ประสิทธิภาพของการบำบัดแคดเมียม ทองแดง และนิกเกิล ในน้ำเสียด้วยคอลัมน์เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

THE EFFICIENCY OF CADMIUM COPPER AND NICKEL REMOVAL FROM WASTEWATER BY SPENT CATION EXCHANGE RESIN COLUMN

ปุญญิศา มนต์มี

พรพิศ แก้วสถิตพรชัย

พิมุกต์ ไชยโกฏิ

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE EFFICIENCY OF CADMIUM COPPER AND NICKEL REMOVAL FROM WASTEWATER BY SPENT CATION EXCHANGE RESIN COLUMN

POONYISA MONMEE

PORNPIT KAEWSATITPORNCHAI

PHIMOOK CHAIYAGOD

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 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	ประสิทธิภาพของการบำบัดแคดเมียม ทองแดง และนิกเกิลในน้ำเสียด้วยคอลัมน์เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว The Efficiency of Cadmium Copper and Nickel Removal from Wastewater by Spent Cation Exchange Resin Column	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปุญญิศา มนต์มี	รหัสนักศึกษา 58050654
	นางสาวพรพิศ แก้วสถิตพรชัย	รหัสนักศึกษา 58050656
	นายพิมุกต์ ไชยโกฏิ	รหัสนักศึกษา 58050665
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)	
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2561	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. กรองแก้ว ทิพยศักดิ์	

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ประธานกรรมการ	
ดร.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ กรรมการ	
ผศ.กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ ประสิทธิภาพของการบำบัดแคดเมียม ทองแดง และนิกเกิลในน้ำเสียด้วยคอลัมน์เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ชื่อนักศึกษา นางสาวปุญญิศา มนต์มี รหัสนักศึกษา 58050654
นางสาวพรพิศ แก้วสถิตพรชัย รหัสนักศึกษา 58050656
นายพิมุกต์ ไชยโกฏิ รหัสนักศึกษา 58050665

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา เคมี

คณะ วิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. กรองแก้ว ทิพยศักดิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดไอออนของแคดเมียม (Cd^{2+}), ทองแดง (Cu^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการด้วยเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว (SR) โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบแบตช์ (Batch) และแบบคอลัมน์ (Column) ในการบำบัดได้ศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของ SR ได้แก่ ค่าพีเอช, ค่าการนำไฟฟ้า, ค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด และการอุ้มน้ำของเรซิน จากการทดลองแบบแบตช์ (Batch) ของน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนเดี่ยวทั้ง 3 ชนิด และแบบผสมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.18 -1.96 meq/L พบว่า SR สามารถบำบัดไอออน Cu^{2+} ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับ Cd^{2+}และ Ni^{2+} โดยสามารถบำบัด Cu^{2+} สูงสุดได้มากกว่า 99% ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิช (Q_m = 0.01 meq/g, R^2 = 0.8621) กรณีน้ำเสียสังเคราะห์ผสม SR สามารถบำบัดโลหะหนักสูงสุดได้มากกว่า 90% ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Q_m =4.44 meq/g, R^2 = 0.9176) และผลการทดลองบำบัดแบบคอลัมน์ (Column) แบบต่อเนื่องนาน 24 ชั่วโมง ด้วยอัตราการไหล 2.5 mL/min ในน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยว พบว่าสามารถบำบัดโลหะหนักได้ทั้ง 3 ชนิดตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พ.ศ.2560 ได้นาน 22 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ในช่วง 93–100%, น้ำเสียสังเคราะห์ผสมสามารถบำบัด Cd^{2+} Cu^{2+} และ Ni^{2+} ได้นาน 12 ชั่วโมง และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการสามารถบำบัด Cd^{2+} และCu^{2+} ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งนาน 24 ชั่วโมง แต่ไม่สามารถบำบัด Ni^{2+} ให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งได้ เนื่องจากมีความเข้มข้นเริ่มต้นสูงมาก (10.25 meq/L)

คำสำคัญ : การบำบัดโลหะหนักด้วยเรซินที่แลกเปลี่ยนประจุ, แคดเมียม, ทองแดง, นิกเกิล, เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	The Efficiency of Cadmium Copper and Nickel Removal from Wastewater by Spent Cation Exchange Resin Column			
Students	Miss Poonyisa	Monmee	Student ID	58050654
	Miss Pornpit	Kaewsatitpornchai	Student ID	58050656
	Mr. Phimook	Chaiyagod	Student ID	58050665
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)			
Department	Chemistry			
Faculty	Science			
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)			
Academic Year	2018			
Advisor	Asst.Prof.Krongkaew Tippayasak			

Abstract

The removal efficiency of Cadmium (Cd^{2+}), Copper (Cu^{2+}) and Nickel (Ni^{2+}) from the synthetic wastewater and the laboratory wastewater by spent cation exchange resin (SR) were studied. These experiments were carried out both batch and column. The general properties of the SR were studied such as pH, conductivity, total dissolved solids and the water retention. In batch experiment, the adsorption isotherm of each metal and mixture of 3 metals were done with the initial concentrations between 0.18 - 1.96 meq/L. The Cu^{2+} removals by SR were greatest than Cd^{2+} and Ni^{2+} (>99 %). The results showed that the Freundlich adsorption isotherm were fit with data (Q_m =0.01 meq/g-resin, R^2 = 0.8621). For the synthetic wastewater of 3 mixed metal, SR can remove all ions more than 90%. The Langmuir adsorption isotherms were fitted (Q_m = 4.44 meq/g-resin, R^2 = 0.9176). Furthermore, the continuing column treated for 24 hours with 2.5 mL/min flow rate. For single metal synthetic wastewater, SR column removed 3 heavy metals for run time 22 hours according to the Effluent Standard of Industrial Ministry, B.E. 2018. The removal efficiencies were between 93-100 %. While the synthetic wastewater of mixture, Cd^{2+}, Cu^{2+} and Ni^{2+}can remove for only 12 hours. $Cd^{2+}$and Cu^{2+} ion in the laboratory wastewater were treated by SR column and met the Effluent Standard 24 hours, but these columns did not removal Ni^{2+} ion to meet the Effluent Standard due to high initial concentration (10.25 meq/L).

Keywords: Heavy metal removal by ion exchange resin, Cadmium, Copper, Nickel, Spent cation exchange resin

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ห้ามใช้ในเชิงพาณิชย์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ ที่คอยให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และแนะนำความรู้ในเชิงวิชาการและข้อคิดต่างๆ พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางการแก้ไขที่เป็นประโยชน์อย่างมากเกี่ยวกับงานวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงตรวจแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นด้วยความเอาใจใส่ในทุกรายละเอียด

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และ ดร.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการและกรรมการผู้คุมสอบที่ได้เสียสละเวลาในการเข้าร่วมรับฟังโครงงานพิเศษนี้ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขโครงงานพิเศษให้สำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท พี อี แอนด์ พีเทค จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรซิน เพื่อใช้ในการศึกษาในการทำโครงงานพิเศษครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ คุณสาคร สอนพงษ์ คุณณัฐพล ไกรธรรม และคุณชัชชัย ลัทธิลักขณา เจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินเอกสาร จัดหาอุปกรณ์ และสารเคมีต่างๆในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้เป็นส่วนหนึ่งของสถาบันการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจและเป็นแรงผลักดันในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมถึงรุ่นพี่ และเพื่อนๆในสาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อมทุกๆคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือในด้านงานวิจัยนี้ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์จนงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ดี

ปุญญิศา มนต์มี
พรพิศ แก้วสถิตพรชัย
พิมุกต์ ไชยโกฏิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูป ..... ช
คำย่อ/สัญลักษณ์ ..... ฌ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 เรซิน 3
2.1.1 การจำแนกประเภทของเรซิน 4
2.1.2 โครงสร้าง และสมบัติทั่วไปของเรซิน 6
2.1.3 ความจุของการแลกเปลี่ยนไอออน 8
2.1.4 รีเจนเนอเรชัน 9
2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน 9
2.2 โลหะหนัก 10
2.2.1 แคดเมียม 11
2.2.2 ทองแดง 15
2.2.3 นิกเกิล 17
2.3 น้ำเสีย 19
2.3.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย 19
2.3.2 สิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย 19
2.3.3 การตรวจสอบสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

2.4 วิธีการกำจัดโลหะหนัก 20
2.5 ทฤษฎีการดูดซับ 23
2.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ 24
2.6.1 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ 24
2.6.2 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิช 25
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 34
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ 34
3.1.1 วัสดุและสารเคมี 34
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ 35
3.2 วิธีการทดลอง 35
3.2.1 การสุ่มตัวอย่างเรซิน 35
3.2.2 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของเรซิน 36
3.2.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม 36
3.2.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง 36
3.2.5 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล 36
3.2.6 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ผสม 36
3.2.7 การศึกษาไอโซเทอร์มของการบำบัดด้วยเรซิน 36
3.2.8 การศึกษาการบำบัดโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้คอลัมน์ 37
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล 42
4.1 คุณสมบัติทั่วไปของเรซิน 42
4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน 42
4.2 ไอโซเทอร์มของการบำบัดของการแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 43
4.2.1 แคดเมียม 43
4.2.2 ทองแดง 45
4.2.3 นิกเกิล 46
4.2.4 น้ำเสียสังเคราะห์ผสม 48
4.3 การบำบัดโลหะหนักจากน้ำเสียโดยใช้คอลัมน์ 53
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

5.1 สรุปผลการวิจัย 57
5.2 ข้อเสนอแนะ 57
เอกสารอ้างอิง 59
ภาคผนวก 62
ภาคผนวก ก 63
ภาคผนวก ข 65
ภาคผนวก ค 68
ภาคผนวก ง 72
ภาคผนวก จ 76
ภาคผนวก ฉ 86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 สมบัติทางกายภาพของแคดเมียม 12
2.2 สมบัติทางกายภาพของทองแดง 15
2.3 สมบัติทางกายภาพของนิกเกิล 17
3.1 ความเข้มข้นของสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ 37
3.2 ปริมาตรในแต่ละช่วงเวลาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แบบคอลัมน์ 38
4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของเรซินชนิดประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว 42
4.2 ผลการบำบัดแคดเมียมแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ 43
4.3 ผลการบำบัดทองแดงแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ 45
4.4 ผลการบำบัดนิกเกิลแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ 47
4.5 ผลการบำบัดแคดเมียมของน้ำเสียสังเคราะห์ผสมแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ 48
4.6 ผลการบำบัดทองแดงของน้ำเสียสังเคราะห์ผสมแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ 49
4.7 ผลการบำบัดนิกเกิลของน้ำเสียสังเคราะห์ผสมแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ 50
4.8 ผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ผสมแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ 51
4.9 ค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่สูงที่สุด 52
4.10 การบำบัดโลหะหนักด้วยคอลัมน์โดยเทียบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม 54
ก.1 ข้อมูลเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว 63
ก.2 คำแนะนำการใช้งานเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว 64
ข.1 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม 65
ง.1 ผลไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของEDTA 72
จ.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียมน้ำเสียสังเคราะห์เชิงเดี่ยว 76
จ.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับทองแดงน้ำเสียสังเคราะห์เชิงเดี่ยว 78
จ.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับนิกเกิลน้ำเสียสังเคราะห์เชิงเดี่ยว 80
จ.4 เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอโซเทอร์มการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ผสม 81
จ.5 เปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม, ทองแดง และนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เชิงเดี่ยวแบบคอลัมน์ 82
จ.6 เปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม, ทองแดง และนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมแบบคอลัมน์ 83
จ.7 เปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม, ทองแดง และนิกเกิลในน้ำเสียจริงจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการ 84
จ.8 การบำบัดโลหะหนักด้วยคอลัมน์โดยเทียบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม 85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 เรซิน 4
2.2 การแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน 6
2.3 แคดเมียม 11
2.4 โรคอิไต อิไต 14
2.5 ทองแดง 15
2.6 นิกเกิล 17
2.7 กราฟเส้นตรงของแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม 25
2.8 กราฟเส้นตรงของฟรุนด์ลิชไอโซเทอร์ม 26
3.1 การบำบัดโลหะหนักโดยใช้เรซินที่แลกเปลี่ยนประจุบรรจุในคอลัมน์ 40
3.2 แผนการดำเนินการวิจัย 41
4.1 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียม 44
4.2 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิชของการบำบัดทองแดง 46
4.3 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิชของการบำบัดนิกเกิล 47
4.4 ไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นของการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ 48
4.5 ไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นของการบำบัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ผสม 49
4.6 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการบำบัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ผสม 50
4.7 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของไอออนรวมการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ 51
4.8 เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะหนัก 55
ค.1 กราฟมาตรฐานแคดเมียม 68
ค.2 กราฟมาตรฐานทองแดง 69
ค.3 กราฟมาตรฐานนิกเกิล 70
ค.4 กราฟมาตรฐานโซเดียม 70
ค.5 กราฟมาตรฐานโพแทสเซียม 71
ค.6 กราฟมาตรฐานเหล็ก 71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
AAS	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปคโทรโฟโตมิเตอร์
C_e	ความเข้มข้นที่สมดุล
CEC	ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange)
cm	เซนติเมตร
cmol/kg	เซนติโมลต่อกิโลกรัม
g/cm^3	กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
g/mol	กรัมต่อโมล
gal/min-ft^3	แกลลอนต่อนาที ลูกบาศก์ฟุต
L	อัตราส่วนไอออนของสารตัวอย่างที่มีอยู่ในเรซินต่อความจุเรซิน
meq	จำนวนมิลลิกรัมสมมูลของไอออน
meq/g	จำนวนมิลลิสมมูลต่อกรัม
meq/L	จำนวนมิลลิสมมูลต่อลิตร
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/L as $CaCO_3$	หน่วยมิลลิกรัมในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร
mL	มิลลิลิตร
ml/min	มิลลิลิตรต่อนาที
N	นอร์มอล
ppm	หนึ่งส่วนในล้านส่วน
Q_m	ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด
RP	เรซินที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน
rpm	รอบต่อนาที
SR	เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว
TDS	ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด
µS/cm	ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร
Cd^{2+}	แคดเมียมไอออน
Cu^{2+}	คอปเปอร์ไอออน
Ni^{2+}	นิกเกิลไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาเทคโนโลยี และการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเกินขีดจำกัด ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงและยากต่อการแก้ไข หนึ่งในผลกระทบนั้น คือ การรั่วไหลปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำ โลหะหนักเป็นวัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้ในหลายภาคส่วน เช่น ในด้านอุตสาหกรรม การผลิตพลาสติก พีวีซี สีถ่านไฟฉาย สำหรับทางด้านการเกษตรเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้หากไม่มีการกำจัดโลหะหนักก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะทำให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีวิต น้ำทิ้งต้องมีการควบคุมปริมาณโลหะหนักไม่ให้เกินค่ามาตรฐานตามที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ โลหะหนักที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ เช่น แคดเมียม ปรอท โคบอลต์ ทองแดง สารหนู ตะกั่ว สังกะสี นิกเกิล โครเมียม และแมงกานีส เป็นต้น ในภาคอุตสาหกรรม หน่วยงานและสถานศึกษาต่างๆ มีห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ในการวิเคราะห์และทำการทดลองจึงทำให้มีการใช้สารเคมีเป็นจำนวนมาก รวมทั้งโลหะหนัก ดังนั้นมีความจำเป็นในการบำบัดหรือกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำ เพื่อลดการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำ และลดการสะสมของโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตในน้ำ

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีมีหลายรูปแบบให้เลือก ต้องเลือกให้เหมาะสม และได้ประสิทธิภาพการบำบัดตามที่ต้องการ กระบวนการบำบัดทางเคมีที่นิยมใช้กัน ได้แก่ กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation), กระบวนการฟล็อกคูเลชัน (Flocculation), กระบวนการตกตะกอนผลึก (Precipitation), กระบวนการทำให้เป็นกลาง (Neutralization), กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange), การดูดซับด้วยผงถ่าน (Carbon Adsorption) และกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction) เป็นต้น แต่การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน มีข้อดี คือ ได้ผลรวดเร็ว ใช้พื้นที่น้อย ประสิทธิภาพสูง อาจได้ผลพลอยได้นำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่ เหมาะกับการบำบัดที่มีความเข้มข้นต่ำที่ใช้การบำบัดด้วยวิธีอื่นไม่เหมาะสม

การศึกษาครั้งนี้จึงเลือกวิธีการบำบัดโลหะในน้ำเสีย คือ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) โดยเลือกเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้วนำมาบำบัดแคดเมียม ทองแดง และนิกเกิล ซึ่งแคดเมียม ทองแดง และนิกเกิล เป็นโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้องปฏิบัติการทางคณะวิทยาศาสตร์มีการเก็บรวบรวมโลหะหนักเหล่านี้ไว้เพื่อส่งให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริษัทภายนอกมารับและนำไปบำบัดต่อไป ทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย และเป็นการนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด จึงได้ทำการศึกษาครั้งนี้ขึ้นมา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียม ทองแดง และนิกเกิลที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยใช้เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว แบบคอลัมน์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการบำบัดแคดเมียม ทองแดง และนิกเกิล โดยใช้เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยคอลัมน์
2. ศึกษาไอโซเทอร์มการบำบัด 3 แบบ คือ แบบเส้นตรง แบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนด์ลิช
3. ความสูงของเรซินที่บรรจุในคอลัมน์ เพื่อใช้ในการบำบัดแคดเมียม ทองแดง และนิกเกิล คือ 30 เซนติเมตร โดยศึกษาทั้งน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ช่วยลดมลภาวะทางน้ำและช่วยรักษาสภาพสิ่งแวดล้อม
2. สามารถนำเรซินที่ผ่านการใช้งานมาแล้วนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้
3. สามารถบำบัดไอออนของแคดเมียม ทองแดง และนิกเกิลที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้
4. ลดค่าใช้จ่ายการนำน้ำเสียส่งบำบัดบริษัทภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

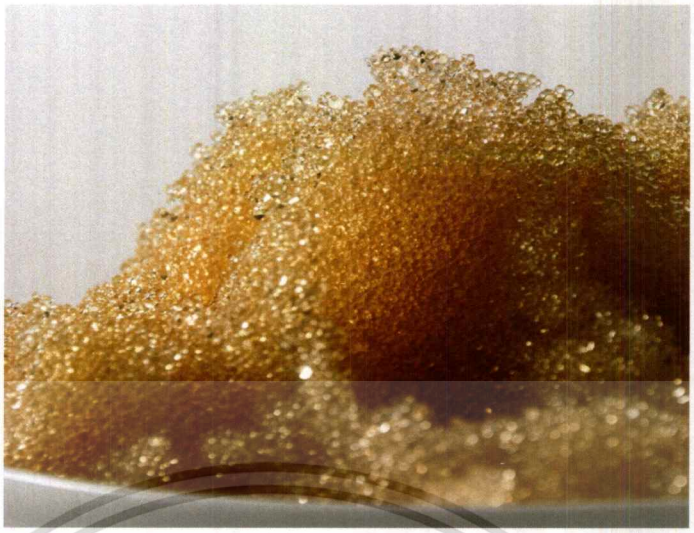
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เรซิน (Resin)

เรซิน หมายถึง สารพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นของแข็งหรือสารที่มีลักษณะกึ่งของแข็ง เป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งมีโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง (Cross-linked) หรือเป็นแบบร่างแห (Three-dimension network) ทำให้ไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป และยังมีคุณสมบัติในการเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนบวกและไอออนลบ ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซิน และแหล่งกำเนิด ลักษณะการทำงานของเรซิน คือ สามารถกำจัดความกระด้างในน้ำได้โดยแลกเปลี่ยนไอออนกับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของน้ำกระด้าง จุดเด่นของเรซิน คือ ช่วยลดความกระด้างของน้ำ และยังสามารถลดสี กลิ่น รส จากสารบางอย่างในน้ำ เช่น ไอออนของเหล็ก จุดด้อย คือ ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ ฝุ่นผงตะกอน และไม่สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ อายุการใช้งานน้อย ต้องมีการรีเจนเนอเรต (Regenerate) ฟื้นอำนาจการแลกเปลี่ยนไอออนใหม่ ในการผลิตน้ำบริสุทธิ์จะใช้เรซินแบบกรดและเรซินแบบด่าง ซึ่งน้ำบริสุทธิ์ หมายถึง น้ำที่ปราศจากเกลือแร่ต่างๆ โดยเรซินแบบด่างจะทำหน้าที่กำจัดไอออนลบและสามารถ รีเจนเนอเรต (Regenerate) ด้วยโซดาไฟ (NaOH) ส่วนเรซินแบบกรดจะทำหน้าที่กำจัดไอออนบวกออกจากน้ำ สามารถรีเจนเนอเรต (Regenerate) ด้วยกรดเกลือ หรือกรดกำมะถัน

ประวัติของเรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) เริ่มขึ้นในราวปี ค.ศ. 1850 โดยนักเคมีชาวอังกฤษ ชื่อ โธมัส (Thomas) และ เวย์ (Way) โดยสังเกตจากการทดลองใส่ปุ๋ยลงดิน พบว่าเมื่อสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$) ลงไปชั้นดิน แล้วนำน้ำผ่านชั้นดินมาวิเคราะห์นั้น พบว่าแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) เข้าแทนที่แอมโมเนียมซัลเฟต (NH_4SO_4) จากการวิเคราะห์พบว่ามีสารบางอย่างในดินซึ่งสามารถแตกตัวให้ไอออนบวกเป็นตัวการดูดจับแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ไว้จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Cation exchange ซึ่งมีประจุบวกได้ดีกว่าประจุบวกชนิดอื่นๆ ทำให้สารละลายดังกล่าวมีความเหมาะสมกับการใช้งานทางด้านการเกษตรกรรม ต่อมามีผู้ค้นพบแร่บางชนิดในดิน เช่น Zeolites และพวก Alumminium silicates มีสมบัติเป็น Ion exchange ที่ดีได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 เรซิน (THAI PEEKEN CO.,LTD, 2561)

2.1.1 การจำแนกประเภทของเรซิน

ปัจจุบันมีการจำแนกเรซินออกเป็น 4 ประเภทคือ

1. เรซินชนิดประจุบวก - กรดแก่ (Strong acid Cation Resin)
2. เรซินชนิดประจุบวก - กรดอ่อน (Weak acid Cation Resin)
3. เรซินชนิดประจุลบ - ด่างแก่ (Strong base Anion Resin)
4. เรซินชนิดประจุลบ - ด่างอ่อน (Weak base Anion Resin)

1. เรซินชนิดประจุบวก - กรดแก่ (Strong acid Cation Resin)

มีหมู่ฟังก์ชันเป็น Sulfonic acid มีไอออนประจำตัวคือ $R\text{-}SO_3^-$ เป็นเรซินที่มีการใช้งานมากที่สุดในจำพวกเรซินประจุบวก ปกติจะอยู่ในรูป

- เกลือโซเดียม ($R\text{-}SO_3Na_2$) หรือเรียกว่า Sodium form เป็นตัวจับไอออนของความกระด้างเพื่อทำน้ำอ่อน (Softening) เพียงอย่างเดียว เรียงลำดับความยากง่ายในการใช้จับสำหรับไอออนประจุบวกดังนี้ $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+$

- ในรูปของ H^+ ($R\text{-}SO_3H_2$) หรือเรียกว่า Hydrogen form ใช้จับไอออนประจุบวกทั้งหมด

2. เรซินชนิดประจุบวก – กรดอ่อน (Weak acid Cation Resin)

มีหมู่ฟังก์ชันเป็น Carboxylic acid มีไอออนประจำตัวคือ R-COOH สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับด่างโซดาไฟหรือเกลือของกรดอ่อนได้ เช่น $NaHCO_3$ แต่ไม่สามารถจับไอออนประจุบวกของเกลืออินทรีย์ได้ เกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$R\text{-}COOH + NaOH \longrightarrow RCOONa + H_2O \qquad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R\text{-}COOH + NaHCO_3 \longrightarrow RCOONa + H_2O + CO \quad (2.2)$$

$$\begin{pmatrix} Ca \\ Mg \\ 2Na \end{pmatrix}(HCO_3)_2 + 2RCOOH \rightarrow 2RCOO\begin{pmatrix} Ca \\ Mg \\ 2Na \end{pmatrix} + 2H_2CO_3 \quad (2.3)$$

$$R\text{–}COOH + NaCl \longrightarrow \text{ไม่ทำปฏิกิริยา} \quad (2.4)$$

$$R\text{-}COOH + CaSO_4 \longrightarrow \text{ไม่ทำปฏิกิริยา} \quad (2.5)$$

$$R\text{–}COOH + CaCl_2 \longrightarrow \text{ไม่ทำปฏิกิริยา} \quad (2.6)$$

3. เรซินชนิดประจุลบ-ด่างแก่ (Strong base Anion Resin)

มีหมู่ฟังก์ชันเป็น Quaternary amine – NH_2 NHR และ NR_2 ติดอยู่กับโครงสร้างของเรซิน มีไอออน คือ R-NOH

เมื่ออยู่ในน้ำปฏิกิริยาแตกตัวดังนี้

$$R\text{-}NOH \leftrightarrow R\text{-}N+ + OH^- \quad (2.7)$$

4. เรซินชนิดประจุลบ – ด่างอ่อน (Weak base Anion Resin)

เรซินชนิดนี้สามารถแตกตัวและจับไอออนได้ในสารละลายที่เป็นกรด เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน และเกลือของกรดอ่อน เรซินชนิดนี้กำจัดได้เฉพาะกรดแก่ เช่น HCl, H_2SO_4 และHNO_3 ออกจากน้ำ และไม่สามารถกำจัดกรดอ่อนได้ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และไม่สามารถจับคลอไรด์ในโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ได้การกำจัดกรดแก่เกิดขึ้นโดยที่กรดแก่ทั้งโมเลกุลเข้าจับกับเรซิน

มีหมู่ฟังก์ชันเป็น Primary Amine จนถึง Tertiary Amine ($R\text{-}NH_2$) ติดอยู่กับโครงสร้างของเรซิน ซึ่งจะแตกตัวดังนี้

$$R\text{-}NH_2 + H_2O \longrightarrow RNH_3\text{-} + OH^- \quad (2.8)$$

$$R + HCl \longrightarrow RHCl \quad (2.9)$$

$$R\text{-}NH_2 + H_2O \longrightarrow RNH_3OH \quad (2.10)$$

$$R\text{-}NH_3OH + HCl \longrightarrow RNH_3Cl + H_2O \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R\text{-}NH_3OH + NH_4Cl \longrightarrow RNH_3Cl + NH_4OH \quad (2.12)$$

การล้างเรซินชนิดนี้อาจใช้ NaOH หรือ Na_2CO_3 หรือ NH_4OH ทั้งนี้เรซินจะจับกับกรดไม่หนาแน่นพอ

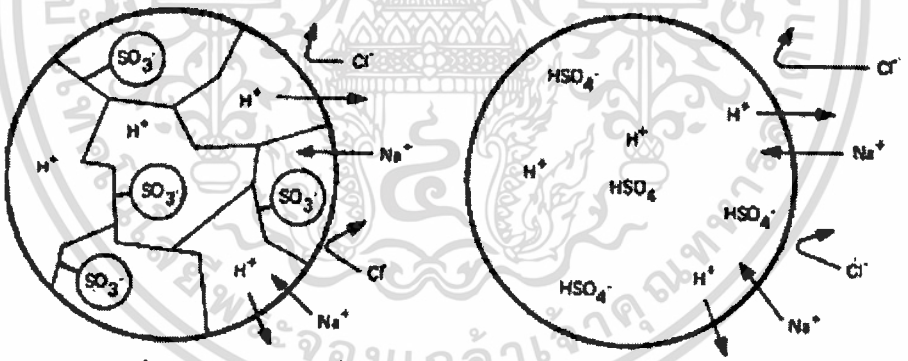
$$RHCl + NaOH \longrightarrow R + NaCl + H_2O \quad (2.13)$$

แม้ว่าจะล้างออกง่าย แต่ก็สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ และปล่อยไอออนที่จับไว้ได้เช่นกัน

$$RNH_3Cl + H_2O \longrightarrow R\text{-}NH_3OH + HCl \quad (2.14)$$

2.1.2 โครงสร้าง และสมบัติทั่วไปของเรซิน

โครงสร้างของเรซินนั้นมีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยเรซินมีโครงร่างคล้ายกับร่างแหตาข่ายสามมิติ ซึ่งจะมีกลุ่มไอออนที่มีประจุตามตำแหน่งต่างๆบนตาข่าย เรียกว่า Matrix ส่วนหมู่ของไอออนที่มีประจุไฟฟ้าที่มีบนตำแหน่งต่างๆของตาข่าย จะเรียกว่า Functional group เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของเรซินในการแลกเปลี่ยนไอออนบนเรซิน เรซินควรมีคุณสมบัติดังนี้



รูปที่ 2.2 การแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (สภาวิศวกร, 2561)

โครงร่างของเรซิน (Structure)

โครงร่างของเรซินเป็นโครงร่างไม่ละลายน้ำและไม่แตกหักง่าย ดังที่ปรากฏโครงร่างของเรซินขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก และชนิดเดียวกันต่อกันเป็นสายยาว และมีไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่งทำหน้าที่เชื่อมขวางให้เกิดเป็นรูปสามมิติที่มีความโปร่งหรือความพรุน ความโปร่งหรือความพรุนของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ ซึ่งความโปร่งหรือความพรุนจะขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมขวางของโครงร่าง เรซินจะต้องมีความโปร่งหรือความพรุนเพียงพอที่ทำให้ไอออนต่างๆเคลื่อนที่เข้าออกได้สะดวกจึงสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับความเชื่อมขวางต่ำจะมีความพรุนมาก ทำให้สามารถอุ้มน้ำได้มาก แตกหักง่าย เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวต่ำ ทำให้ไอออนมีขนาดใหญ่

ความหนาแน่นของเรซิน (Density)

ความหนาแน่นของเรซินแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ความหนาแน่นของเรซินทั่วไป คือ ความหนาแน่นที่ปรากฏ เป็นความหนาแน่นที่วัดได้หลังจากการผ่านการชะล้างเรซิน และปล่อยให้จมตัว แต่ถ้าทางการคำนวณชลศาสตร์ เรซินจะใช้ความหนาแน่นเปียก (Wet adsolute density หรือ True density) และความหนาแน่นประเภทสุดท้าย คือ ความหนาแน่นแห้ง (Dry density)

ขนาดของเม็ดเรซิน (Particle Size)

ขนาดของเรซินนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณเรซิน ความชื้น ระดับการเชื่อมขวางของโครงร่างไฮโดรคาร์บอนและปริมาณหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งคุณสมบัติทางด้านชลศาสตร์ของเรซิน ได้แก่ Head loss ในขณะที่มีการแลกเปลี่ยนไอออน และขยายตัวของชั้นเรซินนั้น ขณะที่การชะล้างเรซินปริมาณน้อยจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของเม็ดเรซินทำให้เรซินมีขนาดประมาณ 0.04 – 1.00 มิลลิเมตร และสามารถบอกได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size) และสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient) ของเรซินแห้ง และเรซินเปียกปริมาตรจะไม่เท่ากัน เนื่องจากขนาดเรซินไม่เท่ากัน

ความชื้นของเรซิน (Moisture Content)

ความชื้นหรือความสามารถในการเก็บกักน้ำในตัวเรซินนั้น มีความสำคัญต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน โดยเรซินที่มีความชื้นสูงจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้มากกว่าเรซินที่มีความชื้นน้อย ซึ่งความสามารถในการเก็บกักน้ำแสดงถึงการบวมน้ำของเม็ดเรซิน หรือเรียกว่า การพองน้ำของเรซิน เมื่อแช่เรซินในน้ำจะมีการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านเข้ามา และออกจากช่องว่างเรซิน เนื่องจากทำให้ไอออนต่างๆที่อยู่ในน้ำสามารถผ่านเข้าไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอิสระของเรซิน ระดับการบวมน้ำของเรซินจะขึ้นอยู่กับระดับของการเชื่อมขวางของโครงร่างไฮโดรคาร์บอน ทำให้เรซินนั้นมีลักษณะเป็นเม็ดแข็ง ถ้าไฮโดรคาร์บอนมีแรงยึดเหนี่ยวไม่แน่นพอเกิดมีช่องว่างมากจะสามารถเก็บน้ำได้มาก ทำให้เรซินมีความชื้นสูงและมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ต่ำ ในทางตรงกันข้าม ถ้าเรซินมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรคาร์บอนสูงก็จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนสูง เรซินจะมีความชื้นน้อย แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวสูงเกินไปทำให้ช่องว่างในเรซินน้อยลง การแลกเปลี่ยนไอออนจะไม่สามารถเกิดขึ้นเองได้ เนื่องจากไอออนอิสระไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าออกได้อย่างสะดวก และอาจทำให้เรซินแตกได้ง่าย ความชื้นของเรซินยังมีประโยชน์ไว้สำหรับใช้ตรวจสอบระดับการเชื่อมขวางของโครงร่าง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของเรซิน

หมู่ฟังก์ชันของเรซิน (Functional Group)

หมู่ฟังก์ชันของเรซินเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆของตัวเรซิน เช่น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ถ้าโครงสร้างส่วนของ Matrix ที่มีประจุลบบนตำแหน่งต่างๆบนตาข่าย หมู่ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเรซินจะเป็นประจุบวก เรียกว่า สารแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchanger) แต่ถ้าโครงสร้างส่วนของ Matrix ที่มีประจุลบบนตำแหน่งต่างๆบนตาข่าย หมู่ฟังก์ชันของเรซินจะเป็นประจุบวก เรียกว่า สารแลกเปลี่ยนแอนไอออน (Anion Exchanger)

โดยทั่วไปเรซินที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย จะมีลักษณะโครงร่างเป็นสารพวกพอลีสไตรีน (Polystyrene) เชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน (Divinylbenzene)

2.1.3 ความจุของการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange capacity)

เนื่องจากเรซินสามารถแสดงลักษณะต่างๆมากมาย จึงจำเป็นต้องมีตัวชี้วัดที่สามารถแสดงถึงคุณลักษณะของเรซินได้ โดยสิ่งที่แสดงคือ ขนาดของความจุและความแรงของหมู่กรดและเบส การหาความจุของเรซินตาทฤษฎี คือหาจำนวนหมู่ฟังก์ชันของกรดและเบสที่มีใน 1 กรัมของเรซินแห้ง การหาความจุในทางปฏิบัติ คือ การหาจำนวนมิลลิกรัมสมมูลของไอออน (meq) ที่สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนของเรซินแห้ง 1 กรัมในทางปฏิบัติ ตามปกติค่าความจุในทางปฏิบัติจะน้อยกว่าค่าทางทฤษฎี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงร่างและส่วนประกอบของเรซินและสารละลาย

ส่วนในการทดลองจำเป็นต้องทราบความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน มิฉะนั้นการบรรจุเรซินลงในคอลัมน์จะไม่เพียงพอต่อการแลกเปลี่ยนไอออน หรือมากเกินไปโดยไม่จำเป็น วิธีการตรวจสอบความจุของเรซินทำได้โดยชั่งเรซินเพื่อให้ทราบถึงน้ำหนักที่แน่นอนที่จะบรรจุลงคอลัมน์ และเปลี่ยนเรซินทั้งหมดให้อยู่ในรูปของไฮโดรเจน (H^+) สำหรับเรซินชนิดแลกเปลี่ยนแคตไอออนชนิดกรดแก่ หลังจากนั้นผ่านสารละลายเกลือแกงลงไปจนกระทั่งเรซินอยู่ในรูปของโซเดียมทั้งหมด นำสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ซึ่งมีไฮโดรเจน (H^+) หลุดออกมา มาทำการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วคำนวณหาจำนวนมิลลิกรัมสมมูลของไฮโดรเจน (H^+) ที่ได้ทั้งหมด จะทำให้ทราบความจุในทางปฏิบัติของเรซิน ถ้าเป็นเรซินชนิดแลกเปลี่ยนแอนไอออนให้เปลี่ยนเรซินให้อยู่ในรูปของคลอไรด์ (Cl^-) ที่ถูกแลกเปลี่ยน

สำหรับการหาความจุของการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange capacity) ต้องคำนึงถึงค่าพีเอชของสารละลายด้วย เพราะเรซินจะแลกเปลี่ยนได้ดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช กรณีแคตไอออนเรซินชนิดอ่อนต้องหาความจุเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชสูงกว่า 9 และในกรณีของแอนไอออนเรซินชนิดอ่อนต้องหาความจุเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชต่ำกว่า 5

เทอร์มที่ใช้สำหรับแสดงคุณลักษณะของเรซินอีกเทอร์มหนึ่ง เรียกว่า loading (L) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนไอออนของสารตัวอย่างที่มีอยู่ในเรซินต่อความจุของเรซิน

$$L = \frac{n[MR_n]}{C} \qquad (2.15)$$

n คือ ประจุไอออนของ M^{n+}

$[MR_n]$ คือ ความเข้มข้นของ M^{n+} ในเรซิน

C คือ ความจุของเรซินหมายถึง จำนวนมิลลิกรัมสมมูลของไอออนต่อเรซินที่แห้ง 1 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 รีเจนเนอเรชัน (Regeneration)

รีเจนเนอเรชัน หมายถึง การทำให้เรซินหมดอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน แล้วนำกลับมาฟื้นตัวขึ้นให้มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนใหม่อีกครั้ง การที่เรซินหมดอำนาจในการแลกเปลี่ยน(ชั่วคราว) เป็นเพราะว่าไอออนอิสระส่วนใหญ่ถูกนำไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอื่นในน้ำจนหมด การที่ทำรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) คือการไล่ไอออนในเรซินที่แลกเปลี่ยนกับน้ำ และเติมไอออนอิสระให้กับเรซิน ทำให้เรซินกลับสู่สภาพเดิม และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ใหม่อีกครั้ง สารเคมีที่ใช้เติมไอออนอิสระให้กับเรซินที่เสื่อมสภาพแล้วจะเรียกว่า สารรีเจนเนอแรนต์ (Regenerant) ได้แก่ NaCl, H_2SO_4 และHCl ซึ่งจะใช้เติม H^+ เป็นต้น

ประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชัน (Regeneration efficiency) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างจำนวนสมดุลของไอออนในเรซินที่เสื่อมแล้ว กับจำนวนสมดุลของไอออนในสารรีเจนเนอแรนต์ที่นำมาแลกเปลี่ยน ถ้าประสิทธิภาพเท่ากับ 100 % หมายความว่า ไอออนที่แลกเปลี่ยนระหว่างกันของสารรีเจนเนอแรนต์ กับเรซินที่เสื่อมสภาพนั้นมีจำนวนเท่ากัน โดยปกติแล้วการแลกเปลี่ยนไอออนจากเรซินที่เสื่อมอำนาจแล้วมักจะใช้ไอออนจำนวนมากกว่าสารรีเจนเนอแรนต์ กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชันมักมีค่าไม่ถึง 100 %

2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

ระดับพีเอช

เรซินแต่ละประเภทมีข้อจำกัดที่ต่างกันไป เรซินแบบกรดอ่อนจะใช้ได้ดีกับน้ำที่มีระดับพีเอชสูง ส่วนเรซินแบบด่างอ่อนใช้ได้ดีกับน้ำที่ระดับพีเอชต่ำ ในขณะที่เรซินแบบกรดอ่อนและแบบด่างแก่สามารถใช้ได้กับน้ำทุกระดับพีเอช

ปริมาณของเรซิน

ปริมาณของเรซินมีความสำคัญต่อการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากเรซินแต่ละชนิดมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนแตกต่างกันไป ถ้าเรซินมีปริมาณมากๆ ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนจะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ

เวลาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน

เรซินแต่ละประเภทใช้เวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนที่แตกต่างกัน เรซินแบบกรดแก่และด่างแก่จะมีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนเร็วกว่าเรซินแบบกรดอ่อนและด่างอ่อน

ปริมาณสารรีเจนเนอแรนต์ (หรือระดับสารที่ใช้ในการรีเจอเนอเรชัน)

ถ้าใช้ปริมาณรีเจนเนอแรนต์มากเกินไป ทำให้มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดปริมาณไม่ให้รีเจนเนอแรนต์สูงเกินไป หน่วยที่เราใช้ในการทำรีเจนเนอแรนต์ คือ ปริมาณสารเคมีต่อปริมาตรของเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของรีเจนเนอแรนต์

ในการย้อนกลับการแลกเปลี่ยนไอออนที่ได้ดีที่สุด จำเป็นต้องมีระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม การใช้ความเข้มข้นที่สูงเกินไปทำให้เรซินเกิดการหดตัวจนเป็นอุปสรรคต่อการแลกเปลี่ยนไอออน แต่ถ้าความเข้มข้นต่ำไปก็ไม่เพียงพอต่อการแลกปลี่ยนไอออนเช่นกัน

เวลาสัมผัสระหว่างรีเจนเนอแรนต์และเรซิน

เวลาสัมผัสระหว่างรีเจนเนอแรนต์และเรซิน หมายถึง ระยะเวลาที่เรซินเริ่มสัมผัสกับรีเจนเนอแรนต์ถึงเวลาที่เริ่มทำการชะล้าง สารรีเจนเนอร์แรนต์ เวลาสัมผัสสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$t = \frac{1}{f(f/n)} \qquad (2.16)$$

t คือ เวลาสัมผัส

f คือ อัตราการไหลของการทำรีเจนเนอเรชัน

n คือ ปริมาณเรซิน

อัตราการไหลของน้ำในระหว่างแลกเปลี่ยนไอออน

การแลกเปลี่ยนไอออนที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เช่น กรณีเรซินแบบกรดแก่ที่ใช้กำจัดความกระด้าง อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านชั้นเรซินจะมีอิทธิพลน้อยมากต่ออำนาจในการแลกเปลี่ยน แต่เรซินบางชนิดมีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ จึงใช้อัตราการไหลของน้ำต่ำ เพื่อให้มีเวลาพอเพียงสำหรับปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นนิยมกำหนดอัตราการไหลของน้ำอยู่ที่ช่วง 2-5 gal/min-ft^3

2.2 โลหะหนัก (Heavy Metals)

โลหะหนักถือเป็นสารพิษ เนื่องจากร่างกายไม่สามารถเผาผลาญได้จึงมีการสะสมไว้ในเนื้อเยื่ออ่อน โดยโลหะหนักจะมีความถ่วงจำเพาะที่มากกว่าน้ำ 5 เท่าขึ้นไป เป็นสารที่มีอัตราการสลายตัวค่อนข้างช้า และยังมีการสะสมในสิ่งแวดล้อมได้นาน โลหะหนักยังมีคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่าง คือ ต้องเป็นโลหะที่อยู่ในกลุ่มธาตุแทรนซิชัน(Transition metals) ซึ่งจัดว่าเป็นกลุ่มธาตุที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ไม่สลายตัวในกระบวนการทางธรรมชาติ มีความเสถียร และสามารถสะสมอยู่ในอากาศ ดิน และแหล่งน้ำรวมถึงสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตได้อีกด้วย โดยโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ผ่านทางอาหาร, น้ำ, อากาศ หรือผ่านทางการดูดซับทางผิวหนังจากการสัมผัสในการทำเกษตรกรรม, กระบวนการผลิตทางเภสัชกรรม, กระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม หรือบริเวณที่ตั้งอาศัย ธาตุที่จัดเป็นโลหะหนักมีทั้งหมด 21 ชนิด ได้แก่ ทองแดง (Cu^{2+}), เงิน (Ag^{2+}), ทองคำ (Au^{2+}), ทองคำขาว (Pt), สังกะสี(Zn^{2+}), ตะกั่ว (Pb^{2+}), ดีบุก (Sn^{2+}), โครเมียม (Cr^{2+}), ทังสเตน (W), แคดเมียม (Cd^{2+}), ปรอท (Hg^{2+}), บิสมัท (Bi^{2+}), พลวง (Sb^{3+}), ไททาเนียม (Ti^{2+}), แทนทาลัม (Ta^{2+}), โคบอลต์ (Co^{2+}), ยูเรเนียม (U^{2+}), นิกเกิล (Ni^{2+}), แมงกานีส (Mn^{2+}), โมลิเดียม (Mo^{2+}) และเบอร์มัสเนียม จะเห็นว่าแต่ละธาตุที่นิยมนำใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท และจากข้อมูลการจัดอันดับสารอันตรายโดยองค์กร The Agency for

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) ซึ่งเป็นองค์กรที่ก่อตั้งขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบต่อสุขภาพและคุณภาพชีวิตที่ลดลงจากสารอันตรายต่างๆ พบว่า มีโลหะหนัก 3 ชนิด ติด 10 อันดับแรกของสารอันตรายจากทั้งหมด 275 รายการทั้งในปี ค.ศ. 2007 และค.ศ.2011 คือ ตะกั่ว (Lead), ปรอท (Mercury) และแคดเมียม (Cadmium)

2.2.1 แคดเมียม (Cadmium)

รูปที่ 2.3 แคดเมียม (สถาบันไอทีจีเนียส, 2015)

แคดเมียม หรือ เรียกอีกชื่อหนึ่ง Colloidal cadmium เป็นโลหะหนักที่มีประจุบวก 2 ประจุ ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1817 โดยมีรากศัพท์มาจากภาษาลาตินว่า Cadmia และภาษากรีกว่า Kadmeia

สมบัติทางกายภาพ

แคดเมียมเป็นธาตุโลหะหนักที่มีสีเงินแกมขาว มีคุณสมบัติเบา อ่อน ดัดโค้งได้ง่ายและสามารถทนต่อการกัดกร่อนเมื่อใช้ความร้อนสูง เช่น การอบแร่, การบัดกรี, การหลอมเหล็ก และการเผาของเสีย ทำให้มีไอของแคดเมียมออกมาในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน ไอระเหยของแคดเมียมจะระเหยขึ้นสู่อากาศถูกออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วเปลี่ยนเป็นแคดเมียมออกไซด์ (CdO) นอกจากนี้แคดเมียมยังมีคุณสมบัติเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก (HNO_3) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เจือจาง ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ความรุนแรงถึงขั้นได้รับแล้วมีอาการเฉียบพลัน โดยทั่วไปจะไม่ค่อยพบแคดเมียมในรูปของแคดเมียมบริสุทธิ์ มักจะพบในรูปของสารประกอบของเกลือ เช่น Cadmium sulfate ($CdSO_4$), Cadmium nitrate ($Cd(NO_3)_2$ และCadmium chloride ($CdCl_2$) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีสี และละลายได้ดีในน้ำ และแคดเมียมยังสามารถรวมตัวกับสารชนิดอื่นๆเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้โดยเฉพาะเมื่อรวมกับ Cyanides (CN^-) และ Amines ($-NH_2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของแคดเมียม

สมบัติ	รายละเอียด
เลขอะตอม	48 เป็นธาตุที่สองของหมู่ XIIB ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะแทรนซิชัน
น้ำหนักอะตอม	112.40 g/mol
จุดหลอมเหลว	594.22 K (321.07 °C)
จุดเดือด	1040 K (767 °C)
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 °C	8.65 g/cm^3
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.69 Pauling scale
เลขออกซิเดชันสามัญ	+2

ที่มา : วิกิพีเดียสารานุกรมเสรี, 2559

ประโยชน์

แคดเมียมนิยมไปใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมต่างๆ และสินค้าอุปโภค เช่น ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสมอัลลอยด์ (Alloy) เพื่อเพิ่มความเหนียวและความทนทานต่อการกัดกร่อน ใช้สำหรับชุบโลหะ โดยแคดเมียมจะเคลือบบนแผ่นเหล็ก, ทองแดงและอะลูมิเนียม โดยการชุบโลหะจะใช้ไฟฟ้า โลหะที่ได้จากการชุบจะนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน, รถยนต์, อุปกรณ์ไฟฟ้า, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และวิทยุ เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นเม็ดสีในอุตสาหกรรม สารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์ และแคดเมียมซัลโฟซีลีไนต์ ใช้ในการให้สีอุตสหกรรมต่างๆ เช่น สีอินาเมล, เซรามิก, ยาง, แก้ว, ผ้า, เส้นใย, หนัง, หมึกพิมพ์ และพลาสติก และยังใช้ผลิตแบตเตอรี่ โดยใช้โลหะร่วมกับนิกเกิลเป็น Cd-Ni battery ซึ่งนำมาใช้เป็นแบตเตอรี่ในเครื่องคิดเลข, แฟลชถ่ายรูป, นาฬิกา และวิทยุเล็กๆ เป็นต้น

ความเป็นพิษ

จากการที่แคดเมียมถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม และสินค้าอุปโภค จึงพบโลหะแคดเมียมปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม, น้ำ, อากาศ, และในร้านอาหาร ส่งผลให้มนุษย์เราได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายได้ โดยคนทั่วไปจะได้รับแคดเมียมจากการบริโภคอาหารเป็นหลัก อาจปนเปื้อนมากับผักผลไม้หรือจากเนื้อสัตว์ที่นำมาประกอบอาหาร จากการดื่มน้ำที่มีแคดเมียมละลายในน้ำดื่ม และได้รับจากการหายใจเอาอากาศที่มีฝุ่นของแคดเมียมฟุ้งกระจายตัวอยู่ โดยเฉพาะในแหล่งอุตสาหกรรมที่มีการใช้แคดเมียมเป็นวัตถุดิบ อาทิเช่น โรงงานทำแบตเตอรี่ หรือ บริเวณที่มีการทำเหมืองแร่ ตะกั่ว, ทองแดง, สังกะสี ที่มักมีแคดเมียมปนอยู่ด้วย และอาศัยอยู่ในแหล่งที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมในอากาศเป็นเวลานาน จะทำให้แคดเมียมเข้าสู่ร่างกายซึมผ่านผิวหนัง และผู้ที่สูบบุหรี่จัดจะทำให้ได้รับปริมาณแคดเมียมในร่างกายเพิ่มขึ้นเป็นครึ่งหนึ่งของปริมารที่ได้รับ จะเก็บสะสมไว้ที่ตับและไต ทำให้เป็นพิษสะสมได้ในร่างกาย การขับแคดเมียมที่ร่างการดูดซึมเข้าไปออกจากร่างกายเป็นไปค่อนข้างช้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก เพราะแคดเมียมนั้นมีวงจรครึ่งชีวิตในคนค่อนข้างยาวนานประมาณ 16 – 33 ปี โดยความเป็นพิษของแคดเมียม แบ่งเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

1. ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

1.1 ความเป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหาร ร่างกายเราได้รับแคดเมียมจากการกินอาหาร และเครื่องดื่มที่มีแคดเมียมปนเปื้อน หรือในภาชนะที่เคลือบด้วยแคดเมียม ผู้ที่ได้รับแคดเมียมอาการเริ่มแรกที่พบ คือ รู้สึกคลื่นไส้และอาเจียนอย่างรุนแรง ท้องร่วง เป็นตะคริว และมีน้ำลายฟูมปาก ในกรณีที่อาการหนักเป็นมากๆ อาจทำให้เกิดอาการช็อคได้ เนื่องจากสูญเสียน้ำในปริมาณมาก ระบบทำงานของไตทำงานผิดปกติ และถึงขั้นอาจเสียชีวิตได้

1.2 ความเป็นพิษต่อระบบบรการหายใจ การสูดไอแคดเมียมเข้าไป ทำให้เกิดอาการระคายเคืองที่หลอดลม ปอด จมูก ลำคอ และยังทำให้เกิดอาการไอ เวียนศีรษะ อ่อนเพลีย หนาวสั่น

2. ความเป็นพิษเรื้องรัง

ความเป็นพิษแบบเรื้อรังของแคดเมียม จะเกิดจากการที่ร่างกายได้รับแคดเมียมสะสมเป็นเวลานานติดต่อกัน ส่งผลให้ต่ออวัยวะภายในร่างกายมนุษย์

2.1 ความเป็นพิษต่อปอด คือ การหายใจเอาฝุ่นหรือไอ (fume) ของแคดเมียมเข้าไปในร่างกายติดต่อกันเป็นเวลานาน จะทำให้เนื้อเยื่อของปอดเกิดการบวมหรือพองตัวได้ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการระบายลมของปอดลดลง อากาศจะอยู่ภายในปอดนานกว่าปกติ ทำให้หายใจติดขัดหรือหายใจไม่ออก

2.2 ความเป็นพิษต่อไต คือ ผู้ที่ได้รับแคดเมียมสะสมในร่างากยติดต่อกันเป็นเวลานาน จะพบความเป็นพิษที่ไตก่อนจะไปที่ปอด เกิดเป็นแผลที่บริเวณไต ความเป็นพิษต่อไตจะปรากฏ โดยผู้ป่วยจะมีอาการของโปรตีนยูเรีย คือ ไตจะขับปัสสาวะที่มีโปรตีนมากกว่าปกติ โปรตีนที่ขับออกมา ส่วนใหญ่จะเป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น microglobin lysozyme rinbonuclease retinol binding protein และ immunoglobin chain โดยชนิดของโปรตีนที่ถูกขับออกมาจะเป็นตัวบอกให้ว่าไตส่วนใดถูกทำลาย เช่น ถ้าโปรตีนขนาดใหญ่ถูกขับออกมา แสดงว่า ทิบูล (Tubule) ถูกทำลาย นอกจากโปรตีนแล้วยังอาจมีสารอื่นๆ ถูกขับออกมากปกติด้วย เช่น กรดอะมิโน ทำให้เกิดอาการ glucosuria เป็นต้น

2.3 ความเป็นพิษที่กระดูก สามารถเห็นได้ชัดในกรณีการเกิดโรค อิไต อิไต โรคชนิดนี้เป็นโรคกระดูกผุ หรือกระดูกพรุน โกง ง้อโค้งได้ ทำให้กระดูกเสียรูปทรง แตกร้าวและหักได้ เนื่องจากร่างกายดูดซึมแคลเซียมได้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 โรคอิไต อิไต (ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและการจัดการภัยพิบัติ, 2552)

2.4 ความเป็นพิษต่อระบบเลือดเข้าสู่หัวใจและระบบการสร้างเม็ดเลือด จะทำให้เกิดความดันโลหิตสูง เป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคหัวใจ หัวใจเต้นผิดจังหวะ ในกลุ่มผู้ป่วยที่เป็นโรคอิไต อิไต และกลุ่มคนงานที่ต้องสัมผัสกับแคดเมียมนั้นจะพบอาการของโรคโลหิตจางด้วย

2.5 ความเป็นพิษต่อตับ จากการทดลองในสัตว์ทดลองพบว่า แคดเมียมในปริมาณน้อย (ในน้ำดื่ม 1 ppm) มีผลทำให้การทำงานของเอนไซม์ในตับเปลี่ยนไป

การปฐมพยาบาลเบื้องต้นและวิธีการป้องกันการเกิดพิษ

1. หากผู้ป่วยได้รับพิษจากทางหายใจหรืออยู่ในบริเวณที่มีแคดเมียมฟุ้งกระจาย ควรนำผู้ป่วยออกมาที่โล่ง ที่ไม่มีการฟุ้งกระจายของแคดเมียม ผู้ปฐมพยาบาลควรใส่หน้ากาก และชุดป้องกันพิษเพื่อป้องกันอันตราย

2. หากผู้ป่วยหยุดหายใจให้รีบช่วยหายใจทันที ร่วมด้วยการใช้หน้ากากที่มีวาล์วทางเดียว (One way valve) ช่วยในการหายใจด้วย

3. ผู้ป่วยมีการสัมผัสทางผิวหนัง ให้รีบถอดเสื้อผ้าที่ปนเปื้อนออก และรีบล้างทำความสะอาดร่างกายด้วยน้ำสะอาดหรือใช้สบู่ช่วยในการทำความสะอาด สำหรับเสื้อผ้าผู้ป่วยควรเก็บใส่ถุงปิดสนิทเพื่อตรวจสอบหาสาเหตุร่วมด้วย

4. หากสัมผัสที่ตา ให้รีบล้างตาด้วยน้ำเกลือ เป็นเวลา 15 นาที

5. หากได้รับโดยทางกิน ให้ผู้ป่วยดื่มน้ำและทำให้อาเจียนเป็นระยะๆ

6. ให้รีบนำผู้ป่วยส่งโรงพยาบาลที่ใกล้ที่สุด พร้อมนำหลักฐาน เช่น เสื้อผ้า อาหารที่กิน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ทองแดง (Copper)

รูปที่ 2.5 ทองแดง (วิกิพีเดียสารานุกรมเสรี, 2561)

ทองแดงมีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cu ซึ่งมาจากภาษาลาตินว่า Cuprum หมายถึง ชื่อเกาะไซปรัส (Cyprus) เป็นแหล่งแร่ทองแดงขนาดใหญ่ มีการค้นพบและนำโลหะทองแดงมาใช้ประโยชน์ แร่ทองแดงสามารถพบในสภาพบริสุทธิ์โดยธรรมชาติ คือ พบในสภาพที่เป็นโลหะ (Metallic state) หรือในสภาพทองแดงธรรมชาติ (Native copper) ทำให้การรวบรวมและนำมาหลอมเป็นโลหะสำหรับใช้งานได้ง่าย

สมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของทองแดง

สมบัติ	รายละเอียด
เลขอะตอม	29 เป็นธาตุแรกของหมู่ IB จัดเป็นโลหะและโลหะแทรนซิชัน
น้ำหนักอะตอม	63.55 g/mol
จุดหลอมเหลว	1357.77 K (1084.62 °C)
จุดเดือด	2835 K (2562 °C)
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 °C	8.96 g/cm^3
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.90 Pauling scale
เลขออกซิเดชันสามัญ	+1, +2

ที่มา : วิกิพีเดียสารานุกรมเสรี, 2561

ประโยชน์

ทองแดง เป็นโลหะที่มีความสำคัญในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ (Eletronics) รวมถึงเครื่องเรือนต่างๆ เพราะมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ได้แก่ เป็นโลหะที่สื่อไฟฟ้า และถ่ายเทความร้อนได้ดี มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง สามารถรีดขึ้นรูปได้ง่าย อุตสาหกรรมที่มีการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทองแดง ได้แก่ อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น

ความเป็นพิษ

ทองแดงเป็นธาตุโลหะที่ร่างกายมนุษย์เรามีความต้องการในปริมาณเล็กน้อย (Trace element) เช่น จำเป็นต่อกระบวนการเผาผลาญอาหาร (Metabolism) ผู้ใหญ่ต้องการทองแดง 2 มิลลิกรัมต่อวัน และร่างกายของคนเราจะมีทองแดงอยู่ประมาณ 100 – 150 มิลลิกรัม ซึ่งทองแดงจำนวนนี้จะมีความเข้มข้นสูงสุดที่บริเวณตับและกระดูก ในกระบวนการสร้างฮีโมโกบิลต้องอาศัยทองแดง แม้ว่าตัวฮีโมโกลบินจะไม่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้การสังเคราะห์เอนไซม์หลายชนิดต้องอาศัยทองแดงด้วย

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณทองแดงน้อยๆ ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ยังเป็นสิ่งที่ร่างกายคนเราต้องการอีกด้วย แต่ถ้าหากได้รับปริมาณสูงจะมีโทษและเป็นพิษได้ เช่น $CuSO_4$ 27 กรัม ทำให้ตายได้ ถ้ารับประทานปริมาณน้อยกว่านี้จะเกิดอาการอาเจียน เหน็บชา และสำลัก ทองแดงยังเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับพืชด้วย เช่น จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ และเอนไซม์ของพืช

การปฐมพยาบาลเบื้องต้นและวิธีการป้องกันการเกิดพิษ

1. ผิวหนัง ควรสวมเสื้อผ้าที่รัดกุมและมีเครื่องป้องกันร่างกาย ก่อนการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับสารทุกครั้ง เมื่อสารพิษถูกผิวหนังรีบล้างออกด้วยสบู่และน้ำสะอาด ถ้าสารพิษกระเด็นหรือหกเปื้อนเสื้อผ้า ต้องรีบเปลี่ยนเสื้อผ้าทันที แล้วล้างผิวด้วยสบู่และน้ำสะอาด จากนั้นรีบนำส่งโรงพยาบาล
2. ตา ควรมีเครื่องป้องกันสายตาที่เหมาะสมก่อนการปฏิบัติงานที่เกี่ยวกับสาร (ไม่ควรสวมคอนเทคเลนส์ระหว่างทำงานเกี่ยวข้องกับสารเคมี) เพราะเมื่อสารพิษกระเด็นเข้าตา ต้องรีบล้างออกด้วยน้ำสะอาดจำนวนมากสลับกับการค่อยๆกระพริบตาขึ้น-ลง จากนั้นรีบนำส่งโรงพยาบาลทันที
3. การหายใจ เมื่อหายใจรับเอาสารเข้าไปเป็นจำนวนมาก ต้องรีบเคลื่อนย้ายผู้ได้รับสารออกจากบริเวณนั้น ไปสู่บริเวณที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก ถ้าหยุดหายใจให้รีบทำการผายปอด (mouth-to-mouth) แล้วรีบนำส่งโรงพยาบาลทันที
4. การกลืนกินสารพิษ รีบนำส่งโรงพยาบาลทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 นิกเกิล (Nickel)

รูปที่ 2.6 นิกเกิล (วิกิพีเดียสารานุกรมเสรี, 2558)

นิกเกิล เป็นโลหะหนักที่มีอยู่ในธรรมชาติ ในดิน หิน แหล่งน้ำธรรมชาติ และเหมืองแร่ มีความมันวาวสีขาวเงิน อยู่กลุ่มเดียวกับเหล็ก ซึ่งมีความแข็งแต่สามารถตีเป็นแผ่นได้ มีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่าง ได้แก่ ความเงา, ความทนทานต่อการกัดกร่อน, ความทนต่อความร้อน และเป็นโลหะที่ยืดงอได้ ด้วยเหตุนี้มีการนำนิกเกิลในธรรมชาติจะทำปฏิกิริยาเคมีกับกำมะถัน เกิดเป็นแร่มิลเลอร์ไรต์ (Millerite) ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับสารหนู (Arsenic) จะเกิดเป็นแร่นิกกอไลต์ (Niccolite) แต่ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับทั้งสารหนูและกำมะถันจะเป็นก้อนนิกเกิลกลานซ (Nickel glance)

สมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของทองแดง

สมบัติ	รายละเอียด
เลขอะตอม	28 เป็นธาตุแรกของหมู่ I จัดเป็นโลหะและโลหะแทรนซิชัน
น้ำหนักอะตอม	58.6934 g/mol
จุดหลอมเหลว	1728 K (1455 °C)
จุดเดือด	3186 K (2913 °C)
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 °C	8.908 g/cm^3
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.91 Pauling scale
เลขออกซิเดชันสามัญ	0, +1, +2, +3 และ +4

ที่มา : วิกิพีเดียสารานุกรมเสรี, 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์

ใช้สำหรับชุบโลหะหนัก, ป้องกันการเกิดสนิม และยังช่วยให้ผิวของโลหะแวววาวมากขึ้น สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในทางอุตสาหกรรมบางชนิด เช่น ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ในกระบวนการผลิตน้ำมันพืช ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตโลหะผสมต่างๆ สำหรับใช้ในอุตสาหกรรม เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ และเครื่องใช้ครัวเรือน เป็นต้น ใช้ผลิตฉนวนต้านทานไฟฟ้าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

ความเป็นพิษ

ความเป็นพิษของนิกเกิลมักเกิดจากฝุ่นนิกเกิล และนิกเกิลคาร์บอนิลที่เกิดจากกระบวนการทำนิกเกิลบริสุทธิ์ รวมถึงนิกเกิลอิสระในรูปของประจุ +2 และสารประกอบของนิกเกิลอื่นๆ ซึ่งนิกเกิลและสารประกอบของนิกเกิลสามารถทำให้เกิดโรคมะเร็งในคนและสัตว์ ความเป็นพิษจากการสัมผัสกับนิกเกิลโดยตรง ทั้งจากฝุ่นและนิกเกิลที่ละลายในน้ำจะทำให้เกิดอาการผื่นคันตามผิวหนัง รวมถึงการสัมผัสกับตาจะทำให้เกิดการระคายเคืองของเยื่อบุตา เกิดอาการแสบตา ตาแดง และรุนแรงบวม อักเสบ การสูดดมฝุ่นและไอระเหยของสารประกอบนิกเกิลยังเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดมะเร็งปอด และอาการระคายเคืองในระบบทางเดินหายใจ

การปฐมพยาบาลเบื้องต้นและวิธีการป้องกันการเกิดพิษ

1. การหายใจ จะเน้นการรักษาในเรื่องการเปิดทางเดินหายใจให้โล่ง เพื่อให้หายใจได้ ถ้าไม่หายใจต้องใส่ท่อและทำการช่วยหายใจ ควรตรวจเอกซเรย์ทรวงอกเพื่อดู Chemical pneumonitis อาจพิจารณาการใช้สเตียรอยด์เพื่อลดปฏิกิริยาอักเสบ ในกรณีที่มี Pulmonary edema ให้รักษาด้วยการใช้เครื่องช่วยหายใจ PEEP หรือ CPAP นอกจากนี้ ต้องเฝ้าระวังคลื่นไฟฟ้าหัวใจ และการทำงานของไตด้วย

2. ผิวหนัง ผิวหนังอักเสบที่เกิดขึ้นจะลดลงได้เมื่อหยุดการสัมผัสกับโลหะนิกเกิลต้นเหตุ ซึ่งอาจต้องพิจารณาว่าเป็นสิ่งใด ส่วนใหญ่จะเป็นของใกล้ตัว เช่น คลิปหนีบกระดาษ, เหรียญ, สร้อย และหัวเข็มขัด เป็นต้น อาชีพและตำแหน่งที่ผื่นขึ้นอาจช่วยบอกสาเหตุได้ การรักษาเน้นรักษาตามอาการ ให้ยาทาสเตียรอยด์ลดการอักเสบ

3. ตา หลังจากปฐมพยาบาล ควรส่งตรวจกับจักษุแพทย์เพื่อเอาสิ่งแปลกปลอมออกจากตาถ้ามี และเพื่อการรักษาต่อเนื่องต่อไป

4. การกลืนกินสารพิษ ทำ Gastric lavage และให้ Activated charcoal 50 กรัม เฝ้าระวัง EKG และการทำงานของไต และให้การรักษาตามอาการ

วิธีการป้องกันการเกิดพิษ

1. การหายใจ หากผู้ป่วยหยุดหายใจให้ทำการช่วยหายใจทันที อุปกรณ์แนะนำคือ Pocket mask with a one way valve หรือ หน้ากากแบบมีถุงออกซิเจนและมีลิ้นควบคุมอากาศให้ไหลไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางเดียว เพื่อป้องกันไม่ให้ผู้ช่วยเหลือสัมผัสกับลมหายใจออก เสมหะ และสิ่งคัดหลั่งของผู้ป่วย ซึ่งมีสารเคมีปนเปื้อน

2. ผิวหนัง ถอดเสื้อผ้าและล้างตัวทันที และควรเก็บเสื้อผ้าในภาชนะปิด

3. ตา ล้างตาด้วยน้ำหรือน้ำเกลือ 0.9 % นานอย่างน้อย 15 นาที

2.3 น้ำเสีย (Wastewater)

น้ำเสีย หมายถึง น้ำทิ้ง หรือน้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์ หรือมีสิ่งปฏิกูลที่ไม่พึงประสงค์เจือปนอยู่ในน้ำ จนทำให้คุณสมบัติของน้ำเสื่อมลง จนไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ เว้นแต่ได้ผ่านกรรมวิธีการบำบัดที่เหมาะสม โดยสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเสียจะมีคุณลักษณะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดนั้น เช่น สี, กลิ่น, น้ำมัน, ไขมัน, ผงซักฟอก, สบู่, ยาฆ่าแมลง, สารอินทรีย์, สารอนินทรีย์เชื้อโรค และตลอดจนสารพิษอื่นๆ

2.3.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย

สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทใหญ่ ได้แก่

1. น้ำเสียจากชุมชน (Domestic Wastewater)

น้ำเสียชุมชนเป็นน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยในชุมชนและการประกอบอาชีพ เช่น บ้านพักอาศัย, หมู่บ้านจัดสรร, คอนโดมิเนียม, โรงแรม, ตลาดสด, โรงเรียน และโรงพยาบาล เป็นต้น โดยน้ำเสียจะเกิดจากกิจกรรม ได้แก่ การอุปโภคบริโภค, การชำระล้าง, การซักล้าง, การประกอบอาหาร, น้ำเสียประเภทนี้มักมีสารอินทรีย์, แบคทีเรีย, น้ำมันและไขมันปนเปื้อน

2. น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Wastewater)

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีการปนเปื้อนสิ่งสกปรกแตกต่างกันไปตามแต่ลักษณะอุตสาหกรรม โดยปกตินำเสียมักเกิดจากการล้างวัตถุดิบ กระบวนการผลิต กระบวนการหล่อเย็น กระบวนการต้มระเหย นอกจากนี้ก็มีน้ำเสียจากสำนักงาน, อาคารที่พัก, โรงอาหารเป็นต้น

3. น้ำเสียจากการเกษตรกรรม (Agricultural Wastewater)

น้ำเสียจากการเกษตรมักมีสิ่งเจือปนอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้น้ำ การใช้ปุ๋ย และการใช้สารเคมีต่างๆ เป็นต้น

2.3.2 สิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

1 .สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ทำให้ระดับออกซิเจนละลายในน้ำ ค่าดีโอ (DO) หรือ Dissolved Oxygenลดลงเกิดสภาพเน่าเหม็นได้ ปริมาณสารอินทรีย์นิยมวัดด้วยค่าบีโอดี (BOD) หรือ Biochemical Oxygen Demand เมื่อค่าบีโอดีในน้ำสูง แสดงว่ามีสารอินทรีย์ปะปนอยู่มาก

2. สารอนินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่างๆ อาจไม่ทำให้น้ำเน่าเหม็น แต่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โลหะหนักและสารพิษอื่นๆ อยู่ในรูปสารอนินทรีย์ หรืออินทรีย์และสามารถสะสมอยู่ในห่วงโซ่อาหาร เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น ปรอท โครเมียม ทองแดง เป็นต้น

4. น้ำมันและสารลอยน้ำต่างๆ มีผลกระทบต่อการสังเคราะห์แสง และยังกีดขวางการกระจายตัวของออกซิเจน

5. สีและความขุ่น

6. กรดและด่าง ค่าพีเอชของน้ำทิ้งควรอยู่ในช่วง 5 - 9

7. ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส เมื่อมีปริมาณสูงจะทำให้เกิดการโตของสาหร่าย (Algae bloom) ทำให้ออกซิเจนลดลงในช่วงกลางคืน

8. กลิ่น

2.3.3 การตรวจสอบสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำ

แบ่งได้ 3 วิธี ได้แก่

1. ลักษณะทางกายภาพ การดูด้วยตาเปล่า เช่น สี กลิ่น อุณหภูมิ หรือความขุ่น เป็นต้น

2. ลักษณะทางเคมี เช่น ความเป็นกรด-ด่าง(pH), ความสกปรกในรูป BOD, COD, สารอาหาร และสารพิษต่างๆ

3. ลักษณะทางชีวภาพ ได้แก่ จุลินทรีย์ต่างๆ

2.4 วิธีการกำจัดโลหะหนัก

การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียมีหลายวิธีและขั้นตอน จะขึ้นอยู่กับสภาพของน้ำเสียและวัตถุประสงค์ในการบำบัด ตัวอย่างวิธีการบำบัดที่ใช้โดยทั่วไป

1. การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

การตกตะกอนเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยจะเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสียเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักในน้ำเสียที่ละลายอยู่ จะเกิดตะกอนแยกตัวออกจากน้ำเสีย ซึ่งการตกตะกอนนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน โดยทั่วไปมักใช้วิธีการตกตะกอนโลหะหนัก 2 แบบ ได้แก่ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) และการตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

1.1 การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation)

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยเติมสารเคมี คือ ปูนขาว หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกิดปฏิกิริยาดังสมการนี้

$$Cd^{2+} + 2NaOH \longrightarrow Cd(OH)_2 + 2Na^{+} \qquad (2.17)$$

1.2 การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

การตกตะกอนซัลไฟด์ สารเคมีที่นิยมใช้ในการตกตะกอนคือ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S), โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Cd^{2+} + Na_2H \longrightarrow CdS + 2Na^{+} \quad (2.18)$$

2. การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นกระบวนการที่สามารถแยกโลหะหนักในน้ำเสียโดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดดูดจับเรซินไม่เท่ากัน หน้าที่หลักของการแลกเปลี่ยนไอออน คือ การกำจัดไอออนต่างๆ เช่น Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-} และCl^- เป็นต้น นอกจากนี้เรซินยังใช้กำจัดโลหะพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสีย แต่ต้องสังเคราะห์เรซินเป็นพิเศษ อีกทั้งยังมีหน้าที่ที่ทำให้ให้ไอออนโลหะต่างๆ มีความเข้มข้นสูงมากๆ คือ ไอออนที่ถูกกำจัดออกจากสารละลายจะหลุดมากับสารละลายรีเจนเนอแรนต์ (Regenerate) ในระหว่างที่ทำรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) เนื่องจากปริมาตรสารรีเจนเนอแรนต์ต่ำกว่าปริมาตรของสารละลายที่มีอยู่เดิมของไอออน ทำให้ความเข้มข้นใหม่ของไอออนนั้นสูงกว่าเดิม ดังนั้นไอออนเดิมที่เจือจางมากจะทำให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหลายๆเท่า ซึ่งสารที่แลกเปลี่ยนไอออนมีทั้งแบบได้จากธรรมชาติ และการสังเคราะห์ขึ้น เรซินจะมีหมู่ฟังก์ชันติดอยู่ และจะทำให้สมดุลโดยไอออนประจุตรงข้าม ซึ่งประจุตรงข้ามเป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวก เรียกว่า แคตไอออนเอกเชนจ์ (Cation exchange) ส่วนถ้าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ จะเรียกว่า แอนไอออนเอกเชนจ์ (Anion exchange) โดยวิธีการนี้เหมาะกับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูง ถ้ามีการปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องถูกกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อทำให้การกำจัดมีประสิทธิภาพสูงสุด

กระบวนการนี้ใช้สำหรับการแก้ความกระด้างของน้ำและการทำให้น้ำบริสุทธิ์ปราศจากแร่ธาตุเพื่อใช้ในการทำไอน้ำ และในงานอุตสาหกรรมบางชนิดใช้สำหรับกำจัดน้ำทิ้ง

3. ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้กันมาก ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานชุบโลหะซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆ เจือปน ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ได้แก่ ออกซิเจน (O_2), โอโซน (O_3), คลอรีน (Cl_2), ไฮโปคลอไรด์ (ClO^-), เปอร์แมงกาเนต (MnO_4^-) โครเมต (CrO_4^{2-}) และไนเตรต (NO_3^-) ส่วนสารเคมีที่ให้เกิดรีดักชัน (Reduction) ได้แก่ เฟอร์ริกซัลเฟต ($Fe_2(SO_4)_3$), โซเดียมเมตาไบซัลเฟต ($Na_2S_2O_5$), และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

4. รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการแตกต่างของแรงดันแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลสอะซีเตด และโพลีเอมีน ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำลายผ่าน เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูง โดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องบำบัดขั้นต้น โดยปรับค่าพีเอชแยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออก และกรองสารแขวนลอยก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของเมมเบรน วิธีการนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า

5. การระเหย (Evaporation)

วิธีนี้จะทำให้สารเคมีมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยทั้งแบบระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (Amospheric Evaporation) และระเหยภายใต้สูญญากาศ (Vacuum Evaporation) โดยวิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น แต่ต้องใช้ต้นทุนการดำเนินงานสูง

6. อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electro dialysis)

วิธีการนี้เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลาย ด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เลือกเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) กลไกเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนกับการสกัดตัวทำละลายและน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันแผ่นเมมเบรนอุดตัน ข้อเสียวิธีการนี้คือต้นทุนการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง ส่วนข้อดีคือสามารถกำหนดไอออนที่ต้องการแยกออกจากสารละลายได้

7. การแยกกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนในขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

8. การดูดซับ (Adsorption)

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

ในระบบบำบัดทางเคมีการค้นพบสารสังเคราะห์ประเภทเรซิน (Synthetic Resin) ซึ่งมีความสามารถในการแลกประจุได้ดี ถือว่ามีประโยชน์ต่อการบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะกำจัดพวกโลหะหนัก เช่น เหล็กและโครเมียม หรือพวกสารอาหาร เช่น ไนโตรเจน แอมโมเนีย และฟอสเฟต ออกจากน้ำทิ้ง และป้องกันไม่ให้สาหร่ายเกิดขึ้นมากเกินต้องการ นอกจากนี้สารอาหารที่ถูกเรซินจับไว้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก ส่วนตัวเรซินสังเคราะห์เมื่อใช้งานหมดประสิทธิภาพแล้ว เราสามารถนำเรซินกลับมาปรับคืนสภาพ (Regenerate) ด้วยกรดเกลือ (HCl) หรือเกลือแกง (NaCl) แล้วนำมาใช้ใหม่ได้ ในการปรับคืนสภาพสามารถทำได้หลายครั้ง เป็นการยืดอายุการใช้งานของได้เรซินนานถึง 3 - 4 ปี บางชนิดอาจมีอายุมากกว่านั้นก็เป็นได้หากถูกสังเคราะห์มาด้วยวัสดุที่แข็งแกร่ง

เรซินสังเคราะห์มีหลายชนิด ชนิดที่เป็นกรดจะเป็นกรดแก่หรือกรดอ่อนที่นำมาแลกเปลี่ยนกับประจุบวก เมื่อประสิทธิภาพในการแลกประจุหมดลง ก็นำมาปรับคืนสภาพด้วยกรดเกลือ (HCl) หรือเกลือแกง (NaCl) ส่วนเรซินที่เป็นด่างจะเป็นด่างแก่หรือด่างอ่อน นำมาแลกเปลี่ยนกับประจุลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถปรับฟื้นคืนสภาพด้วยโซดาไฟ (NaOH) กรดเกลือหรือสารละลายแอมโมเนีย (NH_3) ตามคุณสมบัติของเรซินที่นำมาใช้ เรซินแต่ละตัวจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป แม้ว่าจะอยู่กลุ่มเดียวกันก็ตาม คุณสมบัติของเรซินจะถูกกำหนดไว้ เพื่อให้ใช้งานได้อย่างเหมาะสมและถูกต้องว่า เรซินตัวนั้นมีความสามารถแลกประจุได้มากน้อยเพียงใด จับสารอะไรได้ดี ปรับคืนสภาพอย่างไร เมื่อไม่สามารถปรับคืนสภาพแล้วจะต้องเผาทิ้งที่อุณหภูมิเท่าใดจึงไม่เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีแลกประจุได้ผลรวดเร็ว ใช้พื้นที่น้อย ประสิทธิภาพสูง อาจได้ผลพลอยได้นำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่ เช่น การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการเคลือบผิวด้วยโครเมียม น้ำเสียจะเป็นพวกกรดโครมิคที่ไม่บริสุทธิ์ ผ่านเข้ามายังเรซินเปลี่ยนประจุบวก แล้วจะได้กรดโครมิคที่บริสุทธิ์ออกมา เป็นต้น

2.5 ทฤษฎีการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิว (Surface free energy) ต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ ปริมาณการดูดซับขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ธรรมชาติของสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ และสภาวะการดูดซับ เช่น อุณหภูมิ, ความเข้มข้น, ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับ (อาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือแก๊ส) กับสารดูดซับ (ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง) ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง การดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (interface) โดยที่มีวัฏภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ และเป็นวัฏภาคคายความร้อน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งของสารดูดซับ ดังนั้นการดูดซับด้วยของแข็งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของของสารดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นสารดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของของเหลวนั้น การดูดซับบนผิวของแข็ง แบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทนการดูดซับทางกายภาพไม่มีแรงกระตุ้น (Activation energy) มาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่ายและการดูดซับเกิดซ้อนกันได้หลายชั้น (Multilayer) โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารและเกิดขึ้นได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรง แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนซ์มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีพลังงานกระตุ้น (Activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว

2.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ จะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุล (C_e) กับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ

2.6.1 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

ได้เสนอไอโซเทอร์มแบบง่ายโดยมีสมมติฐานดังนี้

1. ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption)

2. โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน

3. แต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้กัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ

4. โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่ายๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m\, bC_e}{1+bC_e} \qquad (2.19)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ(g) ที่ภาวะสมดุล หรือเรียกว่าหรือค่าการดูดซับที่สมดุล

q_m = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer)

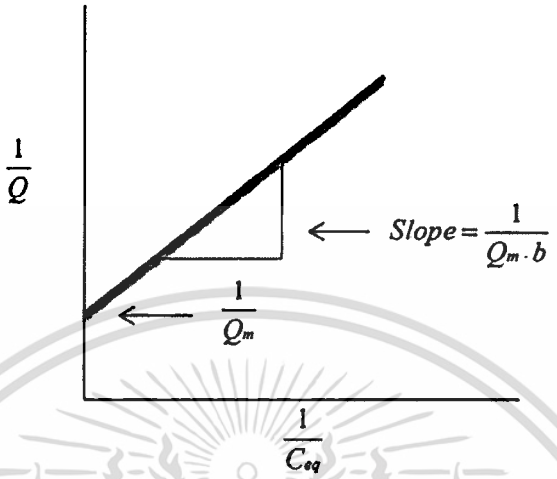
b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจัดให้เป็นสมการเส้นตรง คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bq_m} + \frac{C_e}{q_m} \qquad (2.20)$$



รูปที่ 2.7 กราฟเส้นตรงของแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม

จากสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ค่า q_m และ b หาได้จากความชัน (Slope) และจุดตัดแกน (Intercept) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังแสดงปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (Separation factor or equilibrium parameter, R_L) ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1+bC_0} \qquad (2.21)$$

เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) โดยค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอร์มว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่

- ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่ดี (unfavorable)
- ถ้า $R_L = 1$ การดูดซับ เป็นเส้นตรง (linear)
- ถ้า $0 < R_L < 1$ การดูดซับดี (favorable)
- ถ้า $R_L = 0$ การดูดซับเกิดผันกลับได้ (irreversible)

2.6.2 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลังใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิช (Freundlich Isotherm) เป็นไอโซเทอร์มที่พัฒนาจากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) ที่เกิดบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer)

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \qquad (2.22)$$

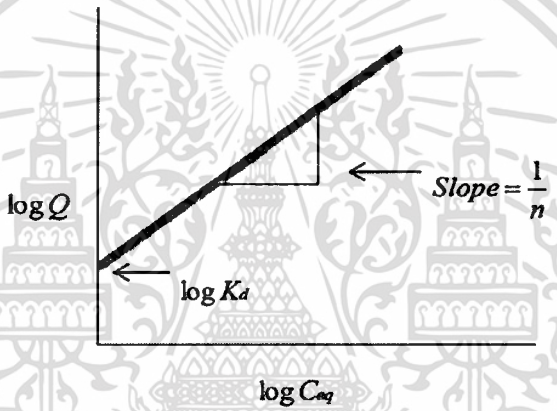
$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \qquad (2.23)$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

K_F = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

n = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย



รูปที่ 2.8 กราฟกราฟเส้นตรงของฟรุนด์ลิชไอโซเทอร์ม

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log q_e กับ log C_e จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 1/n และมีจุดตัดแกนเท่ากับ log K_F จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณา จากความชันของกราฟระหว่าง log C_e กับ log q_e โดย

- ถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า n น้อย แสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ค่า 1/n ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsortion Isotherm)

- ถ้า 1/n เท่ากับ 1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

- ถ้า 1/n มากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ

- ถ้า 1/n น้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชฎาภรณ์ บุญแท้ (2545) ผู้วิจัยได้การศึกษาตัวดูดซับโลหะหนัก แคดเมียม (Cd^{2+}), โครเมียม (Cr^{3+}) และอาร์เซนิค (As^{5+}) จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ดินเบาเป็นตัวดูดซับ พบว่าจากการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก, ปริมาณดินเบา, ค่าพีเอชของสารละลาย และช่วงเวลาสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียม (Cd^{2+}) คือ ความเข้มข้น Cd^{2+} เท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ดินเบาปริมาณ 2.0 กรัม ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 เขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที และช่วงเวลาสัมผัส 10 ชั่วโมง โดยประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 99.92 % สำหรับการดูดซับโครเมียม (Cr^{3+}) สภาวะที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้น Cr^{3+} เท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ดินเบาปริมาณ 1.0 กรัม กับค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 เขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที และช่วงเวลาสัมผัส 10 ชั่วโมง โดยประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 98.82% และจากการศึกษาพบว่าดินเบาไม่เหมาะสม ที่จะใช้ในการดูดซับ As^{5+} ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษา แต่สามารถดูดซับได้ดีเมื่อนำดินเบาไปเผาที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงมาใช้ในการดูดซับ พบว่าสามารถใช้กำจัด As^{5+} ได้ดี โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของ As^{5+} เท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ดินเบาเผาปริมาณ 1.0 กรัม กับค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 เขย่าด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที และช่วงเวลาสัมผัสเท่ากับ 6 ชั่วโมง ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงถึง 99.96% ผลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับพบว่า การดูดซับ Cd^{2+} ด้วยดินเบานั้นสัมพันธ์กับ สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิช การดูดซับ Cr^{3+} ด้วยดินเบาไม่เป็นไปตามสมการไอโซเทอร์มของการดูดซับ เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัด Cr^{3+} ด้วยดินเบานั้น เกิดจากการตกตะกอนเป็นส่วนใหญ่ และการดูดซับ As^{5+} ด้วยดินเบาเผานั้น สัมพันธ์กับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ผลการกำจัด Cr^{3+}, As^{5+} และPb^{2+} ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่ ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.23, 0.42 และ 5.89 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าดินเบามีประสิทธิภาพในการกำจัดได้มากกว่า 99%

เบญจวรรณ วงศ์ศิริ (2547) ผู้วิจัยได้การศึกษาการเตรียมตัวดูดซับในการกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) และทองแดง (Cu^{2+}) ออกจากน้ำเสียจริง โดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยศึกษาที่สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสารดูดซับทั้ง 2 วิธี คือการเคลือบแบบดูดซับ (Modified Adsorption Method) และเคลือบแบบตกตะกอน (Modified Precipitation Method) พบว่าการดูดซับโดยใช้ซิลิกาเจลสามารถกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) และทองแดง (Cu^{2+}) ได้มากที่สุดเท่ากับ 11.82 และ 3.55 มิลลิกรัมต่อตัวดูดซับหนึ่งกรัม ซึ่งเมื่อพีเอชของสารละลายโลหะเท่ากับ 3 หรือต่ำกว่าเหล็กออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวของตัวดูดซับจะถูกชะละลายให้ปนเปื้อนออกมาในสารละลายได้ และการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.01 โมลต่อลิตรขึ้นไปในสารละลายโลหะจะส่งผลให้ตัวดูดซับสามารถกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) และทองแดง (Cu^{2+}) ได้น้อยลง โดยการกำจัดโลหะหนักที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช และเมื่อทำการเคลือบซิลิกาเจลที่ใช้แล้วจากห้องปฏิบัติการ พบว่า สามารถกำจัดตะกั่ว (Pb^{2+}) ได้อยู่ในช่วง 8.21-11.82 มิลลิกรัมต่อซิลิกาเจลหนึ่งกรัม และกำจัดทองแดงได้อยู่ในช่วง 2.12-3.55 มิลลิกรัมต่อซิลิกาเจลหนึ่งกรัม โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียจริงที่มีตะกั่ว (Pb^{2+}) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.2187 จำนวนมิลลิสมมูลต่อลิตร และทองแดง (Cu^{2+}) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.4126 จำนวนมิลลิสมมูลต่อลิตร ได้เท่ากับ 89.48 และ 83.52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ชยาภาส ทับทอง (2549) ผู้วิจัยได้ศึกษาความสามารถในการกำจัดไอออนตะกั่วจากน้ำเสียด้วยตะกอนจุลินทรีย์ โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น และปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับคือ กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge, AS-P) และจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) ของอุตสาหกรรมน้ำอัดลม ชนิดที่ 3 คือ ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำกรุงเทพมหานคร (Cyclic Activated Sludge system, CASS-N) ตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้นำมาล้างด้วยน้ำกลั่น และอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C จากนั้นทำการบดและแยกขนาดให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 106-150 ไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่าการดูดซับเข้าสู่สมดุลที่เวลา 15 นาที โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วสูงถึง 94-99 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น 60 มิลลิลิตรต่อลิตร นอกจากนี้ยังใช้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) มาในใช้ทำนายผลการทดลอง พบว่าสมการไอโซเทอร์มการดูดซับทั้ง 2 สมการ สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดี ค่า K_F ที่สูง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับไอออน ตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิดสูง ส่วนปริมาณไอออนโลหะหนักตะกั่วที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของ AS-P, MUR-P และ CASS-N ที่ได้จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ มีค่าเป็น 253, 248 และ 247 มิลลิกรัมโลหะต่อกรัมวัสดุดูดซับตามลำดับ

รอฮานาและคณะ (2553) ผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติเบื้องต้น และประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วไอออนทองแดงชนิดเดียวและสารละลายผสมไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และทองแดง (Cu^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านและถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดเปรียบเทียบกับถ่านทางการค้า และถ่านจากเปลือกมังคุด ตามลำดับ ค่าพีเอชของสารละลายในน้ำเสียสังเคราะห์ควรอยู่ในช่วง 3-6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ปริมาณของวัสดุดูดซับและเวลาการดูดซับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุดูดซับและชนิดไอออนของสารละลายแต่ละชนิด วัสดุดูดซับทั้งสามชนิดมีความสอดคล้องกับ ไอโซเทอร์มการ ดูดซับทั้งแบบแลงเมียร์และฟรุนด์ลิช และค่าความสามารถในการดูดซับ Pb^{2+} และ Cu^{2+} ได้ดีที่สุด (q_m) ดังนี้ ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดสามารถดูดซับ Pb^{2+} เท่ากับ 12.50 mg/g และ Cu^{2+} เท่ากับ 4.35 mg/g , ถ่านจากเปลือกมังคุดสามารถดูดซับ Pb^{2+} เท่ากับ 2.27 mg/g และ Cu^{2+} เท่ากับ 0.21 และถ่านกัมมันต์ทางการค้าสามารถดูดซับ Pb^{2+} เท่ากับ 0.08 mg/g และ Cu^{2+} เท่ากับ 0.06 ตามลำดับ

เกษราและคณะ (2555) ผู้วิจัยได้ศึกษาการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}) สังกะสี (Zn^{2+}) ทองแดง (Cu^{2+}) และแคดเมียม (Cd^{2+}) ของสเมกไทต์ โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียว ในชั้นดินบน และล่างของชุดดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชัยบาดาล และชุดดิน วังชมพู ซึ่งมีสเมกไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทำ การทดลองแบบแบตช์ ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าพีเอชและความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย พบว่าเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นความจุในการดูดซับ Pb^{2+}, Zn^{2+} , Cu^{2+} และ Cd^{2+} ของสเมกไทต์เพิ่มขึ้น โดยปริมาณการดูดซับที่สเมกไทต์สามารถดูดซับได้ สูงสุดที่ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่ 50 มก./ลิตร แสดงค่าการดูดซับที่เหมาะสมในสมการ แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม ซึ่งแสดงการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ปริมาณของ Pb^{2+}, Zn^{2+} , Cu^{2+} และ Cd^{2} ที่ถูกดูดซับสูงสุดเท่ากับ 49.56 , 42.37, 42.43 และ 22.17 มก./กรัมดินเหนียว โดยปริมาณ การดูดซับสูงสุดดังกล่าวอยู่ในตัวอย่างที่มีปริมาณสเมกไทต์สูง (80-90 เปอร์เซ็นต์) ในชุดดินชัยบาดาล แสดงว่าเวอร์ทิซอลส์ ซึ่งมีค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง-ด่าง ที่มีปริมาณสเมกไทต์เป็นองค์ ประกอบหลักในอนุภาคขนาดดินเหนียวสามารถที่จะลดการแพร่กระจายของโลหะหนักได้โดยขึ้นอยู่กับพีเอช ชนิดและความเข้มข้นของโลหะหนักซึ่งสามารถใช้เป็นดรรชนีประเมินความเป็นพิษของโลหะหนักในสภาพแวดล้อมทางดินได้

นพปฎล เสงี่ยมศักดิ์ (2555) ผู้วิจัยได้ศึกษาการดูดซับนิกเกิลของดินเหนียว และดินทรายปนทรายแป้งที่พบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตอนบนของประเทศไทยการทดสอบใช้วิธีแบบกะโดยมีการ หาระยะเวลาดูดซับสมดุล ไอโซเทอมการดูดซับผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ และผลกระทบของวัสดุที่นำมาผสมกับดิน ได้แก่ ปูนขาวและเถ้าแกลบ จากการศึกษาพบว่าการดูดซับนิกเกิลของดินทั้งสองชนิดเขาสู่สภาวะสมดุลภายใน เวลา 1 ชั่วโมง โดยแบบจำลองของฟรุนด์ลิชสามารถอธิบายการดูดซับได้ดีกว่าแบบจำลองแลงเมียร์ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับนิกเกิลของดินทั้งสองชนิดพบว่า ดินเหนียวมีความสามารถในการดูดซับนิกเกิลได้ ดีกว่าดินทรายปนทรายแป้ง การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น และการนำปูนขาวหรือเถ้าแกลบผสมมาผสมกับดินช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับนิกเกิลได้

รุจาและคณะ (2556) ผู้วิจัยได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวก Lewatit MonmPlus S108 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent Resin, SR) ซึ่งเป็นเรซินชนิดกรดแก่ โดยทำการทดลองแบบแบตช์ ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และค่าพีเอช ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแคดเมียม (Cd^{2+}) 10 mg/L จำนวน 25 mL แปรค่าน้ำหนักของ SR 1, 3 และ 5 g จากการศึกษาระยะที่เหมาะสม และเข้าสู่สมดุล พบว่าที่สภาวะการบำบัด Cd^{2+} แปรค่าน้ำหนักของ SR 0.1 ถึง 5 g พบว่าเป็นไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นและแบบฟรุนด์ลิชมีความสอดคล้องกัน เมื่อใช้น้ำกลั่น และกรดไฮโดรคลอริก 5 % โดยมีน้ำหนัก เป็นตัวชะละลาย Cd^{2+} จากเรซินที่ใช้บำบัด พบว่ากรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวชะละลายที่ดีได้ Cd^{2+} กลับคืนถึง 59.68 %

จิราพรและคณะ (2557) ผู้วิจัยได้ศึกษาการบำบัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้คอลัมน์บรรจุเรซินที่แลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent Resin, SR) และเรซินที่ผ่านการฟื้นฟู (Regenerate Resin, RP) โดยใช้คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการบำบัด ได้แก่ อัตราการไหล, ระดับความสูงของเรซิน และจำนวนรอบในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ซ้ำและหลังการฟื้นฟู ด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองพบว่า อัตราการไหล 2.50 mL/min มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับอัตราการไหลอื่น ณ ความสูงเรซิน 13.50 cm เท่ากัน สามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น 10.50 ± 0.18 mg/L ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัด 90 % (Break Through, BT) สามารถบำบัดได้ถึง 3.30 L แต่ถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพของน้ำทิ้งได้ตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (2539) (Effective Point, EP) กำหนดความเข้มข้นไม่เกิน 0.03 mg/L สามารถบำบัดได้ปริมาตร 1.63 L เมื่อแปรความสูงของเรซิน พบว่า ระดับความสูง 17 cm มีประสิทธิภาพบำบัดได้ดีที่สุด ที่อัตราการไหล 2.5 mL/min สามารถบำบัด Cd^{2+} ไว้ได้ 19.388 ± 0.78 mg หลังการฟื้นฟูระบบสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ถึง 4 รอบ ในแต่ละรอบบำบัดตามเกณฑ์ EP ได้ 17.27 ± 0.79, 16.50 ± 0.78, 15.71 ± 0.00 และ14.93 ± 1.35 mg ตามลำดับ

ปิยภรณ์และคณะ (2558) ผู้วิจัยศึกษาวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการดูดซับตะกั่ว (Pb^{2+}) ด้วยดินจากป่าบุ่งป่าทาม 4 พื้นที่ ในจังหวัดมหาสารคาม คือ ป่าบุ่งป่าทามม่วงใหญ่ วนอุทยานโกสัมพี ป่าบุ่งป่าทามหนองตีนบ้าน และป่าบุ่งป่าทามเกาะเกิ้ง โดยใช้วิธีการ ทดลองแบบกะเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดูดซับ ได้แก่ น้ำหนักดิน 0.1, 0.5, 1 และ 5 กรัม เวลาสัมผัส 30 และ 60 นาที และความเข้มข้นสารละลายตะกั่ว 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าความสามารถของดินในการดูดซับ Pb^{2+}แปรผันตามน้ำหนักดินโดยเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับคือ 30 นาที และความเข้มข้น สารละลายตะกั่วเริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร สมการแลงเมียร์สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการดูดซับ Pb^{2+}ได้ดีกว่าสมการฟรุนด์ลิช ซึ่งบ่งบอกว่าเป็นการดูดซับ Pb^{2+}แบบชั้นเดียว โดยประสิทธิภาพการดูดซับ Pb^{2+}ของ ดินทั้ง 4 พื้นที่ พบว่า ป่าบุ่งป่าทามม่วงใหญ่ดูดซับ Pb^{2+}ได้มากที่สุด รองลงมาคือ ป่าบุ่งป่าทามเกาะเกิ้ง ป่าบุ่งป่าทาม วนอุทยานโกสัมพี ป่าบุ่งป่าทามหนองตีนบ้าน (5.91, 5.90, 5.28 และ5.21 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ)

ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์ (2558) ผู้วิจัยศึกษาการดูดซับแบบกะของไอออนโลหะ 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว (Pb^{2+}), สังกะสี (Zn^{2+}), แคดเมียม (Cd^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ในสารละลายเดี่ยวโดยใช้ถ่านขาวกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับพบว่าถ่านขาวกะลามะพร้าวสามารถดูดซับ Pb^{2+}, Zn^{2+}, Cd^{2+} และ Ni^{2+} ได้ โดยใช้ตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาคช่วง 500 ถึง 710 ไมโครเมตร มีค่าความสามารถดูดซับไอออน Pb^{2+}, Zn^{2+}, Cd^{2+} และ Ni^{2+} ออกจากสารละลายที่พีเอช 5 เท่ากับ 10.81, 9.10, 4.89 และ1.92 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ และตัวดูดซับขนาดอนุภาคช่วง 500 ถึง 710 ไมโครเมตร สามารถดูดซับไอออนโลหะได้สูงกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดช่วงอนุภาค 1000 ถึง 2000 ไมโครเมตร เมื่อศึกษาผลของค่าพีเอชสารละลายระหว่างพีเอช 2 ถึง 5 พบว่าค่าการดูดซับไอออนโลหะทั้ง 4 ชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นจากพีเอช 2 จนมีค่าสูงสุดที่พีเอช 5 สำหรับการดูดซับไอออนโลหะผสมแบบแข่งขัน พบว่าถ่านขาวกะลามะพร้าวขนาดอนุภาคช่วง 500 ถึง 710 ไมโครเมตร สามารถดูดซับไอออนผสมออกจากสารละลายที่พีเอช 5 มีค่าเป็น 4.63, 2.26, 1.73 และ 1.54 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับ Pb^{2+}, Zn^{2+},

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cd^{2+} และ Ni^{2+} ตามลำดับ แบบจำลองการดูดซับไอออนโลหะทั้ง 4 ชนิดเป็นแบบแลงเมียร์ และมีค่าความสามารถดูดซับสูงสุด (q_m) ของไอออนโลหะต่างๆเป็น 17.12, 15.82, 4.48 และ 3.60 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับ Pb^{2+}, Zn^{2+}, Cd^{2+} และ Ni^{2+} ตามลำดับ และเมื่อนำถ่านขาวกะลามะพราวนี้ไปกำจัดไอออนตะกั่วจากน้ำเสียจริงพบว่าสามารถกำจัดไอออนตะกั่วออกจากสารละลายที่พีเอช 5 ได้ประมาณร้อยละ 90 หรือ 0.56 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้นถ่านขาวกะลามะพร้าวจึงสามารถใช้เป็นตัวกำจัดไอออนโลหะหนักออกจากน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้จริง

ณัฐพิมลและคณะ (2560) ผู้วิจัยได้ศึกษาการบำบัดโครเมียมไตรวาเลนต์ Cr^{3+} ในน้ำเสียโดยใช้เรซินที่แลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว ทำการทดลองแบบคอลัมน์ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออน ได้แก่ ความสูง 4 ระดับ คือ 15, 20, 25, และ 30 cm ตามลำดับใช้น้ำเสียสังเคราะห์ Cr^{3+} ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 mg/L อัตราการไหลเท่ากับ 6 mL/min และศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีที่ผ่านการตะตอนทางเคมี ก่อนนำมาบำบัดด้วยคอลัมน์เรซิน จากการศึกษา The bed depth service time model (BDST) เพื่อหาเวลาที่ใช้ในการบำบัด และหาปริมาณสมมูลแต่ละความสูงที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ เมื่อพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่สามารถบำบัดโครเมียมได้ถึง 99% (แกนY) กับความสูงของเรซินในคอลัมน์ (แกนX) ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ BDST $Y = 0.759x - 3.255$, ($R^2 = 0.997$) และศึกษาการตกตะกอนทางเคมีน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการโดยทำการปรับค่าพีเอชเป็น 7.5 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัด Cr^{3+}, Ag^{2+}, Fe^{2+}, K^{+} และNa เท่ากับ 99.97, 99.91, 99.68 และ 84.4% ตามลำดับ เมื่อนำไปบำบัดต่อโดยใช้คอลัมน์เรซินสูง 30 cm ใช้อัตราการไหลต่อเนื่อง 6 mL/min นาน 9 ชั่วโมง มีปริมาณประจุบวกโลหะที่สามารถบำบัดได้ 31.63 meq

Hasfalina C.M, *et al.* (2012) ผู้วิจัยได้ศึกษาการดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) จากสารละลายในคอลัมน์โดยบรรจุเส้นใยปอแก้ว โดยพิจารณาจากการดูดซับโลหะด้วยคอลัมน์ซึ่งตัวดูดซับจะอยู่กับที่ พารามิเตอร์ที่มีผลกับการดำเนินงาน เช่น อัตราการไหลและความลึกของชุดการทดลอง ซึ่งข้อมูลนี้สอดคล้องกับ ทฤษฎี bed depth Service Time (BDST) และ Thomas models พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 \geq 91$ ความจุสูงสุดที่ตัวดูดซับได้ 1.49 มิลลิสมมูลต่อกรัม ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที จากผลการทดลองสรุปได้ว่าเส้นใยปอแก้ว เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด Cu^{2+}

Michał Cegłowski, *et al.* (2015) ผู้วิจัยได้ศึกษาเรซินคีเลตชนิดใหม่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาของพอลิเมอร์โพลี (MVE-alt-MA) ได้จากการควบแน่นของ 2-acetylpyridine และ 4 minobenzoic hydrazide ซึ่งความสามารถในการดูดซับของเรซินสำหรับไอออน Cu^{2+}, Cd^{2+}, Cr^{3+}, Ni^{2+} และCo^{2+} ที่ศึกษาพบได้ในช่วง 29.95 - 157.25 มิลลิกรัมต่อกรัม กระบวนการดูดซับของไอออนศึกษาข้างต้นโดยทั่วไปตามแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ จลศาสตร์ของกระบวนการนี้พบว่าเป็นไปตามแบบจำลองลำดับที่สองมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในอุณหพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเอนทรัลปีมาตรฐานเอนโทรปีและพลังงานเสรีของกิ๊บส์ จากการวิเคราะห์ พบว่าเรซินมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนโลหะหนักจากตัวอย่างน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นสูงของไอออนดังกล่าวข้างต้น

S.S. Kalaivani a, *et al.* (2016) ผู้วิจัยได้ศึกษาเรซินที่สังเคราะห์จาก Polyurethane (PU) ใช้ศึกษาการกำจัด Pb^{2+} และ Ni^{2+} จากสารละลายในน้ำ ซึ่งเรซินมีลักษณะพิเศษสามารถวิเคราะห์โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรเมตรี (Fourier Transform Infrared Spectrometry, FT-IR), โปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนท์สเปกโตรสเปคปี (Proton Nuclear magnetic Resonance, H NMR), C NMR, เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA), กล้องจุลทัศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scaning Electron mincroscope, SEM), EXAD และDLS ปัจจัยพารามิเตอร์การทดลองที่เหมาะสำหรับการกำจัดไอออนโลหะหนักโดยการชะพิจารณาจากพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้ พีเอช, ปริมาณการดูดซับ, ระยะเวลาการสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะหนัก กิ่ง PU เป็นตัวดูดซับที่ถูกสังเคราะห์แล้วประสบความสำเร็จ และมีการประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับในการตรวจสอบของไอออนโลหะหนัก ตัวดูดซับมีองค์ประกอบของกลุ่มคีเลต โดยอะตอมผู้ให้อะตอมจะตอบสนองสำหรับการกำจัดไอออนโลหะหนักจากสารละลายในน้ำที่มีประสิทธิภาพการตอบสนองสูง

Serpil Edebali, *et al.* (2016) ผู้วิจัยได้ศึกษาเรซินคีเลตมีคุณสมบัติที่ดีในการกำจัด Cu^{2+} จากสารละลายในน้ำ ความสามารถในการดูดซับของเรซินเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้มีความเข้มข้นของ Cu^{2+} สูงขึ้นในตัวกลางที่เป็นของเหลว ผลการวิเคราะห์ด้วย FT-IR แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการแลกเปลี่ยนไอออนและคีเลตเป็นกลไกในการดูดซับ Cu^{2+} จากสารละลาย

Shu-PingWu, *et al.* (2016) ผู้วิจัยได้ศึกษาการสังเคราะห์Carboxymethyl chitosan-hemicellulose resin (CMCH) โดยกระบวนการการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วยความร้อน โดยเทคนิค FTIR, TGA และ SEM เนื่องมาจากคุณสมบัติการดูดซับของ CMCH จะทำให้ Ni^{2+}, Cd^{2+}, Cu^{2+}, Hg^{2+}, Mn^{7+} และ Cr^{6+} ถูกชะออกมา ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อพฤติกรรม เช่น พีเอช, อุณหภูมิ, ระยะเวลาการสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก การทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับทั้งหมดเหมาะสมกับรูปแบบสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง และไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ การทดลองแสดงให้เห็นว่า CMCH สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ และมีประสิทธิภาพการดูดซับในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียได้

H.Panda, *et al.* (2017) ผู้วิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติการดูดซับของน้ำเสียอุตสาหกรรม (dolochar) สำหรับการกำจัดโครเมียม (Cr^{3+}) จากสารละลาย โดยเราจะศึกษาจากพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น เวลาสัมผัส, ปริมาณการดูดซับ, ความเข้มข้นของตัวดูดซับ และพีเอช ในการศึกษาขั้นตอนการดำเนินงานต่างๆที่ เช่น เวลาสัมผัส, ปริมาณการดูดซับ, ความเข้มข้นของตัวดูดซับ และพีเอช จาก 0 – 70 นาที, 10 -25 กรัมต่อลิตร, 10 - 50 มิลลิลิตรต่อลิตรและ 2 - 7.5 ตามลำดับ จากผลการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองสรุปได้ว่าการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรม จนถึงสมดุลจะหลังจาก 60 นาที และหลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของการกำจัดโครเมียมเล็กน้อย การกำจัดโครเมียมสูงสุดที่ 95 % ที่ pH 2 สำหรับตัวดูดซับและปริมาณสารดูดซับที่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การดูดซับโครเมียมเป็นไปตามสมการแลงเมียร์ มีค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.997 นอกจากนั้นจลนศาสตร์ของกระบวนการดูดซับดังต่อไปนี้แบบจำลองอันดับที่สองของรูปแบบของจลนศาสตร์ ที่ค่าคงที่อัตรา 0.82 min^{-1} นอกจากนี้ศักยภาพของ dolachar สำหรับการกำจัดโลหะหนักได้รับการประเมินค่าในการบรรจุคอลัมน์ให้มีความลึก 2.50 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสมดุลและเวลาทั้งหมดที่หาได้ 19.5 ชั่วโมง และ 90 ชั่วโมง ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ผ่านการบำบัดแล้ว 23 ลิตร ในน้ำเสียอุตสาหกรรมสามารถใช้เป็นตัวเลือกในการกำจัดโครเมียมเพื่อลดต้นทุนการกำจัดโครเมียมจากน้ำและน้ำเสียได้

Thobeka P, *et al.* (2017) ผู้วิจัยได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับของเรซินพอลิสไตรีนิกเพื่อกำจัดเบนซีน, โทลูอีน, เอธิลเบนซีน และไอโซเมอร์ของไซลีน (BTEX) สำหรับสารละลายน้ำ จะทำการศึกษาแบบแบตช์ โดยดูจากการทดลองพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความเร็วในการผสม, เวลาสัมผัส, การแพร่กระจายภายใน, ตัวดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้น ในการกำจัดสาร BTEX สมดุลไอโซโทปของการดูดซับจะวิเคราะห์โดยไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ และ linearized Dubinin-Radushkevich models ที่ pH 5.86 สรุปได้ว่าในการทำปฏิกิริยากับการดูดซับสารประกอบอะโรมาติกเป็นประโยชน์มากที่สุด ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ ระบุไว้ว่า เรซินมีความสามารถในการดูดซับสูงถึง 79.44 mg/g ที่อุณหภูมิ 25 °C พบว่าเรซินดูดซับเบนซีน 98%, โทลูอีน 88%, เอธิลเบนซีน 59%, เมตา-ไซลีน, พารา-ไซลีน 84% และ ออโธ-ไซลีน 90 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 14.47 mg/l การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ส่งผลให้เอนโทรปีเป็นลบ สมดุลเป็นกระบวนการคายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

1. เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก DOWEX IR 100 ที่ผ่านการใช้งานแล้วอยู่ในรูป Ca-form
2. กรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3), 65% ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
4. กรดไนตริก (HNO_3), 0.1 นอร์มอล ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
5. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ยี่ห้อ SDFCL sd fine – chem Limited เกรดวิเคราะห์
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
7. สารประกอบนิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4$) Merck KGaA, Germany Pro analysis เกรดวิเคราะห์
8. สารประกอบคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
9. สารประกอบแคดเมียมไนเทรตเตตระไฮเดรต ($Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) ยี่ห้อ Fluka Chemika เกรดวิเคราะห์
10. แอมโมเนียมอะซิเทต ($NH_4CH_3CO_2$) ยี่ห้อ Loba Chem, India เกรดวิเคราะห์
11. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ [(NH_4OH), 50% ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
12. แอมโมเนียมออกซาเลต [$(NH_4)_2C_2O_4H_2O$], 10% ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
13. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl), 1 N ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
14. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH4Cl), 0.25 N ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
15. สารละลายซิลเวอร์ไนเทรต ($AgNO_3$), 0.1 N ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
16. เอทิลแอลกอฮอล์ 95% องค์การสุรา เกรดการค้า
17. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Acidified, NaCl), 10% ยี่ห้อ Fishe Scientific, Belgium เกรดวิเคราะห์
18. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), 40% ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
19. สารละลายกรดบอริก (H_3BO_3), 3% ยี่ห้อ Merck
20. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP), 0.1000 N ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
21. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl), 0.1 N ยี่ห้อ Loba Chemie, India
22. อินดิเคเตอร์ผสม (Methyl red, Bromocresol green)
23. แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, $CaCO_3$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24. เมทิลเรดอินดิเคเตอร์ (Methyl red indicator)

25. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)

26. สารละลายมาตรฐาน EDTA (Standard EDTA solution)

27. เอริโอโครมแบลคที

28 . สารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 (แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์, แมกนีเซียมอีดีทีเอ ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์)

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชัน สเปคโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer, AAS) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น AA-200

2. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ยี่ห้อ Mettle Toleto รุ่น Seven compact

3. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) ยี่ห้อ Mettle Toleto รุ่น Fiveeasy Plus

4. เครื่องกลั่นไนโตรเจน ยี่ห้อ BUCHI Distillation Unit K - 350

5. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 และเบอร์ 42

6. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง Mettler Toledo รุ่น New classic MF (ML204)

7. เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ jis รุ่น JSSI – 100 C ทำการทดลองที่ 25 °C

8. อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การสุ่มตัวอย่างเรซิน

เรซินที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นเป็นเรซินที่ผ่านการแลกเปลี่ยนแคลเซียม และแมกนีเซียมในการบำบัดน้ำกระด้าง โดยนำตัวอย่างเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้วในสภาพที่แห้งสนิทมาทำการสุ่มตัวอย่างโดยวิธี quartering and coning (อภินันท์ บุญตาและคณะ, 2553) โดยนำเรซินทั้งหมดมาคลุกเคล้ากันในภาชนะที่เตรียมไว้ แล้วแบ่งออกเป็น 4 ส่วน เลือก 2 ส่วนที่อยู่ตรงข้ามกันมารวมกันส่วนที่เหลือแยกทิ้งไป แล้วคลุกเคล้าให้เข้ากันอีกครั้ง แล้วทำการเก็บตัวอย่างเรซินในปริมาณที่ต้องการใช้

3.2.2 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของเรซิน

ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของเรซิน โดยนำเรซินแห้งที่ผ่านการใช้งานแล้วมาหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ โดยนำเรซินน้ำหนักแห้ง 20 g แช่น้ำกลั่นปริมาตร 50 mL แล้วเข้าเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 rpm เป็นเวลา 30, 60 และ180 นาที กรองน้ำออกตามเวลาแล้วนำไปชั่งน้ำหนักเปียกของเรซิน แล้วนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ นำน้ำที่ผ่านการแช่เรซินมาตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) นำเรซินที่แช่น้ำจนอิ่มตัวแล้วมา

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Capacity , CEC) ด้วยวิธีการไทเทรตในรูปCa-form (กรองแก้ว และพิสมัย, 2559) ทำจำนวน 3 ซ้ำ

3.2.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม

เตรียมสารละลายสต๊อกแคดเมียมที่ความเข้มข้น 1000 mg/L โดยชั่งแคดเมียมไนเทรต ($Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) ที่มีมวลโมเลกุล 308.47 g/mol มา 2.7442 g ละลายด้วยน้ำกลั่น คนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1000 mL เก็บไว้ในขวดพลาสติก เติม HNO_3 10 mL เพื่อรักษาสภาพของโลหะหนักให้อยู่ในรูปของสารละลาย เมื่อจะใช้งานปิเปตสารละลายสต๊อกแคดเมียมและเจือจางให้ได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการ

3.2.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง

เตรียมสารละลายสต๊อกคอปเปอร์ที่ความเข้มข้น 1000 mg/L โดยชั่งคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) ที่มีมวลโมเลกุล 249.68 g/mol มา 3.9291 g ละลายด้วยน้ำกลั่น คนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1000 mL เก็บไว้ในขวดพลาสติก เติม HNO_3 10 mL เมื่อจะใช้งานปิเปตสารละลายสต๊อกคอปเปอร์และเจือจางให้ได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการ

3.2.5 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล

เตรียมสารละลายสต๊อกนิกเกิลที่มีความเข้มข้น 1000 mg/L โดยชั่งนิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4 \cdot 6H_2O$) ที่มีมวลโมเลกุล 262.86 g/mol มา 4.4786 g ละลายด้วยน้ำกลั่น คนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1000 mL เก็บไว้ในขวดพลาสติก เติม HNO_3 10 mL เมื่อจะใช้งานปิเปตสารละลายสต๊อกนิกเกิลซัลและเจือจางให้ได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการ

3.2.6 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ผสม

เตรียมสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ผสมที่มีความเข้มข้นของโลหะ Cd^{2+}, Cu^{2+} และ Ni^{2+} เท่ากับ 1.779 meq/L โดยปิเปตสารละลาย Cd^{2+}, Cu^{2+} และ Ni^{2+} จากขวดพลาสติกที่มีความเข้มข้น 1000 mg/L มา 100, 56.53 และ 52.21 mL ตามลำดับ ปิเปตลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 mL แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1000 mL แล้วเก็บไว้ในขวดพลาสติก เติม HNO_3 10 mL (เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดไม่เท่ากัน จึงใช้หน่วย meq/L เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนไอออน)

3.2.7 การศึกษาไอโซเทอร์มของการบำบัดด้วยเรซิน

1. ชั่งเรซินน้ำหนักเปียก 1 g จำนวน 15 ขวด

2. วัดค่าความเป็นกรด–ด่าง, ค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแคดเมียมตามความเข้มข้นดังตารางที่ 3.1

3. ปิเปตน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมดังตารางที่ 3.1 มา 25 mL ใส่ลงในแต่ละขวดที่มีเรซินใส่ไว้ความเข้มข้นละ 3 ขวด ทำชุดควบคุมโดยปิเปตน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแคดเมียมลงในขวดโดยไม่ต้องใส่เรซินความเข้มข้นละ 1 ขวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือแสวงหาประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำเข้าเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ความเร็วรอบ 150 rpm เป็นเวลา 30 นาที (ปิยภรณ์ และคณะ, 2558) กรองใส่บีกเกอร์ขนาด 50 mL ด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1

5. นำสารละลายที่ได้วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณของแข็งในน้ำทั้งหมด

6. นำสารละลายไปย่อยโดยการเติมกรดไนตริกเข้มข้น 65% 3 mL ในตู้ดูดควัน แล้วนำไปย่อยบนเตาให้ความร้อนจนกระทั่งเกิดการย่อยสมบูรณ์ หรือ สารละลายใสไม่มีตะกอน (ระวังอย่าให้เดือด) ตามวิธีของ U.S. EPA method 3050B (U.S.EPA, 1996)

7. นำสารละลายที่ย่อยจนใสมาปรับปริมาตรเป็น 25 mL ด้วยน้ำกลั่นหรือกรดไนตริก 0.1 นอร์มอล ให้ pH น้อยกว่า 2

8. นำสารละลายทั้งหมดตรวจวัดปริมาณโลหะแคดเมียมที่ละลายน้ำด้วยเครื่อง AAS กรณีที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ทันที ทำการเก็บรักษาตัวอย่างด้วยกรดไนตริก 0.1 นอร์มอล

9. ทำซ้ำเหมือนเดิมตามข้อ 1-8 แต่เปลี่ยนจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแคดเมียมเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดง น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีนิกเกิล และน้ำเสียสังเคราะห์ผสมที่มีความเข้มข้นของโลหะดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความเข้มข้นของสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์

ความเข้มข้นของสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์							
แคดเมียม (Cd^{2+})		ทองแดง (Cu^{2+})		นิกเกิล (Ni^{2+})		Cd^{2+}, Cu^{2+}, Ni^{2+}	
mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L
10.00	0.18	5.65	0.18	5.22	0.18	10.00	0.18
20.00	0.36	11.31	0.36	10.44	0.36	20.00	0.36
40.00	0.71	22.61	0.71	20.89	0.71	40.00	0.71
70.00	1.25	39.57	1.25	36.55	1.25	70.00	1.25
110.00	1.96	62.18	1.96	57.03	1.96	110.00	1.96

3.2.8 การศึกษาการบำบัดโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้คอลัมน์

1. เตรียมคอลัมน์โดยใช้บิวเรตขนาด 50 mL รองด้วยใยสังเคราะห์

2. ล้างคอลัมน์ด้วยกรดไนตริก 25% แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งจนแน่ใจว่าคอลัมน์ปราศจากสิ่งเจือปน ก่อนบรรจุเรซินลงในบิวเรตที่ความสูงของเรซินเป็น 30 cm น้ำหนักเปียก 33 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ของน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 4 ชนิด ที่ความเข้มข้น 0.18 meq/L

4. ปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์ที่มีความสูงของเรซิน 30 cm อย่างต่อเนื่องตามเวลาดังตารางที่ 3.2

5. เก็บสารละลายที่ผ่านคอลัมน์ ทำเมื่อเวลาผ่านไป 2, 4, 6, 8 ชั่วโมง และหยุดการปล่อยน้ำเสียในช่วงเวลากลางคืน คืนที่ 1 วันต่อมาจึงเริ่มปล่อยน้ำเสียลงคอลัมน์ต่อ คิดเป็นเวลาต่อจากวันแรก ทำการเก็บตัวอย่างที่ 10, 12, 14, 16 ชั่วโมงและหยุดการปล่อยน้ำเสียในช่วงเวลากลางคืน คืนที่ 2 วันต่อมาจึงเริ่มปล่อยน้ำเสียลงคอลัมน์ต่อ คิดเป็นเวลาต่อจากวันที่ 2 ทำการเก็บตัวอย่างที่ 18, 20, 22, 24 ชั่วโมงและทำการวัดปริมาตรทุกครั้งที่เก็บตัวอย่าง ดังตารางที่ 3.2 แล้วทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าการนำไฟฟ้าและ ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดทันทีที่เก็บตัวอย่าง

6. นำสารละลายไปย่อยโดยการเติมกรดไนตริกเข้มข้น 65% 3 mL ในตู้ดูดควัน แล้วนำไปย่อยบนเตาให้ความร้อนจนกระทั่งเกิดการย่อยสมบูรณ์ หรือ สารละลายใสไม่มีตะกอน (ระวังอย่าให้เดือด) ตามวิธีของ U.S. EPA method 3050B (U.S.EPA, 1996)

7. นำสารละลายที่ย่อยจนใสมาปรับปริมาตรเป็น 25 mL ด้วยน้ำกลั่นหรือกรดไนตริก 0.1 นอร์มอล

8. นำสารละลายไปตรวจวัดปริมาณโลหะหนักแคดเมียม, ทองแดง และนิกเกิลด้วยเครื่อง AAS

ตารางที่ 3.2 ปริมาตรในแต่ละช่วงเวลาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

เวลาการบำบัด (hr)	ปริมาตร (mL)	เวลาการบำบัด (hr)	ปริมาตร (mL)
2	300	14	2100
4	600	16	2400
6	900	18	2700
8	1200	20	3000
10	1500	22	3300
12	1800	24	3600

3.2.9 การศึกษาการบำบัดโลหะหนักจากน้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการโดยใช้คอลัมน์

นำตัวอย่างน้ำเสียที่ได้มาแบ่งเป็น 2 ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 1

1. นำน้ำตัวอย่างมา 25 mL ตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าการนำไฟฟ้า และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

2. นำสารละลายไปย่อยโดยการเติมกรดไนตริก (HNO_3^-) เข้มข้น 65% 3 mL ในตู้ดูดควัน แล้วนำไปย่อยบนเตาให้ความร้อนจนกระทั่งเกิดการย่อยสมบูรณ์ หรือ สารละลายใสไม่มีตะกอน (ระวังอย่าให้เดือด) ตามวิธีของ U.S. EPA method 3050B (U.S.EPA, 1996)

3. นำสารละลายที่ย่อยจนใสมาปรับปริมาตรเป็น 25 mL ด้วยกรดไนตริก 0.1 นอร์มอล

4. นำสารละลายไปตรวจวัดปริมาณโลหะหนักแคดเมียม, ทองแดง และนิกเกิลด้วยเครื่อง AAS

<u>ส่วนที่ 2</u>

1. เตรียมคอลัมน์โดยใช้บิวเรตขนาด 50 mL รองด้วยใยสังเคราะห์

2. ล้างคอลัมน์ด้วยกรดไนตริก 25 % แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งจนแน่ใจว่าคอลัมน์ปราศจากสิ่งเจือปน ก่อนบรรจุเรซินลงในบิวเรตที่ความสูงของเรซินเป็น 30 cm น้ำหนัก 33 g (น้ำหนักเรซินเปียก)

3. วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าการนำไฟฟ้า และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของน้ำเสีย

4. ปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์ที่มีความสูงของเรซิน 30 cm อย่างต่อเนื่องตามเวลา ดังตารางที่ 3.2

5. เก็บสารละลายที่ผ่านคอลัมน์ ทำเมื่อเวลาผ่านไป 2, 4, 6, 8 ชั่วโมง และหยุดการปล่อยน้ำเสียในช่วงเวลากลางคืน คืนที่ 1 วันต่อมาจึงเริ่มปล่อยน้ำเสียลงคอลัมน์ต่อ คิดเป็นเวลาต่อจากวันแรก ทำการเก็บตัวอย่างที่ 10, 12, 14, 16 ชั่วโมงและหยุดการปล่อยน้ำเสียในช่วงเวลากลางคืน คืนที่ 2 วันต่อมาจึงเริ่มปล่อยน้ำเสียลงคอลัมน์ต่อ คิดเป็นเวลาต่อจากวันที่ 2 ทำการเก็บตัวอย่างที่ 18, 20, 22, 24 ชั่วโมงและทำการวัดปริมาตรทุกครั้งที่เก็บตัวอย่าง ดังตารางที่ 3.1 แล้วทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าการนำไฟฟ้าและ ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดทันทีที่เก็บตัวอย่าง

6. นำสารละลายไปย่อยโดยการเติมกรดไนตริกเข้มข้น 65% 3 mL ในตู้ดูดควัน แล้วนำไปย่อยบนเตาให้ความร้อนจนกระทั่งเกิดการย่อยสมบูรณ์ หรือ สารละลายใสไม่มีตะกอน (ระวังอย่าให้เดือด) ตามวิธีของ U.S. EPA method 3050B (U.S.EPA, 1996)

7. นำสารละลายที่ย่อยจนใสมาปรับปริมาตรเป็น 25 mL ด้วยกรดไนตริก 0.1 นอร์มอล

8. นำสารละลายไปตรวจวัดปริมาณโลหะหนักแคดเมียม, ทองแดง และนิกเกิลด้วยเครื่อง AAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 การบำบัดโลหะหนักโดยใช้เรซินที่แลกเปลี่ยนประจุบรรจุในคอลัมน์

3.2.10 การประกันคุณภาพ

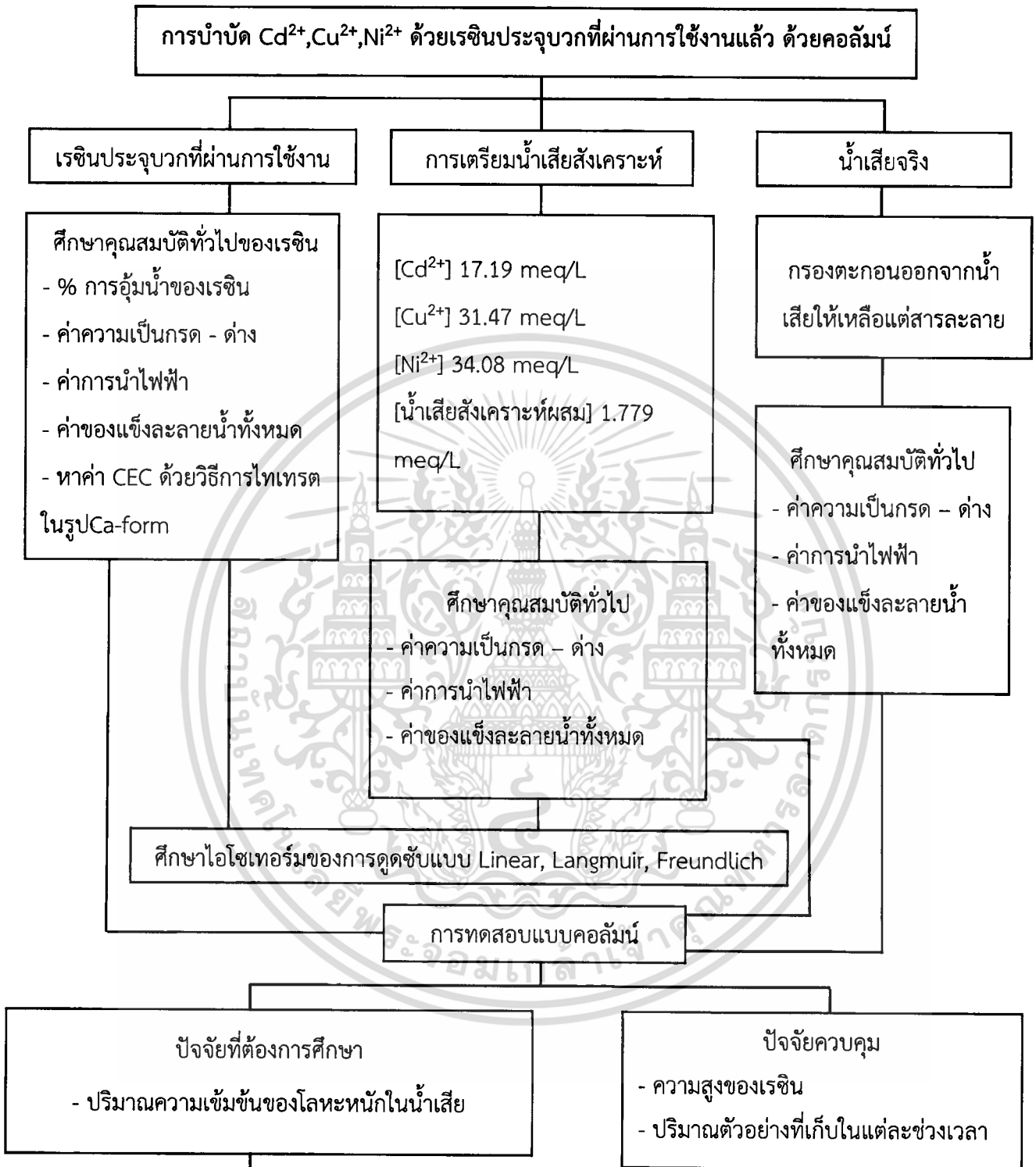
1. ใช้วิธีวิเคราะห์ตาม Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd edition

2. กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์โลหะหนักแต่ละชนิดต้องมีความถูกต้องแม่นยำ ให้ค่า R^2 ไม่น้อยกว่า 0.99

3. ตรวจสอบค่านัยสำคัญทางสถิติด้วยวิธี One-way ANOVA ซึ่งทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีของ Tukey ที่ความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการดำเนินการวิจัย แสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2 แผนการดำเนินการวิจัย

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติทั่วไปของเรซิน

4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน

เรซินที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นเรซินประจุบวก-กรดแก่ (SR) ที่หมู่ฟังก์ชันเป็นซัลโฟเนต (Sulfonate) ที่อยู่ในรูป H^+ form เมื่อเรซินผ่านการใช้งานเป็นเวลานานจะต้องมีการรีเจนเนอเรต เนื่องจากประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนลดลง การรีเจนเนอเรตปรับฟื้นคืนสภาพด้วยด้วยกรดเกลือ (HCl) หรือเกลือแกง (NaCl) ก่อนนำมาทำการศึกษา (The Dow chemical company, 2017) เมื่อนำเรซินมาใช้แลกเปลี่ยนไอออนกับแคลเซียม (Ca^{2+}) ในน้ำกระด้าง จนไม่คุ้มค่าในการรีเจนเนอเรตให้กลับมาใช้ซ้ำได้ ทางโรงงานผลิตน้ำสะอาดจึงเลิกใช้เรซิน เรซินจึงเป็นของเสียที่รอการกำจัด และอยู่ในรูป Ca-form เป็นหลัก คณะผู้วิจัยจึงนำเรซินนี้มาศึกษาสมบัติทั่วไป เพื่อใช้กำจัดโลหะหนักแบบแบตช์ และแบบคอลัมน์ ทั้งนี้ยังสามารถนำเรซินมาบำบัดกับน้ำเสียที่พีเอชทุกระดับได้ ลักษณะทางกายภาพของเรซิน มีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดเล็ก สีน้ำตาล ไม่มีกลิ่น ทำการศึกษา คุณสมบัติเบื้องต้นดังตารางที่ 4.1 โดยแหล่งของเรซินที่นำมาใช้เป็นแหล่งเดียวกับณัฐพิมล และคณะ (2560), ภัทรพร และคณะ (2559), ชนากานต์ และคณะ (2558)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของเรซินชนิดประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

พารามิเตอร์	SR ปีการศึกษา 2561				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	$\bar{X}$	SD
pH (อัตราส่วน 1 : 1)	7.09	7.12	7.14	7.12	±0.03
ค่าการนำไฟฟ้า (อัตราส่วน1:5) (µS/cm)	0.24	0.24	0.24	0.24	±0.00
TDS (อัตราส่วน 1:5) (mg/L)	0.12	0.12	0.12	0.12	±0.00
ค่า CEC จากการไทเทรตในรูป Ca-form (meq/g)	1.56	1.53	1.53	1.54	±0.01
การอุ้มน้ำ (%)	51.10	52.44	52.48	52.01	±0.42

จากตารางที่ 4.1 พบว่าคุณสมบัติของเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent Resin,SR) ยี่ห้อ Dowex™ IR 100 พบว่าเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้วเมื่อทำการวัดค่าพีเอช เรซินมีความเป็นเบสเล็กน้อย ค่าพีเอชเท่ากับ 7.12 อาจเป็นผลมาจาก Ca^{2+} ในเรซินหลุดออกมาในสารละลาย ซึ่ง Ca^{2+} เป็นไอออนที่มีฤทธิ์เป็นเบสส่งผลให้ค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการนำไฟฟ้า 0.24 µS/cm, ค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด 0.12 mg/L , ค่า CEC จากการไทเทรตในรูป Ca-form 1.53±0.01 meq/g และ %การอุ้มน้ำ 52.01±0.42 จากผลการศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยปี 2560 พบว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างกัน เนื่องจากการเก็บรักษาเรซิน

4.2 ไอโซเทอร์มของการบำบัดของการแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้น

4.2.1 แคดเมียม (Cadmium)

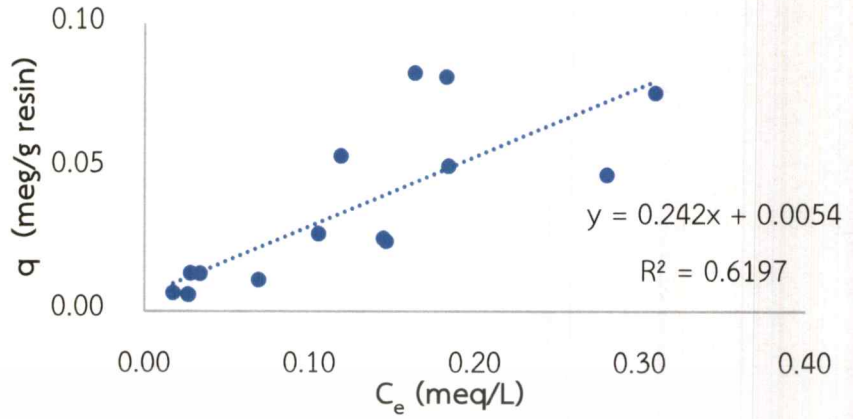
การเลือกความเข้มข้น Cd^{2+} ในการศึกษาการบำบัดเริ่มต้นที่ 0.18 meq/L ถึง 1.96 meq/L เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของการบำบัดโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม ที่ระดับความเข้มข้น 0.18 meq/L มีค่า pH เท่ากับ 3.75 ปริมาตร 25 mL ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 rpm อุณหภูมิ 25 °C ระยะเวลาการบำบัด 30 นาที ปริมาณเรซินที่ใช้ 1 g นำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการไอโซเทอร์มในการบำบัด ก. แบบเชิงเส้น, ข. แบบแลงเมียร์ และค. แบบฟรุนด์ลิช ได้ดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ผลการบำบัดแคดเมียมแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ

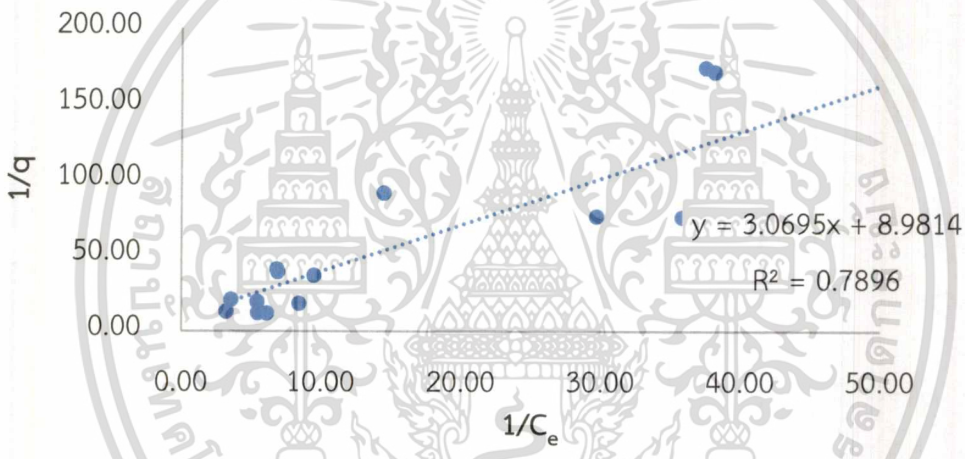
	Cd^{2+}		
	แบบเชิงเส้น	**แบบแลงเมียร์**	**แบบฟรุนด์ลิช**
สมการ	$Q = 0.242C_e +$ 0.0054	$1/Q = 3.0695(1/C_e) +$ 8.9814	$\log Q = 0.9183 \log C_e -$ 0.6428
R^2	0.6197	0.7896	0.8181
ค่าคงที่ของการดูดซับ	$K_d = 0.24$	b = 2.93	1/n = 0.92
		$Q_m = 0.11$ meq/g	K = 4.39

จากผลการวิเคราะห์การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าข้อมูลการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์ เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่าไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นมีค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เท่ากับ 0.24 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) เท่ากับ 0.11 meq/g และไอโซเทอร์มของฟรุนด์ลิช มีค่าความสามารถในการดูดซับ (K) เท่ากับ 4.39

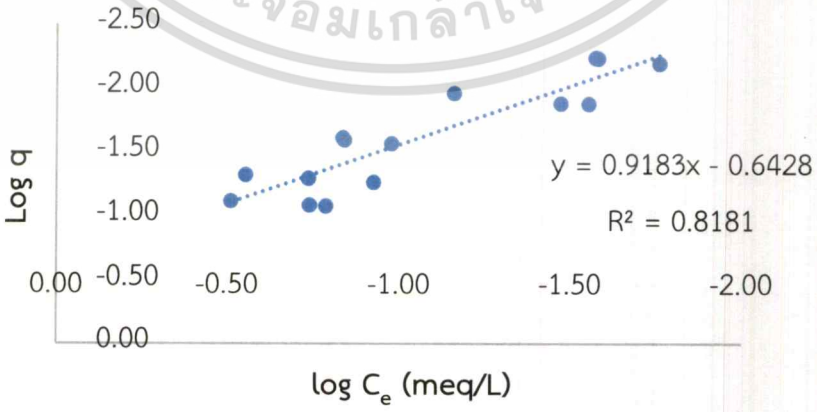
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. แบบเชิงเส้น



ข. แบบแลงเมียร์



ค. แบบฟรุนด์ลิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียม

จากรูปที่ 4.1 สรุปได้ว่า เมื่อนำข้อมูลการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างไอออนของโลหะหนักกับไอออนของแคลเซียมที่เกาะกับหมู่ซัลโฟเนตบนพื้นผิวและรูพรุนของเรซิน เมื่อเขย่าสารละลาย Cd^{2+} กับเรซิน พบว่าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับแคลเซียม (Ca^{2+}) ที่ติดบนหมู่ฟังก์ชันของเรซิน การเกิดปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลได้ 30 นาที (ปิยภรณ์และคณะ, 2558) เมื่อเข้าสู่สมดุลสามารถนำแนวคิด ไอโซเทอร์มการดูดซับมาประยุกต์ใช้ได้ เช่น รูปที่ 4.1 เมื่อเทียบความสัมพันธ์ของกราฟรูปที่ 4.1 ก.-ค. พบว่าแบบจำลองฟรุนด์ลิชให้ค่าความสัมพันธ์ R^2 ได้สูงที่สุด (R^2 = 0.8181) แสดงว่าเรซินมีพื้นที่ผิวที่มีหมู่ฟังก์ชันปริมาณจำกัด เมื่อพิจารณาจากค่า 1/n = 0.9183 (น้อยกว่า 1) ซึ่งสอดคล้องกับ (ชฎาภรณ์ , 2545) ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับ Cd^{2+} จากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบา พบว่าผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด เท่ากับ 99.92 % และการดูดซับ Cd^{2+} ด้วยดินเบาสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิช

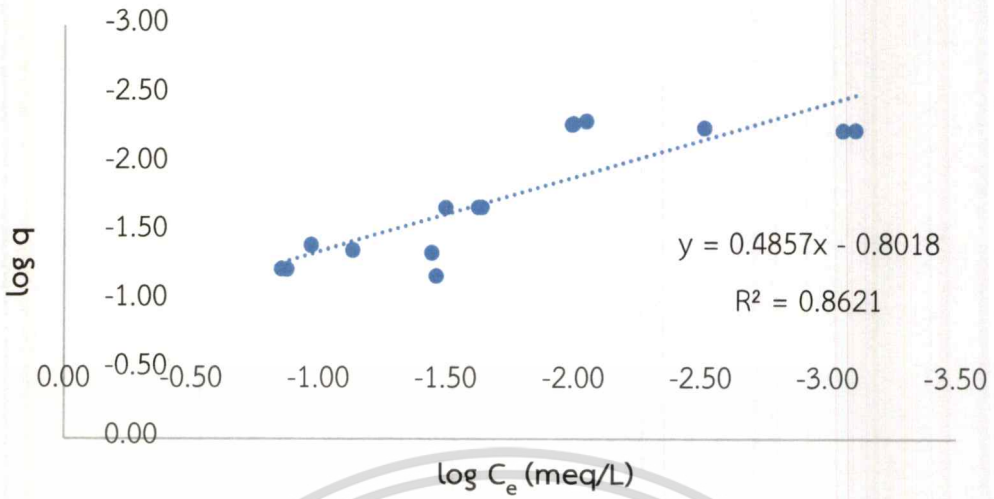
4.2.2 ทองแดง (Copper)

การเลือกความเข้มข้น Cu^{2+} ในการศึกษาการบำบัดเริ่มต้นที่ 0.18 meq/L - 1.96 meq/L เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการวิเคราะห์เช่นเดียวกับแคดเมียมโดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง แล้วนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการไอโซเทอร์มในการบำบัด ก. แบบเชิงเส้น, ข. แบบแลงเมียร์ และค. แบบฟรุนด์ลิช ได้ดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ผลการบำบัดทองแดงแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ

	Cu^{2+}		
	แบบเชิงเส้น	**แบบแลงเมียร์**	**แบบฟรุนด์ลิช**
สมการ	$Q = 0.3648C_e + 0.0111$	$1/Q = 0.1076(1/C_e) + 70.471$	$\log Q = 0.4857\log C_e - 0.8018$
R^2	0.6166	$R^2 = 0.2862$	$R^2 = 0.8621$
ค่าคงที่ของการดูดซับ	$K_d = 0.36$	b = 654.93	1/n = 0.49
		Q_m = 0.01 meq/g	K = 6.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิชของการบำบัดทองแดง

จากผลการวิเคราะห์การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าข้อมูลการบำบัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์ เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่าไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นมีค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เท่ากับ 0.36, ไอโซเทอร์มแลงเมียร์มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) เท่ากับ 0.01 meq/g และไอโซเทอร์มของฟรุนด์ลิช มีค่าความสามารถในการดูดซับ (K) เท่ากับ 6.34 ซึ่งสอดคล้องกับ (เบญจวรรณ, 2547) การเตรียมตัวดูดซับเพื่อใช้ในการกำจัดทองแดง (Cu^{2+}) ออกจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ (FeO) ผลการศึกษา พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด Cu^{2+} คือ ใช้ระยะเวลาในการสัมผัสนาน 30 นาที และพีเอชของสารละลายโลหะเท่ากับ 5.5 โดยสามารถกำจัด Cu^{2+} ที่สูงสุดมีค่าเท่ากับ 3.55 มิลลิกรัมต่อตัวดูดซับหนึ่งกรัม โดยการกำจัดโลหะหนักที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช และเมื่อทำการเคลือบซิลิกาเจลที่ใช้แล้วที่นำมาจากต่างห้องปฏิบัติการ พบว่า สามารถกำจัด Cu^{2+} ได้อยู่ในช่วง 2.12- 3.55 มิลลิกรัมต่อซิลิกาเจลหนึ่งกรัม โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียจริงที่มี Cu^{2+} ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 13.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้เท่ากับ 89.48 และ 83.52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

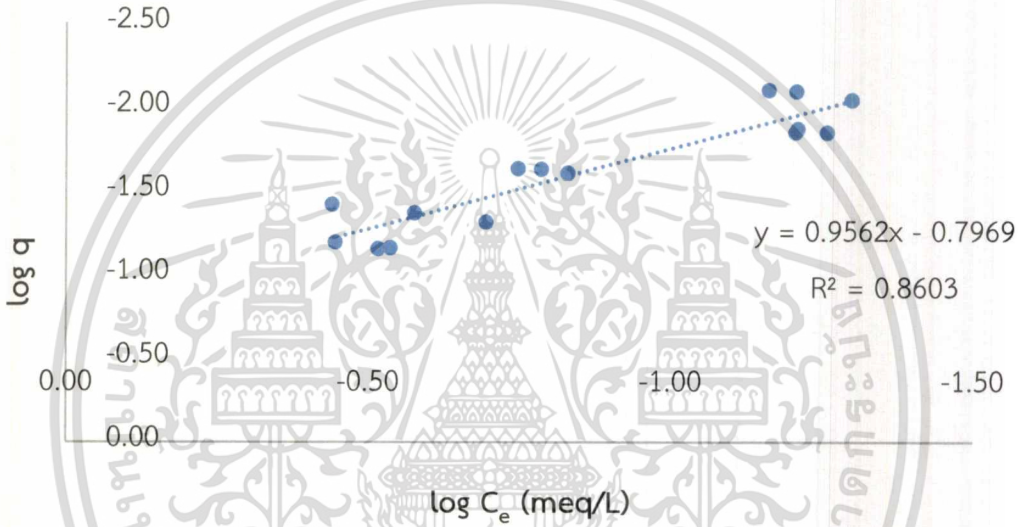
4.2.3 นิกเกิล (Nickel)

การเลือกความเข้มข้น Ni^{2+} ในการศึกษาการบำบัดเริ่มต้นที่ 0.18 meq/L - 1.96 meq/L เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการวิเคราะห์เช่นเดียวกับแคดเมียมโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล แล้วนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการไอโซเทอร์มในการบำบัด ก. แบบเชิงเส้น, ข. แบบแลงเมียร์ และค. แบบฟรุนด์ลิช ได้ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการบำบัดนิกเกิลแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ

	Ni^{2+}		
	แบบเชิงเส้น	**แบบแลงเมียร์**	**แบบฟรุนด์ลิช**
สมการ	$Q = 0.1701C_e + 0.0014$	$1/Q = 5.3473(1/C) + 4.4492$	$\log Q = 0.9562\log C_e - 0.7969$
R^2	0.7766	0.7671	0.8603
ค่าคงที่ของการดูดซับ	$K_d = 0.17$	b = 0.83	1/n = 0.96
		Q_m = 0.22 meq/g	K = 6.26



รูปที่ 4.3 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิชของการบำบัดนิกเกิล

จากผลการวิเคราะห์การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าข้อมูลการบำบัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์ เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่าไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นมีค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เท่ากับ 0.17, ไอโซเทอร์มแลงเมียร์มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) เท่ากับ 0.22 meq/g และไอโซเทอร์มของฟรุนด์ลิช มีค่าความสามารถในการดูดซับ (K) เท่ากับ 6.26 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (นพปฎลและคณะ, 2555) การดูดซับ Ni^{2+} ของดินเหนียว และดินทรายปนทรายแป้ง ทดสอบด้วยวิธีแบบกะโดยมีการหาไอโซเทอร์มการดูดซับจากการศึกษาพบว่าการดูดซับ Ni^{2+} ของดินทั้งสองชนิดเข้าสู่สภาวะสมดุลภายใน เวลา 1 ชั่วโมง โดยแบบจำลองของฟรุนด์ลิชสามารถอธิบายการดูดซับได้ดีกว่าแบบจำลองแลงเมียร์ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ Ni^{2+} ของดินทั้งสองชนิด พบว่าดินเหนียวมีความสามารถในการดูดซับ Ni^{2+} ได้ดีกว่าดินทรายปนทรายแป้ง เท่ากับ 6.57 และ 5.23 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

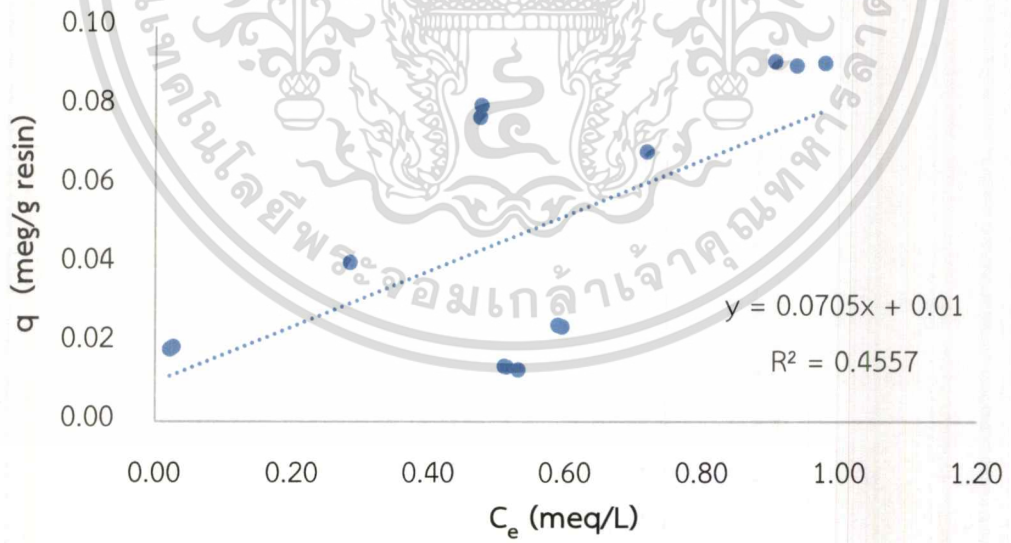
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 น้ำเสียสังเคราะห์ผสม

จากการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของการบำบัดโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ผสม Cd^{2+} , Cu^{2+} และNi^{2+}ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากัน คือ 0.18 meq/L มีค่า pH เท่ากับ 4.53 ปริมาตร 25 mL ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 rpm อุณหภูมิ 25 °C ระยะเวลาการบำบัด 30 นาที ปริมาณเรซินที่ใช้ 1 g แล้วนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการไอโซเทอร์มในการบำบัด เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการแข่งขันการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนจะได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูป 4.4

ตารางที่ 4.5 ผลการบำบัดแคดเมียมของน้ำเสียสังเคราะห์ผสมแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ

	Cd^{2+}		
	แบบเชิงเส้น	**แบบแลงเมียร์**	**แบบฟรุนด์ลิช**
สมการ	$Q = 0.0705C_e + 0.01$	$1/Q = 0.8294(1/C) + 27.517$	$\log Q = 0.2811\log C_e - 1.3168$
R^2	0.4557	0.3136	0.2397
ค่าคงที่ของการดูดซับ	$K_d = 0.07$	b = 33.18	1/n = 0.29
		Q_m = 0.04 meq/g	K = 20.74



รูปที่ 4.4 ไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นของการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ผสม

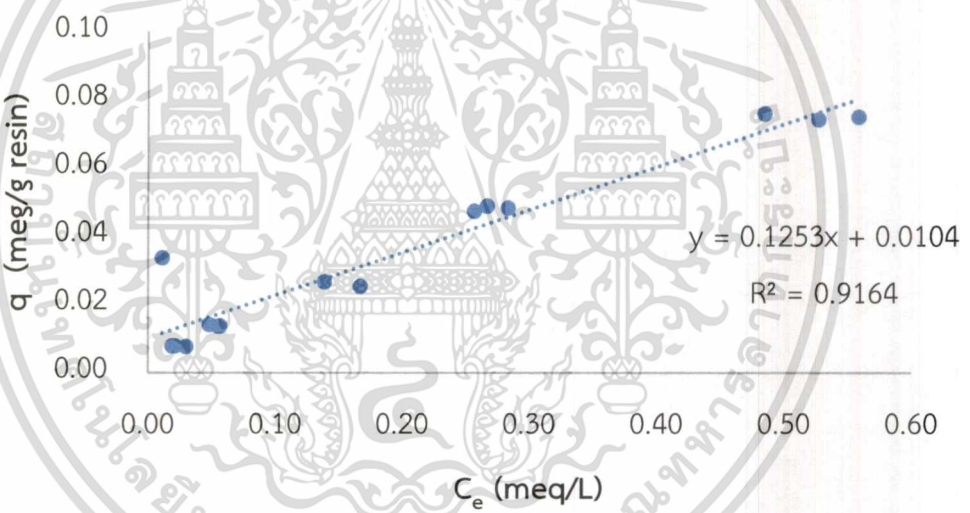
จากผลการวิเคราะห์การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าข้อมูลการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์ เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่าไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นมีค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เท่ากับ 0.07 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) เท่ากับ 0.04 meq/g และไอโซเทอร์มของฟรุนด์ลิช มีค่าความสามารถในการดูดซับ (K) เท่ากับ 20.74

ตารางที่ 4.6 ผลการบำบัดทองแดงของน้ำเสียสังเคราะห์ผสมแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ

	Cu^{2+}		
	แบบเชิงเส้น	**แบบแลงเมียร์**	**แบบฟรุนด์ลิช**
สมการ	$Q = 0.1253C_e + 0.0104$	$1/Q = 0.8506(1/C) + 36.073$	$\log Q = 0.5362 \log C_e - 1.0571$
R^2	0.9164	0.2504	0.6915
ค่าคงที่ของการดูดซับ	$K_d = 0.13$	b = 42.41	1/n = 0.54
		Q_m = 0.03meq/g	K = 11.41



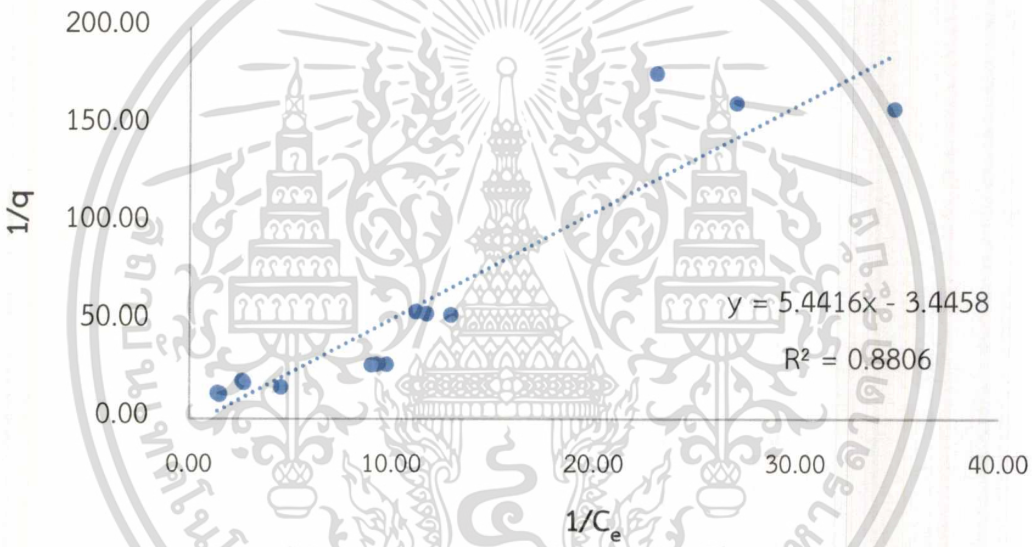
รูปที่ 4.5 ไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นของการบำบัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ผสม

จากผลการวิเคราะห์การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าข้อมูลการบำบัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์ เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่าไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นมีค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เท่ากับ 0.13, ไอโซเทอร์มแลงเมียร์มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) เท่ากับ 0.03 meq/g และไอโซเทอร์มของฟรุนด์ลิช มีค่าความสามารถในการดูดซับ (K) เท่ากับ 11.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการบำบัดนิกเกิลของน้ำเสียสังเคราะห์ผสมแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ

	Ni^{2+}		
	แบบเชิงเส้น	**แบบแลงเมียร์**	**แบบฟรุนด์ลิช**
สมการ	$Q = 0.0969C_e + 0.0147$	$1/Q = 5.4416(1/C) - 3.4458$	$\log Q = 0.802\log C_e - 0.8862$
R^2	0.8373	0.8806	0.8583
ค่าคงที่ของการดูดซับ	$K_d = 0.10$	b = 0.63	1/n = 0.80
		Q_m = 0.29 meq/g	K = 7.69



รูปที่ 4.6 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการบำบัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ผสม

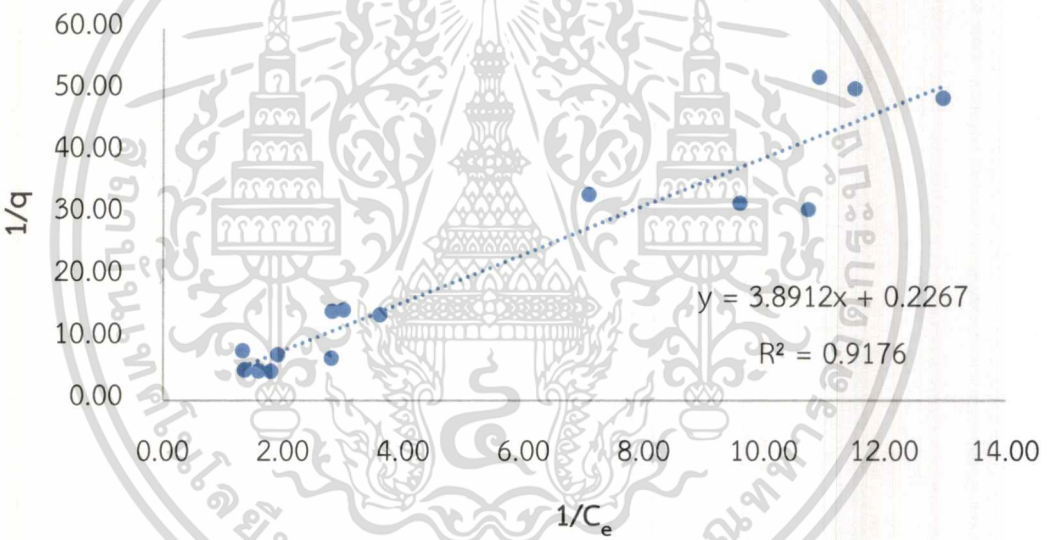
จากผลการวิเคราะห์การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าข้อมูลการบำบัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์ เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่าไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นมีค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เท่ากับ 0.10 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) เท่ากับ 0.29 meq/g และไอโซเทอร์มของฟรุนด์ลิช มีค่าความสามารถในการดูดซับ (K) เท่ากับ 7.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ผสมแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ

* เมื่อคิดจากโลหะหนักทุกชนิด

	Cd^{2+}, Cu^{2+} และNi^{2+}		
	แบบเชิงเส้น	**แบบแลงเมียร์**	**แบบฟรุนด์ลิช**
สมการ	$Q = 0.2645C_e + 0.0028$	$1/Q = 3.8912(1/C) + 0.2267$	$\log Q = 1.0108\log C_e - 0.5757$
R^2	0.7930	0.9176	0.9156
ค่าคงที่ของการดูดซับ	$K_d = 0.26$	b = 0.06	1/n = 1.01
		Q_m = 4.44 meq/g	K = 3.76



รูปที่ 4.7 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของไอออนรวมการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

จากผลการวิเคราะห์การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าข้อมูลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ผสม โดยทำการทดลองแบบแบตช์ เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่าไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นมีค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เท่ากับ 0.26 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) เท่ากับ 4.41 meq/g และไอโซเทอร์มของฟรุนด์ลิช มีค่าความสามารถในการดูดซับ (K) เท่ากับ 3.76 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (ศิริวรรณ, 2558) ศึกษาการดูดซับแบบกะของไอออนโลหะ 4 ชนิด ได้แก่ Cd^{2+} และNi^{2+} ในสารละลายเดี่ยวโดยใช้ถ่านขาวกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับ พบว่าถ่านขาวกะลามะพร้าวสามารถดูดซับ Cd^{2+} และNi^{2+} ค่าความสามารถดูดซับ Cd^{2+} และ Ni^{2+} เท่ากับ 9.10 และ1.92 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับการดูดซับไอออนโลหะผสมแบบแข่งขัน พบว่าถ่านขาวกะลามะพร้าวขนาดอนุภาคช่วง 500 ถึง 710 ไมโครเมตร สามารถดูดซับไอออนผสมออกจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายที่พีเอช 5 มีค่าเป็น 2.26 และ 1.73 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับ Cd^{2+} และ Ni^{2+} แบบจำลองการดูดซับไอออนโลหะเป็นแบบแลงเมียร์ และมีค่าความสามารถดูดซับสูงสุด (q_m) ของไอออนโลหะต่างๆเป็น 15.82 และ 3.60 มิลลิกรัมต่อกรัมสำหรับ Cd^{2+} และNi^{2+}

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนำค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่สูงสุด (Q_m) จากวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าความสามารถการดูดซับโลหะหนักที่สูงสุด (Q_m)

วัสดุ	โลหะหนัก	q_m (mg/g)	q_m (meq/g)	อ้างอิง	หมายเหตุ
AS-P	Pb^{2+}	233.0	2.25	ชยาภาส ทับทอง (2549)	
MUR-P	Pb^{2+}	248.0	2.40		
CASS-N	Pb^{2+}	247.0	2.40		
ถ่านจากเปลือกมังคุด	Pb^{2+}	2.27	0.02	รอฮานาและคณะ (2553)	
	Cu^{2+}	0.21	0.01		
ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด	Pb^{2+}	12.50	0.12		
	Cu^{2+}	4.35	0.30		
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	Pb^{2+}	0.08	0.0008		
	Cu^{2+}	0.06	0.004		
สเมกไทต์	Pb^{2+}	49.56	0.48	เกษราและคณะ (2555)	
	Zn^{2+}	42.37	1.30		
	Cd^{2+}	22.17	0.92		
	Cu^{2+}	42.43	6.72		
ถ่านขาว	Pb^{2+}	17.12	0.17	ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์ (2558)	
	Zn^{2+}	15.82	0.48		
	Cd^{2+}	4.48	0.19		
	Ni^{2+}	3.60	0.26		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าความสามารถการดูดซับโลหะหนักที่สูงสุด (Q_m) (ต่อ)

วัสดุ	โลหะหนัก	q_m (mg/g)	q_m (meq/g)	อ้างอิง	หมายเหตุ
เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว (แบตช์)	Cd^{2+}	6.26	0.11	จากงานวิจัยนี้	น้ำเสียสังเคราะห์
	Cu^{2+}	0.45	0.01		
	Ni^{2+}	6.60	0.22		
	Cd^{2+}, Cu^{2+} และ Ni^{2+} ผสม		4.41		

จากตารางที่ 4.9 พบว่าวัสดุที่นำมาเป็นตัวดูดซับแคดเมียม (Cd^{2+}) และทองแดง (Cu^{2+}) คือ วัสดุดูดซับสเมกไทต์ มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 22.17 และ42.43 mg/g ตามลำดับ และวัสดุที่สามารถนำมาเป็นตัวดูดซับนิกเกิล (Ni^{2+}) ได้ดีที่สุด คือ เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว (แบตช์) มีค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงสุด เท่ากับ 6.60 mg/g

4.3 การบำบัดโลหะหนักจากน้ำเสียโดยใช้คอลัมน์

จากการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียด้วยด้วยคอลัมน์เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วบรรจุใส่บิวเรตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.6 cm ที่ความสูงของเรซิน 30 cm ใช้เป็นคอลัมน์ในการบำบัด โดยปล่อยทั้งน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการผ่านคอลัมน์เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว และเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านเรซินตามเวลา ดังตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าช่วงต้นของการเก็บตัวอย่างนำมาตรวจวัดพบว่าน้ำตัวอย่างที่ผ่านคอลัมน์ออกมานั้นมีปริมาณไอออนของโลหะหนักเหลืออยู่น้อยมาก ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง (ภาคผนวก ข) แต่เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมงความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะหนักของเรซินน้อยลง จึงจะเห็นได้ว่าในช่วงท้ายของการเก็บตัวอย่างมาตรวจวัดจะมีปริมาณไอออนของโลหะในน้ำเสียมากกว่าในช่วงต้นของการเก็บตัวอย่าง ดังตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

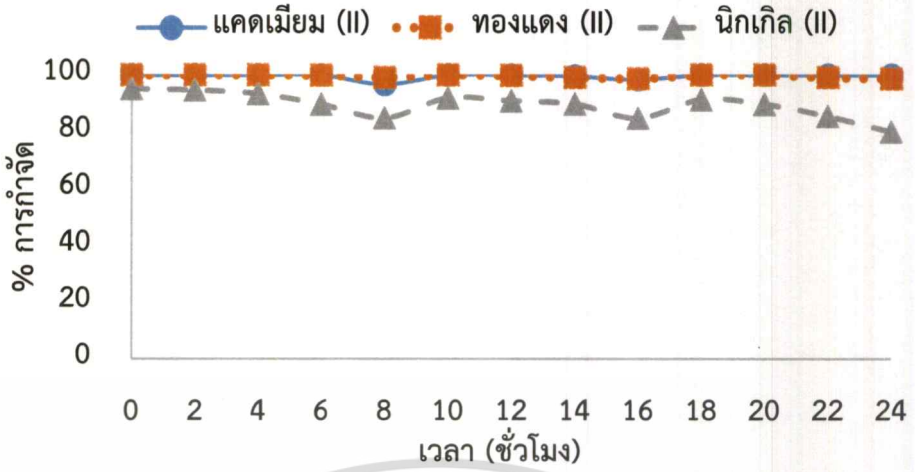
ตารางที่ 4.10 การบำบัดโลหะหนักด้วยคอลัมน์โดยเทียบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

เวลา (ชั่วโมง)		2	4	6	8**	10	12	14	16**	18	20	22	24**	หมายเหตุ*
น้ำเสียสังเคราะห์เชิงเดี่ยว	Cd^{2+}(ppm)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0.03 ppm
	Cu^{2+}(ppm)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	2.0 ppm
	Ni^{2+}(ppm)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	×	1.0 ppm
น้ำเสียสังเคราะห์ผสม	Cd^{2+}(ppm)	√	√	√	√	√	√	×	×	×	×	×	×	0.03 ppm
	Cu^{2+}(ppm)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	2.0 ppm
	Ni^{2+}(ppm)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	×	1.0 ppm
น้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการ	Cd^{2+}(ppm)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	0.03 ppm
	Cu^{2+}(ppm)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	2.0 ppm
	Ni^{2+}(ppm)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	1.0 ppm
	Na^{+} (ppm)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-
	K^{+} (ppm)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
	Fe (ppm)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	

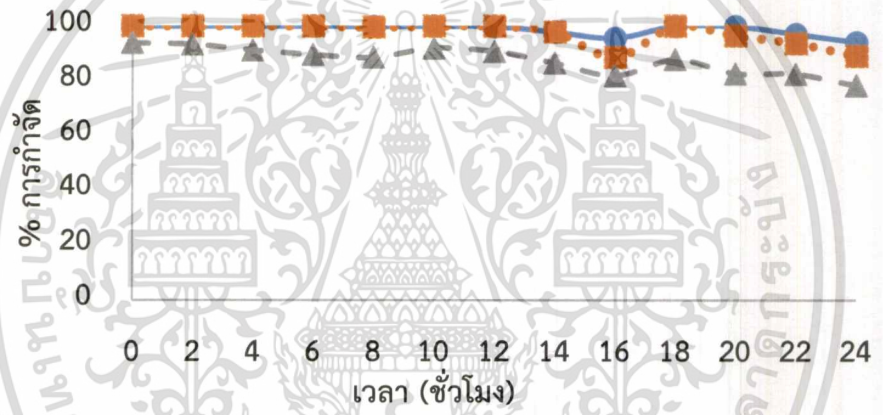
หมายเหตุ √ ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม , × ไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

* หมายถึง มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม (ภาคผนวก ข)

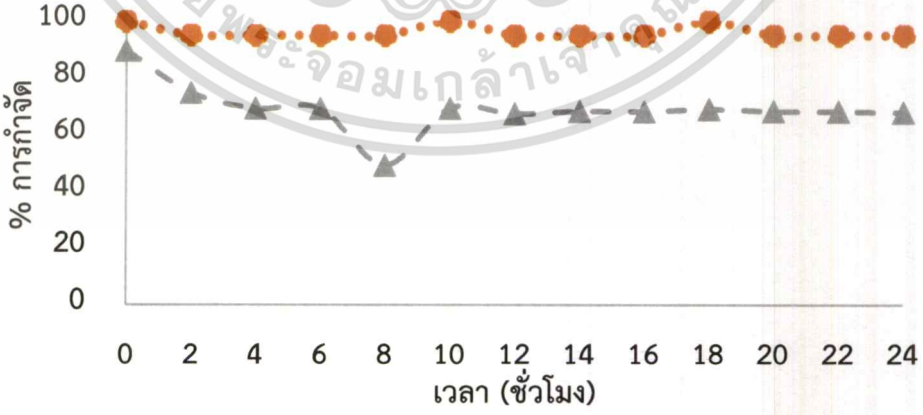
8** , 16** และ24** หมายถึง ที่ชั่วโมงที่ 8, 16 และ24 มีการหยุดพักการบำบัดช่วงเวลากลางคืน และมีการเริ่มบำบัดในวันถัดไป



ก. เปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม ทองแดง นิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เชิงเดี่ยว



ข. เปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม ทองแดง นิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ผสม



ค. เปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม ทองแดง นิกเกิลในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.10 พบว่าการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้คอลัมน์ที่บรรจุเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียสังเคราะห์เชิงเดี่ยวที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/L ได้จำนวน 36 L ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งทุกโลหะหนัก กรณีน้ำเสียสังเคราะห์ผสมที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 3 ตัวเท่ากันที่ 0.18 meq/L พบว่าสามารถบำบัดได้เพียง 18 L ทั้งนี้เพราะจำนวนของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด เพิ่มมากขึ้นเกินขีดจำกัดของการแลกเปลี่ยน กรณีน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ พบว่าแคดเมียม (Cd^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ไม่สามารถบำบัดได้ตลอดช่วงเวลาการทดลอง และทองแดง (Cu^{2+}) สามารถบำบัดได้ 36 L เนื่องมาจากน้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการมีไอออนอื่นผสมอยู่เป็นจำนวนมากโดยเฉพาะ Na^{+} และ K^{+} จึงเป็นตัวแข่งขันในการเข้าไปแลกเปลี่ยนประจุได้ดีกว่าโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดที่ทำการศึกษา ทำให้ไม่สามารถบำบัดได้เหมาะสม ควรใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เช่น การกรองด้วยเมมเบรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักด้วยคอลัมน์เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีการทำการทดลองบำบัดแบบแบตช์ ใช้เรซิน 1 g ต่อน้ำ 25 mL เขย่าเป็นเวลา 30 นาที และแบบคอลัมน์ ที่ความสูงของเรซิน 30 cm น้ำหนัก 33 g แล้ววิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดไอออนของโลหะหนัก ได้ผลดังนี้

1. การศึกษาไอโซเทอร์มของการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว จากการทดลองแบบแบตช์ พบว่าเรซินสามารถดูดซับไอออนของโลหะทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล ได้มากที่สุดตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดของไอออนโลหะแต่ละชนิดมากกว่า 99%, 91% และ 83% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิชทั้ง 3 ตัว มีค่า R^2 = 0.8621, 0.8181 และ0.8603 ตามลำดับ ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมได้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดของ แคดเมียม, ทองแดง และนิกเกิล ที่ประสิทธิภาพมากกว่า 87%, 98% และ 85% ตามลำดับ ซึ่งแคดเมียม และทองแดง สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้น มีค่า R^2 = 0.9033 และ 0.9164 ตามลำดับ นิกเกิลสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์มีค่า R^2 = 0.8806

2. การศึกษาการบำบัดโลหะหนักด้วยคอลัมน์เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว จากน้ำเสียสังเคราะห์ อย่างต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง พบว่า เรซินสามารถบำบัดไอออนของโลหะหนักแคดเมียม ทองแดง และนิกเกิลได้ตามลำดับโดยมีประสิทธิภาพการบำบัดเกือบ 100% แต่เมื่อเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ความเข้มข้นแคดเมียมตั้งแต่ชั่วโมงที่ 14 ถึง 24 ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ 0.03 ppm

เมื่อบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ พบว่าไอออนบวกชนิดอื่นๆเจือปนอยู่มาก ดังในภาคผนวก จ ตารางที่ จ.8 ซึ่งเป็นไอออนที่เข้าไปแข่งขันการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักที่ศึกษาทั้ง 3 ชนิด ทำให้ไม่สามารถกำจัดไอออนของนิกเกิลให้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งได้ ดังสรุปในตารางที่ 4.10 แต่โลหะหนักแคดเมียม และทองแดงผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากงานวิจัยได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนัก ควรศึกษาการบำบัดโลหะหนักชนิดอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักชนิดอื่นๆ

2. จากงานวิจัยควรศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของน้ำเสีย เพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบำบัดโลหะหนัก ในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินกับโลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการบำบัดแบบชุดการทดลองแบตช์ (Batch) และแบบคอลัมน์ (Column) ควรมีการบำบัดซ้ำเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัด

4. จากงานวิจัยนี้หลังจากการบำบัดน้ำเสียเรซินที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย ควรนำเรซินที่ผ่านการบำบัดมาทำการรีเจนเนอเรตเพื่อดูประสิทธิภาพในการบำบัดครั้งต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ และพิสมัย ชัยรัตน์อุทัย. 2559. **การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย.** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การประปานครหลวง. 2561. **เรซิน.** [Online]. Available : https://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=583

กรมโรงงานอุสาหกรรม. 2560. **ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม.** [Online]. Available : http://www.diw.go.th/hawk/news/11.PDF

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 2558. **"การดูดซับตะกั่วด้วยดินป่าบุ่งป่าทามจังหวัด มหาสารคาม".** *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า.* 33(2) : 93-101.

จิราพร ภูษาจารย์, ณัฏฐ์ญดา คำมณีวณิชวงศ์ และอริสรา สวาทพงษ์. 2557. **"การบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียแบบคอลัมน์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก."** โครงงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชฎาภรณ์ บุญแท้. 2545. **การดูดซับโลหะหนังบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบา.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณัฐพิมล สุขกมลพิพัฒน์, ณัฐภัทร ผลานันทนิท และเบญจพร แก้วจุมพฏ. 2560. **การกำจัดโครเมียมด้วยคอลัมน์ที่บรรจุเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว.** โครงงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นพปฎล เสงี่ยมศักดิ์ และพงศกร พรรณรัตนศิลป์. 2555. **"ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลของดินเหนียวและดินทรายปนทรายแป้ง"** *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา.* 23(3) : 46-53.

มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2547. **การกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออน.** [Online]. Available : http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/fulltext/snamcn/Porta_Prasannam/Fulltext.pdf

วิกิพีเดีย. 2017. **ทองแดง.** [Online]. Available : https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%97%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%94%E0%B8%87

รอฮานา อาดาม. 2553. **"ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักโดยใช้ถ่านและถ่านกัมมันต์".** วิทยานิพนธ์ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี, มหาวิทยาลัยทักษิณ

รุจา สุวรรณสุข, วชิระ พิมพ์ปราโมทย์ และอานนท์ จริยนรเศรษฐ์. 2556. **การกำจัดแคดเมียมใน**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งาน. โครงงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์. 2558. "การกำจัดไอออนโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้ถ่านขาว" *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินวิโรฒ.* 10(1) : 22-31

ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่. 2017. **ทองแดง**. [Online]. Available : http://lc.dpim.go.th/kb/1077.

ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา. 2017. **ความเป็นพิษของทองแดง**. [Online]. Available : http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=296

สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2549. "การกำจัดไอออนตะกั่วจากน้ำเสียด้วยตะกอนจุลินทรีย์." *วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.* 28(1) : 1-11.

อภินันท์ บุญตา, ธีรนันท์ ขนอม และนภัสวรรณ โครตวงศ์. 2553. **ปฏิบัติการที่ 1 การสุ่มตัวอย่าง.** [Online]. Availible : http://samkon-eve.blogspot.com/2010/07/1.html

เกษรา จิตนิยม, อัญชลี สุทธิประการ, และเอิบ เขียวรื่นรมณ์. 2555. **การดูดซับ ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ของสเมกไทต.** [Online]. Available : http://www.lib.ku.ac.th/KUCONF/2556/KC5001006.pdf

เขมชิต ธนากิจชาญเจริญ, นงนาถ เมฆรังสิมันต์ และสุรชัย ศิลามณีโชติ. 2560. **ประโยชน์และความเป็นพิษของโลหะหนักแคดเมียม**. [Online]. Available : http://www.dss.go.th/images/st- article/cp_4_2551_Cadmium.pdf

Hasfalina C.m., Maryam R.Z., Luqman C.A., Rashid M. 2012. "Adsorption of copper (II) From Aqueous Medium In Fixed-Bed Colomn By Kenaf Fibres." *Scierse ScienceDirect.* 2012(3) : 255-263

H. Panda, N.Tiadi, M.Mohanty, C.R.Mohanty. 2017. "Studies on adsorption behavior Of an industrial waste for removal of chromium from aqueous solution" *South African Journal of Chemical Engineering.* 2017(23) : 132-138

Michal Ceglowski, Grzegorz Schroeder. 2015. "Preparation of porous resin with Schiff base Chelating groups for removal of heavy metal from aqueous soiutions". *Chemical Engineering Journal.* 263(1) : 402-411.

Shu-Ping Wu, Xiang-Zi Dai, Jia-Rui Kan, Fang-Di Shilong, Mai-Yong Zhu. 2016. "Fabrication of carboxymethyl chitosan-hemicellulose resin for adsorptive Removal of heavy metals from wastewater". *Chinese Chemical Lettres.* 28(1) : 625-632.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Siamchemi. 2017. **นิกเกิล (Ni) ประโยชน์ และพิษนิกเกิล**. [Online]. Available : http://www.siamchemi.com/%E0%B8%99%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%B4%E

S.S. Kalaivani, A. Muthukrishnaraj, S. sivanesan, L. Ravikumar. 2016. "Novel Hyperbranched polyurethane resins for the removal of heavy metal Ions from aqueous solution." *Process Safety and Environmental Protection.* 2016(04) : 11-23.

Thaienvironmentblog. 2017. **น้ำเสีย.** [Online]. Available : http://thaienvironmentblog.com/wastewater-source-of-wastewater/

Thaihealthlife.com. 2017. **แคดเมียม พิษจากแคดเมียม และการรักษา**. [Online]. Available : http://thaihealthlife.com/%E0%B8%9E%E0%B8%B4%E0%B8%A9%E0%B8%88%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B9%81%E0%B8%84%E0%B8%94%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%A1/

Thaitox. 2017. **นิกเกิล**. [Online]. Available : http://www.summacheeva.org/index_thaitox_nickel.htm

Thaipeeken. 2018. **คุณสมบัติทั่วไปของเรซิน.** [Online]. Available : https://www.tpkwater.com/สารกรองเรซิน-dowex-ir-100-25-ลิตรต่อกระสอบ-120734.product

Thobeka P. Makhathini, Sudesh Rathilal. 2016. "Investigation of BTEX compounds adsorption onto polystyrenic resin". *South African Journal of Chemical Engineering*. 23(2017) : 71-80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ข้อมูลเรซินที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

การจำแนกประเภท		Na form	H form
ความจุในการแลกเปลี่ยนทั้งหมด	eq/L	2	1.8
การอิ่มตัว	%	42 - 50	50 - 58
ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ		1.9	1.9
สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี			
ขนาดเฉลี่ยของเรซิน	mm	0.5 - 0.7	0.5 - 0.7
ความเป็นเนื้อเดียวกัน	%	สูงสุด 2.0	สูงสุด 2.0
ความจุทั้งหมด	%	95 - 100	95 - 100
ความสามารถในการแลกเปลี่ยน Na^+ เป็น H^+	%	สูงสุด 11	-
ความหนาแน่นรวม	g/L	840	820
ความสามารถในการจับตัว		25 L bag	25 L bag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำแนะนำการใช้งาน เรซิน DOWEX^{TM} IR 100 H/Na

ตารางที่ ก.2 คำแนะนำการใช้งานเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

อุณหภูมิ (สูงสุด)	120 °C
ช่วง pH	0 – 14
ความลึก (น้อยสุด)	800 mm
อัตราการไหล	
- Co-current regeneration	1 - 10 m/h
- Counter- current regeneration	5 - 20 m/h
ความต้องการเรซินทั้งหมด (Bed volumes)	2 – 5
สารรีเอเจนเนอร์แรนต์แบบ Co-current regeneration ความเข้มข้น (%)	1 – 8 % H_2SO_4 4 – 8 % HCl 8 – 12 % NaCl

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
มาตรฐานการระบายน้ำทิ้ง

มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ ข.1 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
ความเป็นกรดและด่าง (pH)	5.5 - 9.0	เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH meter) ที่มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า 0.1 หน่วย
อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิวัดขณะทำการเก็บตัวอย่าง
สี (Color)	300 เอดีเอ็มไอ	วิธีเอดีเอ็มไอ (ADMI Method)
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Suspended Solid)	- กรณีระบายลงแหล่งน้ำต้องไม่เกิน 3,000 mg/L - กรณีระบายลงแหล่งน้ำที่มีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเกินกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำทิ้งที่จะระบายได้ต้องมีค่าเกินกว่าค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในแหล่งน้ำนั้นไม่เกิน5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร	ใช้วิธีระเหยตัวอย่างที่กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disk) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 mg	ใช้วิธีกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีการวิเคราะห์
บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 20 mg/L	ใช้วิธีบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 วันติดต่อกันและหาค่าออกซิเจนละลายด้วยวิธีเอไซด์โมดิฟิเคชั่น (Azide Modification) หรือวิธีเมมเบรนอิเลคโทรด (Membrane Electrode)
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 120 mg/L	วิธีย่อยสลายโดยใช้โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate)
โลหะหนัก		
สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 5.0 mg/L ไม่เกิน 2.0 mg/L ไม่เกิน 0.03 mg/L ไม่เกิน 0.2 mg/L ไม่เกิน 1.0 mg/L	วิธีย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรดและวัดหาปริมาณโลหะด้วยวิธีอะตอมมิคแอบซอฟชั่นสเปคโตรเมตตรี (Atomic Absorption Spectrometry) หรือวิธีอินดักทีคัพเพิลพลาสมา (Inductively Coupled *Plasma*)
โครเมียมเฮกซะวาเลนท์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 mg/L	วิธีเทียบสี (Colorimetric Method) หรือวิธีสกัดและตรวจวัดด้วยวิธีอะตอมมิคแอบซอฟชั่นสเปคโตรเมตตรี (Atomic Absorption Spectrometry) หรือวิธีสกัดและตรวจวัดด้วยวิธีอินดักทีฟลีคัพเพิลพลาสมา (Inductively Coupled *Plasma*)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีการวิเคราะห์
โครเมียมไตรวาเลนท์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 mg/L	ใช้วิธีคำนวณจากค่าส่วนต่างของโครเมียมทั้งหมดกับโครเมียมเฮกซะวาเลนท์
ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 mg/L	ใช้วิธีโคลด์เวเปอร์อะตอมมิคแอบซอฟชั่นสเปคโตรเมตตรี (Atomic Absorption Cold Vapour Technique) หรือวิธีโคลด์เวเปอร์อะตอมมิคฟลูออเรส (Cold Vapor Atomic Fluorescence pectrometry) เซนซ์สเปคโตรเมตตรีหรือวิธีอินดักทีฟลีคัพเพิลพลาสมา(Inductively Coupled *Plasma*)

ที่มา : ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ประกาศ ณ วันที่ 29 มีนคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียม

1.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 2.0 mg/L

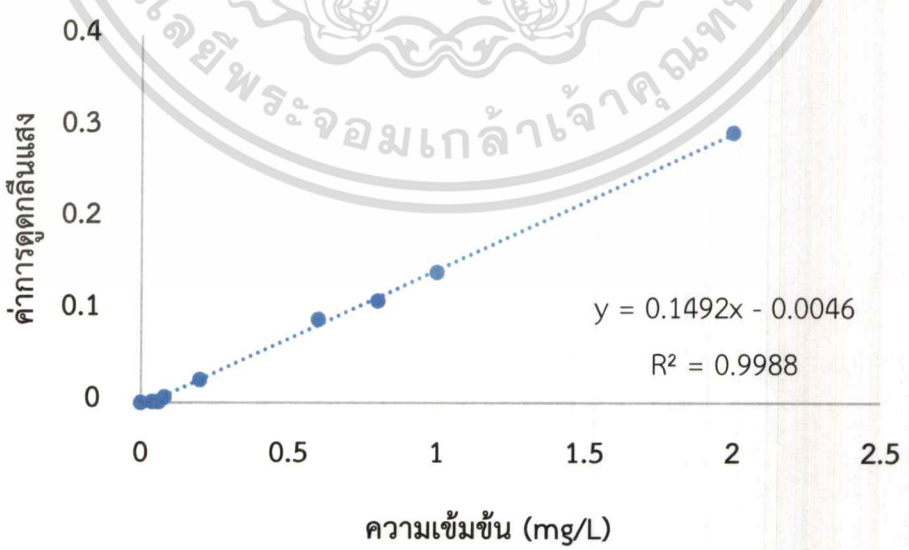
1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 1000 mg/L จำนวน 10 mL ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL แล้วปรับปริมาตรจะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 100 mg/L

2. ปิเปตสารละลายที่ได้จากข้อ 1 มา 10 mL ปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL จะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 10 mg/L

3. ปิเปตสารละลายที่ได้จากข้อ 3 มา 10 และ 20 mL ปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL จะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 1 และ 2 mg/L ตามลำดับ

4. ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 1 mg/L มา 5, 10, 20, 30 และ 40 ml ปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL จะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 mg/L ตามลำดับ

5. ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.1 mg/L มา 10, 20, 30 และ 40 mL ปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL จะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 mg/L ตามลำดับ



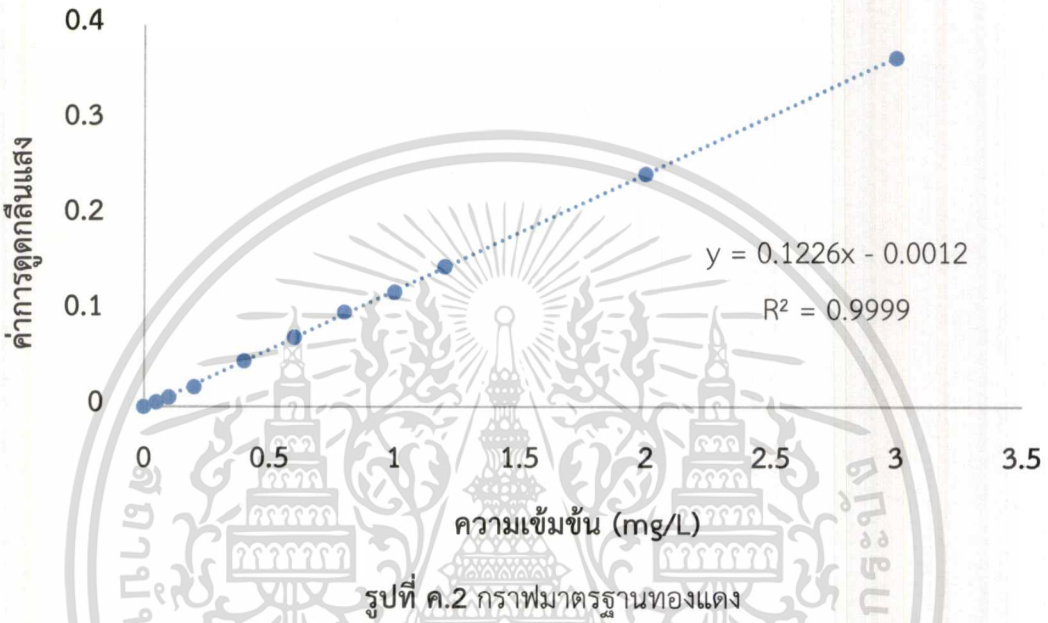
รูปที่ ค.1 กราฟมาตรฐานแคดเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดง

2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 2.0 และ 3.0 mg/L

ทำเช่นเดียวกับการเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมโดยใช้สูตร $C_1V_1 = C_2V_2$ ในการคำนวณหาปริมาตรที่ใช้เตรียมในแต่ละความเข้มข้น



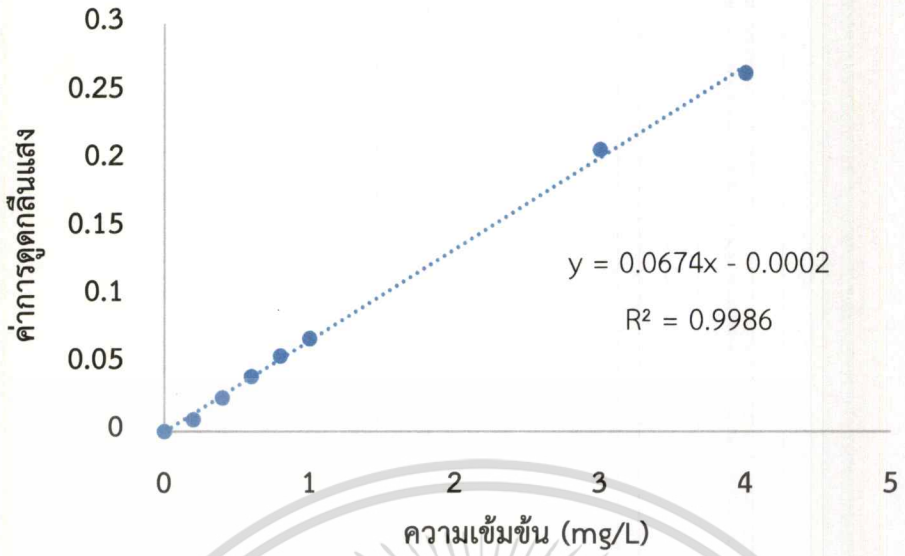
รูปที่ ค.2 กราฟมาตรฐานทองแดง

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานนิกเกิล

3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานนิกเกิลความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 และ 6.0 mg/L

ทำเช่นเดียวกับการเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมโดยใช้สูตร $C_1V_1 = C_2V_2$ ในการคำนวณหาปริมาตรที่ใช้เตรียมในแต่ละความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

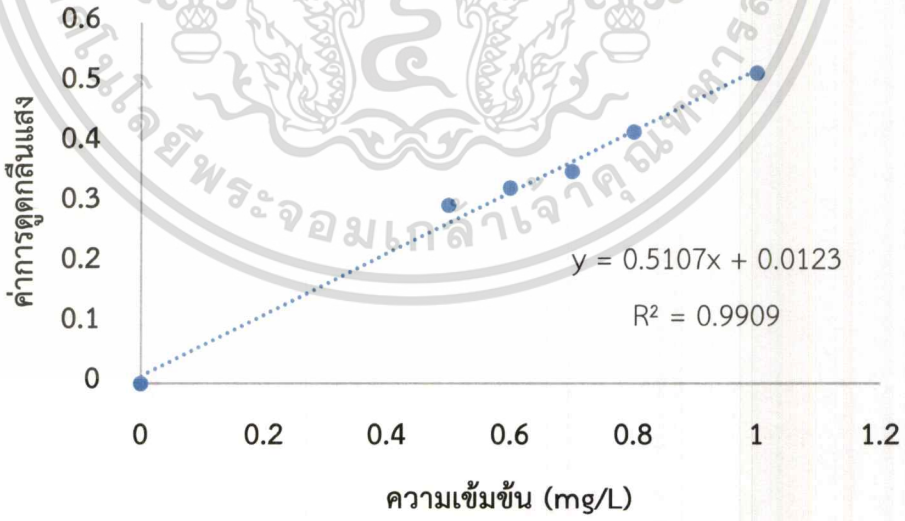


รูปที่ ค.3 กราฟมาตรฐานนิกเกิล

4. การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียม

4.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียมความเข้มข้น 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 และ 1.5 mg/L mg/L

ทำเช่นเดียวกับการเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมโดยใช้สูตร $C_1V_1 = C_2V_2$ ในการคำนวณหาปริมาตรที่ใช้เตรียมในแต่ละความเข้มข้น



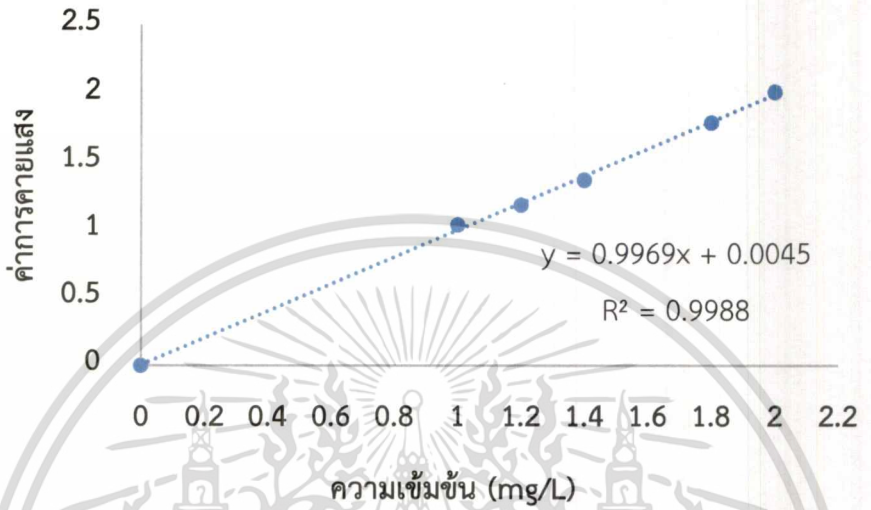
รูปที่ ค.4 กราฟมาตรฐานโซเดียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม

5.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 และ 2.0 mg/L

ทำเช่นเดียวกับการเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมโดยใช้สูตร $C_1V_1 = C_2V_2$ ในการคำนวณหาปริมาตรที่ใช้เตรียมในแต่ละความเข้มข้น

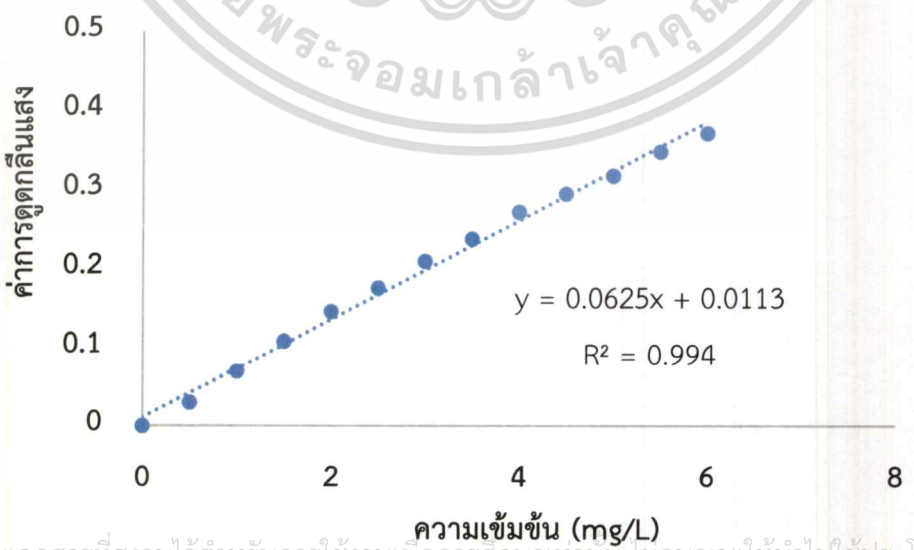


รูปที่ ค.5 กราฟมาตรฐานโพแทสเซียม

6. การเตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็ก

6.1 การเตียมสารละลายมาตรฐานเหล็ก 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 และ 6.0 mg/L

ทำเช่นเดียวกับการเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมโดยใช้สูตร $C_1V_1 = C_2V_2$ ในการคำนวณหาปริมาตรที่ใช้เตรียมในแต่ละความเข้มข้น



รูปที่ ค.6 กราฟมาตรฐานเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การคำนวณ

1. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ

$$\% \text{ การอุ้มน้ำ} = \frac{(\text{น้ำหนักเรซินเปียก} - \text{น้ำหนักเรซินแห้ง})}{\text{น้ำหนักเรซินปียก}} \times 100$$

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>

น้ำหนักเรซิน = 20.0025 g น้ำหนักเรซินเปียก = 41.1593 g

$$\% \text{ การอุ้มน้ำ} = \frac{(41.1593 - 20.0025)}{41.1593} \times 100$$

$$= 51.40$$

ชั่งสารมาตรฐาน KHP 2.0422 g ละลายน้ำและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 mL

$$[NaOH] = \frac{0.1000 \text{ N} \times 20.00 \text{ ml}}{21.60 \text{ ml}}$$

$$= 0.0926 \text{ N}$$

2. การหาค่า CEC จากการไทเทรตในรูปแคลเซียม (Ca^{2+})

2.1 การเทียบมาตรฐานของสารละลาย

ตารางที่ ง.1 ผลไทเทรตหาความเข้มข้นของกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอาเซติก (EDTA)

ครั้งที่	ปริมาตร $CaCO_3$ (mL)	ปริมาตรที่ใช้ EDTA (mL)	หมายเหตุ
1	25.00	32.40	
2	25.00	32.50	
3	25.00	32.40	
	เฉลี่ย	32.43	

$$[CaCO_3] = N_1 = \frac{0.0104 \times 10^3 \text{ mg}}{100 \text{ mg}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}}$$

$$= 104.00 \text{ mg/L as } CaCO_3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[EDTA] = \frac{A \times B}{C}$$

เมื่อ A = ความเข้มข้นของแคลเซียมคาร์บอเนต (mg/L as $CaCO_3$) 104.00 mg/L as $CaCO_3$

B = ปริมาตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (mL) 25.00 mL

C = ปริมาตรของEDTA ที่ใช้ไทเทรตกับสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนต (mL) 32.43 mL

$$[EDTA] = \left(\frac{104.00 \text{ mg/L as } CaCO_3)(25.00 \text{ mL})}{32.43 \text{ mL}}\right)$$

$$= 80.16 \text{ mg/L as } CaCO_3$$

2.2 การหาค่าCEC ในรูปCa-form ของตัวอย่าง

$$\text{ความกระด้าง} = \frac{T \times B}{\text{ตัวอย่างน้ำ (ml)}}$$

เมื่อ T = ปริมาตรของ EDTA ที่ใช้ไทเทรต (mL) 93.40 mL

B = ความเข้มข้นของสารละลาย EDTA (mg/L as) 80.17 (mg/L as $CaCO_3$)

$$\text{ความกระด้าง} = \frac{(93.40 \text{ ml})(80.16 \text{ as } CaCO_3)}{10.00 \text{ mL}}$$

$$= 748.74 \text{ mg/L as } CaCO_3$$

ตัวอย่างน้ำ	1000.0	ml	มีแคลเซียม	748.74	mg/L as $CaCO_3$
ถ้า ตัวอย่างน้ำ	210.00	mL	มีแคลเซียม	3.14	meq
ในเรซิน	5.0518	g	มีแคลเซียม	3.14	meq
ถ้า ในเรซิน	1.00	g	มีแคลเซียม	1.56	meq

ดังนั้น สารละลายเรซิน มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุเท่ากับ 0.62 meq/g

4. การเตรียมสารละลายสต๊อกแคดเมียม ที่ความเข้มข้น 1000 ppm

เตรียมจาก $Cd(NO_3.).5H_2O$

<u>คำนวณจาก</u>

มวลโมเลกุลของ $Cd(NO_3.).5H_2O$ 308.47 กรัม/โมล

น้ำหนักอะตอม Cd^{2+} 112.41 กรัม/โมล

$$\text{น้ำหนักของแคดเมียมในสต๊อก 1000 ppm} = \frac{1000 \text{ mg}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}}$$

$$= 1.0 \text{ g/L}$$

Cd^{2+} 112.41 กรัม ใช้ $Cd(NO_3.).5H_2O$ 308.47 กรัม

ถ้า Cd^{2+} 1 กรัม ใช้ $Cd(NO_3.).5H_2O$ 2.7742 กรัม

<u>เจือจาง</u> ความเข้มข้นจาก 1000 ppm เป็น 100 ppm

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(1000 \text{ ppm})V_1 = (10 \text{ ppm})(250 \text{ mL})$$

$$= \frac{10 \times 250}{1000}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \quad 2.5 \text{ mL}$$

5. ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล

$$C_e = \frac{AAS \times df \times V_{สุดท้าย} \times 1000}{1000 \times V_{เริ่มต้น}}$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

AAS คือ ค่าการดูดกลืนแสง (ppm) 0.71 ppm

df คือ ค่าการเจือจาง 5 เท่า

$V_{เริ่มต้น}$ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (mL) 25.00 mL

$V_{สุดท้าย}$ คือ ความเข้มข้นสุดท้าย (mL) 25.00 mL

$$= \frac{0.71 \times 5 \times 25.00 \times 1000}{1000 \times 25}$$

$$= 3.55 \text{ mg/L}$$

6. การคำนวณปริมาณของสารถูกดูดซับต่อสารดูดซับ

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{1000 \times D}$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อสารดูดซับหนึ่งหน่วย (meq/g)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (meq/L) 0.141 meq/L

C_e คือ ความเข้นข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (meq) 0.0174 meq/L

V คือ ปริมาตร (mL) 25.00 mL

D คือ น้ำหนักแห้งของเรซิน (g) 0.67 g

$$= \frac{(0.141-0.0174) \text{meq/L} \times 25.00 \text{ mL}}{(1000 \text{ mL})(0.67 \text{ g})}$$

$$= 0.0046 \text{ meq/g}$$

7. การคำนวณการแปลงหน่วย

$$\text{meq/L} = \frac{\text{ppm}}{\text{น้ำหนักหนักสมมูล}}$$

เมื่อ meq/L คือ จำนวนสมมูลต่อลิตร

ppm คือ หนึ่งส่วนในล้านส่วน

$$\text{น้ำหนักหนักสมมูล} = \frac{\text{มวลโมเลกุล}}{\text{จำนวนประจุ}}$$

8. การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะหนัก

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

เมื่อ C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)

C_e คือ ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ทั้งหมด (mg/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{การกำจัด (\%)} = \left(\frac{0.1406 - 0.0174}{0.1406}\right) \times 100$$

$$= 87.6367\ \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ จ.1 เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียมสังเคราะห์เชิงเดี่ยว

Resin		C_0 (meq/L)	C_e (meq/L)	q (meq/g dried resin)	1/q	$1/C_e$	log q	log C_e	% การกำจัด
Wet Weight (g)	Dried weight (g)								
1.0052	0.4824	0.1406	0.0174	0.0064	156.6627	57.52815	-2.1950	-1.7599	87.64
1.0340	0.4962	0.1406	0.0267	0.0057	174.2931	37.495	-2.2413	-1.5740	81.03
1.0212	0.4901	0.1406	0.0262	0.0058	171.4391	38.1568	-2.2341	-1.5816	81.36
1.0560	0.5068	0.2905	0.0690	0.0109	91.5170	14.4858	-1.9615	-1.1609	76.24
1.0158	0.4875	0.2905	0.0337	0.0132	75.9222	29.6753	-1.8804	-1.4724	88.40
1.032	0.4953	0.2905	0.0279	0.0133	75.4347	35.8222	-1.8776	-1.5542	90.39
1.0593	0.5084	0.6419	0.1461	0.0244	41.0173	6.8459	-1.6130	-0.8354	77.24
1.0218	0.4904	0.6419	0.1444	0.0254	39.4309	6.9261	-1.5958	-0.8405	77.51
1.0371	0.4977	0.6419	0.1052	0.0270	37.1019	9.5021	-1.5694	-0.9778	83.61
1.0568	0.5072	1.209	0.1838	0.0505	19.7891	5.4409	-1.2964	-0.7357	84.80
1.0191	0.4891	1.209	0.2799	0.0475	21.0566	3.5731	-1.3234	-0.5530	76.85
1.0489	0.5034	1.209	0.1186	0.0542	18.4666	8.4329	-1.2664	-0.9260	90.19

ตารางที่ จ.1 เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียมสังเคราะห์เชิงเดี่ยว (ต่อ)

Resin		C_0 (meq/L)	C_e (meq/L)	q (meq/g dried resin)	1/q	$1/C_e$	log q	log C_e	% การกำจัด
Wet Weight (g)	Dried weight (g)								
1.0677	0.5124	1.8664	0.1633	0.0831	12.0352	6.1225	-1.0805	-0.7869	91.25
1.0743	0.5156	1.8664	0.1825	0.0817	12.2472	5.4807	-1.0880	-0.7388	90.22
1.0677	0.5124	1.8664	0.3090	0.0760	13.1613	3.2358	-1.1193	-0.5100	83.44

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ จ.2 เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอโซเทอร์มการดูดซับทองแดงสังเคราะห์เชิงเดี่ยว

Resin		C_0(meq/L)	C_e (meq/L)	q (meq/g dried resin)	1/q	$1/C_e$	log q	log C_e	% การกำจัด
Wet Weight (g)	Dried weight (g)								
1.0267	0.4927	0.1116	0.0008	0.0056	177.9064	1270.92	-2.2502	-3.1041	99.29
1.0462	0.5021	0.1116	0.0031	0.0054	185.1246	324.2143	-2.2675	-2.5108	97.24
1.0237	0.4913	0.1116	0.0009	0.0056	177.5379	1134.75	-2.2493	-3.0549	99.21
1.0192	0.4891	0.1094	0.0101	0.0051	197.1008	98.9813	-2.2947	-1.9956	90.76
1.0799	0.5183	0.1094	0.0090	0.0048	206.4826	111.4842	-2.3149	-2.0472	91.80
1.0094	0.4844	0.1094	0.0102	0.0051	195.3915	98.0648	-2.2909	-1.9915	90.68
1.0553	0.5065	0.4406	0.0230	0.0206	48.5060	43.5247	-1.6858	-1.6387	94.79
1.0261	0.4925	0.4406	0.0318	0.0208	48.1805	31.4584	-1.6829	-1.4977	92.79
1.0534	0.5056	0.4406	0.0237	0.0206	48.5064	42.1393	-1.6858	-1.6247	94.61
1.0222	0.4906	0.9001	0.0738	0.0421	23.7473	13.5493	-1.3756	-1.1319	91.80
1.0605	0.5090	0.9001	0.1073	0.0389	25.6787	9.3176	-1.4096	-0.9693	88.08
1.0197	0.4894	0.9001	0.0361	0.0441	22.6547	27.7251	-1.3552	-1.4429	95.99
1.0458	0.5019	1.3408	0.0346	0.0651	15.3706	28.8845	-1.1867	-1.4607	97.42
1.085	0.5207	1.3408	0.1404	0.0576	17.3516	7.1240	-1.2393	-0.8527	89.53

ตารางที่ จ.2 เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอโซเทอร์มการดูดซับทองแดงสังเคราะห์เชิงเดี่ยว (ต่อ)

Resin		C_0(meq/L)	C_e (meq/L)	q (meq/g dried resin)	1/q	$1/C_e$	log q	log C_e	% การกำจัด
Wet Weight (g)	Dried weight (g)								
1.0824	0.5195	1.3408	0.1338	0.0581	17.2152	7.4760	-1.2359	-0.8737	90.02

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ จ.3 เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอโซเทอร์มการดูดซับนิกเกิลสังเคราะห์เชิงเดี่ยว

Resin		C_0 (meq/L)	C_e (meq/L)	q (meq/g dried resin)	1/q	$1/C_e$	log q	log C_e	% การกำจัด
Wet Weight (g)	Dried weight (g)								
1.0266	0.4927	0.2242	0.0688	0.0079	126.8053	14.5354	-2.1031	-1.1624	69.31
1.0520	0.5049	0.2242	0.0619	0.0080	124.4318	16.1513	-2.0949	-1.2082	72.39
1.0025	0.4811	0.2242	0.0501	0.0090	110.5248	19.9639	-2.0435	-1.3002	77.66
1.0049	0.4823	0.3348	0.0621	0.0141	70.7490	16.0982	-1.8497	-1.2068	81.45
1.0540	0.5058	0.3348	0.0616	0.0135	74.0670	16.2317	-1.8696	-1.2104	81.62
1.0261	0.4925	0.3348	0.0551	0.0142	70.4285	18.1490	-1.8477	-1.2589	83.54
1.0566	0.5071	0.6386	0.1637	0.0234	42.7169	6.1076	-1.6306	-0.7859	74.36
1.0299	0.4943	0.6386	0.1787	0.0233	42.9950	5.5952	-1.6334	-0.7478	72.01
1.0319	0.4952	0.6386	0.1480	0.0248	40.3824	6.7558	-1.6062	-0.8297	76.82
1.0571	0.5073	1.1279	0.2651	0.0425	23.5206	3.7721	-1.3714	-0.5766	76.50
1.0527	0.5052	1.1279	0.3632	0.0378	26.4288	2.7530	-1.4221	-0.4398	67.79
1.0027	0.4812	1.1279	0.2019	0.0481	20.7873	4.9531	-1.3178	-0.6949	82.10
1.0682	0.5127	1.6680	0.3588	0.0638	15.6636	2.7870	-1.1949	-0.4451	78.49
1.0198	0.4894	1.6680	0.3046	0.0696	14.3596	3.2827	-1.1571	-0.5162	81.74
1.0454	0.5017	1.6680	0.2908	0.0686	14.5726	3.4384	-1.1635	-0.5364	82.56

ตารางที่ จ.4 เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอโซเทอร์มการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ผสม

Resin		C_0 (meq/L)	C_e (meq/L)	q (meq/g dried resin)	1/q	$1/C_e$	log q	log C_e	% การกำจัด
Wet Weight (g)	Dried weight (g)								
1.0031	0.4814	0.7306	0.0870	0.0199	50.2761	11.4986	-1.7014	-1.0606	88.10
1.0391	0.4987	0.7306	0.0917	0.0192	52.1492	10.9088	-1.7172	-1.0378	87.45
1.0523	0.5050	0.7306	0.0772	0.0205	48.7488	12.9569	-1.6880	-1.1125	89.44
1.0443	0.5012	1.5881	0.1413	0.0301	33.1841	7.0794	-1.5209	-0.8500	91.11
1.0524	0.5051	1.5881	0.1043	0.0315	31.7302	9.5900	-1.5015	-0.9818	93.43
1.0554	0.5065	1.5881	0.0932	0.0326	30.7001	10.7282	-1.4871	-1.0305	94.13
1.0252	0.4920	2.5770	0.3328	0.0684	14.6186	3.0050	-1.1649	-0.4778	87.09
1.0456	0.5018	2.5770	0.3549	0.0694	14.4145	2.8177	-1.1588	-0.4499	86.23
1.0416	0.4999	2.5770	0.2770	0.0723	13.8252	3.6102	-1.1407	-0.5575	89.25
1.0404	0.4993	4.7830	0.5227	0.1352	7.3987	1.9131	-0.8692	-0.2817	89.07
1.0886	0.5224	4.7830	0.7504	0.1243	8.0469	1.3326	-0.9056	-0.1247	84.31
1.0456	0.5018	4.7830	0.3565	0.1464	6.8306	2.8047	-0.8345	-0.4479	92.55
1.0060	0.4828	6.9491	0.5568	0.2120	4.7172	1.7961	-0.6737	-0.2543	91.99
1.0379	0.4981	6.9491	0.6275	0.2089	4.7865	1.5937	-0.6800	-0.2024	90.97
1.0436	0.5008	6.9491	0.7336	0.2027	4.9336	1.3631	-0.6932	-0.1345	89.44

ตารางที่ จ.5 เปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม, ทองแดง และนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เชิงเดี่ยวแบบคอลัมน์

Time (hr)	Cd^{2+}			Cu^{2+}			Ni^{2+}		
	C_o (meq/L)	C_e (meq/L)	% การกำจัด	C_o (meq/L)	C_e (meq/L)	% การกำจัด	C_o (meq/L)	C_e (meq/L)	% การกำจัด
2	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0097	94.59
4	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0120	93.34
6	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0003	99.84	0.1800	0.0186	89.64
8	0.1800	0.0061	96.61	0.1800	0.0017	99.06	0.1800	0.0272	84.89
10	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0148	91.78
12	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0006	99.69	0.1800	0.0166	90.78
14	0.1800	0.0007	99.58	0.1800	0.00017	99.06	0.1800	0.0185	89.70
16	0.1800	0.0030	98.36	0.1800	0.0025	98.62	0.1800	0.0274	84.78
18	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0158	91.20
20	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0186	89.64
22	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0017	99.07	0.1800	0.0261	85.48
24	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0025	98.64	0.1800	0.0361	79.93

ตารางที่ จ.6 เปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม, ทองแดง และนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมแบบคอลัมน์

Time (hr)	Cd^{2+}			Cu^{2+}			Ni^{2+}		
	C_o (meq/L)	C_e (meq/L)	% การกำจัด	C_o (meq/L)	C_e (meq/L)	% การกำจัด	C_o (meq/L)	C_e (meq/L)	% การกำจัด
2	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0120	93.32
4	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0157	91.25
6	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0188	89.55
8	0.1800	0.0000	99.98	0.1800	0.0005	99.74	0.1800	0.0205	88.58
10	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0146	91.92
12	0.1800	0.0001	99.93	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0166	90.78
14	0.1800	0.0038	97.87	0.1800	0.0038	97.87	0.1800	0.0243	86.52
16	0.1800	0.0077	95.70	0.1800	0.0206	88.56	0.1800	0.0326	81.86
18	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0000	100.00	0.1800	0.0221	87.73
20	0.1800	0.0001	99.94	0.1800	0.0063	96.52	0.1800	0.0312	82.64
22	0.1800	0.0051	97.14	0.1800	0.0113	93.71	0.1800	0.0316	82.43
24	0.1800	0.0105	94.16	0.1800	0.0195	89.14	0.1800	0.0390	78.34

ตารางที่ จ.7 เปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม, ทองแดง และนิกเกิลในน้ำเสียจริงจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการแบบคอลัมน์

Time (hr)	Cd^{2+}			Cu^{2+}			Ni^{2+}		
	C_o (meq/L)	C_e (meq/L)	% การกำจัด	C_o (meq/L)	C_e (meq/L)	% การกำจัด	C_o (meq/L)	C_e (meq/L)	% การกำจัด
2	2.73E-04	4.55E-04	-66.96	4.44	0.2165	95.12	10.25	1.0720	74.67
4	2.73E-04	6.62E-04	-142.61	4.44	0.2192	95.06	10.25	2.5980	69.15
6	2.73E-04	5.62E-04	-106.09	4.44	0.2212	95.01	10.25	3.1640	69.09
8	2.73E-04	7.19E-04	-163.48	4.44	0.2226	94.98	10.25	3.1700	49.04
10	2.73E-04	3.13E-04	-14.78	4.44	0.0001	100.00	10.25	5.2260	69.17
12	2.73E-04	5.12E-04	-87.83	4.44	0.2223	94.99	10.25	3.1620	67.24
14	2.73E-04	6.12E-04	-124.35	4.44	0.2223	94.99	10.25	3.3600	68.17
16	2.73E-04	7.40E-04	-171.30	4.44	0.2226	94.98	10.25	3.2640	68.07
18	2.73E-04	5.41E-04	-98.26	4.44	0.0009	99.98	10.25	3.2740	68.84
20	2.73E-04	6.41E-04	-134.78	4.44	0.2219	95.00	10.25	3.1950	68.11
22	2.73E-04	7.12E-04	-160.87	4.44	0.2223	94.99	10.25	3.2700	68.02
24	2.73E-04	7.54E-04	-176.52	4.44	0.2226	94.98	10.25	3.2800	67.68

ตารางที่ จ.8 การบำบัดโลหะหนักด้วยคอลัมน์โดยเทียบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

เวลา (ชั่วโมง)		2	4	6	8**	10	12	14	16**	18	20	22	24**	หมายเหตุ*
น้ำเสียสังเคราะห์เชิงเดี่ยว	Cd^{2+}(ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.03 ppm
	Cu^{2+}(ppm)	ND	ND	0.009	0.054	0.010	0.018	0.054	0.079	0.018	0.036	0.053	0.078	2.0 ppm
	Ni^{2+}(ppm)	0.29	0.35	0.55	0.798	0.434	0.487	0.544	0.804	0.465	0.547	0.767	1.060	1.0 ppm
น้ำเสียสังเคราะห์ผสม	Cd^{2+}(ppm)	ND	ND	ND	0.002	ND	0.007	0.215	0.435	0.019	0.126	0.289	0.591	0.03 ppm
	Cu^{2+}(ppm)	ND	ND	ND	0.015	0.000	0.008	0.122	0.654	0.199	0.207	0.360	0.621	2.0 ppm
	Ni^{2+}(ppm)	0.353	0.462	0.552	0.603	0.427	0.487	0.712	0.958	0.648	0.917	0.928	1.144	1.0 ppm
น้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการ	Cd^{2+}(ppm)	0.041	0.064	0.093	0.101	0.044	0.072	0.086	0.104	0.076	0.090	0.100	0.106	0.03 ppm
	Cu^{2+}(ppm)	1.720	1.741	1.757	1.768	0.009	1.766	1.766	1.768	0.008	1.763	1.776	1.768	2.0 ppm
	Ni^{2+}(ppm)	2.598	3.164	3.170	5.226	3.162	3.360	3.264	3.274	3.195	3.270	3.280	3.314	1.0 ppm
	Na^{+} (ppm)	0.799	0.780	0.779	0.779	0.724	0.779	0.779	0.726	0.779	0.779	0.779	0.780	
	K^{+} (ppm)	0.876	1.042	1.111	1.111	0.758	1.096	1.100	0.772	1.096	1.114	1.063	1.062	
	Fe (ppm)	1.457	2.062	2.716	3.483	0.476	3.335	3.517	0.469	1.524	1.770	1.800	1.801	

หมายเหตุ * หมายถึง มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม (ภาคผนวก ข)

ND หมายถึง Not detector

8** , 16** และ24** หมายถึง ที่ชั่วโมงที่ 8, 16 และ24 มีการหยุดพักการบำบัดช่วงกลางคืน และมีการเริ่มบำบัดในวันถัดไป

ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลองทางสถิติ

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยโปรแกรม Mini-tab

ทำการศึกษาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำที่เหมาะสมในการบำบัดแคดเมียม(II), ทองแดง(II) และนิกเกิล(II) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลา 30 และ 60 นาที ทำการทดลอง 7 ซ้ำ โดยศึกษาความสามารถในการบำบัดแคดเมียม (II), ทองแดง(II) และนิกเกิล(II) โดยคาดการณ์ว่าเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำจะมีค่าไม่แตกต่างกัน

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
30 min	7	51.095	A
60 min	7	50.764	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous 95% CIs

จากการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำของเรซินทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA ในการทดสอบและเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีของ Tukey จะเห็นได้ว่าสามารถแบ่งเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำในการบำบัดแคดเมียม(II), ทองแดง(II) และนิกเกิล(II) ทั้งหมด 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 (กลุ่ม A) คือ เปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ 30 นาที และ กลุ่มที่ 2 (กลุ่ม A) คือ เปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ 60 นาที จึงสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ 30 นาที และเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ 60 นาที ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงเลือกเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำที่ 30 นาที เนื่องจาก ช่วยประหยัดเวลาในการทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้