การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งาน

REMOVAL OF CADMIUM FROM THE SYNTHETIC WASTEWATER BY SPENT CATIONIC RESIN

นางสาวรุจา สุวรรณสุข

นายวชิระ พิมพ์ปราโมทย์

นายอานนท์ จริยนรเศรษฐ์

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งาน

REMOVAL OF CADMIUM FROM THE SYNTHETIC WASTEWATER BY SPENT CATIONIC RESIN

นางสาวรุจา สุวรรณสุข
นายวชิระ พิมพ์ปราโมทย์
นายอานนท์ จริยนรเศรษฐ์

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REMOVAL OF CADMIUM FROM THE SYNTHETIC WASTEWATER BY SPENT CATIONIC RESIN

RUJAR SUWANNASOOK

WACHIRA PIMPRAMOTE

ANON JARIYANORASADE

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งาน

Removal of Cadmium from the Synthetic Wastewater by Spent Cationic Resin

ชื่อนักศึกษา นางสาวรุจา สุวรรณสุข

นายวชิระ พิมพ์ปราโมทย์

นายอานนท์ จริยนรเศรษฐ์

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.กรองแก้ว ทิพยศักดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	
อ.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
ผศ.กรองแก้ว ทิพยศักดิ์	
ผศ.ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งาน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวรุจา สุวรรณสุข
	นายวชิระ พิมพ์ปราโมทย์
	นายอานนท์ จริยนรเศรษฐ์
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.กรองแก้ว ทิพยศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวก Lewatit MonoPlus S108 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent Resin, SR) ซึ่งเป็นเรซินชนิดกรดแก่ โดยทำการทดลองแบบแบตช์ ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และค่าพีเอช ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแคดเมียม (Cd^{2+}) 10 mg/L จำนวน 25 mL แปรค่าน้ำหนักของ SR 1, 3 และ 5 g จากการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม และเข้าสู่สมดุล พบว่าที่สภาวะการบำบัด Cd^{2+} ในน้ำเสียสังเคราะห์ใช้เวลา 10 นาที ที่พีเอชเดิมของน้ำเสียสังเคราะห์ 5.44 สามารถบำบัดได้สูงสุดมากกว่า 99% ผลการศึกษา ไอโซเทอร์มของการบำบัด Cd^{2+} แปรค่าน้ำหนักของ SR 0.1 ถึง 5 กรัม พบว่าเป็นไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นและแบบฟรุนลิชด์ มีความสอดคล้องกัน เมื่อใช้น้ำกลั่น และกรดไฮโดรคลอริก 5 % โดยน้ำหนัก เป็นตัวชะละลาย Cd^{2+} จากเรซินที่ใช้บำบัด พบว่ากรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวชะละลายที่ดี ได้ Cd^{2+} กลับคืนถึง 59.68 %

คำสำคัญ : แคดเมียม, เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว, การทดลองแบบแบตช์, ไอโซเทอร์มการบำบัดแคดเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Removal of Cadmium from the Synthetic Wastewater by Spent Cationic Resin	
Students	Rujar	Suwannasook
	Wachira	Pimpramote
	Anon	Jariyanorasade
Degree	Bachelor of Science	
Major Program	Environmental Chemistry	
Academic Year	2013	
Advisor	Asst. Prof. Krongkaew Tippayasak	
Co-Advisor	Asst. Prof. Pantawat Sampanpanish, Ph.D.	

ABSTRACT

The aim of this research was to study the removal of Cadmium (Cd (II)) in synthetic wastewater by spent cationic resin - SR -, Lewatit MonoPlus S108, a strong acid exchange resin. The experiment were carried by batch experiments. Factors affecting the Cd (II) removal were SR quantities and pH value. The initial Cd (II) concentration was 10 mg/L 25 mL and SR was varied 1, 3 and 5 g. The results showed that the optimum time for treatment was 10 minute to reach equilibrium, at original pH of synthetic wastewater at 5.44; it could remove more than 99 % of Cd (II). Both the linear and Freundlich adsorption isotherm for Cd (II) varied UR weight 0.1-5 g, the data were fitted with the isotherm The desorption experiment by the de-ionized water and the 5% v/v of HCl were examined. HCl showed as the best eluent and has 59.68 % recovery.

Keywords : Cadmium, Spent cation exchange resin, Batch experiments, Cadmium Removal isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคล ผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย คอยให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด พร้อมเสนอแนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงงานพิเศษ ที่ให้แนวทางในการจัดทำงานวิจัย และตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้การช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท ทรีท เคมิคอล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรซิน เพื่อใช้ในงานวิจัย และการทดลองในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณสถาบันเทโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้เป็นส่วนหนึ่งของสถาบันการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่เป็นกำลังใจและเป็นแรงผลักดันในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และรวมถึงเพื่อนๆในสาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อมทุกๆคนที่ให้กำลังใจ และช่วยเหลือในทุกๆด้านจนงานวิจิยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดี

นางสาวรุจา สุวรรณสุข
นายวชิระ พิมพ์ปราโมทย์
นายอานนท์ จริยนรเศรษฐ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
คำย่อและสัญลักษณ์	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เรซิน	3
2.1.1 ประเภทของเรซิน	4
2.1.2 ลำดับความชอบในการเลือกจับไอออนของเรซิน	8
2.1.3 โครงสร้าง และคุณสมบัติทั่วไปของเรซิน	10
2.1.4 การใช้ประโยชน์ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน	12
2.1.5 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน	14
2.1.6 เรซินที่นำมาใช้	15
2.2 น้ำเสีย	17
2.2.1 นิยามของน้ำเสีย	17
2.2.2 ประเภทของน้ำเสีย	17
2.3 โลหะหนักในน้ำเสีย	19
2.3.1 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนัก	19
2.3.2 แคดเมียม	20

เอกสารนี้เป็นเอกสาร... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น... ห้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 แคดเมียมในน้ำ	21
2.3.4 การนำมาใช้ประโยชน์	23
2.3.5 อันตรายที่อาจเกิดจากแคดเมียม	23
2.3.6 การกำจัดแคดเมียมออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ	24
2.4 กระบวนการดูดซับ	26
2.4.1 การดูดซับ	26
2.4.2 กลไกการดูดซับ	27
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	28
2.4.4 ความสัมพันธ์สมดุลสำหรับการดูดซับ	29
2.4.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	30
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์	41
3.1.1 สารเคมี	41
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	42
3.2 วิธีการทดลอง	43
3.2.1 การสุ่มตัวอย่าง	43
3.2.2 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของเรซิน	43
3.2.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์	43
3.2.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 คุณสมบัติทั่วไปของเรซิน	49
4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดย UR	50
4.2.1 ผลของระยะเวลาต่อการบำบัด	50
4.2.2 ผลของพีเอชต่อการบำบัด	53
4.2.3 ไอโซเทอร์มของการบำบัด	54

เอกสารนี้เป็นเอกสาร[illegible]เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น[illegible]และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4 การคายซับ	60
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลวิจัย	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก ก	69
ภาคผนวก ข	71
ภาคผนวก ค	74
ภาคผนวก ง	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2. 1 ชนิดของเรซิน	7
ตารางที่ 2. 2 ลำดับความชอบไอออนองเรซินที่มีสารละลายโลหะหนักในน้ำ 1,000 PPM	9
ตารางที่ 2. 3 ข้อมูลทั่วไป และสมบัติทางกายภาพ-เคมีของ เรซินที่นำมาใช้	16
ตารางที่ 2. 4 สภาพการใช้งานของ เรซิน	16
ตารางที่ 2. 5 มาตรฐานปริมาณแคดเมียม	22
ตารางที่ 4. 1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน RM กับ SR	49
ตารางที่ 4. 2 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนของเรซินในการบำบัดต่อไอโซเทอร์ม	54
ตารางที่ 4. 3 ผลของความเข้มข้นแคดเมียมต่อไอโซเทอร์ม	57
ตารางที่ 4. 4 ผลการคายซับด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5%v/v	59
ตารางที่ ข- 1 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม	73
ตารางที่ ค. 1 การเทียบมาตรฐานของสารละลายไฮโดรคลอริก	74
ตารางที่ ง- 1 ผลของเวลาต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเรซินที่ผ่านการใช้งานจำนวน 1 g	81
ตารางที่ ง- 2 ผลของเวลาต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเรซินที่ผ่านการใช้งานจำนวน 3 g	83
ตารางที่ ง- 3 ผลของเวลาต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเรซินที่ผ่านการใช้งานจำนวน 5 g	85
ตารางที่ ง- 4 ผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเรซินที่ผ่านการใช้งาน	87
ตารางที่ ง- 5 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าน้ำหนักเรซิน ครั้งที่ 1	88
ตารางที่ ง- 6 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าน้ำหนักเรซิน ครั้งที่ 2	88
ตารางที่ ง- 7 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าน้ำหนักเรซิน ครั้งที่ 3	89
ตารางที่ ง- 8 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าน้ำหนักเรซิน(ค่าเฉลี่ย)	89
ตารางที่ ง- 9 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าความเข้มข้น ครั้งที่ 1	90
ตารางที่ ง- 10 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าความเข้มข้น ครั้งที่ 2	90
ตารางที่ ง- 11 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าความเข้มข้น ครั้งที่ 3	91

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ... ไม่ว่ากรณีใดๆ ... ครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่ ง- 12 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าความเข้มข้น 91
ตารางที่ ง- 13 ผลการคายซับด้วยน้ำกลั่น 92
ตารางที่ ง- 14 ผลการคายซับด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 5%v/v 93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2. 1 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนแคตไอออน	4
รูปที่ 2. 2 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนแอนไอออน	5
รูปที่ 2. 3 รูปร่างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	11
รูปที่ 2. 4 Lewatit MonoPlus S108 (เรซินก่อนใช้งาน)	15
รูปที่ 2. 5 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักที่พีเอชต่างๆ	20
รูปที่ 2. 6 ขอบเขตสถานะของแคดเมียมในน้ำที่มีซัลเฟอร์และคาร์บอเนต	22
รูปที่ 2. 7 รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับ	29
รูปที่ 3. 1 แผนภาพการทดลอง	48
รูปที่ 4. 1 การแยกของเรซินที่ผ่านการใช้งาน (MIXED RESIN)	49
รูปที่ 4. 2 ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียมด้วย SR ที่ระยะเวลาต่างๆ	52
รูปที่ 4. 3 ผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดแคดเมียมด้วย SR	53
รูปที่ 4. 4 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าน้ำหนักเรซิน	56
รูปที่ 4. 5 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าความเข้มข้น	59
รูปที่ 4. 6 ค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืนด้วยเรซินของน้ำกลั่น	60
รูปที่ 4. 7 ค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืนของเรซินด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 %v/v	61
รูปที่ ข- 1 กราฟมาตรฐานสารละลายแคดเมียม	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

Cd	แคดเมียม
RM	เรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน (Raw Materail)
SR	เรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin)
AAS	Atomic Absorption Spectrophotometer
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
μS/cm	ไมโครซีเมนต่อเซนติเมตร
meq/g	มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม
cmol/g	เซนติโมลต่อกรัม
Ksp	ผลคูณของการละลาย (Solubility product)
^{o}C	องศาเซลเซียส
q_e	ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อสารดูดซับหนึ่งหน่วย
C_e	ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
Q^{o}	ปริมาณของสารถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว
b	ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
X/m	ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ
k_f และ n	ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
rpm	รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันได้มีการระบายน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติมีสารปนเปื้อนต่างๆ จำนวนมาก ระบบนิเวศแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลง และขาดความอุดมสมบูรณ์ สาเหตุหลักเกิดจากภาคอุตสาหกรรม ที่มีการปล่อยน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานลงสู่แหล่งน้ำในรูปแบบของน้ำทิ้งเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งประเทศไทยมีความเจริญก้าวหน้าในด้านอุตสาหกรรมมากขึ้น ทำให้กระบวนการผลิตของบางอุตสาหกรรม จำเป็นที่ต้องใช้วัตถุดิบที่หลากหลายในกระบวนการผลิต และปล่อยของเสียออกมา ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี ที่ต้องใช้โลหะหนักร่วมในกระบวนการผลิต เป็นต้น เมื่อโลหะหนักจากกระบวนการผลิตถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ หรือไม่มีการกำจัดก่อน จะส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพแหล่งน้ำ โดยโลหะที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำที่พบส่วนมาก ได้แก่ สารหนู แคดเมียม สังกะสี โครเมียม นิกเกิล และแมงกานีส เป็นต้น ซึ่งโลหะหนักมีบทบาทต่อการเกิดมลพิษทางน้ำมากที่สุดโดยเฉพาะแคดเมียมที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม ส่งผลให้เกิดการตกค้าง และ ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ตลอดจนเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร หากสารแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจากอาหารที่บริโภคเป็นหลัก จะทำให้ร่างกายได้รับผลกระทบจากพิษของแคดเมียม ซึ่งความเป็นพิษสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ 1) ความเป็นพิษแบบเฉียบพลันเป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหาร และระบบทางเดินหายใจ 2) ความเป็นพิษแบบเรื้อรังเป็นพิษต่ออวัยวะภายในร่างกาย รวมถึงระบบไหลเวียนเลือด (ฉัตรสินี, 2545 อ้างถึง Dunnick และ Fowler, 1998) ดังนั้นจากความเป็นพิษของแคดเมียมดังกล่าว จึงมีความจำเป็นยิ่งที่ต้องมีการบำบัดหรือ กำจัดแคดเมียมให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิต

การศึกษาครั้งนี้จึงได้เลือกเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งาน (Spent Cationic Resin, Lewatit MonoPlus S108) มากำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้ เรซินที่ผ่านการใช้งานเมื่อไม่มีความคุ้มค่าในการนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้กลายเป็นของเสีย ไม่มีประโยชน์ ซึ่งต้องนำไปทิ้ง หรือกำจัดด้วยวิธีต่างๆ เมื่อจำนวนเรซินมีมากขึ้น ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา ดังนั้นการนำเรซินดังกล่าวมาใช้งาน เป็นการนำของเสียนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยวิธีการที่เลือกใช้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออน หรือการแลกเปลี่ยนประจุบนของแข็ง เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับการพิจารณา และถูกเลือกมาใช้ในการแยกสารจำพวกโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งโรงงาน และเป็นการป้องกันมลพิษสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย

1. ศึกษาการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างเรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, Lewatit MonoPlus S108) กับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

2. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมในลักษณะของไอโซเทอร์ม และประสิทธิภาพในการบำบัด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการกำจัดแคดเมียม คือ เรซินชนิดประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว Lewatit Mono Plus S108

2. ในการทดลองศึกษาแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่สังเคราะห์จาก Cadmium chloride hemipentahydrate ($CdCl_2 \cdot 2.5\ H_2O$) ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/L

3. ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ เวลาที่สัมผัส ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาณสารแลกเปลี่ยนไอออนแสดงในรูปไอโซเทอร์ม

4. ศึกษาการคายซับโดยใช้สารคายซับโดยน้ำ และกรด

5. ศึกษาไอโซเทอร์มการบำบัด 3 แบบ คือ แบบเส้นตรง แบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนด์ลิช

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วไปใช้ประโยชน์ได้

2. ทราบรูปแบบของไอโซเทอร์มในการดูดซับเชิงเคมี (Chemisorption) ของเรซินประจุบวกที่ใช้งานแล้ว สามารถนำมาพัฒนา และประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เรซิน

เรซิน ตามคำจำกัดความแล้ว หมายถึง สารพอลิเมอร์ซึ่งมีโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง (cross-linked) หรือเป็นแบบร่างแห (Three-dimension network) ดังนั้น จึงไม่ละลายในตัวทำละลาย (Solvent) ทั่วๆไป

ประวัติของเรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin) ได้เริ่มอย่างเป็นวิชาการในราวปี ค.ศ. 1850 โดยนักเคมีชาวอังกฤษ ชื่อ H.S. Thomson ซึ่งมีอาชีพเป็นเกษตรกร Thomson พบว่า เมื่อผ่านสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟตลงไปในชั้นดิน แอมโมเนียมไอออนส่วนใหญ่จะหายไปในดิน แต่กลับมีแคลเซียมออกมาแทนที่ จากการวิเคราะห์พบว่าสารบางอย่างในดินซึ่งสามารถแตกตัวให้ไอออนบวกเป็นตัวการดูดจับแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ไว้ จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า base exchange ซึ่งก็คือ Cation exchange นั่นเอง ต่อจากนั้นมีผู้พบว่าแร่บางชนิดในดิน เช่น Zeolites และพวก aluminium silicates มีสมบัติเป็น ion exchange ที่ดีได้

ในปี ค.ศ.1935 นักเคมีชาวอังกฤษ 2 ท่าน Adams และ Holms สามารถสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ที่มีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้สำเร็จ และให้ชื่อว่าเรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน แต่มีประสิทธิภาพต่ำ ใช้งานได้ในวงแคบๆเท่านั้น ต่อมามีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยที่ในตอนเริ่มแรก ทำจากปฏิกิริยาควบแน่นของฟีนอลกับฟอร์มาลดิไฮด์ แล้วใส่หมู่ที่เป็นกรด (acid group) เข้าไป เช่น หมู่ซัลโฟนิก และหมู่คาร์บอกซิลิก เมื่อผลิตภัณฑ์มีหมู่เหล่านี้ติดอยู่ก็สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นอยู่กับ pH แต่เรซินชนิดนี้ก็ยังมีข้อเสียอยู่ คือ ยังมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำจึงมีการพัฒนาใช้โคพอลิเมอร์ระหว่างสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน (styrene-divinylbenzene copolymer) แทนเรซินฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ และปรับปรุงวิธีการสังเคราะห์จากเดิมใช้วิธีการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) ซึ่งเรซินที่ได้จากวิธีนี้จะเป็นผงชนิดละเอียด และไม่สะดวกต่อการใช้งาน แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้วิธีพอลิเมอร์ไรเซชันแบบแขวนลอย (suspension polymerization) เรซินที่ได้จากวิธีนี้เป็นเม็ดกลมๆมีขนาดใกล้เคียงกัน สะดวกต่อการนำไปใช้งาน (พอตา, 2547)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ประเภทของเรซิน

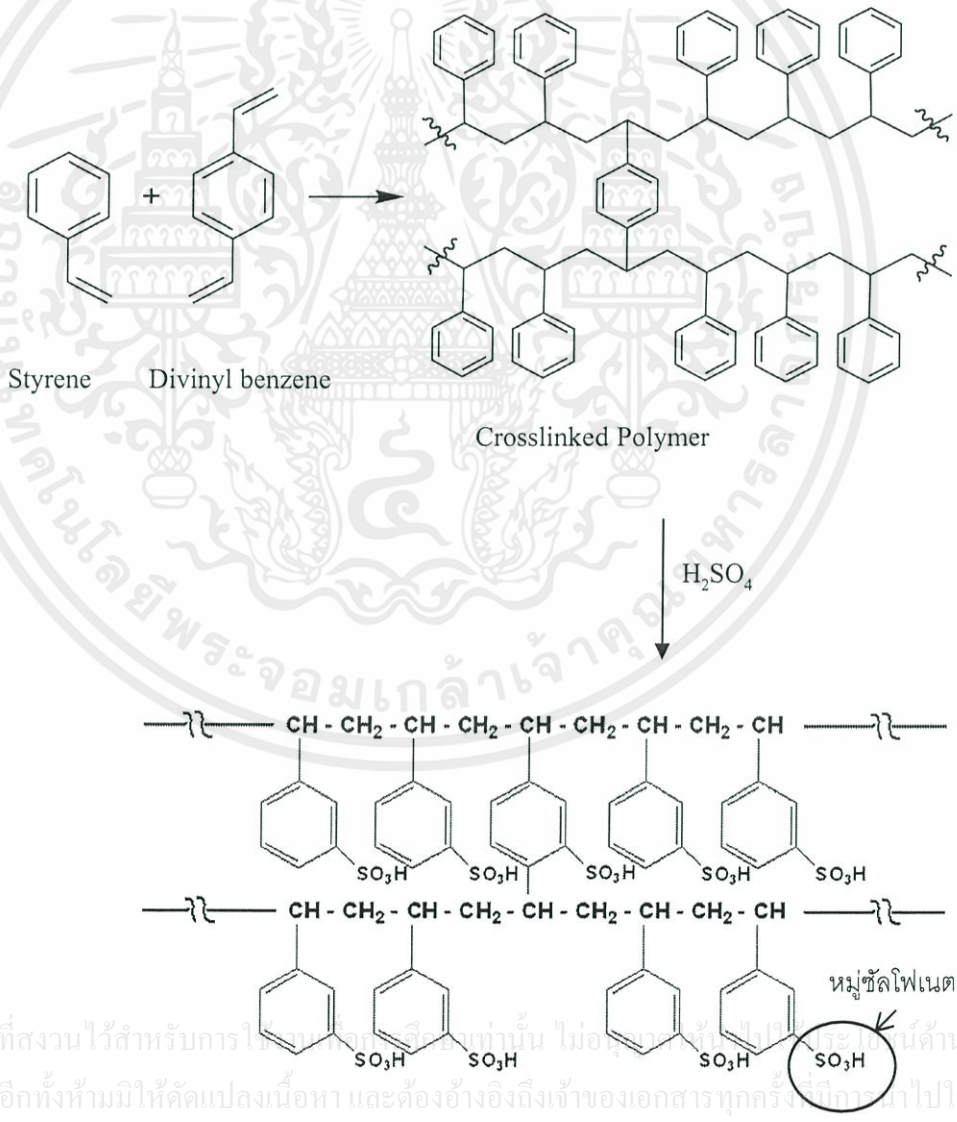
1. เรซินที่ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

   - เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation – exchange resin) คือ เรซินที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (functional group) เช่น –OH, -COOH, $-PO(OH)_2$, $-SO_3H$ เป็นต้น ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนบวก (cation) จากสารละลายที่อยู่ใกล้เคียงได้ ซึ่งอาจจะเขียนปฏิกิริยาทั่วไปได้ ดังนี้

$$R^-A^+ + B^+ \rightleftarrows R^-B^+ + A^+ \quad \text{..... (2.1)}$$

เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก	ไอออนบวกที่อยู่ในสารละลาย	เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนแล้ว	ไอออนบวกที่เรซินปล่อยออกมา

การสังเคราะห์เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation – exchange resin)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

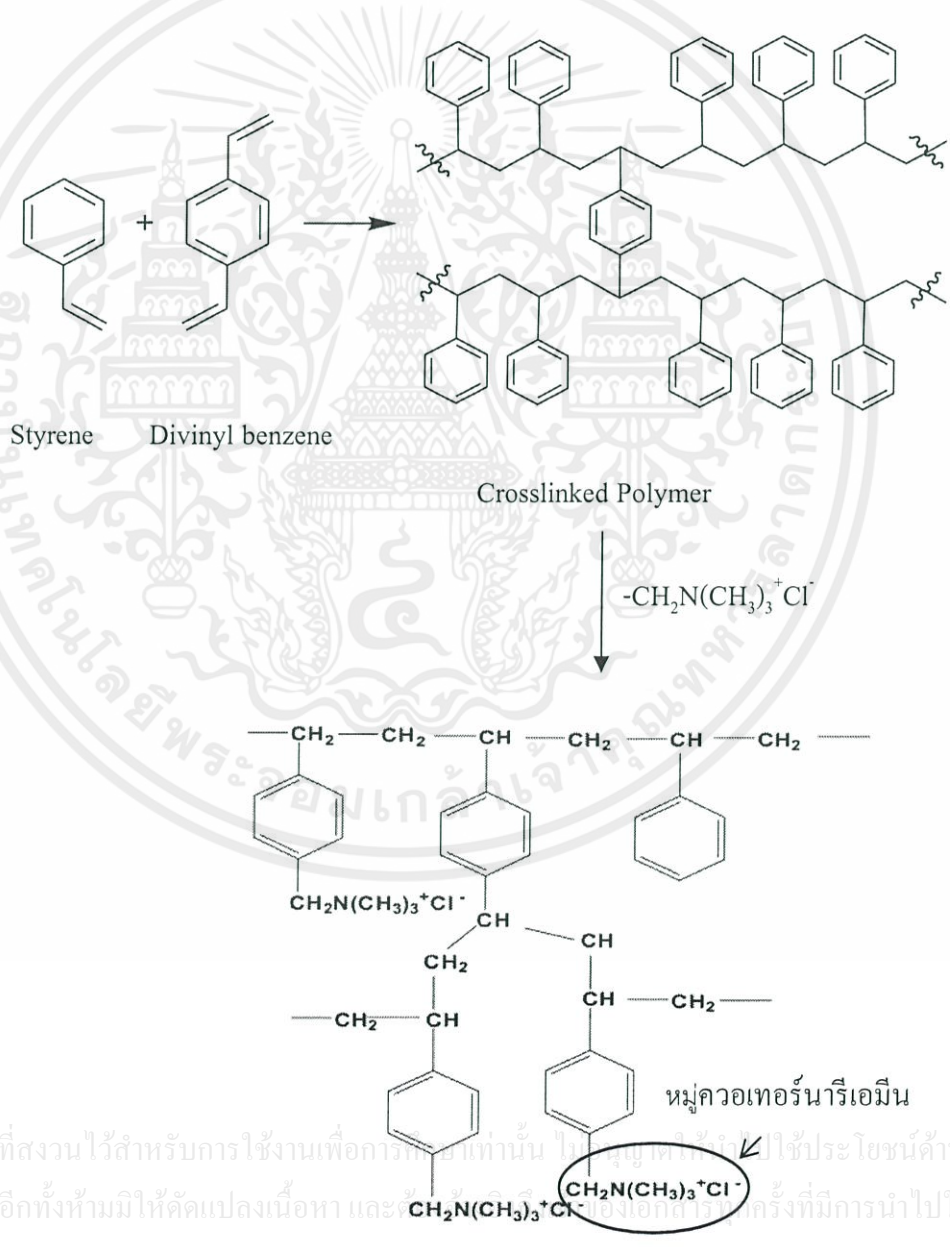
รูปที่ 2. 1 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนแคตไอออน (พอตา, 2547)

- เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion – exchange resin) คือ เรซินที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน และหมู่อะมิโน (-NH_2)ทั้งไพรมารี (Primary,1°)เซเคิลดารี (Secondary,2°) และเทอร์เชียรี (Tertiary,3°) และหมู่ควอเทอร์นารีเอมีน (Quaternary Amine group) ซึ่งสามารถจะทำปฏิกิริยากับไอออนลบ (Anion) จากสารละลายที่อยู่ใกล้เคียงได้ ซึ่งอาจจะเขียนปฏิกิริยาทั่วไปได้ ดังนี้

$$R^+A^- + B^- \leftrightarrows R^+B^- + A^- \quad \text{..... (2.2)}$$

เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ	ไอออนลบที่อยู่ในสารละลาย	เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนแล้ว	ไอออนลบที่เรซินปล่อยออกมา

การสังเคราะห์เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion – exchange resin)



รูปที่ 2. 2 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนแอนไอออน (พอตา, 2547)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การแบ่งชนิดของเรซินตามลักษณะการใช้งานตาม Functional Group

คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินจะขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) สามารถแบ่งได้เป็นหมู่กรด (acid group) และหมู่เบส (basic group) นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งย่อยเป็นเรซินแบบกรดแก่ (Strong acid ion exchanger) เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acid ion exchanger) เรซินแบบด่างแก่ (Strong basic ion exchanger) และเรซินแบบด่างอ่อน (Weak basic ion exchanger) หมู่ฟังก์ชันของเรซินประเภทต่างๆ เป็นดังตารางที่ 2.1

- **เรซินแบบกรดแก่ (Strong acidic cationic resin)** มีหมู่ซัลโฟนิค (SO_3) เป็นประจุไฟฟ้า โดยมี H^+ หรือ Na^+ เป็นอิสระ หน้าที่ของเรซินแบบกรดแก่จะใช้ไอออนบวกของตัวเองแลกกับไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} เป็นต้น เรซินแบบนี้มีปฏิกิริยาทางเคมีเหมือนกรดซัลฟิวริก หรือกรดไฮโดรคลอริก

ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดแก่ ในรูป Na^+ และ H^+

$$2RSO_3^-Na^+ + CaCl_2 \rightarrow (RSO_3^-)_2Ca^{2+} + 2NaCl \quad \text{..... (2.3)}$$

$$2RSO_3^-H^+ + CaCl_2 \rightarrow (RSO_3^-)_2Ca^{2+} + 2HCl \quad \text{..... (2.4)}$$

เรซินแบบกรดแก่สามารถที่จะรับไอออนบวกได้ทั้งหมด เมื่อเรซินหมดอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน สามารถรีเจเนอเรชัน เรซินที่อยู่ในรูปของ Na^+ ต้องรีเจเนอเรชันด้วยโซเดียมคลอไรด์ ส่วนในรูป H^+ ต้องรีเจเนอเรชันด้วยกรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก หรือกรดไนตริก ดังนี้

$$(RSO_3^-)_2Ca^{2+} + 2NaCl \rightarrow 2RSO_3^-Na^+ + CaCl_2 \quad \text{..... (2.5)}$$

$$(RSO_3^-)_2Ca^{2+} + 2HCl \rightarrow 2RSO_3^-H^+ + CaCl_2 \quad \text{..... (2.6)}$$

- **เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acidic cationic resin)** มีหมู่คาร์บอกซิลิก (COO^-) เป็นหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าโดยมี H^+ หรือ Na^+ เป็นไอออนอิสระ เรซินแบบนี้มีปฏิกิริยาทางเคมีเหมือนกรดอ่อน เช่น กรดคาร์บอนิก กรดอะซิติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2. 1 ชนิดของเรซิน

ชนิด	หมู่ฟังก์ชัน	พอลิเมอร์[a)]	ช่วง pH	ชื่อทางการค้า	ที่มา[b)]
ด่างแก่	Terraalkyl - ammonium hydroxide	S-DVB	0-14	ANGA-542	Baker
				REXYN 201 OH	Fisher
	$-CH_2N(CH_3)_3^+OH$	S-DVB		Amberlite IRA 400C	R and H
				Dowex-1	Dow
	$-CH_2N(CH_3)_3^+Cl^-$	S-DVB		Amberlite IRA 400 OH	R and H
	Tetraaklyl- Ammonium chloride	S-DVB		IONAC A-540	MC/B
				REXYN 201 Cl	Fisher
ด่างอ่อน	$-N(CH_3)_2$	S-DVB	0-14	CGA-301	Baker
	$-NH_2$	S-DVB	0-9	Amberlite IRA 93	R and H
			0-7	Amberlite IRA 45	R and H
			0-12	ANGA-316	Baker
	$-NH_2$	A-DVB	0-7	Amberlite IRA 68	R and H
กรดแก่	$-SO_3^-H^+$	S-DVB	0-14	Dowex-50	Dow
				INONAC C-242	MC/B
	$-SO_3^-Na^+$	S-DVB	0-14	Amberlite IR 120P	R and H
				Amberlite 200	R and H
				Amberlite 252	R and H
				CGC-241	Baker
กรดอ่อน	$-COO^-H^+$	S-DVB	0-12	CGC-270	Baker
				Amberlite CG 50	R and H
	$-COO^-H^+$	MA-DVB	5-14	Amberlite IRC 50	R and H

[a)] S-DVB is styrene-divinylbenzene: MA-DVB is methacrylate- divinylbenzene: A-DVB is acrylate- divinylbenzene.

[b)] Baker is J.T. Chemical Co.: Fisher is Fisher Scientific Co.: MC/B is Matheson, Coleman and Bell Manufacturing Chemists: Dow is Dow Chemical Co.: R and H is Rohm and Haas Co.

ที่มา : มหาวิทยาลัยรามคำแหง ไอออนเอ็กซ์เชนจ์โครมาโตกราฟี, 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **เรซินแบบด่างแก่ (Strong basic anionic resin)** มีหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเป็น Quaternary Amine และไอออนอิสระมักเป็น Cl^- หรือ OH^- มีปฏิกิริยาเคมีเหมือนด่างแก่ หน้าที่ของเรซินแบบด่างแก่ คือ ใช้ไอออนลบของเรซินแลกกับไอออนลบในน้ำที่ต้องการกำจัดออก เช่น HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, CO_2 และ SiO_2

  เรซินแบบด่างแก่แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

  1. Type I มีความเป็นด่าง และความคงทนสูง มีความสามารถในการจับ Silica ได้ดี
  2. Type II มีขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และประสิทธิภาพในการทำรีเจเนอเรชันสูง

  ปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนไอออน และรีเจเนอเรชัน เป็นปฏิกิริยาย้อนกับได้ดังนี้

$$ROH^- + NaCl \leftrightarrows RCl^- + NaOH \qquad \text{..... (2.7)}$$

  สารที่ใช้ในการรีเจเนอเรชันคือ โซเดียมคลอไรด์ กรดไฮโดรคลอริก โซเดียมไฮดรอกไซด์

  เนื่องจากเรซินแบบด่างแก่ไม่จำเป็นต้องมีไอออนอิสระก็ได้ ดังนั้น กลไกการทำงานของเรซินจะเป็นลักษณะ Absorption ไม่ใช่ลักษณะแลกเปลี่ยนประจุ

- **เรซินแบบด่างอ่อน (Weak basic anionic resin)** มีหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเป็น Primary, Secondary หรือ Tertiary Amino และไอออนอิสระมักเป็น Cl^- หรือ OH^- หรือไม่มีก็ได้ การกำจัดไอออนลบของเรซินแบบนี้จะแตกต่างกับเรซินอีก 3 ประเภท เนื่องจากไม่ได้มีการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินชนิดนี้กำจัดเฉพาะกรดแก่ เช่น HCl, H_2SO_4 และHNO_3 ออกจากน้ำ และไม่สามารถกำจัดกรดอ่อน เช่น CO_2 , SiO_2 เป็นต้น การกำจัดกรดแก่เกิดขึ้นโดยที่กรดแก่ทั้งโมเลกุลเข้ามาจับกับเรซิน

2.1.2 ลำดับความชอบในการเลือกจับไอออนของเรซิน (Selectivity)

เรซินทั้งแบบกรด และแบบด่าง มีความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินไม่เท่ากัน พบว่า เรซินเลือกที่จะชอบทำปฏิกิริยากับไอออนบางชนิดมากกว่าชนิดอื่น ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนประจุ น้ำหนักโมเลกุล และยังขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของไอออนนั้นๆในสารละลาย นอกจากนี้การแลกเปลี่ยนไอออนยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเรซิน เช่น ขนาดของเรซิน (Effective Size) ความเหนียวแน่นของการประสาน (Degree of crosslinking) โครงสร้างภายในของเรซิน ชนิดของหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) และระยะในการทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ในเชิงการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างไอออนกับการเลือกจับไอออนของเรซิน

1. เรซินสามารถแลกเปลี่ยนไอออนที่มีวาเลนซ์สูงได้ดีกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ ลำดับความชอบดังตารางที่ 2.2

2. สำหรับไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากัน จะพิจารณาจากน้ำหนักอะตอม ซึ่งไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูงกว่าจะจับกับเรซินได้ดีกว่าไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำ เช่น $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Be^{2+}$ หรือ $K^{+} > Li^{+} > Na^{+}$

3. เรซินที่มีระดับการเชื่อมขวางสูงความสามารถในการเลือกจับจะมากกว่าเรซินที่มีระดับการเชื่อมขวางต่ำ

ตารางที่ 2. 2 ลำดับความชอบไอออนของเรซินที่มีสารละลายโลหะหนักในน้ำ 1,000 ppm

ไอออนบวก	ไอออนลบ	ลำดับความชอบ
Fe^{3+}	CO_3^{2-}	มากที่สุด
Al^{3+}	SO_4^{2-}	↑
Pb^{2+}	SO_3^{2-}	
Ba^{2+}	HPO_4^{2-}	
Sr^{2+}	CNS^{-}	
Cd^{2+}	CNO^{-}	
Zn^{2+}	NO_3^{-}	
Cu^{2+}	Br^{-}	
Fe^{2+}	Cl^{-}	
Mn^{2+}	CN^{-}	
Ca^{2+}	HCO_3^{-}	
Mg^{2+}	$HSiO_3^{-}$	
K^{+}	OH^{-}	
NH_4^{+}	F^{-}	
Ba^{+}		
H^{+}		
Li^{+}		น้อยที่สุด

ที่มา : เกศสุชา, 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 โครงสร้าง และคุณสมบัติทั่วไปของเรซิน

โครงสร้างของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินจะมีโครงร่างคล้ายร่างแหตาข่ายสามมิติโดยมีกลุ่มไอออนที่มีประจุตามตำแหน่งต่างๆบนตาข่ายเรียกว่า Matrix ส่วนหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าที่มีบนตำแหน่งต่างๆของตาข่าย เรียกว่าหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆของเรซิน เพื่อให้เกิดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบนเรซิน ดังนั้นเรซินควรมีคุณสมบัติดังนี้

โครงร่างของเรซิน

โครงร่างของเรซินเป็นส่วนที่ทำให้มันมีรูปร่างเป็นอย่างที่ปรากฏ และรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำ และไม่แตกหักง่าย โครงร่างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก และชนิดเดียวกันซึ่งต่อกันเป็นสายยาว และมีไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่เชื่อมขวางเพื่อให้เกิดเป็นรูปสามมิติที่มีความโปร่งหรือความพรุน ความโปร่งหรือความพรุนของเรซินขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมขวาง (Degree of Crosslinkage) ซึ่งวัดได้จากปริมาณของสารเชื่อมขวางที่ใช้ ถ้าปริมาณของสารเชื่อมขวางมาก โครงร่างของเรซินจะแข็งและทึบ แต่ถ้าปริมาณของสารเชื่อมขวางน้อย โครงร่างของเรซินจะอ่อนและโปร่ง

ความชื้นของเรซิน (Moisture Content)

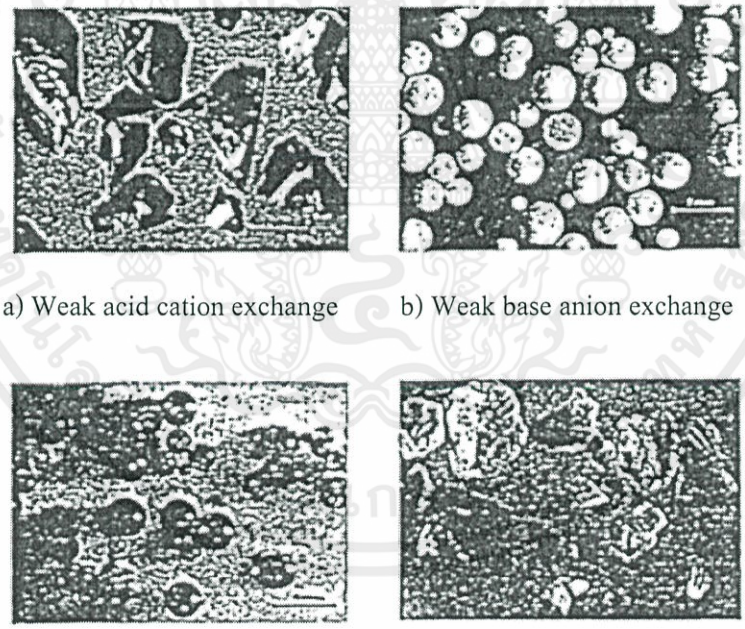
ความสามารถในการเก็บกักน้ำไว้ในตัวเรซิน มีความสำคัญต่ออำนาจการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินที่มีความชื้นสูงจะเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้มาก และถ้ามีช่องว่างน้อยจะทำให้มีความชื้นต่ำ ความสามารถในการเก็บกักน้ำจะแสดงให้เห็นได้จากการบวม หรือพองน้ำของเรซิน เมื่อวางแช่อยู่ในน้ำ การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านเข้าและออกจากช่องว่างเรซินเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจาก ทำให้ไอออนต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ สามารถซึมผ่านเข้าไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอิสระของเรซิน ระดับการบวมน้ำขึ้นอยู่กับระดับของการเชื่อมขวางของโครงไฮโดรคาร์บอนซึ่งทำให้เรซิน มีลักษณะเป็นเม็ดแข็ง ถ้าไฮโดรคาร์บอนยึดเหนี่ยวไม่แน่นช่องว่างก็จะมีมาก จึงสามารถเก็บน้ำได้มาก ทำให้เรซินมีความชื้นสูง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจึงต่ำ ในทางตรงกันข้ามถ้าเรซินมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรคาร์บอนสูง ก็จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนสูง ความชื้นจะน้อย แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวสูงเกินไปจะทำให้ช่องว่างในเรซินเหลือน้อย ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากไอออนอิสระไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าออกได้อย่างสะดวก และยังอาจทำให้เรซินแตกได้ง่าย ความชื้นของเรซินมีประโยชน์สำหรับใช้เป็นพารามิเตอร์ในการตรวจสอบระดับการเชื่อมขวางของโครงร่าง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) ของเรซิน

หมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) ของเรซินเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆของเรซิน เช่น ความสามารถหรืออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ถ้าโครงสร้างส่วนของMatrix มีประจุลบ Functional group จะมีประจุบวก เรียกว่าเป็นสารแลกเปลี่ยนแคทไอออน (Cation Exchanger) แต่ถ้าโครงสร้างส่วนของ Matrix มีประจุบวก Functional group จะมีประจุลบ เรียกว่าเป็นสารแลกเปลี่ยนแอนไอออน (Anion Exchanger) ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

เรซินที่สังเคราะห์โดยกระบวนการทางเคมีนิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน จะมีโครงร่างเป็นสารพวกพอลีสไตรีน (Polystyrene) ที่เชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน (Divinylbenzene) โดย Functional group ของสารแลกเปลี่ยนแคทไอออน(Cation Exchange)จะเป็นพวกซัลโฟนิก (Sulfonic), คาร์บอกซิลิก(Carboxylic) หรือ ฟอสโฟนิก(Phosphonic) ส่วนเรซินที่นำไปใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนแอนไอออน (Anion Exchange) จะเป็นพวกควอเทอร์นารีเอมีน (Quaternary Amine), ไพรมารีเอมีน(Primary Amine), เซคัลดารีเอมีน(Secondary Amine), เทอร์เชียรีเอมีน(Tertiary Amine)



a) Weak acid cation exchange b) Weak base anion exchange

c) Strong acid cation exchange d) Strong base anion exchange

รูปที่ 2. 3 รูปร่างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (เกศสุชา, 2537)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของเรซิน (Density)

ความหนาแน่นของเรซินแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ความหนาแน่นของเรซินที่ใช้ทั่วไป คือ ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent หรือ Column density) เป็นความหนาแน่นที่วัดหลังจากผ่านการชะล้างย้อน และปล่อยจมตัว แต่ถ้าเกี่ยวกับการคำนวณทางชลศาสตร์ของเรซิน จะต้องใช้ความหนาแน่นเปียก (Wet absolute density หรือ True density) ความหนาแน่นประเภทสุดท้าย คือ ความหนาแน่นแห้ง (Dry density)

ขนาดของเม็ดเรซิน (Particle Size)

คุณสมบัติทางด้านชลศาสตร์ของเรซินได้แก่ Head loss ในขณะการแลกเปลี่ยนไอออน และการขยายตัวของชั้นเรซิน ในขณะล้างน้อยมีความสัมพันธ์โดยกับขนาดของเม็ดเรซินขนาดประมาณ 0.04 - 1.00 mm และสามารถบอกได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size) และสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient) ของเรซินในขณะแห้ง และเปียกปริมาตรจะไม่เท่ากัน เนื่องจากขนาดเรซินไม่เท่ากัน เกิดจากการบวมตัวของเรซิน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณ ความชื้น ระดับการเชื่อมขวาง (Degree of Crosslinking) และปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน

การบวมน้ำของเรซิน (Swlling)

เรซินที่ทำจากสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์มีความสามารถในการดูดน้ำหรือของเหลวรอบตัวมันได้ และทำให้เรซินขยายตัวหรือบวมขึ้น การบวมตัวของเรซินนั้นเกิดจากการไฮเดรชัน (Hydration) ของหมู่ไอออนที่ยึดติดกับโครงร่าง และไอออนอิสระ และเกิดจากความดันออสโมติก (Osmotic Pressure) การไฮเดรชันของไอออนแต่ละชนิดจะแตกต่างกันโดยไอออนที่มีขนาดเล็กหรือเรียกว่า เมื่อเรซินแห้ง จะมีขนาดใหญ่เมื่อเกิดการไฮเดรชัน ถ้าบรรจุไอออนที่มีขนาดใหญ่ หรือขณะไฮเดรชัน ก็จะมีการบวมตัวสูง เช่นเดียวกับเรซินที่อยู่ในสารละลายเจือจาง เรซินจะบวมตัวเพื่อพยายามลดความเข้มข้นภายในตัวเพื่อให้เกิดความสมดุลกับภายนอก ในทางตรงกันข้ามเรซินจะหดตัวเมื่อสารละลายภายนอกมีความเข้มข้นกว่าภายใน

2.1.4 การใช้ประโยชน์ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถกำจัดสารเจือปนต่างๆ ในน้ำที่อยู่ในรูปละลายน้ำ อย่างไรก็ตามเรซินแลกเปลี่ยนอิออนไม่เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงมากๆ (เช่น สูงกว่า 700 มก./ล.) เพราะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย วิธีที่เหมาะกว่า คือ Reverse osmosis หรือ Electrodialysis

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนใช้กำจัด ความกระด้าง ความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และกำจัดเกลือแร่ทุกชนิดเพื่อผลิตน้ำบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำจัดความกระด้าง

เรซินกำจัดความกระด้างนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือชุมชนขนาดเล็ก เรซินที่ใช้งานคือแบบกรดแก่ ที่รีเจนเนอเรตด้วยเกลือแกง ในระหว่างการแลกเปลี่ยนอิออน ตัวเรซิน จะใช้โซเดียม (Na^+) แลกกับไอออนบวกต่างๆ ในน้ำ เช่น Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{3+}, Fe^{2+}

การกำจัดความเป็นด่าง ไบคาร์บอเนต

นิยมใช้เรซินแบบกรดอ่อน (RCOOH) ซึ่งรีเจนเนอเรตด้วยกรดเกลือ (HCl) หรือกรดกำมะถัน (H_2SO_4) แบบกรดอ่อนนั้นจะใช้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่อยู่ร่วมกับไบคาร์บอเนต ทำให้เกิดกรดคาร์บอนิกซึ่งสลายตัวเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ง่าย ในขณะที่ไอออนบวกอื่นๆ ที่ไม่ได้อยู่ร่วมกับไบคาร์บอเนต จะไม่ถูกกำจัดออกจากน้ำ

เรซินแบบกรดแก่ (RSO_3H) ก็สามารถกำจัดด่างไบคาร์บอเนตได้ แต่จะสิ้นเปลืองเนื่องจากจะกำจัดไอออนบวกอื่นๆ ทั้งหมดไปด้วย

เรซินแบบด่างแก่ อาจใช้ได้ แต่จะสิ้นเปลือง เนื่องจากจะกำจัดไอออนลบอื่นๆ ด้วย เช่น SO_4^{2-}, Cl^-

การผลิตน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากไอออน

ต้องใช้เรซินทั้ง 2 ชนิด คือ แบบกรดและแบบด่าง กำจัดไอออนทั้งประจุบวกและลบ เรซินทั้งสองชนิดอาจบรรจุแยกถังหรือในถังเดียวกันก็ได้

การผลิตน้ำอ่อน

เรซินสามารถนำมาใช้ผลิตน้ำอ่อนซึ่งอยู่อยู่ในเครื่องทำน้ำอ่อน มีข้อดีดังนี้คือ

1. สามารถผลิตน้ำที่มีความกระด้างน้อยกว่า 2 ppm ในรูปของ $CaCO_3$
2. การใช้งานบังคับควบคุมง่าย สามารถติดตั้งระบบการล้างเรซินเป็นแบบอัตโนมัติได้
3. การล้างเรซินเพื่อฟื้นฟูประสิทธิภาพนั้น ใช้เกลือซึ่งหาได้ง่ายและมีราคาถูก
4. ไม่มีปัญหาเรื่องการบำบัดน้ำทิ้ง

ข้อจำกัดของการใช้เรซินในเครื่องทำน้ำอ่อนมีดังนี้

1. เรซินในเครื่องทำน้ำอ่อนจะขจัดได้เฉพาะความกระด้างแคลเซียม และแมกนีเซียมเท่านั้น ถ้าหากนำไปใช้แทนระบบเดิมซึ่งเป็นการลดความกระด้างโดยใช้ปูนขาว หรือปูนขาว-โซดาแอชแล้ว จะพบว่าน้ำที่ได้จากเครื่องทำน้ำอ่อนนี้ถ้านำไปใช้สำหรับหม้อไอน้ำจะพบว่าน้ำในหม้อไอน้ำมีความเป็นด่าง มีปริมาณซิลิกา และสารละลายน้ำทั้งหมดสูง
2. น้ำดิบที่ผ่านจากกระบวนการที่มีการใช้สารส้มในการตกตะกอน ต้องระมัดระวังอย่าให้มีปริมาณอะลูมินัมไอออนมากเกินควร เพราะจะไปทำลายเม็ดเรซิน ถ้ามีการใช้สารส้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนหน้าจะเข้าเครื่องทำน้ำอ่อนจะต้องมีการควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วงที่กำหนดอย่างเข้มงวดเพื่อให้เครื่องทำน้ำอ่อนมีประสิทธิภาพการใช้งานสูง

3. ถ้าในน้ำมีสารที่ทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซ์อย่างรุนแรง เช่น คลอรีน ซึ่งจะไปออกซิไดซ์ทำลายเม็ดเรซินได้ ถ้าหากในน้ำมีคลอรีนอยู่ ต้องใส่สารที่มีคุณสมบัติในการรีดิวส์ เช่น โซเดียมซัลไฟต์ เพื่อไปทำลายคลอรีน

2.1.5 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

- ระดับพีเอช (pH)

เรซินแต่ละประเภทจะมีข้อจำกัดต่างกันไป เรซินแบบกรดอ่อนจะใช้ได้ดีกับน้ำที่มีระดับพีเอชสูง ส่วนเรซินแบบด่างอ่อนใช้ได้ดีกับน้ำที่มีระดับพีเอชต่ำ ในขณะที่เรซินแบบกรดแก่ และแบบด่างแก่สามารถใช้ได้กับน้ำทุกระดับพีเอช

- ปริมาณเรซิน

ปริมาณของเรซินมีความสำคัญต่อการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากเรซินแต่ละชนิดก็จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Exchange Capacity) แตกต่างกันไป รวมถึงถ้ายิ่งใช้ปริมาณเรซินมากๆ ประสิทธิภาพก็ยิ่งเพิ่มขึ้นตามลำดับ

- เวลาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน

เรซินแต่ละประเภทจะใช้เวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนที่แตกต่างกัน เรซินแบบกรดอ่อนและแบบด่างอ่อน จะมีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนช้า ส่วนเรซินแบบกรดแก่และแบบด่างแก่จะมีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนเร็ว

- ปริมาณสารรีเจนเนอแรนต์ (หรือระดับสารที่ใช้ในการรีเจนเนอเรชัน)

หน่วยที่เราใช้ในการทำรีเจนเนอเรชัน คือ ปริมาณสารเคมี ต่อ ปริมาตรของเรซิน ถ้าเราใช้ปริมาณสารรีเจนเนอแรนต์มากเกินไปทำให้มีผลต่ออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดปริมาณรีเจนเนอแรนต์ไม่ให้สูงเกินไป

- ความเข้มข้นของรีเจนเนอแรนต์

ในการฟื้นอำนาจแลกเปลี่ยนไอออนให้กลับคืนมาได้ดีที่สุดจำเป็นต้องมีระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม การใช้ความเข้มข้นสูงเกินไปทำให้เรซินหดตัวจนเป็นอุปสรรคต่อการแลกเปลี่ยนไอออน แต่ถ้าความเข้มข้นต่ำไปก็ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เวลาสัมผัสระหว่างรีเจนเนอแรนต์และเรซิน

เวลาสัมผัสระหว่างรีเจนเนอแรนต์และเรซิน หมายถึง ระยะเวลาที่เรซินเริ่มได้สัมผัสกับรีเจนเนอแรนต์ไปถึงเวลาที่เริ่มทำการชะล้าง (Rinse) สารรีเจนเนอร์แรนต์ เวลาสัมผัสสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{เวลาสัมผัส} = \frac{1}{\text{อัตราการไหลของการทำรีเจนเนอเรชัน (อัตราไหล/ปริมาณเรซิน)}} \quad \text{..... (2.8)}$$

- อัตราการไหลของน้ำในระหว่างแลกเปลี่ยนไอออน

ถ้าแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เช่น กรณีเรซินแบบกรดแก่ที่ใช้กำจัดความกระด้าง อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านชั้นเรซินจะมีอิทธิพลน้อยมากต่ออำนาจในการแลกเปลี่ยน แต่เรซินบางชนิดมีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ จึงต้องใช้อัตราการไหลของน้ำต่ำ เพื่อให้มีเวลาพอเพียงสำหรับปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้น นิยมกำหนดอัตราการไหลของน้ำอยู่ที่ช่วง 2-5 gal/min-ft^3

2.1.6 เรซินที่นำมาใช้ ยี่ห้อ Lewatit MonoPlus S 108 Resin

Lewatit MonoPlus S 108 Resin เป็นกรดแก่ (strong acidic) ชนิดของตัวแลกเปลี่ยนไอออนจะอยู่ในรูปของโซเดียม (Na) โครงสร้างของเม็ดเรซินเป็น styrene-divinylbenzene (SBR) เนื่องจากการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตแบบพิเศษ จึงทำให้เรซินต้องทนทานต่อสารเคมี แรงดันออสโมติก และความเค้นเชิงกล

รูปที่ 2. 4 Lewatit MonoPlus S108 เรซินก่อนใช้งาน (LANXESS Energizing Chemistry, 2011)

ปฏิกิริยา การแลกเปลี่ยนระหว่างเรซินที่ใช้งานแล้วกับแคดเมียม เป็นดังนี้

$$2R\text{-}Na + Cd^{2+} \leftrightarrows R\text{-}Cd + 2Na^{+} \quad \text{..... (2.9)}$$

หรือ $$R\text{-}Na + M^{n+} \overset{K}{\leftrightarrows} R\text{-}M + Na^{+} \quad \text{..... (2.10)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2. 3 ข้อมูลทั่วไป และสมบัติทางกายภาพ-เคมีของ Lewatit MonoPlus S108 Resin

ข้อมูลทั่วไป

ไอออนอิสระ	Na^+
หมู่ฟังก์ชัน	Sulfonic acid (SO_3^-)
โครงสร้างของเม็ดเรซิน	Crosslinked polystyrene
ลักษณะหรือรูปร่าง	เรซินมีลักษณะคล้ายเม็ดเจลสีดำ หรือน้ำตาล

สมบัติทางกายภาพ และทางเคมี

ขนาดของเรซิน (mm)	0.62 ±0.05
ความเป็นเนื้อเดียวกัน	1.05 ±0.05
ความหนาแน่นรวม (g/L)	840 ±5%
ความหนาแน่น (approx. g/mL)	1.30
การเก็บกักน้ำ (wt. %)	41-46
ความจุทั้งหมด	2.2
ปริมาตรที่ใช้ในการเปลี่ยน $Na^+ \rightarrow H^+$ (max. vol %)	10
พีเอช	0-14
อายุการใช้งาน (max. years)	2
อุณหภูมิที่ไม่ทำให้เรซินเสื่อมสภาพ (^oC)	-20 ถึง 40

ตารางที่ 2. 4 สภาพการใช้งานของ Lewatit MonoPlus S108 Resin

อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งาน (^oC)	120	
พีเอชที่สามารถทำงานได้	0-14	
สารรีเจนเนอร์แรนต์ แบบ Counter-current regeration	HCl	H_2SO_4
- จำนวน (g/L)	50	80
- ความเข้มข้น (%)	4-6	1.5-3
- เวลาที่ใช้ (minutes)	15-20	20
- อัตราการไหลในการรีเจนเนอร์เรชัน (m/h)	5	10-20
สารรีเจนเนอร์แรนต์ แบบ Co-flow regeration	HCl	H_2SO_4
- จำนวน (g/L)	100	150
- ความเข้มข้น (%)	6-10	1.5-3
- เวลาที่ใช้ (minutes)	30-40	20
- อัตราการไหลในการรีเจนเนอร์เรชัน (m/h)	5	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มา : LANXESS Energizing Chemistry, 2011

2.2 น้ำเสีย

2.2.1 นิยามของน้ำเสีย

น้ำเสีย ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 หมายถึง ของเสียที่อยู่ในสภาพเป็นของเหลวรวมทั้งมวลสารที่ปะปนหรือปนเปื้อน อยู่ในของเหลวนั้น แต่โดยทั่วไป หมายถึง น้ำที่เสื่อมคุณภาพ หรือคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปจากเดิมตามธรรมชาติ มักจะผ่านการใช้งานแล้ว โดยมีสิ่งปฏิกูลที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำเจือปนอยู่ เช่น สารอนินทรีย์ สารอินทรีย์ สารเคมีที่เป็นพิษ สารที่ทำให้เกิดฟอง กรด ด่าง น้ำร้อน สารแขวนลอย สี และจุลินทรีย์ เป็นต้น จนไม่สามารถนำน้ำนั้นมาใช้ประโยชน์ได้เท่าที่ควร สารอนินทรีย์ที่ย่อยสลายได้เมื่อถูกทิ้งลงไปในแหล่งน้ำจะถูกจุลินทรีย์ในน้ำย่อยสลาย ในกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์จะต้องใช้ออกซิเจนที่อยู่ในน้ำ (พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2535)

2.2.2 ประเภทของน้ำเสีย (Types of wastewater)

การแบ่งประเภทของน้ำเสียสามารถแบ่งได้หลายรูปแบบ เช่น แบ่งตามแหล่งกำเนิดน้ำเสีย (Sources of wastewater) หรือแบ่งตามชนิดของสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย (Types of impurities)

1. การแบ่งประเภทของน้ำเสียตามแหล่งกำเนิด (Classification by source of wastewater)

การแบ่งประเภทของน้ำเสียตามแหล่งกำเนิดมักเป็นที่นิยมใช้กันมาก ทั้งนี้เนื่องจากทำให้ทราบถึงแหล่งที่มาของน้ำเสีย รวมทั้งสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำเสียด้วย (เสริมพล และไชยยุทธ, 2524) การแบ่งประเภทของเสียโดยวิธีการนี้สามารถแบ่งน้ำเสียได้เป็น 3 ประเภท คือ

น้ำเสียชุมชน (Domestic wastewater)

น้ำเสียจากแหล่งชุมชน คือ น้ำที่ถูกใช้จากแหล่งชุมชนต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของสารอนินทรีย์ และสารอินทรีย์ต่างๆ ในรูปของขนาดใหญ่ ขนาดเล็ก หรือไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า น้ำเสียยังมีสิ่งมีชีวิตเล็กมากอาศัยปะปนอยู่ด้วย ได้แก่ แบคทีเรีย ไวรัส และโปรโตซัว น้ำเสียชุมชนหรืออาจจะเรียกอีกอย่างว่าน้ำโสโครก (Sewage) ได้แก่ น้ำทิ้งที่มาจากชุมชน บ้านเรือนที่พักอาศัย อาคาร ร้านค้า ภัตราคาร โรงแรม เป็นต้น โดยน้ำเสียดังกล่าวมักเกิดจากมนุษย์

น้ำเสียเกษตรกรรม (Agricultural wastewater)

น้ำเสียจากทางเกษตรเป็นน้ำเสียที่ถูกปล่อยมาจากพื้นที่ที่มีกิจกรรมเกี่ยวกับการเกษตร ไม่ว่าจะเป็นพื้นที่เพาะปลูก หรือพื้นที่เลี้ยงสัตว์ สิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำเสียที่มาจากพื้นที่เลี้ยงสัตว์ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งมาจากเศษอาหารสัตว์ และสิ่งขับถ่ายออกจากตัวสัตว์ ซึ่งน้ำเสียส่วนนี้มักจะ

เอกสารนี้เป็นเอ... ไม่ว่ากรณี...

มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ค่อนข้างสูงรวมทั้งอาจจะมีความเข้มข้นของแข็งไม่ละลายน้ำสูงด้วย ส่วนน้ำเสียที่มาจากพื้นที่เพาะปลูกมักมีการปนเปื้อนสารเคมี ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช ที่ถูกใช้ในพื้นที่เพาะปลูก ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าน้ำเสียจากเกษตรกรรมมักมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์เป็นจำนวนมากรวมทั้งสารเคมีด้วย

น้ำเสียอุตสาหกรรม (Industrial wastewater)

น้ำเสียอุตสาหกรรมจะเป็นน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสิ่งสกปรกที่แตกต่างกัน และปริมาณของสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนก็แตกต่างกันด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรม วัตถุดิบที่ใช้ ตลอดจนกระบวนการผลิตที่ใช้ โดยสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนอาจเป็นสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ หรืออาจจะเป็นสารทั้ง 2 ที่กล่าวมาก็ได้ น้ำเสียอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการล้างวัตถุดิบ การล้างเครื่องจักรอุกรณ์ การระบายความร้อน รวมทั้งกิจกรรมต่างๆของพนักงานในโรงงานเป็นต้น

2. การแบ่งประเภทของน้ำเสียตามลักษณะสมบัติของสิ่งสกปรก (Classification of wastewater by type impurities)

การจำแนกชนิดของน้ำเสีย วิธีการนี้อาศัยแบ่งตามลักษณะสมบัติของสิ่งปนเปื้อน โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

น้ำเสียอินทรีย์ (Organic wastewater)

น้ำเสียที่เป็นน้ำเสียที่มีสิ่งสกปรกปนเปื้อนเป็นสารอินทรีย์ซึ่งจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ น้ำเสียประเภทนี้ได้แก่ น้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร และแปรรูปอาหาร น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ น้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ เป็นต้น

น้ำเสียอนินทรีย์ (Inorganic wastewater)

น้ำเสียอนินทรีย์เป็นน้ำเสียที่มีสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนสารอนินทรีย์ซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ น้ำเสียประเภทนี้ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานปิโตรเคมี อุตสาหกรรมผลิตสารเคมี อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 โลหะหนักในน้ำเสีย

โลหะหนักถือว่าเป็นพิษและมีอันตราย เกิดจากการสร้างผลิตภัณฑ์ต่างๆ โลหะหนักที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีความเข้มข้นที่แตกต่างกันไป แต่โลหะหนักที่เป็นปัญหาหลักเกิดจากกระบวนการอุตสาหกรรมต่อไปนี้

- การทำเหมืองแร่โลหะ และการถลุงแร่
- โรงหล่อ
- โรงชุบโลหะ และตกแต่ง
- โลหะแปรรูป

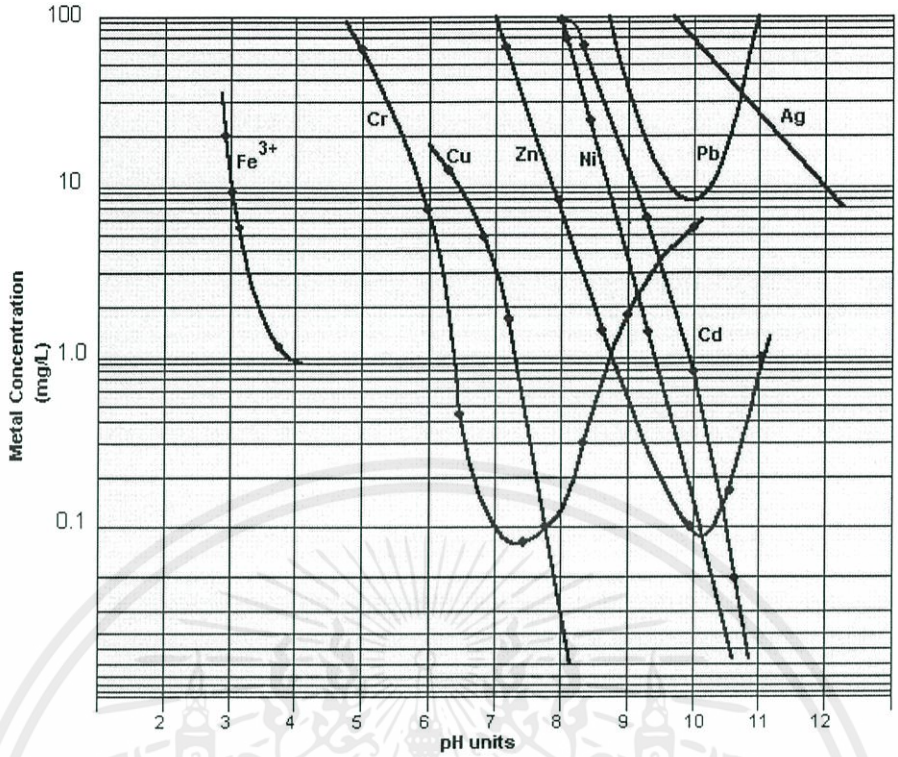
2.3.1 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนัก

ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักต่างๆ (Solubility) ดังรูปที่ 2.5 เมื่อเกลือของโลหะละลายน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนบวก และไอออนลบ จนกระทั่งถึงจุดสมดุล หากผลคูณของความเข้มข้นของไอออนมีค่าต่ำกว่าค่าคงที่ของความสามารถของการละลาย (Solubility product constant, Ksp) โลหะนั้นก็ยังละลายน้ำอยู่ ในทางตรงกันข้ามถ้าความเข้มข้นของไอออนมีปริมาณมากพอ ทำให้ผลคูณของความเข้มข้นของไอออนสูงกว่าค่าของความสามารถในการละลาย โลหะนั้นก็จะตกผลึกลงมา(ปาริฉัตร และคณะ, 2554 อ้างถึง กาญนิถา, 2545) ค่าคงที่ของ (Ksp) ของ Cadmium chloride เท่ากับ 8.65

การตกตะกอนโลหะหนักในรูปไฮดรอกไซด์ การเติมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินพอ และมีการกวนอย่างสม่ำเสมอรวมทั้งควบคุมพีเอชให้เหมาะสม ไอออนของโลหะหนักจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ (metal-hydroxide) ที่ไม่ละลายน้ำ สารเคมีที่ใช้คือ แคลเซียมคาร์บอเนต หรือปูนขาว ($CaCO_3$) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) การใช้ปูนขาวจะทำให้เกิดฟล็อคของหินปูนทำให้ได้ตะกอนแข็ง และฟล็อคขนาดใหญ่กว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ การกำจัดด้วยปูนขาว หรือสารประกอบแคลเซียมอื่นๆ ที่ช่วยให้เกิด Coprecipitation ในการกำจัดโลหะหนัก ทำให้มีตะกอนดียิ่งขึ้นแต่ต้องมีปริมาณสลัดจ์ที่ต้องกำจัดเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนใหญ่โซเดียมไฮดรอกไซด์จะง่ายกว่า และมีปัญหาเรื่องฟุ้งกระจายของสารเคมีที่อาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้

โลหะไฮดรอกไซด์จะเป็นพวกแอมโฟเทอริก (Amphoteric) คือ สามารถเพิ่มการละลายเมื่อพีเอชเปลี่ยนแปลง และจุดของการละลายต่ำสุดของโลหะแต่ละชนิดแตกต่างกันมีค่าพีเอชหนึ่งทำให้เกิดปัญหาสำหรับน้ำเสียที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนกันอยู่ ดังนั้นการที่จะควบคุมการกำจัดโลหะทุกตัวออกจากน้ำเสียอาจจะใช้ร่วมกับการตกตะกอนในรูปแบบอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2. 5 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักที่พีเอชต่างๆ

(Hoffland Environment, Inc., 2012)

2.3.2 แคดเมียม

แคดเมียม (Cd) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 48 เป็นธาตุที่ 2 ของหมู่ IIB น้ำหนักอะตอม 112.40 amu เป็นโลหะหนักที่มีสีเงินแกมขาว มีคุณสมบัติ เบา อ่อน ดัดโค้งได้ง่าย และทนต่อการกัดกร่อน มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 8.65 ค่าความแข็งของโมห์ เท่ากับ 2.0 ค่าดัชนีการหักเหแสง เท่ากับ 1.13 จุดหลอมเหลว เท่ากับ 302.90 °C จุดเดือด เท่ากับ 767 °C ความดันไอ (Vapor pressure) เท่ากับ 1.4 mm ที่ 400 °C และ16 mm ที่ 500°C ดังนั้นเมื่อมีการใช้ความร้อนสูง เช่น การอบแร่การบัดกรี การหลอมเหล็ก และการเผาของเสีย จะทำให้ไอของแคดเมียมออกมาได้ในระหว่างกระบวนการที่มีการให้ความร้อน และไอของแคดเมียมในอากาศจะถูกออกซิไดส์อย่างรวดเร็วไปเป็นแคดเมียมออกไซด์ (CdO) นอกจากนี้แคดเมียมยังเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก (HNO_3) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เจือจาง โดยทั่วไปจะไม่ค่อยพบแคดเมียมในรูปของแคดเมียมบริสุทธิ์ แต่มักจะพบในรูปของสารประกอบของเกลือ เช่น แคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) แคดเมียมไนเตรต ($CdNO_3$) แคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2$) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีสี และละลายได้ดีในน้ำ และแคดเมียมยังสามารถรวมตัวกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้โดยเฉพาะเมื่อรวมกับ ไซยาไนด์ และเอมีน (เขมชิต และคณะ, 2551)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคดเมียมปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเนื่องจากมนุษย์ได้นำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์กว้างขวาง ได้มีการผลิตแคดเมียมส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่สังกะสี และมีบางส่วนที่ได้มาจากการถลุงแร่ทองแดง และการถลุงตะกั่ว International Agency for Research on Cancer (IARC) ได้รายงานว่ามีการผลิตแคดเมียมทั่วโลกในปี พ.ศ. 2516 ประมาณ 17,000 ตัน และประเทศไทยได้เริ่มการผลิตแคดเมียมตั้งแต่ปี 2533 โดยผลิตแคดเมียมจากของเหลือจากการถลุงแร่สังกะสีที่จังหวัดตากเดือนละ 1 ตัน เพื่อจำหน่ายที่ประเทศญี่ปุ่น ส่วนแคดเมียมที่ประเทศไทยนำเข้ามาจากประเทศสหรัฐอเมริกา สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน อังกฤษ ออสเตรเลีย และสวิตเซอร์แลนด์ (นงนุช, 2550)

2.3.3 แคดเมียมในน้ำ

ในแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีแคดเมียมอยู่ในช่วง 0.00 - 0.01 mg/L แคดมเมียมสามารถกระจายไปในแหล่งน้ำธรรมชาติต่างๆ ได้มากกว่าโลหะชนิดอื่นๆ เพราะมีความสามารถในการสร้างสารเชิงซ้อนกับสารประกอบฮิวมิก และลิแกนด์ของสารอินทรีย์ต่างๆ ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถละลายน้ำได้ นอกจากนี้แคดเมียมยังสามารถถูกชะจากดินลงสู่น้ำโดยเฉพาะในสภาวะกรด และแม้ว่าแคดเมียมแยกออกจากน้ำได้ด้วยการตกตะกอน หรือถูกดูดซับโดยแร่ธาตุ และสารอินทรีย์ต่างๆที่มีทั่วไปอยู่ในน้ำ แต่เมื่อสภาวะของน้ำเปลี่ยนไปก็ทำให้แคดเมียมกลับมาละลายได้อีก แคดเมียมที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำเกือบทั้งหมดจะอยู่ในรูปของสารประกอบไอออนต่างๆ ได้แก่ แคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) สารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมไซยาไนด์ หรือ ผลึกของแคดเมียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสัดส่วนปริมาณไอออนเหล่านี้ในน้ำขึ้นอยู่กับค่าพีเอช พบว่าถ้าพีเอชน้อยกว่า 8 แคดเมียมจะละลายน้ำในรูปของแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) เช่น แคดเมียมซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ เมื่อพีเอชเพิ่มมากว่า 8 พบแคดเมียมไฮดรอกไซด์ และแคดเมียมคาร์บอเนต ซึ่งละลายน้ำได้ต่ำ และเกิดการตกตะกอน ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

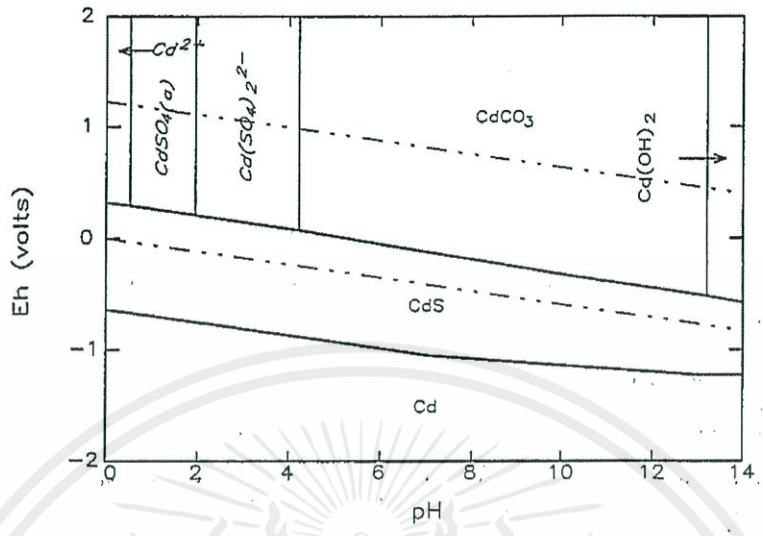
$$Cd^{2+} + CO_3^{2-} = CdCO_3(s) \quad \text{(ovatite)} \qquad \triangle G = -15.25 \text{ kcal/mol} \quad \text{..... (2.11)}$$
$$\log Ks = 11.18$$

$$Cd^{2+} + 2OH^- = Cd(OH)_2(s) \qquad \triangle G = -19.62 \text{ kcal/mol} \quad \text{..... (2.12)}$$
$$\log Ks = 13.7$$

ที่พีเอชสูงกว่า 10 $CdCO_3$ สามารถละลายน้ำได้ประมาณ 300 µg/L และที่พีเอชสูงกว่า 10 $Cd(OH)_2$ ละลายได้ประมาณ 225 µg/L (ฉัตรสินี, 2545 อ้างถึง Faust และ Aly, 1983) แต่หากมีการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงสู่น้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้แคดเมียมไฮดรอกไซด์และแคดเมียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนอยู่จะเปลี่ยนรูปและสามารถละลายกลับขึ้นมาสู่น้ำได้อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแหล่งน้ำที่มีซัลเฟอร์อยู่เมื่อเกิด reducing condition แคดเมียมจะอยู่ในรูปของสารประกอบซัลไฟด์ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2. 6 ขอบเขตสถานะของแคดเมียมในน้ำที่มีซัลเฟอร์และคาร์บอเนต (U.S. EPA, 1984)

สำหรับการปนเปื้อนแคดเมียมในแหล่งกำเนิดต่าง ๆ กรมควบคุมมลพิษได้กำหนดค่ามาตรฐานไว้ดังนี้

ตารางที่ 2. 5 มาตรฐานปริมาณแคดเมียม

แหล่งกำเนิด	ค่ามาตรฐาน (mg/L)
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค	0.01
มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท	0.005
มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค	0.01
มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม	ไม่เกิน 0.03
มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อน้ำบาดาล	0.1
มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน	0.003
มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน	0.005*, 0.05**
มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเล	ไม่เกิน 0.005
มาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน	ไม่เกิน 0.003

* น้ำที่มีความกระด้างในรูปของ $CaCO_3$ ไม่เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

** น้ำที่มีความกระด้างในรูปของ $CaCO_3$ เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2553

เอกสารนี้เป็นการสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 การนำมาใช้ประโยชน์

แคดเมียมถูกนำไปใช้ประโยชน์หลายด้าน ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมที่เห็นอย่างชัด และทางด้านเกษตร ในด้านอุตสาหกรรมแคดเมียม และเกลือของแคดเมียมจำนวนมากถูกนำมาใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า นำมาผสมกับโลหะอื่น เช่น อลูมิเนียม ปรอท แมกนีเซียม นิกเกิล ทำเป็นโลหะผสม เช่น อัลลอยด์ ซึ่งนำไปทำเป็นอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ท่องอ เครื่องป้องกันไฟ เบ้าลม ส่วนประกอบรถยนต์ นอกจากนี้ยังใช้ทำแบตเตอรี่ นิกเกิลกับแคดเมียมผสมในยางเพื่อให้ทนความร้อน ทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เสถียร (Stabilizer) ในอุตสาหกรรมพลาสติก ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น สีทาบ้าน สีชุบโลหะ หมึกพิมพ์ สีทำแก้ว กระดาษ สิ่งทอ เป็นต้น ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์สุริยะ (Solar cell) และใช้ในทางการแพทย์และทันตแพทย์ ด้านการเกษตรแคดเมียมถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารฆ่าวัชพืช สารฆ่าเชื้อรา ส่วนผสมในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต (ฉัตรสินี, 2545 อ้างถึง สิทธิชัย, 2541; Dunnick และ Fowler, 1988)

2.3.5 อันตรายที่อาจเกิดจากแคดเมียม

แคดเมียมถูกการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งอาจปล่อยแคดเมียมปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม เช่น เซลล์ไฟฟ้า สี พลาสติก โลหะบัดกรี และโลหะแอลลอยด์ โรงงานผลิตเหล็ก โรงงานซีเมนส์ และพบว่าแคดเมียมมีปนเปื้อนอยู่ในควันบุหรี่ รวมทั้งเป็นผลพลอยได้จากเหมืองสังกะสีและเหมืองตะกั่วซึ่งเป็นแหล่งปนเปื้อนของโลหะหนักหลายชนิด แคดเมียมมีการกระจายจากแหล่งกำเนิดไปสู่อากาศ น้ำ และดิน แคดเมียมยังเคยใช้เป็นปุ๋ย พืชซึมซับและสะสมแคดเมียมในเนื้อเยื่อ จึงพบว่าแคดเมียมเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร และแคดเมียมมีการสะสมในพวกหอยชนิดต่าง ๆ ในปริมาณสูง และยังพบในผลไม้และเนื้อสัตว์ (ฐิติยา, 2551)

ความเป็นพิษ

ถ้าได้รับแคดเมียมปริมาณสูงจากอาหารจะทำให้เกิดอาการพิษเฉียบพลัน เช่น คลื่นไส้ อาเจียน ปวดศีรษะ ปวดท้อง ท้องเสีย ชัก ตับถูกทำลาย และไตทำงานล้มเหลว ตัวอย่างเช่น การเกิดโรคอิไต - อิไต ในประเทศญี่ปุ่น อาการพิษเฉียบพลันเมื่อได้รับแคดเมียมจากการหายใจ เช่น รู้สึกรสขมคล้ายโลหะในปาก หายใจสั้น ๆ เจ็บหน้าอก ไอเป็นเลือด อ่อนเพลีย และเจ็บขา อาการพิษเรื้อรังของคนที่ได้รับแคดเมียมทางหายใจ คือ จมูกไม่ได้กลิ่น น้ำหนักลด โลหิตจาง ฟันเกิดรอย หรือ คาบเหลือง ตับและไตถูกทำลาย จากการศึกษาทางระบาดพบว่าการได้รับแคดเมียมทางการหายใจ ในการประกอบอาชีพมีความสัมพันธ์กับการเป็นมะเร็งปอด และมะเร็งต่อมลูกหมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความเป็นพิษแคดเมียมมีฤทธิ์ทำลายไต และระบบทางเดินหายใจ ทั้งยังมีผลต่อการสะสมแคลเซียมในร่างกายด้วย (มลิวรรณ, 2547)

พิษต่อปอด

หลังจากผู้ป่วยได้รับแคดเมียมเข้าไป 2 -3 ชั่วโมง ผู้ป่วยจะมีอาการปอดบวม เจ็บหน้าอก คลื่นไส้ และท้องเดิน ถ้าได้รับเข้าไปเป็นเวลานาน ๆ ประสิทธิภาพในการระบายลมของปอดจะลดลง ทำให้อากาศอยู่ภายในปอดนานกว่าผิดปกติ และทำให้เกิดอาการหายใจไม่ออก อาการชนิดนี้จะเป็นแบบถาวรและมีผลกระทบรุนแรงกว่าการได้รับแคดเมียมแบบเฉียบพลัน จึงทำให้เกิดโรคถุงลมโป่งพองได้

พิษต่อไต

พิษต่อไตจะปรากฏโดยผู้ป่วยมีอาการของโปรตีนยูเรีย (Proteinuria) คือมีการขับโปรตีนออกมาในปัสสาวะมากกว่าปกติ

อาการอื่น ๆ

นอกจากพิษแคดเมียมที่มีต่อปอดและไตแล้ว แคดเมียมยังมีพิษต่อกระดูก ทำให้เกิดอาการกระดูกโก่ง แตกร้าว เนื่องจากร่างกายดูดซึมแคลเซียมได้น้อยลงนั้นเอง ส่วนอาการอื่น ๆ ได้แก่ ผลที่เกิดกับหลอดเลือด คือ ถ้าร่างกายได้รับแคดเมียมในปริมาณน้อย ๆ จะเกิดการบีบตัวของหลอดเลือด แต่ถ้ารับเข้าไปมาก ๆ กลับทำให้หลอดเลือดบวมได้

2.3.6 การกำจัดแคดเมียมออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียมีหลายวิธีและขั้นตอน ขึ้นอยู่กับสภาพของน้ำเสียและวัตถุประสงค์ในการบำบัด ตัวอย่างวิธีการบำบัดที่ใช้โดยทั่วไป (จตุรวิทย์ และศราวุธ, 2550) มีดังนี้

1. การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานแล้ว โดยทำการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสียเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้ ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกันแต่วิธีที่นิยมใช้กันทั่วไปในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 แบบ คือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) และการตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation)

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยเติมสารเคมีคือปูนขาว หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกิดปฏิกิริยาตามสมการดังนี้

$$Cd^{2+} + 2NaOH \longrightarrow Cd(OH)_2 + 2Na^{+} \quad \text{..... (2.13)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

การตกตะกอนซัลไฟด์ สารเคมีที่นิยมใช้ในการตกตะกอนคือ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) และเฟอรัสซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ

$$Cd^{2+} + Na_2S \longrightarrow CdS + 2Na^{+} \quad \text{..... (2.14)}$$

2. การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน สามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือดูดจับโดยเรซิน (Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งสารแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ เรซินมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามเป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า แคตไอออนเอกเชนเจอร์ (Cation exchange) ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ เรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (Anion exchange) วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องถูกกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การกำจัดมีประสิทธิภาพสูงสุด

3. ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้กันมาก ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆ เจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน ได้แก่ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรด์ เปอร์แมงกาเนต โครเมตและไนเตรต สวนสารเคมีที่ให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ เฟอร์ริกซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์

4. รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลสอะซีเตด และโพลีเอมีน ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน (Sernipermeable Membrane) เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องบำบัดขั้นต้นโดยการปรับค่า pH แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออก และกรองสารแขวนลอยออกก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของเมมเบรน วิธีการนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำเสียจากการล้างภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การระเหย (Evaporation)

เป็นวิธีง่ายๆ ที่ทำให้สารเคมีมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยทั้งการระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (Atmospheric Evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum Evaporation) วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น แต่ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินงานสูง

6. อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electro dialysis)

วิธีการนี้เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลาย ด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เลือกเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) กลไกของกระบวนการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนกับการสกัดตัวทำละลายและน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันแผ่นเมมเบรนอุดตัน แต่วิธีการนี้ต้นทุนก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง แต่สามารถกำหนดไอออนที่ต้องการได้

7. การแยกกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนในขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีการนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่เป็นที่นิยมเพราะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

8. การดูดซับ (Adsorption)

การที่โมเลกุลของสารถูกดึงเข้ามาติดผิวของสารดูดซับ หรือ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ

2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

2.4.1 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ หมายถึง การที่โมเลกุลของสารถูกดึงเข้ามาติดผิวของสารดูดซับ หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ พลังงานอิสระที่ผิวของสารดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิวและพื้นที่ผิว ดังสมการ (2.13) เมื่อความตึงผิว (surface tension) หรือ พื้นที่ผิว (surface area) เปลี่ยนไปจะเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานอิสระที่ผิว ($\Delta G_{surface}$) (จตุรวิทย์ และศราวุธ, 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta G_{surface} = \gamma A \qquad \text{..... (2.15)}$$

เมื่อ $\Delta G_{surface}$ = พลังงานอิสระที่ผิว

γ = ความตึงผิว

A = พื้นที่ผิว

การดูดซับบนผิวของแข็ง แบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นแรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals) เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน ตัวอย่างเช่น การดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งภายในโครงสร้างของพื้นที่ผิวมีรูพรุนมากทำให้มีการดูดซับบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับสูงขึ้น ดังนั้นรูพรุนของสารดูดซับจึงมีความสำคัญ ส่วนการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ โดยมีค่าพลังงานสูงมากในการเกิดพันธะและการดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับอย่างแท้จริง

2.4.2 กลไกการดูซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลว การเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 4 ระยะติดต่อกันดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Bulk solution transport เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ(Absorbate)ในน้ำ จะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ เกิดขึ้นโดยการแพร่หรือเรียกว่า การแพร่ภายนอก (External diffusion)

ขั้นตอนที่ 2 Film diffusion transport โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะแพร่ผ่านชั้นน้ำ (Hydrodybamic boundary layer) ที่ล้อมรอบสารดูดติดผิว เมื่อน้ำเคลื่อนที่ผ่านสารดูดติดผิว ระยะทางในการเคลื่อนที่ และเวลาที่เกิดขึ้นของขั้นตอนนี้ ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล ถ้าอัตราการไหลสูงระยะทางจะสั้น

ขั้นตอนที่ 3 Pore transport หลังจากเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำ (Hydrodynamic boundary layer) สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่ผ่านช่องที่อยู่ภายในสารดูดติดผิวไปสู่บริเวณที่จะเกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 Adsorption หลังจากสารดูดติดผิวมีการเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีการดูดซับเกิดขึ้น จะถูกดูดติดผิวทางกายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุด เรียกว่า Rate-limiting step ซึ่งจะควบคุมอัตราการกำจัด ในถังปฏิกรที่มีความปั่นป่วนสูง Film diffusion และ Pore diffusion จะควบคุมอัตราการกำจัด

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film Diffusion และ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนาแน่นมากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้ Pore Diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

พื้นที่ผิวของสารดูดซับ พื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถ ในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ยกเว้นในกรณีที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของสารดูดซับ

ขนาดของสารดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ การลดขนาดของสารดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่

ความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำและเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง จึงเป็นสารที่ยากในการดูดซับ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวสารดูดซับได้ดี

ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับโดยเฉพาะการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ

ค่าพีเอช ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องมาจากค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดซับมาก

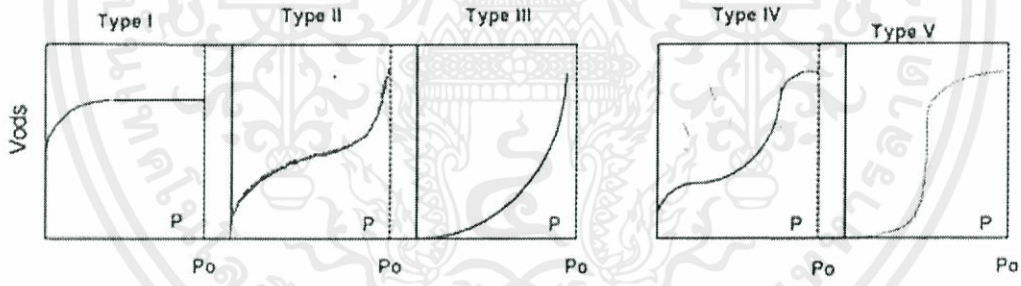
อุณหภูมิ ในกรณีการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนช่วยทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำลดลงการเคลื่อนย้ายสารถูกดูดซับจากสารละลายภายนอก (Bulk Solution) เคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็วขึ้น

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 ความสัมพันธ์สมดุลสำหรับการดูดซับ (Equilibrium Relations for Adsorption)

กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยสารจะถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและอัตราการคายการดูดซับมีค่าเท่ากัน ที่จุดนี้ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับจะเท่ากับความเข้มข้นในสารดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ เราใช้ Adsorption Isotherm เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้นนั้นAdsorption Isotherm คือความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสารที่ถูกดูดซับไปต่อน้ำหนักของสารดูดซับ และความเข้มข้นของสารนั้นยังคงเหลืออยู่ในสารละลาย และนำไปสร้างกราฟลอการิทึมโดยให้ความเข้มข้นของสารที่เหลือในสารละลายเป็นแกนนอน และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับต่อสารดูดซับเป็นแกนตั้งเส้น โค้งที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมดเรียกว่า Adsorption Isotherm ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถในการดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบหาชนิดของสารดูดซับที่ดีที่สุด (กนกอร, 2549)

รูปร่างของไอโซเทอร์มการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ และปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวสารดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับมีทั้งหมด 5 แบบ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2. 7 รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับ (กนกอร, 2549)

1. ไอโซเทอร์มแบบที่ I เรียกว่าไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ สำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว ตามสมการของแลงเมียร์ ไอโซเทอร์มแบบนี้มักจะพบในวัสดุที่มีความพรุน แต่ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำ เช่น ซีโอไลต์ หรือ ถ่านกัมมันต์บางชนิด ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้นและเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วทำให้ค่าการดูดซับคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ไอโซเทอร์มแบบที่ II บางครั้งเรียกว่า sigmoid หรือ ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ ตำแหน่งซึ่งเป็นคล้ายหัวเข่าเป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียว แล้วหลังจากนั้นจึงเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น

3.ไอโซเทอร์มแบบที่ III มีรูปร่างเหมือนกระจกเว้า และไม่มีตำแหน่งที่เหมือนหัวเข่า ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบบ่อย จะเกิดกับการดูดซับที่อ่อน เกิดเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าต่ำ เช่น การดูดซับของสารที่มีขั้ว หลังจากที่ผิวหน้าถูกคลุมหมดแล้ว การดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แสดงถึงแรงดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกันเองมีสูง ตัวอย่างการดูดซับแบบนี้ ได้แก่ การดูดซับของไอน้ำบนแกรไฟต์

4. ไอโซเทอร์มแบบที่ IV มักพบในวัสดุที่มีรูพรุนแบบมีโซพอร์ จะเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 แต่หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการควบแน่นในรูขนาดเล็กแบบคะปิลลารี ซึ่งทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส ที่เกิดจากเส้นกราฟของการดูดซับและเส้นกราฟของการคายไม่ทับกัน เพราะการคายเกิดได้ยากกว่าเพราะต้องเอาชนะแรงคะปิลลารี (Capillary force)

5. ไอโซเทอร์มแบบที่ V เหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 4 ต่างกันเพียงการควบแน่นในรูพรุน ในกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า P/P_0 สูงกว่า เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าต่ำ ฮิสเทอรีซิสจากการดูดซับและการคายเกิดจากการเอาชนะแรงคะปิลลารีในการดึงตัวถูกดูดซับออกมา ไอโซเทอร์มชนิดนี้พบไม่บ่อยนัก

2.4.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวกับความดันของก๊าซหรือความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบ่งออกได้เป็น (สุภาพร คำธิมา, 2551) ดังนี้

1. ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ.1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอร์มแบบง่ายสุดโดยมีสมมติฐานคือ 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้กันจากการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลาย ได้ดังสมการ (2.14)

$$q_e = \frac{Q^0 \cdot b \cdot C_e}{1 + bC_e} \quad \text{..... (2.14)}$$

หรือ $$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0} \quad \text{..... (2.15)}$$

เมื่อ q_e = ปริมาณของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับหนักหนึ่งกรัม

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

Q^0 = ปริมาณของสารถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว

b = ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกน $\frac{C_e}{q_e}$ เป็น $\frac{1}{bQ^0}$ และมีความชันเท่ากับ $\frac{1}{Q^0}$

2. ไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิช (Freundlich isotherm)

ในปี ค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมี ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดังสมการ 2.16

$$q_e = \frac{X}{m} = k_f \cdot C_e^{1/n} \quad \text{..... (2.16)}$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่สมดุล

X/m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ

k_f และ n = ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการฟฟรุนด์ลิช เมื่อใส่ลอการิทึม (Logarithm) จะได้สมการ

$$log = log\frac{X}{m} = logk_f + \frac{1}{n} logC_e \quad \text{..... (2.17)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $log\frac{x}{m}$ กับ log C_e ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกน สามารถนำมาหาค่า k_f ได้ และความชันของกราฟเป็น $\frac{1}{n}$

บางกรณีที่เขียนกราฟระหว่าง $log\frac{x}{m}$ กับ log C_e แล้วไม่ได้เส้นตรงแสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการของฟลุนด์ลิช เช่น การดูดซับสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของสารดูดซับ แต่ค่าจากสารถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณมาก ทำให้สารถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึง มีปริมาณลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อัจฉรา (2546) การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกไข่ โดยใช้ระบบถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาผลของชนิดเปลือกไข่ และระดับความหนาของชั้นเปลือกไข่ในถังดูดติดผิวที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม โดยใช้อัตราการไหลของน้ำเสีย 1.5 m^3/m^2.hr เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทุกชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า เปลือกไข่สามารถลดปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียได้มากกว่าร้อยละ 80 โดยเปลือกไข่ไก่มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงกว่าเปลือกไข่เป็ด กล่าวคือเปลือกไข่ไก่และเปลือกไข่เป็ดมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงสุดร้อยละ 99.84 และ 86.41 ตามลำดับ นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความหนาของชั้นเปลือกไข่ในถังดูดติดผิว

พอตา (2547) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้เรซินที่แลกเปลี่ยนไอออนผลิตจาก Hydroxy ethyl Cellulose โดยการนำเรซินที่แลกเปลี่ยนไอออนทดลองจับไอออนของทองแดง (Cu^{2+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) โคบอลต์ (Co^{2+}) สังกะสี (Zn^{2+}) นิกเกิล (Ni^{2+}) และแคดเมียม (Cd^{2+}) จากสารละลายสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L โดยกระบวนการแบบแบตช์ พบว่า เรซินที่ได้จากการสังเคราะห์สามารถดูดจับไอออนของทองแดง ตะกั่ว และโคบอลต์ได้มากกว่าร้อยละ 90 และให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าสังกะสี นิกเกิล และแคดเมียม

กนกอร (2549) ได้ศึกษาการดูดซับกรดแลคติกจากสารละลายกรดแลคติกมาตรฐาน และอาหารหมักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบเบสอ่อนที่มีชื่อทางการค้าว่า Amberlite IRA-96 ได้ถูกศึกษาในระบบกะ การทดลองแลกเปลี่ยนไอออนในระบบกะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถึงสมดุลใน 1 นาที ที่อุณหภูมิ 35 °C ไอโซเทอร์มที่ได้มีรูปร่างตามแบบสมการของโบล์ทซแมนน์ (Boltzmann) ซึ่งมีรูปร่างคล้ายตัวเอส ค่าความเข้มข้นสูงสุดของการดูดซับกรดแลคติกของเรซินที่อัตราการเขย่า 200 rpm ค่าพีเอช เท่ากับ 5 อุณหภูมิ 20, 25, 30 และ 35°C ได้ค่า 128, 152, 155 และ 190 mg/g ตามลำดับ ค่า $\Delta H°$ และ $\Delta S°$ ที่ได้เป็นบวก ค่า $\Delta G°$ มีค่าเป็นลบ ที่อัตราการเขย่า 200 rpm ค่าพีเอชเท่ากับ 5 อุณหภูมิ 35 °C ค่าความเข้มข้นสูงสุดของการดูดซับกรดแลคติกในสารละลายกรดแลคติกมาตรฐาน และในอาหารหมักได้ค่าประมาณ 190 และ130 mg/g ตามลำดับ การเพิ่มจำนวนเรซินช่วยเพิ่มปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับกรดแลคติก แต่จะลดประสิทธิภาพของเรซิน อัตราการดูดซับกรดแลคติกของเรซินลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นกรดแลคติก และการเพิ่มอัตราการเขย่าก็ช่วยเพิ่มอัตราการดูดซับกรดแลคติกเช่นกัน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมที่ได้ซึ่งครอบคลุมสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลจากของแต่ละเฟส ในช่วงมีค่า 10^{-4} วินาที ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในที่คำนวณได้มีค่า 10^{-6} cm^2/s ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มที่ได้มีค่า 10^{-6}-10^{-7} cm^2/s เมื่อความหนาของฟิล์มอยู่ในช่วง 10^{-4}-10^{-5} m ซึ่งบ่งบอกว่าอัตราการดูดซับกรดแลคติกบน Amberlite IRA-96 ถูกกำหนดด้วยกระบวนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม

บัญชา และคณะ (2550) ได้ศึกษาว่าเปลือกลำไยเป็นส่วนเกินจากการแปรรูปได้ถูกนำมาพัฒนาเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ และศึกษาคุณสมบัติในการดูดซับไอออนของโลหะหนักในสารละลายโดยการปรับสภาพด้วยวิธีการต่างกัน 3 แบบ คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น และ เปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง ทำให้เกิดความแตกต่างในลักษณะบางประการของเปลือกลำไย คือ ปริมาณเยื่อใย เถ้า ไขมัน ความเป็นกรด-ด่าง และขนาดของรูพรุนเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วย วิธีดังกล่าวสามารถดูดซับไอออนของตะกั่วและแคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L ได้ดีที่สุดเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 คือ 87.53 - 97.77 % ภายในเวลา 1 ชั่วโมง โดยสามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม นอกจากนี้ปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ ปริมาณและขนาดของตัวดูดซับ มีผลต่อการดูดซับไอออนของโลหะหนักแตกต่างกัน และการศึกษาสมดุลของการดูดซับแบบกะทำให้ทราบว่าการดูดซับของเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยวิธีดังกล่าวสอดคล้องในระดับที่ค่อนข้างสูงกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ โดยมีความจุสูงสุดของการดูดซับโลหะแคดเมียมและตะกั่วเท่ากับ 5.7405, 1.2680 และ 3.5273 mg/g และ 8.7032, 1.4766 และ 1.0075 mg/g ตามลำดับ และเมื่อทดลองกำจัดไอออนของโลหะแคดเมียมในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะที่เหมาะสม พบว่าเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมได้สูงสุด คือ 88.75 % ส่วนเปลือกลำไยแห้ง และเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยสารละลายด่างกำจัดโลหะแคดเมียมได้ไม่แตกต่างกัน คือ 84.45 และ 83.75 % ตามลำดับ

โกวิทย์ และคณะ (2551) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะในการทดลองแบบแบตช์ใช้ไคโตซานเรซิน มีการประเมินความสามารถในการดูดซับและจลนศาสตร์ของการดูดซับ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับโครเมียม (VI) เกิดขึ้นที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 ปริมาณ 47.9 mg/g มีการนำแบบจำลองการดูดซับของสมการแลงเมียร์และสมการฟรุนลิชด์ มาอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับและค่าคงที่ของไอโซเทอร์ม ซึ่งไอโซเทอร์มของการดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะ มีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ เมื่อนำแบบจำลองPseudo-first order และ Pseudo-second order มาใช้ในการอธิบายจลนศาสตร์การดูดซับ พบว่าจลนศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second order สามารถใช้ได้ดีกว่าแบบ Pseudo-first order

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กมลทิพย์ และพันธวัศ (2552) ได้ทำการศึกษาผลของอีดีทีเอต่อการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยมวลชีวภาพจากต้นและใบของสับปะรด โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งทำการทดลองแบบแบตช์ และได้ทำการศึกษาผลของระดับค่าพีเอช น้ำหนักของมวลชีวภาพ และความเข้มข้นของ EDTA ต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว โดยแปรค่าพีเอช เป็น 2, 4, 6 และ10 น้ำหนักของมวลชีวภาพเท่ากับ 0.1, 0.5, 1.0 และ 2.0 g และระดับความเข้มข้นของ EDTA เท่ากับ 50, 150, 300 และ600 mg/L โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่เติม EDTA ผลการทดลองแบบแบตช์ พบว่า ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยมวลชีวภาพจากสับปะรดสูงขึ้นเมื่อค่าพีเอชต่ำลง และพบว่า EDTA ที่ความเข้มข้น 150 และ 50 mg/L มีความเหมาะสม และมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้มากที่สุดเท่ากับ 24.25 และ 17.64 mg/g ตามลำดับ ที่ระดับพีเอชเท่ากับ 2 ณ เวลาสมดุลที่ 12 ชั่วโมง

เทียมชัย บัวลอย และคณะ (2552) ได้ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากมูลโค การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์มูลโคทำการคาร์บอไนซ์ (Carbonization) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านกัมมันต์มูลโคที่สังเคราะห์ได้มาดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อศึกษาสภาวะที่ใช้ในการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาณตัวดูดซับ เวลาในการดูดซับ และพีเอช พบว่าเวลาที่สมดุลในการดูดซับคือ 60 นาที และพีเอชที่เหมาะสมคือ 4, 5 และ 6 ซึ่งแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ และจากการศึกษาเปอร์เซ็นต์การกำจัดมีค่าอยู่ในช่วง 75-100% และจากการศึกษา ไอโซเทอร์ม พบว่า การดูดซับของแลงเมียร์ให้ค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 4.28 mg/g สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิชและแลงเมียร์ ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9901 และ 0.9567 ตามลำดับซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิชสามารถอธิบายได้ดีกว่าแลงเมียร์ เนื่องจาก ค่า R^2 มีค่าใกล้เคียงหนึ่งมากกว่า

เกษรา และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาการดูดซับ ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียมของสเมกไทต์ โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวในชั้นดินบนและล่างของชุดดินชัยบาดาล และชุดดินวังชมพู ซึ่งมี สเมกไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทำการทดลองแบบแบตช์ ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าพีเอช และความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย พบว่าเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นความจุในการดูดซับตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และ แคดเมียมของสเมกไทต์เพิ่มขึ้น โดยปริมาณการดูดซับที่สเมกไทต์สามารถดูดซับได้สูงสุดที่ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่ 50 mg/L แสดงค่าการดูดซับที่เหมาะสมในสมการแลงเมียร์ไอโซเทอร์มซึ่งแสดงการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ปริมาณของตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และ แคดเมียมที่ถูกดูดซับสูงสุดเท่ากับ 49.56 , 42.37, 42.43 และ 22.17 mg/g โดยปริมาณการดูดซับสูงสุดดังกล่าวอยู่ในตัวอย่างที่มีปริมาณสเมกไทต์สูง (80-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

90%) ในชุดดินชัยบาดาล แสดงว่าเวอร์ทิซอลส์ซึ่งมีค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็น กลาง-ด่าง ที่มีปริมาณสเมกไทต์เป็นองค์ประกอบหลักในอนุภาคขนาดดินเหนียวสามารถที่จะลดการแพร่กระจายของโลหะหนักได้โดยขึ้นอยู่กับพีเอช ชนิดและความเข้มข้นของโลหะหนัก ซึ่งสามารถใช้เป็นดรรชนีประเมินความเป็นพิษของโลหะหนักในสภาพแวดล้อมทางดินได้

เกษราพร และโกวิทย์ (2555) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการดูดซับไอออนเงิน โดยใช้เรซินไคโตซานเป็นตัวดูดซับ ทำการทดลองแบบแบตช์ได้ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ, ความเข้มข้นเริ่มต้น และค่าพีเอชของไอออนเงิน การทดลองได้ใช้ตัวดูดซับปริมาณ 0.5 g ความเข้มข้นเริ่มต้นของ ไอออนเงินเท่ากับ 100 mg/L และ ค่าพีเอช 6 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของไอออนเงินมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เรซินไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 22.8 mg/g ไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับแบบฟรุนลิชด์ จลนศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับสมการ pseudo-second order อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับและครึ่งเวลาของการดูดซับมีค่าเท่ากับ 8.6 mg/g.min และ 2.7 นาที ตามลำดับ กลไกการดูดซับไอออนเงินของเรซินไคโตซานเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน เป็นผลจากการแพร่ภายในรูพรุนและสมดุลของการดูดซับ

วรรณา และคณะ (2555) ในการศึกษาการดูดซับแคดเมียมไอออนในสารละลายด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ เปลือกสับปะรด, เปลือกมะละกอ และเปลือกลูกตาล โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ค่าพีเอช, ความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้น และระยะเวลาการดูดซับ โดยทำการทดลองแบบแบตช์ พบว่า วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน โดยพบว่าที่พีเอชเท่ากับ 4 มีค่าการดูดซับสูงสุด ไอโซเทอร์มการดูดซับมีลักษณะความสัมพันธ์แบบแลงเมียร์ ซึ่งเปลือกลูกตาลมีค่าการดูดซับสูงสุดที่ 33.11 mg/g รองมาเป็นเปลือกสับปะรด และเปลือกมะละกอ ให้ค่าการดูดซับสูงสุด 32.68 และ 31.65 mg/g และใช้เวลาในการดูดซับที่สมดุลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 15, 10 และ 10 นาที สำหรับเปลือกสับปะรด, เปลือกมะละกอ และเปลือกลูกตาล ตามลำดับ และอธิบายอันดับของอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ด้วยสมการอัตราปฏิกิริยาอันดับสอง แสดงว่าอัตราการควบคุมปฏิกิริยาอาจจะเป็นการดูดซับทางเคมี ที่เกี่ยวข้องกับแรงวาเลนส์ ที่อาจจะเกิดจากการร่วมใช้กันหรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ ดังนั้นเห็นได้ว่าวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสามารถเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และยังมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมได้ดีอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนิสา และคณะ (2555) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกหอยผสมธรรมชาติ (กระซ้า) ที่มีอยู่ในจังหวัดสมุทรสาครซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นหอยสองฝาได้แก่ หอยลาย หอยตลับ และหอยแครง มีขนาดประสิทธิผล 0.28 มิลลิเมตร และ

สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ 7.27 เมื่อทำการทดลองแบบแบตช์พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม คือ พีเอช เท่ากับ 5 ระยะเวลาปั่นกวน 60 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที และปริมาณตัวดูดซับ 0.25 g ขนาด 2 - 4.275 mm โดยสามารถลดปริมาณโลหะหนักได้ 40 - 65 % ซึ่งไอโซเทอร์มในการดูดซับมีความสอดคล้องทั้งแบบแลงเมียร์และฟรุนดิชด์ แต่จลนศาสตร์ดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลอง Pseudo-second order มากกว่า pseudo-first order

Kaewsarn and Yu (2000) ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติในการดูดซับของมวลชีวภาพโดยใช้สาหร่ายทะเล *Padina* sp. จากหมู่เกาะสุรินทร์ ประเทศไทย ในการกำจัดแคดเมียมในสารละลาย ในการทดลองแบบแบตช์ และ แบบคอลัมน์ ได้ทำการปรับปรุงมวลชีวภาพด้วย $CaCl_2$ ที่พีเอชเท่ากับ 5 ระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C นาน 24 ชั่วโมง และร่อนด้วยตะแกรงจนได้ขนาด 300 – 600 μm จากการทดลองพบว่า ที่พีเอชเท่ากับ 5 ความสามารถในการกำจัดจะสูงที่สุด 0.53 mmol/g ซึ่งจลนศาสตร์การดูดซับของแคดเมียมจะเกิดได้รวดเร็วเป็น 90% ของการดูดซับที่ 35 นาที

Bratek, K., *et.al.* (2002) ผู้วิจัยทำการผลิตถ่านทรงกลม (Spherical chess) จากเรซินที่ใช้งานแล้ว Amberjet 1200 H ขนาด 0.8 - 0.63 mm โดยแปรอัตราการให้ความร้อนเป็น 1, 5 และ 10 $Kmin^{-1}$ นำถ่านที่ได้ไปกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 °C นาน 45 นาที โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการศึกษาพบว่ามี รูพรุนชนิด mesopore และ macropore ในช่วงที่เป็นเรซิน แต่เมื่อทำให้เป็นถ่านพบว่า มีการสลายของ mesopore และ macropore และเกิดรูพรุนขนาดเล็กมาก (ultramicropore) ระหว่างการกระตุ้นช่วยขยาย ultramicropore เป็น micropore และ mesopore ได้ทำให้ถ่านที่ได้สามารถกำจัดโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ดีถึง 75 %

Erdem, *et.al.* (2004) ได้ศึกษาการดูดซับไอออนของโคบอลต์ ทองแดง สังกะสี และแมงกานีส โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออน Clinoptilolite ในการทดลองแบบแบตช์ โดยทดลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ที่ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักในช่วง 100-400 mg/L ผลการศึกษา พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับ และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อีกทั้งการดูดซับสามารถอธิบายโดยใช้ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ และฟลุนด์ลิช ซึ่งการดูดซับด้วย Clinoptilolite จะดูดซับไอออนของโคบอลต์ได้ดีที่สุด รองมาเป็น ทองแดง สังกะสี และแมงกานีส ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Clinoptilolite มีประสิทธิภาพให้การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bulut, *et.al.* (2006) ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้ขี้เลื่อย จากต้นวอลนัทเป็นสารดูดซับ โลหะที่ศึกษาได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และ นิกเกิล โดยได้ทำการศึกษาในสภาวะที่เหมาะสม คือ เวลาสัมผัสที่สมดุล 60 นาที และ อุณหภูมิที่ 25, 45 และ 60 °C ซึ่งอธิบายโดยใช้ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ และฟลุนด์ลิช ผลการทดลอง พบว่า ขี้เลื่อยสามารถดูดซับไอออนของตะกั่วได้ดีที่สุด รองมาเป็น แคดเมียม และนิกเกิล ตามลำดับ ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่าขี้เลื่อยจากต้นวอลนัทเป็นสารดูดซับที่ดีเนื่องจากในการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลาย

Ibrahim, *et.al.* (2006) ทำการทดลองแบบแบตช์เพื่อการกำจัดแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วง 1-100 mg/L โดยใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับ พบว่า ชานอ้อยสามารถดูดซับไอออนของแคดเมียมได้สูงสุดที่อัตราการเขย่า 150 rpm เวลาสัมผัสที่สมดุล 90 นาที และพีเอชอยู่ในช่วง 5-7 ซึ่งอธิบายโดยใช้ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ สามารถดูดซับแคดเมียมได้ 6.79 mg/g ที่อุณหภูมิ 30 °C เนื่องจาก ค่า R^2 ของแลงเมียร์มากกว่าฟลุนด์ลิช

Fei, W., *et.al.* (2008) ผู้วิจัยได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียม โดยใช้เรซินชนิดกรดแก่ (001X7) ได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ค่าพีเอช, อุณหภูมิ, ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น และอัตราการดูดซับ จากการทดลองพบว่า เรซินชนิดประจุบวกกรดแก่ (001X7) สามารถดูดซับแคดเมียมได้ดี และในสภาวะสมดุลสามารถอธิบายโดยใช้ไอโซเทอร์มแบบฟลุนด์ลิช การดูดซับที่ดีที่สุดอยู่ในสภาวะที่ค่าพีเอช 4 ถึง 5 โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 300 – 500 mg/L และ เรซินสามารถทำการคายซับด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 3 mol/L ซึ่งประสิทธิภาพการคายซับมากว่า 98 % และความสามารถในการดูดซับที่สูงสุด คือ 355 mg/g ที่อุณหภูมิ 293 K หรือ 20°C

Bai, *et.al* (2009) ได้นำเอาเรซินแลกเปลี่ยนประจุ Amberjet 1200H มากำจัดแคดเมียมในน้ำเสีย ซึ่งเรซินสามารถแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนได้ ซึ่งผลการทดลอง พบว่า เรซินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้และสามารถกำจัดแคดเมียมได้ดีที่พีเอชตั้งแต่ 4-7

C.H. Xiong and C.P. Yao (2009) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเรซิน D152 มาดูดซับแคดเมียม โดยศึกษาผลของพีเอช อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการสัมผัส และไอโซเทอร์มการดูดซับ พบว่าเรซิน D152 มีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมอย่างสูง ที่พีเอช 5.95 มีการดูดแคดเมียมได้สูงสุดถึง 378 mg/g ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สำหรับสมการของการดูดซับสามารถอธิบายโดยใช้ไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Saikaew and Kaewsarn (2009) ผู้วิจัยได้ศึกษาความสามารถของเปลือกผลไม้ต่าง ๆ ได้แก่ ข้าวโพด ทุเรียน ส้มโอ และกล้วย โดยใช้เป็นตัวดูดซับ เพื่อกำจัดแคดเมียมออกจากสารละลาย ในการทดลองแบบแบตช์ ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดของตัวดูดซับ ค่าพีเอช และความเข้มข้นของแคดเมียม พบว่า เปลือกกล้วยสามารถกำจัดแคดเมียมได้ดีที่สุด ตามมาด้วยทุเรียน ส้มโอ และ ข้าวโพด ซึ่งเปอร์เซ็นต์การกำจัดได้ดังนี้ 73.15, 72.17, 70.56 และ 51.22 % ตามลำดับ จากการทดลองขนาดของตัวดูดซับไม่มีผลต่อการกำจัดแคดเมียม และความสามารถในการกำจัดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 โดยแคดเมียมสามารถกำจัดได้ดีที่พีเอชเท่ากับ 5 ในสภาวะสมดุลสามารถใช้ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์อธิบายได้ดีที่สุด ซึ่งความสามารถในการกำจัดของทุเรียน ส้มโอ กล้วย เท่ากับ 18.55, 21.83 และ 20.88 mg/g ตามลำดับ

Srinivasa, K., *et.al.* (2010) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในสารละลายโดยใช้เรซินประจุบวก (Duolite Es467) ในการทดลองแบบแบตช์ได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส, ความเร็วรอบ, ตัวดูดซับ, ความเข้มข้นของแคดเมียม, พีเอช, ประจุคู่แข่ง และ อุณหภูมิ จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาที่สัมผัส และความเร็วรอบ เป็น 60 นาที และ 600 rpm ตามลำดับ และการที่มี NaCl อยู่ในสารละลายจะทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดจะมีค่าลดลงด้วย เนื่องจาก Cd^{2+} และ Na^{+} จะเข้าแข่งขันในการจับประจุของเรซิน และ ในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าพีเอช และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้การการดูดซับได้ดี

Singanan (2011) ทำการศึกษาการกำจัดไอออนของตะกั่ว และแคดเมียมจากน้ำเสีย โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากต้นตีนตุ๊กแก ในการทดลองได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ พีเอช เวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น และปริมาณตัวดูดซับ ผลการทดลองพบว่า พีเอชที่สามารถดูดซับไอออนของตะกั่ว และแคดเมียมสูงสุด คือ 4.5 และ4.8 ส่วนเวลาสัมผัสที่สมดุลคือ 180 นาที และที่ปริมาณตัวดูดซับ 2.5 กรัม จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนของตะกั่ว และแคดเมียม เป็น 95 เปอร์เซ็นต์ และ98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิช และแลงเมียร์สามารถอธิบายได้ดีพอๆ กัน

Otrembska, *et.al.* (2012) ได้ทำการศึกษาจลศาสตร์การดูดซับไอออนของนิกเกิล และแคดเมียมจากสารละลาย โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก ได้แก่ Lewatit MonoPlus SP 112, Amberlite 200C and Amberlyst 15 ซึ่งผลการทดลอง พบว่า เรซิน Lewatit MonoPlus SP 112 มีค่าการดูดซับสูงสุด 1.70 มิลลิโมลต่อกรัม, เรซิน Amberlite 200 C มีค่าการดูดซับ 1.64 มิลลิโมลต่อกรัม และเรซิน Amberlyst 15 มีค่าการดูดซับต่ำสุด 0.97 มิลลิโมลต่อกรัม ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับ คือ พีเอชเท่ากับ 2 และเวลาสัมผัสที่จุดสมดุลเท่ากับ 30 นาที สำหรับสมการการดูดซับสามารถอธิบายโดยใช้ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ได้ดีกว่าฟลุนด์ลิช

Akissi, L.C., *et.al.* (2013) ได้ศึกษาการทดลองแบบแบตช์ และแบบคอลัมน์ในการกำจัดแคดเมียม ในสารละลาย โดยใช้ขี้เลื่อยจาก *Triplochiton scleroxylon* ซึ่งความสามารถในการดูดซับสูงสุดได้จากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ คือ 10.793, 10.476, 10.529 และ10.061 mg/g ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 °C การศึกษาผลของอุณหภูมิในการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและ เกิดขึ้นได้เอง และในการทำคอลัมน์สามารถนำเรซินมารีเจนเนอเรตด้วย $CaCl_2$ 0.2 mol/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

1. เรซินชนิดประจุบวก Lewatit MonoPlus S108 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว
2. แคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2.2.5H_2O$) ยี่ห้อ Univar เกรดวิเคราะห์
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
4. สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ยี่ห้อ Fisher Scientific เกรดวิเคราะห์
5. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเทต (NH_4OAc) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
6. สารละลายแอมโมเนียมออกซาเลท [$(NH_4)_2C_2O_4.H_2O$] ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
7. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
8. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
9. สารละลายซิลเวอร์ไนเทรต ($AgNO_3$) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
10. เอธิลแอลกอฮอล์ 95 % (Ethyl alcohol) ยี่ห้อ องค์การสุรา กรมสรรพสามิต
11. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
12. สารละลายกรดบอริก (H_3BO_3) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
13. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
14. สารละลายกรดไนตริก 65 % (HNO_3) ยี่ห้อ Loba chemie เกรดห้องปฏิบัติการ
15. อินดิเคเตอร์ผสม (โบรโมกรีซอลกรีน และเมธิลเรด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ปชัน สเปคโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer, AAS) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น AA-200
2. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (MastersizerX) ยี่ห้อ Malvern
3. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AUX 220
4. เครื่องชั่งละเอียด 3 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Denver Instument Company รุ่น TR403
5. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter) ยี่ห้อ Consort รุ่น C860
6. ตู้อบความร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ Fisher Scientific
7. เครื่องเขย่า (Shaker) ยี่ห้อ Gallenkamp
8. เครื่องกลั่นไนโตรเจนพร้อมหลอดเจลห์ดาล ยี่ห้อ Buchi Distillation Unit รุ่น B-323
9. ขวดกลั่น (Kjeldahl flask)
10. ชุดกรองแบบลดความดัน
11. เครื่องกรองแบบลดความดัน ยี่ห้อ Tokyo Rikakikai
12. โถดูดความชื้น (Dessicator)
13. เครื่องแก้วต่าง ๆ
14. ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่าง
15. แผ่นความร้อน (Hot plate)
16. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และเบอร์ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การสุ่มตัวอย่าง

เรซินที่ได้มาจากโรงงานเป็นแบบ Mixed bed คือ มีทั้งเรซินประจุบวกและประจุลบปะปนมา ทางโรงงานได้ทำการคัดแยกเบื้องต้นมาแล้วเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งาน ในระหว่างก่อนทำงานวิจัยได้คัดแยกและสุ่มตัวอย่าง โดยนำเรซินที่คัดแยกเบื้องต้นมาแล้ว มาใส่น้ำเพื่อทำการแยก ซึ่งเรซินประจุลบจะลอยออกจากเรซินประจุบวก แล้วทำการตักเรซินประจุลบออกมาไป ในการสุ่มตัวอย่างนำเรซินมาเทใส่ถาดแล้วคัดเลือกโดยเลือกจากมุมทั้งสี่และตรงกลาง

3.2.2 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของเรซิน

นำเรซินจากโรงงาน (Raw Material, RM) กับเรซินที่ผ่านการใช้ (Spent Resin Lewatit MonoPlus S108, SR) ที่เก็บแบบแช่น้ำไว้ มาศึกษาสมบัติทางเคมีโดยใช้พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ใช้อัตราส่วน 1:1 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) ใช้อัตราส่วน 1:5 ค่าของแข็งที่ละลายน้ำ (Total Dissolved Solid) และค่าความสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Capacity, CEC) ด้วยวิธีแอมโมเนียมอะซิเทต (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548) จำนวน 3 ซ้ำ

3.2.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมสารละลายสต็อคแคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2.2.5H_2O$) มวลโมเลกุล 228.35 g/mol ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 1,000 mg/L โดยชั่งแคดเมียมคลอไรด์ 1.0157 g ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 500 mL นำสารละลายสต็อคเก็บไว้ในขวดแก้วสีน้ำตาล เมื่อใช้งานปิเปตสารละลายสต็อคและเจือจางเป็น 10 mg/L แล้ววัดค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้า

3.2.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์

1. การหาเวลาการดูดซับที่เหมาะสม

1.1 ทำการแปรค่าปริมาณเรซินจำนวน 1, 3 และ 5 g ลงในขวดพลาสติกจำนวน 11 ขวดรวมทั้งหมด 3 ชุดการทดลอง โดยใช้ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL ทุกชุดการทดลองจะทำชุดควบคุม โดยไม่มีการเติมเรซิน และทดลอง 3 ซ้ำ

1.2 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 1, 3, 5, 10, 30, 60, 90, 120, 180 และ240 นาที และ24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30±2 °C ที่ความเร็วรอบ 120 rpm ไม่หมุนเร็วเกินจนทำให้เรซินเกิดการเสียดสีกัน (เกษราพร และโกวิทย์, 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 นำตัวอย่างที่ได้มาทำการกรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2 โดยเรซินจะทำการเก็บในขวดพลาสติกเพื่อนำไปทำทดลองเรื่องการคายซับต่อไป

1.4 นำสารละลายไปทำการย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 5 mL บนแผ่นความร้อน จนกระทั่งเกิดการย่อยสมบูรณ์ หรือ สารละลายใส ตามวิธีของ U.S. EPA method 3050B (U.S. EPA, 1996)

1.5 นำตัวอย่างที่ย่อยแล้วไปทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และปรับปริมาตรให้เป็น 10 mL ด้วยน้ำกลั่น

1.6 นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS

1.7 นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม กับ เวลา เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสม ที่อัตราการดูดซับและการคายซับสมดุลกัน

2. การหาพีเอชที่เหมาะสม

2.1 ทำการแปรค่า pH เป็น 2, 4, 6 และ pH เดิมของน้ำเสียสังเคราะห์ รวมทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง โดยใช้เรซิน 1 g ต่อน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL ทุกชุดการทดลอง จะทำชุดควบคุม และทดลอง 3 ซ้ำ

2.2 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.4 ข้อ 1

2.3 นำตัวอย่างที่ได้มาทำการกรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2

2.4 นำสารละลายไปทำการย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร บนแผ่นความร้อน จนกระทั่งเกิดการย่อยสมบูรณ์ หรือ สารละลายใส ตามวิธีของ U.S. EPA method 3050B (U.S. EPA, 1996)

2.5 นำตัวอย่างที่ย่อยแล้วไปทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และปรับปริมาตรให้เป็น 10 mL ด้วยน้ำกลั่น

2.6 นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS

2.7 นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม กับ พีเอช เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสม

3. การศึกษาไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียม

3.1 อัตราส่วนของเรซินในการบำบัดต่อไอโซเทอร์ม

1. ทำการแปรค่าปริมาณเรซิน 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 1, 3 และ 5 g โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL และปรับค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.4 ข้อ 2 และทดลอง 3 ซ้ำ แต่ละชุดการทดลองจะทำชุดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.4 ข้อ 1

3. นำตัวอย่างที่ได้มาทำการกรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2

4. นำสารละลายไปทำการย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 5 mL บนแผ่นความร้อน จนกระทั่งเกิดการย่อยสมบูรณ์ หรือ สารละลายใส ตามวิธีของ U.S. EPA method 3050B (U.S. EPA, 1996)

5. นำตัวอย่างที่ย่อยแล้วไปทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และปรับปริมาตรให้เป็น 10 mL ด้วยน้ำกลั่น

6. นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS

7. นำค่าที่ได้ไปหาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้น แบบแลงเมียร์ และ แบบฟลุนด์ลิช

3.2. ความเข้มข้นแคดเมียมต่อไอโซเทอร์ม

1. ทำการแปรค่าความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 10, 20, 40, 70 และ 110 mg/L ปริมาตร 25 mL และปรับค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.4 ข้อ 2 และทดลอง 3 ซ้ำ แต่ละชุดการทดลองจะทำชุดควบคุม

2. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.4 ข้อ 1

3. นำตัวอย่างที่ได้มาทำการกรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2

4. นำสารละลายไปทำการย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 5 mL บนแผ่นความร้อน จนกระทั่งเกิดการย่อยสมบูรณ์ หรือ สารละลายใส ตามวิธีของ U.S. EPA method 3050B (U.S. EPA, 1996)

5. นำตัวอย่างที่ย่อยแล้วไปทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และปรับปริมาตรให้เป็น 10 mL ด้วยน้ำกลั่น

6. นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS

7. นำค่าที่ได้ไปหาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้น แบบแลงเมียร์ และ แบบฟลุนด์ลิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การคายซับ

4.1. การคายซับด้วยน้ำกลั่น

1. เตรียมเรซินที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมมาแล้ว จากการทดลองที่ 3.2.4 ข้อ 1 จำนวน 1 กรัม 11 ขวด
2. เติมน้ำกลั่นจำนวน 25 mL
3. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm โดยใช้เวลา 1 วัน
4. นำตัวอย่างที่ได้มาทำการกรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2
5. นำสารละลายไปทำการย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 5 mL บนแผ่นความร้อน จนกระทั่งเกิดการย่อยสมบูรณ์ หรือ สารละลายใส ตามวิธีของ U.S. EPA method 3050B (U.S. EPA, 1996)
6. นำตัวอย่างที่ย่อยแล้วไปทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และ ปรับปริมาตรให้เป็น 10 mL ด้วยน้ำกลั่น
7. นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS

4.2 การคายซับด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 %v/v

1. เตรียมเรซินที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมมาแล้ว จากการทดลองที่ 3.2.4 ข้อ 1 จำนวน 3 g ทดลอง 3 ซ้ำ
2. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 %v/v ปริมาตร 5 mL
3. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที โดยใช้เวลา 10 นาที
4. นำตัวอย่างที่ได้มาทำการกรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2
5. นำสารละลายไปทำการย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 5 mL บนแผ่นความร้อน จนกระทั่งเกิดการย่อยสมบูรณ์ หรือ สารละลายใส ตามวิธีของ U.S. EPA method 3050B (U.S. EPA, 1996)
6. นำตัวอย่างที่ย่อยแล้วไปทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และ ปรับปริมาตรให้เป็น 10 mL ด้วยน้ำกลั่น
7. นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS
8. นำเรซินที่ผ่านการคายซับมาทำการย่อย โดยนำเรซินมาบดให้ละเอียด ชั่งเรซิน 0.5 g และเติมกรดซัลฟิวริก และกรดไนตริก อย่างละ 5 mL และให้ความร้อนบนแผ่นความร้อน จนกระทั่งไม่มีเรซินหลงเหลืออยู่

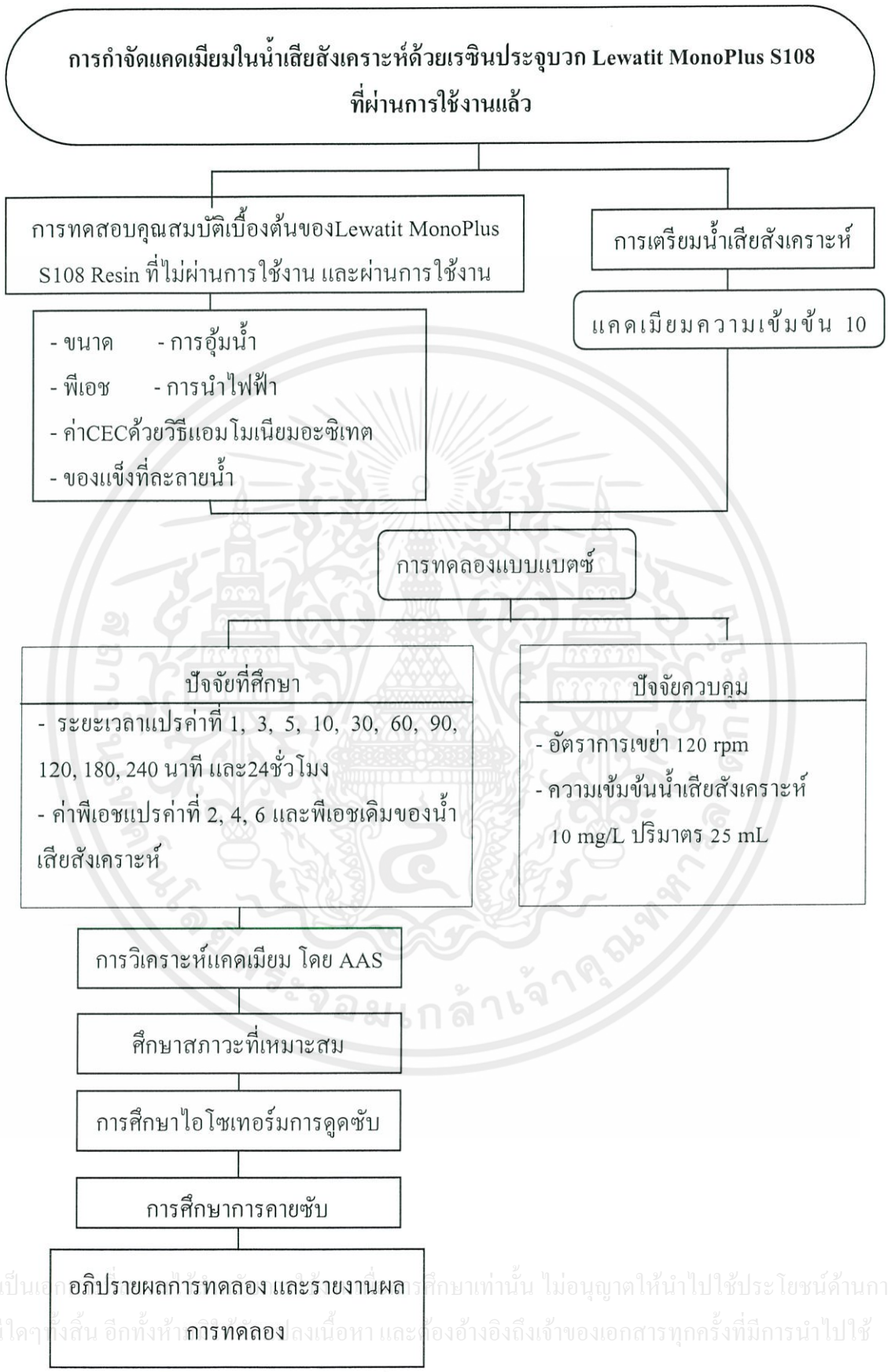
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. นำตัวอย่างที่ย่อยแล้วไปทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และปรับปริมาตรให้เป็น 10 mL ด้วยน้ำกลั่น

10. นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS เพื่อศึกษาสมดุลมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการดำเนินการวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ต่อไปนี้



รูปที่ 3. 1 แผนภาพการทดลอง

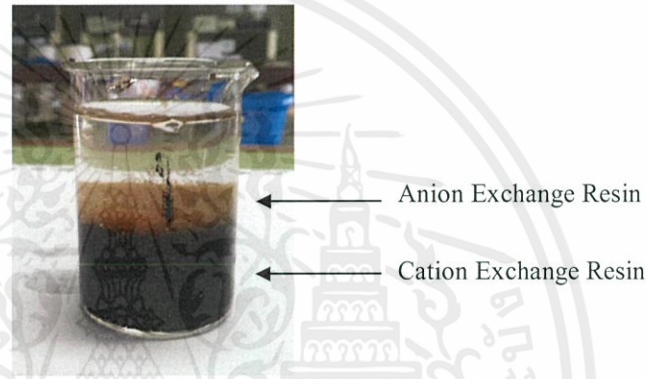
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติทั่วไปของเรซิน

นำเรซินที่ใช้ในการศึกษาเป็นเรซินชนิดกรดแก่ ยี่ห้อ Lewatit MonoPlus S108 ที่ไม่ผ่านการใช้งาน (Raw Material, RM) กับ เรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, SR) ทั้ง 2 ชนิดเก็บรักษาด้วยการนำเรซินแช่น้ำก่อนนำมาศึกษา ดังตารางที่ 4.1

เรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, SR) เป็นแบบ Mixed Resin ดังนั้น ก่อนนำมาทดสอบแยกโดยใช้ความหนาแน่นเป็นเกณฑ์ โดยจะเลือกใช้ Cation Exchange Resin



รูปที่ 4. 1 การแยกของเรซินที่ผ่านการใช้งาน (Mixed Resin)

ตารางที่ 4. 1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน RM กับ SR

พารามิเตอร์	RM	SR
สีที่ปรากฏ	สีดำ	สีดำ
ขนาด (เมื่อแช่น้ำจนอิ่มตัว)	0.62 ± 0.05* mm	น้อยกว่า 2.38 mm
การอุ้มน้ำ	26.03%±0.18	60.68%±0.35
พีเอช อัตราส่วน 1 : 1	8.62±0.20	4.91±0.54
การนำไฟฟ้า อัตราส่วน 1 : 5 (μS/cm)	87.67±0.58	7.8±1.79
ของแข็งที่ละลายน้ำ (mg/L)	49.00±1.00	4.2±1.64
ความจุแลกเปลี่ยนประจุบวกด้วยวิธีแอมโมเนียมอะซิเทต (centimol/gram , cmol/g)	0.01±0.90	0.12±0.05
ปริมาณแมกนีเซียม (Mg^{2+}) (meq/g) on dried basis	0.073±0.10	0.466±0.10
ปริมาณแคลเซียม (Ca^{2+}) (meq/g) on dried basis	0.045±0.03	2.177±0.58

* ที่มา LANXESS Energizing Chemistry, 2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 พบว่าคุณสมบัติทั่วไปของเรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน และเรซินที่ผ่านการใช้งานมีความแตกต่างกัน เช่น เรซินที่ผ่านการใช้งานนั้นมีเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ มากกว่า เรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน เพราะเรซินได้ผ่านการใช้ทำให้บริเวณพื้นผิวของเรซินนั้น เม็ดเรซินอาจจะแตกหรือมีพื้นที่ว่าง ทำให้น้ำแทรกตัวเข้าไปตามพื้นที่ว่างของเรซินได้ ค่าพีเอชเรซินที่ไม่ผ่านการใช้งานอยู่ในช่วงพีเอชที่เป็นเบส เมื่อวัดค่าของแข็งละลายน้ำพร้อมกับค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูง เนื่องจากไอออนของเรซินอยู่ในรูป Na^+ ดังที่กล่าวในตารางที่ 2.3 จึงพบ Na^+ บางส่วนอาจหลุดมาในสารละลาย ซึ่ง Na^+ เป็นประจุบวกที่มีฤทธิ์เป็นเบส (Basic Cation) แต่เรซินที่ผ่านการใช้งานมีหมู่ฟังก์ชันที่จับกับ Ca^{2+} Mg^{2+} หลุดออกได้น้อย ส่วนไอออนบางตัวที่หลุดออกมาได้ ในทางปฏิบัติทั่วไปก่อนนำ เรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน มาใช้ มีการกระตุ้นด้วยกรด ดังนั้นเรซินที่ผ่านการใช้อาจจะมีโปรตอน (H^+) จากหมู่ซัลโฟเนต หลุดออกมาได้ ทำให้สารละลายเป็นกรดอ่อน ส่วน $Ca^{2+}Mg^{2+}$เรซินที่ผ่านการใช้งาน ได้ผ่านการใช้ในการบำบัดความกระด้างซึ่งไอออนหลักที่ทำให้เกิดความกระด้างก็ Ca^{2+} Mg^{2+} เข้าไปแลกเปลี่ยน กับ H^+ เกิดพันธะแข็งแรงทำให้หลุดออกได้น้อย

4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดย SR

4.2.1 ระยะเวลาที่เหมาะสม

จากการศึกษาเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดจนถึงสภาวะสมดุล ทำได้โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL โดยแปรค่าปริมาณเรซินตั้งแต่ 1 ถึง 5 g ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm โดยอุณหภูมิระหว่างการทดลองอยู่ที่ 30±2 °C และแปรค่าระยะเวลาในการบำบัดตั้งแต่ 1 นาที ถึง 24 ชั่วโมง แล้ววิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ จากนั้นนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม กับระยะเวลาในการบำบัดที่เหมาะสมของเรซินได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.2

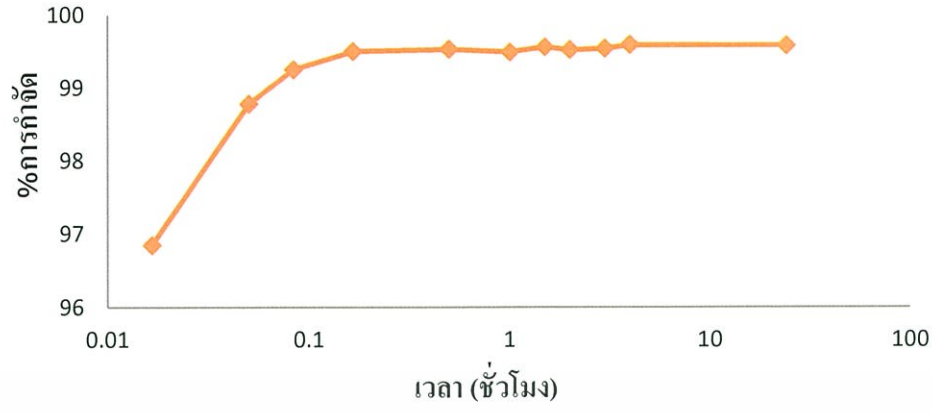
จากรูปที่ 4.2 เห็นได้ว่าค่าการกำจัดแคดเมียมในช่วง 5 นาทีแรก เกิดการดูดซับทางเคมีอย่างรวดเร็ว ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นที่ตำแหน่งซัลโฟเนต ($-SO_3H$) ดังรูปที่ 2.1 ในสายโซ่ของเรซินจะเกิดพันธะกับไอออนแคดเมียม แต่เมื่อหลังจาก 5 นาทีไปแล้ว พื้นที่ผิวของการดูดซับจะน้อยลง ทำให้การดูดซับจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ และจะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาผ่านไป 10 นาที ดังนั้นระยะเวลาในการบำบัดที่เหมาะสมคือ 10 นาที ซึ่งปริมาณแคดเมียมที่หลงเหลืออยู่จะเท่ากับ 0.05, 0.07 และ0.05 mg/L และเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 99.51 % ± 0.062, 99.39 % ± 0.01 และ 99.50 % ± 0.04 สำหรับปริมาณเรซิน 1 g 3 g และ 5 g ตามลำดับ ดังรายละเอียดในภาคผนวก ง จะเห็นได้ว่าปริมาณแคดเมียมที่หลงเหลืออยู่นั้น ไม่ผ่านค่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งกำหนดค่าไว้ 0.03 mg/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

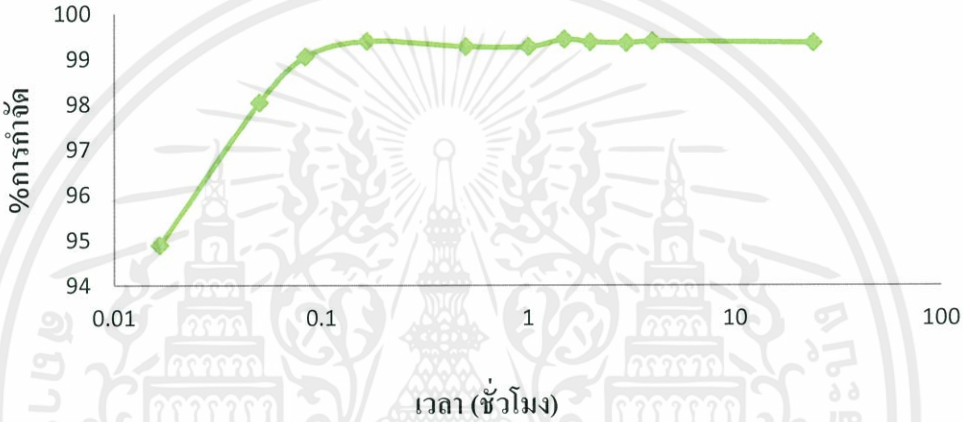
การที่แคดเมียดถึงจุดสมดุลอย่างรวดเร็วสามารถอธิบายโดยใช้ไอโซเทอร์มการบำบัดแบบ H-type ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกันสูงมากระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับตัวดูดซับจัดเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี ซึ่งเกิดพันธะเคมีขึ้น และ ปริมาณ SR ที่ใช้ 1 – 5 g มีความสามารถในการจับประจุบวกประมาณ 0.12 – 0.6 cmol ในขณะที่ปริมาณแคดเมียมเริ่มต้นมีปริมาณ 2.22×10^{-8} cmol ซึ่งยังไม่เกินค่าความจุ จึงทำให้ปริมาณแคดเมียมที่มีน้อยในน้ำเสียสังเคราะห์จึงเข้าแลกเปลี่ยนและถึงจุดสมดุลได้อย่างรวดเร็วภายใน 5 – 10 นาที

ดังนั้นเวลาการดูดซับที่ถึงจุดสมดุลคือ 10 นาที เป็นต้นไป และไม่ว่าอัตราส่วนระว่างปริมาณ SR กับแคดเมียม ในอัตราส่วน 1:1 3:1 และ 5:1 ระยะเวลาในการบำบัดที่จุดสมดุล คือ 10 นาที เช่นเดียวกัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้ออกมาไม่มีความแตกต่างกันจึงใช้ปริมาณเรซิน 1 g ในทุกการทดลอง

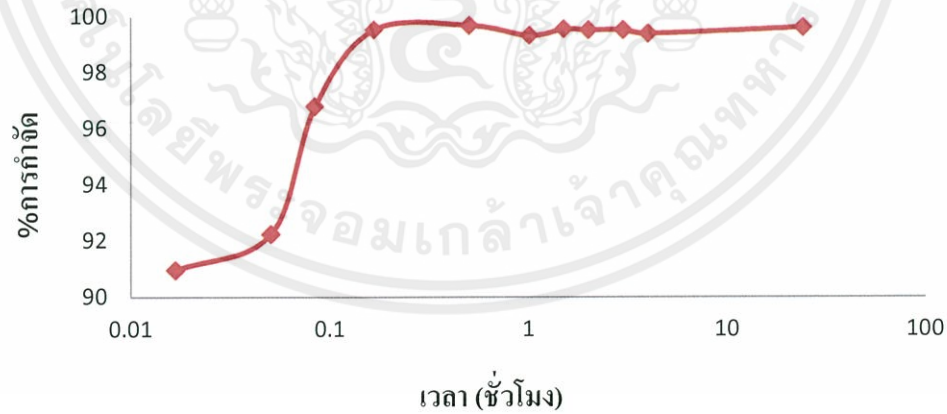
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ปริมาณ 5 กรัม



(ข) ปริมาณเรซิน 3 กรัม



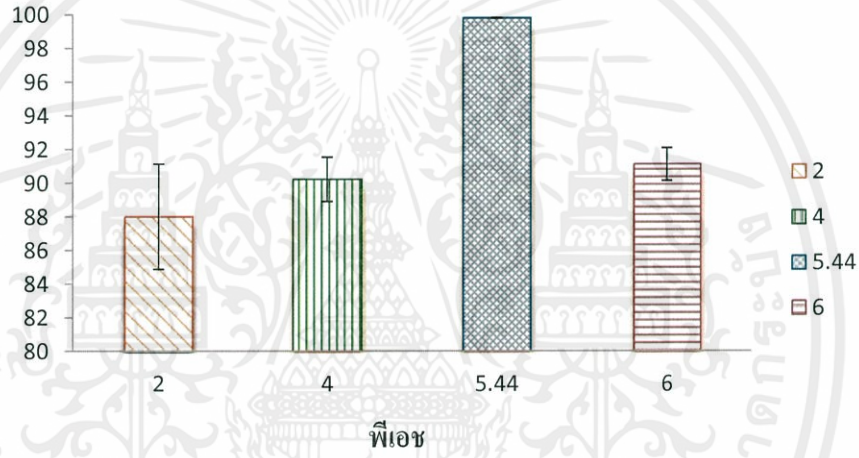
(ค) ปริมาณเรซิน 1 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4. 2 ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียมด้วย SR ที่ระยะเวลาต่างๆ

4.2.2 ผลของค่าพีเอชต่อการบำบัด

จากการศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัด ทำได้โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นโดยประมาณ 10 mg/L ปริมาตร 25 mL ที่พีเอช 2, 4, 6 และพีเอชเดิม เนื่องจากต้องการศึกษาช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการทดลอง และที่พีเอชตั้งแต่ 8.65 ขึ้นไปพบว่าแคดเมียมเริ่มตกตะกอนเป็น $Cd(OH)_2$ ดังตัวอย่างการคำนวณค่าพีเอชต่อการละลายของ $Cd(OH)_2$ (ภาคผนวก ค) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่ได้ศึกษาการแปรค่าพีเอชที่สูงกว่า 8.65 เพราะอาจเกิด การตกตะกอนของ $Cd(OH)_2$ ควบคู่กับการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งการทดลองนี้ใช้ปริมาณเรซิน 1 g ทำการเขย่า ที่ความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที โดยอุณหภูมิระหว่างการทดลองอยู่ที่ 30 ± 2 °C แล้ววิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ จากนั้นนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม กับค่าพีเอชที่เหมาะสม ซึ่งผลการทดลองแสดงใน รูปที่ 4.3



รูปที่ 4. 3 ผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดแคดเมียมด้วย SR

จากรูปที่ 4.3 เห็นได้ว่าค่าพีเอชมีผลต่อการกำจัดแคดเมียมโดยการบำบัดด้วยเรซิน พบว่า เมื่อค่าพีเอชลดลงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมมีแนวโน้มที่ต่ำลง สำหรับการทดลองนี้ ค่าพีเอชที่มีการบำบัดแคดเมียมได้ดีที่สุดคือ ที่พีเอช 5.44 หรือ พีเอชเดิม ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 99.82 % ± 0.03 ส่วนที่ความเป็นกรดสูง (pH ต่ำ) จะมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่ต่ำกว่าซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของนักวิจัย (วรรณา และคณะ, 2555) ดังนั้นการเพิ่มความเป็นกรดให้กับสารละลาย เป็นการเพิ่มความเข้มข้น H^+ ให้มากขึ้น ซึ่ง H^+ เป็นคู่แข่งกับ Cd^{2+} ในการเข้าแลกเปลี่ยนประจุบวกในเรซิน กับหมู่ซัลโฟเนต ($-SO_3H$) เป็นผลทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดลดลง เมื่อพีเอชมีค่าลดลง และอีกสาเหตุหนึ่งคือ การที่เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วจากโรงงานมีโอกาสเก็บปนกับเรซินชนิดประจุลบ ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดลดลงได้เช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นจากค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง จึงมีแนวโน้มการกำจัดแคดเมียมลดลงเมื่อค่าพีเอชต่ำลง ทำให้เรซินมีสมบัติต่างกันได้ กล่าวได้ว่า เมื่อพีเอชที่ต่ำ ๆ อาจจะทำลายสายโซ่เรซินได้

ดังนั้นจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างพีเอชที่ 2, 4, 6 และพีเอชเดิมของน้ำเสียสังเคราะห์ จะพบว่าพีเอชเดิมของน้ำเสียสังเคราะห์ (5.44) มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมได้ดีกว่า ที่พีเอชอื่นๆ

4.2.3 ไอโซเทอร์มของการบำบัด

ไอโซเทอร์มจากการแปรค่าน้ำหนักเรซิน

จากการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของการบำบัดทำได้โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm ระยะเวลาการบำบัด 10 นาที และแปรค่าปริมาณเรซินตั้งแต่ 0.1 ถึง 5 g แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการไอโซเทอร์มในการบำบัด แบบเชิงเส้น(ก), แบบแลงเมียร์ (ข) และแบบฟลุนด์ลิช(ค) ได้ผลดังในรูปที่ 4.4 ซึ่งผลจาการวิเคราะห์สรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4. 2 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนของเรซินในการบำบัดต่อไอโซเทอร์ม

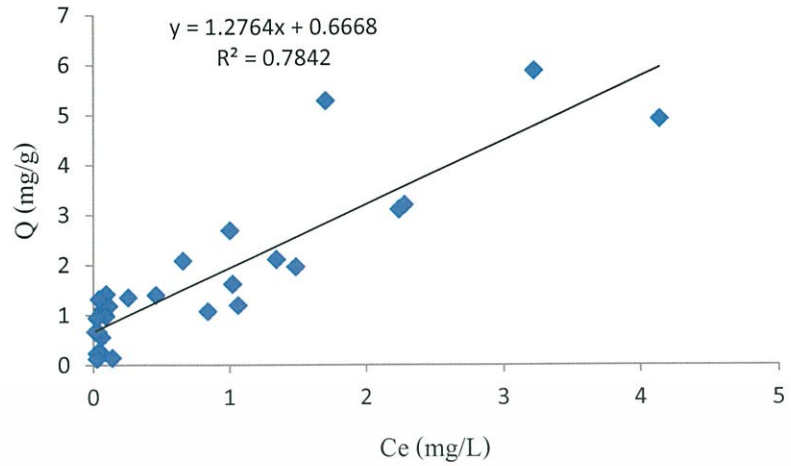
	เรซินที่ผ่านการใช้		
	เชิงเส้น	**แลงเมียร์**	**ฟลุนด์ลิช**
สมการ	$Q = 1.2764C_e +$ 0.6668	$1/Q = 0.0633\ (1/C) +$ 0.9042	$\log Q = 0.4747 \log C_e +$ 0.3255
R^2	0.7842	0.2191	0.6113
ค่าคงที่ของการดูดซับ	$K_d = 1.2764$	$b = 14.2844$	$1/n = 0.4747$
		$Q_m = 1.1060$ mg/g	$K = 2.1159$

จากผลการวิเคราะห์พบว่าข้อมูลการบำบัดแคดเมียม โดยเรซินที่ผ่านการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบ ไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่า ไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้น มีค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เท่ากับ 1.2764 และไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) เท่ากับ 1.1060 mg/g ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Akissi, L.C., et.al. (2013) ศึกษาการทดลองแบบแบตช์และแบบคอลัมน์ ในการกำจัดแคดเมียมในสารละลาย โดยใช้ขี้เลื่อยจาก Triplochiton scleroxylon ที่ไม่มีการดัดแปลง ซึ่งความสามารถในการดูดซับสูงสุดได้จากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ คือ 10.793, 10.476, 10.529 และ10.061 mg/g ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 °C ตามลำดับ แต่ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเรซินมีค่าต่ำกว่าขี้เลื่อย

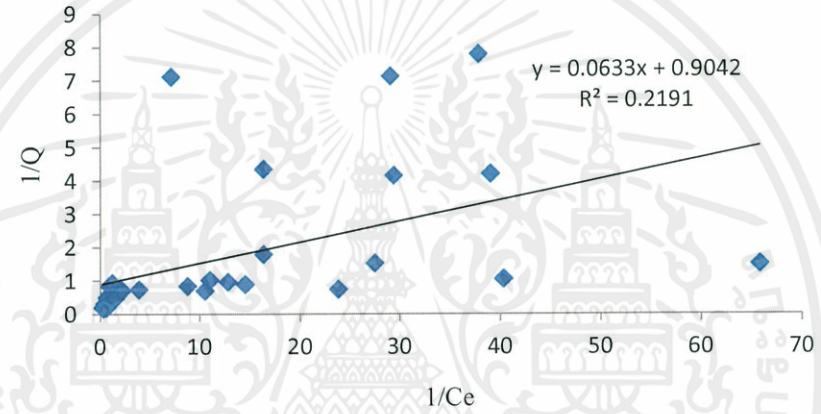
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเปรียบเทียบไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่า ไอโซเทอร์มการบำบัดแบบเชิงเส้น มีค่า R^2 มากกว่าแบบแลงเมียร์ และแบบฟลุนด์ลิช แสดงให้เห็นว่าการดูดซับบนผิวเรซินมีอยู่อย่างไม่มีขีดจำกัด ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของเรซินแปรผันตรงกับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล ดังรูปที่ 4.4 (ก) ไอโซเทอร์มลักษณะนี้ใช้อธิบายสมดุลการดูดซับได้ดีกับตัวถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยมีค่าคงที่การดูดซับ คือ K_d เท่ากับ 1.2764 ซึ่งค่า K_d ที่มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าการแลกเปลี่ยนประจุใดๆ (M^{n+}) กับ Cd^{2+} บนหมู่ฟังก์ชันของ SR มีแนวโน้มที่จะเป็นผลิตภัณฑ์มากกว่าที่จะกลับมาเป็นสารตั้งต้น ดังค่า K ในสมการ 2.10

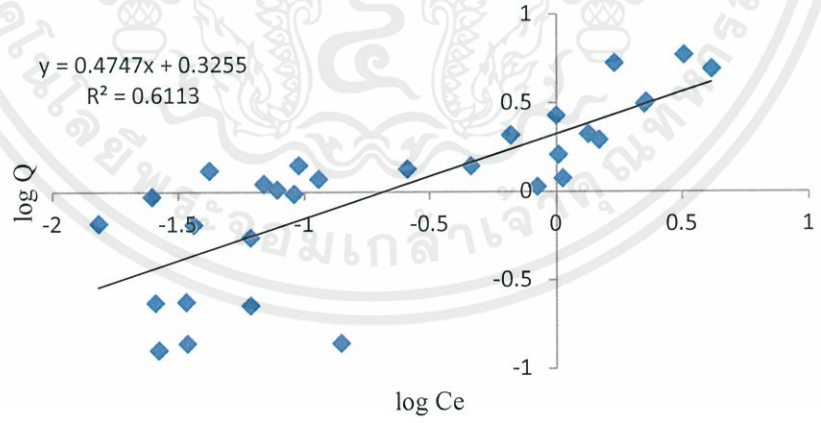
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. แบบเชิงเส้น



ข. แบบแลงเมียร์



ค. แบบฟลุนด์ลิช

รูปที่ 4. 4 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าน้ำหนักเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโซเทอร์มจากการแปรค่าความเข้มข้น

จากการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของการบำบัด ทำได้โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L ถึง 110 mg/L ปริมาตร 25 mL ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm ระยะเวลาการบำบัด 10 นาที และใช้ปริมาณเรซิน 1 g แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการไอโซเทอร์มในการบำบัดแบบเชิงเส้น(ก), แบบแลงเมียร์(ข) และแบบฟลุนด์ลิช (ค) ได้ผลดัง ในรูปที่ 4.5 ซึ่งผลจาการวิเคราะห์สรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4. 3 ผลของความเข้มข้นแคดเมียมต่อไอโซเทอร์ม

เรซินที่ผ่านการใช้			
	เชิงเส้น	**แลงเมียร์**	**ฟลุนด์ลิช**
สมการ	$Q = 4.7101C_e + 1.6562$	$1/Q = 0.0126\ (1/C) + 0.3838$	$\log Q = 0.4456 \log C_e + 0.7884$
R^2	0.5213	0.2628	0.5438
ค่าคงที่ของการดูดซับ	$K_d = 4.7101$	$b = 30.4603$	$1/n = 0.4456$
		$Q_m = 2.6055$ mg/g	$K = 6.1433$

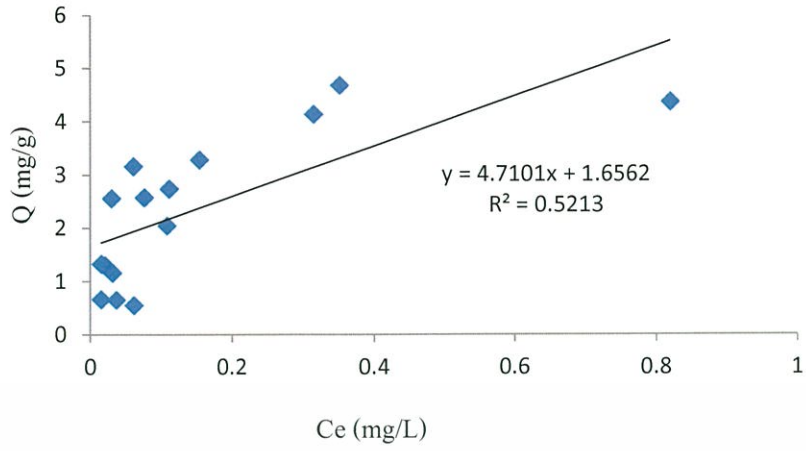
จากผลการวิเคราะห์พบว่าข้อมูลการบำบัดแคดเมียม โดยเรซินที่ผ่านการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบ ไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่า ไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้น มีค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เท่ากับ 4.7101 และไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) เท่ากับ 2.6055 mg/g ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ บัญชา และคณะ (2550) ที่ศึกษาเปลือกลำไยแห้ง และเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยกรด และด่างมาดูดซับแคดเมียม สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ โดยมีความจุสูงสุดของการ ดูดซับเท่ากับ 5.7405, 1.2680 และ 3.5273 mg/g ตามลำดับ แต่ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเรซินมีค่าต่ำกว่าเปลือกลำไย เนื่องจากเรซินไม่ได้มีการปรับสภาพก่อนมาใช้งาน และเรซินที่มาดูดซับเป็นเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว จึงทำให้หมู่ฟังก์ชันบนเรซินนั้นเสียหายได้ ส่วนไอโซเทอร์มแบบฟลุนด์ลิช มีค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เท่ากับ 6.1433

ดังนั้นเปรียบเทียบไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่า ค่า R^2 ระหว่างไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้น (ดังรูป 4.5 ก.) และแบบฟลุนด์ลิช (ดังรูป 4.5 ค.) มีค่าใกล้เคียงกัน มากกว่าแบบแลงเมียร์ จึงสามารถอธิบายได้ทั้งสองแบบคือ การดูดซับนั้นสามารถเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิว ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของ เรซินแปรผันตรงกับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล และยังสามารถเกิดขึ้นในลักษณะเรียงซ้อนกันหลายชั้น และเกิดชั้นของประจุไฟฟ้าสองชั้น (Electrical Double Layer) ซึ่งก่อนที่นำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมาดูดซับแคดเมียม เรซินจะอิ่มตัวไปด้วย Na^+ และเมื่อไปดูดซับแคดเมียมในสารละลาย จะเกิดการแลกเปลี่ยนโดยทั่วไปของ

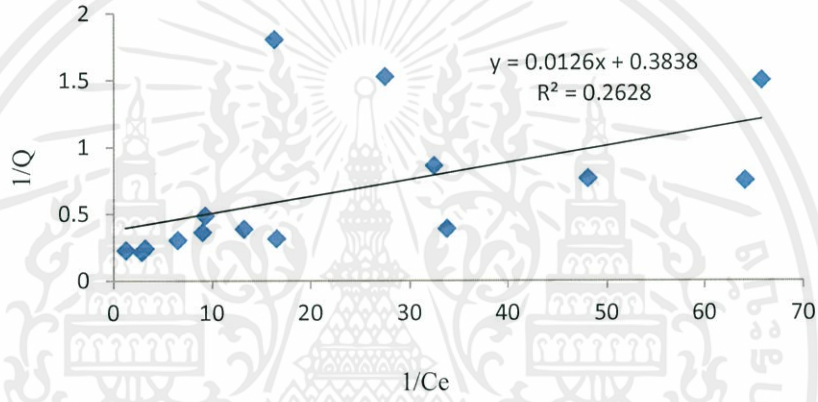
เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ไม่ว่ากรณีใดๆ

โครงสร้างเรซินบางส่วนจะถูกแทนที่ด้วย Cd^{2+} การแทนที่เช่นนี้ทำให้เกิดประจุลบที่พื้นผิว ซึ่งจะเป็นกลางได้ โดยการดูดซับประจุบวก จึงมีผลทำให้เกิดชั้นประจุไฟฟ้าสองชั้น แต่อาจจะเกิดแบบฟลุนด์ลิช ในปริมาณที่มากกว่า จากผลการทดลองทั้ง 2 ตอน คือ ไอโซเทอร์มจากการแปรค่าน้ำหนักเรซิน และไอโซเทอร์มจากการแปรค่าความเข้มข้น แสดงผลการทดลองโดยใช้ข้อมูลทุกค่ามาทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการไอโซเทอร์มในการดูดซับ เห็นได้ว่าข้อมูลแต่ละค่ามีกระจายตัวซึ่งไม่อยู่บนเส้นเดียวกัน แสดงว่าตัวอย่างที่นำมาทดลองมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน(heterogeneous) และการที่ตัวอย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ไอโซเทอร์มในการบำบัด มีค่า R^2 น้อยลง

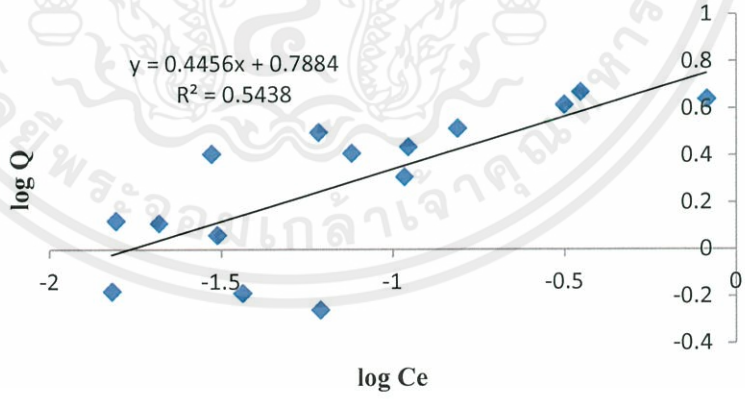
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. แบบเชิงเส้น



ข. แบบแลงเมียร์



ค. แบบฟลุนด์ลิช

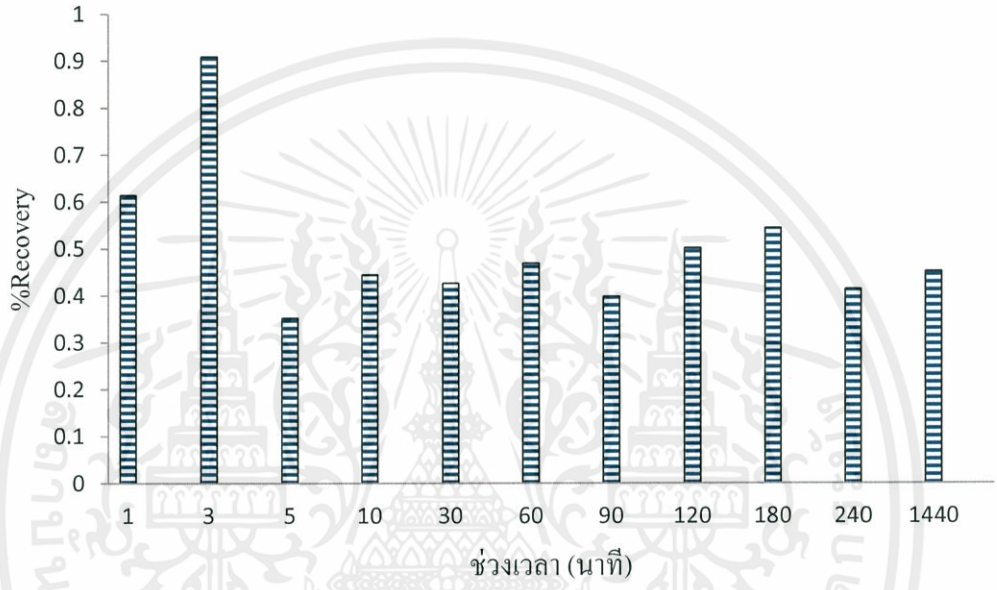
รูปที่ 4. 5 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การคายซับ

1. การคายซับด้วยน้ำกลั่น

จากการศึกษาการคายซับเพื่อรีเจนเนอเรตเรซินทำได้โดยใช้น้ำกลั่น 25 mL โดยใช้ปริมาณเรซินจากการทดลองที่ 3.2.3 ข้อ 1 จำนวน 1g ทั้งหมด 11 ขวด มาทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 1 วัน แล้ววิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่ปล่อยออกมา เพื่อคำนวณหา เปอร์เซ็นต์การกลับคืน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6



รูปที่ 4. 6 ค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืนด้วย SR ของน้ำกลั่น

จากกราฟ เห็นได้ว่าเมื่อนำเอาเรซินที่ดูดซับแคดเมียมมาทำการชะด้วยน้ำกลั่น ทำให้เรซินคายปริมาณแคดเมียมออกมาประมาณ 0.0003 – 0.0006 mg และค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืน 0.35 -0.91 % (ดูตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ค) ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณแคดเมียมที่เริ่มต้น 0.1 g เนื่องจากเรซินมีการดูดซับทางเคมี ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง โดยน้ำเป็นตัวชะที่สามารถเข้าแทนที่กับแคดเมียมในสายโซ่เรซินได้ไม่ดี จึงทำให้น้ำชะปริมาณแคดเมียมออกมาได้ปริมาณน้อยมากจึงไม่เหมาะกับเป็นสารรีเจนเนอเรต

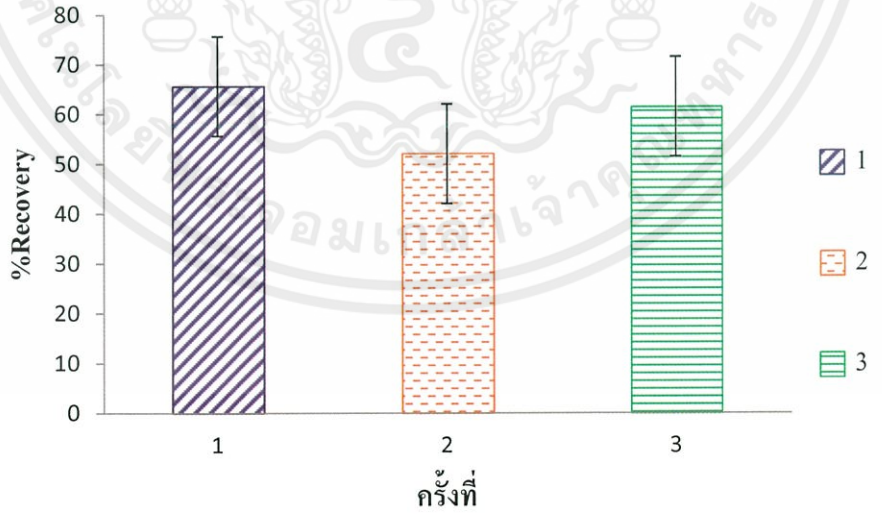
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคายซับด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5% v/v

จากการศึกษาการคายซับเพื่อรีเจนเนอเรตเรซินทำได้โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก 5 %v/v ปริมาตร 5 mL โดยใช้ปริมาณเรซินจากการทดลองที่ 3.2.3 ข้อ 1 จำนวน 3 g 3 ขวด มาทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที แล้ววิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่ปล่อยออกมา และหาสมดุลมวลโดยนำเรซินมาย่อย เพื่อคำนวณหา เปอร์เซ็นต์การกลับคืน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4. 4 ผลการคายซับด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5%v/v

ครั้งที่	ปริมาณแคดเมียม (mg)				สมดุลมวล		
	การดูดซับ	การคายซับ	เรซินที่ย่อย	% recovery	ปริมาณแคดเมียมเริ่มต้น (mg)	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (mg)	% การประกันคุณภาพ
1	0.093	0.061	0.031	65.59	0.093	0.092	98.81
2	0.100	0.052	0.028	52.00	0.100	0.080	79.77
3	0.096	0.059	0.043	61.46	0.096	0.102	105.85
เฉลี่ย	0.096	0.057	0.034	59.68	0.096	0.091	94.81
SD	0.004	0.005	0.01	6.97	0.004	0.01	13.49



รูปที่ 4. 7 ค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืนของเรซินด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 %v/v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำเอาเรซินที่บำบัดแคดเมียมมาทำการชะด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5%v/v พบว่าสามารถได้ Cd^{2+} มีเปอร์เซ็นต์การกลับคืนได้ 59.68 % ± 6.97 (n=3) ทำให้เรซินคายปริมาณแคดเมียมออกมาประมาณ 0.057 mg ± 0.005 โดยเทียบกับปริมาณแคดเมียมเริ่มต้น 0.096 mg ± 0.004 และเมื่อนำเอาเรซินที่ผ่านการคายซับมาย่อยเพื่อหาปริมาณแคดเมียมที่ดูดซับได้ 0.034 mg ± 0.01 เพื่อหาสมดุลมวล ดูตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ค โดยนำปริมาณแคดเมียมที่คายซับและที่อยู่ในเรซินได้ 0.091 mg ± 0.01 ซึ่งเมื่อเทียบกับปริมาณแคดเมียมเริ่มต้น 0.096 mg ± 0.004 จะได้เปอร์เซ็นต์ประกันคุณภาพ 94.81 % ± 13.49

จากการศึกษาการคายซับด้วยน้ำกลั่น และกรดไฮโดรคลอริก 5%v/v พบว่า กรดไฮโดรคลอริก 5%v/v ที่ใช้เป็นสารรีเจนเนอเรต สามารถชะแคดเมียมที่อยู่ในสายโซ่เรซินได้ดีกว่าน้ำเนื่องจากความสามารถในการเข้าแทนที่ของ H^+ จะดีกว่าน้ำ จึงทำให้แคดเมียมหลุดออกจากสายโซ่เรซินได้ง่าย ดังนั้นการที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก 5 %v/v สามารถเป็นสารรีเจนเนอเรตได้ และนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง

เรซินที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์จะทำให้เรซินเป็นของเสียอันตราย ถึงแม้ว่าเรซินจะเป็นของเสียอันตราย เนื่องจากมีปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับเอาไว้จึงเป็นปัญหาในการจัดการ แต่ค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียอันตรายจะลดลง เพราะปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์จะลดลง และค่าใช้จ่ายในการบำบัดจะมีค่าลดลงตาม เนื่องจากไม่ได้ใช้สารเคมีในการบำบัดน้ำเสีย และ เรซินที่ใช้งานแล้วถือว่าเป็นของเสียที่ไม่มีต้นทุน หรือ ต้นทุนต่ำ ดังนั้นการนำเรซินที่ใช้งานแล้วมาบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมมีประสิทธิภาพในการกำจัดถึง 99 % และสามารถมารีเจนเนอเรตกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงเป็นวิธีที่ดีในการลดต้นทุน และการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลวิจัย

1. การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ พบว่าการบำบัดเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาผ่านไป 10 นาที ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดมากกว่า 99 %

2. การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดแคดเมียมด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Lewatit MonoPlus S108) พบว่าที่ค่าพีเอช 5.44 หรือที่ไม่ปรับค่าพีเอช สามารถกำจัดปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 99.82 % ±0.03

3. การวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยแปรค่าอัตราส่วนของเรซินในการบำบัดต่อการบำบัดน้ำเสีย พบว่าการดูดซับแคดเมียม โดยเรซินที่ผ่านการใช้งาน สอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้น โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.7824 และ ค่าคงที่ในการดูดซับ คือ K_d เท่ากับ 1.2764 ส่วนไอโซเทอร์มของการดูดซับ แปรค่าความเข้มข้นแคดเมียม สอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับ 2 แบบ ซึ่งมีค่า R^2 ใกล้เคียงกัน คือแบบเชิงเส้น R^2 เท่ากับ 0.5213 K_d เท่ากับ 4.7101 และแบบฟลุนด์ลิช R^2 0.5438 และค่าคงที่การดูดซับ คือ K เท่ากับ 6.1433 และ 1/n เท่ากับ 0.4456

4. การศึกษาการคายซับเรซินด้วยน้ำกลั่นเป็นตัวชะ มีค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืนเท่ากับ 0.35 ถึง 0.91 % ส่วนการคายซับด้วยการใช้กรดไฮโดรคลอริก 5 %v/v เป็นตัวชะ พบว่าสามารถเป็นตัวชะแคดเมียมในสายโซ่เรซินที่ดีมาก โดยค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืนเท่ากับ 59.68 % ± 6.97

ดังนั้นในการศึกษา ที่ได้นำเรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, Lewatit MonoPlus S108) มากำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูง จึงเป็นข้อเสนอแนะในการที่จะนำเรซินชนิดนี้ไปพัฒนาต่อ และประยุกต์ใช้ในด้านการกำจัดโลหะหนักแคดเมียม รวมถึงโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ในน้ำเสียของอุตสาหกรรม หลังจากกำจัดความกระด้างในน้ำ หรือการทำให้น้ำสะอาด สามารถนำเรซินที่หมดประโยชน์จากการใช้งานเดิม จนทำให้เกิดเป็นของเสียไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก มาทำให้เกิดประโยชน์ เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ในอีกรูปแบบให้มากขึ้น ไม่ให้เกิดเป็นของเสีย ที่อาจก่อให้ผลกระทบสิ่งแวดล้อม และทำให้เกิดความคุ้มค่าของการใช้งานได้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent resin) ควรศึกษาในการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นเพิ่มเติม

2. ในการศึกษาเพิ่มเติม ควรศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent resin) เพื่อเปรียบเทียบผลการวิจัย

3. จากงานวิจัยซึ่งได้ทดลองแบบแบตซ์ (Batch) ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดควรศึกษาการบำบัดเป็นแบบคอลัมน์ (Colunm) หรือ พัฒนาเป็นแบบ Two Stage คือที่ให้สารละลายผ่านเรซินจนกว่าปริมาณแคดเมียมจะลดลง และผ่านค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กนกอร ประยูรพันธ์. 2549. **การประเมินค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของการดูดซับกรดแลคติกด้วยเรซินแบบเบสอ่อน**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

กมลทิพย์ ดอกประทุม. 2552. **ผลของอีดีทีเอต่อการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยมวลชีวภาพจากสับปะรด.** วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2552.

กรมควบคุมมลพิษ. **มาตรฐานคุณภาพน้ำ.** [Online]. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2556). Available : http://www.pcd.go.th.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. **คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า เล่มที่ 1**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

เกษรา จิตนิยม. "การดูดซับ ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียมของสเมกไทต์" **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50.** 2555. หน้า 136-143

เกศสุชา พูลคำ. 2537. **การกำจัดโลหะหนักโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากชานอ้อยและผักตบชวา.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เกษราพร สุอรุณ และโกวิทย์ ปิยะมังคลา. "จลนศาสตร์การดูดซับไอออนเงินโดยเรซินไคโตซาน" **ว.วิทย. มข.** ปีที่ 40, ฉบับที่ 4, 2555. หน้า 1285-1300.

โกวิทย์ ปิยะมังคลา, จารุวรรณ ตาพวัฒน์, ปิยวัฒน์ โพธิมงคลกุล และ ฉัฐรส คงสมภักดิ์. "จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเรซิน" **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.** ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, 2551. หน้า 68-79.

เขมชิต ธนากิจชาญเจริญ, นงนาถ เมฆรังสิมันต์ และสุรชัย ศิลามณีโชติ. **ประโยชน์และความเป็นพิษของโลหะหนักแคดเมียม.** [Online]. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2556). Available : http://www.dss.go.th/images/st-article/cp_4_2551_Cadmium.pdf.

จตุรวิทย์ สิมาฉายา และศราวุธ พิจารณ์. 2550. **การดูดซับทองแดงด้วยขี้เถ้าแกลบดำ.** ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พ.ศ. 2550.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉัตรสินี สุรเสน. 2545. **การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการกรองด้วยเปลือกไข่.** ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ฐิติยา แซ่ปัง. 2551. **พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 110-111.

เทียมชัย บัวลอย, วิภาดา สนองราษฎร์ และสมภพ สนองราษฎร์. "การดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์มูลโค" **วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย.** ปีที่ 23, ฉบับที่ 3, 2552. หน้า 53-61.

นงนุช กำลังแพทย์. 2550. **การศึกษาแคดเมียมและสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์-กรดฟัลวิกต่อความผิดปกติของพันธุกรรมผักบุ้งจีน.** วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2550.

บัญชา ชวาลไชย, ฐปน ชื่นบาล, ศิราภรณ์ ชื่นบาล และประจวบ ฉายบุ. "การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมและตะกั่วในสารละลายโดยใช้เปลือกลำไยเป็นสารดูดซับ" **วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง.** ปีที่ 1, ฉบับที่ 2, 2550. หน้า 297-308.

ปาริฉัตร คำแท้, ปีย์ เจนถาวร และพรภัทรา สุขสาคร. 2554. **การกำจัดไอออนโครเมียม และสารลดแรงตึงผิวประจุลบในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตะกอนสารส้มจากระบบผลิตน้ำประปา.** ปริญญานิพนธ์ วิทยาศาสตรบัณฑิต เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535. **น้ำเสีย.** [Online]. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2556). Available : http://www.deqp.go.th/regulation/pdf/Law2535/law_envi2535.pdf.

พอตา ประสานนาม. 2547. **การกำจัดโลหะออกจากสารละลายโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนที่ผลิตจาก Hydroxy ethyl Cellulose.** วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการ และวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2547.

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. **โครงสร้างที่ผิวและระหว่างผิว.** [Online]. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2556). Available : http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek_file/ceramic/u3-4.htm.

มลิวรรณ บุญเสนอ. 2547. **พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม.** พิมพ์ครั้งที่ 3. นครปฐม : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2544. **ไอออนเอ็กซ์เชนจ์โครมาโตกราฟี.** [Online]. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2556). Available : http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM334/CM334-5.pdf.

วรรณา สายแก้ว, สุนิดา เถาว์โท และวุฒิกร สายแก้ว. การดูดซับแคดเมียมไอออนด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. **ราชภัฏเพชรบูรณ์สาร.** ปีที่ 14, ฉบับที่ 2, 2555. หน้า 1-10.

สุภาพร คำธิมา. 2551. **การดูดซับทองแดง (II) ในน้ำโดยเยื่อปอสาดัดแปร ด้วยไคโตซานและกลูตารัลดีไฮด์.** วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2551.

เสริมพล รัตนสุข และไชยยุทธ์ กลิ่นสุคนธ์. 2524. **การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน.** กรุงเทพฯ : สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ. "เทคโนโลยีการบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อน." [Online]. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2556). Available: http://wqm.pcd.go.th/water/images/stories/marine/journal/2554/soil_remed150153.pdf.

สำนักโรงงานอุตสาหกรรมรายสาขา 6 กรมโรงงานอุตสาหกรรม. **คู่มือการขออนุญาตนำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงาน ตามกฎหมายโรงงาน.** [Online]. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2556). Available : http://www.industry.go.th

อนิสา ทรัพย์นิวัตต์, มณฑล ฐานุตตมวงศ์ และอรรณพ หอมจันทร์. "การบำบัดน้ำปนเปื้อนโลหะหนักด้วยเปลือกหอยผสมธรรมชาติ (กระชา)". **การประชุมวิชาการแห่งชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9.** หน้า 411-418.

อัจฉรา ดวงเดือน. "การกำจัดแคดเมียมด้วยเปลือกไข่" **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41.** 2556. หน้า 470-479.

Akissi, L.C.K., Adouby, K., Yao, B. and Boa. D. 2013. Batch and column studies for Cadmium (II) removal using sawdust from Triplochiton Scleroxylon. **International Journal of Engineering Science and Technology.** 5(1), 31-40.

Bai, Y. and Bartkiewicz, B. 2009. Removal of Cadmium from Wastewater Using Ion Exchange Resin Amberjet 1200H Columns. **Polish J.of Environ. Stud.** 18(6), 1191-1195.

Bulut, Y., Tez, Z. 2006. Removal of heavy metals from aqueous solution by sawdust adsorption. **Journal of Environmental Sciences.** 19(2), 160-166.

Erdem, E., Karapinar, N. and Donat, R. 2004. The removal of heavy metal cations by natural zeolites. **Journal of Colloid and Interface Science.** 280(2), 309-314.

Fei, W., Lian-jun, W., Jian-sheng, L., Xiu-yun, S. and Wei-qing, H. 2008. Adsorption behavior and mechanism of cadmium on strong-acid cation exchange resin. **Trans. Nonferrous Met. Soc. China.** 19, 740-744.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hoffland Environmental, Inc. Hydroxide Precipitation. [Online]. (Access on 20 August 2013) Available : http://hoffland.net/treatment-processes-chemistry-2/hydroxide-precipitation.

Ibrahim, S.C., Hanafiah, M.A.K.M. and Yahya, M.Z.A. 2006. Removal of Cadmium from Aqueous Solutions by Adsorption onto Sugarcane Bagasse. **American-Eurasian J. Agric. & Environ Sci.** 1(3), 179-184.

Lanxess Energizing Chemistry. Lawatit MonoPlus S108. [Online]. (Access on 20 August 2013) Available : http://www.decker-vt.de/english/pdf/ion-exchange-resin/ion-exchange-resin-lewatit-s108-product-sheet.pdf.

Otrembska, P. and Gega, J. 2012. Kinetic studies on sorption of Ni (II) and Cd (II) from chloride solution using selected acidic cation exchangers. **Physicochem. Probl. Miner. Process.** 49(1), 301-312.

Pairat Kaewsarn and Qiming Yu. 2000. Cadmium(II) removal from aqueous solutions by pre-treated biomass of marine alga *Padina* sp. **Environmental Pollution.** 112, 209-213.

Rao, K.S., Chaudhury, G.R. and Mishra, B.K. 2010. Kinetics and equilibrium studies for the removal of cadmium ions from aqueoussolutions using Duolite ES 467 resin. **International Journal of Mineral Processing.** 97, 68–73.

Singanan, M. 2011. Removal of lead (II) and cadmium (II) ions from wastewater using activated biocarbon. **ScienceAsia.** 37, 115–119.

U.S. EPA. Microwave assisted acid digestion of aques samples and extracts. [Online]. (Access on 20 August 2013)Available : http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/ pdfs /3015a. pdf.

Volesky, B. and Holant, Z. R. 1995. Biosorption of Heavy Metals. **Biotechnol. Prog.** 11(3), 235-250.

Wanna Saikaew and Pairat Kaewsarn. 2009. Cadmium ion removal using biosorbents derived from fruit peel waste. Songklanakarin J. Sci. Technol. 31(5), 547-554.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การกำจัดของเสียอันตราย

สำนักโรงงานอุตสาหกรรมรายสาขา 6 กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2549) การกำหนดของเสียอันตราย จะใช้วิธีนำมาหาค่าความเข้มข้นทั้งหมด (Total Concentration Analysis) ของสิ่งเจือปน หากพบว่ามีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (mg/kg; wet weight) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) ที่กำหนดไว้ แสดงว่าของเสียดังกล่าวเป็นของเสียอันตราย หากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ ให้นำของเสียดังกล่าวไปวิเคราะห์ โดยวิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์น้ำสกัด หากมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ที่กำหนดไว้ของเสียดังกล่าวจัดเป็นของเสียอันตราย

จากการทดลองการคายซับของเรซินที่ผ่านการใช้แล้ว ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 %w/w พบปริมาณแคดเมียมมี 5.7 mg/L ±0.05 และ ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดหาได้จากการทดลองการคายซับและนำเรซินไปย่อย ได้ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด 30.01 mg/Kg-wet weight ±0.01

กำหนดค่า TTLC ของแคดเมียมไว้ที่ 100 mg/Kg wet weight

ค่าที่วิเคราะห์ได้ 30.01 mg/Kg < ค่า TTLC 100 mg/ Kg wet weight ซึ่งค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ จึงนำของเสียดังกล่าวไปวิเคราะห์ โดยวิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์น้ำสกัดต่อไป

กำหนดค่า STLC ของแคดเมียมไว้ที่ 1 mg/L

ค่าที่วิเคราะห์ได้ 5.7 mg/L > ค่า STLC 1 mg/L ซึ่งค่ามากกว่าที่กำหนดไว้ จึงนำสรุปได้ว่าเรซินที่ผ่านการดูดซับแคดมียม จัดเป็นของเสียอันตราย

การที่เรซินที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมจัดว่าเป็นของเสียอันตราย ดังนั้นการจัดของเสียจึงต้องใช้วิธีการปรับเสถียร (Solidification / Stabilization) ซึ่งเป็นขบวนการกำจัดของเสียจำพวก Sludge หรือของเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว สารหนู โครเมียม แคดเมียม โบรอน เซเรเนียม ปรอท และสารอนินทรีย์ต่างๆ โดยการผสมปูนซีเมนต์เข้ากับของเสีย เพื่อให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือแสวงหาประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงสร้างที่จับของเสียไว้ ทำให้ของเสียถูกชะล้างละลายออกมาได้น้อยลง การปรับเสถียรกากของเสียนี้เป็นการเตรียมของเสียเพื่อนำไปฝังกลบอย่างปลอดภัย เพราะของเสียที่ผ่านการปรับเสถียรแล้วต้องนำมาทดสอบความเป็นพิษด้านสมบัติการถูกชะล้าง (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP) ภายใต้สภาวะมาตรฐานก่อนนำไปฝังกลบ ทั้งนี้สารละลายที่ออกมาจากการชะล้างกากของเสียที่ปรับเสถียรแล้วนั้น จะต้องมี ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่างๆ เหล่านั้นต่ำกว่าปริมาณที่กำหนดไว้ ตัวอย่างการปรับเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารมาตรฐาน

1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียม

1.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 100 mg/L

ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 1000 mg/L จำนวน 10 mL

↓

ใส่ในขวดวัดปริมาตร 100 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 100 mg/L

1.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1 mg/L

ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 100 mg/L จำนวน 2.5 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตร 25 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 10 mg/L

↓

ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 10 mg/L จำนวน 5 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตร 50 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 1 mg/L

↓

ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 1 mg/L จำนวน 17.5, 12.5 และ 5 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตร 50 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.7, 0.5 และ 0.1 mg/L ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ ... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ ... นำไปใช้

(ต่อ)

ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 0.5 mg/L จำนวน 15 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตร 25 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.3 mg/L

↓

ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 0.1 mg/L จำนวน 17.5, 12.5 และ 2.5 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตร 25 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียม ความเข้มข้น 0.07, 0.05 และ 0.01 mg/L

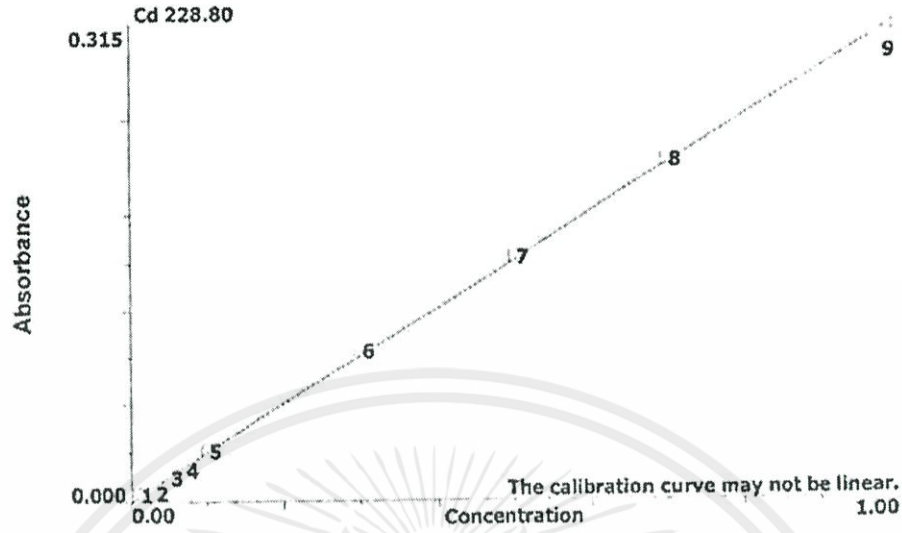
↓

ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 0.05 mg/L จำนวน 15 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตร 25 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.03 mg/L

↓

ตรวจวัดโดยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer:AAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Calibration Curve Slope: 0.31863
Calibration Curve Intercept: 0.00000
Calibration Curve Correlation Coefficient: 0.999731
Calibration Curve Type: Linear Through Zero

ตารางที่ ข- 1 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียม

Standard ID	Entered Conc.	Calculated Conc.
Blank	0.000	0.000
1	0.010	0.015
2	0.030	0.019
3	0.050	0.050
4	0.070	0.064
5	0.100	0.103
6	0.300	0.311
7	0.500	0.507
8	0.700	0.706
9	1.000	0.989

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การคำนวณ

1. การคำนวณค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวกด้วยวิธีแอมโมเนียมอะซิเทต (CEC)

การเทียบมาตรฐานของสารละลายไฮโดรคลอริก 0.5 N

ตาราง ค. 1 การเทียบมาตรฐานของสารละลายไฮโดรคลอริก 0.5 N

ตอนที่ 1 ไทเทรตโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลตด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 N

ครั้งที่	ไทแทรนต์	ไทแทรนด์	ปริมาตรที่ใช้	หมายเหตุ
1	NaOH	KHP 0.5 N	26.2 ml	
2	NaOH	KHP 0.5 N	27.3 ml	ตัดทิ้ง
3	NaOH	KHP 0.5 N	26.1 ml	
		เฉลี่ย	26.15 ml	

$$C_{NaOH} = \frac{0.5 \text{ N x } 25 \cancel{\text{ ml}}}{26.15 \cancel{\text{ ml}}}$$

$$= 0.4780 \ N$$

ตอนที่ 2 ไทเทรตโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่หาความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว ด้วย HCl

ครั้งที่	ไทแทรนต์	ไทแทรนด์	ปริมาตรที่ใช้	หมายเหตุ
1	HCl	NaOH 0.4780 N	25.2 ml	ตัดทิ้ง
2	HCl	NaOH 0.4780 N	24.8 ml	
3	HCl	NaOH 0.4780 N	24.9 ml	
		เฉลี่ย	24.85 ml	

$$C_{HCl} = \frac{0.4780 \text{ N x } 25 \cancel{\text{ ml}}}{24.85 \cancel{\text{ ml}}}$$

$$= 0.4809 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาการแลกเปลี่ยนประจุบวกของเรซิน

$$CEC = \frac{(A-B)N \times 100}{w \times 1000}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับสารละลายตัวอย่างเรซิน (mL)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์ (mL)

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มอล)

W = น้ำหนักแห้งมีหน่วยเป็นกรัมของเรซิน

- เรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน (RM)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$CEC = \frac{(2.38-0)0.4809 \times 100}{10.071 \times 1000}$$

$$= 0.011 \quad \text{cmol/g}$$

- เรซินที่ผ่านการใช้งาน (SR)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$CEC = \frac{(24.6-0)0.4809 \times 100}{10.009 \times 1000}$$

$$= 0.012 \quad \text{cmol/g}$$

การคำนวณหาปริมาณแคลเซียม

$$\text{ปริมาณ } Ca^{2+} = \frac{R \times C \times df}{10 \times A \times \frac{40.078}{2}}$$

เมื่อ A = น้ำหนักของเรซิน (g)

df = จำนวนเท่าของการเจือจางสารละลาย

C = ปริมาตรสุดท้ายของสารละลายตัวอย่าง (mL)

R = ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่อ่านได้จากเครื่อง AAS (mg/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน (RM)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$\text{ปริมาณ } Ca^{2+} = \frac{3.637\ \frac{mg}{L} \times 25mL \times 1}{10 \times 10.071\ g \times \frac{40.078}{2}\ \frac{mg}{eq}}$$

$$= 0.045\ \text{meq/g}$$

- เรซินที่ผ่านการใช้งาน (SR)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$\text{ปริมาณ } Ca^{2+} = \frac{0.873\ \frac{mg}{L} \times 50\ mL \times 100}{10 \times 10.009\ g \times \frac{40.078}{2}\ \frac{mg}{eq}}$$

$$= 2.177\ \text{meq/g}$$

การคำนวณหาปริมาณแมกนีเซียม

$$\text{ปริมาณ } Mg^{2+} = \frac{R \times C \times df}{10 \times A \times \frac{24.3050}{2}}$$

เมื่อ A = น้ำหนักของเรซิน (g)

df = จำนวนเท่าของการเจือจางสารละลาย

C = ปริมาตรสุดท้ายของสารละลายตัวอย่าง (mL)

R = ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่อ่านได้จากเครื่อง AAS (mg/L)

- เรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน (RM)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$\text{ปริมาณ } Mg^{2+} = \frac{0.072\ \frac{mg}{L} \times 25mL \times 50}{10 \times 10.071\ g \times \frac{24.3050}{2}\ \frac{mg}{eq}}$$

$$= 0.073\ \text{meq/g}$$

- เรซินที่ผ่านการใช้งาน (SR)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$\text{ปริมาณ } Mg^{2+} = \frac{0.113\ \frac{mg}{L} \times 50\ mL \times 100}{10 \times 10.071\ g \times \frac{24.3050}{2}\ \frac{mg}{eq}}$$

$$= 0.466\ \text{meq/g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเตรียมสารละลายแคดเมียมเริ่มต้น

เตรียมสารละลายสต๊อคแคดเมียมความเข้มข้น 1000 ppm จาก $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ โดยคำนวณจาก

$$1000 \text{ ppm} = 1000\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)$$

$$1000 \text{ mg} \times \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}}\right) = 1\text{g Cd}$$

$$1 \text{ g Cd} \times \left(\frac{1 \text{ mol}}{112.411 \text{ g}}\right) = 8.9 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$1\text{mol Cd} = 1 \text{ mol } CdCl_2$$

$$8.9 \times 10^{-3} \text{ mol } CdCl_2 \cdot 2.5H_2O \times \frac{228.35 \text{ g}}{1 \text{ mol}} = 2.0323 \text{ g}$$

ดังนั้นต้องชั่ง 1.0161 g ของ$CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ ในน้ำกลั่น 500 mL จะได้ความเข้มข้นแคดเมียม 1000 ppm

3. การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม

ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดเป็นการดูประสิทธิภาพของการกำจัดสารออกจากสารละลายโดยคิดจากความเข้มข้นเริ่ม และความเข้มข้นที่เหลือ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การกำจัด}(\%) = \left(\frac{C_0 - C_i}{C_0}\right) \times 100$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม (mg/L)

C_i คือ ความเข้มข้นที่เหลือของแคดเมียม (mg/L)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การกำจัด } (\%) = \left(\frac{9.40 - 0.042}{9.40}\right) \times 100$$

$$= 99.55 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมต่อปริมาณเรซิน

ค่าความสามารถในการดูดซับเป็นค่าที่ศึกษาว่าปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ โดยคิดจากความเข้มข้นเริ่มต้น และความเข้มข้นที่เหลือ ต่อ ปริมาณตัวดูดซับ

$$\text{ความสามารถในการดูดซับ } \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}}\right) = \left[\frac{(c_0 \times v_0) - (c_i \times v_i)}{1000 \times M}\right]$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม (mg/L)

C_i คือ ความเข้มข้นที่เหลือของแคดเมียม (mg/L)

V_0 คือ ปริมาตรของสายละลายเริ่มต้น (mL)

V_i คือ ปริมาตรของสารละลายหลังการย่อย (mL)

M คือ น้ำหนักเรซินแห้ง (g)

$$\text{ความสามารถในการดูดซับ } \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}}\right) = \left[\frac{(9.40 \times 25) - (0.042 \times 10)}{1000 \times 0.4527}\right]$$

$$= 0.52 \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}}\right)$$

5. การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืนของแคดเมียม (%Recovery)

เปอร์เซ็นต์การกลับคืนเป็นการวิเคราะห์สารที่ทราบปริมาณในตัวอย่าง โดยหาได้จาก ปริมาณสารที่คายซับ กับปริมาณสารที่เติมลงไป

$$\%\ \text{Recovery} = \left(\frac{\text{มวลที่คายซับ } (mg)}{\text{มวลเริ่มต้น } (mg)}\right) \times 100$$

$$= \left(\frac{0.092}{0.093}\right) \times 100$$

$$= 98.81\ \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การคำนวณพีเอชต่อการละลายของ$Cd(OH)_2$

การคำนวณพีเอชต่อการละลายของ$Cd(OH)_2$ เป็นการช่วงพีเอชว่าปริมาณแคดเมียมเริ่มต้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL ว่าจะเกิดการตกตะกอนในช่วงพีเอชเท่าไร เพื่อหลีกเลี่ยงในการปรับค่าพีเอช

$$Cd(OH)_2 \leftrightarrow Cd^{2+}(aq) + 2OH^-(aq)$$

$$K_{sp} = [Cd^{2+}][OH^-]^2$$

$$7.2 \times 10^{-15} = (8.9 \times 10^{-5})(2X^2)$$

$$x^2 = \frac{(7.2 \times 10^{-15})}{(4 \times 8.9 \times 10^{-5})}$$

$$x = \sqrt{\frac{(7.2 \times 10^{-15})}{(4 \times 8.9 \times 10^{-5})}}$$

$$x = 4.5 \times 10^{-6}$$

คำนวณค่าพีเอช

$$pOH = -\log(4.5 \times 10^{-6})$$

$$= 5.35$$

$$pH = 14 - 5.35$$

$$= 8.65$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. การคำนวณหาสมดุลมวล

การคำนวณหาสมดุลมวลเป็นการว่าปริมาณสารตั้งต้นที่เติมลงไป แล้วเมื่อผ่านการทดลองนำมาหาปริมาณสารที่อยู่ในตัวดูดซับว่ามีปริมาณใกล้เคียงกัน

ปริมาณแคดเมียมเริ่มต้น

สารละลายปริมาตร 1000 mL มีปริมาณแคดเมียมอยู่ 9.30 mg

ถ้าสารละลายปริมาตร 10 mL จะมีปริมาณแคดเมียมอยู่ $= \frac{10 \times 9.30}{1000}$

$= 0.093$ mg

การดายซับ

สารละลายปริมาตร 1000 mL มีปริมาณแคดเมียมอยู่ 6.10 mg

ถ้าสารละลายปริมาตร 10 mL จะมีปริมาณแคดเมียมอยู่ $= \frac{10 \times 6.10}{1000}$

$= 0.061$ mg

เรซินที่ย่อย

สารละลายปริมาตร 1000 mL มีปริมาณแคดเมียมอยู่ 0.458 mg

ถ้าสารละลายปริมาตร 10 mL จะมีปริมาณแคดเมียมอยู่ $= \frac{10 \times 0.458}{1000}$

$= 4.58 * 10^{-3}$ mg

เรซินที่ย่อยมีปริมาณ 0.1982 g มีปริมาณแคดเมียมอยู่ 4.58×10^{-3} mg

ถ้าเรซินที่ย่อยมีปริมาณ 1.911 g จะมีปริมาณแคดเมียมอยู่ $= \frac{1.1911 \times 4.58 \times 10^{-3}}{0.1982}$

$= 0.031$ mg

ดังนั้นปริมาณแคดเมียมทั้งหมด 0.061+0.031 = 0.092 mg เมื่อเทียบกับปริมาณแคดเมียดเริ่มต้น 0.093 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ข้อมูลผลการทดลอง

1. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, Lewatit MonoPlus S108)

1.1 ผลของระยะเวลาต่อการบำบัด

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ปริมาณเรซิน 1, 3 และ 5 g ความเร็วรอบในการเขย่า 120 rpm อุณหภูมิ 30± 2 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 10 mg/L ระยะเวลาแปรค่าที่ 1, 3, 5, 10, 30, 60, 90, 120, 180, 240 นาที และ24 ชั่วโมง

ตารางที่ ง- 1 ผลของเวลาต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, Lewatit MonoPlus S108) จำนวน 1 g

เวลา (นาที)	ตัวดูดซับ	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย			
		ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	ค่าSD	% การกำจัด	ค่าSD
1	ควบคุม	10.08	92.10	10.08	92.01	10.74	88.73	10.30	0.381	90.95	1.920
	เรซิน	0.796		0.805		1.21		0.94	0.236		
3	ควบคุม	10.36	91.65	5.36	86.16	10.3	98.88	8.67	2.870	92.23	6.383
	เรซิน	0.865		0.742		0.115		0.57	0.402		
5	ควบคุม	6.32	95.00	7.86	97.23	9.46	98.11	7.88	1.570	96.78	1.602
	เรซิน	0.316		0.218		0.179		0.24	0.071		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตารางที่ ง-1 ผลของเวลาต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, Lewatit MonoPlus S108) จำนวน 1 g (ต่อ)

เวลา (นาที)	ตัวดูดซับ	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย			
		ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	ค่าSD	% การกำจัด	ค่าSD
10	ควบคุม	9.4	99.55	10.38	99.55	11.32	99.44	10.37	0.960	99.51	0.062
	เรซิน	0.042		0.047		0.063		0.05	0.011		
30	ควบคุม	9.56	99.69	9.87	99.65	10.08	99.68	9.84	0.262	99.67	0.023
	เรซิน	0.03		0.035		0.032		0.03	0.003		
60	ควบคุม	8.86	99.59	9.82	99.71	10.54	98.61	9.74	0.843	99.31	0.603
	เรซิน	0.036		0.028		0.146		0.07	0.066		
90	ควบคุม	10.24	99.55	10.08	99.49	10.18	99.56	10.17	0.081	99.53	0.035
	เรซิน	0.046		0.051		0.045		0.05	0.003		
120	ควบคุม	9.32	99.61	7.02	99.44	8.22	99.46	8.19	1.150	99.51	0.092
	เรซิน	0.036		0.039		0.044		0.04	0.004		
180	ควบคุม	7.28	99.29	8.66	99.62	11.06	99.61	9.00	1.913	99.51	0.190
	เรซิน	0.052		0.033		0.043		0.04	0.010		
240	ควบคุม	10.34	99.12	8	99.64	10.7	99.37	9.68	1.466	99.38	0.259
	เรซิน	0.091		0.029		0.067		0.06	0.031		
1440	ควบคุม	9.7	99.66	9.78	99.55	11.46	99.57	10.31	0.994	99.59	0.058
	เรซิน	0.033		0.044		0.049		0.04	0.008		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตารางที่ ง- 2 ผลของเวลาต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, Lewatit MonoPlus S108) จำนวน 3 g

เวลา (นาที)	ตัวดูดซับ	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย			
		ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	ค่าSD	% การกำจัด	ค่าSD
1	ควบคุม	5.34	96.09	8.66	92.38	11.16	96.20	8.39	2.920	94.89	2.174
	เรซิน	0.209		0.66		0.424		0.43	0.226		
3	ควบคุม	6.96	97.44	10.9	98.42	8.84	98.25	8.90	1.971	98.04	0.522
	เรซิน	0.178		0.172		0.155		0.17	0.012		
5	ควบคุม	9.28	98.98	10.03	99.13	9.57	99.03	9.63	0.378	99.05	0.080
	เรซิน	0.095		0.087		0.093		0.09	0.004		
10	ควบคุม	10.4	99.40	11.14	99.39	10.56	99.38	10.70	0.389	99.39	0.010
	เรซิน	0.062		0.068		0.065		0.07	0.003		
30	ควบคุม	10	99.33	11.72	99.49	5.92	99.00	9.21	2.979	99.27	0.247
	เรซิน	0.067		0.06		0.059		0.06	0.004		
60	ควบคุม	11.02	99.50	6.32	99.05	8.26	99.25	8.53	2.362	99.27	0.226
	เรซิน	0.055		0.06		0.062		0.06	0.004		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตารางที่ ง-2 ผลของเวลาต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, Lewatit MonoPlus S108) จำนวน 3 g (ต่อ)

เวลา (นาที)	ตัวดูดซับ	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย			
		ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	ค่าSD	% การกำจัด	ค่าSD
90	ควบคุม	11.2	99.40	11.66	99.44	10.94	99.45	11.27	0.365	99.43	0.027
	เรซิน	0.067		0.065		0.06		0.06	0.004		
120	ควบคุม	7.34	99.13	10.9	99.49	10.88	99.51	9.71	2.050	99.38	0.215
	เรซิน	0.064		0.056		0.053		0.06	0.006		
180	ควบคุม	9.22	99.47	3.54	98.42	9.62	99.64	7.46	3.401	99.17	0.660
	เรซิน	0.049		0.056		0.035		0.05	0.011		
240	ควบคุม	10.58	99.37	11.66	99.56	10.44	99.74	10.89	0.668	99.56	0.187
	เรซิน	0.07		0.051		0.027		0.05	0.020		
1440	ควบคุม	7.24	99.39	11.56	99.38	11.52	99.61	10.11	2.483	99.46	0.130
	เรซิน	0.044		0.072		0.045		0.05	0.016		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตารางที่ ง- 3 ผลของเวลาต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, Lewatit MonoPlus S108) จำนวน 5 g

เวลา (นาที)	ตัวดูดซับ	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย			
		ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	ค่าSD	% การกำจัด	ค่าSD
1	ควบคุม	10.7	96.67	10.24	96.94	10.96	96.94	10.63	0.365	96.85	0.156
	เรซิน	0.356		0.313		0.335		0.33	0.022		
3	ควบคุม	9.7	98.75	10.04	98.73	9.94	98.87	9.89	0.175	98.78	0.079
	เรซิน	0.121		0.128		0.112		0.12	0.008		
5	ควบคุม	9.89	99.28	10.5	99.25	9.85	99.34	10.08	0.364	99.29	0.047
	เรซิน	0.071		0.079		0.065		0.07	0.007		
10	ควบคุม	10.42	99.51	10.14	99.46	10.06	99.52	10.21	0.189	99.50	0.035
	เรซิน	0.051		0.055		0.048		0.05	0.004		
30	ควบคุม	10.42	99.49	10.52	99.54	9.92	99.55	10.29	0.321	99.53	0.031
	เรซิน	0.053		0.048		0.045		0.05	0.004		
60	ควบคุม	10.38	99.50	11.66	99.54	10.22	99.42	10.75	0.789	99.49	0.058
	เรซิน	0.052		0.054		0.059		0.06	0.004		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ตารางที่ ง-3 ผลของเวลาต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, Lewatit MonoPlus S108) จำนวน 5 g (ต่อ)

เวลา (นาที)	ตัวดูดซับ	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย			
		ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	% การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)	ค่าSD	% การกำจัด	ค่าSD
90	ควบคุม	10.7	99.53	10.66	99.55	10.24	99.59	10.53	0.255	99.56	0.029
	เรซิน	0.05		0.048		0.042		0.05	0.004		
120	ควบคุม	9.34	99.50	10.7	99.54	10.42	99.51	10.15	0.718	99.52	0.023
	เรซิน	0.047		0.049		0.051		0.05	0.002		
180	ควบคุม	10.72	99.55	9.94	99.49	9.82	99.58	10.16	0.489	99.54	0.049
	เรซิน	0.048		0.051		0.041		0.05	0.005		
240	ควบคุม	10.12	99.53	10.86	99.64	10.52	99.60	10.50	0.370	99.59	0.058
	เรซิน	0.048		0.039		0.042		0.04	0.005		
1440	ควบคุม	9.24	99.52	10.56	99.67	10.32	99.54	10.04	0.703	99.58	0.078
	เรซิน	0.044		0.035		0.047		0.04	0.006		

1.2 ผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับ

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ปริมาณเรซิน 1 g ความเร็วรอบในการเขย่า 120 rpm ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 10 mg/L ระยะเวลา 10 นาที พีเอชแปรค่าที่ 2, 4, 6 และ พีเอชเดิม อุณหภูมิ 30± 2 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ง- 4 ผลของค่าพีเอชต่อการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, Lewatit MonoPlus S108)

พีเอช	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			เฉลี่ย			
	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)		%การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)		%การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)		%การกำจัด	ความเข้มข้น Cd^{2+} (mg/L)		%การกำจัด	ค่า SD
	ควบคุม	เรซิน		ควบคุม	เรซิน		ควบคุม	เรซิน		ควบคุม	เรซิน		
2	13.8	1.44	89.57	11.74	1.84	84.33	11.7	1.18	89.91	12.41	1.49	88.02	3.1300
4	12.06	1.061	91.2	11.8	1.1	90.68	10.44	1.18	88.7	11.43	1.11	90.26	1.3212
ไม่ปรับ	11.48	0.0208	99.82	11.48	0.0244	99.79	11.48	0.0176	99.85	11.48	0.02	99.82	0.0296
6	11.62	1.053	90.94	11.28	0.88	92.2	11.28	1.096	90.28	11.39	1.01	91.14	0.9733

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2. ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียม

2.1 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าน้ำหนักเรซิน

ตารางที่ ง- 5 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าน้ำหนักเรซิน ครั้งที่ 1

X เปียก (g)	X แห้ง (g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	Q (mg/g)	1/Q	$1/C_e$	log Q	log Ce
0.1098	0.0432	10.16	4.14	4.92	0.20	0.24	0.69	0.62
0.2061	0.0810	11.00	2.24	3.12	0.32	0.45	0.49	0.35
0.3116	0.1225	10.90	1.34	2.11	0.47	0.75	0.33	0.13
0.4129	0.1624	10.94	1.02	1.62	0.62	0.98	0.21	0.01
0.5135	0.2019	11.00	0.26	1.35	0.74	3.89	0.13	-0.59
0.6094	0.2396	10.70	0.07	1.11	0.90	14.53	0.05	-1.16
0.702	0.2760	11.44	0.08	1.03	0.97	12.82	0.01	-1.11
1.0676	0.4198	11.00	0.04	0.65	1.53	27.47	-0.18	-1.44
3.0019	1.1803	11.36	0.03	0.24	4.16	29.41	-0.62	-1.47
5.0461	1.9841	11.12	0.03	0.14	7.15	29.07	-0.85	-1.46

ตารางที่ ง- 6 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าน้ำหนักเรซิน ครั้งที่ 2

X เปียก (g)	X แห้ง (g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	Q (mg/g)	1/Q	$1/C_e$	log Q	log Ce
0.1077	0.0423	11.26	3.22	5.89	0.17	0.31	0.77	0.51
0.2049	0.0806	11.24	2.28	3.20	0.31	0.44	0.51	0.36
0.3127	0.1230	10.26	1.48	1.97	0.51	0.68	0.29	0.17
0.4112	0.1617	8.14	1.06	1.19	0.84	0.94	0.08	0.03
0.5123	0.2014	11.46	0.09	1.42	0.71	10.55	0.15	-1.02
0.6059	0.2382	11.34	0.11	1.19	0.84	8.80	0.07	-0.94
0.7041	0.2769	10.86	0.09	0.98	1.02	11.01	-0.01	-1.04
1.0691	0.4204	9.34	0.06	0.55	1.81	16.34	-0.26	-1.21
3.0038	1.1811	10.86	0.06	0.23	4.36	16.34	-0.64	-1.21
5.0482	1.9850	11.20	0.14	0.14	7.12	7.14	-0.85	-0.85

เอกสารนี้เป็นการที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง- 7 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าน้ำหนักเรซิน ครั้งที่ 3

X เปียก (g)	X แห้ง (g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	Q (mg/g)	1/Q	$1/C_e$	log Q	log Ce
0.1288	0.0506	11.40	1.70	5.29	0.19	0.59	0.72	0.23
0.228	0.0896	10.06	1.00	2.69	0.37	1.00	0.43	0.00
0.3183	0.1252	10.72	0.66	2.09	0.48	1.52	0.32	-0.18
0.4393	0.1727	9.86	0.46	1.40	0.71	2.17	0.15	-0.34
0.5075	0.1995	10.58	0.04	1.32	0.76	23.81	0.12	-1.38
0.6268	0.2465	10.90	0.84	1.07	0.93	1.19	0.03	-0.08
0.7125	0.2802	10.57	0.02	0.94	1.06	40.32	-0.03	-1.61
1.0099	0.3971	10.60	0.02	0.67	1.50	65.79	-0.18	-1.82
3.0111	1.1840	11.24	0.03	0.24	4.22	39.06	-0.63	-1.59
5.2277	2.0555	10.54	0.03	0.13	7.81	37.88	-0.89	-1.58

ตารางที่ ง- 8 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าน้ำหนักเรซิน(ค่าเฉลี่ย)

X เปียก (g)	X แห้ง (g)	C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	Q (mg/g)	1/Q	$1/C_e$	log Q	log Ce
0.1154	0.0454	10.94	3.02	5.37	0.38	0.19	0.45	0.73
0.2130	0.0838	10.77	1.84	3.01	0.63	0.33	0.24	0.48
0.3142	0.1235	10.63	1.16	2.06	0.98	0.49	0.04	0.31
0.4211	0.1656	9.65	0.85	1.41	1.37	0.72	-0.10	0.14
0.5111	0.2010	11.01	0.13	1.36	12.75	0.73	-1.00	0.13
0.6140	0.2414	10.98	0.34	1.12	8.18	0.89	-0.73	0.05
0.7062	0.2777	10.96	0.06	0.98	21.39	1.02	-1.25	-0.01
1.0489	0.4124	10.31	0.04	0.63	36.53	1.61	-1.49	-0.21
3.0056	1.1818	11.15	0.04	0.24	28.27	4.25	-1.42	-0.63
5.1073	2.0082	10.95	0.07	0.14	24.70	7.36	-1.30	-0.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าความเข้มข้น

ตารางที่ ง- 9 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าความเข้มข้น ครั้งที่ 1

ความเข้มข้น (mg/L)	X เปียก (g)	X แห้ง (g)	ครั้งที่1			Q (mg/g)	$1/C_e$	1/Q	log C_e	log Q
			C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	% การกำจัด					
10	1.0676	0.4198	11	0.04	99.67	0.65	27.47	1.53	-1.44	-0.18
20	1.012	0.3979	20.72	0.02	99.90	1.30	48.08	0.77	-1.68	0.11
40	1.0174	0.4000	41.28	0.08	99.82	2.58	13.23	0.39	-1.12	0.41
70	1.0175	0.4001	52.64	0.15	99.71	3.29	6.49	0.30	-0.81	0.52
110	1.0153	0.3992	74.9	0.35	99.53	4.68	2.84	0.21	-0.45	0.67

ตารางที่ ง- 10 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าความเข้มข้น ครั้งที่ 2

ความเข้มข้น (mg/L)	X เปียก (g)	X แห้ง (g)	ครั้งที่1			Q (mg/g)	$1/C_e$	1/Q	log C_e	log Q
			C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	% การกำจัด					
10	1.0691	0.4204	9.34	0.06	99.34	0.55	16.34	1.81	-1.21	-0.26
20	1.0101	0.3972	21.16	0.02	99.93	1.33	64.10	0.75	-1.81	0.12
40	1.0128	0.3982	43.72	0.11	99.75	2.74	9.03	0.36	-0.96	0.44
70	1.0102	0.3972	50.24	0.06	99.88	3.16	16.56	0.32	-1.22	0.50
110	1.0144	0.3989	66.20	0.32	99.52	4.14	3.17	0.24	-0.50	0.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง- 11 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าความเข้มข้น ครั้งที่ 3

ความเข้มข้น (mg/L)	X เปียก (g)	X แห้ง (g)	ครั้งที่1			Q (mg/g)	$1/C_e$	1/Q	log Ce	log Q
			C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	% การกำจัด					
10	1.0099	0.3971	10.60	0.02	99.86	0.67	65.79	1.50	-1.82	-0.18
20	1.0102	0.3972	18.44	0.03	99.83	1.16	32.47	0.86	-1.51	0.06
40	1.0112	0.3976	40.76	0.03	99.93	2.56	33.78	0.39	-1.53	0.41
70	1.0124	0.3981	32.64	0.11	99.67	2.05	9.26	0.49	-0.97	0.31
110	1.0162	0.3996	70.10	0.82	98.83	4.37	1.22	0.23	-0.09	0.64

ตารางที่ ง- 12 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียมเมื่อแปรค่าความเข้มข้น (ค่าเฉลี่ย)

ความเข้มข้น (mg/L)	X เปียก (g)	X แห้ง (g)	ครั้งที่1			Q (mg/g)	$1/C_e$	1/Q	log C_e	log Q
			C_0 (mg/L)	C_e (mg/L)	% การกำจัด					
10	1.0489	0.4124	10.31	0.04	99.62	0.63	36.53	1.61	-1.49	-0.21
20	1.0108	0.3974	20.11	0.02	99.89	1.26	48.22	0.79	-1.67	0.10
40	1.0138	0.3986	41.92	0.07	99.83	2.63	18.68	0.38	-1.20	0.42
70	1.0134	0.3985	45.17	0.11	99.75	2.83	10.77	0.37	-1.00	0.44
110	1.0153	0.3992	70.40	0.50	99.29	4.40	2.41	0.23	-0.35	0.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการคายซับ

3.1 การคายซับด้วยน้ำกลั่น

ตารางที่ ง- 13 ผลการคายซับด้วยน้ำกลั่น

เวลา (นาที)	การดูดซับ			การคายซับ	%Recovery
	ปริมาณแคดเมียมในสารละลาย* (mg)			ปริมาณแคดเมียม (mg)	
	เริ่มต้น	หลังดูดซับ	ปริมาณที่ถูกดูดซับ		
1	0.1008	0.0081	0.0928	5.70×10^{-4}	0.61
3	0.0536	0.0074	0.0462	4.20×10^{-4}	0.91
5	0.0786	0.0022	0.0764	2.70×10^{-4}	0.35
10	0.1038	0.0005	0.1033	4.60×10^{-4}	0.45
30	0.0987	0.0004	0.0984	4.20×10^{-4}	0.43
60	0.0982	0.0003	0.0979	4.60×10^{-4}	0.47
90	0.1008	0.0005	0.1003	4.00×10^{-4}	0.40
120	0.0702	0.0004	0.0698	3.50×10^{-4}	0.50
180	0.0866	0.0003	0.0863	4.70×10^{-4}	0.54
240	0.0800	0.0003	0.0797	3.30×10^{-4}	0.41
1440	0.0978	0.0004	0.0974	4.40×10^{-4}	0.45

หมายเหตุ * ปริมาณแคดเมียมในสารละลายที่ผ่านการย่อย และปรับปริมาณเป็น 10 mL แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การคายซับด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5 %v/v

ตารางที่ ง- 14 ผลการคายซับด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5%v/v

ครั้งที่	ปริมาณแคดเมียม (mg)				สมดุลมวล		
	การดูดซับ	การคายซับ	เรซินที่ย่อย	% recovery	ปริมาณแคดเมียมเริ่มต้น (mg)	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (mg)	% การประกันคุณภาพ
1	0.093	0.061	0.031	65.59	0.093	0.092	98.81
2	0.100	0.052	0.028	52.00	0.100	0.080	79.77
3	0.096	0.059	0.043	61.46	0.096	0.102	105.85
เฉลี่ย	0.096	0.057	0.034	59.68	0.096	0.091	94.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้