

การกำจัดไอออนโลหะหนักจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยเรซิน
แลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

HEAVY METAL ION REMOVAL FROM LABORATORY
WASTEWATER BY SPENT CATION EXCHANGE RESIN



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การกำจัดไอออนโลหะหนักจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยเรซิน
แลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

HEAVY METAL ION REMOVAL FROM LABORATORY
WASTEWATER BY SPENT CATION EXCHANGE RESIN



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HEAVY METAL ION REMOVAL FROM LABORATORY
WASTEWATER BY SPENT CATION EXCHANGE RESIN



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
(ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)

DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การกำจัดไอออนโลหะหนักจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยเรซิน
แลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

Heavy Metal Ion Removal from Laboratory Wastewater
by Spent Cation Exchange Resin

ชื่อนักศึกษา

นางสาวชนากานต์ จันบาง รหัสนักศึกษา 55050903
นางสาวอริสา วิริยขันติธรรม รหัสนักศึกษา 55051039
นางสาวอารยา โพธิ์เล็ก รหัสนักศึกษา 55051047

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา

เคมี


ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาเคมี
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ประธานกรรมการ	
ดร.ธิปชัย วัฒนวิจารณ์ กรรมการ	
ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การกำจัดไอออนโลหะหนักจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชนากานต์ จันบาง	รหัสนักศึกษา 55050903
	นางสาวอริสา วิริยขันติธรรม	รหัสนักศึกษา 55051039
	นางสาวอารยา โพธิ์เล็ก	รหัสนักศึกษา 55051047
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)	
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2558	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์	

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้เป็นการศึกษาการนำเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้เรซินในรูปที่ผ่านการใช้งานแล้วจากระบบผลิตน้ำสะอาด (Spent Resin, SR) และเรซินที่ผ่านการรีเจนเนอเรตด้วยกรด (Regenerated Resin, RR) ทำการทดลองแบบแบทช์ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดตะกั่ว ได้แก่ เวลาและค่า pH ที่เหมาะสม โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว (set A) ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 mg/L แปรค่าอัตราส่วนระหว่างเรซินกับน้ำเสียเป็น 8, 16 และ 24 g/L และทำการศึกษาหาไอโซเทอร์มการดูดซับ ทำการแปรค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 20-100 mg/L อัตราส่วนระหว่างเรซินกับน้ำเสียเป็น 16 g/L การศึกษาแบบคอลัมน์ จะใช้น้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการ (set B) มาบำบัดโดยตรงด้วย SR ส่วนน้ำเสีย set C ทำการตกตะกอนโดยการปรับ pH ให้เท่ากับ 11.5 เพื่อให้เกิดการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และเติมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (วิเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนักในสารละลายโดยวิธี U.S. EPA 3050B ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy) ผลการทดลองพบว่าสามารถบำบัดโลหะตะกั่วสูงถึง 99.14% ไอโซเทอร์มของการบำบัดตะกั่วด้วย SR สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ที่ pH 5 ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุล 30 นาที ($y = 5.9159x + 0.1897$, $R^2 = 0.9074$) ส่วนไอโซเทอร์มของการบำบัดตะกั่วด้วย RR สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช ($y = 0.6642x - 0.5994$, $R^2 = 0.7595$) และเวลาในการตกตะกอนที่เหมาะสมเท่ากับ 6 ชั่วโมง โลหะหนัก คือ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีจากน้ำเสีย B และน้ำเสีย C ที่ผ่านการตกตะกอน ถูกบำบัดโดยการผ่านคอลัมน์ SR มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

คำสำคัญ : การกำจัดโลหะหนัก, การตกตะกอนทางเคมี, การแลกเปลี่ยนไอออน, เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว, ไอโซเทอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Heavy Metal Ion Removal from Laboratory Wastewater by Spent Cation Exchange Resin		
Students	Miss Chanakarn Janbang	Student ID 55050903	
	Miss Arisa Viriyakantitham	Student ID 55051039	
	Miss Araya Pholek	Student ID 55051047	
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
Department	Chemistry		
Academic Year	2015		
Advisor	Asst. Prof. Krongkaew Tippayasak		

Abstract

The utilization of spent cation exchange resin from water purification process for heavy metal removal from laboratory wastewater was the purpose of this project. Those resin were spent-Ca-form (SR) and regenerated H form (RR). In batch experiment, factors affecting treatment were examined such as equilibrium time, the suitable pH for Lead ion (Pb^{2+}) removal from the artificial wastewater (set A). The initial Pb^{2+} concentration was 10 mg/L and ratio of resin to water was varied 8, 16 and 24 g/L. Isotherm experiment, the initial Pb^{2+} concentrations were varied from 20 to 100 mg/L with resin to water ratio 16 g/L. In column experiment, the wastewater (set B) contained metals from laboratory were treated directly with SR while set C was prior raised pH to 11.5 for precipitation with Sodium hydroxide (NaOH) and Sodium metabisulfite ($Na_2S_2O_5$). The metals were analyzed by U.S. EPA method 3050B. The results showed that the Pb^{2+} removal efficiency were 99.14%. The isotherm of Pb^{2+} removal by SR were fitted with the Langmuir adsorption isotherm at pH 5, equilibrium time 30 minutes and settling time 6 hours ($y = 5.9159x + 0.1897$, $R^2 = 0.9074$) while the removal by RR was suitable with Freundlich adsorption isotherm ($y = 0.6642x - 0.5994$, $R^2 = 0.7595$). The metals (Pb, Cu and Zn) removal from wastewater set B directly by SR column and wastewater set C - precipitation followed with SR column, were less than the industrial effluent standard.

Keywords : Heavy metal removal, Chemical Precipitation, Ion exchange, Spent resin, Isotherm

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำ คำปรึกษา และความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่านดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาโครงการในเรื่องที่สนใจ ทั้งยังมอบความรู้ พร้อมทั้งความเอาใจใส่ ตลอดการทำโครงการพิเศษจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อุสารัตน์ อถรรพ์ชัยสิทธิ์ และ ดร.ธิปชัย วัฒนวิจารย์ ประธานกรรมการและกรรมการผู้คุมสอบที่ได้เสียสละเวลาในการเข้าร่วมรับฟังโครงการพิเศษนี้ พร้อมทั้งยังให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขให้โครงการพิเศษเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บริษัท พี อี แอนด์ พีเทค จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรซินเพื่อใช้ในการศึกษาในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมี คุณชัชชัย คุณสาคร คุณณัฐพล คุณสุพจน์ คุณสุรินทร์ คุณทองสุข และเจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์ในการดำเนินโครงการพิเศษ และช่วยจัดทำเอกสารเกี่ยวกับการดำเนินงาน ทำให้การจัดทำโครงการพิเศษนี้ดำเนินไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณอานนท์ จรรย์นเรศเรขันธ์ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาเคมี สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ที่ให้คำปรึกษา และช่วยแก้ปัญหาเกี่ยวกับโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนเกี่ยวกับการทำโครงการพิเศษ

ชนากานต์ จันบาง

อริสา วิริยขันติธรรม

อารยา โพธิ์เล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อและสัญลักษณ์	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 โลหะหนัก	3
2.2 เรซิน	8
2.3 น้ำเสีย	17
2.4 การตกตะกอนทางเคมี (CHEMICAL PRECIPITATION)	23
2.5 กระบวนการดูดซับ	27
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	44
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์	44
3.2 วิธีการทดลอง	45
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	51
4.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน	51
4.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียสังเคราะห์	52
4.3 การศึกษาไอโซเทอร์มจากน้ำเสียสังเคราะห์	53
4.4 การบำบัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี	58
4.5 สมบัติของน้ำเสียที่บำบัดผ่านคอลัมน์	59
4.6 การบำบัดโลหะหนักโดยผ่านคอลัมน์เรซิน	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	66
5.1 สรุปผลการวิจัย	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก วิธีการทดลอง	70
ภาคผนวก ข มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม	71
ภาคผนวก ค การเตรียมสารมาตรฐาน	73
ภาคผนวก ง ข้อมูลผลการทดลอง	82
ภาคผนวก จ การคำนวณ	95



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทั่วไปของตะกั่ว	3
2.2 สมบัติทั่วไปของสังกะสี	5
2.3 สมบัติทั่วไปของทองแดง	7
2.4 ลำดับความชอบไอออนของเรซินที่มีสารละลายโลหะหนักในน้ำ 1,000 ppm	12
2.5 ข้อมูลทั่วไป และสมบัติทางกายภาพ-เคมีของเรซิน	16
2.6 สภาพการใช้งานของเรซิน	16
2.7 แสดงค่าความสามารถในการละลาย (Solubility) ของโลหะคาร์บอนेटและโลหะ ซัลไฟด์ต่างๆ (pKs -log Ks)	25
2.8 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อด้อยของวิธีการตกตะกอนทางเคมี	26
2.9 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี	28
3.1 สมบัติของเรซินและน้ำเสีย	45
4.1 สมบัติทั่วไปของเรซิน	51
4.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสีย	52
4.3 ความสัมพันธ์กราฟไอโซเทอร์มของความเข้มข้นตะกั่วกับการบำบัดด้วย SR และ RR	58
4.4 ปริมาณโลหะหนักที่ผ่านกระบวนการต่างๆ	60
ข-1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	72
ง -1 หาเวลาสัมผัสที่สมดุลโดย SR	82
ง -2 หาเวลาสัมผัสที่สมดุลโดย RR	83
ง -3 ผลของพีเอชต่อการบำบัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดย SR ที่พีเอช 3, 4 และ 5	85
ง -4 ผลของพีเอชต่อการบำบัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดย RR ที่พีเอช 3, 4 และ 5	86
ง -5 ไอโซเทอร์มของการบำบัดตะกั่วเมื่อแปรค่าความเข้มข้นโดย SR	87
ง -6 ไอโซเทอร์มของการบำบัดตะกั่วเมื่อแปรค่าความเข้มข้นโดย RR	88
ง -7 ปริมาณโลหะหนักที่คงเหลือในการตกตะกอนในน้ำส่วนใสที่ 6 ซม. และ 120 ซม.	89
ง -8 ปริมาณโลหะหนักที่คงเหลือในการตกตะกอนในส่วนตะกอนที่ 6 ซม. และ 120 ซม.	89
ง -9 พารามิเตอร์ที่วัดได้จากการตกตะกอนทางเคมีที่เวลาต่างๆ	90
ง -10 พารามิเตอร์ที่วัดจากน้ำตัวอย่างที่เก็บในเวลา 30 - 180 นาที	91
ง -11 ปริมาณโลหะที่บำบัดได้ด้วยวิธีการแบบคอลัมน์จากน้ำเสีย B ₂	93
ง -12 ปริมาณโลหะที่บำบัดได้ด้วยวิธีการแบบคอลัมน์จากน้ำเสีย C ₃	94
จ -1 T-TEST: PAIRED TWO SAMPLE FOR MEANS	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	9
2.2 รูปร่างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	11
2.3 การดูดซับ	30
2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	32
2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	33
2.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรอนด์ลิซ	34
2.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนด์ลิซ	34
2.8 กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว	35
2.9 ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว	35
2.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์	36
2.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	36
2.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท	37
2.13 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท	38
3.1 คอลัมน์ PVC	49
4.1 ค่าการบำบัดตะกั่วของ SR และ RR ที่เวลาต่างๆ	53
4.2 ผลของค่าพีเอชต่อการบำบัดตะกั่วของ SR และ RR	54
4.3 ไอโซเทอร์มของ SR ต่อการบำบัดตะกั่ว	56
4.4 ไอโซเทอร์มของ RR ต่อการบำบัดตะกั่ว	57
4.5 ผลของเวลากับการบำบัดโลหะหนัก	59
4.6 ผลของเวลากับปริมาณโลหะหนัก สละสมใน SR ของน้ำเสีย B ₁	61
4.7 ผลของเวลากับปริมาณโลหะหนัก สละสมใน SR ของน้ำเสีย C ₂	61
4.8 ปริมาณแคลเซียมที่สละสมในเวลา 30 - 180 นาที	62
4.9 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของน้ำทิ้งกับค่ามาตรฐาน	63
ค -1 กราฟมาตรฐานของแคดเมียม	76
ค -2 กราฟมาตรฐานของโซเดียม	77
ค -3 กราฟมาตรฐานตะกั่ว	78
ค -4 กราฟมาตรฐานทองแดง	79
ค -5 กราฟมาตรฐานแมกนีเซียม	80
ค -6 กราฟมาตรฐานสังกะสี	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
AAS	เครื่องการวัดการดูดกลืนแสงโดยอะตอม
Blank	แบลงค์
BOD	ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ
C ₀	ความเข้มข้นเริ่มต้น
C _e	ความเข้มข้นที่เหลือ
cm	เซนติเมตร
COD	ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการใช้เพื่อออกซิเดชันสารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ
Conductivity	ค่าการนำไฟฟ้า
°C	องศาเซลเซียส
DO	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ
g	กรัม
g/L	กรัมต่อลิตร
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mL	มิลลิลิตร
mL/min	มิลลิลิตรต่อนาที
mol/L	โมลต่อลิตร
mS/cm	มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร
mV	มิลลิโวลต์
ORP	ค่าปริมาณความต่างศักย์โออาร์พี
PPM	พีพีเอ็ม
psu	พีเอสยู
SD	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ss	ของแข็งแขวนลอย
STD	ค่ามาตรฐาน
TDS	ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด
TOC	ปริมาณคาร์บอนในน้ำ
TS	ของแข็งทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์ (ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
VS	ของแข็งระเหยง่าย
uS/cm	ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัญหาทางมลพิษของโลหะหนักเป็นปัญหาที่สำคัญเนื่องจากโลหะหนัก สามารถสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิตและส่งผลกระทบต่อความเป็นอยู่ของสิ่งมีชีวิตตลอดจนห่วงโซ่อาหาร ความเป็นพิษของโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารพิษที่ได้รับเข้าไปในร่างกาย โลหะหนักที่มีปริมาณในร่างกายเพียงเล็กน้อยในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดพิษ แต่ก็ก่อให้เกิดผลเสียต่อร่างกายหลายประการ เพราะโลหะหนักจะเข้าไปรบกวนการทำงานของแร่ธาตุต่างๆ ในร่างกาย โลหะหนักมีหลายชนิด ได้แก่ ดีบุก สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว สารหนูปรอท เป็นต้น ในภาคอุตสาหกรรมและสถานศึกษาต่างๆ ได้มีการกำจัดโลหะหนักหรือส่งไปกำจัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำเพื่อลดปัญหาในการเกิดมลพิษของโลหะหนัก แต่ก็ยังมีการปนเปื้อนของโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำ ปัจจุบันหน่วยงานและสถาบันศึกษาต่างๆ มีห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์มีการใช้สารเคมีจำนวนมากซึ่งมีความเป็นพิษสูง เช่น โลหะหนัก ดังนั้นการปล่อยน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จำเป็นต้องผ่านการบำบัดน้ำก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อลดการปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมได้วิธีกำจัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำเสียอุตสาหกรรม มี 3 วิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ กระบวนการกำจัดโลหะหนักออกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เทคโนโลยีของการบำบัดน้ำเสีย ความเข้มข้น และสถานะการออกซิเดชัน (Oxidation state) ของโลหะ ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ และกลไกการกำจัดโลหะ เทคนิคที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ วิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี เช่น วิธีออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) การแยกกรองด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) การกรอง (Filtration) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange) การตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมีโดยทั่วไป วิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมีมีข้อเสียคือ ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักได้อย่างสมบูรณ์ จึงมีการใช้วิธีทางชีวภาพเป็นทางเลือก ได้แก่ เทคโนโลยีดูดซับทางชีวภาพโดยใช้มวลชีวภาพจากธรรมชาติในการดูดซับโลหะหนักที่ทำให้ประหยัดและเป็นมิตรกับระบบนิเวศ โลหะหนักที่ถูกดูดซับและสารดูดซับชีวภาพสามารถนำกลับไปใช้ในระบบได้ (ภิญโญ และคณะ มหิดล, 2559)

วิธีการบำบัดโลหะหนักที่จะนำมาศึกษาคือวิธีการการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange) ซึ่งการศึกษาครั้งนี้จะเลือกใช้เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมากำจัดโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) เพื่อให้ได้ค่าตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ในกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งเป็นของเสียที่อยู่ห้องปฏิบัติการของสถาบันการศึกษาเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เรซินที่ผ่านการใช้งานมาแล้วจะถูกปล่อยทิ้งให้กลายเป็นของเสียจำนวนมากจึงมีแนวคิดในการนำเรซินที่ผ่านการใช้งานมาแล้วนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อนำเรซินที่ใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเรซิน
3. เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ใช้เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว (spent resin, SR) ที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำสะอาด และเรซินที่ผ่านการรีเจนเนอเรต (Regenerate resin, RR) ด้วยกรด ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก
2. ศึกษาการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn)
3. ศึกษาสภาวะที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินกับโลหะหนักมี 2 รูปแบบคือ แบบ Batch และ แบบ Column
4. ศึกษาไอโซเทอร์มในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินกับโลหะหนัก
5. ศึกษาประสิทธิภาพของเรซินในการบำบัดโลหะหนัก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำเรซินที่ใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้
2. สามารถกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นเกิน 5 กรัม ตัวอย่างเช่น พรอท ตะกั่ว สารหนู แคดเมียม โคบอลต์ เป็นต้น ความเป็นพิษของโลหะหนักเกิดจากการที่ร่างกายได้รับสารจำพวกโลหะหนัก ซึ่งสารเหล่านี้จะไปรบกวนการทำงานของเอ็นไซม์ของเซลล์และยึดกับเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้การควบคุมการลำเลียงสารต่างๆ ของเยื่อหุ้มเซลล์ผิดปกติไป ความเป็นพิษของโลหะหนักขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมีของสารประกอบของโลหะหนักแต่ละชนิด ปริมาณที่ได้รับ และเส้นทางที่ได้รับเข้าไป เช่น ทางระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร ผิวหนัง เป็นต้น ซึ่งสารพิษเหล่านี้เมื่อสะสมอยู่ในร่างกายจนถึงระดับหนึ่งจะแสดงอาการต่างๆ ออกมาให้เห็น (สุทธิณี มีสุข, 2559) ซึ่งความเป็นพิษของโลหะหนักส่งผลต่อกลไกระดับเซลล์มี 5 แบบ คือ

1. ทำให้เซลล์ตาย
2. เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทำงานของเซลล์
3. เป็นตัวการทำให้เกิดมะเร็ง
4. ทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม
5. ทำความเสียหายต่อโครโมโซม ซึ่งเป็นปัจจัยทางพันธุกรรม

2.1.1 ตะกั่ว

ตะกั่ว เป็นธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 82 และสัญลักษณ์คือ Pb ตะกั่วเป็นธาตุโลหะ เนื้ออ่อนนุ่มสามารถยืดได้ เมื่อตัดใหม่ๆ จะมีสีขาวอมน้ำเงิน แต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทา ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีพิษใช้ทำวัสดุก่อสร้าง แบตเตอรี่ กระจกปืน โลหะผสม

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของตะกั่ว

สมบัติ	รายละเอียด
เลขอะตอม	82 เป็นธาตุที่ 5 ของหมู่ IVA ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะ
น้ำหนักอะตอม	207.19 amu
จุดหลอมเหลว	327 °C
จุดเดือด	1737 °C
ความหนาแน่น	11.34 g/cc ที่ 20°C
เลขออกซิเดชันสามัญ	+2, +4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การค้นพบ

ตะกั่วเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มีมนุษย์รู้จักและนำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่สมัยโบราณ มีหลักฐานยืนยันว่ามนุษย์รู้จักนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่ 4,000 ปีก่อนคริสต์ศักราช

การใช้ประโยชน์

ตะกั่วจัดเป็นโลหะหนักอย่างหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่ถูกนำมาใช้เป็นจำนวนมาก ทั่วโลกใช้ตะกั่วประมาณ 3 ล้านตันต่อปี (ประมาณการของปี 1970) ตะกั่วใช้ประโยชน์มากที่สุดในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่และใช้ในรูปของเตตระเอทิลเลด การใช้ประโยชน์ที่สำคัญของตะกั่วมีดังนี้

1. ใช้ในการสังเคราะห์สารเตตระเอทิลเลด (Tetraethyllead, TEL) ซึ่งเป็นสารที่ใช้เติมใส่แก๊สโซลีนเพื่อเพิ่มเลขออกเทน (Octane number) ของแก๊สโซลีน สาร TEL เตรียมจากเอทิลคลอไรด์ (Ethyl chloride) และโลหะเจือของตะกั่ว
2. ใช้ในแบตเตอรี่ แบตเตอรี่รถยนต์ที่ใช้ทั่วไปเป็นเซลล์กัลวานิกที่ใช้โลหะตะกั่วเป็นแอโนดและออกไซด์ของโลหะตะกั่ว (PbO_2) เป็นคาโทด
3. การใช้งานอื่น ๆ ได้แก่ ใช้งานบัดกรี ทำโลหะเจือ ใช้ในการทำท่อในอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมการผลิตกรดซัลฟูริก กระสุนปืน และเคยใช้ผสมกับสีทาบ้าน เป็นต้น

ความเป็นพิษ

ตะกั่วเป็นโลหะที่ร่างกายไม่ต้องการ เนื่องจากไม่มีส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบเผาผลาญอาหาร (Metabolism) ยิ่งไปกว่านั้นตะกั่วยังเป็นพิษต่อร่างกายอย่างแรง ถ้าร่างกายรับตะกั่วเข้าไปในปริมาณสูง โดยปกติร่างกายคนเราสามารถทนต่อตะกั่วในปริมาณสูงพอสมควร ในการวิจัยพบว่าคนทั่วไปมีตะกั่วในเลือด 0.25 ppm โดยไม่เกิดอาการเป็นพิษแต่อย่างใด แต่ถ้าร่างกายรับตะกั่วเข้าไปในปริมาณมากในทันทีทันใด เช่นในเลือดมีมากกว่า 0.8 ppm จะเกิดอาการเป็นพิษอย่างฉับพลัน มักเกิดในคนงานที่ทำงานในอุตสาหกรรมที่ใช้ตะกั่วในกระบวนการการผลิต

อาการจากพิษตะกั่ว

1. อาการในระบบทางเดินอาหาร จะมีลักษณะของการเบื่ออาหาร อาเจียน ท้องผูก จนถึงอาจมีอุจจาระร่วง แต่ที่สำคัญมักจะมีอาการปวดท้องอย่างรุนแรง ในบางครั้งอาการนี้แพทย์อาจวินิจฉัยผิดว่ามาจากสาเหตุอื่นได้ เช่น การปวดท้องจากท่อน้ำดี การปวดท้องจากอาการของไต การปวดท้องจากแผลในกระเพาะอาหาร บางรายอาจพบรอยสีดําของตะกั่วบริเวณเหงือก แต่ก็อาจเป็นรอยดําจากการสูบบุหรี่ได้เหมือนกัน

2. อาการทางระบบประสาท ผู้ป่วยมักมีอาการปวดเมื่อยตามร่างกาย กล้ามเนื้ออ่อนแรง ข้อมือและข้อเท้าห้อย

3. อาการทางสมอง มักพบอาการทางสมองเกิดขึ้นในเด็ก ได้แก่ อาการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรม อารมณ์ เซื่องซึม และหากมีการสะสมของตะกั่วมากอาจทำให้เกิดอาการชัก และหมดสติได้

4. อาการในระบบเลือด มักพบผู้ป่วยมีอาการของเลือดจาง อ่อนเพลีย และร่างกายซีดเนื่องจากตะกั่วไปขัดขวางการสังเคราะห์ฮีโมโกลบิน ทำให้มีปริมาณฮีโมโกลบินในเลือดลดลง

5. อาการในระบบกระดูก และกล้ามเนื้อ เมื่อตะกั่วเกิดการสะสมในเนื้อเยื่อกระดูก และกล้ามเนื้อต่างๆ จะทำให้เกิดอาการปวดเมื่อยตามข้อ และกระดูก ซึ่งมักพบอาการกระดูกผุ และหักง่ายตามมา อาการทางกล้ามเนื้อจะทำให้ผู้ป่วยเมื่อยล้า และกล้ามเนื้ออ่อนแรง

2.1.2 สังกะสี

สังกะสี เป็นธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 30 และสัญลักษณ์คือ Zn สังกะสีเป็นโลหะธาตุที่มีลักษณะเป็นสีเงิน มีน้ำหนักเบา เป็นที่นิยมนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมมากมาย เพื่อเป็นโลหะโครงสร้างหรือโลหะผสมกับโลหะอื่นสำหรับประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ นอกจากนั้นสังกะสียังเป็นแร่ธาตุชนิดหนึ่งที่สามารถพบได้ในร่างกายมนุษย์และสัตว์ เนื่องจากจัดเป็นแร่ที่ร่างกายต้องการชนิดหนึ่ง

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของสังกะสี

สมบัติ	รายละเอียด
เลขอะตอม	30 เป็นธาตุแรกของหมู่ IIB จัดเป็นโลหะ
น้ำหนักอะตอม	65.37 amu
จุดหลอมเหลว	419.5 °C
จุดเดือด	907 °C
ความหนาแน่น	7.133 g/cc ที่ 25°C
เลขออกซิเดชันสามัญ	+2

การค้นพบ

สมัยโบราณมักใช้สังกะสีในรูปของโลหะเจือ เริ่มมีการถลุงและสกัดสังกะสีที่ไม่บริสุทธิ์ในประเทศจีนและอินเดียประมาณปี ค.ศ. 1000 และได้มีการนำสังกะสีที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ (เรียกว่า Slab zinc หรือ Spelter) เข้าไปยังยุโรปในศตวรรษที่ 17 ซึ่งในขณะนั้นยังไม่ได้มีชื่อเป็นทางการ และในปี ค.ศ. 1697 Lohneyes เรียกชื่อธาตุนี้ว่า "Zink" ซึ่งต่อมากลายเป็น "Zinc"

การใช้ประโยชน์

1. ใช้ประโยชน์ในรูปของโลหะเจือ เช่นเดียวกับทองแดง (Cu) และอะลูมิเนียม (Al) ในการผลิตแผ่นโลหะเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้เคลือบผิว (Galvanizing) เหล็กกล้าเพื่อป้องกันการขึ้นสนิม
3. ใช้เติมในยางและสี
4. ใช้ในอุตสาหกรรมถ่านไฟฉาย โดยทำเป็นกล่องนอกของถ่านไฟฉายซึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วลบของเซลล์
5. ผสมกับทองแดง (Cu) เป็นทองเหลือง ใช้ประโยชน์ได้มาก
6. ใช้ ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตยางรถยนต์ ใช้เป็นส่วนผสมของสีขาว และใช้ทำยาจำพวกขี้ผึ้ง หรือเครื่องสำอาง
7. อื่นๆ เช่น ชิ้นส่วนของรถยนต์ พิวไฟฟ้า แอโนดของเซลล์ไฟฟ้า ถ่านไฟฉาย (Dry cell) และเตรียมสารเคมีของสังกะสี

ความเป็นพิษ

การได้รับสังกะสีเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่อาจทำให้เกิดพิษสามารถแบ่งได้หลายกรณี ได้แก่

1. การได้รับสังกะสีจากภาวะมลพิษ

สังกะสีที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมมักเกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมที่บำบัดไม่หมดหรือการผลิตภัณฑ์ที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบ มลพิษที่ปนเปื้อนสังกะสีมักอยู่ในรูปของฝุ่นหรือไอสารที่ลอยในอากาศ ซึ่งมีโอกาสสัมผัสและได้รับสารได้ง่าย โดยเฉพาะคนงานที่เกี่ยวข้องกับการผลิตอาการเมื่อได้รับฝุ่นหรือไอของสังกะสีนั้น จากการสูดดมจะเกิดอาการระคายเคือง ไอ หลอดลมอักเสบ ปอดบวม เหนื่อยล้าง่าย อ่อนแรง มีอาการปวดกล้ามเนื้อ คลื่นไส้ มีไข้ มีอาการหนาวสั่น และผิวหนังเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งมักเกิดภายใน 4-12 ชั่วโมงหลังการสัมผัส อาการเหล่านี้จะหายเป็นปกติภายใน 1-2 วัน เรียกชื่อโรคนี้อีกว่า โรคไข้วันจันทร์ (Monday Fever) หรือโรคไข้พิษโลหะ (Metal Fume Fever)

2. การปนเปื้อนจากอาหาร และน้ำดื่ม

สารจำพวกสังกะสีมักปะปนในแหล่งน้ำหรืออาหารได้ง่าย โดยเฉพาะพื้นที่ที่อยู่ใกล้แหล่งแร่สังกะสี เมื่อร่างกายได้รับและสะสมเป็นเวลานานจะก่อให้เกิดเอนไซม์ของตับเกิดความผิดปกติ และพบอาการเลือดออกในระบบทางเดินอาหารการเกิดพิษในระบบทางเดินอาหารจากการกิน จะเกิดการกัดกร่อนบริเวณทางเดินอาหารส่วนต้น ได้แก่ หลอดอาหาร และกระเพาะอาหาร ทำให้มีอาการอักเสบปวดท้องอย่างรุนแรง และอาจทำให้ทางเดินอาหารตีบตันได้

3. ผลกระทบอาหารเสริมสังกะสี

การบริโภคอาหารเสริมในรูปของสังกะสีทั้งชนิดเม็ดและชนิดน้ำ หากผู้บริโภครับประทานในปริมาณที่มากเกินไปเกินความต้องการของร่างกายมักทำให้เกิดพิษในระบบทางเดินอาหาร

2.1.3 ทองแดง

ทองแดง เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu ทองแดงเป็นโลหะที่ใช้มากที่สุดในรูปแบบของโลหะอิสระ เพราะมีสมบัติที่ดีหลายอย่าง เช่น สมบัติการนำไฟฟ้าและความร้อนดีเยี่ยม ทนต่อการผุกร่อน แข็งแรง ดึงเป็นเส้นและตีเป็นแผ่นบางๆ ได้

ตารางที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของทองแดง

สมบัติ	รายละเอียด
เลขอะตอม	29 เป็นธาตุแรกของหมู่ IB จัดเป็นโลหะและโลหะทรานซิชัน
น้ำหนักอะตอม	63.54 amu
จุดหลอมเหลว	1083 °C
จุดเดือด	2582 °C
ความหนาแน่น	8.94 g/cc ที่ 25°C
เลขออกซิเดชันสามัญ	+1, +2

การค้นพบ

ทองแดงได้มีการนำมาใช้ประโยชน์มากกว่า 6,000 ปีแล้ว ถึงแม้จะมีหลักฐานค่อนข้างแน่ชัดว่ามนุษย์เรารู้จักนำเอาทองคำและเหล็กมาใช้ประโยชน์ก่อนทองแดง แต่ก็เป็นที่มั่นใจได้ว่าทองแดงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการช่วยพัฒนาวัฒนธรรมในสมัยโบราณ

การใช้ประโยชน์

1. เนื่องจากทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ใช้ทำสายไฟ เคเบิล มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไดนาโม พัดลม ระบบควบคุมในโรงงาน อุปกรณ์ไฟฟ้า ระบบจ่ายกำลัง เครื่องปรับอากาศ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ
2. ด้วยคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนทองแดงจึงนำมาใช้ในการก่อสร้าง เช่น ทำหลังคา ท่อน้ำ และข้อต่อต่างๆ ระบบให้ความร้อน และระบบปรับอากาศ
3. ใช้ทำเครื่องจักรกล เครื่องใช้ในบ้าน เนื่องจากขึ้นรูปง่าย และมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของน้ำทะเลและมีการถ่ายเทความร้อนสูง จึงใช้ทำท่อ วาล์ว ข้อต่อในโรงกลั่นน้ำจากน้ำทะเล อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และเครื่องมือกลอื่นๆ
4. ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วนเครื่องบิน เรือเดินสมุทร หัวจักรรถไฟ อุปกรณ์สวิตช์ และสัญญาณต่างๆ
5. การใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ เช่น ใช้ผลิตยูทริเนียม ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เครื่องวัดต่างๆ เครื่องประดับ เครื่องตกแต่ง เหริยภูเขาปณ์ บรรจุภัณฑ์ และใช้ผลิตโลหะผสม เช่น ทองเหลือง และทองสัมฤทธิ์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

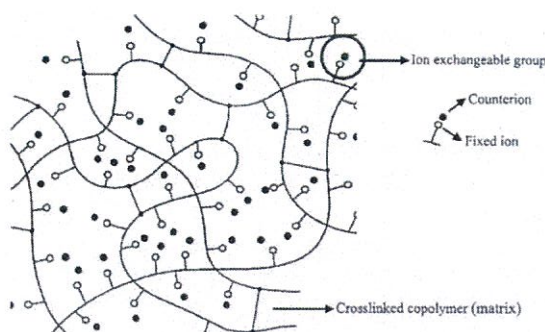
ความเป็นพิษ

การเกิดพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับและสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดีแล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระ หรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30% โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่ตับและสมอง

เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นเหียนอาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ ภาวะภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน และตับทำหน้าที่บกพร่อง ไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรือกลุ่มอาการ Wilson' Diseases คือ ร่างกายสิ้นเทาอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูกน้ำลายไหล ควบคุมการพูดลำบาก

2.2 เรซิน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออน คือ สารพอลิเมอร์ไม่ละลายน้ำที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประกอบด้วยส่วนที่เรียกว่าเมทริกซ์ (Matrix) และหมู่แลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchangeable Group) ส่วนของเมทริกซ์จะเป็นโคพอลิเมอร์เชื่อมโยงลักษณะสามมิติ (Three Dimension Crosslinked Copolymer) มีขนาดโมเลกุลใหญ่เท่ากับขนาดอนุภาคของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมขึ้น ลักษณะเช่นนี้ทำให้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนไม่ละลายน้ำและในตัวทำละลายอินทรีย์เกือบทุกชนิด หมู่แลกเปลี่ยนไอออนจะยึดติดอยู่กับโคพอลิเมอร์เชื่อมโยงด้วยพันธะโควาเลนต์ ดังรูป 2.1 โดยเป็นหมู่เคมีที่แตกตัวได้เป็นไอออนประจุบวกหรือไอออนประจุลบ เรียกว่าไอออนยึดเหนี่ยว (Fixed Ion) ไอออนยึดแน่นในเรซินจะจับกับไอออนตรงข้าม (Counterion) เสมอด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Attraction) ไอออนตรงข้ามที่จับกับไอออนยึดแน่นสามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนตรงข้ามอื่นได้ ดังนั้นชนิดของหมู่แลกเปลี่ยนไอออนจะเป็นตัวกำหนดชนิดของไอออนตรงข้ามที่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแลกเปลี่ยนได้ โดยเรซินที่มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนประจุลบจะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนตรงข้ามประจุบวกได้ และเรซินที่มีหมู่แลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกจะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนตรงข้ามประจุลบได้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ที่มา : ประเสริฐ อัครมงคลพร, 2552

2.2.1 ประเภทของเรซิน

การแบ่งประเภทของเรซินสามารถแบ่งตามคุณสมบัติของเรซินในการจับ หรือดูดซับสิ่งปนเปื้อน ดังนั้น เรซินที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

1. เรซินประจุบวกชนิดกรดอ่อน (Weak acid cation resin) เป็นเรซินที่สามารถจับไอออนบวก โดยเรซินมีอนุมูล Carboxyl ปฏิกริยาแลกเปลี่ยน ดังนี้



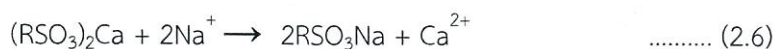
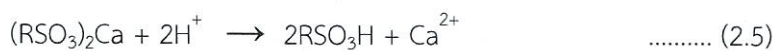
สถานะควบคุม pH สูงกว่า 7 เพื่อให้ปฏิกิริยาไปทางขวา หาก pH ของปฏิกิริยาลดลงหรือมีสภาพเป็นกรดปฏิกิริยาจะย้อนกลับ กล่าวคือ โลหะหนักที่เกาะติดกับเรซินจะหลุดออกจากเรซิน ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะเป็นการฟื้นฟูสภาพเรซินได้ ดังนั้นการนำเรซินที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่จะต้องนำไปล้างด้วยกรดหรือเกลือของกรดนั้นๆ เช่น ไฮโดรคลอริก ซัลฟูริก โซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น

2. เรซินประจุบวกชนิดกรดแก่ (Strong acid cation resin) เป็นเรซินที่สามารถจับไอออนบวก เรซินประเภทนี้มีอนุมูล Sulfonic (SO_3H) สามารถแตกตัวได้ดีกว่าเรซินประจุบวกชนิดกรดอ่อน จึงสามารถทำงานได้ที่ช่วง pH กว้างกว่าชนิดเรซินประจุบวกชนิดกรดอ่อน ปฏิกริยาแลกเปลี่ยนไอออนเป็นดังนี้

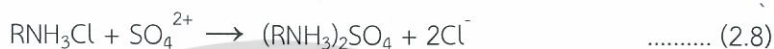


การใช้เรซินประเภทนี้จะควบคุม pH สูงกว่า 7 และการนำกลับมาใช้ใหม่จะต้องล้างด้วยกรดหรือเกลือแก่ ดังสมการ (2.3) และ (2.4) โดยปริมาณกรดหรือเกลือแก่ที่ใช้จะสูงกว่าการใช้เรซินประจุบวกชนิดกรดอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



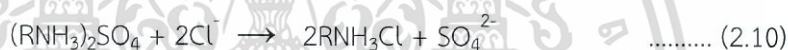
3. เรซินประจุลบชนิดเบสอ่อน (Weak base anion resin) เป็นเรซินที่มีอนุมูลของ Secondary anion หรือ Tertiary anion สามารถจับไอออนลบที่สามารถเกิดเป็นกรดอินทรีย์ที่รุนแรง (Strong mineral acid) ได้แก่ ซัลเฟตไอออนและคลอไรด์ เป็นต้น แต่ไม่สามารถเป็นกรดอินทรีย์ คาร์บอนไดออกไซด์ ซิลิกอนออกไซด์ เป็นต้น ปฏิกริยาแลกเปลี่ยนไอออนมีดังนี้



การควบคุม pH ควรควบคุมให้ต่ำกว่า 7 และการนำเรซินกลับมาใช้ใหม่จะต้องล้างต่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือเกลือแกง ดังสมการ (2.9) และ (2.10)



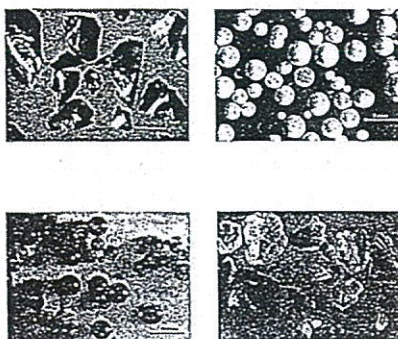
..... (2.9)



4. เรซินประจุลบชนิดเบสแก่ (Strong base anion resin) เป็นเรซินที่มีอนุมูลของ Quaternary anion สามารถจับไอออนลบทุกชนิดทั้งที่มาจากกรดแก่หรือกรดอ่อน ปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นดังนี้



การควบคุม pH ควรควบคุมให้ต่ำกว่า 7 และการนำเรซินกลับมาใช้ใหม่จะต้องล้างด้วยต่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือเกลือแกง แต่ต้องให้ได้ปริมาณมากกว่าการณีของเรซินประจุลบชนิดเบสอ่อน



รูปที่ 2.2 รูปร่างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ที่มา : รุจา และ คณะ, 2556 อ้างถึง เกศสุชา พูลคำ, 2537

2.2.2 ลำดับความชอบในการเลือกจับไอออนของเรซิน (Selectivity)

เรซินทั้งแบบกรด และแบบต่าง มีความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินไม่เท่ากัน พบว่า เรซินเลือกที่จะชอบทำปฏิกิริยากับไอออนบางชนิดมากกว่าชนิดอื่น ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนประจุ น้ำหนักโมเลกุล และยิ่งขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของไอออนนั้นๆในสารละลาย นอกจากนี้การแลกเปลี่ยนไอออนยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเรซิน เช่น ขนาดของเรซิน (Effective Size) ความเหนียวแน่นของการประสาน (Degree of Crosslinking) โครงสร้างภายในของเรซินชนิดของหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) และระยะในการทำปฏิกิริยา

ความสัมพันธ์ระหว่างไอออนกับการเลือกจับไอออนของเรซิน

1. เรซินสามารถแลกเปลี่ยนไอออนที่มีวาเลนซ์สูงได้ดีกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ ลำดับความชอบดังตารางที่ 2.4
2. สำหรับไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากัน จะพิจารณาจากน้ำหนักอะตอม ซึ่งไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูงกว่าจะจับกับเรซินได้ดีกว่าไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำ เช่น $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Be^{2+}$ หรือ $K^+ > Li^+ > Na^+$
3. เรซินที่มีระดับการเชื่อมขวางสูงความสามารถในการเลือกจับจะมากกว่าเรซินที่มีระดับการเชื่อมขวางต่ำ

ตารางที่ 2.4 ลำดับความชอบไอออนของเรซินที่มีสารละลายโลหะหนักในน้ำ 1,000 ppm

ไอออนบวก	ไอออนลบ	ลำดับความชอบ
Fe ³⁺	CO ₃ ²⁻	มากที่สุด
Al ³⁺	SO ₄ ²⁻	↑
Pb ²⁺	SO ₃ ²⁻	
Ba ²⁺	HPO ₄ ²⁻	
Sr ²⁺	CNS ⁻	
Cd ²⁺	CNO ⁻	
Zn ²⁺	NO ₃ ⁻	
Cu ²⁺	Br ⁻	
Fe ²⁺	Cl ⁻	
Mn ²⁺	CN ⁻	
Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	
Mg ²⁺	HSiO ₃ ⁻	
K ⁺	OH ⁻	
NH ₄ ⁺	F ⁻	
Ba ⁺		
H ⁺		
Li ⁺		

ที่มา : รุจา และ คณะ, 2556 อ้างถึง เกศสุชา พูลคำ, 2537

2.2.3 โครงสร้าง และคุณสมบัติทั่วไปของเรซิน

โครงสร้างของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเรซินมีโครงสร้างคล้ายร่างแหตาข่ายสามมิติโดยมีกลุ่มไอออนที่มีประจุตามตำแหน่งต่างๆบนตาข่าย เรียกว่า Matrix ส่วนหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าที่มีบนตำแหน่งต่างๆ ของตาข่ายเรียกว่า หมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เพื่อให้เกิดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบนเรซิน ดังนั้นเรซินควรมีคุณสมบัติดังนี้

- โครงสร้างของเรซิน

โครงสร้างของเรซินเป็นส่วนที่ทำให้มันมีรูปร่างเป็นอย่างไรที่ปรากฏ และรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำ และไม่แตกหักง่าย โครงสร้างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก และชนิดเดียวกันซึ่งต่อกันเป็นสายยาว และมีไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่เชื่อมขวางเพื่อให้เกิดเป็นรูปสามมิติที่มีความโปร่งหรือความพรุน ความโปร่งหรือความพรุนของเรซินขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อม

ขวาง (Degree of Crosslinkage) ซึ่งวัดได้จากปริมาณของสารเชื่อมขวางที่ใช้ ถ้าปริมาณของสารเชื่อมขวางมาก โครงร่างของเรซินจะแข็งและทึบ แต่ถ้าปริมาณของสารเชื่อมขวางน้อย โครงร่างของเรซินจะอ่อนและโปร่ง

- ความชื้นของเรซิน (Moisture Content)

ความสามารถในการเก็บกักน้ำไว้ในตัว มีความสำคัญต่ออำนาจการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน เรซินที่มีความชื้นสูงจะเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้มาก และถ้ามีช่องว่างน้อยจะทำให้มีความชื้นต่ำ ความสามารถในการเก็บกักน้ำจะแสดงให้เห็นได้จากการบวม หรือพองน้ำของเรซิน เมื่อวางแช่อยู่ในน้ำ การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านเข้าและออกจากช่องว่างเรซินเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากทำให้ไอออนต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ สามารถซึมผ่านเข้าไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอิสระของเรซิน ระดับการบวมน้ำขึ้นอยู่กับระดับของการเชื่อมขวางของโครงไฮโดรคาร์บอนซึ่งทำให้เรซินมีลักษณะเป็นเม็ดแข็ง ถ้าไฮโดรคาร์บอนยึดเหนี่ยวไม่แน่นช่องว่างก็จะมึนมาก จึงสามารถเก็บน้ำได้มาก ทำให้เรซินมีความชื้นสูง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจึงต่ำในทางตรงกันข้ามถ้าเรซินมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรคาร์บอนสูงก็จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนสูง ความชื้นจะน้อย แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวสูงเกินไปจะทำให้ช่องว่างในเรซินเหลือน้อย ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากไอออนอิสระไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าออกได้อย่างสะดวก และยังสามารถทำให้เรซินแตกได้ง่าย ความชื้นของเรซินมีประโยชน์สำหรับใช้เป็นพารามิเตอร์ในการตรวจสอบระดับการเชื่อมขวางของโครงร่างและการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของเรซิน

- หมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) ของเรซิน

หมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) ของเรซินเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เช่น ความสามารถหรืออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ถ้าโครงสร้างส่วนของ Matrix มีประจุลบ Functional group จะมีประจุบวก เรียกว่าเป็นสารแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchanger) แต่ถ้าโครงสร้างส่วนของ Matrix มีประจุบวก Functional group จะมีประจุลบ เรียกว่าเป็นสารแลกเปลี่ยนแอนไอออน (Anion Exchanger)

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

- ความหนาแน่นของเรซิน (Density)

ความหนาแน่นของเรซินแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ความหนาแน่นของเรซินที่ใช้ทั่วไป คือ ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent หรือ Column density) เป็นความหนาแน่นที่วัดหลังจากผ่านการชะ

ล้างย้อน และปล่อยจมตัว แต่ถ้าเกี่ยวกับการคำนวณทางชลศาสตร์ของเรซิน จะต้องใช้ความหนาแน่นเปียก (Wet absolute density หรือ True density) ความหนาแน่นประเภทสุดท้าย คือ ความหนาแน่นแห้ง (Dry density)

- ขนาดของเม็ดเรซิน (Particle Size)

คุณสมบัติทางด้านชลศาสตร์ของเรซินได้แก่ Head loss ในขณะการแลกเปลี่ยนไอออน และการขยายตัวของชั้นเรซิน ในขณะล้างน้อยมีความสัมพันธ์โดยกับขนาดของเม็ดเรซินขนาดประมาณ 0.04 - 1.00 mm และสามารถบอกได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size) และสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient) ของเรซินในขณะแห้ง และเปียก ปริมาตรจะไม่เท่ากัน เนื่องจากขนาดเรซินไม่เท่ากันเกิดจากการบวมตัวของเรซิน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น ระดับการเชื่อมขวาง (Degree of Crosslinking) และปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน

- การบวมตัวของเรซิน (Swelling)

เรซินที่ทำจากสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์มีความสามารถในการดูดน้ำหรือของเหลวรอบตัวมันได้ และทำให้เรซินขยายตัวหรือบวมขึ้น การบวมตัวของเรซินนั้นเกิดจากการไฮเดรชัน (Hydration) ของหมู่ไอออนที่ยึดติดกับโครงร่างไอออนอิสระ และเกิดจากความดันออสโมติก (Osmotic Pressure) การไฮเดรชันของไอออนแต่ละชนิดจะแตกต่างกันโดยไอออนที่มีขนาดเล็ก หรือเรียกว่า เม็ดเรซินแห้ง จะมีขนาดใหญ่เมื่อเกิดการไฮเดรชัน ถ้าบรรจุไอออนที่มีขนาดใหญ่ หรือขณะไฮเดรชันก็จะมีการบวมตัวสูง เช่นเดียวกับเรซินที่อยู่ในสารละลายเจือจาง เรซินจะบวมตัวเพื่อพยายามลดความเข้มข้นภายในตัวเพื่อให้เกิดความสมดุลกับภายนอก ในทางตรงกันข้ามเรซินจะหดตัวเมื่อสารละลายภายนอกมีความเข้มข้นสูงกว่าภายใน

2.2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

1. ปริมาณสารเคมีที่ใช้ทำรีเจนเนอเรชัน (กรัม) ต่อปริมาตรของเรซิน (ลิตร) คือ ถ้าใช้สารเคมีปริมาณมากๆ จะได้อำนาจแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าการใช้ปริมาณน้อย
2. ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ทำรีเจนเนอเรชัน เช่น สารละลายเกลือแกลกควรใช้ที่ความเข้มข้น 10-15% จึงจะได้อำนาจแลกเปลี่ยนไอออนมากที่สุด ถ้าใช้ความเข้มข้นสูงเกินไปเรซินจะหดตัวทำให้ไอออนเคลื่อนที่เข้า-ออกไม่สะดวก
3. เวลาสัมผัสในการทำรีเจนเนอเรชัน ยิ่งนานยิ่งดี เรซินกรดแก่ใช้ 20-40 นาที ส่วนเรซินแบบอื่นใช้ 60 นาทีหรือมากกว่า
4. ความลึกของชั้นเรซิน เพิ่มความลึกของเรซินทำให้อำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น แต่ไม่มากนัก เพราะปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว
5. อัตราการไหลของน้ำในระหว่างแลกเปลี่ยนไอออน มีอิทธิพลน้อยมากต่ออำนาจแลกเปลี่ยนไอออน

6. ความเข้มข้นของเกลือแร่ในน้ำดิบมีอิทธิพลอย่างมาก เช่น ถ้าน้ำดิบมีความเข้มข้นโซเดียมสูง จะทำให้อำนาจในการกำจัดความกระด้างของเรซินลดลง

2.2.5 ประโยชน์ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถกำจัดสารเจือปนต่างๆ ในน้ำที่อยู่ในรูปละลายน้ำ อย่างไรก็ตาม เรซินแลกเปลี่ยนไอออนไม่เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงมากๆ (เช่น สูงกว่า 700 มก./ล.) เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง วิธีที่เหมาะสมกว่า คือ Reverse Osmosis หรือ Electrodialysis

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเหมาะสำหรับใช้กำจัดความกระด้าง ความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และกำจัดเกลือแร่ทุกชนิดเพื่อผลิตน้ำบริสุทธิ์

การกำจัดความกระด้าง

- เรซินกำจัดความกระด้างนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือชุมชนขนาดเล็ก
- เรซินที่ใช้งานคือ แบบกรดแก่ รีเจนเนอเรตด้วยเกลือแกง ในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออนตัวเรซินจะใช้โซเดียม (Na^+) แลกกับไอออนบวกต่างๆ ในน้ำ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Fe^{2+}

การกำจัดความเป็นด่างไบคาร์บอเนต

- นิยมใช้เรซินแบบกรดอ่อน (RCOOH) ซึ่งรีเจนเนอเรตด้วยกรดเกลือ (HCl) หรือกรดกำมะถัน (H_2SO_4)
- เรซินแบบกรดอ่อนจะใช้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่อยู่ร่วมกับไบคาร์บอเนต ทำให้เกิดกรดคาร์บอนิกซึ่งสลายตัวเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ง่าย ในขณะที่ไอออนบวกอื่นๆ ที่ไม่ได้อยู่ร่วมกับไบคาร์บอเนตจะไม่ถูกกำจัดออกจากน้ำ
- เรซินแบบกรดแก่ (RSO_3H) ก็สามารถกำจัดด่างไบคาร์บอเนตได้ แต่สิ้นเปลืองเนื่องจากจะกำจัดไอออนบวกอื่นๆ ทั้งหมดไปด้วย
- เรซินแบบด่างแก่ ก็อาจใช้ได้แต่สิ้นเปลือง เนื่องจากจะกำจัดไอออนลบอื่นๆ ด้วย เช่น SO_4^{2-} , Cl^-

การผลิตน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากแร่ธาตุ

- ต้องใช้เรซินทั้ง 2 ชนิด คือ แบบกรดและแบบด่าง กำจัดไอออนทั้งประจุบวกและลบ เรซินทั้งสองชนิดอาจบรรจุแยกถังหรือในถังเดียวกันก็ได้
- เรซินแบบด่างซึ่งใช้ไอออนลบ OH^- ของตน แลกเปลี่ยนไอออนลบต่างๆ ในน้ำ รวมทั้ง SiO_2 และ CO_2 ออกจากน้ำ เรซินแบบนี้จะรีเจนเนอเรตด้วยโซดาไฟ
- เรซินแบบกรดซึ่งใช้ไฮโดรเจนไอออนของตน แลกเปลี่ยนไอออนบวกต่างๆ ออกจากน้ำ รีเจนเนอเรตด้วยกรดเกลือหรือกรดกำมะถัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 สมบัติของเรซินที่นำมาใช้งาน

เรซินชนิดนี้เป็นเรซินประจุบวก ชนิดกรดแก่ (Strong acid Cation) ชนิดของตัวแลกเปลี่ยนไอออนจะอยู่ในรูปของไฮโดรเจน/โซเดียม (H/Na)

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลทั่วไป และสมบัติทางกายภาพ-เคมีของเรซิน

ข้อมูลทั่วไป

	Na form	H form
ไอออนอิสระ	Na ⁺	H ⁺
หมู่ฟังก์ชัน	Sulfonic acid (SO ₃ ⁻)	
ลักษณะหรือรูปร่าง	เรซินมีลักษณะคล้ายเม็ดเจลสีน้ำตาล	
ความจุในการแลกเปลี่ยนทั้งหมด (eq/L)	2.0	1.8
เปอร์เซ็นต์การอิ่มตัว	42 - 50	50 - 58
ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ	1.9	1.9

สมบัติทางกายภาพ และทางเคมี

ขนาดเฉลี่ยของเรซิน (mm)	0.5 - 0.7	0.5 - 0.7
ความเป็นเนื้อเดียวกัน (%)	max 2.0	Max 2.0
ความจุทั้งหมด (%)	95 - 100	95 - 100
ความสามารถที่ใช้ในการเปลี่ยน Na ⁺ → H ⁺ (%)	Max 11	-
ความหนาแน่นรวม (g/L)	840	820

ตารางที่ 2.6 สภาพการใช้งานของเรซิน

อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งาน (°C)	120		
พีเอชที่สามารถทำงานได้	0-14		
สารรีเจนเนอเรชั่นแบบ Counter-current regeneration	HCl	H ₂ SO ₄	NaCl
- ความเข้มข้น (%)	4-8	1-8	8-12
อัตราการไหล			
- Counter-current regeneration (m/h)	1-10		
- Co-current regeneration(m/h)	5-20		
ความต้องการเรซินทั้งหมด (Bed volumes)	2-5		
ความสูงต่ำสุดของเรซิน(mm)	80		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 น้ำเสีย

น้ำเสีย หมายถึง น้ำหรือของเหลวที่มีสิ่งเจือปนต่างๆ ในปริมาณมากจนกลายเป็นน้ำที่ไม่เป็นที่ต้องการ และน่ารังเกียจของคนทั่วไปไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ประโยชน์ทั้งในด้านการอุปโภคและบริโภค ถ้าปล่อยน้ำเสียลงสู่ลำนํ้าธรรมชาติก็จะทำให้คุณภาพของน้ำเสียหาย ส่งผลต่อทัศนียภาพ และก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม

2.3.1 ลักษณะของน้ำเสีย

น้ำจะมีสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารต่างๆ ที่ละลายปะปนอยู่ในน้ำ ซึ่งน้ำที่มีสิ่งเจือปนอยู่นั้นจะมีองค์ประกอบทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ลักษณะทางกายภาพของน้ำ คือ ลักษณะทางภายนอกที่แตกต่างกัน เช่น ความใส ความขุ่น กลิ่น สี เป็นต้น

- อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิของน้ำมีผลในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งจะส่งผลต่อการลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ
- สี (Color) สีของน้ำเกิดจากการสะท้อนแสงของสารแขวนลอยในน้ำ เช่น น้ำตามธรรมชาติจะมีสีเหลืองซึ่งเกิดจากกรดอินทรีย์ น้ำในแหล่งน้ำที่มีใบไม้ทับถมจะมีสีน้ำตาล หรือถ้ามีตะไคร่น้ำก็จะมีสีเขียว
- กลิ่นและรส กลิ่นและรสของน้ำจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ เช่น ซากพืช ซากสัตว์ที่เน่าเปื่อยหรือสารในกลุ่มของฟีนอล เกลือโซเดียมคลอไรด์ซึ่งจะทำให้ น้ำมีรสกร่อยหรือเค็ม
- ความขุ่น (Turbidity) เกิดจากสารแขวนลอยในน้ำ เช่น ดิน ซากพืช ซากสัตว์
- การนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) บอกลักษณะความสามารถของน้ำที่กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่าน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนโดยรวมในน้ำ และอุณหภูมิขณะทำการวัดค่าการนำไฟฟ้า
- ของแข็งทั้งหมด (Total Solid : TS) คือ ปริมาณของแข็งในน้ำ สามารถคำนวณจากการระเหยน้ำออก ได้แก่ ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids : TDS) จะมีขนาดเล็กผ่านขนาดกรองมาตรฐาน คำนวณได้จากการระเหยน้ำที่กรองผ่านกระดาษกรองออกไป ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids : SS) หมายถึง ของแข็งที่อยู่บนกระดาษกรองมาตรฐานหลังจากการกรอง แล้วนำมาอบเพื่อระเหยน้ำออก ของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solids : VS) หมายถึง ส่วนของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์แต่ละลายน้ำ สามารถคำนวณได้โดยการนำกระดาษกรองวิเคราะห์เอาของแข็งที่แขวนลอยออก แล้วนำของแข็งส่วนที่ละลายทั้งหมดมาระเหยอุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส นำน้ำหนักน้ำที่ชั่งหลังการกรองลดด้วยน้ำหนักหลังจากการเผา น้ำหนักที่ได้คือ ของแข็งส่วนที่ระเหยไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ลักษณะทางเคมีของน้ำ เช่น ความเป็นกรด - เบส ความกระด้าง ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ เป็นต้น

- pH แสดงความเป็นกรดหรือเบสของน้ำ โดยทั่วไปน้ำที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีค่า pH ที่ต่ำ ($\text{pH} < 7$) ซึ่งหมายถึงมีความเป็นกรดสูงมีฤทธิ์กัดกร่อน การวัดค่า pH ทำได้ง่ายโดยใช้กระดาษลิตมัส หรือการวัดโดยใช้ pH meter สภาพเบส (Alkalinity) คือสภาพที่น้ำมีสภาพความเป็นเบสสูงจะประกอบด้วยไอออนของ OH^- , CO_3^{2-} , H_2CO_3 ของธาตุแคลเซียม โซเดียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม หรือแอมโมเนีย ซึ่งสภาพเบสนี้จะช่วยทำหน้าที่คล้ายบัฟเฟอร์ด้านการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำทั้ง สภาพกรด (Acidity) โดยทั่วไปน้ำที่ออกจากแหล่งชุมชนจะมีบัฟเฟอร์ในสภาพเบสจึงไม่ทำให้น้ำมีค่า pH ที่ต่ำเกินไป แต่น้ำที่ออกจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีค่า pH ต่ำกว่า 4.5 ซึ่งมาจาก CO_2 ที่ละลายน้ำ
- ความกระด้าง (Hardness) เป็นการไม่เกิดฟองกับสบู่และเมื่อต้มน้ำกระด้างนี้จะเกิดตะกอนน้ำกระด้างชั่วคราว เกิดจากสารไบคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) รวมตัวกับไอออนของโลหะ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} ซึ่งสามารถแก้ได้โดยการต้ม นอกจากนี้แล้วยังมีความกระด้างถาวรซึ่งเกิดจากไอออนของโลหะและสารที่ไม่ใช่พวกคาร์บอเนต เช่น SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- รวมตัวกับ Ca^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} เป็นต้น ความกระด้างจึงเป็นข้อเสียในด้านการสิ้นเปลืองทรัพยากร คือต้องใช้ปริมาณสบู่หรือผงซักฟอกในการซักผ้าในปริมาณมาก ซึ่งก็จะเกิดตะกอนมากเช่นกัน
- ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved Oxygen : DO) แบคทีเรียที่เป็นสารอินทรีย์ในน้ำต้องการออกซิเจน (Aerobic Bacteria) ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ความต้องการออกซิเจนของแบคทีเรียนี้จะทำให้จะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ดังนั้นในน้ำที่สะอาดจะมีค่า DO สูง และน้ำเสียจะมีค่า DO ต่ำ มาตรฐานของน้ำที่มีคุณภาพดีโดยทั่วไปจะมีค่า DO ประมาณ 5-8 ppm หรือปริมาณ O_2 ละลายอยู่ปริมาณ 5-8 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 5-8 ppm น้ำเสียจะมีค่า DO ต่ำกว่า 3 ppm
- บีโอดี (Biological Oxygen Demand : BOD) เป็นปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ น้ำที่มีคุณภาพดีควรมีค่าบีโอดีไม่เกิน 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าค่า BOD สูงมากแสดงว่าน้ำนั้นเน่ามาก แหล่งน้ำที่มีค่า BOD สูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะจัดเป็นน้ำเน่าหรือน้ำเสีย
- ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD) คือ ปริมาณ O_2 ทั้งหมดที่ต้องการใช้เพื่อออกซิเดชันสารอินทรีย์ในน้ำให้เป็น CO_2 และน้ำ ค่า COD มีความสำคัญในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทั้ง การควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย เช่นเดียวกับค่า BOD
- ทีโอซี (Total Organic Carbon : TOC) คือ ปริมาณคาร์บอนในน้ำ
- ไนโตรเจน เป็นธาตุสำคัญสำหรับพืช ซึ่งจะอยู่ในรูปของแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนไตรท์ ไนเตรท ยิ่งถ้าในน้ำมีปริมาณไนโตรเจนสูง จะทำให้น้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฟอสฟอรัส ในน้ำจะอยู่ในรูปของสารประกอบพวกออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) เช่น สาร PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$ และ H_3PO_4 นอกจากนี้ยังมีสารพวกโพลีฟอสเฟต
- ซัลเฟอร์ มีอยู่ในธรรมชาติและเป็นองค์ประกอบภายในของสิ่งมีชีวิต สารประกอบซัลเฟอร์ในน้ำจะอยู่ในรูปของ Organic Sulfur ซึ่งสารพวกนี้จะทำให้เกิดกลิ่นเหม็นเน่า เช่น ที่เรียกว่า ก๊าซไข่เน่า และนอกจากนี้ยังมีฤทธิ์กัดกร่อนในสิ่งแวดล้อมได้
- โลหะหนัก มีทั้งที่เป็นพิษและไม่เป็นพิษ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับ ถ้ามากเกินไปจะเป็นพิษ ได้แก่ โครเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส และสังกะสี บางชนิดไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ แคดเมียม ตะกั่ว ปรอท และนิกเกิล

3. ลักษณะทางชีวภาพของน้ำ

- แบคทีเรีย คือ จุลินทรีย์เซลล์เดียว มีขนาดเล็ก ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เป็นผู้ย่อยสลายในแหล่งน้ำ
- รา เป็นจุลินทรีย์ที่มีหลายเซลล์ ไม่มีคลอโรฟิลล์ ามีความสำคัญในการย่อยสลายพวกคาร์บอนที่มีค่า pH ต่ำ ามีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียบางระบบ

2.3.2 แหล่งกำเนิดของน้ำเสีย

แหล่งกำเนิดน้ำเสียส่วนใหญ่จะเกิดมาจากกิจกรรมต่างๆ ที่มนุษย์ทำในชีวิตประจำวัน และยักรวมถึงอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งแหล่งกำเนิดน้ำเสียมีดังนี้

1. แหล่งชุมชน ได้แก่ บ้านเรือน อาคารพาณิชย์ โรงแรม โรงพยาบาล โรงเรียน สำนักงาน น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนจะมีสารมลพิษที่เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นเศษอาหาร ของเสีย และสารที่ใช้ซักฟอกปะปนมา

2. แหล่งอุตสาหกรรม เช่น โรงน้ำปลา โรงน้ำตาล โรงงานอาหารกระป๋อง โรงงานกระดาษ โรงงานผลิตสี โรงงานฟอกหนัง และเหมืองแร่ แหล่งอุตสาหกรรมเหล่านี้ จะปล่อยของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ลงสู่แหล่งน้ำ ก่อให้เกิดน้ำเน่า นอกจากนั้นยังอาจปล่อยโลหะเป็นพิษและสารประกอบที่เป็นพิษ เช่น ตะกั่ว ปรอท สารหนู แคดเมียม และไซยาไนด์ลงน้ำอีกด้วย

3. แหล่งเกษตรกรรม เนื่องจากเกษตรกรใช้ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง และยาปราบศัตรูพืชมากขึ้นเป็นลำดับ ปุ๋ย ยาฆ่าแมลงและยาปราบศัตรูพืชรวมทั้งมูลสัตว์ จะถูกชะไหลลงสู่แหล่งน้ำ จึงเกิดการสะสมสารดังกล่าวในแหล่งน้ำมากขึ้น ในที่สุดจะเกิดยูโทรฟิเคชันขึ้นและเกิดการสะสมสารพิษที่เป็นโลหะหนักในแหล่งน้ำ จึงเป็นอันตรายต่อพืชและสัตว์ในน้ำ

4. น้ำเสียจากสถานที่กำจัดขยะมูลฝอย น้ำเสียประเภทนี้เกิดจากการที่มีการนำขยะมูลฝอยไปกองทิ้งอย่างไม่ถูกวิธี ทำให้เป็นแหล่งกำเนิดน้ำเสียที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่ง เนื่องจากขยะมูลฝอยประกอบด้วยเศษอาหาร และของเน่าเสีย เมื่อฝนตกชะลงมาทำให้น้ำเสียไหลปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำผิวดินและซึมลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้ด้วย

5. แหล่งคมนาคมทางเรือ เป็นแหล่งมลพิษทางน้ำที่สำคัญแหล่งหนึ่งแต่ มักจะถูกมองข้ามไป สารมลพิษจากแหล่งนี้ คือ น้ำมันที่ใช้กับเครื่องจักรกลของเรือ จะเล็ดลอดลงในน้ำ เมื่อเรือขนส่ง น้ำมันขนาดใหญ่รั่ว หรือเกิดอุบัติเหตุจมลงน้ำมันจะกระจายเข้าไปอยู่ในแหล่งน้ำ เกิดคราบน้ำมันปกคลุมผิวน้ำน้ำเป็นบริเวณกว้างขวางมากคลื่นจะซัดคราบน้ำมันเข้าหาฝั่งทะเล ก่อความสกปรกและการขาดออกซิเจนในบริเวณนั้นได้นาน จนกระทั่งสิ่งมีชีวิตล้มตายลงมากมาย

6. น้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ การเกิดน้ำเสียจากสาเหตุอื่นๆ จะเกิดจากสาเหตุดังนี้ น้ำเสียที่เกิดจาก ขบวนการคมนาคมขนส่ง การบริการ การก่อสร้างและการรื้อถอน การพาณิชย์ การล้างถนน อาคาร รถยนต์ และน้ำเสียจากกิจกรรมประมง เป็นต้น

2.3.3 มลพิษจากน้ำเสีย

ปัญหาน้ำเสียเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดมลพิษในด้านต่างๆ โดยเฉพาะ มลพิษทางน้ำ ซึ่งมีผลกระทบในหลายด้าน ดังนี้

1. ด้านระบบนิเวศ น้ำเสียเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งในน้ำและบริเวณใกล้เคียง ทำให้เสีย ความสมดุลทางธรรมชาติ เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม น้ำเสียทำให้สัตว์น้ำลด ปริมาณลง หรืออาจทำลายพืชและสัตว์น้ำเล็กๆ ที่เป็นอาหารของปลาและตัวอ่อน ก่อให้เกิดผล เสียหายต่อการประมงและเศรษฐกิจ และอาจทำให้ปลาสูญพันธุ์ได้

2. ด้านการสาธารณสุข น้ำเสียเป็นแหล่งแพร่เชื้อโรค ทำให้เกิดโรคระบาด เช่น โรค อหิวาตกโรค ไทฟอยด์ บิด เป็นแหล่งเพาะเชื้อยุงซึ่งเป็นพาหะของโรคบางชนิด เช่น มาเลเรีย ไข้เลือดออก ถ้าเราบริโภคจะทำให้เกิดโรคต่างๆ เช่น โรคมีนามาตา เกิดจากการรับประทานปลาที่มี สารปรอทสูง โรคอีไค-อีไค เกิดจากการได้รับสารแคดเมียม

3. ด้านการเกษตร น้ำเสียมีผลทั้งต่อการเพาะปลูก และการเลี้ยงสัตว์ น้ำเสียที่ก่อให้เกิดความ เสียหายต่อการเกษตรส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่มีความเป็นกรดเป็นด่างสูง ซึ่งเกิดจากโรงงาน อุตสาหกรรมปล่อยน้ำเสียและเกิดจากผลของการทำเกษตรกรรมนั่นเอง เช่น การชลประทาน สร้าง เขื่อนกักเก็บน้ำไว้ใช้เพื่อการเกษตร ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติน้ำในธรรมชาติประกอบด้วยเกลือ อนินทรีย์เจือปนอยู่โดยเฉพาะเกลือคลอไรด์ ขณะที่ใช้น้ำเพื่อการเกษตร น้ำจะระเหยเป็นไอโดย ธรรมชาติ ปริมาณเกลืออนินทรีย์ซึ่งได้ระเหยจะตกค้างในดิน เมื่อมีการสะสมมากเข้า ปริมาณเกลือใน ดินสูงขึ้น ทำให้ดินเค็มไม่เหมาะแก่การเพาะปลูก ปริมาณเกลืออนินทรีย์ที่ตกค้างอาจถูกชะล้าง ภายหลังฝนตก หรือโดยระบายน้ำจากการชลประทาน เกลืออนินทรีย์ก็จะถูกถ่ายทอดลงสู่แม่น้ำลำ คลองในที่สุด

4. ด้านการผลิตน้ำเพื่อบริโภคและอุปโภค น้ำเสียกระทบกระเทือนต่อการผลิตน้ำดื่ม น้ำใช้อย่าง ยิง แหล่งน้ำสำหรับผลิตประปาได้มาจากแม่น้ำ ลำคลอง เมื่อแหล่งน้ำเน่าเสียเป็นผลให้คุณภาพน้ำ ลดลง ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเพื่อให้มีคุณภาพเข้าเกณฑ์มาตรฐานสำหรับน้ำดื่มก็จะเพิ่ม สูงขึ้น

5. ด้านทัศนียภาพ โดยเฉพาะแหล่งน้ำที่ใช้ในการคมนาคม และเป็นแหล่งท่องเที่ยวพักผ่อนหย่อนใจ เช่น ใช้เล่นเรือ ตกปลา วายน้ำ เป็นต้น

2.3.4 การบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไป หรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียจากแหล่งต่างกันจะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำจึงมีหลายวิธี โดยระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปมี 4 วิธีคือ

2.3.4.1 กระบวนการทางเคมี (Chemical process)

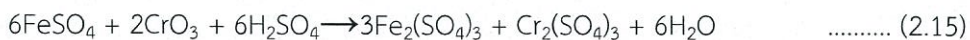
กระบวนการทางเคมี (Chemical process) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด-ด่างสูงๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้ว ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ

- การทำให้เกิดตะกอน (Precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุบวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อไม่สามารถแยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพโดยส่วนมากสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนจะละลายน้ำ เช่น เกลือของสารประกอบต่างๆ เช่น เกลืออะลูมิเนียมซัลเฟต หรือสารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) เกลือเหล็ก ($FeCl_3$, $FeSO_4$) และเกลือของแคลเซียม ($Ca(OH)_2$) ส่วนเกลือที่นำมาช่วยในการเกิดตะกอนได้ดียิ่งขึ้นนี้เป็นสารประกอบของกลุ่ม Activated ของ Silica และ Polyelectrolytes โดยกระบวนการทางเคมีมีหลายวิธี
- การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Oxidation) อาศัยหลักการเสียอิเล็กตรอนของอะตอม ให้แก่สารเคมีที่เติมลงไป ในน้ำเสียโดยสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ส่วนมากวิธีนี้จะนิยมใช้เปลี่ยนโมเลกุลของโลหะที่เป็นพิษ เช่น การเปลี่ยน Fe^{2+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็นสาร Fe^{3+} ซึ่งมีพิษน้อยด้วยคลอรีน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเกิดรีดักชันทางเคมี (Chemical Reduction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารพิษไปเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง อะตอมหรือไอออนของสารพิษจะรับอิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) เช่น การเปลี่ยน Cr^{6+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็น Cr^{3+} ด้วยเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ในสภาพที่เป็นกรด ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



- การสะเทิน (Neutralization) เป็นการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียให้มีฤทธิ์เป็นกลาง (pH=7) ถ้าต้องการปรับค่าน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด (pH<7) ในน้ำเสียให้สูงขึ้น ต้องเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกรณีถ้าต้องการปรับน้ำเสียมีฤทธิ์เป็นด่าง (pH>7) ให้มีค่า pH ต่ำลงจะต้องเติมกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดเกลือ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

2.3.4.2 กระบวนการทางชีววิทยา (Biological process)

กระบวนการทางชีววิทยา (Biological process) เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่างๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้เลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย แบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นพวกไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Bacteria)

2.3.4.3 กระบวนการทางกายภาพ (Physical process)

กระบวนการทางกายภาพ (Physical process) เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65% ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD_5) ประมาณ 20-30% เท่านั้น วิธีการต่างๆ ในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น การดักด้วยตะแกรง (Screening) เป็นการแยกเศษขยะต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ ถุงพลาสติก กระดาษ ตะแกรงมีหลายขนาด การดักด้วยตะแกรงจึงเป็นการแยกขั้นตอนแรกในการบำบัดน้ำเสีย การตัดย่อย (Combination) คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง การกวาด (Skimming) เป็นการกำจัดน้ำมันและไขมันโดยทำการดักหรือกวาดออกจากน้ำเสีย การทำให้ลอย (Floating) จะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ การตกตะกอน (Sedimentation) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

2.3.4.4 กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physical-Chemical process)

กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physical-Chemical process) เป็นกระบวนการที่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยมากกว่ากระบวนการที่กล่าวมา ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้ในขั้นตอนสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนอื่นแล้ว เช่น กระบวนการดังต่อไปนี้

- การดูดซับด้วยถ่าน (Carbon Adsorption) วิธีการนี้ใช้ผงถ่านหรือคาร์บอนเป็นตัวดูดซับสารเจือปนที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้ง
- การแลกเปลี่ยนประจุ วิธีการนี้อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารปนเปื้อนในน้ำเสียกับตัวกลางที่บรรจุซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยจะมีการลำเลียงน้ำภายใน

2.4 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

การตกตะกอนเป็นกระบวนการแยกสิ่งสกปรกที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำโดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสียเพื่อให้สิ่งสกปรกที่ละลายน้ำเกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ และตกตะกอนลงได้ วิธีการนี้ใช้ได้กับตะกอนหนัก เช่น ดิน ทราย หรือตะกอนแบคทีเรียในระบบน้ำเสียแบบเลี้ยงตะกอน

2.4.1 การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation)

คือการทำให้สิ่งสกปรกที่ละลายน้ำอยู่ซึ่งจะอยู่ในสภาวะอนุภาคบวกตกตะกอนออกมาในรูปเกลือไฮดรอกไซด์โดยวิธีการง่ายๆ คือ การปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียให้สูงขึ้นโดยให้เป็นด่างสูง (คือมีความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7) สารเคมีที่นิยมใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และปูนขาว ดังสมการเคมีต่อไปนี้



ส่วนใหญ่แล้วกระบวนการ Hydroxide precipitation มักนิยมใช้กับน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักในรูปของไอออน แต่สิ่งที่ควรพิจารณาเพิ่มเติม คือ สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียมักจะประกอบด้วยสิ่งสกปรกหลายชนิด และแต่ละชนิดก็จะมีลักษณะสมบัติในการตกตะกอนที่สภาพความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันออกไป ในกรณีของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียที่มาจากโรงงานชุบโลหะ มักจะประกอบด้วยสังกะสี โครเมียม ตะกั่ว ฯลฯ เป็นต้น ดังนั้น อาจจะต้องมีการตกตะกอนโลหะหนักเหล่านั้นออกมาที่สภาพความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียเป็น 8.5 ในช่วงแรกเพื่อให้สังกะสี และโครเมียมตกตะกอนออกมาในรูปของโลหะออกไซด์ก่อน แล้วจึงค่อยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียเป็น 10 เพื่อให้ทองแดง และแคดเมียมตกตะกอนออกมาในขั้นที่ 2 เป็นต้น

2.4.2 การตกตะกอนคาร์บอเนต (Carbonate precipitation)

เป็นการตกตะกอนอนูภาคบวก (Cation) หรือโลหะหนักออกจากน้ำเสียในรูปของผลิตภัณฑ์คาร์บอเนตซึ่งส่วนใหญ่เป็นไอออนของโลหะ โดยโลหะคาร์บอเนตเกือบทุกตัวมีค่าความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำดังตารางที่ 2.7 อย่างไรก็ตาม การตกตะกอนโลหะในรูปของคาร์บอเนตจำเป็นต้องปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสมด้วย เพื่อที่จะให้เกิดการตกตะกอนที่สมบูรณ์ซึ่งสภาพความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมของการตกตะกอนโลหะมักจะอยู่ในสภาวะที่เป็นด่างสูงๆ



2.4.3 การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide precipitation)

การตกตะกอนด้วยอนูมลซัลไฟด์เป็นการตกตะกอนโลหะหนักในรูปของเกลือซัลไฟด์ โดยสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน ได้แก่ Na_2S , H_2S หรือ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ซึ่งมักนิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักพวกอาร์เซนิก แคดเมียม เหล็ก อะลูมิเนียม และปรอท เป็นต้น โลหะหนักซัลไฟด์ดังกล่าวจะมีค่าการละลายต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนต ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพในการตกตะกอนโลหะดังกล่าวด้วยซัลไฟด์ไอออนมีค่าสูง แต่โลหะซัลไฟด์ที่ตกตะกอนออกมาจากน้ำเสียจะมีสีดำและมักจะมีกลิ่นเหม็น ซึ่งเป็นข้อเสียในการบำบัดน้ำเสียตามวิธีการนี้



ตารางที่ 2.7 แสดงค่าความสามารถในการละลาย (Solubility) ของโลหะคาร์บอเนตและโลหะซัลไฟด์ต่างๆ (pKs -log Ks)

Compound	pKs	Compound	pKs
CaCO ₃	8.3	SnS ₂	18.3
NiCO ₃	8.2	FeS	21.2
BaCO ₃	8.3	ZnS	24.7
SrCO ₃	9.0	SnS	25.9
ZnCO ₃	9.1	Sb ₂ S ₃	26.0
CuCO ₃	9.9	NiS	26.6
MnCO ₃	9.3	CdS	27.0
CoCO ₃	10.0	PbS	27.5
Ag ₂ CO ₃	11.1	As ₂ S ₃	50.1
FeCO ₃	10.5	CuS	53.3
PbCO ₃	13.5	Ag ₂ S	50.1
CdCO ₃	13.7	HgS	53.3
HgCO ₃	16.0		
CrPO ₄	17.0		

ที่มา : สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2557

2.4.4 การตกตะกอนซัลเฟต (Sulfate precipitaion)

การตกตะกอนด้วยอนุมูลซัลเฟตเป็นการตกตะกอนอนุภาคบวกหรือโลหะหนัก (Cation) ออกจากน้ำเสียในรูปของโลหะซัลเฟต ตัวอย่างเช่น การตกตะกอนแบเรียมออกจากน้ำเสียในรูปของแบเรียมซัลเฟตหรือเกลือซัลเฟต เป็นต้น ดังสมการ (2.24)



ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อด้อยของวิธีการตกตะกอนทางเคมี

วิธี	ข้อดี	ข้อด้อย
ไฮดรอกไซด์	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถลดสารอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำบางชนิด - สามารถควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ - ขั้นตอนในกระบวนการจัดการไม่ซับซ้อน - มีค่าใช้จ่ายต่ำ - เป็นที่ยอมรับและใช้ในอุตสาหกรรม 	<ul style="list-style-type: none"> - ไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพไม่ดีในการกำจัดโลหะบางชนิด - การตกตะกอนมีแนวโน้มที่จะละลายกลับเมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงทำให้การตกตะกอนน้ำเสียที่มีโลหะหลายชนิดมีประสิทธิภาพไม่ดี - ตะกอนของไฮดรอกไซด์สามารถแยกออกจากน้ำได้ยากเพราะมีโครงสร้างของตะกอนที่เบา
ซัลไฟด์	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถกำจัดโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้มีค่าพีเอชต่ำ - ใช้เวลาในการตกตะกอนต่ำเพราะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง - โลหะที่กำจัดสามารถนำมาปรับสภาพให้ใช้ประโยชน์ใหม่ได้ - ตะกอนของซัลไฟด์มีความหนาแน่นมากกว่าและสามารถแยกออกจากน้ำได้ดีกว่าตะกอนของไฮดรอกไซด์ 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีความเป็นพิษ มีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็น - มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ - อาจมีซัลไฟด์ตกค้างในน้ำที่บำบัดแล้ว
คาร์บอเนต	<ul style="list-style-type: none"> - ตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถกรองออกได้ง่ายกว่าตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ - สามารถตกตะกอนโลหะหนักได้ที่ค่าพีเอชต่ำได้ - สารประกอบคาร์บอเนตที่ใช้ในการตกตะกอนสามารถขนย้ายได้สะดวก 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เวลาในการตกตะกอนนานเพราะอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ - คาร์บอเนตสามารถปนอยู่ในสารละลายได้ง่ายและเกิดเป็น CO₂ ได้ง่าย - แคลเซียมคาร์บอเนตบางครั้งไม่เกิดปฏิกิริยากับโลหะหนัก - แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถใช้ตกตะกอนได้ที่ช่วงพีเอช 5-7 เท่านั้น - โครเมียม (VI) ต้องการกระบวนการรีดักชันก่อนการตกตะกอนด้วยคาร์บอเนต

ที่มา : จิตยา และ คณะ, 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่ออกโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

2.5.1 กลไกการดูดซับ

การเกาะหรือดูดซับประกอบไปด้วย 3 กลไก ได้แก่ กลไกทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic mechanism) กลไกทางเคมี (Chemical) และกลไกทางกายภาพ (Physical)

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

2.5.2 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

2.5.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption หรือ Physisorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่ายซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้นหรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านั้น โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2.5.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption หรือ Chemisorption)

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น

ตารางที่ 2.9 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ (กิโลจูลต่อโมล)	≤ 20	50-400
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer, multilayer	monolayer

ที่มา : อมรา ดาวโรสง, 2550

2.5.3 ตัวดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท

1. สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์ ถ่านกระดูก อะลูมิเนียมแกมมันต์ สินแร่จำพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต ตัวดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 - 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก แต่ก็มีข้อเสียคือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้ประโยชน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500 – 1400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรสใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น

3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 – 500 ตารางเมตรต่อกรัม

4. วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ชีลื้อย ไคโตซาน (Chitosan) กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลือง ฟางข้าว เปลือกไม้ เถ้าแกลบดำ เป็นต้น

5. สารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือ รา สายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ธรรมชาติของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับ เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการดูดซับ โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ถ้าตัวดูดซับไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวดูดซับมีขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ

2. ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ ซึ่งแนวโน้มของการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เพราะว่าก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้โมเลกุลตัวถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น

3. พีเอช

การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด (pH ต่ำ) ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมีความเป็นด่าง (pH เพิ่มขึ้น) มีผลทำให้มี OH^- บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมี pH สูงกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

4. อุณหภูมิ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

5. ความดัน

อัตราการเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ Film Diffusion หรือ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันของระบบ ถ้าน้ำมีความดันต่ำ ฟิล์มน้ำล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนาแน่นมากทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่จะเข้าไปตัวดูดซับ ดังนั้น การแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีความดันสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับความดันในถังการดูดซับ คือ ความเร็วของน้ำที่ผ่านถึงต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากความดันสูงขึ้น

6. เวลาสัมผัส

เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับโดยเวลาที่สัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาที่สัมผัสเลยจากช่วงนี้ไปแล้วก็จะมีผลต่อการดูดซับเลย (ลลิตา แสงอาทิตย์, 2554)

2.5.5 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น C_0 ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา อัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล สภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่



รูปที่ 2.3 การดูดซับ

ที่มา : นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์, 2550

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 mol/L ในสารละลาย

-S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

(1-q) เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

$$r_1 = k_1[C](1-q) \quad \dots\dots\dots (2.26)$$



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q) \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

ณ สภาวะสมดุล

$$r_1 = r_2$$

$$k_1[C](1-q) = k_2(q)$$

$$\frac{q}{(1-q)} = \frac{k_1}{k_2} [C] = K[C]$$

$$q = \frac{K(C)}{1+K(C)} \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



ณ สภาวะสมดุล

$$K = \frac{q}{C} \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

q = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็น ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น mol/kg, mol/g, mg/kg

W = มวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น kg

V = ปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็น ลบ.ซม. (cm^3) หรือลิตร

C = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น mol/L

q อาจเรียกว่า ความจุของการดูดซับ (Adsorption capacity)

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

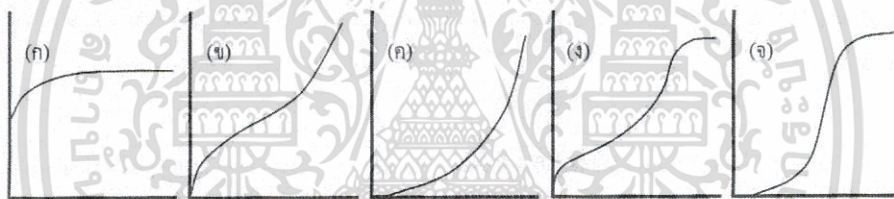
ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$qW = V(C_0 - C) \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

2.5.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังรูปที่



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา :นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, 2550

รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบขั้นเดียว ส่วน (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 4 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

2.5.6.1 สมการการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear Equation)

จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า q และ C ตามสมการ (2.31)

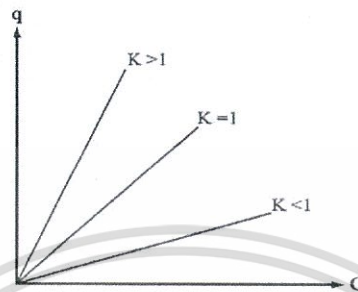
$$K = \frac{q}{C}$$

จะได้

$$q = KC$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำ



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา : นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, 2550

$K > 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากบนพื้นผิวตัวดูดซับ

$K < 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ

$K = 1$ แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

2.5.6.2 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

โดยนักเคมีฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich (1880-1941) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous adsorption surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

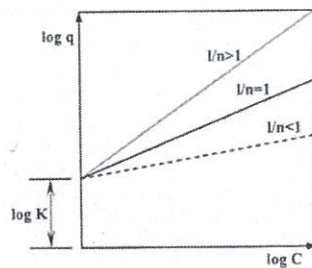
$$q = KC^{1/n} \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

สมการ (2.33) ไม่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะของเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการ (2.33) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรอนด์ลิช

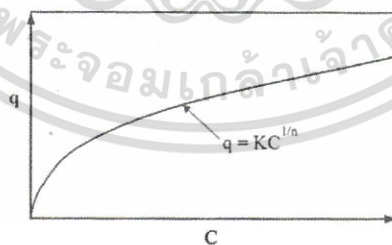
ที่มา : นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, 2550

ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ บอกลักษณะความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ บอกลักษณะความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการ (2.33) ดังรูปที่ 2.7 จะไม่สามารถบอกลักษณะปริมาณของตัวดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุด (Adsorption maxima) เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้

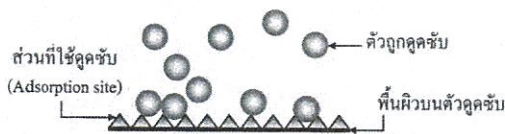


รูปที่ 2.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนด์ลิช

ที่มา : นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, 2550

2.5.6.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

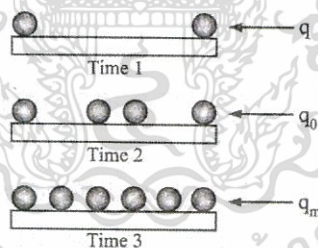
ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักเคมีชาวอเมริกา Irving Langmuir ในปี ค.ศ.1916 ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปีค.ศ.1932



รูปที่ 2.8 กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว

ที่มา : นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, 2550

โดยมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังรูปที่ 2.9



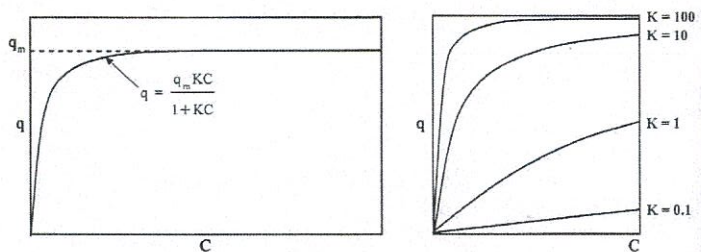
รูปที่ 2.9 ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว

ที่มา : นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, 2550

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการ (2.29) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์จะใช้สมการ (2.29) เพียงแต่ต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับแทนด้วย q_m ดังนั้น สมการ (2.29) จึงมีรูปแบบดังนี้

$$q = \frac{q_m KC}{1+KC} \dots\dots\dots (2.35)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการ (2.35) จะได้กราฟดังรูปที่ 2.10



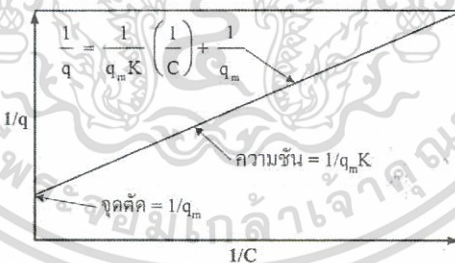
รูปที่ 2.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา : นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, 2550

เมื่อจัดรูปสมการ (2.35) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \dots\dots\dots (2.36)$$

เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m K}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา : นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.6.4 สมการการดูดซับแบบเบท (Brunauer-Emmett-Teller หรือ BET Adsorption Isotherm)

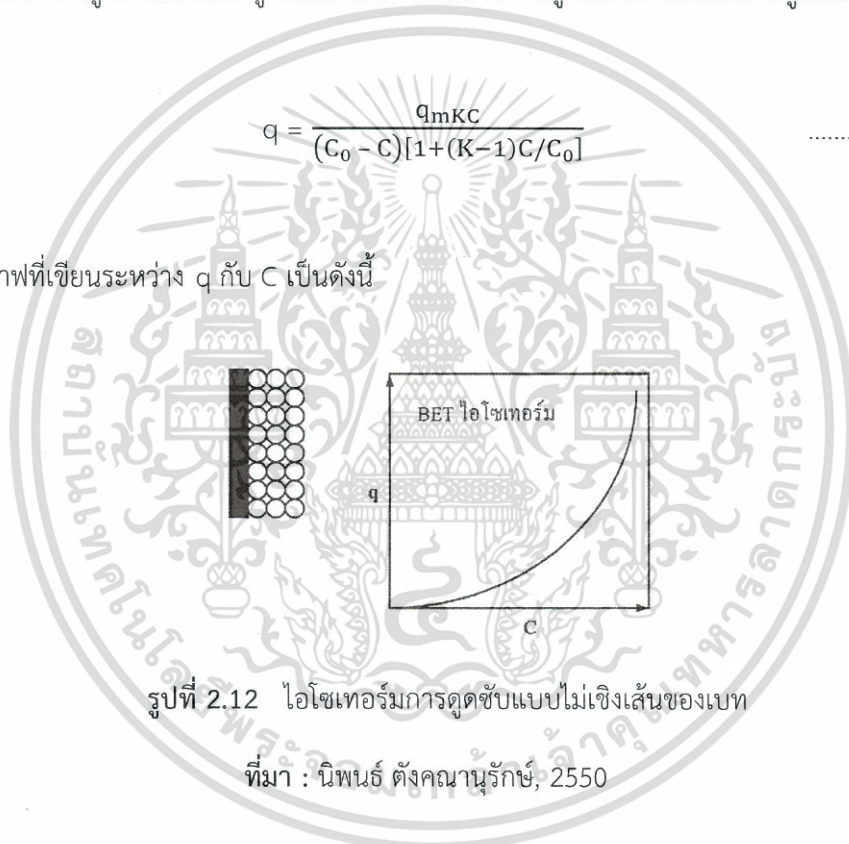
ถูกพัฒนาขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกา 3 ท่าน ในปี ค.ศ.1938 Stephen Brunauer, Paul Emmett และ Edward Teller โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. การดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multi-layer Adsorption)
2. โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
3. ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
4. แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับต่อไป

สมการการดูดซับแบบเบทถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ มีรูปแบบสมการดังนี้

$$q = \frac{q_m K C}{(C_0 - C)[1 + (K-1)C/C_0]} \quad \dots\dots\dots (2.37)$$

กราฟที่เขียนระหว่าง q กับ C เป็นดังนี้



รูปที่ 2.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท

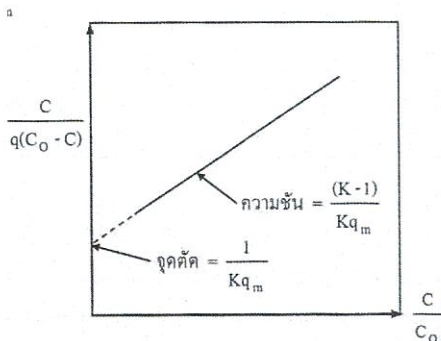
ที่มา : นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, 2550

เมื่อจัดรูปสมการ (2.37) ใหม่จะได้สมการเส้นตรง ดังนี้

$$\frac{C}{q(C_0 - C)} = \frac{1}{q_m K} + \frac{(K-1)}{q_m K} \left(\frac{C}{C_0}\right) \quad \dots\dots\dots (2.38)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{C}{q(C_0 - C)}$ กับค่า $\frac{C}{C_0}$ จะได้กราฟเส้นตรง มีความชันเท่ากับ $\frac{(K-1)}{q_m K}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m K}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

ที่มา : นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, 2550

จากที่กล่าวมาทั้งหมด พอสรุปได้ว่า สมดุลการดูดซับเป็นการศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ ที่สภาวะสมดุลความสัมพันธ์ระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับจะอธิบายด้วยไอโซเทอร์มของการดูดซับ ซึ่งจะบอกด้วยอัตราส่วนปริมาณของตัวดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ไอโซเทอร์มของการดูดซับที่นำมาใช้อธิบายนั้น ได้แก่ สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช และของแลงเมียร์

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทิตยา และคณะ (2552) ศึกษาเกี่ยวกับการจัดการของเสียอันตรายประเภทโลหะหนักในห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยนำน้ำเสียที่นำมาศึกษามาจากการทดลองในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2551 ในการทดลองนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบดังนี้ 1.การบำบัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.การบำบัดโลหะหนักโดยการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกชนิดกรดอ่อน 3.การบำบัดโลหะหนักโดยการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับการตกตะกอนทางไฟฟ้า พบว่า ระบบที่ 1 สภาวะที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ 85 g เป็นสภาวะที่ดีที่สุดเมื่อใช้น้ำเสีย 1 ลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัด Zn, Cr(III), Cu, Cd, Pb และ Mn ได้ 94.35, 97.65, 95.15, 98.31, 100 และ 81.08% ตามลำดับ ระบบที่ 2 สภาวะที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ 85 g เป็นสภาวะที่ดีที่สุด มีประสิทธิภาพในการกำจัด Zn, Cr(III), Cu, Cd, Pb และ Mn ได้ 89.35, 97.54, 97.31, 96.98, 53.80 และ 67.46% ตามลำดับ ระบบที่ 3 สภาวะที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ 90 g เป็นสภาวะที่ดีที่สุด มีประสิทธิภาพในการกำจัด Zn, Cr(III), Cu, Cd, Pb และ Mn ได้ 96.92, 99.39, 94.60, 98.94, 60.09 และ 75.15% ตามลำดับ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันทั้ง 3 ระบบพบว่า การบำบัดโลหะหนักโดยการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับการตกตะกอนทางไฟฟ้าเป็นสภาวะที่ดีที่สุด โดยในการศึกษาในครั้งนี้ใช้แบบสอบถามสำรวจการใช้ การกำจัดและการจัดการโลหะหนักในงานวิจัยภายในสาขาวิชาเคมี พบว่าต้องมีการอบรมและให้ความรู้ในการจัดการของเสียอันตรายอย่างมีประสิทธิภาพ

อนิสา และคณะ (2555) ศึกษาการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกหอยผสมธรรมชาติ (กระช้ำ) ที่มีอยู่ในจังหวัดสมุทรสาครซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นหอยสองฝาได้แก่ หอยลาย หอยตลับ และหอยแครง มีขนาดประสิทธิภาพ 0.28 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ 7.27 เมื่อทำการทดลองแบบแบทช์พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี ทองแดง และแคดเมียม คือ พีเอช 5 ระยะเวลาปั่นกววน 60 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ปริมาณ 0.25 กรัม ขนาด 2-4.275 มิลลิเมตร โดยสามารถลดปริมาณโลหะหนักได้ 40-65 % ไอโซเทอร์มในการดูดซับมีความสอดคล้องทั้งแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนด์ลิช แต่จลนศาสตร์ดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลอง pseudo-second order มากกว่า pseudo-first order

รุจา และคณะ (2556) ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวก Lewatit MonoPlus S108 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent Resin, SR) ซึ่งเป็นเรซินชนิดกรดแก่ โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และค่าพีเอช ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแคดเมียม (Cd^{2+}) 10 mg/L จำนวน 25 mL แปรค่าน้ำหนักของ SR 1, 3 และ 5 g จากการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม และเข้าสู่สมดุล พบว่าที่สภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบำบัด Cd^{2+} ในน้ำเสียสังเคราะห์ใช้เวลา 10 นาที ที่พีเอชเดิมของน้ำเสียสังเคราะห์ 5.44 สามารถบำบัดได้สูงสุ่มมากกว่า 99% ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการบำบัด Cd^{2+} แปรค่าน้ำหนักของ SR 0.1 ถึง 5 g พบว่าเป็นไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นและแบบฟรอนด์ลิชมีความสอดคล้องกัน เมื่อใช้น้ำกลั่นและกรดไฮโดรคลอริก 5% โดยน้ำหนักเป็นตัวชะละลาย Cd^{2+} จากเรซินที่ใช้บำบัด พบว่ากรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวชะละลายที่ดีกว่าน้ำกลั่น ได้ Cd^{2+} กลับคืนถึง 59.68%

วรวิทย์ และประเทืองทิพย์ (2556) เพื่อศึกษาการดูดซับโลหะหนักจากน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมีโดยการใช้ธูมอญแบบผงเป็นวัสดุดูดซับ โดยรวบรวมเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมีระหว่างทำการทดลองในรายวิชาปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ปฏิบัติการหลักเคมี และปฏิบัติการเคมีสำหรับวิศวกร การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักรวมประกอบด้วยระยะเวลาการกวน ปริมาณของตัวดูดซับต่อโลหะหนัก และอุณหภูมิ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือระยะเวลาการกวน 2 ชั่วโมง ปริมาณธูมอญ 10 กรัมต่อปริมาตรสารละลาย 100 มิลลิลิตร และที่อุณหภูมิห้อง ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับต่อโลหะหนัก ตะกั่ว ทองแดง สังกะสีและโครเมียมในตัวอย่างน้ำทิ้งเท่ากับ 65.1, 54.8, 63.4 และ ND ตามลำดับ

วาดวัน และคณะ (2557) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย โดยใช้ดินตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาออกจากน้ำเสียชุมชน ซึ่งมีการเติมตะกั่ว 30 mg/L ฟอสเฟต 25 mg/L และมีค่าซีโอดี 300 mg/L ออกแบบการทดลองในรูปของคอลัมน์ เปรียบเทียบระหว่างคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม ทำการปล่อยน้ำเสียลงคอลัมน์ทุกวัน ระยะเวลาดำเนินการทั้งสิ้นรวม 71 วัน ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเฉลี่ยของคอลัมน์ทราย ดินตะกอน และดินตะกอนผสมสารส้ม เท่ากับ 98.31%, 99.01% และ 99.09% ตามลำดับ โดยตะกั่วจะฟอร์มตัวกับฟอสเฟต หรือสารประกอบอื่นๆ อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำและถูกกำจัดขั้นแรกด้วยการกรอง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้น ตะกั่วจะถูกไฮโดรไลซ์อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ ($Pb(OH)_2$) ซึ่งสามารถถูกดูดซับบนดินหรือบนโลหะไฮดรอกไซด์ได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้น สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีพบว่า คอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มมีค่ามากกว่าทรายตามลำดับคือ 50.65%, 50.85% และ 32.09% โดยซีโอดีถูกกำจัดด้วยการกรองและกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพที่อาจเกิดขึ้นภายในคอลัมน์ และสุดท้ายคือประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยซึ่งจะถูกกำจัดด้วยการกรองพบว่า คอลัมน์ดินตะกอนและดินตะกอนผสมสารส้มมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยมากกว่าคอลัมน์ทราย คือ 73.42%, 72.23% และ 63.97% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ Kruskal Wallis One-way analysis of Variance พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยของคอลัมน์ทั้งสามมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จิราพร และคณะ (2557) ศึกษาการบำบัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้คอลัมน์เรซินที่แลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent Resin, SR) และเรซินที่ผ่านการฟื้นฟู (Regenerate Resin, RR) โดยใช้คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการบำบัด ได้แก่ 1) อัตราการไหล 2.5, 5 และ 7 mL/min 2) ระดับความสูงของเรซิน 10, 15 และ 17 cm และ 3) จำนวนรอบในการใช้ซ้ำและหลังการฟื้นฟูด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองพบว่า อัตราการไหล 2.5 mL/min มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับอัตราการไหลอื่น ณ ความสูงเรซินที่ 13.5 cm เท่ากัน สามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น 10.50 ± 0.18 mg/L ที่ประสิทธิภาพในการบำบัด 90% ถือเป็นสถานะ Break Through, BT สามารถบำบัดได้ถึง 3.3 L แต่ถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพของน้ำทิ้งได้ตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (2539) (Effective Point, EP) ที่กำหนดความเข้มข้นไม่เกิน 0.03 mg/L สามารถบำบัดได้ปริมาณ 1.63 L เมื่อแปรความสูงของเรซิน พบว่า ที่ระดับความสูง 17 cm มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด ที่อัตราการไหล 2.5 mL/min สามารถบำบัดแคดเมียมไว้ได้ 19.388 ± 0.78 mg หลังการฟื้นฟูระบบสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ถึง 4 รอบ ในแต่ละรอบบำบัดตามเกณฑ์ EP ได้ 17.27 ± 0.79 , 16.50 ± 0.78 , 15.71 ± 0.00 และ 14.93 ± 1.35 mg ตามลำดับ

Teng Zhang et al. (2014) การศึกษาการกำจัดแคดเมียม-เทลลูไรด์ในสารละลายกรดที่เกิดจากการรีไซเคิลกระบวนการผลิตแสงอาทิตย์ที่ใช้วิธี Cadmium telluride photovoltaic จะทำการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นโดยการสังเคราะห์เรซินที่มีชื่อว่า sultanate magnetic microspheres (PSt-DVB-sNa MPs) เป็นตัวดูดซับที่มีแม่เหล็กนำไปใช้ในกระบวนการดูดซับเพื่อกำจัดแคดเมียม-เทลลูไรด์ที่เป็นของเสีย โดยใช้เครื่องมือ Fourier transform infrared spectra (FT-IR), X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscope (TEM), scanning electron microscope equipped with an energy dispersive spectrometer (SEM-EDS) และ vibrating sample magnetometer (VSM) ในการตรวจสอบสารที่สังเคราะห์ว่ามีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ พบว่ามีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับว่ามีผลต่อการกำจัดแคดเมียม-เทลลูไรด์ พบว่าในแคดเมียมถ้าเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ (PSt-DVB-sNa MPs) จาก 0.5g/5 ml - 2.5g/5 ml จะสามารถกำจัดปริมาณแคดเมียมในสารละลายได้ 44.8% - 93.4% จากนั้นถ้าเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะเริ่มเข้าสู่สมดุล ส่วนเทลลูไรด์ถ้าเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ (PSt-DVB-sNa MPs) จาก 0.5g/5 ml - 5.0g/5 ml จะสามารถกำจัดปริมาณเทลลูไรด์ในสารละลายได้ 8.3% - 71.5% จากนั้นถ้าเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะเริ่มเข้าสู่สมดุล ศึกษาเวลาที่เหมาะสม (contact time) ในการดูดซับสารละลายพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายคือ 5 นาทีจะสามารถกำจัดสารละลายแคดเมียม 60% และเทลลูไรด์ 25% ในการชะล้างสารละลายครั้งที่ 2 สามารถดูดซับได้รวดเร็วกว่าการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินชนิดธรรมดา ศึกษาจลศาสตร์และไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ และฟรุนด์ลิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าสมการของแลงเมียร์สามารถอธิบายได้ดีกว่าสมการของฟรุนด์ลิช จากการศึกษาพบว่า sultanate magnetic microspheres (PSt-DVB-sNa MPs) สามารถกำจัดแคดเมียมได้ 100% และกำจัดเทลูไรต์ได้ 80% จากกระบวนการชะล้างครั้งที่สองภายในเวลา 5 นาที ซึ่งคาดว่าในอนาคตจะสามารถสังเคราะห์เรซินชนิดนี้มาใช้ในการกำจัดแคดเมียมและเทลูไรต์ที่เกิดจากการรีไซเคิลกระบวนการผลิตพลังงานแสงอาทิตย์

Nicolas Reynier et al. (2015) ศึกษา น้ำชะขยะสังเคราะห์ 3 ตัวอย่างที่ปนเปื้อนสารประกอบอินทรีย์ (เพนตะคลอโรฟินอล และไดออกซินฟูราน) และสารประกอบอนินทรีย์ (ทองแดง สารหนู และโครเมียม) โดยทำการบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนด้วย $Fe_2(SO_4)_3$ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซินชนิดต่างๆ โดยทำการทดลองแบบแบทช์จากการศึกษาพบว่า การตกตะกอนเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะและPCP แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัด DF โดยถ่านกัมมันต์ชนิด CAP สามารถดูดซับคอปเปอร์ได้มากที่สุด ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิด CAG N และ CAP เป็นชนิดที่สามารถฟื้นฟู PCP ได้มากที่สุด การแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินประจุลบทุกตัว มีประสิทธิภาพในการดูดซับและกำจัดสารละลาย PCP ได้จากการศึกษาข้างต้นพบว่าการใช้เรซิน และถ่านกัมมันต์มีราคาแพงกว่าการตกตะกอน ดังนั้นจึงมีการดัดแปลงโดยการใช้ตัวดูดซับ 2 ประเภทโดยการนำเรซินประจุลบ 2 ตัว (Amberlite IRA900, Lewatit SR7) นำมารวมกับถ่านกัมมันต์ชนิด CAP เพื่อการฟื้นฟูโลหะและ PCP ผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดสารหนูได้ดีใน Lewatit SR7 ที่ผสมกับ CAP ส่วนการกำจัด โครเมียมกำจัดได้ดีใน Amberlite IRA900 ที่ผสมกับ CAP การศึกษาในครั้งนี้ต้องการที่จะบำบัดน้ำชะขยะให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ($<1 \text{ mgAs L}^{-1}$, $<5 \text{ mgCr L}^{-1}$, $<5 \text{ mgCu L}^{-1}$, $<1 \text{ mgPCP L}^{-1}$, $<15 \text{ pgDF L}^{-1}$) ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการปล่อยน้ำเสียลงสู่ที่น้ำทิ้งเนื่องจากการปล่อยน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเข้าไปในท่อระบายน้ำของเทศบาลที่มีการควบคุมอย่างเข้มงวด

Xu-Jian Zhou et al. (2015) ทำการศึกษาถ่านกัมมันต์ในการกำจัดไดออกซินที่ละลายอยู่ใน n-hexane โดยแปรค่าความเข้มข้นของไดออกซินใน n-hexane และปริมาณของถ่านกัมมันต์ ผลจากการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ชนิด Polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs) สามารถกำจัดไดออกซินได้สูงสุด 98% และ ชนิด Polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) สามารถกำจัดไดออกซินได้สูงสุด 99.8% และปริมาณของถ่านกัมมันต์ไม่มีผลต่อการกำจัดไดออกซินที่ละลายอยู่ใน n-hexane ไอโซเทอร์มของการดูดซับ PCDD/Fs แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยมีค่า $R^2 > 0.98$

Yogeshwar N. Thakare and Arun Kumar Jana (2015) ศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ไอออนในน้ำเสียด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนบนตัวดูดซับเรซินชนิด INDION225H โดยทำการศึกษาหาลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ การศึกษาสมดุลการดูดซับของคอปเปอร์ไอออนตามโมเดลของ Freundlich และ Redlich-Peterson การศึกษาจลศาสตร์ของการดูดซับ ใช้การวิเคราะห์ pseudo-first order และ pseudo-second order รวมถึงศึกษากลไกการดูดซับ จากการศึกษาพบว่าขนาดอนุภาคของเรซินอยู่ที่ 300-1200 μm มีค่าเฉลี่ยที่ 544 μm ลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินเป็นแบบผิวเรียบมีทรงกลม มีพลังงานกระตุ้นที่ใช้สำหรับการดูดซับ Cu จะใช้พลังงานการกระตุ้นประมาณ 79.49 KJ/mol ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับของ Cu เป็นการดูดซับทางเคมี และที่ความเข้มข้นต่ำจะทำให้อัตราการดูดซับลดลงจนกระทั่งถึงจุดสมดุล ซึ่งจะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาที่ 300 นาที สำหรับตัวอย่างความเข้มข้นต่ำกว่า 50 mg/L และถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นอัตราการดูดซับเริ่มต้นก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย มาจากข้อมูลจลศาสตร์การดูดซับที่ใช้การวิเคราะห์ pseudo-first order และ pseudo-second order จากการศึกษาในครั้งนี้จะเห็นได้ว่าลักษณะการดูดซับของ INDION225H จะคล้ายกับตัวดูดซับตัวอื่นๆ แต่เนื่องจากมีความหนาแน่นสูงและมีพื้นผิวเรียบจึงเหมาะสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบคอลัมน์มากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นๆ จึงเป็นแนวทางสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่จะนำเรซินชนิดนี้ไปใช้ในการดูดซับคอปเปอร์ไอออนตามแบบการทดลองในครั้งนี้

Xuwei Hu et al. (2016) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียการผลิตก๊าซจากถ่านหิน (CGW) โดยการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแม่เหล็กชนิดโพลิอะคริลิกเป็นเรซินประจุลบ โดยแปรค่าปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ปริมาณของเรซิน, ระยะเวลาการดูดซับ และการกระจายตัวน้ำหนักโมเลกุลน้ำเสียจากการผลิตก๊าซจากถ่านหิน รวมไปถึงการศึกษาศามารถในการนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ในการกำจัดกำจัดซีโอไซด์ด้วย NDMP และประสิทธิภาพการบำบัด CGW ด้วยเรซิน NDMP ผลการทดลองสรุปว่าใช้ พีเอช 10 อัตราส่วนของเรซินเท่ากับ 8.0 g/L และระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ 10 นาที การกระจายตัวน้ำหนักโมเลกุลถูกแสดงให้เห็นในรูปซีโอไซด์ของ CGW ส่วนใหญ่รวมตัวอยู่บนโมเลกุลสารอินทรีย์ขนาดเล็กในส่วนเล็กน้อย น้ำหนักโมเลกุล <500 ดาลตัน พบว่าการฟื้นฟูด้วย NaCl 1% ผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% ให้ประสิทธิภาพสูงสำหรับการฟื้นฟูเรซิน NDMP การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ที่สูงของเรซิน NDMP ในการใช้สำหรับกำจัดสารอินทรีย์วัตถุของน้ำเสียจากการผลิตก๊าซจากถ่านหิน และยังแสดงให้เห็นการประยุกต์ที่เป็นไปได้ดีในน้ำเสียอุตสาหกรรม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

1. เรซินชนิดประจุบวก DOWEXTM IR 100 H/Na ที่ผ่านการใช้งานแล้ว
2. Lead (II) Nitrate ยี่ห้อ APS Ajax Finechem เกรดห้องปฏิบัติการ
3. กรดไฮโดรคลอริก (HCL) 35% ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
4. แอมโมเนียมอะซิเตต (Ammonium acetate, NH₄OAc) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
5. โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (Na₂S₂O₅) ยี่ห้อ Himedia เกรดห้องปฏิบัติการ
6. แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride, NH₄Cl) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
7. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) 10% acidified ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
8. เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) เกรดห้องปฏิบัติการ
9. กรดบอริก (H₃BO₃) ยี่ห้อ Loba Chemie เกรดห้องปฏิบัติการ
10. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Bromocresol green, BG)
11. ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ (phenolphthalein) เกรดห้องปฏิบัติการ
12. กรดไนตริก 65% (HNO₃) ยี่ห้อ Loba chemie เกรดห้องปฏิบัติการ
13. โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium hydrogen phthalate) เกรดห้องปฏิบัติการ

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชัน สเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer, AAS) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น AA-200
2. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น New classic MF (ML204)
3. เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ JSR รุ่น JSSI-100C
4. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น Sevencompact

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องกลั่น (Micro Kjeldahl) พร้อมขวดกลั่น (Kjeldahl flask) ยี่ห้อ Buchi Distillation Unit รุ่น B-323
6. เครื่องกวน (Hotplate stirrer) ยี่ห้อ Stuart รุ่น CB162
7. ตู้อบความร้อน
8. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น FiveEasy Plus
9. เครื่องกรองลดความดัน ยี่ห้อ Tokyo Rikakikai
10. คอลัมน์ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 50 เซนติเมตร
11. เครื่องแก้วชนิดต่างๆ

3.2 วิธีการทดลอง

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักตะกั่ว

เตรียมสารละลายสต็อก Lead (II) Nitrate [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$] มวลโมเลกุล 331.2 g/mol ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 1000 mg/L - โดยชั่ง [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$] 1.6 g ละลายด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 mL แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1000 mL ศึกษาคุณลักษณะเบื้องต้นทั้งทางด้านกายภาพ และทางเคมี ตรวจสอบตามพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.1

3.2.1 ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของเรซิน

เรซินที่ใช้ในการทดลองเป็นเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้วจากโรงงานผลิตน้ำสะอาด โดยนำมาเก็บรักษาโดยการแช่น้ำและใช้น้ำหนักเปียกในการทดลอง และนำมาศึกษาสมบัติทางเคมีดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของเรซินและน้ำเสีย

พารามิเตอร์	เครื่องมือ	วิธีการ	เรซิน	น้ำเสีย
pH (อัตราส่วน 1:1)	เครื่องวัดพีเอช	กรมพัฒนาที่ดิน 2553	✓	✓
ค่าการนำไฟฟ้า (อัตราส่วน 1:5)	เครื่องวัดการนำไฟฟ้า	กรมพัฒนาที่ดิน 2553	✓	✓
TDS	เครื่องวัดการนำไฟฟ้า	กรมพัฒนาที่ดิน 2553	✓	✓
ORP	เครื่องวัด ORP	AWWA, 2012	-	✓
การอุ้มน้ำ	เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง	กรมพัฒนาที่ดิน 2553	✓	-
ค่าความสามารถในการ	เครื่องกลั่นไนโตรเจน	กรมพัฒนาที่ดิน 2553	✓	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์	เครื่องมือ	วิธีการ	เรซิน	น้ำเสีย
แลกเปลี่ยนไอออนบวก (CEC)				
โลหะ - Ca Cu Mg Pb Zn	เครื่องอะตอมมิกแอป ซอร์ปชัน	U.S. EPA Method 3050B	-	✓

3.2.2 ศึกษาคุณลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสีย

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว (น้ำเสีย A) น้ำเสียจริงในห้องปฏิบัติการชุดที่ 1 (น้ำเสีย B) และน้ำเสียจริงในห้องปฏิบัติการชุดที่ 2 (น้ำเสีย C) การศึกษาคุณลักษณะเบื้องต้นทั้งทางด้านกายภาพ และทางเคมี โดยจะตรวจสอบตามพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.1

3.2.3 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียในห้องปฏิบัติการ

แหล่งที่มาของน้ำเสีย จากห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาเคมี ศึกษาศาสตร์ ชั้น 5 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นน้ำเสียประเภทโลหะหนักที่มีการแยกเก็บน้ำเสียประเภทโลหะหนักโดยเฉพาะ ในการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียที่เก็บรวบรวมจากห้องปฏิบัติการทั้งก่อนและหลังการดูดซับด้วยเรซินประจุบวก โดยก่อนทำการตรวจวัดนำน้ำเสียทำการย่อยน้ำเสียสมบูรณ์ตามวิธีของ U.S. EPA Method 3050B และวิเคราะห์หาความเข้มข้นด้วยเครื่อง AAS

3.2.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการแบบแบทช์

ในการทดลองจะใช้น้ำเสีย A ที่มีความเข้มข้น 10 mg/L โดยใช้เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ยังไม่มีการรีเจนเนอเรต (SR) และเรซินที่ผ่านการรีเจนเนอเรตด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 7% (RR) ในหัวข้อนี้ทำการทดลองด้วยสภาวะควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 25 °C (Isotherm) โดยนำชุดควบคุมและชุดทดลองเขย่าในเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ

3.2.4.1 การหาเวลาการดูดซับที่เหมาะสม

1. ทำการแปรค่าปริมาณเรซิน โดยซัง SR และ RR อัตราส่วนเรซินต่อน้ำเสียเป็น 8, 16 และ 24 g/L ลงในขวดพลาสติก โดยใช้ปริมาณน้ำเสีย A มีความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL ทุกชุดการทดลองทำ 3 ซ้ำ และในทุกชุดการทดลองทำชุดควบคุม โดยไม่มีการใส่เรซินและทำ 3 ซ้ำ

2. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 5, 15, 30 นาที เพื่อให้การหมุนไม่หมุนเร็วเกินไปจนทำให้เรซินเกิดการเสียดสีกัน

3. นำตัวอย่างที่ได้มาทำการกรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรองละเอียด และนำสารละลายที่กรองได้ไปย่อยสมบูรณ์ตามวิธีของ U.S. EPA Method 3050B และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

3.2.4.2 การหาพีเอชที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนประจุ

1. ทำการแปรค่าพีเอช เป็น 3, 4 และ pH เดิม (5.46) ของน้ำเสีย A โดยใช้เรซิน SR และ RR อัตราส่วนเรซินต่อน้ำเสียเป็น 8, 16 และ 24 g/L โดยใช้ปริมาณน้ำเสีย A มีความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL ทุกชุดการทดลองจะมีชุดควบคุม และทำการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ

2. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากการทดลองข้อที่ 3.2.4.1

3. นำตัวอย่างที่ได้มากรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรองละเอียด

4. นำสารละลายไปทำการย่อยสมบูรณ์ตามวิธีของ U.S. EPA Method 3050B และนำสารละลายไปกรองด้วยกระดาษกรองละเอียด ปรับปริมาตรให้ได้ 10 mL แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

3.2.4.3 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ทำไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยสมการแบบเส้นตรง ดังสมการที่ 2.31 แบบพหุนามดีกรี 2 ดังสมการที่ 2.34 และแบบแลงเมียร์ ดังสมการที่ 2.36 มาใช้ในการตรวจสอบว่าลักษณะของการดูดซับเป็นอย่างไร สอดคล้องในรูปแบบใด โดยใช้ปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาเวลา และพีเอช โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ซังเรซิน SR และ RR จำนวน 0.4 g และเตรียมน้ำสังเคราะห์โลหะหนักตะกั่วที่มีความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 และ 100 mg/L อย่างละ 3 ตัวอย่าง

2. นำเรซิน 0.4 g และน้ำเสีย A ที่ความเข้มข้นต่างๆ ใส่ลงในขวดพลาสติก และทำการปรับค่าพีเอชของตัวอย่างให้เท่ากับพีเอชที่เหมาะสมในข้อที่ 3.2.4.2 ด้วยกรดไนตริก 0.1 N หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N

3. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที ตามเวลาที่เหมาะสมในขั้นตอนที่ 3.2.4.1

4. นำตัวอย่างที่ได้มากรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรองละเอียด

5. นำสารละลายไปทำการย่อยสมบูรณ์ตามวิธีของ U.S. EPA Method 3050B และนำสารละลายไปกรองด้วยกระดาษกรองละเอียด ปรับปริมาตรให้ได้ 10 mL แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

6. นำผลที่ได้จากเครื่อง AAS มาวิเคราะห์โดยให้ค่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่สภาวะสมดุล (C_e) และปริมาณสารละลายตะกั่วที่ถูกดูดซับบนเรซิน (q_e) โดยหาจากสมการที่ 2.29 และคำนวณได้ดังภาคผนวก จ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_e กับ q_e เพื่อหาความสอดคล้องของข้อมูลการทดลองกับสมการแบบฟรอนด์ลิช และสมการแบบแลงเมียร์

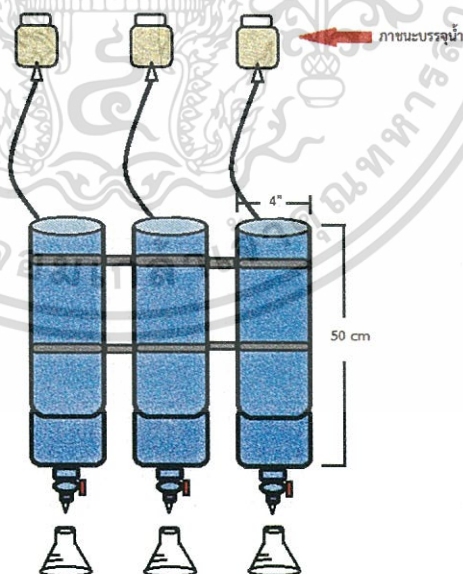
3.2.5 การศึกษาการตกตะกอนที่มีผลต่อการบำบัดโลหะหนัก

การตกตะกอนโลหะหนักจะทำการทดลองโดยใช้น้ำเสีย C ปริมาตร 1000 mL และใช้สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) (มกคล, 2559) โดยทำการทดลองด้วยวิธีการจาร์เทสต์

1. นำน้ำเสีย C ปริมาตร 1000 mL ใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 mL จำนวน 6 บีกเกอร์
2. ใส่โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ 1 g และคนให้ของแข็งละลายทิ้งไว้ 5 นาที
3. ทำการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำการปรับค่าพีเอชให้ได้เท่ากับ 11.5 (ดูการคำนวณดังภาคผนวก จ)
4. ทำการปั่นกวนโดยใช้เครื่องจาร์เทสต์โดยทำการปั่นกวนเร็วที่ความเร็วรอบ 150 รอบ/นาทีเป็นเวลา 1 นาที และทำการปั่นกวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที
5. นำสารละลายที่ได้มาใส่กรวยอิมฮอลล์ขนาด 1000 mL แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 6 ชั่วโมงและ 120 ชั่วโมง
6. ในการทดลองมีชุดควบคุม อย่างละ 1 ชุด โดยไม่มีการใส่โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์และปรับค่าพีเอชใดๆ
7. เมื่อครบกำหนดเวลาทำการแยกส่วนใส่ออกจากตะกอนโดยการกรองผ่านกระดาษกรองละเอียด
8. นำส่วนใสที่ได้ไปวัดค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่า TDS และค่าความต่างศักย์โออาร์พี และนำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที
9. ปิเปิดส่วนใส 50 mL และตะกอนที่อบเสร็จแล้ว ใส่บีกเกอร์แล้วนำไปย่อยสมบูรณ์ตามวิธีของ U.S. EPA Method 3050B
10. ปรับปริมาตรให้ได้ 25 mL แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เพื่อหาปริมาณโลหะหนัก

3.2.6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ และ น้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนโดยวิธีการบำบัดแบบคอลัมน์

1. นำน้ำเสีย B และน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอน (น้ำเสีย C) ใส่ภาชนะบรรจุที่มีสายยางพร้อม ถ่ายลงสู่คอลัมน์ โดยใช้อัตราการไหลที่ทำให้น้ำเสียมีระยะเวลาพักกักในคอลัมน์นานไม่น้อยกว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมตามหัวข้อที่ 3.2.4.1
2. บรรจุเรซินที่แห้งและผ่านการใช้งานแล้ว (SR) ลงในแต่ละคอลัมน์ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 50 เซนติเมตร (ดังรูปที่ 3.1) จำนวน 2000 กรัม รวม 3 คอลัมน์ และทำการแช่น้ำทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชม. หลังจากครบกำหนดเวลา ถ่ายน้ำออกจากคอลัมน์
3. นำน้ำเสีย B และน้ำเสีย C ใส่ลงในคอลัมน์และทิ้งระยะพักกักให้ได้เวลาที่เหมาะสมตามหัวข้อ 3.2.4.1
4. เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วให้ถ่ายน้ำออกตามอัตราการไหลที่เหมาะสม และปล่อยน้ำออกจากภาชนะลงสู่คอลัมน์ที่อัตราการไหลเดียวกันเพื่อในน้ำเสียมีอัตราการไหลคงที่
5. เก็บน้ำตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาที นาน 180 นาที ทำการวัดค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าTDS และค่าความต่างศักย์โออาร์พี (ORP)
6. ปิเปิดน้ำตัวอย่างที่ผ่านคอลัมน์แล้ว 50 mL และนำไปทำการย่อยสมบูรณ์ตามวิธีของ U.S. EPA Method 3050B และนำสารละลายไปกรองด้วยกระดาษกรองละเอียด ปรับปริมาตรให้ได้ 25 mL แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS
7. นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดโลหะต่อเวลาที่ใช้ในการบำบัด (min)



รูปที่ 3.1 คอลัมน์ PVC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 การประกันคุณภาพในการวิเคราะห์และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1. การประกันคุณภาพเครื่องมือที่ใช้ได้รับการตรวจสอบว่ามีค่าเที่ยงตรงเหมาะสมแก่การใช้งาน
2. ใช้วิธีการทดลองที่ได้รับการยอมรับเป็นมาตรฐาน (ดังภาคผนวก ข)
3. มีการทำกราฟมาตรฐานที่มีค่า $R^2 = 0.99$ (ดังภาคผนวก ค)
4. ใช้วิธีการสถิติในการตรวจสอบค่านัยสำคัญ ด้วยวิธี T-Test และ MINITAB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน

เรซินที่นำมาใช้ในโครงการนี้มี 2 ประเภท คือ ประเภทที่ 1 เป็นเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว (SR) จากกระบวนการผลิตน้ำสะอาด ซึ่งผ่านการใช้งานซ้ำหลายรอบจนไม่คุ้มค่าในการรีเจนเนอเรตเพื่อใช้ซ้ำ หรือผ่านการใช้งานและรีเจนเนอเรตประมาณ 3 ครั้ง และเรซินประเภทที่ 2 ที่นำมาใช้งานคือ เรซิน SR ที่ผ่านการรีเจนเนอเรตด้วยกรดไฮโดรคลอริก (RR) โดยทำการแช่กรดไฮโดรคลอริก 7% เป็นเวลา 1 วัน หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจน pH เท่ากับ pH ของน้ำกลั่น (ประมาณ 6.50) เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป ลักษณะทางกายภาพของเรซินทั้ง 2 ชนิดที่สามารถสังเกตได้ ลักษณะเป็นเม็ดพลาสติกกลมเล็ก สีน้ำตาลอ่อน ไม่มีกลิ่น โดยมีสมบัติเบื้องต้นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติทั่วไปของเรซิน

พารามิเตอร์	SR	RR
pH (อัตราส่วน1:1)	7.41 (± 0.02)	6.49 (± 0.02)
ค่าการนำไฟฟ้า (อัตราส่วน1:5), uS/cm	51.83 (± 0.03)	13.88 (± 0.02)
TDS (อัตราส่วน1:5), mg/L	26.16 (± 0.01)	7.40 (± 0.01)
%การอุ้มน้ำ	52.97 (± 2.94)	46.77 (± 6.05)
ความสามารถการแลกเปลี่ยนประจุบวกของเรซิน (CEC), cmol/kg	0.1046 (± 0.02)	0.1252 (± 0.04)

หมายเหตุ \bar{x} ($\pm SD$), n = 3

จากตารางที่ 4.1 เห็นได้ว่าค่าพีเอชของ SR มีความเป็นเบสเล็กน้อย ส่วนค่าพีเอชของ RR มีความเป็นกรดเล็กน้อยจากการรีเจนเนอเรตด้วยกรดไฮโดรคลอริก ค่าการนำไฟฟ้าของ SR มีค่าสูงกว่า RR แสดงว่า SR มีสารประกอบอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำจำพวกไอออนละลายออกมากับน้ำได้ดีกว่าชนิด RR เมื่อค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าก็เป็นผลให้ค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้หรือค่า TDS ของ SR สูงกว่า RR และเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเป็นเรซินชนิดเดียวกันซึ่งก็เป็นเหตุผลที่สอดคล้องว่าทำให้อัตราการอุ้มน้ำใกล้เคียงกันด้วย สุดท้ายในส่วนของคุณสมบัติความสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity, CEC) มีค่าใกล้เคียงกันคือ มีความสามารถในการดูดซับประจุบวกที่ใกล้เคียงกันแต่ RR อาจมีค่ามากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนประจุได้ดีผลจากการ

รีเจนเนอร์เรตเรซินแล้วจึงอยู่ในรูปเรซิน-ไฮโดรเจน (Resin-hydrogen form) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันซัลโฟเนต ถูกแลกเปลี่ยนจาก Ca^+ เป็น H^+ (ดังสมการ 2.3, 2.4) ซึ่งสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกของ H^+ ได้ง่ายกว่า Ca^+ ที่มีประจุมากกว่า พันธะแข็งแรงกว่า ซึ่งค่า CEC เป็นพารามิเตอร์ชี้ถึงสมบัติในการบำบัดความกระด้างในรูปการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนในน้ำดิบ (Raw water) แต่ในโครงการพิเศษนี้ต้องการให้เกิดการแลกเปลี่ยนยึดประจุบวกของโลหะหนักไว้แทน จึงมีการตรวจวัดค่า CEC ของทั้ง SR และ RR จะเห็นได้ว่า CEC ของ SR และ RR ไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อเทียบกับเรซินที่ไม่ผ่านการใช้งานในรูปโซเดียม (Na-form) พบว่าสามารถแลกเปลี่ยนจากรูปโซเดียมเป็นรูปไฮโดรเจน ได้สูงสุด 11% (ประมาณ 4.78 mol/kg) ถือว่าทั้ง SR และ RR มีค่า CEC ต่ำมาก พารามิเตอร์ TDS เป็นการยืนยันว่าปริมาณของแข็งที่อาจจะละลายน้ำออกมาจากรซินไม่ใช่เป็นแหล่งกำเนิดหลักหลังการใช้เรซินบำบัดน้ำเสียโลหะหนักและ TDS เป็นอีกพารามิเตอร์ที่มีกำหนดในมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ดังภาคผนวก ข ข้อ 2

4.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียสังเคราะห์

แหล่งของน้ำเสียที่นำมาทำการทดลองแบ่งเป็นน้ำเสีย 2 รูปแบบ คือ น้ำเสีย A เป็นน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักตะกั่วจาก $[\text{Pb}(\text{NO}_3)_2]$ สำหรับการศึกษาไอโซเทอร์ม ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียที่สังเคราะห์ ใส่ไม่มีตะกอน ไม่มีกลิ่น โดยมีสมบัติเบื้องต้นดังตารางที่ 4.2 คือมีความเป็นกรดปานกลาง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นค่าการนำไฟฟ้าและค่า TDS ก็เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีไอออนที่ละลายน้ำมากขึ้น

ตารางที่ 4.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสีย

พารามิเตอร์	น้ำเสีย A ความเข้มข้น (mg/L)					
	10	20	40	60	80	100
pH	5.46 (±0.02)	5.11 (±0.03)	5.49 (±0.02)	5.59 (±0.03)	5.33 (±0.02)	5.43 (±0.01)
ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	6.25 (±0.03)	22.90 (±0.02)	43.60 (±0.02)	66.20 (±0.01)	90.80 (±0.01)	103.70 (±0.01)
TDS (mg/L)	3.48 (±0.02)	11.39 (±0.01)	21.80 (±0.03)	33.00 (±0.01)	45.50 (±0.01)	51.80 (±0.02)

หมายเหตุ \bar{x} ($\pm\text{SD}$), $n = 3$

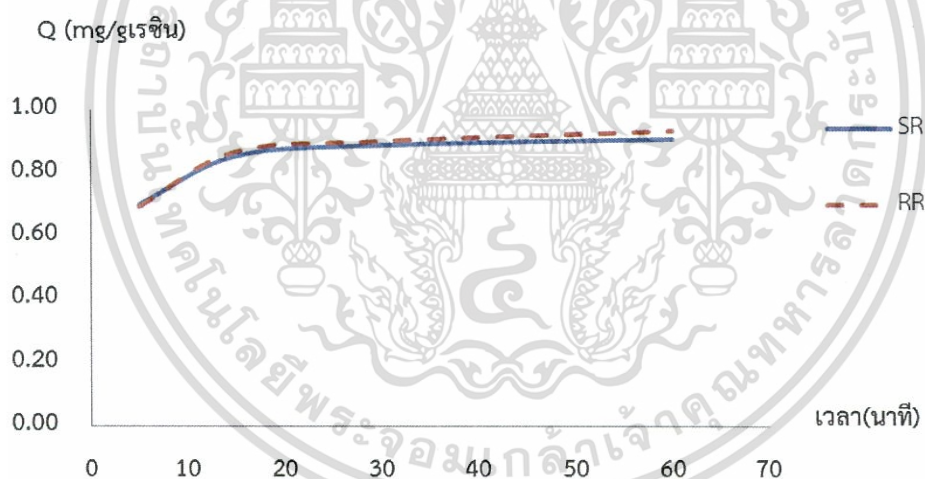
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาไอโซเทอร์มจากน้ำเสียสังเคราะห์

ในการหาไอโซเทอร์มของการบำบัดตะกั่วโดยใช้น้ำเสีย A ปริมาตร 25 mL กรณีที่แปรค่าความเข้มข้นของน้ำเสีย A 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 mg/L และกรณีที่แปรค่าปริมาณเรซิน SR และ RR เท่ากับ 0.2, 0.4 และ 0.6 g ทำการเขย่าที่ 120 rpm เพื่อให้สารสัมผัสกันได้ทั่วภาชนะ แต่ไม่เขย่าแรงเพื่อป้องกันการกระทบหรือแตกหักของเรซิน ตลอดการทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส จนเกิดการแลกเปลี่ยนประจุได้เหมาะสมตามระยะเวลาที่ศึกษา โดยทำการหาค่าเวลาและพีเอชที่เหมาะสม

4.3.1 เวลาที่เหมาะสม

การศึกษาเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดจนถึงภาวะสมดุล ซึ่งทำการทดลองโดยใช้ SR และ RR ทำการแปรค่าเวลาที่ใช้ในการบำบัดคือ 5, 15, 30 และ 60 นาที ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสีย A เริ่มต้น 10 mg/L อัตราส่วนของเรซินต่อน้ำเสียเท่ากับ 8, 16 และ 24 g/L แล้ววิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่วที่เหลืออยู่และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Q เฉลี่ย และเวลาที่ใช้ในการบำบัดได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 การคำนวณค่า Q ดังตัวอย่างในภาคผนวก จ



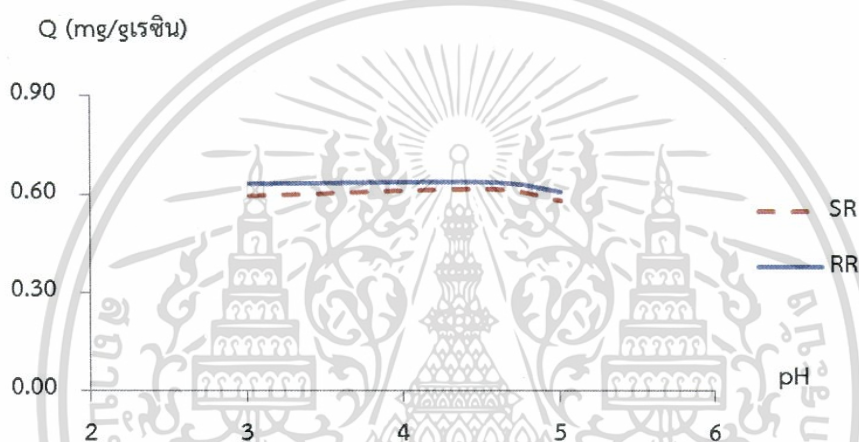
รูปที่ 4.1 ค่าการบำบัดตะกั่วของ SR และ RR ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของ SR และ RR เกือบซ้อนทับกันแสดงว่าเกิดการแลกเปลี่ยนคล้ายคลึงกัน ซึ่งค่าการบำบัดตะกั่วในช่วง 5-15 นาทีแรก เกิดการดูดซับทางเคมีจากการแลกเปลี่ยนประจุของ Ca^{2+} บนหมู่ฟังก์ชันของ SR หรือ การแลกเปลี่ยนประจุของ H^+ บนหมู่ฟังก์ชันของ RR กับไอออนของตะกั่วในน้ำเสียเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อผ่านเวลา 15 นาทีไปแล้วการดูดซับน้อยลงอย่างช้าๆ เพราะมีพื้นที่ในการดูดซับน้อยลง และจะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดตะกั่วคือ 30 นาที จึงนำเอาเวลาดังกล่าวไปทำการทดลองในทุกการทดลอง ดูรายละเอียดผลการทดลองดังภาคผนวก ง (ตารางที่ ง -1, ง -2)

4.3.2 พีเอชที่เหมาะสม

การศึกษาเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัด ซึ่งทำการทดลองโดยใช้ SR และ RR ทำการแปรค่าพีเอชที่ 3, 4 และ 5 ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสีย A เริ่มต้น 10 mg/L อัตราส่วนของเรซินต่อน้ำเสียเท่ากับ 8, 16 และ 24 g/L แล้ววิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่วที่เหลืออยู่และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q เฉลี่ย และพีเอชที่ใช้ในการบำบัดได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2 โดยให้ระยะเวลาสัมผัสเป็น 30 นาทีตามผลจากข้อ 4.3.1



รูปที่ 4.2 ผลของค่าพีเอชต่อการบำบัดตะกั่วของ SR และ RR

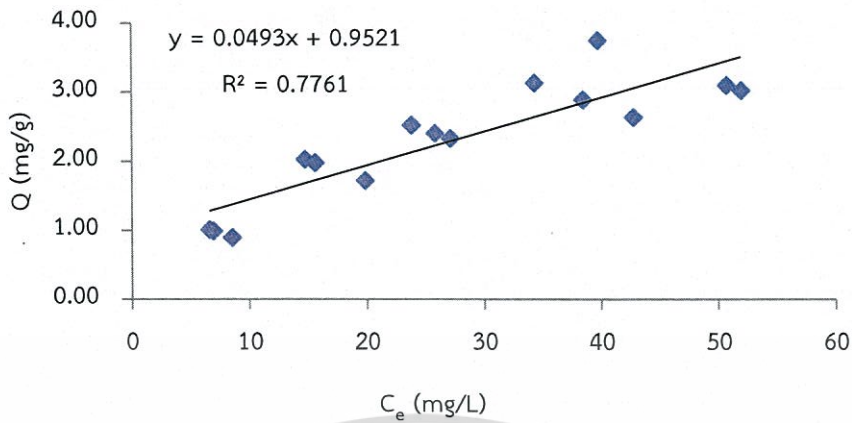
จากรูปที่ 4.2 เห็นได้ว่าเส้นกราฟของ SR และ RR เกือบซ้อนทับกันแสดงว่าเกิดการแลกเปลี่ยนคล้ายกัน ซึ่งค่าพีเอชมีผลต่อการบำบัดตะกั่วโดยการดูดซับด้วยเรซิน พบว่าเมื่อค่าพีเอช ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดตะกั่วต่ำลง เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้น H^+ มากขึ้นซึ่งเป็นคู่แข่งของ Pb^{2+} ในการเข้าแลกเปลี่ยนประจุกับเรซิน สำหรับการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชที่ทำการทดลองไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างพีเอชที่ 3, 4 และ 5 (พีเอชเดิม) ของน้ำเสียสังเคราะห์ จึงใช้พีเอช 5 ในการทดลองในขั้นต่อไป เพื่อเป็นการลดการใช้สารเคมีในการปรับค่าพีเอช ลดขั้นตอนในการเตรียมน้ำเสียก่อนการบำบัด และลดค่าใช้จ่าย ดูรายละเอียดผลการทดลองได้ในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง -3, ง -4)

4.3.3 กราฟไอโซเทอร์มของน้ำเสียสังเคราะห์

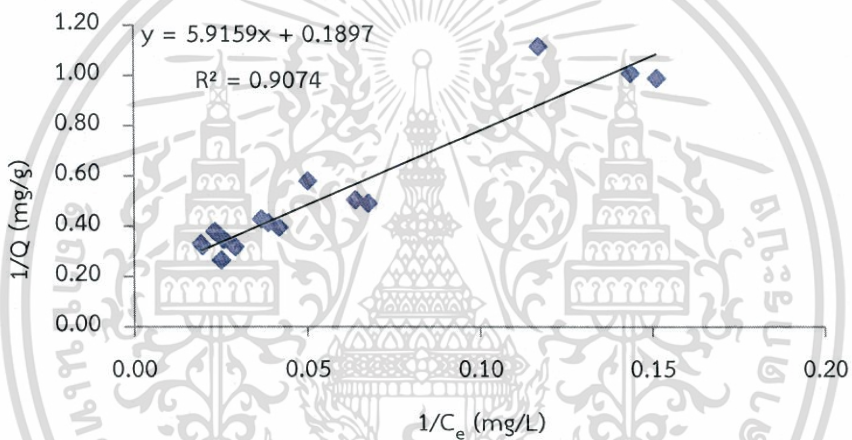
ไอโซเทอร์มจากการแปรค่าความเข้มข้นทำได้โดยการใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ (A) ที่ความเข้มข้น 20 ถึง 100 mg/L ใช้เวลาการสัมผัส 30 นาที และใช้ปริมาณเรซิน 0.4 g ต่อน้ำเสีย 25 mL แล้วนำ

ข้อมูลไปพล็อตความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้น, แบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนด์ลิชของ SR และ RR ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

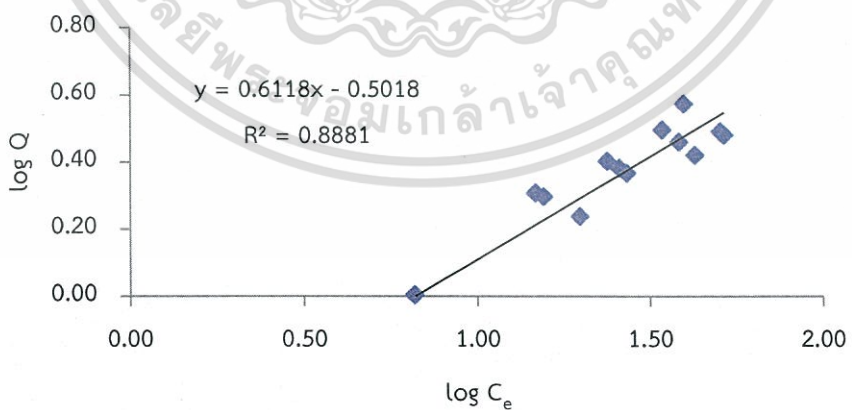
ผลจากการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 สรุปได้ดังตารางที่ 2 พบว่าการบำบัดตะกั่วโดย SR จากไอโซเทอร์มเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 แบบ ดูรายละเอียดผลการทดลองได้ในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง -5, ง -6) พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์มีค่ามากที่สุด ($R^2 = 0.9074$) แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว โดยที่โมเลกุลไม่เกิดการซ้อนทับกันตามข้อสมมุติฐานของแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม จากค่า $q_m = 5.27$ mg/g ซึ่งหมายถึงค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว ส่วนการดูดซับตะกั่วโดย RR เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 แบบ พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนด์ลิชมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งอาจบอกได้ว่าตัวถูกดูดซับสามารถที่เกิดขึ้นในลักษณะเรียงซ้อนกันหลายชั้นและเกิดขึ้นของประจุไฟฟ้าสองชั้น (Electrical Double Layer) ซึ่งก่อนที่นำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมาดูดซับตะกั่ว เรซินอิ่มตัวไปด้วย Ca^{2+} และเมื่อไปดูดซับตะกั่วในสารละลายเกิดการแลกเปลี่ยนประจุโดยทั่วไปของโครงสร้างเรซินบางส่วนถูกแทนที่ด้วย Pb^{2+} การแทนที่เช่นนี้ทำให้เกิดประจุลบที่พื้นผิว ซึ่งเป็นกลางได้โดยการดูดซับประจุบวก จึงมีผลทำให้เกิดชั้นประจุไฟฟ้าสองชั้น ค่า R^2 ของไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิชเท่ากับ 0.7595 จากค่า $K = 3.9755$ mg/g ซึ่งหมายถึงค่าคงที่ของฟรุนด์ลิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ ค่า $1/n$ ของ RR มีค่าน้อยกว่า 1 ($1/n = 0.6642$) แสดงว่าพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนประจุมีจำนวนจำกัด ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิว จากรายละเอียดในตารางที่ 4.3 สามารถนำค่า q_m และสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ได้ไปทำนายหาความสามารถในการดูดซับต่อปริมาณเรซินได้อีกด้วย



ก. กราฟเชิงเส้น



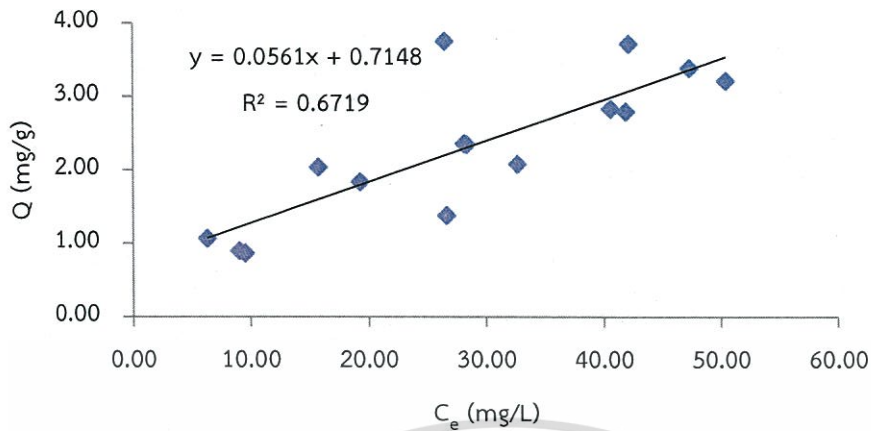
ข. กราฟแบบแลงเมียร์



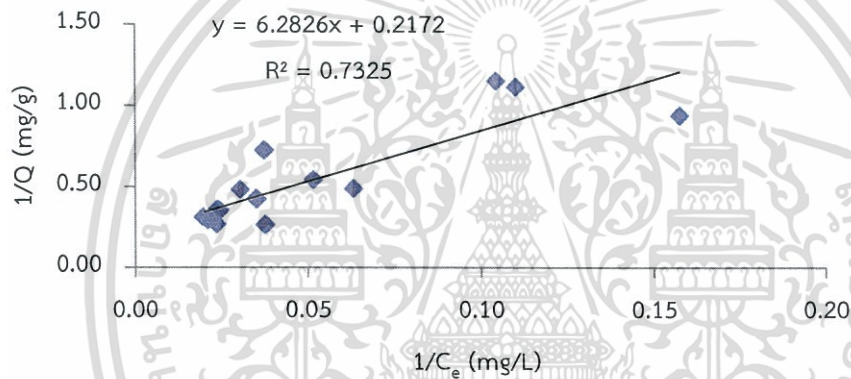
ค. กราฟแบบฟรอนด์ลิช

รูปที่ 4.3 ไอโซเทอร์มของ SR ต่อการบำบัดตะกั่ว

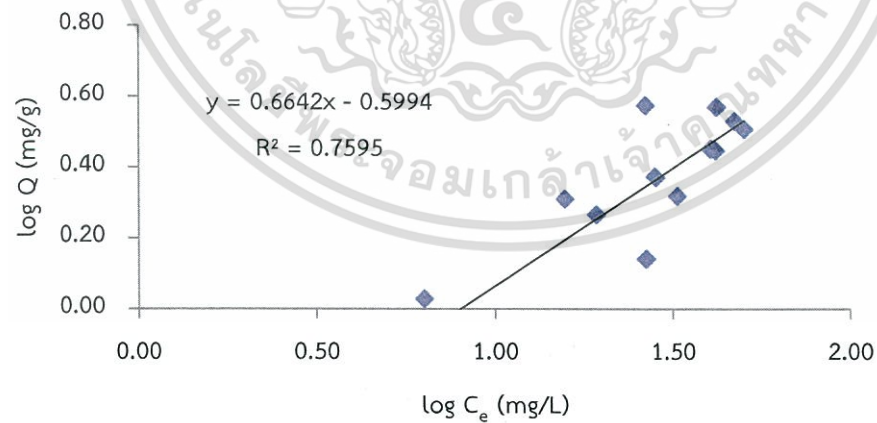
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. กราฟเชิงเส้น



ข. กราฟแบบแลงเมียร์



ค. กราฟแบบฟรุนด์ลิช

รูปที่ 4.4 ไอโซเทอร์มของ RR ต่อการบำบัดตะกั่ว

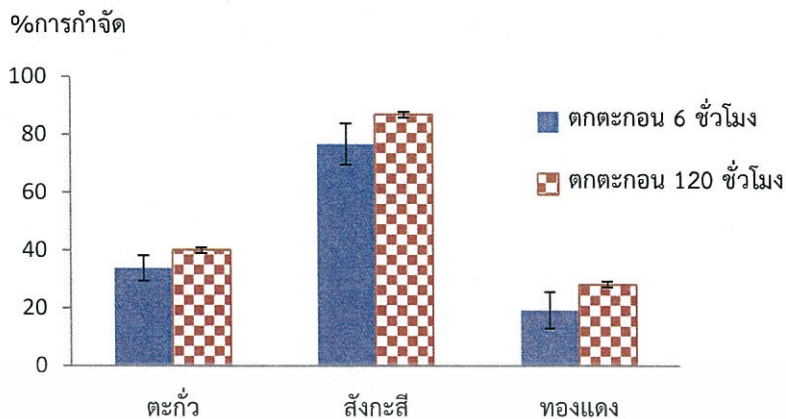
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์กราฟไอโซเทอร์มของความเข้มข้นตะกั่วกับการบำบัดด้วย SR และ RR

เรซิน	ความสัมพันธ์	สมการ	R ²	ค่าคงที่การดูดซับ
SR	เชิงเส้น	$Q = 0.0493 C_e + 0.9521$	0.7761	$K_d = 0.0493$
	แลงเมียร์	$1/Q = 5.9159(1/C_e) + 0.1897$	0.9074	$b = 0.0321$ $Q_m = 5.27 \text{ mg/g}$
	ฟรุนด์ลิช	$\log Q = 0.6118(\log C_e) - 0.5018$	0.8881	$1/n = 0.6118$ $K = 3.1754$
RR	เชิงเส้น	$Q = 0.0561 C_e + 0.7148$	0.6719	$K_d = 0.0561$
	แลงเมียร์	$1/Q = 6.2826(1/C_e) + 0.2172$	0.7325	$b = 0.0345$ $Q_m = 4.60 \text{ mg/g}$
	ฟรุนด์ลิช	$\log Q = 0.6642(\log C_e) - 0.5994$	0.7595	$1/n = 0.6642$ $K = 3.9755$

4.4 การบำบัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

ในการศึกษาไอโซเทอร์มเลือกเฉพาะ Pb เป็นตัวแทนการแลกเปลี่ยนซึ่งเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ตามหลักมวลสารสัมพันธ์ สารที่เข้าทำปฏิกิริยาหรือแลกเปลี่ยนประจุต้องมีจำนวนสมมูล (Equivalent) เท่ากัน ดังนั้นใช้ค่าจำนวนสมมูลที่คำนวณได้จากไอโซเทอร์มสามารถนำมาประมาณการบำบัดได้ การบำบัดโลหะหนักด้วยการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมเมตะไบซัลไฟด์เป็นสารตกตะกอน ด้วยการใช้น้ำเสีย C เป็นน้ำที่ได้จากห้องปฏิบัติการที่มีการคัดแยกเฉพาะน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก โดยทั่วไปเป็นน้ำเสียจากการวิเคราะห์ที่มีการใช้กรดแต่ไม่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนซึ่งทำให้ไม่มีตัวรบกวนในการตกตะกอน โดยทำการศึกษาริงเวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนโลหะหนัก ในการทดลองขั้นต้นเติมโซเดียมเมตะไบซัลไฟด์ 1 g และเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับค่าพีเอชให้มีค่า 11.5 (± 0.02) ทำการทดลองแบบจาร์เทสต์ ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ 120 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะหนักกับเวลาในการตกตะกอนดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลของเวลากับการบำบัดโลหะหนัก

จากรูปที่ 4.5 เห็นได้ว่าการตกตะกอน 6 ชั่วโมง และ 120 ชั่วโมงมีเปอร์เซ็นต์การบำบัดโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากวิธี T-Test ดูรายละเอียดผลการทดลองได้ในภาคผนวก จ (ตารางที่ จ -1) แต่การตกตะกอน 120 ชั่วโมงจะให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดมากกว่าเวลา 6 ชั่วโมงเล็กน้อย จึงเลือกเวลาตกตะกอนที่ 6 ชั่วโมงเนื่องจากเวลานั้นเหมาะสมในการทำการทดลองต่อไปและมีขั้นตอนสั้นลงไม่ยุ่งยาก นำค่าเวลาจากการตกตะกอนไปทำการตกตะกอนน้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการเพื่อนำไปทำการบำบัดโดยวิธีการบำบัดแบบคอลัมน์ในขั้นตอนถัดไป ดูรายละเอียดผลการทดลองได้ในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง -7, ง -8)

4.5 สมบัติของน้ำเสียที่บำบัดผ่านคอลัมน์

น้ำเสียที่นำมาทำการทดลองแบบคอลัมน์นำมาจากห้องปฏิบัติการเคมี ศึกษาศาสตร์ ชั้น 5 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับการทดลองแบบคอลัมน์ ลักษณะทางกายภาพ มีสีเหลืองอมเขียวใสมีตะกอนแขวนลอย มีกลิ่นเล็กน้อย แต่เนื่องจากปริมาณน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีมีจำนวนจำกัดเราจึงทำการทดลองโดยนำน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีมา 2 ชุด ซึ่งชุดที่ 1 จะเรียกว่าน้ำเสีย B ส่วนชุดที่ 2 จะเรียกว่าน้ำเสีย C โดยมีปริมาณโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดดังตารางที่ 4.4

การใช้ความเข้มข้นของโลหะในหน่วย eq/L สามารถนำมาอธิบายการแลกเปลี่ยนประจุของโลหะหนักได้โดยใช้มวลสารสัมพันธ์ในการรายงานผลจึงใช้ทั้ง 2 หน่วย เพื่อคำนวณและเทียบค่ากับค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง จากตารางที่ 4.4 เห็นได้ว่า B₁, C₁ และ C₂ ไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง เช่นค่า pH ของน้ำเสีย B₁ มีค่าเป็นกรดแก่ (pH 1.53) แต่เมื่อผ่านคอลัมน์ SR มีฤทธิ์เป็นเบส (pH 5.53) อาจเป็นเพราะความเป็นกรดหรือ H⁺ เข้าไปแลกเปลี่ยนประจุยึดกับเรซินให้ Ca²⁺ หลุดออกมาในสารละลายค่า pH จึงเพิ่มขึ้น ส่วนน้ำทิ้ง B₂ และ C₃ จะเห็นได้ว่ามีค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งทั้งค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า ค่า TDS และค่าปริมาณโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด (Pb < 0.2 mg/L , Zn <

5.0 mg/L และ $\text{Cu} < 2.0 \text{ mg/L}$) ส่วนค่า ORP ของ B_1, B_2, C_1, C_3 ที่เป็นบวกนั้นเท่ากับว่าในน้ำมีตัวออกซิไดส์อยู่เป็นจำนวนมาก มีเพียงค่า ORP ของ C_2 ที่มีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายถึงมีตัวรีดิวซ์อยู่ แสดงถึงจำนวนอิเล็กตรอนประจุลบที่อยู่ในน้ำ เนื่องจาก C_2 เป็นน้ำที่ผ่านการตกตะกอนด้วยการเติมโซเดียมเมตะไบซัลไฟต์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เมื่อตกตะกอนแล้ว S^{2-} ของโซเดียมเมตะไบซัลไฟต์เข้าทำปฏิกิริยากับ Pb, Zn และ Cu เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดย S^{2-} เป็นตัวรีดิวซ์ ทำให้ค่า ORP มีค่าติดลบด้วย

ตารางที่ 4.4 ปริมาณโลหะหนักที่ผ่านกระบวนการต่างๆ

ชนิดน้ำเสีย/ พารามิเตอร์	B_1	B_2	C_1	C_2	C_3
pH	1.53 (±0.01)	5.53 (±0.01)	1.30 (±0.02)	11.61 (±0.05)	6.97 (±0.80)
ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	24.6 (±0.02)	7.02 (±0.02)	37.80 (±0.01)	17.22 (±0.25)	9.55 (±0.14)
TDS (g/L)	12.30 (±0.01)	3.52 (±0.01)	18.86 (±0.01)	8.68 (±0.11)	4.77 (±0.05)
ORP (mV)	599.6 (±2.03)	371.93 (±96.91)	463.70 (±0.93)	-87.7 (±0.88)	91.57 (±15.48)
[Pb] (eq/L)	3.00×10^{-6} (±0.01)	2.44×10^{-7} (±0.01)	13.04×10^{-6} (±0.01)	8.06×10^{-6} (±0.01)	17.4×10^{-7} (±0.01)
(mg/L)	0.31 (±0.01)	0.13 (±0.01)	1.35 (±0.01)	0.74 (±0.01)	0.18 (±0.01)
[Zn] (eq/L)	3.3×10^{-5} (±0.02)	18.34×10^{-7} (±0.02)	19.28×10^{-6} (±0.02)	4.58×10^{-6} (±0.02)	2.14×10^{-6} (±0.02)
(mg/L)	1.08 (±0.01)	0.06 (±0.02)	0.63 (±0.01)	0.16 (±0.02)	0.07 (±0.02)
[Cu] (eq/L)	8.18×10^{-6} (±0.01)	0.00 (±0.01)	16.52×10^{-5} (±0.01)	13.4×10^{-5} (±0.01)	4.16×10^{-5} (±0.01)
(mg/L)	0.26 (±0.02)	0.02 (±0.02)	3.43 (±0.01)	2.24 (±0.02)	1.32 (±0.01)

หมายเหตุ * B_1 = น้ำเสียจริงตัวอย่างที่ 1 * B_2 = น้ำเสียจริงที่ผ่านการบำบัดแบบคอลัมน์ที่เวลา 180 นาที

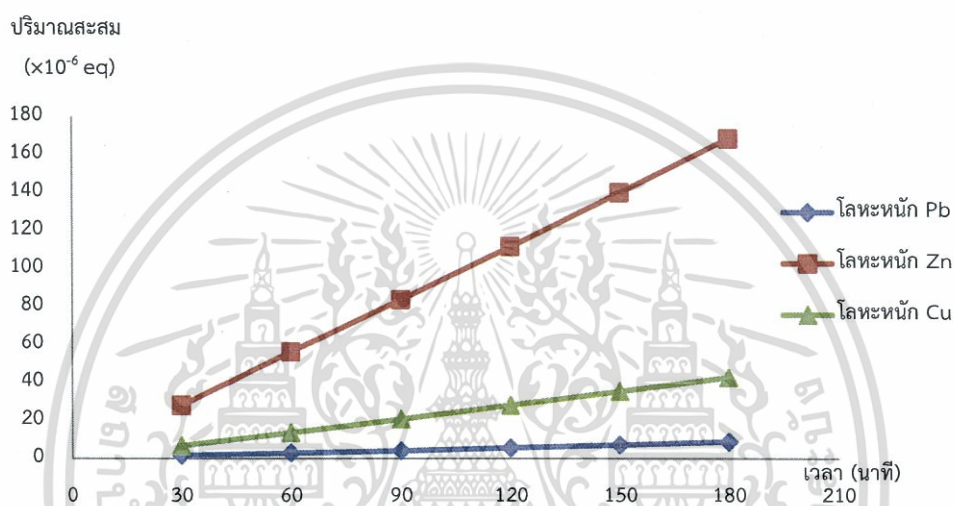
* C_1 = น้ำเสียจริงตัวอย่างที่ 2 * C_2 = น้ำเสียจริงที่ผ่านการบำบัดโดยการตกตะกอน

* C_3 = น้ำเสียจริงที่ผ่านการตกตะกอนและผ่านการบำบัดแบบคอลัมน์ที่เวลา 180 นาที

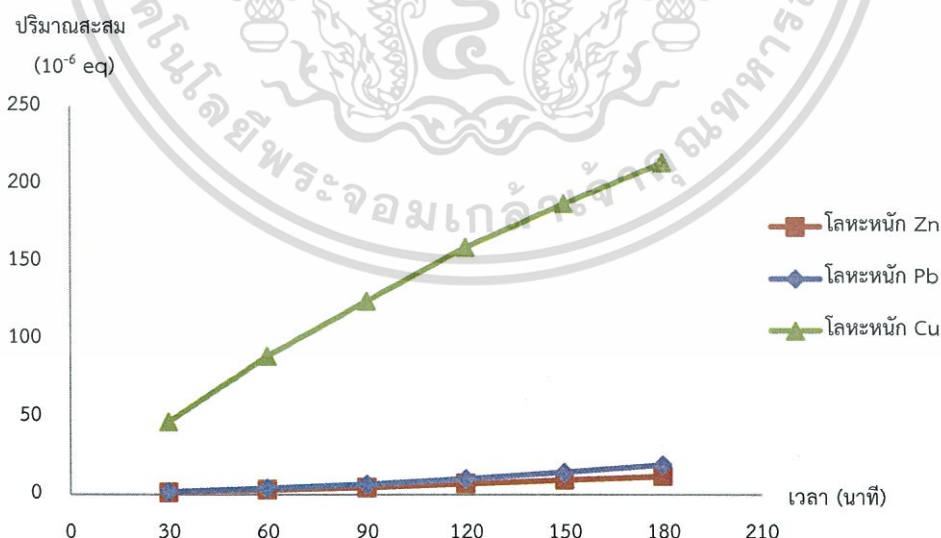
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การบำบัดโลหะหนักโดยผ่านคอลัมน์เรซิน

ในการทดลองแบบคอลัมน์ใช้น้ำเสียที่ไม่ผ่านการตกตะกอน B₁ และน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนนำไปบำบัดโดยคอลัมน์ PVC ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 50 เซนติเมตร ที่บรรจุเรซินหนัก 2000 g ที่มีความสูง 14 เซนติเมตร ในอัตราการไหลเท่ากับ 30 mL/min อัตราการไหลนี้ให้ระยะเวลาที่น้ำเสียสัมผัสเรซิน (Contact time) ได้มากกว่า 30 นาที เพื่อให้ได้เวลาที่เหมาะสมตามผลการทดลองไอโซเทอร์ม ดูตัวอย่างการคำนวณดังภาคผนวก ง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7

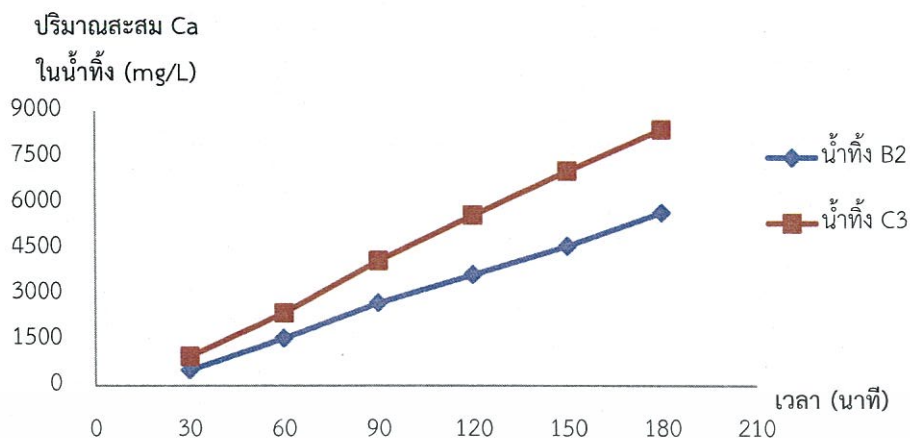


รูปที่ 4.6 ผลของเวลากับปริมาณโลหะหนัก สะสมใน SR ของน้ำเสีย B₁



รูปที่ 4.7 ผลของเวลากับปริมาณโลหะหนัก สะสมใน SR ของน้ำเสีย C₂

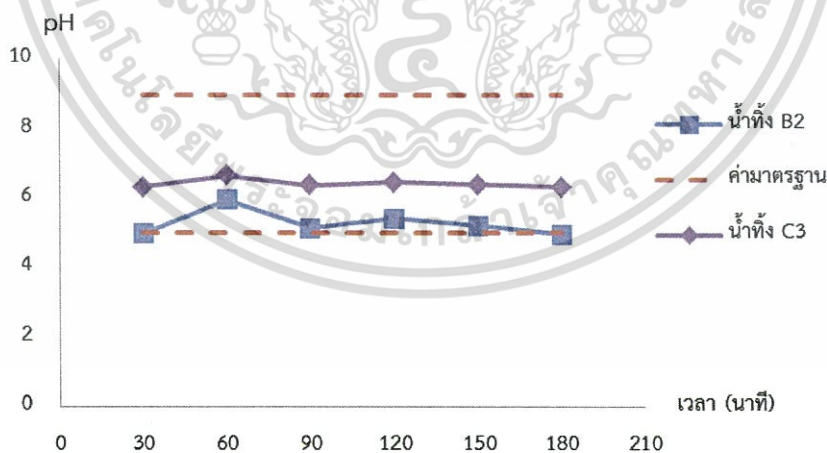
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



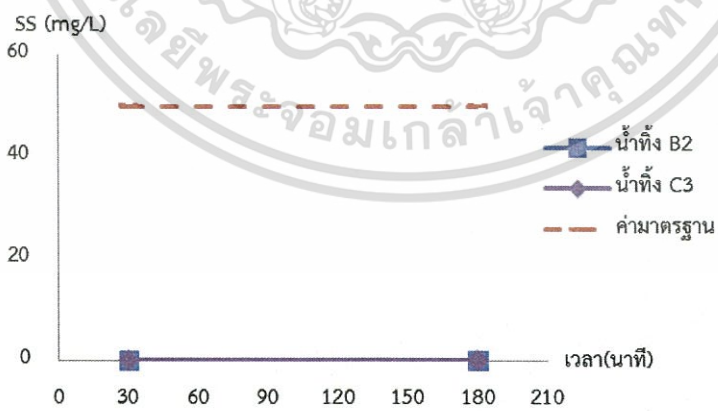
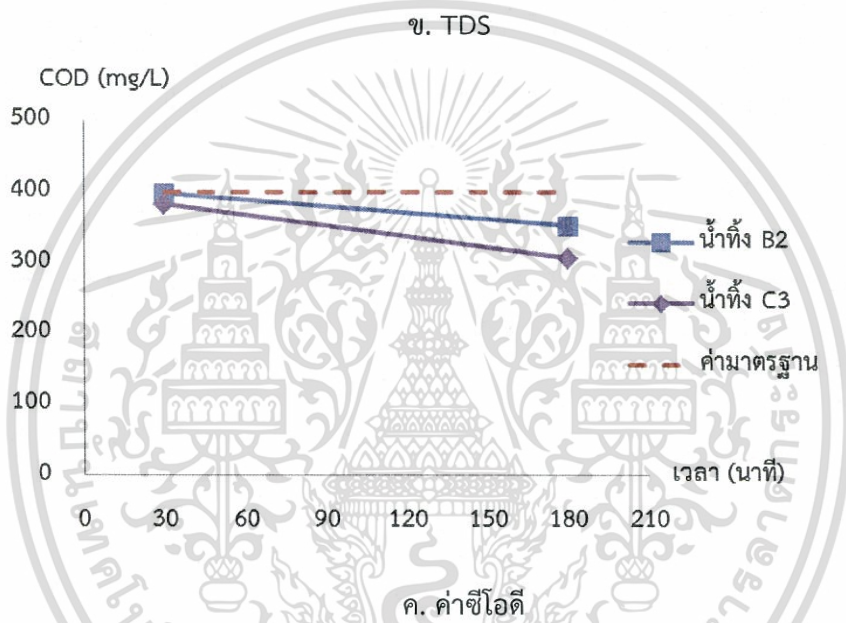
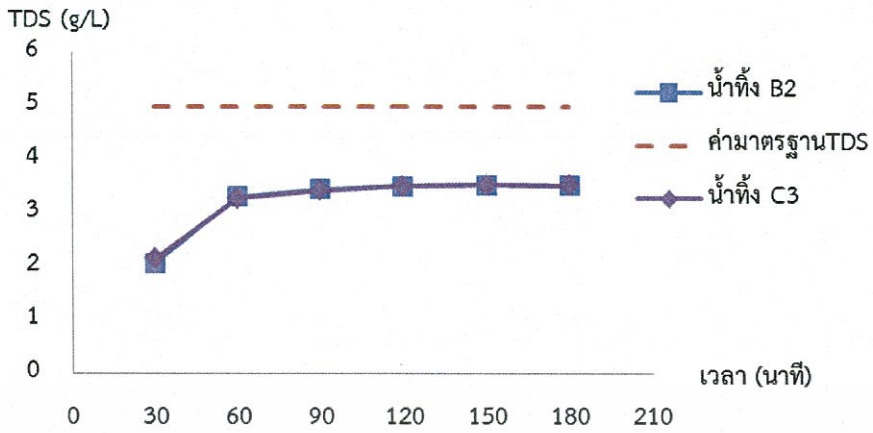
รูปที่ 4.8 ปริมาณแคลเซียมที่สะสมในเวลา 30 – 180 นาที

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 พบว่าใน SR ของน้ำเสียจริง มีการแลกเปลี่ยนประจุและเกิดการสะสมของ $Zn > Cu > Pb$ ตามลำดับ ส่วนในน้ำเสียตกตะกอน พบว่าใน SR มีการแลกเปลี่ยนประจุและเกิดการสะสมของ $Cu > Pb > Zn$ ตามลำดับ เนื่องจากน้ำเสียจริงและน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนมีความเข้มข้นเริ่มต้นของปริมาณโลหะทั้งสามชนิดที่แตกต่างกันจึงทำให้ปริมาณโลหะที่สะสมในเรซินนั้นต่างกัน

จากรูปที่ 4.8 อธิบายได้ว่าโลหะหนักเกิดการแลกเปลี่ยนกับ Ca ทำให้ Ca หลุดออกมาในน้ำเสีย B₂ และ C₃ เมื่อดูจากกราฟปริมาณสะสมจะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปแคลเซียมก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



ก. พีเอช



ง. ค่าของแข็งที่แขวนลอย

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของน้ำทิ้งกับค่ามาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสรุปได้ว่าสามารถบำบัดค่าโลหะหนักของน้ำเสียจริงและน้ำเสียตกตะกอน (ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี) ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539) เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงาน อุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ดังภาคผนวก ข นอกจากนี้ยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานในด้านนี้เกี่ยวกับ ค่าพีเอช ค่าTDS ค่าสารแขวนลอย อุณหภูมิ สีหรือกลิ่น และค่าซีโอดี ดังรูปที่ 4.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วพบว่าการดูดซับเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที และพีเอชที่เลือกใช้ในการศึกษา คือ พีเอช 5 หรือพีเอชเดิมของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 10 mg/L มีค่าประสิทธิภาพในการบำบัด 99.14 % การวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของการดูดซับโดยแปรค่าความเข้มข้นตั้งแต่ 20-100 mg/L พบว่าการดูดซับของ SR ข้อมูลสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอร์มของแลงเมียร์โดยมีสมการ $y = 5.9159X + 0.1897$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9074 มีค่าการดูดซับสูงสุด (Q_m) = 5.27 mg/g ของเรซิน ส่วน RR ข้อมูลสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอร์มของฟรุนด์ลิชโดยมีสมการ $y = 0.6642X - 0.5994$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.7595 การศึกษาการบำบัดโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการ พบว่าเวลาในการตกตะกอนที่เหมาะสมเท่ากับ 6 ชั่วโมง สุดท้ายการบำบัดโลหะหนักของน้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการและน้ำเสียจริงที่ผ่านการตกตะกอนด้วยวิธีการแบบคอลัมน์พบว่าสามารถบำบัดโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดที่สนใจให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้

ดังนั้นการศึกษาก็ได้นำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว และเรซินที่นำมารีเจนเนอร์เรต มาบำบัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ และนำมาประยุกต์ในการบำบัดน้ำเสียจริงซึ่งมีโลหะที่ศึกษาคือ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี จึงทำให้เป็นแนวทางในการนำเรซินชนิดนี้ไปพัฒนาต่อ และประยุกต์ใช้ในทางบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียของอุตสาหกรรม นอกจากนี้จะนำมากำจัดความกระด้างในน้ำหรือทำให้น้ำสะอาดเพียงอย่างเดียว และยังเป็นการเพิ่มประโยชน์ของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ให้เกิดความคุ้มค่าได้มากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักชนิดอื่นเพื่อเปรียบเทียบความจำเพาะเจาะจงกับตะกั่ว
- ควรศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเรซินเพื่อเปรียบเทียบผลวิจัย
- จากงานวิจัยซึ่งทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด ควรศึกษา พัฒนาเป็นแบบ Two Stage รองรับน้ำเสียที่เข้มข้นมากให้น้ำเสียผ่านเรซินจนกว่าจะผ่านค่ามาตรฐานน้ำทิ้งได้

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. คู่มือปฏิบัติงาน กระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี. แก้ไขครั้งที่ 01. กันยายน 2553.
- กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์, กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และ สุวรรณิ จรรยาพูน. 2557. ปฏิบัติการเคมี สิ่งแวดล้อมสำหรับดินและอากาศ. กรุงเทพมหานคร โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า (11-1) - (11-10).
- คณะอนุกรรมการความปลอดภัยและอนามัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล. 2555. แนวปฏิบัติด้าน อนามัยสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย มหาวิทยาลัยมหิดล. พิมพ์ครั้งที่ 1 กุมภาพันธ์ 2555.[Online].(เข้าถึงเมื่อวันที่ 29 เมษายน 2559).Available :<https://www.mahidol.ac.th/green/pdf/Environmental-Safety.pdf>
- จิราพร ภูเขาจารย์, ญัฐธัญดา คำมณีวณิชวงศ์ และ อริสรา สวาทพงษ์. 2557. การบำบัดแคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์แบบคอลัมน์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จิตยา วสุนธราภิวัฒก์, ตรีรัตน์ ตรีคุณรุ่งเรือง และ ธาพิดา พรหมศร. 2552. การจัดการของเสีย อันตรายในห้องปฏิบัติการประเภทโลหะหนัก. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี ทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุกรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทาง เคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 281 หน้า.
- ประเสริฐ อัครมงคลพร. 2552. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนทางเภสัชกรรมเพื่อการนำส่งยา. พิมพ์ครั้งที่ 1, มิถุนายน 2552.
- มงคล ดำรงค์ศรี. 2559. การบำบัดน้ำเสียของโรงงาน SME ประเภทชุบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการ ตกตะกอนทางเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และ มันรัชช์ ตัณฑุลเวศม์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 608 หน้า.
- รุจา สุวรรณสุข, วชิระ พิมพ์ปราโมทย์ และ อานนท์ จริญนรเศรษฐ์. 2556. การกำจัดแคดเมียมในน้ำ เสียสังเคราะห์ด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว. สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ลลิตา แสงอาทิตย์. 2554. การดูดซับยาปฏิชีวนะ Norfloxacin โดยเถ้าแกลบที่ pH 5-8. สาขา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

- วรวิทย์ จันทรสุวรรณ และ ประเทืองทิพย์ โรจนวิภาต. 2556. การดูดซับไอออนโลหะหนักในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมีด้วยอิฐมอญ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- วาดวัน สิงหพงษ์, วิษะวานี บุญคุ้ม และ อภิรักษ์ โฮจิ้น. 2556. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียชุมชนด้วยตะกอนสารส้มแบบคอลัมน์. สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2557. ระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป. 648 หน้า.
- อนิสา ทรัพย์นิวัตต์, มณฑล ฐานุตตมวงศ์ และ อรรณพ หอมจันทร์. 2556. การบำบัดน้ำปนเปื้อนโลหะหนักด้วยเปลือกหอยผสมธรรมชาติ (กระช้ำ). การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9, หน้า 411-418.
- อมรา ดาวโธสง. 2550. การดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- Nicolas Reynier, Lucie Coudert, Jean-François Blais, Guy Mercier and Simon Besner. 2015. Treatment of contaminated soil leachate by precipitation, adsorption and ion exchange. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 3. (2015), 977-985.
- Ruey-Shin Juang, Su-Hsia Lin, Hsiang-Chien Kao and Ming-Huei Theng. 2004. Effect of formaldehyde on Cu(II) removal from synthetic complexed solutions by ion exchange. *Chemosphere* 59 (2005), 1355-1360.
- Teng Zhang, Zebin Dong, Fei Qu, Fazhu Ding, Xingyu Peng, Hongyan Wang and Hongwei Gu. 2014. Removal of CdTe in acidic media by magnetic ion-exchange resin: A potential recycling methodology for cadmium telluride photovoltaic waste. *Journal of Hazardous Materials* 279. (2014), 597-604.
- U.S. EPA, 1996. METHOD 3050B. ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES AND SOILS. Revision 2. December 1996.
- Wanpen Wirojanagud. 2011. Chemical Wastewater Treatment Process Vientiane Capital City. June 13, 2011.
- Xuwei Hu, Kai Chen, Xinke Lai, Qi Yao, Siping Ji and Kevin Kaiser. 2016. Treatment of Pretreated Coal Gasification Wastewater (CGW) by Magnetic Polyacrylic Anion Exchange Resin. *Journal of environmental chemical engineering*.
- Xu-Jian Zhou, Alfons Buekens, Xiao-Dong Li, Ming-Jiang Ni and Ke-Fa Cen. 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Adsorption of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans on activated carbon from hexane. *Chemosphere* 144 (2016) 1264–1269.

Yogeshwar N. Thakare and Arun Kumar Jana. 2015. Performance of high density ion exchange resin (INDION225H) for removal of Cu(II) from waste water. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 3. (2015), 1393–1398.

Zeng-YeiHseu. 2004. Evaluating heavy metal contents in nine composts using four digestion methods. *Bioresource Technology* 95 (2004) 53-59.

[Online].(เข้าถึงเมื่อวันที่ 26 มีนาคม 2559). Available :http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ecology/chapter3/chapter3_water13.htm

[Online].(เข้าถึงเมื่อวันที่ 26 มีนาคม 2559). Available :

http://thaipollutions.blogspot.com/2013/02/blog-post_16.html

[Online].(เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 เมษายน 2559). Available : http://digi.library.tu.ac.th/thesis/st/0149/10CHAPTER_2.pdf

[Online].(เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 เมษายน 2559). Available : <https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการทดลอง

1. วิธีการหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

ชั่งเรซิน (น้ำหนักเปียก) 5-10 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มล.
เติม 1 M pH 7.0 NH_4OAc 50 มล. เขย่า ทิ้งไว้ค้างคืน
กรองด้วยกรวยบุชเนอร์ (Buchner Funnel) โดยใช้กระดาษกรอง Whatman No.42

ล้างตัวอย่างเรซินด้วย 1 M NH_4OAc pH 7.0 ทีละน้อย ประมาณ 100 มล.
จากนั้นล้างต่อด้วย 1 M NH_4OAc pH 7.0 อีก 5 ครั้งๆ ละประมาณ 20 มล.

ล้างต่อด้วย 1 M NH_4Cl pH 7.0 5 ครั้งๆ ละประมาณ 20 มล.
และ 0.25 M NH_4Cl pH 7.0 ประมาณ 20 มล. 1 ครั้ง

ล้างด้วย Ethyl alcohol 95% อีก 5-6 ครั้งๆ ละ 20 มล. ฉีดล้างรอบๆ ด้วยน้ำกลั่น จากนั้น
เทสารละลายในขวดกรองทิ้ง (การล้างด้วย alcohol เพื่อล้างแอมโมเนียมส่วนเกินที่เรซิน
ไม่ได้แลกเปลี่ยนออกให้หมด ซึ่งทดสอบได้จากปริมาณคลอไรด์ไม่มีหลงเหลืออยู่ในเรซินโดย
หยดสารละลาย AgNO_3 0.1 M 1-2 หยด ลงในสารละลาย ถ้ามีตะกอนสีขาวเกิดขึ้นแสดงว่า
ยังล้างแอมโมเนียมไม่หมดต้องล้างตัวอย่างเรซินด้วย Ethyl alcohol 95% ต่อไปอีก แล้ว
ทดสอบจนไม่มีตะกอนสีขาวอยู่)

เปลี่ยนขวดกรองใหม่ ล้างเรซินด้วย Acidified NaCl 10% แต่ละครั้งที่ล้างให้ใส่
สารละลายให้ท่วมเรซิน จนกระทั่งได้สารละลายที่กรองได้ประมาณ 300-350 มล.

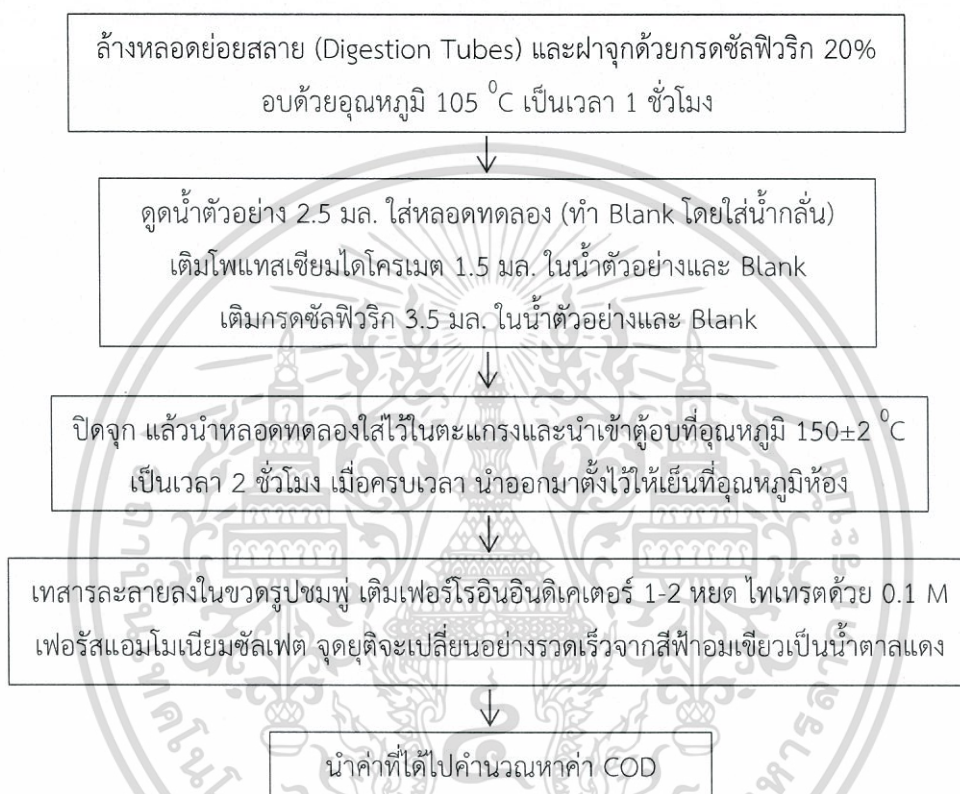
ถ่ายสารละลายที่กรองได้ในขวดกลั่น โดยเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงไปในขวดกลั่นให้
มากเกินพอ (ประมาณ 30 มล.) โดยมีสารละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 3% ใส่ในขวดรูปชมพู่
ขนาด 500 มล. รองรับสารละลายที่กลั่นออกมา จนได้สารละลายประมาณ 250-275 มล.
(ประมาณ 40 นาที)

(ต่อ)

นำสารละลายที่กลั่นได้ในขวดรูปชมพู่มาหยดอินดิเคเตอร์ผสมประมาณ 5 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลายเกลือ 0.1 N ให้สารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง บันทึกปริมาตรแล้วนำไปคำนวณ

2. วิธีการหาซีโอดีโดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด/การไทเทรต (Closed-Reflux, Titrimetric Method)

(จิตยา, 2552)



3. วิธีการหาปริมาณความต่างศักย์โออาร์พี (ORP) (AWWA, 2012)

- เปิดเครื่องที่ปั๊มเปิด เปิดในโหมดมิลลิโวลต์
- จุ่มอิเล็กโทรดในสารละลายมาตรฐาน ZoBell's 2-3 นาทีแล้วบันทึกค่า
- ล้างอิเล็กโทรดให้สะอาด ซับด้วยกระดาษให้แห้ง แล้วจุ่มลงในสารละลายที่ต้องการจะวัด
- อ่านค่าที่ได้ และฉีดล้างด้วยน้ำกลั่น

ภาคผนวก ข

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ตารางที่ ข-1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน	วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	- ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก.ล.	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิวัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น (Color or Odor)	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Titrate
7. ไซยาไนด์ (Cyanide)	ไม่เกิน 0.2มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน	วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์
8. โลหะหนัก		
8.1 สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
8.2 โครเมียม ชนิด เฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25มก./ล.	
8.3โครเมียม ชนิด ไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75มก./ล.	
8.4 ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	
8.5 แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03มก./ล.	
8.6 แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
8.7 ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
8.8 นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
8.9 แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
8.10 อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
8.11 เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	
8.12ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	Atomic Absorption Cold Vapour Technique
9. น้ำมันและไขมัน (Fat oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน	วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์
10. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Spectrophotometry
11. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
12. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Iodometric Method
13. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
14. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน
15. ค่าทีเคเอ็น (TKN) หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	Kjeldahl
16. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion

ที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

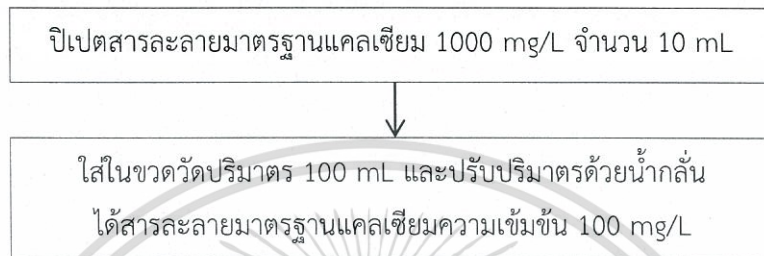
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

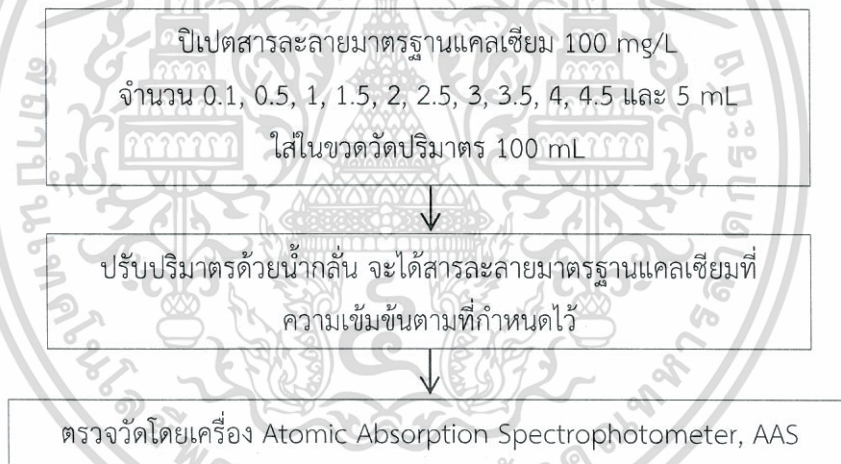
การเตรียมสารมาตรฐาน

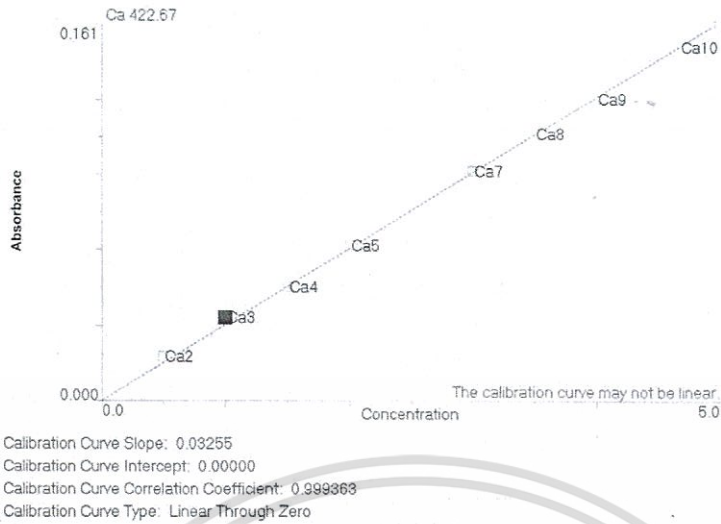
1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานแคลเซียม

1.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแคลเซียมความเข้มข้น 100 mg/L



1.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแคลเซียมความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 และ 5.0 mg/L





รูปที่ ค-1 กราฟมาตรฐานของแคลเซียม

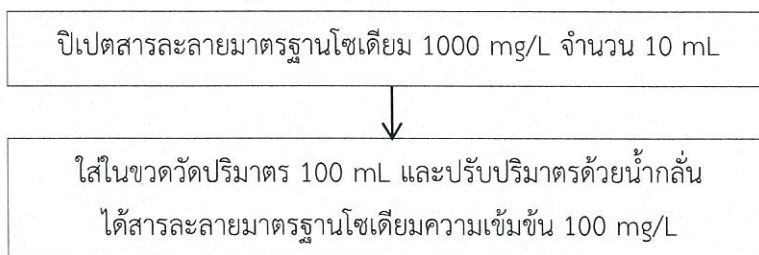
ได้สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น $y = mx + c$ และมีค่า $R^2 = 0.9993$

มีช่วงเส้นตรงที่ตรวจวัดได้ เริ่มจาก 0.50 – 5.00 mg/L

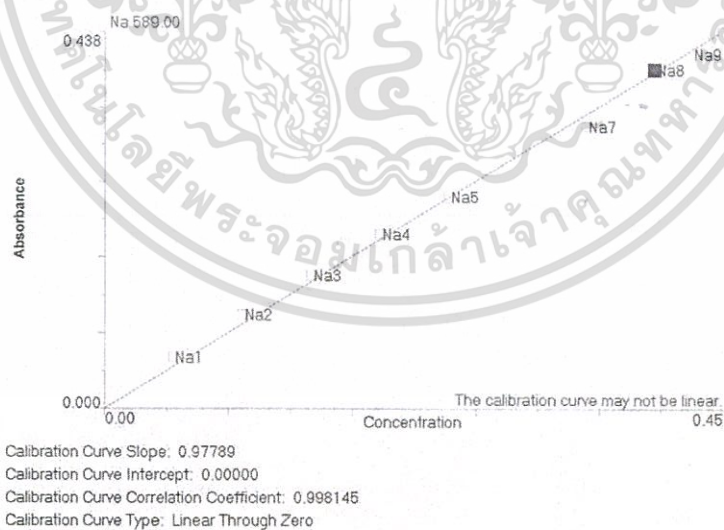
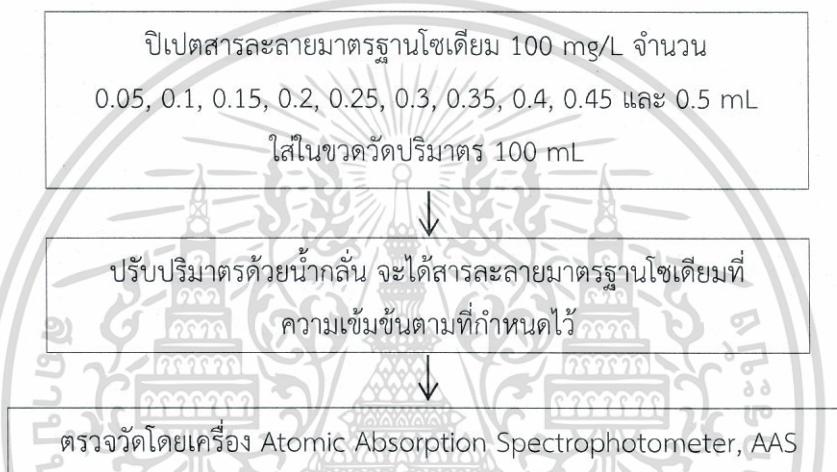
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียม

2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมความเข้มข้น 100 mg/L



2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมความเข้มข้น 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45 และ 0.50 mg/L



รูปที่ ค-2 กราฟมาตรฐานของโซเดียม

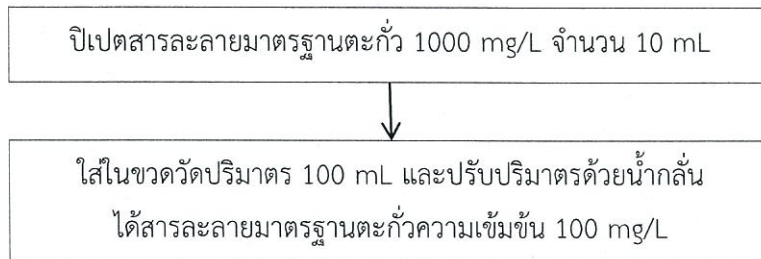
ได้สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น $y = mx + c$ และ มีค่า $R^2 = 0.9778$

มีช่วงเส้นตรงที่ตรวจวัดได้ เริ่มจาก 0.05 – 0.50 mg/L

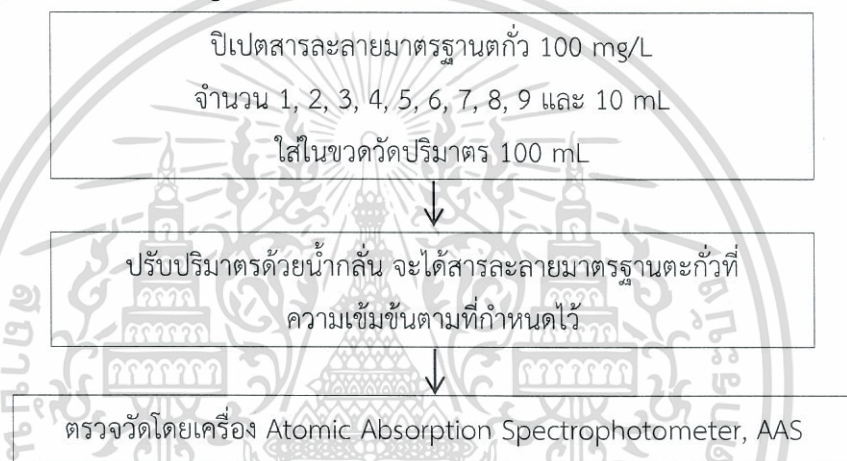
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว

3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 100 mg/L



3.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0 และ 10.0 mg/L



รูปที่ ค-3 กราฟมาตรฐานตะกั่ว

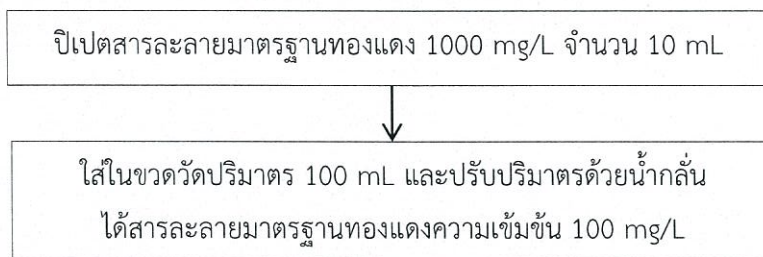
ได้สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น $y = mx + c$ และ มีค่า $R^2 = 0.9996$

มีช่วงเส้นตรงที่ตรวจวัดได้ เริ่มจาก 1 – 10 mg/L

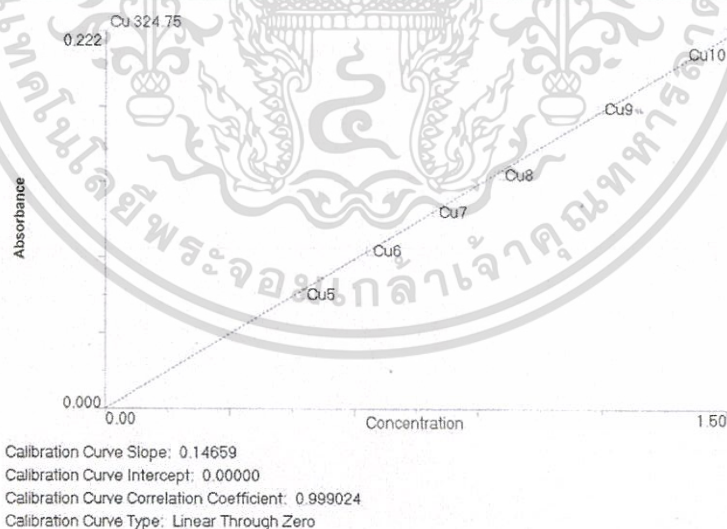
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การเตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดง

4.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 100 mg/L



4.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.48, 0.64, 0.80, 0.96, 1.20 และ 1.50 mg/L



รูปที่ ค -4 กราฟมาตรฐานทองแดง

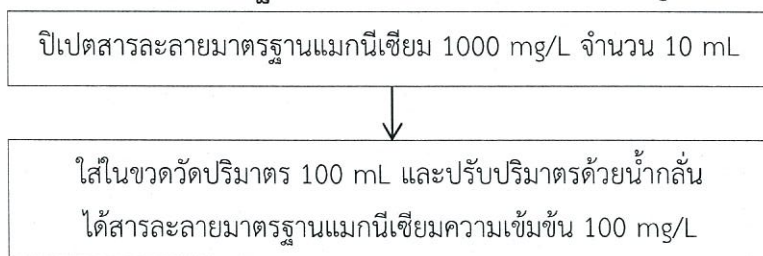
ได้สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น $y = mx + c$ และ มีค่า $R^2 = 0.9990$

มีช่วงเส้นตรงที่ตรวจวัดได้ เริ่มจาก 0.04 – 1.50 mg/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การเตรียมสารละลายมาตรฐานแมกนีเซียม

5.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแมกนีเซียมความเข้มข้น 100 mg/L



5.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแมกนีเซียมความเข้มข้น 0.03, 0.05, 0.07, 0.10, 0.13, 0.15, 0.17, 0.20, 0.23 และ 0.25 mg/L



รูปที่ ค-5 กราฟมาตรฐานแมกนีเซียม

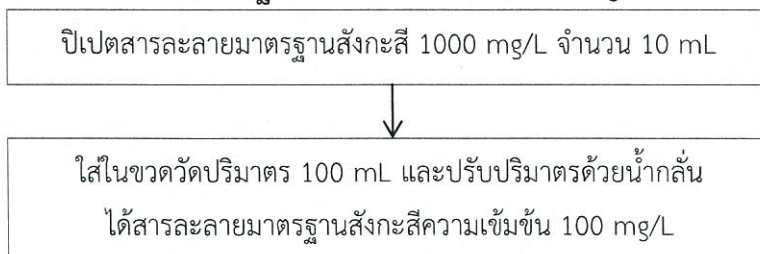
ได้สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น $y = mx + c$ และ มีค่า $R^2 = 0.9960$

มีช่วงเส้นตรงที่ตรวจวัดได้ เริ่มจาก 0.03 – 0.25 mg/L

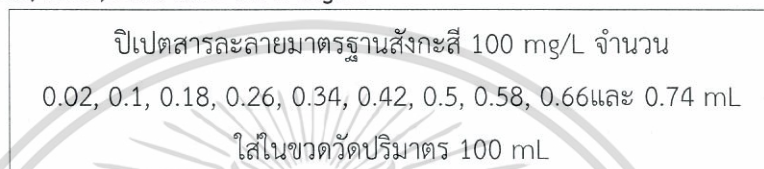
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การเตรียมสารละลายมาตรฐานสังกะสี

6.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 100 mg/L



6.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสังกะสีความเข้มข้น 0.02, 0.10, 0.18, 0.26, 0.34, 0.42, 0.50, 0.58, 0.66 และ 0.74 mg/L



ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานสังกะสีที่
ความเข้มข้นตามที่กำหนดไว้

ตรวจวัดโดยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS



รูปที่ ค-6 กราฟมาตรฐานสังกะสี

ได้สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น $y = mx + c$ และ มีค่า $R^2 = 0.9991$

มีช่วงเส้นตรงที่ตรวจวัดได้ เริ่มจาก 0.02 – 0.74 mg/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ข้อมูลผลการทดลอง

1. ผลการศึกษาไอโซเทอร์มในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว และเรซินที่ผ่านการรีเจนเนอเรตด้วยกรด

1.1 ผลของระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดตะกั่ว

ตารางที่ ง -1 หาเวลาสัมพัทธ์ที่สมดุลโดย SR

เวลา (นาที)	ครั้งที่	C_0	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	C_e	Q (mg/gเรซิน)
5	1	7.42	0.1080	1.78	1.37
	2	8.36	0.1083	3.12	1.05
	3	7.25	0.1094	3.48	0.96
	4	7.42	0.2130	1.36	0.74
	5	8.36	0.2130	4.44	0.38
	6	7.25	0.2157	1.84	0.68
	7	7.42	0.3194	2.41	0.41
	8	8.36	0.3182	1.69	0.47
	9	7.25	0.3181	4.46	0.25
	เฉลี่ย	7.67			
15	1	8.19	0.1082	2.30	1.22
	2	6.98	0.1089	2.26	1.22
	3	7.60	0.1067	2.63	1.16
	4	8.19	0.2123	0.89	0.79
	5	6.98	0.2122	0.65	0.82
	6	7.60	0.2161	0.79	0.79
	7	8.19	0.3183	0.54	0.55
	8	6.98	0.3182	0.38	0.57
	9	7.60	0.3186	0.40	0.56
	เฉลี่ย	7.59			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (นาที)	ครั้งที่	C ₀	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	C _e	Q (mg/gเรซิน)
30	1	6.41	0.1076	1.56	1.18
	2	5.92	0.1084	0.25	1.48
	3	7.65	0.1073	0.18	1.51
	4	6.41	0.2131	0.07	0.77
	5	5.92	0.2125	0.02	0.78
	6	7.65	0.2135	0.08	0.77
	7	6.41	0.3186	0.07	0.52
	8	5.92	0.3206	0.02	0.52
	9	7.65	0.3204	0.63	0.47
	เฉลี่ย	6.66			0.89
60	1	6.67	0.1071	0.02	1.54
	2	5.87	0.1108	0.33	1.42
	3	7.32	0.1073	0.03	1.54
	4	6.67	0.2163	0.00	0.77
	5	5.87	0.2134	1.44	0.61
	6	7.32	0.2136	0.03	0.77
	7	6.67	0.3213	0.00	0.52
	8	5.87	0.3209	0.00	0.52
	9	7.32	0.3211	0.00	0.52
	เฉลี่ย	6.62			0.91

ตารางที่ ๒ -2 หาเวลาสัมผัสที่สมดุลโดย RR

เวลา (นาที)	ครั้งที่	C ₀	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	C _e	Q (mg/gเรซิน)
5	1	7.42	0.1076	4.15	0.82
	2	8.36	0.1100	1.96	1.30
	3	7.25	0.1085	3.29	1.01
	4	7.42	0.2132	3.22	0.52
	5	8.36	0.2147	2.56	0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (นาที)	ครั้งที่	C ₀	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	C _e	Q (mg/gเรซิน)
5	6	7.25	0.2155	2.08	0.65
	7	7.42	0.3193	2.15	0.43
	8	8.36	0.3179	1.68	0.47
	9	7.25	0.3187	1.92	0.45
	เฉลี่ย	7.67			0.69
15	1	8.19	0.1091	2.12	1.25
	2	6.98	0.1096	2.18	1.23
	3	7.60	0.1072	2.19	1.26
	4	8.19	0.2161	0.65	0.80
	5	6.98	0.2141	0.80	0.79
	6	7.60	0.2159	0.70	0.80
	7	8.19	0.3218	0.27	0.57
	8	6.98	0.3206	0.36	0.56
	9	7.60	0.3211	0.69	0.54
	เฉลี่ย	7.59			0.87
30	1	6.41	0.1083	0.20	1.49
	2	5.92	0.1086	0.59	1.40
	3	7.65	0.1087	0.17	1.49
	4	6.41	0.2164	0.06	0.76
	5	5.92	0.2133	0.08	0.77
	6	7.65	0.2146	0.30	0.74
	7	6.41	0.3209	0.00	0.52
	8	5.92	0.3196	0.04	0.52
	9	7.65	0.3223	0.00	0.52
	เฉลี่ย	6.66			0.91
60	1	6.67	0.1094	0.00	1.51
	2	5.87	0.1082	0.00	1.53
	3	7.32	0.1066	0.05	1.54
	4	6.67	0.2148	0.00	0.77
	5	5.87	0.2166	0.00	0.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (นาทื)	ครั้งที่	C ₀	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	C _e	Q (mg/gเรซิน)
60	6	7.32	0.2166	0.00	0.76
	7	6.67	0.3197	0.00	0.52
	8	5.87	0.3230	0.00	0.51
	9	7.32	0.3229	0.09	0.51
	เฉลี่ย	6.62			0.94

1.2 พีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดตะกั่ว

ตารางที่ ง -3 ผลของพีเอชต่อการบำบัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดย SR ที่พีเอช 3, 4 และ 5

พีเอช	ครั้งที่	C ₀	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	C _e	Q (mg/gเรซิน)
3	1	6.62	0.1063	2.91	0.90
	2	7.25	0.1077	3.17	0.82
	3	6.30	0.1090	2.92	0.87
	4	6.62	0.2137	2.73	0.47
	5	7.25	0.2151	1.80	0.57
	6	6.30	0.2164	1.98	0.55
	7	6.62	0.3180	1.88	0.38
	8	7.25	0.3187	2.10	0.36
	9	6.30	0.3195	1.13	0.44
	เฉลี่ย	6.72			0.60
4	1	7.04	0.1062	3.07	0.88
	2	6.89	0.1094	2.65	0.95
	3	6.44	0.1104	2.68	0.93
	4	7.04	0.2126	2.89	0.46
	5	6.89	0.2132	2.23	0.53
	6	6.44	0.2141	1.98	0.56
	7	7.04	0.3221	1.01	0.45
	8	6.89	0.3206	1.96	0.38
	9	6.44	0.3202	1.44	0.42
	เฉลี่ย	6.79			0.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีเอช	ครั้งที่	C ₀	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	C _e	Q (mg/gเรซิน)
5	1	7.31	0.1093	2.38	1.01
	2	6.77	0.1087	3.19	0.83
	3	6.34	0.1078	3.01	0.88
	4	7.31	0.2145	2.08	0.55
	5	6.77	0.2152	2.79	0.47
	6	6.34	0.2159	2.98	0.44
	7	7.31	0.3187	2.23	0.36
	8	6.77	0.3215	2.24	0.36
	9	6.34	0.3225	2.53	0.33
	เฉลี่ย	6.81			0.58

ตารางที่ ง -4 ผลของพีเอชต่อการบำบัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดย RR ที่พีเอช 3, 4 และ 5

พีเอช	ครั้งที่	C ₀	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	C _e	Q (mg/gเรซิน)
3	1	6.62	0.1098	2.15	1.04
	2	7.25	0.1086	2.61	0.95
	3	6.30	0.1071	2.92	0.89
	4	6.62	0.2161	1.93	0.56
	5	7.25	0.2150	2.37	0.51
	6	6.30	0.2141	1.85	0.57
	7	6.62	0.3204	1.61	0.40
	8	7.25	0.3183	1.59	0.40
	9	6.30	0.3223	1.77	0.38
	เฉลี่ย	6.72			0.63
4	1	7.04	0.1107	2.68	0.93
	2	6.89	0.1095	2.82	0.91
	3	6.44	0.1100	2.36	1.01
	4	7.04	0.2128	2.21	0.54
	5	6.89	0.2141	1.95	0.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีเอช	ครั้งที่	C ₀	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	C _e	Q (mg/gเรซิน)
4	6	6.44	0.2151	1.64	0.60
	7	7.04	0.3193	2.16	0.36
	8	6.89	0.3198	1.22	0.44
	9	6.44	0.3180	1.72	0.40
	เฉลี่ย	6.79			0.64
5	1	7.31	0.1071	3.04	0.88
	2	6.77	0.1072	2.70	0.96
	3	6.34	0.1076	2.71	0.95
	4	7.31	0.2170	2.49	0.50
	5	6.77	0.2141	2.12	0.55
	6	6.34	0.2169	2.00	0.55
	7	7.31	0.3200	2.33	0.35
	8	6.77	0.3224	2.07	0.37
	9	6.34	0.3199	2.07	0.37
	เฉลี่ย	6.81			0.61

1.3 ผลของไอโซเทอร์มจากการแปรค่าความเข้มข้น

ตารางที่ ง -5 ไอโซเทอร์มของการบำบัดตะกัวเมื่อแปรค่าความเข้มข้นโดย SR

ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	Q (mg/g)
1	0.2127	23.6	6.60	1.06
2	0.2146		6.94	1.03
3	0.2134		8.54	0.93
1	0.2158	48.86	19.90	1.78
2	0.2147		15.62	2.05
3	0.2168		14.77	2.08
1	0.2142	66.21	25.84	2.50
2	0.2124		27.165	2.65
3	0.2159		23.86	2.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	Q (mg/g)
1	0.2164	86.93	42.8	2.70
2	0.2145		38.5	2.99
3	0.2127		34.33	3.27
1	0.2123	102.68	51.96	3.16
2	0.2125		39.76	3.20
3	0.2153		50.73	3.20

ตารางที่ ง -6 ไอโซเทอร์มของการบำบัดตะกั่วเมื่อแปรค่าความเข้มข้นโดย RR

ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง (g)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	Q (mg/g)
1	0.2140	23.6	6.34	1.07
2	0.2138		9.08	0.90
3	0.2134		9.57	0.87
1	0.2144	48.86	15.80	2.04
2	0.2120		19.34	1.84
3	0.2123		26.68	1.38
1	0.2134	66.21	28.405	2.35
2	0.2134		32.685	2.08
3	0.2134		28.21	2.36
1	0.2130	86.93	26.55	3.75
2	0.2134		41.93	2.79
3	0.2168		40.64	2.83
1	0.2153	102.68	50.47	3.21
2	0.2164		47.37	3.38
3	0.2154		42.19	3.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลการศึกษาการบำบัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

ตารางที่ ง -7 ปริมาณโลหะหนักที่คงเหลือในการตกตะกอนในน้ำส่วนใสที่ 6 ชม. และ 120 ชม.

เวลา	น้ำเสียส่วนใส	ปริมาณของโลหะ (mg/L)			เปอร์เซ็นต์การบำบัด		
		Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
6 ชม.	Blank	1.35	0.63	3.43			
	ครั้งที่ 1	0.92	0.17	2.79			
	ครั้งที่ 2	0.89	0.14	2.77			
	ครั้งที่ 3	0.87	0.13	2.75			
	เฉลี่ย	0.89	0.15	2.77	33.83	76.72	19.24
120 ชม.	Blank	1.40	0.71	4.02			
	ครั้งที่ 1	0.89	0.09	3.03			
	ครั้งที่ 2	0.87	0.09	2.90			
	ครั้งที่ 3	0.76	0.10	2.73			
	เฉลี่ย	0.84	0.09	2.88	40	86.85	28.19

ตารางที่ ง -8 ปริมาณโลหะหนักที่คงเหลือในการตกตะกอนในส่วนตะกอนที่ 6 ชม. และ 120 ชม.

เวลา	น้ำเสียส่วนตะกอน	ปริมาณของโลหะ (mg/L)		
		Pb	Zn	Cu
6 ชม.	Blank	0.10	0.05	0.04
	ครั้งที่ 1	8.80	6.88	8.83
	ครั้งที่ 2	9.10	7.74	8.71
	ครั้งที่ 3	8.80	7.28	6.41
	เฉลี่ย	8.90	7.30	7.98
120 ชม.	Blank	0.02	0.14	0.02
	ครั้งที่ 1	7.41	7.21	8.09
	ครั้งที่ 2	7.71	7.00	7.71
	ครั้งที่ 3	7.35	6.40	7.85
	เฉลี่ย	7.49	6.87	7.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-9 พารามิเตอร์ที่วัดได้จากการตกตะกอนทางเคมีที่เวลาต่างๆ

พารามิเตอร์	Blank	ครั้งที่	6 ชั่วโมง	Blank	120 ชั่วโมง
pH	1.34	1	10.57	1.30	9.19
		2	10.49		9.23
		3	10.78		9.29
		$\bar{x} \pm SD$	10.61 \pm 0.15		9.29 \pm 0.05
Conduct (ms/cm)	37.90	1	17.74	38.1	21.10
		2	17.64		21.40
		3	18.10		21.60
		$\bar{x} \pm SD$	17.83 \pm 0.24		21.37 \pm 0.25
TDS (g/L)	18.96	1	8.78	18.89	10.58
		2	8.97		10.69
		3	8.93		10.81
		$\bar{x} \pm SD$	8.89 \pm 0.10		10.70 \pm 0.11
ORP (mV)	463.70	1	-218.60	430.60	62.10
		2	-203.90		64.20
		3	-209.80		73.10
		$\bar{x} \pm SD$	-210.77 \pm 7.40		66.46 \pm 5.83
ปริมาณตะกอน (mL)	6.00	1	115	7.00	21
		2	130		18
		3	120		19
		$\bar{x} \pm SD$	121 \pm 7.64		19.33 \pm 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การบำบัดโลหะหนักด้วยวิธีการแบบคอลัมน์

สภาวะที่ใช้ทดลอง ใช้คอลัมน์ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 50 เซนติเมตร โดยบรรจุเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 2000 กรัม แล้วใส่น้ำเสียจริง และน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนลงในคอลัมน์ให้อัตราการไหล 30 mL/min ทำการเก็บน้ำตัวอย่างทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ตารางที่ ง -10 พารามิเตอร์ที่วัดจากน้ำตัวอย่างที่เก็บในเวลา 30 - 180 นาที

พารามิเตอร์ คอลัมน์	นาที	น้ำเสีย B					น้ำเสีย C				
		pH	Conduct (mS/cm)	TDS (g/L)	SAL (psu)	ORP (mV)	pH	Conduct (mS/cm)	TDS (g/L)	SAL (psu)	ORP (mV)
Blank	0	1.53	24.6	12.3	14.89	599.6	11.61	17.22	8.68	10.22	-87.7
1	30	6.16	3.63	1.83	1.92	233.8	7.22	2.33	1.26	1.34	104.6
	60	6.16	6.82	3.41	3.73	232.4	7.07	7.79	3.93	4.24	96.9
	90	4.27	6.94	3.50	3.83	377.6	7.12	8.49	4.25	4.68	90.2
	120	5.81	7.11	3.53	3.85	265.7	7.38	9.02	4.39	5.02	83.5
	150	5.72	7.05	3.53	3.85	266.6	6.89	9.24	4.6	5.14	83.9
	180	5.64	7.03	3.52	3.84	266.6	6.65	9.44	4.72	5.28	89.7

พารามิเตอร์ คอลัมน์	นาที่	น้ำเสีย B					น้ำเสีย C				
		pH	Conduct (mS/cm)	TDS (g/L)	SAL (psu)	ORP (mV)	pH	Conduct (mS/cm)	TDS (g/L)	SAL (psu)	ORP (mV)
2	30	2.99	5.59	2.81	3.03	476.5	6.30	4.31	2.15	2.27	150.1
	60	6.20	6.9	3.45	3.76	311.5	3.40	8.94	4.45	4.98	222
	90	5.85	6.98	3.49	3.81	258.5	7.03	9.10	4.58	5.10	93.4
	120	5.73	7.08	3.54	3.85	285.3	7.47	9.27	4.65	5.18	77.8
	150	5.61	7.05	3.53	3.86	267.0	7.89	9.48	4.74	5.29	75.2
	180	5.33	6.99	3.52	3.84	391.9	7.41	9.51	4.76	5.31	77.1
3	30	5.79	4.50	2.25	2.38	248.7	6.19	4.75	2.39	2.47	144.4
	60	5.54	6.13	3.10	3.35	259.0	6.54	8.81	4.42	4.90	103.9
	90	5.28	6.73	3.37	3.68	266.4	6.88	9.27	4.62	5.15	92.2
	120	4.72	6.89	3.47	3.79	311.1	6.75	9.32	4.66	5.19	90.8
	150	4.30	7.07	3.54	3.86	409.7	7.27	9.48	4.74	5.28	87.9
	180	3.93	7.04	3.53	3.86	457.3	6.39	9.71	4.83	5.43	107.9

ตารางที่ ง -11 ปริมาณโลหะที่บำบัดได้ด้วยวิธีการแบบคอลัมน์จากน้ำเสีย B₂

นาที่		30	60	90	120	150	180
ตะกั่ว	ความเข้มข้นเริ่มต้น (*10 ⁻⁷ mol/L)	15	15	15	15	15	15
	คอลัมน์ 1	6.4	8.2	11	6.0	8.0	6.5
	คอลัมน์ 2	3.8	6.8	8.0	5.0	3.0	5.9
	คอลัมน์ 3	4.2	8.8	6.0	8.0	6.0	5.9
	เฉลี่ย	4.8	7.9	8.0	6.0	6.0	6.1
	จำนวน(*10 ⁻⁷ mol/L) ที่ดูดซับ	9.0	6.2	6.0	7.9	8.1	7.8
	ปริมาณสะสม	90	15.2	21.2	29.1	37.2	45
สังกะสี	ความเข้มข้นเริ่มต้น (*10 ⁻⁷ mol/L)	170	170	170	170	170	170
	คอลัมน์ 1	8.0	8.0	11	14	8.0	8.6
	คอลัมน์ 2	7.0	8.0	6.0	6.0	5.0	6.2
	คอลัมน์ 3	16	9.0	21	8.0	10	11
	เฉลี่ย	11	9.0	13	9.0	8.0	8.7
	จำนวน (*10 ⁻⁷ mol/L) ที่ดูดซับ	140	140	140	140	140	140
	ปริมาณสะสม	139	281	418	559	701	843
ทองแดง	ความเข้มข้นเริ่มต้น(*10 ⁻⁶ mol/L)	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
	คอลัมน์ 1	1.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	คอลัมน์ 2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	คอลัมน์ 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	เฉลี่ย	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	จำนวน (*10 ⁻⁶ mol/L) ที่ดูดซับ	3.4	3.5	3.6	3.6	3.6	3.6
	ปริมาณสะสม	3.4	6.9	10.5	14.2	17.8	21.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง -12 ปริมาณโลหะที่บำบัดได้ด้วยวิธีการแบบคอลัมน์จากน้ำเสีย C3

เวลา (นาที)		30	60	90	120	150	180
ตะกั่ว	ความเข้มข้นเริ่มต้น ($*10^{-6}$ mol/L)	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
	คอลัมน์ 1	2.5	2.5	2.0	1.5	8.0	8.0
	คอลัมน์ 2	2.1	2.2	2.2	1.4	9.0	9.0
	คอลัมน์ 3	2.8	2.3	2.3	1.7	9.0	9.0
	เฉลี่ย	2.5	2.3	2.2	1.5	9.0	9.0
	จำนวน ($*10^{-6}$ mol/L) ที่ดูดซับ	0.99	1.1	1.3	1.8	2.4	2.4
	ปริมาณสะสม	0.99	2.1	3.4	5.2	9.8	9.8
สังกะสี	ความเข้มข้นเริ่มต้น ($*10^{-6}$ mol/L)	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
	คอลัมน์ 1	1.6	1.2	1.8	0.9	1.2	1.2
	คอลัมน์ 2	2.0	1.9	1.2	1.3	0.8	0.8
	คอลัมน์ 3	1.3	1.3	1.9	0.7	1.3	1.3
	เฉลี่ย	1.6	1.5	1.6	1.0	1.1	1.1
	จำนวน ($*10^{-6}$ mol/L) ที่ดูดซับ	7.0	0.9	0.7	1.3	1.2	1.2
	ปริมาณสะสม	7.0	1.6	2.3	3.7	6.1	6.1
ทองแดง	ความเข้มข้นเริ่มต้น ($*10^{-6}$ mol/L)	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0
	คอลัมน์ 1	9.0	11.0	16.0	17.0	22.0	20.0
	คอลัมน์ 2	9.0	13.0	16.0	16.0	18.0	20.0
	คอลัมน์ 3	10.0	11.0	14.0	14.0	18.0	22.0
	เฉลี่ย	9.0	12.0	15.0	16.0	20.0	21.0
	จำนวน ($*10^{-6}$ mol/L) ที่ดูดซับ	23.4	21.1	17.8	17.5	14.1	13.1
	ปริมาณสะสม	23.4	44.6	62.4	79.9	94.0	107.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณผลการทดลอง

1. หากการอิมตัวของเรซิน

$$\% \text{ การอุมน้ำ} = \left(\frac{\text{นน.เรซินเปียก} - \text{นน.เรซินแห้ง}}{\text{นน.เรซินเปียก}} \right) \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ

น้ำหนักเรซินเปียก = 100.0223 g และน้ำหนักเรซินแห้ง = 52.9817 g

$$\begin{aligned} \% \text{ การอุมน้ำ} &= \left(\frac{100.0223 \text{ g} - 52.9817 \text{ g}}{100.0223 \text{ g}} \right) \times 100 \\ &= 47.03 \% \end{aligned}$$

2. การคำนวณค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวกด้วยวิธีแอมโมเนียมอะซิเตรท (CEC)

ตอนที่ 1 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ NaOH 0.1 N

ครั้งที่	น้ำหนักของ KHP (g)	ปริมาตร NaOH (mL)
1	0.4009	19.10
2	0.4004	19.20
3	0.4008	19.10
เฉลี่ย	0.4007	19.10

$$C_{\text{NaOH}} = \frac{(\text{น้ำหนักกรัมของ KHP} \times 1000)}{\text{น้ำหนักกรัมสมมูลของ KHP} \times \text{ปริมาตรของ NaOH}}$$

$$C_{\text{NaOH}} = (0.4007 \times 1000) \div (204.23 \times 19.1)$$

$$= 0.1027 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ HCl 0.1 N

ครั้งที่	ปริมาตร HCl (mL)	ปริมาตร NaOH (mL)
1	20.00	19.80
2	20.00	19.50
3	20.00	19.90
เฉลี่ย	20.00	19.70

$$C_{\text{HCl}} = \frac{C(\text{NaOH}) \times V(\text{NaOH})}{V(\text{HCl})}$$

$$C_{\text{HCl}} = \frac{(0.1027 \times 19.7)}{20.0}$$

$$C_{\text{HCl}} = 0.1012 \text{ N}$$

การหาการแลกเปลี่ยนประจุบวกของเรซิน

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

เมื่อ A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับสารละลายตัวอย่างเรซิน (mL)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์ (mL)

N = ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มอล)

W = น้ำหนักแห้งมีหน่วยเป็นกรัมของเรซิน

ครั้งที่ 1

$$\text{CEC} = \frac{(32.9 - 0) \times 0.1012 \text{ N} \times 100}{2.6936 \times 1000}$$

$$\text{CEC} = 0.1236 \text{ cmol/g}$$

ครั้งที่ 2

$$\text{CEC} = \frac{(44.4 - 0.0) \times 0.1012 \text{ N} \times 100}{2.6812 \times 1000}$$

$$\text{CEC} = 0.1676 \text{ cmol/g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 3

$$CEC = \frac{(22.3-0) \times 0.1012N \times 100}{2.6704 \times 1000}$$

$$CEC = 0.0845 \text{ cmol/g}$$

เฉลี่ย

$$CEC \text{ เฉลี่ย} = \frac{(CEC1+CEC2+CEC3)}{3}$$

$$CEC \text{ เฉลี่ย} = \frac{(0.1236+0.1676+0.0845)}{3}$$

$$CEC \text{ เฉลี่ย} = 0.1252 \text{ cmol/g}$$

3. การเตรียมสารละลายตะกั่วเริ่มต้น 10 ppm

เตรียมสารละลายสต็อกตะกั่วความเข้มข้น 1000 ppm จาก $[Pb(NO_3)_2]$ โมลโมเลกุล 331.2 g/mol โดยคำนวณจาก

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

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

$$1 \text{ gPb} \times \left(\frac{1 \text{ mol}}{207.2 \text{ g}} \right) = 4.83 \times 10^{-3}$$

$$1 \text{ molPb} = 1 \text{ mol Pb(NO}_3)_2$$

$$4.83 \times 10^{-3} \text{ mol Pb(NO}_3)_2 \times \frac{331.2 \text{ g}}{1 \text{ mol}} = 1.60 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องชั่ง 1.60 g ของ $Pb(NO_3)_2$ ในน้ำกลั่น 1000 mL จะได้ความเข้มข้นตะกั่ว 1000 ppm ถ้าต้องการสารละลายตะกั่ว 10 ppm ในน้ำกลั่น 1000 mL คำนวณจาก

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(1000 \text{ ppm}) V_1 = (10 \text{ ppm})(1000 \text{ mL})$$

$$V_1 = \frac{(10 \text{ ppm}) (1000 \text{ mL})}{1000 \text{ ppm}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_1 = 10 \text{ mL}$$

ดังนั้น ปิเปตสารละลายสต็อกตะกั่วความเข้มข้น 1000 ppm มา 10 mL ในน้ำกลั่น 1000 mL จะได้ความเข้มข้นตะกั่ว 10 ppm

4. การคำนวณหาปริมาณของตะกั่ว (mg/L)

$$\text{ปริมาณโลหะ Pb} = \frac{C_1 \times V_1}{V_2}$$

เมื่อ V_1 = ปริมาตรของน้ำเสียก่อนย่อย (mL)

V_2 = ปริมาตรของน้ำเสียหลังย่อย (mL)

C_1 = ปริมาณตะกั่วที่อ่านได้จากเครื่อง AAS (mg/L)

ตัวอย่างการคำนวณที่ $V_1 = 25 \text{ mL}$, $V_2 = 50 \text{ mL}$ และ $C_1 = 3.45 \text{ (mg/L)}$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณโลหะ Pb} &= \frac{C_1 \times V_1}{V_2} \\ &= \frac{3.45 \times 25}{50} \\ &= 1.73 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

5. การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบำบัดของตะกั่ว

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

เมื่อ C_o คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว (mg/L)

C_i คือ ความเข้มข้นที่เหลือของตะกั่ว (mg/L)

ตัวอย่างการคำนวณที่อัตราการไหล 30 mL/min นานที่ 30

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์การบำบัด (\%)} &= \left(\frac{0.31 - 0.10}{0.31} \right) \times 100 \\ &= 67.52\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับต่อปริมาณเรซิน

$$\text{ความสามารถดูดซับ (mg/gเรซิน)} = \frac{(C_o - C_e) \times V}{M \times 1000}$$

เมื่อ C_o คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี (mg/L)

C_e คือ ความเข้มข้นที่เหลือของสังกะสี (mg/L)

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (mL)

M คือ น้ำหนักแห้งของเรซิน (g)

ตัวอย่างการคำนวณ $C_o=7.42$, $C_e=1.78$, $V= 25$ และ $M = 0.1080$

$$\begin{aligned} \text{ความสามารถดูดซับ (mg/gเรซิน)} &= \frac{(7.42 - 1.78) \times 25}{0.1080 \times 1000} \\ &= 1.37 \text{ mg/gเรซิน} \end{aligned}$$

7. การทำนายค่าปริมาณการบำบัดต่อเรซินด้วยค่า q_m

เรซิน 1 g จับโลหะ 3 ชนิดได้		0.000217 mg
เรซิน 2000 g จับโลหะ 3 ชนิดได้		0.4336 mg
ค่า q_m		5.27 mg
คอลัมน์ยังสามารถดูดซับ		4.8364 mg
เรซิน 2000 g จับโลหะ 3 ชนิดได้	0.4336 mg	ใช้น้ำ 5.4 L
เรซิน 2000 g จับโลหะ 3 ชนิดได้	4.8364 mg	ใช้น้ำ 60.2 L

8. การคำนวณค่าสมดุลของการละลาย

จากสมการ



$$\text{ค่า} K_{sp} = 4 \times 10^{-11}, \quad Q = \left[\frac{1.66 \times 10^{-3} \text{ g/l}}{207.2 \text{ g/mol}} \right] [\text{OH}]^2$$

$$4 \times 10^{-11} = \left[\frac{1.66 \times 10^{-3} \text{ g/l}}{207.2 \text{ g/mol}} \right] [\text{OH}]^2$$

$$[\text{OH}]^2 = \frac{4 \times 10^{-11}}{\left[\frac{1.66 \times 10^{-3} \text{ g/l}}{207.2 \text{ g/mol}} \right]}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[\text{OH}]^2 = 4.99 \times 10^{-6}$$

$$[\text{OH}] = 2.23 \times 10^{-3}$$

$$\text{p}[\text{OH}] = 2.64$$

$$\text{pH} = 14 - 2.65$$

$$= 11.35$$

ดังนั้น pH มากกว่า 11.35 จะทำให้โลหะตะกั่วตกตะกอน

9. การคำนวณปริมาณน้ำเสียที่ไหลลงในคอลัมน์

คอลัมน์มีรัศมี (r) = 5.08 ซม. และเรซินสูง 11 ซม.

คอลัมน์มีรูปทรงกระบอก,

$$\text{สูตรปริมาตร} = \pi r^2 h$$

แทนค่า

$$= \pi \times (5.08)^2 \times 10$$

$$= 810.32 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{ดังนั้นเรซินมีปริมาตร} = 810.32 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

จาก

$$1000 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} = 1 \text{ ลิตร}$$

ดังนั้น

$$810.32 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} = \frac{1 \text{ ลิตร} \times 810.32 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}}{1000 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}}$$

$$= 0.81 \text{ ลิตร}$$

จาก

$$1 \text{ ลิตร} = 1000 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น

$$0.81 \text{ ลิตร} = \frac{0.81 \text{ ลิตร} \times 1000 \text{ มิลลิลิตร}}{1 \text{ ลิตร}}$$

$$= 810 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้นเรซินมีปริมาตร 810 มิลลิลิตร จะต้องใส่น้ำเสียมากกว่า = 900 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. คำนวณอัตราการไหล

ต้องการกักน้ำเป็นเวลา 30 นาที คำนวณได้จาก

จาก 30 นาที = 900 มิลลิลิตร

$$1 \text{ นาที} = \frac{900 \text{ มิลลิลิตร}}{30 \text{ นาที}} \times 1 \text{ นาที}$$

$$= 30 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้นจะต้องควบคุมอัตราการไหล 30 ml/min จึงจะเก็บน้ำเป็นเวลา 30 นาที

11. การหาความเข้มข้นของโลหะหนักในหน่วย mol/L

ตัวอย่างการคำนวณ ตะกั่วมีมวลโมเลกุล = 207.2 g/mol มีความเข้มข้น 1.73 mg/L

$$\text{ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mol/L)} = \frac{\left(1.73 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) \times 1 \text{ g}}{207.2 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times 1000 \text{ mg}}$$

$$= 8.35 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$$

12. การหาค่าซีไอดี

ตอนที่ 1 หาความเข้มข้นของ FAS

ครั้งที่	ปริมาตร $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (mL)	ปริมาตร FAS (mL)
1	5.00	10.50
2	5.00	10.40
3	5.00	10.50
เฉลี่ย	5.00	10.50

$$\text{หาความเข้มข้นที่แน่นอน FAS} = \frac{(\text{ปริมาตร } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \text{ mL} \times 0.1)}{\text{ปริมาตร FAS (mL)}}$$

$$= \frac{5.0 \times 0.1}{10.5}$$

$$= 0.0478 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 1 หาค่าซีโอดี

$$\text{ซีโอดี (mgO}_2\text{/L)} = \frac{(A-B) \times N \times 8000}{V}$$

เมื่อ A = ปริมาณของ FAS ที่ใช้ไทเทรตแบลงค์ (mL)

B = ปริมาณของ FAS ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่างน้ำ (mL)

N = ความเข้มข้นของ FAS (N)

V = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mL)

ตัวอย่างการคำนวณที่ A=2.6 mL, B=0.0 mL , N=0.0478 N และ V= 2.5 mL

$$\begin{aligned} \text{ซีโอดี (mgO}_2\text{/L)} &= \frac{(A-B) \times N \times 8000}{V} \\ &= \frac{(2.6-0.0) \times 0.0478 \times 8000}{2.5} \\ &= 397.70 \text{ mgO}_2\text{/L} \end{aligned}$$

13. การคำนวณค่า T-test

จากการคำนวณค่า T-test ใน Excel จะได้ตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ จ -1 t-Test: Paired Two Sample for Means

	Variable 1	Variable 2
Mean	43.26333333	51.68
Variance	892.7284333	962.5657
Observations	3	3
Pearson Correlation	0.998479565	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	2	
t Stat	-7.170171222	
P(T<=t) one-tail	0.009450619	
t Critical one-tail	2.91998558	
P(T<=t) two-tail	0.018901239	
t Critical two-tail	4.30265273	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลดังตารางสามารถแปลผลได้ดังนี้

สมมติฐานหลัก Hypothesized Mean Difference ไม่แตกต่างกัน $H_0 = 0$ และสมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ $H_a \neq 0$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ค่า t Stat = -7.17 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า P แสดงว่ายอมรับสมมติฐานหลักและปฏิเสธสมมติฐานรอง ดังนั้นข้อมูลทั้งสองชุดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

14. การวิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยโปรแกรม Mini-tab

ศึกษาปริมาณการบำบัดน้ำเสียด้วย SR โดยใช้น้ำเสีย 2 ชนิด คือ น้ำเสีย B และ น้ำเสีย C ที่เวลา 30 – 180 นาที ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนัก 3 ชนิด คือ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี โดยคาดการณ์ว่าที่เวลาต่างๆของแต่ละคอลัมน์จะมีประสิทธิภาพการบำบัดโลหะที่แตกต่างกัน ได้ผลการทดลองดังนี้

MANOVA for water

s = 1 m = 0.5 n = 10.0

Criterion	Test	F	DF		P
	Statistic		Num	Denom	
Wilks'	0.01039	698.570	3	22	0.000
Lawley-Hotelling	95.25954	698.570	3	22	0.000
Pillai's	0.98961	698.570	3	22	0.000
Roy's	95.25954				

MANOVA for time

s = 3 m = 0.5 n = 10.0

Criterion	Test	Approx F	DF		P
	Statistic		Num	Denom	
Wilks'	0.01351	15.305	15	61	0.000
Lawley-Hotelling	17.72664	24.423	15	62	0.000
Pillai's	1.84973	7.719	15	72	0.000
Roy's	14.56025				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MANOVA for water*time

s = 3 m = 0.5 n = 10.0

Criterion	Test	DF		P
	Statistic	Approx F	Num Denom	
Wilks'	0.01692	13.788	15 61	0.000
Lawley-Hotelling	17.44454	24.035	15 62	0.000
Pillai's	1.71799	6.432	15 72	0.000
Roy's	14.91658			

จากข้อมูลสามารถแปลผลได้ดังนี้ จากค่า P ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ของน้ำเสีย 2 ชนิด จำนวน 3 คอลัมน์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 95%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้