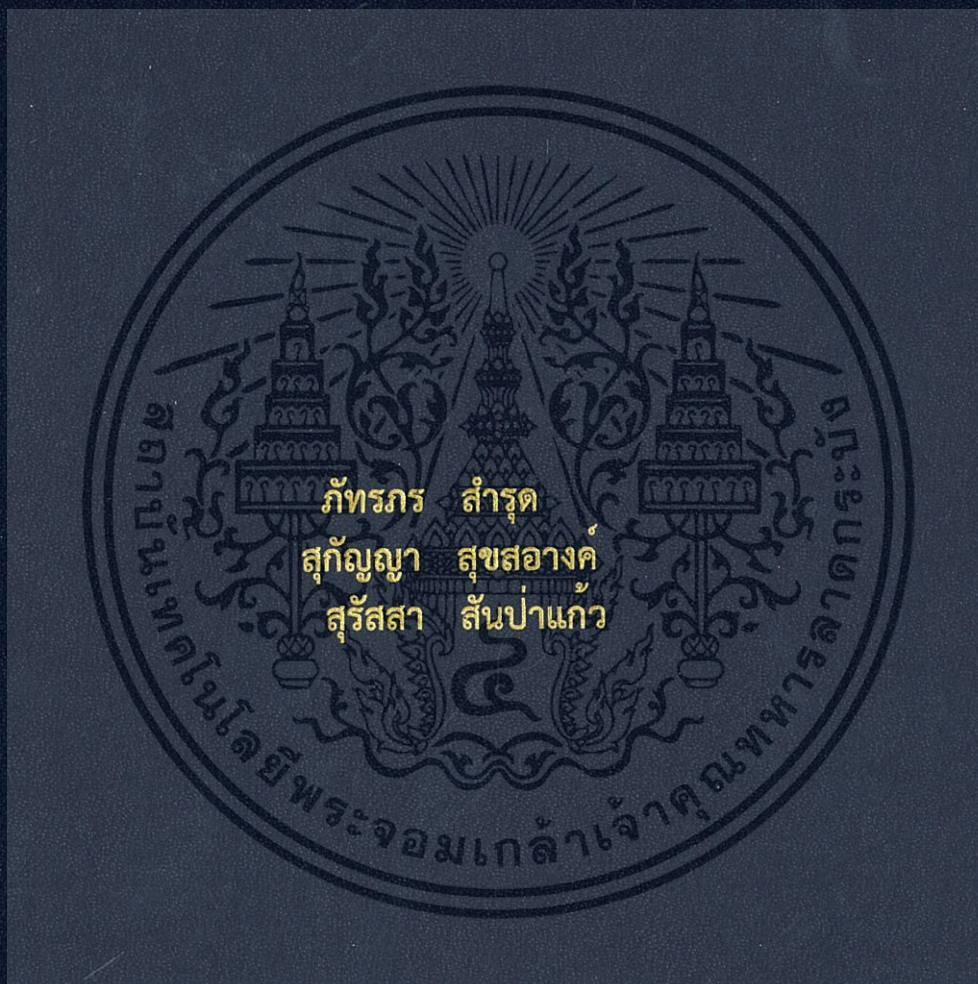


การบำบัดโครเมียม (III) ในน้ำเสีย โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก
ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

CHROMIUM (III) REMOVAL FROM WASTEWATER BY
SPENT CATION EXCHANGE RESIN



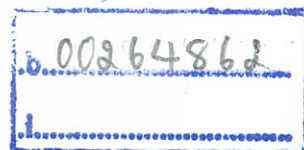
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การบำบัดโครเมียม (III) ในน้ำเสีย โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก
ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

CHROMIUM (III) REMOVAL FROM WASTEWATER BY
SPENT CATION EXCHANGE RESIN



TB00048



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHROMIUM (III) REMOVAL FROM WASTEWATER BY SPENT CATION EXCHANGE RESIN



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
(ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การบำบัดโครเมียม (III) ในน้ำเสีย โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

Chromium (III) Removal from Wastewater by Spent Cation Exchange Resin

ชื่อนักศึกษา

นางสาว ภัทรภร สำรุด รหัสนักศึกษา 56050737

นางสาว สุกัญญา สุขสองงค์ รหัสนักศึกษา 56050771

นางสาว สุรัสสา สันป่าแก้ว รหัสนักศึกษา 56050785

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. อุสารรัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ประธานกรรมการ	
ดร. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ กรรมการ	
ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การบำบัดโครเมียม (III) ในน้ำเสีย โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว
ชื่อนักศึกษา	นางสาว ภัทรภร สำรุด รหัสนักศึกษา 56050737 นางสาว สุกัญญา สุขสอางค์ รหัสนักศึกษา 56050771 นางสาว สุรัสสา สันป่าแก้ว รหัสนักศึกษา 56050785
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์

บทคัดย่อ

ศึกษาการบำบัดโครเมียม (III) โดยเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณเรซิน, ระยะเวลาสัมผัส และพีเอช โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโครเมียม (III) 10 mg/L ความเร็วรอบในการเขย่า 120 rpm และ อุณหภูมิ 30 °C ตามลำดับ ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับโดยแปรค่าอัตราส่วนเรซินต่อน้ำเสีย และแปรค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (III) ต่อมาศึกษาการคายซับ และ ทดลองการบำบัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการบำบัดแบบแบดซ์ พบว่า สภาวะการบำบัดโครเมียม (III) ที่เหมาะสม ใช้อัตราส่วนเรซิน 1.0 g ต่อน้ำเสีย 25 mL ระยะเวลาสัมผัส 180 นาที และพีเอชเดิมของน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 3.82 สามารถบำบัดได้ $91.40 \pm 0.96\%$ ไอโซเทอร์มการดูดซับโดยแปรค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (III) สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ($y = 2.6771x + 0.0227$, $R^2 = 0.9645$) ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (Q_m) และค่าคงที่การดูดซับ (K_d) เท่ากับ 44.05 mg/g และ 0.0085 ตามลำดับ การคายซับด้วย 8% H_2SO_4 (v/v) ถือเป็นตัวชี้ที่เหมาะสมในการคายซับ เรซินหลังผ่านการบำบัดโครเมียม (III) แล้ว สามารถคายซับได้ $52.57 \pm 8.52\%$ และการบำบัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการแบบแบดซ์ ไม่เหมาะสมในการนำมาบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงๆของโครเมียม (III) และไอออนประจุบวกอื่น

คำสำคัญ : โครเมียม (III), เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว, การบำบัดโครเมียม, การดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Chromium (III) Removal from Wastewater by Spent Cation Exchange Resin
Students	Miss Pattaraporn Sumrood Student ID 56050737 Miss Sukanya Suksa-Ang Student ID 56050771 Miss Surussa Sanpakaew Student ID 56050785
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Asst. Prof. Krongkaew Tippayasak

Abstract

The treatment of Cr (III) was studied using the spent cation exchange resin. The effect of resin amount, contact time and pH on the sorption were investigated by initial concentration 10 mg/L Cr (III) synthetic wastewater, shaking speed 120 rpm at 30 °C. The Adsorption Isotherm was examined by varying the ratio of resin per wastes volume and the aqueous solution concentration. Then, the Desorption was investigated and the treatment of Cr (III) from laboratory wastewater was also experimented. It was found that the optimum conditions for Cr (III) treatment were 1 g resin per 25 mL of solution ratio, contact time 180 min. and pH 3.82 (original pH of solution). The removal efficiency of Cr (III) was $91.40 \pm 0.96\%$. Adsorption isotherm from varied the Cr (III) concentration was consistent with the Langmuir isotherm ($y = 2.6771x + 0.0227$, $R^2 = 0.9645$) the adsorption maximum, Q_m and the Langmuir constant, K_d for Cr (III) were found as 44.05 mg/g and 0.0085, respectively. Desorption of Cr (III) with 8% H_2SO_4 (v/v) were found that it was an optimum eluent. The percentage desorption of Cr (III) was $52.57 \pm 8.52\%$. In batch experiments of high concentration Cr (III) and other cation from laboratory wastewater, the results was not suitable for treat this wastewater.

Keywords : Chromium (III), Spent cation exchange resin, Chromium treatment, Langmuir Adsorption Isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จไปด้วยความกรุณาเป็นอย่างสูงจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือตลอดการทำโครงการพิเศษ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนความเอาใจใส่ในการแก้ไขข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และ ดร.กลีนสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการและกรรมการผู้คุมสอบที่ได้เสียสละเวลาในการเข้าร่วมรับฟังโครงการพิเศษนี้ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขโครงการพิเศษให้สำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท พี อี แอนด์ พี เทคโนโลยี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรซิน เพื่อใช้ในการศึกษาในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ คุณสาคร สอนพงษ์ คุณณัฐพล ไกรธรรม และคุณชัชชัย ลัทธิลักษณ์ เจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์และสารเคมีต่างๆ ในการดำเนินงานโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณเป็นพิเศษสำหรับความรัก ความห่วงใย และกำลังใจจากจากครอบครัว ซึ่งเป็นที่รักยิ่งที่คอยสนับสนุนการศึกษา เพื่อความสำเร็จของผู้วิจัยและเป็นแรงใจสำคัญจนทำให้โครงการพิเศษสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

และขอขอบพระคุณบุคคลท่านอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือ และเป็นที่ยกปรึกษาในการจัดทำโครงการพิเศษเล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนมอบกำลังใจในระหว่างการทำโครงการพิเศษนี้แก่ผู้วิจัย ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ภัทรภร สำรุด

สุกัญญา สุขสองงค์

สุรัสสา สันป่าแก้ว

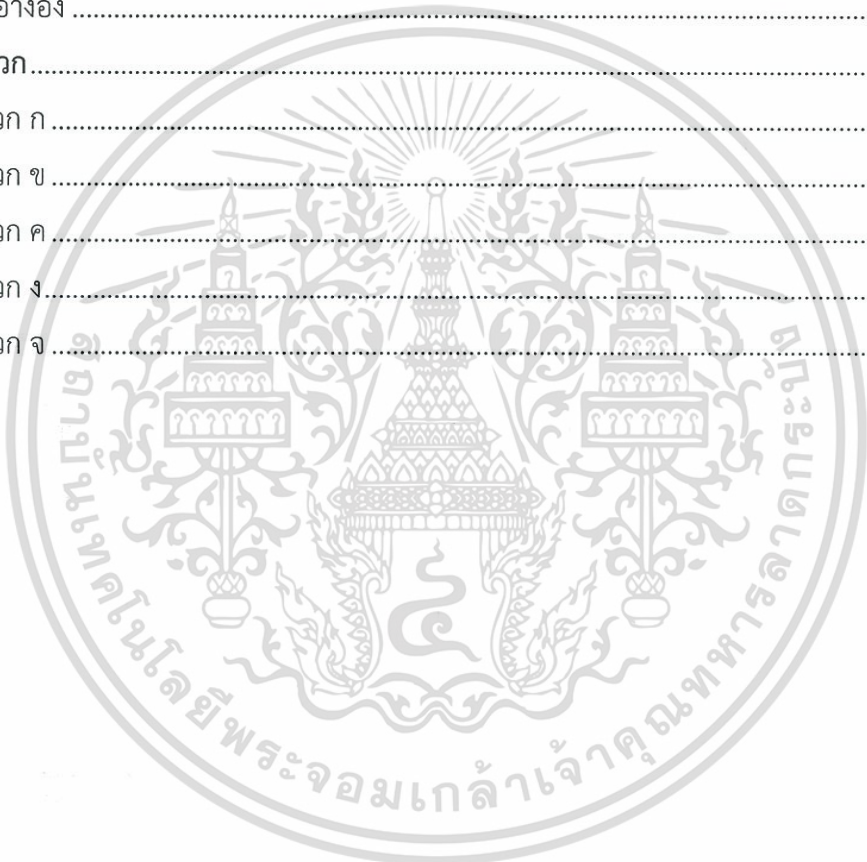
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ซ
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 โครเมียม.....	3
2.2 เรซิน.....	5
2.3 น้ำเสีย.....	16
2.4 กระบวนการดูดซับ.....	22
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	39
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	37
3.2 วิธีการทดลอง.....	38
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	46
4.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน.....	44
4.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียสังเคราะห์.....	45
4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียม (III) จากน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยวิธีการแบบแบตช์	45
4.4 ไอโซเทอร์มของการบำบัด.....	52
4.5 การศึกษาการคายซับ.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
4.6 การศึกษาการบำบัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการบำบัดแบบแบคทีเรีย.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการวิจัย	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก	67
ภาคผนวก ข	70
ภาคผนวก ค	72
ภาคผนวก ง	83
ภาคผนวก จ	98



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลำดับความชอบไอออนของเรซินที่มีสารละลายโลหะหนักในน้ำ 1,000 มก./ล.....	10
2.2 ข้อมูลทั่วไป และสมบัติทางกายภาพ-เคมีของเรซิน.....	15
2.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ของสารละลายมาตรฐาน	21
3.1 รายละเอียดการทดลอง 3 ชุด	46
4.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน.....	44
4.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (III)	45
4.3 ปริมาณเรซินและระยะเวลาสัมผัสต่างๆ ที่บำบัดโครเมียม (III) ผ่านและไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน	48
4.4 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนเรซินในการบำบัดต่อไอโซเทอร์ม	50
4.5 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นโครเมียม (III) ในการบำบัดต่อไอโซเทอร์ม	52
4.6 ผลการคายซับด้วยกรดซัลฟิวริก 8% v/v.....	56
4.7 สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ.....	58
ก-1 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม	67
ง-1 ผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR ปริมาณ 0.5 กรัม.....	83
ง-2 ผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR ปริมาณ 1.0 กรัม	85
ง-3 ผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR ปริมาณ 5.0 กรัม	88
ง-4 ผลของพีเอชต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR	90
ง-5 ผลของไอโซเทอร์มจากการแปรอัตราส่วนเรซินต่อน้ำเสีย โดยโดยใช้ SR	91
ง-6 ผลของไอโซเทอร์มจากการแปรค่าความเข้มข้นโครเมียม (III) โดยโดยใช้ SR.....	93
ง-7 ผลของปริมาณโครเมียม (III) เริ่มต้น.....	94
ง-8 ผลของปริมาณโครเมียม (III) ที่คายซับจากเรซิน	94
ง-9 ผลของปริมาณโครเมียม (III) ที่เกาะอยู่บนเรซิน	94
ง-10 ผลการบำบัดโครเมียม (III) และ เหล็กด้วยวิธีการบำบัดแบบแบดจ์ ชุดที่ 1	95
ง-11 ผลการบำบัดโครเมียม (III) และ เหล็กด้วยวิธีการบำบัดแบบแบดจ์ ชุดที่ 2.....	96
ง-12 ผลการบำบัดโครเมียม (III) และ เหล็กด้วยวิธีการบำบัดแบบแบดจ์ ชุดที่ 3.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปร่างและสีของเม็ดเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	8
2.2 รูปแบบ FUNCTIONAL GROUP ของสารแลกเปลี่ยนแคตไอออนพวกซัลโฟนิก	12
2.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	24
2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	25
2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช	26
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	43
4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียมด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่ระยะเวลาต่างๆ	46
4.2 ผลของค่าพีเอชต่อการบำบัดโครเมียม (III) ด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว	49
4.3 ไอโซเทอร์มของการบำบัดโครเมียม (III) เมื่อแปรค่าอัตราส่วนเรซินต่อน้ำเสีย	51
4.4 ไอโซเทอร์มของการบำบัดโครเมียม (III) เมื่อแปรค่าความเข้มข้น.....	54
4.5 ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะหนักทั้งสองชนิด	59
ช-1 กราฟมาตรฐานของโครเมียม.....	70
ช-2 กราฟมาตรฐานของเหล็ก	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
AAS	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
C_0	ความเข้มข้นเริ่มต้น
C_e	ความเข้มข้นที่เหลือ
COD	ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการใช้เพื่อออกซิเดชันสารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
g/L	กรัมต่อลิตร
K_{sp}	ความสามารถในการละลายน้ำ
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
mg	มิลลิกรัม
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mL	มิลลิลิตร
mol/L	โมลต่อลิตร
mS/cm	มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร
mV	มิลลิโวลต์
ORP	ปริมาณความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน
ppm	หนึ่งในล้านส่วน
rpm	รอบต่อวินาที
SR	เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว
$\mu\text{S/cm}$	ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมอยู่ตลอดเวลา ส่งผลให้แนวโน้มของการพัฒนาและขยายตัวที่สูงขึ้น การเพิ่มของอุตสาหกรรมนั้น ก่อให้เกิดปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก และยิ่งทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาของเสียอันตรายปนเปื้อนลงสู่ดินและน้ำ ซึ่งปัญหาดังกล่าว อาทิ เช่น การปนเปื้อนของโครเมียมของน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกหนัง จังหวัดสมุทรปราการ การลักลอบทิ้งน้ำเสียในพื้นที่รกร้างจังหวัดฉะเชิงเทราและจังหวัดระยอง ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศวิทยาของแหล่งน้ำและก่อให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพต่อประชาชนจำนวนมาก หากได้รับการสะสมในระดับที่เกินมาตรฐาน อาจก่อให้เกิดการอักเสบของผิวหนัง ทำให้เยื่อบุตาอักเสบและระคายเคืองในช่องจมูก รวมทั้งอาจเป็นสาเหตุของโรคมะเร็งปอด (สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2557) ด้วยเหตุนี้ได้มีการกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ โดยให้โครเมียม (VI) มีค่าความเข้มข้นได้ไม่เกิน 0.25 mg/L และโครเมียม (III) มีค่าความเข้มข้นได้ไม่เกิน 0.75 mg/L (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559)

โรงงานต่างๆ หรือแหล่งกำเนิดที่มีโครเมียมปนเปื้อนในน้ำเสียมีวิธีการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อน หลากหลายวิธี เช่น การใช้วิธีทางเคมี การใช้วิธีทางชีวภาพ และการใช้วิธีทางกายภาพ รวมทั้งการใช้วิธีทางกายภาพและเคมี เช่น วิธีการดูดซับด้วยถ่าน และวิธีการแลกเปลี่ยนประจุ เป็นต้น ซึ่งการบำบัดด้วยวิธีการใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุนี้เป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ได้ผลรวดเร็ว ใช้พื้นที่น้อย และมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งเรซินนั้นมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุได้ดี สามารถปรับสภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้มีอายุการใช้งานนานถึง 3-4 ปี ประกอบกับสถานการณ์ในปัจจุบันที่มีการใช้เรซินเป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุในการบำบัดน้ำเสีย หรือนำมาใช้เป็นตัวกำจัดไอออนในกระบวนการผลิตน้ำสะอาดที่อยู่ในภาคอุตสาหกรรมและภายในห้องปฏิบัติการเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ปริมาณของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมีจำนวนเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะนำเรซินแลกเปลี่ยนประจุวทที่ผ่านการใช้แล้วมาแก้ไขปัญหการปนเปื้อนโครเมียมในแหล่งน้ำและเป็นการป้องกันมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการบำบัดโครเมียม (III) ในน้ำเสีย
- 2) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้วกับโครเมียม (III) ในน้ำเสีย
- 3) เพื่อนำเรซินที่ผ่านการบำบัดโครเมียม (III) แล้วกลับมาใช้ใหม่ โดยศึกษาการคายซับของโครเมียม (III) ในน้ำเสีย
- 4) เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) วัสดุที่ใช้ในการกำจัดโครเมียม (III) คือ เรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว
- 2) ศึกษาโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/L และน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมี อาคารพระจอมเกล้า ชั้น 5 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 3) ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ค่าพีเอชของน้ำเสีย เวลาที่สัมผัส ปริมาณของเรซินที่ใช้และความเข้มข้นของน้ำเสียในการแลกเปลี่ยนไอออนในรูปไอโซเทอร์ม โดยทำการทดลองแบบแบตช์
- 4) ศึกษาไอโซเทอร์มการบำบัดโครเมียม (III) แบบเส้นตรง แลงเมียร์ และฟลูนดลีช
- 5) ศึกษาการคายซับด้วยน้ำกลั่นและกรดซัลฟิวริก 8% v/v

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถบำบัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว
- 2) ทราบรูปแบบไอโซเทอร์มการดูดซับเชิงเคมี (Chemisorption) ของเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว
- 3) สามารถนำเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้วจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำสะอาดกลับมาใช้ประโยชน์ได้
- 4) สามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโครเมียม (III) ก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครเมียม

2.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี

โครเมียมเป็นโลหะหนักอยู่ในตารางธาตุกลุ่มโลหะทรานซิชันหมู่ VI (B) ซึ่งมีเลขอะตอม 24 น้ำหนักอะตอม 51.996 g/mol จุดหลอมเหลว 1,900 °C จุดเดือด 2,462 °C และวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 1 พบมากที่โครเมียม (II), โครเมียม (III) และโครเมียม (VI) เป็นต้น มักพบอยู่ในรูปของโครเมต (CrO_4^{2-}) และไดโครเมต ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) (ชลทิศ, 2547 อ้างถึง Patterson, James. W., 1978)

2.1.2 การใช้ประโยชน์

โครเมียมเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับโลหะผสม ซึ่งทำให้โลหะแข็งตัว มีความแข็งแรงและทนทาน อีกทั้งยังป้องกันโลหะอื่นไม่ให้เป็นสนิมและคงทนต่อการผุกร่อน การใช้ประโยชน์จากโครเมียมนั้น เพื่อป้องกันการเกิดสนิมและเพื่อเกิดความสวยงาม ทำให้มีความแข็ง ความเหนียว ความทนทาน และความคงทนต่อการผุกร่อน (ชลทิศ แก้วลี อ้างถึงดวงกลม พรหม, 2541) สารประกอบของโครเมียมยังใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมฟอกหนัง การย้อมสีขนสัตว์ และหนังสือพิมพ์ เป็นต้น (ชลทิศ แก้วลี อ้างถึงจิตรรัตน์ ศรีสุโข, 2540)

2.1.3 ความเป็นพิษ

โครเมียมและสารประกอบโครเมียมมีหลายกลุ่ม โดยแบ่งตามวาเลนซ์ ได้แก่ 0, 1, 2, 3, 4 และ 6 ซึ่งกลุ่มโครเมียม (III) และโครเมียม (VI) เป็นกลุ่มที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต หากมีปริมาณมากเกินไปจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในสิ่งแวดล้อม โครเมียมสามารถดูดซึมและแพร่กระจายเข้าสู่ร่างกายได้จากทางการหายใจ ทางการบริโภค และทางผิวหนัง ซึ่งโครเมียมและสารประกอบโครเมียมสามารถแบ่งออกเป็น

1. Chromium metal และ Alloy กลุ่มนี้จะรวมถึงเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) และ Chromium containing alloy โดยทั่วไปกลุ่มนี้จะมีความเป็นพิษต่อสุขภาพค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น
2. สารประกอบโครเมียม (II) หรือ Chromos compounds ได้แก่ Chromos chloride (CrCl_2) และ Chromos sulfate (CrSO_4) กลุ่มนี้จะมีความเป็นพิษน้อยต่อสุขภาพของมนุษย์
3. สารประกอบโครเมียม (III) หรือ Chromic compound เป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อร่างกายในกระบวนการ Glucose metabolism ส่วน Compound อื่น ๆ ที่พบในกลุ่มนี้ ได้แก่ Chromic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

oxide (Cr_2O_3), Chromic sulfate ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$), Chromic chloride (CrCl_3), Chromic potassium sulfate ($\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$) และ Chromite ore (FeOCr_2O_3)

4. สารประกอบโครเมียม (VI) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

กลุ่มที่ละลายน้ำได้ (Water-soluble hexavalent compounds) ได้แก่ Chromic acid, Anhydride of chromic acid, Monochromate, Dichromate of sodium, Potassium, Ammonium, Cesium, Rubidium และ Lithium เป็นต้น

กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ (Water-insoluble hexavalent compounds) ได้แก่ Zinc chromate, Calcium chromate, Lead chromate, Barium chromate, Strontium chromate และ Sintered chromium trioxide เป็นต้น

2.1.4 ความเป็นพิษต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อม

เมื่อโครเมียมเข้าสู่ร่างกายแล้ว โครเมียม (III) จะรวมกับ Transferrin ใน Plasma และกระจายไปทั่วร่างกาย มีเพียงส่วนน้อยที่เข้าไปในเม็ดเลือดแดง ส่วนโครเมียม (VI) จะผ่านเข้าไปในเม็ดเลือดแดงอย่างรวดเร็ว และจะรวมกับ B-chain ของ Hemoglobin และเปลี่ยนไปเป็น Trivalent form ในเม็ดเลือด ทำให้การทำงานของเม็ดเลือดแดงผิดปกติ โครเมียม (VI) มีความเป็นพิษสูงกว่าโครเมียม (III) มาก เนื่องจากโครเมียม (VI) มีฤทธิ์เป็น Oxidizing agent จึงกัดกร่อนเนื้อเยื่อต่างๆ ได้ อีกทั้งโครเมียม (VI) ยังสามารถจับตัวกับโปรตีน และกรดนิวคลีอิก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ผิดปกติไป โดยปกติโครเมียมจะถูกขับออกทางไต มีเพียงส่วนน้อยที่สะสมอยู่ในร่างกาย ผู้ใหญ่ที่มีสุขภาพแข็งแรงและได้รับโครเมียมจากอาหารปริมาณวันละ 30-100 μg จะมีระดับความเข้มข้นของโครเมียมในปัสสาวะประมาณ 2-10 $\mu\text{g}/\text{L}$ และช่วงครึ่งชีวิต (Half-life) ของโครเมียม (VI) ในปัสสาวะอยู่ระหว่าง 15-41 ชั่วโมง นอกจากนี้โครเมียมยังถูกขับออกทางน้ำดี ประมาณร้อยละ 10 ของการขับออกทั้งหมด และมีปริมาณน้อยมากที่ขับออกทางนม เล็บ และเหงื่อ ความเป็นพิษของโครเมียมสามารถแบ่งออกเป็น (จิระฉัตร, 2555)

1. ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน มักพบในกรณีได้รับโดยการกินโครเมียม (VI) เช่น Chromic acid ทำให้เกิดการระคายเคือง ทำให้มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง เป็นอันตรายต่อกระเพาะอาหาร และลำไส้ เกิดอาการไตวายทำให้เสียชีวิตได้ ปริมาณโครเมียม (VI) ที่ทำให้เสียชีวิตได้ในผู้ใหญ่ คือ 1-3 g

2. ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง มักพบในคนงานที่ต้องทำงานสัมผัสกับโครเมียมและสารประกอบโครเมียมเป็นเวลานานๆ สามารถแบ่งออกเป็น

- 2.1 เป็นพิษต่อผิวหนังและทางเดินหายใจ มักมีสาเหตุจากการสัมผัสโครเมียม (VI) เป็นระยะเวลานานๆ ทำให้เกิดแผลเรื้อรังได้ โดยบริเวณที่สัมผัสมักได้แก่ มือและแขน ระบบทางเดินหายใจเกิดการระคายเคืองต่อเยื่อบุโพรงจมูก ตาแดง น้ำตาไหล น้ำมูกไหล คัดและแสบจมูก ในกรณีที่รุนแรงอาจเกิดแผลเรื้อรังในเยื่อจมูกจนเกิดพังกั้นจมูกทะลุได้

- 2.2 เป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง (Carcinogenicity) โดยหน่วยงาน The International Agency for Research on Cancer (IARC) และ US Toxicology Program จัดโครเมียม (VI) เป็น Human

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยเว็บไซต์นี้แล้ว ผู้ใช้สามารถนำเอกสารไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

carcinogen เพราะมีความสามารถในการละลายน้ำที่ดี ในคนงานที่ทำงานสัมผัสกับโครเมียม (VI) เป็นเวลามากกว่า 30 ปีขึ้นไป จะมีความเสี่ยงสูงในการเกิดโรคมะเร็งและพบว่าเป็นโรคมะเร็งปอดมากกว่าโรคมะเร็งชนิดอื่น

ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมโครเมียม (VI) ในสิ่งแวดล้อมมีความเป็นพิษตั้งแต่ปานกลางถึงสูงมาก โดยส่งผลต่อสัตว์ที่กินน้ำและอาหารที่มีโครเมียมปนเปื้อนเข้าไป ทำให้สัตว์ตายได้ ส่วนพืชที่ได้รับโครเมียม (VI) จะเจริญเติบโตช้าลงโครเมียม (VI) มีความคงทนในธรรมชาติจึงเป็นไปได้ว่าจะสะสมในสัตว์น้ำได้

2.2 เรซิน

เรซิน ตามคำจำกัดความ หมายถึง สารพอลิเมอร์ ซึ่งมีโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง (Cross linked) หรือเป็นแบบร่างแห (Three-dimension network) ดังนั้นจึงไม่ละลายในตัวทำละลาย (Solvent) ทั่วๆ ไป (พอลดา, 2547)

ประวัติของเรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) ได้เริ่มขึ้นอย่างเป็นทางการในปี ค.ศ. 1850 โดยนักเคมีชาวอังกฤษ ชื่อ H.S. Thompson ซึ่งมีอาชีพเป็นเกษตรกร Thompson พบว่า เมื่อผ่านสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟตลงในชั้นดิน แอมโมเนียมไอออนส่วนใหญ่ลดลง แต่กลับมีแคลเซียมออกมาจากการแทนที่ จากการวิเคราะห์พบว่าสารบางอย่างในดินซึ่งสามารถแตกตัวให้อีออนบวกเป็นตัวการดูดจับเอาแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ไว้ จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Acid exchange ซึ่งก็คือ Cation exchange นั่นเอง ต่อจากนั้นก็มีผู้พบว่าแร่บางชนิดในดิน เช่น Zeolites และพวก Aluminium silicates มีสมบัติเป็น Ion exchanger ที่ดี

ในปี ค.ศ.1935 นักเคมีชาวอังกฤษ 2 ท่าน คือ Adams และ Holms สามารถสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ที่มีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้สำเร็จ และให้ชื่อว่าเรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน แต่มีประสิทธิภาพต่ำ ใช้งานได้ในช่วงแคบๆ เท่านั้น ต่อมามีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยที่ในตอนเริ่มแรกทำจากปฏิกิริยาควบแน่นของฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol - formaldehyde condensations) แล้วใส่หมู่ที่เป็นกรด (Acid group) เข้าไป เช่น หมู่ซัลโฟนิค และหมู่คาร์บอกซิลิก เมื่อผลิตภัณฑ์มีหมู่เหล่านี้ติดอยู่จะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ขึ้นอยู่กับ pH แต่เรซินชนิดนี้มีข้อเสีย คือ ยังมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำจึงมีการพัฒนาใช้ โคพอลิเมอร์ระหว่างสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน (Styrene - divinylbenzene copolymer) แทนเรซินฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ และปรับปรุงวิธีการสังเคราะห์จากเดิมใช้วิธีการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) ซึ่งเรซินที่ได้จากวิธีนี้จะเป็นผงชนิดละเอียด และไม่สะดวกต่อการใช้งาน แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้วิธีพอลิเมอร์ไรเซชันแบบแขวนลอย (Suspension polymerization) เรซินที่ได้จากวิธีนี้เป็นเม็ดกลมๆ มีขนาดใกล้เคียงกัน สะดวกต่อการนำไปใช้งาน

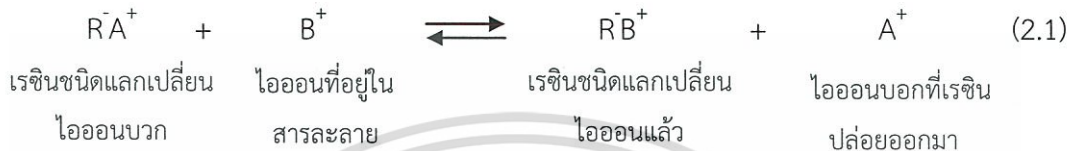
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ประเภทของเรซิน

1. เรซินที่ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation-exchange resin)

เรซินที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) เช่น $-\text{OH}^-$, $-\text{COOH}$, $-\text{PO}(\text{OH})_2$, $-\text{SO}_3\text{H}$ เป็นต้น สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนบวก (Cation) จากสารที่อยู่ใกล้เคียงได้ อาจเขียนปฏิกิริยาทั่วไปได้ ดังนี้



เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion-exchange resin)

เรซินที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) และหมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) ไพรมารี (Primary, 1°) เซเคินดารี (Secondary, 2°) เทอร์เชียรี (Tertiary, 3°) และหมู่ควอเทอร์นารีเอมีน (Quaternary Amine group) สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนลบ (Anion) จากสารละลายที่อยู่ใกล้เคียงได้ อาจเขียนปฏิกิริยาทั่วไปได้ ดังนี้



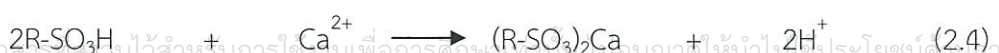
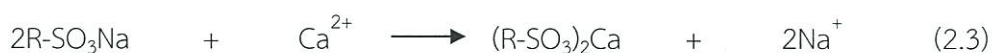
2. การแบ่งชนิดของเรซินตามหมู่ฟังก์ชันที่ใช้งาน (Functional Group)

สมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินจะขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) สามารถแบ่งได้เป็นหมู่กรด (Acid group) และหมู่เบส (Basic group) นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งย่อยเป็นเรซินแบบกรดแก่ (Strong acidic cationic resin) เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acidic cationic resin) เรซินแบบด่างแก่ (Strong basic anionic resin) และเรซินแบบด่างอ่อน (Weak basic anionic resin) หมู่ฟังก์ชันของเรซินประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.1 เรซินแบบกรดแก่ (Strong acidic cationic resin)

เรซินแบบกรดแก่จะมีหมู่ซัลโฟนิค ($-\text{SO}_3^-$) เป็นหมู่ไอออน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกรดแก่ เรซินชนิดนี้ใช้ไอออนบวกของตัวเอง (มักเป็น H^+ หรือ Na^+) แลกกับไอออนบวกที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} เป็นต้น

ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดแก่ที่มี Na^+ และ H^+ เป็นดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรซินแบบกรดแก่นี้สามารถใช้งานได้ดีที่พีเอชทุกระดับ และเรซินทุกชนิดต้องหมดอำนาจเมื่อใช้ไประยะเวลาหนึ่ง แต่สามารถเรียกอำนาจกลับคืนได้อีก เช่น เรซินที่อยู่ในรูปของ Na^+ สามารถฟื้นฟูสภาพด้วยเกลือแกง (NaCl) ส่วนเรซินที่อยู่ในรูปของ H^+ สามารถฟื้นฟูสภาพด้วยกรดแก่ (H^+) ดังนี้



ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพต่ำประมาณร้อยละ 25–45 ทำให้ต้องเปลี่ยนสารเคมีในการฟื้นฟูสภาพ

2.2 เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acidic cationic resin)

เรซินแบบกรดอ่อนจะมีหมู่ไอออนคาร์บอกซิลิก ($-\text{COO}^-$) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน เรซินแบบนี้แตกตัวเป็นไอออนน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดทำให้ไม่สามารถใช้แลกเปลี่ยนไอออนได้ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพสูงถึงร้อยละ 90 โดยมีกรดแก่หรือกรดอ่อน หรือเกลือแกงเป็นสารฟื้นฟูสภาพ

ตัวอย่างของการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดอ่อน เป็นดังนี้



เรซินแบบกรดอ่อนนี้ทำงานได้ดีในช่วงพีเอชสูงกว่า 4 หรือ 5 และใช้งานได้ดีกับน้ำที่มีความกระด้างสูง

2.3 เรซินแบบต่างแก่ (Strong basic anionic resin)

เรซินแบบต่างแก่มักเป็น Quaternary Amine ใช้ไอออนลบของตัวเอง (มักเป็น OH^- หรือ Cl^-) แลกกับไอออนลบที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ เช่น HCO_3^- , SO_4^{2-} และ Cl^- เป็นต้น ปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนไอออนและการฟื้นฟูสภาพ เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับซึ่งกันและกัน



การฟื้นฟูสภาพอาจใช้ NaCl , HCl หรือ NaOH ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพต่ำเพียงร้อยละ 18–33 ทำให้เปลี่ยนสารเคมี

2.4 เรซินแบบต่างอ่อน (Weak basic anionic resin)

เรซินแบบต่างอ่อนจะไม่ใช้ไอออนอิสระในการแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นเรซินชนิดนี้ไม่ต้องมี

ไอออนอิสระ ซึ่งเรซินจะสามารถกำจัดได้เฉพาะกรดแก่เท่านั้น เช่น HCl , H_2SO_4 และ HNO_3 ออกจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำจัดกรดแก่เกิดขึ้นโดยที่กรดแก่ทั้งโมเลกุลเข้ามาจับกับเรซิน



การฟื้นฟูสภาพจะใช้ NaOH Na₂CO₃ หรือ NH₄OH ก็ได้ เพราะเรซินจับกับกรดไม่แน่น ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพสูงเกือบร้อยละ 100 ทำให้ไม่เปลืองสารเคมี



เรซินแบบอ่อนนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสูง ที่พีเอชต่ำกว่า 6 เท่านั้น



รูปที่ 2.1 รูปร่าง และสีของเม็ดเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

2.2.2 ลำดับความชอบในการเลือกจับไอออนของเรซิน (Selectivity)

เรซินทั้งแบบกรดและต่าง มีความชอบไม่เท่ากันในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน พบว่าเรซินที่จะชอบทำปฏิกิริยากับไอออนบางชนิดมากกว่าชนิดอื่น ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของไอออนนั้นๆ ในสารละลาย นอกจากนี้ในการแลกเปลี่ยนไอออนยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเรซิน เช่น ขนาดของเรซิน (Degree of cross linking) ชนิดของ Functional group และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ความสัมพันธ์ระหว่างไอออนกับการเลือกจับไอออนของเรซิน (รุจา และคณะ อ้างถึง พอตตา, 2547)

1. เรซินสามารถแลกเปลี่ยนไอออนที่มีวาเลนซ์สูงได้ดีกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ ลำดับความชอบดังตารางที่ 2.1

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

3. เรซินที่มีระดับการเชื่อมขวางสูงความสามารถในการเลือกจับจะมากกว่าเรซินที่มีระดับการเชื่อมขวางต่ำจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 โครงสร้าง และสมบัติทั่วไปของเรซิน

โครงสร้างของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเรซิน มีโครงสร้างคล้ายร่างแหตาข่ายสามมิติโดยมีกลุ่มไอออนที่มีประจุตามตำแหน่งต่างๆ บนตาข่าย เรียกว่า Matrix ส่วนหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าที่มีบนตำแหน่งต่างๆ ของตาข่ายเรียกว่า หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เพื่อให้เกิดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบนเรซิน ดังนั้นเรซินควรมีสมบัติดังนี้

1. โครงร่างของเรซิน

โครงร่างของเรซินเป็นส่วนที่ทำให้มันมีรูปร่างเป็นอย่างไรที่ปรากฏ รูปร่างคงอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำ และไม่แตกหักง่าย โครงร่างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากที่เป็นชนิดเดียวกันซึ่งต่อกันเป็นสายยาว และมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่ประสานเพื่อให้เกิดเป็นรูปสามมิติที่มีความโปร่งหรือความพรุน ความโปร่งหรือความพรุนของเรซิน ขึ้นอยู่กับระดับของการเชื่อมขวาง (Degree of cross linkage) ซึ่งวัดได้จากปริมาณของสารเชื่อมขวางที่ใช้ ถ้าปริมาณของสารเชื่อมขวางมากโครงร่างของเรซินจะแข็งและทึบ แต่ถ้าปริมาณของสารเชื่อมขวางน้อย โครงร่างของเรซินจะอ่อนและโปร่ง ความพรุนของเรซินต้องมีเพียงพอที่จะทำให้ไอออนต่างๆ เคลื่อนที่เข้าออกได้สะดวกจึงจะมีการแลกเปลี่ยนได้ เรซินที่มีระดับของการเชื่อมขวางต่ำเกินไปจะมีความพรุนมากทำให้อุ่มน้ำได้มาก และแตกตัวได้ง่าย เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวหรือแรงเชื่อมขวางน้อย

2. ความชื้นของเรซิน

ความสามารถในการเก็บกักน้ำไว้ในตัวเรซิน มีความสำคัญต่ออำนาจการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินที่มีความชื้นสูงสามารถเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้มาก และถ้ามีช่องว่างน้อยทำให้มีความชื้นต่ำ

ตารางที่ 2.1 ลำดับความชอบไอออนของเรซินที่มีสารละลายโลหะหนักในน้ำ 1,000 mg/L

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

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

ความสามารถในการเก็บกักน้ำแสดงให้เห็นได้จากการบวม หรือการพองน้ำของเรซิน เมื่อวางแช่อยู่ในน้ำ การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านเข้าและออกจากช่องว่างเรซินเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากทำให้ไอออนต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ สามารถซึมผ่านเข้าไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอิสระของเรซิน ระดับการบวมน้ำขึ้นอยู่กับระดับของการเชื่อมขวางของไฮโดรคาร์บอนซึ่งทำให้เรซินมีลักษณะเป็นเม็ดแข็ง ถ้าไฮโดรคาร์บอนยึดเหนี่ยวไม่แน่นช่องว่างก็จะมีมาก จึงสามารถเก็บน้ำได้มาก ทำให้เรซินมีความชื้นสูง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ ในทางตรงกันข้ามถ้าเรซินมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรคาร์บอนสูง ทำให้มีความชื้นน้อย ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะสูง แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวสูงเกินไปจะทำให้ช่องว่างในเรซินเหลือน้อย ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากไอออนอิสระไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าออกได้อย่างสะดวก และอาจจะทำให้เรซินแตกได้ง่าย ความชื้นของเรซินมีประโยชน์สำหรับใช้เป็นพารามิเตอร์ในการตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับการเชื่อมขวางของโครงร่าง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของเรซิน ความชื้นของเรซิน มีหน่วยดังนี้

1. % ความชื้นต่อน้ำหนักเปียกของเรซิน
2. % ความชื้นต่อน้ำหนักแห้งของเรซิน
3. น้ำหนักหรือจำนวนโมลของน้ำต่อจำนวน Equivalent ของความสามารถในการแลกเปลี่ยน

การแลกเปลี่ยน

3. หมู่ฟังก์ชันของเรซิน (Functional Group)

หมู่ฟังก์ชันของเรซิน เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เช่น ความสามารถหรืออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ถ้าโครงสร้างส่วนของ Matrix มีประจุลบ ส่วนของ Functional group มีประจุบวก เรียกว่า สารแลกเปลี่ยนแอนไอออน (Anion exchange) แต่ถ้าโครงสร้างส่วนของ Matrix มีประจุบวก ส่วนของ Functional group มีประจุลบ เรียกว่า สารแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange)

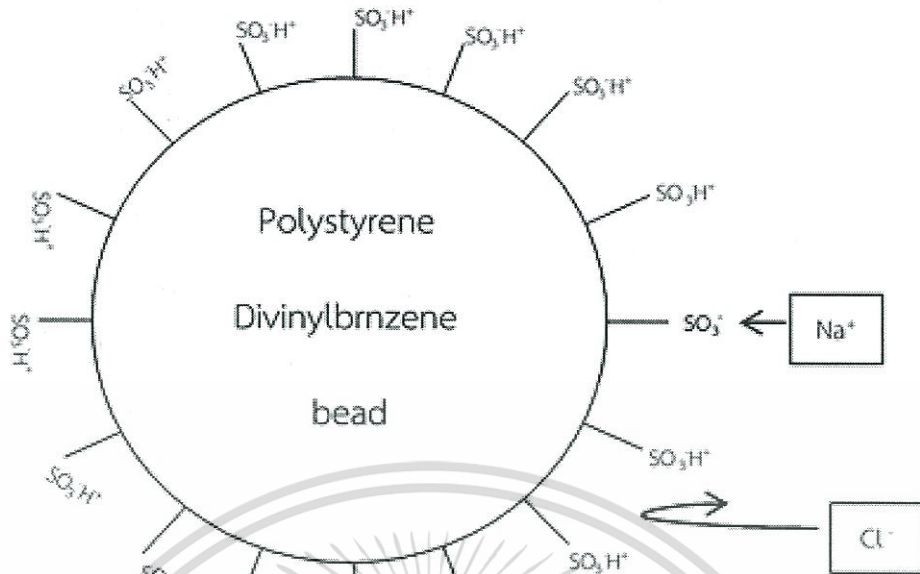
เรซินที่สังเคราะห์โดยกระบวนการทางเคมีนิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน มีโครงร่างเป็นสารพอลิสไตรีน (Polystyrene) ที่เชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน (Divinylbenzene) โดย Functional group ของสารแลกเปลี่ยนแคตไอออนจะเป็นพวกซัลโฟนิก (Sulfonic), คาร์บอกซิลิก (Carboxylic) หรือ ฟอสโฟนิก (Phosphonic) ส่วนเรซินที่นำไปใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนแอนไอออนจะเป็นพวกควอเทอร์นารีเอมีน, ไพรมารีเอมีน, เซเคดารีเอมีน และเทอร์เชียรีเอมีน

4. ความหนาแน่นของเรซิน (Density)

ความหนาแน่นของเรซินแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ความหนาแน่นของเรซินที่ใช้ทั่วไปคือ ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent หรือ Column density) เป็นความหนาแน่นที่วัดหลังจากผ่านการชะล้างย้อน และทิ้งให้สะเด็ดน้ำแล้ว แต่ถ้าเกี่ยวกับการคำนวณทางศาสตร์ของเรซิน จะต้องใช้ความหนาแน่นเปียก (Wet absolute density หรือ True density) ความหนาแน่นประเภทสุดท้ายคือ ความหนาแน่นแห้ง (Dry density)

5. ขนาดของเม็ดเรซิน (Particle Size)

สมบัติทางด้านศาสตร์ของเรซิน ได้แก่ Head loss ในขณะการแลกเปลี่ยนไอออน และการขยายตัวของชั้นเรซิน มีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของเม็ดเรซินขนาดประมาณ 0.04 – 1.00 mm และสามารถบอกได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size) และสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient) ของเรซินในขณะแห้ง และเปียก ปริมาตรจะไม่เท่ากัน เนื่องจากขนาดของเรซินไม่เท่ากัน เกิดจากการบวมตัวของเรซิน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น ระดับการเชื่อมขวาง (Degree of Crosslinking) และปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน



รูปที่ 2.2 รูปแบบ Functional Group ของสารแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange) พวกลซโฟนิค (Sulfonic)

ที่มา : มหาวิทยาลัยรามคำแหง ไอออนเอ็กซ์เชนจ์โครมาโตกราฟี, 2544

6. การบวมตัวของเรซิน (Swelling)

เรซินที่ทำจากสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์มีความสามารถในการดูดน้ำหรือของเหลวรอบตัวมันได้ และทำให้เรซินขยายตัวหรือบวมขึ้น การบวมตัวของเรซินนั้นเกิดจากการไฮเดรชัน (Hydration) ของหมู่ไอออนที่ยึดติดกับโครงร่าง และไอออนอิสระซึ่งเกิดจากความดันออสโมติก (Osmotic pressure) การไฮเดรชันของไอออนแต่ละชนิดมักแตกต่างกันโดยไอออนที่จะมีขนาดเล็กเมื่อเรซินแห้ง และจะมีขนาดใหญ่เมื่อเกิดการไฮเดรชัน ถ้าเรซินบรรจุไอออนที่มีขนาดใหญ่หรือขณะไฮเดรชันก็จะเกิดการบวมตัวสูง เช่นเดียวกับเรซินที่อยู่ในสารละลายเจือจาง เรซินจะบวมตัวเพื่อพยายามลดความเข้มข้นภายในตัว เพื่อให้สมดุลกับภายนอก ในทางกลับกันเรซินจะหดตัวเมื่อสารละลายภายนอกมีความเข้มข้นสูงกว่าภายใน เช่น ในขณะการทำรีเจนเนอเรชัน แต่การบวมตัวของเรซินจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับการเชื่อมขวางของโครงร่าง อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และชนิดของสารละลาย

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

1. ระดับ pH

เรซินแต่ละประเภทก็มีข้อจำกัดต่างกันไป เรซินแบบกรดแก่และด่างแก่สามารถใช้ได้กับน้ำทุกระดับพีเอช เรซินแบบกรดอ่อนจะใช้ได้ดีกับน้ำที่มีระดับพีเอชสูง ส่วนเรซินแบบด่างอ่อนจะใช้ได้ดีกับน้ำที่มีระดับพีเอชต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปริมาณเรซิน

ปริมาณของเรซินมีความสำคัญต่อการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากเรซินแต่ละชนิดก็จะมี ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Exchange Capacity) แตกต่างกันไป รวมถึงถ้ายังใช้ ปริมาณเรซินมากๆ ประสิทธิภาพก็ยิ่งจะดีขึ้นตามลำดับ

3. เวลาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนเรซิน

เรซินแต่ละประเภทจะใช้เวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนแตกต่างกัน เรซินแบบกรดแก่ และ ต่างแก่จะมีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนเร็ว ส่วนเรซินแบบกรดอ่อน และแบบด่างอ่อนจะมีอัตราการ แลกเปลี่ยนไอออนช้า

4. ปริมาณสารรีเจนเนอเรนต์ หรือระดับสารที่ใช้ในการรีเจนเนอเรชัน

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการกำหนดอำนาจแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน คือ ปริมาณรีเจนเนอเรนต์ ที่ใช้ในการทำรีเจนเนอเรชัน หน่วยที่ใช้คือ ปริมาณสารเคมีต่อปริมาตรของเรซิน การใช้รีเจนเนอเรนต์ ปริมาณมากๆ มีอำนาจแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าการใช้ปริมาณรีเจนเนอเรนต์น้อย แต่อัตราการเพิ่ม ปริมาณรีเจนเนอเรนต์สูงกว่าการเพิ่มอำนาจแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดปริมาณ รีเจนเนอเรนต์ไม่ให้สูงเกินไป

5. ความเข้มข้นของรีเจนเนอเรนต์

ในการฟื้นฟูอำนาจแลกเปลี่ยนไอออนให้กลับคืนมาได้ดีที่สุด จำเป็นต้องมีระดับความเข้มข้นของ รีเจนเนอเรนต์ที่เหมาะสม เช่น สารละลายเกลือแกงควรมีความเข้มข้นประมาณ 10-15% มีอำนาจ แลกเปลี่ยนไอออนได้มากที่สุด การใช้ความเข้มข้นสูงเกินไปทำให้เรซินหดตัวจนเป็นอุปสรรคต่อการ เคลื่อนที่ของโซเดียมเข้าสู่ช่องว่างภายในเรซิน ในทางกลับกันถ้าความเข้มข้นของเกลือแกงต่ำเกินไป ก็จะมี ปริมาณโซเดียมในช่วงใดช่วงหนึ่งไม่เพียงพอที่จะดึงแคลเซียม และแมกนีเซียมให้หลุดออกจากเรซินได้

6. เวลาสัมผัสระหว่างรีเจนเนอเรนต์กับเรซิน

เวลาสัมผัสระหว่างรีเจนเนอเรนต์กับเรซิน หมายถึง ระยะเวลาที่เรซินเริ่มสัมผัสกับรีเจนเนอ เรนต์ไปถึงเวลาที่เริ่มทำการชะล้างเรซิน ยิ่งใช้เวลานานยิ่งดี เรซินแบบกรดแก่ใช้เวลา 20-40 นาที ส่วนเรซินแบบอื่นๆ ใช้เวลาถึง 60 นาทีหรือมากกว่า

7. ความลึกของเรซิน

ความลึกของเรซินมีความสำคัญต่อการแลกเปลี่ยนไอออนไม่มากนัก เนื่องจากปฏิกิริยา แลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว มักออกแบบให้ชั้นเรซินมีความลึกไม่น้อยกว่า 24-30 นิ้ว

8. อัตราการไหลของน้ำในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออน

ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น กรณีเรซินแบบกรดแก่ที่ใช้กำจัดความ กระด้าง อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านชั้นเรซินจะมีอิทธิพลน้อยมากต่ออำนาจในการแลกเปลี่ยน ไอออน แต่เรซินบางชนิดมีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำทำให้ต้องใช้อัตราการไหลต่ำ เพื่อให้มี เวลาเพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นนิยมกำหนดให้อัตราการไหลของน้ำ

อยู่ที่ช่วง 2-5 gal/min.ft (มันสัน, 2547) การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การใช้ประโยชน์ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถกำจัดสารเจือปนต่างๆ ในน้ำที่อยู่ในรูปละลายได้ อย่างไรก็ตาม เรซินแลกเปลี่ยนไอออนไม่เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 700 mg/L เพราะจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย วิธีที่เหมาะสมกว่า ได้แก่ Reverse Osmosis หรือ Electrodialysis

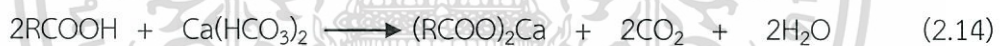
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนใช้กำจัด ความกระด้าง ความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และกำจัดเกลือแร่ทุกชนิดเพื่อผลิตน้ำบริสุทธิ์

1. การกำจัดความกระด้าง

เรซินกำจัดความกระด้างนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือชุมชนขนาดเล็ก เรซินที่ใช้งานคือเรซินแบบกรดแก่ที่รีเจนเนอเรตด้วยเกลือแกง ในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินจะใช้โซเดียม (Na^+) แลกเปลี่ยนไอออนบวกที่อยู่ในน้ำ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} เป็นต้น

2. การกำจัดความเป็นด่างไบคาร์บอเนต

การกำจัดไบคาร์บอเนตนิยมใช้เรซินแบบกรดอ่อน (RCOOH) ซึ่งรีเจนเนอเรตด้วยกรดเกลือ (HCl) หรือกรดกำมะถัน (H_2SO_4) เรซินแบบกรดอ่อนจะใช้ไฮโดรเจนไอออนแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกของไบคาร์บอเนต ทำให้เกิดกรดคาร์บอนิกสลายตัวเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ง่าย ไอออนบวกอื่นๆ จะไม่ถูกกำจัดออกจากน้ำ ดังสมการ



เรซินแบบกรดแก่ (RSO_3H) ก็สามารถกำจัดด่างไบคาร์บอเนตได้แต่จะสิ้นเปลืองโดยไม่จำเป็นเนื่องจากกำจัดไอออนบวกอื่นๆ ทั้งหมดไปด้วยเรซินแบบด่างแก่อาจใช้ได้แต่จะสิ้นเปลืองเนื่องจากกำจัดไอออนลบอื่นๆ ด้วยเช่น SO_4^{2-} , Cl^- การกำจัดด่างจึงไม่นิยมใช้เรซินแบบด่างแก่ แต่ถ้าจำเป็นต้องใช้ควรจะใช้รีเจนเนอเรตด้วยเกลือแกง

2.2.6 สมบัติของเรซินที่นำมาใช้งาน

เรซินชนิดนี้เป็นเรซินประจุบวก ชนิดกรดแก่ (Strong acid Cation) ชนิดของตัวแลกเปลี่ยนไอออนจะอยู่ในรูปของไฮโดรเจน/โซเดียม (H/Na) ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทั่วไป และสมบัติทางกายภาพ-เคมีของเรซิน

	Na form	H form	
ไอออนอิสระ	Na ⁺	H ⁺	
หมู่ฟังก์ชัน	Sulfonic acid (SO ₃ ⁻)		
ลักษณะหรือรูปร่าง	เรซินมีลักษณะคล้ายเม็ดเจลสีน้ำตาล		
ความจุในการแลกเปลี่ยนทั้งหมด (eq/L)	2.0	1.8	
เปอร์เซ็นต์การอิ่มตัว	42 - 50	50 - 58	
ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ	1.9	1.9	
ขนาดเฉลี่ยของเรซิน (mm)	0.5 - 0.7	0.5 - 0.7	
ความเป็นเนื้อเดียวกัน (%)	max 2.0	Max 2.0	
ความจุทั้งหมด (%)	95 -100	95 - 100	
ความสามารถที่ใช้ในการเปลี่ยน Na ⁺ → H ⁺ (%)	Max 11	-	
ความหนาแน่นรวม (g/L)	840	820	
อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งาน (°C)	120		
พีเอชที่สามารถทำงานได้	0-14		
สารรีเจนเนอเรนต์ แบบ Counter-current regeneration	HCl	H ₂ SO ₄	NaCl
- ความเข้มข้น (%)	4-8	1-8	8-12
อัตราการไหล			
- Counter-current regeneration (m/h)	1-10		
- Co-current regeneration (m/h)	5-20		
ความต้องการเรซินทั้งหมด (Bed volumes)	2-5		
ความสูงต่ำสุดของเรซิน (mm)	80		

ที่มา : The Dow Chemical Company, 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 น้ำเสีย

2.3.1 นิยามของน้ำเสีย

น้ำเสีย ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ.2535 หมายความว่า ของเสียที่อยู่ในสภาพเป็นของเหลว รวมทั้งมลสารที่ปะปนหรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลว นั้น แต่โดยทั่วไปหมายถึงน้ำที่มีสิ่งเจือปนต่างๆ มากมาย จนกระทั่งกลายเป็นน้ำที่ไม่เป็นที่ต้องการและน่ารังเกียจของคนทั่วไป ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ประโยชน์อีกต่อไป หรือถ้าปล่อยลงสู่ลำน้ำ ธรรมชาติก็จะทำให้คุณภาพน้ำของธรรมชาติเสียหายได้ ลักษณะของน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ เช่น โรงไฟฟ้า โรงฆ่าสัตว์ มีพารามิเตอร์ในการตรวจวัดและบ่งชี้ ได้ดังตารางที่ ก-1 (ภาคผนวก ก)

2.3.2 มลพิษในแหล่งน้ำ

ประเภทของมลพิษ

สิ่งที่ทำให้เกิดมลพิษในแหล่งน้ำมีที่มาหลายแหล่งด้วยกัน สามารถจำแนกประเภทของมลพิษของน้ำตามแหล่งที่มาของสารมลพิษ (Pollutants) ได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. มลพิษของน้ำที่เกิดจากน้ำโสโครกของแหล่งชุมชน (Domestic wastewaters)

น้ำโสโครกเหล่านี้ถูกปล่อยออกมาจากบ้านเรือน ชุมชน ตลาด โรงพยาบาล เทศบาล เมือง ถ้าน้ำโสโครกเหล่านี้ถูกถ่ายเทลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่มีการกำจัดสิ่งโสโครกที่ละลายหรือแขวนลอยอยู่ก่อนก็จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำทั้งในด้านสาธารณสุข อาจทำให้เกิดการแพร่กระจายของเชื้อโรคปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำซึ่งจะมีผลกระทบโดยตรงต่อสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำนั้นและในด้านความสวยงามของแหล่งน้ำ ก่อให้เกิดการเน่าเสียและกลิ่นที่ก่อให้เกิดความรำคาญ

2. มลพิษของน้ำที่เกิดจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial wastewaters)

โรงงานอุตสาหกรรมเป็นแหล่งใหญ่ที่ปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำและทำให้เกิดปัญหามลพิษขึ้นหลายแห่งทั่วโลก ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของน้ำทิ้งตามผลเสียที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมออกได้เป็น 8 ประเภท ดังนี้

1) ประเภทที่ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง (Oxygen depleting wastes) เป็นน้ำทิ้งที่มีสารประกอบอินทรีย์ซึ่งถูกย่อยสลายได้โดยจุลชีพ จุลชีพจะใช้ออกซิเจนไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านี้ ทำให้ออกซิเจนในน้ำลดลง น้ำทิ้งส่วนใหญ่มาจากโรงงานเหล่านี้ ได้แก่ โรงงานน้ำตาล โรงงานฆ่าสัตว์ โรงงานผลิตแปงมันสำปะหลัง โรงงานกลั่นสุรา และโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรอีกหลายประเภท

2) ประเภทที่มีสารมีพิษปะปน (Toxic wastes contamination) สารพิษชนิดต่างๆ ในน้ำทิ้ง ได้แก่ โลหะหนัก และสารประกอบมีพิษอื่นๆ ส่วนใหญ่น้ำทิ้งเหล่านี้มาจากโรงงานอุตสาหกรรมเคมี โรงงานถลุงโลหะชนิดต่างๆ โรงงานย้อมผ้า และเหมืองแร่ต่างๆ ที่อยู่ใกล้แหล่งน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ประเภทที่สามารถทำลายสภาพของแหล่งน้ำ โรงงานบางประเภทอาจปล่อยของเสียชนิดที่ทำลายสภาพทางฟิสิกส์ของแหล่งน้ำเสียไป เช่น โรงเลื่อย อาจปล่อยเศษผงไม้ลงมาในแหล่งน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน การทำเหมืองดีบุกในทะเลก่อให้เกิดตะกอนอย่างมากในน้ำทะเลและมีผลเสียต่อปะการังที่อาศัยอยู่ในบริเวณใกล้เคียง โรงย้อมผ้าก็อาจปล่อยของเสียที่ทำให้สีของน้ำเปลี่ยนไปจากสภาพเดิมได้

4) ประเภทที่ทำให้รสและกลิ่นของน้ำเปลี่ยนไป โรงงานบางชนิดอาจปล่อยน้ำทิ้งที่มี สารบางชนิด เช่น Phenolic compounds ทำให้รสของน้ำในแหล่งน้ำเปลี่ยนไป น้ำทิ้งประเภทนี้มาจาก โรงงานผลิตยางเทียม โรงกลั่นน้ำมัน เป็นต้น

5) ประเภทที่มีสารอนินทรีย์ที่เป็นของแข็งละลายอยู่ สารอนินทรีย์พวกนี้ได้แก่ Na, K, Ca, Mg และ Fe สารอนินทรีย์เหล่านี้เป็นธาตุอาหารของพืชน้ำ แต่ต้องอยู่ในปริมาณที่พอควร ถ้ามีในปริมาณมากเกินไปก็เกิดเป็นพิษภัยได้เช่นกัน โรงงานที่ปล่อยสารอนินทรีย์เหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำได้แก่ โรงงานฟอกหนัง

6) ประเภทที่ปล่อยสารกัมมันตรังสีออกมา น้ำทิ้งเหล่านี้มาจากโรงไฟฟ้าปรมาณู เต้าปฏิกรณ์ปรมาณู โรงงานผลิตและแปรสภาพสารกัมมันตภาพรังสี โดยปกติแล้วถ้ามีการควบคุมที่ดีพอ ก็จะไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม แต่ในบางครั้งอาจเกิดอุบัติเหตุของการรั่วไหลได้

7) ประเภทที่ปล่อยสารกัดโลหะออกมา น้ำทิ้งที่มีความเป็นกรดหรือด่างมากอาจก่อให้เกิดการผุกร่อนของโลหะที่เป็นโครงสร้าง โรงงานที่ปล่อยน้ำทิ้งชนิดนี้ออกมาได้แก่ โรงงานผลิตสบู่และผงซักฟอก โรงงานทำของดอง

8) ประเภทที่ปล่อยเชื้อโรคลงสู่แหล่งน้ำ น้ำทิ้งประเภทนี้ส่วนใหญ่มาจากโรงงานฆ่าสัตว์ โรงงานฟอกหนังและโรงพยาบาล น้ำทิ้งจากโรงงานเหล่านี้ควรได้รับการกำจัดเชื้อโรคโดยสารเคมี เช่น เดิมคลอรีนก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

3. มลพิษของน้ำที่เกิดจากการเกษตรกรรม (Agricultural wastewaters) เป็นมลพิษที่มาจาก การที่ฝนชะยาปราบศัตรูพืช ปุ๋ย และสารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ในทางเกษตรกรรมจากดินลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตรวมถึงธาตุอาหารในแหล่งน้ำนั้น

การปนเปื้อนโลหะลงสู่แหล่งน้ำ

โลหะลงสู่แหล่งน้ำได้ทั้งจากทางธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ สามารถจำแนกตามแหล่งต้นกำเนิดการปนเปื้อนออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

1) การผุพังทางธรณีภาค

เป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญของการปนเปื้อนโลหะลงสู่แหล่งน้ำและดิน ซึ่งเป็นการผุพังมาจากหินตะกอนประเภทดินเหนียว (clay) และหินดินดาน (shale) มีความเข้มข้นของโลหะอื่นๆ สูง ด้วยเนื่องจากคุณสมบัติในการดูดซับโลหะของมัน (นัทธิธา, 2555 อ้างถึง Alloway BJ, 1990)

การละลายของโลหะลงสู่แหล่งน้ำขึ้นกับสมบัติในการละลาย ตลอดจนปัจจัยในธรรมชาติ เอกสารอื่นๆ ที่กำหนดคุณสมบัติการละลายนั้น เช่น ความเป็นกรด-ด่าง สภาพภาวะรีดอกซ์ในแหล่งน้ำ และลิแกนด์ ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มาแย่งจับกับโลหะ ตัวอย่างเช่น ในสภาวะที่เป็นด่างมีโลหะหลายชนิดจะเกิดปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นตะกอนแขวนลอยหรือตกลงสู่ท้องน้ำ เช่น Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} และ Cr^{3+} เป็นต้น ซึ่งโลหะเหล่านี้ส่วนใหญ่ละลายได้ในสภาวะที่เป็นกรดเท่านั้น (นัทธีรา, 2555 อ้างถึง Solomons และ Forstner, 1984)

2) น้ำจากกระบวนการทำเหมืองแร่

เหมืองแร่มีกิจกรรมหลายด้านที่ปล่อยน้ำทิ้งจากกระบวนการทำเหมืองออกสู่สิ่งแวดล้อม เช่น น้ำล้างแร่ น้ำชะกองกากแร่ และน้ำที่ใช้เพื่อการฉีดหาแร่ เป็นต้น เหมืองที่ปล่อยน้ำทิ้งออกมามากที่สุด ได้แก่ เหมืองแร่แบบฉีด เพราะใช้น้ำเพื่อการฉีดหาแร่เป็นปริมาณมากและน้ำเหล่านี้จะไหลลงไปสู่แหล่งน้ำโดยตรง ปัจจุบันเหมืองแร่ประเภทนี้พบได้น้อยลงเนื่องจากแหล่งผลิตแร่ที่ต้องใช้วิธีผลิตเช่นนี้ ค่อยๆ หดไป เช่น พลอย ดีบุก และทอง

การปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำของน้ำทิ้งจากกิจกรรมเหมืองแร่นี้ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำโดยตรง เกิดการสะสมในตะกอน ในสัตว์น้ำ และในที่สุดส่งผลมายังมนุษย์ที่บริโภคสัตว์น้ำนั้น

3) น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

โรงงานอุตสาหกรรมเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษโลหะทางน้ำที่สำคัญ เช่น โรงงานผลิตเนื้อสัตว์ ปลา ขนปัง ไอศกรีม เครื่องดื่ม ตลอดจนโรงงานที่เกี่ยวกับอุตสาหกรรมหนักต่างๆ (นัทธีรา, 2555 อ้างถึง Forstner และ Wittmann, 1981) ถึงแม้ว่าจะมีการกำหนดค่ามาตรฐานโลหะควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ลงวันที่ 29 มีนาคม 2559 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษาเล่มที่ 133 ตอนที่ 129 ง ลงวันที่ 6 มิถุนายน 2559 (ตารางที่ 1) แล้วก็ตาม แต่การทิ้งน้ำที่มีโลหะปนเปื้อนเป็นปริมาณมากๆ และเป็นระยะเวลาต่อเนื่องอย่างยาวนาน ถึงแม้จะไม่เกินค่ามาตรฐานก็อาจส่งผลให้เกิดการสะสมโลหะลงสู่สิ่งแวดล้อมในบริเวณดังกล่าวได้

4) น้ำทิ้งจากชุมชน

น้ำเสียจากชุมชนเป็นสาเหตุประการหนึ่งของความเสื่อมโทรมคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำต่างๆ ถึงแม้ว่ารัฐบาลได้สร้างระบบบำบัดน้ำเสียทั่วประเทศไปแล้ว แต่ปัญหาน้ำเสียชุมชนก็ยังไม่หมดไป เช่น ระบบขาดการซ่อมบำรุง ขาดบุคลากรที่มีความรู้ความเข้าใจในการควบคุมระบบ เป็นต้น สำหรับปัญหามลพิษของโลหะจากน้ำเสียชุมชนนั้น มาจากทั้งในรูปอนุภาคแขวนลอยและจากที่ละลายปนออกมาจากกิจกรรมต่างๆ ในบ้านเรือน เช่น การทำความสะอาดด้วยน้ำยาเช็ดกระจก น้ำยาล้างห้องน้ำ โดยเฉพาะบ้านเรือนที่ทำอุตสาหกรรมในครัวเรือน เช่น ร้านชุบโลหะ อู่ซ่อมรถ และน้ำเสียจากโรงพยาบาล เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีโลหะปนเปื้อนมาจากน้ำทิ้งจากทางการเกษตรที่ใส่โลหะในสารกำจัดศัตรูพืช อาหารสัตว์ และปุ๋ย ตัวอย่างโลหะที่ตรวจพบในน้ำเสียชุมชน เช่น พรอท โครเมียม และทองแดง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment Processes)

กระบวนการบำบัด

การบำบัดน้ำเสียเป็นการกำจัดสารต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งสามารถแบ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียออกได้เป็น 4 กระบวนการใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการทางกายภาพ (Physical unit operations) คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยแรงต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย โดยมากจะเป็นขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง การตัดย่อย การกวาด การกวน การทำให้ลอย การตกตะกอน การแยกตัวด้วยแรงเหวี่ยง การกรอง การกำจัดตะกอนหนัก เป็นต้น

2. กระบวนการทางเคมี (Chemical unit operations) คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยสารเคมีผสมกับน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อแยกเอามลสารต่างๆ ออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การตกตะกอนผลึก การทำให้เป็นกลางหรือการสะเทิน การเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน การฆ่าเชื้อโรค เป็นต้น

3. กระบวนการทางชีวภาพ (Biological unit operations) คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยจุลินทรีย์ย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นก๊าซลอยขึ้นสู่อากาศและได้จุลินทรีย์เพิ่มจำนวนขึ้น ได้แก่ แอคทิเวตเต็ดสลัดจ์ ลานโปรยกรอง สระเติมอากาศ ถังกรองไร้อากาศ บ่อหมักไร้อากาศ บ่อปรับเสถียร เป็นต้น

4. กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical unit operations) คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยทั้งทางกายภาพและทางเคมีมารวมกัน จะใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ การแลกเปลี่ยนประจุ การดูดซับด้วยคาร์บอน การออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse osmosis) อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis) เป็นต้น

ขั้นตอนการบำบัด

1. ระบบบำบัดก่อนขั้นต้น (Preliminary Treatment) เป็นระบบที่อยู่ในขั้นแรกๆ ของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง การกำจัดตะกอนหนัก การทำให้ลอย การบดตัด เป็นต้น

2. ระบบบำบัดขั้นต้น (Primary Treatment) เป็นระบบที่อยู่ในขั้นที่ต้องการแยกสารตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำเสีย และกำจัดสารอินทรีย์บางส่วนออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง การตกตะกอน เป็นต้น

3. ระบบบำบัดขั้นที่สอง (Secondary Treatment) เป็นระบบที่กำจัดสารอินทรีย์ และตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำเสีย โดยมากจะเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กระบวนการทางชีวภาพสำหรับระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำทิ้ง เช่น การเติมคลอรีนก็จัดอยู่ในระบบบำบัดขั้นที่สองด้วย

4. ระบบบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary Treatment) เป็นระบบที่แยกและกำจัดสารตะกอนแขวนลอยที่หลงเหลือจากระบบบำบัดขั้นที่สอง การกำจัดสารไนโตรเจน และฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสีย จากการกำจัดสารปนเปื้อนอื่นๆ ที่หลงเหลือจากระบบบำบัดขั้นต้นที่สอง ซึ่งขั้นนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการที่จะทำการบำบัดน้ำเสียให้ได้คุณภาพของน้ำทิ้งดีขนาดไหน โดยทั่วไประบบบำบัดขั้นที่สาม

มักใช้กับการบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่ต้องการนำกลับมาใช้อีก เช่น นำมาใช้รดน้ำสนามหญ้า ใช้กับค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับการชักโครกของโถส้วม ใช้กับระบบหอหล่อเย็น เป็นต้น

ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ใช้บำบัดน้ำเสียทางเคมี

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (รีดอกซ์) หมายถึงปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารชนิดหนึ่งให้กับสารอีกชนิดหนึ่ง สารที่ให้อิเล็กตรอนเรียก Reducing Agent ส่วนสารที่รับอิเล็กตรอนเรียก Oxidizing Agent ตัวอย่างของการใช้ประโยชน์จากปฏิกิริยารีดอกซ์ ได้แก่ การกำจัดโครเมียม โดยใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์

การกำจัดโครเมียมเป็นปฏิกิริยารีดักชันของโครเมียม (VI)



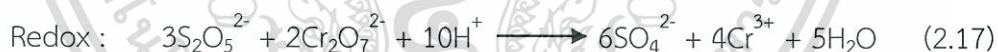
ปฏิกิริยา (2.15) เป็นปฏิกิริยารีดักชันเพราะ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เป็นสารรับอิเล็กตรอนและกลายเป็น Cr^{3+} $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ จึงเป็น Oxidizing Agent

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เมื่อละลายน้ำ



ปฏิกิริยา (2.16) เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันเพราะ $\text{S}_2\text{O}_5^{2-}$ กลายเป็น SO_4^{2-} และสร้างหรือให้อิเล็กตรอนจึงถือว่า $\text{S}_2\text{O}_5^{2-}$ เป็น e-donor และเรียก $\text{S}_2\text{O}_5^{2-}$ ว่าเป็น Oxidizing Agent

สมการข้างบนทั้งสองเป็นสมการครึ่งปฏิกิริยา (Half reaction) ยังไม่ได้เป็นสมการรีดอกซ์ที่สมบูรณ์ นั่นคือ สมการ (2.15) ต้องการ Half reaction ที่เป็นออกซิเดชันมาควบคู่ด้วยจึงจะเป็นสมการรีดอกซ์ที่สมบูรณ์



ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential, ORP)

การวัด ORP เป็นการวัดที่แสดงถึงระดับความสามารถของสารที่สามารถออกซิเดชันหรือรีดักชันสารอื่นๆ ได้ ค่า ORP จะวัดในหน่วยของมิลลิโวลต์ (mV) โดยใช้เครื่องวัด ORP (ORP meter) ค่า ORP ที่อ่านได้ จะได้จากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กตรอนโดยขั้วเฉื่อย (Inert electrode) เมื่อเทียบกับขั้วอ้างอิง โดยอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วอ้างอิงจะทำหน้าที่เป็นผู้ให้หรือรับอิเล็กตรอน (APHA-AWWA, 2012)

เมื่อนำมาวัดในสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate, FAS) หรือ โซเบล (Zobell) ซึ่งเป็นสารละลายผสมของโพแทสเซียมเฟอร์โรไซยาไนด์ (Potassium ferrocyanide, K_4FeCN_6) 0.003 M และโพแทสเซียมเฟอร์ริไซยาไนด์ (Potassium ferricyanide, K_3FeCN_6) 0.003 M ใน 0.1 M โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride, KCl) จะได้ความสัมพันธ์ของค่า ORP ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิตั้งสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Eh_{Zobell} = 0.428 - 0.0022 (T - 25) \quad (2.18)$$

$$Eh_{FAS} = 0.675 - 0.0022 (T - 25) \quad (2.19)$$

เมื่อ h = ค่า ORP ของสารละลายมาตรฐาน ที่ใช้ขั้วแพลทินัม - ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์วัด ณ อุณหภูมิที่ปรับแก้ (mV)

T = อุณหภูมิของสารละลายขณะวัด ($^{\circ}C$)

เมื่อนำอิเล็กโทรดไปวัดสารละลายตัวอย่างจะได้ค่า ORP ของสารละลายตัวอย่าง คำนวณหาค่า ORP ของน้ำตัวอย่างจากสมการ

$$Eh_s = Eh_{obs} + Eh_{FAS} - Eh_{FAS\ obs} \quad (2.20)$$

$$Eh_s = Eh_{obs} + Eh_{Zobell} - Eh_{Zobell\ obs} \quad (2.21)$$

เมื่อ

- Eh_s = ค่า ORP ของสารละลายตัวอย่างที่ปรับแก้ (mV)
- Eh_{obs} = ค่า ORP ของสารละลายตัวอย่างที่อ่านได้จริง (mV)
- Eh_{FAS} = ค่า ORP ของสารละลายมาตรฐาน FAS คำนวณจากสมการที่ 2.19 (mV)
- $Eh_{FAS\ obs}$ = ค่า ORP ของสารละลายมาตรฐาน FAS ที่อ่านได้จริง (mV)
- Eh_{Zobell} = ค่า ORP ของสารละลายมาตรฐาน Zobell คำนวณจากสมการที่ 2.18 (mV)
- $Eh_{Zobell\ obs}$ = ค่า ORP ของสารละลายมาตรฐาน Zobell ที่อ่านได้ (mV)

ตารางที่ 2.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ของสารละลายมาตรฐาน

ขั้วที่ใช้วัด	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ของสารละลายมาตรฐาน ที่ 25 $^{\circ}C$ (mV)	
	FAS	Zobell
ขั้ว Pt-Calomel (Hg:HgCl ₂ saturated KCl)	+430	+183
ขั้ว Pt // Ag/AgCl (1 M KCl)	+439	+192
ขั้ว Pt // Ag/AgCl (4 M KCl)	+475	+228
ขั้ว Pt // Ag/AgCl (saturated KCl)	+476	+229
ขั้ว Pt-H ₂	+675	+428

ที่มา : APHA-AWWA, 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กระบวนการดูดซับ

2.4.1 การดูดซับ (adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ ความสมดุลในการดูดซับเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของปฏิกิริยาระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ดังนั้นรูปแบบสมการที่ได้อธิบายกลไกการดูดซับ คือ สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับซึ่งอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ โดยสมการที่นิยมใช้กัน คือ สมการแลงเมียร์ (Langmuir) และสมการฟรุนด์ลิช (Freundlich)

2.4.2 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ จึงจำแนกประเภทตามชนิดของแรงที่ดูดจับโมเลกุลของสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. การดูดซับแบบกายภาพ (Physisorption) คือ การดูดหรือดึงสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดร่วมกัน แรงกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ ได้แก่

1) แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ เช่น การดูดซับความชื้นด้วยผลึกดูดความชื้น ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วลบบนผิวผลึกดูดความชื้น หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วลบของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วบวกบนผิวผลึกดูดความชื้น เป็นต้น

2) แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ เช่น การดูดซับไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) และไอออนแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ในน้ำกระด้างด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนบนผิวตัวดูดซับชนิดพอลิเมอร์ เป็นต้น

3) แรงดึงดูดมวลระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เช่น การดูดซับกลิ่นซึ่งมักเป็นไอระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ด้วย ถ่านดูดซับ หรือการดูดซับไอสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยถ่านดูดซับ เป็นต้น

4) ลักษณะสำคัญของการดูดซับ คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศทั่วไป และเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจากอากาศ เช่น การดูดซับกลิ่นอับต่างๆ ในตู้เย็นและในห้องโดยสารปรับอากาศ เป็นต้น การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรงและเกิดบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับแล้ว โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงมักเรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า การดูดซับหลายชั้น (Multilayer adsorption)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การดูดซับแบบเคมี (Chemisorption) คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้ อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้น การดูดซับจึงมักเกิดได้ดีหรือเกิดได้เร็วที่อุณหภูมิสูงๆ และเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นคือ การดูดซับแบบเคมีจะเกิดได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น จะไม่เหมือนการดูดซับแบบกายภาพซึ่งเกิดการดูดซับบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ จึงมักเรียกรวมการดูดซับประเภทนี้ว่า การดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption)

2.4.3 ตัวดูดซับ (Adsorbent)

การดูดซับเป็นการสะสมสารถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับซึ่งมักเป็นของแข็ง ตัวดูดซับจึงต้องมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากๆ เพื่อให้สามารถดูดซับสารถูกดูดซับได้ในปริมาณมากๆ ดังนั้นตัวดูดซับจึงมีลักษณะพรุนหรือมีโพรงภายในเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะให้มากขึ้นโดยมีขนาดเท่าเดิม เมื่อตัวดูดซับมีโพรงภายในมากแต่ตัวดูดซับมีขนาดเท่าเดิม ตัวดูดซับจึงมีความหนาแน่นลดลง

ตัวดูดซับพาณิชย์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม จำแนกตามธาตุองค์ประกอบหลักของตัวดูดซับออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. **ตัวดูดซับอนินทรีย์** คือ ตัวดูดซับที่มีธาตุกลุ่มโลหะชนิดต่างๆ เป็นองค์ประกอบหลักตัวดูดซับอนินทรีย์นี้จำแนกย่อยตามลักษณะการเกิดของตัวดูดซับออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ตัวดูดซับอนินทรีย์ธรรมชาติ เช่น ดินเหนียวดูดซับ (Activated clay) และตัวดูดซับอนินทรีย์สังเคราะห์ เช่น ผลึกซิลิกาดูดซับความชื้น (Silica gel) ผลึกอะลูมินาดูดซับความชื้น (Activated Alumina) และผลึกคัตโมเลกุล

2. **ถ่านดูดซับ** คือ ตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากวัสดุสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ถ่านดูดซับนี้จำแนกย่อยตามขนาดปากโพรงของเม็ดถ่านดูดซับออกเป็นถ่านดูดซับทั่วไป (Activated carbon) และถ่านคัตโมเลกุล (Molecular sieve carbon)

2.4.4 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

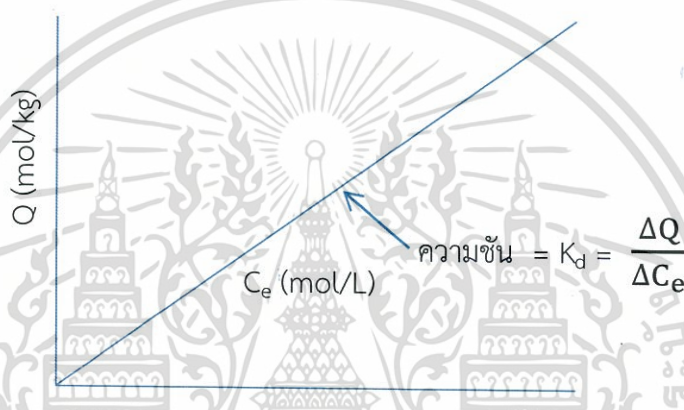
อัตราการดูดซับค่อยๆ เพิ่มขึ้นในขณะที่ตัวถูกละลายค่อยๆ สัมผัสกับผิวของตัวดูดซับ และแพร่เข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ขณะเดียวกันอาจมีอนุภาคของตัวดูดซับหลุดออกจากผิวของตัวดูดซับ เรียกกระบวนการนี้ว่า Desorption ในขั้นแรก อัตราการดูดซับมีค่าสูงกว่าอัตราการกลับเข้าสู่สารละลาย เมื่อพื้นที่ผิวและช่องว่างของตัวดูดซับลดน้อยลง เนื่องจากมีสารถูกดูดซับที่ผิวของของแข็งมากขึ้น อัตราการดูดซับจะค่อยๆ ลดลงจน ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายมีค่าคงที่ แสดงว่าเกิดสมดุลของการดูดซับ ซึ่งที่สภาวะนี้จะมีกระบวนการดูดซับ (Adsorption) และคายซับ (Desorption) เกิดขึ้นตลอดเวลาในอัตราที่เท่ากัน ปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่สมดุลหนึ่งๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะและความเข้มข้นของตัวถูกละลาย อนุภาค ซึ่งเป็นแรงขับให้สารเคลื่อนที่ไปยังตัวดูดซับหรือหลุดจากการดูดซับรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาหาพฤติกรรมการดูดซับตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ มักแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ และความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สมดุล เมื่อศึกษาที่อุณหภูมิคงที่ จะเรียกว่า Adsorption isotherm

สมการการดูดซับของเส้นตรง

ไอโซเทอร์มนี้แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับไม่มีขีดจำกัด ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับแปรผันตรงกับ ความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในสารละลาย สมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Q และ C_e คือ

$$Q = K_d C_e \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

เมื่อ	Q	=	ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ
	K_d	=	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ
	C_e	=	ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล

จากสมการ (2.22) สามารถหา K_d ได้จาก

$$K_d = \frac{Q}{C_e} \quad (2.23)$$

และจากสมการ (2.23) สามารถหา C_e ได้จาก

$$C_e = \frac{Q}{K_d} \quad (2.24)$$

เมื่อนำค่า C_e และ Q จากการทดลองมาพลอตกราฟ โดยให้ Q อยู่บนแกน y และ C_e อยู่บนแกน x แล้วได้กราฟเส้นตรง แสดงว่าสามารถอธิบายการดูดซับโดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงได้ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับสามารถหาค่าได้จากความชันของกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

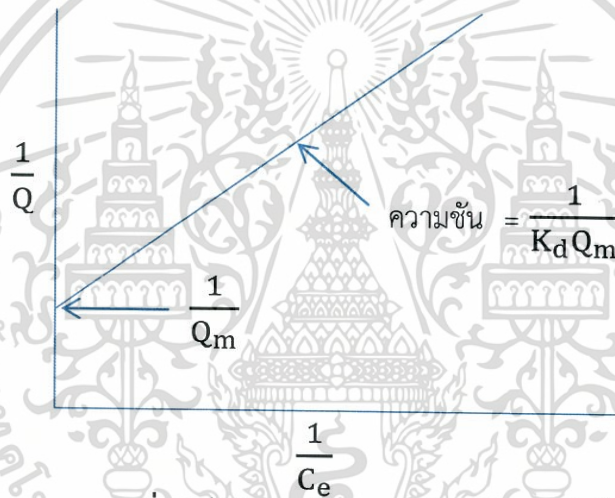
สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์มีสมมติฐานดังนี้

1. การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer)
2. พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Homogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน
3. ตัวถูกดูดซับจะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือแรงกระทำต่อกัน เมื่อเกิดการดูดซับแล้ว

สมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Q และ C_e คือ

$$Q = \frac{K_d Q_m C_e}{1 + K_d C_e} \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

เมื่อ	Q	=	ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ
	K_d	=	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ
	C_e	=	ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล
	Q_m	=	ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สามารถดูดซับได้สูงสุดต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ

จากสมการ (2.25) จัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้

$$\text{จาก} \quad y = mx + c$$

$$\text{จะได้} \quad \frac{1}{Q} = \frac{1}{K_d Q_m} \left(\frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{Q_m} \quad (2.26)$$

$$\text{สามารถหา } m \text{ ได้จาก} \quad m = \frac{1}{K_d Q_m} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหา K_d ได้จาก
$$K_d = \frac{1}{mQ_m} \quad (2.28)$$

สามารถหา Q_m ได้จาก
$$c = \frac{1}{Q_m} \quad (2.29)$$

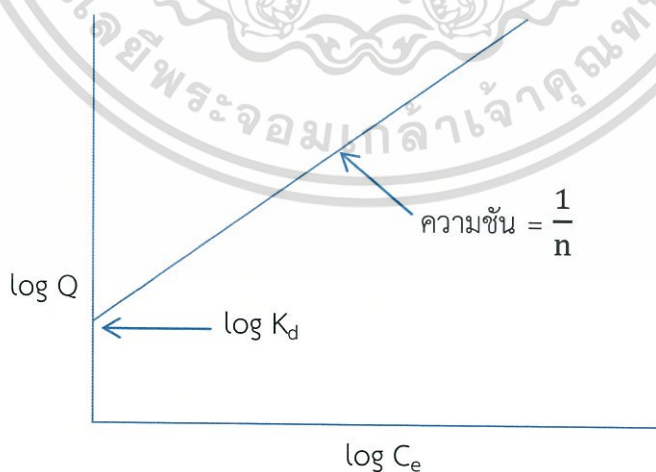
$$Q_m = \frac{1}{c} \quad (2.30)$$

เมื่อนำค่า $\frac{1}{Q}$ และ $\frac{1}{C_e}$ จากการทดลองมาพลอตกราฟ โดยให้ $\frac{1}{Q}$ อยู่บนแกน y และ $\frac{1}{C_e}$ อยู่บนแกน x แล้วได้กราฟเส้นตรง แสดงว่าสามารถอธิบายการดูดซับโดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ได้ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับสามารถหาค่าได้จากความชันของกราฟ ที่หาจาก $\frac{1}{K_d Q_m}$ และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ $\frac{1}{Q_m}$

สมการการดูดซับของฟรุนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดซับของฟรุนด์ลิชใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Heterogeneous adsorption surface) การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) และการดูดซับเกิดขึ้นแบบไม่มีขีดจำกัด สมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Q และ C_e คือ

$$Q = K_d (C_e)^n \quad (2.31)$$



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

เมื่อ Q = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สอนได้สำหรับค่าคงที่สมดุลการดูดซับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลื้ืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล
 n = ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
 $n = 1$: การดูดซับเกิดขึ้นได้อย่างไม่มีขีดจำกัด (ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง)
 $n > 1$: พื้นที่ผิวดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดการดูดซับสารถูกละลายได้มากขึ้น
 $n < 1$: พื้นที่การดูดซับบนตัวดูดซับมีเนื้อที่จำกัด

สมการที่ (2.31) จัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงโดยใช้ logarithm จะได้

$$\text{จาก} \quad y = mx + c$$

$$\text{จะได้} \quad \log Q = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_d \quad (2.32)$$

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\log Q$ และ $\log C_e$ จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง มีค่าความชัน (slope) เท่ากับ $\frac{1}{n}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K_d$ ดังนั้นค่าของ n และ K_d หาได้จาก

$$m = \frac{1}{n} \quad (2.33)$$

$$n = \frac{1}{m} \quad (2.34)$$

สามารถหา $\log K_d$ ได้จาก

$$c = \log K_d \quad (2.35)$$

$$K_d = 10^c \quad (2.36)$$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Beukes, JP. *et al.* (1999) ได้ศึกษาผลของค่า pH ต่อการรีดักชันโครเมียม (VI) ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยซัลไฟต์, แปรค่าปริมาณซัลไฟต์ที่ใช้และระยะเวลาการสัมผัสที่จะทำให้ปฏิกิริยาลงถึงจุดสมดุล โดยแหล่งของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ผู้วิจัยได้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จาก $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ผลการทดลองพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโครเมียม (VI) และซัลไฟต์ได้แสดงให้เห็นว่าการผสมกันของสารขึ้นกับค่า pH เป็นอย่างมาก เมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงและมีการเพิ่มขึ้นของค่า pH จาก 2.0-5.0 ต้องใช้ซัลไฟต์เข้มข้นอย่างน้อย 5 เท่าของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์นี้มีความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้นที่ $5.0 \times 10^4 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ (~26 mg/L) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการรีดักชันที่สมบูรณ์ในช่วงค่า pH ดังกล่าว และที่ค่า pH มากกว่า 6.0 ขึ้นไปจะต้องใช้ซัลไฟต์ในปริมาณที่เข้มข้นมากขึ้นเพื่อรีดิวซ์โครเมียม (VI) ผู้วิจัยได้ตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ว่ามีความเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรม จึงได้ใช้ฝุ่นจากถุงกรอง (Baghouse dust) ซึ่งมาจากโรงงานที่ผลิตเฟอร์โรเอ็กสารโครเมียม ให้เป็นแหล่งกำเนิดน้ำเสียอุตสาหกรรมโครเมียม (VI) จำลองมาโดยทำการทดลองเปรียบเทียบไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายๆ ชุดการทดลอง ผลลัพธ์ที่ได้ชี้ให้เห็นชัดว่าซัลไฟต์เป็นตัวรีดิวซ์โครเมียม (VI) ที่เหมาะสมในน้ำเสีย ภายใต้สภาวะจำเพาะ ($2.0 < \text{pH}_{\text{เริ่มต้น}} < 5.0$ และ $[\text{sulphite}] = 5 \times [\text{Cr(VI)}]_{\text{เริ่มต้น}}$)

Rengaraj, S. *et al.* (2001) ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมจากน้ำและน้ำเสีย โดยเรซินแลกเปลี่ยนประจุและทำการทดลองการดูดซับแบบ Batch shaking เพื่อประเมินค่าสมรรถภาพของเรซินแลกเปลี่ยนประจุวอย์ท็อ IRN77 และ SKN1 ในการกำจัดโครเมียมจากสารละลาย ผู้วิจัยได้แปรสภาวะการทดลองต่างๆ เช่น ปริมาณของตัวดูดซับ, ค่า pH ของสารละลายและระยะเวลาการสัมผัส เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การกำจัดของโครเมียมพบว่าภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ที่ค่า pH 3.5 มีการกำจัดมากกว่า 95% ผู้วิจัยได้คำนวณความสามารถในการดูดซับ (k) สำหรับโครเมียมจากไอโซเทอร์มการดูดซับของฟลูนด์ลิชพบว่าเท่ากับ 35.38 และ 46.34 mg/g สำหรับเรซินยี่ห้อ IRN77 และ ยี่ห้อ SKN1 ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนประจุที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นการดูดซับกลับของโครเมียม ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้สำหรับการกำจัดหรือการกลับคืนของโครเมียมจากน้ำและน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี

Kocaoba, S. and Akcin, G. (2002) โดยปกติ เราพบปริมาณโครเมียม (III) เป็นจำนวนมากในน้ำเสียที่มาจากการฟอกหนัง ดังนั้น การกลับคืนของปริมาณโครเมียมในน้ำเสียเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการป้องกันสิ่งแวดล้อมและเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ การกำจัดและการกลับคืนของโครเมียมสามารถทำได้โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุ เพื่อวัตถุประสงค์นี้ ผู้วิจัยจึงได้ใช้เรซินแลกเปลี่ยนชนิดประจุบวก-กรดอ่อน 2 รุ่น ได้แก่ Amberlite รุ่น IRC 76 และ Amberlite รุ่น IRC 718 และเรซินแลกเปลี่ยนชนิดประจุบวกกรดแก่ Amberlite รุ่น IR 120 ในการกำจัดและการกลับคืนของโครเมียม เตรียมสารละลายโครเมียมซัลเฟต $[\text{Cr}_4(\text{SO}_4)_5(\text{OH})_2]$ ที่ความเข้มข้นและ pH ที่แตกต่างกันให้เป็นตัวแทนของน้ำเสียที่มาจากการฟอกหนังสำหรับใช้ตลอดทั้งการทดลอง และเตรียมเรซินในรูปไอออนที่แตกต่างกันคือ Na^+ และ H^+ ผู้วิจัยทำการศึกษาผลของความเข้มข้นในช่วง 5-100 mg/L, ค่า pH 1-8, ระยะเวลาการปั่นกวน 5-60 นาที และปริมาณเรซิน 50-1000 mg ใช้ความเร็วในการปั่นกวน 2000 rpm ตลอดการทดลอง ผู้วิจัยได้ศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยน, ปริมาณความขึ้นและสภาวะที่เหมาะสมของเรซินในการทดลองแบบแบตช์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ใช้เรซินแลกเปลี่ยนชนิดประจุบวก-กรดอ่อน Amberlite รุ่น IRC 76 และ 718 ในรูป Na^+ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดและการกลับคืนของโครเมียม (III) มากกว่าเรซินแลกเปลี่ยนชนิดประจุบวกกรดแก่ Amberlite IR 120 ที่อยู่ในรูป Na^+ เช่นเดียวกัน แต่เรซินแลกเปลี่ยนชนิดประจุบวกกรดแก่ Amberlite IR 120 มีประสิทธิภาพในการกำจัดเมื่ออยู่ในรูป H^+ และยังพบว่าสภาวะที่เหมาะสมอยู่ที่ความเข้มข้นของโครเมียม (III)

เอกสารเกี่ยวกับ 10 mg/L, pH เท่ากับ 5, ระยะเวลาการปั่นกวน 20 นาที และปริมาณเรซิน 250 mg ถ้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ศึกษาสปีซีโครเมียม (III) สำหรับความเข้มข้นและ pH ที่เหมาะสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MINTEQA2 โดยศึกษาช่วง pH 1-8 และช่วงความเข้มข้น 5-100 mg/L ในการทดลองแบบแบตช์ พบสปีซี $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$ ปริมาณมากในช่วง pH 5 ที่ความเข้มข้น 10 mg/L ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมมีความสอดคล้องกันกับผลการทดลอง

Gode, F. and Pehlivan, E. (2003) ทำการศึกษาการเปรียบเทียบของคีเลตติ้งเรซิน แลกเปลี่ยนประจุสองยี่ห้อสำหรับการกำจัดโครเมียม (III) จากสารละลาย ซึ่งเป็นเรซินที่มีรูพรุนขนาดใหญ่และมีหมู่ฟังก์ชัน iminodiacetic acid (IDA) โดยได้ศึกษาผลของความเข้มข้น, อุณหภูมิ และค่าพีเอช ที่มีต่อคุณสมบัติการดูดซับโครเมียม (III) และได้ทำการวิเคราะห์ประจุโครเมียม (III) ที่ติดอยู่บนเรซินและความเข้มข้นที่สถานะสมดุลด้วยเครื่อง ICP spectrophotometer พบว่าที่ค่า pH เท่ากับ 4.5 เกิดการดูดซับประจุโครเมียมได้สูงสุด และค่า pH มีผลอย่างมากต่อค่าคงที่สมดุล โดยเรซินยี่ห้อ Lewatit TP 207 มีค่าคงที่สมดุลเท่ากับ 320 และเรซินยี่ห้อ Chelex-100 มีค่าคงที่สมดุลเท่ากับ 7 นอกจากนี้ยังพบว่าสถานะสมดุลมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับและพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และพบว่าที่ค่า pH 4.5 ซึ่งเรซินมีความสามารถในการดูดซับได้สูงสุด เรซินยี่ห้อ Chelex-100 มีค่าเท่ากับ 0.288 mmol Cr (III) /g และเรซินยี่ห้อ Lewatit TP 207 มีค่าเท่ากับ 0.341 mmol Cr (III) /g และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสามารถทำให้ค่าคงที่สมดุลการดูดซับประจุโครเมียม (III) เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย

Kocaoba, S. and Akin, G. (2005) ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียม (III) และแคดเมียม (II) จากน้ำเสียสังเคราะห์ ในการศึกษา ผู้วิจัยได้ใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่แรง เช่น เรซินยี่ห้อ Amberlite IR 120 สำหรับการกำจัดโครเมียมและแคดเมียม เตรียมเรซินในรูปประจุบวกสองรูปที่แตกต่างกัน เช่น Na^+ และ H^+ และศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโดยทำการทดลองแบบแบตช์ ศึกษาที่ศึกษาได้แก่ ช่วงความเข้มข้นระหว่าง 2-50 mg/L, ช่วงค่า pH 2-10, ระยะเวลาปั่นกวนที่ 5-60 นาที และปริมาณเรซินที่ใช้ 50-1000 mg ความสามารถในการแลกเปลี่ยน, ปริมาณความชื้น ความเร็วในการปั่นกวนที่ใช้ 2000 rpm ระหว่างการทดลอง ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นสุดท้ายของโครเมียมและแคดเมียมโดยเครื่อง Atomic Absorbtion Spectrometer (AAS) ผลการทดลองพบว่าที่สถานะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมีความเข้มข้นที่ 20 mg/L, ค่าพีเอชที่ 5.5, ระยะเวลาปั่นกวนที่ 20 นาที และปริมาณเรซินที่ใช้ 100 mg แสดงว่าเรซินยี่ห้อ Amberlite IR 120 ที่ในรูปประจุบวกของ Na^+ มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้ดีสำหรับการกำจัดและการกลับคืนของโครเมียมและแคดเมียม

Gode, F. and Pehlivan, E. (2006) ศึกษาการกำจัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุ 2 ยี่ห้อ คือ ยี่ห้อ Lewatit S 100 และยี่ห้อ Chelex-100 โดยศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ, ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะ, ระยะเวลาการสัมผัส, ค่า pH และไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียม (III) ผู้วิจัยได้ทำการทดลองแบบแบตช์ พบว่าเรซินยี่ห้อ Lewatit S 100 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับโครเมียม (III) ที่น่าสังเกต คือ มีการแลกเปลี่ยนประจุค่อนข้างรวดเร็ว และมีจุดสมดุลหลังระยะเวลาการสัมผัสที่ 150 นาที ในกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ ค่า pH ในช่วง 2.8-4.0 เป็นช่วงที่มีการกำจัดโครเมียม (III) ได้สูงสุดที่ความเข้มข้นโครเมียม (III) เริ่มต้น 1.0×10^{-3} M ที่ค่า pH 3.5 มีค่าคงที่สมดุลของเรซินยี่ห้อ Lewatit S 100 เท่ากับ 36.67 และที่ค่า pH 4.5 มีค่าคงที่สมดุลของเรซินยี่ห้อ Chelax-100 เท่ากับ 6.64 ผู้วิจัยได้พลอตกราฟแลงเมียร์ไอโซเทอร์มเพื่อสังเกตปริมาณของประจุที่แลกเปลี่ยน พบว่าจุดสมดุลมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูงสุดของเรซินยี่ห้อ Lewatit S 100 ที่สภาวะสมดุล ค่า pH 3.5 เท่ากับ 0.39 mmol Cr (III) /g และยี่ห้อ Chelex-100 ที่สภาวะสมดุล ค่า pH 4.5 เท่ากับ 0.29 mmol Cr (III) /g นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสามารถส่งผลให้ค่าคงที่สมดุล (K_d) การดูดซับประจุโครเมียม (III) ของเรซินทั้งสองยี่ห้อเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่า เรซินยี่ห้อ Lewatit S 100 มีความสามารถในการดูดซับโครเมียม (III) มากกว่าเรซินยี่ห้อ Chelex-100 อย่างเห็นได้ชัด

Gode, F. and Pehlivan, E. (2007) ศึกษาการกำจัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้คีเลตเรซิน b-DAEG-sporopollenin และ CEP-sporopollenin, กลไกต่างๆ รวมทั้งการแลกเปลี่ยนประจุ, การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและการดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับ โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษาในครั้งนี้เพื่อเตรียมคีเลตเรซินขึ้นมาใหม่และศึกษาความสามารถในการดูดซับโครเมียม (III) โดยใช้เรซิน b-DAEG-sporopollenin และ CEP-sporopollenin และแปรค่าความเข้มข้นของโครเมียม (III) ในช่วง 1×10^{-4} - 1×10^{-3} mol/L, pH 3-8 และอุณหภูมิ $20-65 \pm 1$ °C เตรียมสารละลายสต็อกของโครเมียม (III) ที่ความเข้มข้น 1×10^{-3} mol/L จากการละลาย $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ 0.2380 g ในน้ำกลั่นปริมาตร 1000 mL วิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียม (III) ด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Spectrometry (ICP-AES) ผลการวิเคราะห์การดูดซับพบว่าที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโครเมียม (III) แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการดูดซับบนเรซินที่เป็นไปตามไอโซเทอร์มแลงเมียร์ ผู้วิจัยพบว่าค่าคงที่แลงเมียร์ Γ_{max} และ k ที่อุณหภูมิ 20 ± 1 °C ของ b-DAEG-sporopollenin ในการดูดซับโครเมียม (III) เท่ากับ 1.23, 84.84 mmol/g และของ CEP-sporopollenin เท่ากับ 133.33, 10.39 mmol/g ตามลำดับ เปรียบเทียบการกำจัดโครเมียม (III) ที่สูงที่สุดอยู่ใกล้เคียงที่ค่า pH เท่ากับ 6 โดยที่เรซิน b-DAEG-sporopollenin มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 90.25 และเรซิน CEP-sporopollenin เท่ากับ 88.94 และผู้วิจัยได้เลือก pH 5.5 เป็น pH ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม (III) ผู้วิจัยอธิบายการดูดซับโครเมียม (III) ด้วยไอโซเทอร์มแลงเมียร์กับเรซินทั้งสองชนิด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อความเข้มข้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครเมียม (III) เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นและการดูดซับลดลงแสดงว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพและในทางตรงกันข้ามการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแสดงว่าเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีและกายภาพของพื้นผิวดูดซับ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังคำนวณจลนศาสตร์และพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ เช่น เอนทัลปี (ΔH°), พลังงานอิสระ (ΔG°) และ เอนโทรปี (ΔS°) ค่าเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการดูดซับโครเมียม (III) บนเรซิน b-DAEG-sporopollenin และ CEP-sporopollenin เป็นกระบวนการคายความร้อนและที่อุณหภูมิสูงมีความเหมาะสมกับกระบวนการดูดซับมากกว่า

Karale, R.S. *et al.* (2007) โครเมียมเป็นหนึ่งในโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูงซึ่งมาจากอุตสาหกรรมต่างๆ สารประกอบโครเมียมโดยเฉพาะอย่างยิ่งโครเมียม (VI) เป็นที่ทราบกันว่าเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ วัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อเลือกใช้วิธีการที่พัฒนาเทคนิคให้มีความเหมาะสมเพื่อป้องกันมลพิษจากโลหะหรือเพื่อลดปริมาณโลหะให้อยู่ในระดับที่ต่ำมากๆ ด้วยการพิจารณาต้นทุนที่เหมาะสม การวิเคราะห์ทางเคมีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่อลดความเป็นพิษของโครเมียม (VI) ด้วยการรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปของโครเมียม (III) โดยใช้ตัวรีดิวซ์ (reducing agents) เช่น เฟอร์รัสซัลเฟต และโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ และการเติมเบสเพื่อตกตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ การทดลองทั้งหมดนี้ได้ทำเพื่อศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการเกิดรีดักชันและค่า pH ในการรีดักชันจากปริมาณตัวรีดิวซ์ในปริมาณต่างๆ ในงานวิจัยนี้ การกำจัดและการกลับคืนของโครเมียมได้พยายามเน้นการศึกษาที่ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

ผลการทดลองพบว่า ใช้เฟอร์รัสซัลเฟตมากกว่า 2,000 mg/L และต้องทำที่ค่า pH เท่ากับ 1 ขณะที่ใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์แค่ 360 mg/L และทำที่ค่า pH ประมาณ 2 ถ้าไม่พิจารณาถึงค่า pH เฟอร์รัสซัลเฟตรีดิวซ์โครเมียม (VI) เป็นโครเมียม (III) ได้ 57.47% และใช้เวลาในการเกิดรีดักชันอย่างน้อย 60 นาที ขณะที่โซเดียมเมตาไบซัลไฟตรีดิวซ์โครเมียม (VI) เป็นโครเมียม (III) ได้ 75.86% และใช้เวลาเกิดการรีดักชันเพียง 30 นาที ที่ค่า pH 9.5 ปูนขาวมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตกตะกอนโครเมียม (III) เป็น $\text{Cr}(\text{OH})_3$ โดยใช้ปริมาณปูนขาวเท่ากับ 1,850 mg/L การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างเดียวไม่สามารถตกตะกอนโครเมียม (III) ได้อย่างสมบูรณ์ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ที่ 372 และ 12.5 mg/L ตามลำดับ หลัง pH 12.5 โครเมียม (III) ที่ตกค้างอยู่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกลับมาละลายใหม่ของโครเมียม (III) การใช้ปูนขาวและโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกันสามารถตกตะกอนโครเมียม (III) ได้มากกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างเดียวแต่มีประสิทธิภาพน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนขาวอย่างเดียว และการกลับคืนของโครเมียมใช้ H_2SO_4 เข้มข้น 1 N ปริมาตร 400 mL/L สลัดจ์ของโครเมียม พบว่ามีการกลับคืนประมาณ 90% ซึ่งนั่นก็ช่วยลดต้นทุนในการกำจัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mustafa, S. *et al.* (2008) ศึกษาการกำจัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนชนิดประจุบวก-กรดอ่อน ยี่ห้อ Amberlite รุ่น IRC-50 ภายใต้สภาวะการทดลองที่มีความเข้มข้นของไอออนโลหะ 0.962-19.231 mmol/L และอุณหภูมิ 293-313 K โดยใช้ค่า pH เริ่มต้นอยู่ระหว่าง 2.50-3.50 ผู้วิจัยใช้สมการแลงเมียร์ในการอธิบายสภาวะสมดุลและคำนวณพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ (ΔH° , ΔS° และ ΔG°) จากการแลกเปลี่ยนประจุโครเมียมบนเรซิน ผลการทดลองที่ได้พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนชนิดประจุบวก-กรดอ่อน ยี่ห้อ Amberlite รุ่น IRC-50 เมื่ออยู่ในสารละลายที่เป็นกรดปานกลางจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนโครเมียม (III) สูง โดยความสามารถในการแลกเปลี่ยนสูงสุดมีความเข้มข้นของโครเมียม 0.694 mmol/g ที่อุณหภูมิ 313 K และ pH เท่ากับ 3 ระยะเวลาการสัมผัส 2 ชั่วโมง การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในระบบแสดงให้เกิดการแข่งขันเข้าไปแลกเปลี่ยนประจุที่ตำแหน่งต่างๆ บนเรซินระหว่างไอออนของ $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$ และ H^+ และพบว่าในสารละลายที่มีความเข้มข้นโครเมียม (III) ต่ำๆ เรซินจะดูดซับ H^+ ได้มากกว่าโครเมียม (III) ค่าพลังงานกระตุ้นที่สูง แสดงให้เห็นว่ากระบวนการแพร่เป็นการแพร่แบบธรรมดา พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ ได้ค่า ΔG° เป็นลบที่อุณหภูมิต่างๆ ค่า ΔG° ที่เป็นลบมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิชี้ให้เห็นว่าการดูดซับโครเมียม (III) สามารถเกิดขึ้นได้เองมากขึ้น ค่า ΔH° และ ΔS° เป็นบวกชี้ให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับโครเมียม (III) เป็นกระบวนการดูดความร้อนและเป็นกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นเองได้

Mustafa, S. *et al.* (2010) ได้ศึกษาธรรมชาติของเคาน์เตอร์ไอออน ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่จะมีผลต่อจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (III) ด้วยตัวแลกเปลี่ยนประจุแบบกรดแก่ยี่ห้อ Amberlyst.15 ผู้วิจัยพบว่า อัตราการดูดซับเรียงลำดับจาก $\text{H}^+ > \text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$ และพบว่าค่า pH เพิ่มขึ้นตามเวลาระหว่างที่ตัวดูดซับทำการดูดซับในรูป Li^+ , Na^+ และ Ca^{2+} และลดลงระหว่างการดูดซับในรูป H^+ สำหรับในกรณีที่ตัวดูดซับอยู่ในรูป Al^{3+} ค่า pH ค่อนข้างคงที่ ผู้วิจัยใช้จลนศาสตร์อธิบายสมการการแพร่ทั้งการแพร่เข้าสู่ผิวและอนุภาคของตัวดูดซับ พบว่าค่าอัตราคงที่ของการแพร่เข้าอนุภาคตัวดูดซับเป็นไปตามลำดับที่กล่าวถึงก่อนหน้านั้น และได้คำนวณพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ซึ่งผลการคำนวณพลังงานที่ได้มีค่าต่ำ นั้นเป็นค่าที่ช่วยยืนยันว่าเกิดการแพร่แบบธรรมดาในกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ และคำนวณพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ของพลังงานกระตุ้นด้วยสมการไอริง (Eyring equation) พบว่าพลังงานกระตุ้นและความร้อนแฝงเพิ่มขึ้นขณะที่เอนโทรปี การกระตุ้นของตัวดูดซับลดลงจากในรูป H^+ ไปจนถึงรูป Na^+ และพลังงานอิสระของการกระตุ้นก็ลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อตัวดูดซับอยู่ในรูป H^+ , Li^+ , Na^+ , Ca^{2+} และ Al^{3+} พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ของการกระตุ้นแสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับโครเมียม (III) มีเอนโทรปีเป็นตัวขับเคลื่อนให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุและการดูดซับนี้ขึ้นอยู่กับรัศมีไอออนและประจุของเคาน์เตอร์ไอออนเริ่มต้นที่อยู่ในเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sahu, S.K. *et al.* (2009) ศึกษาการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว จากโรงฟอกหนังด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยใช้เรซิน Indion790 ซึ่งเป็นเรซินประจุบวกชนิดกรดแก่ที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากและมีหมู่ฟังก์ชันซัลโฟนิคโพลิสไตรีน จากผลการทดลองพบว่าเรซินชนิดนี้จะดูดซับโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 500 ppm ในช่วง pH 0.5-3.5 โดยที่ pH 3.5 สามารถกำจัดโครเมียม (III) ให้ลดลงได้ 92-76% ผู้วิจัยอธิบายการดูดซับโครเมียม (III) ของเรซิน Indion790 โดยกราฟพลุนด์ลิชไอโซเทอร์ม ได้ค่าคงที่ของการดูดซับเท่ากับ K_f เท่ากับ 8.57 แสดงว่าประจุของโลหะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับเรซินได้อย่างสมบูรณ์ การคายซับโครเมียม (III) ออกจากเรซินสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโดยใช้สารละลาย H_2SO_4 เข้มข้น 20% เป็นตัวชะ ซึ่งผู้วิจัยทำการชะทั้งหมดสามครั้ง พบว่าในการชะครั้งแรกโครเมียม (III) ถูกชะออกมาได้ 93% ในการชะครั้งที่สองเท่ากับ 89% และการชะครั้งที่สามพบว่าไม่มีโครเมียมถูกชะออกมา ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าโครเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบ $Cr(OH)SO_4$ ซึ่งเป็นรูปที่ชะออกมาได้ยากในสภาวะการทดลองปกติ

Sowmya, T.P. *et al.* (2013) โครเมียมเป็นหนึ่งในโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูงซึ่งมาจากอุตสาหกรรมต่างๆ วัตถุประสงค์หลักคือเพื่อเลือกใช้วิธีการที่พัฒนาเทคนิคให้มีความเหมาะสมเพื่อป้องกันมลพิษจากโลหะหรือเพื่อลดปริมาณโลหะให้อยู่ในระดับที่ต่ำมากๆ ในขั้นตอนแรกการทดลองใช้ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโพแทสเซียมไดโครเมต เพื่อหา pH ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน, ปริมาณของตัวรีดิวซ์ที่เหมาะสมและช่วงเวลาการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่เหมาะสมสำหรับเพอร์สัลเฟตและโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ การลดปริมาณโครเมียม (VI) ในน้ำเสียสังเคราะห์ถูกใช้ในการหา pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอน, ปริมาณที่เหมาะสมของสารที่ทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งสารที่ใช้ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์, โซเดียมไฮดรอกไซด์ และการใช้สารเคมีทั้งสองร่วมกัน เมื่อผู้วิจัยได้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมจากการทดลองจากน้ำเสียสังเคราะห์แล้วจึงได้มีการนำมาทดลองกับน้ำเสียอุตสาหกรรมเพื่อกำจัดโครเมียม (VI) และโครเมียม (III) ในสภาวะดังกล่าว

ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างเพอร์สัลเฟตและโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ พบว่าโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์มีประสิทธิภาพมากกว่าในการรีดิวซ์โครเมียม (VI) ให้เป็นโครเมียม (III) ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่สมบูรณ์ต้องใช้เพอร์สัลเฟตที่ค่า pH 1 ปริมาณมากกว่า 1000 mg/L ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 75 นาที ขณะที่โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เกิดปฏิกิริยารีดักชันสมบูรณ์ที่ค่า pH 2 ปริมาณ 100 mg/L ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 50 นาที สำหรับการตกตะกอนโครเมียม (III) ให้เป็นโครเมียมไฮดรอกไซด์ ($Cr(OH)_3$) ผู้วิจัยได้ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารตกตะกอน (Precipitating agent) ปริมาณสารตกตะกอนที่จะทำให้การตกตะกอนมีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่ากับ 30 mg/L สำหรับ

เอกสารประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (III) เมื่อใช้เพอร์สัลเฟตเป็นตัวรีดิวซ์ หลังตกตะกอนด้วย $Ca(OH)_2$ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วมกับ NaOH มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม (III) เท่ากับ 99 ที่ค่า pH 10.5 มีปริมาตรสลัดจ์เกิดขึ้น 36 mL/L และเมื่อใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เป็นตัวรีดิวซ์ มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม (III) เท่ากับ 99.6 ที่ค่า pH 10.2 หลังตกตะกอนด้วย Ca(OH)_2 ร่วมกับ NaOH มีปริมาตรสลัดจ์เกิดขึ้น 10.5 mL/L จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ใน การกำจัดโครเมียม Ca(OH)_2 ร่วมกับ NaOH เป็น สารตกตะกอนที่ดีที่สุด

ชัชฎาพร (2545) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนน้ำไอออนที่เตรียมจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ต้นมันสำปะหลัง ใบสับประรด และ กาบมะพร้าว ชนิดไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% ความเข้มข้นของโลหะหนัก (นิกเกิล ทองแดง และสังกะสี) ที่ ทำการศึกษา ได้แก่ 5, 10, 20 และ 50 mg/L โดยทำการทดลองแบบแบตช์ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยน ไอออนที่เตรียมจากกากบะพร้าวชนิดไม่ปรับสภาพจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้สูงกว่า ชนิดที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5 % ชนิดที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% และชนิดที่ปรับสภาพ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 N ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกากบะพร้าวมีประสิทธิภาพ ในการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี จากน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง และใบสับประรด โดยมีประสิทธิภาพใน การกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิล และ สังกะสี เฉลี่ยเท่ากับ 67.72 % 22.55% และ 44.78% ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมี ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักดีที่สุดในความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย 5 mg/L โดยพบว่าเมื่อ ความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง นอกจากนี้ผลการกำจัดโลหะ หนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีความเข้มข้นของทองแดง นิกเกิล สังกะสี เริ่มต้นเท่ากับ 3.930 4.034 และ 576 mg/L ตามลำดับ พบว่ากากบะพร้าวชนิดไม่ปรับสภาพสามารถกำจัดโลหะหนัก ดังกล่าวได้ เฉลี่ยเท่ากับ 85.80 65.23 และ 90.43 mg/L ตามลำดับ

พอดตา (2547) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออน ที่ผลิตจาก Hydroxyethyl Cellulose โดยนำเรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ทำลองจับไอออน ของทองแดง (Cu^{2+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) โคบอลต์ (Co^{2+}) สังกะสี (Zn^{2+}) นิกเกิล (Ni^{2+}) และแคดเมียม (Cd^{2+}) จากสารละลายสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L ในการทดลองใช้ เรซินที่ สังเคราะห์ได้แต่ละชนิดหนัก 0.2 g ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้กระบวนการแบบแบตช์ พบว่า เรซินดูดจับไอออนของทองแดง ตะกั่ว และโคบอลต์ ได้มากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งให้ ประสิทธิภาพได้ดีกว่า สังกะสี นิกเกิล และแคดเมียม ศึกษาเปรียบเทียบการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Batch process กับ Column process พบว่า ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักแบบ Column process ต่ำกว่าแบบ Batch process แต่ก็ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

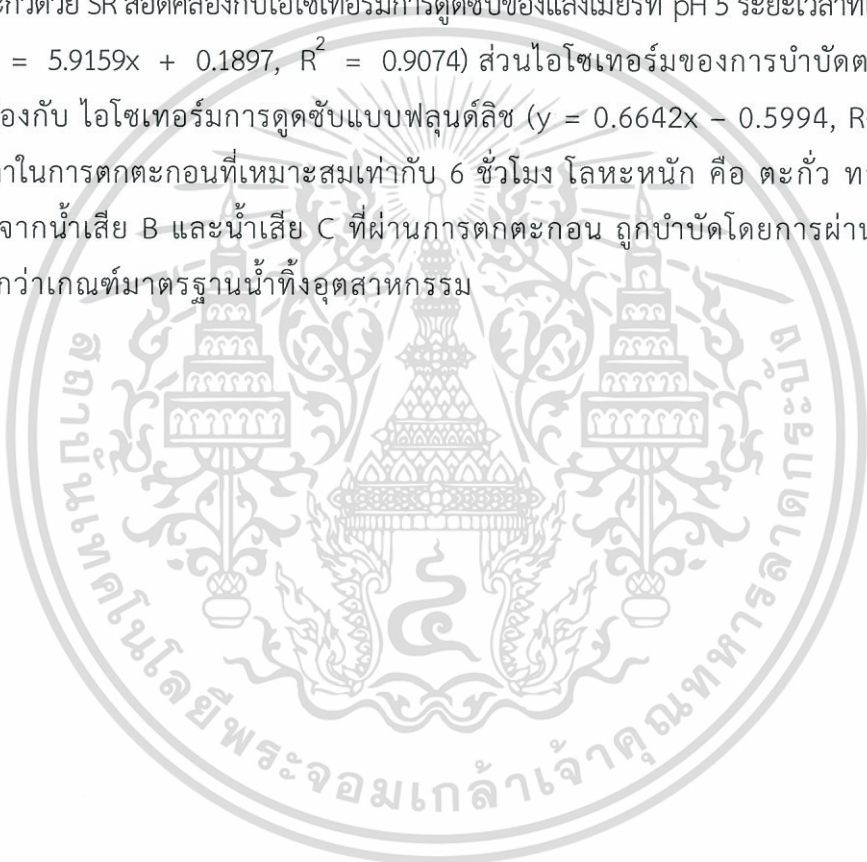
สนับสนุน การนำเรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนจากอนุพันธ์ของ Hydroxyethyl Cellulose ไปใช้ประโยชน์ในการกำจัดโลหะหนักบางชนิดออกจากรน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมได้

นันทชัย และคณะ (2553) ศึกษาการดูดซับไอออนของโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี เหล็ก และโครเมียม ด้วยตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมเผาในสภาวะอากาศไหลผ่านที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับ ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองแบบแบตช์ และการทดลองแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง สำหรับการทดลองแบบแบตช์ทำการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ 3 แบบ คือ แบบเส้นตรง แบบแลงเมียร์ และแบบฟลูนต์ลิช โดยตัวดูดซับมีประสิทธิภาพของการดูดซับเหล็กได้ดีที่สุดถึง 92.19% ส่วนประสิทธิภาพของการดูดซับแคดเมียม สังกะสี และโครเมียม มีค่าเท่ากับ 90.62% 91.82% และ 24.30% ตามลำดับ ไอโซเทอร์มของการดูดซับ สังกะสี เหล็ก และโครเมียม มีแนวโน้มของความสัมพันธ์สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบฟลูนต์ลิช และแคดเมียมสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ สำหรับการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์บรรจุแบบเบดนิ่ง ประสิทธิภาพในการดูดซับทั้งแคดเมียมและสังกะสีมีค่าเท่ากัน คือ 50% ซึ่งมีประสิทธิภาพดีที่สุด ส่วนประสิทธิภาพของการดูดซับตะกั่วและเหล็ก คือ 40% และ 28.75% ตามลำดับ ในการดูดซับโครเมียม ตัวดูดซับไม่ดูดซับไอออนของโครเมียมของการทดลองแบบต่อเนื่อง จะเห็นได้ว่าการดูดซับไอออนของโลหะหนักแบบแบตช์มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบต่อเนื่อง

รุจา และคณะ (2556) ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวก Lewatit MonoPlus S108 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent Resin, SR) ซึ่งเป็นเรซินชนิด กรดแก่ โดยทำการทดลอง แบบแบตช์ ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และค่าพีเอช ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแคดเมียม (Cd^{2+}) 10 mg/L จำนวน 25 mL แปรค่าน้ำหนักของ SR 1, 3 และ 5 g จากการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม และเข้าสู่สมดุล พบว่าที่สภาวะการบำบัด Cd^{2+} ในน้ำเสียสังเคราะห์ ใช้เวลา 10 นาที ที่พีเอชเดิมของน้ำเสียสังเคราะห์ 5.44 สามารถบำบัดได้สูงสุดมากกว่า 99% ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการบำบัด Cd^{2+} แปรค่าน้ำหนักของ SR 0.1 ถึง 5 g พบว่าเป็นไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นและแบบฟลูนต์ลิชมีความสอดคล้องกัน เมื่อใช้น้ำกลั่นและกรดไฮโดรคลอริก 5% โดยน้ำหนักเป็นตัวชะละลาย Cd^{2+} จากเรซินที่ใช้บำบัด พบว่ากรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวชะละลายที่ดีกว่าน้ำกลั่น ได้ Cd^{2+} กลับคืนถึง 59.68%

ชนากานต์ และคณะ (2558) ศึกษาการนำเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้เรซินในรูปที่ผ่านการใช้งานแล้วจากระบบผลิตน้ำสะอาด (Spent Resin, SR) และเรซินที่ผ่านการรีเจนเนอเรตด้วยกรด (Regenerated Resin, RR) ทำการทดลองแบบแบตช์ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดตะกั่ว ได้แก่ เวลาและค่าพีเอช กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pH ที่เหมาะสม โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว (set A) ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 mg/L แปรค่าอัตราส่วนระหว่าง เรซินกับน้ำเสียเป็น 8, 16 และ 24 g/L และทำการศึกษาหาไอโซเทอร์มการดูดซับ ทำการแปรค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 20-100 mg/L อัตราส่วนระหว่างเรซินกับน้ำเสียเป็น 16 g/L การศึกษาแบบคอลัมน์ จะใช้น้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการ (set B) มาบำบัดโดยตรงด้วย SR ส่วน น้ำเสีย set C ทำการตกตะกอนโดยการปรับ pH ให้เท่ากับ 11.5 เพื่อให้เกิดการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเติมโซเดียมเมเตบิซัลไฟด์ (วิเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนักในสารละลายโดยวิธี U.S. EPA 3050B ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy) ผลการทดลองพบว่าสามารถบำบัดโลหะตะกั่วสูงถึง 99.14% ไอโซเทอร์มของการบำบัดตะกั่วด้วย SR สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ที่ pH 5 ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุล 30 นาที ($y = 5.9159x + 0.1897, R^2 = 0.9074$) ส่วนไอโซเทอร์มของการบำบัดตะกั่วด้วย RR สอดคล้องกับ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟลูนต์ลิช ($y = 0.6642x - 0.5994, R^2 = 0.7595$) และเวลาในการตกตะกอนที่เหมาะสมเท่ากับ 6 ชั่วโมง โลหะหนัก คือ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีจากน้ำเสีย B และน้ำเสีย C ที่ผ่านการตกตะกอน ถูกบำบัดโดยการผ่านคอลัมน์ SR มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

1. เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก DOWEX™ IR 100 H/Na ที่ผ่านการใช้งานแล้ว
2. โครเมียม (III) คลอไรด์ ($\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์ (Analytical grade, AR)
3. แอมโมเนียมอะซิเตต ($\text{NH}_4\text{CH}_3\text{CO}_2$) ยี่ห้อ Lobal Chemie เกรด AR
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรด AR
5. ฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรด AR
6. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ยี่ห้อ Lobal Chemie เกรด AR
7. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ยี่ห้อ Lobal Chemie เกรด AR
8. กรดบอริก (H_3BO_3) ยี่ห้อ Lobal Chemie เกรด AR
9. โบโรโมครีซอลกรีน (Bromocresol Green) ยี่ห้อ APS Finechem เกรดห้องปฏิบัติการ
10. Methyl red ยี่ห้อ Fisher Scientific เกรดทั่วไป (General purpose grade, GR)
11. กรดไนตริก 98% (conc. HNO_3) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรด AR
12. โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) ยี่ห้อ Himedia เกรดห้องปฏิบัติการ
13. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรด AR
14. กรดซัลฟิวริก 98% (conc. H_2SO_4) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรด AR

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer, AAS) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น AA-200
2. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น New Classic MF (ML204)
3. เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ JSR รุ่น JSSI-100C ควบคุมอุณหภูมิที่ $30\text{ }^\circ\text{C}$
4. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น Seven Compact
5. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง ยี่ห้อ AZ Instrument รุ่น 8689
6. เครื่องปั่นกวน (Hotplate stirrer) ยี่ห้อ Stuart รุ่น CB162
7. ตู้อบความร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ Fisher Scientific
8. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น Five Easy Plus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เครื่องกรองแบบลดความดัน ยี่ห้อ Tokyo Rikakikai อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เครื่องกลั่น (Micro Kjeldahl) พร้อมขวดกลั่น (Kjeldahl flask) ยี่ห้อ Buchi รุ่น K-350
11. เครื่องแก้วชนิดต่างๆ

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การสุ่มตัวอย่างเรซิน

เรซินที่ใช้ในการทดลองเป็นเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้วจากโรงงานผลิตน้ำสะอาด โดยนำเรซินที่มีสภาพแห้งทั้งหมดมาเทใส่ผ้าพลาสติกคลุมเกล้าให้เข้ากัน ทำการคลุกเกล้าอีกครั้ง โดยยกมุมผ้าพลาสติกที่ละ 2 มุม ที่อยู่ตรงข้ามกัน ทำสลับมุมกัน 3-4 ครั้ง หลังจากนั้นกองเรซินแห้งให้เป็นรูปฟลาซี แล้วใช้มือตบยอดกองให้แบนราบ หลังจากนั้นแบ่งเรซินแห้งเป็น 4 ส่วน เก็บตัวอย่างเรซินแห้งจากมุมทั้ง 4 และตรงกลาง

3.2.2 ศึกษาสมบัติทั่วไปของเรซิน

นำเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว มาทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ โดยใช้เรซินแห้งในการหาค่ากรด-ด่าง (pH) อัตราส่วน 1:1, ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) อัตราส่วน 1:5, ค่าของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solid, TDS) และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Capacity, CEC) ด้วยวิธีแอมโมเนียมอะซิเตด (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) จำนวน 3 ซ้ำ ส่วนเรซินเปียกจะใช้ในการหาค่าการอุ้มน้ำ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) จำนวน 3 ซ้ำ และใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

3.2.3 ศึกษาสมบัติทั่วไปของน้ำเสีย

นำน้ำเสียมารวัดค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่า pH, ค่าการนำไฟฟ้า, ค่าของแข็งละลายน้ำ, ค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential, ORP) (AWWA. Method 2580A, 2012) และวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (AWWA. Method 3030C, 2012) จำนวน 3 ซ้ำ

3.2.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักโครเมียม (III)

เตรียมสารละลายสต็อกโครเมียม (III) คลอไรด์ มวลโมเลกุล 266.48 g/mol ที่ระดับความเข้มข้น 1,000 mg/L โดยชั่งโครเมียม (III) คลอไรด์ 5.1250 g ละลายด้วยน้ำกลั่นอุ่น แล้วปรับปริมาตร 1000 mL นำสารละลายสต็อกเก็บไว้ในขวดพลาสติก เพื่อป้องกันการดูดซับไอออนที่ผิวภาชนะบรรจุ เมื่อใช้งาน ปิเปตสารละลายสต็อกเจือจางเป็น 10 mg/L แล้ว วัดค่า pH และค่าการนำไฟฟ้า (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียม (III) จากน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยวิธีการแบบแบตช์

3.2.5.1 การหาอัตราส่วนเรซินต่อน้ำเสีย 25 mL และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

1. ชั่งเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 0.5 g ลงในขวดพลาสติกขนาด 60 mL โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ ระดับความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ และทำการควบคุมที่ไม่ใส่เรซิน 1 ชุด
2. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที (rpm) ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 10 นาที
3. นำตัวอย่างตามระยะเวลาที่ระบุมากรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
4. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมด (Total Chromium) ตามข้อที่ 3.2.5.1.1
5. ทำซ้ำเหมือนข้อที่ 1-4 แต่ปรับเวลาเป็น 20, 30, 40, 50, 60, 180, 540, 720 และ 1,440 นาที ตามลำดับ
6. นำค่าโครเมียมที่ได้ไปพลอตกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดโครเมียม (III) กับเวลา เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม

3.2.5.1.1 การวิเคราะห์หาโครเมียมทั้งหมด (Total Chromium)

1. นำสารละลายที่กรองได้ ไปย่อยด้วยกรดไนตริก เข้มข้น 5 mL บนแผ่นความร้อนจนสารละลายใส ตามวิธีของ AWWA. Method 3030E, 2012
2. ทำการกรองตัวอย่างที่ย่อยแล้วด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และปรับปริมาตรให้เป็น 25 mL ด้วยน้ำกลั่น
3. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดด้วยเครื่อง AAS ตามวิธีของ AWWA. Method 3111B, 2012

3.2.5.2 การหาพีเอชที่เหมาะสม

1. ทำการปรับ pH เป็น 2 โดยใช้อัตราส่วนเรซินที่ได้จากการทดลอง 3.2.6.1 ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ ระดับความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ และทำการควบคุมที่ไม่ใส่เรซิน 1 ชุด
2. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 rpm โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากการทดลอง 3.2.5.1
3. นำตัวอย่างที่ได้มากรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
4. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Total Chromium ตามวิธีในข้อที่

3.2.5.1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำซ้ำเหมือนข้อที่ 1-4 แต่ปรับค่า pH เป็น 3, 4, 5 และใช้ pH เดิมของน้ำเสียสังเคราะห์ ตามลำดับ

6. นำค่าโครเมียมที่ได้ไปพลอตกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดโครเมียม (III) กับพีเอช เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสม

3.2.6 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของเรซินกับโครเมียม (III)

3.2.6.1 ปริมาณของเรซิน

1. ทำการแปรค่าอัตราส่วนเรซิน 0.1 g โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ ระดับความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL และปรับค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.5.2 ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ และทำชุดการควบคุมที่ไม่ใส่เรซิน 1 ชุด

2. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 rpm โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากการทดลอง

3.2.5.1

3. นำตัวอย่างที่ได้มากรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

4. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Total Chromium ตามวิธีในข้อที่

3.2.5.1.1

5. ทำซ้ำเหมือนข้อที่ 1-4 แต่ปรับอัตราส่วนเรซินเป็น 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 และ 1 g ตามลำดับ

6. นำค่าโครเมียมที่ได้ไปหาไอโซเทอร์มการดูดซับของเรซินกับโครเมียม (III) แบบเส้นตรง แล่งเมียร์ และฟลูนดัลลิก

3.2.6.2 ความเข้มข้นของโครเมียม (III)

1. ชั่งเรซินที่ได้จากการทดลอง 3.2.5.1 ทำการแปรค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ระดับความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL และปรับค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.5.2 ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ และทำชุดการควบคุมที่ไม่ใส่เรซิน 1 ชุด

3.2.5.2 ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ และทำชุดการควบคุมที่ไม่ใส่เรซิน 1 ชุด

2. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 rpm โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากการทดลอง

3.2.5.1

3. นำตัวอย่างที่ได้มากรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

4. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Total Chromium ตามวิธีในข้อที่

3.2.5.1.1

5. ทำซ้ำเหมือนข้อที่ 1-4 แต่ปรับค่าความเข้มข้นเป็น 30, 60, 90 และ 120 mg/L ตามลำดับ

6. นำค่าโครเมียมที่ได้ไปหาไอโซเทอร์มการดูดซับของเรซินกับโครเมียม (III) แบบเส้นตรง แล่งเมียร์ และฟลูนดัลลิก

3.2.7 การศึกษาการคายซั้บ

1. ชั่งเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 1 g ลงในขวดพลาสติกขนาด 60 mL โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ระดับความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ และทำชุดการควบคุมที่ไม่ใส่เรซิน 1 ชุด
2. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 rpm ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 180 นาที
3. นำตัวอย่างตามระยะเวลาที่ระบุมากรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
4. นำเรซินที่ผ่านการดูดซับโครเมียม (III) ในข้อ 1-3 จำนวน 1 g ทำการเติมน้ำกลั่นจำนวน 5 mL เพื่อให้เกิดการคายซั้บ
5. ทำการเขย่าและปฏิบัติเหมือนข้อ 2 และ 3
6. นำสารละลายที่กรองได้ ไปย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 5 mL บนแผ่นความร้อนจนสารละลายใส ตามวิธีของ AWWA. Method 3030E, 2012
7. ทำการกรองตัวอย่างที่ย่อยแล้วด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และปรับปริมาตรให้เป็น 10 mL ด้วยน้ำกลั่น
8. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียม (III) ทั้งหมดที่คายซั้บออกมาด้วยเครื่อง AAS ตามวิธีของ AWWA. Method 3111B, 2012
9. ทำการศึกษาการคายซั้บเหมือนข้อที่ 1-8 แต่เปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 8% v/v จำนวน 5 mL
10. นำเรซินที่ผ่านการคายซั้บในข้อ 9 มาทำการย่อย โดยบดเรซินให้ละเอียดและชั่งมา 0.1 g
11. ทำการย่อยและปฏิบัติเหมือนข้อ 6-8 เพื่อศึกษาสมมูลมวล

3.2.8 การศึกษาการบำบัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีการบำบัดแบบแบดซ์

1. ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยวัดค่า pH, ค่าการนำไฟฟ้า, ค่า TDS, ค่า ORP (AWWA. Method 2580A, 2012) และวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมทั้งหมด (AWWA. Method 3030C, 2012)
2. นำน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ ปริมาตร 500 mL ทำการเติม $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ในจำนวนที่มากเกินพอ เพื่อเปลี่ยนโครเมียม (VI) เป็นโครเมียม (III) อย่างสมบูรณ์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 5 นาที
3. ทำการตกตะกอนด้วย NaOH เพื่อให้ได้พีเอชมากกว่า 4.47 ดังตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ค (ข้อมูลที่ 12)
4. ทำการคนสารละลายให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้เวลานาน 1 ชั่วโมง
5. กรองสารละลายเพื่อแยกตะกอนด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
6. ทำการปรับพีเอชให้ได้ตามผลการทดลองที่ 3.2.5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว มาทำการทดลอง 3 ชุด ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการทดลอง 3 ชุด

ชุดการทดลอง	อัตราส่วนเรซิน (g)	ปริมาณน้ำเสีย (mL)	จำนวนรอบ
1	1	25	1
2	1	25	3
3	5	25	1

ทำการทดลอง 3 ชุด และทำชุดควบคุมที่ไม่ใส่เรซิน 1 ชุด

8. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 rpm โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากการทดลอง 3.2.5.1

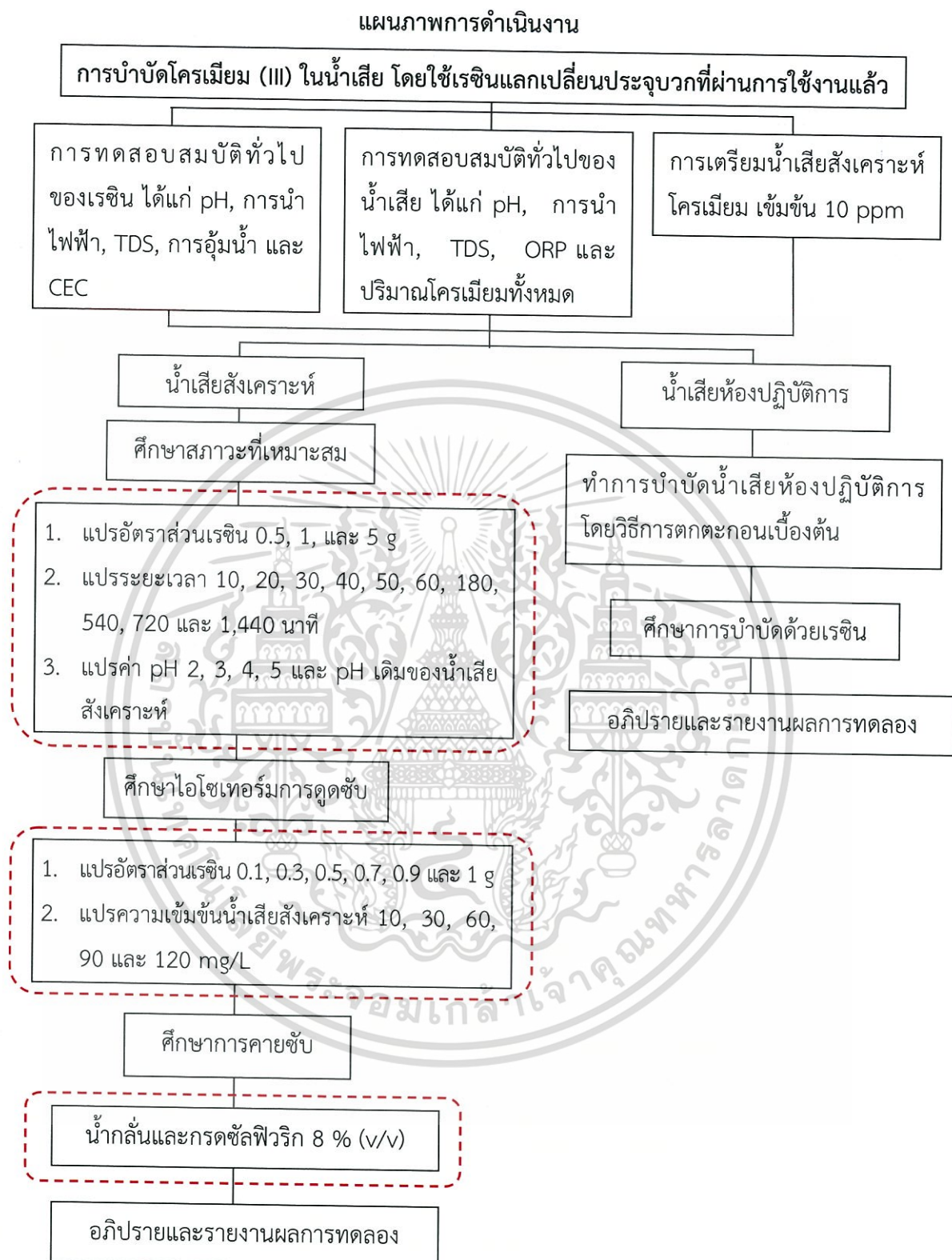
9. นำตัวอย่างที่ได้มากรองเพื่อแยกเรซินด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

10. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Total Chromium ตามวิธีในข้อที่

3.2.5.1.1

3.2.9 การประกันคุณภาพในการวิเคราะห์และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการประกันคุณภาพ โดยทำการตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือที่ใช้ว่ามีค่าเที่ยงตรงเหมาะสมแก่การใช้งาน และวิธีการทดลองที่ใช้ในนั้นได้รับการยอมรับเป็นมาตรฐานตาม AWWA, 2012 รวมถึงกราฟมาตรฐานที่ใช้มีค่า $R^2 = 0.99$ และได้ทำการตรวจสอบค่านัยสำคัญทางสถิติ ด้วย One-way ANOVA และ General Linear Model ซึ่งทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีของ Tukey ที่ความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน

เรซินที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว (SR) จากกระบวนการผลิตน้ำสะอาด ซึ่งผ่านการใช้งานหลายรอบจนไม่คุ้มทุนในการรีเจนเนอเรตเพื่อใช้ซ้ำ หรือรีเจนเนอเรตมาแล้วประมาณ 3 ครั้ง ลักษณะทางกายภาพของเรซิน มีลักษณะเป็นเม็ดพลาสติกกลมเล็ก สีน้ำตาลอ่อน และไม่มีกลิ่น ทำการเก็บรักษาโดยการนำเรซินแช่น้ำก่อนนำมาศึกษา ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน

พารามิเตอร์	SR	SR*
pH (อัตราส่วน 1:1)	6.27 (± 0.04)	7.14 (± 0.02)
ค่าการนำไฟฟ้า (อัตราส่วน 1:5), $\mu\text{S}/\text{cm}$	57.39 (± 0.14)	51.83 (± 0.03)
TDS (อัตราส่วน 1:5), mg/L	29.10 (± 0.44)	26.16 (± 0.01)
%การอุ้มน้ำ	42.64 (± 0.15)	52.97 (± 2.94)
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของเรซิน, meq/g	1.48 (± 0.24)	2.09 (± 0.42)

*ที่มา ชนากานต์ และคณะ (2558)

จากตารางที่ 4.1 พบว่าสมบัติเบื้องต้นของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมีความเป็นกรดเล็กน้อย ซึ่งค่าพีเอชเท่ากับ 6.27 ± 0.04 เนื่องจากมีไอออนบางชนิดอาจหลุดออกมาในสารละลายได้ เมื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าพบว่ามีค่าเท่ากับ $57.39 \pm 0.14 \mu\text{S}/\text{cm}$ ถือว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำกลั่นที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ (น้อยกว่า $2 \mu\text{S}/\text{cm}$) แสดงให้เห็นว่ามีไอออนหลุดออกมาจากเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วได้ สอดคล้องกับค่า TDS ที่ได้เท่ากับ $29.10 \pm 0.44 \text{ mg}/\text{L}$ เมื่อนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วไปแช่น้ำ และทำการชั่งน้ำหนัก พบว่ามีความสามารถในการอุ้มน้ำเท่ากับ $42.64 \pm 0.15\%$ และสอดคล้องกับงานวิจัยของชนากานต์ และคณะ (2558) ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วจากระบบผลิตน้ำสะอาด พบว่า มีความสามารถในการอุ้มน้ำเท่ากับ $52.97 \pm 2.94\%$ สุดท้ายในส่วนความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity, CEC) ของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมีค่าลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity, CEC) ของเรซินที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน มีค่าเท่ากับ $2.38 \text{ meq}/\text{g}$ ดูตัวอย่างการคำนวณดังภาคผนวก ค (ข้อมูลที่ 2) ซึ่งเรซินที่ผ่านการใช้งานมีค่า CEC เพียง $1.48 \pm 0.24 \text{ meq}/\text{g}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (III) เตรียมจากสาร $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ สำหรับศึกษาการกำจัดโครเมียม (III) และการทำไอโซเทอร์ม ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้ สารละลายใสไม่มีสี ไม่มีตะกอน ไม่มีกลิ่น โดยมีสมบัติเบื้องต้นดังตารางที่ 4.2 เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพีเอชลดลง เนื่องจาก CrCl_3 ทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ H^+ จึงส่งผลให้ค่าพีเอชลดลง (ปัญญา, 2558) ค่าการนำไฟฟ้า และค่า TDS เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารประกอบอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำจำพวกไอออนละลายออกมากับน้ำได้ดี (มันสิน, 2545)

ตารางที่ 4.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (III)

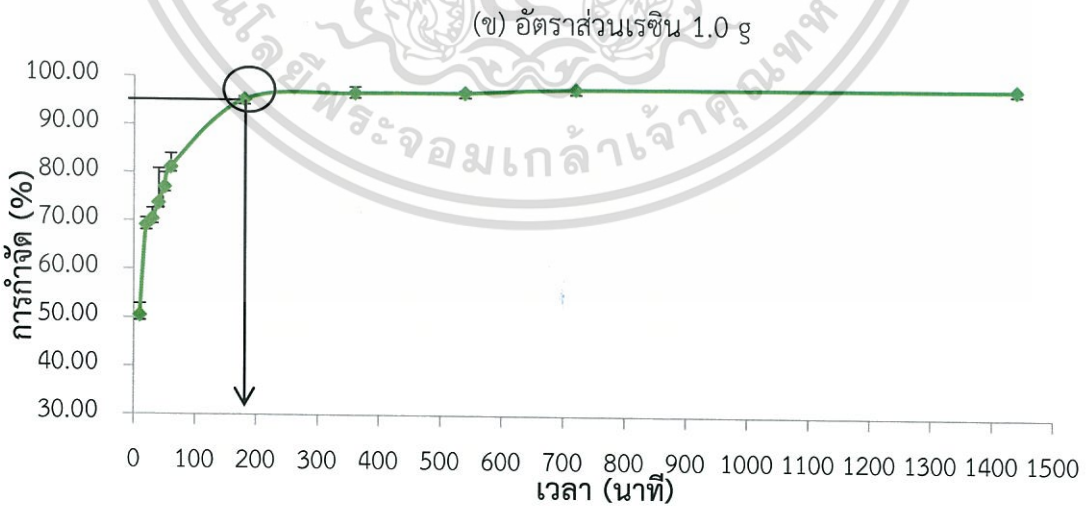
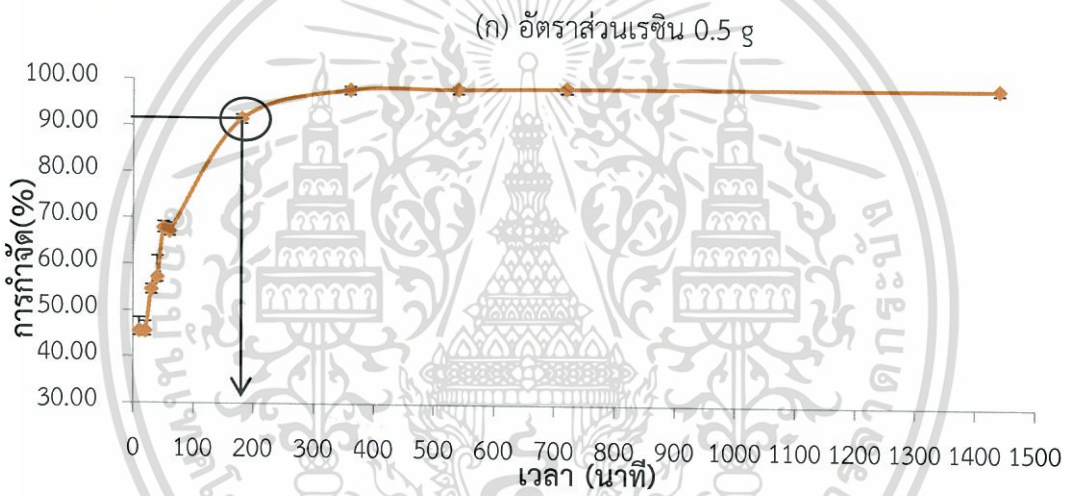
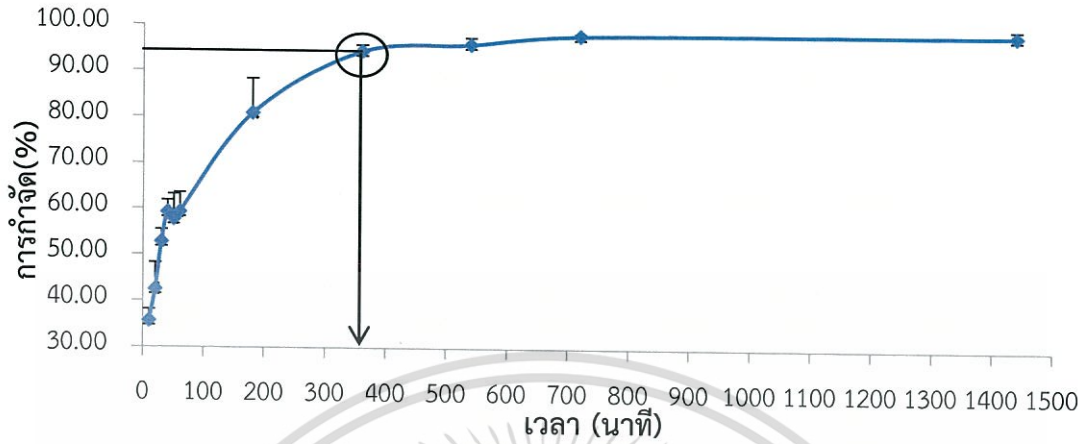
พารามิเตอร์	ความเข้มข้น (mg/L)				
	10	30	60	90	120
pH	3.82 (±0.01)	3.55 (±0.01)	3.39 (±0.01)	3.28 (±0.02)	3.21 (±0.01)
ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	111.71 (±0.52)	224.57 (±0.51)	412.49 (±0.09)	580.78 (±0.56)	725.61 (±1.50)
TDS (mg/L)	66.20 (±0.01)	135.33 (±0.58)	248.20 (±0.15)	350.33 (±0.58)	442.67 (±0.58)
ORP (mV)	56.48 (±6.15)	60.84 (±0.55)	64.51 (±1.18)	70.48 (±0.36)	112.98 (±0.70)

4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียม (III) จากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการแบบแบตช์

4.3.1 การหาอัตราส่วนเรซินต่อน้ำเสียและระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

การศึกษาเพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการบำบัดจนถึงสภาวะสมดุล โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (III) ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL ทำการแปรค่าอัตราส่วนเรซินตั้งแต่ 0.5, 1.0 และ 5.0 g เขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm อุณหภูมิระหว่างการทดลองอยู่ที่ 30 °C และแปรค่าระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ในการบำบัดตั้งแต่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 180, 360, 540, 720 และ 1440 นาที จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณของโครเมียม (III) ที่เหลืออยู่และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดและระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ในการบำบัดได้ผลดังรูปที่ 4.1 การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดดังตัวอย่างในภาคผนวก ค (ข้อมูลที่ 10) รายละเอียดผลการทดลองดังภาคผนวก ง (ตารางที่ ง-1, ง-2 และ ง-3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) อัตราส่วนเรซิน 0.5 g
 (ข) อัตราส่วนเรซิน 1.0 g
 (ค) อัตราส่วนเรซิน 5.0 g

รูปที่ 4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียมด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่ระยะเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 เห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนเรซินในน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น การบำบัดโครเมียม (III) ให้ได้มากกว่า 90% ใช้ระยะเวลาสัมผัสลดลง เช่น เมื่อใช้อัตราส่วนเรซิน 0.5, 1.0 และ 5.0 g มีการกำจัดโครเมียม (III) เท่ากับ 90% ภายในระยะเวลา 360, 180 และ 180 นาที ระยะเวลาสั้นลงตามลำดับ จากกรณีนี้พบว่าหลังระยะเวลาสัมผัสและอัตราส่วนเรซินทั้งสามสัดส่วนสามารถกำจัดโครเมียม (III) ได้สูงที่สุด และเข้าสู่สมดุล

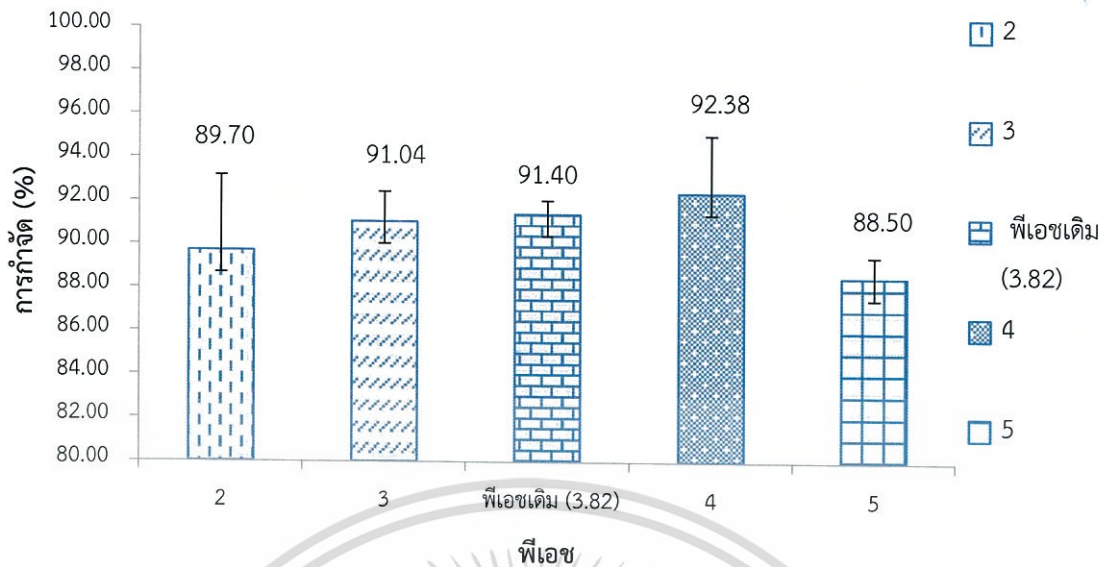
จากข้อมูลข้างต้นพบว่าการเข้าสู่สมดุลที่อัตราส่วนของเรซิน 0.5, 1.0 และ 5.0 g มีความแตกต่างกันจึงได้ทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนของเรซินและระยะเวลาที่สัมผัสทั้งหมดว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่โดยใช้ General Linear Model ในการทดสอบและเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีการของ Tukey ดังรายละเอียดภาคผนวก จ (ข้อมูลที่ 1) พบว่าอัตราส่วนของเรซินและระยะเวลาที่สัมผัสในการบำบัดโครเมียม (III) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นอัตราส่วนเรซินและเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการบำบัดโครเมียม (III) ที่จุดสมดุลคือ 1.0 g และ 180 นาที ตามลำดับ ทำให้ความเข้มข้นของโครเมียม (III) ที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.6987 mg/L และเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ $91.40 \pm 0.96\%$ จึงใช้อัตราส่วนเรซิน 1.0 g ระยะเวลาสัมผัส 180 นาที ในการบำบัดโครเมียม (III) ในการทดลองขั้นต่อไป ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fethiye Gode และ Erol Pehlivan. (2005) ศึกษาการกำจัดโครเมียม (III) จากน้ำเสีย โดยใช้เรซิน แลกเปลี่ยนประจุยี่ห้อ Lewatit S 100 และเปรียบเทียบกับเรซินยี่ห้อ Chelex-100 โดยทำการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส ต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม (III) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^{-3} M ผลการทดลองที่ได้พบว่าเรซิน Lewatit S 100 และเรซิน Chelex-100 มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม (III) เพิ่มขึ้นค่อนข้างรวดเร็วจนถึงระยะเวลาการสัมผัสเท่ากับ 70 นาที และ 45 นาที ตามลำดับ หลังจากนั้นเรซินทั้งสองชนิดจึงมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนเข้าสู่สมดุล โดยเรซิน Lewatit S 100 และเรซิน Chelex-100 เข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลาการสัมผัส 150 นาที เปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 99% และ 120 นาที เปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 80% ตามลำดับ จากความเข้มข้นของโครเมียม (III) ที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์หลังการบำบัด มีรายละเอียดผลการทดลองดังภาคผนวก ง (ตารางที่ ง-1, ง-2, ง-3 และ ง-6) พบว่าที่ปริมาณเรซิน และระยะเวลาสัมผัสต่างๆ ดังตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของโครเมียม (III) ที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์หลังการบำบัด สามารถผ่านค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรมตามประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (พ.ศ.2559) ที่กำหนดค่าไว้ 0.75 mg/L

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนเรซินและระยะเวลาสัมผัสต่างๆ ที่บำบัดโครเมียม (III) ผ่านและไม่ผ่านเกณฑ์
มาตรฐาน

[Cr ³⁺] เริ่มต้น (mg/L)	น้ำหนักเรซิน (g)	เวลาสัมผัส (นาที)	[Cr ³⁺] ที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย (mg/L)	เกณฑ์ มาตรฐาน (0.75 mg/L)
10	0.5	≥ 360	0.451 ± 0.11	ผ่าน
	1.0	≥ 180	0.699 ± 0.08	ผ่าน
	5.0	≥ 180	0.373 ± 0.05	ผ่าน
30	1.0	180	2.601 ± 0.53	ไม่ผ่าน
60	1.0	180	3.561 ± 1.00	ไม่ผ่าน
90	1.0	180	7.418 ± 0.52	ไม่ผ่าน
120	1.0	180	10.94 ± 2.44	ไม่ผ่าน

4.3.2 การหาพีเอชที่เหมาะสม

การศึกษาเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัด โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (III) ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L ที่สภาวะต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ ทำการแปรค่าพีเอชที่ 2, 3, 4, 5 และพีเอชเดิม เนื่องจากทำการศึกษาช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการทดลอง และที่พีเอช ตั้งแต่ 5.17 ขึ้นไปพบว่าโครเมียม (III) เริ่มตกตะกอนเป็น Cr(OH)₃ จากการคำนวณค่าพีเอชต่อการตกตะกอนของ Cr(OH)₃ ดังตัวอย่างในภาคผนวก ค (ข้อมูลที่ 12) จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณของโครเมียม (III) ที่เหลืออยู่และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดและพีเอชที่ใช้ในการบำบัดได้ผลดังรูปที่ 4.2 รายละเอียดผลการทดลองดังภาคผนวก ง (ตารางที่ ง-4)



รูปที่ 4.2 ผลของค่าพีเอชต่อการบำบัดโครเมียม (III) ด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว

จากรูปที่ 4.2 เห็นได้ว่าค่าพีเอชมีผลต่อการบำบัดโครเมียม (III) โดยการดูดซับด้วยเรซิน พบว่าเมื่อค่าพีเอชต่ำทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียม (III) ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นกรดให้กับสารละลายเป็นการเพิ่มความเข้มข้น H^+ ให้มากขึ้น ซึ่ง H^+ เป็นคู่แข่งกับ Cr^{3+} ในการเข้าแลกเปลี่ยนประจุบวกกับเรซิน เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าพีเอชทางสถิติโดยใช้ One way ANOVA ในการทดสอบและเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีการของ Tukey ดังรายละเอียดภาคผนวก จ (ข้อมูลที่ 2) พบว่าที่พีเอช 2, 3, 4, 5 และพีเอชเดิม (3.82) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงใช้พีเอชเดิมของน้ำเสียสังเคราะห์ ในการทดลองในขั้นตอนต่อไป เพื่อลดการใช้สารเคมีในการปรับค่าพีเอช และลดขั้นตอนในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนบำบัด ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fethiye Gode และ Erol Pehlivan. (2005) ศึกษาการกำจัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุห่อ Lewatit S 100 และเปรียบเทียบกับเรซินยี่ห้อ Chelex-100 โดยทำการศึกษา ผลของค่าพีเอชต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม (III) ผู้วิจัยแปรค่าพีเอช 2 ถึง 6 ผลการทดลองที่ได้พบว่า เรซินยี่ห้อ Lewatit S 100 ค่า pH เท่ากับ 3.5 และ เรซินยี่ห้อ Chelax-100 มีค่า pH เท่ากับ 4.5 ดังนั้นการแลกเปลี่ยนไอออนในช่วงกรดปานกลาง (pH 3.5 – 4.5) จึงเหมาะสมกว่าในช่วงกรดจัด (pH 2) แสดงให้เห็นว่า H^+ มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนในหมู่ฟังก์ชันมากขึ้น

4.4 ไอโซเทอร์มของการบำบัด

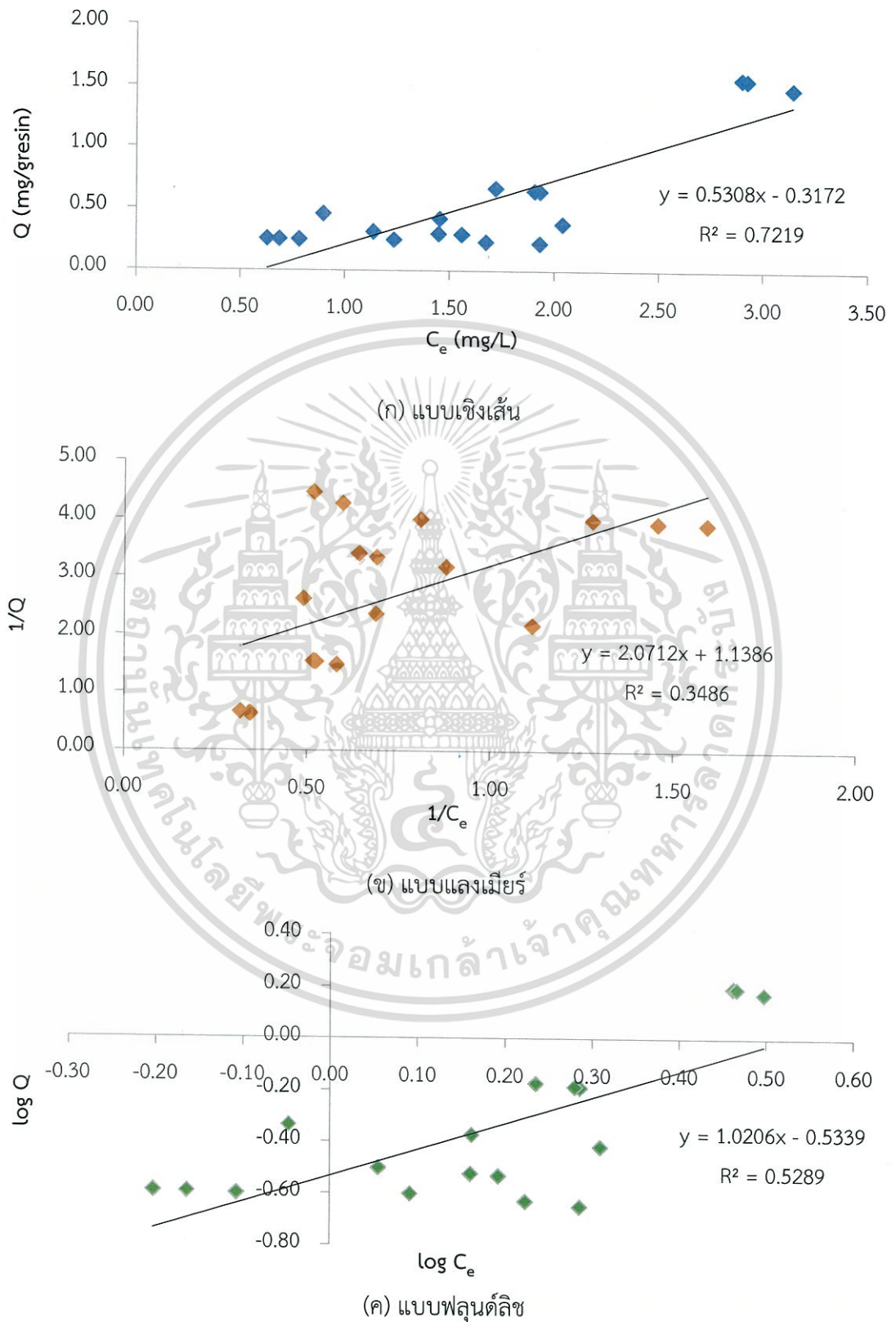
4.4.1 ไอโซเทอร์มจากการแปรอัตราส่วนเรซินต่อน้ำเสีย

จากการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของการบำบัดโครเมียม (III) ทำได้โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (III) ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L สภาวะต่างๆ ในการทดลองคงที่ และแปรค่าอัตราส่วนเรซินตั้งแต่ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 และ 1.0 g แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการไอโซเทอร์มในการบำบัด แบบเชิงเส้น (ก), แบบแลงเมียร์ (ข), แบบฟรุนด์ลิช (ค) ได้ผลดังตารางที่ 4.4 รายละเอียดผลการทดลองดังภาคผนวก ง (ตารางที่ ง-5) และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนเรซินต่อน้ำเสียในการบำบัดต่อไอโซเทอร์ม

ไอโซเทอร์ม	ความสัมพันธ์	สมการ	R ²	ค่าคงที่ของการดูดซับ
Cr ³⁺	เชิงเส้น	$Q = 0.5308C_e - 0.3172$	0.7219	$K_d = 0.5308$
	แลงเมียร์	$1/Q = 2.0712(1/C_e) + 1.1386$	0.3486	$K_d = 0.5497$ $Q_m = 0.8783 \text{ mg/g}$ หรือ $= 0.05 \text{ meq/g}$
	ฟรุนด์ลิช	$Q = 1.0206C_e - 0.5339$	0.5289	$1/n = 1.0206$ $K_d = 3.419$
Cd ^{2+*}	เชิงเส้น	$Q = 1.2764C_e + 0.6668$	0.7842	$K_d = 1.2764$
	แลงเมียร์	$1/Q = 0.0633(1/C_e) + 0.9042$	0.2191	$K_d = 14.2844$ $Q_m = 1.1060 \text{ mg/g}$ หรือ $= 0.02 \text{ meq/g}$
	ฟรุนด์ลิช	$Q = 0.4747(\log C_e) - 0.3255$	0.6113	$1/n = 0.4747$ $K_d = 2.1159$

*ที่มา รุจา และคณะ (2556)



รูปที่ 4.3 ไอโซเทอร์มของการบำบัดโครเมียม (III) เมื่อแปรค่าปริมาณเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงการบำบัดโครเมียม (III) ด้วย เรซิน ที่ผ่านการใช้งานแล้วเมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นมีค่ามากที่สุด ($R^2 = 0.7219$) ค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เท่ากับ 0.5308 โดยปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล แม้โครเมียมจะเป็นประจุบวกสามารถแลกเปลี่ยนประจุก็ไม่แตกต่างจากแคดเมียมประจุบวกสอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของรุจา และคณะ (2556) ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการทดลองแบบแบตช์ โดยเรซินประจุบวก Lewatit MonoPlus S108 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้น มีค่าเท่ากับ 0.7842 ซึ่ง R^2 ของไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นมีค่ามากที่สุด และมีค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เท่ากับ 1.2764 โดยไอโซเทอร์มประเภทนี้แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีอยู่อย่างไม่มีขีดจำกัด ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล

4.4.2 ไอโซเทอร์มจากการแปรค่าความเข้มข้นโครเมียม (III)

จากการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของการบำบัดโครเมียม (III) ทำได้โดยแปรค่าน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (III) ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 10, 30, 60, 90 และ 120 mg/L สภาวะต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ โดยใช้อัตราส่วนเรซิน เวลา และพีเอช จากการทดลองในข้อ 3.2.5.1 และ 3.2.5.2 ตามลำดับ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการไอโซเทอร์มในการบำบัด แบบเชิงเส้น (ก), แบบแลงเมียร์ (ข), แบบฟลุนด์ลิช (ค) ได้ผลดังตารางที่ 4.5 รายละเอียดผลการทดลองดังภาคผนวก ง (ตารางที่ ง-6) และรูปที่ 4.4

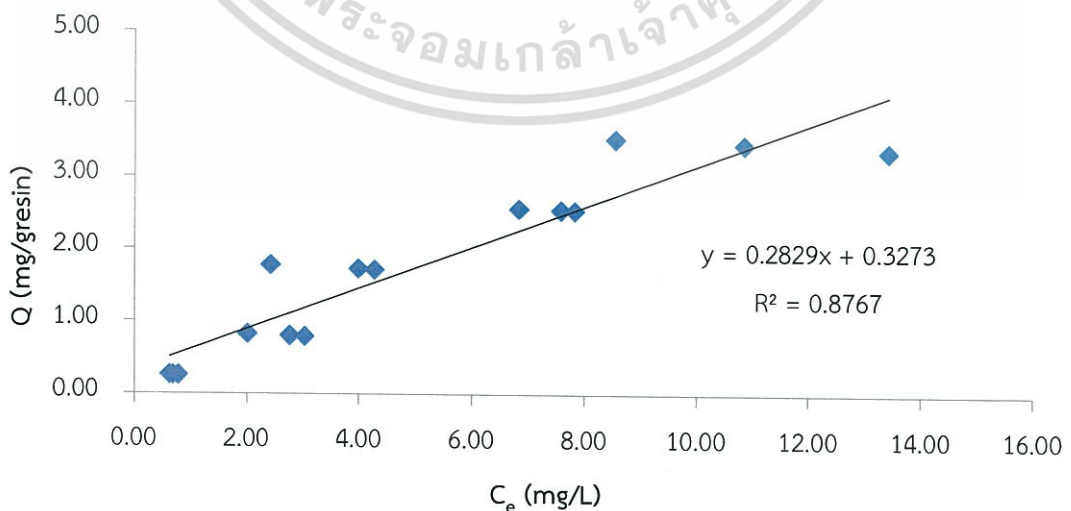
จากตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.4 พบว่าการบำบัดโครเมียม (III) ด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่า ค่า R^2 ของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ($R^2 = 0.9645$) และแบบฟลุนด์ลิชมีค่าใกล้เคียงกัน ($R^2 = 0.9335$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของชนากานต์และคณะ (2558) ศึกษาการกำจัดไอออนโลหะหนักจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งมีค่า R^2 ของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ($R^2 = 0.9074$) แต่ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) ของการกำจัดโครเมียม (III) มีค่ามากกว่าตะกั่ว (II) เท่ากับ 2.54 และ 0.05 meq/g ตามลำดับ และมีค่าสูงกว่าค่า CEC ที่ถูกแทนที่ด้วย NH_4^+ จากข้อมูลการกำจัดโครเมียม (III) สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และแบบฟลุนด์ลิช แสดงว่าเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วอาจเกิดการดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) ทั้งนี้อาจมาจากโครเมียม (III) ที่มีอำนาจในการเข้าแทนที่และแลกเปลี่ยน

ประจวบวิวัฒน์ได้สูงกว่า NH_4^+ ที่ใช้ในการหาค่า CEC และตะกั่ว (II) จึงเข้าไปแลกเปลี่ยนหรือแทนที่ได้มากกว่า

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นโครเมียม (III) ในการบำบัดต่อไอโซเทอร์ม

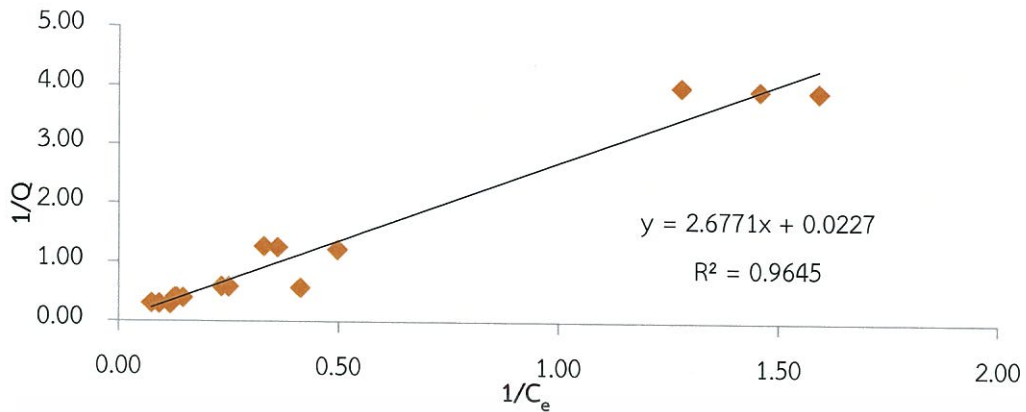
ไอโซเทอร์ม	ความสัมพันธ์	สมการ	R^2	ค่าคงที่ของการดูดซับ
Cr^{3+}	เชิงเส้น	$Q = 0.2829C_e + 0.3273$	0.8767	$K_d = 0.2829$
	แลงเมียร์	$1/Q = 2.6771(1/C_e) + 0.0227$	0.9645	$K_d = 0.0085$ $Q_m = 44.05 \text{ mg/g}$ หรือ $= 2.54 \text{ meq/g}$
	ฟรุนด์ลิช	$\log Q = 0.9357(\log C_e) - 0.4058$	0.9335	$1/n = 0.9357$ $K_d = 2.5457$
Pb^{2+}	เชิงเส้น	$Q = 0.0493 C_e + 0.9521$	0.7761	$K_d = 0.0493$
	แลงเมียร์	$1/Q = 5.9159(1/C_e) + 0.1897$	0.9074	$K_d = 0.0321$ $Q_m = 5.27 \text{ mg/g}$ หรือ $= 0.05 \text{ meq/g}$
	ฟรุนด์ลิช	$\log Q = 0.6118(\log C_e) - 0.5018$	0.8881	$1/n = 0.6118$ $K_d = 3.1754$

*ที่มา ชนากานต์ และคณะ (2558)

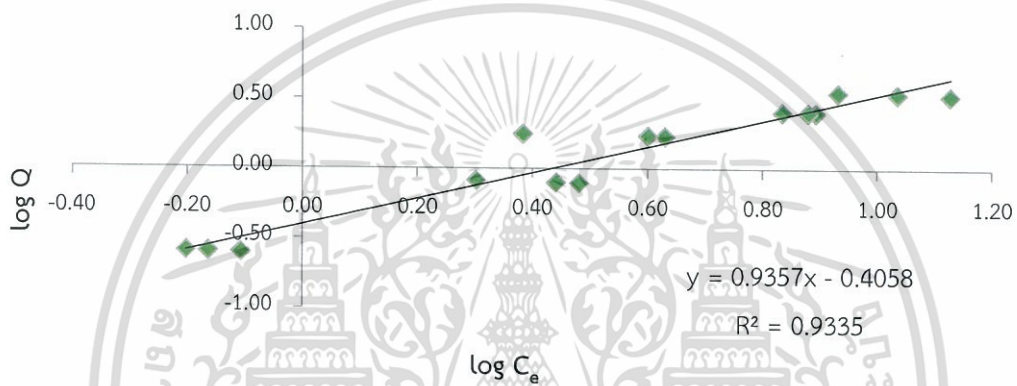


(ก) แบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) แบบแลงเมียร์



(ค) แบบฟลินด์ลีช

รูปที่ 4.4 ไอโซเทอร์มของการบำบัดโครเมียม (III) เมื่อแปรค่าความเข้มข้น

4.5 การศึกษาการคายซับ

4.5.1 การคายซับด้วยน้ำกลั่น

จากการศึกษาการคายซับเพื่อรีเจนเนอเรชันที่ใช้ในการกำจัดโครเมียม (III) ทำได้โดยใช้น้ำกลั่น 5 mL ตามการทดลองในข้อ 3.2.6 โดยใช้อัตราส่วนเรซิน เวลา และพีเอช จากการทดลองในข้อ 3.2.5.1 และ 3.2.5.2 ตามลำดับ เขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm แล้ววิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม (III) ที่คายออกมา เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การคายซับ เมื่อนำเรซินที่ดูดซับโครเมียม (III) มาทำการคายซับด้วยน้ำกลั่น ปริมาณโครเมียม (III) ที่คายออกมาน้อยกว่าค่า Detection Limit (DL) เนื่องจากโครเมียม (III) และเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมีการดูดซับทางเคมีเป็นพันธะที่แข็งแรง ซึ่งน้ำเป็นตัวชะที่เข้าแทนที่โครเมียม (III) ในเรซินได้ไม่ดี ทำให้น้ำไม่สามารถชะปริมาณโครเมียม (III) ออกมาได้ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาเป็นสารรีเจนเนอเรตอย่างง่าย แต่ในแง่ของการบำบัดโครเมียม (III) ด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว จากผลการทดลองโครเมียม (III) เปลี่ยนสภาพจากการปนเปื้อนในน้ำเสียมาจับอยู่ในเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วถือว่ามีความปลอดภัยมากขึ้น เนื่องจากสามารถตรึงโครเมียม (III) บนเรซินไว้ได้ จึงไม่ถูกชะล้างโดยน้ำได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การคายซับด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 8% v/v

จากการศึกษาการคายซับเพื่อรีเจนเนอเรชันเรซินที่ใช้ในการกำจัดโครเมียม (III) ทำได้โดยใช้กรดซัลฟิวริก 8% v/v 5 mL เนื่องจากผู้ผลิตได้ระบุว่าสารละลายกรดซัลฟิวริก 8% v/v สามารถใช้เป็นสารรีเจนเนอเรต อธิบายได้ดังตารางที่ 2.2 ตามการทดลองในข้อ 3.2.6 โดยใช้อัตราส่วนเรซิน เวลา และพีเอช จากการทดลองในข้อ 3.2.5.1 และ 3.2.5.2 ตามลำดับ เขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm แล้ววิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม (III) ที่คายออกมา เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การคายซับ ดังตัวอย่างในภาคผนวก ค (ข้อมูลที่ 18) รายละเอียดผลการทดลองดังตารางที่ 4.6 รายละเอียดผลการทดลอง ดังภาคผนวก ง (ตารางที่ ง-7, ง-8 และ ง-9)

จากตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเรซินที่บำบัดโครเมียม (III) มาทำการชะด้วยกรดซัลฟิวริก 8% v/v พบว่าปริมาณโครเมียม (III) ที่คายซับออกมาจากเรซิน เท่ากับ 0.0385 ± 0.0070 mg มีเปอร์เซ็นต์การคายซับ เท่ากับ $52.57 \pm 8.52\%$ โดยเทียบกับปริมาณการดูดซับโครเมียม (III) 0.0731 ± 0.0020 mg แสดงว่ากรดซัลฟิวริกเหมาะสมในการทำให้โครเมียม (III) หลุดออกมาจาก เรซิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S.K. Sahu. *et al.* (2009) ที่ศึกษาการคายซับโครเมียม (III) ออกจากเรซินยี่ห้อ Indion790 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการคายซับโดยใช้สารละลาย H_2SO_4 20% w/v เป็นสารรีเจนเนอเรต ซึ่งทำการชะทั้งหมดสามครั้ง พบว่าในการชะครั้งแรก โครเมียม (III) ถูกชะออกมาได้ 93% ในการชะครั้งที่สองเท่ากับ 89% และการชะครั้งที่สามพบว่าไม่มีโครเมียมถูกชะออกมาอาจเป็นไปได้ว่าโครเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบ $Cr(OH)SO_4$ ซึ่งเป็นรูปที่ชะออกมาได้ยากในสภาวะการทดลองปกติ แต่ในการทดลองนี้เลือกใช้สารละลาย H_2SO_4 8% v/v แทน เนื่องจากสารละลาย H_2SO_4 20% w/v มีความเป็นกรดสูงทำลายเม็ดเรซินที่ใช้ มีลักษณะเสื่อมสภาพ รวมทั้งผู้ผลิตระบุว่าสารละลาย H_2SO_4 8% v/v สามารถใช้เป็นสารรีเจนเนอเรตได้ (ดังที่ตารางที่ 2.2) เปอร์เซ็นต์การคายซับที่ใช้สารละลาย H_2SO_4 8% v/v ในโครงการนี้จึงมีค่าน้อยกว่าการใช้ H_2SO_4 20% w/v เมื่อนำ เรซินที่ผ่านการคายซับมาย่อยด้วยกรด เพื่อหาปริมาณโครเมียม (III) ที่เกาะอยู่บนเรซินได้ เท่ากับ 0.0318 ± 0.0021 mg เพื่อหาสมมูลมวล (ดังตัวอย่างในภาคผนวก ค ข้อมูลที่ 16) โดยคำนวณหาปริมาณโครเมียม (III) ทั้งหมด ได้จากปริมาณโครเมียม (III) ที่คายซับจากเรซินรวมกับปริมาณโครเมียม (III) ที่เกาะอยู่บนเรซิน ค่าที่ได้เท่ากับ 0.0703 ± 0.0053 mg เมื่อนำมาเทียบกับปริมาณการดูดซับโครเมียม (III) 0.0731 ± 0.0020 mg จะได้เปอร์เซ็นต์โครเมียม (III) ที่วิเคราะห์เท่ากับ $96.13 \pm 4.86\%$ แสดงว่า มวลของโครเมียม (III) มีการสูญหายจากขั้นตอนการทดลองน้อยมาก

ตารางที่ 4.6 ผลการคายซับด้วยกรดซัลฟิวริก 8% v/v

ครั้งที่	ปริมาณโครเมียม (III) (mg)						สมดุลมวล	
	ปริมาณเริ่มต้น (mg)	การดูดซับ	% การดูดซับ	การคายซับ	เรซินที่ย่อย	% การคายซับ	Cr ³⁺ (mg)	% Cr ³⁺ ที่วิเคราะห์ได้
1	0.1939	0.0733	94.48	0.0427	0.0297	58.23	0.0724	98.80
2	0.1939	0.0710	91.55	0.0304	0.0339	42.77	0.0643	90.53
3	0.1939	0.0749	96.60	0.0425	0.0317	56.70	0.0742	99.07
เฉลี่ย	0.1939	0.0731	94.21	0.0385	0.0318	52.57	0.0703	96.13
SD	0.0000	0.0020	2.53	0.0070	0.0021	8.52	0.0053	4.86

4.6 การศึกษาการบำบัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีการบำบัดแบบแบคทีเรีย

4.6.1 สมบัติน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ

น้ำเสียที่นำมาทดลองแบบแบคทีเรียมานำมาจากห้องปฏิบัติการเคมี อาคารพระจอมเกล้า ชั้น 5 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง น้ำเสียที่มาจากห้องปฏิบัติการเคมีได้ผ่านการคัดแยกในระหว่างการเก็บรวบรวม ซึ่งเป็นน้ำเสียที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่า COD แบบไม่เติมปรอท (Hg) ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสีย มีสีเขียวอมเหลืองขุ่น มีตะกอนแขวนลอย มีกลิ่น มีค่าพีเอชน้อยกว่า 0 จึงใช้กระดาษวัดพีเอชในการตรวจสอบสำหรับการวัดค่าพีเอชน้ำเสีย ไม่สามารถใช้เครื่องวัดพีเอชวัดค่าโดยตรง เพราะน้ำเสียมีความเป็นกรดสูง อาจทำให้โพรบวัดพีเอชเสื่อมสภาพได้ และค่าพีเอชที่ต่ำมากๆ ไม่เหมาะสมในการบำบัดด้วยเรซิน เพราะความเป็นกรดสูงอาจทำลายเม็ดเรซินที่ใช้ให้เสื่อมสภาพได้ จึงต้องนำมาปรับพีเอชให้ได้ตามการทดลองในข้อ 3.2.5.2 ก่อนนำมาบำบัดด้วยวิธีแบบแบคทีเรีย และนอกจากมีโครเมียม (III) แล้ว ยังมีเหล็กที่อาจเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกเป็นไอออนคู่แข่งกับโครเมียม (III) ได้ ทำการทดลองทั้งหมดสามชุดการทดลอง ดังนี้ ชุดที่ 1 ทำการบำบัดโลหะหนัก 1 ครั้ง ใช้อัตราส่วนเรซิน 1.0 g ชุดที่ 2 ใช้อัตราส่วนเรซินเหมือนกับชุดที่ 1 แต่ทำการบำบัดโลหะหนัก 3 ครั้ง และชุดที่ 3 ทำการบำบัดโลหะหนัก 1 ครั้ง ใช้อัตราส่วนเรซิน 5.0 g ทำการวัดสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสีย ดังตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.7 พบว่าสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี เมื่อทำการตกตะกอนด้วย NaOH และมีการปรับพีเอชให้ได้ค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ 3.2.5.2 พบว่ามีพีเอช เท่ากับ 3.87 ± 0.02 ค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 33.06 ± 0.09 mS/cm ค่า TDS เท่ากับ 20.73 ± 0.15 g/L ค่า ORP เท่ากับ -116.23 ± 0.44 mV เนื่องจากมีความสามารถในการรีดักชันสูงจึงทำให้ค่า ORP ลดลง และในส่วนของความเข้มข้นของโครเมียม (III) หลังการตกตะกอนมีค่าเข้มข้นลดลงเหลือ 425.3 ± 2.52 mg/L เนื่องจากโครเมียม (III) รวมกับไฮดรอกไซด์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโครเมียมไฮดรอกไซด์ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ดังภาคผนวก ค (ข้อมูลที่ 13) เมื่อนำน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนไปบำบัดโครเมียม (III) ด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ทำการวัดหลังการบำบัดมีค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่า TDS และค่า ORP เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำเสียหลังการตกตะกอน เนื่องจากโลหะหนักเข้าไปแทนที่ไอออนที่จับกับหมู่ฟังก์ชันซัลโฟเนตทำให้ไอออนละลายออกมาให้น้ำได้ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) ของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ที่แปรค่าความเข้มข้นโครเมียม (III) เริ่มต้น เท่ากับ 2.54 meq/g พบว่า ผลรวมของค่าความสามารถในการดูดซับ (Q) ระหว่าง โครเมียม (III) กับเหล็ก (III) ของการทดลองชุดที่ 1 ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 มีค่าเท่ากับ 0.0764 (± 0.01), 0.0716 (± 0.01) และ 0.1010 (± 0.01) meq/g-resin ตามลำดับ ซึ่งมีการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับเรซินน้อยมาก เนื่องจากน้ำเสียในห้องปฏิบัติการมีไอออนชนิดอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น H^+ , Ag^+ และ Na^+ ไอออนเหล่านี้สามารถเข้าไปแทนที่และแลกเปลี่ยนประจุบวกกับเรซินได้เช่นกัน

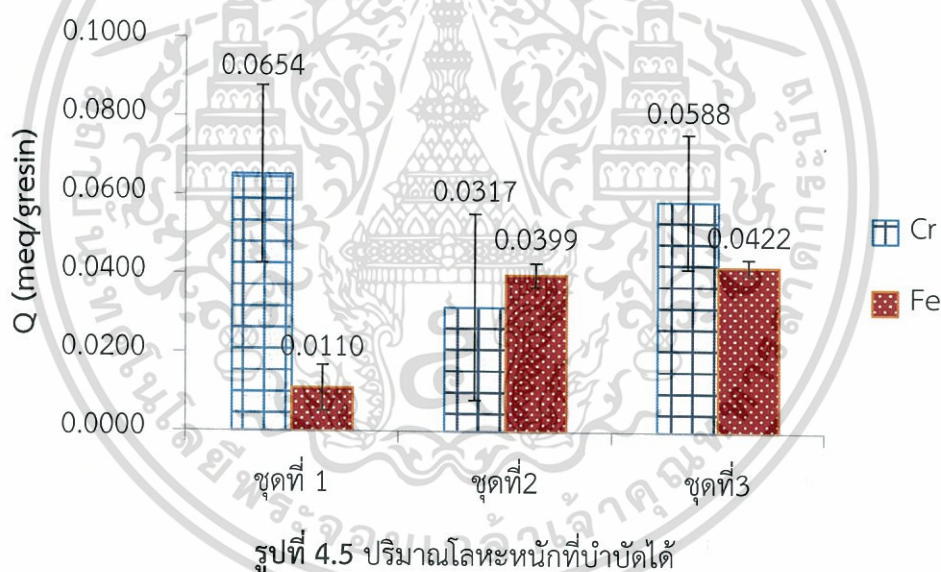
ตารางที่ 4.7 สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ

การทดลอง	น้ำเสีย	pH	ค่าการนำไฟฟ้า (mS/cm)	TDS (g/L)	ORP (mV)	[Cr ³⁺] (mg/L)	[Fe ³⁺] (mg/L)
	หลัง ตกตะกอน	3.87 (±0.02)	33.06 (±0.09)	20.73 (±0.15)	-116.23 (±0.44)	425.3 (±2.52)	155.7 (±0.49)
จุดที่ 1 (เรซิน 1.0 g)	หลัง การบำบัด	3.92 (±0.02)	50.06 (±0.38)	32.40 (±0.50)	-111.19 (±2.87)	382.1 (±11.47)	144.4 (±3.18)
	Q _{Cr³⁺+Fe³⁺} (meq/gresin)					0.0764 (±0.01)	
จุดที่ 2 (เรซิน 1.0 g)	หลัง การบำบัด ครั้งที่ 1	3.91 (±0.01)	49.42 (±0.37)	32.73 (±0.15)	-107.19 (±2.63)	309.7 (±12.10)	115.4 (±1.65)
	หลัง การบำบัด ครั้งที่ 2	3.77 (±0.01)	44.63 (±0.23)	28.80 (±0.12)	-30.59 (±0.38)		
	หลัง การบำบัด ครั้งที่ 3	3.94 (±0.01)	52.63 (±0.41)	34.00 (±0.10)	-48.44 (±0.15)		
	เฉลี่ย	3.87 (±0.09)	48.89 (±4.03)	31.84 (±2.71)	-29.78		
	Q _{Cr³⁺+Fe³⁺} (meq/gresin)					0.0716 (±0.01)	
จุดที่ 3 (เรซิน 5.0 g)	หลัง การบำบัด	3.94 (±0.02)	46.68 (±0.28)	30.80 (±0.10)	-104.15 (±6.52)	360.1 (±8.62)	136.9 (±1.18)
	Q _{Cr³⁺+Fe³⁺} (meq/gresin)					0.1010 (±0.01)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 การบำบัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียห้องปฏิบัติการ

ศึกษาการบำบัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีการบำบัดแบบแบดจ์ ก่อนนำน้ำเสียมาทดลอง ทำการเติม $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ให้มากเกินพอ คำนวณได้จากสมการที่ 2.17 ปรับพีเอชให้มีค่ามากกว่า 4.47 ดังตัวอย่างในภาคผนวก ค (ข้อมูลที่ 13) ด้วย NaOH เพื่อทำการตกตะกอนโลหะหนัก และกรองเอาส่วนใสมาทำการบำบัดด้วยเรซินต่อไป ทำการทดลองสามชุดโดยใช้น้ำเสียส่วนที่กรองแล้วปริมาตร 25 mL เขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm อุณหภูมิระหว่างการทดลองอยู่ที่ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 180 นาที จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณของโครเมียม (III) และปริมาณเหล็กที่เหลืออยู่ และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดและประเภของโลหะหนักได้ผลดังรูปที่ 4.5 หรือคิดเป็นปริมาณโครเมียม (III) ที่บำบัด (mg/ग्रซิน) การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัด และการคำนวณปริมาณโครเมียม (III) ที่ผ่านการบำบัดดังตัวอย่างในภาคผนวก ค (ข้อมูลที่ 10 และ 11) รายละเอียดผลการทดลองดังภาคผนวก ง (ตารางที่ ง-10, ง-11 และ ง-12)



จากรูปที่ 4.5 พบว่าเรซินที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ ชุดที่ 1 ทำการบำบัดโลหะหนัก 1 ครั้ง ใช้อัตราส่วนเรซิน 1.0 g สามารถบำบัดโครเมียม (III) ได้มากกว่าเหล็ก เท่ากับ 0.0654 ± 0.02 meq/g และ 0.0110 ± 0.01 meq/g ตามลำดับ ชุดที่ 2 ใช้อัตราส่วนเรซินเหมือนกับชุดที่ 1 แต่ทำการบำบัดโลหะหนัก 3 ครั้ง สามารถบำบัดโครเมียม (III) ได้น้อยกว่าเหล็ก (III) เท่ากับ 0.0317 ± 0.02 meq/g และ 0.0399 ± 0.00 meq/g ตามลำดับ และชุดที่ 3 ทำการบำบัดโลหะหนัก 1 ครั้ง ใช้อัตราส่วนเรซิน 5.0 g สามารถบำบัดโครเมียม (III) ได้มากกว่าเหล็ก (III) เท่ากับ 0.0588 ± 0.01 meq/g และ 0.0422 ± 0.00 meq/g ตามลำดับ เนื่องจากเหล็ก (III) มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับหมู่ซิลโฟเนตได้มากที่สุด จึงทำให้เหล็กมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดมากกว่าโครเมียม (III)

เมื่อพิจารณาผลรวมของค่าความสามารถในการดูดซับปริมาณโลหะหนักที่บำบัดได้ทั้งหมด เท่ากับ 0.2490 meq/g ซึ่งถือว่ามี การดูดซับโครเมียม (III) และเหล็ก (III) ได้น้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) ของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ที่แปรค่าความเข้มข้นโครเมียม (III) เริ่มต้น เท่ากับ 2.54 meq/g เนื่องจาก ไอออนโซเดียมที่อยู่ในน้ำเสียห้องปฏิบัติการอาจมีความเข้มข้นมากกว่าไอออนโครเมียม (III) และเหล็ก (III) จึงสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้ดีกว่า ทำให้เกิดการบำบัดโครเมียม และเหล็กได้น้อยลง และการบำบัดทั้ง 3 ชุดการทดลองไม่สามารถบำบัดโลหะหนักให้มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (พ.ศ.2559) เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม เนื่องจากปริมาณเรซินที่ใช้ในการบำบัดโครเมียม (III) ไม่เพียงพอต่อการจับไอออนที่เป็นประจุบวกชนิดอื่นๆ เช่น Na^+ ถึงแม้จะทำการตกตะกอนเบื้องต้นก่อนทำการบำบัด ดังนั้นต้องเพิ่มปริมาณเรซินให้เพียงพอต่อการดูดซับไอออนบวกชนิดอื่นๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนของเรซินต่อน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัส และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เข้มข้น 10 mg/L พบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนของเรซิน 1.0 g ต่อน้ำเสีย ปริมาตร 25 mL ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการบำบัด เท่ากับ 180 นาที และพีเอชเดิมของน้ำเสียสังเคราะห์ (พีเอช 3.82) เป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัด ทำให้ความเข้มข้นของโครเมียม (III) ที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.6987 mg/L ซึ่งผ่านค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรมตามประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (พ.ศ.2559) ที่กำหนดค่าไว้ 0.75 mg/L และมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม (III) เท่ากับ $91.40 \pm 0.96\%$

การศึกษาไอโซเทอร์มของการบำบัดโครเมียม (III) โดยแปรค่าอัตราส่วนเรซินต่อน้ำเสียและแปรค่าความเข้มข้นโครเมียม (III) เริ่มต้น ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์มากที่สุด ($R^2 = 0.9645$) จึงเลือกใช้ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ในการคำนวณอัตราส่วนเรซินสำหรับบำบัดน้ำเสียห้องปฏิบัติการ

การศึกษาการคายซับโดยศึกษาตัวชะ 2 ชนิด คือน้ำกลั่น และกรดซัลฟิวริก 8% v/v พบว่า กรดซัลฟิวริก 8% (v/v) สามารถชะโครเมียม (III) ออกจากของเรซินได้ดี ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การคายซับเท่ากับ $52.57 \pm 8.52\%$

การบำบัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียจริงที่มาจากห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการบำบัดแบบแบตช์ ใช้สภาวะการทดลองตามปัจจัยที่ศึกษาด้วยน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (III) คือ อัตราส่วน เรซิน 1.0 g ต่อน้ำเสีย 25 mL ระยะเวลาสัมผัส 180 นาที ปรับพีเอชให้ใกล้เคียงกับสภาวะการทดลองที่ศึกษาหาปริมาณโลหะหนัก 2 ชนิด คือ โครเมียม (III) และเหล็ก พบว่าการบำบัดแบบแบตช์ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียห้องปฏิบัติการให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามภาคผนวก ก ได้ จึงต้องทำการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นโครเมียม (III) สูงๆ ก่อนด้วยการตกตะกอนและเพิ่มปริมาณเรซินให้เพียงพอต่อการดูดซับไอออนบวกชนิดอื่นๆ

ดังนั้นในการศึกษาการบำบัดโครเมียม (III) ด้วยเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Dowex IR100 H/Na) มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโครเมียม (III) ที่ความเข้มข้นน้อยๆ เหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง (Advance Treatment) จึงเป็นข้อเสนอแนะในการนำเรซินชนิดนี้ไปพัฒนาต่อและประยุกต์ใช้ในการกำจัดโครเมียม (III) และโลหะหนักชนิดอื่นๆ ในระดับอุตสาหกรรม หลังจากใช้กำจัดความกระด้างในน้ำและผ่านการรีเจนเนอเรตซ้ำๆ จนไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่นๆ เพื่อไม่ให้เกิดเป็นของเสียที่อาจไม่ทราบชนิดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ลดปริมาณของเสียในการจัดการของเสียอันตราย และใช้ทรัพยากรคุ้มค่าต่อการใช้งานให้มากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมาบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโครเมียม มีประสิทธิภาพการกำจัดประมาณ 90% ที่ความเข้มข้นโครเมียมปริมาณน้อยๆ ดังนั้นก่อนทำการบำบัดด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วจึงควรทำการบำบัดเบื้องต้นด้วยการตกตะกอนก่อน
2. ในการศึกษาการบำบัดโครเมียม (III) ด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วควรศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักชนิดอื่นเพิ่มเติม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักชนิดต่างๆ และความเฉพาะเจาะจงในการเลือกจับไอออนโลหะหนักของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว
3. ในการศึกษาการบำบัดโครเมียม (III) ควรศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วเพื่อเปรียบเทียบผลการบำบัดและประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม (III)
4. จากงานวิจัยซึ่งได้ทำการบำบัดด้วยวิธีแบบแบตช์ (Batch) เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดควรศึกษาการบำบัดแบบคอลัมน์ (Column)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2559. พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535.
[Online]. Available : http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_envi.html
- กรมควบคุมมลพิษ. 2559. มาตรฐานคุณภาพน้ำ. [Online].
Available : http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html
- กรมควบคุมมลพิษ. 2559. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง. [Online].
Available : http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html
- กรมควบคุมมลพิษ. 2559. ระบบบำบัดน้ำเสีย. [Online].
Available : http://www.pcd.go.th/info_serv/water_wt.html
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2559. ความกระด้าง (Hardness). [Online].
Available : <http://www2.diw.go.th/Research/เอกสารเผยแพร่/9-hardness-w.pdf>
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2559. ความขุ่น (Turbidity). [Online].
Available : <http://www2.diw.go.th/Research/เอกสารเผยแพร่/4-Turbidity-w.pdf>
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2559. สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) และความเค็ม (Salinity). [Online]. Available : <http://www2.diw.go.th/เอกสารเผยแพร่/5-Conductivity-w.pdf>
- กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์. 2558. เคมีสิ่งแวดล้อมสำหรับดินและอากาศ. กรุงเทพฯ : โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 82-90.
- กิตติศักดิ์ เสพศิริสุข และคณะ. 2552. “การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารพิษโพลีเอสเตอร์ ในน้ำมันสบู่น้ำ โดยใช้เบนโทไนต์ชนิดต่างๆ.” หน้า 327-334. ใน การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2542. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สยามสเตชัน เนอร์ซิงพลาเยส. หน้า 115-136.
- จิระฉัตร ศรีแสน. 2555. “ผลกระทบของโครเมียมและสารประกอบโครเมียมต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม.” *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*. 60(189) : 10-12
- ชนากานต์ จันบาง และคณะ. 2558. “การกำจัดไอออนโลหะหนักจากของเสียปฏิบัติการ ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชลทิศ แก้วลี. 2547. “การกำจัดโลหะหนักโดยใช้ตะกอนสารส้มจากการผลิตน้ำประปา.”
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เดชา ฉัตรศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ส.เอเชียเพรส (1989)

ธนกาญจน์ บุญพิทักษ์. “การกำจัดไฮยาไนด์และโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดย
กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน : กรณีของคอลัมน์แบบแยกเรซิน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นัทธีรา สรรมณี. 2555. โลหะหนักในแหล่งน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : จรัสสินทวศ์การพิมพ์.
หน้า 16-35.

เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต. 2538. แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

พรชวรณ ศรีนาค. 2556. การควบคุมมลพิษทางน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : มินเซอร์วิซซ์พ
พลาย.

พอลดา ประสานนาม. 2547. “การกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออน
ที่ผลิตจาก Hydroxy ethyl Cellulose.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิทยาการ และวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.

มงคล ดำรงค์ศรี. 2549. “การบำบัดน้ำเสียของโรงงาน SME ประเภทชุบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการ
ตกตะกอนทางเคมี.” หน้า 132-137. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ครั้งที่ 44 สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาการจัดการทรัพยากรและ
สิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2538. วิศวกรรมการประปาเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์
จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย. หน้า 79-106.

มันสิน ตันฑุลเวศม์ และมันรัช ตันฑุลเวศม์. 2547. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2.
กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รุจา สุวรรณสุข และคณะ. 2556. “การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวกที่
ผ่านการใช้งานแล้ว.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม บัณฑิต
วิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม. กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข 2557. ความรู้
เรื่องโรค. [Online]. Available : <http://envoccc.ddc.moph.go.th/contents/view/62>

APHA, AWWA and WEF. 2012. Standard Method for the Examination of Water
and Wastewater. 22nd ed. USA : American Public Health Association.

Beukes, JP. et al. 1999. “The reduction of hexavalent chromium by sulphite in
wastewater.” *Water SA*. 25 : 363-370.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Gode, F. and Pehlivan, E. 2006. "Removal of chromium (III) from aqueous solutions using Lewatit S 100 : The effect of pH, time, metal concentration and temperature." *Journal of Hazardous Materials*. B136 : 330-337.
- Gode, F. and Pehlivan, E. 2007. "Sorption of Cr(III) onto chelating b-DAEG-sporopollenin and CEP-sporopollenin resins." *Bioresource Technology*. 98 : 904-911.
- Gode, F. and Pehlivan, E. 2003. "A comparative study of two chelating ion-exchange resins for the removal of chromium(III) from aqueous solution." *Journal of Hazardous Materials*. B100 : 231-243.
- Karale, R. et al. 2007. "Removal and recovery of hexavalent chromium from industrial waste water by precipitation with due consideration to cost optimization." *Journal of Environmental Research And Development*. 2 : 209-216.
- Kocaoba, S. and Akcin, G. 2002. "Removal and recovery of chromium and chromium speciation with MINTEQA2." *Talanta*. 57 : 23-30.
- Kocaoba, S. and Akcin, G. 2005. "Removal of chromium (III) and cadmium (II) from aqueous solutions." *Desalination*. 180 : 151-156.
- Mustafa, S. et al. 2008. "Chromium (III) removal by weak acid exchanger Amberlite IRC-50 (Na)." *Journal of Hazardous Materials*. 160 : 1-5.
- Mustafa, S. et al. 2010. "Counter-ion effect on the kinetics of chromium (III) sorption by Amberlyst.15 in H^+ , Li^+ , Na^+ , Ca^{++} , Al^{+++} forms." *Desalination*. 264 : 108-114.
- Rengaraj, S. et al. 2001. "Removal of chromium from water and wastewater by ion exchange resins." *Journal of Hazardous Materials*. B87 : 273-287.
- Sahu, S.K. et al. 2009. "Removal of chromium (III) by cation exchange resin, Indion 790 for tannery waste treatment." *Hydrometallurgy*. 99 : 170-174.
- Sowmya, T.P. et al. 2013. "Optimization Of Hexavalent And Trivalent Chromium Present In Waste Water By Chemical Treatment." *International Journal of Engineering Research and Applications*. 3 : 817-820.
- The Dow Chemical Company. 2016. **Product Information**. [Online].
Available : <http://supplies.cmpthai.com/products/165/images/ir100-hna.pdf>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม
และเขตประกอบการอุตสาหกรรม

ตารางที่ ก-1 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5 - 9.0	pH meter
2. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 °C	เครื่องวัดอุณหภูมิ
3. สี (Color)	ไม่เกิน 300 ADMI	ADMI Method
4. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved solids)	(1) กรณีระบายลงแหล่งน้ำ ไม่เกิน 3,000 mg/L (2) กรณีระบายลงแหล่งน้ำที่มีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด เกินกว่า 3,000 mg/L ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำทิ้งที่จะระบายได้ต้องมีค่าเกินกว่าค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในแหล่งน้ำนั้นไม่เกิน 5,000 mg/L	กรองตัวอย่างผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
5. สารแขวนลอย (Suspended solids)	ไม่เกิน 50 mg/L	กรองตัวอย่างผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
6. บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 20 mg/L	บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นเวลา 5 วัน และหาค่า DO ด้วยวิธี Azide Modification หรือ วิธี Membrane Electrode
7. ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 120 mg/L	ย่อยสลายโดยใช้ $K_2Cr_2O_7$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
8. ซัลไฟด์ (Sulfide)	ไม่เกิน 1 mg/L	วิธี Iodometric Method หรือวิธี Methylene Blue Method
9. ไซยาไนด์ (Cyanide, HCN)	ไม่เกิน 0.2 mg/L	กลั่นและตรวจวัดด้วยวิธี Colorimetric Method หรือวิธี Flow Injection Analysis
10. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5 mg/L	สกัดด้วยตัวทำละลายโดยเทคนิค Liquid-Liquid Extraction หรือวิธี Soxhlet Extraction แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
11. พอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1 mg/L	วิธี Colorimetric Method
12. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1 mg/L	กลั่นและตรวจวัดด้วยวิธี Colorimetric Method
13. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1 mg/L	Titrimetric Method และวิธี Colorimetric Method
14. สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบ	วิธี Gas-Chromatographic Method
15. ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 mg/L	วิธี Kjeldahl
16. โลหะหนัก (Heavy Metal)		
1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5 mg/L	Atomic Absorption Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma
2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 mg/L	วิธี Colorimetric Method หรือ Atomic Absorption Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma
3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 mg/L	วิธีคำนวณส่วนต่างของโครเมียมทั้งหมดกับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 mg/L	Atomic Absorption Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 mg/L	Atomic Absorption Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 mg/L	
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 mg/L	
8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 mg/L	Atomic Absorption Spectrometry
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5 mg/L	ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Inductively Coupled Plasma
10. สารหนู (As)	ไม่เกิน 0.25 mg/L	Atomic Absorption Spectrometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Inductively Coupled Plasma Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry หรือวิธี Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma
11. ซีลีเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 mg/L	
12.ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 mg/L	

ที่มา : ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ลงวันที่ 29 มีนาคม 2559 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 113 ตอนพิเศษ 129 ง วันที่ 6 มิถุนายน 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

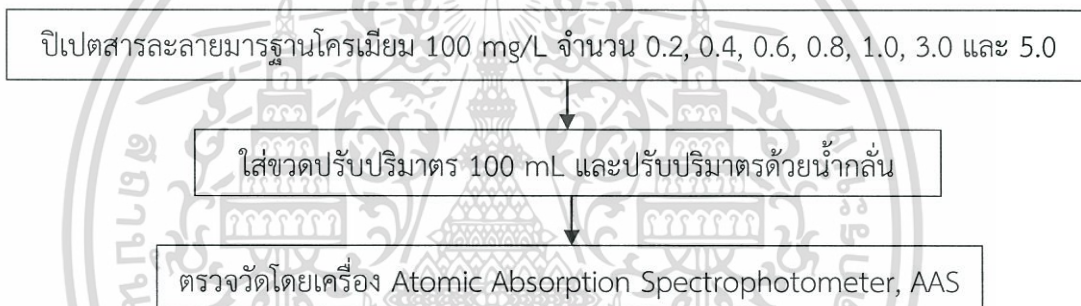
การเตรียมสารมาตรฐาน

1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานโครเมียม

1.1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานโครเมียมความเข้มข้น 100 mg/L



1.2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานโครเมียมความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 3.0 และ 5.0 mg/L



รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานของโครเมียม

ได้สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น $y = mx + c$ และ มีค่า $R^2 = 0.9988$

มีช่วงเส้นตรงที่ตรวจวัดได้ เริ่มจาก 0.20 - 5.00 mg/L

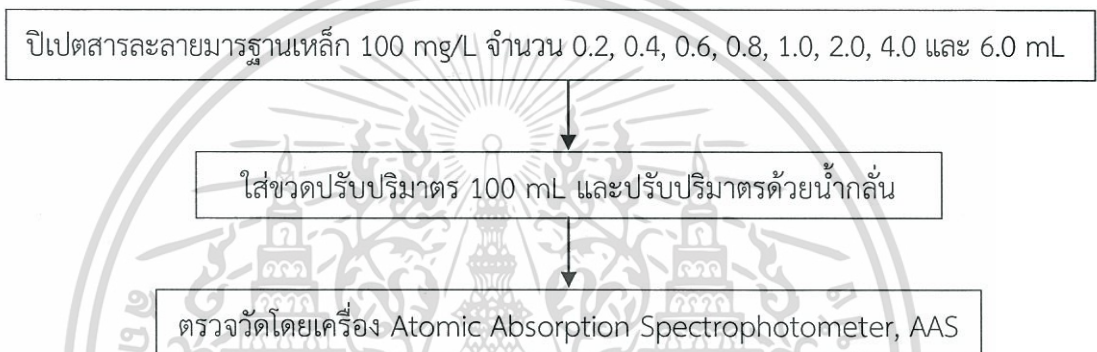
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็ก

2.1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็กความเข้มข้น 100 mg/L



2.2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็กความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 4.0 และ 6.0 mg/L



รูปที่ ข-3 กราฟมาตรฐานของเหล็ก

ได้สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น $y = mx + c$ และ มีค่า $R^2 = 0.9913$

มีช่วงเส้นตรงที่ตรวจวัดได้ เริ่มจาก 0.20 - 6.00 mg/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การคำนวณผลการทดลอง

1. คำนวณหาการอุ้มน้ำของเรซิน โดยนำเรซินแห้งไปแช่น้ำ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

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

ตัวอย่างการคำนวณที่ น้ำหนักเรซินเปียก = 87.1750 g และน้ำหนักเรซินแห้ง = 50.0008 g

$$\begin{aligned} \% \text{ การอุ้มน้ำ} &= \left(\frac{87.1750 - 50.0008}{87.1750} \right) \times 100 \\ &= 42.64\% \end{aligned}$$

2. คำนวณหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity, CEC) ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก หาได้จากความจุในการแลกเปลี่ยนทั้งหมด เท่ากับ 2.0 eq/L และความหนาแน่นรวมเท่ากับ 840 g/L ข้อมูลดังตารางตารางที่ 2.2

$$\begin{aligned} \text{CEC} &= \frac{2.0 \text{ eq/L}}{840 \text{ g/L}} \\ &= 2.38 \text{ meq/g} \end{aligned}$$

3. คำนวณหาความชื้นของเรซิน โดยนำเรซินเปียกไปอบไล่ความชื้นที่ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

$$\% \text{ ความชื้น} = \left(\frac{\text{น้ำหนักเรซินเปียก} - \text{น้ำหนักเรซินแห้ง}}{\text{น้ำหนักเรซินแห้ง}} \right) \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณที่ น้ำหนักเรซินเปียก = 50.0006 g และน้ำหนักเรซินแห้ง = 36.4849 g

$$\begin{aligned} \% \text{ ความชื้น} &= \left(\frac{50.0006 - 36.4849}{36.4849} \right) \times 100 \\ &= 37.04\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คำนวณหาน้ำหนักเรซินแห้ง

$$\text{น้ำหนักเรซินแห้ง} = \left(\frac{100 \times \text{น้ำหนักเรซินเปียก}}{100 + \% \text{ความชื้น}} \right)$$

ตัวอย่างการคำนวณที่ น้ำหนักเรซินเปียก = 1.0047 g และ % ความชื้น = 37.04%

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักเรซินแห้ง} &= \left(\frac{100 \times 1.0047}{100 + 37.04} \right) \\ &= 0.7331 \text{ g} \end{aligned}$$

5. คำนวณหาค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกด้วยวิธีแอมโมเนียอะซิเตด (CEC)

ตอนที่ 1 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ NaOH 0.1 N

ครั้งที่	ความเข้มข้นของ KHP (N)	ปริมาตร NaOH ที่ใช้ (mL)
1	0.0980	19.90
2	0.0981	20.00
3	0.0981	20.00
เฉลี่ย	0.0980	19.97

$$\begin{aligned} C_{\text{NaOH}} &= \frac{C(\text{KHP}) \times V(\text{KHP})}{V(\text{NaOH})} \\ &= \frac{0.0980 \text{ N} \times 20 \text{ mL}}{19.97 \text{ mL}} \\ &= 0.0982 \text{ N} \end{aligned}$$

ตอนที่ 2 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ HCL 0.1 N

ครั้งที่	ความเข้มข้นที่แน่นอนของ NaOH (N)	ปริมาตร HCL ที่ใช้ (mL)
1	0.0985	21.85
2	0.0981	21.80
3	0.0981	21.81
เฉลี่ย	0.0982	21.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$= \frac{0.0982 \text{ N} \times 20 \text{ mL}}{21.82 \text{ mL}}$$

$$= 0.0900 \text{ N}$$

ตอนที่ 3 การหาการแลกเปลี่ยนประจุบวกของเรซิน

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

เมื่อ A คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับสารละลายตัวอย่างเรซิน (mL)

B คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลนด์ (mL)

N คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มอล)

W คือ น้ำหนักแห้งมีหน่วยเป็น g ของเรซิน

ครั้งที่ 1

$$\text{CEC} = \frac{(18.86 - 0.1) \times 0.0900 \times 100}{1.0001 \times 1000}$$

$$= 1.7882 \text{ meq/g}$$

ครั้งที่ 2

$$\text{CEC} = \frac{(15.69 - 0.1) \times 0.0900 \times 100}{1.0004 \times 1000}$$

$$= 1.4025 \text{ meq/g}$$

ครั้งที่ 3

$$\text{CEC} = \frac{(15.20 - 0.1) \times 0.0900 \times 100}{1.0004 \times 1000}$$

$$= 1.3585 \text{ meq/g}$$

เฉลี่ย

$$\text{CEC}_{\text{เฉลี่ย}} = \frac{\text{CEC}_1 + \text{CEC}_2 + \text{CEC}_3}{3}$$

$$= \frac{1.7882 + 1.4025 + 1.3585}{3}$$

$$= 1.5164 \text{ meq/g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. คำนวณค่าการนำไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 25 °C

$$EC_{25} = \frac{EC_t}{[1 + 0.02(T - 25)]}$$

- เมื่อ EC_{25} คือ ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 °C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
 EC_t คือ ค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้ที่อุณหภูมิ T °C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
 T คือ อุณหภูมิ (°C)

ตัวอย่างการคำนวณที่ $EC_t = 63.13 \mu\text{S}/\text{cm}$ และ $t = 30.0 \text{ }^\circ\text{C}$

$$EC_{25} = \frac{63.13}{[1 + 0.02(30.0 - 25)]}$$

$$= 57.39 \mu\text{S}/\text{cm}$$

7. คำนวณค่าโออาร์พี (Oxidation - Reduction Potential)

คำนวณค่า Eh_{FAS}

$$Eh_{FAS} = 0.675 - 0.0022(T - 25)$$

- เมื่อ Eh_{FAS} คือ ค่า ORP ของสารละลายมาตรฐาน ที่ใช้ขั้วแพลทินัม - ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ วัด ณ อุณหภูมิที่ปรับแก้ (mV)
 T คือ อุณหภูมิของสารละลายขณะที่วัด (°C)

ตัวอย่างการคำนวณที่ $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Eh_{FAS} = 0.675 - 0.0022(25 - 25)$$

$$= 0.675 \text{ mV}$$

คำนวณค่า Eh_s

$$Eh_s = Eh_{obs} + Eh_{FAS} - Eh_{FAS\ obs}$$

- เมื่อ Eh_s คือ ค่า ORP ของสารละลายตัวอย่างที่ปรับแก้ (mV)
 Eh_{obs} คือ ค่า ORP ของสารละลายตัวอย่างที่อ่านได้จริง (mV)
 Eh_{FAS} คือ ค่า ORP ของสารละลายมาตรฐาน FAS คำนวณจากค่า Eh (mV)
 $Eh_{FAS\ obs}$ คือ ค่า ORP ของสารละลายมาตรฐาน FAS ที่อ่านได้จริง (mV)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณที่ $E_{h_{obs}} = 414.03 \text{ mV}$, $E_{h_{FAS}} = 0.675 \text{ mV}$ และ $E_{h_{FAS_{obs}}} = 334.80 \text{ mV}$

$$E_{h_s} = 414.03 + 0.675 - 334.80$$

$$= 79.91 \text{ mV}$$

8. การเตรียมสารละลายโครเมียม (III) ที่ระดับความเข้มข้น 10 ppm

เตรียมสารละลายสต็อกโครเมียม (III) ความเข้มข้น 1000 ppm จาก $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ โดยคำนวณจาก

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

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

$$1 \text{ g Cr} = 1 \text{ g}$$

$$1 \text{ g Cr} \times \left(\frac{1 \text{ mol}}{51.9961 \text{ g}} \right) = 1.92 \times 10^{-2} \text{ mol Cr}$$

$$1 \text{ mol Cr} = 1 \text{ mol CrCl}_3$$

$$1.92 \times 10^{-2} \text{ mol CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \times \left(\frac{266.48 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \right) = 5.1250 \text{ g}$$

ดังนั้นต้องชั่ง $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 5.1250 g ในน้ำกลั่น 1,000 mL จะได้ความเข้มข้นโครเมียม (III) 1,000 ppm ถ้าต้องการสารละลายโครเมียม (III) ที่ความเข้มข้น 10 ppm ในน้ำกลั่น 1000 ppm คำนวณจาก

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

$$(1000 \text{ ppm}) V_1 = (10 \text{ ppm})(2000 \text{ mL})$$

$$V_1 = \left(\frac{(10 \text{ ppm})(2000 \text{ mL})}{(1000 \text{ ppm})} \right)$$

$$V_1 = 20 \text{ mL}$$

9. การคำนวณหาความเข้มข้นของโครเมียม (III) (mg/L)

$$\text{ความเข้มข้นโลหะ Cr} = \frac{C_1 V_1}{C_2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ C_1 คือ ความเข้มข้นของโครเมียม (III) ที่อ่านได้จากเครื่อง AAS (mg/L)
 V_1 คือ ปริมาตรของน้ำเสียหลังย่อย (mL)
 V_2 คือ ปริมาตรของน้ำเสียก่อนย่อย (mL)

ตัวอย่างการคำนวณที่ $C_1 = 4.594$ (mg/L), $V_1 = 50$ mL และ $V_2 = 25$ mL

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นโลหะ Cr} &= \frac{C_1 V_1}{C_2} \\ &= \frac{4.594 \times 50}{25} \\ &= 9.1880 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

10. การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบำบัดของโครเมียม (III) (%)

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

- เมื่อ C_o คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม (III) (mg/L)
 C_e คือ ความเข้มข้นที่เหลือของโครเมียม (III) (mg/L)

ตัวอย่างการคำนวณที่ $C_o = 8.12$ mg/L และ $C_e = 0.628$ mg/L

$$\begin{aligned} \text{การกำจัด (\%)} &= \left(\frac{8.12 - 0.628}{8.12} \right) \times 100 \\ &= 92.27\% \end{aligned}$$

11. การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมต่อปริมาณเรซิน

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

- เมื่อ C_o คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม (mg/L)
 C_e คือ ความเข้มข้นที่เหลือของโครเมียม (mg/L)
 V คือ ปริมาตรเริ่มต้นของสารละลาย (mL)
 W คือ น้ำหนักแห้งของเรซิน (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณที่ $C_o = 8.12 \text{ mg/L}$, $C_e = 0.628 \text{ mg/L}$, $V = 25 \text{ mL}$ และ $W = 0.7331 \text{ g}$

$$\begin{aligned} \text{ความสามารถในการดูดซับ (mg/gเรซิน)} &= \frac{(8.12 - 0.628) \times 25}{0.7331 \times 1000} \\ &= 0.2555 \text{ mg/gเรซิน} \end{aligned}$$

12. การคำนวณพีเอชต่อการละลายของ $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

การคำนวณพีเอชต่อการละลายของ $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ เป็นการตรวจสอบช่วงพีเอชของสารละลายโครเมียมที่ระดับความเข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 25 mL ว่าจะเกิดการตกตะกอนในช่วงพีเอชเท่าไร เพื่อหลีกเลี่ยงในการปรับค่าพีเอช



$$\begin{aligned} K_{\text{sp}} &= [\text{Cr}^{3+}][3\text{OH}^-] \\ 6.3 \times 10^{-31} &= (1.92 \times 10^{-4})(X^3) \end{aligned}$$

$$X^3 = \frac{6.3 \times 10^{-31}}{1.92 \times 10^{-4}}$$

$$X = \sqrt[3]{\frac{6.3 \times 10^{-31}}{1.92 \times 10^{-4}}}$$

$$X = 1.49 \times 10^{-9}$$

คำนวณค่าพีเอช

$$\text{pOH} = -\log[\text{OH}^-]$$

$$= -\log(1.49 \times 10^{-9})$$

$$= 8.83$$

$$\text{pH} = 14 - 8.83$$

$$= 5.17$$

13. การคำนวณพีเอชต่อการละลายของน้ำเสียโครเมียม (III) จากห้องปฏิบัติการ

การคำนวณพีเอชต่อการละลายของน้ำเสียโครเมียม (III) จากห้องปฏิบัติการเป็นการตรวจสอบช่วงพีเอชของสารละลายโครเมียม (III) ที่ความเข้มข้น 1,633.9 ppm ปริมาตร 25 mL ว่าจะเกิดการตกตะกอนในช่วงพีเอชเท่าไร เพื่อทำการตกตะกอนน้ำเสียก่อนนำไปทำการบำบัดด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$K_{\text{sp}} = [\text{Cr}^{3+}][3\text{OH}^{-}]$$

$$6.3 \times 10^{-31} = (0.0314)(X^3)$$

$$X^3 = \frac{6.3 \times 10^{-31}}{0.0314}$$

$$X = \sqrt[3]{\frac{6.3 \times 10^{-31}}{0.0314}}$$

$$X = 2.72 \times 10^{-10}$$

คำนวณค่าพีเอช

$$\text{pOH} = -\log[\text{OH}^{-}]$$

$$= -\log(2.72 \times 10^{-10})$$

$$= 9.57$$

$$\text{pH} = 14 - 9.57$$

$$= 4.43$$

ดังนั้นพีเอชที่มากกว่า 4.43 จะทำให้โลหะหนักตกตะกอน

14. การคำนวณค่าคงที่ของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

คำนวณค่า K_d

$$m = \frac{1}{K_d Q_m}$$

$$K_d = \frac{1}{m Q_m}$$

$$K_d = \frac{1}{2.0712 \times 0.8783}$$

$$K_d = 0.5497$$

คำนวณค่า Q_m

$$C = \frac{1}{Q_m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ Q_m ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_m = \frac{1}{1.1386}$$

$$Q_m = 0.8783 \text{ mg/g}$$

15. การคำนวณค่าคงที่ของไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิช

คำนวณค่า 1/n

$$m = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{m}$$

$$n = \frac{1}{1.0206}$$

$$n = 0.9798$$

คำนวณค่า K_d

$$c = \log K_d$$

$$K_d = 10^c$$

$$K_d = 10^{0.5339}$$

$$K_d = 3.419$$

16. การคำนวณหาสมมูลมวล

การคำนวณสมมูลมวลเป็นการหาว่าปริมาณสารเริ่มต้นที่เติมลงไป และเมื่อผ่านการทดลองแล้วนำมาหาปริมาณสารที่อยู่ในตัวดูดซับว่ามีปริมาณใกล้เคียงกัน

ปริมาณโครเมียม (III) ที่ดูดซับ

สารละลายปริมาตร 1,000 mL จะมีปริมาตรโครเมียม (III) อยู่ 7.328 mg

ถ้าสารละลายปริมาตร 10 mL จะมีปริมาตรโครเมียม (III) อยู่ $= \frac{10 \times 7.328}{1,000}$ mg
 $= 0.0733$ mg

ปริมาณโครเมียม (III) ที่คายซับจากเรซิน

สารละลายปริมาตร 1,000 mL จะมีปริมาตรโครเมียม (III) อยู่ 4.267 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ถ้าสารละลายปริมาตร } 10 \text{ mL จะมีปริมาตรโครเมียม (III) อยู่} &= \frac{10 \times 4.267}{1,000} \text{ mg} \\ &= 0.0427 \text{ mg} \end{aligned}$$

ปริมาณโครเมียม (III) ที่เกาะอยู่บนเรซิน

$$\text{สารละลายปริมาตร } 1,000 \text{ mL จะมีปริมาตรโครเมียม (III) อยู่} \quad 0.303 \text{ mg}$$

$$\begin{aligned} \text{ถ้าสารละลายปริมาตร } 10 \text{ mL จะมีปริมาตรโครเมียม (III) อยู่} &= \frac{10 \times 0.303}{1,000} \text{ mg} \\ &= 0.0030 \text{ mg} \end{aligned}$$

$$\text{เรซินที่น้อยที่ปริมาตร } 0.1023 \text{ g จะมีปริมาตรโครเมียม (III) อยู่} \quad 0.0030 \text{ mg}$$

$$\begin{aligned} \text{เรซินที่น้อยที่ปริมาตร } 1.0038 \text{ g จะมีปริมาตรโครเมียม (III) อยู่} &= \frac{1.0038 \times 0.0030}{0.1023} \text{ mg} \\ &= 0.0297 \text{ mg} \end{aligned}$$

ปริมาณโครเมียมทั้งหมด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณโครเมียม (III) ทั้งหมด} &= \text{ปริมาณโครเมียม (III) ที่คายซับจากเรซิน} + \text{ปริมาณโครเมียม (III) ที่เกาะอยู่บนเรซิน} \\ &= 0.0427 + 0.0297 \text{ mg} \\ &= 0.0724 \text{ mg} \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาณโครเมียม (III) ทั้งหมด เท่ากับ 0.0724 mg เมื่อเทียบกับปริมาณโครเมียมเริ่มต้น 0.0733 mg

17. การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับโครเมียม (III)

เปอร์เซ็นต์การดูดซับเป็นการวิเคราะห์สารที่ทราบปริมาณในตัวอย่าง โดยหาได้จากปริมาณสารที่ดูดซับ กับปริมาณสารเริ่มต้น

$$\% \text{ การดูดซับ} = \left(\frac{\text{ปริมาณที่ดูดซับ (mg)}}{\text{ปริมาณเริ่มต้น (mg)}} \right) \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณที่ ปริมาณที่คายซับ = 0.0447 mg และปริมาณเริ่มต้น = 0.0776 mg

$$\% \text{ การดูดซับ} = \left(\frac{0.0733}{0.1939} \right) \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การคายซั้บ

เปอร์เซ็นต์การคายซั้บเป็นการวิเคราะห์สารที่ทราบปริมาณในตัวอย่าง โดยหาได้จากปริมาณสารที่คายซั้บกับปริมาณการดูดซั้บ

$$\% \text{ การคายซั้บ} = \left(\frac{\text{ปริมาณที่คายซั้บ}(mg)}{\text{ปริมาณการดูดซั้บ}(mg)} \right) \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณที่ ปริมาณที่คายซั้บ = 0.0447 mg และปริมาณการดูดซั้บ = 0.0776 mg

$$\begin{aligned} \% \text{ การคายซั้บ} &= \left(\frac{0.0427}{0.0733} \right) \times 100 \\ &= 58.23\% \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลการทดลอง

1. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR

1.1 อัตราส่วนเรซินต่อน้ำเสีย 25 mL และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (III) ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL แปรค่าอัตราส่วนเรซินตั้งแต่ 0.5, 1.0 และ 5.0 g เขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm อุณหภูมิ 30 °C ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ในการบำบัดตั้งแต่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 180, 360, 540, 720 และ 1,440 นาที

ตารางที่ ง-1 ผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR อัตราส่วนเรซิน 0.5 g

เวลา (นาที)	ชื่อ	C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	%การกำจัด	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})
10	ควบคุม	8.120				
	1		5.188	36.11	0.3659	0.2003
	2		5.239	35.48	0.3683	0.1956
	3		5.239	35.48	0.3685	0.1955
	เฉลี่ย		5.222	35.69	0.3676	0.1971
20	ควบคุม	8.754				
	1		5.037	42.46	0.3672	0.2531
	2		5.010	42.77	0.3672	0.2549
	3		5.055	42.25	0.3669	0.2521
	เฉลี่ย		5.034	42.49	0.3671	0.2533
30	ควบคุม	8.578				
	1		4.115	52.03	0.3674	0.3037
	2		3.799	55.71	0.3673	0.3253
	3		4.233	50.65	0.3659	0.2969
	เฉลี่ย		4.049	52.80	0.3668	0.3086

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1 ผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR อัตราส่วนเรซิน 0.5 g

เวลา (นาที)	ชื่อ	C _o (mg/L)	C _e (mg/L)	%การกำจัด	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})
40	ควบคุม	8.524				
	1		3.460	59.41	0.3678	0.3442
	2		3.478	59.20	0.3665	0.3442
	3		3.500	58.94	0.3664	0.3428
	เฉลี่ย		3.473	59.18	0.3669	0.3437
50	ควบคุม	8.316				
	1		3.490	58.03	0.3686	0.3273
	2		3.538	57.46	0.3683	0.3243
	3		3.526	57.60	0.3688	0.3247
	เฉลี่ย		3.518	57.70	0.3686	0.3255
60	ควบคุม	8.098				
	1		3.277	59.52	0.3670	0.3283
	2		3.317	59.04	0.3666	0.3260
	3		3.301	59.24	0.3658	0.3278
	เฉลี่ย		3.299	59.27	0.3665	0.3274
180	ควบคุม	7.63				
	1		0.897	88.24	0.3663	0.4595
	2		1.453	80.96	0.3656	0.4224
	3		2.040	73.26	0.3667	0.3811
	เฉลี่ย		1.463	80.82	0.3662	0.4210
360	ควบคุม	7.956				
	1		0.476	94.02	0.3685	0.5075
	2		0.548	93.11	0.3658	0.5063
	3		0.329	95.86	0.3662	0.5207
	เฉลี่ย		0.451	94.33	0.3668	0.5115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1 ผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR อัตราส่วนเรซิน 0.5 g

เวลา (นาทีก)	ชื่อ	C _o (mg/L)	C _e (mg/L)	%การกำจัด	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})
540	ควบคุม	8.364				
	1		0.481	94.25	0.3681	0.5354
	2		0.247	97.05	0.3704	0.5479
	3		0.298	96.44	0.3677	0.5484
	เฉลี่ย		0.342	95.91	0.3687	0.5439
720	ควบคุม	8.704				
	1		0.216	97.52	0.3678	0.5769
	2		0.167	98.08	0.3684	0.5793
	3		0.154	98.23	0.3668	0.5827
	เฉลี่ย		0.179	97.94	0.3677	0.5796
1,440	ควบคุม	8.05				
	1		0.167	97.93	0.3659	0.5385
	2		0.220	97.27	0.3659	0.5350
	3		0.012	99.85	0.3670	0.5475
	เฉลี่ย		0.133	98.35	0.3663	0.5404

ตารางที่ ง-2 ผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR อัตราส่วนเรซิน 1.0 g

เวลา (นาทีก)	ชื่อ	C _o (mg/L)	C _e (mg/L)	%การกำจัด	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})
10	ควบคุม	8.380				
	1		4.827	42.40	0.7330	0.1212
	2		4.361	47.96	0.7344	0.1368
	3		4.512	46.16	0.7327	0.1320
	เฉลี่ย			45.51	0.7334	0.1300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-2 ผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR อัตราส่วนเรซิน 1.0 g

เวลา (นาทึ)	ชื่อ	C _o (mg/L)	C _e (mg/L)	%การกำจัด	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})
20	ควบคุม	8.118				
	1		4.232	47.87	0.7328	0.1326
	2		4.505	44.51	0.7338	0.1231
	3		4.550	43.95	0.7336	0.1216
	เฉลี่ย		4.429	45.44	0.7334	0.1258
30	ควบคุม	8.516				
	1		3.797	55.41	0.7328	0.1610
	2		3.971	53.37	0.7341	0.1548
	3		3.857	54.71	0.7330	0.1589
	เฉลี่ย		3.875	54.50	0.7333	0.1582
40	ควบคุม	8.192				
	1		3.795	53.67	0.7330	0.1500
	2		3.087	62.32	0.7347	0.1737
	3		3.661	55.31	0.7329	0.1546
	เฉลี่ย		3.514	57.10	0.7335	0.1594
50	ควบคุม	8.662				
	1		2.783	67.87	0.7343	0.2002
	2		2.913	66.37	0.7333	0.1960
	3		2.684	69.01	0.7327	0.2040
	เฉลี่ย		2.739	67.75	0.7334	0.2000
60	ควบคุม	8.854				
	1		2.894	67.31	0.7327	0.2034
	2		3.090	65.10	0.7332	0.1965
	3		2.772	68.69	0.7335	0.2073
	เฉลี่ย		2.919	67.04	0.7331	0.2024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-2 ผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR ปริมาณ 1.0 g

เวลา (นาที)	ชื่อ	C _o (mg/L)	C _e (mg/L)	%การกำจัด	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})
180	ควบคุม	8.120				
	1		0.628	92.27	0.7331	0.2555
	2		0.686	91.55	0.7320	0.2539
	3		0.782	90.37	0.7326	0.2504
	เฉลี่ย		0.699	91.40	0.7326	0.2533
360	ควบคุม	8.690				
	1		0.242	97.22	0.7331	0.2881
	2		0.118	98.64	0.7336	0.2921
	3		0.210	97.58	0.7330	0.2892
	เฉลี่ย		0.190	97.81	0.7333	0.2898
540	ควบคุม	8.134				
	1		0.175	97.85	0.7337	0.2712
	2		0.179	97.80	0.7341	0.2709
	3		0.111	98.64	0.7326	0.2738
	เฉลี่ย		0.155	98.09	0.7335	0.2720
720	ควบคุม	8.096				
	1		0.135	98.33	0.7344	0.2710
	2		0.152	98.12	0.7325	0.2711
	3		0.093	98.85	0.7340	0.2726
	เฉลี่ย		0.127	98.44	0.7336	0.2716
1,440	ควบคุม	8.372				
	1		0.133	98.41	0.7333	0.2809
	2		0.091	98.91	0.7322	0.2827
	3		0.080	99.04	0.7325	0.2830
	เฉลี่ย		0.101	98.79	0.7327	0.2822

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-3 ผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR อัตราส่วนเรซิน 5.0 g

เวลา (นาที)	ชื่อ	C _o (mg/L)	C _e (mg/L)	%การกำจัด	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})
10	ควบคุม	7.478				
	1		3.585	52.06	3.6522	0.0266
	2		3.921	47.57	3.6503	0.0244
	3		3.615	51.66	3.6514	0.0264
	เฉลี่ย		3.707	50.43	3.6513	0.0258
20	ควบคุม	8.060				
	1		2.398	70.25	3.6537	0.0387
	2		2.446	69.65	3.6518	0.0384
	3		2.622	67.47	3.6500	0.0372
	เฉลี่ย		2.489	69.12	3.6518	0.0381
30	ควบคุม	8.374				
	1		2.688	67.90	3.6534	0.0389
	2		2.432	70.96	3.6502	0.0407
	3		2.316	72.34	3.6532	0.0415
	เฉลี่ย		2.479	70.40	3.6523	0.0404
40	ควบคุม	7.976				
	1		1.890	76.30	3.6529	0.0417
	2		1.654	79.26	3.6510	0.0433
	3		2.738	65.67	3.6536	0.0358
	เฉลี่ย		2.094	73.75	3.6525	0.0403
50	ควบคุม	7.814				
	1		1.733	77.82	3.6540	0.0416
	2		1.597	79.56	3.6507	0.0426
	3		2.044	73.84	3.6526	0.0395
	เฉลี่ย		1.791	77.08	3.6524	0.0412

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-3 ผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR อัตราส่วนเรซิน 5.0 g

เวลา (นาที)	ชื่อ	C _o (mg/L)	C _e (mg/L)	%การกำจัด	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})
60	ควบคุม	7.530				
	1		1.291	82.86	3.6538	0.0427
	2		1.654	78.03	3.6517	0.0402
	3		1.299	82.75	3.6506	0.0427
	เฉลี่ย		1.415	81.21	3.6520	0.0419
180	ควบคุม	7.972				
	1		0.368	95.38	3.6508	0.0521
	2		0.328	95.89	3.6508	0.0523
	3		0.423	94.69	3.6525	0.0517
	เฉลี่ย		0.373	95.32	3.6514	0.0520
360	ควบคุม	8.086				
	1		0.380	95.30	3.6513	0.0528
	2		0.213	97.37	3.6534	0.0539
	3		0.195	97.59	3.6533	0.0540
	เฉลี่ย		0.263	96.75	3.6527	0.0535
540	ควบคุม	7.884				
	1		0.250	96.83	3.6506	0.0523
	2		0.279	96.46	3.6517	0.0521
	3		0.207	97.37	3.6497	0.0526
	เฉลี่ย		0.245	96.89	3.6506	0.0523
720	ควบคุม	8.138				
	1		0.172	97.89	3.6533	0.0545
	2		0.173	97.87	3.6544	0.0545
	3		0.194	97.62	3.6520	0.0544
	เฉลี่ย		0.180	97.79	3.6533	0.0545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-3 ผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR อัตราส่วนเรซิน 5.0 g

เวลา (นาทึ)	ชื่อ	C _o (mg/L)	C _e (mg/L)	%การกำจัด	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})
1,440	ควบคุม	7.288				
	1		0.156	97.86	3.6523	0.0488
	2		0.132	98.19	3.6533	0.0490
	3		0.130	98.22	3.6532	0.0490
	เฉลี่ย			98.09	3.6529	0.0489

1.2 พีเอชที่เหมาะสม

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 25 mL อัตราส่วนเรซิน 1.0 g เซย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm อุณหภูมิ 30 °C ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ในการบำบัด 180 นาที แปรค่าพีเอชตั้งแต่ 2, 3, 4, 5 และพีเอชเดิม (3.82)

ตารางที่ ง-4 ผลของพีเอชต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR

พีเอช	ชื่อ	C _o mg/L	C _e mg/L	%การกำจัด	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})
2	ควบคุม	8.828				
	1		0.945	89.30	0.7322	0.2691
	2		0.586	93.36	0.7329	0.2811
	3		1.198	86.43	0.7320	0.2606
	เฉลี่ย		0.910	89.70	0.7324	0.2703
3	ควบคุม	10.250				
	1		0.962	90.61	0.7321	0.3172
	2		0.759	92.60	0.7318	0.3242
	3		1.034	89.91	0.7310	0.3152
	เฉลี่ย		0.918	91.04	0.7316	0.3189

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-4 ผลของพีเอชต่อการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ SR

พีเอช	ชื่อ	C _o mg/L	C _e mg/L	%การกำจัด	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})
4	ควบคุม	8.060				
	1		0.600	92.56	0.7318	0.2548
	2		0.571	92.92	0.7344	0.2549
	3		0.671	91.67	0.7312	0.2526
	เฉลี่ย		0.614	92.38	0.7325	0.2541
5	ควบคุม	8.370				
	1		1.180	85.90	0.7309	0.2459
	2		0.975	88.35	0.7309	0.2530
	3		0.733	91.24	0.7309	0.2612
	เฉลี่ย		0.963	88.50	0.7309	0.2534
พีเอชเดิม (3.82)	ควบคุม	8.120				
	1		0.628	92.27	0.7331	0.2555
	2		0.686	91.55	0.7320	0.2539
	3		0.782	90.37	0.7326	0.2504
	เฉลี่ย		0.699	91.40	0.7326	0.2533

2. ไอโซเทอร์มของการบำบัด

2.1 ไอโซเทอร์มจากการแปรปริมาณเรซิน

ตารางที่ ง-5 ผลของไอโซเทอร์มจากการแปรอัตราส่วนเรซิน โดยโดยใช้ SR

น้ำหนักเรซิน (g)	ชื่อ	C _o mg/L	C _e mg/L	Q (mg/g _{resin})	1/Q	1/C _e	logQ	logC _e
0.1	1	7.488	2.898	1.5663	0.64	0.35	0.19	0.46
	2		3.143	1.4852	0.67	0.32	0.17	0.50
	3		2.924	1.5576	0.64	0.34	0.19	0.47
	เฉลี่ย		2.988	1.5364	0.65	0.34	0.19	0.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-5 ผลของไอโซเทอร์มจากการแปรอัตราส่วนเรซิน โดยใช้ SR

น้ำหนักเรซิน (g)	ชื่อ	C _o mg/L	C _e mg/L	Q (mg/g _{resin})	1/Q	1/C _e	log Q	log C _e
0.3	1	7.618	1.933	0.6456	1.55	0.52	-0.19	0.29
	2		1.720	0.6709	1.49	0.58	-0.17	0.24
	3		1.907	0.6501	1.54	0.52	-0.19	0.28
	เฉลี่ย		1.853	0.6555	1.53	0.54	-0.18	0.27
0.5	1	7.63	0.897	0.4595	2.18	1.11	-0.34	-0.05
	2		1.453	0.4224	2.37	0.69	-0.37	0.16
	3		2.040	0.3811	2.62	0.49	-0.42	0.31
	เฉลี่ย		1.463	0.4210	2.39	0.76	-0.38	0.14
0.7	1	7.572	1.559	0.2933	3.41	0.64	-0.53	0.19
	2		1.137	0.3142	3.18	0.88	-0.50	0.06
	3		1.448	0.2991	3.34	0.69	-0.52	0.16
	เฉลี่ย		1.381	0.3022	3.31	0.74	-0.52	0.14
0.9	1	7.832	1.674	0.2340	4.27	0.60	-0.63	0.22
	2		1.931	0.2239	4.47	0.52	-0.65	0.29
	3		1.235	0.2498	4.00	0.81	-0.60	0.09
	เฉลี่ย		1.613	0.2359	4.25	0.64	-0.63	0.20
1.0	1	8.12	0.628	0.2555	3.91	1.59	-0.59	-0.20
	2		0.686	0.2539	3.94	1.46	-0.60	-0.16
	3		0.782	0.2504	3.99	1.28	-0.60	-0.11
	เฉลี่ย		0.699	0.2533	3.95	1.44	-0.60	-0.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ไอโซเทอร์มจากการแปรค่าความเข้มข้น

ตารางที่ ง-6 ผลของไอโซเทอร์มจากการแปรค่าความเข้มข้น โดยใช้ SR

ความเข้มข้น (mg/L)	ชื่อ	C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	Q (mg/g _{resin})	1/Q	1/ C_e	log Q	log C_e
10	1	8.120	0.628	0.2555	3.91	1.59	-0.59	-0.20
	2		0.686	0.2539	3.94	1.46	-0.60	-0.16
	3		0.782	0.2504	3.99	1.28	-0.60	-0.11
	เฉลี่ย		0.699	0.2533	3.95	1.44	-0.60	-0.16
30	1	26.180	3.030	0.7895	1.27	0.33	-0.10	0.48
	2		2.764	0.7992	1.25	0.36	-0.10	0.44
	3		2.010	0.8225	1.22	0.50	-0.08	0.30
	เฉลี่ย		2.601	0.8037	1.24	0.40	-0.09	0.41
60	1	54.520	3.989	1.7247	0.58	0.25	0.24	0.60
	2		2.422	1.7722	0.56	0.41	0.25	0.38
	3		4.273	1.7109	0.58	0.23	0.23	0.63
	เฉลี่ย		3.561	1.7359	0.58	0.30	0.24	0.54
90	1	82.040	7.830	2.5304	0.40	0.13	0.40	0.89
	2		7.586	2.5369	0.39	0.13	0.40	0.88
	3		6.838	2.5563	0.39	0.15	0.41	0.83
	เฉลี่ย		7.418	2.5412	0.39	0.14	0.41	0.87
120	1	111.560	10.852	3.4445	0.29	0.09	0.54	1.04
	2		8.550	3.5180	0.28	0.12	0.55	0.93
	3		13.425	3.3515	0.30	0.07	0.53	1.13
	เฉลี่ย		10.942	3.4380	0.29	0.09	0.54	1.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การคายซับด้วยกรดซัลฟิวริก 8% v/v

ตารางที่ ง-7 ผลของปริมาณโครเมียม (III) เริ่มต้น

ชื่อ	C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	$C_o - C_e$ (mg/L)	การดูดซับ (mg)	% การกำจัด	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})
ควบคุม	7.756						
1		0.428	7.328	0.0733	94.48	0.7357	0.2490
2		0.655	7.101	0.0710	91.55	0.7312	0.2428
3		0.264	7.492	0.0749	96.60	0.7360	0.2545
เฉลี่ย		0.449	7.307	0.0731	94.21	0.7343	0.2488

ตารางที่ ง-8 ผลของปริมาณโครเมียม (III) ที่คายซับจากเรซิน

ชื่อ	C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	การดูดซับ (mg)	การคายซับ (mg)	% การคายซับ	น้ำหนักเรซินแห้ง (g)
1	7.328	4.267	0.0733	0.0427	58.23	0.7357
2	7.101	3.037	0.0710	0.0304	42.77	0.7312
3	7.492	4.248	0.0749	0.0425	56.70	0.7360
เฉลี่ย	7.307	3.851	0.0731	0.0385	52.57	0.7343

ตารางที่ ง-9 ผลของปริมาณโครเมียม (III) ที่เกาะอยู่บนเรซิน

ชื่อ	C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	การดูดซับ (mg)	การคายซับ ของเรซิน 0.1 g (mg)	การคายซับ ของเรซิน 1.0 g (mg)	น้ำหนัก เรซินเปียก(g)	น้ำหนัก เรซินแห้ง(g)
1	7.328	0.303	0.0733	0.0030	0.0297	0.1023	0.0746
2	7.101	0.354	0.0710	0.0035	0.0339	0.1046	0.0763
3	7.492	0.327	0.0749	0.0033	0.0317	0.1039	0.0758
เฉลี่ย	7.307	0.328	0.0731	0.0033	0.0318	0.1036	0.0756

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การศึกษาการบำบัดโครเมียม (III) จากน้ำเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการบำบัดแบบเบดซ์

ตารางที่ ง-10 ผลการบำบัดโครเมียม (III) และ เหล็กด้วยวิธีการบำบัดแบบเบดซ์ ชุดที่ 1

ประเภทของโลหะหนัก	ชื่อ	C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	% การกำจัด	น้ำหนัก เรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})	Q (meq/g _{resin})
Cr (III)	ควบคุม	415.4					
	1		374.3	9.89	0.7357	1.3967	0.0806
	2		376.8	9.29	0.7312	1.3197	0.0761
	3		395.3	4.84	0.7360	0.6828	0.0394
	เฉลี่ย		382.1	8.01	0.7343	1.1331	0.0654
Fe	ควบคุม	150.4					
	1		140.8	6.38	0.7357	0.3262	0.0175
	2		146.9	2.33	0.7312	0.1197	0.0064
	3		145.4	3.32	0.7360	0.1698	0.0091
	เฉลี่ย		144.4	4.01	0.7343	0.2052	0.0110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-11 ผลการบำบัดโครเมียม (III) และ เหล็กด้วยวิธีการบำบัดแบบแบดจ์ ชุดที่ 2

ประเภทของโลหะหนัก	ชื่อ	C _o (mg/L)	C _e (mg/L)	% การกำจัด	น้ำหนัก เรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})	Q (meq/g _{resin})
Cr (III)	ควบคุม	325.8					
	1		295.9	9.18	0.7357	1.0161	0.0586
	2		318.6	2.21	0.7312	0.2462	0.0142
	3		314.5	3.47	0.7360	0.3838	0.0221
	เฉลี่ย		309.7	4.95	0.7343	0.5487	0.0317
Fe	ควบคุม	137.2					
	1		113.7	17.13	0.7357	0.7986	0.0429
	2		115.4	15.89	0.7312	0.7453	0.0400
	3		117.0	14.72	0.7360	0.6862	0.0369
	เฉลี่ย		115.4	15.91	0.7343	0.7434	0.0399

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-12 ผลการบำบัดโครเมียม (III) และ เหล็กด้วยวิธีการบำบัดแบบแบตช์ ชุดที่ 3

ประเภทของโลหะหนัก	ชื่อ	C _o (mg/L)	C _e (mg/L)	% การกำจัด	น้ำหนัก เรซินแห้ง (g)	Q (mg/g _{resin})	Q (meq/g _{resin})
Cr (III)	ควบคุม	390.0					
	1		360.7	7.51	0.7357	0.9957	0.0574
	2		351.2	9.95	0.7312	1.3265	0.0765
	3		368.4	5.54	0.7360	0.7337	0.0423
	เฉลี่ย		360.1	7.67	0.7343	1.0187	0.0588
Fe	ควบคุม	160.0					
	1		135.9	15.06	0.7357	0.8190	0.0440
	2		138.2	13.63	0.7312	0.7453	0.0400
	3		136.6	14.63	0.7360	0.7949	0.0427
	เฉลี่ย		136.9	14.44	0.7343	0.7864	0.0422

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ทางสถิติ

1. ผลของอัตราส่วนเรซิน และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมทางสถิติโดยใช้ General Linear Model

ศึกษาอัตราส่วนเรซินและระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการบำบัดโครเมียม (III) โดยแปรค่าอัตราส่วนเรซินตั้งแต่ 0.5, 1.0 และ 5.0 g แปรค่าระยะเวลาสัมผัสที่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 180, 360, 540, 720 และ 1440 นาที ทำการทดลองอย่างละ 3 ซ้ำ ศึกษาเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม (III) โดยตั้งสมมติฐานว่า อัตราส่วนเรซินเรซินและระยะเวลาสัมผัสมีผลรวมกันที่จะทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม (III) โดยเฉลี่ยแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ผลการทดลองดังนี้

General Linear Model: Y versus A, B

Factor	Type	Levels	Values
A	fixed	3	0.5, 1.0, 5.0
B	fixed	11	10, 20, 30, 40, 50, 60, 180, 360, 540, 720, 1440

Analysis of Variance for Y, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	2	2634.0	2634.0	1317.0	194.19	0.000
B	10	37781.3	37781.3	3778.1	557.07	0.000
A*B	20	2088.5	2088.5	104.4	15.40	0.000
Error	66	447.6	447.6	6.8		
Total	98	42951.4				

S = 2.60426 R-Sq = 98.96% R-Sq(adj) = 98.45%

Unusual Observations for Y

Obs	Y	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
13	58.4536	52.3088	1.5036	6.1448	2.89 R
15	48.0159	52.3088	1.5036	-4.2929	-2.02 R
19	88.2438	80.8213	1.5036	7.4225	3.49 R
21	73.2634	80.8213	1.5036	-7.5579	-3.55 R
44	62.3169	57.1004	1.5036	5.2165	2.45 R
77	79.2628	73.7462	1.5036	5.5165	2.59 R
78	65.6720	73.7462	1.5036	-8.0742	-3.80 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Grouping Information Using Tukey Method and 95.0% Confidence

A	B	N	Mean	Grouping
1.0	1440	3	98.79	A
1.0	720	3	98.44	A
0.5	1440	3	98.35	A
1.0	540	3	98.09	A
5.0	1440	3	98.09	A
0.5	720	3	97.94	A
1.0	360	3	97.81	A
5.0	720	3	97.79	A
5.0	540	3	96.89	A
5.0	360	3	96.75	A
0.5	540	3	95.91	A
5.0	180	3	95.32	A
0.5	360	3	94.33	A
1.0	180	3	91.40	A
5.0	60	3	81.21	B
0.5	180	3	80.82	B
5.0	50	3	77.08	B C
5.0	40	3	73.75	B C D
5.0	30	3	70.40	C D
5.0	20	3	69.12	C D
1.0	50	3	67.75	D
1.0	60	3	67.04	D E
0.5	60	3	59.27	E F
0.5	40	3	59.18	E F
1.0	40	3	57.10	F G
1.0	30	3	54.50	F G
0.5	30	3	52.80	F G H
0.5	50	3	52.31	F G H
5.0	10	3	50.43	G H I
1.0	10	3	45.51	H I
1.0	20	3	45.44	H I
0.5	20	3	42.49	I J
0.5	10	3	35.69	J

Means that do not share a letter are significantly different.

จากข้อมูลสรุปผลเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม (III) โดยเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เนื่องจากค่า P น้อยกว่า 0.05 จึงนำข้อมูลไปเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีของ Tukey เพื่อวิเคราะห์ว่าข้อมูลชุดไหนที่แตกต่างกันบ้าง พบว่า กลุ่ม A เป็นกลุ่มที่มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม (III) มากที่สุด ซึ่งปริมาณเรซิน เวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการบำบัดโครเมียม (III) ที่จุดสมดุล คือ 1.0 g และ 180 นาที ตามลำดับ เนื่องจากใช้ปริมาณเรซินและระยะเวลาที่สัมผัสน้อยที่สุดจึงเหมาะสมที่จะนำสภาวะที่กล่าวมาข้างต้นไปทำการทดลอง

2. ผลของค่าพีเอชที่เหมาะสมทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA

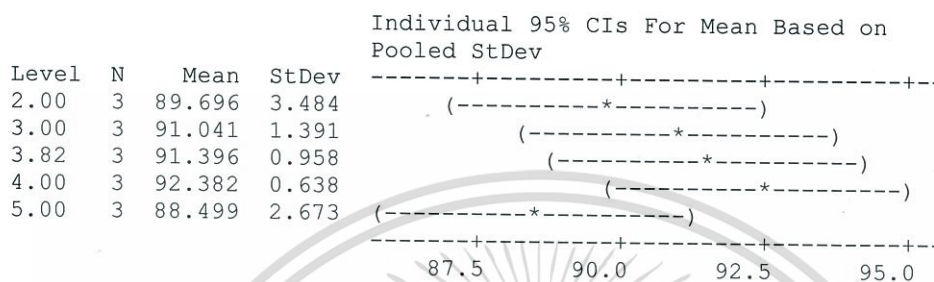
ศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดโครเมียม (III) โดยแปรค่าพีเอชที่ 2, 3, 4, 5 และพีเอชเดิม ทำการทดลองอย่างละ 3 ซ้ำ ศึกษาเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม (III) โดยตั้งสมมติฐานว่า พีเอชที่จะทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม (III) โดยเฉลี่ยแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

One-way ANOVA: Y versus A

Source	DF	SS	MS	F	P
A	4	27.71	6.93	1.54	0.265
Error	10	45.08	4.51		
Total	14	72.80			

S = 2.123 R-Sq = 38.07% R-Sq(adj) = 13.29%



Pooled StDev = 2.123

Grouping Information Using Tukey Method

A	N	Mean	Grouping
4.00	3	92.382	A
3.82	3	91.396	A
3.00	3	91.041	A
2.00	3	89.696	A
5.00	3	88.499	A

Means that do not share a letter are significantly different.

จากข้อมูลสรุปผลเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียม (III) โดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เนื่องจากค่า P มากกว่า 0.05 ซึ่งพีเอชที่เลือกมาทำการทดลอง คือ พีเอชเดิมของน้ำเสียสังเคราะห์ (3.82) เพื่อลดการใช้สารเคมีในการปรับค่าพีเอช และลดขั้นตอนในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนบำบัด