที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าเท่ากับ 23.41 mg/g ตามลำดับพฤติกรรมการคายซับของแคดเมียมของตัวดูดซับเปลือกส้มโอ พบว่า น้ำกลั่นทำให้เกิดการคายซับได้ 44.18 % แต่เมื่อใช้สารละลาย 0.1 M HCl ทำให้เกิดการคายซับเพิ่มขึ้นเป็น 68.06 % แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นได้ทั้งกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางกายภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาเปรียบเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ในการดูดซับแคดเมียม เช่น ถ่านกัมมันต์ เปลือกผลไม้ชนิดอื่น เป็นต้น

5.2.2 ควรศึกษาโดยใช้สารชนิดอื่น ๆ ในการนำมาตัดแปรเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมที่ดียิ่งขึ้น

5.2.3 ควรศึกษาการดูดซับโลหะหนักชนิดอื่น ๆ เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น

5.2.4 ควรศึกษาการดูดซับน้ำจริงที่มีโลหะหนัก เพราะมีสารตัวอื่น ๆ อยู่ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. นนทบุรี : มิตรนราการพิมพ์, 2539.
- โกศล วงศ์สวรรค์ และสถิต วงศ์สวรรค์. ปัญหาสังคมไทย. กรุงเทพฯ : รวมสาสน์, 2543.
- จักรกฤษณ์ อัมพูช และรัตนวรรณ (วิบูลย์สวัสดิ์) เกียรติโกมล. “จลนพลศาสตร์ของการกำจัดสี
ย้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนโดยใช้แร่ดิน
มอนต์มอริลโลไนต์ในระบบถังกวน”, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. 17(3) :
40-47, 2549.
- จักรกฤษณ์ อัมพูช. การกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าในระดับอุตสาหกรรม
ครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2549.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2552
- เต็ม สมิตินันทน์. ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ : สำนักงานหอพรรณไม้ กรมอุทยาน
แห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2549.
- ทรงศักดิ์ สระแก้ว. การกำจัดสีย้อมโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยไคโตซาน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2555.
- นันทิศา ศรีเผือก. ฤทธิ์ทางชีวภาพของน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มโอ. ปริญญาโท
วิทยาศาสตร์บัณฑิต : มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม, 2548.
- นิตดา หงส์วิวัฒน์ และทวีทอง หงส์วิวัฒน์. ส้มโอ ใน ผลไม้ 111 ชนิด : คุณค่าอาหารและการกิน.
กรุงเทพฯ : แสงแดด, 2550.
- ปิยะภรณ์ จารูวงศ์ และรัตนวรรณ เกียรติโกมล. “การดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำโดยใช้แร่ดิน
มอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และ Organo-clays”, วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 11(1) :
55-59, 2547.
- ปิยะพร บารมี. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์.
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- ฝ่ายสุขภาพิบาลโรงงาน กองอนามัยสิ่งแวดล้อม. น้ำเสียและการบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ :
สำนักอนามัย, 2555.
- โยชิน เบญจวงษ์. “โรคพืชตะกั่ว”, สารศิริราช. 50(8) : 792-802, 2541.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

มันสิน คณกุลเวศม์. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

_____ . คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2543.

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ :
โรงพิมพ์เรือนแก้วการพิมพ์, 2540.

ศรีภัทรา โสภาสิน. การกำจัดสีข้อมโรห้คามินบีโดยใช้เปลือกส้มโอตัดแปร. วิทยานิพนธ์ปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2556.

อุไรวรรณ อินทร์ม่วง. มลพิษทางน้ำ. ขอนแก่น : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2545.

Benguella, B. and Benaissa, H. "Cadmium removal from aqueous solutions by chitin: kinetic and
equilibrium studies", Water Research. 36(10): 463-474, 2002.

Brown, P., et al. "Evaluation of the adsorptive capacity of peanut hull pellets for heavy metals in
solution", Advances in Environmental Research. 4(1): 19-29, 2000.

Chen, D. and et al. "Characterization of anion-cationic surfactants modified montmorillonite and
its application for removal of methyl orange", Chemical Engineering Journal. 17(1):
1150-1158, 2011.

D.A. Skoog, F. J. Holler, T.A. Nieman. Principle of Instrument Analysis. 5thed. USA: Saunders
Golden Sunburst Series, 1998.

May, C.D. Pectina In : Thickening and Gelling Agents for Food. New York: Chapman& hall.,
1997.

S. Schiewer and M. Iqbal. "The role of pectin in Cd binding by orange peel biosorbents:
A comparison of peels, depectinated peels and pectic acid", Journal of Hazardous
Materials. 177(1): 899-907, 2010.

Duong D. Do. Adsorption analysis : equilibrium and kinetics. Singapore: Uto-print., 1998.

Khan, T. A. and et al. "Equilibrium uptake, isotherm and kinetic studies of Cd(II) adsorption onto
iron oxide activated red mud from aqueous solution", Journal of Molecular Liquids.
202(1): 165-175, 2015.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

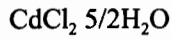
- Lasheen, M. R. and et al. "Adsorption/desorption of Cd(II), Cu(II) and Pb(II) using chemically modified orange peel: Equilibrium and kinetic studies", Solid State Sciences. 14(2): 202-210, 2012.
- Li, Y., et al. "Removal of copper ions from aqueous solution by calcium alginate immobilized kaolin", Journal of Environmental Sciences. 23(3): 404-411, 2011.
- Liang, S., et al. "Isotherms, kinetics and thermodynamic studies of adsorption of Cu²⁺ from aqueous solutions by Mg²⁺/K⁺ type orange peel adsorbents", Journal of Hazardous Materials. 174(1-3): 756-762, 2010.
- P. Vladimir, K. Zlatko, C. Slavoj. Adsorption on Solid. Czechoslovakia: Butterworth Group., 1974.
- Rozada, F., and et al. "Dye adsorption by sewage sludge-based activated carbons in batch and fixed-bed systems", Bioresource Technology. 87(2): 221-230, 2003.
- Sarı, A., et al. "Biosorption of Pb(II) and Ni(II) from aqueous solution by lichen (*Cladonia furcata*) biomass", Biochemical Engineering Journal. 37(2): 151-158, 2007.
- Schiewer, S. and Iqbal, M. "The role of pectin in Cd binding by orange peel biosorbents: A comparison of peels, depectinated peels and pectic acid", Journal of Hazardous Materials. 177(1-3): 899-907, 2010.
- Seymour G.B. and Know. Pectins and their Manipulation. New York: CRC Press., 2002.
- Torab-Mostaedi, M. and et al. "Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies for biosorption of cadmium and nickel on grapefruit peel", Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 44(2): 295-302, 2013.
- Wang, L. and Wang, A. "Adsorption characteristics of Congo Red onto the chitosan /montmorillonite nanocomposite", Journal of Hazardous Materials. 147(3): 979-985, 2007.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีการเตรียมสารละลายและกราฟมาตรฐานแคดเมียม

1. การเตรียมสารละลายแคดเมียม (II) ไอออนเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (1,000 mg Cd/L)

1.1. การคำนวณ



$$\text{Cd} = 112.411, \text{Cl} = 35.4527, \text{H} = 1, \text{O} = 16$$

$$\begin{aligned} \text{CdCl}_2 \cdot 5/2\text{H}_2\text{O} &= 112.411 + 2(35.4527) + 2.5(18) \text{ g/mole} \\ &= 228.3164 \text{ g/mole} \end{aligned}$$

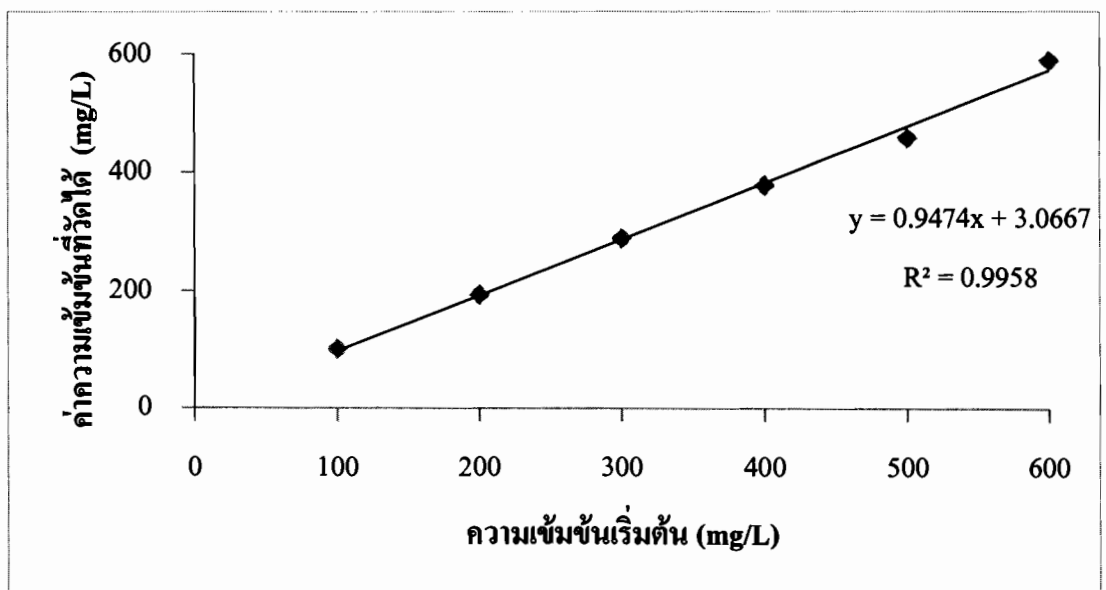
$$\text{Cd}^{2+} = 112.411 \text{ g/mole}$$

เตรียม Cd^{2+} 1,000 mg/L จาก $\text{CdCl}_2 \cdot 5/2\text{H}_2\text{O}$

$$\begin{aligned} \text{CdCl}_2 \cdot 5/2\text{H}_2\text{O} &= \frac{1,000 \text{ mg Cd}^{2+}}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ g Cd}^{2+}}{1,000 \text{ mg Cd}^{2+}} \times \frac{228.3164 \text{ g}}{112.411 \text{ g Cd}^{2+}} \\ &= 2.031 \text{ g} \end{aligned}$$

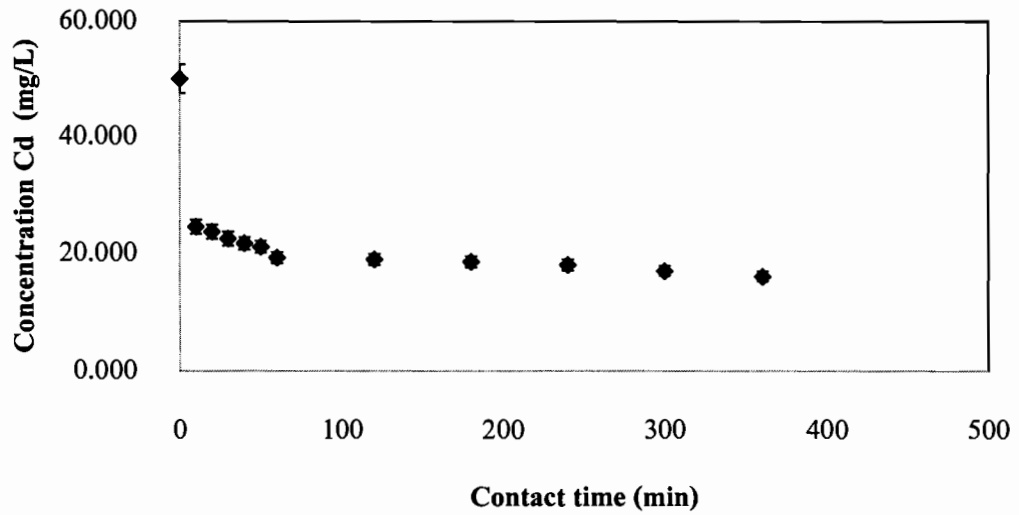
2. สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่ง $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 2.031 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนและปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร

3. กราฟมาตรฐานแคดเมียม

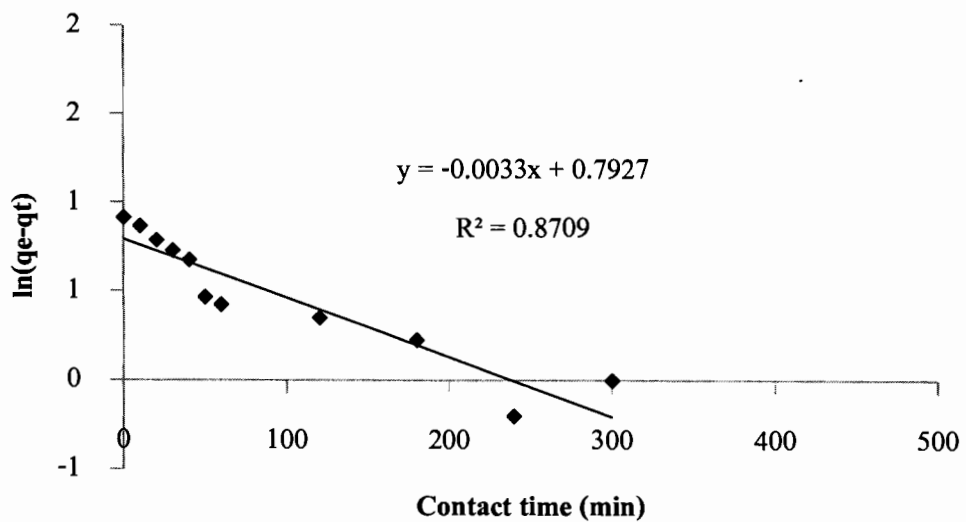


ภาพที่ ก.1 กราฟมาตรฐานแคดเมียมที่ความเข้มข้น 100 – 600 mg/L

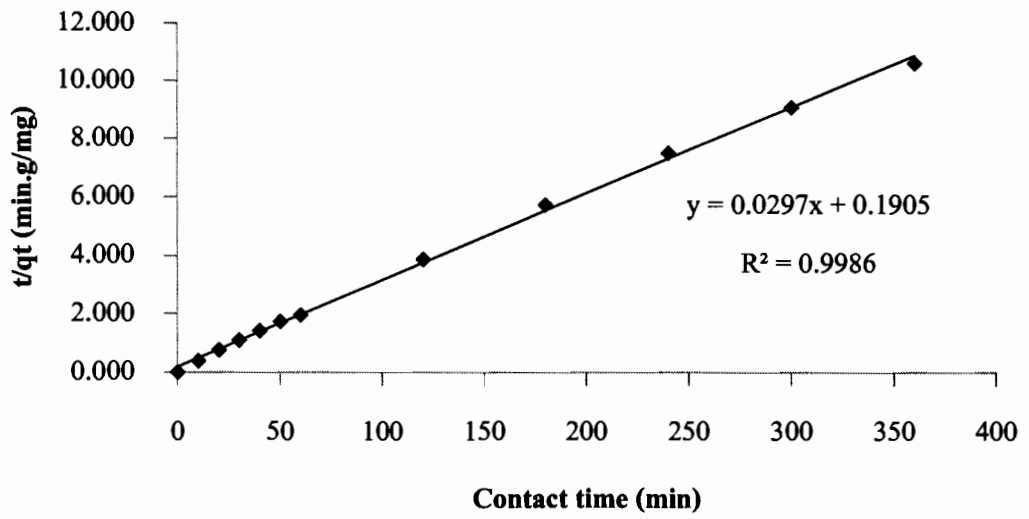
ภาคผนวก ข
ผลการศึกษาจนผลศาสตร์การดูฉบับ



ภาพที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักแคดเมียมกับเวลาสัมผัสที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25°C และ $\text{pH}_0 = 5.7 \pm 0.5$

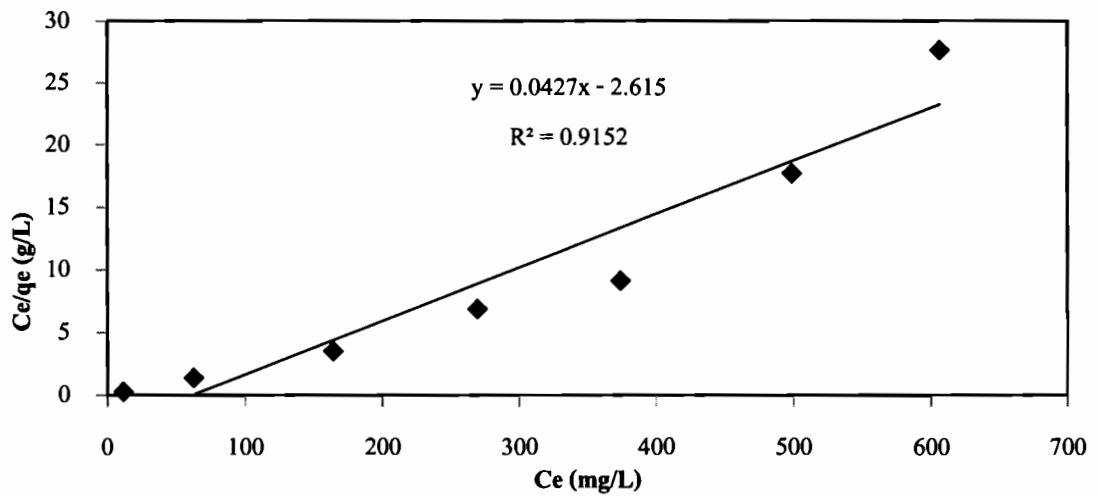


ภาพที่ ข.2 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ของการดูดซับแคดเมียมที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25°C และ $\text{pH}_0 = 5.7 \pm 0.5$

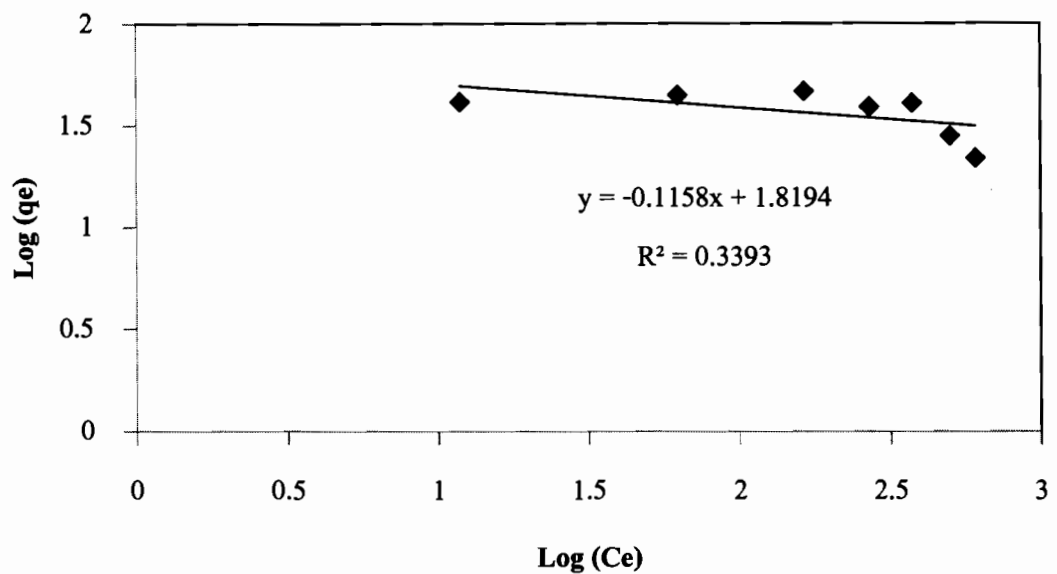


ภาพที่ ข.3 แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ของการดูดซับ แคลเมียมที่ $C_0 = 50 \text{ mg/L}$ โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g อุณหภูมิในการดูดซับ 25°C และ $\text{pH}_0 = 5.7 \pm 0.5$

ภาคผนวก ก
ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ



ภาพที่ ค.1 ไอโซเทอมการดูดซับตามสมการของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) จากน้ำเสีย
สังเคราะห์ของโลหะหนักแคดเมียม โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g และ
 $pH_0 = 5.7 \pm 0.5$



ภาพที่ ค.2 ไอโซเทอมการดูดซับตามสมการของฟรูนดิช (Freundlich Isotherm) จากน้ำเสีย
สังเคราะห์ของโลหะหนักแคดเมียม โดยใช้ตัวดูดซับเปลือกส้มโอ ปริมาณ 0.1 g และ
 $pH_0 = 5.7 \pm 0.5$

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ

นางสาวปวิษณาดา ญาวงศ์

วัน เดือน ปี เกิด

15 มิถุนายน 2528

ประวัติการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2552

