

การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยใช้กากของเหลวเขียว



นางสาว วิชชุดา ไชยะโชค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT OF HEAVY METAL WASTEWATER USING GREEN LIQUOR DREGS



Miss Vichchuda Chaiyachok

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering  
Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยใช้กากของเหลวเขียว

โดย

นางสาว วิชชุดา ไชยะโชค

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์


(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนिरูวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



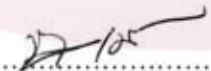
ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)



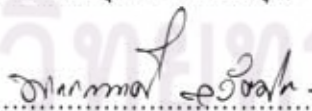
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)



กรรมการ

(อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล)



กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.พรรณวดี สุวัฒน์ิกะ)

ศูนย์วิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิชา ไซยะโชค : การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยใช้กากของเหลวเขียว.  
(Treatment of Heavy Metal Wastewater Using Green Liquor Dregs) อ. ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.สุธา ชาวเชียร, 108 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการใช้กากของเหลวเขียวสำหรับ  
ดูดซับโครเมียม และทองแดงจากน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม การดำเนินการ  
วิจัยนี้ได้ทำการทดลองแบบกวนผสมสมบูรณ์ ในระบบแบบครึ่งระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง และ  
ทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ในน้ำ  
เสียก่อน และหลังจากเขย่า ซึ่งน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจาก  
โรงงานชุบโครเมียม โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์คือ ค่าความเข้มข้นโครเมียม  
และ ทองแดง เท่ากับ 200 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และโครเมียมผสมทองแดงที่ความ  
เข้มข้นเดียวกัน โดยวิธีการหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจะทำการเขย่าเป็นเวลา 0.5 ถึง 24 ชั่วโมง  
วิธีการหาค่าพีเอชที่เหมาะสมจะทำการปรับค่าพีเอชเป็น 2 ถึง 9 และวิธีการหาไอโซเทอมนั้นจะทำการ  
ปรับปริมาณกากของเหลวเขียวเป็น 0 ถึง 1.2 กรัม/100มิลลิตร นอกจากนี้จะทำการศึกษาการคาย  
ออกของโลหะโดยใช้วิธี Waste Extraction Test (WET) ผลการวิจัยพบว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม  
ในการดูดซับโครเมียม และทองแดงมีค่าเท่ากับ 24 ชั่วโมง ช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม  
และทองแดงเท่ากับ 7-9 และไอโซเทอมที่เหมาะสมกับการดูดซับโครเมียมในน้ำเสีย คือไอโซเทอม  
ของฟรุนดริช และไอโซเทอมของแลงเมียร์ แต่การดูดซับทองแดงนั้นไม่เป็นไปตามไอโซเทอมของการ  
ดูดซับทั้งสองชนิด เนื่องจากเกิดกระบวนการตกตะกอนขึ้นเป็นส่วนใหญ่ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำ  
กากของเหลวเขียวมาใช้ในระบบการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น เพื่อกำจัดโลหะหนักบางส่วนก่อนเข้าสู่ระบบ  
บำบัดน้ำเสีย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....  
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....  
ปีการศึกษา 2552.....

ลายมือชื่อนิสิต ..... วิชา ไซยะโชค .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... ๑ ๗.....

## 5070612021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD : GREEN LIQUOR DREGS / ADSORPTION / CHROMIUM

VICHCHUDA CHAIYACHOK : TREATMENT OF HEAVY METAL WASTEWATER  
USING GREEN LIQUOR DREGS. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. SUTHA  
KHAODHIAR, Ph.D., 108 pp.

The objectives of this research were to find an optimum condition and efficiency of dregs in the adsorption of chromium and copper from synthetic wastewater and wastewater from electroplating factories. The experiment was carried out in a laboratory scale-completely mixed batch system at room temperature. The heavy metals concentration in the wastewater was measured by Atomic Adsorption Spectrophotometer before and after adsorption by Dregs. Two sample of synthetic wastewater was prepared; one with either chromium or copper and one with both chromium and copper at concentration of 200 and 20 mg/L, respectively. For adsorption kinetic studies samples were taken for heavy metals measurement at 0.5-24 hours of adsorption time. The pH range from 2-9 was studied to determine the optimum value. Isotherm was identified by varying the amount of dregs from 0-1.2 g/100ml. Furthermore, leaching test of heavy metals was performed by Waste Extraction Test (WET). The optimum condition for this study was 24 hours of contact time and pH range of 7-9. The adsorption isotherm of chromium can be described by both the Freundlich and Langmuir isotherm. For copper, the equilibrium was not followed the adsorption isotherm because the removal of copper is based on precipitation. Therefore, it would be plausible to use dregs in the preliminary treatment of wastewater to remove some of the heavy metals, and to reduce the amount of chemicals used in pH adjustment step in the precipitation process.

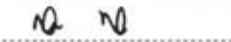
Department : Environmental Engineering...

Student's Signature



Field of Study : Environmental Engineering

Advisor's Signature



Academic Year : 2009.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ชาวเธียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนอาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล และ อาจารย์ ดร.พรรณวดี สุวฒิกะ ที่ได้ให้คำชี้แนะ ปรึกษา และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสี่ยอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ช่วยให้คำชี้แนะ ให้ความช่วยเหลืองานด้านเอกสาร และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือเสมอมา

คุณพรเทพ กมลานนท์ ผู้จัดการส่วนผลิต บริษัทสยามเซลลูโลส จำกัด และเจ้าหน้าที่โรงงาน ชุบโครเมียม จังหวัดกาญจนบุรี ที่กรุณาอนุเคราะห์ตัวอย่าง และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ เพื่อใช้สำหรับงานวิจัยนี้ตลอดระยะเวลาการศึกษา

ดร.อดิศักดิ์ วรรณพินิจ นักวิจัยศูนย์พัฒนาผลิตภัณฑ์และเทคโนโลยี บริษัทเอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความรู้ และข้อมูลเกี่ยวกับกากของเหลวเขียวที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงคำแนะนำต่างๆ ที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการทำงานวิจัย

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา พี่ชาย ซึ่งสนับสนุน ส่งเสริม และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ.....	4
2.1.1 กระบวนการแยกเยื่อกระดาษ.....	4
2.1.2 กากของเหลวเยื่อ.....	9
2.2 ไครเมียม.....	11
2.2.1 ลักษณะการชุบโครเมียม.....	11
2.2.2 วิธีการชุบโครเมียม.....	13
2.2.3 น้ำเสียจากการชุบโครเมียม.....	14
2.2.4 ไครเมียมในสารละลาย.....	16
2.2.5 ความเป็นพิษของโครเมียม.....	18
2.2.6 โลหะหนักชนิดอื่นๆ ในสารละลาย และความเป็นพิษ.....	19
2.2.7 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ.....	22

บทที่	หน้า
2.3 การดูดซับ หรือการดูดติดผิว(Adsorption).....	28
2.3.1 กลไกการดูดซับ.....	28
2.3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	29
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	30
2.3.4 สมดุลของการดูดซับ(Adsorption equilibrium).....	31
2.3.5 ประโยชน์ของการดูดซับในทางอุตสาหกรรม.....	36
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
2.4.1 กากของเหลวเขียว กับการนำไปใช้ประโยชน์.....	36
2.4.2 สารดูดซับ(Adsorbent)ในการดูดซับโครเมียม และทองแดงในน้ำเสีย.....	38
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	43
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	43
3.2 ตัวอย่าง และสารเคมีในการวิจัย.....	44
3.2.1 ตัวอย่างกากของเหลวเขียว(Dregs).....	44
3.2.2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก.....	45
3.3 อุปกรณ์ และเครื่องมือในการวิจัย.....	48
3.3.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือในการศึกษาสมบัติของกากของเหลวเขียว(Dregs).....	48
3.3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือในการศึกษาสมบัติ และปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย.....	49
3.3.3 อุปกรณ์ และเครื่องมือในการศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์.....	49
3.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
3.4.1 ตัวแปรกำหนด.....	50
3.4.2 ตัวแปรอิสระ.....	51
3.4.3 ตัวแปรตาม.....	52
3.5 วิธีการดำเนินการทดลอง.....	52
3.5.1 การวัดค่าประจุที่ผิวของกากของเหลวเขียว.....	52
3.5.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม.....	54



บทที่	ฉ	หน้า
3.5.3 การทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก.....		58
3.5.4 การศึกษาความสามารถในการคายออกของ โลหะหนักจากกากของเหลวเขียว.....		60
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....		62
4.1 การศึกษาประจุบนพื้นผิวของกากของเหลวเขียว(pH of Point of Zero Charge).....		62
4.2 การศึกษาสมบัติของกากของเหลวเขียว และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม.....		63
4.2.1 การศึกษาพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุน.....		63
4.2.2 การศึกษาลักษณะพื้นที่ผิว.....		63
4.2.3 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเขียว.....		65
4.2.4 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม.....		66
4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม.....		67
4.3.1 การศึกษาหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก.....		67
4.3.2 การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก.....		68
4.4 การทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก.....		72
4.5 การศึกษาความสามารถในการคายออกของโครเมียม และทองแดงจากกากของเหลวเขียว.....		75
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....		77
5.1 สรุปผลการวิจัย.....		77
5.2 ข้อเสนอแนะ.....		79
รายการอ้างอิง.....		81
ภาคผนวก.....		86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		108

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ความเข้มข้น (กรัมต่อกิโลกรัม) ของธาตุอาหาร (P Ca Na K Mg S Cu Zn) และธาตุโลหะ (Fe Mn Cd Cr Ni) ที่อยู่ในกากของเหลวเขียว (Dregs) จากโรงงานผลิตกระดาษ Stora Enso Oyj Veitsiluoto.....	10
2.2 สมบัติของกากของเหลวเขียว (Dregs) จากโรงงานผลิตกระดาษ Stora Enso Oyj Veitsiluoto.....	10
2.3 การใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรม.....	12
2.4 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานชุบโลหะ.....	19
2.5 งานวิจัยที่มีการนำกากของเหลวเขียวไปใช้ประโยชน์.....	37
2.6 เปรียบเทียบธาตุองค์ประกอบของกากของเหลวเขียวในการนำไปใช้ประโยชน์จากงานวิจัยต่างๆ.....	38
2.7 งานวิจัยที่มีการใช้สารดูดซับชนิดต่างๆ ในการดูดซับโครเมียม ในน้ำเสีย.....	41
2.8 งานวิจัยที่มีการใช้สารดูดซับชนิดต่างๆ ในการดูดซับทองแดง ในน้ำเสีย.....	42
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเขียว.....	45
3.2 ปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม(จินตนา สายวรรณ, 2541).....	46
3.3 ปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม.....	47
3.4 ตัวแปรกำหนด และพารามิเตอร์ ในการทดลองต่างๆ.....	50
3.5 ตัวแปรอิสระ และพารามิเตอร์ ในการทดลองต่างๆ.....	51
3.6 ตัวแปรตาม ในการทดลองต่างๆ.....	52
4.1 พื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุน ของกากของเหลวเขียวก่อน และหลังการดูดซับ.....	63
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเขียว.....	65
4.3 องค์ประกอบทางเคมีในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม.....	66
4.4 สมการเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และแลงเมียร์.....	73
4.2 ค่ามาตรฐานดัชนีคุณภาพน้ำสกัดที่ได้จากวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่จัดเป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548) ลงวันที่ 25 มกราคม 2549 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว, ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 11ง..	76

ตาราง	หน้า
ก.1 ผลการศึกษาประจุนพื้นผิวของกากของเหลวเขียว.....	88
ข.1 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม.....	90
ข.2 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง.....	90
ข.3 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียม ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม.....	91
ข.4 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง.....	91
ข.5 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง.....	92
ข.6 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับทองแดง ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม.....	92
ข.7 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โครเมียม โครเมียมผสมทองแดง และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม.....	93
ข.8 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง โครเมียมผสมทองแดง และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม.....	94
ข.9 ผลการตกตะกอนโครเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม โครเมียมผสมทองแดง และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	95
ข.10 ผลการตกตะกอนทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง โครเมียมผสมทองแดง และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	96
ค.1 ผลการศึกษ ปริมาณกากของเหลวเขียว ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม.....	98

ตาราง	หน้า
ค.2 ผลการศึกษาปริมาณกากของเหลวเขียว ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง.....	98
ค.3 ผลการศึกษาปริมาณกากของเหลวเขียว ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียม ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม.....	99
ค.4 ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และฟรุนดริชในการดูดซับโครเมียม จากน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม.....	99
ค.5 ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และฟรุนดริชในการดูดซับโครเมียม จากน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง.....	100
ค.6 ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และฟรุนดริชในการดูดซับโครเมียม จากน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม.....	100

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปประกอบ	หน้า
2.1 ขั้นตอนการผลิตเยื่อกระดาษ.....	5
2.2 วงจรการนำสารเคมีกลับคืน.....	8
2.3 แผนผังขั้นตอนการชุบโครเมียมและน้ำเสียที่เกิดขึ้น.....	15
2.4 รูปแบบของโครเมียม ( $Cr^{3+}$ ) ที่ละลายอยู่ในน้ำ ที่พีเอชต่างๆ.....	20
2.5 รูปแบบของทองแดง ( $Cu^{2+}$ ) ที่ละลายอยู่ในน้ำ ที่พีเอชต่างๆ.....	20
2.6 รูปแบบของนิกเกิล ( $Ni^{2+}$ ) ที่ละลายอยู่ในน้ำ ที่พีเอชต่างๆ.....	21
2.7 รูปแบบของสังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) ที่ละลายอยู่ในน้ำ ที่พีเอชต่างๆ.....	21
2.8 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ และซัลไฟด์ของโลหะหนัก.....	23
2.9 การบำบัดน้ำเสียของโรงชุบโลหะ.....	27
2.10 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับมายังสารดูดซับ.....	30
2.11 ไอโซเทอมการดูดซับแบบพื้นฐาน.....	32
2.12 สมการ (2.15) ของ Langmuir.....	33
2.13 สมการ (2.16) ของ Langmuir.....	33
2.14 สมการ (2.18) ของ BET.....	34
2.15 สมการ (2.20) ของ Freundlich.....	35
3.1 ตัวอย่างกากของเหลวเขียว จากเครื่องกรองระบบสุญญากาศ.....	44
3.2 ขั้นตอนการวัดค่าประจุบนพื้นผิว.....	53
3.3 ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก.....	55
3.4 ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก.....	57
3.5 ขั้นตอนการทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก.....	59
3.6 การศึกษาความสามารถในการคายออกของโลหะหนักจากกากของเหลวเขียว.....	61
4.1 ประจุบนพื้นผิวของกากของเหลวเขียวที่ค่า pH ต่างๆ.....	62
4.2 ลักษณะพื้นผิวของกากของเหลวเขียว ก่อนการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม.....	64
4.3 ลักษณะพื้นผิวของกากของเหลวเขียว หลังการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม.....	64
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น ( $C_0$ ) กับระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง) ในน้ำเสียนิตต่างๆ.....	67

รูปประกอบ	หน้า
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นทองแดงเริ่มต้น ( $C_0$ ) กับระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง) ในน้ำเสียชนิดต่างๆ.....	68
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น ( $C_0$ ) กับค่าพีเอช ในน้ำเสียชนิดต่างๆ.....	69
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นทองแดงเริ่มต้น ( $C_0$ ) กับค่าพีเอช ในน้ำเสียชนิดต่างๆ.....	69
4.8 ร้อยละการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม และทองแดง.....	70
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโครเมียมต่อปริมาณกากของเหลวเขียว (q) กับความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ ( $C_e$ ) ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง.....	72
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโครเมียมต่อปริมาณกากของเหลวเขียว (q) กับความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ ( $C_e$ ) ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม.....	72
4.11 ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมแบบฟรุนดริช และแลงเมียร์ในน้ำเสียชนิดต่างๆ.....	74
ง.1 พื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุน ของกากของเหลวเขียวก่อนการดูดซับ.....	102
ง.2 พื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุน ของกากของเหลวเขียวหลังการดูดซับ.....	103
ง.3 องค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเขียวก่อนการดูดซับตรวจวัดครั้งที่ 1.....	104
ง.4 องค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเขียวก่อนการดูดซับตรวจวัดครั้งที่ 2.....	105
ง.5 องค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเขียวหลังการดูดซับตรวจวัดครั้งที่ 1.....	106
ง.6 องค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเขียวหลังการดูดซับตรวจวัดครั้งที่ 2.....	107

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการ เยื่อกระดาษของประเทศไทย มีการเติบโตอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวมากขึ้นในอนาคต เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของประชาชน การผลิตเยื่อกระดาษนั้นประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ทั้งทางด้านเคมี และกึ่งเคมี ซึ่ง ก่อให้เกิดของเสียหลายอย่างตามมา เช่น ขี้เถ้า ตะกอน และ กากของเหลวเขียว (Dregs) โดยเฉพาะกากของเหลวเขียวนั้นมีปริมาณการปลดปล่อยออกมามากที่สุด ในจำนวนของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้น ซึ่ง ของเสียเหล่านี้ส่วนใหญ่จะถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ การฝังกลบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมนั้นต้องมีการออกแบบที่เหมาะสม ซึ่งทำให้ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของหลุมฝังกลบเพิ่มขึ้น และในอนาคตการหาพื้นที่ใหม่ในการทำหลุมฝังกลบ มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดปัญหาหลายด้านตามมา ดังนั้นการนำกากของเหลวเขียวมาใช้ให้เกิดประโยชน์ จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ภาคอุตสาหกรรมได้ให้ความสนใจเป็นอย่างมาก เพื่อลดปัญหาจากการฝังกลบของเสียดังกล่าว ในปัจจุบันพบว่า การนำกากของเหลวเขียวไปใช้ยังไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร เนื่องจากสมบัติบางประการของ กากของเหลวเขียว (ค่าพีเอชสูง และมีองค์ประกอบของโลหะหนักบางชนิด) ทำให้มีความจำเพาะต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งสมบัติดังกล่าวนี้เป็นสมบัติที่ อาจจะไม่เหมาะสมในการนำมาผลิตสารดูดซับเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้

เมื่อกล่าวถึงปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อม ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักจากน้ำเสีย อุตสาหกรรมสู่สิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่สำคัญเรื่องหนึ่ง โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการชุบโลหะ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว และใช้น้ำในกระบวนการผลิตค่อนข้างมาก น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ ในการชุบโลหะจะมีส่วนประกอบของโลหะหนักเป็นหลัก เช่น โครเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี หรือโลหะหนักอื่นๆ ขึ้นกับชนิดของการชุบ สารเหล่านี้มีความเป็นพิษสูงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำรวมทั้งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีมาตรการควบคุมสารพิษเหล่านี้ การบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมชุบโลหะในประเทศไทยสำหรับโรงงานขนาดใหญ่ที่มีเงินลงทุนสูงจะมีการเตรียมการ และมีความสามารถในการติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียภายในโรงงานซึ่งจะไม่เป็นปัญหามากนัก แต่สำหรับโรงงานขนาดกลาง และขนาดเล็กมักประสบปัญหาด้านเงินทุน และความ รับผิดชอบในการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้งลงวางระบายน้ำ ในปัจจุบันโรงงานขนาดกลาง และขนาดเล็กบางแห่งได้ใช้บริการของศูนย์บริการกำจัดกากของเสีย อุตสาหกรรม แต่ยังพบว่า มีโรงงานขนาดเล็กอีกจำนวนมาก โดยเฉพาะที่อยู่ตามห้องแถวไม่มีระบบ

ระบายน้ำเสีย และไม่ใช้บริการของศูนย์บริการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรม ได้ใช้วิธีระบายน้ำเสียลงสู่ท่อระบายน้ำสาธารณะ และแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม และสุขภาพอนามัยของมนุษย์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำ กากของเหลวเขียว มาใช้เป็นสารดูดซับสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ โดยศึกษาปัจจัยทางกายภาพ และเคมี รวมถึงประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก เพื่อให้สามารถนำกากของเหลวเขียวไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยที่ก่อให้เกิดผลดีทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมควบคู่กันไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักโครเมียม (ประจุบวก 6) และทองแดง (ประจุบวก 2) จากน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจาก โรงงานชุบโครเมียม โดยใช้กากของเหลวเขียว
- 1.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพของกากของเหลวเขียวในการกำจัดโลหะหนักโครเมียม (ประจุบวก 6) และทองแดง (ประจุบวก 2) จากน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม
- 1.2.3 ศึกษาความสามารถในการคายออกของโลหะหนักจากกากของเหลวเขียว

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภายใต้ดูแลของห้อง ใช้ตัวกลางกากของเหลวเขียวจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษใช้น้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ โดยมีรายละเอียด

- 1.3.1 กากของเหลวเขียวนำมาจากกระบวนการผลิตต่าง ( Causticizing) ในอุตสาหกรรม การผลิตเยื่อกระดาษ
- 1.3.2 ตัวอย่างน้ำเสียมีดังนี้
  - น้ำเสียจริงเก็บจากบ่อรวบรวมน้ำทิ้งหลังจากการชุบโครเมียม ในโรงงานชุบโครเมียม
  - น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (ประจุบวก 6) ความเข้มข้นเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง (ประจุบวก 2) ความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดงเตรียมที่ความเข้มข้นของ



โครเมียมเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

- 1.3.3 ทำการทดลองแบบแบตช์ (Batch) โดยวิเคราะห์ประสิทธิภาพ และสภาวะที่เหมาะสม ในการกำจัดโครเมียม (ประจุบวก 6) และทองแดง (ประจุบวก 2) โดยค่าพีเอชในการ ทดลองอยู่ในช่วง 2 ถึง 9

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เพื่อนำกากของเหลวเขียว มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย
- 1.4.2 เพื่อพัฒนากากของเหลวเขียวมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก โดยอาจเป็นทางเลือก หนึ่งใน การแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้
- 1.4.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นๆ โดยจะก่อให้เกิดผลดีทั้ง ทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมควบคู่กันไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษของประเทศไทย ได้มีการเติบโตอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวมากขึ้นในอนาคต เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของประชาชน การผลิตเยื่อกระดาษนั้นประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ทั้งทางด้านเคมี และกึ่งเคมี ซึ่งก่อให้เกิดของเสียหลายอย่างตามมา เช่น ขี้เถ้า ตะกอน และ กากของเหลวเขียว ซึ่งของเสียเหล่านี้ส่วนใหญ่จะถูกนำไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ อย่างไรก็ตามการฝังกลบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมนั้นต้องมีการออกแบบที่เหมาะสมซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการหลุมฝังกลบมีค่าสูง ในปัจจุบันแนวทางการนำของเสียเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ เป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจมากในอุตสาหกรรมกระดาษ และเยื่อกระดาษ

##### 2.1.1 กระบวนการแยกเยื่อกระดาษ

กระบวนการแยกเยื่อกระดาษ โดยกระบวนการทางเคมี หรือกึ่งเคมี เป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุด เพื่อให้ลิกนินในเนื้อไม้ละลายออกมาพร้อมกับเยื่อไม้ ดังนั้นการนำสารเคมีกลับคืนไปใช้ใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จึงเป็นกระบวนการที่ให้ผลกำไร และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

###### 2.1.1.1 กระบวนการทางเคมี

กระบวนการทางเคมีเป็นวิธีการผลิตเยื่อที่ใช้สารเคมีละลายสารในเนื้อไม้ที่เป่า “นัตวียัดให้เส้นใยกับเส้นใยที่จับตัวกันไว้ออกมา วิธีการนี้เป็นวิธีการนำวัตถุดิบมาต้มกับสารเคมีความเข้มข้นสูงในหม้อต้มเยื่อ (Digester) โดยเยื่อจากกระบวนการนี้จะมีปริมาณเซลลูโลสสูง มีลิกนินและสารอินทรีย์อื่น ๆ ปนอยู่น้อยมาก มีความแข็งแรงสูง ใช้ผลิตกระดาษที่มีคุณภาพดี กระบวนการนี้แบ่งออกตามประเภทสารเคมีที่ใช้ได้ดังนี้ คือ

1. กระบวนการโซดา (Soda process) เป็นกระบวนการที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารเคมีในการต้มเยื่อ นอกจากนี้การผลิตกระดาษชนิดพิเศษ เช่น กระดาษสา ก็จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเช่นกัน

2. กระบวนการซัลเฟตหรือคราฟท์ (Sulphate or Kraft process) สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการนี้ คือ โซเดียมซัลไฟด์ แต่เรียกชื่อกระบวนการซัลเฟตเนื่องจากใช้สารเคมีโซเดียม

ซัลเฟต (Sodium sulphate) ในการทำน้ำยาเคมีกลับคืน เยื่อซัลเฟตส่วนใหญ่ใช้ทำกระดาษคราฟท์ (Kraft paper) กระดาษผิวกล่อง (Kraft linerboard) และเยื่อซัลเฟตฟอกขาวใช้ทำกระดาษได้หลายชนิดตั้งแต่กระดาษพิมพ์เขียน กระดาษอนามัย และอื่นๆ

โรงงานผลิตเยื่อกระดาษในประเทศไทยที่ใช้กระบวนการผลิตทางเคมีนั้น มีทั้งแบบโซดา (Soda process) และแบบซัลเฟต (Kraft process) ซึ่งกระบวนการผลิตทั้งสองแบบจะต่างกันเฉพาะสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อดังกล่าว แต่ในขั้นตอนอื่น ๆ จะคล้ายคลึงกันแสดงในรูปที่ 2.1 สำหรับขั้นตอนการผลิตเยื่อโดยใช้กระบวนการทางเคมี โดยทั่วไปจะเริ่มจากการนำวัตถุดิบจากหน่วยเตรียมวัตถุดิบเข้าสู่หม้อต้มเยื่อ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกเส้นใยในวัตถุดิบออกจากกัน ขณะเดียวกันก็ให้เยื่อที่มีคุณภาพตามที่กำหนด สารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อเรียกว่า ของเหลวขาว (White liquor) หรือน้ำยาต้มเยื่อ ซึ่งก็คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na<sub>2</sub>S) แล้วต้มในหม้อต้มเยื่อแบบต่อเนื่อง (Continuous digester) โดยชิ้นไม้สับ และน้ำยาต้มเยื่อ จะถูกผสมกันแล้วส่งเข้าทางด้านบนของหม้อต้มเยื่อ หม้อต้มเยื่อจะมีลักษณะเป็นท่อในแนวตั้ง ภายในมีความดัน ขณะที่ชิ้นไม้ (Chip) ไหลลงในถังจะมีการให้ความร้อนด้วย เยื่อที่ผ่านการต้มและล้างแล้วจะถูกส่งออกมาทางด้านล่างของหม้อต้ม



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตเยื่อกระดาษ (การผลิตเยื่อกระดาษ, [www.knowpulp.com/soodakattilyleista.htm](http://www.knowpulp.com/soodakattilyleista.htm), [22 กันยายน 2551])

เส้นใยที่แยกออกจากกันแล้ว จะนำมาผ่านขั้นตอนการคัดขนาดของเยื่อเพื่อแยกเยื่อออกจากสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ต้องการ ซึ่งสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ได้แก่ ตาไม้ (Knot) ชิ้นไม้สับที่ผ่านการต้มยังไม่สมบูรณ์ เส้นใยที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการคัดขนาด ได้แก่ เครื่องแยกตาไม้ (Disc knotter) ตะแกรงหยาบ (Vibrating knotter screen) เครื่องร่อนแยกเยื่อ (Delta screen) และอื่นๆ แล้วนำเข้าสู่ขั้นตอนการล้างเยื่อต่อไป

เยื่อที่ได้เมื่อผ่านการคัดขนาดแล้วจะนำไปผ่านขั้นตอนการล้าง ในขั้นตอนนี้ของเหลวจากการต้มเยื่อจะถูกล้างแยกออกจากเยื่อ ของเหลวเหล่านั้นประกอบด้วย สารเคมี ลิกนิน และส่วนประกอบอื่นๆ ของเส้นใย ของเหลวที่ได้นี้เรียกว่า ของเหลวดำ (Black liquor) ซึ่งจุดประสงค์ในการล้างเยื่อ คือ ล้างของเหลวดำออกจากเยื่อ ลดการใช้สารเคมีในขั้นตอนการผลิตถัดไป และนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ในขั้นตอนการต้มเยื่ออีกครั้ง สำหรับการผลิตเยื่อกระดาษในโรงงานขนาดใหญ่ที่มีระบบนำสารเคมีกลับคืน (Chemical recovery) จำนวนครั้งในการล้างเยื่อขึ้นอยู่กับกระบวนการต้มเยื่อ โดยการต้มเยื่อแบบที่ละถัง โดยปกติจะมีขั้นตอนการล้างเยื่อประมาณ 4-5 ขั้นตอน การล้างเยื่อจะทำในถังล้าง (Drum washer) และใช้หลักการล้างเยื่อแบบ Counter current คือ จะใช้น้ำดีเฉพาะขั้นตอนการล้างขั้นสุดท้ายแล้วนำน้ำนั้นวนกลับมาล้างเยื่อในขั้นตอนแรก ๆ

ขั้นตอนการฟอกเยื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพเยื่อในด้านความขาว (Brightness) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในการผลิตกระดาษบางชนิด เช่น กระดาษพิมพ์เขียน กระดาษทิชชู กระดาษสา กระบวนการฟอกเยื่อยังแบ่งเป็นแบบขั้นตอนเดียว หรือหลายขั้นตอน ขึ้นกับความขาวของเยื่อที่ต้องการ เช่น กระดาษพิมพ์เขียน และกระดาษทิชชู ที่ต้องการความขาวของเยื่อมากจะใช้วิธีการฟอกหลายขั้นตอน สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อมีหลายชนิด ได้แก่ ไฮโปคลอไรท์ คลอรีน โซเดียมไฮดรอกไซด์ คลอรีนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

เยื่อที่ฟอกแล้วในแต่ละขั้นตอนจะผ่านการล้างในทุก ๆ ขั้นตอนการฟอก เมื่อฟอกเสร็จแล้วเยื่อที่ได้จะเรียกว่า Bleached pulp ซึ่งจะส่งไปเก็บในถังเพื่อส่งต่อไปยังขั้นตอนเดินแผ่น (Sheet forming) หรือส่งไปยังโรงงานผลิตกระดาษ ในกรณีที่เป็นโรงงานผลิตทั้งเยื่อและกระดาษ (Integrated mill) ในส่วนของการฟอกเยื่อแบบระบบทั่วไป (Conventional) ที่ยังคงใช้ในโรงงานผลิตเยื่อกระดาษของประเทศไทยซึ่งใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบ จะมีขั้นตอนในการฟอกเยื่อ 4 ขั้นตอนโดย ขั้นตอนแรกจะใช้ก๊าซคลอรีนในการฟอก จากนั้นจะนำเยื่อไปล้างในเครื่องล้างเยื่อ แล้วจึงนำเยื่อไปผ่านเข้าเครื่องเพิ่มอุณหภูมิเยื่อให้มีอุณหภูมิ 45°C แล้วนำไปฟอกต่อใน ขั้นตอนที่ 2 ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการฟอก ขั้นตอนที่ 3 ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ฟอก และขั้นตอนที่ 4 ใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ในการฟอก เมื่อทำการฟอกเยื่อเสร็จในแต่ละขั้นตอน ก็จะนำมาผ่านการล้างเยื่อทุกครั้ง ซึ่งจะเป็นแหล่งกำเนิดน้ำเสียที่สำคัญลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย เยื่อที่ผ่านการล้างในขั้นตอนสุดท้ายแล้วจะถูกส่งไปกักเก็บไว้ในถังพักเยื่อ เพื่อนำไปใช้ในการผลิตกระดาษต่อไป

เยื่อจากหน่วยร่อนทำความสะอาดขั้นสุดท้ายจะเข้าสู่เครื่องเดินแผ่น (Sheet forming machines) โรงงานที่ผลิตเยื่อกระดาษส่วนใหญ่จะมีระบบน้ำวงจรปิด (Closed water system) ซึ่งจะนำน้ำได้ลวดเดินแผ่นวนกลับเข้าไปเจือจางเยื่อที่เฮดบ็อกซ์ (Head box) และน้ำล้นส่วนที่เหลือ (Overflow) จะนำกลับเข้าไปใช้ในขั้นตอนการล้างเยื่อ และเมื่อเยื่อผ่านกระบวนการเดินแผ่นแล้ว

จะเข้าสู่ขั้นตอนการอบแห้ง (Drying) เพื่อให้เหลือความชื้นประมาณ 10% ก่อนส่งไปจำหน่ายยังผู้บริโภค โดยเวลาที่ใช้ในการผลิตเยื่อทั้งหมดคิดเป็นเวลาประมาณ 18 ชั่วโมง

### 2.1.1.2 กระบวนการนำสารเคมีกลับคืน (Chemical recovery)

ระบบการนำสารเคมีกลับคืนจะมีในส่วนของการผลิตเยื่อแบบเคมี เนื่องจากการผลิตเยื่อแบบเคมีจะใช้สารเคมีในปริมาณมาก ถ้าหากไม่มีการนำสารเคมีกลับมาใช้อีกก็จะทำให้เยื่อกระดาษมีราคาแพงมากขึ้น เนื่องจากสารเคมีมีราคาแพง อีกทั้งยังทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการนำสารเคมีกลับคืน คือ เพื่อนำสารเคมีจากการต้มเยื่อกลับมาใช้ใหม่ และนำพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้สารอินทรีย์มาใช้ประโยชน์ ระบบนำสารเคมีกลับคืนประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ หน่วยทำระเหย (Evaporation plant) หม้อไอน้ำนำสารกลับคืน (Recovery boiler) และหน่วยทำด่าง และเตาเผาปูน (Causticizing plant & Lime kiln) วงจรนำสารเคมีกลับคืนแสดงในรูปที่ 2.1

#### 1. หน่วยทำระเหย (Evaporator)

หน่วยทำระเหยมีหน้าที่ระเหยน้ำออกจากของเหลวดำเจือจาง (Weak black liquor) ให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น หรือที่เรียกว่า ของเหลวดำเข้มข้น ก่อนที่จะส่งไปเป็นเชื้อเพลิงที่หม้อไอน้ำนำสารเคมีกลับคืน (Recovery boiler) ของเหลวดำเจือจางที่เกิดจากการล้างเยื่อที่ผ่านการต้มแล้วที่มีความเข้มข้นประมาณ 15-20% จะถูกส่งเข้าเครื่องทำระเหย เครื่องทำระเหยนี้จะมีหลายตัวต่อกันด้วยกันเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของของเหลวดำ และภายในเครื่องจะมีสภาพเป็นสุญญากาศเพื่อให้ความระเหยของน้ำเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ เครื่องทำระเหยทุกแบบจะใช้ไอน้ำความดันต่ำเป็นตัวให้ความร้อน เมื่อน้ำระเหยออกจากของเหลวดำจะมีพลังงานความร้อนอยู่ในไอน้ำนั้น ซึ่งสามารถส่งไประเหยน้ำจากของเหลวดำในเครื่องระเหยตัวอื่น ๆ ได้อีก เพื่อประหยัดไอน้ำ และพลังงาน ของเหลวดำที่ออกมาจากหน่วยทำระเหยจะมีความเข้มข้นประมาณ 65-70% ในหน่วยทำระเหยนี้ บางโรงงานจะมีระบบ Steam stripper เพื่อบำบัดน้ำคอนเดนเสทสกปรกให้สะอาด แล้วส่งไปใช้ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ ต่อไป

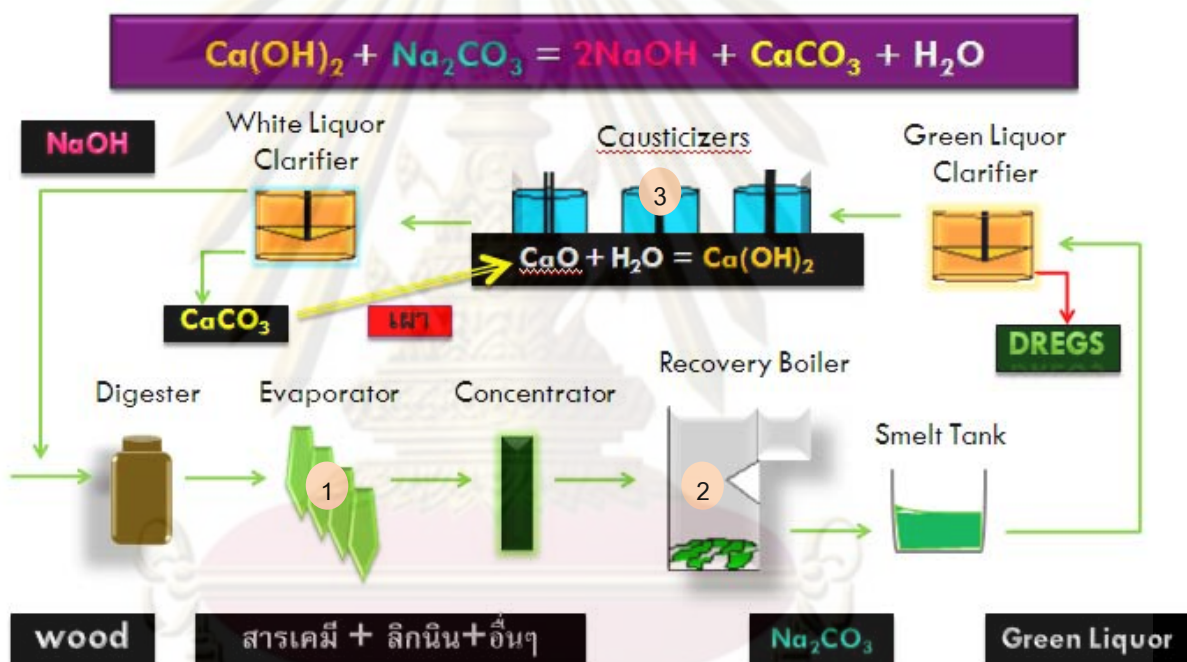
#### 2. หม้อไอน้ำนำสารกลับคืน (Recovery boiler)

หน้าที่ของหม้อไอน้ำนำสารกลับคืน คือ การเผาของเหลวดำที่ส่งมาจากหน่วยทำระเหย เพื่อให้สารเคมีในของเหลวดำ เปลี่ยนมาอยู่ในรูปที่เหมาะสม สำหรับการทำของเหลวขาว ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์จะถูกเผาไหม้ให้พลังงานความร้อนและนำความร้อนที่ได้ไปต้มน้ำเพื่อนำไอน้ำไปใช้ ส่วนสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของเกลืออินทรีย์โซเดียมก็จะกลายเป็นของแข็งหลอมเหลว (Smelt) ซึ่งประกอบด้วยโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) และโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ของแข็งหลอมเหลวจะถูกระบายออกทางด้านล่างของเตาลงมาที่ถังทำละลาย (Dissolving tank) ภายในถังทำละลายจะมีน้ำที่มาจาก 3 ส่วน คือน้ำเจือจางจากหน่วยทำด่าง น้ำที่ได้จากการล้างโคลนปูน (Lime mud)

และน้ำจากการล้างกากของเหลวเขียว (Dregs) เมื่อของแข็งหลอมเหลวผสมกับของเหลวในถังทำละลาย จะถูกเปลี่ยนเป็นของเหลวเขียว (Green liquor) และจะส่งของเหลวเขียว ที่เกิดขึ้นไปยังหน่วยทำต่าง เนื่องจากในการเผาไหม้จะเกิดอนุภาคฝุ่น และควัน ดังนั้นที่หม้อไอน้ำนำสารกลับคืนจึงต้องติดตั้งอุปกรณ์ดักฝุ่นก่อนระบายออกสู่บรรยากาศ

### 3. หน่วยทำต่าง (Causticizing plant & Lime kiln)

หน่วยทำต่างมีหน้าที่ผลิตของเหลวขาว (White liquor) จากของเหลวเขียว โดยการเติมปูนขาว และผลิตปูนขาวเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง ของเหลวเขียวจากเตาเผาของหม้อไอน้ำนำสารกลับคืน (Recovery boiler) จะถูกนำมาแยกเอาสิ่งเจือปนที่ไม่ละลายน้ำออกที่ถัง Green liquor clarifier จากนั้นส่วนที่เป็นของเหลวเขียวจะถูกส่งต่อไปผสมกับปูนขาวที่ Slaker เกิดเป็นของเหลว



รูปที่ 2.2 วงจรการนำสารเคมีกลับคืน

### 4. หม้อไอน้ำนำสารกลับคืน (Recovery boiler)

หน้าที่ของหม้อไอน้ำนำสารกลับคืน คือ การเผาของเหลวดำที่ส่งมาจากหน่วยทำระเหย เพื่อให้สารเคมีในของเหลวดำ เปลี่ยนมาอยู่ในรูปที่เหมาะสม สำหรับการทำของเหลวขาว ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์จะถูกเผาไหม้ให้พลังงานความร้อนและนำความร้อนที่ได้ไปต้มน้ำเพื่อนำไอน้ำไปใช้ ส่วนสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของเกลืออินทรีย์โซเดียมก็จะกลายเป็นของแข็งหลอมเหลว (Smelt) ซึ่งประกอบด้วยโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) และโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ของแข็งหลอมเหลวจะถูกระบายออกทางด้านล่างของเตาลงมาที่ถังทำละลาย (Dissolving tank) ภายในถังทำละลายจะ

มีน้ำที่มาจาก 3 ส่วน คือน้ำเจือจางจากหน่วยทำต่าง น้ำที่ได้จากการล้างโคลนปูน (Lime mud) และน้ำจากการล้างกากของเหลวเขียว (Dregs) เมื่อของแข็งหลอมเหลวผสมกับของเหลวในถังทำละลาย จะถูกเปลี่ยนเป็นของเหลวเขียว (Green liquor) และจะส่งของเหลวเขียว ที่เกิดขึ้นไปยังหน่วยทำต่าง เนื่องจากในการเผาไหม้จะเกิดอนุภาคฝุ่น และควัน ดังนั้นที่หม้อไอน้ำนำสารกลับคืนจึงต้องติดตั้งอุปกรณ์ดักฝุ่นก่อนระบายออกสู่บรรยากาศ

#### 5. หน่วยทำต่าง (Causticizing plant & Lime kiln)

หน่วยทำต่างมีหน้าที่ผลิตของเหลวขาว (White liquor) จากของเหลวเขียว โดยการเติมปูนขาว และผลิตปูนขาวเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง ของเหลวเขียวจากเตาเผาของหม้อไอน้ำนำสารกลับคืน (Recovery boiler) จะถูกนำมาแยกเอาสิ่งเจือปนที่ไม่ละลายน้ำออกที่ถัง Green liquor clarifier จากนั้นส่วนที่เป็นของเหลวเขียวจะถูกส่งต่อไปผสมกับปูนขาวที่ Slaker เกิดเป็นของเหลวขาว แต่ก่อนที่จะส่งของเหลวขาวไปยังหม้อต้ม จะทำการแยกโคลนปูน หรือแคลเซียมคาร์บอเนตออกก่อน ส่วนวิธีการที่ใช้แยกแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นสามารถทำได้ทั้งแบบการตกตะกอน และการกรอง หลังจากนั้นจึงล้างแคลเซียมคาร์บอเนต และกำจัดน้ำออกก่อนที่จะส่งไปเผาที่เตาเผาปูน (Lime kiln) เพื่อผลิตปูนขาวกลับมาใช้ที่ Slaker อีกครั้ง อุณหภูมิในเตาเผาปูนอยู่ในช่วง 1,100 ถึง 1,300 °C อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม้ไฟและข่าน้อยเป็นวัสดุที่มีซิลิกาอยู่ในเนื้อไม้ในปริมาณสูง หากนำแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นในหน่วยทำต่าง (Causticizing plant) ไปเผาต่อในเตาเผาเพื่อผลิตปูนขาวนั้น ซิลิกาจะทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนทำให้การเผาไม่สมบูรณ์ ดังนั้นเมื่อใช้ไม้ไฟและข่าน้อยเป็นวัสดุผลิตเยื่อกระดาษโรงงานจะนำแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นไปกำจัด โดยวิธีฝังกลบ

#### 2.1.2 กากของเหลวเขียว (Dregs)

กากของเหลวเขียวเป็นของแข็ง สีเทาดำ มีกลิ่นเล็กน้อย และมีค่าพีเอชค่อนข้างสูง เกิดจากการนำของเหลวสีดำที่ได้จากการต้มเยื่อไปเผาในหม้อไอน้ำ แล้วนำไปผสมกับของเหลวในถังทำละลายได้เป็นของเหลวเขียว ซึ่งประกอบด้วยไฮเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) และไฮเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) แล้วส่งไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอนออกจากของเหลวเขียว ตะกอนเหลวที่แยกได้จะเข้าสู่เครื่องกรอง และกากที่ไม่ผ่านเครื่องกรองเรียกว่า กากของเหลวเขียว (Dregs)

กากของเหลวเขียวมีส่วนประกอบของโลหะ และวัสดุที่ไม่ละลายน้ำ ตัวอย่างเช่น แมกนีเซียม แมงกานีส เหล็ก โพแทสเซียม แบริียม สังกะสี โครเมียม ทองแดง และอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 และมีสมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 2.2 ซึ่งถ้ามีปริมาณมากจะเป็นปัญหาในกระบวนการนำสารเคมีกลับคืน ทำให้การเดินระบบทำได้ยาก หรือเกิดตะกอนในระบบ

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้น (กรัมต่อกิโลกรัม) ของธาตุอาหาร (P Ca Na K Mg S Cu Zn) และธาตุโลหะ (Fe Mn Cd Cr Ni) ที่อยู่ในกากของเหลวเขียว (Dregs) จากโรงงานผลิตกระดาษ Stora Enso Oyj Veitsiluoto (Poykio และคณะ, 2006)

ธาตุอาหาร /ธาตุโลหะ	ปริมาณใน Dregs (กรัมต่อกิโลกรัม)
Ca	84.5
Mg	29.2
Na	26.1
S	10.6
Mn	10.3
Fe	4.5
K	1.7
Zn	1.2
Cr	0.3
Ni	0.2
Cu	0.11
P	0.01
Cd	<0.01

ตารางที่ 2.2 สมบัติของกากของเหลวเขียว (Dregs) จากโรงงานผลิตกระดาษ Stora Enso Oyj Veitsiluoto (Poykio และคณะ, 2006)

Property of Dregs	Value
pH	10.7 ± 0.04
Electrical Conductivity	16.5 ± 0.3 ms cm <sup>-1</sup>
Dry matter (105 °C )	54.4 ± 0.6 %
Loss on ignition (550 °C )	5.0 ± 0.1 %
Neutralizing Value (NV)	39.6 ± 0.3 % Ca
Reactivity Value (r <sub>ac</sub> )	39.4 ± 0.7 % Ca



ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ได้จัด Green liquor sludge จากกระบวนการเรียกคืนน้ำยาต้มเยื่อ (Green liquor sludge (From recovery of cooking liquor)) ในกระบวนการผลิตเยื่อ กระดาษ หรือกระดาษแข็ง (Wastes from pulp, paper and cardboard production and processing) เป็นของเสียรหัส 03 03 02 HM (Hazardous waste – Mirror entry) ถือว่าเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ที่มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตราย สำหรับสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีรหัสกำกับด้วย HM ผู้ประกอบการต้องทำการวิเคราะห์ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด ในกรณีที่ต้องการโต้แย้งว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วดังกล่าวไม่เข้าข่ายเป็นของเสียอันตรายตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

## 2.2 โครเมียม

โครเมียมถูกนำมาใช้ในงานต่างๆ หลายรูปแบบ รูปฟอร์มของสารโครเมียมขึ้นอยู่กับการใช้งาน ถ้าอยู่ในรูปของแข็งมักเป็นโครเมียมออกไซด์ ที่มีเลขออกซิเดชัน +2 หรือ +6 เช่น โครเมียม +2 ถูกใช้เป็นสารให้สี (Pigment) นำมาผสมเป็นสีทาอาคาร และโครเมียม +6 ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อใช้อยู่ในรูปของสารละลาย โครเมียมจะมีเลขออกซิเดชันเป็น +6 หรือ +3 โครเมียม +6 เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วจะเปลี่ยนจากโครเมียม +6 ไปเป็น +3 การใช้งานโครเมียม +6 เช่น การชุบโลหะโครเมียมขึ้นงานเพื่อป้องกันสนิม การทำเฟอร์นิเจอร์ให้มีความมันเงาสวยงาม การใช้งานฟอกหนังและการย้อม ตัวอย่างการนำโครเมียมไปใช้งานดังแสดงในตารางที่ 2.3

### 2.2.1 ลักษณะการชุบโครเมียม

การชุบโครเมียมแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือการชุบบางเพื่อความสวยงาม ( Decorative chromium) และชุบแข็ง (Hard chromium)

#### 2.2.1.1 การชุบเพื่อความสวยงามหรือชนิดบาง (Decorative chromium)

การชุบเพื่อความสวยงามหรือชนิดบางจำเป็นต้องมีการชุบรองพื้นก่อนชุบโครเมียม เพราะโครเมียมเป็นโลหะที่แข็งแต่เปราะมาก การชุบบางโดยตรงบนเหล็กจะเกิดรุกรุนอยู่ทั่วไป และทำให้หลุดร่อนได้ การชุบทำได้โดยการรองพื้นขึ้นงานด้วยทองแดงก่อนชุบนิเกิล และรองพื้นด้วยนิเกิลก่อนชุบโครเมียม เหมาะกับชิ้นงานที่เป็นเหล็ก เหล็กหล่อ โลหะผสม และอื่นๆ

### 2.2.1.2 การชุบชนิดแข็ง (Hard chromium)

การชุบชนิดแข็งสามารถทำการชุบได้โดยตรง ไม่ต้องมีการชุบทองแดงหรือนิกเกิลรองพื้น ซึ่งวิธีที่ใช้ คือวิธีการเคลือบเชิงไฟฟ้า (Electrolytic deposition) โดยเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับงานเชิงวิศวกรรม วัสดุที่นิยมนำมาชุบส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กกล้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กกล้าชุบแข็ง การชุบชนิดแข็งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ การชุบอย่างบางและการชุบหนา การชุบอย่างบางเป็นการชุบเพื่อยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และใช้ในงานที่มีอัตราความเสียดต่อการสึกกร่อนสูง หรืองานที่อยู่ในสภาพที่มีการกัดกร่อนทางเคมี สำหรับการชุบหนาเป็นการชุบเพื่อซ่อมแซมชิ้นส่วนอะไหล่ที่ชำรุดเสียหาย ให้กลับมาใช้งานได้โดยมีประสิทธิภาพดังเดิม ตัวอย่างชิ้นส่วนที่นำมาชุบชนิดแข็ง เช่น กระบอกสูบไฮดรอลิก (Hydraulic cylinder) ด้ามลูกสูบ (Pump shafts) ไบพัต (Rotors) ลูกไม้ (Rollers) วงแหวนลูกสูบ (Piston ring) ผิวด้านนอกเบ้าหล่อ (Mold surfaces) แม่พิมพ์ตอกโลหะ (Dies) ตะปูควง (Screws) เข็มร้อยด้าย (Thread guides) และลำกล้องปืน (Gun bores) เป็นต้น

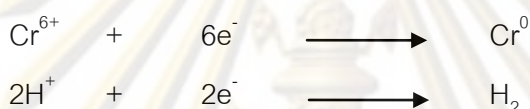
ตารางที่ 2.3 การใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรม (Ullmann's, 1986)

ประเภทของอุตสาหกรรม	สารประกอบโครเมียม	การใช้งาน
ก่อสร้าง	โครเมียม(II)ออกไซด์	สีทาบ้าน
อุตสาหกรรมเคมี	ไดโครเมต โครเมียม(VI)ออกไซด์	เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา, ออกซิไดซ์ สารประกอบอินทรีย์
อุตสาหกรรมการพิมพ์	ไดโครเมต โครเมียม(VI)ออกไซด์	แผ่นพิมพ์
อุตสาหกรรมปิโตรเลียม	โครเมต(VI)	ป้องกันสนิม
อุตสาหกรรมชุบโลหะ	โครเมียม(VI)ออกไซด์	ความสวยงาม, แข็งแรง
อุตสาหกรรมไม้	ไดโครเมต โครเมียม(VI)ออกไซด์	ป้องกันเชื้อราและแมลง
อุตสาหกรรมการฟอกหนัง	โครเมียม(III)ซัลเฟต	ฟอกสีหนัง
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	โครเมต โครเมียม(III)อะซิเตท โครเมียม	ย้อมสีผ้า

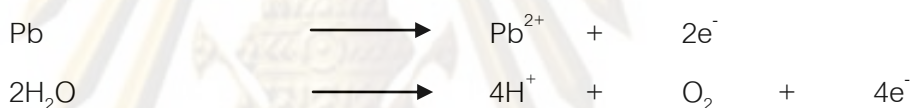
## 2.2.2 วิธีการชุบโครเมียม

การชุบโครเมียมต่างจากการชุบโลหะชนิดอื่น คือ ไม่ได้ใช้โลหะโครเมียมที่ขั้วแอโนด แต่จะใช้โลหะโครเมียมในรูปสารละลายกรดโครมิก (Chromic acid) ซึ่งเป็นสารประกอบโครเมียม (+6) ออกไซด์ เมื่อละลายน้ำให้กรดโครมิกรูปต่างๆ มีสีส้มแดง ขั้วแอโนดที่ใช้เป็นตัวล่อเป็นโลหะผสมระหว่างดีบุกกับตะกั่วหรือพลวง ในการชุบโครเมียม จะต่อชิ้นงานเข้ากับขั้วแคโทด และจุ่มลงในน้ำยาชุบโลหะ ซึ่งเป็นกรดโครมิก ผสมกับกรดซัลฟูริก ในอัตราส่วน 100:1 เมื่อผ่านไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไป โครเมียม (+6) ในสารละลายจะถูกรีดิวซ์ที่ขั้วแคโทดเปลี่ยนเป็นโลหะโครเมียม ( $\text{Cr}^0$ ) เกาะที่ชิ้นงานนั้น ดังสมการ

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



ก่อนนำชิ้นงานมาชุบโครเมียม จะต้องมีการเตรียมชิ้นงาน ดังขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 2.3 ชิ้นงานจะต้องผ่านการขัดผิวให้เรียบและล้างทำความสะอาด ความสะอาดของชิ้นงานเป็นสิ่งจำเป็นมาก เพราะจะทำให้การชุบได้ผลดี

ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการผลิต จะมีน้ำมันหล่อลื่นติดบนผิวงาน ชิ้นงานที่ผ่านการขัดจะมีไขมันจากยาขัดติดอยู่บนผิวงาน การเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปชุบโครเมียมนั้นต้องทำการกำจัดน้ำมันหรือไขมันเหล่านี้ออกด้วยวิธีการล้างด้วยตัวทำละลาย ซึ่งละลายไขมันได้ดี ตัวทำละลายไขมันที่ได้ดี ได้แก่ ไตรคลอโรเอธิลีน เปอร์คลอโรเอธิลีน เป็นต้น จากนั้นจึงนำไปล้างในน้ำยาที่เป็นด่าง และล้างชิ้นงานด้วยการใช้ไฟฟ้าเพื่อขจัดโลหะที่ติดอยู่ออก โดยให้ชิ้นงานเป็นขั้วบวก และล้างครั้งสุดท้ายโดยใช้สารละลายที่เป็นกรด เพื่อให้ชิ้นงานมีความเป็นกลางพร้อมที่จะนำไปชุบ น้ำเสียที่เกิดแต่ละครั้งจึงมีความเป็นกรดและต่าง

บางกรณีก่อนการชุบโครเมียม อาจรองพื้นชิ้นงานด้วยการชุบทองแดงและนิกเกิลก่อน ขึ้นอยู่กับความต้องการและคุณภาพของชิ้นงาน ดังนั้น น้ำทิ้งจากกระบวนการจึงมีทองแดง และนิกเกิลอยู่ด้วย น้ำทิ้งจากการชุบโครเมียมเกิดจากน้ำที่ใช้ในการล้างผิวโลหะ น้ำยาที่หกหรือล้นออกนอกอ่าง

ซูป น้ำทิ้งจากการทำความสะอาดโรงงานและอ่างซูป และน้ำที่ใช้ฟันทักไอสารเคมีเหนืออ่างซูป (Morissel, 1954)

### 2.2.3 น้ำเสียจากการซูปโครเมียม

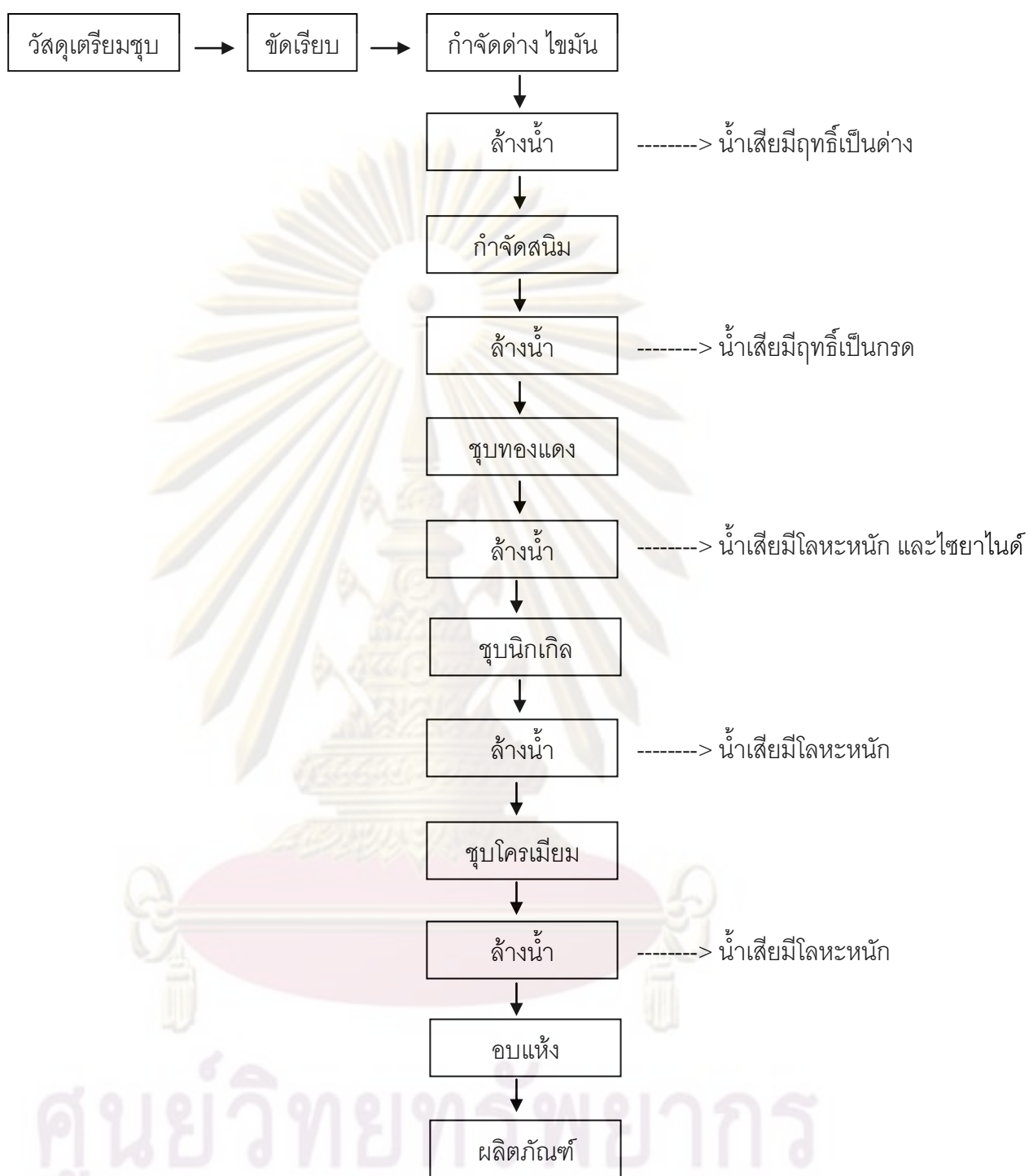
น้ำเสียจากโรงงานซูปโลหะมาจากสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้ ( Nemerrow,1978)

1. น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดไขมัน และน้ำมัน
2. น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงา และกำจัดสนิม
3. น้ำล้างจากชิ้นงานภายหลังการซูปน้ำยา
4. น้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมาโดยอุบัติเหตุ
5. น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือ และบริเวณสถานที่

มลพิษปล่อยออกมาจากโรงงานปริมาณสูง ได้แก่ น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดน้ำมัน และไขมันซึ่งจะเป็นน้ำเสียต่าง น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงา และกำจัดสนิมน้ำล้างในส่วนนี้เป็นน้ำเสียกรด และน้ำล้างชิ้นงานภายหลังการซูปน้ำยาซึ่งจะเป็นน้ำเสียที่มีโลหะหนัก และไซยาไนด์เป็นส่วนประกอบ น้ำเสียทั้งสามส่วนนี้จะเกิดต่อเนื่องในการผลิต ส่วนน้ำเสียเนื่องจากน้ำยาที่เสื่อมคุณภาพ หรือไหลออกมาเนื่องจากอุบัติเหตุจะมีมลพิษสูง แต่จะเกิดขึ้น น้อยครั้ง และน้ำยาล้างทำความสะอาดเครื่องมือ หรือบริเวณสถานที่ที่มีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ จะมีปริมาณไม่มาก สำหรับแหล่งกำเนิดน้ำเสียของโรงงานซูปโครเมียม แสดงในรูปที่ 2.3



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



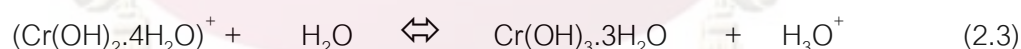
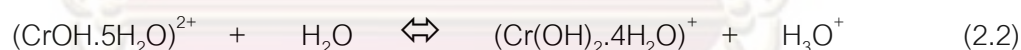
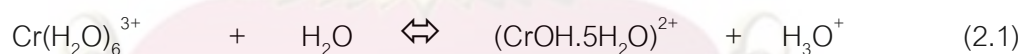
รูปที่ 2.3 แผนผังขั้นตอนการซูปโครเมียมและน้ำเสียที่เกิดขึ้น (TISTR, 1982)

## 2.2.4 โครเมียมในสารละลาย

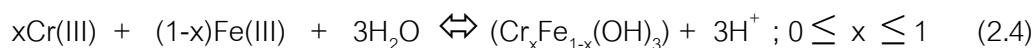
โครเมียมจัดเป็นธาตุทรานซิชันอยู่ในหมู่ 6B ในตารางธาตุมีสถานะออกซิเดชัน (Oxidation state) ตั้งแต่ -2 ถึง +6 มีเพียงโครเมียมสถานะออกซิเดชันศูนย์เท่านั้นที่ปรากฏในรูปของธาตุ โดยปกติโครเมียมมักปรากฏในรูปที่มีสถานะออกซิเดชัน +2 +3 และ +6 คือ ไดวาเลนต์โครเมียม (Divalent chromium) ไตรวาเลนต์โครเมียม (Trivalent chromium) และเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent chromium) ตามลำดับ สารประกอบของไดวาเลนต์โครเมียมไม่เสถียรเพราะจะถูกออกซิไดซ์โดยอากาศได้ง่าย เกิดเป็นสารประกอบไตรวาเลนต์โครเมียมซึ่งมีเสถียรภาพมากที่สุด ส่วนสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมนั้นค่อนข้างมีเสถียรภาพ ดังนั้นสารประกอบของโครเมียมที่พบตามธรรมชาติในสิ่งแวดล้อมมักพบในรูปสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียม และเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะมีเสถียรภาพและคงอยู่ได้นาน แต่ในสภาวะขาดแคลนออกซิเจนสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะถูกรีดิวซ์เป็นสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียม (วุฒิชัย ทิวพงษ์, 2545)

### 2.2.4.1 ไตรวาเลนต์โครเมียม (Trivalent chromium)

ไตรวาเลนต์โครเมียมปรากฏอยู่ในสารละลายที่ประกอบด้วยน้ำ (Aqueous solution) ในรูปของไฮเดรตไอออน (Hydrated ion) คือ  $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  และสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) ดังสมการ (2.1) – (2.3)

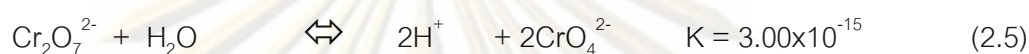


ดังนั้นการเพิ่มไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) จำนวน 3 โมลจะทำให้  $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  กลายเป็น  $\text{Cr}(\text{OH})_3.3\text{H}_2\text{O}$  หรือเขียนอย่างง่าย ๆ คือ  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  ซึ่งเป็นสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมที่มีความสามารถในการละลายต่ำ (Quagliano, 1963) ในสภาวะที่ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4 ถึง 6.5 พบว่าสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมอยู่ในรูป  $\text{CrOH}^{2+}$  แต่เมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5 ถึง 10 สารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมอยู่ในรูป  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  (Rai และคณะ, 1986) สารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียมยังสามารถปรากฏในรูปของผลึกแข็ง (Solid solution) คือ  $\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$  ดังสมการ (2.4) (Eary และคณะ, 1988)

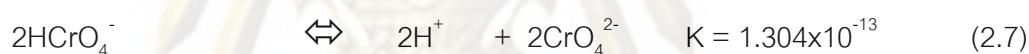
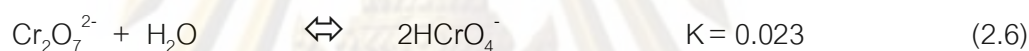


#### 2.2.4.2 เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent Chromium)

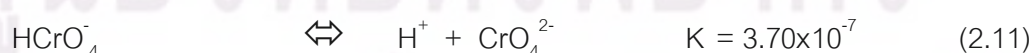
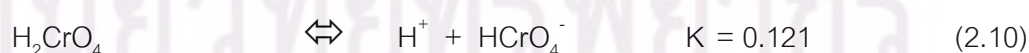
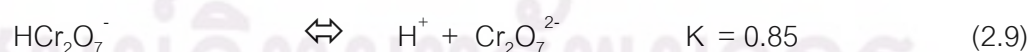
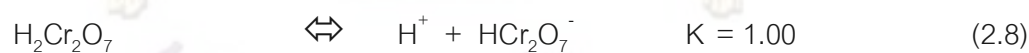
เฮกซะวาเลนต์โครเมียมเกือบทั้งหมด มักเกิดเป็นสารประกอบร่วมกับออกซิเจน (Oxospecies) คือ โครเมตไอออน ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) และไดโครเมตไอออน ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) โดยเฮกซะวาเลนต์โครเมียมมีแนวโน้มที่จะปรากฏเป็นไดโครเมตไอออนในสารละลายที่ค่าพีเอชเป็นกรด และเป็นโครเมตไอออนในสารละลายที่ค่าพีเอชเป็นกลางหรือด่าง สมการเคมีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไดโครเมตไอออน และโครเมตไอออนเป็นดังสมการ (2.5)



สมการเคมีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไดโครเมตไอออน ไปโครเมตไอออน และโครเมตไอออนเป็นสมการ (2.6) – (2.7) (Quagliano, 1963)



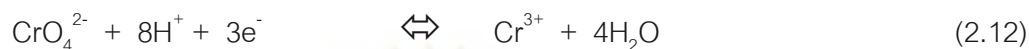
ภายใต้สภาวะที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 6 สารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะอยู่ในรูปไปโครเมตไอออน แต่เมื่อค่าพีเอชมากกว่า 6 สารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะอยู่ในรูปโครเมตไอออน สมการแสดงการแตกตัวให้เฮกซะวาเลนต์โครเมียมไอออนต่างๆ เมื่อสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมละลายน้ำเป็นดังสมการ (2.8) – (2.11)



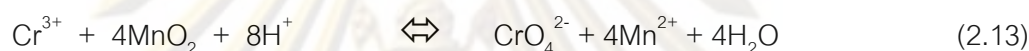
#### 2.2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเฮกซะวาเลนต์โครเมียม และไตรวาเลนต์โครเมียม

สารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง เมื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชันแล้วจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียม โดยตัวให้อิเลคตรอนเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะ

เพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดลง ปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นดังสมการ (2.12)



สารประกอบของไตรวาเลนต์โครเมียม ที่ได้จากปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม อาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอีกครั้งหนึ่ง (Reoxidation Reaction) ได้ ตัวออกซิไดซ์ที่สำคัญ ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ของแมงกานีส (III, IV) และสารประกอบไฮดรอกไซด์ของแมงกานีส (III, IV) ตัวอย่างเช่น สารประกอบแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) ดังสมการ (2.13) (Nelson, 1995)



## 2.2.5 ความเป็นพิษของโครเมียม

เฮกซะวาเลนต์โครเมียมมีความเป็นพิษสูงกว่าไตรวาเลนต์โครเมียม และ โครเมียมในรูปแบบอื่นๆ คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ได้กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมให้มีปริมาณเฮกซะวาเลนต์โครเมียมได้ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัม ต่อ ลิตร ในอากาศมีฝุ่นของโครเมียมบริเวณที่ทำงานได้ไม่เกิน 5 มิลลิกรัม ต่อ อากาศ หนึ่งลูกบาศก์เมตร องค์การอนามัยโลกได้กำหนดค่าโครเมียมโดยทั่วไปไว้ว่า คนที่อยู่ในวัยเจริญพันธุ์สามารถรับโครเมียมเข้าไปในร่างกายได้ 50-70 มิลลิกรัม ต่อ กิโลกรัม ของน้ำหนักตัว ถ้ารับในปริมาณที่มากกว่านี้จะมีผลกระทบต่อตับ ไต และระบบเลือด ผลกระทบที่เกิดขึ้นแบบเฉียบพลัน ทำให้เกิดการอาเจียน อูจจาระร่วง ตกเลือดและมีเลือดไหลเข้าสู่ระบบลำไส้ ทำให้เกิดอาการช็อคได้ ถ้าคนไข้ไม่เสียชีวิต คนไข้จะมีอาการตายของเนื้อเยื่อบริเวณตับและไต และมีระบบเลือดที่เป็นพิษ ส่วนผู้ที่ได้รับโครเมียมปริมาณไม่มากจะได้รับผลกระทบแบบเรื้อรัง บุคคลอาจรับโครเมียมได้สองทาง คือ การสัมผัสกับโครเมียมโดยตรง ซึ่งโครเมียมสามารถทำลายผิวหนัง ทำให้เกิดแผลพุพอง และการหายใจเอาไอของโครเมียมเข้าไปโดยตรง จะมีผลต่อปอด ตับ ไต ระบบลำไส้ โดยเฉพาะผนังกันจมูกอาจทำให้เป็นมะเร็งบริเวณนี้ได้ นอกจากนั้นยังอาจทำให้เป็นโรคเยื่อจมูกอักเสบ โรคปอดและหลอดลมอักเสบ โครเมียมสามารถทำให้เกิดเป็นมะเร็งได้เฉพาะบริเวณผนังกันจมูกและที่ปอดเท่านั้น ส่วนในบริเวณเนื้อเยื่ออื่นๆ ยังไม่มีรายงานว่าโครเมียมสามารถทำให้เกิดโรคมะเร็งได้ นอกจากนี้โครเมียมยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมได้ เนื่องจาก



โครเมียมทำปฏิกิริยากับ อาร์ เอ็น เอ ( RNA) ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ได้ ปัญหามลพิษดังกล่าวจัดเป็นปัญหาใหญ่ต่อสังคม ดังนั้นทางโรงงานต้องมีการจัดการและลดผลกระทบดังกล่าว ซึ่งมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานชุบโลหะ

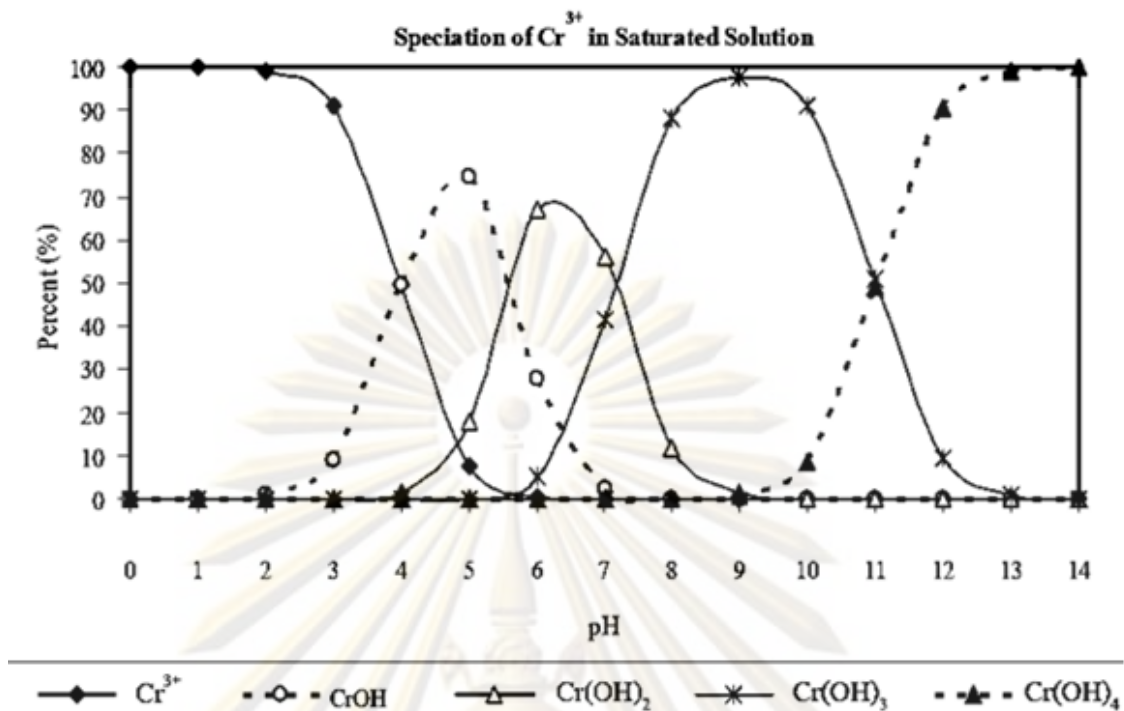
ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0
2. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.
3. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.
4. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.
5. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.
6. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.
7. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.

ที่มา: ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539)

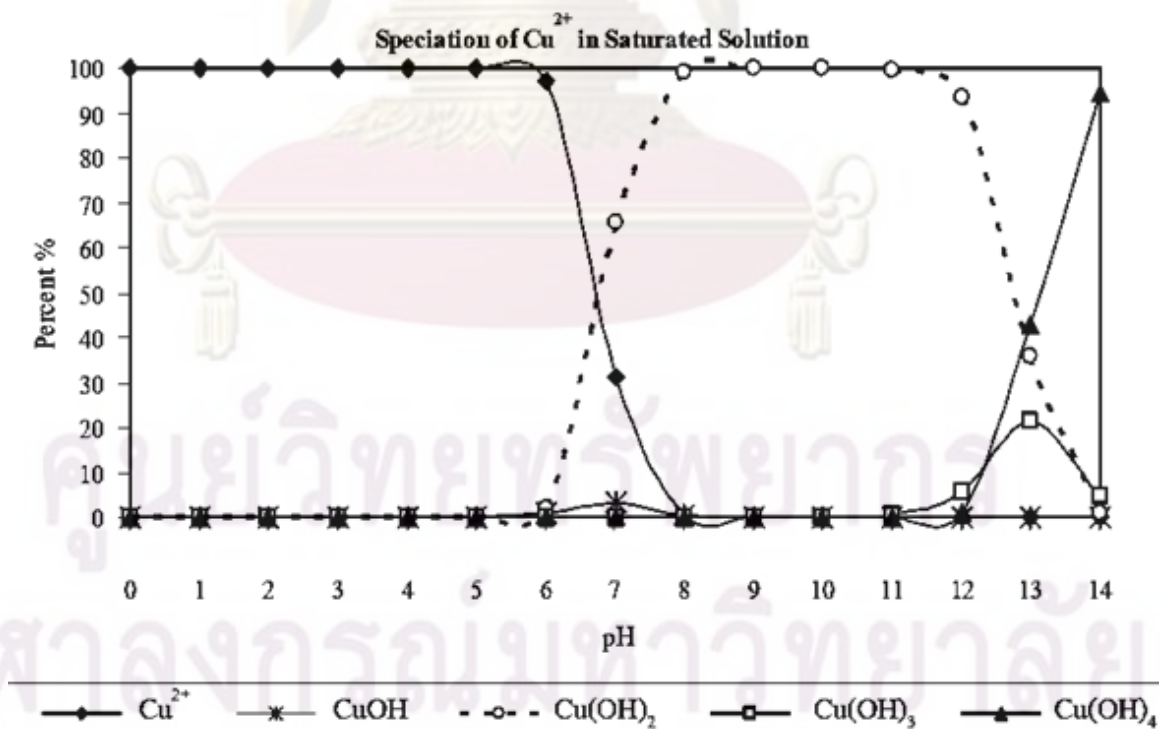
ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม, ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

## 2.2.6 โลหะหนักชนิดอื่นๆ ในสารละลาย และความเป็นพิษ

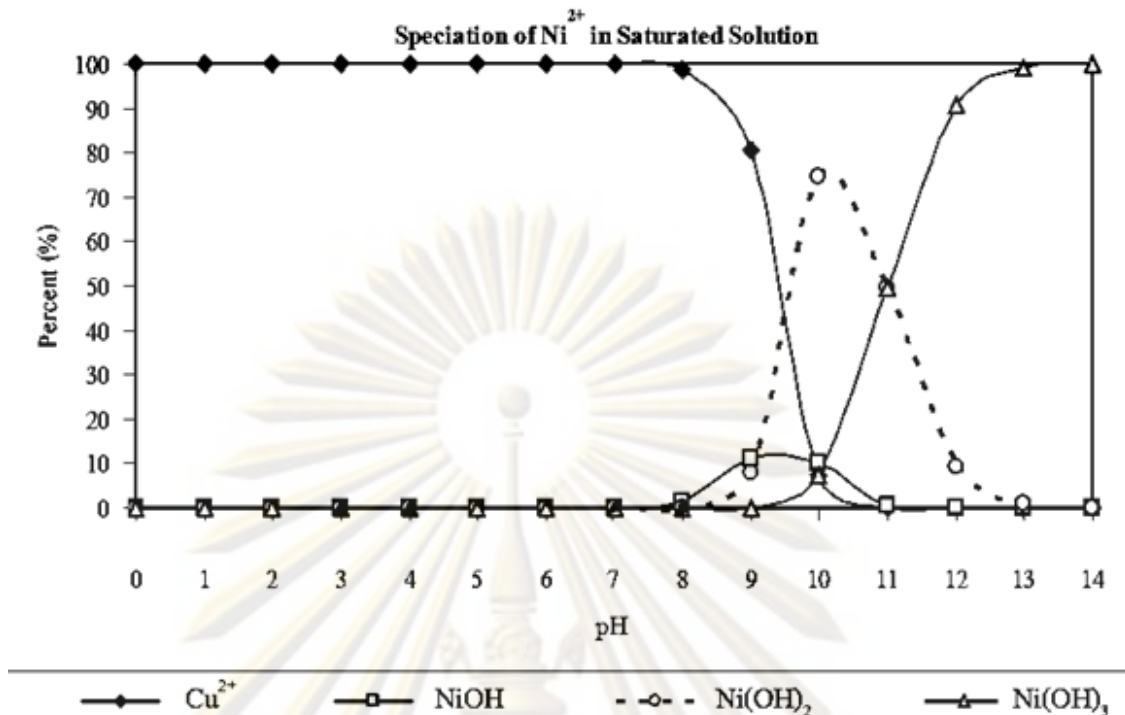
โลหะหนักเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมอยู่ในช่วง 23-92 และอยู่ในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ ในสภาพปกติโลหะหนักจะเป็นผลึกบริสุทธิ์ มีความเป็นพิษเล็กน้อยถ้าอยู่ในสภาวะความดันไอสูง สารประกอบโลหะหนักบางชนิดมีความเป็นพิษสูง ตัวอย่างโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว (Pb)ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น สำหรับโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำจะมีด้วยกันหลายรูป และมีสัดส่วนที่แตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพีเอช รูปแบบของโลหะหนักบางชนิด เช่น โครเมียม ( $Cr^{+3}$ ) ทองแดง ( $Cu^{+2}$ ) นิกเกิล ( $Ni^{+2}$ ) และสังกะสี ( $Zn^{+2}$ ) ที่ละลายอยู่ในน้ำในแต่ละพีเอช แสดงดังรูปที่ 2.4 2.5 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ



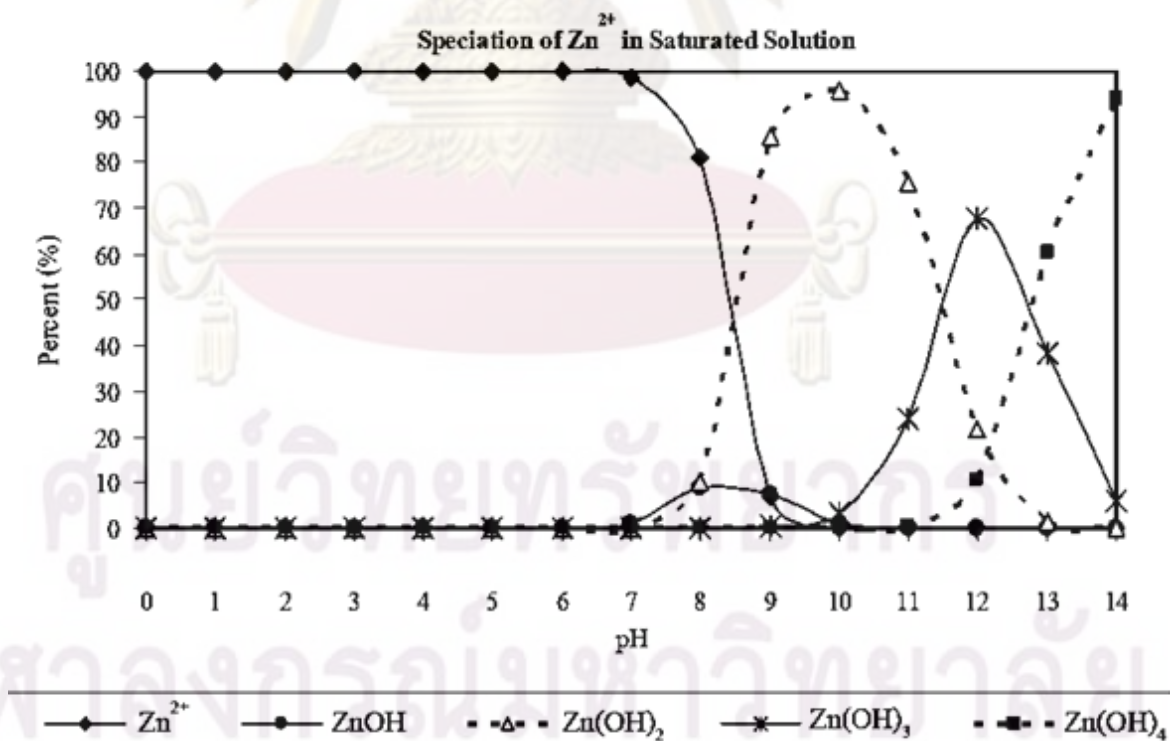
รูปที่ 2.4 รูปแบบของโครเมียม (Cr<sup>3+</sup>) ที่ละลายอยู่ในน้ำ ที่พีเอชต่างๆ (Bowen, 1979)



รูปที่ 2.5 รูปแบบของทองแดง (Cu<sup>2+</sup>) ที่ละลายอยู่ในน้ำ ที่พีเอชต่างๆ (Bowen, 1979)



รูปที่ 2.6 รูปแบบของนิกเกิล (Ni<sup>2+</sup>) ที่ละลายอยู่ในน้ำ ที่พีเอชต่างๆ (Bowen, 1979)



รูปที่ 2.7 รูปแบบของสังกะสี ((Zn<sup>2+</sup>) ที่ละลายอยู่ในน้ำ ที่พีเอชต่างๆ (Bowen, 1979)

โลหะหนักเมื่อเข้าสู่ร่างกายผ่านกระแสโลหิตจะทำลายอวัยวะต่างๆ ปรากฏอาการมีทั้งเฉียบพลันและเรื้อรังแล้วแต่ปริมาณที่รับเข้าไป บางส่วนอาจถูกขับออกจากร่างกาย หรือสะสมอยู่ตัวอย่างโลหะหนักบางชนิดที่มีผลต่อสุขภาพ (ธนพร เหล่าไพโรจน์, 2548) ได้แก่

1. ทองแดง ( Cu) เป็นโลหะที่ร่างกายต้องการในปริมาณเล็กน้อยผู้ใหญ่ต้องการปริมาณ 2 มิลลิกรัม ต่อ วัน แต่ถ้าร่างกายได้รับมากเกินไปก็ก่อให้เกิดโทษแก่ร่างกายได้ เช่น รับประทาน  $\text{CuSO}_4$  ในปริมาณ 27 กรัม ทำให้เสียชีวิตได้ ถ้ารับประทานน้อยกว่านี้จะเกิดอาการอาเจียน เหน็บชา และสลัก
2. ตะกั่ว ( Pb) เป็นโลหะที่ร่างกายไม่ต้องการแต่ร่างกายคนเราสามารถทนต่อปริมาณตะกั่วได้ โดยคนปกติทั่วไปสามารถมีตะกั่วในเลือด 0.25 ส่วนในล้านส่วน โดยไม่เป็นพิษ แต่ถ้าได้รับในปริมาณที่มากกว่าที่ทนได้ เช่น พบในเลือดมากกว่า 0.8 ส่วนในล้านส่วน เกิดเป็นพิษเฉียบพลันได้
3. นิกเกิล ( Ni) สารประกอบของนิกเกิล ไม่มีผลทางสรีระของสัตว์และพืช หรือเป็นพิษในเกณฑ์ที่ต่ำมาก
4. สังกะสี ( Zn) สังกะสีในรูปของธาตุไม่ปรากฏความเป็นพิษ แต่ ถ้าอยู่ในรูปสารประกอบมีหลายชนิดที่มีความเป็นพิษ

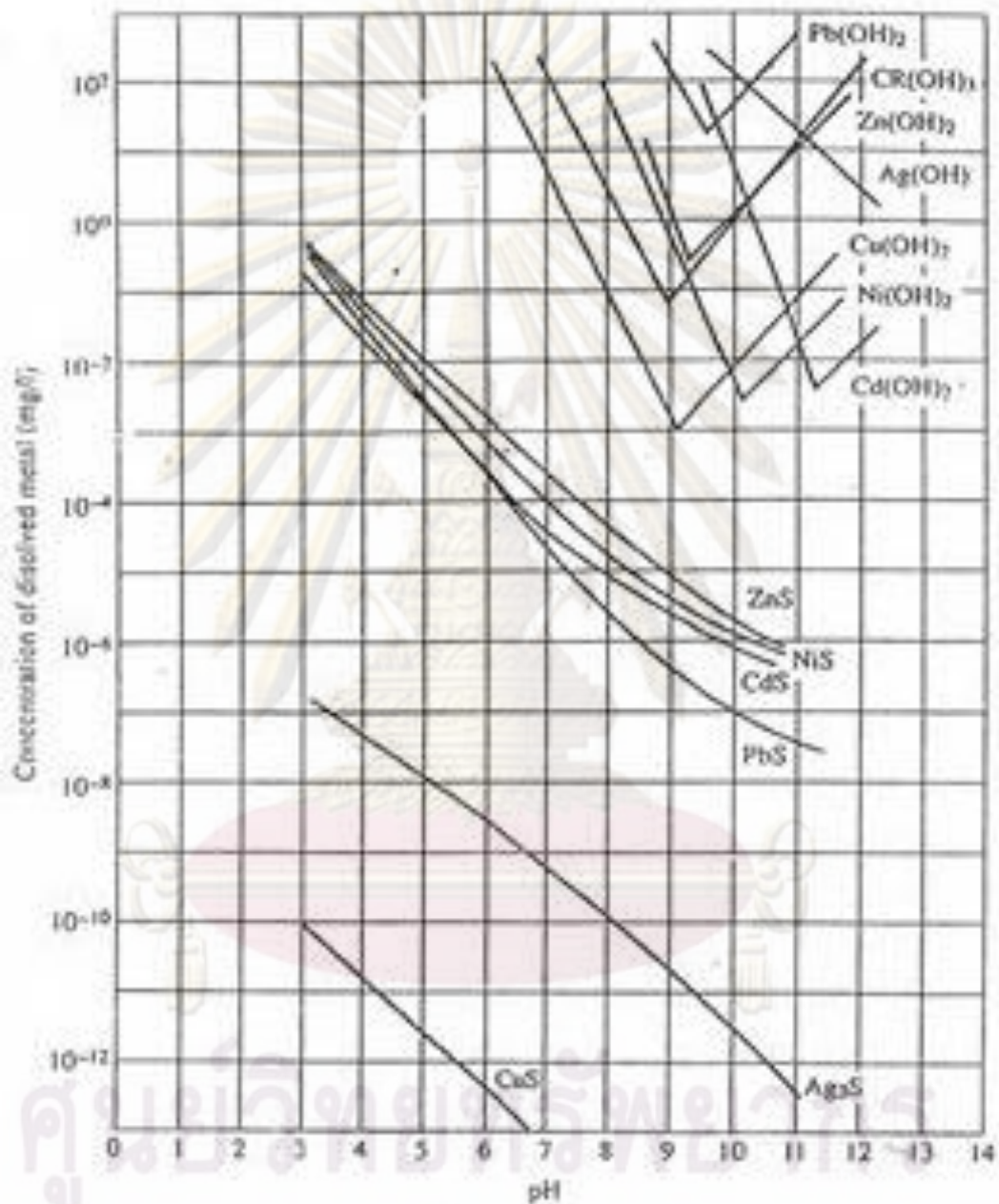
## 2.2.7 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

### 2.2.7.1 การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย

ในการบำบัดโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการอย่างหนึ่งอย่างใดหรือหลายอย่างรวมกันดังต่อไปนี้

1. การตกผลึก (Precipitation) เป็นการเปลี่ยนรูปโลหะที่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปของแข็ง (Solid) สามารถทำได้โดยการทำอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้
  - การเติมสารเคมีเพื่อไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักโดยตรง เกิดเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เช่นการเติมซัลไฟด์ เป็นต้น
  - การเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลง เช่น การปรับค่าพีเอช
  - การเปลี่ยนอุณหภูมิ เป็นการปรับเพื่อให้สารประกอบของโลหะหนักนั้นมีค่าความสามารถในการละลายได้น้อยลง

สำหรับวิธีการมาตรฐาน (Conventional treatment) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป คือการปรับค่าพีเอช ซึ่งสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของโลหะหนักชนิดต่างๆ แสดงดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ และซัลไฟด์ของโลหะหนัก (Eckenfelder,2000)

2. การระเหย (Evaporation) เป็นการทำให้น้ำเสียที่เจือจางระเหย โดยใช้ความร้อนในการระเหยน้ำออกไปทำให้น้ำเสียเข้มข้นขึ้น หรือกลายเป็นภาคตะกอน ซึ่งพลังงานความร้อนที่ใช้มาจากเชื้อเพลิง (Fuel) หรือใช้พลังงานจากดวงอาทิตย์ วิธีการนี้ค่าติดตั้งระบบ และค่าดำเนินการมีราคาค่อนข้างแพง วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น

3. รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) เป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำเสียโดยการใช้แรงดันอัดน้ำเสียให้ผ่านเยื่อ (Semipermeable membrane) ซึ่งเยื่อนี้จะมีคุณสมบัติยอมให้น้ำและสารบางตัวผ่านไปได้ ดังนั้นจะได้น้ำที่มีความสะอาด ส่วนโมเลกุลที่ใหญ่กว่ารูเยื่อจะติดค้างอยู่และสารบางตัวผ่านไม่ได้ ดังนั้นจะได้น้ำที่มีความสะอาด ส่วนโมเลกุลที่ใหญ่กว่ารูเยื่อจะติดค้างอยู่และมีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถระบายออกเพื่อนำไปใช้หรือบำบัดต่อไป กระบวนการนี้จะต้องใช้พลังงานมาก และต้องมีการควบคุมคุณภาพน้ำเสียเข้า วิธีนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าและน้ำเสียจากการล้างภาพ

4. ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation-Reduction) เป็นกระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ โดยในการบำบัดต้องเติมสารเคมีลงไป เพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการบำบัด เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงออกซิเดชัน ทำให้มีความเป็นพิษน้อยลง และสามารถบำบัดได้ง่ายขึ้น สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต โครเมต และไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ เฟอร์รัสซัลเฟต

5. กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นกระบวนการทางเคมี น้ำเสียที่มีโลหะหนักไอออนบวก หรือสารประกอบไอออนลบ เมื่อผ่านเรซินก็จะถูกจับไว้ในเรซินทำให้น้ำเสียมีคุณภาพดี แต่หลังจากใช้งานระยะหนึ่ง ประสิทธิภาพจะต่ำลงต้องมีการฟื้นฟูประสิทธิภาพ (Regenerate) และได้ น้ำที่มีความเข้มข้นของโลหะหนัก หรือสารประกอบสูงมาก อาจนำกลับมาใช้ใหม่ หรือบำบัดด้วยวิธีอื่น กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้ จะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดจับโดยเรซินไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า แคตไอออนเอกเซนเจอร์ (Cation exchanger) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบจะเรียกว่าแอนไอออนเอกเซนเจอร์ (Anion exchanger) วิธีนี้เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง เช่น น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า

6. การดูดซับ (Adsorption) การดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลว หรือก๊าซให้มาเกาะติดผิว บนผิวของมันโดยโมเลกุลหรือ

คอลลอยด์ เรียกว่า สารถูกดูดซับ ส่วนของแข็งที่โมเลกุล หรือคอลลอยด์เกาะติดบนผิวเรียกว่า สารดูดซับ สำหรับสารดูดซับที่ใช้งานกันทั่วไปคือถ่านกัมมันต์ ( Activated carbon) ที่มีรูพรุนมากมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง เมื่อมีการสัมผัสกับน้ำเสียจะทำให้มลสารต่างๆถูกจับไว้ในช่องรูพรุนต่างๆทำให้น้ำเสียมีความสะอาด

#### 2.2.7.2 การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม

การตกตะกอนเป็นวิธีที่ใช้กำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้ง โดยการเติมปูนขาวหรือต่างถึงระดับพีเอชที่ไปตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์ของโลหะ โดย ไตรวาเลนท์โครเมียมมีการละลายต่ำสุดที่พีเอช 7.5 และการละลายเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ค่าพีเอชสูงกว่านี้ การตกตะกอนสามารถลดปริมาณโลหะลงได้ถึงระดับ 1-2 มิลลิกรัม ต่อ ลิตร การกรองจะช่วยลดความเข้มข้นลงอีกถึงระดับ 0.5 มิลลิกรัม ต่อ ลิตร หรือต่ำกว่านี้ สำหรับน้ำทิ้งของเฮกซะวาเลนท์โครเมียม จะต้องวิธีวิธีเป็นไตรวาเลนท์โครเมียมก่อน ในสารละลายที่เป็นกรด แล้วจึงตกตะกอนด้วยปูนขาว

ปัจจุบันมีการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมที่ใช้กันหลายวิธี ในที่นี้ขอยกตัวอย่าง 2 วิธี คือ วิธีการกำจัดน้ำทิ้งของกรมโรงงาน อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และวิธีการกำจัดน้ำทิ้งของสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ (MIDI) ดังนี้

##### 1. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

กรมโรงงานอุตสาหกรรม ใช้วิธีที่เรียกว่า Batch process คือการกำจัดเป็นครั้งๆไม่ต่อเนื่อง เหมาะสำหรับโรงงานชุบโลหะขนาดเล็ก และขนาดกลาง ซึ่งมีการเติมสารเคมีและปรับค่าพีเอชหลายขั้นตอน ดังนี้

- 1) ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 2.5 ด้วยกรดซัลฟูริก
- 2) เติมเพอร์ซัลเฟต และกวน 30 นาที
- 3) ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8.5 ด้วยปูนขาว
- 4) กวน 30 นาที ในระหว่างนี้ถ้ามีนิเกิล ทองแดง หรือสังกะสี ละลายอยู่ก็จะถูกทำปฏิกิริยาให้สามารถตกตะกอนได้
- 5) ปล่อยให้ตกตะกอน 4 ชั่วโมง
- 6) ปล่อยน้ำใส (Effluent) ข้างบนทิ้ง
- 7) ปล่อยให้ตะกอนเหลว ลงสู่ถังตกตะกอน ( Sand drying bed) ส่วนที่เป็นตะกอนจะถูกกรองติดอยู่บนผิวทรายและจะแห้งไปในที่สุด และส่วนที่เป็นน้ำจะไหลผ่านชั้นทราย หิน-อิฐ และไหลไปสู่ถังเก็บน้ำเสีย (Raw waste tank)

## 2. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ (MIDI)

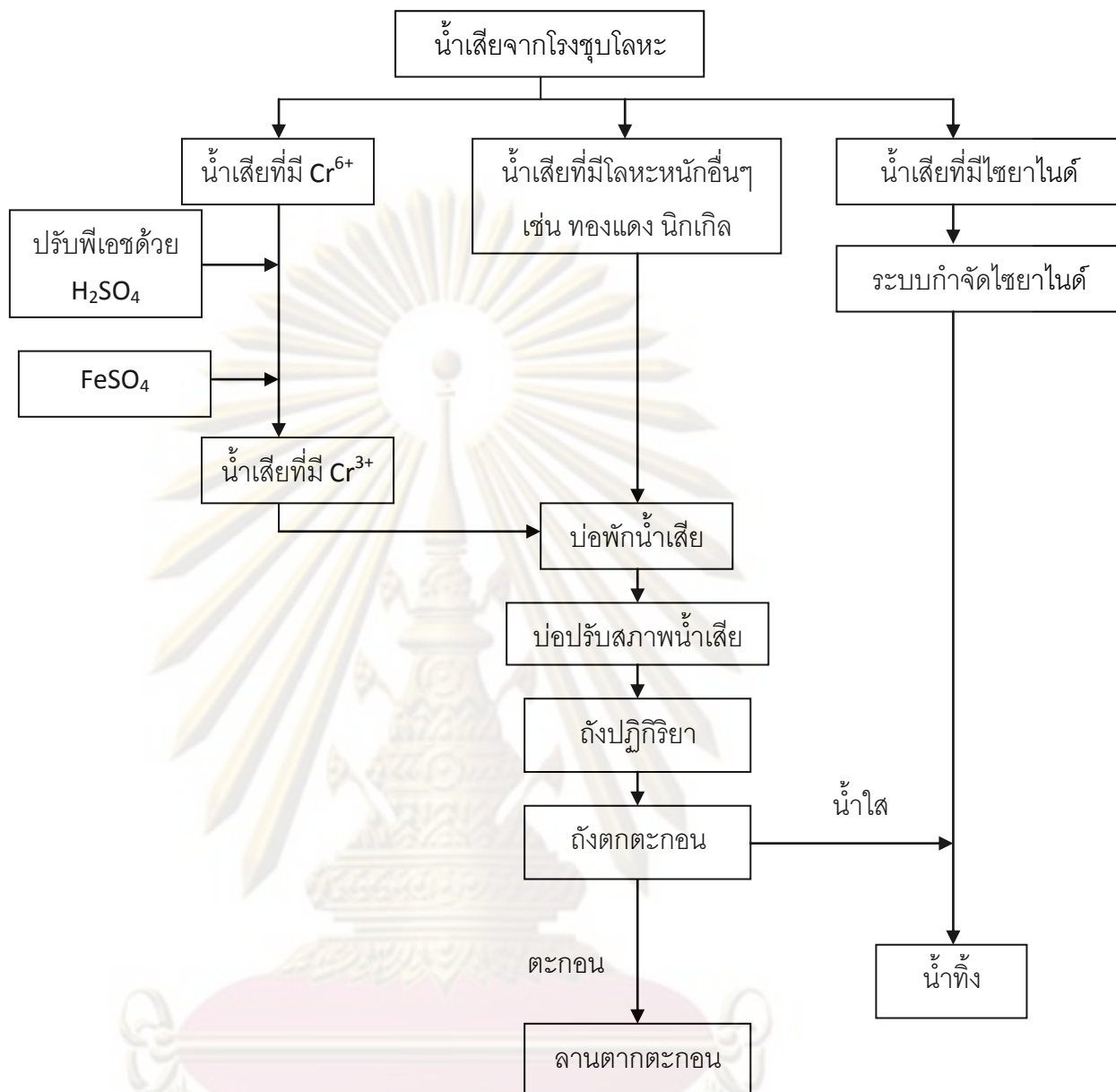
สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการได้ออกแบบ กระบวนการ กำหนดน้ำทิ้งตามความเหมาะสม สำหรับโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่เป็นแบบผสม คือมีการชุบโลหะหลายชนิด เช่น การชุบทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม การชุบสังกะสี การชุบฮาร์ดโครม การอะโนไดซ์ และการกัดล้างโลหะ เป็นต้น น้ำเสียที่มาจากกระบวนการชุบจึงมีหลายประเภทด้วยกัน (แสดงดังรูปที่ 2.9) คือ

- 1) น้ำเสียที่มีไซยาไนด์ ได้จากน้ำยาชุบทองแดงต่าง น้ำยาชุบสังกะสีแบบไซยาไนด์ หรือน้ำยาชุบทอง ไซยาไนด์จะถูกกำจัดโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- 2) น้ำเสียที่มีเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ได้จากน้ำยาชุบโครเมียม หรือน้ำยาโครเมต ในการชุบสังกะสี เฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นพิษและไม่ตกตะกอน การกำจัดต้องทำให้กลายเป็นไตรวาเลนต์โครเมียมก่อน จึงจะหมดพิษและตกตะกอนได้
- 3) น้ำเสียที่มีกรดและต่างชนิดต่างๆ จะใช้สารเคมีเป็นตัวทำปฏิกิริยา มีประสิทธิภาพของการทำงานโดยกำจัดน้ำเสียที่มีกรดและต่างชนิดต่างๆได้ในอัตราส่วน 2.0 ลูกบาศก์เมตร ต่อ ชั่วโมง (จินตนา สายวรรณ, 2541)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.9 การบำบัดน้ำเสียของโรงชุบโลหะ (วุฒิชัย ทิวทอง, 2545)

## 2.3 การดูดซับ หรือการดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดซับนั้นเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสาร ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุล หรือคอลลอยด์ ที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ ( Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ ( Adsorbent) โดยกลไกการดูดซับเกิดเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้สารดูดซับ

### 2.3.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับโดยทั่วไปแบ่งได้ 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การแพร่ภายนอก ( External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับ มีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวน้ำสารดูดซับ

2. การแพร่ภายใน ( Internal diffusion) เป็นกลไกที่สารถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

3. ปฏิกริยาพื้นผิว ( Surface reaction) ปฏิกริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ดูดติดที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายจะมีความสามารถในการกระจายตัวบนผิว และเกิดแรงดึงดูดกับผิวได้แตกต่างกัน ซึ่งลักษณะการดูดซับแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ การดูดซับทางกายภาพ ( Physisorption) และการดูดซับทางเคมี ( Chemisorption) การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากความแตกต่างของพลังงานและ/หรือ แรงดูดซับทางไฟฟ้า (แรงวาเลนซ์) ซึ่งมีค่าน้อย โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) กล่าวคือ แต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่บนชั้นของโมเลกุลที่ติดอยู่ก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับทางเคมีเกิดจากปฏิกริยาระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับที่ก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดซับทางเคมีแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ( Monolayer) และไม่สามารถที่จะผันกลับได้ (Reversible) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดนี้อ่อนลงจะเป็นการทำให้เกิดการคายสารออกขึ้น การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นที่

อุณหภูมิสูง เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่างๆมาติดผิวได้ มีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

1. ประเภทสารอนินทรีย์ ประกอบด้วยสารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น ดินเหนียวต่างๆ ซึ่งสารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตร ต่อ กรัม และสารอนินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อเป็นตัวดูดซับ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ และแอคติเวเต็ดซีลิกา โดยสารสังเคราะห์นี้อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก แต่อย่างไรก็ตาม มีข้อเสียคือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด

2. ถ่านกัมมันต์ เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตร ต่อ กรัม

3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตร ต่อ กรัม

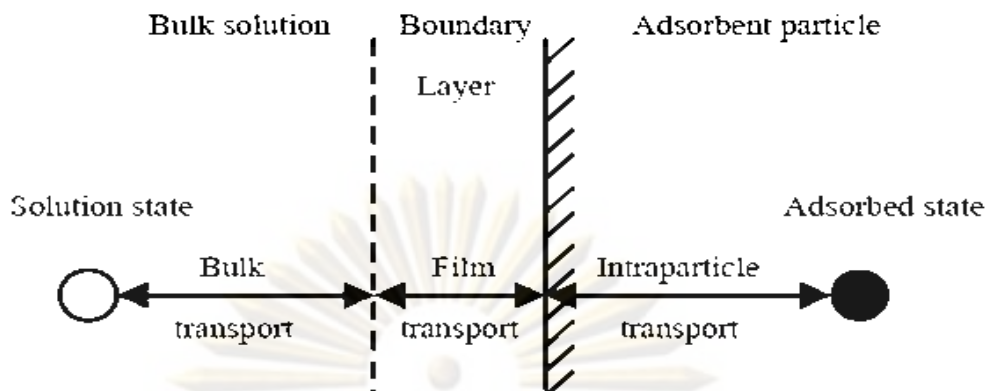
### 2.3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมได้โดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในอัตราการดูดซับของสารจากสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุนมี 3 ขั้นตอน (แสดงดังรูปที่ 2.10) คือ

1. การส่งทั้งก้อน (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2. การขนส่งชั้นฟิล์ม ( Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

3. การขนส่งภายในโมเลกุล (Intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ ( Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับมายังสารดูดซับ (Eckenfelder, 2000)

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 1. ลักษณะของตัวถูกดูดซับ (Nature of adsorbate)

การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับ ตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการละลายของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำจะลดลง เมื่อความยาวของพันธะลูกโซ่ยาวขึ้น นอกจากนั้นขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย โดยขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

#### 2. ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดซับ เป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับเมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวภายในรูพรุน ถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม ( Film transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

#### 3. อุณหภูมิ (Temperature)

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ( Exothermic) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง

#### 4. ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดซับได้อย่างแข็งแรง นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวของไอออนของสารประกอบที่เป็นกรดหรือเบสในการดูดซับ

#### 5. ความปั่นป่วน (Mixing speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัด อัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) ในระบบที่ของเหลวมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มของเหลวที่อยู่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ในกรณีนี้ การแพร่ผ่านฟิล์มจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางกลับกันถ้าความปั่นป่วนของเหลวในระบบสูง ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

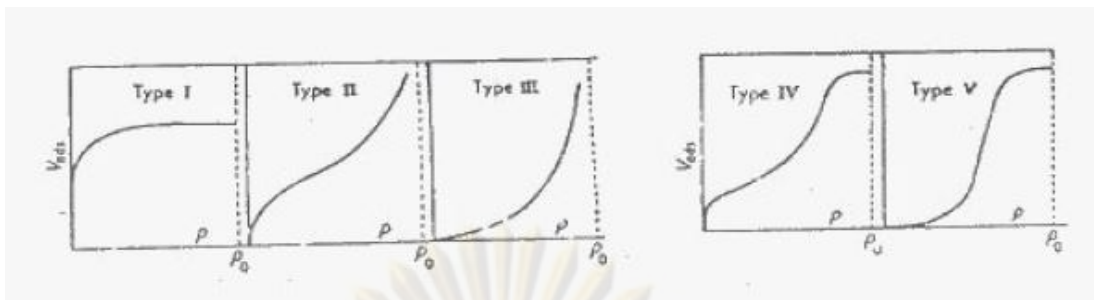
#### 6. เวลาสัมผัส (Contact time)

ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยระยะเวลาในการสัมผัสต้องเพียงพอให้สามารถเกิดกลไกในการดูดซับได้

### 2.3.4 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

การดูดซับจากสารละลาย มีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของของแข็ง ในขณะที่เกิดการดูดซับขึ้นตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ มีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลาย เมื่ออัตราการคายสารออกเข้าสู่สภาวะคงที่ (Equilibrium state) ซึ่งเรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดซับ หรือในของเหลว สมดุลนี้จึงเป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย สารดูดซับ ตัวทำละลาย ค่าพีเอช อุณหภูมิ และอื่นๆ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล โดยปกติจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของสารดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

รูปร่างของไอโซเทอมของการดูดซับ จะให้ข้อมูลที่ถูกต้องเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ และปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมของการดูดซับมี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งจากไอโซเทอมชนิดที่ I เป็นระบบที่การดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนที่เหลือเป็นการดูดซับของโมเลกุลแบบหลายชั้น



รูปที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดซับแบบพื้นฐาน (Faust and Aly, 1987)

สมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับ ระหว่างปริมาณของสารดูดซับ และสารที่ถูกดูดซับ จึงเรียกว่า ไอโซเทอม (Isotherm) ที่นิยมนำมาใช้งานมีอยู่ 3 แบบ คือ

1. แลงเมียร์ (Langmuir isotherm)
2. เบต (Brunauer-Emmett-Teller Isotherm : BET isotherm)
3. ฟรูนดริช (Freundlich isotherm)

2.3.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์(Langmuir isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองแลงเมียร์ ที่เรียกว่า Ideal localized monolayer model คือ

1. โมเลกุลถูกดูดซับติดอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับ
2. แต่ละบริเวณสามารถดูดซับได้เพียงชั้นเดียว
3. พื้นที่ของบริเวณที่ดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
4. พลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

การดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลาย โดยสารดูดซับของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงดังสมการที่ (2.14)

$$q = \frac{(q_m K_A C)}{(1 + K_A C)} \tag{2.14}$$

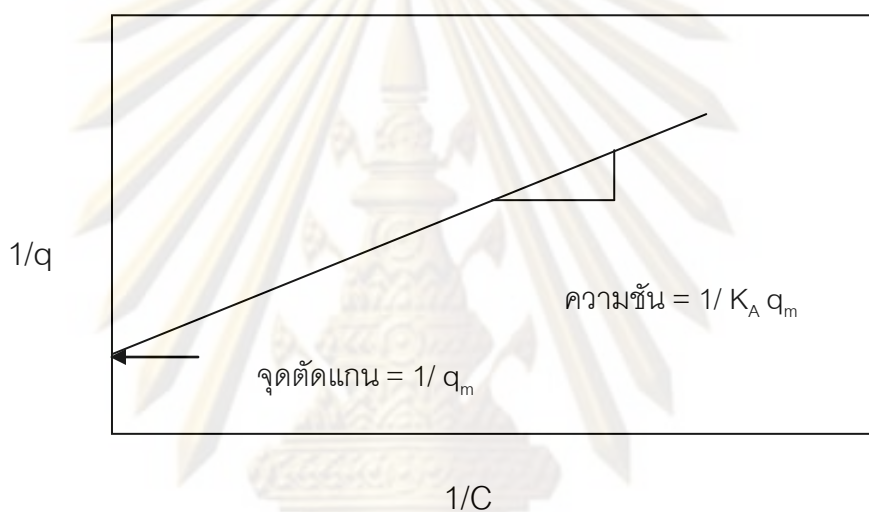
- เมื่อ:
- q = ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ, mg/g
  - q<sub>m</sub> = ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล, mg/g
  - C = ความเข้มข้นของสารละลาย, mg/l
  - K<sub>A</sub> = ค่าคงที่ของการดูดซับ

เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า  $q_m$  และ  $K_A$  ได้ด้วยวิธีกราฟ จึงจำเป็นต้องจัดรูปแบบสมการให้เป็นสมการ (2.15) หรือ (2.16)

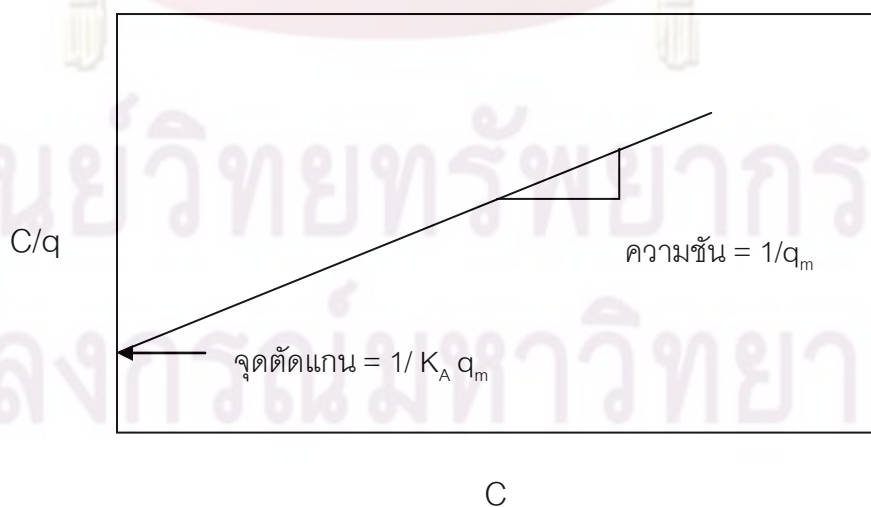
$$1/q = (1/q_m) + (1/K_A q_m)(1/C) \quad (2.15)$$

$$C/q = (C/q_m) + (1/K_A q_m) \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.15) และ (2.16) สามารถวาดกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 สมการ (2.15) ของ Langmuir



รูปที่ 2.12 สมการ (2.16) ของ Langmuir

### 2.3.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบต(Brunauer-Emmett-Teller Isotherm : BET isotherm)

ไอโซเทอมแบบเบตพัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ นำมาใช้สำหรับการดูดซับแบบหลายชั้น ( Multilayer) ซึ่งมีสมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองคือ แต่ละโมเลกุลในชั้นแรกจะเป็นแหล่งซึ่งเกิดการดูดซับของโมเลกุลในชั้นที่สอง และชั้นต่อไป สมการการดูดซับแบบเบตแสดงในสมการที่ (2.17) โดยสมการนี้มีเงื่อนไขว่าโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว และการดูดซับมีระดับคงที่สำหรับทุกๆโมเลกุล

$$q = q_m K_B C / (C_s - C) [1 + (K_B - 1) (C / C_s)] \quad (2.17)$$

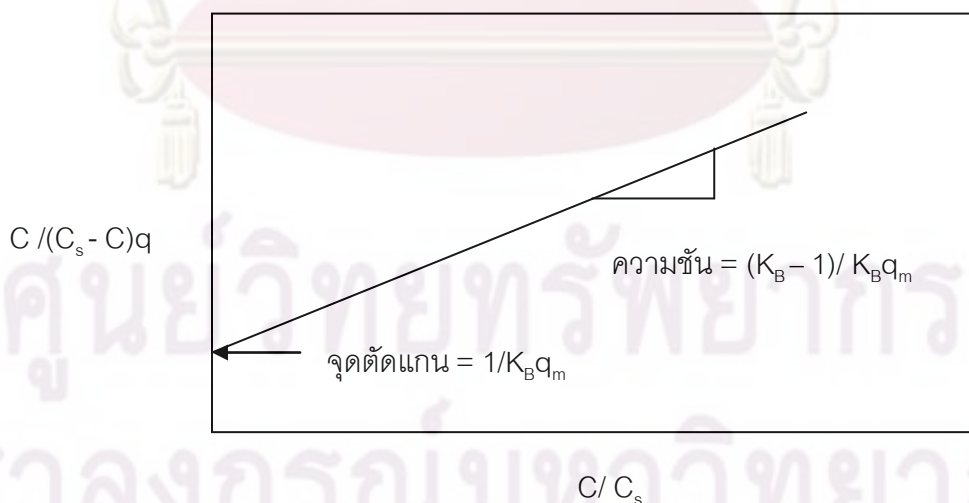
เมื่อ:  $C_s$  = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ, mg/l หรือ mol/l

$K_B$  = ค่าคงที่ของการดูดซับแบบเบต

เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า  $q_m$  และ  $K_B$  ได้ด้วยวิธีกราฟ จึงจำเป็นต้องจัดรูปแบบสมการให้เป็นสมการ (2.18)

$$C / (C_s - C) q = (1 / K_B q_m) + [(K_B - 1) / K_B q_m] (C / C_s) \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) สามารถวาดกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 สมการ (2.18) ของ BET



### 2.3.4.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ริช(Freundlich isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ริชใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจางและมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.19)

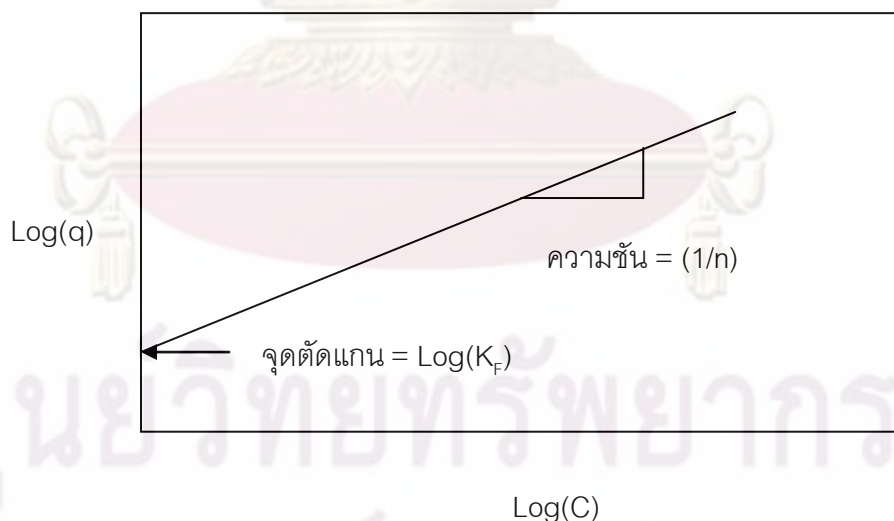
$$q = K_F C^{1/n} \quad (2.19)$$

เมื่อ:  $n =$  ค่าคงที่  
 $K_F =$  ค่าคงที่

เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า  $n$  และ  $K_F$  ได้ด้วยวิธีการกราฟ จึงจำเป็นต้องใช้ Logarithm มาจัดรูปแบบสมการให้เป็นสมการ (2.20)

$$\text{Log}(q) = \text{Log}(K_F) + (1/n) \text{Log}(C) \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.20) สามารถวาดกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 สมการ (2.20) ของ Freundlich

### 2.3.5 ประโยชน์ของการดูดซับในทางอุตสาหกรรม

การดูดซับเป็นการแยกกำจัดอย่างหนึ่งที่มีการนำมาใช้เป็นระยะเวลายาวนาน เช่น การใช้ถ่านเพื่อกำจัดกลิ่น และรสขมของน้ำ เป็นต้น ซึ่งต่อมามีการพัฒนาคุณสมบัติ ของถ่านจนเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้ในการดูดซับสารพิษได้ การดูดซับจึงจัดได้ว่าเป็นกระบวนการที่มีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่ง โดยประโยชน์จากการดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีดังนี้

- การกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ออกจากน้ำดื่ม เช่น สารพวกไตรฮาโลมีเทน สารปราบศัตรูพืช และสารประกอบคลอรีนต่างๆ
- การกำจัดกลิ่น รส และสีออกจากน้ำดื่ม
- การกำจัดสีออกจากน้ำมันพืช
- การบำบัดน้ำเสียหรือของเสียอุตสาหกรรมโดยใช้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ หรือในกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สาม
- แยกพาร์ฟินและไอโซพาร์ฟินออกจากกัน

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 กากของเหลวเขียว กับการนำไปใช้ประโยชน์

ปัจจุบันแนวทางการนำของเสียต่างๆมาใช้ประโยชน์ เป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจมากในอุตสาหกรรมกระดาษ และเยื่อกระดาษ เพื่อเป็นการลดปัญหาการใช้พื้นที่ในการฝังกลบ ดังนั้นจึงเริ่มมีการคิดที่จะนำกากของเหลวเขียว มาใช้ประโยชน์ ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังตารางที่ 2.5

Fenske และคณะ (2000) ได้นำกากของเหลวเขียวมาลดปัญหามลพิษที่ก่อให้เกิดกลิ่น ในกระบวนการต่างๆ ของโรงงานผลิตกระดาษ โดยใช้ Packed – bed reactor (Fixed bed) ซึ่งบรรจุอนุภาคของกากของเหลวเขียวไว้ พบว่า ประสิทธิภาพของระบบอาจขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของกากของเหลวเขียว และก๊าซที่นำมาบำบัด ซึ่งอาจก่อให้เกิดความดันลดในถังปฏิกิริยา ดังนั้นอาจแก้ปัญหาโดยการใส่ Fluidize bed แทนการใช้ Packed – bed reactor

Nurmesniemi และคณะ (2006) ตั้งแต่ปี 1990 เริ่มมีการคิดที่จะนำกากของเหลวเขียว มาใช้ในการสะเทินน้ำเสียที่เป็นกรด และในปี 2004 ได้มีการนำกากของเหลวเขียว ประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณกากของเหลวเขียวทั้งหมดมาทำการสะเทินกรดในน้ำเสีย โดย นำกากของเหลว

เชื่อมผสมกับน้ำในภาชนะ แล้วใส่ลงไปในน้ำเสียที่เป็นกรด ก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดทางชีวภาพต่อไป ซึ่งผลการทดลองพบว่ากากตะกอนชีวภาพที่นำไปเผาใน Fluidized bed ไม่ก่อให้เกิดปัญหาใดๆในกระบวนการเผา และปริมาณโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นในน้ำทิ้งถือว่ามีความสัมพันธ์น้อยมาก

Zambrano และคณะ (2007) พบว่ากากของเหลวเชื่อมมีค่าความเป็นด่าง และเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช เช่น ฟอสฟอรัส (0.37%) โพแทสเซียม (0.76%) แมกนีเซียม (1.4%) และแคลเซียม (27%) และมีธาตุอาหารรอง เช่น สารประกอบเหล็ก (0.47%) และสังกะสี (0.12%) ถึงอย่างไรก็ตามยังพบปัญหาในเรื่องค่าพีเอชที่สูง โดยความน่าจะเป็นไปได้ในการใช้งานที่เหมาะสมมีอัตราส่วนของกากของเหลวเชื่อม : เปลือกไม้ คือ 0.25

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่มีการนำกากของเหลวเชื่อมไปใช้ประโยชน์

การใช้ประโยชน์	ปัญหาที่เกิดขึ้น	ผู้ทำการวิจัย
ใช้ลดกลิ่นซัลเฟอร์ (สะเทินกรดในอากาศ)	อาจเกิดความดันลดในถังปฏิกิริยาแบบ Packed-bed ได้ง่าย	Fenske และคณะ (2000)
ใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์	ปูนที่ได้สามารถรับแรงอัดได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ	Gemellia (2001)
ใช้สะเทินน้ำเสียที่เป็นกรดในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	ไม่ปรากฏ	Nurmesniemi และคณะ (2006)
ใช้ผสมในการผลิตปุ๋ย	ต้องผสมกับเปลือกไม้เพื่อปรับค่าพีเอชให้เหมาะสม	Zambrano และคณะ (2007)
นำผสมกับดินเพื่อคืนสู่ป่า	ทำให้ค่าพีเอชในดินสูง ดังนั้นต้องผสมกับซีเมนต์จากเปลือกไม้	Rothpfeffer (2007)

โดยในแต่ละงานวิจัยจากตารางที่ 2.5 ได้ทำการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของกากของเหลวเชื่อมจากกระบวนการผลิตต่างในอุตสาหกรรมกระดาษ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบธาตุองค์ประกอบของกากของเหลวเขียว ในการนำไปใช้ประโยชน์ จากงานวิจัยต่างๆ

ธาตุองค์ประกอบ	กากของเหลวเขียว (กรัมต่อกิโลกรัม)			
	การสะเทินกรด		เกษตรกรรม	
	น้ำเสีย	ก๊าซซัลเฟอร์	กลับคืนสู่ป่า	ทำปุ๋ย
Zn	1.2	-	1.03	1.2
Mn	10.3	10.3	11.6	-
Fe	4.5	3.2	-	4.7
Mg	29.2	21.3	29.8	14
Al	-	3.1	5.25	-
Ca	84.5	199.5	253	270
Na	26.1	94.1	35.4	-
Li	-	-	-	-
Pb	-	-	-	-
Ni	0.2	-	0.08	-
Cr	0.3	-	0.118	-
Cu	0.11	-	0.102	-
P	0.01	-	3.79	3.7
K	1.7	8.3	3.07	7.6

#### 2.4.2 สารดูดซับ (Adsorbent) ในการดูดซับโครเมียม และทองแดง ในน้ำเสีย

การดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ปฏิกิริยาการนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของแข็ง โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แสดงดังตารางที่ 2.7 และ 2.8

**อริชัย นพแก้ว ( 2539)** ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก โดยใช้การทดลองแบบแบตช์เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก พบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดติดโลหะหนักโครเมียม และปรอทได้ดีที่ความเข้มข้นของโครเมียมและปรอทเท่ากับ 5 มิลลิกรัม ต่อ ลิตร และระยะเวลาสัมผัส 15 นาที นอกจากนี้ยังพบว่า การกำจัดโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอย มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดประมาณ 90% และ 70% ตามลำดับ

**ไชยันต์ ไชยยะ ( 2542)** ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของเม็ดดูดซับ (กากกาแฟผงกับดิน) พบว่าสามารถดูดซับไอออนโลหะแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และนิกเกิล ได้ภายในระยะเวลา 30 นาที และทำการศึกษาประสิทธิภาพของเม็ดดูดซับหลังจากใช้งานแล้วโดยการชะด้วยน้ำกลั่นพบว่าประสิทธิภาพในการชะไอออนแต่ละครั้งค่อนข้างคงที่ คือ ร้อยละ 90 และความสามารถในการดูดซับลดลงกว่าร้อยละ 10 หลังจากนำกลับมาใช้ใหม่เป็นครั้งที่ 3

**ศิริรัตน์ ศรีเกษเพชร ( 2543)** ทำการศึกษาการดูดซับสารละลายโลหะหนัก ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม และโครเมียม โดยใช้แร่ดินเหนียว kaolinite bentonite และดินเหนียวจากสถานที่ต่างๆ พบว่าเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสูงขึ้น จะสามารถทำให้สามารถดูดซับโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น โดยลำดับความสามารถในการดูดซับจากมากไปน้อยเป็นดังนี้ คือ โครเมียม ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี ตามลำดับ ยกเว้นแร่ดินเหนียว kaolinite ที่สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงสุด

**อดิศักดิ์ ปิยสถิตย์ ( 2543)** ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมโดยใช้ทรายเคลือบแมกนีไทต์พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัด ที่ความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชเท่ากับ 4 นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในกรณีพื้นอำนาจตัวกลางด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 พบว่า สามารถนำกลับโลหะหนักได้ โดย ที่ตัวกลางทรายเคลือบแมกนีไทต์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ต่อ ซึ่งประสิทธิภาพจะลดลงประมาณ 30% ในครั้งแรก และ 50% ในครั้งต่อไป

**ชฎาภรณ์ บุญแท้ ( 2545)** ศึกษาการทดสอบไอโซเทอมของการดูดซับไตรวาเลนซ์โครเมียมด้วยดินเบา พบว่าไม่เป็นไปตามไอโซเทอมของการดูดซับ เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมด้วยดินเบาส่วนใหญ่เกิดจากการตกตะกอน และพบว่าปริมาณการคายออกของโลหะโครเมียมจากดินเบาไม่เกินมาตรฐานตามเกณฑ์ที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด

**ณัฐ ดิลกเกียรติ (2546)** ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมโดยใช้ดินดำผสมกะลามะพร้าว และดินดำผสมกะลาปาล์ม พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ระยะเวลาสัมผัสดำเท่ากับ 4 ชั่วโมง ค่าพีเอชเท่ากับ 3 และศึกษาการชะตัวดูดซับด้วยสารละลายกรดอ่อน และน้ำกลั่นที่ 24 ชั่วโมงพบว่าไม่สามารถชะไอออนโครเมียมออกมาได้ด้วยสารละลายกรดอ่อน และน้ำกลั่นได้

**กรรณิการ์ รักกิจ (2547)** ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 4 ชนิดที่ผลิตจากกะลามะพร้าว เป็นสารดูดซับ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับมีค่าพีเอชเท่ากับ 4-5

**กาญจนา คุณาทัยและคณะ (2548)** ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตซีโอไลต์จากเถ้าลอย พบว่าการกระตุ้นด้วย 2 M NaOH ที่ 100 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จะมีค่าการแลกเปลี่ยนแคตไอออนมากที่สุด และพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะทองแดงใช้ระยะเวลาในการสัมผัสเท่ากับ 3 ชั่วโมง

**Bin Yu และคณะ (2000)** ทำการศึกษาการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำเสีย โดยใช้ซีลี้อย พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย ปริมาณของซีลี้อย ระยะเวลาในการสัมผัส และค่าพีเอช ซึ่งค่าพีเอชที่เหมาะสมในการใช้ซีลี้อยดูดซับทองแดง คือค่าพีเอชเท่ากับ 7

**Kadirvelu (2001)** ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากมะพร้าว พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นจากค่าพีเอชเท่ากับ 2 ถึงค่าพีเอชเท่ากับ 6 และจะคงที่จนถึงค่าพีเอชเท่ากับ 10

**Sciban และคณะ (2006)** ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะทองแดง โดยใช้ซีลี้อย พบว่าการกระตุ้นซีลี้อยด้วย NaOH เพียงอย่างเดียวสามารถทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นได้ โดยศึกษาที่สภาวะเหมาะสม คือ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.7 งานวิจัยที่มีการใช้ สารดูดซับชนิดต่างๆ ในการดูดซับโครเมียม ในน้ำเสีย

สารดูดซับ (Adsorbent)	สารถูกดูดซับ (Adsorbate)	สภาวะที่เหมาะสม	ผู้ทำการวิจัย
ถ่านกัมมันต์	โครเมียม (น้ำชะมูลฝอย)	ความเข้มข้น 5 มก./ล. ค่าพีเอช 7-8 เวลาสัมผัส 15 นาที	อริชัย นพแก้ว (2539)
แร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ	โครเมียม	เวลาสัมผัส 2 ชั่วโมง	ศิริวัฒน์ ศรีเกษ เพชร (2543)
ทรายเคลือบแมงनीไทต์	โครเมียม (VI) (น้ำเสียสังเคราะห์)	ความเข้มข้น 100 มก./ล. ค่าพีเอช 4	อดิศักดิ์ ปิยสถิตย์ (2543)
ดินเบา (Diatoma Earth)	โครเมียม (III) (น้ำเสียสังเคราะห์)	ค่าพีเอช 4 เวลาสัมผัส 10 ชั่วโมง 100 รอบต่ออนาที	ชฎาภรณ์ บุญแท้ (2545)
ดินดำผสมกะลามะพร้าว (20:80) หรือกะลาปาล์ม (10:90) โดยผ่านกระบวนการ เผาแบบไร้ออกซิเจน 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที	โครเมียม (VI) (น้ำใต้ดินสังเคราะห์)	ค่าพีเอช 3 เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง	ณัฐ ดิลกเกียรติ (2546)

ตารางที่ 2.8 งานวิจัยที่มีการใช้สารดูดซับชนิดต่างๆ ในการดูดซับทองแดง ในน้ำเสีย

สารดูดซับ (Adsorbent)	สารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate)	สภาวะที่เหมาะสม	ผู้ทำการวิจัย
ซีลี้อย	ทองแดง (น้ำเสียสังเคราะห์)	ค่าพีเอช 7	Bin Yu และ คณะ (2000)
ซีลี้อยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH	ทองแดง (น้ำเสียสังเคราะห์)	ค่าพีเอช 4 เวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง	Sciban และ คณะ (2006)
ถ่านกัมมันต์จากกากมะพร้าว	ทองแดง (น้ำเสียอุตสาหกรรม)	ค่าพีเอช 6	Kadirvelu (2001)
กากกาแฟกับดิน (80:20) ผ่านกระบวนการเผาแบบไร้ออกซิเจน 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	ทองแดง	เวลาสัมผัส 30 นาที	ไชยันต์ ไชยยะ (2542)
ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว	ทองแดง (น้ำเสียอุตสาหกรรม)	ค่าพีเอช 4-5	กรรณิการ์ รัก กิจ (2547)
ซีโอไลต์จากถั่วลันเตา	ทองแดง (น้ำเสียสังเคราะห์)	เวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง	กาญจนา คุณาทัยและ คณะ (2548)

จากตารางที่ 2.7 และ 2.8 พบว่าสารดูดซับต่างชนิดกัน จะมีสภาวะเหมาะสม ในการดูดซับโครเมียม และทองแดง ที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาค่าพีเอช และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักโครเมียม และทองแดง ด้วยกากของเหลือ

เขียว

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การทดลองนี้เป็นการศึกษาการใช้กากของเหลวเขียวเป็นสารดูดซับ สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

1. รวบรวมข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดทำเอกสาร และขอเก็บตัวอย่างกากของเหลวเขียวจากโรงงานผลิตกระดาษ
3. จัดทำเอกสาร และขอเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม
4. ศึกษาสมบัติ และองค์ประกอบของโลหะหนักในกากของเหลวเขียว
5. ศึกษาสมบัติ และวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม
6. เตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นที่ต้องการ
7. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้กากของเหลวเขียว เพื่อดูดซับโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม
8. ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสีย จากโรงงานชุบโครเมียม
9. ศึกษาความสามารถในการคายออกของโลหะหนักจากกากของเหลวเขียว
10. วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

## 3.2 ตัวอย่าง และสารเคมีในการวิจัย

### 3.2.1 ตัวอย่างกากของเหลวเขียว (Dregs)

กากของเหลวเขียวเป็นของเสียที่นำมาจากระบวนการผลิตต่าง ( Causticizing) ในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งมีอัตราการเกิดกากของเหลวเขียว ประมาณ 6 ตัน (น้ำหนักแห้ง) ต่อวัน

วิธีการเก็บตัวอย่าง จะทำการเก็บตัวอย่างกากของเหลวเขียว จากเครื่องกรองระบบสุญญากาศ แสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ใส่ภาชนะที่ปิดสนิท และเก็บไว้ในที่แห้ง ณ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างกากของเหลวเขียว จากเครื่องกรองระบบสุญญากาศ

หลังจากนั้น นำมาทดสอบสมบัติของตัวอย่างกากของเหลวเขียวเบื้องต้น โดยทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรของรูพรุน ด้วยเครื่อง BET surface area and pore ก่อนผ่านการดูดซับไอระเหยน้ำ พบว่า กากของเหลวเขียวมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 139.40 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดของรูพรุนเท่ากับ 88.95 อังสตรอม และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.3099 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ของกากของเหลวเขียว ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแมกนีเซียม 55.01% ซิลิกอน 34.22% แมงกานีส 4.45% และอื่นๆ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเขียว

ธาตุองค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์
Mg	55.0
Si	34.2
Mn	4.45
S	2.25
P	1.47
Nb	1.38
Fe	1.15
Ca	0.31
Cr	0.20
Cu	0.10

กากของเหลวเขียวหลังผ่านการดูดซับโลหะหนักที่สภาวะเหมาะสมแล้ว จะถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติ และองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้

- พื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรของรูพรุน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET surface area and pore
- ลักษณะพื้นที่ผิว วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
- องค์ประกอบทางเคมีของ วิเคราะห์ด้วย X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

### 3.2.2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ น้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโครเมียม

#### 3.2.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนั้น จำลองมาจากข้อมูลน้ำเสียจริง จากงานวิจัยของจินตนา สายวรรณ ( 2541) ที่ทำการเก็บตัวอย่างจากโรงงานชุบโครเมียม โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม 4 โรงงาน ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.2

ผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียมทั้ง 4 โรงงาน พบว่าปริมาณโลหะหนักเรียงตามลำดับปริมาณที่พบจากโรงงานที่ 2 3 และ 4 คือ โครเมต และทองแดง ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกทำการวิจัยความเข้มข้นของโครเมต และทองแดงในน้ำเสียชนิดต่างๆ โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ค่าความเข้มข้นโครเมียม เท่ากับ 200 มิลลิกรัม ต่อ ลิตร
2. ค่าความเข้มข้นทองแดง เท่ากับ 20 มิลลิกรัม ต่อ ลิตร
3. ค่าความเข้มข้นโครเมียม-ทองแดง เท่ากับ 200 และ 20 มิลลิกรัม ต่อ ลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม (จินตนา สายวรรณ, 2541)

ไอออน	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)			
	โรงงานที่1	โรงงานที่2	โรงงานที่3	โรงงานที่4
โครเมต	560	284	408	187
ทองแดง	14.6	1.51	7.99	0.18
เหล็ก	39.9	0.75	5.27	0.00
นิเกิล	124	0.60	4.80	1.50

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ และหาความสามารถในการตกตะกอนของโลหะที่ค่าพีเอชต่างๆ

1. ชั่งสารเคมีตามลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ที่ต้องการ โดยจะใช้สารเคมีในรูปของ Sodium Dichromate ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) ซึ่งมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 262 กรัม และโครเมียมมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 52 กรัม และ Copper Nitrate ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ) ซึ่งมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 188 กรัม และทองแดงมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 63.6 กรัม
  - น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม ความเข้มข้นเท่ากับ 200 มิลลิกรัม ต่อ ลิตร ต้องใช้  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  0.504 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร
  - น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัม ต่อ ลิตร ต้องใช้  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  0.059 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร

- น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม-ทองแดง ความเข้มข้นเท่ากับ 200 และ 20 มิลลิกรัม ต่อ ลิตร ตามลำดับ ต้องใช้  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  0.504 กรัม และ  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  0.059 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร
- 2. ทำการปรับค่าพีเอช ให้อยู่ในช่วงค่าพีเอช 1 ถึง 8 ด้วยกรดไนตริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 3. นำไปวัดค่าความเข้มข้นของโครเมียม และทองแดงที่หลงเหลืออยู่ในน้ำ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ( AAS) เพื่อหาปริมาณโครเมียม และทองแดงที่ ตกตะกอน ณ ค่าพีเอชต่างๆ

### 3.2.2.2 น้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโครเมียม

ตัวอย่างน้ำเสียนำมาจากกระบวนการล้างน้ำหลังจากการชุบโครเมียม ในโรงงานชุบโครเมียม (จังหวัดกาญจนบุรี) ซึ่งมีกระบวนการชุบโครเมียมด้วยวิธีการชุบชนิดแข็งเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีการชุบทองแดง หรือนิกเกิลเพื่อเป็นการรองพื้นชิ้นงาน โดยน้ำยาที่ใช้ในการชุบคือ กรดโครมิก ผสมกับกรดซัลฟูริก

วิธีการเก็บตัวอย่าง เก็บจากท่อรวบรวมน้ำทิ้ง โดยใช้ตัวอย่างน้ำเขย่าล้างภาชนะที่บรรจุ 2-3 ครั้ง หลังจากเก็บตัวอย่างน้ำเต็มภาชนะแล้วปิดฝาให้สนิท และเก็บตัวอย่างน้ำไว้ในที่มีด อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม (+6) และทองแดง (+2) เริ่มต้น โดยวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ( AAS) ซึ่งสามารถ แสดงองค์ประกอบทางเคมี ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียมได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม

ธาตุองค์ประกอบ	มิลลิกรัมต่อลิตร
Ca	169
Cr	1388
Cu	14.1
Mg	23.5

### 3.2.3 สารเคมี

1. Nitric Acid 65%	Analytical Reagent Grade	บริษัท Carlo Ebra
2. Sodium Hydroxide	Analytical Reagent Grade	บริษัท Carlo Ebra
3. Sodium Dichromate	Standard Solution	บริษัท Carlo Ebra
	Analytical Reagent Grade	
4. Copper Nitrate	Standard Solution	บริษัท Carlo Ebra
	Analytical Reagent Grade	
5. Sodium Acetate	Analytical Reagent Grade	บริษัท Carlo Ebra
6. Monosodium Phosphate	Analytical Reagent Grade	บริษัท Carlo Ebra
7. Disodium Phosphate	Analytical Reagent Grade	บริษัท Carlo Ebra
8. Citric Acid	Analytical Reagent Grade	บริษัท Carlo Ebra

### 3.3 อุปกรณ์ และเครื่องมือในการวิจัย

#### 3.3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือในการศึกษาสมบัติของกากของเหลวเขียว (Dregs)

ลำดับ	อุปกรณ์และเครื่องมือ	ยี่ห้อ (รุ่น)	สมบัติที่ทำการวิเคราะห์
1.	เครื่อง BET surface area and pore	Micromeritics (ASAP 2000)	พื้นที่ผิว และปริมาตร ของรูพรุน
2.	เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	JEOL (JSM-5800LV)	ลักษณะพื้นที่ผิว
3.	เครื่อง Inductive Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)	Perkin Elmer (PLASMA-100)	องค์ประกอบทางเคมี
4.	เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)	Philips (PW 2400)	องค์ประกอบทางเคมี

### 3.3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการศึกษาสมบัติ และปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย

ลำดับ	อุปกรณ์และเครื่องมือ	ยี่ห้อ (รุ่น)	สมบัติที่ทำการวิเคราะห์
1.	pH meter	Denver (215)	ค่าพีเอช
2.	เครื่อง Inductive Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)	Perkin Elmer (PLASMA-100)	ปริมาณโลหะหนัก ในน้ำเสีย
3.	เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)	GBC (Avanta)	ปริมาณโครเมียม (+6) และทองแดง (+2)

### 3.3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือในการศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์

ลำดับ	อุปกรณ์และเครื่องมือ	ยี่ห้อ (รุ่น)	สมบัติที่ทำการวิเคราะห์
1.	pH meter	Denver (215)	วัดค่าพีเอช
2.	เครื่องเขย่า	GFL (3015)	ตั้งความเร็วที่ 200 รอบต่อวินาที
3.	เครื่องชั่งไฟฟ้า	Mettler (PB3002-S)	ชั่งน้ำหนัก Dregs
4.	กระดาษกรองเบอร์ 42	Whatman	ใช้กรองตัวอย่างน้ำ
5.	เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)	GBC (Avanta)	ปริมาณโครเมียม (+6) และทองแดง (+2)
6.	อุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป		

### 3.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

ในการทดลองนี้จะแบ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องออกเป็น 3 ชนิด คือ ตัวแปรกำหนด ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 3.4.1 ตัวแปรกำหนด

ตัวแปรกำหนดเป็นตัวแปรที่เราที่กำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง โดยสามารถแสดงตัวแปรกำหนดในการทดลองต่างๆ ได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรกำหนด และพารามิเตอร์ ในการทดลองต่างๆ

ตัวแปรกำหนด	พารามิเตอร์
<b>1. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานซูบโครเมียม</b>	
- อุณหภูมิในการทดลอง	อุณหภูมิห้อง (25 °ซ)
- ความเร็วรอบของเครื่องเขย่า	200 รอบต่อนาที
- ปริมาณ Dregs	0.5 กรัม
- ปริมาณน้ำเสีย	100 มิลลิลิตร
<b>2. การทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก</b>	
- อุณหภูมิในการทดลอง	อุณหภูมิห้อง (25 °ซ)
- ความเร็วรอบของเครื่องเขย่า	200 รอบต่อนาที
- ปริมาณน้ำเสีย	100 มิลลิลิตร
- ระยะเวลาในการสัมผัส	ผลจากการทดลองที่ 3.5.2.1
- ค่าพีเอช	ผลจากการทดลองที่ 3.5.2.2

น้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากโรงงานซูบโครเมียมได้จากหัวข้อที่ 3.2.2.1 และ 3.2.2.2 ตามลำดับ



### 3.4.2 ตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรที่เรากำหนดค่าขึ้น ซึ่งมีผลต่อการทำงานของระบบ โดยสามารถแสดงตัวแปรอิสระในการทดลองต่างๆ ได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรอิสระ และพารามิเตอร์ ในการทดลองต่างๆ

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม	
- ระยะเวลาในการดูดซับโลหะหนัก	30 นาที 1 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง 5 ชั่วโมง 7 ชั่วโมง 10 ชั่วโมง 15 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง
- ค่าพีเอชในการดูดซับโลหะหนัก	2 3 4 5 6 7 8 9 และไม่ปรับค่าพีเอช
2. การทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก	
- ปริมาณ Dregs	0.05 0.1 0.3 0.5 0.7 1.0 1.2 กรัม และไม่ใส่ Dregs

น้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโครเมียมได้จากหัวข้อที่ 3.2.2.1 และ 3.2.2.2 ตามลำดับ

### 3.4.3 ตัวแปรตาม

ตัวแปรตามเป็นตัวแปรที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระ โดยตัวแปรตามในการทดลองต่างๆได้ตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรตาม ในการทดลองต่างๆ

ตัวแปรตาม	
1.	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานซูบโครเมียม ตัวแปรตามคือ ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก
2.	การทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก ตัวแปรตามคือ ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก

น้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากโรงงานซูบโครเมียมได้จากหัวข้อที่ 3.2.2.1 และ 3.2.2.2 ตามลำดับ

### 3.5 วิธีการดำเนินการทดลอง

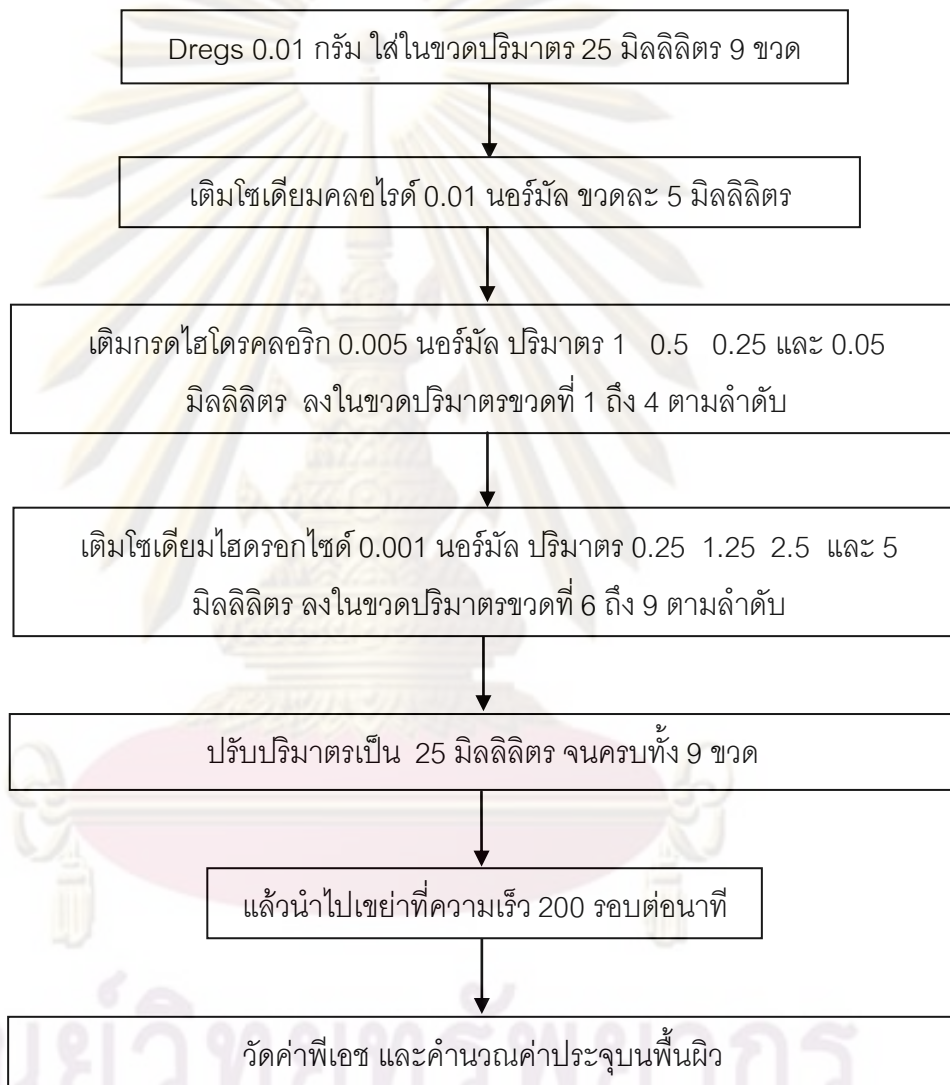
#### 3.5.1 การวัดค่าประจุที่ผิวของกากของเหลวเขียว

เป็นการศึกษาทดลองหาค่าประจุที่อยู่รอบผิวของกากของเหลวเขียวตามวิธี Bath equilibrium technique (ประยุกต์ตาม Punyapalakul Patiparn,2004) ในช่วงพีเอชต่างๆ สามารถแสดงขั้นตอนได้ดังรูปที่ 3.2

1. นำกากของเหลวเขียวปริมาณ 0.01 กรัม ใส่ในขวดปริมาตร 25 มิลลิลิตร 9 ขวด
2. เติมน้ำเกลือคลอไรด์ 0.01 นอร์มัล ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตรทั้ง 9 ขวด
3. เติมนอร์มัลไฮโดรคลอริก 0.005 นอร์มัล ปริมาตร 1 0.5 0.25 และ 0.05 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตรขวดที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ
4. เติมนอร์มัลไฮดรอกไซด์ 0.001 นอร์มัล ปริมาตร 0.25 1.25 2.5 และ 5 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตรขวดที่ 6 ถึง 9 ตามลำดับ
5. ปรับปริมาตรตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นให้เท่ากับ 25 มิลลิลิตร จนครบทั้ง 9 ขวด

6. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
7. จากนั้นนำไปวัดค่าพีเอช และคำนวณหาค่าประจุบนพื้นผิวจากสมการดังนี้

$$\frac{c}{g} = \frac{[HCl_{add}] - [NaOH_{add}] - [H^+] + [OH^-]}{weight_{g/l}} \times 96,500$$



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการวัดค่าประจุบนพื้นผิว (ประยุกต์ตาม Punyapalaku, 2004)

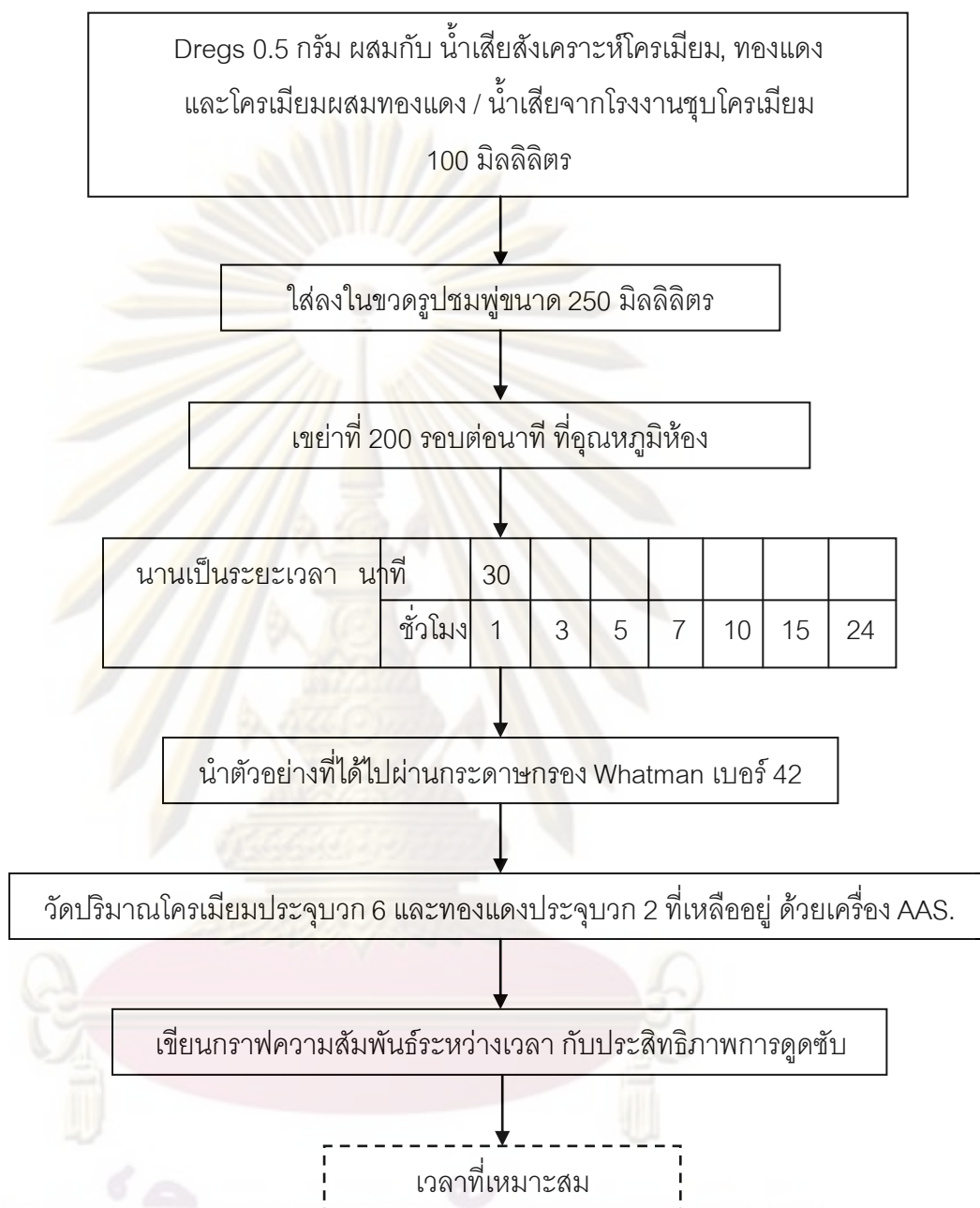
### 3.5.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และ น้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม

ศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก (โครเมียมประจุบวก 6 และทองแดงประจุบวก 2) ในน้ำเสียน้ำเสียสังเคราะห์ (โครเมียม ทองแดง และโครเมียม-ทองแดง) และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม ของกากของเหลวเขียว โดยใช้การทดลองแบบแบตช์ (Batch test) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับดังนี้

#### 3.5.2.1 การศึกษาเพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

เป็นการศึกษาทดลองหาเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยา (Equilibrium) เพื่อนำไปใช้ในการหาความสามารถในการดูดซับ และไอโซเทอมของสารดูดซับ สามารถแสดงขั้นตอนได้ดังรูปที่ 3.3

1. นำกากของเหลวเขียวปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 24 ใบ
2. นำน้ำเสียสังเคราะห์ (โครเมียม ทองแดง และโครเมียม-ทองแดง) 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
3. นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 30 นาที 1 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง 5 ชั่วโมง 7 ชั่วโมง 10 ชั่วโมง 15 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ
4. นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง
5. นำน้ำตัวอย่างไปวัดปริมาณโครเมียมประจุบวก 6 และทองแดงประจุบวก 2 ที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
6. นำค่าที่ได้ไปทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมประจุบวก 6 และทองแดงประจุบวก 2
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึงข้อ 6 แต่ใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโครเมียมมาแทนที่การใช้น้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

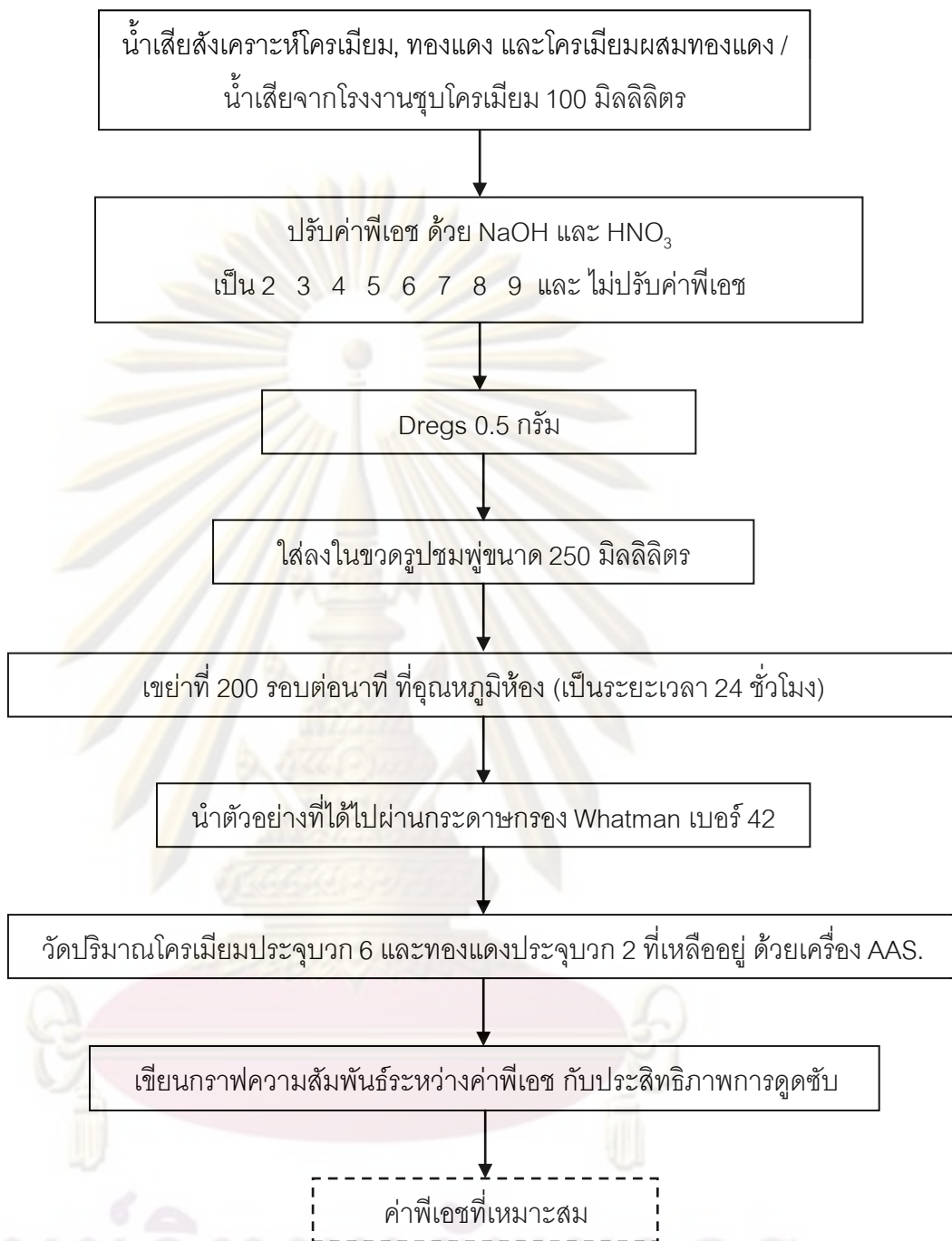
### 3.5.2.2 การศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

เป็นการศึกษาทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับโครเมียมประจุบวก 6 และทองแดงประจุบวก 2 เพื่อนำไปใช้ในการหาความสามารถในการดูดซับ และไอโซเทอมของสารดูดซับ สามารถแสดงขั้นตอนได้ดังรูปที่ 3.4

1. นำกากของเหลวเขียวปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 3 ใบ
2. นำน้ำเสียสังเคราะห์ (โครเมียม ทองแดง และโครเมียม-ทองแดง) 100 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 1 (ด้วย NaOH และ HNO<sub>3</sub>) ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
3. นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (การหาระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.5.2.1)
4. นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง
5. นำน้ำตัวอย่างไปวัดปริมาณโครเมียมประจุบวก 6 และทองแดงประจุบวก 2 ที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
6. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 1 แต่ทำการปรับค่าพีเอชของน้ำเป็น 2 3 4 5 6 7 8 9 และไม่ปรับค่าพีเอช
7. นำค่าที่ได้ไปทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมประจุบวก 6 และทองแดงประจุบวก 2
8. หาค่าปริมาณการดูดซับจากส่วนต่างของปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดที่ถูกกำจัดได้กับปริมาณที่ถูกตกตะกอนในน้ำเสียที่ค่าพีเอชต่างๆ จากการทดลองก่อนหน้านี้
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึงข้อ 7 แต่ใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโครเมียมมาแทนที่การใช้น้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในน้ำเสียนั้นทำการควบคุมค่าพีเอช โดยการเติมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ลงในน้ำกลั่นที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ ซึ่งใช้โมโนโซเดียมฟอสเฟต และไดโซเดียมฟอสเฟต ในปริมาณที่คำนวณได้จากโปรแกรมคำนวณฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Robinson, <http://home.fuse.net/clymer/buffers/phos2.html>. [19 กันยายน 2552])

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



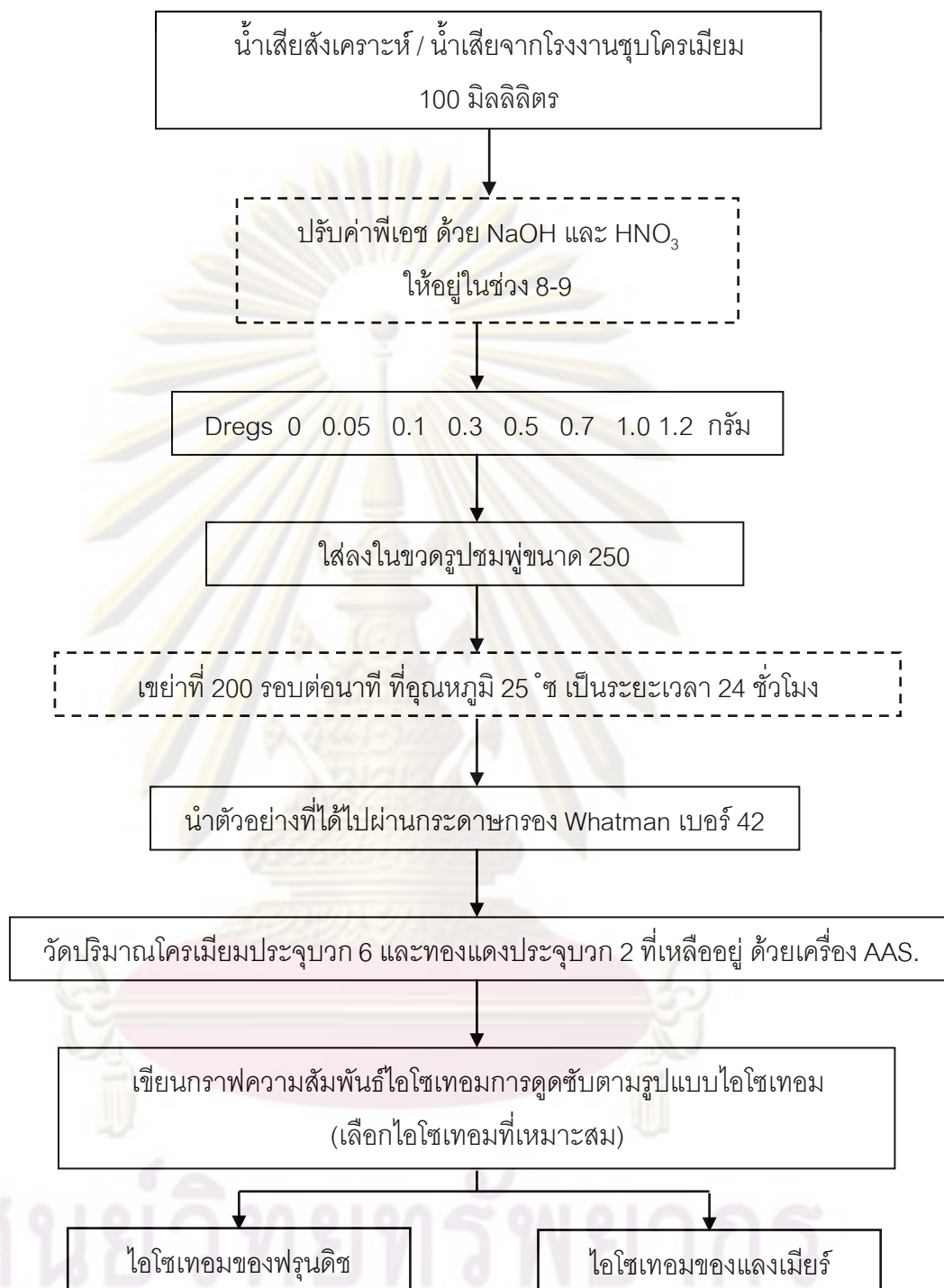
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

### 3.5.3 การทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก

1. นำกากของเหลวเขียวปริมาณ 0.05 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 3 ใบ
2. นำน้ำเสียสังเคราะห์ (โครเมียม ทองแดง และโครเมียม-ทองแดง) 100 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 8-9 (ด้วย NaOH และ HNO<sub>3</sub>) ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
3. นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะ 24 ชั่วโมง
4. นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ใ้เก็บน้ำไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง
5. นำน้ำตัวอย่างไปวัดปริมาณโครเมียมประจุบวก 6 และทองแดงประจุบวก 2 ที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
6. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 1 แต่ทำการปรับปริมาณกากของเหลวเขียว เป็น 0.1 0.3 0.5 0.7 1.0 1.2 กรัม และไม่ใส่กากของเหลวเขียว
7. นำค่าที่ได้ไปทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับ ตามรูปแบบของฟรุนดลิช และ แลงเมียร์ โดยเลือกสมการที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด สามารถแสดงขั้นตอนได้ดังรูปที่ 3.5
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึงข้อ 7 แต่ใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโครเมียมมาแทนที่การใช้น้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองหาไอโซเทอมในน้ำเสียนั้นทำการควบคุมค่าพีเอช โดยการเติมฟอสเฟต บัฟเฟอร์ลงในน้ำกลั่นที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในช่วงพีเอช 8-9 ซึ่งใช้โมโนโซเดียมฟอสเฟต และไดโซเดียมฟอสเฟตในปริมาณ 0.05 และ 1.25 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ (Robinso, <http://home.fuse.net/clymer/buffers/phos2.html>. [19 กันยายน 2552])





รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก

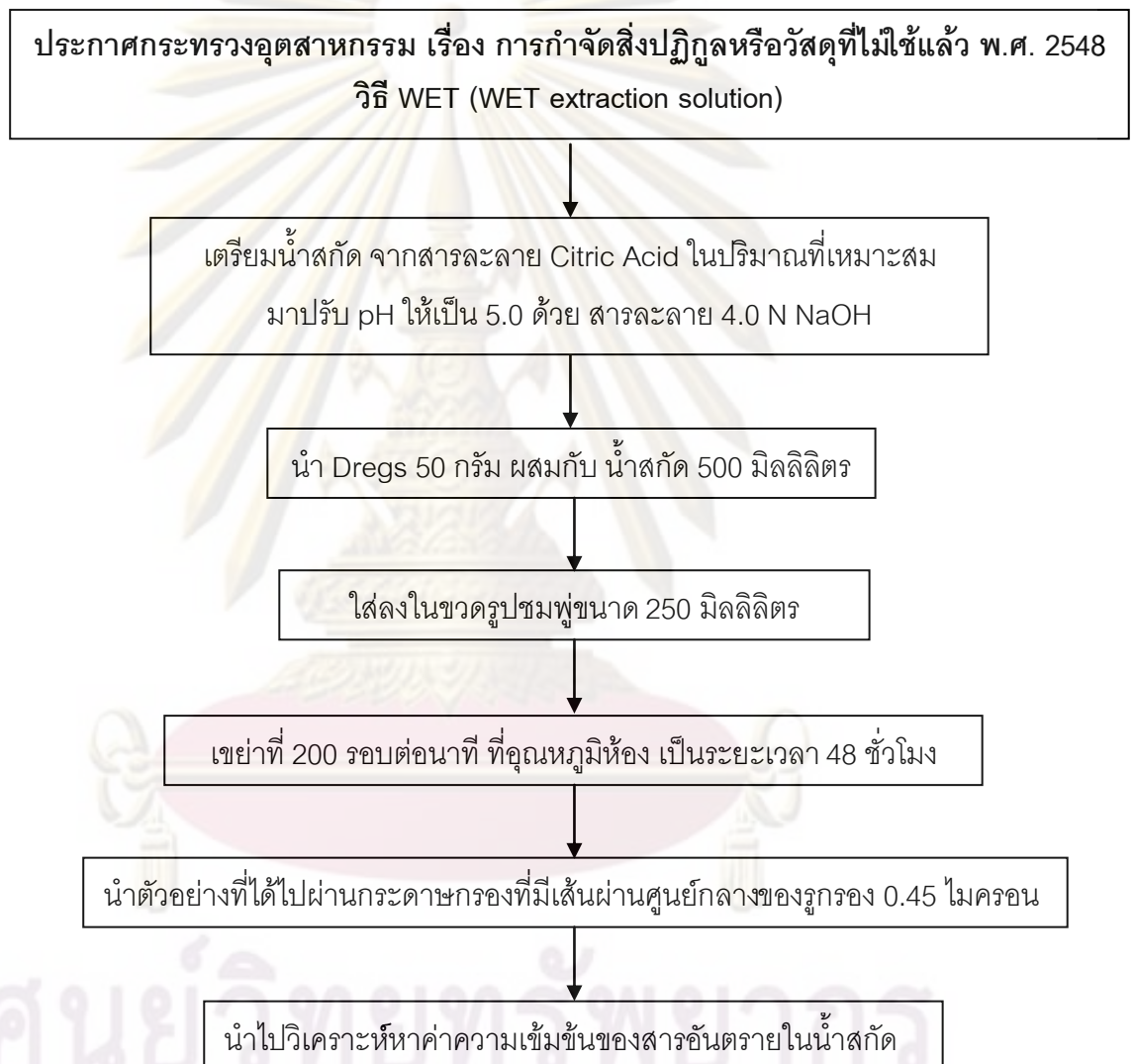
### 3.5.4 การศึกษาความสามารถในการคายออกของโลหะหนักจากกากของเหลวเขียว

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ในเรื่องการเตรียมตัวอย่างสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ที่ต้องการทดสอบหาค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Total concentration) หรือปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร (Extractable concentration) ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นกากตะกอน (Sludge) เเลน (Slurry) หรือเป็นน้ำมัน (Oily) น้ำมันดิน (Tarry) ที่ไม่สามารถกรองหรือบดได้ หลังจากแยกสิ่งแปลกปลอมออกแล้ว ตัวอย่างที่เหลือทั้งหมดจะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไปโดยให้ใช้ สารละลาย 0.2 M Sodium citrate ที่ pH  $5.0 \pm 0.1$  เป็นน้ำสกัดที่ใช้ใน วิธี WET (WET extraction solution) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

1. เตรียมสารละลาย Citric acid ได้โดยนำ Analytical grade citric acid ไปละลายในน้ำปราศจากไอออน
2. จากนั้นนำสารละลาย Citric acid ในปริมาณที่เหมาะสม มาปรับ pH ให้เป็น 5.0 ด้วยสารละลาย 4.0 N NaOH เพื่อใช้เป็นน้ำสกัด
3. นำ 50 กรัมของตัวอย่างใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน (ควรใช้ภาชนะที่ทำจากแก้วเมื่อต้องการวิเคราะห์หาสารอินทรีย์อันตราย) ภาชนะที่ใส ในการสกัดควรผ่านการล้าง (Rinsed) อย่างต่อเนื่องด้วยสารละลาย Nitric acid ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการนำเอา Nitric acid solution มาผสมกับน้ำปราศจากไอออนในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร)
4. เติม 500 มิลลิลิตรของน้ำสกัดลงในตัวอย่าง และนำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าซึ่งสามารถทำให้เป็นเนื้อเดียวกันตลอดเวลา 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
5. จากนั้นนำเอาของผสมไปกรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (Membrane filter) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน
6. นำไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร (Extractable concentration; EC) โดยใช้วิธีตาม Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods," SW-846, 2nd edition, U.S. Environmental Protection Agency, 1982 ดังนี้คือ
  - Method 3050 สำหรับโลหะและสารประกอบทุกตัวยกเว้นโครเมียมเฮกซะวาเลนต์
  - Method 3060 สำหรับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์

7. โดยอุปกรณ์และเครื่องมือที่จำเป็น ให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ใน method 1310 ใน Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods," SW-846, 3rd edition, U.S.Environmental Protection Agency, 1986 สามารถแสดงขั้นตอนได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การศึกษาความสามารถในการคายออกของโลหะหนักจากกากของเหลวเขียว

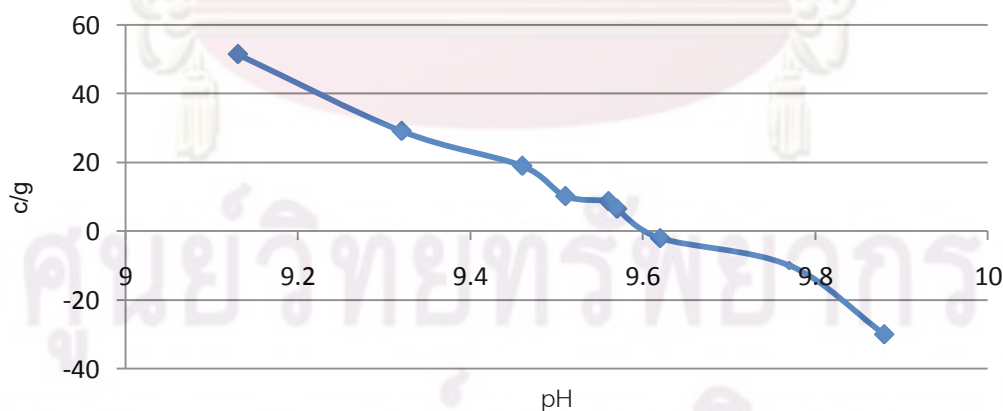
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการใช้กากของเหลือเขียว สำหรับดูดซับโครเมียม และทองแดงจากน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ประเภท (น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง) และน้ำเสียจาก โรงงานชุบโครเมียม โดย ทำการทดลองแบบกวนผสมสมบูรณ์ในระบบเบตซ์ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งกำหนดค่าความเข้มข้นของโครเมียม และทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ค่าความเข้มข้นโครเมียม 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ทองแดง 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 4.1 การศึกษาประจุบนพื้นผิวของกากของเหลือเขียว (pH of Point of Zero Charge ( $pH_{pzc}$ ))

จากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าประจุบนพื้นผิวของกากของเหลือเขียว โดยใช้วิธีการคำนวณค่าประจุต่อกรัมของตัวอย่างจากการวัดค่าพีเอชในตัวอย่าง พบว่าค่า  $pH_{pzc}$  ของกากของเหลือเขียวมีค่าเท่ากับ 9.62 ดังนั้นเมื่อค่า pH มีค่ามากกว่า 9.62 กากของเหลือเขียวจะมีประจุบนพื้นผิวเป็นประจุลบ และเมื่อค่า pH มีค่าน้อยกว่า 9.62 กากของเหลือเขียวจะมีประจุบนพื้นผิวเป็นประจุบวก ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ประจุบนพื้นผิวของกากของเหลือเขียวที่ค่า pH ต่างๆ

## 4.2 การศึกษาสมบัติของกากของเหลวเขียว และน้ำเสียจากโรงงานซูบโครเมียม

### 4.2.1 การศึกษาพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุน

จากผลการศึกษาพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของกากของเหลวเขียว ก่อนและหลังการศึกษาหาสภาวะเหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานซูบโครเมียม 100 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชเท่ากับ 8.58 และปริมาณกากของเหลวเขียว 1.201 กรัม ด้วยเครื่อง BET surface area and pore ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และผลการวิเคราะห์โดยละเอียดในรูปที่ ง.1 – ง.2 (ภาคผนวก ง) พบว่าพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของกากของเหลวเขียวลดลง หลังจากทำการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานซูบโครเมียม โดยมีพื้นที่ผิวลดลง ประมาณ 63.29 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนลดลง 0.1511 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนลดลง 5.5 อังสตรอม ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่มีโครเมียม และทองแดงส่วนหนึ่งในน้ำเสียได้เคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ทำให้กากของเหลวเขียวมีพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุนลดลง

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุนของกากของเหลวเขียวก่อน และหลังการเติม Dregs

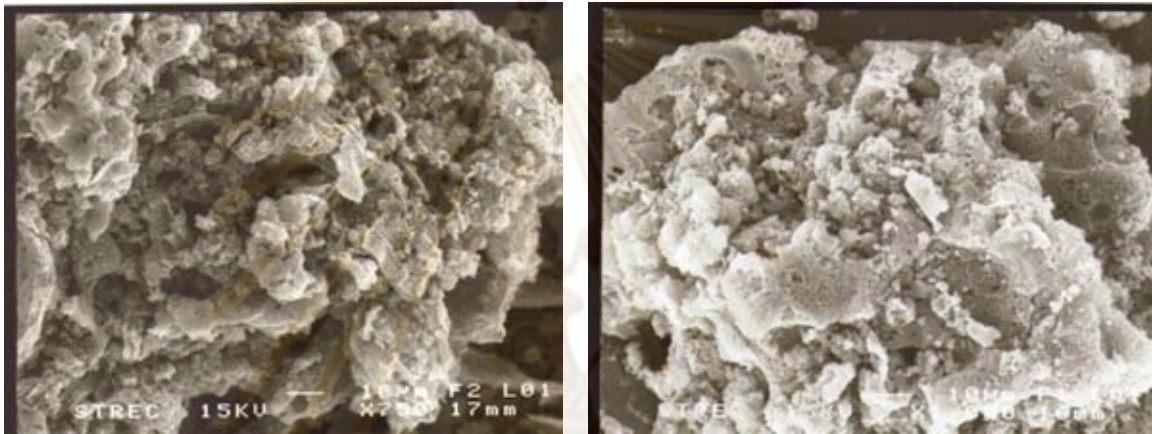
	พื้นที่ผิว (ตร.ม./ก.)	ปริมาตรรูพรุน (ลบ.ซม./ก.)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม,Å)
ก่อนการเติม Dregs	139.40	0.3099	88.95
หลังการเติม Dregs	76.11	0.1588	83.45

### 4.2.2 การศึกษาลักษณะพื้นที่ผิว

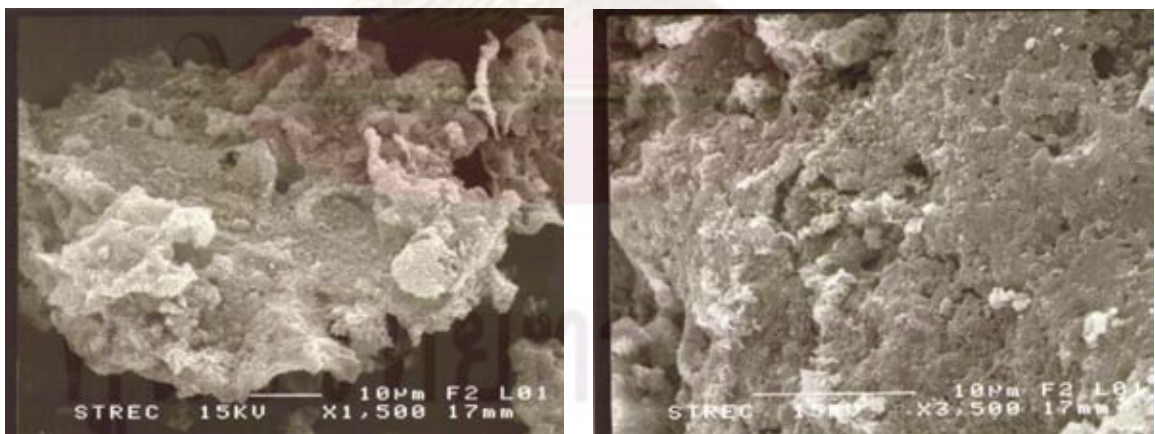
จากผลการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของกากของเหลวเขียว ก่อนและหลังการศึกษาหาสภาวะเหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานซูบโครเมียม 100 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชเท่ากับ 8.58 และปริมาณกากของเหลวเขียว 1.201 กรัม ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าลักษณะพื้นผิวของกากของเหลวเขียวก่อนการกำจัดที่สภาวะเหมาะสมมีปริมาตรรูพรุน และพื้นที่ผิวมากกว่าหลังผ่านการกำจัดที่สภาวะเหมาะสมอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของกากของเหลวเขียว ด้วยเครื่อง BET surface area and pore ดังนั้นอาจมีความเป็นไปได้ว่ามีกระบวนการกำจัดโลหะหนักส่วน

หนึ่งเกิดขึ้นที่พื้นผิวของกากของเหลวเขียว เนื่องจากการทดลองโดยใช้ดินเบาดูดซับทองแดงในน้ำเสีย พบว่าดินเบาที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ จะทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลที่มีขั้วได้ (ชฎาภรณ์ บุญแท้, 2545) ซึ่งแตกต่างจากการใช้เส้นใยจากปาล์มน้ำมันนั้นจะเกิดการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียม โดยใช้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของเส้นใยที่มีประจุเป็นบวกกับ เฮกซะวาเลนท์โครเมียม (Isa และคณะ, 2007)



รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของกากของเหลวเขียว ก่อนการศึกษาสภาวะเหมาะสมที่กำลังขยาย 750 และ 1,000 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของกากของเหลวเขียว หลังการศึกษาสภาวะเหมาะสมที่กำลังขยาย 1,500 และ 3,500 ตามลำดับ

#### 4.2.3 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเขียว

จากผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ของกากของเหลวเขียวก่อนและหลังการศึกษาหาสภาวะเหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานซูบโครเมียม 100 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชเท่ากับ 8.58 และปริมาณกากของเหลวเขียว 1.201 กรัม ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเขียว

ธาตุองค์ประกอบ	กากของเหลวเขียว (ร้อยละ)	
	ก่อนการเติม Dregs	หลังการเติม Dregs
Ca	0.306	0.329
Cr	0.204	22.5
Cu	0.102	1.28
Fe	1.15	3.66
Mg	55.0	1.32
Mn	4.45	6.87
Nb	1.38	2.85
P	1.47	3.58
S	2.25	2.78
Si	34.2	56.5

จากตารางที่ 4.2 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีในกากของเหลวเขียวก่อนการกำจัด ที่สภาวะเหมาะสมคิดเป็นแมกนีเซียมประมาณร้อยละ 55.0 ซิลิกอนร้อยละ 34.2 แมงกานีสร้อยละ 4.45 และอื่นๆ ซึ่งเมื่อผ่านการกำจัดที่สภาวะเหมาะสมแล้วนั้น องค์ประกอบทางเคมีในกากของเหลวเขียวมีการเปลี่ยนแปลงพบปริมาณซิลิกอน โครเมียม แมงกานีส เหล็ก ฟอสฟอรัส และทองแดง เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 56.5 22.5 6.87 3.66 3.58 และ 1.28 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าแมกนีเซียมสามารถละลายลงมาอยู่ในน้ำเสียได้ ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมในกากของเหลวเขียวลดลงอยู่ที่ร้อยละ 1.32 โดยองค์ประกอบของตัวอย่างกากของเหลวเขียวที่ใช้ในงานวิจัย มีความแตกต่างจาก

การทดลองที่เคยได้มีผู้ศึกษามาก่อนหน้านี้ซึ่งมีองค์ประกอบหลักในกากของเหลวคือ แคลเซียม และ โซเดียม ( Poykio และคณะ, 2006) เนื่องจากจากเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์แตกต่างกัน โดยการ วิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่อง ICP – AES นั้นไม่สามารถวิเคราะห์หาซิลิกอนได้ นอกจากนี้ยัง พบว่าปริมาณโซเดียมที่พบมีค่าน้อยกว่าที่เคยมีการศึกษามาก เนื่องจากโรงงานที่ใช้สำหรับเก็บตัวอย่าง กากของเหลวเขียว ในการศึกษามีระบบกรองแบบสูญญากาศ สามารถนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับไปใช้ในกระบวนการผลิตต่าง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่โรงงานที่เคยมีการศึกษา และ ใช้อ้างอิงไม่มีระบบดังกล่าว

#### 4.2.4 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม

จากผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียมก่อนและหลัง การศึกษาหาสภาวะเหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม 100 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชเท่ากับ 8.58 และปริมาณกากของเหลวเขียว 1.201 กรัม ด้วย เครื่อง Inductive Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP - AES) ดังแสดงในตาราง ที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม

ธาตุองค์ประกอบ	น้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม (mg/l)	
	ก่อนการเติม Dregs	หลังการเติม Dregs
Ca	169	33
Cr	1388	1182
Cu	14.1	<0.02
Mg	23.5	188

จากตารางที่ 4.3 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม ก่อนการ ดูดซับที่สภาวะเหมาะสมมีความเข้มข้นของโครเมียมเท่ากับ 1388 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของ แคลเซียมเท่ากับ 169 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของแมกนีเซียมเท่ากับ 23.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ความเข้มข้นทองแดงเท่ากับ 14.1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยหลังจากผ่านการดูดซับที่สภาวะเหมาะสมแล้ว พบว่าความเข้มข้นของโครเมียม แคลเซียม และทองแดงลดลง 206 136 และ 14.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

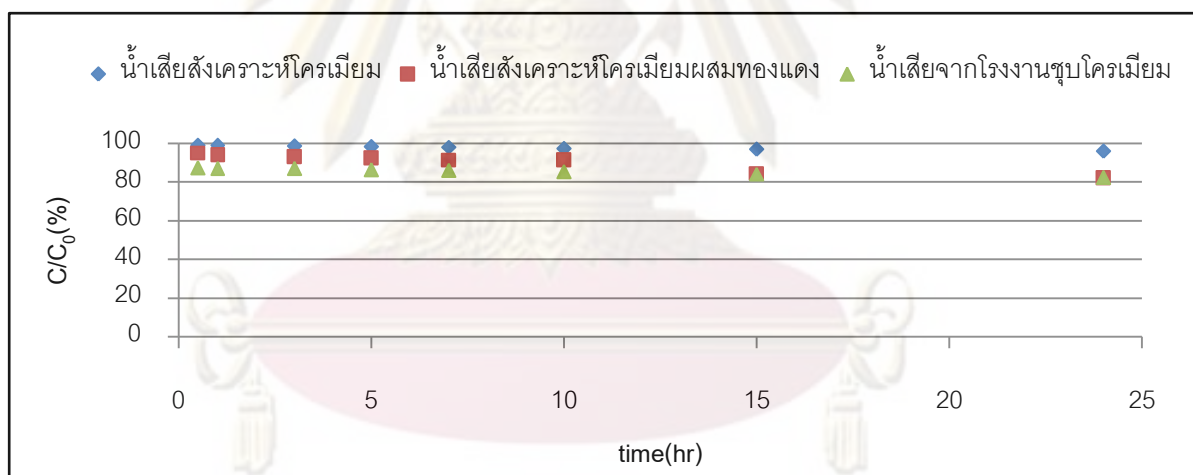


ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคิดเป็นร้อยละการกำจัดโลหะหนักจะพบว่าสามารถกำจัดโครเมียมได้เท่ากับร้อยละ 14.84 และสามารถกำจัดทองแดงโดยการตกตะกอนได้ทั้งหมด

#### 4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม

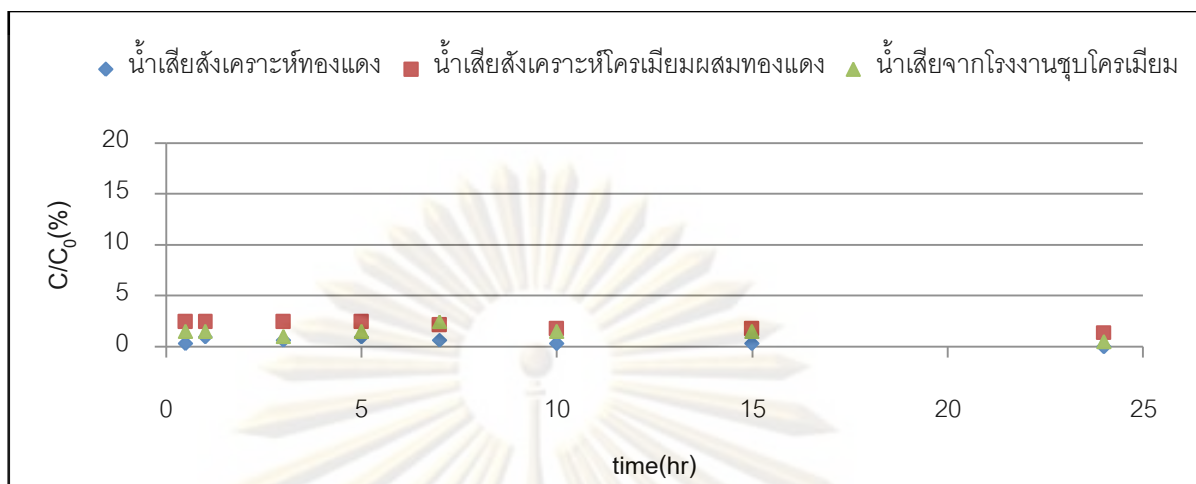
##### 4.3.1 การศึกษาหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก

จากการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการกำจัดโครเมียม และทองแดง โดยนำน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร และ กากของเหลวเขียว 0.5 กรัม ใส่ลงขวดรูปชมพู่ เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาเวลา 30 นาที 1 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง 5 ชั่วโมง 7 ชั่วโมง 10 ชั่วโมง 15 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้วทำการเก็บตัวอย่างที่ได้มารอง วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำ ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น ( $C_0$ ) กับระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง) ในน้ำเสียชนิดต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นทองแดงเริ่มต้น ( $C_0$ ) กับระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง) ในน้ำเสียชนิดต่างๆ

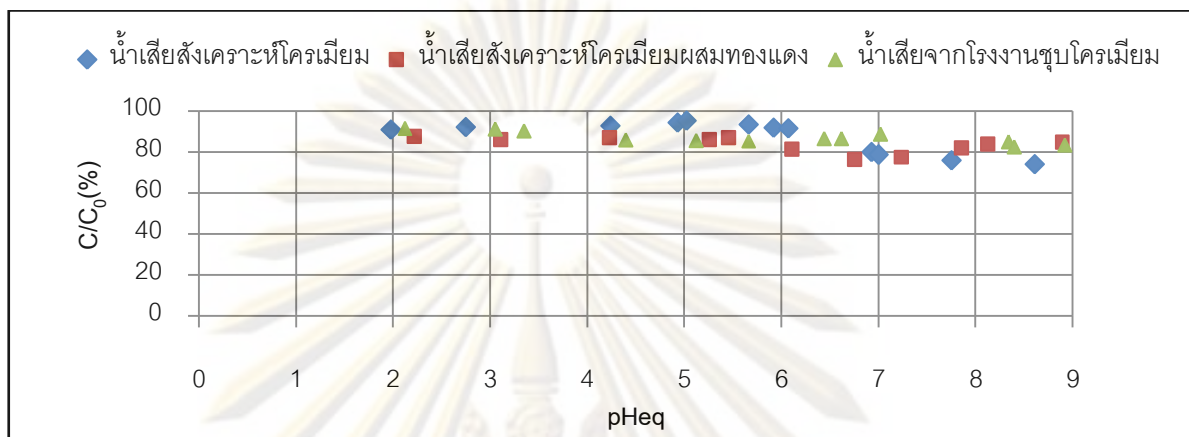
จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากันจะมีอัตราส่วนความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือต่อความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้นแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสีย โดยน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียมจะมีอัตราส่วนความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือต่อความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้นน้อยที่สุด รองลงมาคือน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของทองแดงที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆกัน จะมีอัตราส่วนความเข้มข้นทองแดงที่เหลือต่อความเข้มข้นทองแดงเริ่มต้นไม่แตกต่างกันอยู่ที่ร้อยละ 1-2

จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของโครเมียม และทองแดง มีค่าลดลงตามระยะเวลาที่สัมผัสจนมีระดับค่อนข้างคงที่ โดยความเข้มข้นจะลดลงมากที่สุด ณ ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนัก แต่ในทางปฏิบัตินั้นควรใช้ระยะเวลาที่ 1 ชั่วโมง เนื่องจากความเข้มข้นส่วนใหญ่ได้ลดลงแล้ว การใช้ระยะเวลาที่น้อยกว่าจะทำให้ขนาดของถังกวนผสมลดลง ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

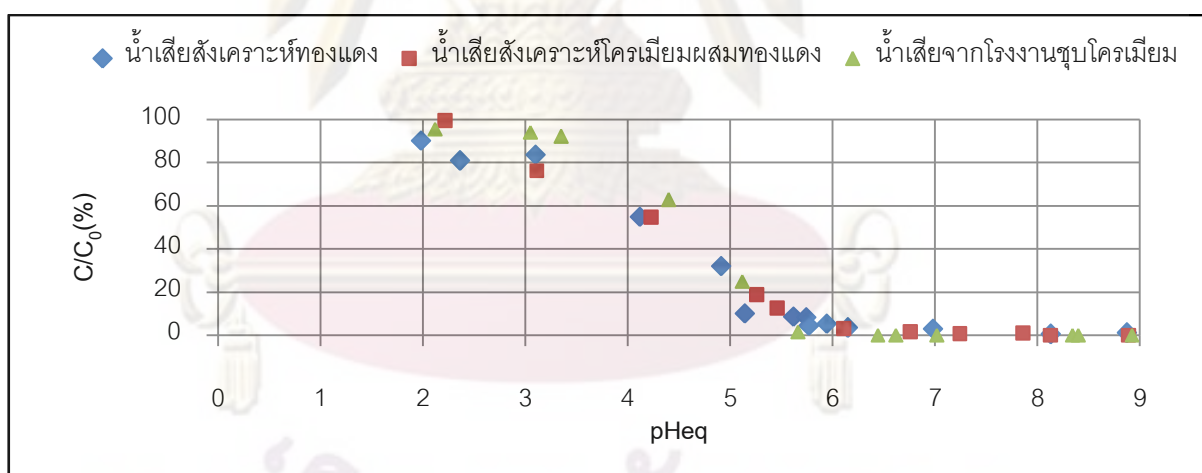
#### 4.3.2 การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก

จากการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการกำจัดโครเมียม และทองแดง โดยนำน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร และกากของเหลวเขียว 0.5 กรัม ใส่ลงขวดรูปชมพู่ หลังจากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ปรับค่าและควบคุมค่าพีเอชในแต่ละขวดให้เป็น 2 3 4 5 6 7 8 9 ตลอดการทดลอง

ตามลำดับ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างที่ได้มากรอง วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำ ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น ( $C_0$ ) กับค่าพีเอช ในน้ำเสียชนิดต่างๆ

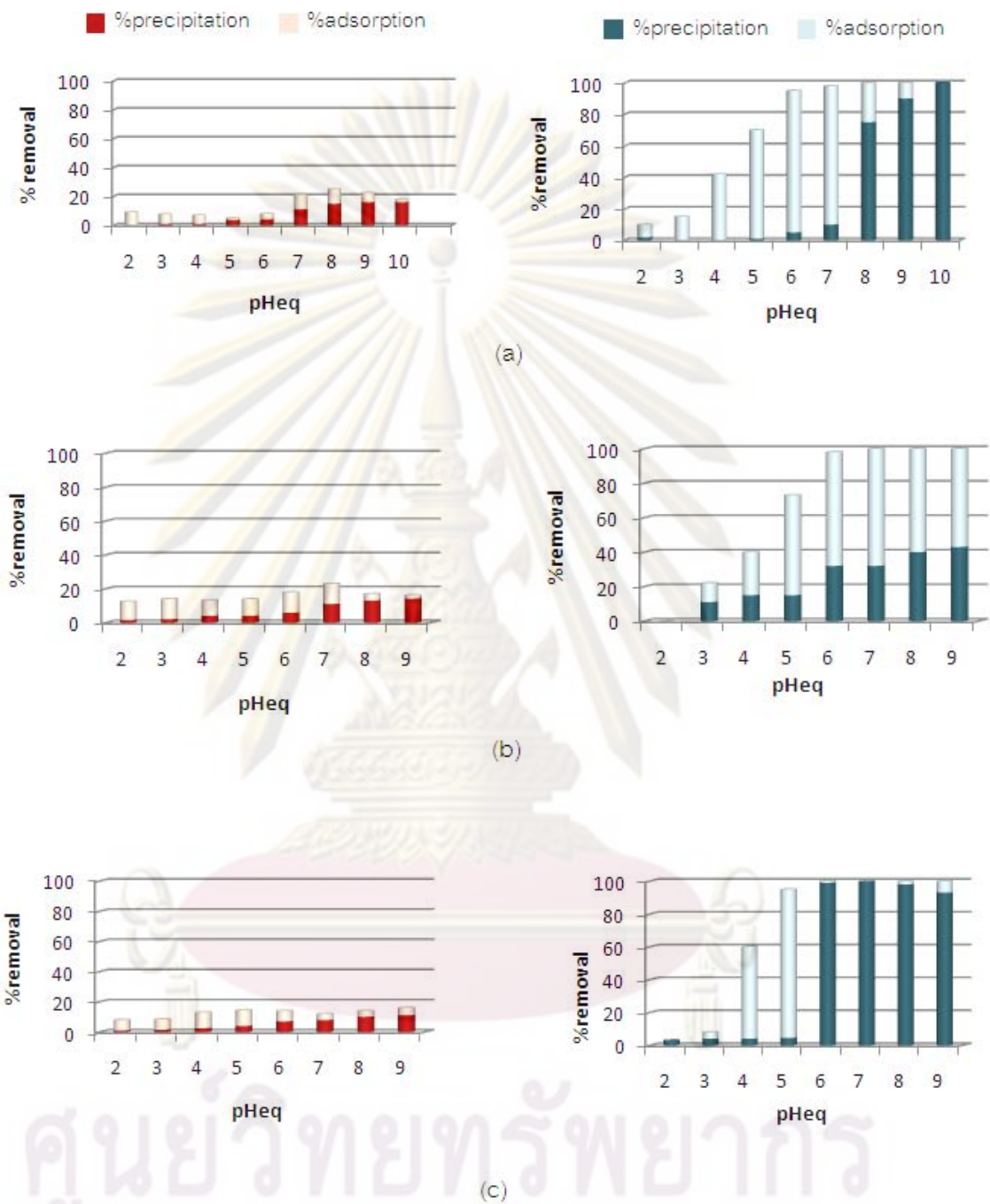


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นทองแดงเริ่มต้น ( $C_0$ ) กับค่าพีเอช ในน้ำเสียชนิดต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกำจัดโครเมียม

การกำจัดทองแดง



รูปที่ 4.8 ร้อยละการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย (a)น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม และทองแดง (b)น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง (c)น้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม หลังผ่านกระบวนการกำจัดด้วยกากของเหลวเขียวที่ค่าพีเอชต่างกัน เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละการกำจัดไอออนโครเมียม (รูปซ้าย) และทองแดง (รูปขวา) ตามลำดับ

จากผลการทดลองหาประจุบนพื้นผิวของกากของเหลวเขียว ซึ่งมีค่า pH<sub>ZPC</sub> เท่ากับ 9.6 แสดงว่าที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 9.6 กากของเหลวเขียวจะแสดงประจุเป็นบวก ทำให้มีความน่าจะเป็นในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 9.6 แต่จากรูปที่ 4.8 พบว่าการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียทั้งสามชนิดเกิดกระบวนการร่วมระหว่างการตกตะกอนกับการดูดซับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากลไกการดูดซับโดยแรงทางประจุเกิดขึ้นได้น้อยมาก เนื่องจากจากโลหะหนักส่วนหนึ่งเกิดการดูดซับขึ้นภายในรูพรุนของกากของเหลวเขียวทำให้ขนาด และปริมาตรรูพรุนหลังการกำจัดโลหะหนักลดลง โดยในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดงจะสามารถกำจัดโครเมียมได้ดีในช่วงพีเอชเท่ากับ 7-8 และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียมจะสามารถกำจัดโครเมียมได้ดีในช่วงพีเอชเท่ากับ 8-9 และจากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าพีเอชระหว่าง 2-9 สามารถลดความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียลงได้ไม่เกินร้อยละ 30 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Akar และคณะ (2007) พบว่าการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมจะเกิดขึ้นได้ดีที่ค่าพีเอชเท่ากับ 1 ดังนั้นจึงมีความไม่เหมาะสมในการนำกากของเหลวเขียวมาใช้ในการดูดซับเฮกซะวาเลนทีโครเมียมโดยตรง

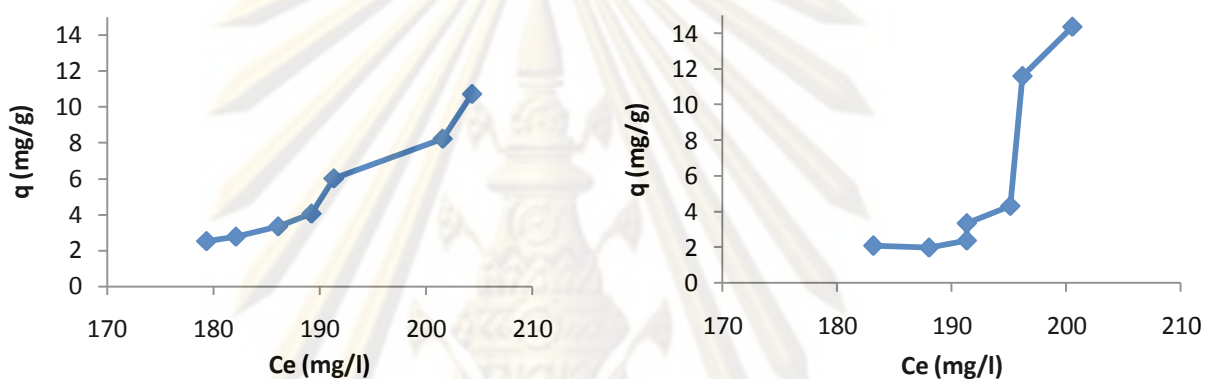
สำหรับผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับทองแดงจากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียมีค่าลดลง และเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 7 พบว่าอัตราส่วนความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือต่อความเข้มข้นของทองแดงเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0 โดยในส่วนของ การตกตะกอนสามารถหาได้จากการปรับพีเอชในน้ำเสียที่ค่าพีเอชต่างๆ แล้วคำนวณหาปริมาณที่ตกตะกอนจากการนำค่าความเข้มข้นเริ่มต้นลบค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในน้ำเสียที่ค่าพีเอชต่างๆ จากรูปที่ 4.8 แสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงพบว่าเมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 5 ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงจะเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 และสามารถกำจัดได้ทั้งหมดเมื่อค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 7 โดยพบว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียมเกิดกระบวนการตกตะกอนเป็นส่วนใหญ่ ส่วนในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง จะเกิดกระบวนการดูดซับประมาณร้อยละ 60 ของการกำจัดทองแดงทั้งหมดในน้ำเสีย

ดังนั้นค่าพีเอชของน้ำเสียที่เหมาะสม สำหรับทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักคือค่าพีเอชในช่วง 7-9 โดยปริมาณกากของเหลวเขียว 1.2 กรัม จะทำให้น้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม 100 มิลลิลิตร มีค่าพีเอชเท่ากับ 8.58

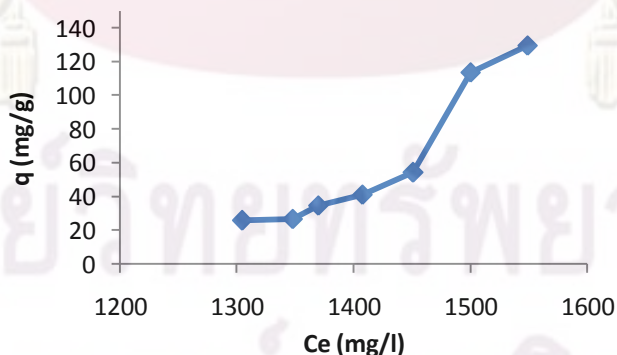
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4 การทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

จากการศึกษาผลของปริมาณกากของเหลวเขียวต่อประสิทธิภาพในการกำจัด โดยนำน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร และกากของเหลวเขียว 0 0.05 0.1 0.3 0.5 0.7 1.0 และ 1.2 กรัม ตามลำดับ ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ หลังจากนั้นนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที แล้วปรับค่าพีเอชแต่ละขวดให้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8-9 เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างที่ได้มากรอง วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำ ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโครเมียมต่อปริมาณกากของเหลวเขียว (q) กับความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (Ce) ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (ซ้าย) และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง (ขวา)



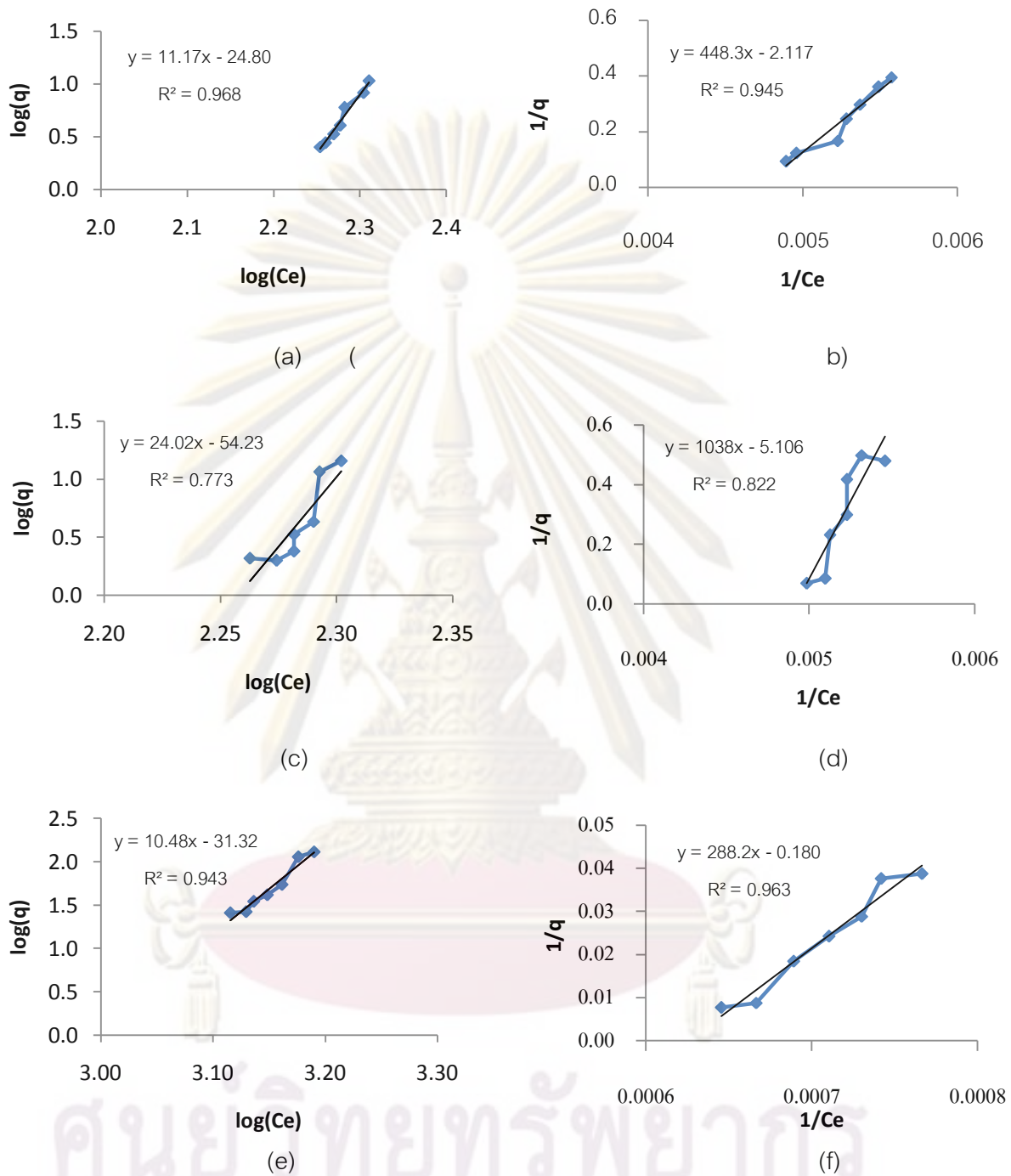
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโครเมียมต่อปริมาณกากของเหลวเขียว (q) กับความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (Ce) ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโครเมียมที่เหลื่อ (Ce) กับปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) ในน้ำเสียชนิดต่างๆ เมื่อใช้กากของเหลวเขียวปริมาณ 0.05 0.1 0.3 0.5 0.7 1.0 และ 1.2 จากรูปที่ 4.9 พบว่าไอโซเทอมของการดูดซับนั้นแปรผันตรงกับความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสีย คือเมื่อความเข้มข้นที่ ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดงเพิ่มขึ้น ปริมาณของโครเมียมต่อปริมาณกากของเหลวเขียวมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในลักษณะเดียวกับน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียมซึ่งมีค่าความเข้มข้นของโครเมียมสูง แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าไอโซเทอมของการดูดซับยังคงแปรผันตรงกับความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีแนวโน้มที่จะเข้าใกล้ค่าคงที่ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อเพิ่มความเข้มข้นในน้ำเสีย

ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลื่อ (Ce) มีค่าเป็นศูนย์ คือสามารถกำจัดทองแดงได้ทั้งหมดที่ค่าพีเอชมากกว่า 7 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุส่วนใหญ่มาจากการตกตะกอนของทองแดงที่ค่าพีเอชสูงๆ ดังนั้นทำให้ไม่สามารถคำนวณหาปริมาณของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) ในน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียมได้

ตารางที่ 4.4 สมการเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดริช และแลงเมียร์ (การดูดซับโครเมียม)

ตัวอย่างน้ำเสีย	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดริช		ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์	
	$\log(q) = \left(\frac{1}{n}\right) (\log C_e) + (\log K)$	$R^2$	$q = \frac{1}{C_e} \left( \frac{1}{Kq_m} \right) + \left( \frac{1}{q_m} \right)$	$R^2$
น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม	$y = 11.17x - 24.8$	0.97	$y = 448.3x - 2.117$	0.95
น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง	$y = 24.02x - 54.23$	0.77	$y = 1038x - 5.106$	0.82
น้ำเสียโรงงานชุบโครเมียม	$y = 10.48x - 31.32$	0.94	$y = 288.2x - 0.18$	0.96



รูปที่ 4.11 ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียม (a)แบบฟรุนดริช สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (b)แบบแลงเมียร์สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (c)แบบฟรุนดริช สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมและทองแดง (d)แบบแลงเมียร์ สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมและทองแดง (e)แบบฟรุนดริช สำหรับน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม (f)แบบแลงเมียร์ สำหรับน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม



จากตารางที่ 4.4 ได้แสดงค่า Correlation coefficient ( $R^2$ ) ของไอโซเทอมการดูดซับแบบ ฟรุนดริช และไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ สำหรับการดูดซับโครเมียมในตัวอย่งน้ำเสีย พบว่า ค่า  $R^2$  ในการดูดซับโครเมียมของไอโซเทอมทั้งสองแบบ มีค่าเข้าใกล้หนึ่งมาก แสดงว่าการดูดซับ สามารถเกิดได้ทั้งสองลักษณะ คือทางกายภาพและทางเคมี โดยเมื่อพิจารณาสมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริชพบว่าค่า  $1/n$  มีค่าสูงในทุกตัวอย่งน้ำเสีย แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับ ได้ดีเมื่อใช้กากของเหลวเขียวปริมาณมาก และจะเกิดการดูดซับได้น้อยเมื่อใช้ในปริมาณที่ต่ำ แต่ในการหาไอโซเทอมสำหรับการดูดซับทองแดงนั้น พบว่าเมื่อควบคุมค่าพีเอชในการทดลองเท่ากับ 8 จะทำให้สามารถกำจัดทองแดงได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของไอโซเทอมในการดูดซับทองแดงได้ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อค่าพีเอชในน้ำเสียมีค่ามากกว่า 7 การกำจัดทองแดงจะเกิดจากกระบวนการตกตะกอนขึ้นเป็นส่วนใหญ่

#### 4.5 การศึกษาความสามารถในการคายออกของโครเมียม และทองแดงจากกากของเหลวเขียว

เมื่อทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของโครเมียม และทองแดงหลังการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม 100 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชเท่ากับ 8.58 และปริมาณกากของเหลวเขียว 1.201 กรัม ใช้วิธีการตามประกาศกระทรวง อุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมได้ กำหนดให้ใช้วิธี Waste Extraction Test (WET) [5] โดยใช้น้ำสกัดเป็นกรดซิดริก พบว่าความเข้มข้นของโครเมียม และทองแดง ในน้ำสกัดเท่ากับ 44.83 และ 2.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อนำไป เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548) ลงวันที่ 25 มกราคม 2549 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว, ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 11ง ซึ่ง กำหนดให้ลักษณะวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่จัดเป็นของเสียอันตรายคือวัสดุที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า 2 หรือสูงกว่า 12.5 หรือมีค่าความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมมากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือมีค่าความเข้มข้นของทองแดงมากกว่า 25 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 4.5

เนื่องจากกากของเหลวเขียวที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย จากโรงงานชุบโครเมียม ตามสภาวะที่กล่าวไว้ก่อนหน้านั้น จะมีปริมาณเฮกซะวาเลนทีโครเมียมมากกว่าค่ามาตรฐาน ดังนั้นจึง จัดเป็นวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548) ซึ่งต้องมีการกำจัดที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การฝังกลบอย่างปลอดภัย เป็นต้น

ตารางที่ 4.5 ค่ามาตรฐานดัชนีคุณภาพน้ำสกัดที่ได้จากวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่จัดเป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548) ลงวันที่ 25 มกราคม 2549 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว, ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 11ง

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง(pH value)	ต่ำกว่า 2, สูงกว่า 12.5
2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์(Hexavalent Chromium)	มากกว่า 5.0 มก./ล.
3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์(Trivalent Chromium)	มากกว่า 5.0 มก./ล.
4. ทองแดง(Cu)	มากกว่า 25.0 มก./ล.
5. นิกเกิล(Ni)	มากกว่า 20.0 มก./ล.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการใช้กากของเหลวเขียว สำหรับกำจัดโครเมียม และทองแดงจากน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ประเภท (น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง) และน้ำเสียจาก โรงงานชุบโครเมียม โดยทำการทดลองแบบกวนผสมสมบูรณ์ในระบบเบตซ์ที่อุณหภูมิห้อง

5.1.1 ก่อนการทดลองกากของเหลวเขียวมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีดำ ซึ่งมีค่า pH<sub>Zpc</sub> เท่ากับ 9.6 และสามารถหาค่าประกอบในกากของเหลวเขียวด้วยเครื่อง XRF พบปริมาณของแมกนีเซียมร้อยละ 55.0 ซิลิกอนร้อยละ 34.2 และแมงกานีสร้อยละ 4.45 ซึ่งแตกต่างจากการทดลองที่เคยได้มีผู้ศึกษามาก่อนหน้านี้ เนื่องมาจากเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์แตกต่างกัน โดยการวิเคราะห์หาค่าประกอบด้วยเครื่อง ICP – AES นั้นไม่สามารถวิเคราะห์หาซิลิกอนได้ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณโซเดียมที่พบมีค่าน้อยกว่าที่เคยมีการศึกษามาก เนื่องจากโรงงานที่ใช้สำหรับเก็บตัวอย่างกากของเหลวเขียว ในการศึกษา มีระบบกรองแบบสุญญากาศ สามารถนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับไปใช้ในกระบวนการผลิตต่าง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่โรงงานที่เคยมีการศึกษา และใช้อ่างอิงไม่มีระบบดังกล่าว

5.1.2 การดูดซับโครเมียม และทองแดงในน้ำเสียโดยกากของเหลวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเข้าสู่สมดุลภายใน 24 ชั่วโมง แต่ในทางปฏิบัตินั้นควรใช้ระยะเวลาที่ 1 ชั่วโมง เนื่องจากความเข้มข้นส่วนใหญ่ได้ลดลงแล้ว การใช้ระยะเวลาที่น้อยกว่าจะทำให้ขนาดของถังกวนผสมลดลง ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

5.1.3 กระบวนการกำจัดโครเมียม และทองแดงในน้ำเสีย เป็นกระบวนการร่วมระหว่างการดูดซับโดยตัวกลางกากของเหลวเขียว และการตกตะกอนทางเคมี พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม และทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม และน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง ที่จะสามารถกำจัดโครเมียมได้ดี ได้แก่พีเอชในช่วง 7-8 และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียมในช่วงพีเอช 8-9 ในส่วนของการกำจัดทองแดง พบว่าสามารถกำจัดทองแดงได้ทั้งหมดเมื่อค่าพีเอชในสารละลายมีค่าตั้งแต่ 7 ขึ้นไป ดังนั้นค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโครเมียม และทองแดง คือค่าพีเอชในช่วง 7-9 เมื่อใช้ปริมาณกากของเหลวเขียว 1.2 กรัม จะทำให้น้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม 100 มิลลิลิตร มีค่าพีเอชเท่ากับ 8.58

5.1.4 การดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยตัวกลางกากของเหลวเขียวเกิดขึ้นได้น้อย และสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการของทั้งแลงเมียร์ และ ฟรุนดริช การกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมควรทำโดยการปรับค่าพีเอชในน้ำเสียให้เท่ากับ 1 เพื่อเปลี่ยนรูปเฮกซะวาเลนต์โครเมียมให้อยู่ในรูปไตรวาเลนต์โครเมียม ก่อนนำมาเติมกากของเหลวเขียว เพื่อตกตะกอนโครเมียมที่ค่าพีเอชเท่ากับ 9 ซึ่งจะสามารถทำให้เหลือความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียเท่ากับ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (Eckenfelder ,2000) ในส่วนของการกำจัดทองแดงเกิดจากกระบวนการตกตะกอนเป็นหลัก โดยมีการดูดซับเป็นกลไกเสริม ซึ่งการใช้กากของเหลวเขียวสามารถลดปริมาณทองแดงให้เหลือน้อยกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ในช่วงพีเอชเท่ากับ 8 ถึง 11

5.1.5 การศึกษาการคายออกด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) [5] พบว่ากากของเหลวเขียวที่ผ่านขั้นตอนการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียมแล้ว จะมีปริมาณเฮกซะวาเลนต์โครเมียมมากกว่าค่ามาตรฐาน ดังนั้นจึงจัดเป็นวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตราย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548) ซึ่งต้องมีการกำจัดที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การฝังกลบอย่างปลอดภัย เป็นต้น

5.1.6 ลักษณะพื้นผิวของกากของเหลวเขี้ยวก่อนการดูดซับที่สภาวะเหมาะสม มีปริมาตรรูพรุน และพื้นที่ผิวมากกว่าหลังผ่านการดูดซับที่สภาวะเหมาะสมอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับผล การศึกษาพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของกากของเหลวเขี้ยว ด้วยเครื่อง BET surface area and pore ดังนั้นอาจมีความเป็นไปได้ว่ามีกระบวนการดูดซับโลหะหนักส่วนหนึ่งเกิดขึ้นที่พื้นผิวของ กากของเหลวเขี้ยว

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆโดยกากของเหลวเขี้ยว เพื่อการนำไป ประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะโลหะหนักที่สามารถตกตะกอนได้ดีในช่วงพีเอชสูงๆ เช่น นิกเกิล แคดเมียม และตะกั่ว นอกจากนี้ยังพบว่าหากทำการรีดิวซ์เฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นไตร วาเลนต์โครเมียม จะสามารถกำจัดไตรวาเลนต์โครเมียมโดยวิธีการตกตะกอนได้ที่พีเอชเท่ากับ 9 โดย เมื่อทำการเติมปูนขาว 3.8 กรัม ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังซึ่งมีการปนเปื้อนของไตรวาเลนต์ โครเมียม 1 ลิตร จะสามารถกำจัดไตรวาเลนต์โครเมียมได้ทั้งหมดถ้าพีเอชหลังการตกตะกอนเท่ากับ 11.78 (พฤกษ์ ตัญจรัญรัตน์, 2546) ดังนั้นหากใช้กากของเหลวเขี้ยวแทนการเติมปูนขาวเพื่อช่วย ตกตะกอนจะสามารถลดมูลค่าการใช้งบประมาณได้ประมาณ 6.08 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร (ราคา ปูนขาวเท่ากับ 1.6 บาทต่อกิโลกรัม)

5.2.2 จากการทดลองพบว่า กากของเหลวเขี้ยวสามารถนำไปใช้ในการกำจัดเฮกซะวาเลนต์ โครเมียมได้ดีต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่เหมาะสำหรับการนำไปกำจัดโครเมียมโดยตรง แต่ อาจจะนำไปใช้ในระบบบำบัดขั้นต้นเพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมี และควรศึกษาผลจากการใช้กาก ของเหลวเขี้ยวที่มีต่อระบบบำบัดขั้นต่อไป

5.2.3 น้ำเสียที่ได้หลังจากการดูดซับพบว่ามีปริมาณแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณ

แมกนีเซียมที่เป็นส่วนประกอบหลักในกากของเหลวเขียว ก่อนการเติมกากของเหลวเขียวลงในน้ำเสียนั้นได้ละลายออกมาในน้ำเสีย ดังนั้นอาจสามารถนำน้ำเสียดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้อีก หากมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง

5.2.4 ปริมาณกากของเหลวเขียวที่เหลือจากการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่ามีปริมาณลดลงประมาณร้อยละ 50 เนื่องจากแมกนีเซียมที่เป็นองค์ประกอบในกากของเหลวเขียวนั้นได้ละลายลงไปในน้ำเสีย ดังนั้นจึงเป็นผลดีในการลดพื้นที่ที่ใช้ในการฝังกลบ มูลค่าที่ใช้ในการฝังกลบ และน่าจะเป็นผลดีถ้าทำการศึกษาในเชิงเศรษฐศาสตร์ควบคู่ไปด้วย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กรรณิการ์ รักกิจ. 2547. การจัดไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียโดยการดูดซับบนถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กาญจนา คุณาทัย, วีราภรณ์ คารมณ และ ภัทธา เฟงธรรมกীরติ. 2548. การผลิตซีโอไลต์จากเถ้าลอยและการใช้ประโยชน์เพื่อการบำบัดน้ำเสีย. โครงการโครงงานอุตสาหกรรมภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จินตนา สายวรรณ. 2541. การศึกษากำจัดสารโครเมียมออกจากน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียมโดยใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชฎาภรณ์ บุญแท้. 2545. การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไชยยันต์ ไชยยะ. 2542. การพัฒนาออกแบบเม็ดดูดซับเซรามิกส์ผลิตจากกากกาแฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ณัฐ ดิลกเกียรติ. 2546. ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินดำผสมกะลามะพร้าวหรือกะลาปาล์มเพื่อการดูดซับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ธนพร เหล่าไพโรจน์. 2548. การกำจัดไซยาไนด์ และโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน:กรณีของคอลัมน์แบบเรซินรวม. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พฤษัช ตัญจรัยรัตน์. 2546. การตกตะกอนด้วยปูนขาวจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. 2539. ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี  
และสิ่งแวดล้อมเรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภท  
โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (พ.ศ.2539). กรุงเทพมหานคร:  
กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
- วุฒิชัย ทิวพงษ์. 2545. การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไบ  
เหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต . ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริรัตน์ ศรีเกษเพชร. 2543. การดูดซับโลหะหนักด้วยดินเหนียวและดินเหนียวปรับปรุง. วิทยานิพนธ์  
ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อดิศักดิ์ ปิยสถิตย์. 2543. การกำจัดโครเมียม (ประจุ+6) ในน้ำเสียโดยใช้ตัวกลางทรายเคลือบ  
แมกนีไทต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อริชัย นพแก้ว . 2539. การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บ  
กัก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2548. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่  
ใช้แล้ว (พ.ศ. 2548). กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.

### ภาษาอังกฤษ

Akar, T.S., Yetimoglu, Y. and Gedikbey, T. 2008. Removal of chromium (VI) ions from aqueous solutions by using Turkish montmorillonite clay: effect of activation and modification. Desalination. 24(2009): 97-108.

APHA, AWWA, and WEF. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21<sup>st</sup> ed. Missouri: Byrd PrePress.

Bin Yu a, Y., Zhang, Alka Shukla, Shyam, S. and Kenneth, L. D. 2000. The removal of heavy metal from aqueous solutions by sawdust adsorption-removal of copper. Journal of Hazardous Materials. B80: 33-42.

Bowen, H.J.M. 1979. Environmental Chemistry of the Elements. London : Academic Press

Eary, L.E. and Rai, D. 1988. Chromate Removal from Aqueous Wastes by Reduction with Ferrous. Environmental Science & Technology. 22(8): 972-977.

Eckenfelder, W.W., Jr. 2000. Industrial Water Pollution Control. 3<sup>rd</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill.

Fenske, B.J., Empie, H.J. and Heedick, G. 2000. Reduction of Odorous Emissions from Kraft Pulp Mills Using Green Liquor Dregs. Master's Thesis, Institute of Paper Science and Technology.

- Gemellia, E. 2001. Evaluation of paper industry wastes in construction material applications. Materials Research. 4: 297-304.
- Isa, M.H., Ibrahim, N. and Aziz, H.A. 2007. Removal of Chromium (VI) from Aqueous Solution Using Treated Oil Palm Fibre. Journal of Hazardous Materials. 152: 662-668.
- Kadirvelu, K., Thamaraiselvi, K. and Namasivayam, C. 2001. Removal of heavy metals from industrial wastewater by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural solid waste. Bioresource Technology. 76(1): 63-65.
- Morissel, P. 1954. Chromium Plating. England: Robert Draper.
- Nelson, P.O. 1995. Adsorption and Fate of Metals in Wastewater and Soils. A Short Course Presented for Chula Unisearch, Chulalongkorn University.
- Nemerow, N.L. 1978. Industry Water Pollution, origin, characteristics and Treatment. USA: Addison-Wesley Publishing.
- Nurmesniemi, H. and Poykio, R. 2007. A case study of waste management at the Northern Finnish pulp and paper mill complex of Stora Enso Veitsiluoto Mills. Waste Management. 27: 1939-1948.
- Poykio, R., Nurmesniemi, H., Kuokkanen, T. and Peramaki, P. 2006. Green liquor dregs as an alternative neutralizing agent at a pulp mill. Environ Chem Lett. 4: 37-40.
- Punyapalukul, P. 2004. Effect of Organic Grafting Modification of Hexagonal Mesoporous Silicate on Haloacetic Acid Removal. Environmental Engineering Research. 41: 247-256
- Quagliano, J.V. 1963. Chemistry. Prentice-Hall.

Rai, D. and Zachara, J.M. 1986. Geochemical Behavior of Chromium Species. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.

Robinson, D. Phosphate Buffer Calculator [Online]. Available from: <http://home.fuse.net/clymer/buffers/phos2.html>[2009,September 19]

Rothpfeffer, C. 2007. From wood to waste and waste to wood-aspects on Recycling Waste Products from the Pulp Mill to the Forest Soil. Doctor's Thesis, Department of Forest Soils, Swedish University of Agricultural Science.

Sciban, M., Klasnja, M. and Skrbic, B. 2006. Modified hardwood sawdust as adsorbent of heavy metal ions from Water. Wood Sci Technol. 40: 217-227.

Thailand Institute of Scientific and Technological Research, TISTR. 1982. Recovery of Heavy Metals from Electroplating Wastes. Report Submitted to UNEP.

U.S. Environmental Protection Agency. 1986. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods," SW-846. 3<sup>rd</sup> ed. United States: United States Environmental Protection Agency.

Zambrano, M., Freer, J., Baeza, J., Villarroel, M. and Vidal, G. 2007. Using a second-order polynomial model to determine the optimum dregs/bark ratio for industrial-biosolid composting: the initial conditioning stage. Waste Management & Research. 25:

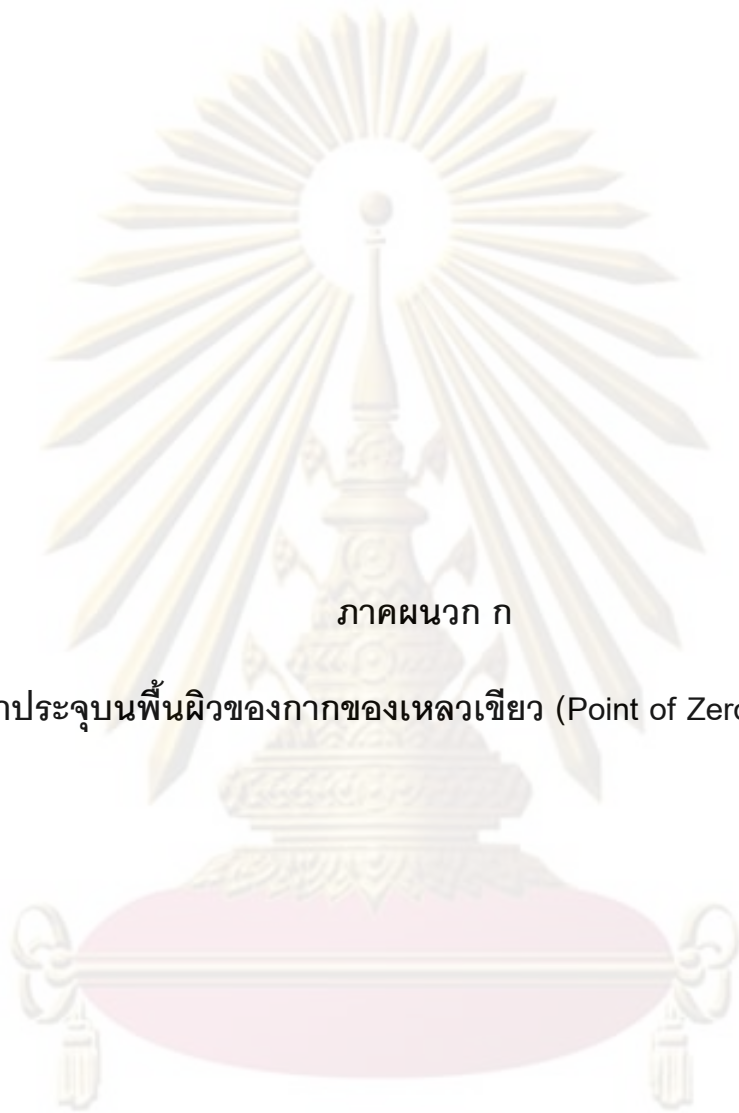
319-326

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

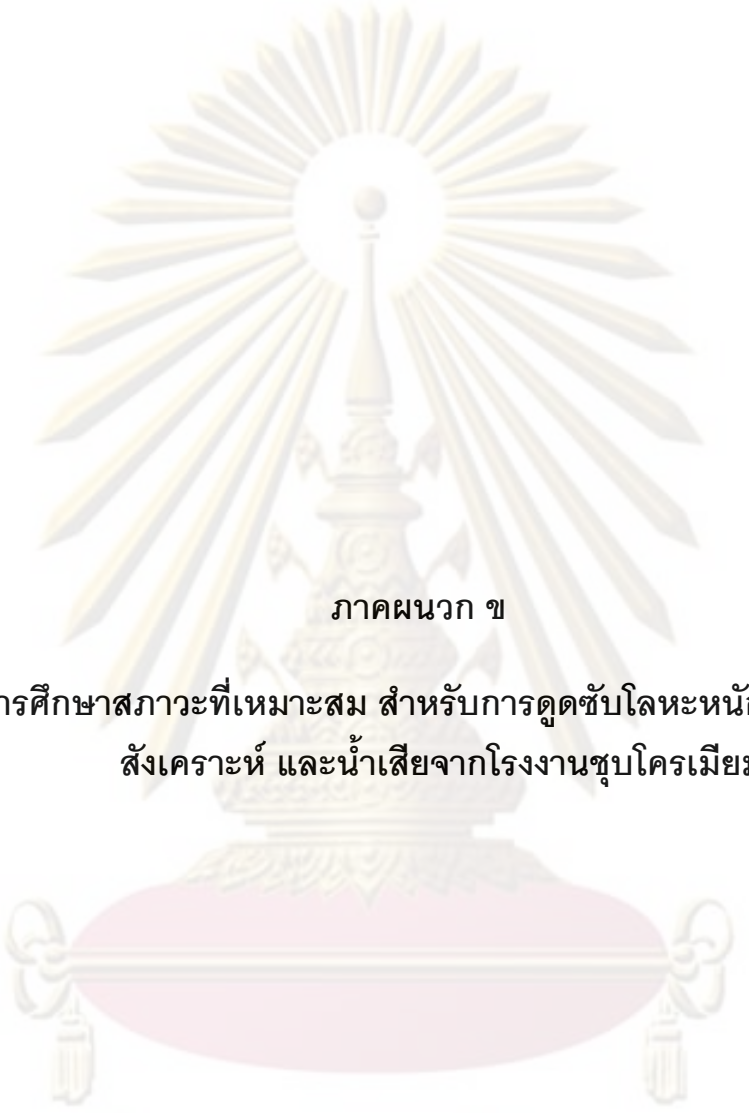
การศึกษาประจุบนพื้นผิวของกากของเหลวเขียว (Point of Zero Charge ( $\text{pH}_{\text{pzc}}$ ))

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ผลการศึกษาประจุบนพื้นผิวของกากของเหลวเขียว

HCl (N)	NaOH (N)	pH	pOH	[H <sup>+</sup> ]	[OH <sup>-</sup> ]	dregs(g)	c/g
0.0002	0	9.13	4.87	7.41E-10	1.35E-05	0.4154	49.595
0.0001	0	9.32	4.68	4.79E-10	2.09E-05	0.4065	28.699
0.00005	0	9.46	4.54	3.47E-10	2.88E-05	0.4032	18.869
0.00001	0	9.51	4.49	3.09E-10	3.24E-05	0.4106	9.955
0	0	9.56	4.44	2.75E-10	3.63E-05	0.4023	8.709
0	0.00001	9.57	4.43	2.69E-10	3.72E-05	0.4098	6.394
0	0.00005	9.62	4.38	2.40E-10	4.17E-05	0.4055	-1.978
0	0.0001	9.77	4.23	1.70E-10	5.89E-05	0.4123	-9.623
0	0.0002	9.88	4.12	1.32E-10	7.59E-05	0.4012	-29.860

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข  
การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการดูดซับโลหะหนัก ในน้ำเสีย  
สังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์  
โครเมียม

time(hr)	abs	Cr, mg/l	C/C <sub>0</sub>	C/C <sub>0</sub> (%)
0.5	0.651	200.926	0.991	99.087
1.0	0.651	200.926	0.991	99.087
3.0	0.650	200.617	0.989	98.934
5.0	0.647	199.691	0.985	98.478
7.0	0.646	199.383	0.983	98.326
10.0	0.640	197.531	0.974	97.412
15.0	0.638	196.914	0.971	97.108
24.0	0.631	194.753	0.960	96.043
before	0.657	202.778	1.000	100.000

ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์  
โครเมียมผสมทองแดง

time(hr)	abs	Cr, mg/l	C/C <sub>0</sub>	C/C <sub>0</sub> (%)
0.5	0.368	200.000	0.953	95.337
1.0	0.364	197.826	0.943	94.300
3.0	0.360	195.652	0.933	93.264
5.0	0.357	194.022	0.925	92.487
7.0	0.354	192.391	0.917	91.710
10.0	0.353	191.848	0.915	91.451
15.0	0.327	177.717	0.847	84.715
24.0	0.318	172.826	0.824	82.383
before	0.386	209.783	1.000	100.000



ตารางที่ ข.3 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียจาก  
โรงงานชุบโครเมียม

time(hr)	abs	Cr, mg/l	C/C <sub>0</sub>	C/C <sub>0</sub> (%)
0.5	0.247	1342.391	0.876	87.589
1.0	0.246	1336.957	0.872	87.234
3.0	0.246	1336.957	0.872	87.234
5.0	0.244	1326.087	0.865	86.525
7.0	0.243	1320.652	0.862	86.170
10.0	0.241	1309.783	0.855	85.461
15.0	0.238	1293.478	0.844	84.397
24.0	0.233	1266.304	0.826	82.624
before	0.282	1532.609	1.000	100.000

ตารางที่ ข.4 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์  
ทองแดง

time(hr)	abs	Cu, mg/l	C/C <sub>0</sub>	C/C <sub>0</sub> (%)
0.5	0.001	0.067	0.003	0.322
1.0	0.003	0.200	0.010	0.965
3.0	0.002	0.133	0.006	0.643
5.0	0.003	0.200	0.010	0.965
7.0	0.002	0.133	0.006	0.643
10.0	0.001	0.067	0.003	0.322
15.0	0.001	0.067	0.003	0.322
24.0	0.000	0.000	0.000	0.000
before	0.311	20.733	1.000	100.002

ตารางที่ ข.5 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์  
โครเมียมผสมทองแดง

time(hr)	abs	Cu, mg/l	C/C <sub>0</sub>	C/C <sub>0</sub> (%)
0.5	0.007	0.452	0.025	2.456
1.0	0.007	0.452	0.025	2.456
3.0	0.007	0.452	0.025	2.456
5.0	0.007	0.452	0.025	2.456
7.0	0.006	0.387	0.021	2.105
10.0	0.005	0.323	0.018	1.754
15.0	0.005	0.323	0.018	1.754
24.0	0.004	0.258	0.014	1.404
before	0.285	18.387	1.000	100.001

ตารางที่ ข.6 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับทองแดงในน้ำเสียจาก  
โรงงานชุบโครเมียม

time(hr)	abs	Cu, mg/l	C/C <sub>0</sub>	C/C <sub>0</sub> (%)
0.5	0.005	0.194	0.015	1.485
1.0	0.003	0.194	0.015	1.485
3.0	0.003	0.129	0.010	0.990
5.0	0.003	0.194	0.015	1.485
7.0	0.003	0.323	0.025	2.475
10.0	0.003	0.194	0.015	1.485
15.0	0.002	0.194	0.015	1.485
24.0	0.001	0.065	0.005	0.495
before	0.202	13.032	1.000	100.002

ตารางที่ ข.7 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม โครเมียมผสมทองแดง และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม

น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม				น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง				น้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม			
pHeq	Cr, mg/l	%remove	C/C0(%)	pHeq	Cr, mg/l	%remove	C/C0(%)	pHeq	Cr, mg/l	%remove	C/C0(%)
1.98	187.963	8.969	91.031	2.22	183.152	12.468	87.532	2.12	1402.174	8.511	91.489
2.75	190.432	7.773	92.227	3.11	179.596	14.167	85.833	3.05	1396.739	8.865	91.135
4.24	191.975	7.025	92.975	4.23	181.776	13.125	86.875	3.35	1385.870	9.574	90.426
4.93	195.062	5.531	94.469	5.26	179.891	14.026	85.974	4.4	1315.217	14.184	85.816
5.02	196.914	4.634	95.366	5.46	181.522	13.247	86.753	5.12	1311.769	14.409	85.591
5.66	192.901	6.577	93.423	6.11	170.109	18.701	81.299	5.66	1309.783	14.539	85.461
5.92	189.815	8.072	91.928	6.76	159.783	23.636	76.364	6.44	1326.087	13.475	86.525
6.07	189.198	8.371	91.629	7.24	162.500	22.338	77.662	6.62	1326.087	13.475	86.525
6.93	165.123	20.030	79.970	7.86	171.196	18.182	81.818	7.02	1358.696	11.348	88.652
7.00	162.346	21.375	78.625	8.13	175.000	16.364	83.636	8.34	1304.348	14.894	85.106
7.75	156.790	24.066	75.934	9.10	175.332	16.205	83.795	9.10	1266.304	17.376	82.624
8.61	152.778	26.009	73.991								
9.47	168.210	18.535	81.465								
9.90	168.519	18.386	81.614								
non adj	206.482	100.000	0.000	non adj	209.239	100.000	0.000	non adj	1532.609	100.000	0.000

ตารางที่ ข.8 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง โครเมียมผสมทองแดง และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม


น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง				น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง				น้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม			
pHeq	Cu, mg/l	%remove	C/C <sub>0</sub> (%)	pHeq	Cu, mg/l	%remove	C/C <sub>0</sub> (%)	pHeq	Cu, mg/l	%remove	C/C <sub>0</sub> (%)
1.98	18.000	10.000	90.000	2.22	18.645	0.000	100.000	2.12	12.580	3.470	96.530
2.36	16.148	19.259	80.741	3.11	14.320	23.725	76.275	3.05	12.258	5.941	94.059
3.1	16.741	16.296	83.704	4.23	10.230	45.510	54.490	3.35	12.000	7.921	92.079
4.12	10.963	45.185	54.815	5.26	3.484	81.443	18.557	4.4	8.194	37.129	62.871
4.91	6.370	68.148	31.852	5.46	2.323	87.629	12.371	5.12	3.250	75.062	24.938
5.14	2.000	90.000	10.000	6.11	0.516	97.251	2.749	5.66	0.194	98.515	1.485
5.62	1.704	91.481	8.519	6.76	0.258	98.625	1.375	6.44	0.000	100.000	0.000
5.74	1.630	91.852	8.148	7.24	0.065	99.656	0.344	6.62	0.000	100.000	0.000
5.94	1.037	94.815	5.185	7.86	0.129	99.313	0.687	7.02	0.000	100.000	0.000
6.15	0.667	96.667	3.333	8.13	0.000	100.000	0.000	8.34	0.000	100.000	0.000
6.98	0.593	97.037	2.963	9.10	0.000	100.000	0.000	9.10	0.000	100.000	0.000
8.13	0.074	99.630	0.370								
8.87	0.192	99.038	0.962								
9.47	0.192	99.038	0.962								
non adj	20.002	100.000	0.000	non adj	18.774	100.000	0.000	non adj	13.032	100.000	0.000

ตารางที่ ข.9 ผลการตกตะกอนโครเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม โครเมียมผสมทองแดง และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม ที่ค่าพีเอชต่างๆ

น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม			น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง			น้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม		
pHeq	Cr, mg /l	%precipitation	pHeq	Cr, mg /l	%precipitation	pHeq	Cr, mg /l	%precipitation
2.00	199.938	0.031	2.19	206.304	1.403	2	1519.57	0.851
3.10	196.500	1.750	3.08	205.345	1.861	3.05	1508.70	1.560
4.18	197.125	1.438	4.01	200.870	4.000	4.02	1496.54	2.353
5.22	192.438	3.781	5.12	200.870	4.000	5.03	1472.57	3.918
6.34	192.125	3.938	5.97	197.609	5.558	6.05	1423.91	7.092
7.19	17.388	13.063	6.35	192.717	7.896	7.11	1413.04	7.801
7.90	173.063	13.469	7.05	185.652	11.273	8.19	1375.00	10.284
8.34	159.438	20.281	8.14	181.848	13.091	9.18	1358.70	11.348
9.41	173.063	13.469	9.1	179.130	14.390			
9.90	168.960	15.520						
non adj	200.001	0.000	non adj	209.239	0.000	non adj	1532.61	0.000

ตารางที่ ข.10 ผลการตกตะกอนทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง โครเมียมผสมทองแดง และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม ที่ค่าพีเอชต่างๆ

น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง			น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง			น้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม		
pHeq	Cu, mg/l	%precipitation	pHeq	Cu, mg/l	%precipitation	pHeq	Cu, mg/l	%precipitation
1.97	21.867	2.987	2.19	18.765	0.048	2	12.194	6.434
2.99	22.533	0.030	3.08	16.452	12.370	3.05	12.387	4.949
4.00	22.467	0.325	4.01	15.935	15.119	4.02	12.452	4.454
4.97	22.200	1.508	5.12	16.000	14.776	5.03	12.387	4.949
5.93	21.333	5.353	5.97	12.387	34.020	6.05	0.065	99.505
6.79	21.000	6.832	6.35	12.452	33.676	7.11	0.000	100.000
7.08	20.200	10.382	7.05	12.516	33.333	8.19	0.516	96.041
7.43	7.400	67.169	8.14	11.290	39.862	9.18	0.903	93.069
8.15	5.154	77.133	9.1	10.567	43.715			
9.32	1.733	92.310						
non adj	22.540	0.000	non adj	18.774	0.000	non adj	13.032	0.000



ภาคผนวก ค  
การศึกษาไอซีเทอม การทดลองหาไอซีเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ  
ในการดูดซับโลหะหนัก

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาปริมาณกากของเหลวเขียว ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียมใน  
น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม

Dregs, g	pH	abs	mg/l	C/C <sub>0</sub>	C/C <sub>0</sub> (%)
0.0518	8.33	0.662	204.321	0.974	97.353
0.1012	8.66	0.653	201.553	0.960	96.034
0.3079	8.34	0.620	191.358	0.912	91.176
0.5089	8.54	0.613	189.198	0.901	90.147
0.7064	8.32	0.603	186.111	0.887	88.676
1.0012	8.21	0.590	182.099	0.868	86.765
1.205	8.52	0.581	179.383	0.855	85.471
before	8.32	0.680	209.877	1.000	100.000

ตารางที่ ค.2 ผลการศึกษาปริมาณกากของเหลวเขียว ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียมใน  
น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง

Dregs, g	pH	abs	mg/l	C/C <sub>0</sub>	C/C <sub>0</sub> (%)
0.0529	8.33	0.369	200.543	0.963	96.345
0.1030	8.35	0.361	196.196	0.943	94.256
0.3018	8.72	0.359	195.109	0.937	93.734
0.5036	8.87	0.352	191.304	0.919	91.906
0.7031	8.69	0.352	191.304	0.919	91.906
1.0032	8.56	0.346	188.043	0.903	90.340
1.2010	8.54	0.337	183.152	0.880	87.990
before	8.45	0.383	208.152	1.000	100.000



ตารางที่ ค.3 ผลการศึกษาปริมาณกากของเหลวเขียว ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียมใน  
น้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม

Dregs, g	pH	abs	mg/l	C/C <sub>0</sub>	C/C <sub>0</sub> (%)
0.0503	8.34	0.285	1548.913	0.960	95.960
0.1004	8.53	0.276	1500.000	0.929	92.929
0.3004	8.12	0.267	1451.087	0.899	89.899
0.5002	8.23	0.259	1407.609	0.872	87.205
0.7053	8.31	0.252	1369.565	0.848	84.849
1.0016	8.41	0.248	1347.826	0.835	83.502
1.2011	8.58	0.240	1304.348	0.808	80.808
before	8.34	0.297	1614.130	1.000	100.000

ตารางที่ ค.4 ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และฟรุนดริชในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสีย  
สังเคราะห์โครเมียม

Dregs, g	Ce (mg/l)	C (mg)	C <sub>0</sub> -C (mg)	q (mg/g)	log(q)	log(Ce)	1/q	1/Ce
0.0518	204.321	20.432	0.556	10.732	1.031	2.310	0.0932	0.0049
0.1012	201.553	20.155	0.833	8.228	0.915	2.304	0.1215	0.0050
0.3079	191.358	19.136	1.852	6.016	0.779	2.282	0.1662	0.0052
0.5089	189.198	18.920	2.068	4.064	0.609	2.277	0.2461	0.0053
0.7064	186.111	18.611	2.377	3.365	0.527	2.270	0.2972	0.0054
1.0012	182.099	18.210	2.778	2.775	0.443	2.260	0.3604	0.0055
1.2050	179.383	17.938	3.050	2.531	0.403	2.254	0.3951	0.0056
before	209.877	20.988	0.000	0.000	0.000	2.322	0.0000	0.0048

ตารางที่ ค.5 ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และฟรุนดริชในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสีย

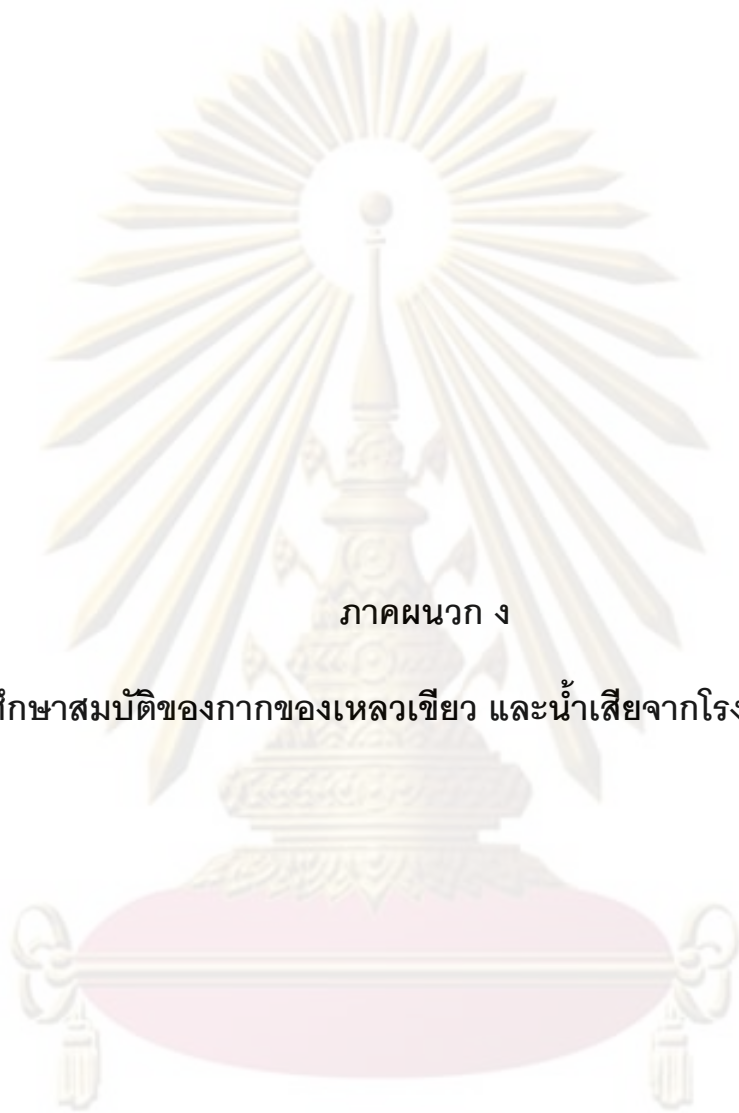
สังเคราะห์โครเมียมผสมทองแดง

Dregs, g	Ce (mg/l)	C (mg)	C <sub>0</sub> -C (mg)	q (mg/g)	log(q)	log(Ce)	1/q	1/Ce
0.0529	200.543	20.054	0.761	14.379	1.158	2.302	0.0695	0.0050
0.1030	196.196	19.620	1.195	11.606	1.065	2.293	0.0862	0.0051
0.3018	195.109	19.511	1.304	4.321	0.636	2.290	0.2314	0.0051
0.5036	191.304	19.130	1.685	3.345	0.524	2.282	0.2989	0.0052
0.7031	191.304	19.130	1.685	2.396	0.379	2.282	0.4174	0.0052
1.0032	188.043	18.804	2.011	2.004	0.302	2.274	0.4989	0.0053
1.2010	183.152	18.315	2.500	2.081	0.318	2.263	0.4804	0.0055
before	208.152	20.815	0.000	0.000	20.815	2.263	0.0000	0.0048

ตารางที่ ค.6 ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และฟรุนดริชในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียจาก

โรงงานชุบโครเมียม

Dregs, g	Ce (mg/l)	C (mg)	C <sub>0</sub> -C (mg)	q (mg/g)	log(q)	log(Ce)	1/q	1/Ce
0.0503	1548.91	154.891	6.522	129.656	2.113	3.190	0.0077	0.0006
0.1004	1500.00	150.000	11.413	113.675	2.056	3.176	0.0088	0.0007
0.3004	1451.09	145.109	16.304	54.275	1.735	3.162	0.0184	0.0007
0.5002	1407.61	140.761	20.652	41.288	1.616	3.148	0.0242	0.0007
0.7053	1369.57	136.957	24.456	34.675	1.540	3.137	0.0288	0.0007
1.0016	1347.83	134.783	26.630	26.588	1.425	3.130	0.0376	0.0007
1.2011	1304.35	130.435	30.978	25.792	1.411	3.115	0.0388	0.0008
before	1614.13	161.413	0.000	0.000	0.000	3.208	0.0000	0.0006



ภาคผนวก ง

การศึกษาสมบัติของกากของเหลวเขียว และน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียม

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Date: 06/04/2009

Page 1

Quantachrome Corporation  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	Dreg A				
Description	RN 120/52				
Comments					
Sample Weight	0.1244 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	250.0 °C	Operator	JC
Cross-Sec Area	16.2 Å <sup>2</sup> /molecule	Outgas Time	23.0 hrs	Analysis Time	325.3 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	2	End of Run	06/04/2009 12
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	AS960401.RAW
Station #	1	Bath Temp.	77.35		

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	1.394E+02	m <sup>2</sup> /g
Single Point BET.....	1.368E+02	m <sup>2</sup> /g
Langmuir Surface Area.....	2.185E+02	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.225E+02	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.162E+02	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.260E+02	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.220E+02	m <sup>2</sup> /g
t-Method External Surface Area.....	1.227E+02	m <sup>2</sup> /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	1.668E+01	m <sup>2</sup> /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.919E+02	m <sup>2</sup> /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 2053.3 Å at P/Po = 0.99057.....	3.099E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.706E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	3.673E-01	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	3.706E-01	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	3.673E-01	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.623E-01	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	3.610E-01	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	8.360E-03	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	6.821E-02	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	5.829E-02	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	5.952E-02	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Diameter.....	8.895E+01	Å
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	1.521E+01	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	3.620E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	1.521E+01	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	3.620E+01	Å
DR Method Micro Pore Width .....	1.028E+02	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.780E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.438E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.704E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : ON  
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å  
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm  
Last Po Acquired 766.77 mm Hg  
MaxiDose : CN  
Initial Fill : OFF  
DoseWizard : OFF

รูปที่ ง.1

พื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุน ของกากของเหลวเขี้ยวก่อนการดูดซับ

Date: 06/09/2009		Page 1	
Quantachrome Corporation Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report Autosorb for Windows® Version 1.19			
Sample ID	Dreg B		
Description	RN 120/52		
Comments			
Sample Weight	0.1393 g	Outgas Temp	250.0 °C
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	21.0 hrs
Cross-Sec Area	16.2 Å <sup>2</sup> /molecule	P/Po Toler	2
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35
Station #	1	Operator	JC
		Analysis Time	292.9 min
		End of Run	06/04/2009 18
		File Name	AS960402.RAW
AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY			
SURFACE AREA DATA			
Multipoint BET.....	7.611E+01	m <sup>2</sup> /g	
Single Point BET.....	7.435E+01	m <sup>2</sup> /g	
Langmuir Surface Area.....	1.183E+02	m <sup>2</sup> /g	
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	7.048E+01	m <sup>2</sup> /g	
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	6.804E+01	m <sup>2</sup> /g	
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	7.244E+01	m <sup>2</sup> /g	
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	7.161E+01	m <sup>2</sup> /g	
t-Method External Surface Area.....	7.167E+01	m <sup>2</sup> /g	
t-Method Micro Pore Surface Area.....	4.435E+00	m <sup>2</sup> /g	
DR Method Micro Pore Area.....	1.025E+02	m <sup>2</sup> /g	
PORE VOLUME DATA			
Total Pore Volume for pores with Diameter less than 1542.8 Å at P/Po = 0.98739.....	1.588E-01	cc/g	
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.995E-01	cc/g	
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.980E-01	cc/g	
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.995E-01	cc/g	
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.980E-01	cc/g	
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.953E-01	cc/g	
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.950E-01	cc/g	
t-Method Micro Pore Volume.....	1.863E-03	cc/g	
DR Method Micro Pore Volume.....	3.644E-02	cc/g	
HK Method Cumulative Pore Volume.....	3.089E-02	cc/g	
SF Method Cumulative Pore Volume.....	3.161E-02	cc/g	
PORE SIZE DATA			
Average Pore Diameter.....	8.345E+01	Å	
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	1.948E+01	Å	
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	3.601E+01	Å	
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	1.948E+01	Å	
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	3.601E+01	Å	
DR Method Micro Pore Width.....	1.051E+02	Å	
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.840E+01	Å	
HK Method Pore Width (Mode).....	1.433E+01	Å	
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.685E+01	Å	
DATA REDUCTION PARAMETERS			
Thermal Transpiration : ON			
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å			
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm			
Last Po Acquired 765.23 mm Hg			
MaxiDose : ON			
Initial Fill : OFF			
DoseWizard : OFF			

รูปที่ ง.2

พื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุน ของกากของเหลวเขียวหลังการดูดซับ

SPECTRO X-LabPro 238

---

— Preset Sample Data

Sample Name	Dreg A2/1	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	30/6/09	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys. 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	06/30/2009
Sample Status	A.A.X.X.X	Date of Evaluation	06/30/2009

---

— Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
12	Mg	Magnesium	6.2 %	1.6 %
13	Al	Aluminum	< 0.053 %	(0.0) %
14	Si	Silicon	3.435 %	0.074 %
15	P	Phosphorus	~ 0.137 %	0.039 %
16	S	Sulfur	~ 0.2054 %	0.0082 %
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	< 0.030 %	(0.011) %
23	V	Vanadium	< 0.030 %	(0.0) %
24	Cr	Chromium	< 0.020 %	(0.0) %
25	Mn	Manganese	0.4358 %	0.0021 %
26	Fe	Iron	0.1137 %	0.0011 %
27	Co	Cobalt	< 0.020 %	(0.0) %
28	Ni	Nickel	< 0.015 %	(0.0041) %
29	Cu	Copper	< 0.010 %	(0.0023) %
30	Zn	Zinc	0.02624 %	0.00033 %
31	Ga	Gallium	< 0.010 %	(0.0) %
40	Zr	Zirconium	< 0.051 %	(0.022) %
41	Nb	Niobium	0.1390 %	0.0006 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.00097 %	(0.00086) %
46	Pd	Palladium	< 0.020 %	(0.0) %
47	Ag	Silver	< 0.020 %	(0.0) %
48	Cd	Cadmium	< 0.051 %	(0.0) %
49	In	Indium	< 0.030 %	(0.0) %
50	Sn	Tin	< 0.051 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	< 0.051 %	(0.0) %
74	W	Tungsten	< 0.025 %	(0.0) %
78	Pt	Platinum	< 0.020 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.020 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.020 %	(0.0) %

Sum 10.69 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเชื่อมก่อนการดูดซับตรวจวัดครั้งที่ 1

SPECTRO X-LabPro

238

## - Preset Sample Data

Sample Name	Dreg A2/2	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	30/6/09	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	06/30/2009
Sample Status	A A X X X X	Date of Evaluation	06/30/2009

## - Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
12	Mg	Magnesium	4.7 %	1.6 %
13	Al	Aluminum	< 0.054 %	(0.0) %
14	Si	Silicon	3.280 %	0.073 %
15	P	Phosphorus	~ 0.150 %	0.039 %
16	S	Sulfur	~ 0.2334 %	0.0081 %
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	< 0.030 %	(0.010) %
23	V	Vanadium	< 0.030 %	(0.0) %
24	Cr	Chromium	< 0.020 %	(0.0) %
25	Mn	Manganese	0.4357 %	0.0021 %
26	Fe	Iron	0.1124 %	0.0010 %
27	Co	Cobalt	< 0.020 %	(0.0) %
28	Ni	Nickel	< 0.015 %	(0.0043) %
29	Cu	Copper	< 0.010 %	(0.0027) %
30	Zn	Zinc	0.02455 %	0.00032 %
31	Ga	Gallium	< 0.010 %	(0.0) %
40	Zr	Zirconium	< 0.051 %	(0.020) %
41	Nb	Niobium	0.1310 %	0.0006 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.00092 %	(0.00081) %
46	Pd	Palladium	< 0.020 %	(0.0) %
47	Ag	Silver	< 0.020 %	(0.0) %
48	Cd	Cadmium	< 0.051 %	(0.0) %
49	In	Indium	< 0.030 %	(0.0) %
50	Sn	Tin	< 0.051 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	< 0.051 %	(0.0) %
74	W	Tungsten	< 0.025 %	(0.0) %
78	Pt	Platinum	< 0.020 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.020 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.020 %	(0.0) %
Sum			0.034 %	

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ง.4

องค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเขี้ยวก่อนการดูดซับตรวจวัดครั้งที่ 2

SPECTRO X-LabPro 238

---

— Preset Sample Data

Sample Name	Dreg A1/I	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	30/6/09	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	06/30/2009
Sample Status	A.A.X.X.X	Date of Evaluation	06/30/2009

---

— Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
12	Mg	Magnesium	< 0.12 %	(0.0) %
13	Al	Aluminum	< 0.045 %	(0.0) %
14	Si	Silicon	5.390 %	0.086 %
15	P	Phosphorus	0.261 %	0.049 %
16	S	Sulfur	0.3125 %	0.0084 %
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	< 0.030 %	(0.016) %
23	V	Vanadium	< 0.030 %	(0.0) %
24	Cr	Chromium	2.155 %	0.005 %
25	Mn	Manganese	0.6577 %	0.0036 %
26	Fe	Iron	0.3497 %	0.0020 %
27	Co	Cobalt	< 0.020 %	(0.0) %
28	Ni	Nickel	0.03194 %	0.00054 %
29	Cu	Copper	0.1221 %	0.0008 %
30	Zn	Zinc	0.06612 %	0.00059 %
31	Ga	Gallium	< 0.010 %	(0.0) %
40	Zr	Zirconium	< 0.051 %	(0.037) %
41	Nb	Niobium	0.2569 %	0.0010 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	< 0.0016 %	(0.0014) %
46	Pd	Palladium	< 0.020 %	(0.0) %
47	Ag	Silver	< 0.020 %	(0.0) %
48	Cd	Cadmium	< 0.051 %	(0.0) %
49	In	Indium	< 0.030 %	(0.0) %
50	Sn	Tin	< 0.051 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	< 0.051 %	(0.0) %
74	W	Tungsten	< 0.025 %	(0.0) %
78	Pt	Platinum	< 0.020 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.020 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.020 %	(0.0) %

รวม 9.615 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.5 องค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเขียวหลังการดูดซับตรวจวัดครั้งที่ 1



SPECTRO X-LabPro

238

## Preset Sample Data

Sample Name	Dreg A1/3	Dilution Material	
Description		Sample Mass (g)	8.0000
Method	3069fpo	Dilution Mass (g)	0.0000
Job Number	30/6/09	Dilution Factor	1.0000
Sample Type	Alloys, 32 mm	Sample rotation	No
Sample State	Legierung	Date of Receipt	06/30/2009
Sample Status	AAXXX	Date of Evaluation	06/30/2009

## Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Z	Symbol	Element	Concentration	Abs. Error
12	Mg	Magnesium	< 0.12 %	(0.0) %
13	Al	Aluminum	< 0.045 %	(0.0) %
14	Si	Silicon	4.930 %	0.085 %
15	P	Phosphorus	~ 0.384 %	0.050 %
16	S	Sulfur	< 0.20 %	(0.080) %
20	Ca	Calcium	< 0.030 %	(0.0) %
22	Ti	Titanium	< 0.030 %	(0.015) %
23	V	Vanadium	< 0.030 %	(0.0) %
24	Cr	Chromium	1.963 %	0.005 %
25	Mn	Manganese	0.5974 %	0.0034 %
26	Fe	Iron	0.3184 %	0.0019 %
27	Co	Cobalt	< 0.020 %	(0.0) %
28	Ni	Nickel	0.02858 %	0.00050 %
29	Cu	Copper	0.1116 %	0.0008 %
30	Zn	Zinc	0.05860 %	0.00055 %
31	Ga	Gallium	< 0.010 %	(0.0) %
40	Zr	Zirconium	< 0.051 %	(0.037) %
41	Nb	Niobium	0.2613 %	0.0010 %
42	Mo	Molybdenum	< 0.30 %	(0.0) %
45	Rh	Rhodium	0.00244 %	0.00047 %
46	Pd	Palladium	< 0.020 %	(0.0046) %
47	Ag	Silver	< 0.020 %	(0.0) %
48	Cd	Cadmium	< 0.051 %	(0.0) %
49	In	Indium	< 0.030 %	(0.0) %
50	Sn	Tin	< 0.051 %	(0.0) %
51	Sb	Antimony	< 0.051 %	(0.0) %
74	W	Tungsten	< 0.025 %	(0.0) %
78	Pt	Platinum	< 0.020 %	(0.0) %
79	Au	Gold	< 0.020 %	(0.0) %
82	Pb	Lead	< 0.020 %	(0.0) %

sum 8.656 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ๖.6

องค์ประกอบทางเคมีของกากของเหลวเขียวหลังการดูดซับตรวจวัดครั้งที่ 2

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิษุตา ไชยะโชค เกิดเมื่อวันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน เมื่อปีการศึกษา 2545 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2549 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย