

การบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียแบบคอลัมน์ ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก
ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

CADMIUM REMOVAL FROM WASTEWATER BY SPENT CATION
EXCHANGE RESIN COLUMN

นางสาวจิราพร ภูเขาจารย์
นางสาวณัฐธัญดา คำมณีวิชวงศ์
นางสาวอริสรา สวาทพงษ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียแบบคอลัมน์ ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก
ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

**CADMIUM REMOVAL FROM WASTEWATER BY SPENT CATION
EXCHANGE RESIN COLUMN**

นางสาวจิราพร ภูเขาจารย์
นางสาวณัฐธัญญา คำมณีวิชวงศ์
นางสาวอริสรา สวาทพงษ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

**CADMIUM REMOVAL FROM WASTEWATER BY SPENT CATION
EXCHANGE RESIN COLUMN**

MISS JIRAPORN POOSAJARN

MISS NATYADA KHAMMANEEWANITWONG

MISS ARISSARA SAWATPONG

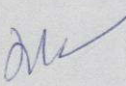

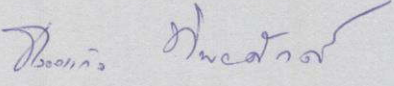
**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014**

หัวข้อโครงการพิเศษ การบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียแบบคอลัมน์ ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก
ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

CADMIUM REMOVAL FROM WASTEWATER BY SPENT CATION
EXCHANGE RESIN COLUMN

ชื่อนักศึกษา นางสาวจิราพร ภูษาจารย์
นางสาวณัฐธัญดา คำมณีวิชวงศ์
นางสาวอริสรา สวาทพงษ์
ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	
อ.กตินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียแบบคอลัมน์ ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก ที่ผ่านการใช้งานแล้ว		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจิราพร	ภูษาจารย์	รหัสนักศึกษา 54051057
	นางสาวณัฐชญา	คำมณีวิชวงศ์	รหัสนักศึกษา 54051103
	นางสาวอริสรา	สวาทพงษ์	รหัสนักศึกษา 54051147
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการบำบัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้คอลัมน์
บรรจุเรซินที่แลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent Resin, SR) และเรซินที่ผ่านการ
ฟื้นฟู (Regenerate Resin, RR) โดยใช้คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm. ศึกษาปัจจัยต่างๆ
ที่มีผลต่อการบำบัด ได้แก่ อัตราการไหล, ระดับความสูงของเรซิน และ จำนวนรอบในการใช้ซ้ำ
และหลังการฟื้นฟู ด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองพบว่า อัตราการ
ไหล 2.5 mL/min มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับอัตราการไหลอื่น ณ ความ
สูงเรซินที่ 13.5 cm เท่ากัน สามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น $10.50 \pm$
 0.18 mg/L ที่ประสิทธิภาพในการบำบัด 90% (Break Through, BT) สามารถบำบัดได้ถึง 3.3 L แต่
ถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพของน้ำทิ้งได้ตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงาน
อุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (2539) (Effective Point, EP) ที่กำหนดความเข้มข้นไม่เกิน
0.03 mg/L สามารถบำบัดได้ปริมาตร 1.63 L เมื่อแปรความสูงของเรซิน พบว่า ที่ระดับความสูง 17
cm. มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด ที่อัตราการไหล 2.5 mL/min สามารถบำบัดแคดเมียมไว้ได้
 19.388 ± 0.78 mg หลังการฟื้นฟูระบบสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ถึง 4 รอบ ในแต่ละรอบบำบัดตาม
เกณฑ์ EP ได้ 17.27 ± 0.79 , 16.50 ± 0.78 , 15.71 ± 0.00 และ 14.93 ± 1.35 mg ตามลำดับ

คำสำคัญ : แคดเมียม, เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว, การทดลองแบบคอลัมน์,
การฟื้นฟูสภาพเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว

Title CADMIUM REMOVAL FROM WASTEWATER BY SPENT CATION
EXCHANGE RESIN COLUMN

Students MISS JIRAPORN POOSAJARN
MISS NATYADA KHAMMANEEWANITWONG
MISS ARISSARA SAWATPONG

Degree Bachelor Chemistry

Major Program Environmental Chemistry

Academic Year 2014

Advisor Asst. Prof. Krongkaew Tipayasak

ABSTRACT

The purpose of this project was to removal Cadmium (Cd^{2+}) from the synthetic wastewater by column of spent cationic exchange resin (SR) and the regenerated resin (RR). Diameter of glass column were 2 cm. The parameters varied as following ; flow rate, resin height and the cycle after regenerate with hydrochloric acid. The experiments were done with 3 replicates. The results showed that the best effective flow rate was 2.5 mL/min compare with the others at 13.5 cm height. These was a removal efficiency 90% or break through (BT) for initial Cd^{2+} concentration 10.50 ± 0.18 mg/L, break through volume equal 3.3 L. However, as The Effluent Standard for Industrial and Industrial estate (B.E. 1996), Cd^{2+} should be less than 0.03 mg/L (effective point, EP), the removal volume decreased to 1.67 L. The results stated that the 17 cm height was the best for Cd^{2+} removing 19.39 ± 0.78 mg. After regenerate, column can be reused 4 cycles with EP criteria and the amount of Cd^{2+} each cycle were 17.27 ± 0.79 , 16.50 ± 0.78 , 15.71 ± 0.00 and 14.93 ± 1.35 mg, respectively.

Keyword: Cadmium removal, Spent cationic exchange resin, Column experiment

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาการทำโครงการพิเศษ เรื่องการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยบรรจุคอลัมน์นี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่านดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่คอยให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และได้บรมขจัดเกล้า แนะนำความรู้ในเชิงวิชาการและข้อคิดต่างๆ พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างมากเกี่ยวกับงานวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงตรวจแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นด้วยความเอาใจใส่ คณะผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท ทริท เคมีคอล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรซิน เพื่อใช้ในการศึกษาในการทำงานวิจัย และการทำการทดลองในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คณะผู้จัดทำได้เป็นส่วนหนึ่งของสถาบันศึกษานี้

ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และคอยเป็นแรงผลักดันทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณรุ่นพี่ และเพื่อนๆ ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นางสาวจิราพร ภูษาจารย์

นางสาวณัฏฐ์ญาดา คำมณีวิชวงศ์

นางสาวอริสรา สวาทพงษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VII
คำย่อและสัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เรซิน	3
2.1.1 การจำแนกประเภทของเรซิน	4
2.1.2 โครงสร้างและสมบัติทั่วไปของเรซิน	9
2.1.3 ความจุของไอออนเอ็กซ์เชนจ์	11
2.1.4 กฎของการเลือก	12
2.1.5 ผลของสารคอมเพลกซ์ซิงเอเจนต์	15
2.1.6 เทคนิคในการทำไอออนเอ็กซ์เชนจ์	18
2.1.7 วิธีการทำแบบคอลัมน์	19
2.1.8 เรซินที่นำมาใช้	22
2.2 แคลเมียม	24
2.2.1 สมบัติของแคลเมียม	24
2.2.2 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนัก	24
2.2.3 การนำแคลเมียมไปใช้ประโยชน์	26
2.2.4 ความเป็นพิษของแคลเมียม	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.5 โรคที่เกิดจากแคดเมียม	29
2.3 กระบวนการดูดซับ	37
2.3.1 ทฤษฎีการดูดซับ	37
2.3.2 กลไกการดูดซับ	38
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	38
2.4 น้ำเสีย	40
2.4.1 นิยามของน้ำเสีย	40
2.4.2 ลักษณะของน้ำเสีย	40
2.4.3 ประเภทของน้ำเสีย	41
2.4.4 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย	42
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	44
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์	51
3.1.1 สารเคมี	51
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	51
3.2 วิธีการทดลอง	52
3.2.1 การสุ่มตัวอย่างเรซิน	52
3.2.2 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน	52
3.2.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนัก	53
3.2.4 การศึกษาอัตราการไหลต่อการบำบัดแคดเมียม	54
3.2.5 การศึกษาความสูงของเรซินต่อการบำบัดแคดเมียม	55
3.2.6 การศึกษาจำนวนรอบในการใช้คอลัมน์เพื่อบำบัดแคดเมียม	55
3.2.7 การศึกษาความเป็นของเสียอันตรายของเรซินที่ใช้ในการบำบัดแคดเมียม	56
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 สมบัติทั่วไปของเรซิน	59
4.2 ผลของอัตราการไหล	62
4.3 ผลของความสูงเรซินที่บรรจุในคอลัมน์	65
4.4 ประสิทธิภาพของเรซินที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การฟื้นฟูสภาพเรซิน	69
บทที่ 5 สรุปลผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปลผลวิจัย	72
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารอ้างอิง	74
ภาคผนวก ก	77
ภาคผนวก ข	99
ภาคผนวก ค	101
ภาคผนวก ง	103

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลำดับความชอบไอออนของเรซินที่มีสารละลายโลหะหนักในน้ำ 1,000 PPM	14
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทั่วไป และสมบัติทางกายภาพ-เคมีของ เรซินที่นำมาใช้	23
ตารางที่ 2.3 สภาพการใช้งานของเรซิน	24
ตารางที่ 2.4 คิดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำ	31
ตารางที่ 2.5 ปริมาณแคลเซียมที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ	34
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคลเซียม	57
ตารางที่ 4.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน	60
ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดแคลเซียมที่อัตราการไหลต่าง ๆ ณ จุด BT	63
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดแคลเซียมที่อัตราการไหลต่าง ๆ ณ จุด EP	64
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดแคลเซียมที่ความสูงเรซินต่าง ๆ ณ จุด EP	67
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ณ จุด EP	69
ตารางที่ 4.6 ปริมาณแคลเซียมจากการฟื้นฟูเรซินด้วยน้ำกลั่น และกรดไฮโดรคลอริก 5%	70
ตารางที่ ก-1 อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดที่อัตราการไหล 2.5 mL/min	77
ตารางที่ ก-2 อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดที่อัตราการไหล 5 mL/min	80
ตารางที่ ก-3 อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดที่อัตราการไหล 7 mL/min	83
ตารางที่ ก-4 ความสูงเรซินต่อประสิทธิภาพในการบำบัดที่ความสูง 10 cm	86
ตารางที่ ก-5 ความสูงเรซินต่อประสิทธิภาพในการบำบัดที่ความสูง 17 cm	88
ตารางที่ ก-6 การล้างไอออนของโลหะหนักแคลเซียมครั้งที่ 1	90
ตารางที่ ก-7 การล้างไอออนของโลหะหนักแคลเซียมครั้งที่ 2	93
ตารางที่ ก-8 การล้างไอออนของโลหะหนักแคลเซียมครั้งที่ 3	95
ตารางที่ ก-9 การล้างไอออนของโลหะหนักแคลเซียมครั้งที่ 4	97
ตารางที่ ข-1 ปริมาณแคลเซียมในเรซิน	99
ตารางที่ ข-1 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2539)	100
ตารางที่ ง-1 การเทียบมาตรฐานของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.5 N	107

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเม็ดเรซิน	3
รูปที่ 2.2 การควบอณูระหว่าง styrene และ DVB	4
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเรซิน SC เมื่ออยู่ในสภาพที่แตกตัว	5
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเรซิน SC	5
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเรซิน SB	8
รูปที่ 2.6 ระยะห่างระหว่างประจุของเรซินกับประจุของไอออน	13
รูปที่ 2.7 การแยกโลหะทรานสิชันโดยใช้เรซินชนิดแอนไอออนเอ็กซ์เชนจ์	17
รูปที่ 2.8 Lewatit MonoPlus S108 (เรซินก่อนใช้งาน)	22
รูปที่ 2.9 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักที่พีเอชต่างๆ	25
รูปที่ 2.10 ผู้ป่วยโรคฮีไต-ฮีไต	29
รูปที่ 3.1 การคัดแยกเรซินประจุบวกและประจุลบ	51
รูปที่ 4. 1 การแยกของเรซินที่ผ่านการใช้งาน (Mixed Resin)	59

คำย่อและสัญลักษณ์

Cd	แคดเมียม
NR	เรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน (New Resin)
SR	เรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin)
RR	เรซินที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ (Regenerate Resin)
AAS	Atomic Absorption Spectrophotometer
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
v/v	ปริมาตรต่อปริมาตร
$\mu\text{S/cm}$	ไมโครซีเมนต่อเซนติเมตร
meq/g	มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม
cmol/g	เซนติโมลต่อกรัม
Ksp	ผลคูณของการละลาย (Solubility product)
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
qe	ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อสารดูดซับหนึ่งหน่วย
Ce	ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
Q°	ปริมาณของสารถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว
b	ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
X/m	ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ
kf และ n	ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
rpm	รอบต่อนาที
Protion,P	การแบ่งสารตัวอย่างออกเป็นส่วนๆ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่พบมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะในประเทศที่กำลังมีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม โลหะหนักที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำเพียงเล็กน้อยสามารถเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ในแหล่งน้ำได้ และเกิดการสะสมในสัตว์น้ำซึ่งจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ เมื่อนุชนำสัตว์น้ำนั้นไปบริโภค ตัวอย่างโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท สารหนู เป็นต้น โดยเฉพาะโลหะแคดเมียมซึ่งถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างกว้างขวาง เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และมีแนวโน้มก่อมลพิษทางสิ่งแวดล้อมสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงงานถลุงแร่ น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ อุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเป็นต้นเหตุทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติมีสารปนเปื้อนของโลหะแคดเมียมจำนวนมาก และอาจส่งผลทำให้เกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อมตลอดจนเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร แคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำ อาหาร เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมในกระเพาะอาหาร แล้วแพร่กระจายไปที่ตับ ม้าม และไต และสะสมเพิ่มขึ้นในปริมาณสูงทำให้เกิดมะเร็ง ไตทำงานผิดปกติ นอกจากนี้ ยังทำให้เกิดโรคความดันโลหิตสูง ปวดกระดูกสันหลัง แขนขา ซึ่งจะทำให้ไตพิการได้ โรคที่เกิดจากพิษของแคดเมียมเรียกว่า โรคอิไต-อิไต (ItaiItai disease) (พรพรรณ, 2549) จากผลกระทบดังกล่าว จึงควรมีการบำบัดแคดเมียมให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิต ตามที่มาตรฐานโรงงานกำหนด และเกณฑ์มาตรฐานปลอดภัยที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก กำหนดไว้ว่า คนปกติไม่ควรได้รับแคดเมียมเกินสี่ปดาห์ละ 0.40-0.50 มิลลิกรัม ปริมาณแคดเมียมสูงสุดในอาหารชนิดต่างๆ ที่กำหนดโดย EU COMMISSION REGULATION (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006

การบำบัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียมีได้หลายวิธี แต่งานวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษากระบวนการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยระบบคอลัมน์ โดยการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่ อัตราการไหล ความสูงของเรซิน และจำนวนรอบในการใช้คอลัมน์ซ้ำ ซึ่งการศึกษากำหนดการบำบัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent Cationic Resin, Lewatit MonoPlus S108) ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งวิธีบำบัดโลหะ

หนักโดยการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เป็นวิธีที่บำบัดโลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรม และเป็นการป้องกันการเกิดการตกค้างของมลพิษในสิ่งแวดล้อมอย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้วิธีแบบคอลัมน์
2. ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์
3. ศึกษาความสูงของเรซินที่เหมาะสมในการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์
4. ศึกษาจำนวนรอบในการใช้คอลัมน์ซ้ำเพื่อบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านเรซิน ที่อัตราการไหล 3 ค่า คือ 2.5, 5 และ 7 mL/min
2. ศึกษาความสูงของเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ เพื่อใช้ในการบำบัดแคดเมียมทั้งหมด 3 ค่า คือ 10, 13.5 และ 17 cm.
3. ศึกษาจำนวนรอบในการใช้คอลัมน์เรซินซ้ำในการบำบัดแคดเมียมทั้งหมด 4 รอบ
4. ศึกษาการฟื้นฟูเรซินโดยใช้สารคายซับกรดไฮโดรคลอริก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

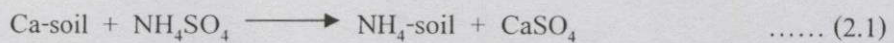
1. สามารถนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้
2. สามารถบำบัดโลหะหนักแคดเมียมออกจากน้ำเสียของระบบอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. สามารถลดมลพิษทางน้ำ และ รักษาคุณภาพแหล่งน้ำได้
4. การบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้คอลัมน์สามารถทำได้แบบต่อเนื่อง และสามารถบำบัดน้ำเสียได้ในปริมาณมากต่อครั้งในการบำบัด

บทที่ 2

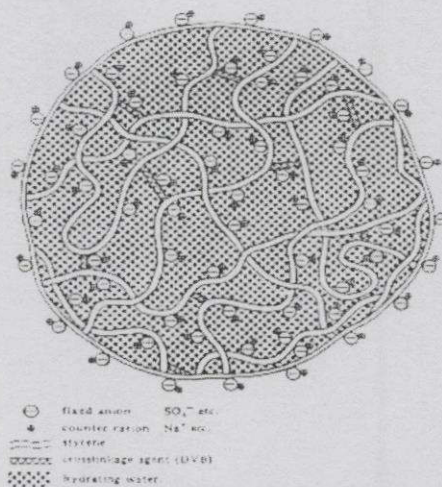
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เรซิน

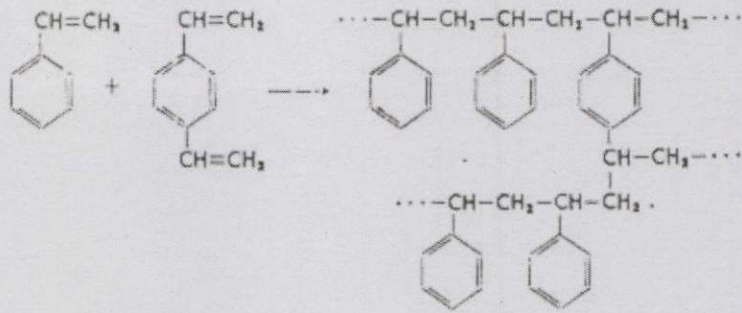
เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) ปี ค.ศ.1850 นักเคมีชาวอังกฤษชื่อทอมป์สันเป็นผู้ค้นพบปรากฏการณ์การแลกเปลี่ยนไอออนของดิน (ณรงค์, 2526) โดยการทำสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) ผ่านดิน ดินจะจับแอมโมเนียมไอออนไว้และได้แคลเซียมซัลเฟตแทนที่ดังสมการ



ต่อมาได้มีการใช้สารจำพวกซีโอไลต์ (Zeolite) หรือ Sodium aluminosilicate เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน แม้ในปัจจุบันจะเลิกใช้แล้วก็ยังเรียกชื่อสารอื่นที่ทำหน้าเดียวกันว่าซีโอไลต์ ในปี พ.ศ. 2487 มีการค้นพบวิธีการควบแน่นระหว่างสไตรีน (Styrene) โดย Divinylbenzene (DVB) เป็นตัวจับระหว่างโพลีสไตรีนเรียกว่า Crosslinkage เกิดเป็นเรซิน (Resin) ซึ่งมีเม็ดค่อนข้างกลม เรซินนี้จะมีประสิทธิภาพและความจุ (Capacity) หรือความสามารถในการจับไอออนต่างๆ สูงกว่าซีโอไลต์มาก เรซินที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้สามารถจับไอออนประจุลบได้ทุกชนิด แม้แต่ที่เป็นกรดอ่อน เช่น กรดซิลิสิลิก กรดคาร์บอนิก



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเม็ดเรซิน (ณรงค์, 2526)



รูปที่ 2.2 การควบอมูระหว่าง styrene และ DVB (ณรงค์, 2526)

ปริมาณร้อยละของ DVB ที่มีอยู่ในเรซิน เรียกว่า crosslinkage เรซินเมื่อแช่อยู่ในน้ำจะมีรูเล็กๆ เป็นโพรงอยู่ภายในมากมาย ไอออนจะแพร่เข้าไปสู่ภายในเรซินตามรูเล็กๆ เหล่านี้ ถ้ามีค่าเปอร์เซ็นต์ DVB สูงก็จะมีขนาดของรูเล็กเป็นตัวอย่าง โครงสร้างเรซินชนิดแลกเปลี่ยนประจุบวก ส่วนชนิดแลกเปลี่ยนประจุลบมีโครงสร้างแบบเดียวกันต่างกันที่หมู่ฟังก์ชันในการแลกเปลี่ยนเป็นประจุบวก

2.1.1 การจำแนกประเภทของเรซิน

ในปัจจุบันมีการจำแนกเรซินออกเป็น 4 ประเภทคือ

1. เรซินประจุบวกชนิดกรดแก่ ตัวย่อ SC (Strong acid cation)
2. เรซินประจุบวกชนิดกรดอ่อน ตัวย่อ WC (Weak acid cation)
3. เรซินประจุลบชนิดด่างแก่ ตัวย่อ SB (Strong base anion)
4. เรซินประจุลบชนิดด่างอ่อน ตัวย่อ WB (Weak base anion)

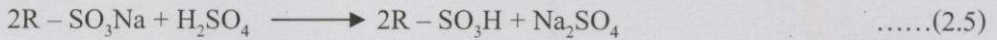
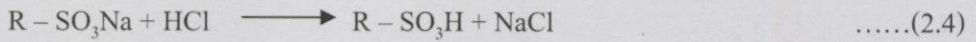
เรซินทั้งสี่แบบนี้จะมีหมู่ฟังก์ชันดังนี้

SC	$-\text{SO}^3$
WC	$-\text{COO}$
SB	$-\text{NR}^{+3}$
WB	$-\text{NH}_2, -\text{NHR}, \text{NR}_2$

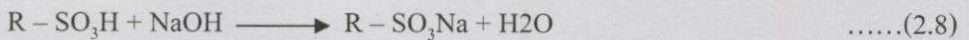
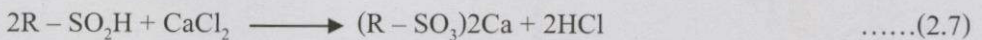
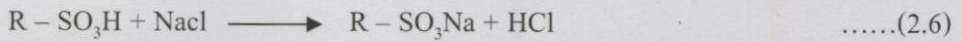
โครงสร้างหลักของเรซินทุกประเภทจะเหมือนกัน แตกต่างกันที่ชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่ติดอยู่กับเรซินเท่านั้น

- เรซินประจุบวก (Cation - exchange resin) ทำได้โดยให้มีหมู่ฟังก์ชัน $-\text{SO}_3\text{H}$ และ $-\text{COOH}$ ติดอยู่กับส่วนที่เป็นผิวของเรซิน ดังนั้น จะเขียนสูตรได้ในรูป $\text{R}-\text{SO}_3\text{H}$ หรือ $\text{R}-\text{COOH}$ ได้ เมื่อเรซินอยู่ในน้ำแตกตัวได้ดังนี้

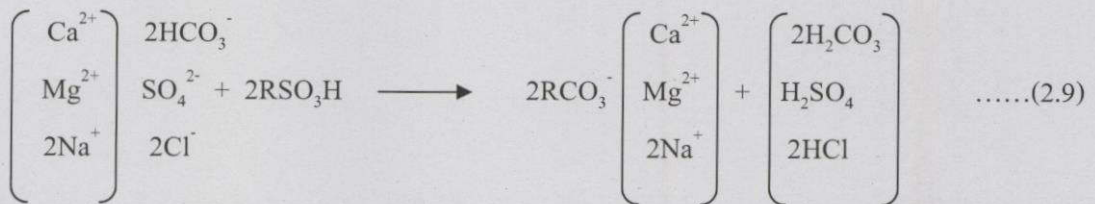
ถ้านำเรซินที่อยู่ในรูป $R-SO_3Na$ ใสลงในสารละลายของกรดเกลือหรือกรดกำมะถัน จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ดังนั้น เพื่อให้การล้างเรซินมีประสิทธิภาพสูงก็ต้องให้เรซินได้สัมผัสกับกรดใหม่อยู่เสมอ วิธีล้างที่ดี คือ ให้กรดไหลผ่านชั้นเรซินที่บรรจุอยู่ในรูปทรงกระบอก เรซินจะถูกฟื้นฟูสภาพกลายเป็น $R-SO_3H$ และล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากไอออนประจุบวก ถ้านำสารละลายที่มีเกลืออนินทรีย์และด่างไหลผ่านเรซินจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

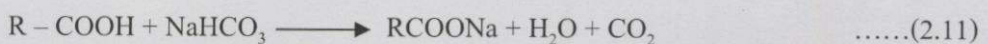
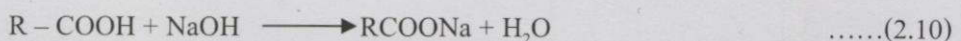


ถ้าใช้กรดล้างเรซินชนิด SC แล้วเรซินนี้จะจับไอออนประจุบวกเกือบทุกชนิดที่มีอยู่ในน้ำได้

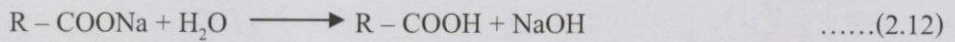


เรซิน SC ถ้าใช้ในการจับไอออนประจุบวกเรียกว่าเป็นวัฏจักรไฮโดรเจน(Hydrogen cycle) ถ้าจับไอออนของความกระด้างเพื่อทำน้ำอ่อน(Softening) แต่เพียงอย่างเดียวเรียกว่าวัฏจักรแคลเซียม(Calcium cycle)

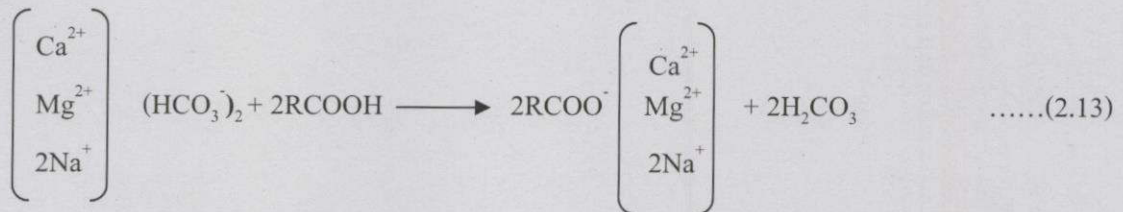
เรซินชนิดกรดอ่อนประจุบวก หรือ WC เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชัน $-COOH$ ซึ่งเป็นกรดอ่อน จึงไม่สามารถจับไอออนประจุบวกของเกลืออนินทรีย์ แต่แลกเปลี่ยนไอออนกับด่างโซดาไฟหรือเกลือของกรดอ่อนได้ เช่น $NaHCO_3$



คุณลักษณะที่ดีของเรซินชนิด WC คือ พื้นฟูประสิทธิภาพให้อยู่ในรูปเดิม (รูปที่มี H) ได้ง่าย และในการฟื้นฟูก็ต้องการปริมาณกรดน้อยกว่าแบบ SC มากพอควร แต่มีข้อเสียก็คือปลดปล่อยไอออนที่จับไว้ได้โดยง่าย เช่น การที่มีน้ำไหลผ่านก็จะปล่อยไอออน โซเดียมออกมา

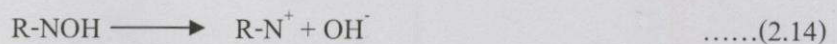


ถ้าหากใช้เรซินชนิด WC ในรูปวัฏจักรไฮโดรเจนแล้ว จะจับไอออนประจุบวกที่อยู่ในรูปความเป็นค่าได้

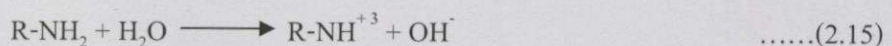


เรซินชนิด WC จะใช้งานที่ pH ต่ำกว่า 5.0 ไม่ได้ เพราะไม่สามารถจับไอออนได้ตามปกติ ดังนั้นการใช้เรซิน WC ก็เพื่อการประหยัดกรดในการล้างและลดปริมาณน้ำทิ้ง ส่วนใหญ่ใช้ในการทำน้ำอ่อนและลดความเป็นค่า (Dealkalization)

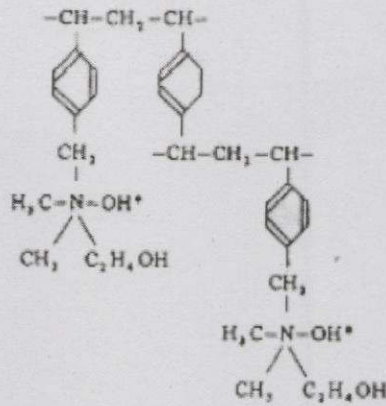
- **เรซินประจุลบ (Anion - exchange resin)** เป็นเรซินที่ใช้จับไอออนประจุลบได้ โครงสร้างจะมีหมู่ฟังก์ชัน quaternary ammonium, $-\text{NH}_2$, NHR และ $-\text{NR}_2$ ติดอยู่กับโครงสร้างของเรซิน เขียนสูตรในรูป $\text{R}-\text{NOH}$ ซึ่งเมื่ออยู่ในน้ำจะมีปฏิกิริยาแตกตัวดังนี้



เรซินแบบ SB จะมีหมู่ฟังก์ชันพวก quaternary ammonium ซึ่งจะมีปฏิกิริยาแตกตัวได้ที่ pH ทุกช่วง แต่ถ้าเป็น WB จะมีหมู่ฟังก์ชัน primary amine ไปจนถึง tertiary amine เช่น $\text{R}-\text{NH}_2$ ซึ่งจะแตกตัวดังนี้

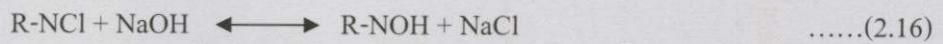


แต่ถ้าอยู่ในสารละลายที่มีสภาพเป็นค่าจะไม่แตกตัว และไม่สามารถจับหรือแลกเปลี่ยนไอออนได้

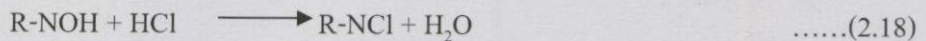
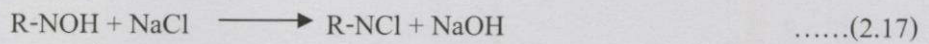


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเรซิน SB แบบหนึ่ง (ณรงค์, 2526)

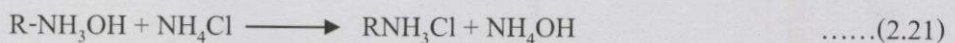
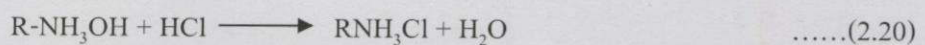
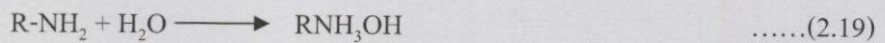
เรซินแบบ SB ที่ใช้จะขายในรูปของคลอไรด์ (R-NCl) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ทั้งนี้เพราะมีเสถียรภาพสูงกว่า ในการใช้งานซึ่งต้องใช้ในรูป R-NOH ก็ต้องล้างหรือฟื้นฟูประสิทธิภาพของเรซินด้วยด่างโซดาไฟก่อน



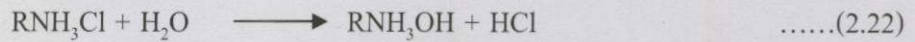
ถ้านำเรซินชนิด SB ใต้งในสารละลายของเกลือแอมโมเนียมหรือกรดเกลือจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



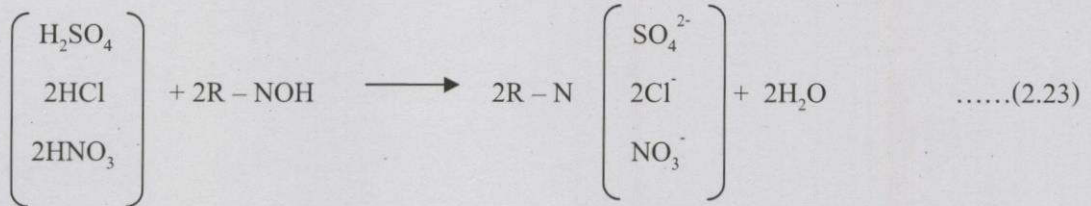
เรซินชนิด WB จะแตกตัวและจับไอออนได้ ในสารละลายที่เป็นกรด สามารถแลกเปลี่ยนไอออน กับกรดเกลือ กรดกำมะถัน และเกลือของด่างอ่อน เช่น NH_4Cl แต่ไม่สามารถจับคลอไรด์ใน NaCl ได้



การล้างเรซินชนิดนี้ทำได้ง่าย ถ้าไม่ใช้ด่างโซดาไฟจะใช้โซดาแอชและน้ำแอมโมเนีย (NH_4OH) ล้างก็ได้ แม้ว่าจะล้างได้ง่ายแต่ก็ทำปฏิกิริยากับน้ำป่่อยไอออนที่จับไว้ได้ง่ายเช่นกัน



เรซินชนิด WB ใช้จับไอออนประจุลบของกรดแก่ หรือ FMA (free mineral acid) ได้



เรซินชนิดนี้จะไม่จับไอออนของกรดอ่อน เช่น กรดคาร์บอนิก กรดซิลิสิก ในการใช้งานจะใช้คู่กับ SB เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการล้างฟื้นฟูประสิทธิภาพของเรซินและดักจับสารอินทรีย์ทั้งหลายไม่ให้ไปอุดตันเม็ดเรซิน SB และใช้ในงานที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และซิลิกาไม่มีความสำคัญมากนัก (ณรงค์, 2526)

จากชนิดต่างๆ ของเรซินที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการแบ่งตามความประพติของเรซินที่เกิดจากธรรมชาติของหมู่ฟังก์ชัน คือ ถ้าหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดจะเป็นแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์เรซิน ถ้าหมู่ฟังก์ชันเป็นเบสจะเป็นแอนไอออนเอ็กซ์เชนจ์เรซิน เรซินที่แบ่งไว้เป็นพวกเดียวกันตามหมู่ฟังก์ชันนี้ยังมีความประพติแตกต่างกันออกไปได้อีก สิ่งที่มีผลทำให้เรซินมีความประพติต่างๆ กัน ได้แก่

1. ขนาดของเรซิน (Size of particles) มีผลต่ออัตราเร็วในการแลกเปลี่ยนไอออนและ การซึมผ่านของสารละลายออกจากคอลัมน์
2. การเกิดพันธะเชื่อมขวาง (Degree of cross-linking) จะมีผลทำให้เรซินมีความแข็ง มีการพองตัว และมีขนาดรู (Porosity) ต่างๆ กัน
3. ความแรงของหมู่ฟังก์ชัน (Strength of functional group) มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายของไอออน ระหว่าง เรซินกับสารละลาย
4. จำนวนของหมู่ฟังก์ชัน (Number of functional group) มีผลทำให้เรซินมีขนาดความจุต่างๆ กัน

2.1.2 โครงสร้าง และสมบัติทั่วไปของเรซิน

โครงสร้างของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินจะมีโครงสร้างคล้ายร่างแหตาข่ายสามมิติโดยมีกลุ่มไอออนที่มีประจุตามตำแหน่งต่างๆ บน ตาข่าย เรียกว่า Matrix ส่วนหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าที่มีบนตำแหน่งต่างๆ ของตาข่าย เรียกว่า หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เพื่อให้เกิดความสามารถในการ

แลกเปลี่ยนไอออนบนเรซิน ดังนั้นเรซินควรมีคุณสมบัติดังนี้

โครงสร้างของเรซิน (Structure)

โครงสร้างของเรซินเป็นส่วนที่ทำให้มันมีรูปร่างเป็นอย่างไรที่ปรากฏ และรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำ และไม่แตกหักง่าย โครงสร้างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก และชนิดเดียวกันซึ่งต่อกันเป็นสายยาว และมีไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่เชื่อมขวางเพื่อให้เกิดเป็นรูปสามมิติที่มีความโปร่งหรือความพรุน ความโปร่งหรือความพรุนของเรซินขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมขวาง (Degree of Crosslinkage) ซึ่งวัดได้จากปริมาณของสารเชื่อมขวางที่ใช้ ถ้าปริมาณของสารเชื่อมขวางมาก โครงสร้างของเรซินจะแข็งและทึบ แต่ถ้าปริมาณของสารเชื่อมขวางน้อย โครงสร้างของเรซินจะอ่อนและโปร่ง

ความชื้นของเรซิน (Moisture Content)

ความสามารถในการเก็บกักน้ำไว้ในตัวเรซิน มีความสำคัญต่ออำนาจการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินที่มีความชื้นสูงจะเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้มาก และถ้ามีช่องว่างน้อยจะทำให้มีความชื้นต่ำ ความสามารถในการเก็บกักน้ำจะแสดงให้เห็นได้จากการบวม หรือพองน้ำของเรซิน เมื่อวางแช่อยู่ในน้ำ การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านเข้า และออกจากช่องว่างเรซินเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากทำให้ไอออนต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ สามารถซึมผ่านเข้าไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอิสระของเรซิน ระดับการบวมน้ำขึ้นอยู่กับระดับของการเชื่อมขวางของโครงไฮโดรคาร์บอนซึ่งทำให้เรซิน มีลักษณะเป็นเม็ดแข็ง ถ้าไฮโดรคาร์บอนยึดเหนี่ยวไม่แน่นช่องว่างก็จะมามาก จึงสามารถเก็บน้ำได้มาก ทำให้เรซินมีความชื้นสูง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจึงต่ำ ในทางตรงกันข้ามถ้าเรซินมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรคาร์บอนสูง ก็จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนสูง ความชื้นจะน้อย แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวสูงเกินไปจะทำให้ช่องว่างในเรซินเหลือน้อย ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากไอออนอิสระไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าออกได้อย่างสะดวก และยังอาจทำให้เรซินแตกได้ง่าย ความชื้นของเรซินมีประโยชน์สำหรับใช้เป็นพารามิเตอร์ในการตรวจสอบระดับการเชื่อมขวางของโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของเรซิน

ความหนาแน่นของเรซิน (Density)

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

ขนาดของเม็ดเรซิน (Particle Size)

คุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของเรซิน ได้แก่ Head loss ในขณะการแลกเปลี่ยนไอออน และการขยายตัวของชั้นเรซิน ในขณะล้างน้อยมีความสัมพันธ์โดยกับขนาดของเม็ดเรซินขนาดประมาณ 0.04-1.00 mm และสามารถบอกได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size) และสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient) ของเรซินในขณะแห้ง และเปียก ปริมาตรจะไม่เท่ากัน เนื่องจากขนาดเรซินไม่เท่ากัน เกิดจากการบวมตัวของเรซิน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณ ความชื้น ระดับการเชื่อมขวาง (Degree of Crosslinking) และปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน

การบวมตัวของเรซิน (Swelling)

เรซินที่ทำจากสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์มีความสามารถในการดูดน้ำหรือของเหลวรอบตัว มันได้ และทำให้เรซินขยายตัวหรือบวมขึ้น การบวมตัวของเรซินนั้นเกิดจากการไฮเดรชัน (Hydration) ของหมู่ฟังก์ชันที่ยึดติดกับโครงร่าง และไอออนอิสระ และเกิดจากความดันออสโมติก (Osmotic Pressure) การไฮเดรชันของไอออนแต่ละชนิดจะแตกต่างกันโดยไอออนที่มีขนาดเล็ก หรือเรียกว่า เมื่อเรซินแห้ง จะมีขนาดใหญ่เมื่อเกิดการไฮเดรชัน ถ้าบรรจุไอออนที่มีขนาดใหญ่ หรือขณะไฮเดรชัน ก็จะมีการบวมตัวสูง เช่นเดียวกับเรซินที่อยู่ในสารละลายเจือจาง เรซินจะบวมตัว เพื่อพยายามลดความเข้มข้นภายในตัวเพื่อให้เกิดความสมดุลกับภายนอก ในทางตรงกันข้ามเรซิน จะหดตัวเมื่อสารละลายภายนอกมีความเข้มข้นกว่าภายใน

2.1.3 ความจุของไอออนเอ็กซ์เชนจ์ (Ion exchange capacity)

เนื่องจากเรซินสามารถแสดงคุณสมบัติต่างๆ กันได้มากมาย จึงจำเป็นต้องมีสิ่งที่สามารถแสดงคุณลักษณะของเรซินได้ สิ่งที่แสดงคุณลักษณะ (Characterization) ของเรซิน คือ ขนาดของความจุและความแรงของหมู่กรดและเบส การหาความจุจำเพาะของเรซินตามทฤษฎี คือ หาจำนวนหมู่ฟังก์ชันของกรดและเบสที่มีอยู่ใน 1 กรัมของเรซินที่แห้ง การหาความจุจำเพาะในทางปฏิบัติคือ หาจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้จริงๆ ในสภาวะของการทดลองนั้นๆ หรือหาจำนวนมิลลิกรัมสมมูลของไอออนที่สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนของเรซินใน 1 กรัมของเรซินที่แห้งในทางปฏิบัติ ตามปกติค่าความจุในทางปฏิบัติจะน้อยกว่าค่าความจุทางทฤษฎี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ โครงสร้างและส่วนประกอบของเรซินและสารละลาย ที่ต้องการแลกเปลี่ยนไอออน ในทางการค้าจะผลิตเรซินที่มีความจุจำเพาะในทางปฏิบัติในช่วง 1 ถึง 10 มิลลิกรัมสมมูลต่อเรซินที่แห้ง 1 กรัม

ในการทดลองจำเป็นต้องทราบความจุของเรซิน มิฉะนั้น จะทำให้บรรจุเรซิน ลงในคอลัมน์ไม่เพียงพอแก่การแลกเปลี่ยนไอออน หรือ มากเกินไปโดยไม่จำเป็น วิธีการตรวจสอบความจุของเรซินทำได้โดยชั่งเรซินให้ทราบน้ำหนักแน่นอนบรรจุในคอลัมน์ และเปลี่ยนเรซินทั้งหมดให้

อยู่ในรูปของไฮโดรเจน สำหรับเรซินชนิดแลกเปลี่ยนแคทไอออนชนิดกรดแก่ หลังจากนั้นผ่านสารละลายเกลือแกงลงไปจนกระทั่งเรซินอยู่ในรูปของโซเดียมทั้งหมด นำสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ซึ่งมี H^+ หลุดออกมา มาทำการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วคำนวณหาจำนวนมิลลิกรัมสมมูลของ H^+ ที่ได้ทั้งหมด จะทำให้ทราบความจุจำเพาะในทางปฏิบัติของเรซิน ถ้าเป็นเรซินชนิดแลกเปลี่ยนแอนไอออนให้เปลี่ยนเรซินให้อยู่ในรูปของคลอไรด์ทั้งหมดก่อน จากนั้นผ่านเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนกระทั่ง ถูกแลกเปลี่ยนด้วย OH^- นำ Cl^- ที่ได้ไปไทเทรตหาปริมาณโดยวิธีตกตะกอน แล้วคำนวณหาปริมาณมิลลิกรัมสมมูลของคลอไรด์ที่ถูกแลกเปลี่ยน

สำหรับการหาความจุของแคทไอออน และ แอนไอออนเอ็กซ์เชนจ์เรซิน ต้องคำนึงถึง pH ของสารละลายด้วย เพราะเรซินชนิดนี้จะแลกเปลี่ยนได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับ pH ในกรณีของ แคทไอออนเรซินชนิดอ่อนต้องหาความจุเมื่อสารละลายมี pH สูงกว่า 9 และ ในกรณีของ แอนไอออนเรซินชนิดอ่อนต้องหาความจุเมื่อสารละลายมี pH ต่ำกว่า 5

มีเทอมที่ใช้สำหรับแสดงคุณลักษณะของเรซินอีกเทอมหนึ่ง เรียกว่า Loading (L) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของไอออนของสารตัวอย่างที่มีอยู่ในเรซินต่อความจุของเรซิน

$$L = \frac{n[MR_n]}{C} \quad \dots\dots(2.24)$$

n คือ ประจุของไอออน Mn^+

$[MR_n]$ คือ ความเข้มข้นของ Mn^+ ในเรซิน

C คือ ความจุของเรซิน ซึ่งหมายถึงจำนวนมิลลิกรัมสมมูลของไอออนต่อเรซินที่แห้ง 1 กรัม

2.1.4 กฎของการเลือก (Selectivity rules)

ไอออนเอ็กซ์เชนจ์โครมาโตกราฟีสามารถแยกไอออนหรือโมเลกุลได้เนื่องจากประจุ ไอออนหรือโมเลกุลที่มีประจุต่างชนิดกันจะใช้เวลาอยู่ในคอลัมน์ได้ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบ 3 ชนิด ที่อยู่ภายในคอลัมน์ คือ

1. ชนิดของเรซินว่าเป็นชนิดใด เช่น โพลีสไตรีน + ไคไวนิลเบนซีน หรือ อะครีเลต + ไคไวนิลเบนซีน ฯลฯ

2. ชนิดของหมู่ฟังก์ชัน เช่น เป็นหมู่ของกรดหรือหมู่ของเบส

3. เฟสเคลื่อนที่ (Eluent) ถ้าตัวชะมีประจุตรงข้ามกับหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดึงดูดกันได้ดี จะทำให้ไอออนของสารตัวอย่างที่อยู่ในคอลัมน์ถูกแลกเปลี่ยนและถูกชะออกจากคอลัมน์ได้

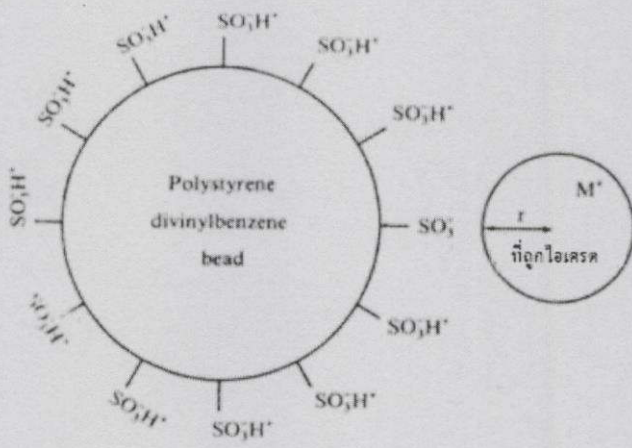
เริ่มต้นเมื่อผ่านสารตัวอย่างผสมลงในคอลัมน์ โมเลกุลของสารตัวอย่างที่เป็นกลางหรือ มีประจุเหมือนกับหมู่ฟังก์ชันนอล จะไม่ถูกกักไว้ในคอลัมน์ สามารถเดินทางออกจากคอลัมน์ได้ ด้วยการ

พาของเฟสเคลื่อนที่ ส่วน โมเลกุลที่มีประจุตรงข้ามกับหมู่ฟังก์ชันนอล จะถูกกักไว้ในคอลัมน์ โดยการแลกเปลี่ยนไอออนกับแคตไอออนของเรซิน ถ้าต้องการให้โมเลกุลของสารตัวอย่างถูกอีลิวต์ออกจากคอลัมน์ ต้องใช้สารละลายที่มีความแรง (Ionic strength) และ pH ที่ เหมาะสมเป็นตัวอีลิวต์ ถ้าสารตัวอย่างมีโมเลกุลที่มีประจุ หรือ ไอออนตรงข้ามกับหมู่ฟังก์ชันนอลหลายตัว โมเลกุลหรือไอออนเหล่านั้นสามารถถูกดึงดูดไว้ในคอลัมน์ได้ทุกตัว แต่ความสามารถในการดึงดูดคิ่งคูดนั้นไม่เท่ากัน สามารถใช้กฎของคูลอมบ์ทำนายแรงที่ดึงดูดกันไว้ระหว่างเรซินกับ ไอออนของสารตัวอย่างได้ดังนี้

$$F \propto \frac{q_- q_+}{r^2} \propto \frac{q(\text{ion})q(\text{resin})}{r^2} \dots\dots(2.24)$$

- q (ion) คือ ประจุของไอออน
- q (resin) คือ ประจุของเรซิน
- r คือ ระยะห่างของประจุทั้งสอง

ถ้าประจุของไอออนได้จากการวัดที่จุดศูนย์กลางของไอออนที่ถูกไฮเดรตจะได้ระยะ r คือ รัศมีของไฮเดรตไอออนนั่นเอง เพราะประจุของเรซินจะอยู่ที่ด้านนอกสุดของเรซินดังในรูปที่ 2.6

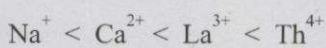


รูปที่ 2.6 ระยะห่างระหว่างประจุของเรซินกับประจุของไอออน (โสภา, 2548)

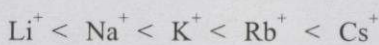
ตามรูปที่ 2.6 M⁺ เข้าแลกที่กับ H⁺ ได้เมื่อแรงดึงดูดระหว่าง M⁺ กับเรซินมีค่า มากกว่า H⁺ กับเรซิน ซึ่งแรงดึงดูดนี้เป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ แสดงว่าเรซินแต่ละชนิดมีความสามารถในการดึงดูดไอออนที่มีประจุตรงข้ามได้หมดทุกตัว แต่ความสามารถแตกต่างกัน เช่น เรซินชนิดแคทไอออน

สามารถดึงดูด หรือ แลกเปลี่ยนแก๊สไอออนได้หมดทุกตัว ไม่สามารถเตรียมเรซินที่แลกเปลี่ยนไอออนได้เฉพาะเจาะจงตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากไอออนแต่ละตัว มีความสามารถในการดึงดูด หรือ แลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 3 ชนิดที่กล่าวมาข้างต้น จึงสามารถควบคุมสถานะของการทดลองเพื่อให้ไอออน ต่างๆ มีความประพฤติตามที่ต้องการได้ สรุปกฎเกณฑ์ต่างๆ ไป สำหรับควบคุมความประพฤติของไอออนในการแลกเปลี่ยนกับไอออนของเรซินได้ดังนี้

1. ในสารละลายของน้ำที่มีความเข้มข้นของไอออนต่ำๆ ไอออนที่มีประจุสูงกว่าจะ แลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้ดีกว่า ดังนั้น ไอออนที่มีประจุเป็นไตรวาเลนต์สามารถแลกเปลี่ยนตัวอย่างความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเรียงลำดับจากน้อยไปหามากได้ ดังนี้



2. สำหรับไอออนที่มีประจุเท่ากันในสารละลายของน้ำที่มีความเข้มข้นต่ำ ไอออนที่ถูกโมเลกุลของน้ำเข้าไปไฮเดรตได้น้อยกว่า จะแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้ดีกว่า ตามตารางสรุปว่า ไอออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะถูกไฮเดรตได้ดีกว่า ดังนั้น ไอออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าจะแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้ดีกว่า



3. เรซินที่มีองศาการเชื่อมโยง (Degree of cross-linking) ต่างๆ กัน จะทำให้เกิดการเลือกได้ เรซินที่มี cross-linkage สูง จะมีการพองตัวน้อย มีรูขนาดเล็ก โดยทั่วไปเรซินที่มีรูขนาดเล็กจะใช้กับไอออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และเรซินที่มีรูขนาดใหญ่จะใช้กับไอออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

4. สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงๆ ความแตกต่างของการเลือกไอออนที่มีประจุ ต่างกันจะลดลง และในบางกรณีไอออนที่มีประจุต่ำ จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้สูงขึ้น เช่น $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$ เมื่อความเข้มข้นของ Na^+ สูงกว่า Ca^{2+} มากๆ

ตารางที่ 2.1 ลำดับความชอบไอออนของเรซินที่มีสารละลายโลหะหนักในน้ำ 1,000 ppm

ไอออนบวก	ไอออนลบ	ลำดับความชอบ
Fe^{3+}	CO_3^{2-}	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="margin-right: 10px;">มากที่สุด</div> <div style="flex-grow: 1; border-left: 1px solid black; position: relative;"> <div style="position: absolute; top: -10px; left: 50%; transform: translate(-50%, -50%);">↑</div> </div> <div style="margin-left: 10px;">น้อยที่สุด</div> </div>
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^+		

ที่มา : เกศสุชา, 2537

2.1.5 ผลของสารคอมเพลกซ์ซิงเอเจนต์ (Effect of complexing agents)

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนจะมีผลทำให้สมดุลของการแลกเปลี่ยนไอออนเปลี่ยนไป เพราะการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมีผลทำให้ประจุของไอออนที่เป็นตัวแลกเปลี่ยน เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ หรือ ถ้าเติมลิแกนด์ชนิดที่มีโมเลกุลเป็นกลาง ประจุของไอออนจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน แต่จะทำให้สมดุลของการแลกเปลี่ยนเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ตัวอย่างนี้ ได้แก่ การผ่านสารละลายของโลหะไอออนบางตัวลงในคอลัมน์ ไอออนของโลหะนี้เมื่ออยู่ในสารละลายของน้ำจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลของน้ำ (Aquo complex) ซึ่งไม่ทำให้ประจุของไอออนเปลี่ยนแปลง หรือถ้าเติมคอมเพลกซ์ซิงเอเจนต์ที่ไม่มีประจุ เช่น NH_3 ลงไปในสารละลายของไอออน จะไม่ทำให้ประจุของไอออนเปลี่ยนแปลงเช่นกัน การ

แลกเปลี่ยนไอออนก็ยังคงเกิดขึ้นได้เหมือนเดิม แต่สมดุลของการแลกเปลี่ยนจะเปลี่ยนไป เนื่องจากเกิดความแตกต่างทางความประพฤติกของไอออนกับสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ จะคงที่สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนชนิดหนึ่งๆ การคำนวณหาค่าสมดุลของการแลกเปลี่ยนสามารถทำได้เมื่อทราบความเข้มข้นของโลหะไอออน ซึ่งสามารถคำนวณได้ โดยพิจารณาจากเศษส่วนของไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย (α_M) เช่นเดียวกับผลของ pH

$$\alpha_M = \frac{[M^+]}{C_M} \quad \dots\dots(2.25)$$

$$\therefore [M^+] = \alpha_M C_M = \alpha_M ([M^+] + [M(NH_3)^+] \dots + [M(NH_3)_n^+])$$

$$\text{โดยที่ } \alpha_M = \frac{1}{1 + K_1[NH_3] + K_1K_2[NH_3]^2 + \dots + K_1K_2 \dots K_n[NH_3]^n}$$

$$\text{จะได้ } D^M = K_d^M \alpha_M = Q_H^M \frac{[HR]}{[H^+]} \quad \dots\dots(2.26)$$

เมื่อเรซินอยู่ในรูปของ H^+

$$\text{และได้ } D^M = K_d^M \alpha_M = Q_{Na}^M \frac{[HR]}{[Na^+]} \quad \dots\dots(2.27)$$

เมื่อเรซินอยู่ในรูปของ Na^+

ในกรณีนี้ถ้าคอมเพลกซิงเอเจนต์เป็นสารที่แรง คือทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดี α_M จะมีค่าน้อยมีผลทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนมีประสิทธิภาพลดลง

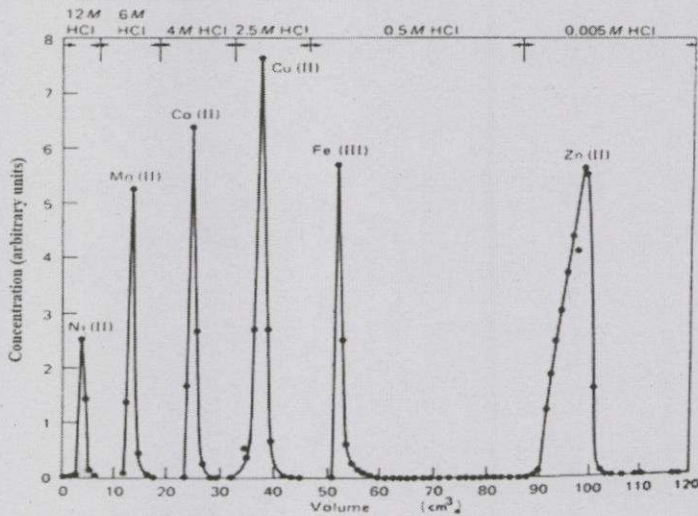
การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก คือ เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุตรงข้ามกับไอออนที่มีอยู่เดิม เช่น ไอออนของโลหะ M^{n+} เมื่อเกิด สารประกอบเชิงซ้อนกับ EDTA (Y^{4-}) จะให้สารประกอบเชิงซ้อน $MY^{(4-n)-}$ ซึ่งมีประจุตรง ข้ามกับ M^{n+} ในกรณีเช่นนี้ ถ้าใช้เรซินชนิดแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์ การคำนวณหาค่าอัตราส่วนของการกระจาย และสมดุลของการแลกเปลี่ยนคิดได้แบบเดียวกับการใช้คอมเพลกซิงเอเจนต์ที่ไม่ทำให้ประจุของโลหะไอออนเปลี่ยนแปลง (คิดจากสมการที่ 2.27) ซึ่งจะพบว่า การแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นน้อยมากจนเกือบไม่มีเลยหรือเป็นศูนย์ แต่ถ้าพิจารณาว่าในสารละลายส่วนใหญ่มีไอออนที่เป็นประจุลบ ดังนั้น จึงใช้แอนไอออนเอ็กซ์เชนจ์เรซินในการแลกเปลี่ยน เราสามารถพิจารณาค่าสมดุลของการแลกเปลี่ยนและอัตราส่วนของการกระจายได้ ดังนี้ (สมมติให้ประจุของโลหะ คือ +2 เกิดสารประกอบเชิงซ้อน และเรซินที่ใช้อยู่ในรูปของคลอไรด์)

$$D^M = K_d^M \alpha_{MY} = \frac{[R_2(MY_2^-)]}{C_{MY}} = Q_{2Cl}^{MY} \frac{[RCl]^2}{[Cl]^{-2}} \quad \dots\dots(2.28)$$

C_{MY} คือ ความเข้มข้นรวมของ M^{2+} ($[M^{2+}] + [MY_2^-]$)

$$\alpha_{MY} = \frac{[MY]}{[M^{2+}] + [MY_2^-]}$$

การแลกเปลี่ยนสามารถเกิดได้ดีเมื่อคอมเพลกซิงเอเจนต์เป็นสารที่แรงซึ่งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรกับ M^{2+} คือมีค่า K_f สูงๆ จะเห็นว่ามีผลตรงกันข้ามกับการใช้ แคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์เรซิน วิธีการทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้สารคอมเพลกซิงเอเจนต์ทำให้เกิดประจุตรงข้ามจะสามารถทำการชะไอออนของโลหะต่างๆ ให้แยกออกจากกันได้ดีโดยควบคุมความเข้มข้นของสารคอมเพลกซิงเอเจนต์ โลหะบางกลุ่ม เช่น พวกแรรี่เอิร์ท และพวกโลหะทรานสิชันบางตัว เมื่อทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์เรซิน พบว่า การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้นได้ไม่ดี ทั้งนี้ เป็นเพราะว่าสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ โมเลกุลของน้ำ การแลกเปลี่ยนสามารถทำได้ดีขึ้น โดยทำให้โลหะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุตรงข้ามกับโลหะโดยใช้คอมเพลกซิงเอเจนต์พวกคลอไรด์ โบรไมด์ หรือฟลูออไรด์ การขสามารถทำได้โดยควบคุมความเข้มข้นของคอมเพลกซิงเอเจนต์ ดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การแยกโลหะทรานสิชันโดยใช้เรซินชนิดแอนไอออนเอ็กซ์เชนจ์ Dowex-1 ขนาดของคอลัมน์ 26 cm. x 0.29 cm. อัตราการไหล 0.5 cm./min (Kraus and G.E. Moore, 1953)

การแยกไอออนของโลหะในสารละลายของกรดเกลือสามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ได้เป็นอย่างดี นักเคมีชื่อ Kraus และผู้ร่วมงานได้ศึกษาความสามารถในการถูกดูดซับ หรือแลกเปลี่ยน ไอออนระหว่างสารละลายที่มีความเข้มข้นของ HCl ต่างๆ กัน ทำให้ทราบความสามารถ และ ลักษณะเคอร์ฟของการแลกเปลี่ยนธาตุหมู่ต่างๆ ที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของคลอไรด์ กับแอนไอออนเอ็กซ์เซนจ์เรซินในของโลหะต่างๆ ซึ่งได้แสดงเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจาย (Kd) โลหะบางตัวสามารถดูดซับ ไว้ที่เรซินได้ดี เมื่อมีความเข้มข้นของ HCl สูง บางตัวถูกดูดซับไว้ได้ดีเมื่อมีความเข้มข้นของ HCl ต่ำ เราสามารถจัดประเภทหรือกลุ่มของโลหะที่มีความประพฤติต่างกันไว้ได้ 4 กลุ่ม คือ

ก. ประเภทของโลหะที่ไม่สามารถถูกดูดซับไว้ที่เรซินได้เลยในสารละลายของกรดเกลือ หรือได้ก็น้อยมาก โลหะประเภทนี้จะไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับคลอไรด์ไอออน

ข. ประเภทที่สามารถถูกดูดซับไว้ได้เล็กน้อยในสารละลายที่มีความเข้มข้นของ HCl สูงๆ ได้แก่ กลุ่ม IV A ในตารางธาตุ และไอออนอื่นๆ อีก ได้แก่ Ti (IV), Th (IV), Fe (II), Ce (IV), U (VI), และ U (V)

ค. ประเภทที่สามารถถูกดูดซับไว้ได้สูงสุดเมื่อมีความเข้มข้นของ HCl เหมาะสม ถ้าความเข้มข้นมากกว่า หรือ น้อยกว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมนั้นจะทำให้การดูดซับน้อยลง ทั้งนี้ เพราะเมื่อมีความเข้มข้นของ HCl ต่ำ ไอออนต่างๆ ในสารละลายจะมีประจุเฉลี่ยในทางบวกการดูดซับจึงมีค่าน้อย แต่จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ HCl เพิ่มขึ้น และเมื่อมีความเข้มข้นของ HCl สูงเกินไปคลอไรด์ไอออนจะแย่งทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนได้ ทำให้การดูดซับของโลหะลดลง โลหะประเภทนี้ ได้แก่ Fe (III), Co (II), Zn (II), Cd (II), Ga (III), In (III), Sn (IV), Pb (II), Sb (III) และ Sb (V)

ง. ประเภทที่ความสามารถในการถูกดูดซับลดลงเมื่อความเข้มข้นของ HCl เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ HCl ต่ำ โลหะเหล่านี้สามารถเกิดคลอไรด์คอมเพลกซ์ที่เสถียร ได้แก่ Au (III), Pd (II) และ Re (III)

2.1.6 เทคนิคในการทำไอออนเอ็กซ์เซนจ์ (Ion exchange technique)

การวิเคราะห์โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนมีเทคนิคในการทำ 2 แบบ คือ เทคนิคของแบทช์ (Batch technique) และเทคนิคของคอลัมน์ (Column technique)

วิธีการทำแบบแบทช์ (Batch technique) วิธีการนี้สามารถทำได้โดยใส่เรซินลงในสารละลายที่ต้องการแยก คนหรือเขย่าจนแน่ใจว่าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนจนถึงสมดุล จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เฟสทั้งสองแยกออกจากกัน จะได้ไอออนที่ต้องการแยกถูกแยกไปอยู่ในเฟสของเรซิน วิธีการนี้จำเป็นต้องกำหนดหาปริมาณของเรซินที่ใช้ให้เพียงพอสำหรับการแยก และอัตราส่วนของการกระจายต้องมีค่าสูง

ค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายเพียงอย่างเดียวไม่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณของโลหะที่ถูกดูดซับและไม่ถูกดูดซับได้ ในการทดลองเราจำเป็นต้องหาปริมาณของเรซินที่ต้องใช้ในการแลกเปลี่ยน ดังนั้น เราจำเป็นต้องคำนวณหาสัดส่วนของปริมาณไอออนในเรซินต่อปริมาณของไอออนในสารละลาย

$$\frac{\text{ปริมาณโลหะไอออนในเรซิน}}{\text{ปริมาณโลหะไอออนในสารละลาย}} = \frac{[MR] \times g}{[M^+] \times V} \quad \dots\dots(2.29)$$

$$\text{ในเมื่อ } D^M = \frac{[MR]}{[M^+]} \quad \text{และ } g = \text{น้ำหนักเป็นกรัมของเรซิน}$$

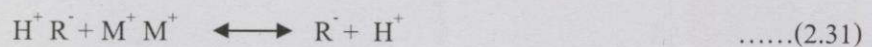
$$\frac{\text{ปริมาณโลหะไอออนในเรซิน}}{\text{ปริมาณโลหะไอออนในสารละลาย}} = \frac{DMg}{V} \quad \dots\dots(2.30)$$

เมื่อทราบค่าอัตราส่วนของการกระจายและปริมาตรของสารละลายที่ใช้ จะสามารถคำนวณหาน้ำหนักของเรซินที่ต้องใช้ในการทดลองได้ หรือ ถ้าทราบอัตราส่วนของการกระจายปริมาณของเรซินที่ใช้ และปริมาตรของสารละลายเราสามารถคำนวณได้ว่าไอออนของโลหะจะถูกดูดซับไปได้เท่าไร หรือ ionic strength ของการแลกเปลี่ยนมีค่าเท่าไร

เนื่องจากเทคนิคของแบทช์จะได้ผลดีเมื่ออัตราส่วนของการกระจาย หรือ ค่าสมดุลของการแลกเปลี่ยนมีค่าสูง ในกรณีที่ค่าสมดุลของการแลกเปลี่ยนมีค่าต่ำ การแยกโดยใช้เทคนิคของแบทช์จะไม่ได้ผล เพราะการเกิดสมดุลของการแลกเปลี่ยนจะทำให้มีปริมาณของไอออนอยู่ใน สารละลายได้มาก ไอออนจึงไม่สามารถถูกดูดซับ หรือ ยึดไว้ที่เรซินได้หมด ด้วยเหตุนี้เทคนิคของแบทช์จึงไม่เป็นที่นิยมใช้กัน ทำให้มีความสำคัญน้อยมากในการทำไอออนเอ็กซ์เชนจ์ เทคนิคที่ทำให้การแยกมีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยทำให้ไอออนสามารถถูกดูดซับไว้ที่เรซินได้หมด คือ เทคนิคของคอลัมน์

2.1.7 วิธีการทำแบบคอลัมน์ (Column operations)

เทคนิคของการทำไอออนเอ็กซ์เชนจ์แบบคอลัมน์ ช่วยทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดได้สมบูรณ์ขึ้น เพราะเมื่อเริ่มใส่สารตัวอย่างลงบนคอลัมน์ จะเกิดสมดุลของการแลกเปลี่ยนขึ้น คือ



H^+ ที่ถูกแลกเปลี่ยนออกมาจะถูกพาให้เคลื่อนที่ลงในคอลัมน์ด้วยตัวพา ทำให้ไม่มี H^+ สำหรับเกิดปฏิกิริยากลับมาทางซ้ายมือ หรือ ถ้ามีบางส่วนเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับมาทางซ้ายมือ ได้ M^+ กลับคืนมา M^+ ก็จะถูกพาให้เคลื่อนที่ลงในคอลัมน์พบกับ $H^+ R^-$ ส่วนใหม่ที่สามารถ แลกเปลี่ยนกัน

ได้อีก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไอออนที่อยู่ในสารละลายทั้งหมดถูกดูดซับไว้หรือยึดไว้ ในคอลัมน์ได้อย่างสมบูรณ์

ถ้าสารผสมของแคทไอออน 2 ตัว คือ A^+ และ B^+ หรือ มากกว่าถูกนำมาผ่านลงในคอลัมน์ที่บรรจุแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์เรซินที่มีปริมาณมากพอ (คือให้ความจุรวมทั้งหมดของเรซิน มากกว่าปริมาณของไอออนทุกตัวรวมกัน) ไอออนทุกตัวจะถูกดูดซับไว้ในคอลัมน์ โดยมีแรงยึดไว้ต่างกัน ถ้าแคทไอออน A^+ ถูกยึดไว้ได้เหนียวแน่นกว่า B^+ เมื่อใช้ตัวอีลูทที่เหมาะสมพบว่า B^+ จะถูกชะออกจากคอลัมน์ได้ก่อน A^+ ทำให้เกิดการแยกเป็นส่วนๆ ขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะของ การทำโครมาโตกราฟี จึงเรียกเทคนิคของการทำไอออนเอ็กซ์เชนจ์แบบคอลัมน์นี้ว่าไอออนเอ็กซ์เชนจ์โครมาโตกราฟี (Ion exchange chromatography) สามารถใช้ในการแยกไอออนที่มีค่าอัตราส่วนของการกระจายต่างกันไม่มากนักได้ ในขณะที่วิธีการแบบแบทช์ทำไม่ได้

ในการทำไอออนเอ็กซ์เชนจ์แบบคอลัมน์จำเป็นต้องทราบความหมายของคำที่ต้องใช้ ดังนี้ คือ Influent หมายถึง สารละลายที่นำมาใส่ในคอลัมน์ ถ้าสารละลายนี้ถูกใช้ทำให้ไอออนที่ถูกดูดซับไว้ในคอลัมน์เคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์ได้จะเรียกว่า Eluent กระบวนการที่เกิดขึ้น เรียกว่า Elution

Effluent หมายถึง สารละลายที่ออกมาจากคอลัมน์ ถ้าสารละลายนี้มีสารที่ถูกดูดซับไว้เคลื่อนที่ออกมาด้วยจะ เรียกว่า Eluate

ขั้นตอนของการดำเนินการทำไอออนเอ็กซ์เชนจ์โครมาโตกราฟี สามารถทำได้โดยมีหลักการดังต่อไปนี้

1. การเลือกและเตรียมเรซิน เรซินที่สังเคราะห์ขึ้นมีมากมายหลายชนิดต้องเลือกชนิดที่ตรงกับไอออนที่ต้องการแยก เช่น ถ้าต้องการแยกแคทไอออนต้องเลือกเรซินชนิดแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์เรซิน เลือกชนิดที่มีขนาดพอเหมาะ (Mesh size) และมีองศาของการเชื่อมโยง (Degree of cross linking) พอเหมาะ เรซินที่มีองศาของการเชื่อมโยงสูง จะทำให้ประสิทธิภาพของการเลือกสูงขึ้น แต่อัตราการกระจายต่ำลง Kettle และ Boyd (ค.ศ. 1947) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดเรซินที่มีต่ออีลูทชันเคอร์ฟ (Elution curve) พบว่า ลักษณะของเคอร์ฟที่ใช้เรซินขนาดเล็กจะแคบ และไม่มีหาง (Tailing effect) โดยทั่วไปขนาดของเรซินไม่ควรใหญ่กว่า 0.1 มิลลิเมตร และไม่ควรเล็กกว่า 0.04 มิลลิเมตร เรซินไม่ควรเล็กเกินไปหากเรซินมีขนาดเล็กเกินไป สารละลายที่ใช้ในการอีลูทจะไหลผ่านคอลัมน์ได้ช้า

เรซินที่นำมาใช้ควรเป็น ชนิด Analytical grade (A.R.) เพราะมีขนาดได้มาตรฐานเท่ากันตลอด และปราศจากมลทินก่อนนำเรซินไปบรรจุในคอลัมน์ต้องแช่ในน้ำก่อนเป็นเวลานานพอสมควร หลังจากที่เรซินนอนก้น อาจมีบางเม็ดลอยอยู่ ให้เทเม็ทที่ลอยทิ้ง หลังจากบรรจุเรซินในคอลัมน์แล้ว

ต้องเปลี่ยนให้เรซินอยู่ในรูปของไอออนที่ต้องการ เช่น ถ้าต้องการเปลี่ยนเรซินที่อยู่ในรูปของไฮโดรเจนมาอยู่ในรูปของโซเดียม สามารถทำได้โดยการผ่านสารละลายโซเดียมคลอไรด์ลงในคอลัมน์ จนกระทั่ง สารละลายที่ออกจากคอลัมน์มีฤทธิ์เป็นกลาง

ถ้ามีความจำเป็นต้องการทราบน้ำหนักของเรซิน สามารถทำได้โดยนำเรซินมาทำให้แห้งภายในตู้อบที่มีการควบคุมความชื้นให้ได้มาตรฐานของความชื้นของเรซิน หลังจากนั้นจึงนำมาชั่งน้ำหนักแน่นอน

2. การบรรจุเรซินในคอลัมน์ คอลัมน์ที่ใช้บรรจุเรซินสามารถทำได้ง่ายๆ โดยใช้หลอดแก้วกลวงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และ ความยาวพอเหมาะกับงานที่ต้องการใช้ ด้านบนมีทางเปิดไว้สำหรับใส่สารตัวอย่างและตัวอีลูท ด้านล่างทำให้เล็กกลงแล้วต่อด้วยสายยางและมีคลิป สำหรับปิดเปิดเพื่อควบคุมการไหลของสารละลายออกจากคอลัมน์ ก่อนบรรจุเรซินลงในคอลัมน์ ต้องใส่ใยแก้วลงไปก่อนเพื่อกันการรั่วไหลของเรซิน เมื่อบรรจุเรซินได้ความสูงตามต้องการแล้วให้ใส่ใยแก้วทับบนเรซินอีกครั้งเพื่อกันการลอยตัวของเรซินเมื่อเทสารละลายลงไป และตลอดคอลัมน์ที่บรรจุเรซินต้องไม่มีฟองอากาศแทรกอยู่

ขนาดของคอลัมน์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณของไอออนและชนิดของไอออนที่ต้องการแยก เมื่อเปรียบเทียบกับคอลัมน์ 2 อัน ที่บรรจุเรซินที่มีปริมาณเท่ากัน พบว่าคอลัมน์ที่ยาวกว่าสามารถแยกไอออนออกจากกันได้ดีกว่าคอลัมน์ที่สั้น คอลัมน์ที่ใช้วิเคราะห์ในงานต่างๆ ไปจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในระหว่าง 8-15 mm.

3. การใส่สารตัวอย่าง ต้องพยายามค่อยๆ ใส่สารตัวอย่าง โดยนำสารตัวอย่างให้เข้าใกล้ส่วนบนสุดของคอลัมน์มากที่สุด อย่าทำให้กระจายติดข้างหลอดแก้ว วิธีการทำคือใช้ปิเปตดูดสารตัวอย่างมาตามปริมาณที่ต้องการ แล้วค่อยๆ ใส่ปิเปตลงในคอลัมน์ให้ปลายของปิเปตอยู่ติดกับส่วนบนของเรซิน แล้วจึงค่อยปล่อยสารตัวอย่างออกจากปิเปต

4. สารละลายที่ใช้ทำการอีลูท (Eluents) สารละลายที่ใช้ในการอีลูทมีความสำคัญต่อการแยกไอออนเช่นเดียวกับการเลือกเรซิน สารละลายที่เป็นตัวอีลูทที่เหมาะสมควรช่วยเพิ่มค่าการแยก (Separation factor) ทำให้การแยกมีประสิทธิภาพและรวดเร็วขึ้น ในการแยกแอร์รี่เอิร์ท 16 ตัว ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกัน สามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลง pH ของ ตัวชะ Nervick (1955) ได้ศึกษาการแยกสารละลายผสมของแอร์รี่เอิร์ทโดยใช้สารละลายซิทเรตเป็นตัวชะ เมื่อเพิ่ม pH ให้สูงขึ้น 0.017 หน่วยต่อชั่วโมงพบว่า การแยกแอร์รี่เอิร์ทจาก Lu ถึง La สามารถทำได้ในเวลาเพียง 8 ชั่วโมง แต่ถ้าให้ pH ของสารละลายคงที่ ที่ 3.19 จะต้องใช้เวลานาน ถึง 100 ชั่วโมง หรือ การแยกกรดอะมิโนชนิดต่างๆ สามารถทำได้โดยควบคุม pH ของตัวอีลูท เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.6 หรือ ถ้าต้องการแยกไอออนของโลหะทรานซิชัน สามารถทำได้โดย ควบคุมความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในรูปของกรด HCl

5. อัตราการไหลของตัวอีลูท (Flow rate) อัตราการไหลหมายถึง อัตราความเร็วที่สารละลายผ่านเรซินออกจากคอลัมน์ มีหน่วยเป็น cm^3/min . การไหลของตัวอีลูทจะเร็ว หรือช้าขึ้นอยู่กับ ความสูงของเรซินในคอลัมน์และความหนืดของตัวอีลูท ความสูงของตัวอีลูทภายในคอลัมน์และ ขนาดของเรซิน ถ้าเพิ่มให้การไหลสูงขึ้นโดยใช้เรซินขนาดใหญ่ จะทำให้การแลกเปลี่ยนไอออน เกิดได้ไม่ดี เคอร์ฟของการอีลูทมีฐานกว้างและมีหาง โดยปกติควรใช้อัตราการไหลต่ำขนาด 3-10 cm^3/min .

6. อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองมีความสำคัญในการทำไอออนเอ็กซ์เชนจ์โครมาโตกราฟี ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อัตราการกระจายของไอออนสูงขึ้น และช่วยทำให้ สารละลายถึงสภาวะสมดุลเร็วขึ้น อุณหภูมิสูงความต้านทานการไหลจะลดลงด้วย

7. วิธีการวัดขนาด ไอออนที่ผ่านออกจากคอลัมน์ต้องถูกนำมาวิเคราะห์หาปริมาณอีกครั้งหนึ่ง ถ้าในการอีลูทต้องใช้ตัวอีลูทมากๆ จะทำให้สารละลายที่ได้เจือจาง การวัดปริมาณโดยวิธีการ ธรรมดา เช่น การไทเทรต และ การตกตะกอนจะทำได้ยาก ซึ่งเป็นข้อเสียของวิธีการนี้ วิธีการที่จะ ทำได้ คือการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ เช่น วัดค่าการดูดกลืนแสง, ค่าดัชนีหักเห, ค่า pH โดยวิธี โฟเทนซิโอเมตรี, วิธีการทางรังสี หรือวิธีโพลารोगราฟี เป็นต้น โดยแต่ละวิธี สามารถทำได้โดย เลือกเฉพาะส่วนของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ ที่มีสารที่สนใจออกมามากที่สุด ไม่จำเป็นต้องเอา สารละลายทั้งหมด

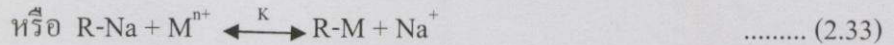
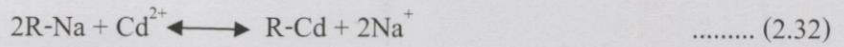
2.1.8 เรซินที่นำมาใช้ ยี่ห้อ Lewatit MonoPlus S 108 Resin

Lewatit MonoPlus S 108 Resin เป็นกรดแก่ (Strong acidic) ชนิดของตัวแลกเปลี่ยนไอออน จะ อยู่ในรูปของโซเดียม (Na) โครงสร้างของเม็ดเรซินเป็น styrene-divinylbenzene (SBR) เนื่องจาก วงการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตแบบพิเศษ จึงทำให้เรซินต้องทนทานต่อสารเคมี แรงดันออสโมติก และความเค็มเชิงกล



รูปที่ 2. 8 Lewatit MonoPlus S108 เรซินก่อนใช้งาน (LANXESS Energizing Chemistry, 2011)

ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างเรซินที่ใช้งานแล้วกับแคดเมียม เป็นดังนี้



ตารางที่ 2.2 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 ⁺ → H ⁺ (max. vol %)	10
พีเอช	0-14
อายุการใช้งาน (max. years)	2
อุณหภูมิที่ไม่ทำให้เรซินเสื่อมสภาพ (°C)	-20 ถึง 40

ตารางที่ 2.3 สภาพการใช้งานของ Lewatit MonoPlus S108 Resin

อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งาน (°C)	120	
พีเอชที่สามารถทำงานได้	0-14	
สารรีเจนเนอเรนต์ แบบ Counter-current regeneration	HCl	H ₂ SO ₄
- จำนวน (g/L)	50	80
- ความเข้มข้น (%)	4-6	1.5-3
- เวลาที่ใช้ (minutes)	15-20	20
- อัตราการไหลในการรีเจนเนอเรชัน (m/h)	5	10-20
สารรีเจนเนอเรนต์ แบบ Co-flow regeneration	HCl	H ₂ SO ₄
- จำนวน (g/L)	100	150
- ความเข้มข้น (%)	6-10	1.5-3
- เวลาที่ใช้ (minutes)	30-40	20
- อัตราการไหลในการรีเจนเนอเรชัน (m/h)	5	5

ที่มา : LANXESS Energizing Chemistry, 2011

2.2 แคดเมียม

2.2.1 สมบัติของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม IIB ของตารางพีริออดิก (Periodic table of elements) มีเลขอะตอม (Atomic number) 48 น้ำหนักอะตอม (Atomic weight) 112.40 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) 8.65 จุดหลอมละลาย (Melting point) 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด (Boiling point) 767 องศาเซลเซียส มีสีเงินแกมขาว น้ำหนักเบา อ่อน ดัดงอได้ง่าย ทนต่อการกัดกร่อน และเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในกรดอ่อน เช่น กรดไนตริก (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) ดังนั้นเมื่อมีการใช้ความร้อนสูง เช่น การอบแร่การบัดกรี การหลอมเหล็ก และการเผาของเสีย จะทำให้ไอของแคดเมียมออกมาได้ในระหว่างกระบวนการที่มีการให้ความร้อน และไอของแคดเมียมในอากาศจะถูกออกซิไดส์อย่างรวดเร็วไปเป็นแคดเมียมออกไซด์ (CdO) นอกจากนี้ แคดเมียมยังเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก (HNO₃) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เจือจาง โดยทั่วไปจะไม่ค่อยพบแคดเมียมในรูปของแคดเมียมบริสุทธิ์ แต่มักจะพบในรูปของสารประกอบของเกลือ เช่น แคดเมียมซัลเฟต (CdSO₄) แคดเมียมไนเตรต (CdNO₃) แคดเมียมคลอไรด์ (CdCl₂) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีสี และละลายได้ดีในน้ำ และยังสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบ

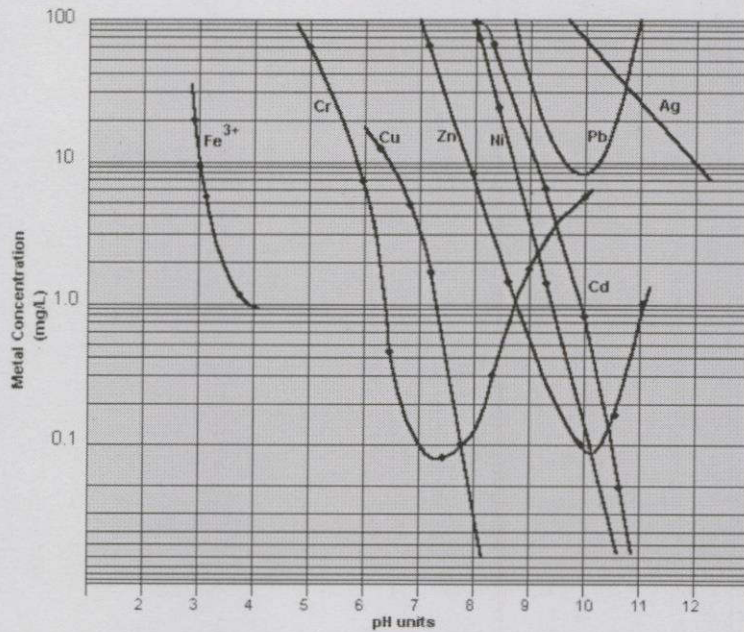
เชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้โดยเฉพาะเมื่อรวมกับไซยาไนด์ และเอมีน (เขมจิต และคณะ, 2551)

2.2.2 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนัก

ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักต่างๆ (Solubility) ดังรูปที่ 2.8 เมื่อเกลือของโลหะละลายน้ำ จะแตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบ จนกระทั่ง ถึงจุดสมดุลหากผลคูณของความเข้มข้นของไอออนมีค่าต่ำกว่าค่าคงที่ของความสามารถของการละลาย (Solubility product constant, K_{sp}) โลหะนั้นก็จะยังละลายน้ำอยู่ในทางตรงกันข้ามถ้าความเข้มข้นของไอออนมีปริมาณมากพอทำให้ผลคูณของความเข้มข้นของไอออนสูงกว่าค่าของความสามารถในการละลายโลหะนั้นก็จะต้องตกตะกอน (ปาริฉัตรและคณะ, 2554 อ้างถึงกาญจนา, 2545) ค่าคงที่ของ (K_{sp}) ของ Cadmium chloride เท่ากับ 8.65

การตกตะกอนโลหะหนักในรูปไฮดรอกไซด์ การเติมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไป และมีการกวนอย่างสม่ำเสมอ รวมทั้งควบคุมพีเอชให้เหมาะสม ไอออนของโลหะหนักจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ (metal-hydroxide) ที่ไม่ละลายน้ำสารเคมีที่ใช้ คือ แคลเซียมคาร์บอเนตหรือปูนขาว (CaCO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) การใช้ปูนขาวจะทำให้เกิดฟล็อกของหินปูน ทำให้ได้ตะกอนแข็ง และฟล็อกขนาดใหญ่กว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์การกำจัดด้วยปูนขาวหรือสารประกอบแคลเซียมอื่นๆ ที่ช่วยให้เกิด Coprecipitation ในการกำจัดโลหะหนัก ทำให้มีตะกอนดียิ่งขึ้นแต่ต้องมีปริมาณสลักซ์ที่ต้องกำจัดเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนใหญ่โซเดียมไฮดรอกไซด์จะง่ายกว่า และมีปัญหาเรื่องฟุ้งกระจายของสารเคมีที่อาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้

โลหะไฮดรอกไซด์จะเป็นพวกแอมโฟเทอริก (Amphoteric) คือ สามารถเพิ่มการละลายเมื่อพีเอชเปลี่ยนแปลง และจุดของการละลายต่ำสุดของโลหะแต่ละชนิดแตกต่างกัน มีค่าพีเอชหนึ่งทำให้เกิดปัญหาสำหรับน้ำเสียที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนกันอยู่ ดังนั้น การที่จะควบคุมการกำจัดโลหะทุกตัวออกจากน้ำเสียอาจจะใช้ร่วมกับการตกตะกอนในรูปแบบอื่น



รูปที่ 2.9 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักที่พีเอชต่างๆ
(Hoffland Environment, Inc., 2012)

แคดเมียมเป็นแร่ที่พบกระจายปนกับแร่ชนิดอื่นในธรรมชาติ ไม่ได้เป็นแร่ที่แยกเป็นอิสระ และมักพบปนอยู่กับแร่สังกะสีในปริมาณร้อยละ 0.1-5 ซึ่งปริมาณแคดเมียมจะมีมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสังกะสีในแร่ กล่าวคือ ถ้าในแร่มีปริมาณสังกะสีสูงปริมาณแคดเมียมจะสูงตามไปด้วย ซึ่งอัตราส่วนระหว่างแคดเมียมและสังกะสีในแร่จะมีค่าตั้งแต่ 1 : 350 จนถึง 1 : 100 สำหรับแร่สังกะสีในประเทศไทยที่ขุดได้ในจังหวัดตาก มีปริมาณแคดเมียม ประกอบอยู่ร้อยละ 0.23-0.38 นอกจากนี้จะพบแร่แคดเมียมปนอยู่ในแร่สังกะสีแล้ว ยังพบอยู่ในแร่ตะกั่ว และทองแดงแต่พบในปริมาณน้อยกว่า (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

2.2.3 การนำแคดเมียมไปใช้ประโยชน์

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

การนำแคดเมียมไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

1. ประมาณร้อยละ 50 ใช้ในการเคลือบเงาผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplated coating) ทำให้ผิวโลหะเงางามและทนต่อการกัดกร่อน ไม่เป็นสนิม ใช้ในอุปกรณ์รถยนต์ต่างๆ ทั้งที่เป็นส่วนของเครื่องยนต์และส่วนประกอบอื่นๆ รวมไปถึงน็อตและสกรูด้วย ใช้เป็นชิ้นส่วนของเครื่องบิน วิทยุ โทรทัศน์ ตู้เย็น และอื่นๆ
2. โลหะแคดเมียมยังอยู่ในรูปของสารประกอบต่างๆ เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ และแคดเมียมซัลโฟไซด์
3. ใช้เป็นตัวสีในสิ่งต่างๆ พลาสติก สีทา สีพ่น หมึก ยาง เสื้อผ้า และสีที่จิตรกรใช้ เพราะให้สีสวย
4. สารประกอบแคดเมียมบางชนิดใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวของพลาสติก เช่น แคดเมียมสเตียเรต เป็นต้น
5. โลหะแคดเมียมยังใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะอัลลอยด์ เช่น ผสมกับโลหะทองแดง จะช่วยเพิ่มความเหนียวและความทนทานต่อการสึกหรอให้กับทองแดงด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งยังทนอุณหภูมิสูงด้วย
6. นำไปใช้ผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องทนความร้อน เช่น ทำหม้อน้ำรถยนต์ หรืออุปกรณ์เครื่องเย็นต่างๆ ที่ต้องระบายความร้อนมากๆ ถ้านำแคดเมียมไปผสมกับโลหะเงินจะได้โลหะอัลลอยด์ที่เงางาม
7. ใช้ในการผลิตเครื่องประดับอัญมณีต่างๆ
8. มีการใช้ไปในอุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่ขนาดเล็กที่เรียกว่า แคดเมียมนิเกิลแบตเตอรี่ (CdNi batteries) สำหรับการใช้กับอุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น นาฬิกา เครื่องคิดเลข กล้องถ่ายรูป และวิทยุเล็กๆ เป็นต้น ยังมีสารประกอบแคดเมียมประเภท แคดเมียมโบรไมด์ แคดเมียมไอโอไดด์ ใช้บ้างในการถ่ายรูป นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะแคดเมียมใช้ใน Photoelectric cells
9. ผสมในสารฆ่าเชื้อราที่ใช้ในกิจการเกษตร
10. ปัจจุบันยังใช้ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณูด้วย

2.2.4 ความเป็นพิษของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นพิษต่อแบคทีเรียโดยเข้าไปแทนที่ไอออนที่จำเป็นต่อการทำงานของเอนไซม์ เช่น สังกะสี หรือจับกับหมู่ -SH ของเอนไซม์ ทำให้เอนไซม์ไม่ทำงาน คนที่ได้รับแคดเมียมมากเกินไปจะเป็นโรคอิไต-อิไต (Nogawa, 2004)

การรับสัมผัส

แคดเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ ทางปาก ทางจมูก และทางผิวหนัง โดยความเป็นพิษของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับปริมาณที่ร่างกายได้รับ

1. **สัมผัสทางหายใจ** การหายใจเข้าไป แคดเมียมสามารถดูดซึมผ่านระบบทางเดินหายใจ การหายใจเอาฝุ่นผงเข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคือง ปวดศีรษะ เจ็บคอ และ/หรือไอ ถ้าสัมผัสปริมาณมาก จะทำให้การหายใจติดขัด แน่นหน้าอก และมีอาการคล้ายคนเป็นหวัด มีอาการอ่อนเพลีย เป็นไข้ เหงื่อออกมากผิดปกติ คลื่นไส้ และปวดกล้ามเนื้อ อาจทำให้เกิดอาการน้ำท่วมปอด ทำลายตับ ไต และอาจทำให้เสียชีวิตได้ อาการที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดภายหลังรับสารถึง 24 ชั่วโมง

2. **สัมผัสทางผิวหนัง** การสัมผัสถูกผิวหนัง จะก่อให้เกิดการระคายเคือง เป็นผื่นแดง และเจ็บปวด

3. **กินหรือกลืนเข้าไป** การกลืนหรือกินสารนี้เข้าไป สารนี้มีความเป็นพิษรุนแรง อาจจะทำให้ตายได้ และทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง, ปวดท้อง, หมดสติ, เวียนศีรษะ มีน้ำลายมากกว่าปกติ ไต และตับทำงานผิดปกติ

4. **สัมผัสถูกตา** การสัมผัสถูกตา จะทำให้เกิดการระคายเคือง ตาแดง และเจ็บปวด

5. **การก่อมะเร็ง** ความผิดปกติแคดเมียมยังเป็นสารก่อมะเร็งกลุ่ม 1 ตามบัญชีรายชื่อของ IARC

พิษเรื้อรัง

ผลการสัมผัสเรื้อรัง การสัมผัสแคดเมียมที่มีความเข้มข้นต่ำเป็นเวลานานๆ จะมีผลทำให้ไตถูกทำลาย เป็นโรคโลหิตจาง ออกรวม ปังพอง เยื่อในจมูกถูกทำลาย ในชายมีความเสี่ยงมากต่อการเป็นมะเร็งในปอด และมะเร็งต่อมลูกหมาก แคดเมียมในกระดูกลดต่ำลง การสัมผัสไอโอดีนเป็นเวลานาน เป็นเหตุให้เกิดโรคนอนไม่หลับ เยื่อตาขาวอักเสบ มีการอักเสบในโพรงจมูก หลอดลมอักเสบ เกิดอาการใจสั่น ท้องร่วง น้ำหนักลด อาจจะทำให้เกิดเป็นโรคภูมิแพ้

พิษเฉียบพลัน

การได้รับแคดเมียมจำนวนมากอาจทำให้เกิดพิษเฉียบพลันได้ พิษเฉียบพลันส่วนใหญ่เกิดจากการหายใจเอาฝุ่นหรือฟุ้งแคดเมียม ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อแคดเมียมถูกทำให้ร้อน โดยทั่วไประยะเวลาหลังจากสัมผัสสารจะยาวนาน 2-3 ชั่วโมงก่อนแสดงอาการ อาการเริ่มแรกจะมีการระคายเคืองเล็กน้อยของทางเดินหายใจส่วนต้น อีก 2-3 ชั่วโมงต่อมาจะมีอาการไอ เจ็บปวดในทรวงอก เหงื่อออกและหนาวสั่น ซึ่งเป็นอาการที่คล้ายกับการติดเชื้อทั่วไปของทางเดินหายใจส่วนต้น ต่อมา 8-24 ชั่วโมง หลังจากสัมผัสสารอย่างฉับพลัน อาจเห็นอาการระคายเคืองอย่างแรงที่ปอด เจ็บปวดในทรวงอก หายใจลำบาก ไอ และอ่อนเพลีย อาการหายใจลำบากจะรุนแรงขึ้น เมื่อเกิดน้ำท่วมปอด ตามมา อันตรายจากกรณีเช่นนี้มีถึง 15% ผู้ป่วยที่รอดชีวิตอาจมีฟองอากาศในเนื้อเยื่อ และเนื้อปอด

ปูดนูนออกมา ซึ่งต้องใช้เวลานานในการรักษาให้หาย มีรายงานว่า พบพิษเรื้อรังเกิดขึ้นหลังจากสัมผัสพุ่มแคดเมียมออกไซด์เป็นเวลานาน

การรักษา

1. ปฐมพยาบาล นำผู้ป่วยออกจากจุดเกิดเหตุ ดูแลเรื่องการทำงานของระบบที่สำคัญ เช่น ระบบหายใจ ระบบการไหลเวียนโลหิต ถ้าผู้ป่วยหมดสติควรทำให้ทางเดินหายใจเปิดโล่งและให้ออกซิเจน 100 %

2. การสัมผัสโดยการหายใจ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้เริ่มทำการช่วยหายใจทันที ถ้าเป็นไปได้ให้ใช้หน้ากาก (pocket mask) ที่มีวาล์วทางเดียว (one way valve) ในการช่วยหายใจ เพราะทางเดินหายใจและใบหน้าของผู้ช่วยเหลืออาจเกิดการปนเปื้อนได้

การสัมผัสทางผิวหนัง ถอดเสื้อผ้าที่ปนเปื้อนออก ถ้าเป็นไปได้ให้ทำขณะที่มีน้ำล้างอยู่ด้วยแล้วนำเสื้อผ้าเก็บไว้ในถุงใสปิดสนิทสองชั้นและเขียนป้ายกำกับไว้ เก็บไว้ในที่ปลอดภัยที่ห่างจากผู้ป่วยและเจ้าหน้าที่ ล้างผิวหนังด้วยน้ำปริมาณมากโดยให้น้ำไหลผ่าน

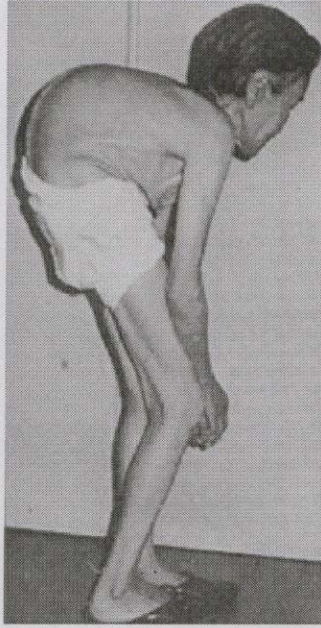
3. การสัมผัสทางตา ล้างตาด้วยน้ำเกลือ (normal saline solution) อย่างน้อยเป็นเวลา 15 นาที

4. การสัมผัสทางการกิน ให้ผู้ป่วยรับประทานน้ำ (ปริมาณไม่เกิน 50-100 มิลลิลิตร) (NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards.US.DHHS, 1990), (ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตราย และเคมีภัณฑ์)

2.2.5 โรคที่เกิดจากแคดเมียม

1. โรคอิไต-อิไต (ItaiItai disease) ในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งแปลว่า "โอ๊ย โอ๊ย" ปรากฏขึ้นครั้งแรกที่ประเทศญี่ปุ่น แถบแม่น้ำจินสุ เขตโตยามา เนื่องมาจากมีการทิ้งขี้แร่ที่มีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ ชาวบ้านที่ใช้น้ำจากแม่น้ำหรือได้รับแคดเมียมทางอ้อมจากแม่น้ำ เกิดเป็นโรคไต กระดูกผุ เจ็บปวดบริเวณหลังและเอวอย่างรุนแรงมาก และการมีเด็กพิการในอัตราสูงผิดปกติเมื่อได้รับแคดเมียมสะสมมากๆ ผู้ที่ได้รับแคดเมียมสะสมในร่างกาย จะสังเกตเห็นวงสีเหลืองที่โคนของซี่ฟัน ซึ่งจะขยายขึ้นไปเรื่อยๆ จนอาจเต็มซี่ ถ้าขนาดของวงยิ่งกว้างและสียิ่งเข้ม แสดงว่ามีแคดเมียมสะสมมาก มีหลักฐานพิสูจน์ได้ว่าแคดเมียมออกไซด์ เป็นสารก่อมะเร็งที่ไตและต่อมลูกหมาก นอกจากนั้นยังทำอันตรายต่อไต ทำให้สูญเสียประสิทธิภาพการดักจับ และทำให้เลือดจาง แต่ส่วนใหญ่โรคที่เกิดจากแคดเมียมมักเป็นชนิดเรื้อรัง โดยการได้รับแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานาน

เกณฑ์มาตรฐานปลอดภัยเกณฑ์มาตรฐานปลอดภัยที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก กำหนดไว้ว่าคนปกติไม่ควรได้รับแคดเมียมเกินสัปดาห์ละ 0.40-0.50 มิลลิกรัม ปริมาณแคดเมียมสูงสุดในอาหารชนิดต่างๆ ที่กำหนดโดย EU



รูปที่ 2.10 ผู้ป่วยโรคอิไต-อิไต (ItaiItai disease)
(ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและการจัดการภัยพิบัติ, 2552)

2. โรคปอดเรื้อรัง การได้รับแคดเมียมนาน ๆ และในปริมาณมาก โดยเฉพาะจากการหายใจ จะทำให้เกิดการอุดตันภายในปอด ซึ่งเป็นเพราะมีการอักเสบของหลอดเลือด มีพังศึคจับในทางเดินหายใจส่วนล่าง และมีการทำลายของถุงลมซึ่งจะกลายเป็นโรคถุงลมโป่งพองในที่สุด ผู้ที่มีความเสี่ยงมากคือคนทำงานกับผงแคดเมียมโดยตรง เช่น โรงงานแบตเตอรี่ขนาดเล็ก

3. โรคไตอักเสบ จะแสดงออกโดยมีการอักเสบของไต โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ท่อในไตซึ่งจะพบแคดเมียมในปัสสาวะสูง มีโปรตีน กลูโคสสูงในปัสสาวะ การทำงานทางท่อในไตเสียการทำงานพบว่ามีการสะสมของแคดเมียมที่หมวกไตก่อให้เกิดการอักเสบและเป็นอันตรายต่อไป และอาจเป็นไตวายได้ในที่สุดการเกิดโรคไตอักเสบนี้จะเป็นแบบถาวรแม้ว่าจะไม่ได้รับแคดเมียมต่อ

2.2.6 การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม

แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่สากลประเทศมีการกำหนดเป็นค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง และน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน เพื่อป้องกันการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมและป้องกันอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์เนื่องจากเคยเกิดวิกฤตการณ์เป็นพิษต่อประชากรจำนวนมากมาก่อน สำหรับประเทศไทยกำหนดปริมาณแคดเมียมในแหล่งต่างๆ ดังนี้

มาตรฐานคุณภาพแหล่งน้ำผิวดิน กำหนดโดยกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และการพลังงานให้น้ำมีปริมาณแคดเมียมได้สูงสุดไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (สำหรับน้ำที่มีความกระด้างในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตเกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) หรือ 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร (สำหรับน้ำที่มีความกระด้างในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตไม่เกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร)

มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเล กำหนดโดยกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการพลังงานให้น้ำมีปริมาณแคดเมียมได้สูงสุดไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรมให้น้ำมีปริมาณแคดเมียมได้สูงสุดไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาครหลวง (โดยคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก) กำหนดให้น้ำมีปริมาณแคดเมียมได้สูงสุดไม่เกิน 0.003 มิลลิกรัมต่อลิตร

มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 พ.ศ. 2539) กำหนดให้น้ำมีปริมาณแคดเมียมได้สูงสุดไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร

มาตรฐานน้ำดื่ม กำหนดโดยกระทรวงสาธารณสุขตามข้อกำหนดขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา หรือ U.S. EPA. กำหนดให้น้ำมีปริมาณแคดเมียมได้สูงสุดไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม, 2538)

จากผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาและแหล่งน้ำประปาทั่วประเทศ ของกรมควบคุมมลพิษเดือนเมษายน พ.ศ. 2543 ในลุ่มน้ำเจ้าพระยา, แม่กลอง, แดงน้อย, แดงใหญ่, ป่าสัก, น้อย, ลพบุรี, สะแกกรัง, บางปะกง, ปราจีน, นครนายกและท่าจีนไม่พบปริมาณแคดเมียมเกินมาตรฐาน 0.003 มิลลิกรัมต่อลิตรแต่ลุ่มน้ำสาละวินพบปริมาณแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ระหว่าง 0.002 - 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตรในหลายจุดและมีบางจุดพบปริมาณแคดเมียมสูงคืออำเภอพบพระ จังหวัดตากพบปริมาณแคดเมียม 0.011 มิลลิกรัมต่อลิตรและอำเภอเชียงคำจังหวัดพะเยาพบปริมาณแคดเมียม 0.012 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งเป็นบริเวณที่มีการทำเหมืองแร่โลหะ(กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

การติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำผิวดินของพื้นที่ที่มีผลกระทบต่อจุดสูบน้ำดิบเพื่อการประปา ในโครงการจัดการน้ำเสียและระบบระบายน้ำโดยกรมควบคุมมลพิษพ.ศ. 2537 ผลการตรวจไม่พบปริมาณแคดเมียมเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินหรือมีปริมาณแคดเมียมสูงสุดไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

การติดตามตรวจสอบสารพิษตกค้างในสิ่งแวดล้อม (น้ำใต้ดิน) ของกรมควบคุมมลพิษพ.ศ. 2538 ในพื้นที่ศึกษา 7 จังหวัด คือ เพชรบูรณ์ ลพบุรี สระบุรี อุทัยธานี กาญจนบุรี สุพรรณบุรี และราชบุรี ซึ่งเป็นจังหวัดที่อยู่ในบริเวณขอบของแหล่งน้ำใต้ดินนครหลวงโดยจำแนกระดับการปนเปื้อนดังนี้

- ระดับที่ 1 <0.005 มิลลิกรัมต่อลิตรไม่ปนเปื้อน
 ระดับที่ 2 0.005 - <0.01 มิลลิกรัมต่อลิตรปนเปื้อนมากกว่าธรรมชาติ
 ระดับที่ 3 0.01 - <0.015 มิลลิกรัมต่อลิตรยอมให้มีได้
 ระดับที่ 4 0.015 - <0.02 มิลลิกรัมต่อลิตรปนเปื้อนน้อย
 ระดับที่ 5 0.02 - <0.025 มิลลิกรัมต่อลิตรปนเปื้อนปานกลาง
 ระดับที่ 6 >0.025 มิลลิกรัมต่อลิตรปนเปื้อนมาก

ตารางที่ 2.4 ติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขา และ แหล่งน้ำประปาทั่วประเทศของ
 กรมควบคุมมลพิษ

สถานที่	น้ำผิวดิน	น้ำใต้ดิน	ดินตะกอน	ที่มาปี พ.ศ.
ลุ่มน้ำเจ้าพระยา	< 0.003 mg/L			(กรมควบคุมมลพิษ,2543)
แม่กลอง	< 0.003 mg/L			(กรมควบคุมมลพิษ,2543)
ท่าจีน	< 0.003 mg/L			(กรมควบคุมมลพิษ,2543)
ลุ่มน้ำสาละวิน	0.002-0.005 mg/L			(กรมควบคุมมลพิษ,2543)
กาญจนบุรี		ระดับ 5		(กรมควบคุมมลพิษ,2538)
สุพรรณบุรี		ระดับ 5		(กรมควบคุมมลพิษ,2538)
เพชรบูรณ์		ระดับ 5		(กรมควบคุมมลพิษ,2538)
ลพบุรี		ระดับ 5		(กรมควบคุมมลพิษ,2538)
สระบุรี		ระดับ 2		(กรมควบคุมมลพิษ,2538)
อุทัยธานี		ระดับ 2		(กรมควบคุมมลพิษ,2538)
ราชบุรี		ระดับ 2		(กรมควบคุมมลพิษ,2538)
ลุ่มน้ำต่างๆทาง ภาคใต้ตอนล่าง	< 0.003 mg/L		< 0.003 mg/L	(สำราญ,2533)
หนองประจักษ์ และห้วยหมาก แข่งจังหวัด อุครธานี	>0.003 mg/L			(มุกดา,2530)
ลุ่มน้ำเลย	< 0.003 mg/L		< 0.003 mg/L	(อภิชาติ,2556)

พบว่ามีการปนเปื้อนแคดเมียมมากในพื้นที่บางแห่งของจังหวัดกาญจนบุรี สุพรรณบุรี เพชรบูรณ์ และ ลพบุรี พบการปนเปื้อนปานกลางในจังหวัดสระบุรี ส่วนจังหวัดอุทัยธานี และ ราชบุรี นั้นมีการปนเปื้อนอยู่ในระดับปนเปื้อนมากกว่าธรรมชาติถึงระดับที่ยอมรับได้ โดยภาพรวมสำหรับพื้นที่ที่มีปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียมที่มีแนวโน้มก่อมลพิษนั้น จะกระจายในฝั่งตะวันตกของกลุ่มน้ำเจ้าพระยามากกว่าฝั่งตะวันออก โดยจะอยู่ในพื้นที่ที่มีโรงงานอุตสาหกรรมที่มีมลพิษ โลหะหนัก และอยู่ในพื้นที่ชลประทานด้วยสามารถสรุปสาเหตุการปนเปื้อนแคดเมียมได้ดังต่อไปนี้

1. แคดเมียมจะพบแนวโน้มมีปัญหาในพื้นที่ที่มีความหนาแน่นประชากรสูงเนื่องจากชุมชนก็เป็นแหล่งกำเนิดแคดเมียมด้วยเช่นกัน

2. พื้นที่ที่มีโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้โลหะหนักน้อยอาจมีการปนเปื้อนแคดเมียมได้มากกว่าพื้นที่ที่มีจำนวน โรงงานมากได้ ขึ้นอยู่กับการจัดการควบคุมมลพิษของ โรงงานในพื้นที่นั้นหากมีการจัดการไม่ได้มาตรฐานก็ส่งผลให้มีการปนเปื้อนแคดเมียมสูงจากการศึกษาโดยทั่วไปพื้นที่ที่มีโรงงานอุตสาหกรรมที่มีมลพิษ โลหะหนักจำนวนมาก มักมีปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียมรุนแรงกว่าพื้นที่ที่ไม่มีโรงงาน หรือ มีน้อยในบางจังหวัดอย่างกาญจนบุรี ซึ่งเป็นจังหวัดที่มีการทำเหมืองแร่โลหะโดยเฉพาะในอำเภอสังขละบุรี และอำเภอศรีสวัสดิ์ แม้ว่าในสองอำเภอนี้จะไม่มีโรงงานอุตสาหกรรมที่มีมลพิษ โลหะหนักแต่ก็มีการปนเปื้อนแคดเมียมถึงระดับรุนแรงมากในชั้นน้ำบาดาลที่มีปริมาณน้ำน้อย

3. การปนเปื้อนแคดเมียมในชั้นกำเนิดน้ำใต้ดิน หินร่วนมีมากกว่าในชั้นหินแข็ง โดยพบว่ามี การปนเปื้อนมากกว่าธรรมชาติจนถึงปนเปื้อนมากในชั้นหินร่วน ส่วนชั้นหินแข็งพบว่ายู่ในระดับ มีการปนเปื้อนมากกว่าธรรมชาติ

4. การปนเปื้อนแคดเมียมในบ่อน้ำตื้นอยู่ในระดับปนเปื้อนมากกว่าธรรมชาติ เช่นเดียวกับชั้นน้ำบาดาลและชั้นน้ำบาดาลระดับลึก แต่ น้ำบาดาลในพื้นที่ชลประทานจะปนเปื้อนถึงระดับที่ยอมรับได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2538)

รายงานปริมาณแคดเมียมในน้ำและดินตะกอนบริเวณลุ่มน้ำป่าสัก ช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2532 ถึงกันยายน พ.ศ. 2533 พบปริมาณแคดเมียมในน้ำเฉลี่ย 0.59-1.13 ไมโครกรัมต่อลิตร ฐานน้ำผิวดิน (สังข์อัครวานิช, 2534) ในดินตะกอนเฉลี่ย 0.37-0.98 ไมโครกรัมต่อกรัม โดยผลที่ได้มีปริมาณแคดเมียมไม่เกินค่ามาตรฐาน

รายงานปริมาณแคดเมียมในน้ำ และดินตะกอนบริเวณลุ่มน้ำแม่กลองช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2532 ถึงสิงหาคม พ.ศ. 2533 พบปริมาณแคดเมียมในน้ำเฉลี่ย 0.66 ไมโครกรัมต่อลิตร ในดินตะกอนเฉลี่ย 0.437 ไมโครกรัมต่อกรัม โดยผลที่ได้มีปริมาณแคดเมียมไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำผิวดิน (โสภณพรหม, 2534)

รายงานปริมาณแคลเซียมในน้ำ และดินตะกอนจากลุ่มน้ำต่างๆ ทางภาคใต้ตอนล่างของประเทศไทยตลอดปี 2533 พบปริมาณแคลเซียมในน้ำอยู่ระหว่าง 0.51-1.21 ไมโครกรัมต่อลิตรเฉลี่ย 0.81 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยผลที่ได้มีปริมาณแคลเซียมไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำผิวดิน และในดินตะกอนพบอยู่ระหว่าง 0.61-0.74 ไมโครกรัมต่อกรัม (สำราญ, 2533)

รายงานปริมาณแคลเซียมในน้ำที่หนองประจักษ์และห้วยหมากแข้ง จังหวัดอุดรธานีปี 2530 พบว่าปริมาณแคลเซียมในน้ำอยู่ระหว่าง 2-60 ไมโครกรัมต่อลิตรเฉลี่ย 16.37 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยผลที่ได้มีปริมาณแคลเซียมเกินค่ามาตรฐานน้ำผิวดิน (มุกดา, 2530)

รายงานคุณภาพน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาปี พ.ศ. 2536 ของกรมอนามัย พบว่ามีปริมาณแคลเซียมอยู่ในช่วง 0.00-0.017 มิลลิกรัมต่อลิตรไม่เกินมาตรฐานน้ำผิวดิน (กรมอนามัย, 2538)

รายงานปริมาณแคลเซียมในน้ำและดินตะกอนบริเวณลุ่มน้ำเลย ปี 2536 พบปริมาณแคลเซียมในน้ำอยู่ระหว่าง 0.85-1.60 ไมโครกรัมต่อลิตร ในดินตะกอนเฉลี่ย 3.86-4.46 ไมโครกรัมต่อกรัม โดยผลที่ได้มีปริมาณแคลเซียมไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำผิวดิน (อภิชาติ, 2536)

แม้ว่าประเทศไทยยังไม่มีกรณีปนเปื้อนแคลเซียมในสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดปัญหารุนแรง แต่ก็มีแหล่งกำเนิดมลพิษ ที่อาจทำให้เกิดการแพร่กระจายของแคลเซียมในแหล่งน้ำได้โดยแบ่งออกเป็น 4 แหล่งสำคัญ (กรมควบคุมมลพิษ, 2538) คือ

1. แหล่งกำเนิดจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้แคลเซียม มีหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี, อุตสาหกรรมแบตเตอรี่, อุตสาหกรรมปุ๋ยเคมี, อุตสาหกรรมชุบโลหะ และ อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น น้ำเสียจากอุตสาหกรรมเหล่านี้จะมีโลหะหนักแคลเซียมปนเปื้อนอยู่ในปริมาณต่างๆ กัน เช่น น้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะจะมีแคลเซียมปนเปื้อนตั้งแต่ 48-240 มิลลิกรัมต่อลิตร (Neuhof and Fresenius, 1989) และประเทศไทยมีแนวโน้มจะพัฒนาอุตสาหกรรมเหล่านี้ให้เพิ่มขึ้นในอนาคต ซึ่งจะเป็นสาเหตุสำคัญของการปนเปื้อนแคลเซียมในแหล่งน้ำ และตะกอนดินในธรรมชาติ ดังเช่น การปนเปื้อนของแคลเซียมในแหล่งน้ำสำคัญของหลายประเทศ

นอกจากแคลเซียมในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเหล่านี้ จะเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนแคลเซียมในสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังพบว่าจากอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตก็อาจเป็นอีกแหล่งที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนแคลเซียมในแหล่งน้ำ ซึ่งกระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดเรื่องโลหะที่ถูกชะล้างได้เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธีการสกัดสารว่าต้องมีปริมาณโลหะหนักแคลเซียมไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรเพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดจากการชะละลายของโลหะจากกากอุตสาหกรรมและจากผลการศึกษาปริมาณแคลเซียมจากกากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น การปนของวัสดุจาก การบำบัดน้ำเสียจากตะกอนเกลือ และกากตะกอนขจัดสีผิวดีบุกรวม 57 ตัวอย่างด้วยวิธีการสกัด พบว่ามีปริมาณแคลเซียม 0-21.8 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นจำนวนตัวอย่างที่มีแคลเซียมเกินกำหนด

มาตรฐานร้อยละ 3.5 ซึ่งอาจจะต้องหาวิธีการบำบัดที่เหมาะสมต่อไป (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2540)

ตารางที่ 2.5 ปริมาณแคดเมียมที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำและตะกอนดิน

พื้นที่สำรวจ	ปริมาณแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	แหล่งที่ปล่อย
Hudson River, Foundry Cove (N.Y.)	Max. 50,000	Cd-Ni battery
Palestine Lake (Indiana)	3.2 - 2,640	Electroplating
Derwent Estuary (Tasmania)	0.8 - 862	Zinc smelter
Sorfjord (Norway)	16 - 850	Pb-Zn smelter
Hitachi area , NE Tokyo (Japan)	Max. 368	Braun tube factory
River Tawe (Wales)	Max. 355	Metal processing
Neckar River (F.R. Germany)	Max. 340	Pigment industry
Takahara River (Kamioka Mine, Japan)	4.1 - 238	Mine effluents
South Esk River (Tasmania)	Max. 153	Mine effluents
New Bedford Harbor (Massachusetts)	Max. 130	Metal processing
Gadura River (Israel)	Max. 123	Battery plant
Stola River (Poland)	Max. 116	Zinc smelter
River Conway (Wales)	3 - 95	Mine effluents
Coeur d' Alene River (Idaho)	Max. 80	Mine effluents

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2538

2. แหล่งกำเนิดจากเหมืองแร่ ที่อาจมีการปนเปื้อนของแคดเมียม คือเหมืองแร่สังกะสี และเหมืองขุดเจาะน้ำมันก๊าซธรรมชาติ

3. แหล่งกำเนิดจากภาคการเกษตร แคดเมียมที่ปนเปื้อนในปุ๋ยเคมีสารปราบศัตรูพืช สารเคมีที่ใช้เพิ่มผลผลิตหรือสารปรับปรุงคุณภาพดิน มักได้มาจากวัตถุดิบที่มีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบ และเมื่อนำสารดังกล่าวไปใช้ในการเกษตรก็จะส่งผลให้เกิดการสะสมแคดเมียมในดินซึ่งสามารถถูกชะล้างสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และ ถูกดึงไปสะสมอยู่ในพืชแล้วเกิดการถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม จึงมีการกำหนดปริมาณโลหะหนักแคดเมียมที่ขอมให้มีได้ในดินเพื่อการเกษตร โดยประเทศอังกฤษเยอรมันฝรั่งเศสแลนเซอร์แลนด์เท่ากับ 1.0 -3.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และได้มีการศึกษาปริมาณโลหะหนักในดิน และปุ๋ยหมักที่ใช้ในการเกษตร

ของประเทศไทยจำนวน 5 ตัวอย่างโดยพบปริมาณแคดเมียมในปูหมักจากขยะมูลฝอยชุมชนเท่ากับ 3.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปูหมักจากมูลฝอยชุมชนผสมกับตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 5.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ ปูหมักจากมูลฝอยชุมชนผสมกับดินสีดาเท่ากับ 3.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะเห็นได้ว่ามีปริมาณแคดเมียมสูงเกินกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับให้มีได้ แต่ปริมาณแคดเมียมในดินธรรมดาและดินสีดาเท่ากับ 2.56 และ 2.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับให้มีได้ (ชเรศ, 2540)

4. แหล่งกำเนิดจากการสาธารณสุขปโลก อาจพบแคดเมียมได้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับเครื่องอุปโภคและบริโภค เช่น เครื่องไฟฟ้าที่ใช้ถ่านไฟฉาย หรือ แบตเตอรี่ ที่สามารถประจุไฟได้สารเจือปนในอาหารสีน้ำมัน น้ำมันก๊าด น้ำมัน เครื่องสำอาง และ พลาสติก เมื่อสิ่งเหล่านี้ถูกทิ้งเป็นขยะก็เป็นอีกแหล่งที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของแคดเมียมลงสู่แหล่งน้ำ ดังมีการศึกษาปริมาณ โลหะหนักในน้ำชะขยะจากสถานบำบัดขยะชอยอ่อนนุช และ ลาดกระบังในเดือนธันวาคม 2540 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2541 พบปริมาณแคดเมียมในน้ำชะขยะทั้งสองจุดมีค่าระหว่าง 0.00-0.007 มิลลิกรัมต่อลิตร เฉลี่ยเท่ากับ 0.0038 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำผิวดิน และ น้ำบาดาลแต่เมื่อเทียบกับปี 2535 ที่ตรวจไม่พบปริมาณแคดเมียมในน้ำชะขยะ ก็พบว่าระยะเวลาต่างกัน 5 ปีปริมาณแคดเมียมจากน้ำชะขยะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และ ถ้ายังไม่มีการจัดการขยะให้ถูกหลักสุขาภิบาลน้ำชะขยะก็อาจเป็นอีกแหล่งที่จะทำให้เกิดการปนเปื้อนแคดเมียมในแหล่งน้ำที่สำคัญได้ (สุจิตรา และปริญญา, 2541) แคดเมียมเป็นธาตุที่สิ่งมีชีวิตในน้ำสามารถรับเข้าไปได้โดยตรงไอออน Cd^{2+} เป็นรูปของแคดเมียมที่สิ่งมีชีวิตเล็กๆ ในน้ำนำไปใช้ได้ น้ำกระด้างที่มีเกลือแคลเซียมและแมกนีเซียมอยู่นั้นจะทำให้การสะสมแคดเมียมลดลง ในน้ำทะเลแคดเมียมอาจเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับคลอไรด์ ซึ่งแคดเมียมในรูปนี้จะไม่ถูกสะสมโดยสิ่งมีชีวิต เนื่องจากนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ปริมาณการปนเปื้อนแคดเมียมของสิ่งมีชีวิตในน้ำนั้นเกี่ยวข้องกับปริมาณการดูดซึม (absorb) หรือดูดซับ (adsorb) แคดเมียมจากน้ำ และตำแหน่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิต เนื่องจากสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่บนตะกอนท้องน้ำมีโอกาสสะสมแคดเมียมได้มากกว่าสิ่งมีชีวิตที่ว่ายอยู่ในน้ำ (Friberg and Kjelstrom, 1992) และผลการศึกษาปริมาณ โลหะหนักแคดเมียมในสัตว์ทะเลที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจบริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกเฉียงตอนกลาง 2530 ถึงเดือนกันยายน 2531 ในสัตว์เศรษฐกิจ 5 จำพวก คือ ปลา ปู กุ้ง กุ้ง ตั๊กแตน หอย และ หมึก จำนวน 95 ชนิด พบว่าสัตว์เหล่านี้สะสมแคดเมียมไว้ในตัว เช่น ปลามีแคดเมียม 0.017 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักสดหมึกมีแคดเมียม 0.124 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักสดปูมีแคดเมียม 0.246 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักสดกุ้งตั๊กแตนมีแคดเมียม 1.225 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักสดหอยนางรมมีแคดเมียม 0.849 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักสดกุ้งมีแคดเมียม 0.074 ไมโครกรัมต่อกรัม (เววตา, 2535) ปริมาณแคดเมียมที่พบในสัตว์เหล่านี้สามารถถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร แล้วเกิดการสะสมในมนุษย์และ ก่อให้เกิดอันตรายได้โดยปริมาณแคดเมียมอาจจะมาจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมที่มีได้ผ่าน

การบำบัดน้ำที่ผ่านการบำบัด แต่ยังไม่ได้มาตรฐานหรือผ่านการบำบัดแล้ว ได้มาตรฐานแต่เมื่อออกสู่แหล่งน้ำ ปริมาณแคดเมียมเหล่านี้อาจสะสมอยู่ในตะกอนดิน และเมื่อสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนแปลง เช่น อุณหภูมิเพิ่มขึ้น หรือ ความเป็นกรดของน้ำเพิ่มขึ้น ปริมาณแคดเมียมที่สะสมอยู่ในดินตะกอนก็จะละลายออกมาแล้วเกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิต

2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

2.3.1 ทฤษฎีการดูดซับ

นิยาม 1 การดูดซับเป็นกระบวนการทางกายภาพ และ/หรือ กระบวนการทางเคมีซึ่งสสารสะสมที่รอยต่อระหว่างวัฏภาค โดยเฉพาะมักหมายถึงระหว่างวัฏภาคของแข็งและของไหล (แก๊สหรือของเหลว) ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) คือสสารที่ถูกดึงจากของไหลนั้นไปที่ผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) ที่เป็นของแข็งนั้น โดยปกติปรากฏการณ์ที่รอยต่อระหว่างวัฏภาค ที่แตกต่างกันจะมีความหนาแน่นของอนุภาคต่างๆ ไม่เท่ากับในเนื้อ (Bulk) ของแต่ละวัฏภาค เมื่อมีสารละลายอยู่ในวัฏภาคใดวัฏภาคหนึ่ง ทั้งนี้ เกิดจากการไม่ได้ดุลของแรงที่ผิวและภายใน คือที่ผิวมี แรงเศษเหลือที่อาจเป็นแรงดูดหรือผลักก็ได้ เมื่อเทียบกับแรงภายในเนื้อของแต่ละวัฏภาค เมื่อเป็นเช่นนี้ โมเลกุลสารในอีกวัฏภาคหนึ่ง จะเข้ามาติดแน่นกับผิวถ้าแรงดังกล่าวมาก และ โอกาสที่จะมีโมเลกุลมาอยู่ใกล้ผิวก็จะมากทำให้ได้ความหนาแน่นของโมเลกุลสารชนิดนั้นที่ผิวมากกว่าในเนื้อในของวัฏภาคนั้นๆ ในทางตรงข้ามแรงนั้นอาจผลักรวมทำให้โมเลกุลของสารบางชนิดหนีห่างออกไป และได้ผลตรงข้ามในกรณีการดูดซับแรงนี้จะเป็นแรงดูดซึ่งอาจแรงหรืออ่อนแล้วแต่ชนิดของโมเลกุล

นิยาม 2 กำหนดให้การดูดซับเคมี เป็นการดูดซับที่มีค่าพลังงานการยึด (Binding energy) มากกว่า 0.5 eV ต่ออนุภาคที่ถูกดูดซับ และมีการถ่ายเทหรือใช้อิเล็กตรอนร่วม ซึ่งแบ่งแยกจากการดูดซับกายภาพ ($1 \text{ eV} = \text{electronvolt} = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ joule}$)

แต่ถ้าจะกล่าวในเชิงเปรียบเทียบกับแรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลที่เป็นแบบอ่อน เช่น แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der waal) หรือ แรงกระจายตัวของลอนดอน (London dispersion force) ซึ่งเป็นผลจากการกระเจิงต่อการกระจายตัวของอิเล็กตรอนบนผิว และ รอบโมเลกุลตัวถูกดูดซับทำให้เกิดแรงทางไฟฟ้าประเภทไดโพล (Dipole) ฯลฯ แรงกระทำในการดูดซับกายภาพจัดอยู่ในลักษณะเดียวกันเป็นส่วนใหญ่ แรงกระทำในการดูดซับเคมีนั้นจะเปรียบได้กับแรงพันธะทางเคมีระหว่างอะตอมในโมเลกุล แต่การที่อีกด้านหนึ่งเป็นของแข็งที่มีอิเล็กตรอนเป็นแบบไม่ประจำถิ่น (Delocalized) นั่นคือมีแถบ (Band) และช่องว่าง (Gap) พันธะการดูดซับทางเคมีจึงไม่เหมือนกับพันธะทางเคมี เช่น โคเวเลนต์ (Covalent) แน่นอนถ้ำของแข็งนั้นเป็นอโลหะ ลักษณะของพันธะการดูดซับเคมี จะคล้ายกับพันธะทางเคมีโคเวเลนต์ระหว่าง อะตอมมาก กล่าวคือมีลักษณะของอิเล็กตรอนประจำถิ่น (Localized) การดูดซับที่มีผลในงานบำบัดน้ำ มีทั้งส่วนที่เป็นการดูดซับ

เคมีและการดูดซับกายภาพ โดยทั่วไปการดูดซับจะเกิดในตำแหน่งจำเพาะบนตัวดูดซับ ซึ่งเป็นของแข็งที่มีโครงสร้างผลึก

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อดูดซับโมเลกุลเข้าติดผิวจนเต็มทุกตำแหน่ง ก็จะปิดผิวนั้นด้วยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทน และจะทำให้แรงดูดของผิวตัวดูดซับจะอ่อนลง แต่อาจยังคงดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับอื่นๆ ต่อไปได้ และถือเป็นขั้นที่สอง สาม สี่ ไปเรื่อยๆ แน่ในความเป็นจริงแล้ว อาจจะมีการต่อขั้นที่สองก่อนที่ขั้นแรกจะเต็ม และในบางตำแหน่งอาจดูดต่อจนเป็นชั้นซ้อนสูงหลายชั้น และในแต่ละแถวที่ต่อซ้อน จะมีแรงกระทำทั้งผลึกหรือดูดกัน ตลอดจนผลของโครงสร้างผลึกที่ผิวที่มีความไม่สม่ำเสมอ ของแรงกระทำดูดซับในตำแหน่งต่างๆ (จ่ายฮก, 2538)

เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resins) ส่วนมากเป็นโพลีเมอร์สังเคราะห์ซึ่งโครงสร้างของโพลีเมอร์ประกอบด้วยหมู่ที่มีประจุ เช่น $-SO_3^-$, $-COO^-$ หรือ $-NR_3^+$ โพลีเมอร์เหล่านี้สามารถดูดซับได้ทั้งตัวถูกละลายที่มีประจุลบและไม่มีประจุ สำหรับเรซินที่ทำมาจาก styrene และ divinylbenzene มักจะดูดซับสารจำพวกที่ไม่มีขั้ว (Nonpolar) ส่วนเรซินพวก acrylic ester มีแนวโน้มให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการดูดซับตัวถูกละลายพวกไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic solutes) นอกจากนี้สารพวกไฮโดรเจล (Hydrogels) เช่น เจลของ polyacrylamides ก็มีการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับเช่นกัน

ตัวดูดซับอื่นๆ ที่นอกเหนือจากนี้มีการนำมาใช้น้อยมาก เช่น สารซีโอไลต์จากธรรมชาติ และจากการสังเคราะห์ (Natural and synthetic zeolites) มักใช้สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ดินเหนียว (Clays) แทบจะไม่ค่อยมีการนำมาใช้ ซิลิกาเจล (Silica gel) และ อะลูมินา (Alumina) สามารถนำมาใช้ในการแยกน้ำ

2.3.2 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากก๊าซ หรือ ของเหลวมายังของแข็ง หรือ ของเหลว-การเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 4 ระยะติดต่อกันดังนี้

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

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

ขั้นตอนที่ 3 Pore transport หลังจากเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำ (Hydrodynamic boundary layer) สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่ผ่านช่องที่อยู่ภายในสารดูดติดผิวไปสู่บริเวณที่จะเกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 Adsorption หลังจากสารดูดติดผิวมีการเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีการดูดซับเกิดขึ้น จะถูกดูดติดผิวทางกายภาพ

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

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film Diffusion และ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนาแน่นมาก เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความปั่นป่วนสูงทำให้ Pore Diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

พื้นที่ผิวของสารดูดซับ พื้นที่ผิวของสารดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ยกเว้นในกรณีที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่า รูพรุนของสารดูดซับ

ขนาดของสารดูดซับ อัตราการดูดซับ เป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ การลดขนาดของสารดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่

ความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับ โมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำ และเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง จึงเป็นสารที่ยากในการดูดซับ ดังนั้น สารที่ไม่ละลายน้ำ หรือ ละลายน้ำได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวสารดูดซับได้ดี

ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ

ค่าพีเอช ค่าพีเอชของสารละลาย เป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องมาจากค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออน และการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้น จึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับมาก

อุณหภูมิ ในกรณีการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลง ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนช่วยให้ ความหนาของฟิล์มน้ำลดลง การเคลื่อนย้ายสารถูกดูดซับจากสารละลายภายนอก (Bulk Solution) เคลื่อนย้ายสารถูกดูดซับจากสารละลายภายนอก (Bulk Solution) เคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว

2.4 น้ำเสีย

2.4.1 นิยามของน้ำเสีย

ตามพระราชบัญญัติส่งเสริม และรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ได้ให้ความหมายของน้ำเสีย คือ ของเหลวซึ่งผ่านการใช้แล้ว ทั้งที่มีกาก และไม่มีกาก หรือ ของเสียที่อยู่ในสภาพเป็นของเหลวรวมทั้งมวลสารที่ปะปนหรือปนเปื้อนในของเหลวในปริมาณสูง จนกระทั่งกลายเป็นน้ำที่ไม่เป็นที่ต้องการ และเป็นที่น่ารังเกียจของคนทั่วไปที่พบเห็น ไม่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ต่อไปอีกหรือถ้าปล่อยลงสู่ลำน้ำธรรมชาติ ก็จะทำให้คุณภาพน้ำของธรรมชาติเสียหายได้ สิ่งเจือปนที่ทำให้น้ำกลายเป็นน้ำเสีย ได้แก่ สารอินทรีย์ต่างๆ กรด ด่าง ของแข็งหรือสารแขวนลอย และสิ่งที่ลอยปนอยู่ในน้ำ เช่น น้ำมัน ไขมัน เกลือและแร่ธาตุ ที่เป็นพิษ เช่น โลหะหนัก สารที่ทำให้เกิดฟอง ความร้อน สารพิษเช่น ยาฆ่าแมลง สี กลิ่น เป็นต้น (พระราชบัญญัติส่งเสริม และรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2535)

2.4.2 ลักษณะของน้ำเสีย

1. สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ทำให้ระดับออกซิเจนละลายในน้ำ หรือ ค่าดีไอ (DO, dissolved oxygen) ลดลงเกิดสภาพเน่าเหม็นได้ ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำนิยมนวัดด้วยค่า บีโอดี (BOD, Biochemical oxygen demand) เมื่อค่าบีโอดีในน้ำสูง แสดงว่าสารอินทรีย์ปะปนอยู่มาก และสภาพเน่าเหม็นจะเกิดขึ้นได้ง่าย

2. สารอนินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่างๆ ที่อาจไม่ทำให้เกิดน้ำเน่าเหม็น แต่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ทำให้เกิดสภาพน้ำปนเปื้อน หรือ เป็นอุปสรรคในกระบวนการผลิตน้ำประปา ได้แก่ คลอไรด์ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ ฯลฯ

3. โลหะหนักและสารพิษอื่นๆ อาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ และสามารถสะสมอยู่ในวงจรอาหาร เกิดเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น พรอท แคลเดเมียม ทองแดง ปกติจะอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดศัตรูพืชที่ปนมากับน้ำทิ้งจากการเกษตร สำหรับในเขตชุมชนอาจมีสารพิษนี้มาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่น ร้านชุบโลหะ อู่ซ่อมรถ ฯลฯ

4. น้ำมันและสารลอยน้ำต่างๆ เป็นอุปสรรคต่อการสังเคราะห์แสง และกีดขวางการกระจายของออกซิเจนจากอากาศลงสู่น้ำ นอกจากนั้นยังทำให้เกิดสภาพไม่น่าดู และอาจเกิดอันตรายจากอัคคีภัยได้ด้วย

5. ความร้อน ทำให้เกิดการแบ่งชั้น (Stratification) ของลำน้ำ เร่งปฏิกิริยา การใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ และ ลดระดับของการละลายของออกซิเจนในน้ำ อาจทำให้เกิดสภาพเน่าเหม็นขึ้นได้ อุณหภูมิของน้ำที่เหมาะสมควรอยู่ประมาณ 25-35 องศาเซลเซียส

6. ของแข็ง (Solids) ประกอบด้วย สารแขวนลอย (Suspended solids), ตะกอนหนัก (settleable solids) และของแข็งละลาย (Dissolved solids) ซึ่งเมื่อจมน้ำตัวผู้กั้นลำน้ำ ทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนที่ท้องน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน มีความขุ่นสูง มีผลกระทบต่อ การดำรงชีพของสัตว์น้ำ และการนำน้ำไปใช้ประโยชน์

7. สีและความขุ่น มักเกิดจากอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ กระดาษ ฟอกหนัง และ โรงฆ่าสัตว์ โดยสี และความขุ่นจะขัดขวางกระบวนการสังเคราะห์แสงในลำน้ำ

2.4.3 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 และ ไชยยุทธ, 2524) การแบ่งประเภทของเสียโดยวิธีการนี้สามารถแบ่งน้ำเสียได้เป็น 3 ประเภท คือ

น้ำเสียชุมชน (Domestic wastewater)

น้ำเสียจากแหล่งชุมชน คือ น้ำที่ถูกใช้จากแหล่งชุมชนต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย ส่วนผสมของ สารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ต่างๆ ในรูปของขนาดใหญ่ ขนาดเล็ก หรือ ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า น้ำเสียยังมีสิ่งมีชีวิตเล็กมากอาศัยปะปนอยู่ด้วย ได้แก่ แบคทีเรีย ไวรัส และ โปรโตซัว น้ำเสียชุมชนหรืออาจจะเรียกอีกอย่างว่าน้ำโสโครก (Sewage) ได้แก่ น้ำทิ้งที่มาจากชุมชน บ้านเรือนที่พักอาศัย อาคาร ร้านค้า กภัตราคาร โรงแรม เป็นต้น โดยน้ำเสียดังกล่าวมักเกิดจากมนุษย์

น้ำเสียเกษตรกรรม (Agricultural wastewater)

น้ำเสียจากทางเกษตร เป็นน้ำเสียที่ถูกปล่อยมาจากพื้นที่ที่มีกิจกรรมเกี่ยวกับการเกษตร ไม่ว่าจะเป็นพื้นที่เพาะปลูก หรือพื้นที่เลี้ยงสัตว์ สิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำเสียที่มาจากพื้นที่เลี้ยงสัตว์ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งมาจากเศษอาหารสัตว์ และสิ่งขับถ่ายออกจากตัวสัตว์ ซึ่งน้ำเสียส่วนนี้มักจะมี ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ค่อนข้างสูงรวมทั้งอาจจะมี ความเข้มข้นของแข็งไม่ละลายน้ำสูงด้วย ส่วนน้ำเสียที่มาจากพื้นที่เพาะปลูกมักมีการปนเปื้อนสารเคมี ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช ที่ถูกใช้ใน พื้นที่เพาะปลูก ดังนั้น อาจจะสามารถกล่าวได้ว่าน้ำเสียจากเกษตรกรรมมักมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์เป็นจำนวนมากรวมทั้งสารเคมีด้วย

น้ำเสียอุตสาหกรรม (Industrial wastewater)

น้ำเสียอุตสาหกรรมจะเป็นน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสิ่งสกปรกที่แตกต่างกัน และปริมาณของสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนก็แตกต่างกันด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรม วัตถุประสงค์ที่ใช้ ตลอดจน

กระบวนการผลิตที่ใช้ โดยสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนอาจเป็นสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ หรืออาจจะเป็นสารทั้ง 2 ที่กล่าวมาก็ได้ น้ำเสียอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการล้างวัตถุดิบ การล้างเครื่องจักรอุปกรณ์ การระบายความร้อน รวมทั้งกิจกรรมต่างๆของพนักงานในโรงงาน เป็นต้น

2. การแบ่งประเภทของน้ำเสียตามลักษณะสมบัติของสิ่งสกปรก (Classification of wastewater by type impurities)

การจำแนกชนิดของน้ำเสีย วิธีการนี้อาศัยแบ่งตามลักษณะสมบัติของสิ่งปนเปื้อน โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

น้ำเสียอินทรีย์ (Organic wastewater)

น้ำเสียที่เป็นน้ำเสียที่มีสิ่งสกปรกปนเปื้อน เป็นสารอินทรีย์ซึ่งจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ น้ำเสียประเภทนี้ได้แก่ น้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร และแปรรูปอาหาร น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ น้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ เป็นต้น

น้ำเสียอนินทรีย์ (Inorganic wastewater)

น้ำเสียอนินทรีย์เป็นน้ำเสียที่มีสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนสารอนินทรีย์ซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ น้ำเสียประเภทนี้ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานปิโตรเคมี อุตสาหกรรมผลิตสารเคมี อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นต้น

2.4.4 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ประกอบด้วย

1. แบบดั้งเดิม (Conventional) ใช้วิธีการตกตะกอน (Precipitation) โลหะหนักที่ละลายอยู่ด้วยค่า เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) โลหะบางชนิดมีความเป็นพิษสูง และละลายน้ำได้ดี เช่น โครเมต (Cr⁶⁺) จึงต้องรีดิวซ์ให้อยู่ในรูป Cr³⁺ ซึ่งไม่มีพิษ และตกตะกอนเป็น Cr(OH)₃ ปฏิกริยารีดักชัน และตกตะกอนจะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับ pH ปริมาณ และชนิดของสารเคมี ระยะเวลาสัมผัสสารเคมี และระยะเวลาการตกตะกอนที่ใช้

2. การแยกและการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recover and recycle) มีหลายวิธี เช่น

2.1 รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO)

เป็นการแยกโลหะออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดัน ระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยเซลลูโลสอะซีเตต (Cellulose Acetate) และโพลีเอไมด์ (Polyamide) หรือเมมเบรนที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ ที่ทำให้ทนต่อสารเคมีได้ดีกว่า และทนต่อแรงดันสูง วิธีนี้เหมาะสำหรับการกำจัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีอุณหภูมิในกระบวนการสูง ต้นทุนในการก่อสร้างขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านเข้าระบบต่อวัน ซึ่งวิธีนี้สามารถแยกน้ำออกได้ถึง 95% และกำจัดโลหะหนักได้มากกว่า 98% แต่กำจัดได้น้อยกว่า 80% หากน้ำเสียมีแคลเซียมซัลเฟตและเหล็กอยู่ด้วย เพราะจะทำให้เมมเบรนทำงานไม่ได้

2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange, IE)

เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุเหมือนกับที่อยู่ในสารละลายกับไอออนที่เกาะอยู่บนผิวเรซิน โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบ อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนควบคุมได้ด้วยอัตราการไหล วิธีนี้มีความเฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นโลหะหนักต่ำ เรซินที่จับโลหะไว้นั้นต้องนำกลับมาใช้งานอีก โดยการกำจัดเอาโลหะออกด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมแล้วกำจัดอีกครั้งหนึ่ง

2.3 การระเหย (Evaporation)

การระเหยนํ้าออกทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง สามารถนำไปใช้ร่วมกับวิธีแลกเปลี่ยนไอออน แต่ต้นทุนการดำเนินการสูง

2.4 การสกัดกลับด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery, ER)

เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด และเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยม เพราะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก เนื่องจากสารละลายที่เจือจางทำให้ความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น วิธีนี้เหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะระหว่าง 10 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.5 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction, SE)

วิธีนี้ใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติเลือกสกัดไอออนโลหะหนักบางชนิด โดยการละลายสารสกัดในตัวทำละลายที่เหมาะสม การกำจัดโลหะด้วยวิธีนี้จะประหยัด นอกจากนี้ยังเพิ่มค่า BOD และ COD ของน้ำทิ้งในขั้นสุดท้าย

2.6 อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis, ED)

เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) กลไกวิธีนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีปริมาณโลหะระหว่าง 200-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนค่าก่อสร้าง และดำเนินการสูง แต่ข้อดีคือ สามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

2.7 ดอนแนนไดอะไลซิส (Donnan Dialysis, DD)

เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เมมเบรนที่ยอมให้ไอออนบวกหรือลบผ่านได้ เมมเบรนมีลักษณะเป็นท่อที่ด้านในให้น้ำเสียไหลผ่าน ส่วนด้านนอกมีสารละลายของสารรีเจนเนอแรนต์ (Regenerant) ไหลผ่านด้านบนและล่างท่อในทิศทางตรงข้าม ความเข้มข้นของโลหะจะลดลงตามความยาวของท่อ วิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงถึง 99% ใช้พลังงานน้อยกว่ารีเวิร์สออสโมซิส และอิเล็กโตรไดอะไลซิส แต่วิธีนี้ยังอยู่ระหว่างการพัฒนาในห้องปฏิบัติการ

2.8 การเติมโอโซน (Ozonation)

เป็นเทคนิคใหม่ที่ใช้ในการกำจัดน้ำเสียทุกชนิด วิธีนี้ใช้กันมานานในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา และของโสโครก ก๊าซโอโซนจะกำจัดโลหะหนักทุกสภาพที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ ถ้าใช้ร่วมกับอัลตราไวโอเลต ปฏิกริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และประหยัด โลหะหนักในน้ำเสียจะถูกออกซิไดส์ ซึ่งทำให้มีลักษณะเป็นวุ้น จึงกรองออกได้ง่าย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพชรพร (2537) ในการวิจัยนี้ใช้ผักตบชวา และชานอ้อยเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดของโลหะหนักที่ทำการศึกษา ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี การทดลองที่ใช้ เป็นแบบคอลัมน์ที่มีชั้นความสูงของเรซิน 20 เซนติเมตร น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีค่าพีเอชประมาณ 5.0 และมีความเข้มข้นของโลหะหนัก 5, 10, 20, 50 มิลลิกรัม/ลิตร ไหลผ่านชั้นเรซินด้วยอัตราไหล 3 ปริมาตรเรซิน/ชั่วโมง ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ กระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพผักตบชวา และชานอ้อย และ ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ปรับสภาพมีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วง 0.686-0.809 มิลลิอิกวิวาเลนซ์/กรัม ส่วนผักตบชวาที่ปรับสภาพแบบคาร์บอกซิเมทิลซัลโฟเอทิล และ ครอสส์ลิงค์แซนเทมมีค่าอยู่ในช่วง 0.330-0.496 มิลลิอิกวิวาเลนซ์ 0.233-0.503 มิลลิอิกวิวาเลนซ์/กรัม และ 0.279-0.595 มิลลิอิกวิวาเลนซ์/กรัม ตามลำดับ สำหรับชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน มีค่าอยู่ในช่วง 0.065-0.086 มิลลิอิกวิวาเลนซ์/กรัม และชานอ้อยที่ปรับสภาพแบบคาร์บอกซิเมทิล มีค่าอยู่ในช่วง 0.052-0.069 มิลลิอิกวิวาเลนซ์/กรัม ผลจากการวิจัยพบว่า การปรับสภาพโดยวิธีทางเคมีทั้ง 3 วิธี ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวา และชานอ้อยลดลง สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของโลหะหนักน้อยลง สำหรับการรีเจนเนอเรชันใช้สารรีเจนเนอเรนต์แต่ละชนิด เข้มข้น 0.5 นอร์มอล ประมาณ 2-3 ปริมาตรเรซิน

ศิริรัตน์ (2543) ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักต่างๆ ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี แคลเซียม และ โครเมียม โดยใช้ตัวดูดซับ 5 ชนิด ได้แก่ แร่ดินเหนียว 2 ชนิดคือ Kaolinite และ Bentonite ตัวอย่างดินเหนียว 3 แห่ง จากอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี (S1), จากอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา (S2) และจากเหมือง MRD-ECC (S3) ศึกษาการดูดซับในช่วงเวลาต่างๆ ได้แก่ 15 30 45 60 120 และ 180 นาที โดยจากการศึกษาพบว่าแร่ดินเหนียว Bentonite สามารถดูดซับโลหะหนักได้สูงสุดรองลงมาได้แก่ ดินเหนียว S1 ดินเหนียว S2 ดินเหนียว S3 และแร่ดินเหนียว Kaolinite ตามลำดับ โดยดินเหนียวที่มีองค์ประกอบเหมือนกัน แต่ค่าพีเอชต่างกันจะมีความสามารถในการดูดซับแตกต่างกัน โดยดินเหนียวพีเอชสูงสามารถดูดซับได้ดีกว่าดินเหนียวที่มี

พีเอชต่ำๆ และเมื่อค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการถูกดูดซับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ คือ $Cr > Pb > Cd > Zn$ ยกเว้นแร่ดินเหนียว Kaolinite ที่สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงที่สุด

อภิชน (2544) ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน คือการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสีย โดยในขั้นตอนนี้จะประกอบด้วยการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักภายใต้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งมีการศึกษาถึงผลกระทบของค่าพีเอชของน้ำเสีย ปริมาณและชนิดของสารอนินทรีย์ เช่น ซัลเฟต คลอไรด์ ไนเตรต เป็นต้น ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลถึงประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสีย และการนำกลับโครเมียมมาใช้อีกครั้ง ขั้นตอนที่สองคือ การศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการนำโครเมียมกลับมาใช้ใหม่ โดยได้ใช้วิธีการชะละลายด้วยกรด และ/หรือด่าง โดยได้นำคะตะลิสต์ที่มีโครเมียมติดอยู่ที่ผิวในสภาวะต่างๆ ที่ผ่านการทดลองในขั้นตอนแรกมาทดลอง เพื่อหาว่าการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียด้วยสภาวะใด จึงจะสามารถนำกลับโครเมียมมาใช้ได้มากที่สุด และควรนำกลับด้วยการชะละลายวิธีใด ในสภาวะ การชะละลายอย่างไรจึงจะเหมาะสมที่สุด ในขั้นตอนนี้สองนี้ กรดหลายชนิดเช่น กรดซัลฟูริก กรดไนตริก เป็นต้น รวมทั้งด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น จะถูกนำมาใช้เป็นสารในการชะละลายโครเมียม ผลที่ได้จากการศึกษานี้จะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการแยก หรือ กำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสีย และการนำกลับโครเมียมเพื่อนำมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมชุบโลหะ อนึ่ง เพื่อให้งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ได้จริงกับโรงงานอุตสาหกรรมงานวิจัยนี้ยังครอบคลุมไปถึงการทดลองบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในทางเทคโนโลยีในการนำวิธีการนี้ไปประยุกต์กับน้ำเสียของอุตสาหกรรมอีกด้วย

ชัชฎาพร (2545) การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ต้นมันสำปะหลังใบสับปะรด และกาบมะพร้าว ชนิดไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัลปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% ความเข้มข้นของโลหะหนัก (นิกเกิล ทองแดง และสังกะสี) ที่ทำการศึกษา ได้แก่ 5, 10, 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองแบบที่ละเทการวิจัยพบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าวชนิดไม่ปรับสภาพจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้สูงกว่าชนิดที่ปรับสภาพด้วย ฟอร์มาลดีไฮด์ 5% ชนิดที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% และชนิดที่ปรับสภาพด้วย 1 นอร์มัล กรดไฮโดรคลอริก ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิลและสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลังและใบสับปะรด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิลและ

สังกะสีเฉลี่ยเท่ากับ 67.72%, 22.55% และ 44.78% ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมี ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่ดีที่สุด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในน้ำเสีย 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยพบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะจะลดลง นอกจากนี้ผลการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีความเข้มข้นของทองแดง นิกเกิล และสังกะสีเริ่มต้นเท่ากับ 3.930, 4.034 และ 0.567 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่ากาบ มะพร้าวชนิดไม่ได้ปรับสภาพสามารถกำจัดโลหะหนักดังกล่าวได้เฉลี่ย 85.80, 65.13 และ 90.43 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

เพชรพร (2546) เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ และเร- ซินแลกเปลี่ยนไอออน ที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ มีแนวโน้มสามารถนำไปใช้ ทดแทนเรซินสังเคราะห์ในการกำจัดทองแดงได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงสูงที่สุดที่ ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 97.98% และ 88.90% ตามลำดับ และเมื่อความ เข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงลดลง เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจาก เปลือกถั่วเหลือง ชนิดไม่ปรับสภาพ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากก้านดอกทานตะวัน ชนิด ไม่ปรับสภาพ มีขีดความสามารถในการกำจัดทองแดง เท่ากับ 0.89 และ 1.05 meq/g. ตามลำดับ

วิมลรัตน์ (2545) งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาการดูดซับโลหะหนัก (ตะกั่ว, สังกะสี, ทองแดง และ แคดเมียม) โดยใช้สาหร่ายช่อพริกไทยซึ่งเป็นสาหร่ายทะเล โดยนำมาอบแห้งเพื่อใช้ เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ การทดลองในห้องต้นแสดงให้เห็นถึงช่วงของค่าความเป็นกรด่างที่ใช้ ในการทดสอบการดูดซับ ซึ่งเป็นช่วงความเป็นกรด่างที่โลหะหนักต่างๆ เหล่านี้สามารถละลายอยู่ ในรูปของสารละลายได้ การทดสอบการดูดซับโดยใช้สาหร่ายช่อพริกไทยกับสารประกอบโลหะ หนักรูปแบบต่างๆ เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต และ ไนเตรต พบว่าค่าการดูดซับของโลหะหนักต่าง รูปแบบกันมีค่าใกล้เคียงกัน การทดสอบการชะล้างด้วยน้ำร้อนและ EDTA แสดงให้เห็นว่าโลหะ หนักไม่สามารถถูกชะล้างด้วยน้ำร้อนแต่สามารถถูกชะล้างได้ดีด้วย EDTA โดยผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่า พันธะการดูดซับไม่น่าจะเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ แต่ควรเป็นพันธะที่มีความ แข็งแรงกว่า เช่น แรงไอออนิกหรือโควาเลนต์การศึกษาลักษณะทางจลนศาสตร์ของการดูดซับด้วย มวลชีวภาพพบว่าการดูดซับเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยโลหะหนักถูกกำจัดได้ 80-90% ภายในเวลา 20 นาที ซึ่งเป็นผลที่เน้นว่ากลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกลไกแบบ passive transport นอกจากนี้การ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมสามารถเกิดพันธะแบบโควาเลนต์กับ C-O ใน หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว, สังกะสี และทองแดง นอกจากสามารถเกิด พันธะโควาเลนต์กับ C-O แล้ว ยังสามารถเกิดพันธะอเล็กโตรสแตติกหรือพันธะไอออนิกกับหมู่ คาร์บอกซิลซัลโฟนิล และ อะมิโน อย่างไรก็ตามการศึกษาถึงผลของขนาดของสาหร่าย พบว่าการ

ดูดซับสังกะสีมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของสาหร่ายเล็กลงซึ่งไม่เกิดขึ้นกับโลหะอื่นๆ นั้นแสดงว่าการดูดซับสังกะสีด้วยมวลชีวภาพน่าจะเกิดขึ้นกับตำแหน่งเป้าหมายบนสาหร่ายที่แตกต่างจากโลหะอื่นๆ และจากการศึกษาความสามารถในการดูดซับพบว่าสาหร่ายช่อพริกไทยสามารถดูดซับแคดเมียมได้สูงสุด ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า (ก) ตำแหน่งเป้าหมายของแคดเมียมแตกต่างจากโลหะอื่นๆ หรือ (ข) ตำแหน่งเป้าหมายของแคดเมียมอาจจะเหมือนกับตำแหน่งสำหรับโลหะอื่น แต่ตำแหน่งนี้สามารถสร้างพันธะกับแคดเมียมได้ง่ายกว่าโลหะอื่นๆ การศึกษายังพบว่า โลหะส่วนมากสามารถถูกดูดซับได้ดีที่ค่าความเป็นกรด/ด่างสูงขึ้น ยกเว้นการดูดซับตะกั่วที่การดูดซับเป็นไปได้ในช่วงค่าความเป็นกรด/ด่างต่ำ และเมื่อค่าความเป็นกรด/ด่างสูงขึ้นจะให้ค่าการดูดซับที่ต่ำลง นอกจากนี้พบว่า การดูดซับของโลหะทั้ง 4 เป็นไปตามไอโซเทอร์มของ Langmuir

ธนาญจน์ (2548) การวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษากำจัดไซยาไนด์และโลหะหนักในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะขนาดกลาง และขนาดเล็กด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยเลือกใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก และไอออนลบที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาด นำมาทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์อย่างเดียว และไซยาไนด์ผสมโลหะหนัก ได้แก่ น้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ผสมโครเมียม ไซยาไนด์ผสมทองแดง ไซยาไนด์ผสมนิกเกิล ไซยาไนด์ผสมสังกะสี และไซยาไนด์ผสมโลหะรวม 4 ชนิด ที่พีเอช 10 และ 12 เพื่อศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์และโลหะหนัก ผลการทดลองแบบแบตช์ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ IRA 402 CI ปริมาตร 0.15 ลิตรเรซินต่อลิตรน้ำ สามารถกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์อย่างเดียวความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้มากกว่าร้อยละ 94 และในน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ผสมโลหะหนักสามารถกำจัดไซยาไนด์และโลหะหนัก ได้มากกว่าร้อยละ 91 และ 96 ตามลำดับ โดยที่พีเอชของน้ำเสียและประเภทของโลหะหนักที่ผสมอยู่ในน้ำเสีย ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดไซยาไนด์และโลหะหนัก ส่วนเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก IR 120 Na สามารถกำจัดไซยาไนด์และโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ผสมโลหะหนักได้ร้อยละ 1.5 และ 3 ตามลำดับ สำหรับผลการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า น้ำเสียที่ไหลผ่านชุดคอลัมน์เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกไม่สามารถกำจัดได้ทั้งไซยาไนด์และโลหะหนัก ดังนั้น ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์อย่างเดียว และไซยาไนด์ผสมโลหะหนัก ควรใช้ชุดคอลัมน์เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบประเภทของโลหะหนักที่ผสมอยู่ในน้ำเสีย มีผลต่อค่าความจุของเรซินในการกำจัดไซยาไนด์ทำให้มีค่าความจุของเรซินน้อยกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์อย่างเดียว และเมื่อนำชุดคอลัมน์เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบไปประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ และไซยาไนด์ผสมโลหะหนักให้มีค่าไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์อย่างเดียว ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดได้ถึง 50 BV (ปริมาตรของคอลัมน์) สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ไซยาไนด์ผสมโครเมียม ไซยาไนด์ผสมทองแดง ไซยาไนด์ผสมนิกเกิลสามารถบำบัดได้ 40 BV

ส่วนโซยาไนต์ผสมสังกะสี โซยาไนต์ผสมโลหะรวม 4 ชนิด สามารถบำบัดได้ 60 และ 110 BV ตามลำดับ

ชเรศ (2540) การศึกษาความสามารถในการดูดซับผิวแคดเมียม และสังกะสี โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในขั้นตอนการเตรียมถ่าน พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาถ่านคือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด คือ ถ่านกะลามะพร้าว ถ่านเมล็ดมะขามจะมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 651 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 609 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 366.68 ตารางเมตรต่อกรัม และ 137.05 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรงเท่ากับ 0.17 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 0.27 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัมขนาดโพรงเฉลี่ยเท่ากับ 14.42 อังสตรอม และ 19.05 อังสตรอม ตามลำดับ การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช พบว่าค่าที่ความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับผิวแคดเมียม (K) ของถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขามเท่ากับ 6.4912 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 4.2854 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับค่า $1/n$ เท่ากับ 0.723 และ 0.4508 ตามลำดับ และค่า K ของการดูดซับสังกะสีของถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขามเท่ากับ 7.6839 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 5.3654 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ค่า $1/n$ เท่ากับ 0.5451 และ 0.4045 ตามลำดับ การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ โดยใช้ถังดูดซับแบบแท่ง เลือกใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว บรรจุลงในคอลัมน์สูง 90 เซนติเมตร แล้วบรรจุทรายลงในคอลัมน์ 30 เซนติเมตร ที่ระดับความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว 1 กรัม สามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้เท่ากับ 1.784, 1.388 และ 1.058 มิลลิกรัม ตามลำดับ คิดเป็น 72.23, 64.21 และ 50.82 BM ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และได้นำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ไปผ่านการฟื้นฟูสภาพ โดยการใช้สารละลายกรดไฮดรอกลอริก ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 288 มิลลิกรัมต่อกรัม

Yadava (1991) ศึกษาการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียโดยใช้ตัวดูดซับเป็น China Clay และ Wallastinite พบว่า ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับจะขึ้นกับอุณหภูมิของสารละลายที่มีตัวดูดซับและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับคืออุณหภูมิค่า เวลาที่การดูดซับเข้าสู่สมดุลสำหรับ China Clay เท่ากับ 90 นาที และสำหรับ Wallastinite เท่ากับ 120 นาที ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ จะถูกศึกษาไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ พบว่าความร้อนของการดูดซับตะกั่วบน China Clay และ Wallastinite เท่ากับ $-77.95 \text{ kJ.mol}^{-1}$ และ $-16.40 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ตามลำดับชี้ให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อนทั้ง 2 ระบบที่ทำการศึกษา

Leyva-Ramos, et.al. (1995) ศึกษาการดูดซับโครเมียม(III) บนถ่านกัมมันต์ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ pH และอุณหภูมิ ผลของ pH ที่มีต่อการดูดซับจะทำการศึกษาที่ pH 2, 4, 5 และ 6 จากการวิจัยพบว่าเมื่อค่า pH ต่ำกว่า 2 โครเมียม(III) จะไม่ถูกดูดซับ และที่ค่า pH มากกว่า 6.4 โครเมียม(III) จะตกตะกอนเป็นโครเมียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้น การดูดซับสูงสุดจะเกิดที่ pH 5 ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้น 20 % เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40 องศาเซลเซียส จากการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าโครเมียม(III) สามารถถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ได้ และการดูดซับขึ้นกับ pH เป็นอย่างมาก

Rengaraj (2006) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากำจัดโครเมียมในน้ำเสีย โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกได้แก่ IRN77 และ SKN1 โดยทำการทดลองแบบแบตช์ ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นของโครเมียม ค่าพีเอช และ ระยะเวลาในการสัมผัส จากผลการทดลองพบว่าเรซินมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม 95% ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้ไอโซเทอร์มฟรุนด์ลิช เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก IRN77 และ SKN1 มีความสามารถในการดูดซับ 35.38 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 46.34 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกเป็นตัวดูดซับที่ดี เนื่องจากสามารถกำจัดโครเมียมออกจากสารละลายได้ดี

Bai Y, Bartkiewicz B. (2009) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากำจัดแคดเมียมในน้ำเสียโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน Amberjet 1200H ด้วยวิธีคอลัมน์ ในการทดลองได้บรรจุเรซิน 2.3 g. ลงในคอลัมน์แก้ว โดยใช้อัตราการไหลของน้ำเสีย 10 m³/hr. ที่ความเข้มข้น 40 mg/L พบว่าที่ pH 4-7 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมมากกว่า 90% และพบว่าที่ pH ต่ำกว่า 2 จะมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดน้อยมาก โดยเรซินมีความสามารถในการดูดซับ 3.0 meq Cd/g. โดยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยรีเจนเนอเรตด้วย 6% HCl ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับที่สอดคล้องคือฟรุนด์ลิชไอโซเทอร์ม

Koivula. R. (2009) การศึกษากำจัด Cd²⁺ โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้คอลัมน์ ในลักษณะของการไหล ลักษณะการดูดซับของโลหะลงบนเรซิน ได้อธิบายไว้โดย isotherms ของ Freundlich การแลกเปลี่ยนไอออนของแคดเมียมในเรซินนี้ใช้หลักจลนศาสตร์ โดยขีดที่เป็นความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของแคดเมียมบนเรซินนั้น จะศึกษาในสารละลายโลหะและความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 3.0 meq Cd/g ส่วนเรซินจะต้องใช้กับกรด HCl รูปแบบต่างๆ ในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน มักจะใช้ในกระบวนการดูดซับ เรซินที่มีองค์ประกอบของกลุ่มซัลโฟเนต ถูกพบในการกำจัดของ Cd²⁺ ปริมาณของไอออนโลหะ เป็น 4.7 meq/g ต่อเร-

จีนแห้ง อีกประการหนึ่งที่พบสำหรับสามารถในการดูดซับ Cd^{2+} ของ Amberlite IR-120 บนเรซิน
คือ 3.3 meq/g

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer, AAS) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น AAS-200 New
2. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AUX220
3. เครื่องชั่งละเอียด 3 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Denver Instrument Company รุ่น TR403
4. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter) ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 827
5. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (conduct meter) ยี่ห้อ Consort รุ่น C860
6. เครื่อง Heating mantle ยี่ห้อ FALC Instruments BE 6
7. ตู้อบความร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ Fisher Scientific 700 Series
8. คอลัมน์แก้ว (Column) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ความสูง 25 cm
9. ภาชนะพลาสติกบรรจุน้ำเสียดังเคราะห์ และ สายยางพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm
10. ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่าง ขนาด 60 mL
11. โยแก้ว
12. Glass bead
13. เครื่องแก้วต่าง ๆ

3.1.2 สารเคมี

1. เรซินชนิดประจุบวก Lewatit MomoPlus S108 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว
2. แคลเดียมคลอไรด์ ($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$) ยี่ห้อ Univar เกรดวิเคราะห์
3. สารละลายกรดไนตริก 65% (HNO_3) ยี่ห้อ LobaChemie เกรดห้องปฏิบัติการ
4. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
5. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
6. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4OAc) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
7. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
8. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์

9. สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ยี่ห้อ Fisher Scientific เกรดวิเคราะห์
10. เอธิลแอลกอฮอล์ 95% (Ethyl alcohol) ยี่ห้อ องค์การสุรา กรมสรรพสามิต
11. สารละลายกรดบอริก (H_3BO_3) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
12. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
13. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
14. สารละลายแอมโมเนียมออกซาเลต $[(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O]$ ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
15. อินดิเคเตอร์ผสม (โบรโมกรีนและเมธิลเรด)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การสุ่มตัวอย่างเรซิน

เรซินที่ได้จากโรงงานจะเป็นเรซินผสม (Mix Resin) คือ จะมีทั้งเรซินประจุบวกและประจุลบ โดยการทำการศึกษาทดลองนี้ จะใช้เรซินประจุบวกเป็นตัวกลางในการดูดซับแคดเมียมไอออน ซึ่งก่อนทำการทดลองได้ทำการสุ่มตัวอย่างเรซินจะใช้ความหนาแน่นเป็นเกณฑ์ โดยใช้น้ำเพื่อทำการแยกเรซินประจุบวก และเรซินประจุลบออกจากกัน โดยเรซินประจุบวกซึ่งมีความหนาแน่นมาก จะจมตัวลงล่าง และประจุลบซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่า จะลอยตัวขึ้นเหนือเรซินประจุบวก จากนั้นจะทำการตัดเรซินประจุลบออก ดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การคัดแยกเรซินระหว่างประจุบวกและประจุลบ

3.2.2 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน

ในการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของเรซิน ให้นำเรซินทั้งจากโรงงาน หรือ เรซินที่ผ่านการใช้งาน โดยมีการเก็บรักษาแบบแช่ในน้ำ ให้นำหนักที่ใช้ในการทดสอบต่างๆ เป็นการใช้ตัวอย่างจากการเก็บรักษาโดยตรง ไม่ผ่านการอบแห้ง หรือเรียกว่าน้ำหนักเปียก โดยน้ำหนักเรซินจะคำนวณ

ย้อนกลับจากน้ำหนักเปียก ยกเว้นที่ระบุชัดเจนว่าเป็นน้ำหนักแห้ง แล้วมาศึกษาสมบัติทางเคมี โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบคือ ความจุเรซิน, ค่า pH, ค่าการนำไฟฟ้าและค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

1. การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity)

1.1 แช่เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent Resin , SR) 1 กรัม ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 5% ทิ้งไว้ 1 คืน

1.2 ล้างเรซินด้วยน้ำกลั่น แล้วแช่เรซินด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต 60 mL

1.3 ล้างเรซินด้วยน้ำกลั่น โดยใช้เครื่องกรองแบบลดความดัน เก็บสารละลายที่กรองได้ แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 mL เก็บใส่ขวดพลาสติกแช่ในตู้เย็น

1.4 ล้างเรซินด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต 3 ครั้ง ครั้งละ 30 mL

1.5 ทดสอบว่ามีแคลเซียมเหลืออยู่หรือไม่ ด้วย สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 N แอมโมเนียมออกซาลेट 10% และ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 50% สารละลายละ 2-3 หยด แล้วนำไปต้มบนเตาให้ความร้อน ถ้ามีตะกอนขาวขุ่นของคลอไรด์ ให้ล้างเรซินต่อด้วยแอมโมเนียมออกซาลेट 10% แต่ถ้าไม่มีตะกอนขาวขุ่นของซิลเวอร์คลอไรด์ ล้างเรซินต่อด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 N 3 ครั้ง ครั้งละ 30 mL และนำสารละลายที่กรองได้ทิ้ง

1.6 ล้างเรซินด้วยเอทานอล 95% 3 ครั้ง ครั้งละ 30 mL

1.7 บีบสารละลายที่กรองได้มา 10 mL ใส่ในหลอดทดลอง แล้วหยดด้วยซิลเวอร์ไนเตรต 0.1 N 2 หยด ถ้าเกิดตะกอนขาวล้างเรซินต่อด้วยเอทานอล 95% แต่ถ้าไม่เกิดตะกอนขาวนำสารละลายที่กรองได้ทิ้ง

1.8 ล้างเรซินต่อด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 100 mL เก็บใส่ขวดเจคาลท์ แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% จำนวน 10 mL

1.9 เตรียมสารละลายกรดบอริก 50 mL ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL หยดอินดิเคเตอร์ผสม 5 หยด

1.10 นำเข้าเครื่องกลั่น

1.11 ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

3.2.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนัก

เตรียมสารละลายสต็อกแคดเมียมคลอไรด์ ($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$) มวลโมเลกุล 228.35 g/mol ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 1,000 mg/L โดยชั่งแคดเมียมคลอไรด์ 2.0324 g ละลายด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 mg/L แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 mL นำสารละลายสต็อกเก็บไว้ในขวดพลาสติก เมื่อใช้งานบีบสารละลายสต็อกและเจือจางเป็น 10 mg/L (ดังภาคผนวก ง.) และนำสารละลายสต็อกเก็บไว้ในถังพลาสติกขนาด 50 L เพื่อเป็นการประกันคุณภาพว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่

นำมาใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นเท่ากันตลอดการทดลอง แล้ววัดค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้า ทุกครั้งเมื่อนำมาใช้ในการทดลอง และในทุกๆ การทดลองจะนำสารละลายสต็อกแคดเมียม 10 mg/L ไปวิเคราะห์หาแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS

3.2.4 การศึกษาอัตราการไหลต่อการบำบัดแคดเมียม

1. บรรจุน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่มีความเข้มข้น 10 mg/L ใส่ภาชนะพลาสติก และสายยางพร้อมที่จะถ่ายลงสู่คอลัมน์โดยควบคุมอัตราการไหลตามต้องการ ใช้ความต่างระดับของพลังงานศักย์
2. ล้างคอลัมน์ที่บรรจุเรซินด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 20% แล้วทำการด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าคอลัมน์ที่นำมาใช้ปราศจากสิ่งเจือปน
3. บรรจุเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกซึ่งหนัก 12.3 g. ลงคอลัมน์ โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ
4. ป้อนน้ำเสียเข้าระบบด้วยอัตราการไหล 2.5 mL/min
5. เก็บน้ำตัวอย่างทีละส่วน โดยส่วนละ 50 mL นาน 24 ชั่วโมง โดยจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนถือเป็นสภาวะ Break Through
6. วัดค่า pH และ ค่าการนำไฟฟ้าแต่ละส่วน
7. ทำการย่อยน้ำตัวอย่างแต่ละส่วน ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 65% จำนวน 5 mL บนเตาให้ความร้อน โดยควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สารละลายตัวอย่างเดือดอย่างรุนแรง จนกระทั่งสารละลายใสหรือเกิดการย่อยอย่างสมบูรณ์ ตามวิธีของ U.S. EPA, 1996 Method 3050B และใส่เม็ด glass bead 4-5 เม็ดเพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรง
8. ย่อยจนสารละลายเหลือ 5 mL แล้วนำตัวอย่างที่ย่อยแล้วไปทำการกรองด้วยกระดาษกรองรูพรุนละเอียด และปรับปริมาตรเป็น 10 mL ด้วยน้ำกลั่น
9. นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์แคดเมียมที่เหลือด้วยเครื่อง AAS
10. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดแคดเมียมต่อปริมาตรที่ใช้ในการบำบัด (mL)
11. ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนอัตราการไหลจาก 2.5 mL/min เป็น 5 และ 7 mL/min ตามลำดับ

3.2.5 การศึกษาความสูงของเรซินต่อการบำบัดแคดเมียม

1. บรรจุน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่มีความเข้มข้น 10 mg/L ในภาชนะพลาสติก และสายยางพร้อมที่จะถ่ายลงสู่คอลัมน์โดยควบคุมอัตราการไหลตามต้องการ ใช้ความต่างระดับของพลังงานศักย์
2. ล้างคอลัมน์ที่บรรจุเรซินด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 20% แล้วทำการด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าคอลัมน์ที่นำมาใช้ปราศจากสิ่งเจือปน
3. บรรจุเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกซึ่งหนัก 8.82 g. ลงคอลัมน์ โดยเรซินในคอลัมน์จะมีความสูง 10 cm.
4. ป้อนน้ำเสียเข้าระบบด้วยอัตราการไหลที่เหมาะสมจากการศึกษาค่าตัวแปรที่ 1
5. เก็บน้ำตัวอย่างที่ละส่วน โดยส่วนละ 50 mL นาน 24 ชั่วโมง โดยจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนถือเป็นสภาวะ BT
6. วัดค่า pH และ ค่าการนำไฟฟ้าแต่ละส่วน
7. ทำการย่อยน้ำตัวอย่างแต่ละส่วน ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 65% จำนวน 5 mL บนเตาให้ความร้อน โดยควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สารละลายตัวอย่างเดือดอย่างรุนแรง จนกระทั่งสารละลายใสหรือเกิดการย่อยอย่างสมบูรณ์ ตามวิธีของ U.S. EPA, 1996 Method 3050B และใส่เม็ด glass bead 4-5 เม็ดเพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรง
8. ย่อยจนสารละลายเหลือ 5 mL แล้วนำตัวอย่างที่ย่อยแล้วไปทำการกรองด้วยกระดาษกรองรูพรุนละเอียด และปรับปริมาตรเป็น 10 mL ด้วยน้ำกลั่น
9. นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์แคดเมียมที่เหลือด้วยเครื่อง AAS
10. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดแคดเมียมต่อปริมาตรที่ใช้ในการบำบัด (mL)
11. ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนความสูงเรซินจาก 10 cm. เป็น 13.5 และ 17 cm. โดยน้ำหนักเรซินที่ใช้คือ 12.3 g. และ 15.03 g. ตามลำดับ

3.2.6 การศึกษาจำนวนรอบในการใช้คอลัมน์ซ้ำเพื่อบำบัดแคดเมียม

1. การฟื้นฟูสภาพเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว

1.1 ใช้เรซินจากการทดลองข้อ 3.2.5 ที่มีความสูงของเรซินที่สามารถบำบัดได้ผลดีที่สุด โดยไขสารละลายเดิมออก และแทนที่ด้วยน้ำกลั่นจำนวน 50 mL ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที แล้วไขส่วนที่เป็นน้ำกลั่นไว้ตรวจสอบว่ามีการแลกเปลี่ยนแคดเมียมออกมา เรียกส่วนนี้ว่า Portion I, (PI)

1.2 เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5% (v/v) จำนวน 50 mL ลงในคอลัมน์ แช่ทิ้งไว้ในคอลัมน์นาน 30 นาที แล้วไขส่วนที่เป็นกรดไฮโดรคลอริกไว้ตรวจสอบว่ามีการแลกเปลี่ยนแคดเมียมออกมา เรียกว่า Portion II, (PII)

1.3 ทำเหมือนข้อ 2 ไซสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรวจว่ามีการแลกเปลี่ยนแคดเมียมออกมา เรียกว่า Portion III, (PIII)

1.4 ทำการทดลองเหมือนข้อ 2 อีกครั้ง คือ ไซสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรวจว่ามีการแลกเปลี่ยนแคดเมียมออกมา เรียกว่า Portion IV, (PIV)

1.5 ป้อนน้ำกลั่นเข้าคอลัมน์แบบต่อเนื่อง จนสารละลายที่ออกมามีค่า pH คงที่ หรือเทียบเท่าน้ำเข้าระบบ

1.6 ถือว่าระบบได้ผ่านการฟื้นฟูเรซินครั้งที่ 1 แล้วจึงนำไปบำบัดแคดเมียมในรอบที่ 2 โดยทำการทดลองซ้ำเหมือนข้อ 3.2.5 จนถึงภาวะ BT

1.7 ทำการฟื้นฟูเรซินในคอลัมน์ที่ผ่านการใช้งานรอบที่ 2 เหมือนข้อ 1-5 ถือว่าเป็นการฟื้นฟูครั้งที่ 2

1.8 ทำการทดลองซ้ำเหมือนเดิมจนครบการใช้งานคอลัมน์ซ้ำ 4 รอบ

1.9 ทำการย่อยน้ำตัวอย่างแต่ละ Portion ที่ได้จากการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยกรดไฮโดรคลอริก ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 65% จำนวน 5 mL บนเตาให้ความร้อน โดยควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สารละลายตัวอย่างเดือดอย่างรุนแรง จนกระทั่งสารละลายใส หรือเกิดการย่อยอย่างสมบูรณ์ ตามวิธีของ U.S. EPA, 1996 Method 3050B และใส่เม็ด glass bead 4-5 เม็ดเพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรง

1.10 ย่อยจนสารละลายเหลือ 5 mL แล้วนำตัวอย่างที่ย่อยแล้วไปทำการกรองด้วยกระดาษกรองรูพรุนละเอียด และปรับปริมาตรเป็น 10 mL ด้วยน้ำกลั่น

1.11 นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์แคดเมียมที่เหลือด้วยเครื่อง AAS

3.2.7 การศึกษาความเป็นของเสียอันตรายของเรซินที่ใช้บำบัดแคดเมียม

1. นำเรซินที่ได้จากการทดลอง 3.2.6 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพเรซินในรอบที่ 4 แล้วมาย่อยโดยซังเรซิน 1 g แล้วนำเรซินมาบดให้ละเอียด

2. ทำการย่อยเรซินด้วยการเติมกรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก อย่างละ 5 mL และนำเรซินมาย่อยในเครื่อง Heating mantle โดยควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สารละลายตัวอย่างเดือดอย่างรุนแรง จนกระทั่งสารละลายใส หรือเกิดการย่อยอย่างสมบูรณ์ ตามวิธีของ U.S. EPA, 1996 Method 3050B

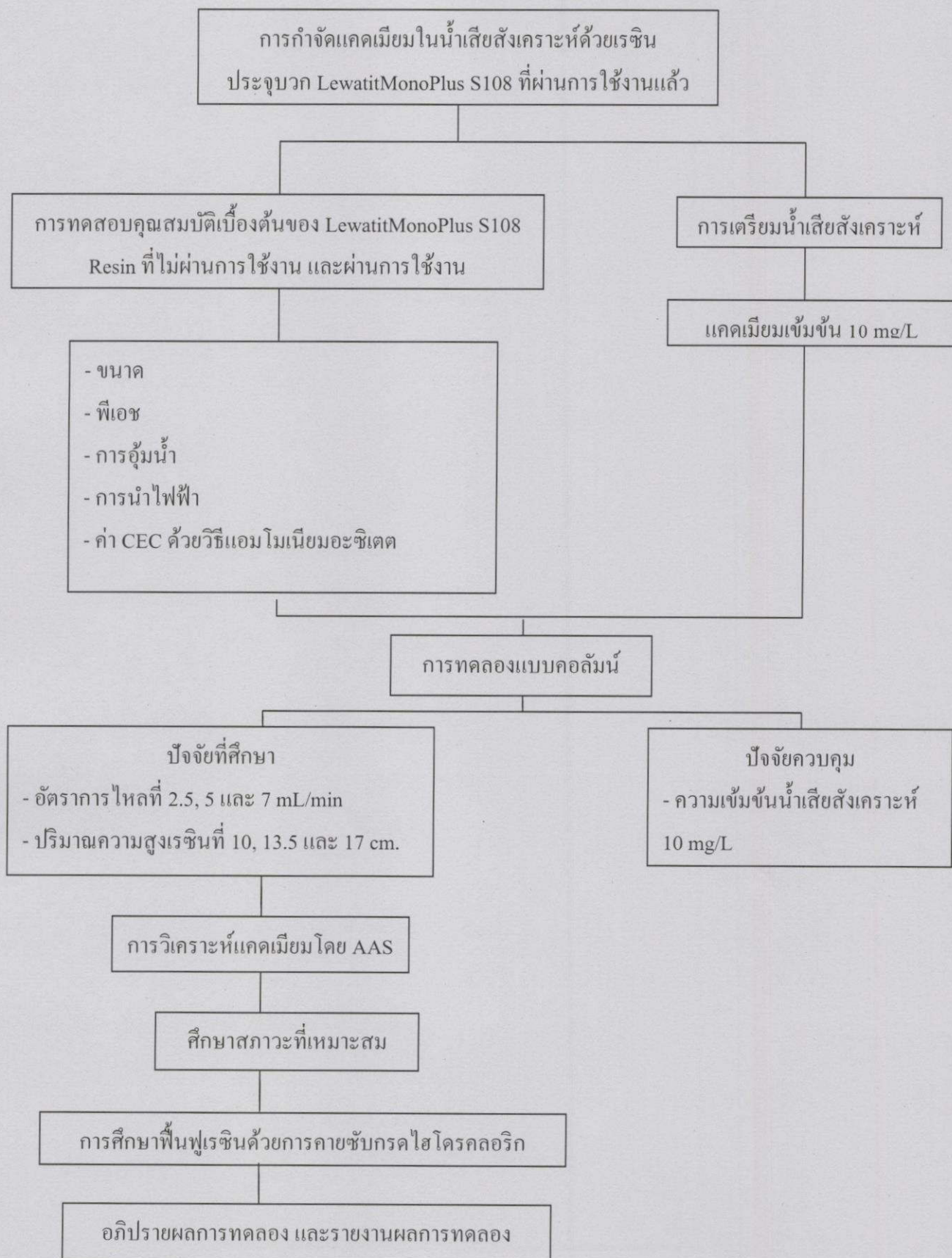
3. นำตัวอย่างที่ย่อยแล้วไปทำการกรองด้วยกระดาษรูพรุนละเอียด

4. นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นแคดเมียมที่เหลือด้วยเครื่อง AAS

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคะเมียม

ตัวแปรที่ศึกษา	ช่วงที่ ทำการศึกษา	ค่าคงที่	
		พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้
1. อัตราการไหล	2.5, 5 และ 7 mL/min	- ความสูงของเรซิน	13.5 cm
2. ความสูงของเรซิน	10, 13.5 และ 17 cm	- ใช้อัตราการไหลที่ เหมาะสมจากหัวข้อ ตัวแปร 1	ค่าจากตัวแปรข้อที่ 1
3. การฟื้นฟูเรซิน		- อัตราการไหล - ความสูงเรซิน	ใช้ค่าอัตราการไหล และ ค่าความสูงของเร ซินที่เหมาะสมจากตัว แปรที่ 1, 2
ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม		
1. ความเข้มข้นของน้ำเสีย	1. ความเข้มข้น 10 mg/L		
2. ชุดคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง	2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm สูง 25 cm		
3. ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง	3. จากเริ่มต้นจนกระทั่งความเข้มข้นของแคะเมียมในน้ำเสียที่ ออกจากคอลัมน์เท่ากับความเข้มข้นของแคะเมียมในน้ำเสียที่เข้า คอลัมน์		
4. เรซินแลกเปลี่ยนไอออน	4. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกยี่ห้อ Lewatit monoplus S108		

วิธีการดำเนินการวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ต่อไปนี้



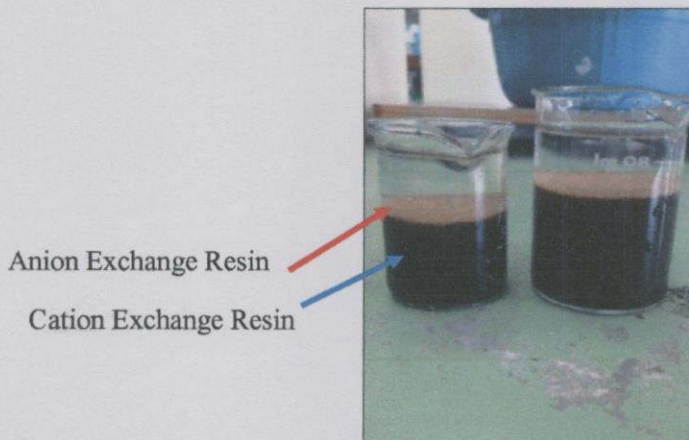
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 สมบัติทั่วไปของเรซิน

เรซินที่ใช้ในการศึกษาเป็นเรซินชนิดกรดแก่ ยี่ห้อ Lewatit MonoPlus S108 ที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, SR) และ เรซินที่ฟื้นฟูสภาพใหม่ (Regenerate Resin, RR) และ เทียบสมบัติกับเรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน (New Resin, NR) ทั้ง 2 ชนิดเก็บรักษาด้วยการนำเรซินแช่น้ำก่อนนำมาศึกษาดังตารางที่ 4.1

เรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, SR) เป็นแบบผสมมีทั้งเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ และเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกผสมกัน ดังนั้นก่อนนำมาทดสอบแยกโดยใช้ความหนาแน่นเป็นเกณฑ์ โดยเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกมีความหนาแน่นมากกว่าจะจมลงด้านล่าง ส่วนเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบมีความหนาแน่นน้อยกว่าจะลอยอยู่ด้านบน โดยจะเลือกใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกในการศึกษา



รูปที่ 4.1 การแยกของเรซินที่ผ่านการใช้งาน (Mixed Resin)

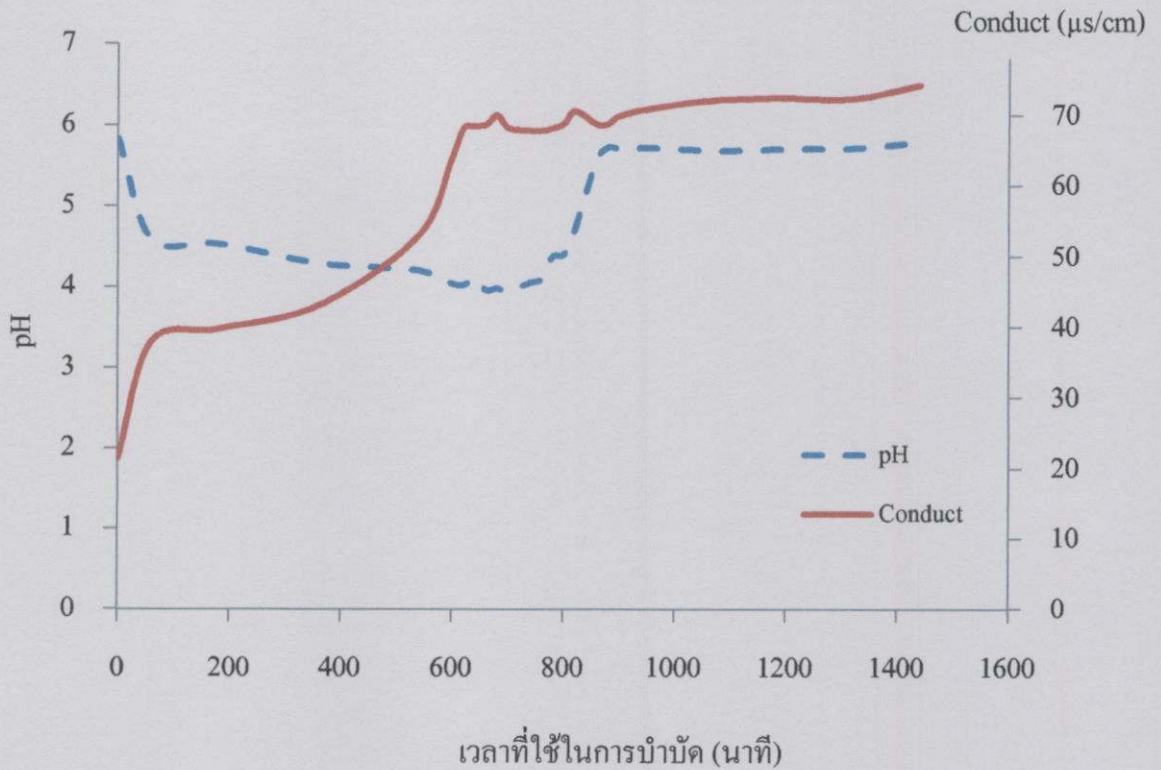
จากตารางที่ 4.1 พบว่าสมบัติทั่วไปของเรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน (New Resin, NR), เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent Resin, SR) และ เรซินที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว (Regenerate Resin, RR) มีความแตกต่างกัน เช่น เปรอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ จากผลการทดลองพบว่า เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมีเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ มากกว่า เรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน เพราะเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว บริเวณพื้นที่ผิวของเม็ดเรซินอาจแตก หรือ มีช่องว่าง ทำให้น้ำแทรกตัวผ่านตามช่องว่างตามพื้นที่ผิวของเม็ดเรซินได้ จากค่าพีเอชของเรซินพบว่า เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมีค่าพีเอชที่เป็นกรด ส่วนเรซินที่ไม่ผ่านการใช้งานมีค่าที่เป็นเบส เนื่องจากเรซินที่ไม่ผ่านการใช้งานให้ไอออนเรซินในรูป Na^+ แล้วหลุดออกมาซึ่งมีประจุที่มีฤทธิ์เป็นเบส (Basic Cation) และ ในขณะเดียวกันเรซินที่ผ่าน

การใช้งานแล้วจะมีหมู่ฟังก์ชันที่จับกับ Ca^{2+} Mg^{2+} หลุดออกมาได้น้อย ในทางปฏิบัติทั่วไป ได้นำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำการ Regenerate Resin โดยการฟื้นฟูเรซินโดยการเติมกรดไฮโดรคลอริก ดังนั้นเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วอาจมีโปรตอน (H^+) หลุดออกมาได้ และส่งผลทำให้สารละลายเป็นกรดอ่อน และเมื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าที่ น้อยกว่า เรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน

ตารางที่ 4.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน NR, SR และ RR

พารามิเตอร์	NR	SR	RR
สีที่ปรากฏ	สีดำ	สีดำ	สีดำ
ขนาด (เมื่อแช่น้ำจนอิ่มตัว) (mm)*	0.62 ± 0.05	น้อยกว่า 2.38	น้อยกว่า 2.38
การอุ้มน้ำ	$26.03\% \pm 0.18$	$50.92\% \pm 1.10$	$52.76\% \pm 0.69$
พีเอชอัตราส่วน 1 : 1	8.62 ± 0.20	4.91 ± 0.54	5.94 ± 0.03
การนำไฟฟ้าอัตราส่วน 1 : 5 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	87.67 ± 0.58	7.80 ± 1.79	6.20 ± 0.32
ความจุแลกเปลี่ยนประจุบวกด้วยวิธีแอมโมเนียมอะซิเตต (centimol/gram , cmol/g)	0.011 ± 0.9	0.12 ± 0.05	0.09 ± 0.02
ปริมาณแมกนีเซียม (Mg^{2+}) (meq/g) on dried basis	0.073 ± 0.10	0.47 ± 0.10	0.95 ± 0.06
ปริมาณแคลเซียม (Ca^{2+}) (meq/g) on dried basis	0.045 ± 0.03	2.18 ± 0.58	1.33 ± 0.38

*ที่มา : LANXESS Energizing Chemistry, 2011



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของค่า pH และ ค่าการนำไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.2 เมื่อผ่านน้ำเสียสังเคราะห์แคว้นความเข้มข้นเริ่มต้น 10.50 ± 0.18 mg/L เข้าสู่คอลัมน์ในช่วงแรกค่า pH อยู่ที่ประมาณ 6 แต่เมื่อ Cd^{2+} เข้าไปแทนที่โปรตรอน (H^+) ซึ่งเป็นไอออนอิสระ ทำให้ H^+ หลุดออกจากเรซินและออกมาพร้อมน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด โดย Cd^{2+} จะเข้าไปแทนที่ H^+ จนกระทั่ง H^+ ที่เกาะอยู่บนผิวเรซินหลุดออกมาพร้อมกับน้ำเสียส่งผลให้ค่า pH ของสารละลายน้ำเสียที่ออกจากคอลัมน์นั้นมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน (ประมาณ 4) จนกระทั่งถึงขีดความสามารถสูงสุดในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินหมู่ฟังก์ชันไม่สามารถจับ Cd^{2+} ไว้ได้ ทำให้ Cd^{2+} หลุดออกมาพร้อมกับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด เนื่องจาก H^+ ที่เกาะบนผิวเรซินเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับ Cd^{2+} จนหมดทำให้เรซินมีประสิทธิภาพแลกเปลี่ยนไอออนลดลง ส่งผลให้ให้น้ำเสียที่ออกจากคอลัมน์มีค่า pH สูงขึ้นอย่างชัดเจน และ เกิดค่าการนำไฟฟ้าที่มากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากสารละลายที่มีประจุมากขึ้น การแตกตัวไอออนของสารละลายในน้ำก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

4.2 ผลของอัตราการไหล

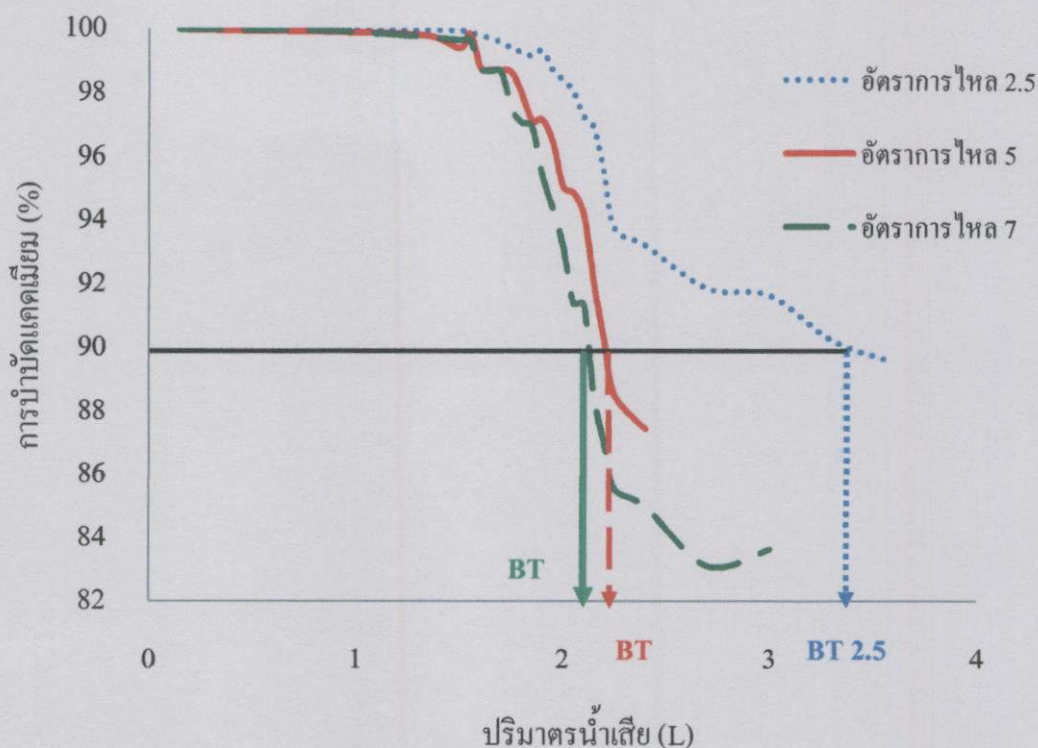
จากการทดลองได้นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาฟื้นฟูสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก เพื่อไล่ออออนของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ที่อยู่บริเวณผิวของเรซิน ทำให้เรซินถูกแทนที่ด้วยโปรตรอน (H^+) ทำให้เรซินกลับคืนสู่สภาพเดิม และมีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกอีกครั้งหนึ่ง

ในโครงการพิเศษนี้ การบำบัดแคดเมียมได้ต่ำกว่า 90% ถือว่าคอลัมน์ถึงสภาวะที่ค่อนข้างอิ่มตัว หรือ เรียกว่า Break Through, BT จากความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น $10.50 \pm 0.18 \text{ mg/L}$ ถ้าน้ำเสียที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นมากกว่า 1 mg/L จะถือว่าเกินจุด BT

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแคดเมียม โดยใช้ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมเริ่มต้น เท่ากับ $10.50 \pm 0.18 \text{ mg/L}$ เรซินที่บรรจุในคอลัมน์ เท่ากับ 12.3 g ความสูงของเรซิน เท่ากับ 13.5 cm โดยแปรค่าอัตราการไหลที่ 2.5, 5 และ 7 mL/min แล้ววิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่เหลือ แล้วนำค่าที่วิเคราะห์ได้มาแสดงในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแคดเมียมที่เหลือกับปริมาณน้ำเสียที่บำบัดได้ ดังรูปที่ 4.3-4.4

จากรูปที่ 4.4 พบว่าในการบำบัดช่วงแรกน้ำที่ออกจากคอลัมน์จะมีความเข้มข้นของแคดเมียมลดต่ำลงเข้าใกล้ศูนย์ (ดังข้อมูลผลการทดลอง ภาคผนวก ก) ลักษณะกราฟที่ได้ขนานตามแนวแกน ปริมาณน้ำเสียที่บำบัดได้ เนื่องจากไอออนของแคดเมียมสามารถแพร่เข้าไปภายใน โครงสร้างเรซิน ได้มาก จึงสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกันได้ง่าย และ รวดเร็ว เพราะหมู่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยน ไอออนของเรซินยังมีเหลืออยู่มาก เมื่อเรซินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำที่ออกจากคอลัมน์จึงสูงขึ้น เนื่องจากไอออนบางส่วนที่ถูกดูดจับไว้ด้วยเรซินแล้วเกิดการหลุดออกมา เพราะการปล่อยน้ำเสียที่มีไอออนให้ไหลผ่านเรซินที่บรรจุในคอลัมน์เป็นเวลานาน การไหลของสารละลายไปทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไอออนของแคดเมียมกับเรซิน จึงทำให้มีไอออนของแคดเมียมบางส่วนหลุดออกมา

การแปรค่าอัตราการไหลจาก 2.5, 5 และ 7 mL/min พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลสูงขึ้น ทำให้ ร้อยละในการบำบัดลดลง เนื่องจากที่อัตราการไหลสูง ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเรซินที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์อย่างรวดเร็ว จึงทำให้มีเวลาในการสัมผัส (Contact time) และระยะเวลาพักกัก (Retention Time) เพื่อแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซิน ไม่มากพอ ร้อยละการบำบัดจึงมีค่าต่ำกว่าอัตราการไหลต่ำกว่า ดังรูปที่ 4.3

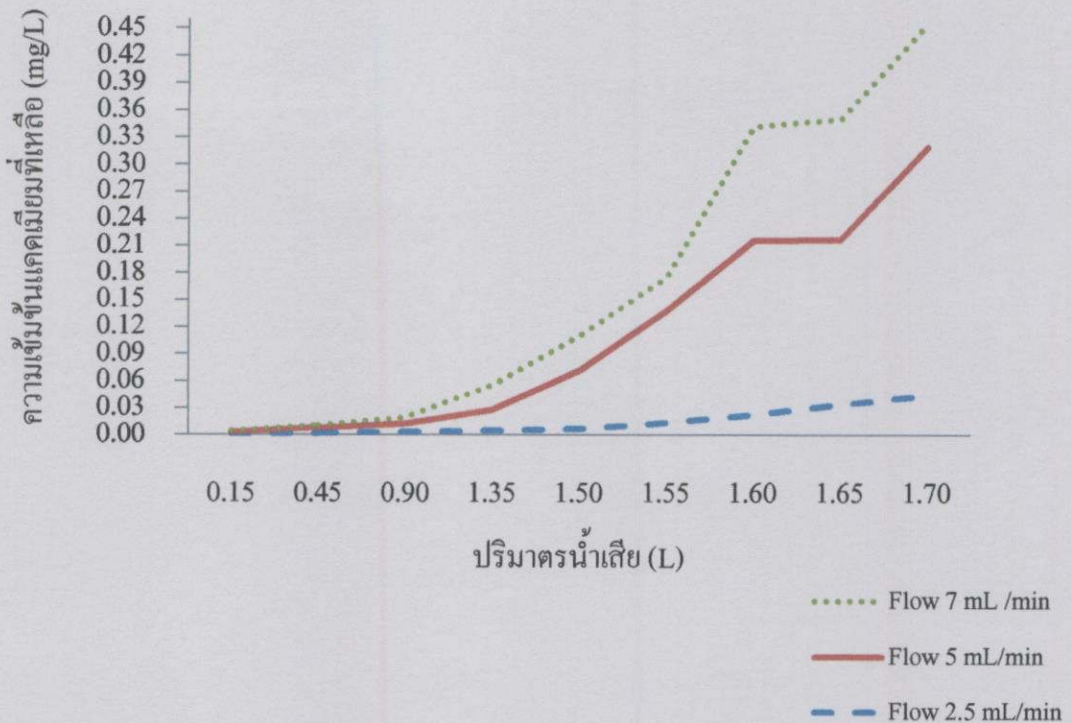


รูปที่ 4.3 ร้อยละการบำบัดคลอรีนที่อัตราการไหลต่างๆ ณ จุด BT

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดคลอรีนที่อัตราการไหลต่างๆ ณ จุด BP

ตัวแปรที่ศึกษา	อัตราการไหล (mL/min)		
	2.5	5	7
ความเข้มข้นน้ำที่ออกจากคอลัมน์ (mg/L)	< 1.00		
น้ำหนักเรซิน (g)	12.34 ± 0.01	12.39 ± 0.02	12.36 ± 0.05
ปริมาณคลอรีน (mg)	31.22 ± 0.14	27.42 ± 1.51	25.20 ± 2.59
ปริมาณน้ำ (L)	3.300 ± 0.00	2.90 ± 0.17	2.64 ± 0.27
เวลาที่ใช้ (min)	1,320 ± 0.00	580 ± 34.64	376.67 ± 37.86

ถ้าหากพิจารณาตาม คุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2539) กำหนดค่าความเข้มข้นคลอรีนไม่เกิน 0.03 mg/L จะถือว่าเป็นจุดที่มีประสิทธิผลที่ดี (Effective point, EP) โดยปริมาณน้ำเสียที่บำบัดได้จึงเป็นปริมาตรสุทธิที่มีความเข้มข้นของน้ำทิ้งผ่านมาตรฐานกรมควบคุมมลพิษ (Effective Volume, EV)



รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นแคดเมียมที่เหลือที่อัตราการไหลต่างๆ ณ จุด EP

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียมที่อัตราการไหลต่างๆ ณ จุด EP

ตัวแปรที่ศึกษา	อัตราการไหล (mL/min)		
	2.5	5	7
ความเข้มข้นน้ำที่ออกจากคอลัมน์ (mg/L)	< 0.03		
น้ำหนักเรซิน (g)	12.34 ± 0.01	12.39 ± 0.02	12.36 ± 0.05
ปริมาณแคดเมียม (mg)	17.10 ± 0.30	16.63 ± 1.22	15.83 ± 0.43
ปริมาณน้ำ (L)	1.63 ± 0.03	1.57 ± 0.12	1.49 ± 0.04
เวลาที่ใช้ (min)	653.33 ± 11.55	313.33 ± 23.09	213.33 ± 5.77

ผลการทดลองอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ 2.5, 5 และ 7 mL/min โดยปริมาณสุทธิที่มีความเข้มข้นแคดเมียมของน้ำที่ผ่านมาตรฐานคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2539) เท่ากับ 1.63 ± 0.03 , 1.57 ± 0.12 และ 1.49 ± 0.04 L ตามลำดับ สามารถบำบัดแคดเมียมได้ 17.10 ± 0.30 , 16.63 ± 1.22 และ 15.83 ± 0.43 mg ตามลำดับ ใช้เวลาในการบำบัด 653.33 ± 11.55 , 313.33 ± 23.09 และ 213.33 ± 5.77 นาที ตามลำดับ (ดังแสดงในตารางที่ 4.3)

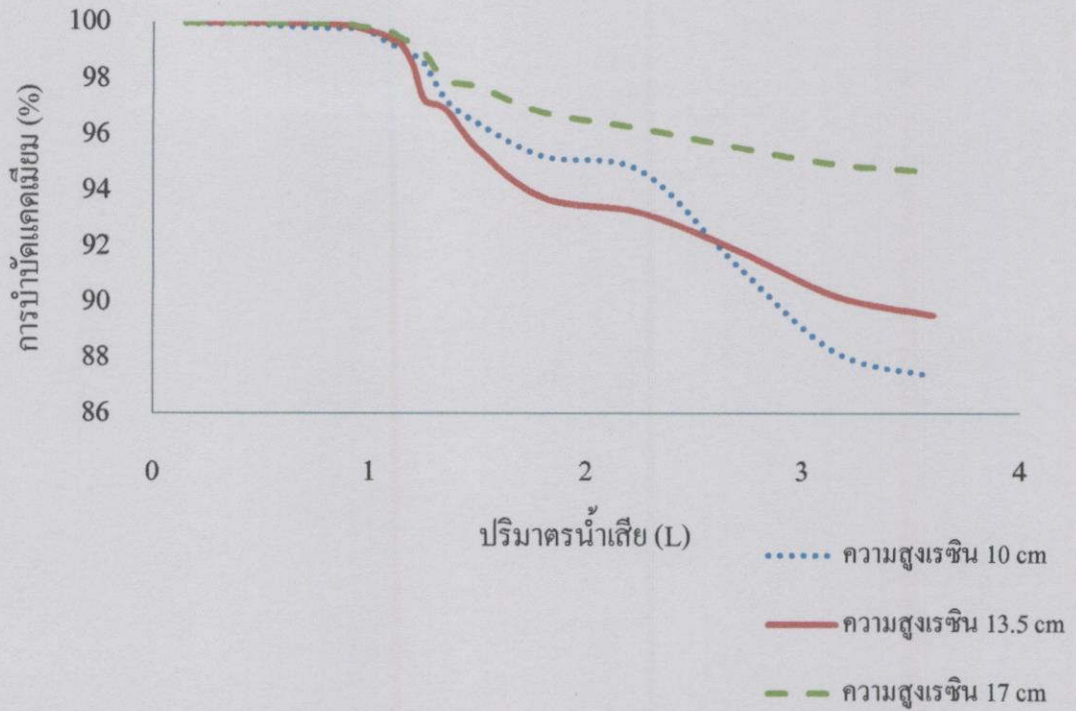
จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์แคะเมียมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำการศึกษา คือ อัตราการไหล เท่ากับ 2.5 mL/min เนื่องจากสามารถบำบัดปริมาณแคะเมียมได้มากที่สุด และสามารถบำบัดน้ำเสียได้ปริมาณที่มากกว่าอัตราการไหล 5 และ 7 mL/min แม้ใช้ระยะเวลาในการบำบัดสูงกว่าอัตราการไหลอื่นๆ

4.3 ผลของความสูงเรซินที่บรรจุในคอลัมน์

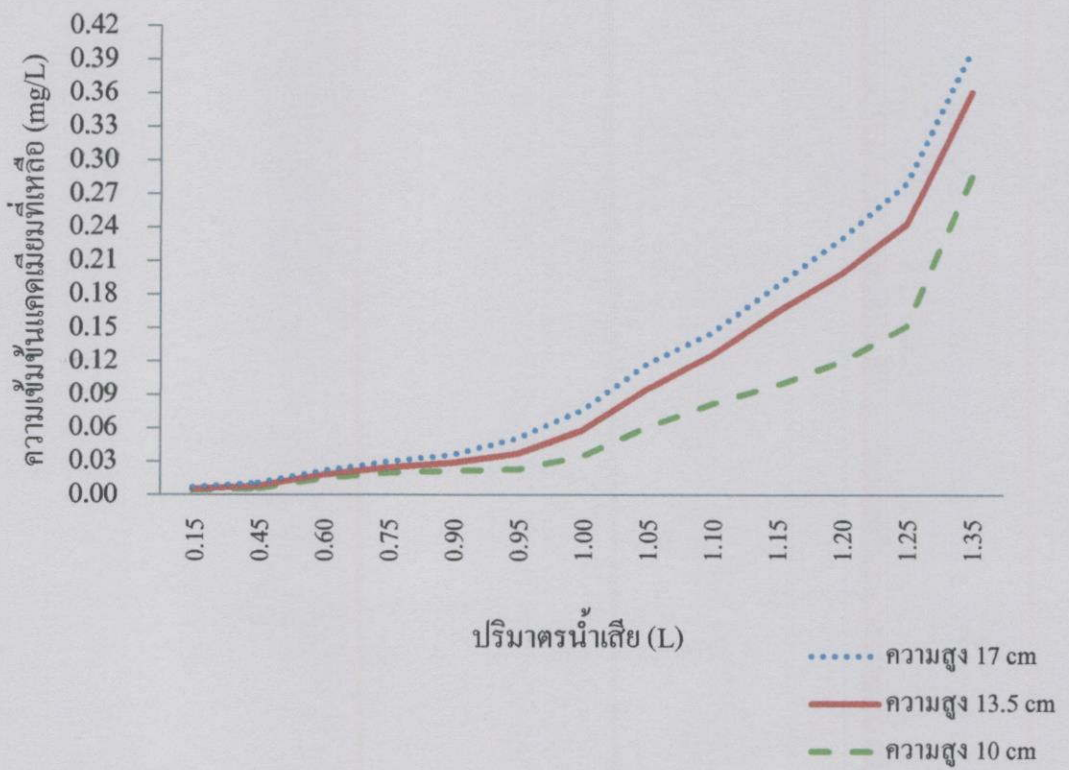
การศึกษาคือผลของความสูงเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแคะเมียม โดยใช้ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์แคะเมียมเริ่มต้น เท่ากับ 10.50 ± 0.18 mg/L อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์แคะเมียม เท่ากับ 2.5 mL/min แปรค่าความสูงของเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ที่ 10, 13.5 และ 17 cm แล้ววิเคราะห์หาปริมาณแคะเมียมที่เหลือเฉลี่ย แล้วนำค่าที่วิเคราะห์ได้แสดงในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการบำบัดแคะเมียมกับปริมาณน้ำเสียที่ใช้ในการบำบัด ดังรูปที่ 4.5-4.6

พบว่าเมื่อเพิ่มความสูงของเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของแคะเมียมมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มความสูงเรซินในคอลัมน์เป็นการเพิ่มปริมาณเรซิน จึงทำให้มีหมู่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินกับไอออนของแคะเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ และ คอลัมน์ที่มีความสูงของเรซินมากกว่าจะทำให้น้ำเสียอยู่ในคอลัมน์ได้นานมากขึ้น จึงทำให้มีเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน (Contact time) และระยะเวลาพักกัก (Retention Time) กับเรซินมากขึ้น จึงมีค่าร้อยละการบำบัดมากกว่าความสูงเรซินที่ต่ำกว่า

ผลการทดลองความสูงเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ ที่ความสูงเรซิน 10, 13.5 และ 17 cm มีปริมาตรสุทธิที่มีความเข้มข้นแคะเมียมของน้ำที่ผ่านมาตรฐานคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน เท่ากับ 0.950 ± 0.00 , 1.633 ± 0.028 และ 1.650 ± 0.075 L ตามลำดับ สามารถบำบัดปริมาณแคะเมียมได้ 9.950 ± 0.006 , 17.10 ± 0.30 และ 17.27 ± 0.79 mg ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการบำบัด 380 ± 0.00 , 653.33 ± 11.55 และ 660 ± 30 นาที ณ อัตราการไหล 2.5 mL/min ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.4)



รูปที่ 4.5 การบำบัดแคดเมียมที่ ความสูงเรซินที่ต่างกัน



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียมที่ความสูงเรซินที่ต่างกัน

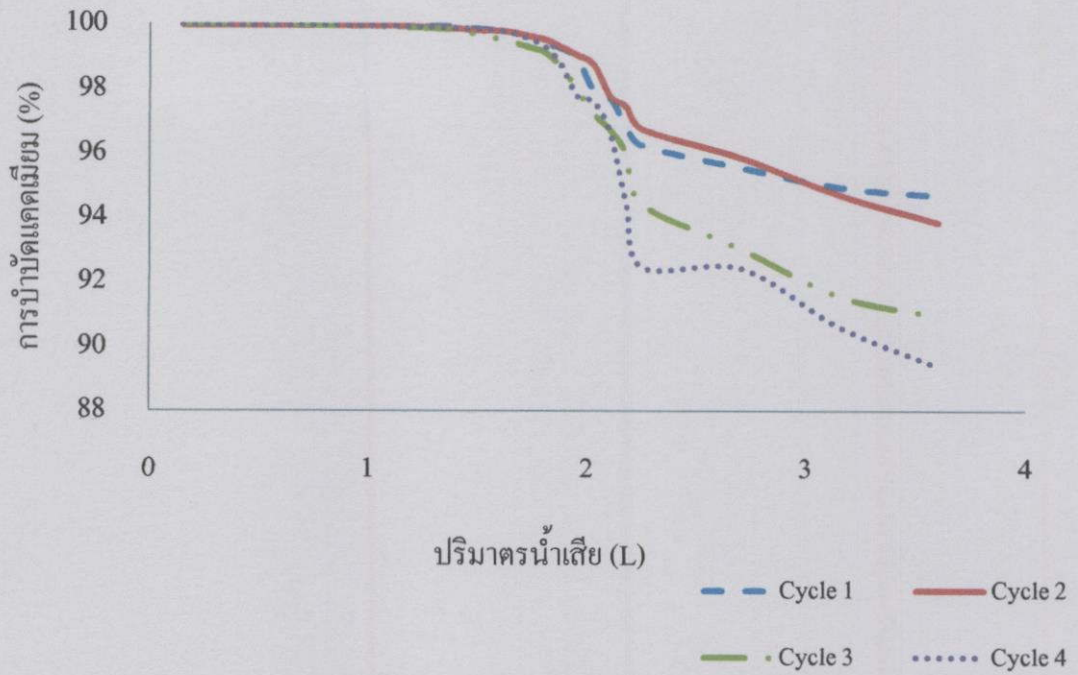
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียมที่ความสูงเรซินต่างๆ ณ จุด EP

ตัวแปรที่ศึกษา	ความสูงของเรซิน (cm)		
	10	13.5	17
ความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)	< 0.03		
น้ำหนักเรซิน (g)	9.148 ± 0.029	12.342 ± 0.010	15.485 ± 0.014
ปริมาณน้ำ (L)	0.950 ± 0.00	1.633 ± 0.028	1.650 ± 0.075
เวลาที่ใช้ (min)	380 ± 0.00	653.33 ± 11.55	660 ± 30
ปริมาณแคดเมียม (mg)	9.950 ± 0.006	17.10 ± 0.30	17.27 ± 0.79

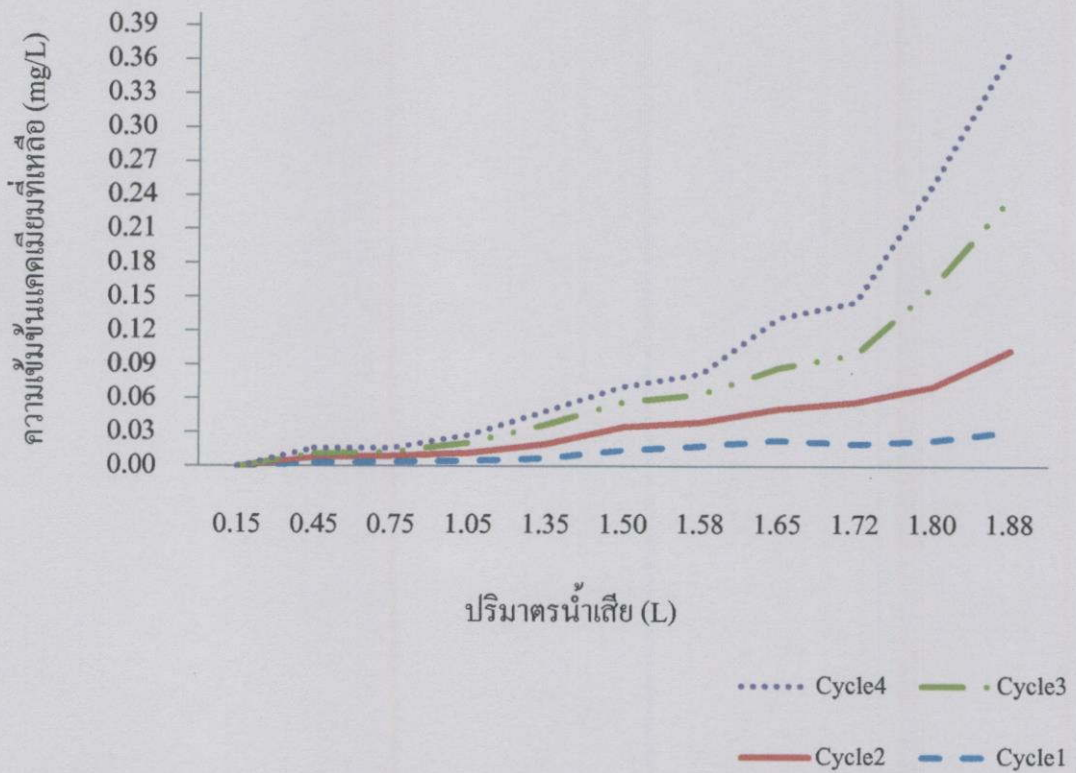
จากข้อมูลผลทดลองคอลัมน์ที่มีความสูงของเรซินมากกว่า จะมีปริมาณเรซินที่สูงกว่า จึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียมที่มากกว่า เพราะฉะนั้นความสูงเรซินที่ 17 cm จึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียมสูงสุด โดยสามารถบำบัดน้ำเสียที่ได้มาตรฐานได้ในปริมาณที่มากกว่าความสูงเรซินอื่นๆที่ทำการศึกษา แม้ใช้เวลาในการบำบัดมากกว่าอัตราการไหลอื่นๆก็ตาม

4.4 ประสิทธิภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพเรซินแล้วนำกลับมาใช้ใหม่

จากการศึกษาประสิทธิภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้วนำมาฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้ความเข้มข้นน้ำเสียดังเคราะห์แคดเมียมเริ่มต้น เท่ากับ 10.50 ± 0.18 mg/L ที่ความสูงเรซิน 17 cm และ ที่อัตราการไหล 2.5 mL/min แล้ววิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่เหลือ แล้วนำค่าที่วิเคราะห์ได้มาแสดงในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดแคดเมียมกับปริมาณน้ำเสียที่ใช้ในการบำบัด ดังรูปที่ 4.7-4.8



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพของเรซิน เมื่อนำกลับมาใช้ในรอบต่างๆ ณ สภาวะ BT



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพของเรซิน เมื่อนำกลับมาใช้ในรอบต่างๆ ณ สภาวะ EP

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพของเรซิน โดยนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ ณ จุด EP

ตัวแปรที่ศึกษา	Cycle			
	1	2	3	4
น้ำหนักเรซิน (g)	15.485 ± 0.014			
ความเข้มข้นที่เหลือ (mg/L)	< 0.03			
ปริมาตรน้ำ (L)	1.650 ± 0.075	1.575 ± 0.075	1.500 ± 0.00	1.425 ± 0.129
เวลาที่ใช้ (min)	660 ± 30	630 ± 30	600 ± 0.00	570 ± 51.96
ปริมาณแคลเซียม (mg)	17.27 ± 0.79	16.50 ± 0.78	15.71 ± 0.00	14.93 ± 1.35

จากรูปที่ 4.7 ร้อยละการบำบัดแคลเซียมกับปริมาตรน้ำเสียที่ใช้ในการบำบัด โดยนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานมาฟื้นฟูสภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่หลายๆครั้ง พบว่าการนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ 4 รอบ เรซินนั้นยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดแคลเซียมผ่านตามมาตรฐานคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน แต่รอบที่วนใช้ซ้ำมากขึ้น พบว่าปริมาณแคลเซียมที่ถูกบำบัดลดลง (ดังตารางที่ 4.5) โดยร้อยละการบำบัดแคลเซียมแต่ละครั้งที่วนกลับมาใช้ใหม่จะลดลงเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสีย

4.5 การฟื้นฟูสภาพเรซิน

การศึกษาประสิทธิภาพของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาฟื้นฟูสภาพเรซินด้วย HCl 5% โดยใช้คอลัมน์เรซินจากการทดลองข้อ 3.2.5 ที่ความสูงเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ 17 cm และ ที่อัตราการไหล 2.5 mL/min

ในการทดลอง เมื่อทำการรีเจนเนอเรตด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5% ครั้งที่ 1 ปริมาณแคลเซียมที่ถูกจับไว้ ณ ตำแหน่งที่แลกเปลี่ยนได้ เท่ากับ 17.27 ± 0.79 mg เมื่อทำการคายซ้ำด้วย HCl 5% ได้ปริมาณแคลเซียมที่คายซ้ำออกมาเท่ากับ 34.71 ± 0.92 mg ในสารละลายคายซ้ำกรดไฮโดรคลอริก 200 mL ส่วนความเข้มข้นแคลเซียมที่คายซ้ำครั้งที่ 2 และ 3 จะมีปริมาณแคลเซียมลดลง เนื่องจากประสิทธิภาพในการดูดซับแคลเซียมของเรซินลดลงเล็กน้อย ทำให้ปริมาณแคลเซียมที่คายซ้ำออกมาจึงลดลงตามปริมาณแคลเซียมที่ถูกดูดซับ (ดังตารางที่ 4.6)

จากการทดลอง เมื่อทำการรีเจนเนอเรตด้วยน้ำกลั่น พบว่าความเข้มข้นแคลเซียมที่คายซ้ำออกมาจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการคายซ้ำด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5% เนื่องจากความสามารถในการเข้าแทนที่ของ H⁺ ของ HCl มีความเข้มข้นมากกว่าน้ำกลั่น จึงมีความสามารถเข้าไปแทนที่

ไอออนแคลเซียมที่จับกับเรซินได้ดีกว่า ทำให้ไอออนของแคลเซียมหลุดออกมาได้ง่ายกว่าการใช้ น้ำกลั่นเป็นสารละลายรีเจนเนอเรต

ตารางที่ 4.6 ปริมาณแคลเซียมจากการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยน้ำกลั่น และ กรดไฮโดรคลอริก 5%

Portion	การฟื้นฟู (รอบที่)		
	1	2	3
P I (น้ำกลั่น)	0.049 ± 0.025	0.036 ± 0.007	0.042 ± 0.02
P II (HCl)	195.20 ± 0.23	188.53 ± 2.40	186.13 ± 1.90
P III (HCl)	18.57 ± 0.17	16.12 ± 2.93	13.67 ± 0.90
P IV (HCl)	17.57 ± 0.06	12.61 ± 2.34	12.13 ± 1.59
ความเข้มข้นแคลเซียมรวม (mg/L)	231.40 ± 6.12	217.30 ± 1.06	211.98 ± 2.59
ปริมาณแคลเซียมรวม (mg)	34.71 ± 0.92	32.59 ± 0.16	31.80 ± 0.39

จากตารางที่ 4.6 ปริมาณแคลเซียมจากการคายซับด้วยน้ำกลั่น และ กรดไฮโดรคลอริก 5% ปริมาณแคลเซียมที่ฟื้นฟูในรอบที่ 1 มีปริมาณแคลเซียม เท่ากับ 34.71 ± 0.92 mg โดยเทียบกับ ปริมาณเรซิน จากผลการทดลองตารางที่ 4.5 รอบที่ 1 มีปริมาณแคลเซียม เท่ากับ 17.27 ± 0.79 mg ซึ่งการฟื้นฟูในรอบที่ 1 มีปริมาณแคลเซียมมากกว่า เนื่องจากเรซินได้ผ่านการใช้งานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการฟื้นฟูเรซิน แต่จากผลการทดลองตารางที่ 4.5 การบำบัดรอบที่ 1 ปริมาณ แคลเซียมวิเคราะห์ ณ จุด EP ซึ่งใช้เวลาในการบำบัดเพียง 11 ชั่วโมง ปริมาณน้ำเสียบำบัดไปเพียง 1.650 ± 0.075 L

จากการทดลองการคายซับของ รอบที่ 1 ปริมาณแคลเซียมที่ถูกจับไว้ ณ ตำแหน่งที่แลกเปลี่ยน ได้ออกมาพร้อมกับสารละลายที่ใช้ในการคายซับปริมาตรทั้งหมด 200 mL ซึ่งเป็นการลดปริมาตร ของเสียอันตราย

ปริมาณแคลเซียมในเรซิน เมื่อนำเรซิน 1 g (โดยน้ำหนักเปียก) มาชั่งเพื่อหาปริมาณแคลเซียม ในเรซิน แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมทั้งหมด โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดค่า TTLC ของแคลเซียมไว้ที่ 100 mg/Kg (โดยน้ำหนักเปียก) จากผลการทดลองค่าวิเคราะห์ได้ เท่ากับ $2,084.90 \text{ mg/kg} \pm 1,131.07$ ซึ่งมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ จึงจัดว่าเรซินดังกล่าวเป็นของเสียอันตราย (ดังภาคผนวก ข)

จากการวิเคราะห์ได้ว่าเรซินที่ผ่านการดูดซับแคลเซียมในน้ำเสียนั้นจัดว่าเป็นของเสียอันตราย ตามอ้างอิง ดังนั้นการจัดการของเสียจึงต้องใช้กระบวนการทำให้เสถียร และ ทำให้เป็นก้อน (Solidification/Stabilization) ซึ่งเป็นขบวนการกำจัดของเสียจำพวก Sludge หรือ ของเสียที่

ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยจะผสมปูนซีเมนต์เข้ากับของเสีย เพื่อสร้างมวลของแข็งเนื้อเดียวกันให้เกิดโครงสร้างที่จับกับของเสียไว้ ทำให้น้ำซึมผ่านได้น้อยลง จึงทำให้ของเสียถูกชะล้างละลายออกมาได้น้อยลง

แม้ว่าเรซินที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียถูกวิเคราะห์ว่าเป็นของเสียอันตราย ต้องจัดการของเสียอันตรายตามมา แต่ปริมาณของน้ำเสียจะลดลง จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียมีค่าลดลงตามปริมาณที่ลดลง เช่น ค่าขนส่งของเสียอันตราย, ค่าสารเคมีในการบำบัด ฯลฯ

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยบรรจุคอลัมน์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

1. การศึกษาอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่เหมาะสมในการบำบัดแคดเมียมพบว่า เมื่อลดอัตราการไหลลง ทำให้ร้อยละการบำบัดของแคดเมียมเพิ่มขึ้น โดยอัตราการไหลที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุดที่ทำการศึกษาคือ 2.5 mL/min โดยพิจารณาตามมาตรฐานคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน สามารถบำบัดปริมาณแคดเมียมได้สูงสุด $17.31 \pm 0.31 \text{ mg}$ ปริมาณน้ำเสียที่บำบัดได้เท่ากับ $11.633 \pm 0.028 \text{ L}$ ซึ่งมากกว่าอัตราการอื่นๆที่ทำการศึกษา
2. การศึกษาความสูงของเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ พบว่าความสูงของเรซินที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด คือ 17 cm โดยสามารถบำบัดปริมาณแคดเมียมได้ $17.27 \pm 0.79 \text{ mg}$
3. การศึกษาประสิทธิภาพของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาฟื้นฟูสภาพเรซินด้วย HCl แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยวนใช้บำบัดซ้ำ 4 รอบ ที่อัตราการไหล 2.5 mL/min และ ที่ความสูงเรซิน 17 cm เรซินยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียมที่ให้ความเข้มข้นน้ำทิ้งได้ตามมาตรฐานคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน สามารถนำกลับมาใช้บำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้หลายครั้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยบรรจุคอลัมน์ มีข้อเสนอแนะ ดังนี้

1. ในการศึกษาการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย อาจศึกษาโลหะหนักชนิดอื่นๆ และ โลหะหนักผสมหลายชนิด เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินที่มีต่อไอออนโลหะหนักชนิดอื่นๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักชนิดอื่นปนเปื้อนได้
2. ศึกษาประสิทธิภาพของชุดคอลัมน์เรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว เมื่อนำไปใช้บำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม
3. ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดียิ่งขึ้น จึงควรพัฒนาการทดลองให้เป็นแบบ Two Stage

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2537. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการจัดการน้ำเสีย และระบบระบายน้ำในพื้นที่ที่มีผลกระทบต่อจุดสูบน้ำดิบเพื่อการประปา. กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ. หน้า 64-72.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2538. การติดตามตรวจสอบสารพิษตกค้างในสิ่งแวดล้อม. บริษัท เทสโก้, กรุงเทพฯ. หน้า 34- 65.
- กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2540. การศึกษาปริมาณโลหะหนักในการอุตสาหกรรม. รายงานกิจกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ. ฉบับที่ 55, หน้า 95.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2541. แคลเดียม. บริษัท อินทิเกรเต็ด โปรโมชันเทคโนโลยี จำกัด, กรุงเทพฯ. 179 หน้า.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2543. รายงานผลการวิเคราะห์ปริมาณสารพิษในน้ำทิ้ง. บริษัท ผาแดง อินดรัสตรี จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ. หน้า 10.
- ชัชฎาพร อองอาจ. 2545. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว. กรุงเทพมหานคร. ชญาบุช แสงวิเชียร และ ผกามาศ เกษณ์พัฒนานนท์. 2546. การออกแบบคอลัมน์ดูดซับเพื่อบำบัดสาร VOC ในอากาศในอุตสาหกรรมเคลือบผิว. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 62 หน้า.
- รศ ศรีสติศย์. 2540. การปนเปื้อนของโลหะหนักในพืชที่ปลูกด้วยปุ๋ยหมักจากขยะมูลฝอยชุมชน. วารสารวิจัยสถานะแวดล้อม. ปีที่ 19, เล่มที่ 1, หน้า 12-22.
- ธนากาญจน์ บุญพิทักษ์. 2548. การกำจัดไซยาไนด์และโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน : กรณีของคอลัมน์แบบแยกเรซิน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 69 หน้า
- เพชรพร เขาวกิจเจริญ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 50 หน้า.
- เพชรพร เขาวกิจเจริญ. 2546. การกำจัดทองแดงโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขังข้าวโพดเปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน. สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 639 หน้า.

- มุกดา เขียมเจริญ. 2530. การวิเคราะห์หาปริมาณปรอท ตะกั่วและแคดเมียมในน้ำหนอง
ประจักษ์ และห้วยหมากแข้ง จังหวัดอุดรธานี, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ,
กรุงเทพฯ. หน้า 102-103.
- ไมตรี สุทธิจิตต์. 2534. สารพิษรอบตัวเรา สาเหตุ กลไกการเกิดพิษ โรคมะเร็ง และการป้องกัน
พิมพ์ครั้งที่ 2, โรงพิมพ์ดาวกราฟฟิก, เชียงใหม่. หน้า 90-92.
- วิมลรัตน์ สังข์คุ้ม. 2545. การดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายมหภาคสีเขียวชนิดช่อพริกไทย.
กรุงเทพมหานคร.
- ศุภวรรณ กฤษณะทรัพย์. 2540. การลดปริมาณตะกั่วโดยใช้เปลือกไข่. ปริญญาานิพนธ์ ภาควิชา
อาหารเคมี คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์, 50 หน้า.
- ศิริรัตน์ ศรีเกษเพชร. 2543. การดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยดินเหนียวและดินเหนียว
ปรับปรุง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 26-40.
- ศุจิตรา สมบัติภิญโญ และปริญญา ปิยะเวชรรัตน์. 2541. การศึกษาปริมาณโลหะหนักตะกั่ว
แคดเมียม และแมงกานีสในน้ำชะล้างและดินจากสถานบำบัดขยะ. ซอยอ่อนนุชและลาดกระ
บัง. โครงการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่ว
ไป จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 45 หน้า.
- อภิชน วัชรนทร์วงศ์. 2546. การกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผงไททานเนียม
ไดออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
138 หน้า.
- Chang, R., 1991, **Chemistry: Fourth edition**, McGraw Hill, Inc., U.S.A, pp.699.
- Charrier, J.J., Guibal, E., Delanghe, J. R. B. and Cloirec, P.L., 1996, **Vanadium (IV) sorption by
chitosan kinetics and equilibrium**, Water Resource, Vol. 30, No. 2, pp. 465- 475.
- Cheung, C.W., Chan, C.K., Porter, J.F. and McKay, G., 2001, Combined diffusion model for the
sorption of cadmium, copper, and zinc ions onto bone char, **Environmental Science
Technology**, Vol. 35, pp. 1511-1522.
- Leusch, A. and Volesky.B., 1995, **The influence of film diffusion on cadmium biosorption by
marine biomass**, Journal of Biotechnology, No. 43, pp. 1-10.
- Neuhof, T. and Fresenius, W., 1989, **Waste Water Technology**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg,
USA., pp.72-78.
- Orumwense, F.F.O., 1996, **Removal of lead from water by adsorption on a koalinitic clay**,

USA., pp.72-78.

Orumwense, F.F.O., 1996, **Removal of lead from water by adsorption on a koalinitic clay**,
Journal Chemistry Technology Biotechnology, vol. 65, pp. 363-369.

Quek, S.Y., Wase, D.A.J. And Forster, C.F., 1998, **The use of sagowaste for the sorption of lead and copper**, Water Resource., Vol.24, No.3, pp. 251-256.

Romos, L.R., Mendez, R.Jr.,Borron, M.J., Rubio, F.L. and Coronado, G., 1997, **Adsorption of cadmium from aqueous solution onto activated carbon**, Water Science Technology, Vol. 35, No. 7, pp. 205-211.

Singh D.B., Rupainwar D.C. and Prasad G., 1998, **Studies on the Cd(II) removal from water by adsorption**, Journal of Hazardous Materials, Vol. 60, pp.29-40.

Y. Bai, B. Bartkiewicz, 2009, **Removal of Cadmium from Wastewater Using Ion Exchange Resin Amberjet 1200H Columns**. Department of Environmental Engineering, Warsaw University of Technology, Poland, Vol. 18, No. 6, pp.1191-1195.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

1. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Regenerate Resin, Lewatit MonoPlus S108)

1.1 ผลของอัตราการไหลที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด ที่อัตราการไหล 2.5 mL/min

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ปริมาณเรซิน 12.3 g

ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 10.50 ± 0.18 mg/L

ระยะเวลาที่แปรค่าหน้าที่ 0 – 1,440

ตารางที่ ก-1 อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่อัตราการไหล 2.5 mL/min ความสูงเรซิน 13.5 cm

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
0	0	5.67	21.6	10.780	5.90	20.5	11.220	5.91	22.2	9.90	5.83	21.43	10.633	0.00
60	0.15	4.68	85.5	0.001	5.29	6	N.D	3.81	22.3	N.D.	4.59	37.93	0.001	99.99
180	0.45	4.48	83.2	0.002	5.31	5.6	0.002	3.80	30.4	N.D.	4.53	39.73	0.002	99.98

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่อัตราการไหล 2.5 mL/min ความสูงเรซิน 13.5 cm

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
360	0.90	4.40	76.2	0.003	4.68	7.5	0.003	3.79	45.5	0.002	4.29	43.07	0.003	99.97
540	1.35	4.44	87.2	0.004	4.34	16.6	0.004	3.83	55.1	0.008	4.20	52.97	0.005	99.95
600	1.50	4.42	85.4	0.004	3.88	54.7	0.007	3.82	52.1	0.009	4.04	64.07	0.007	99.94
620	1.55	4.42	84.3	0.007	3.85	61.7	0.014	3.80	58.5	0.021	4.02	68.17	0.014	99.87
640	1.60	4.43	84.3	0.028	3.78	61.6	0.014	3.77	59.3	0.026	3.99	68.40	0.023	99.79
660	1.65	4.36	81.4	0.041	3.79	63.9	0.029	3.74	60.6	0.032	3.96	68.63	0.034	99.68
680	1.70	4.38	84.1	0.054	3.80	64.9	0.039	3.76	60.9	0.040	3.98	69.97	0.044	99.58
700	1.75	4.29	79.6	0.076	3.76	64.6	0.045	3.79	60.3	0.076	3.95	68.17	0.066	99.38
720	1.80	4.47	75.2	0.088	3.75	58.2	0.058	3.81	60.8	0.091	4.01	64.73	0.079	99.26
740	1.85	4.47	75.4	0.095	3.78	65.5	0.069	3.91	62.4	0.108	4.05	67.77	0.091	99.15
760	1.90	4.47	74.5	0.119	3.84	65.3	0.076	3.98	63.5	0.029	4.10	67.77	0.075	99.30
780	1.95	4.48	76.7	0.171	3.86	63.8	0.119	4.76	63.9	0.127	4.37	68.13	0.139	98.69

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่อัตราการไหล 2.5 mL/min ความสูงเรซิน 13.5 cm

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
800	2.00	4.53	78.8	0.234	3.84	64.1	0.125	4.84	63.5	0.153	4.40	68.80	0.171	98.39
820	2.05	4.56	79.5	0.279	3.89	68.1	0.150	5.67	64.1	0.198	4.71	70.57	0.209	98.03
840	2.10	4.61	50.9	0.359	4.43	64.2	0.252	5.72	64.5	0.264	4.92	59.87	0.292	97.26
860	2.15	4.98	76	0.407	6.07	65.2	0.300	5.71	64.9	0.280	5.59	68.70	0.329	96.90
880	2.20	5.20	74.5	0.441	6.20	66.6	0.465	5.75	65.2	0.541	5.72	68.77	0.482	95.46
900	2.25	5.14	76.7	0.655	6.21	66.8	0.648	5.78	66.2	0.693	5.71	69.90	0.665	93.74
960	2.40	5.15	80.7	0.752	6.23	65.6	0.666	5.76	66.7	0.746	5.71	71.00	0.721	93.21
1080	2.70	5.35	82.5	0.880	6.24	66.7	0.894	5.46	67.3	0.824	5.68	72.17	0.866	91.85
1200	3.00	5.18	83.3	0.950	6.24	66.8	0.910	5.69	67.1	0.810	5.70	72.40	0.890	91.63
1320	3.30	5.20	82.4	0.994	6.26	67.2	1.080	5.66	67.4	1.046	5.71	72.33	1.040	90.22
1440	3.60	5.37	86.7	1.174	6.28	67.7	1.078	5.70	68.3	1.086	5.78	74.23	1.113	89.53

1.2 อัตราการไหลที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด ที่อัตราการไหล 5 mL/min

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ปริมาณเรซิน 12.3 g

ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 10.50 ± 0.18 mg/L

ระยะเวลาที่แปรค่าหน้าที่ 0 – 1,440

ตารางที่ ก-2 อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่อัตราการไหล 5 mL/min ความสูงเรซิน 13.5 cm

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
0	0	5.31	21.7	10.780	5.42	22.5	11.220	5.51	20.4	9.900	5.41	21.5	10.633	0.00
60	0.30	4.50	10.1	0.004	3.88	54.3	0.002	5.14	46.2	0.001	4.51	36.9	0.002	99.98
180	0.90	4.18	22.8	0.008	3.85	55.7	0.007	4.32	54.3	0.003	4.12	44.3	0.006	99.94
300	1.50	4.07	30.8	0.012	3.80	61.0	0.014	3.79	64.3	0.005	3.89	52.0	0.01	99.91
340	1.70	3.95	43.6	0.019	3.79	64.9	0.017	3.81	64.6	0.007	3.85	57.7	0.023	99.78
360	1.80	3.86	55.1	0.093	3.78	64.6	0.043	3.80	64.9	0.007	3.81	61.5	0.065	99.39
380	1.90	3.83	52.1	0.216	3.76	56.9	0.095	3.79	65.2	0.026	3.79	58.1	0.124	98.83
400	2.00	3.84	63.7	0.324	3.80	58.9	0.129	3.78	65.5	0.031	3.81	62.7	0.193	98.18

ตารางที่ ก-2 (ต่อ) อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เคเคเมียมที่อัตราการไหล 5 mL/min ความสูงเรซิน 13.5 cm

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
420	2.10	3.81	57.8	0.318	3.83	63.8	0.224	3.93	68.9	0.04	3.86	63.5	0.183	98.28
440	2.20	3.78	59.3	0.33	3.81	63.9	0.56	3.80	74.5	0.164	3.80	65.9	0.275	97.41
460	2.30	3.75	63.0	0.758	3.82	64.6	0.716	3.79	75.1	0.465	3.79	67.6	0.306	97.12
480	2.40	3.76	63.8	0.878	3.80	64.9	0.882	3.79	76.7	0.476	3.78	68.5	0.358	96.63
500	2.50	5.22	63.0	0.716	3.80	65.8	0.892	3.76	76.0	0.71	4.26	68.3	0.403	96.21
540	2.70	5.16	65.5	0.99	3.76	67.7	1.082	3.84	77.5	0.873	4.25	70.2	0.702	93.40
600	3.00	5.20	66.1	1.046	3.80	66.6	1.274	3.89	78.8	1.062	4.30	70.5	0.749	92.95
720	3.60	5.22	68.1	0.852	3.74	66.8	1.248	5.61	79.8	1.122	4.86	71.6	0.836	92.14
900	4.50	5.26	68.3	0.99	4.68	65.6	1.516	5.72	80.7	0.994	5.22	71.5	1.046	90.16
1080	5.40	5.25	69.5	1.194	4.69	66.7	1.564	5.45	80.2	1.516	5.13	72.1	1.119	89.47
1200	6.00	5.28	70.2	1.474	4.66	66.8	1.365	5.52	80.4	1.092	5.15	72.5	1.163	89.06
1320	6.60	5.27	72.6	1.005	4.66	67.3	1.26	5.57	82.5	1.436	5.17	74.1	1.254	88.20

ตารางที่ ก-2 (ต่อ) อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่อัตราการไหล 5 mL/min ความสูงเรซิน 13.5 cm

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
1380	6.90	5.45	76.8	1.065	4.83	68.5	1.32	5.63	82.8	1.528	5.30	76.0	1.326	87.53
1440	7.20	5.59	75.1	1.45	4.85	70.2	1.385	5.64	83.5	1.432	5.36	76.3	1.441	86.44

1.3 อัตราการไหลที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด ที่อัตราการไหล 7 mL/min

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ปริมาณเรซิน 12.3 g

ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 10.50 ± 0.18 mg/L

ระยะเวลาที่แปรค่าหน้าที่ 0 – 1,440

ตารางที่ ก-3 อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่อัตราการไหล 7 mL/min ความสูงเรซิน 13.5 cm

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
0	0	5.67	22.0	10.780	5.67	22.4	11.220	5.65	21.8	9.900	5.66	22.07	10.633	0.00
60	0.42	5.37	68.5	0.004	4.33	65.3	0.002	4.74	68.6	0.003	4.81	67.47	0.002	99.98
120	0.84	4.20	80.4	0.003	4.25	68.6	0.003	4.52	71.8	0.004	4.32	73.60	0.003	99.97
180	1.26	3.41	96.0	0.004	3.96	71.8	0.007	4.21	75.7	0.005	3.86	81.17	0.007	99.93
210	1.47	3.51	108.0	0.006	3.72	88.4	0.008	3.84	76.1	0.004	3.69	90.83	0.028	99.74
240	1.68	3.75	110.0	0.009	3.74	99.1	0.008	3.82	75.3	0.005	3.77	94.80	0.038	99.64
250	1.75	3.75	111.0	0.013	3.75	99.5	0.017	3.81	75.0	0.012	3.77	95.17	0.037	99.65
260	1.82	3.65	116.0	0.014	3.76	111.0	0.026	3.80	76.0	0.013	3.74	101.00	0.126	98.81

ตารางที่ ก-3 (ต่อ) อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่อัตราการไหล 7 mL/min ความสูงเรซิน 13.5 cm

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	
270	1.89	3.57	113.0	0.017	3.76	111.0	0.033	3.78	76.4	0.014	3.70	100.13	0.133	98.75
280	1.96	3.57	113.0	0.023	3.79	108.0	0.037	3.75	76.8	0.022	3.70	99.27	0.137	98.71
290	2.03	3.62	108.0	0.024	3.80	103.0	0.053	3.76	76.8	0.023	3.73	95.93	0.253	97.62
300	2.10	3.65	108.0	0.036	3.81	105.0	0.098	3.79	81.8	0.039	3.75	98.27	0.298	97.20
310	2.17	3.98	104.0	0.118	3.81	107.0	0.113	3.82	82.8	0.105	3.87	97.93	0.413	96.11
320	2.24	4.29	103.0	0.385	4.07	108.0	0.488	3.85	82.5	0.264	4.07	97.83	0.688	93.53
350	2.45	4.48	106.0	0.724	4.36	115.0	0.915	3.91	83.2	0.988	4.25	101.40	0.915	91.39
360	2.52	4.72	104.0	0.693	4.37	116.0	0.918	4.02	83.7	0.99	4.37	101.23	0.918	91.36
420	2.94	4.97	107.0	0.922	4.68	118.0	1.220	4.14	84.9	1.154	4.60	103.30	1.22	88.52
600	4.20	5.08	107.0	1.185	4.92	120.0	1.385	4.26	85.5	1.31	4.75	104.17	1.385	86.97
780	5.46	5.21	110.0	1.065	5.14	119.0	1.535	4.39	85.7	1.262	4.91	104.90	1.535	85.56
960	6.72	5.20	112.0	1.805	5.20	118.0	1.595	4.87	88.7	1.318	5.09	106.23	1.595	85.00

ตารางที่ ก-3 (ต่อ) อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่อัตราการไหล 7 mL/min ความสูงเรซิน 13.5 cm

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
1140	7.98	5.25	109.0	1.905	5.26	117.0	1.795	5.24	88.5	1.328	5.25	104.83	1.667	83.11
1440	10.08	5.27	108.0	1.925	5.37	117.0	1.740	5.35	89.0	1.336	5.33	104.67	1.795	84.32

1.4 ผลของความสูงเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด ที่ความสูงเรซิน 10 cm

สถานะที่ใช้ในการทดลอง อัตราการไหล 2.5 mL/min

ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 10.50 ± 0.18 mg/L

ระยะเวลาที่แปรค่าหน้าที่ 0 – 1,440

ตารางที่ ก-4 ความสูงเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ความสูงเรซิน 10 cm

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
0	0	5.78	28.7	9.520	5.32	22.6	10.740	5.37	22.1	10.840	5.49	24.5	10.367	0.00
60	0.15	5.25	53.8	0.004	5.37	30.4	0.005	3.89	45.2	0.003	4.84	43.1	0.004	99.96
180	0.45	5.33	54.2	0.005	4.19	34.4	0.007	3.83	54.3	0.007	4.45	47.6	0.006	99.94
240	0.60	4.98	65.2	0.017	3.88	50.9	0.013	3.81	64.9	0.014	4.22	60.3	0.015	99.86
300	0.75	3.82	79.4	0.012	3.86	66.1	0.021	3.75	70.4	0.028	3.81	72.0	0.02	99.81
360	0.90	3.81	80.4	0.02	3.78	76.0	0.019	3.78	76.7	0.028	3.79	77.7	0.022	99.79
380	0.95	3.80	82.5	0.019	3.65	80.4	0.021	3.78	77.5	0.03	3.74	80.1	0.023	99.78
400	1.00	3.81	80.4	0.036	3.61	83.8	0.036	3.74	87.7	0.033	3.72	84.0	0.035	99.66
420	1.05	3.79	84.2	0.03	3.59	81.4	0.041	3.71	87.2	0.112	3.70	84.3	0.061	99.41

ตารางที่ ก-4 (ต่อ) ความสูงเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคะเมียมที่ความสูงเรซิน 10 cm

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
440	1.10	3.79	83.2	0.037	3.54	81.8	0.048	3.71	84.5	0.16	3.68	83.2	0.082	99.21
460	1.15	3.76	82.5	0.045	3.61	82.4	0.065	3.70	86.9	0.186	3.69	83.9	0.099	99.05
480	1.20	3.83	82.8	0.079	3.62	83.3	0.076	3.67	86.5	0.205	3.71	84.2	0.12	98.84
500	1.25	4.32	82.8	0.131	3.66	84.1	0.092	3.66	86.7	0.233	3.88	84.5	0.152	98.53
540	1.35	4.57	83.5	0.189	3.83	90.4	0.182	3.65	88.9	0.488	4.02	87.6	0.286	97.24
600	1.50	4.55	87.2	0.219	4.14	90.8	0.362	3.63	90.4	0.539	4.11	89.5	0.373	96.40
720	1.80	4.56	83.5	0.326	4.32	91.5	0.438	3.62	90.5	0.722	4.17	88.5	0.495	95.23
900	2.25	4.58	87.4	0.412	4.35	92.0	0.45	3.94	90.4	0.788	4.29	89.9	0.55	94.70
1080	2.70	4.60	87.5	0.664	4.57	96.6	0.776	4.41	92.3	1.274	4.53	92.1	0.905	91.27
1260	3.15	4.62	90.4	0.991	4.55	96.5	1.18	4.44	93.6	1.498	4.54	93.5	1.223	88.21
1440	3.60	4.66	91.2	1.18	4.58	96.5	1.31	4.62	92.7	1.445	4.62	93.5	1.312	87.35

1.5 ผลของความสูงเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด ที่ความสูงเรซิน 17 cm

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง อัตราการไหล 2.5 mL/min

ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 10.5 ± 0.18 mg/L

ระยะเวลาที่แปรค่าหน้าที่ 0 – 1,440

ตารางที่ ก-5 ความสูงเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ความสูงเรซิน 17 cm

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
0	0	5.64	21.6	9.52	5.56	22.2	10.74	5.47	22.4	10.84	5.56	22.1	10.367	0.00
60	0.150	5.67	46.4	0.003	5.12	52.1	0.002	4.96	40.7	0.002	5.25	46.4	0.002	99.98
180	0.450	5.33	45.6	0.004	4.92	54.1	0.003	4.79	55.1	0.003	5.01	51.6	0.003	99.97
300	0.750	5.19	48.2	0.005	4.88	60.7	0.004	4.78	59.4	0.004	4.95	56.1	0.004	99.96
420	1.050	4.85	50.0	0.007	4.74	61.8	0.003	4.76	62.3	0.004	4.78	58.0	0.005	99.95
540	1.350	4.69	53.6	0.009	4.64	66.8	0.005	4.70	65.5	0.007	4.68	62.0	0.007	99.93
600	1.500	4.62	60.4	0.028	4.55	67.7	0.005	4.66	69.7	0.01	4.61	65.9	0.014	99.86
630	1.575	4.62	64.1	0.033	4.52	68.1	0.007	4.67	74.7	0.013	4.60	69.0	0.018	99.83

ตารางที่ ก-5(ต่อ)ความสูงเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคะเมียมที่ความสูงเรซิน 17 cm

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	
660	1.650	4.60	67.4	0.037	4.37	68.5	0.012	4.30	76.0	0.02	4.42	70.6	0.023	99.78
690	1.725	4.58	66.7	0.028	4.32	70.1	0.012	4.32	79.5	0.021	4.41	72.1	0.020	99.80
720	1.800	4.81	66.6	0.03	4.28	70.4	0.015	4.47	84.1	0.024	4.52	73.7	0.023	99.78
750	1.875	4.85	67.3	0.033	4.27	74.4	0.031	5.11	82.4	0.029	4.74	74.7	0.031	99.70
780	1.950	4.89	67.7	0.038	4.52	75.1	0.036	5.27	82.8	0.037	4.89	75.2	0.037	99.64
810	2.025	4.96	68.9	0.039	4.98	76.0	0.043	5.34	82.5	0.032	5.09	75.8	0.038	99.63
840	2.100	5.07	68.8	0.041	5.11	81.4	0.045	5.33	83.2	0.044	5.17	77.8	0.043	99.58
870	2.175	5.17	70.2	0.044	5.14	82.4	0.055	5.39	83.5	0.037	5.23	78.7	0.045	99.56
900	2.250	5.20	77.6	0.046	5.12	84.1	0.062	5.41	85.6	0.055	5.24	82.4	0.054	99.48
1080	2.700	5.21	80.1	0.066	5.22	83.3	0.073	5.41	87.9	0.058	5.28	83.8	0.066	99.37
1260	3.150	5.34	81.1	0.082	5.31	83.5	0.069	5.44	87.3	0.062	5.36	84.0	0.071	99.32
1440	3.600	5.35	82.4	0.082	5.35	84.3	0.08	5.48	88.2	0.073	5.39	85.0	0.078	99.24

2. การศึกษาการล้างไอออนของโลหะหนักแคดเมียมออกจาก Ion Exchange Resin แล้วนำกลับมาใช้ใหม่

2.1 การฟื้นฟูสภาพเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว ครั้งที่ 1

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง อัตราการไหลน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม 2.5 mL/min

ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 10.50 ± 0.18 mg/L

ความสูงเรซิน 17 cm

ระยะเวลาที่แปรค่าหน้าที่ 0 – 1,440

ตารางที่ ก-6 การศึกษาการล้างไอออนของโลหะหนักแคดเมียมออกจาก Ion Exchange Resin แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
0	0	5.64	21.6	9.52	5.56	22.2	10.74	5.47	22.4	10.84	5.56	22.1	10.367	0.00
60	0.150	5.67	46.4	0.003	5.12	52.1	0.002	4.96	40.7	0.002	5.25	46.4	0.002	99.98
180	0.450	5.33	45.6	0.004	4.92	54.1	0.003	4.79	55.1	0.003	5.01	51.6	0.003	99.97
300	0.750	5.19	48.2	0.005	4.88	60.7	0.004	4.78	59.4	0.004	4.95	56.1	0.004	99.96
420	1.050	4.85	50.0	0.007	4.74	61.8	0.005	4.76	62.3	0.004	4.78	58.0	0.005	99.95
540	1.350	4.69	53.6	0.009	4.64	66.8	0.007	4.70	65.5	0.007	4.68	62.0	0.008	99.92

ตารางที่ ก-6 (ต่อ) การศึกษาการล้างไอออนของโลหะหนักแคดเมียมออกจาก Ion Exchange Resin แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	
600	1.500	4.62	60.4	0.028	4.55	67.7	0.012	4.66	69.7	0.01	4.61	65.9	0.017	99.84
630	1.575	4.62	64.1	0.03	4.52	68.1	0.012	4.67	74.7	0.021	4.60	69.0	0.021	99.80
660	1.650	4.60	67.4	0.038	4.37	68.5	0.014	4.30	76.0	0.032	4.42	70.6	0.025	99.76
690	1.725	4.58	66.7	0.039	4.32	70.1	0.03	4.32	79.5	0.045	4.41	72.1	0.038	99.63
720	1.800	4.81	66.6	0.046	4.28	70.4	0.034	4.47	84.1	0.107	4.52	73.7	0.042	99.59
750	1.875	4.85	67.3	0.082	4.27	74.4	0.042	5.11	82.4	0.105	4.74	74.7	0.076	99.27
780	1.950	4.89	67.7	0.131	4.52	75.1	0.08	5.27	82.8	0.126	4.89	75.2	0.113	98.91
810	2.025	4.96	68.9	0.203	4.98	76.0	0.146	5.34	82.5	0.289	5.09	75.8	0.212	97.96
840	2.100	5.07	68.8	0.219	5.11	81.4	0.183	5.33	83.2	0.311	5.17	77.8	0.238	97.70
870	2.175	5.17	70.2	0.33	5.14	82.4	0.225	5.39	83.5	0.441	5.23	78.7	0.332	96.80
900	2.250	5.20	77.6	0.409	5.12	84.1	0.264	5.41	85.6	0.491	5.24	82.4	0.391	96.23

ตารางที่ ก-6 (ต่อ) การศึกษาการล้างไอออนของโลหะหนักแคดเมียมออกจาก Ion Exchange Resin แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	
1080	2.700	5.21	80.1	0.539	5.22	83.3	0.331	5.41	87.9	0.539	5.28	83.8	0.463	95.54
1260	3.150	5.34	81.1	0.561	5.31	83.5	0.364	5.44	87.3	0.648	5.36	84.0	0.524	94.95
1440	3.600	5.35	82.4	0.637	5.35	84.3	0.34	5.48	88.2	0.693	5.39	85.0	0.553	94.67

2.2 การฟื้นฟูสภาพเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว ครั้งที่ 2

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง อัตราการไหลน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม 2.5 mL/min

ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 10.50 ± 0.18 mg/L

ความสูงเรซิน 17 cm

ระยะเวลาที่แปรค่าหน้าที่ 0 – 1,440

ตารางที่ ก-7 การศึกษาการล้าง ไอออนของโลหะหนักแคดเมียมออกจาก Ion Exchange Resin แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
0	0	5.36	22.5	9.52	5.36	21.6	10.74	5.35	22.1	10.84	5.36	22.1	10.367	
60	0.150	5.02	30.6	0.001	4.88	36.7	0.002	4.84	60.1	0.0052	4.91	42.5	0.003	99.97
180	0.450	4.95	44.9	0.0018	4.80	55.5	0.0024	4.77	67.2	0.0084	4.84	55.9	0.005	99.95
300	0.750	4.93	57.2	0.0022	4.79	68.4	0.003	4.73	66.1	0.011	4.82	63.9	0.005	99.95
420	1.050	4.84	64.9	0.0024	4.77	68.7	0.0046	4.72	66.5	0.0126	4.78	66.7	0.007	99.93
540	1.350	4.78	67.9	0.0028	4.78	64.1	0.0058	4.56	66.9	0.021	4.71	66.3	0.013	99.87
600	1.500	4.76	65.2	0.0036	4.76	64.8	0.0194	4.51	66.8	0.0276	4.68	65.6	0.021	99.80
630	1.575	4.76	63.3	0.0194	4.78	63.6	0.0142	4.44	69.2	0.042	4.66	65.4	0.021	99.80
660	1.650	4.77	63.9	0.0382	4.78	64.7	0.025	4.42	70.1	0.0418	4.66	66.2	0.028	99.73

ตารางที่ ก-7 (ต่อ) การศึกษาการล้าง ไอออนของโลหะหนักแคดเมียมออกจาก Ion Exchange Resin แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ปริมาตร น้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	
690	1.725	4.75	84.7	0.0422	4.74	69.5	0.0326	4.3	70.4	0.0442	4.60	74.9	0.037	99.64
720	1.800	4.68	86.1	0.041	4.68	69.8	0.0354	4.31	73.6	0.0718	4.56	76.5	0.048	99.54
750	1.875	4.69	86.5	0.0862	4.66	70.1	0.0466	4.28	75.5	0.0838	4.54	77.4	0.072	99.31
780	1.950	4.70	77.6	0.1084	4.61	72.0	0.0768	4.25	76.7	0.1088	4.52	75.4	0.098	99.05
810	2.025	4.89	74.8	0.1402	4.54	74.1	0.1182	4.18	77.5	0.128	4.54	75.5	0.129	98.76
840	2.100	5.16	71.4	0.1466	4.48	75.6	0.254	4.23	79.5	0.286	4.62	75.5	0.229	97.79
870	2.175	5.36	67.1	0.163	4.41	75.6	0.302	4.54	79.8	0.33	4.77	74.2	0.265	97.44
900	2.250	5.44	67.6	0.292	4.35	75.8	0.325	4.68	81.4	0.393	4.82	74.9	0.337	96.75
1080	2.700	5.51	67.3	0.364	4.33	76.0	0.428	4.77	82	0.496	4.87	75.1	0.429	95.86
1260	3.150	5.58	67.8	0.561	4.28	76.7	0.495	4.79	83.6	0.587	4.88	76.0	0.548	94.72
1440	3.600	5.60	68.3	0.639	4.30	78.8	0.671	4.76	85	0.603	4.89	77.4	0.638	93.85

2.3 การฟื้นฟูสภาพเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว ครั้งที่ 3

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง อัตราการไหลน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม 2.5 mL/min

ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 10.50 ± 0.18 mg/L

ความสูงเรซิน 17 cm

ระยะเวลาที่แปรค่านาฬิกาที่ 0 – 1,440

ตารางที่ ก-8 การศึกษาการล้างไอออนของโลหะหนักแคดเมียมออกจาก Ion Exchange Resin แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ครั้งที่ 3

เวลา (นาฬิกา)	ปริมาตร น้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
0	0	5.41	22.1	9.52	5.37	22.4	10.74	5.56	22.2	10.84	5.45	22.2	10.367	0.00
60	0.150	4.87	37.9	0.001	4.89	41.8	0.0032	5.12	52.1	0.003	4.96	43.9	0.002	99.98
180	0.450	4.76	37.3	0.001	4.91	50.4	0.0024	4.92	54.1	0.006	4.86	47.3	0.003	99.97
300	0.750	4.75	52.7	0.004	4.87	51.1	0.0038	4.88	60.7	0.004	4.83	54.8	0.004	99.96
420	1.050	4.63	54.4	0.006	4.83	61.6	0.0126	4.79	61.8	0.008	4.75	59.3	0.009	99.91
540	1.350	4.58	60.4	0.015	4.78	62.4	0.0176	4.64	63.0	0.017	4.67	61.9	0.017	99.84
600	1.500	4.59	61.9	0.025	4.74	64.4	0.0248	4.55	63.0	0.056	4.63	63.1	0.022	99.79
630	1.575	4.48	63.3	0.03	4.66	64.5	0.039	4.52	63.8	0.068	4.55	63.9	0.025	99.76

ตารางที่ ก-8 (ต่อ) การศึกษาการล้าง ไอออนของโลหะหนักแคดเมียมออกจาก Ion Exchange Resin แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ปริมาตร น้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
660	1.650	4.42	63.9	0.03	4.56	65.2	0.0536	4.37	65.5	0.088	4.45	64.9	0.037	99.64
690	1.725	4.39	65.3	0.049	4.43	66.9	0.045	4.31	65.6	0.125	4.38	65.9	0.043	99.59
720	1.800	4.37	66.2	0.082	4.38	68.4	0.066	4.32	68.1	0.12	4.36	67.6	0.089	99.14
750	1.875	4.64	69.5	0.13	4.31	72.1	0.1328	4.28	68.5	0.145	4.41	70.0	0.136	98.69
780	1.950	4.69	72.4	0.177	4.22	74.4	0.122	4.25	70.1	0.331	4.39	72.3	0.21	97.97
810	2.025	4.91	75.6	0.31	4.26	79.3	0.211	4.50	70.4	0.343	4.56	75.1	0.288	97.22
840	2.100	4.95	80.4	0.326	4.78	80.6	0.289	4.52	74.4	0.398	4.75	78.5	0.338	96.74
870	2.175	5.05	80.1	0.138	4.79	80.8	0.577	4.55	75.1	0.537	4.80	78.7	0.417	95.98
900	2.250	5.22	80.7	0.349	4.81	81.1	0.688	4.74	76.0	0.699	4.92	79.3	0.579	94.42
1080	2.700	5.31	81.8	0.492	4.80	81.6	0.976	4.98	81.4	0.701	5.03	81.6	0.723	93.03
1260	3.150	5.35	88.6	0.659	4.81	83.4	0.986	5.11	82.4	0.982	5.09	84.8	0.876	91.55
1440	3.600	5.37	87.2	0.724	4.97	85.5	1.006	5.14	84.1	1.084	5.16	85.6	0.938	90.95

2.4 การฟื้นฟูสภาพเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว ครั้งที่ 4

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง อัตราการไหลน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม 2.5 mL/min

ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 10.50 ± 0.18 mg/L

ความสูงเรซิน 17 cm

ระยะเวลาที่แปรค่าหน้าที่ 0 – 1,440

ตารางที่ ก-9 การศึกษาการล้าง ไอออนของโลหะหนักแคดเมียมออกจาก Ion Exchange Resin แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ครั้งที่ 4

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct (μ s/cm)	[Cd] (mg/L)	
0	0	5.42	27.5	9.52	5.67	22.8	10.74	5.61	20.2	10.84	5.57	23.5	10.367	0.00
60	0.150	4.74	40.4	0.002	4.97	60.4	0.001	4.53	40.7	0.002	4.75	47.2	0.002	99.98
180	0.450	4.64	44.7	0.007	4.74	66.8	0.002	4.21	66.8	0.006	4.43	59.4	0.005	99.95
300	0.750	4.55	69.8	0.003	4.62	70.2	0.002	4.22	66.4	0.003	4.46	68.8	0.003	99.97
420	1.050	4.52	70.4	0.01	4.54	70.4	0.005	4.35	64.1	0.005	4.47	68.3	0.007	99.93
540	1.350	4.29	71.3	0.016	4.36	72.7	0.011	4.36	64.0	0.01	4.34	69.3	0.012	99.88
600	1.500	4.44	75.5	0.012	4.33	74.5	0.012	4.35	63.2	0.018	4.37	71.1	0.014	99.86
630	1.575	4.45	76.0	0.023	4.32	78.3	0.015	4.44	66.7	0.017	4.40	73.7	0.018	99.83

ตารางที่ ก-9 (ต่อ) การศึกษาการล้างไอออนของโลหะหนักแคดเมียมออกจาก Ion Exchange Resin แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ครั้งที่ 4

เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (mL)	การทดลองชุดที่ 1			การทดลองชุดที่ 2			การทดลองชุดที่ 3			ค่าเฉลี่ย			% Removal
		pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	pH	Conduct ($\mu\text{s/cm}$)	[Cd] (mg/L)	
660	1.650	4.48	76.4	0.042	4.40	78.4	0.021	4.48	66.8	0.025	4.45	73.9	0.044	99.58
690	1.725	4.72	79.6	0.076	4.41	78.9	0.039	4.48	70.4	0.024	4.54	76.3	0.046	99.56
720	1.800	4.78	82.1	0.126	4.78	80.2	0.042	4.50	70.6	0.046	4.69	77.6	0.091	99.12
750	1.875	4.80	80.4	0.163	4.76	81.1	0.076	4.84	71.3	0.15	4.80	77.6	0.13	98.75
780	1.950	4.97	81.1	0.231	4.75	80.8	0.17	4.89	75.5	0.292	4.87	79.1	0.231	97.77
810	2.025	5.18	81.3	0.265	4.78	80.5	0.125	4.91	76.9	0.358	4.96	79.6	0.249	97.60
840	2.100	5.21	81.0	0.385	4.79	82.6	0.343	4.97	80.1	0.316	4.99	81.2	0.348	96.64
870	2.175	5.20	81.8	0.361	4.81	84.4	0.693	5.02	80.2	0.682	5.01	82.1	0.579	94.42
900	2.250	5.25	82.8	0.648	4.82	84.9	0.749	5.05	82.4	0.952	5.04	83.4	0.783	92.45
1080	2.700	5.27	82.5	0.751	4.80	85.1	0.724	5.10	81.9	0.884	5.06	83.2	0.786	92.42
1260	3.150	5.27	82.6	0.915	4.80	88.2	1.02	5.11	82.0	0.986	5.06	84.3	0.974	90.61
1440	3.600	5.32	83.0	0.982	4.81	89.3	1.278	5.16	82.2	1.046	5.10	84.8	1.102	89.37

ภาคผนวก ข

การกำจัดของเสียอันตราย

สำนักโรงงานอุตสาหกรรมรายสาขา 6 กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2549) การกำหนดของเสียอันตรายจะใช้วิธีนำมาหาค่าความเข้มข้นทั้งหมด (Total Concentration Analysis) ของสิ่งเจือปนหากพบว่ามียอดประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (mg/kg; wet weight) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) ที่กำหนดไว้แสดงว่าของเสียดังกล่าวเป็นของเสียอันตรายหากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ให้นำของเสียดังกล่าวไปวิเคราะห์โดยวิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์น้ำสกัดหากมียอดประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ที่กำหนดไว้ของเสียดังกล่าวจัดเป็นของเสียอันตราย

ตาราง ข-1 ปริมาณแคดเมียมในเรซิน

	ชุดการทดลอง		
	1	2	3
ปริมาณแคดเมียม (mg/g)	0.7866	2.9336	2.6741
ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ย (mg/g)	2.0845 ± 1.131		
ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ย (mg/คอลัมน์)	32.278 ± 17.515		
ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ย (mg/kg)	2,084.90 ± 1,131.07		
มาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม	< 100 mg/kg		

โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดค่า TTLC ของแคดเมียมไว้ที่ 100 mg/Kg wet weight ค่าที่วิเคราะห์ได้ เท่ากับ 2,084.90 mg/kg ± 1,131.07 ซึ่งมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ จึงจัดว่าเรซินดังกล่าวนี้เป็นของเสียอันตราย (ดังตารางภาคผนวก ข-1)

ตาราง ข-1 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (2539)

โลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน
สังกะสี	ไม่เกิน 5.0 mg/L
โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 mg/L
โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 mg/L
ทองแดง	ไม่เกิน 2.0 mg/L
แคดเมียม	ไม่เกิน 0.03 mg/L
แบเรียม	ไม่เกิน 1.0 mg/L
ตะกั่ว	ไม่เกิน 0.2 mg/L
นิกเกิล	ไม่เกิน 1.0 mg/L
แมงกานีส	ไม่เกิน 5.0 mg/L
อาร์เซนิก	ไม่เกิน 0.25 mg/L
เซลีนียม	ไม่เกิน 0.02 mg/L
ปรอท	ไม่เกิน 0.005 mg/L

แหล่งที่มา: ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

ภาคผนวก ก

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 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 0.01 , 0.03, 0.05, 0.07, 0.09 ,0.1, 0.3 ,0.5, 0.7, 0.9 และ 1 mg/L

ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 100 mg/L จำนวน 5 mL ใส่ในขวดวัด
ปริมาตร 50 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐาน
แคดเมียมความเข้มข้น 10 mg/L



ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 10 mg/L จำนวน 2.5 mL ใส่ในขวดวัด
ปริมาตร 25 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐาน
แคดเมียมความเข้มข้น 1 mg/L



ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม 10 mg/L จำนวน 0.025, 0.075, 0.125, 0.175,
0.225, 0.25, 0.75, 1.25, 1.75 และ 2.25 mL ด้วยไมโครปิเปต ตามลำดับ
ใส่ในขวดวัดปริมาตร 25 mL

(ต่อ)

ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น
0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1, 0.09, 0.07, 0.05, 0.03, และ 0.01 mg/L ตามลำดับ



ตรวจวัดโดยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer:AAS

ภาคผนวก ง

การคำนวณ

1. การคำนวณค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวกด้วยวิธีแอมโมเนียมอะซิเตด (CEC)

การเทียบมาตรฐานของสารละลายไฮโดรคลอริก 0.5 N

ตาราง ค.1 การเทียบมาตรฐานของสารละลายไฮโดรคลอริก 0.5 N

ตอนที่ 1 ไทเทรตโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N

ครั้งที่	ไทเทรนต์	ไทเทรนต์	ปริมาตรที่ใช้
1	NaOH	KHP 0.1 N	50.50 ml
2	NaOH	KHP 0.1 N	50.60 ml
3	NaOH	KHP 0.1 N	50.60 ml
		เฉลี่ย	50.56

$$C_{\text{NaOH}} = \frac{0.100 \text{ N} \times 25 \text{ mL}}{50.56 \text{ mL}}$$

$$= 0.0494 \text{ N}$$

ตอนที่ 2 ไทเทรตโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่หาความเข้มข้นที่แน่นอนแล้วด้วย HCl

ครั้งที่	ไทเทรนต์	ไทเทรนต์	ปริมาตรที่ใช้
1	HCl	NaOH 0.049 N	51.10 ml
2	HCl	NaOH 0.049 N	52.00 ml
3	HCl	NaOH 0.049 N	51.10 ml
		เฉลี่ย	51.10 ml

$$C_{\text{HCl}} = \frac{0.049 \text{ N} \times 25 \text{ mL}}{51.10 \text{ mL}}$$

$$= 0.024 \text{ N}$$

การหาค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของเรซิน

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

เมื่อ A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับสารละลายตัวอย่างเรซิน (mL)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์ (mL)

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มอล)

W = น้ำหนักแห้งมีหน่วยเป็นกรัมของเรซิน

- เรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน (NR)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$\begin{aligned} CEC &= \frac{(2.38 - 0)0.4809 N \times 100}{10.071 \times 1000} \\ &= 0.011 \text{ cmol/g} \end{aligned}$$

- เรซินที่ผ่านการใช้งาน (SR)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$\begin{aligned} CEC &= \frac{(24.60 - 0)0.4809 N \times 100}{10.009 \times 1000} \\ &= 0.012 \text{ cmol/g} \end{aligned}$$

- เรซินที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ (RR)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$\begin{aligned} CEC &= \frac{(39.60 - 0)0.023 N \times 100}{2.0575 \times 1000} \\ &= 0.044 \text{ cmol/g} \end{aligned}$$

การคำนวณหาปริมาณแคลเซียม

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

เมื่อ A = น้ำหนักของเรซิน (g)

df = จำนวนเท่าของการเจือจางสารละลาย

C = ปริมาตรสุดท้ายของสารละลายตัวอย่าง (mL)

R = ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่อ่านได้จากเครื่อง AAS (mg/L)

- เรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน (NR)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ Ca}^{2+} &= \frac{(3.637 \text{ mg/L}) \times 25 \text{ mL} \times 1}{10 \times 10.071 \times \frac{40.078 \text{ mg}}{2 \text{ eq}}} \\ &= 0.045 \text{ meq/g} \end{aligned}$$

- เรซินที่ผ่านการใช้งาน (SR)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ Ca}^{2+} &= \frac{(0.873 \text{ mg/L}) \times 50 \text{ mL} \times 100}{10 \times 10.009 \times \frac{40.078 \text{ mg}}{2 \text{ eq}}} \\ &= 2.177 \text{ meq/g} \end{aligned}$$

- เรซินที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ (RR)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ Ca}^{2+} &= \frac{(2.1397 \text{ mg/L}) \times 25 \text{ mL} \times 1}{10 \times 1.0066 \times \frac{40.078 \text{ mg}}{2 \text{ eq}}} \\ &= 1.326 \text{ meq/g} \end{aligned}$$

การคำนวณหาปริมาณแมกนีเซียม

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

เมื่อ A = น้ำหนักของเรซิน (g)

Df = จำนวนเท่าของการเจือจางสารละลาย

C = ปริมาตรสุดท้ายของสารละลายตัวอย่าง (mL)

R = ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่อ่านได้จากเครื่อง AAS (mg/L)

- เรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน (NR)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ } \text{Mg}^{2+} &= \frac{(0.072 \text{ mg/L}) \times 25 \text{ mL} \times 50}{10 \times 10.071 \times \frac{24.3050 \text{ mg}}{2 \text{ eq}}} \\ &= 0.073 \text{ meq/g} \end{aligned}$$

- เรซินที่ผ่านการใช้งาน (SR)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ } \text{Mg}^{2+} &= \frac{(0.113 \text{ mg/L}) \times 50 \text{ mL} \times 100}{10 \times 10.071 \times \frac{24.3050 \text{ mg}}{2 \text{ eq}}} \\ &= 0.466 \text{ meq/g} \end{aligned}$$

- เรซินที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ (RR)

เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ } \text{Mg}^{2+} &= \frac{(0.950 \text{ mg/L}) \times 25 \text{ mL} \times 1}{10 \times 1.0066 \times \frac{24.3050 \text{ mg}}{2 \text{ eq}}} \\ &= 0.194 \text{ meq/g} \end{aligned}$$

2. การเตรียมสารละลายแคดเมียมเริ่มต้น

เตรียมสารละลายสต็อกแคดเมียมความเข้มข้น 1000 ppm จาก $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ มวลโมเลกุล 228.35 g/mol โดยคำนวณจาก

$$1000 \text{ ppm} = 1000 \text{ mg/L}$$

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

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

$$1 \text{ molCd} = 1 \text{ molCdCl}_2$$

$$8.9 \times 10^{-3} \text{ molCdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O} \times \left(\frac{228.35 \text{ g}}{1 \text{ mol}}\right) = 2.0323 \text{ g}$$

ดังนั้นต้องชั่ง 1.0161 g ของ $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำกลั่น 500 mL จะได้ความเข้มข้นแคดเมียม 1000 ppm

3. การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม

ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดเป็นการดูประสิทธิภาพของการกำจัดสารออกจากสารละลายโดยคิดจากความเข้มข้นเริ่มและความเข้มข้นที่เหลือ

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

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม (mg/L)

C_i คือ ความเข้มข้นที่เหลือของแคดเมียม (mg/L)

ตัวอย่างการคำนวณ ที่อัตราการไหล 2.5 mL/min นาทีที่ 1,440

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์การกำจัด (\%)} &= \left(\frac{10.50 - 1.113}{10.50}\right) \times 100 \\ &= 89.40 \% \end{aligned}$$

4. การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมต่อปริมาณเรซิน

ค่าความสามารถในการดูดซับเป็นค่าที่ศึกษาว่าปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ โดยคิดจากความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นที่เหลือต่อปริมาณตัวดูดซับ

$$\text{ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)} = \frac{(C_0 \times V_0) - (C_i \times V_i)}{1000 \times M}$$

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)

$$\begin{aligned} \text{ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)} &= \frac{(10.50 \times 50) - (1.113 \times 10)}{1000 \times 1.0066} \\ &= 0.5105 \text{ mg/g} \end{aligned}$$

5. ปริมาณแคดเมียมที่บำบัดได้

$$\text{ปริมาณแคดเมียมที่บำบัดได้ (mg)} = \frac{(C_0 - C_i) \times V_i}{V_0}$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม (mg/L)

C_i คือ ความเข้มข้นที่เหลือของแคดเมียม (mg/L)

V_0 คือ ปริมาตรของสารละลายเริ่มต้น (mL)

V_i คือ ปริมาตรของสารละลายหลังการย่อย (mL)

ยกตัวอย่างการคำนวณ การฟื้นฟูเรซินแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ รอบที่ 3 ที่เวลา 600 นาที ปริมาตรน้ำบำบัด 0.150 L

สารละลายปริมาตร 1 L มีปริมาณแคดเมียม 0.028 mg

ถ้าสารละลายปริมาตร 0.150 L มีปริมาณแคดเมียม

$$\begin{aligned} &= \frac{(10.50 - 0.028) \times 0.150 \text{ L}}{1 \text{ L}} \\ &= 15.71 \text{ mg} \end{aligned}$$

6. ปริมาณแคดเมียมจากการฟื้นฟูเรซินด้วย HCl 5% รอบที่ 3

สารละลายปริมาตร 1 L มีปริมาณแคดเมียม 211.98 mg

ถ้าสารละลายปริมาตร 0.150 L มีปริมาณแคดเมียม

$$= \frac{(211.98 \text{ mg}) \times (0.150 \text{ L})}{1 \text{ L}}$$

$$= 31.80 \text{ mg}$$

7. ปริมาณแคดเมียมในเรซิน

สารละลายปริมาตร 1000 mL มีปริมาณแคดเมียม 115.175 mg

ถ้าสารละลายปริมาตร 10 mL มีปริมาณแคดเมียม

$$= \frac{(115.175 \text{ mg}) \times (10 \text{ mL})}{1000 \text{ mL}}$$

$$= 1.152 \text{ mg}$$

จากการทดลองย่อยเรซินหนัก 0.4307 g ดังนั้นมีปริมาณแคดเมียม 1.152 mg/0.4307g

เรซินที่ย่อยหนัก 0.4307 g มีปริมาณแคดเมียม 1.152 mg

ถ้าเรซินที่ย่อยหนัก 1 g มีปริมาณแคดเมียม

$$= \frac{(1.152 \text{ mg}) \times (1 \text{ g})}{0.4307 \text{ g}}$$

$$= 2.675 \text{ mg/g}$$

เรซินที่ย่อยหนัก 1 g มีปริมาณแคดเมียม 2.675 mg

ถ้าเรซินที่ย่อยหนัก 15.485 g มีปริมาณแคดเมียม

$$= \frac{(2.675 \text{ mg}) \times (15.485 \text{ g})}{1 \text{ g}}$$

$$= 41.42 \text{ mg}$$

จากการทดลอง ในคอลัมน์เรซิน 1 ชุดการทดลอง มีเรซินหนัก 15.485 g ดังนั้นมีปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 41.42 mg ต่อน้ำหนักเรซิน 15.485 g