การดูดซับไอออนสังกะสีจากน้ำเสียด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียมเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

น.ส.นราทิพย์ รักษ์เดช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF ZINC ION FROM WASTE WATER BY USED SHOT BLAST AND ALUMINIUM DROSS FROM AUTO PARTS MANUFACTURING

Miss Naratip Rakdech

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science
Inter-Department of Environmental Science
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับไอออนสังกะสีจากน้ำเสียด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียมเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์
โดย	น.ส.นราทิพย์ รักษ์เดช
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันฑพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.นุตา ศุภคต

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนูญ หนูจักร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันฑพงษ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.นุตา ศุภคต)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณบรรจบ อภิรติกุล)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นราทิพย์ รักษ์เดช : การดูดซับไอออนสังกะสีจากน้ำเสียด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียมเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์. (ADSORPTION OF ZINC ION FROM WASTE WATER BY USED SHOT BLAST AND ALUMINIUM DROSS FROM AUTO PARTS MANUFACTURING) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.วรพจน์ กนกกันฑพงษ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.นุตา ศุภคต

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียโดยใช้ของเสียอุตสาหกรรม 2 ชนิด ได้แก่ ผงเหล็กช๊อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม ทำการทดลองแบบกะ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดหลัก ๆ ได้แก่ การทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชและควบคุมพีเอชของน้ำเสียซึ่งใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสี ได้แก่ เวลา (0-48 ชั่วโมง สำหรับผงเหล็กช็อตบลาสท์ และ 0-8 ชั่วโมง สำหรับตะกรันอลูมิเนียม) ปริมาณวัสดุดูดซับ (0.1-2 กรัม) และพีเอชเริ่มต้น (3-6) ผลการทดลองพบว่า ที่พีเอช 6 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดทุกกรณี โดยผงเหล็กช็อตบลาสท์ 2 กรัม ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 28 และ 40 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพร้อยละ 38.35 และ 90.00 สำหรับการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชและควบคุมพีเอชของน้ำเสีย ตามลำดับ ส่วนตะกรันอลูมิเนียม 2 กรัม ใช้เวลาเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 2 และ 6 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพร้อยละ 95.04 และ 19.74 สำหรับการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชและควบคุมพีเอชของน้ำเสีย ตามลำดับ เมื่อใช้ปริมาณวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 2 กรัม ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นทุกการทดลอง จลนพลศาสตร์การดูดซับของวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิดสอดคล้องกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียมทั้ง 2 การทดลอง ไอโซเทอร์มการดูดซับของการทดลองที่ควบคุมพีเอชสอดคล้องทั้งไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิช โดยผงเหล็กช็อตบลาสท์มีค่าคงที่สมดุลการดูดซับตามไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (q_m) และฟรุนด์ลิช (k_f) เท่ากับ 39.08 และ 2.85 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนตะกรันอลูมิเนียมมีค่า q_m และ k_f เท่ากับ 1.51 และ 0.28 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ นอกจากนั้นได้ศึกษาการบำบัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่าตะกรันอลูมิเนียมสามารถกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะได้ปริมาณ 12.27 ลิตร ที่อัตราการไหลน้ำ 1 มิลลิลิตร/นาที โดยใช้เวลา 8 วัน ก่อนที่ค่าสังกะสีจะเกินมาตรฐาน และมีต้นทุนในการดำเนินงานประมาณ 51.82 บาท/ลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย ซึ่งต่ำกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบเดิม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต	....
ปีการศึกษา	2561	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม	....

5987271320 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE
KEYWORD: Adsorption, Precipitation, Aluminium dross, Shot blast, Kinetic, Isotherm

Naratip Rakdech : ADSORPTION OF ZINC ION FROM WASTE WATER BY USED SHOT BLAST AND ALUMINIUM DROSS FROM AUTO PARTS MANUFACTURING . Advisor: Vorapot Kanokkantapong, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. Nuta Supakata, Ph.D.

The objective of this study was to investigate zinc ion removal using two industrial wastes i.e., used shot blast and aluminum dross. Batch experiment was divided into 2 conditions, non-pH control and pH control of wastewater using 50 mL of synthetic wastewater with a concentration of 400 mg/L. The factors that impact on zinc ion treatment, include time (0-48 hours for used shot blast and 0-8 hours for aluminum dross), adsorbent dose (0.1-2 grams), and initial pH (3-6), were studied. The result found that the highest treatment efficiency was at pH 6 in every condition. Used shot blast of 2 grams reached its equilibrium time at 28 and 40 hours with removal efficiency of 38.35 and 90.00 % for non-pH control and pH control conditions, respectively. Whereas the equilibrium time for 2 grams of aluminum dross was 2 and 6 hours with removal efficiency of 95.04 and 19.74 % for non-pH control and pH control conditions, respectively. Increasing the amount of adsorbent from 0.1 to 2 grams affected to an increase in zinc removal efficiency of all experiments. Kinetic study from both adsorbents related with pseudo-second order equation. Adsorption isotherms of controlled pH experiment were fitted with Langmuir and Freundlich adsorption isotherms at q_m = 39.08 and k_f = 2.85 mg/g for shot blast, and q_m = 1.51 mg/g and k_f = 0.28 mg/g for aluminum dross. Moreover, zinc ion treatment in industrial wastewater was studied as column type and was found that aluminum dross could eliminate zinc from plating industrial wastewater of 12.27 liter at 1 ml/min for 8 days before zinc concentration got over effluent standard. The operating cost of this system was 51.82 baht/m^3 of wastewater which was lower than traditional wastewater treatment systems.

Field of Study:	Environmental Science	Student's Signature ....
Academic Year:	2018	Advisor's Signature ....
		Co-advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันฑพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อแนะนำต่าง ๆ ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งให้แนวคิดต่าง ๆ ในการทำงานและเป็นแบบอย่างที่ดีให้ยึดถือปฏิบัติตามอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อศิษย์ และขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุตา ศุภคต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมสำหรับคำแนะนำต่าง ๆ ทั้งยังคอยเป็นกำลังที่ดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ กรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณบรรจบ อภิรติกุล กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย สำหรับคำปรึกษาและความคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย รวมทั้งตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์และถูกต้องยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการใช้ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทดลอง และขอขอบคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนเพื่อใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการเตรียมตัวอย่าง

ขอขอบคุณโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ นิคมอมตะนคร จังหวัดชลบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างผงเหล็กช็อตบลาสท์ ตะกรันอลูมิเนียม และน้ำเสียจากกระบวนการผลิต เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง ทั้งยังมีส่วนในการสนับสนุนด้านข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัวทุกท่าน สำหรับคำปรึกษาคำแนะนำต่าง ๆ และกำลังใจที่ดีตลอดการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอดจนเสร็จสมบูรณ์

นราทิพย์ รักษ์เดช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

.... ค
บทคัดย่อภาษาไทย.. ค
.... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... ง
กิตติกรรมประกาศ .... จ
สารบัญ.. ฉ
สารบัญรูป .... ฏ
สารบัญตาราง.. ณ
นิยามศัพท์เฉพาะ .... ต
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 สมมติฐานการวิจัย 2
1.4 ขอบเขตการวิจัย 2
1.5 คำจำกัดความ 3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.. 4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.. 5
2.1 ของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรม 5
2.1.1 ความหมาย.. 5
2.1.2 สถานการณ์ของเสียอันตรายในปัจจุบัน.. 5
2.1.3 ปัญหาและผลกระทบจากของเสียอุตสาหกรรม.. 6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.4 การกำจัดของเสียอันตราย 7

2.2 อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ (auto parts manufacturing) 8

2.2.1 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ 8

2.2.2 มลพิษจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ 8

2.2.3 ของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ใช้ในการศึกษา 10

2.3 โลหะหนัก (heavy metal) 12

2.4 สังกะสี (Zn) 12

2.4.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ 12

2.4.2 การนำไปใช้ประโยชน์ 13

2.4.3 การแพร่กระจายของสังกะสีสู่สิ่งแวดล้อม 14

2.4.4 ความเป็นพิษของสังกะสี 14

2.4.5 มาตรฐานและการควบคุมสังกะสีในน้ำทิ้ง 15

2.5 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก 15

2.5.1 การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) 15

2.5.2 การสร้างตะกอนและรวมตะกอน (coagulation and flocculation) 17

2.5.3 การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) 17

2.5.4 การออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction) 17

2.5.5 กระบวนการเมมเบรน (membrane process) 18

2.5.6 การดูดซับ (adsorption) 18

2.5.7 กระบวนการอิเล็กโตรโคเอกูเลชั่น (electrocoagulation) 19

2.6 การดูดซับ (adsorption) 19

2.6.1 กระบวนการดูดซับ (adsorption process) 19

2.6.2 กลไกการดูดซับ (adsorption mechanism) 20

2.6.3 กระบวนการถ่ายโอนมวลในระบบดูดซับ (mass transfer processes) 21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6.4 ประเภทของสารดูดซับ 23

2.6.5 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ 24

2.6.6 สมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) 24

2.6.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetics) 27

2.6.8 ระบบดูดซับแบบคอลัมน์ (column adsorption) 28

2.7 การดูดติดบนพื้นผิวไฮดรัสโลหะออกไซด์ 30

2.7.1 ลักษณะของไฮดรัสโลหะออกไซด์ 30

2.7.2 การดูดติดผิวไอออนบวกด้วยไฮดรัสโลหะออกไซด์ 31

2.7.3 การดูดติดผิวไอออนลบด้วยไฮดรัสโลหะออกไซด์ 31

2.7.4 เหล็กออกไซด์ (iron oxide) 32

2.7.5 อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide) 34

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 36

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เหล็กหรือผงเหล็กช็อตบลาสท์เป็นวัสดุดูดซับ 36

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้อลูมิเนียมหรือตะกรันอลูมิเนียมเป็นวัสดุดูดซับ 40

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 44

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี 45

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ 45

3.1.2 สารเคมี 46

3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย 46

3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ 46

3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ 47

3.2.4 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดูดซับ 48

3.2.5 ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetics) 49

3.2.6 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) 51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.7 ศึกษารูปแบบการนำไปใช้จริงโดยดูดซับไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ ... 53
3.2.8 ศึกษาการดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรม ... 53
3.2.9 เปรียบเทียบต้นทุนในการบำบัดสังกะสีด้วยของเสียจากอุตสาหกรรมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมีแบบเดิม ... 53
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล ... 55
3.3.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย ... 55
3.3.2 แบบจำลองและหลักสถิติที่ใช้ ... 55
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง ... 57
4.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ ... 57
4.1.1 ผงเหล็กช็อตบลาสท์ ... 58
4.1.2 ลักษณะของตะกรันอลูมิเนียม ... 65
4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไอออนสังกะสี ... 72
4.2.1 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสี ... 72
4.2.2 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสี .. 77
4.3 กลไกการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช๊อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม ... 79
4.4 การชะละลายของไอออนโลหะจากผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม ... 84
4.5 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetic) ... 85
4.5.1 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของผงเหล็กช็อตบลาสท์ ... 86
4.5.2 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของตะกรันอลูมิเนียม ... 90
4.6 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ (adsorption isotherm) ... 94
4.6.1 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของผงเหล็กช็อตบลาสท์ ... 95
4.6.2 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของตะกรันอลูมิเนียม ... 97
4.7 ผลการศึกษารูปแบบการนำไปใช้จริงโดยบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียม ... 102

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.7.1 เปรียบเทียบการบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชและไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย 103

4.7.2 ผลการศึกษาบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย 105

4.8 ผลการศึกษาการบำบัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ . 107

4.9 การเปรียบเทียบต้นทุนในการบำบัดสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียมแบบคอลัมน์กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมี 109

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 111

5.1 สรุปผลการวิจัย 111

5.1.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม 111

5.1.2 ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม 111

5.1.3 กลไกการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม 112

5.1.4 การชะละลายของไอออนโลหะจากผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม 112

5.1.5 จลนศาสตร์การดูดซับ 112

5.1.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ 112

5.1.7 รูปแบบการนำไปใช้จริงโดยบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียม . 112

5.1.8 การบำบัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ 113

5.1.9 การเปรียบเทียบต้นทุนในการบำบัดสังกะสีด้วยของเสียจากอุตสาหกรรมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมี 113

5.2 ข้อเสนอแนะ 113

บรรณานุกรม 114

ภาคผนวก ก 120

ภาคผนวก ข 129

ภาคผนวก ค 137

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ง..142

ประวัติผู้เขียน..147

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ปริมาณกากของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรม พ.ศ. 2550-2559 6

รูปที่ 2.2 แผนผังของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ 8

รูปที่ 2.3 ภาพสัญลักษณ์ของวัตถุอันตรายประเภทที่ 4.3 ตามระบบ UN class 11

รูปที่ 2.4 การละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ 16

รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลในกระบวนการดูดซับสาร 23

รูปที่ 2.6 รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับตามของ IUPAC 25

รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟ breakthrough curve (ก) และกลไกการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ (ข) 29

รูปที่ 2.8 แผนภาพเปรียบเทียบรูปแบบการเกิดสารประกอบและการตกตะกอนที่พื้นผิวของเหล็กไฮดรอกไซด์สำหรับการดูดซับไอออนบวก) 33

รูปที่ 2.9 การดูดซับ (adsorption) การดูดซึม (absorption) และการตกตะกอน (precipitation) ของไอออนสังกะสีบนผิวของเหล็กออกไซด์ 34

รูปที่ 3.1 แผนผังสรุปวิธีดำเนินการวิจัย 44

รูปที่ 3.2 วัสดุดูดซับก่อนการคัดขนาด (ก) ผงเหล็กช็อตบลาสท์ และ (ข) ตะกรันอลูมิเนียม 46

รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองจลนศาสตร์การดูดซับ 50

รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองไอโซเทอร์มการดูดซับ 52

รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองแบบคอลัมน์ 54

รูปที่ 4.1 วัสดุดูดซับขนาด 0.2-0.5 ม.ม. (ก) ผงเหล็กช็อตบลาสท์ และ (ข) ตะกรันอลูมิเนียม....... 57

รูปที่ 4.2 ผลการศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงเหล็กช็อตบลาสท์ 58

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายผงเหล็กช็อตบลาสท์ก่อนใช้บำบัดไอออนสังกะสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายต่าง ๆ (ก) 100 เท่า (ข) 250 เท่า (ค) 2,500 เท่า (ง) 10,000 เท่า 59

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายผงเหล็กช็อตบลาสท์หลังใช้บำบัดไอออนสังกะสีจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอช (ก-ง) และการทดลองที่ควบคุมพีเอช (จ-ซ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ (ก,จ) 250 เท่า (ข,ฉ) 1,000 เท่า (ค,ช) 2,500 เท่า (ง,ซ) 10,000 เท่า (จากชุดการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 ปริมาณวัสดุดูดซับ 2 กรัม)..60

รูปที่ 4.5 รูปแบบ XRD ของผงเหล็กช็อตบลาสท์ก่อนใช้บำบัดไอออนสังกะสี 62

รูปที่ 4.6 รูปแบบ XRD ของผงเหล็กช็อตบลาสท์หลังใช้บำบัดไอออนสังกะสีจากการทดลองที่ (ก) ไม่ควบคุมพีเอช (ข) ควบคุมพีเอช 63

รูปที่ 4.7 ค่า Zeta potential ของผงเหล็กช็อตบลาสท์ 64

รูปที่ 4.8 ผลการศึกษาการกระจายตัวขนาดอนุภาคของตะกรันอลูมิเนียม...................................... 65

รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายตะกรันอลูมิเนียมก่อนใช้บำบัดไอออนสังกะสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ (ก) 250 เท่า (ข) 1,000 เท่า (ค) 2,500 เท่า (ง) 10,000 เท่า... 67

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายตะกรันอลูมิเนียมหลังการใช้งานจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอช (ก-ง) และการทดลองที่ควบคุมพีเอช (จ-ซ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย ต่าง ๆ (ก,จ) 250 เท่า (ข,ฉ) 1,000 เท่า (ค,ช) 2,500 เท่า (ง,ซ) 10,000 เท่า (จากชุดการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 ปริมาณวัสดุดูดซับ 2 กรัม).. 68

รูปที่ 4.11 รูปแบบ XRD ของตะกรันอลูมิเนียมก่อนใช้บำบัดไอออนสังกะสี 70

รูปที่ 4.12 รูปแบบ XRD ของตะกรันอลูมิเนียมหลังใช้บำบัดไอออนสังกะสีจากการทดลองที่ (ก) ไม่ควบคุมพีเอช (ข) ควบคุมพีเอช.. 71

รูปที่ 4.13 ค่า Zeta potential ของตะกรันอลูมิเนียม 72

รูปที่ 4.14 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์ (ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 3 และ 6 ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1 และ 2 กรัม) (ก) ไม่ควบคุมพีเอช (ข) ควบคุมพีเอช...74

รูปที่ 4.15 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียม (ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 3 และ 6 ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1 และ 2 กรัม) (ก) ไม่ควบคุมพีเอช (ข) ควบคุมพีเอช 76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์ (ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 4-6 ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1-2 กรัม/50 มล.) (ก) ไม่ควบคุมพีเอช (เวลาที่ใช้ 28 ชั่วโมง) (ข) ควบคุมพีเอช (เวลาที่ใช้ 28 ชั่วโมง)........ 78

รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียม (ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 4-6 ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1-2 กรัม/50 มล.) (ก) ไม่ควบคุมพีเอช (เวลาที่ใช้ 28 ชั่วโมง) (ข) ควบคุมพีเอช (เวลาที่ใช้ 28 ชั่วโมง)........ 80

รูปที่ 4.18 กราฟสมการเส้นตรงของผงเหล็กช็อตบลาสท์จากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียตามสมการ (ก) pseudo-first order และ (ข) pseudo-second order........ 87

รูปที่ 4.19 กราฟสมการเส้นตรงของผงเหล็กช็อตบลาสท์จากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียตามสมการ (ก) pseudo-first order และ (ข) pseudo-second order........ 88

รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ ($q_{t,\mathrm{cal}}$) กับเวลาใด ๆ (t) ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ pseudo-second order เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ($q_{t,\exp}$) ของผงเหล็กช็อตบลาสท์ (ก) การทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย (ข) การทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย........ 89

รูปที่ 4.21 กราฟสมการเส้นตรงของตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียตามสมการ (ก) pseudo-first order และ (ข) pseudo-second order........ 91

รูปที่ 4.22 กราฟสมการเส้นตรงของตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย (ตามสมการ (ก) pseudo-first order และ (ข) pseudo-second order........ 92

รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ ($q_{t,\mathrm{cal}}$) กับเวลาใด ๆ (t) ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ pseudo-second order เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ($q_{t,\exp}$) ของตะกรันอลูมิเนียม (ก) การทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย (ข) การทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย........ 93

รูปที่ 4.24 กราฟสมการเส้นตรงของผงเหล็กช็อตบลาสท์จากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียตามแบบจำลองของ (ก) Langmuir และ (ข) Freundlich........ 96

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.25 กราฟสมการเส้นตรงของตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย ตามแบบจำลองของ (ก) Langmuir และ (ข) Freundlich 98

รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ ($q_{e,\mathrm{cal}}$) กับความเข้มข้นที่คงเหลือในสารละลาย ณ จุดสมดุล (C_e) ที่ได้จากการคำนวณตามแบบจำลองของ Langmuir และ Freundlich เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ($q_{e,\exp}$) ของการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย (ก) ผงเหล็กช็อตบลาสท์ และ (ข) ตะกรันอลูมิเนียม 100

รูปที่ 4.27 ผลการศึกษาการบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชและควบคุมพีเอชของน้ำเสีย (น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 อัตราการไหล 3 มล./นาที และความลึก 30 ซม.) 104

รูปที่ 4.28 ผลของความลึกต่อ breakthougt curve จากการทดลองและการคำนวณตามแบบจำลองของ Thomas (น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 อัตราการไหล 3 มล./นาที และความลึก 10, 20 และ 30 ซม.).. 106

รูปที่ 4.29 กราฟสมการเส้นตรงตามแบบจำลองของ Thomas... 106

รูปที่ 4.30 ผลการศึกษาการบำบัดไอออนสังกะสีจากน้ำเสียจริงแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียม (น้ำเสียความเข้มข้น 144.29 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 อัตราการไหล 1 มล./นาที ความลึกของคอลัมน์ 10 ซม.).. 108

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 กระบวนการที่มีการปลดปล่อยสารเคมีเป้าหมายจากอุตสาหกรรมยานยนต์ ชิ้นส่วนและอะไหล่ยานยนต์ 9
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของสังกะสี 13
ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและเคมี 22
ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัสดุดูดซับที่มีส่วนประกอบของเหล็ก 38
ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัสดุดูดซับที่มีส่วนประกอบของอลูมิเนียม 42
ตารางที่ 3.1 เครื่องมือ/เทคนิคที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ 48
ตารางที่ 3.2 วิธีวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา 55
ตารางที่ 3.3 แบบจำลองและสถิติที่ใช้ในการศึกษา 55
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงเหล็กช็อตบลาสท์..... 58
ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของผงเหล็กช็อตบลาสท์ 61
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กช็อตบลาสท์ด้วยเครื่อง XRF 62
ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาการกระจายตัวขนาดอนุภาคของตะกรันอลูมิเนียม 66
ตารางที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของตะกรันอลูมิเนียม 69
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันอลูมิเนียมด้วยเครื่อง XRF..... 69
ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาการชะละลายของไอออนโลหะจากผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม 84
ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่จลนศาสตร์การดูดซับตามแบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order ของผงเหล็กช็อตบลาสท์จากการคำนวณโดยสมการเส้นตรง 90
ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่จลนศาสตร์การดูดซับตามแบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order ของตะกรันอลูมิเนียมจากการคำนวณโดยสมการเส้นตรง 94
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่า r^2 จากไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิชที่ใช้ผงเหล็กช็อตบลาสท์เป็นวัสดุดูดซับด้วยสถิติ t-test 97

ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับของผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียมจากการคำนวณโดยสมการเส้นตรงของ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm99

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะประจุ 2+ ด้วยวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ กับผงเหล็กช็อตบลาสท์ 101

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะประจุ 2+ ด้วยวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ กับตะกรันอลูมิเนียม 102

ตารางที่ 4.14 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียม 103

ตารางที่ 4.15 ค่าคงที่อัตราจากการคำนวณตามแบบจำลองของ Thomas 107

ตารางที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียจริง 108

ตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบต้นทุนในการบำบัดไอออนสังกะสีจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมีกับการบำบัดแบบคอลัมน์ 109

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นิยามศัพท์เฉพาะ

$1/n$	=	ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ
A^{-}	=	เกลือของกรดอ่อน
Å	=	อังสตรอม
C	=	ความเข้มข้นสารละลาย
C_0	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย
C_e	=	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ภาวะสมดุล
cm	=	เซนติเมตร
C_t	=	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ เวลาใด ๆ
FAAS	=	เครื่อง Flame Atomic Adsorption Spectrophotometer
g	=	กรัม
h	=	ชั่วโมง
HA	=	กรดอ่อน
ICP	=	เครื่อง Inductively coupled plasma
k_1	=	ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม
k_2	=	ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม
k_F	=	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของฟรุนด์ลิช
k_L	=	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์
k_{Th}	=	ค่าคงที่อัตราโทมัส
L	=	ลิตร
m	=	น้ำหนักวัสดุดูดซับ
mg	=	มิลลิกรัม
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
pK_a	=	ค่าคงที่การแตกตัวของกรดอ่อน
PSA	=	เครื่อง Particle Size Analyzer
Q	=	อัตราการไหล
q_0	=	ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ภาวะสมดุล
q_e	=	ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุล
$q_{e,\mathrm{cal}}$	=	ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุลจากการคำนวณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$q_{e,\exp}$	=	ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุลจากการทดลอง
q_{mx}	=	ความสามารถในการดูดซับสูงสุด
$q_{mx,\exp}$	=	ความสามารถในการดูดซับสูงสุดจากการทดลอง
q_t	=	ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใด ๆ
$q_{t,\mathrm{cal}}$	=	ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใด ๆ จากการคำนวณ
$q_{t,\exp}$	=	ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใด ๆ จากการทดลอง
r	=	ร้อยละประสิทธิภาพ (%)
r^2	=	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
S.D.	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)
SAA	=	เครื่อง surface area and pore size analyzer
SEM	=	เครื่อง Scanning Electron Microscope
t	=	เวลาใด ๆ
V	=	ปริมาตรของสารละลาย
XRD	=	เครื่อง X-Ray Diffraction
XRF	=	เครื่อง X-Ray Fluorescence spectrometer
$\overline{X}$	=	ค่าเฉลี่ย
μm	=	ไมโครเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ภาคอุตสาหกรรมการผลิตเป็นภาคส่วนสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาเทคโนโลยี และการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเกินขีดจำกัด ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงและยากต่อการแก้ไข หนึ่งในผลกระทบนั้นคือ การรั่วไหลปนเปื้อนของโลหะหนักสู่แหล่งน้ำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) โดยสังกะสี (Zn) จัดเป็นโลหะหนักที่มีคุณสมบัติในการป้องกันสนิม จึงเป็นวัตถุดิบที่สำคัญชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอะไหล่รถยนต์ หากไม่ได้รับการบำบัดให้อยู่ในระดับต่ำกว่าที่กฎหมายกำหนด จะส่งผลให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีพ จึงจำเป็นต้องมีวิธีกำจัดหรือบำบัดให้อยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ปัจจุบันวิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียอุตสาหกรรมมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (chemical precipitation) การแยกโดยใช้กระแสไฟฟ้า (electrolytic process) การแยกด้วยแผ่นเมมเบรน (membrane separation) การบำบัดทางชีวภาพ (biological process) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange) และการดูดซับ (adsorption) (Wan et al., 2010)

กระบวนการดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย เนื่องจากสามารถใช้งานได้ง่ายและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่สูง (Ahmad, Kumar and Haseeb, 2012) โดยใช้วัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ แร่ธาตุต่าง ๆ ชีวมวล วัสดุเหลือใช้ทางเกษตร ของเสียจากอุตสาหกรรม และออกไซด์ของโลหะ เป็นต้น (Burakov et al., 2018) และออกไซด์ของโลหะ (Wang et al., 2017) เป็นต้น วัสดุที่นิยมใช้ในการดูดซับ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีโครงสร้างที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับสูง (Dobrowolski and Otto, 2013) แต่การใช้ถ่านกัมมันต์รวมทั้งวัสดุดูดซับบางชนิดยังมีต้นทุนในการนำมาใช้งาน หากสามารถประยุกต์ใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมมาเป็นวัสดุดูดซับได้ จะช่วยลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสีย ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดอีกทั้งช่วยลดปริมาณของเสียที่ปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เป็นการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า

จากกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ทำให้เกิดของเสียที่เป็นของแข็งจากการผลิต ได้แก่ ผงเหล็กช็อตบลาสท์ (shot blast) และตะกรันอลูมิเนียม (aluminium dross) ซึ่งประเทศไทยมีอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ประมาณ 3,400 โรงงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2560) โดย

ข้อมูลการเกิดของเสียจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในนิคมอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งเป็นผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียมมากถึงประมาณ 36 และ 11 ตันต่อเดือน ทั้งนี้ การกำจัดของเสียอุตสาหกรรมดังกล่าว จำเป็นต้องนำไปกำจัดขั้นตอนสุดท้ายด้วยการฝังกลบ (landfill) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554) ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดโดยไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูล พบว่า เมื่อของเสียดังกล่าวอยู่ในรูปของออกไซด์ ได้แก่ เหล็กออกไซด์จากผงเหล็กช็อตบลาสท์ และอลูมิเนียมออกไซด์จากตะกรันอลูมิเนียม จะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวสูงและสามารถช่วยให้เกิดการดูดติดของไอออนโลหะหนักบนผิวของตัวกลางได้ (Chan et al., 2009) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะนำของเสียจากกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับ (adsorbent) สำหรับกำจัดไอออนสังกะสีในน้ำเสีย โดยศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนสังกะสีด้วยวัสดุดูดซับที่เตรียมจากผงเหล็กช็อตบลาสท์ และตะกรันอลูมิเนียมในสภาวะต่าง ๆ และประยุกต์ใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมได้สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์ และตะกรันอลูมิเนียม

1.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การประยุกต์ใช้ของเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ ผงเหล็กช็อตบลาสท์ และตะกรันอลูมิเนียมเป็นวัสดุดูดซับ มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีออกจากน้ำเสียได้มากกว่าร้อยละ 95

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยในห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของการวิจัยดังนี้

1.4.1 ของเสียอุตสาหกรรมสำหรับใช้เป็นวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิดได้แก่ ผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียมได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่งในนิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร จังหวัดชลบุรี

1.4.2 น้ำเสียที่มีไอออนสังกะสี คือ น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการโดยเตรียมจากสารละลายเกลือโลหะหนัก ได้แก่ Zinc nitrate ($Zn(NO_3)_2•6H_2O$)

1.4.3 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กช็อตบลาสท์ และตะกรันอลูมิเนียมโดยจะศึกษาทั้งก่อนและหลังจากการดูดซับไอออนสังกะสี

1.4.4 ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนสังกะสี (adsorption kinetics) โดยใช้สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order) และอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second order) เพื่ออธิบายจลนศาสตร์การดูดซับที่เกิดขึ้น

1.4.5 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับไอออนสังกะสี (adsorption isotherm) โดยเลือกแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และฟรุนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับที่เกิดขึ้น

1.4.6 ศึกษารูปแบบการนำไปใช้จริงด้วยการบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ (column adsorption) โดยกำหนดความลึกของวัสดุดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ที่แตกต่างกัน

1.4.7 ศึกษาการบำบัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรม

1.4.8 เปรียบเทียบต้นทุนในการบำบัดสังกะสีด้วยของเสียจากอุตสาหกรรมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมีแบบเดิม

1.5 คำจำกัดความ

1.5.1 การดูดซับ (adsorption): เป็นกระบวนการแยกสารที่ต้องการออกจากของเหลวโดยอาศัยการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารที่ต้องการแยก เรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ไปสะสมบนพื้นผิวของของแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent)

1.5.2 การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation): ในกระบวนการตกตะกอนทางเคมี จะใช้สารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะหนัก ทำให้เกิดเป็นตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ จากนั้นจะสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการตกตะกอนหรือการกรอง และน้ำที่ผ่านการบำบัดจะปราศจากไอออนโลหะหนัก

1.5.3 ผงเหล็กช็อตบลาสท์ (shot blast): ของแข็งที่มีลักษณะเป็นผง มีส่วนประกอบหลักได้แก่ เหล็ก (Fe) และซิลิกา (Si) เป็นของเสียที่ผ่านการใช้งานจากกระบวนการตกแต่งผิวชิ้นงานในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ โดยการยิงกระสุนเหล็กไปยังผิวชิ้นงาน แรงอัดจากกระสุนทำให้สิ่งที่ไม่พึงประสงค์หลุดออกจากผิวของชิ้นงาน จนได้ชิ้นส่วนที่มีลักษณะตามต้องการเมื่อกระสุนผ่านการใช้งานทำให้มีลักษณะเปลี่ยนไปจากเดิมไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

1.5.4 ตะกรันอลูมิเนียม (aluminium dross): ของเสียที่มีลักษณะเป็นผงตะกรันสีดำ (black dross) เกิดจากการนำเอาเศษตะกรันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหลอมโลหะอลูมิเนียมขั้นปฐมภูมิ

(ร้อยละของโลหะอลูมิเนียมสูง) มาผ่านกระบวนการหลอมโลหะอลูมิเนียมโดยการใช้ความร้อนอีกครั้ง ทำให้เกิดเศษตะกรันเป็นกากของเสียจากการหลอมอลูมิเนียม ประกอบไปด้วยอลูมิเนียมในรูปโลหะออกไซด์ (Al_2O_3) โลหะอลูมิเนียม (Al) และส่วนผสมของเกลือ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถประยุกต์ของเสียจากอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่ามากที่สุด ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด และลดปริมาณของเสียที่ปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้

1.6.2 เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้ผงเหล็กช็อตบลาสท์ และตะกรันอลูมิเนียมในการดูดซับไอออนสังกะสีจากน้ำเสียด้วยสภาวะที่เหมาะสม และสามารถใช้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อพิจารณาทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม

1.6.3 การพัฒนาวัสดุดูดซับจากของเสียอุตสาหกรรมสามารถเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดโลหะหนักในระบบบำบัดน้ำเสียจริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรม

2.1.1 ความหมาย

ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ แล้ว พ.ศ. 2548 ได้ให้ความหมายของเสียจากอุตสาหกรรมชนิดไว้ดังนี้ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

“สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว” หมายความว่า สิ่งของที่ไม่ใช้หรือของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการประกอบกิจการโรงงาน รวมถึงของเสียจากวัตถุดิบ ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ของเสียที่เป็นผลิตภัณฑ์เสื่อมคุณภาพ และน้ำทิ้งที่มีองค์ประกอบหรือคุณลักษณะที่เป็นอันตราย

“ของเสียอันตราย” หมายความว่า สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบ หรือปนเปื้อนสารอันตราย หรือมีคุณสมบัติเป็นอันตราย

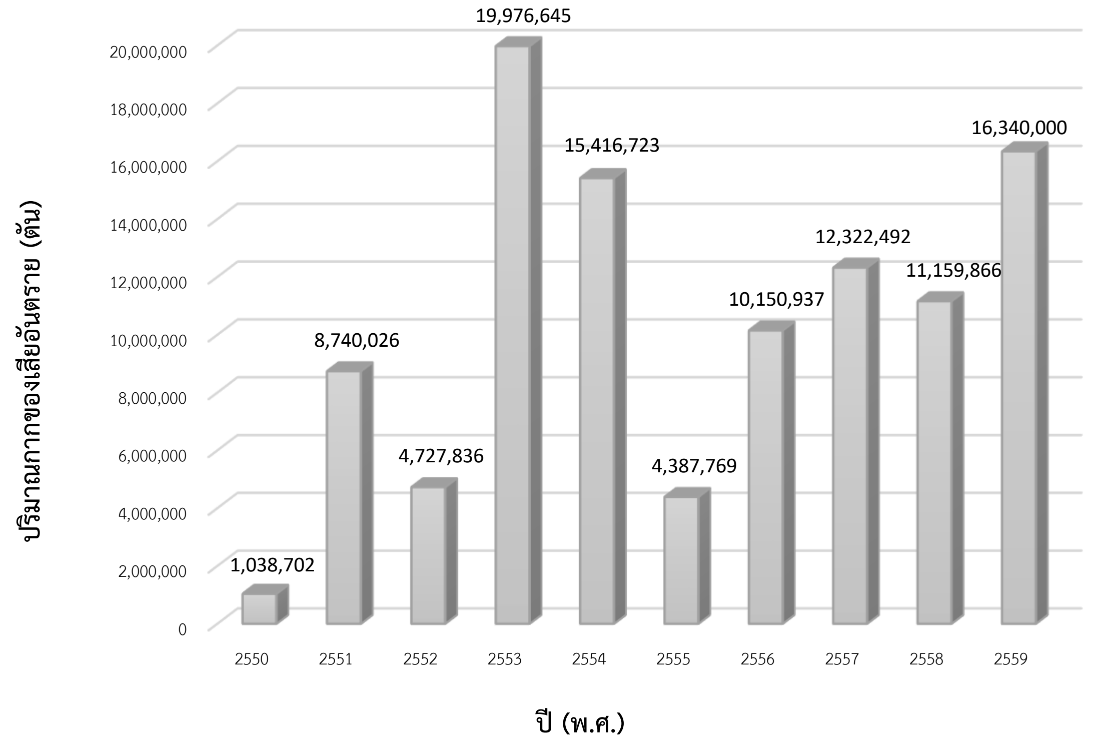
2.1.2 สถานการณ์ของเสียอันตรายในปัจจุบัน

ของเสียอันตราย ได้แก่ ของเสียอันตรายจากชุมชน ของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรม และมูลฝอยติดเชื้อโดยในปี 2559 การประมาณการของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นทั่วประเทศมีจำนวน 3.462 ล้านตัน เพิ่มขึ้น 0.017 ล้านตันหรือร้อยละ 0.49 จากปี 2558 โดยของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรมประมาณ 2.8 ล้านตัน (ร้อยละ 80) และเป็นของเสียอันตรายจากชุมชน (รวมซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์) ประมาณ 0.606 ล้านตัน (ร้อยละ 18) และมูลฝอยติดเชื้อประมาณ 0.056 ล้านตัน (ร้อยละ 2) (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

ปริมาณกากอุตสาหกรรมทั้งที่เป็นอันตรายและไม่อันตรายที่คาดว่าจะเกิดขึ้นทั่วประเทศ ทั้งพื้นที่ภายในเขตนิคมอุตสาหกรรมและนอกเขตนิคมอุตสาหกรรมมีจำนวน 37.4 ล้านตัน แบ่งเป็นกากอุตสาหกรรมที่เป็นอันตราย 2.8 ล้านตัน หรือร้อยละ 7.49 และกากอุตสาหกรรมที่ไม่เป็นอันตราย 34.6 ล้านตัน หรือร้อยละ 92.51 ทั้งนี้ ปริมาณกากอุตสาหกรรมทั้งที่เป็นอันตรายและไม่อันตรายที่มีการแจ้งขนส่งออกนอกบริเวณโรงงานไปจัดการ พบว่า เป็นกากอุตสาหกรรมอันตรายที่สามารถจัดการได้ 1.12 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 40 ของปริมาณที่เกิดขึ้น เพิ่มขึ้นจาก พ.ศ. 2558 (0.97 ล้านตัน) โดยการจัดการกากอุตสาหกรรมที่เป็นอันตราย พบว่า ประเภทการแปรใช้ในรูปพลังงานมีปริมาณสูงที่สุด คือ 0.34 ล้านตัน รองลงมาคือ การกำจัด 0.28 ล้านตัน แปรใช้ในรูปวัสดุ 0.25 ล้านตัน จัดการผ่านกระบวนการเพื่อใช้ซ้ำ 0.16 ล้านตัน ส่งไปจัดการนอกประเทศ 0.06 ล้านตัน และการบำบัด 0.05 ล้านตัน ส่วนกากอุตสาหกรรมที่ไม่เป็นอันตราย สามารถจัดการได้ 15.22 ล้านตัน คิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เป็นร้อยละ 44 ของปริมาณที่เกิดขึ้น เพิ่มขึ้นจาก พ.ศ. 2558 เช่นเดียวกัน (13.99 ล้านตัน) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปริมาณกากของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรม พ.ศ. 2550-2559 (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1.3 ปัญหาและผลกระทบจากของเสียอุตสาหกรรม

ปัญหาการลักลอบทิ้งกากอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้น สืบเนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น โรงงานผู้ก่อกำเนิดของเสีย (waste generator) อาจไม่มีความรู้ความเข้าใจหรือไม่สนใจกฎหมายเท่าที่ควร ทำให้ไม่ส่งของเสียกำจัดหรือบำบัดตามที่ได้รับอนุญาตหรือไม่แจ้งการขนส่ง ขณะที่ผู้รับบำบัดหรือกำจัดกากอุตสาหกรรม (waste processor) รวมถึงผู้ประกอบการขนส่ง (waste transporter) ไม่แจ้งการรับของเสีย ไม่มีการจัดการของเสียอย่างถูกต้อง หรือของเสียไปไม่ถึงผู้รับกำจัดปลายทาง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาการลักลอบทิ้งกากอุตสาหกรรม ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและผลกระทบที่ตามมาอีกมากมายอาจกล่าวได้ว่าแนวโน้มการลักลอบทิ้งกากอุตสาหกรรมยังคงมีอยู่อย่างต่อเนื่องในปัจจุบันและอาจพบเห็นข่าวเป็นระยะๆ ซึ่งเกี่ยวเนื่องจากการจัดการที่ไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการและกฎหมาย โดยมักจะเกี่ยวข้องกับฝ่ายต่างๆ การลักลอบทิ้งกากอุตสาหกรรมก่อให้เกิดผลกระทบตามมามากมาย ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2558)

2.1.3.1 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

สิ่งแวดล้อมทั้งหลายไม่ว่า ดิน น้ำ อากาศ หากปนเปื้อนด้วยกากอุตสาหกรรมที่ถูกลักลอบทิ้งจะเกิดปัญหาผลกระทบตามมาได้ เช่น หากทิ้งกากอุตสาหกรรมลงดิน จะก่อให้เกิดมลพิษทางดิน ทำให้พื้นดินปนเปื้อนด้วยสารอันตราย ก่อให้เกิดอันตราย ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากพื้นที่บริเวณดังกล่าว เมื่อทิ้งกากอุตสาหกรรมลงดินยังอาจทำให้เกิดมลพิษทางน้ำจากการรั่วไหลของสารอันตรายสู่แหล่งน้ำผิวดินและหรือซึมผ่านดินลงสู่น้ำใต้ดินซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้ใช้น้ำได้ นอกจากนี้การจัดการที่ไม่ถูกต้องยังทำให้สารที่ระเหยง่าย ระเหยไปในอากาศและทำอันตรายต่อผู้สูดดมเข้าไป

2.1.3.2 ผลกระทบต่อระบบนิเวศ

การปนเปื้อนของกากอุตสาหกรรมในดิน และแหล่งน้ำนั้นสารอันตรายอาจเข้าไปสะสมในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ และทำให้เกิดอันตรายคุกคามต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืช สัตว์และมนุษย์ โดยกากอุตสาหกรรมที่เป็นสารอันตรายนั้นจะส่งผลเสียต่อระบบนิเวศในสิ่งแวดล้อม รวมทั้งยังปะปนเข้าไปอยู่ในห่วงโซ่อาหาร และในที่สุดจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ที่ได้รับสัมผัสจากการกินสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ที่สะสมสารอันตรายเข้าสู่ร่างกายได้ อันเนื่องจากมนุษย์อยู่ในระดับสูงสุดของห่วงโซ่อาหารนั่นเอง

2.1.3.3 ผลกระทบต่อสุขภาพ

กากอุตสาหกรรมที่ปะปนในแหล่งน้ำทั้งน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดิน อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพสำหรับผู้ใช้แหล่งน้ำในระยะสั้นหรือระยะยาวได้จากการสัมผัสโดยการกิน การหายใจ หรือสัมผัสทางผิวหนัง แม้ว่าสารอันตรายบางตัวในปริมาณน้อยจะไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้น้ำโดยตรง แต่อาจทำให้กลิ่น หรือสีของแหล่งน้ำนั้นเปลี่ยนไป อันเป็นที่ไม่พึงประสงค์ กรณีสารอันตรายที่ปะปนในปริมาณมาก อาจทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำนั้นได้ หรือหากนำมาอุปโภคและบริโภค ก็อาจทำให้ผู้สัมผัสทางผิวหนังหรือเข้าสู่ร่างกายเจ็บป่วยได้ หรือหากมีการสัมผัสสารเคมีที่กองทิ้งไว้โดยรู้เท่าไม่ถึงการ ก็อาจเจ็บป่วยได้ หรือหากสูดดมเอาไอระเหยเข้าสู่ร่างกายก็อาจทำให้เกิดการเจ็บป่วยเช่นกัน

2.1.3.4 ผลกระทบต่อการอยู่ร่วมกันในชุมชน

การลักลอบทิ้งกากอุตสาหกรรมจากผู้ก่อกำเนิดของเสีย จะทำให้ชุมชนขาดความเชื่อใจ ไว้ใจในการอยู่ร่วมกัน หรือการร่วมมือใด ๆ ก็ตามต่อสถานประกอบการที่อยู่ในชุมชนนั้น และสุดท้ายก็อาจเกิดการต่อต้าน คัดค้านการประกอบกิจการนั้น ๆ ให้ออกไปจากชุมชน

2.1.4 การกำจัดของเสียอันตราย

2.1.4.1 การปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง (stabilization and solidification)

การปรับเสถียรและการทำก้อนแข็งเป็นกระบวนการกำจัดของเสียอันตรายเพื่อทำลายฤทธิ์ของสารอันตรายก่อนการนำไปฝังกลบ โดยการใส่สารเคมีหรือวัสดุอื่น ๆ ผสมกับของเสีย

อันตรายเพื่อลดระดับความเป็นพิษ และลดอัตราการเคลื่อนที่ออกของสารปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม เปรียบเสมือนเป็นกระบวนการบำบัดของเสีย ส่วนวิธีทำก้อนแข็งเป็นกระบวนการทำให้ของเสียแข็งตัว สามารถรับแรงกดได้มากขึ้นและลดความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ วัสดุที่ช่วยก่อให้แข็งตัว ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว เป็นต้น ส่งผลให้ของเสียอันตรายมีเสถียรภาพมากขึ้น

2.1.4.2 การฝังกลบอย่างปลอดภัย (secure landfill system)

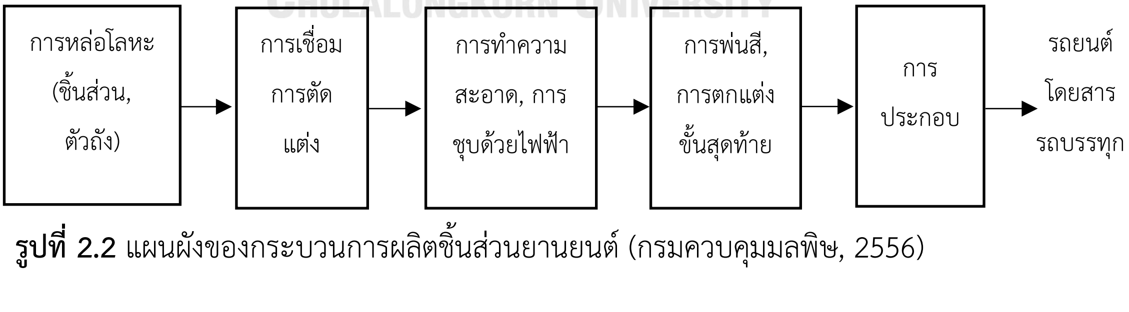
การกำจัดของเสียอันตรายด้วยวิธีการฝังกลบบนดินเป็นวิธีที่สำคัญมากที่สุดวิธีหนึ่ง โดยของเสียอันตรายที่ผ่านการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งแล้วจะถูกฝังกลบแบบปลอดภัย เป็นการกำจัดของเสียที่จบสิ้น ไม่มีการนำของเสียขึ้นมาอีก ระบบการฝังกลบแบบปลอดภัยจะมีการป้องกันการรั่วไหลของน้ำชะขยะ มีระบบปิดทับพื้นที่ฝังกลบ มีระบบระบายน้ำที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ มีการคำนวณออกแบบเสถียรของบ่อฝังกลบ และมีการดูแลฟื้นฟูพื้นที่หลังจากปิดบ่อฝังกลบ ดังนั้นพื้นที่บริเวณฝังกลบต้องมีความปลอดภัย ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2553)

2.2 อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ (auto parts manufacturing)

2.2.1 กระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

ชิ้นส่วนยานยนต์หรือตัวถังที่ผลิตโดยการหล่อด้วยโลหะ การเชื่อมและการตัดแต่ง จะถูกส่งผ่าน ไปยังกระบวนการทำความสะอาด การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การพ่นสีและการตกแต่งขั้นสุดท้าย เพื่อนำชิ้นส่วนมาประกอบเป็นรถยนต์นั่งหรือรถบรรทุก (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) กระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แสดงดังรูปที่ 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.2 แผนผังของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

2.2.2 มลพิษจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

กระบวนการผลิต 5 ขั้นตอนที่มีศักยภาพในการเป็นแหล่งระบายมลพิษจากอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ ดังนี้

1) การหล่อโลหะ มลพิษที่เกิด ได้แก่ ฝุ่นฟุ้งกระจายที่ประกอบด้วยโลหะหรือสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่ใช้ในการเชื่อมโลหะจะถูกปลดปล่อยออกสู่อากาศหรือถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นของเสียจากกระบวนการหล่อโลหะ

2) การขึ้นรูปโลหะและการตัดโลหะ มลพิษที่เกิด ได้แก่ สารเคมีเป้าหมายที่ใช้ในกระบวนการตัดหรือในน้ำมันให้ความร้อน เช่น สาร Boron และ สารประกอบที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ หรือเปลี่ยนรูปไปเป็นของเสียระหว่างกระบวนการตัด และการขึ้นรูปโลหะ

3) การทำความสะอาด (หรือการขจัดไขมัน) มลพิษที่เกิด ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์ระเหย (VOCs) หรือสารอนินทรีย์ที่ใช้ในการทำความสะอาดหรือตัวทำละลายไขมัน หรือสารที่ใช้เคลือบผิวโลหะ ถูกปล่อยออกสู่อากาศหรือแหล่งน้ำและเปลี่ยนรูปไปเป็นของเสีย

4) การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (หรือการชุบเคลือบสังกะสี) มลพิษที่เกิด ได้แก่ โลหะหรือสารอนินทรีย์ที่ใช้เป็นน้ำยาในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะถูกปล่อยออกมาสู่อากาศ แหล่งน้ำและเปลี่ยนรูปไปเป็นของเสียได้

5) การพ่นสี การตกแต่งขั้นสุดท้าย มลพิษที่เกิด ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์ระเหย โลหะหรือสารอื่นที่เกียวข้องกับการนำมาใช้ในกระบวนการพ่นสีหรือการตกแต่งขั้นสุดท้าย ถูกปล่อยออกมาสู่อากาศ แหล่งน้ำและเปลี่ยนรูปไปเป็นของเสียได้

แหล่งกำเนิดมลพิษของสารเคมีเป้าหมายจากอุตสาหกรรมยานยนต์ ชิ้นส่วนและอะไหล่ยานยนต์ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กระบวนการที่มีการปลดปล่อยสารเคมีเป้าหมายจากอุตสาหกรรมยานยนต์ ชิ้นส่วนและอะไหล่ยานยนต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ลำดับ	กระบวนการที่มีการระบายมลพิษ	การปลดปล่อยและเคลื่อนย้าย	ชนิดสาร		
			สารประกอบอินทรีย์ระเหย	โลหะหนัก	สารอื่น
1	การหล่อโลหะ	อากาศ/ขยะ	✓	✓	✓
2	การขึ้นรูปโลหะและการตัดโลหะ	น้ำ/ขยะ			✓
3	การทำความสะอาดชิ้นงาน	อากาศ/น้ำ/ขยะ	✓		
4	การชุบเคลือบสังกะสี ,ชุบโลหะไฟฟ้า	อากาศ/น้ำ/ขยะ		✓	✓
5	การพ่นสี, การตกแต่งขั้นสุดท้าย	อากาศ/น้ำ/ขยะ	✓	✓	✓

(กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

2.2.3 ของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ใช้ในการศึกษา

2.2.3.1 ผงเหล็กช็อตบลาสท์ (shot blast)

1) ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี

เป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นผง มีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ เหล็ก (Fe) และซิลิกา (Si) เป็นของเสียที่ผ่านการใช้งานจากกระบวนการตกแต่งผิวชิ้นงานในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ โดยการยิงกระสุนเหล็กไปยังผิวชิ้นงาน แรงอัดจากกระสุนทำให้สิ่งที่ไม่พึงประสงค์หลุดออกจากพื้นผิวชิ้นงานจนได้ชิ้นส่วนที่มีลักษณะตามต้องการ (Holzknecht, 2005) เมื่อกระสุนผ่านการใช้งานทำให้มีลักษณะเปลี่ยนไปจากเดิมไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2) ความเป็นอันตราย

ผงเหล็กช็อตบลาสท์จากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ถูกจัดเป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ แล้ว พ.ศ. 2548 มีรหัสของชนิดและประเภทของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไมใชแล้ว 6 หลัก คือ 12 01 16 ได้แก่ ของเสียจากการตัดแต่งและปรับสภาพผิวโลหะ พลาสติกดวยกระบวนทางกายภาพหรือเชิงกล (wastes from shaping and physical and mechanical surface treatment of metals and plastics) มีลักษณะเฉพาะเป็นวัสดุพนขัดผิวที่มีสารอันตราย (waste blasting material containing dangerous substances) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

2.2.3.2 ตะกรันอลูมิเนียม (aluminium dross)

1) ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบเคมี

เป็นของเสียที่มีลักษณะเป็นผงตะกรันสีดำ (black dross) เกิดจากการนำเอาเศษตะกรันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหลอมโลหะอลูมิเนียมขั้นปฐมภูมิ (ร้อยละของโลหะอลูมิเนียมสูง) มาผ่านกระบวนการหลอมโลหะอลูมิเนียมโดยการใช้ความร้อน ทำให้เกิดเศษตะกรันเป็นกากของเสียจากการหลอมอลูมิเนียม ประกอบไปด้วยอลูมิเนียมในรูปโลหะออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 20-50 โลหะอลูมิเนียม (Al) ร้อยละ10-20 และส่วนผสมของเกลือ ร้อยละ 40-55 (Tsakiridis, 2012)

2) ความเป็นอันตราย

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้พูดถึงการกำจัดของเสียอันตรายที่ถูกต้อง คือ การปรับสภาพนำไปฝังกลบแบบนิรภัย (secure landfill system) หากจัดการด้วยวิธีที่ไม่ถูกต้อง เช่นการนำไปฝังกลบในหลุมฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาล (sanitary landfill system) หรือการลักลอบทิ้งตะกรันอลูมิเนียม จะทำให้เกิดการปนเปื้อนและมีปัญหาต่าง ๆ ตามมา เนื่องจากตะกรันอลูมิเนียมมีองค์ประกอบทางเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นก๊าซพิษต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังสมการที่ (2.1)-(2.5) (ดิษยพงศ์ หกสุวรรณ, 2555)

$$Al + 3H_2O \rightarrow Al(OH) + 3/2H_2\,(g) \qquad (2.1)$$

$$AlP + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + PH_3\,(g) \qquad (2.2)$$

$$AlN + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3NH_3\,(g) \qquad (2.3)$$

$$Al_4C_3 + 12H_2O \rightarrow 4Al(OH)_3 + 3CH_4\,(g) \qquad (2.4)$$

$$Al_2S_3 + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3H_2S\,(g) \qquad (2.5)$$

จากสมการแสดงให้ถึงการเกิดปฏิกิริยาของตะกรันอลูมิเนียมเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซฟอสฟีน (PH_3) ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์หรือก๊าซไข่เน่า (H_2S) ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม

ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ได้กำหนดให้ตะกรันอลูมิเนียมจากการหลอมอลูมิเนียมในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เข้าข่ายเป็นของอันตราย เนื่องจากเป็นวัตถุที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้อย่างรุนแรง และก๊าซที่เกิดขึ้นสามารถติดไฟได้

ผงตะกรันอลูมิเนียมมีรหัสของชนิดและประเภทของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไมใชแล้ว 6 หลัก คือ 10 03 09 ได้แก่ ของเสียจากกระบวนการใชความรอน (wastes from thermal processes) จากการหลอมถลุงอลูมิเนียม (wastes from aluminium thermal metallurgy) มีลักษณะเฉพาะเป็นกากตะกรันดำจากกระบวนการผลิตทุติยภูมิ (black drosses from secondary production) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

นอกจากนี้ยังถูกจัดเป็นของเสียอันตรายตามข้อกำหนดขององค์กรสหประชาชาติ โดยมีหมายเลข UN (UN number) คือ 3170 และมีประเภทความเป็นอันตราย (hazard class) จัดอยู่ในประเภทที่ 4.3 คือ วัสดุที่เมื่อสัมผัสกับน้ำแล้วเกิดก๊าซไวไฟหรือก๊าซพิษ อาจก่อให้เกิดการลุกติดไฟหรือระเบิดได้ (United Nation, 2009) สารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและเป็นอันตรายต่อร่างกายก่อให้เกิดการบาดเจ็บหรือเสียชีวิต หากมีการสัมผัสหรือสูดดมในปริมาณมาก โดยมีภาพสัญลักษณ์แสดงดังรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 ภาพสัญลักษณ์ของวัตถุอันตรายประเภทที่ 4.3 ตามระบบ UN class (United Nation, 2009)

2.3 โลหะหนัก (heavy metal)

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เช่น โครเมียม (Cr) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) ปรอท (Hg) และนิกเกิล (Ni) เป็นต้น โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็งยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ โดยโลหะหนักส่วนใหญ่มีสมบัติทางกายภาพที่คล้ายคลึงกัน เช่น มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาวและสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ เป็นต้น ลักษณะสมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้น โลหะหนักจึงสามารถรวมตัวกับสารอื่นเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปมากกว่าโลหะหนักอิสระ

โลหะหนักสามารถจัดแบ่งโดยอาศัยแนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาพแวดล้อมได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มโลหะหนักที่มีแนวโน้มความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสูงมาก ได้แก่ สารหนู (As) ทองคำ (Au) แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) ปรอท (Hg) ตะกั่ว (Pb) พลวง (Sb) ดีบุก (Sn) เทลลูเรียม (Te) และสังกะสี (Zn) นอกจากนี้ยังมีโลหะหนักที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมรองลงมา ได้แก่ บิสมัท (Bi) เหล็ก (Fe) แบเรียม (Ba) โมลิบดินัม (Mo) ยูเรเนียม (U) และไทเทเนียม (Ti) ซึ่งโลหะเหล่านี้มีพิษต่อร่างกายมนุษย์แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับ แหล่งกำเนิดที่สำคัญของโหละหนักดังกล่าวมาจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะปะปนมากับน้ำทิ้งและสามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมทั้งดิน น้ำ อากาศ พืชผลทางการเกษตร และเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ซึ่งจะมีผลต่อเมตาโบลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิต

2.4 สังกะสี (Zn)

2.4.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

สังกะสี คือ ธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 30 และสัญลักษณ์คือ Zn (zinc) สังกะสีอยู่ในตารางธาตุหมู่ 12 เป็นธาตุประเภทโลหะที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีพอสมควรกับออกซิเจนและธาตุที่ไม่ใช่โลหะ สังกะสีเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดเจือจางจะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนออก ธาตุชนิดนี้เป็นโลหะธาตุที่มีลักษณะที่เป็นสีเงิน มันวาว เป็นที่นิยมนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมมากมาย เพื่อเป็นโลหะโครงสร้างหรือโลหะผสมกับโลหะอื่นสำหรับประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ นอกจากนั้น สังกะสียังเป็นแร่ธาตุชนิดหนึ่งที่สามารถพบได้ในร่างกายมนุษย์ และสัตว์ เนื่องจากจัดเป็นแร่ที่ร่างกายต้องการชนิดหนึ่ง

สังกะสีที่พบในธรรมชาติไม่พบในรูปของธาตุอิสระ โดยทั่วไปมักพบสังกะสีในดินประมาณ 120 กรัม/ตัน โดยอยู่ในรูปของซัลไฟด์ (ZnS) และมักปนกับซัลไฟด์ของโลหะอื่น เช่น เหล็ก ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง สำหรับสังกะสีที่พบเป็นสินแร่มักพบในรูปแร่เฮมิเมอร์ไฟต์ [$Zn_4(Si_2O_7)$

$(OH)_2$ $(H_2O)]$ แร่สมิทซอไนต์ ($ZnCO_3$) และแร่ซิงไคต์ (ZnO) สำหรับแร่สังกะสีที่พบมากที่สุดในโลก คือ แร่สฟาเลอไรต์ (ZnS)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของสังกะสี

คุณสมบัติ	รายละเอียด
น้ำหนักอะตอม	65.41 g/mol
ระบบผลึก	Hexagonal
ความหนาแน่น	7.14 g/cm (ที่ 20°C)
จุดหลอมเหลว	420 $^{\circ}$C
จุดเดือด	907 $^{\circ}$C
ความต้านทานไฟฟ้า	59.0 nΩ.m (ที่ 20°C)
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	30.2 $\mu m.m^{-1}.K^{-1}$ (ที่ 20°C)

(กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน, 2551)

2.4.2 การนำไปใช้ประโยชน์

1) เคลือบโลหะ เพื่อป้องกันสนิมและการกัดกร่อน เช่น ในกระเบื้องสังกะสี หรือกระเบื้องสังกะสีลูกฟูก เรียกกันในวงการช่างโลหะว่า เหล็กอาบสังกะสี หรือเหล็กชุบสังกะสี

2) ส่วนประกอบในโลหะผสม เช่น ใช้ในการทำของเล่นf

3) ใช้เป็นภาชนะของถ่านอัลคาไลน์

4) สังกะสีเป็นสารอาหาร ที่พบได้มากในหอยนางรม และโปรตีน ถั่ว แอลมอนด์ เมล็ดฟักทอง และเมล็ดทานตะวัน

5) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มีลักษณะสีขาว ใช้เป็นส่วนผสมผลิตสีเคลือบ สีทา และใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์

6) ซิงค์คาร์บอเนต ($ZnCO_3$) ใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมยา เช่น ยาทาแก้อาการคันตามผิวหนัง

7) ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_3$) ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

8) ซิงค์ซัลไฟต์ (ZnS) ใช้เป็นสีขาวในอุตสาหกรรมยาง ใช้เคลือบเป็นฉากเรืองแสงในหลอดฟลูออเรสเซ็นต์ของโทรทัศน์ และใช้เป็นส่วนผสมของสีพรายน้ำ

9) ซิงค์ไฮดรอกไซด์ ($Zn(OH)_2$) ใช้ในอุตสาหกรรมยาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

10) ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ใช้เป็นสารป้องกันเชื้อราในอุตสาหกรรมกระดาษ และไม้อัดซิงค์ไพริดีนไธโอน (zinc pyridinethione) ใช้เป็นส่วนผสมในน้ำยาหรือแชมพูสระผมป้องกันรังแค (สยามเคมี, ม.ป.ป.)

2.4.3 การแพร่กระจายของสังกะสีสู่สิ่งแวดล้อม

1) การชะล้างหน้าดินที่เกิดจากการเปิดหน้าดิน โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเหมืองแร่ต่าง ๆ ที่มักขุดเปิดหน้าดิน และขุดตักดินลงลึก ทำในช่วงฤดูฝนเกิดการชะหน้าดินที่อาจมีโลหะหนักลงสู่แม่น้ำสาธารณะได้ง่าย

2) อุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ ที่มีการใช้วัตถุดิบหรือสารเคมีที่มีโลหะหนักปนเปื้อน เช่น อุตสาหกรรมถลุงแร่ อุตสาหกรรมฟอกหนัง อุตสาหกรรมย้อมสี และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้อาจปล่อยมลพิษ และของเสียจากกระบวนการผลิตออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ทั้งทางอากาศเสีย น้ำเสีย และกากของเสีย

3) สถานประกอบการขนาดเล็กที่ประกอบธุรกิจด้วยการใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีสารโลหะหนักผสมอยู่ เช่น ร้านซ่อม และเคาะพ่นสีรถยนต์ และปั๊มน้ำมัน เป็นต้น

4) แหล่งกำจัดขยะ และสิ่งปฏิกูล ซึ่งมักเป็นแหล่งรวบรวม และกำจัดขยะในปริมาณมาก โดยเฉพาะพื้นที่กำจัดขยะขององค์การปกครองส่วนท้องถิ่นต่าง ๆ โดยกองขยะที่รวบรวมไว้มักมีขยะหลายชนิดที่มีโลหะหนักปนเปื้อน เช่น แบตเตอรี่ ถ่านไฟฉาย สีพ่น เป็นต้น ทั้งนี้ หากมีการรวบรวมและกำจัดไม่ถูกสุขลักษณะย่อมเสี่ยงต่อการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย โดยเฉพาะการชะล้างของฝนและการซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

2.4.4 ความเป็นพิษของสังกะสี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การได้รับสังกะสีเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่อาจทำให้เกิดพิษสามารถแบ่งได้หลายกรณี ได้แก่

2.4.4.1 การได้รับสังกะสีจากภาวะมลพิษ

สังกะสีที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมมักเกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมที่บำบัดไม่หมดหรือการผลิตภัณฑ์ที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบ มลพิษที่ปนเปื้อนสังกะสีมักอยู่ในรูปของฝุ่นหรือไอสารที่ลอยในอากาศ ซึ่งมีโอกาสสัมผัส และได้รับสารได้ง่าย โดยเฉพาะคนงานที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ฝุ่นหรือไอของซิงค์ออกไซด์สามารถทำให้เกิดความระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ส่วนการสัมผัสทางผิวหนังเป็นเวลานานจะทำให้เกิดผิวหนังอักเสบอย่างรุนแรง ที่เรียกว่า oxide pox ส่วนอาการเมื่อได้รับฝุ่นหรือไอของสังกะสีในปริมาณมากจากการสูดดมจะเกิดอาการกระหายน้ำ ไอ หลอดลมอักเสบ ปอดบวม เหนื่อยล้าง่าย อ่อนแรง มีอาการปวดกล้ามเนื้อ คลื่นไส้ มีไข้ มีอาการหนาวสะท้าน และผิวหนังเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งมักเกิดภายใน 4-12 ชั่วโมง หลังการสัมผัส อาการเหล่านี้

จะหายเป็นปกติภายใน 1-2 เรียกชื่อโรคนี้ว่า โรคไข้วันจันทร์ (monday fever) หรือโรคไข้พิษโลหะ (metal fume fever)

2.4.4.2 การปนเปื้อนจากอาหารและน้ำดื่ม

สารประกอบซิงค์ออกไซด์มักปะปนในแหล่งน้ำหรืออาหารได้ง่าย โดยเฉพาะพื้นที่ที่อยู่ใกล้แหล่งแร่สังกะสี เมื่อร่างกายได้รับสาร และสะสมเป็นเวลานานจะก่อให้เอนไซม์ของตับเกิดความผิดปกติ และพบอาการเลือดออกในระบบทางเดินอาหาร การเกิดพิษในระบบทางเดินอาหารจากการกินสังกะสีเข้าไปจะเกิดกัดกร่อนบริเวณทางเดินอาหารส่วนต้น ได้แก่ หลอดอาหาร และกระเพาะอาหาร ทำให้มีอาการอักเสบ ปวดท้องอย่างรุนแรง และอาจทำให้ทางเดินอาหารตีบตันได้

2.4.5 มาตรฐานและการควบคุมสังกะสีในน้ำทิ้ง

ตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ได้กำหนดมาตรฐานการปนเปื้อนของสังกะสี (Zn) ในน้ำทิ้งให้ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

2.5 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

2.5.1 การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation)

การตกตะกอนด้วยสารเคมีเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับกำจัดโลหะหนักจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เนื่องจากดำเนินการได้ง่าย ในกระบวนการตกตะกอนทางเคมี จะใช้สารเคมีจะทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะหนัก ทำให้เกิดเป็นตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ จากนั้นจะสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการตกตะกอนหรือการกรอง และน้ำที่ผ่านการบำบัดจะปราศจากไอออนโลหะหนัก (Fu and Wang, 2011) กระบวนการตกตะกอนทางเคมีมีอยู่ 5 ประเภทหลัก ได้แก่ การตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ (hydroxide precipitation), การตกตะกอนคาร์บอเนต (carbonate precipitation), การตกตะกอนซัลไฟล์ (sulfide precipitation), การตกตะกอนแซน-เธต (xanthate precipitation) และ การตกตะกอนร่วม (combined precipitation) โดยวิธีที่นิยมใช้ คือ การตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ และ การตกตะกอนคาร์บอเนต

การตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ในระบบบำบัดน้ำเสียเป็นวิธีที่ได้รับนิยมมากที่สุด เนื่องจากโลหะหนักหลายชนิดสามารถรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออน (-OH) ของสารเคมีที่ใช้ ได้เป็นสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีค่าการละลายต่ำ ในการบำบัดทำได้โดยการควบคุมพีเอชของระบบบำบัด โดยด่างที่ใช้มากที่สุด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และปูนขาว (CaO) ซึ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายน้ำได้ดี สามารถปรับพีเอชให้มีค่าสูงได้ ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นไม่มากส่วนปูนขาวก็นิยมใช้

เนื่องจากมีราคาถูกเหมาะสำหรับน้ำเสียที่ไม่ต้องปรับพีเอชให้สูงมาก เมื่อปรับพีเอชให้กับน้ำเสีย ไอออนของโลหะจะรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออน เกิดเป็นตะกอนแยกตัวออกมา เมื่อเติมด่างเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของไอออนโลหะจะค่อย ๆ ลดลง จนตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นมากจนในที่สุดคงที่ แม้ว่าจะเติมด่างต่อไป แต่มีโลหะหนักบางชนิดถ้าเติมด่างมากเกินไปโลหะจะรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่มากเกินพอเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ โลหะพวกนี้ ได้แก่ สังกะสี (Zn^{2+}) แคดเมียม (Cd^{2+}) คอปเปอร์ (Cu^{2+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) (พรรษวรรณ ศรีนาค, 2556) ดังรูปที่ 2.4 แสดงการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

ตัวอย่าง การเกิดไฮดรอกไซด์ของซิงค์ไอออน ตั้งแต่เริ่มเติมด่างดังสมการที่ (2.6)-(2.9)

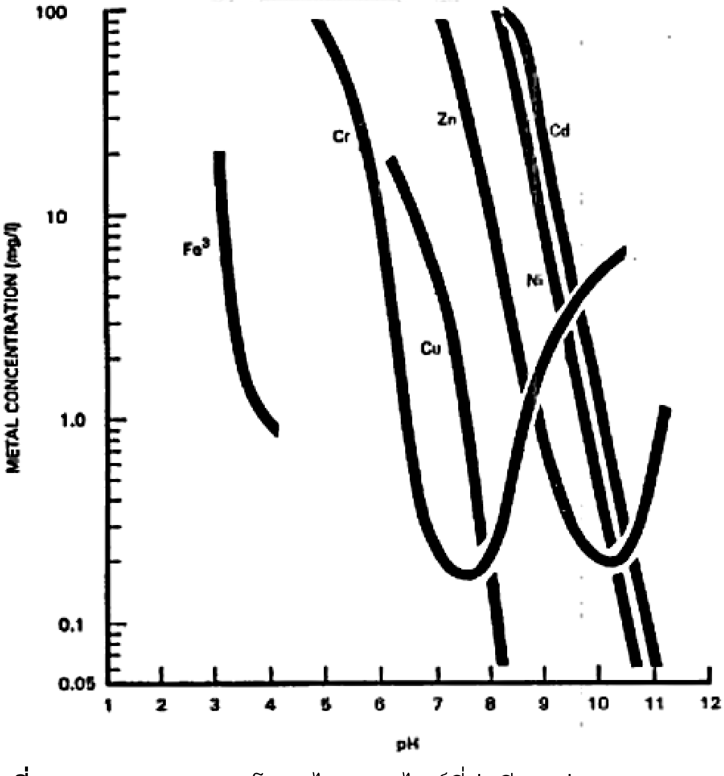
$$Zn^{2+}(aq) + OH^-(aq) \leftrightarrow Zn(OH)^+(aq) \quad (2.6)$$

$$Zn(OH)^{2+} + OH^-(aq) \leftrightarrow Zn(OH)_2(s) \quad (2.7)$$

$$Zn(OH)_2 + OH^-(aq) \leftrightarrow Zn(OH)_3^-(aq) \quad (2.8)$$

$$Zn(OH)_3^- + OH^-(aq) \leftrightarrow Zn(OH)_4^{2-}(aq) \quad (2.9)$$

ถ้าเติมเบสในปริมาณที่เหมาะสมสังกะสีจะอยู่ในรูป $Zn(OH)_2$ ดังสมการที่ 2.7 ซึ่งอยู่ในรูปของแข็งเป็นส่วนมาก ถ้าเติมมากขึ้นอีก $Zn(OH)_2$ จะค่อย ๆ ลดลงเกิดเป็นสมการที่ 2.8 และ 2.9



รูปที่ 2.4 การละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ (EPA, 1980)

2.5.2 การสร้างตะกอนและรวมตะกอน (coagulation and flocculation)

วิธีการนี้เป็นการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ในน้ำเสีย โดยในขั้นแรกจะสร้างตะกอน (coagulation) ด้วยการใส่สารตกตะกอน (coagulant) ที่มีประจุตรงกับข้ามกับโลหะหนัก ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทั่วไปสารตกตะกอนที่ใช้ เช่น aluminium, ferrous sulfate และ ferric chloride ทำให้ไอออนโลหะหนักเริ่มรวมตัวกันเกิด microfloc ขึ้น ในขั้นตอนนี้ต้องการกวนผสมอย่างรวดเร็วเพื่อให้สารเคมีและน้ำเสียผสมกัน จากนั้นจะเกิดการรวมตะกอน (flocculation) โดยการกวนผสมอย่างช้า ๆ microfloc เคลื่อนตัวช้า ๆ มาชนกัน เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันรวมเป็นฟล๊อคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีน้ำหนักมากพอที่จะแยกออกจากน้ำด้วยการตกตะกอน (sedimentation) โดยในขั้นตอนนี้อาจจะใช้สารที่ช่วยให้เกิดการรวมตัวกัน เช่น polymer การกวนผสมต่าง ๆ ช่วยให้สามารถสร้างฟล๊อคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ หากกวนเร็วจะทำให้ฟล๊อคแตก สายโพลิเมอร์ที่จับกันจะขาด หลังจากนั้นให้หยุดการกวนผสมและปล่อยทิ้งไว้ จะทำให้ฟล๊อคซึ่งมีน้ำหนักมากค่อย ๆ จมตัวลง แยกตัวออกจากน้ำโดยเกิดกระบวนการตกตะกอน ได้น้ำใสส่วนบน (supernatant) ในที่สุด

2.5.3 การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อขจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย เนื่องจากมีข้อดีหลายอย่าง ได้แก่ ประสิทธิภาพการกำจัดสูงและใช้เวลาน้อย ในการบำบัดจะใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เป็นของแข็ง มีความสามารถเฉพาะในการแลกเปลี่ยนไอออนโลหะหนักในน้ำเสียกับประจุบวกบนผิวของเรซิน ตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวกส่วนใหญ่เป็นเรซินที่เป็นกรดแก่ประกอบด้วยหมู่กรดซัลโฟนิก และเรซินที่เป็นกรดอ่อนประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) ไอออนไฮโดรเจนในกรดซัลโฟนิก หรือคาร์บอกซิลิกของเรซิน สามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนได้ไอออนบวกกับโลหะหนักได้ เมื่อสารละลายสัมผัสกับเรซินไอออนบวก ไอออนของโลหะจะแลกเปลี่ยนกับไอออนไฮโดรเจนบนเรซินดังสมการที่ (2.10) และ (2.11) โดยการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีนี้มีตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด เช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก และระยะเวลาสัมผัส เป็นต้น (Fu and Wang, 2011)

$$nR\text{-}SO_3H \quad + \quad M^{n+}(R\text{-}SO_3^-)_n \quad \rightarrow \quad M^{n+} + nH^+ \qquad (2.10)$$

$$nR\text{-}COOH \quad + \quad M^{n+} \quad \rightarrow \quad (R\text{-}COOH^-)_nM^{n+} + nH^+ \qquad (2.11)$$

2.5.4 การออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการให้หรือเสียอิเล็กตรอนทำให้ธาตุมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้นปฏิกิริยารีดักชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนจากธาตุอื่นทำให้มีเลขออกซิเดชันลดลง ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดควบคู่กันไปจึงเรียกว่า ออกซิเดชันรีดักชัน หรือ

ปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) ในด้านการบำบัดน้ำเสีย ถ้าองค์ประกอบที่ต้องการบำบัดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับสารที่เติมลงไป ถือว่าเป็นการบำบัดด้วยกระบวนการออกซิเดชั่นทางเคมี สารที่เติมลงไปทำหน้าที่เตรียมตัวรับอิเล็กตรอนจากสารที่ต้องการบำบัดจัดว่าเป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ได้แก่ โอโซน (O_3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) คลอรีน (Cl_2) คลอรีนไดออกไซด์(ClO_2) โปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต และออกซิเจน (O_2) ส่วนการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรีดักชัน มลสารที่ต้องการบำบัดจะถูกรีดิวซ์เกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยโลหะหนักที่นิยมใช้วิธีนี้บำบัด ได้แก่ โครเมียม (Cr^{6+}) ให้เป็น โครเมียม (Cr^{3+}) ตัวรีดิวซ์ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ ($Na_2S_2O_5$) และเฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)

2.5.5 กระบวนการเมมเบรน (membrane process)

กระบวนการนี้อาศัยเมมเบรนในการแยกโลหะออกจากน้ำเสียมี 2 แบบ คือ การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (electrodialysis) และการออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) ซึ่งความแตกต่างของทั้งสองกระบวนการนี้อยู่ที่ความสามารถในการแยกสารละลายที่มีขนาดต่าง ๆ กัน รวมถึงแรงดันที่ทำให้เกิดการแยกไอออนออกจากน้ำด้วย การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง ใช้ความต่างศักย์เป็นแรงขับดันให้เกิดการสารประกอบที่แตกตัวเป็นไอออนให้ออกจากน้ำ โดยแผ่นเยื่อ เมมเบรนที่ใช้มี 2 ชนิด คือ แผ่นบวกและแผ่นลบ โดยแผ่นบวกจะจับสารปนเปื้อนที่มีประจุลบและปล่อยสารที่มีประจุบวกผ่านไปได้ ส่วนแผ่นลบจะจับสารปนเปื้อนให้มีประจุบวกและปล่อยสารที่มีประจุลบผ่านไปได้ โดยที่โมเลกุลของน้ำไหลผ่านได้ยาก ทำให้สามารถแยกไอออนของโลหะหนักออกจากน้ำได้ (วราวุธ วัดขนาด, 2552)

2.5.6 การดูดซับ (adsorption)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของแข็ง เรียกว่า สารดูดซับ ที่นิยมใช้ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ โดยสารที่ถูกดูดซับ ได้แก่ โลหะหนักอยู่ในรูปของสารละลาย ในระบบที่เป็นสารละลาย (aqueous system) การดูดซับบนผิวหรือภายในเม็ดคาร์บอนเป็นกระบวนการที่ขึ้นอยู่กับเวลา ส่วนผงคาร์บอนจะมีผลน้อยกว่า โดยกระบวนการดูดซับเริ่มจาก ขั้นที่ 1 โลหะหนักเคลื่อนที่ไปยังผิวของคาร์บอนซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างผิวของของเหลวและของแข็งโดยการแพร่ เรียกขั้นตอนนี้ว่า macrotransport ขั้นที่ 2 microtransport เป็นการแพร่ผ่านรู macropore (รูขนาดใหญ่) ไปยัง micropore (รูขนาดกลาง) และ submicropore (รูขนาดเล็ก) และขั้นที่ 3 เกิดการดูดซับขึ้นที่ผิวของเม็ดคาร์บอนในรู macropore และ micropore โดยการดูดซับต้องอาศัยแรงทางกายภาพหรือดูดซับด้วยแรงทางเคมี

2.5.7 กระบวนการอิเล็กโตรโคเอกูเลชั่น (electrocoagulation)

เป็นกระบวนการโคเอกูเลชั่นฟล็อคกูเลชั่น (coagulation-flocculation) ที่เกิดจากการผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วอิเลคโทรดที่สามารถกัดกร่อนได้ เช่น อลูมิเนียม เหล็ก โดยอะตอมของโลหะที่เป็นขั้วไฟฟ้า จะแตกตัวเป็นไอออนในสารละลายที่ขั้วแอโนด (Al^{3+}, Fe^{3+}) และไอออนนี้ทำหน้าที่เป็นสารรวมตะกอน (coagulant) ในสารละลาย แทนการใช้สารเคมีในกระบวนการโคเอกูเลชั่นทั่วไป แสดงไว้ดังสมการที่ (2.12)-(2.15)

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้ว anode มีดังต่อไปนี้

สำหรับอิเลคโทรดอลูมิเนียม $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ (2.12)

สำหรับอิเลคโทรดเหล็ก $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ (2.13)

$Fe \rightarrow Fe^{3+} + 3e^-$ (2.14)

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้ว catrode มีปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจน ดังต่อไปนี้

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^- \quad (2.15)$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสารละลาย ทั้ง Al^{3+} และ Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นทำหน้าที่เป็นสารรวมตะกอนสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ หรือ OH^- ที่เกิดจากขั้วแอโนดในสารละลายต่อไปเช่นเดียวกับระบบการสร้างตะกอน-รวมตะกอนทางเคมี ดังสมการที่ (2.16)

$$Al^{3+} + 3OH^- \rightarrow Al(OH)_3 \quad (2.16)$$

กระบวนการนี้สามารถใช้บำบัดโลหะหนักได้ เนื่องจากมีไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด ทำให้เกิดตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ และถูกดูดติดหรือดักจับด้วยฟล็อกของพอลิไฮดรอกไซด์ของอลูมิเนียมหรือเหล็ก เกิดการรวมตะกอนและแยกตัวออกมาจากน้ำได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6 การดูดซับ (adsorption)

2.6.1 กระบวนการดูดซับ (adsorption process)

การดูดซับ (adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิว ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนพื้นผิวที่เป็นที่เกาะจับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) การดูดซับด้วยของแข็ง เช่น ถ่านกัมมันต์ ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของของแข็งนั้น การดูดซับมี 2 กระบวนการ คือ กระบวนการทางกายภาพ (physisorption) และการดูดติดทางเคมี (chemisorption) ทั้งสองกระบวนเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในของเหลวเข้ามาจับกับผิวของของแข็งที่

เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็ง สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลในของเหลวได้ (พิสุทธิ์ เพียรมนกุล, 2557)

2.6.2 กลไกการดูดซับ (adsorption mechanism)

โดยทั่วไปกลไกการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

2.6.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (physical-sorption)

เกิดจากผลต่างของพลังงานและแรงดึงดูดทางไฟฟ้า โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับชนิดนี้เป็นแบบหลายชั้น คือ แต่ละชั้นของโมเลกุลจะเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลที่เกิดก่อนหน้านี้ โดยที่จำนวนชั้นที่เกิดจากเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารที่ปนเปื้อนในของเหลวการผันกลับ (reversibility) ของการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับ และโมเลกุลที่ถูกดูดซับถ้าหากแรงดึงดูดน้อยจะทำให้เกิดการหลุดออกไปของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ (desorption)

2.6.2.2 การดูดซับทางเคมี (chemical-sorption)

เกิดขึ้นเมื่อปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับและสารดูดซับทำให้เกิดเป็นสารประกอบเคมีขึ้น กระบวนการนี้จะเป็นแบบชั้นเดียว และไม่สามารถผันกลับได้เพราะว่าพลังงานจะถูกใช้ไปในการสร้างสารประกอบทางเคมีขึ้นที่พื้นผิวที่ถูกเกาะจับ ในทางทฤษฎีเราสามารถแบ่งกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1) การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารที่ต้องการแยก (adsorbate) จะเข้าถึงสารดูดซับ (adsorbent) ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มอยู่ (liquid film) โดยโมเลกุลของสารดังกล่าวจะแทรกตัวผ่านชั้นของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ และเกี่ยวข้องกับกลไกการแพร่ของโมเลกุล (molecular diffusion) และการถ่ายเทมวลสารแบบพา (convection mass transfer)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) การแพร่ภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารที่ต้องการแยกจะแทรกตัวหรือแพร่เข้าถึงช่องว่างภายในสารดูดซับ (pore diffusion) เพื่อให้เกิดการดูดซับ โดยในขั้นนี้จะเกี่ยวข้องกับกลไกการแพร่ของโมเลกุลในระบบของแข็ง (diffusion in solids)

3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของสารที่ต้องการแยกดูดติดที่ผิวของสารดูดซับ เป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ผ่านมา

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและเคมี ดังตารางที่ 2.3

การดูดซับในระบบบำบัดน้ำเสีย นอกจากกลไกการดูดซับทางกายภาพและเคมีแล้ว อาจเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ด้วย โดยจัดเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลสาร

(mass transfer) ของโมเลกุลที่ต้องการกำจัดซึ่งอยู่ในรูปของประจุ (ไอออน) โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุด้วยการเกาะติดบนผิวของสารตัวกลางที่เรียกว่า สารแลกปลี่ยนไอออน ในขณะเดียวกันก็เกิดการปลดปล่อยประจุจากสารแลกเปลี่ยนไอออนทดแทน กลไกการแลกเปลี่ยนไอออนจะใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับโดยสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ 1) การแพร่ภายนอกประจุ (external diffusion) เป็นกลไกที่ไอออนหรือประจุที่ต้องการแยกจะเข้าถึงสารแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งมีเฟสของเหลวห่อหุ้มอยู่ (liquid film) โดยประจุดังกล่าวจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นของเหลวด้วยกลไกการแพร่ (film diffusion) 2) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) โดยเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างประจุชนิดเดียวกันจากสารที่ต้องการแยกและจากสารแลกเปลี่ยนไอออน และ 3) ปฏิกิริยาพื้นผิวหรือการเกาะติด (surface reaction) เป็นกลไกที่ประจุของสารที่ต้องการแยกดูดติดที่ผิวของสารแลกเปลี่ยนไอออน โดยสารแลกเปลี่ยนไอออนทุกชนิดเมื่อใช้ไปในระยะหนึ่งจะหมดอำนาจ แต่สามารถเรียกอำนาจกลับคืนมาได้อีกครั้งโดยการ generation ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูที่สภาพแตกต่างกัน

2.6.3 กระบวนการถ่ายโอนมวลในระบบดูดซับ (mass transfer processes)

การทำงานของระบบดูดซับสาร อาศัยการสัมผัสระหว่างวัฏภาคของไหลและอนุภาคของสารดูดซับ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลซึ่งอยู่ภายนอกอนุภาคไปยังตำแหน่งของการดูดซับซึ่งอยู่ภายในโครงสร้างรูพรุนของวัสดุดูดซับ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้ แสดงดังรูปที่ 2.5 (Eckenfelder, 1981)

1) การเคลื่อนที่ของโมเลกุล (bulk transport) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับซึ่งอยู่ภายในของเหลวถูกส่งไปยังพื้นผิวของของเหลวที่ห่อหุ้มวัสดุดูดซับ

2) การเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์ม (film transport) โมเลกุของสารที่ถูกดูดซับที่อยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของวัสดุดูดซับ ด้วยกลไกการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางของของไหลที่อยู่ติดกับอนุภาคของสารดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

3) การเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดจากการถ่ายโอนมวลสารโดยกลไกของการแพร่ของสารถูกดูดซับจากพื้นผิวด้านนอกของอนุภาคลึกเข้าไปภายในรูพรุนของอนุภาคซึ่งโดยทั่วไปการแพร่จะมี 2 กลไกล ได้แก่ การแพร่ไปตามช่องว่างของรูพรุนภายในเรียกว่า pore diffusion และการแพร่ไปตามพื้นผิวของรูพรุน เรียกว่า surface diffusion ซึ่งขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

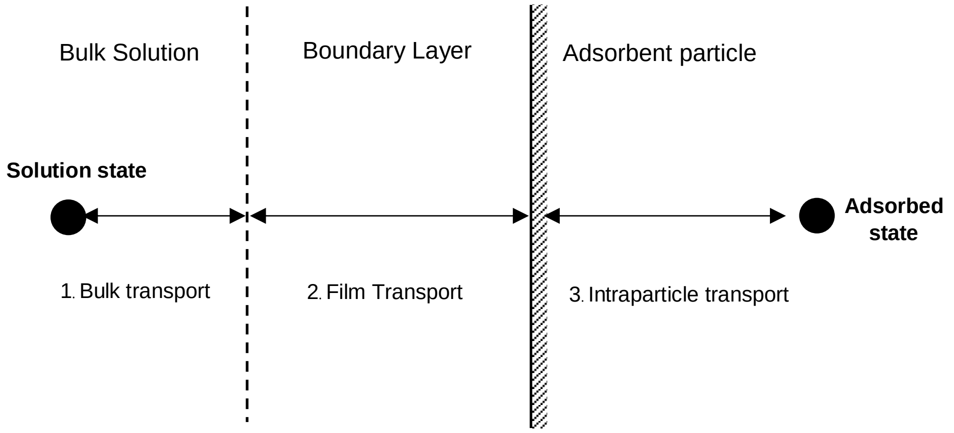
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและเคมี

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ (อยู่ในช่วง 20-40 kJ/mol และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของการควบแน่นของสารถูกดูดซับที่เป็นแก๊ส)	สูง (มากกว่า 80 kJ/mol เทียบเท่าค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมี)
2. สภาพจำเพาะของการดูดซับ	ไม่เจาะจง สารดูดซับหนึ่ง ๆ สามารถดูดซับสารได้หลายชนิด	มีความเจาะจงสูง เลือกดูดซับสารเป็นบางชนิดขึ้นกับสภาพเคมีพื้นผิว
3. ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้น และไม่มีการแตกตัวของสารดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้นและอาจเกิดการแตกตัวของสารถูกดูดซับได้
4. อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า
5. แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ถึงแม้อาจเกิดสภาพมีขั้วของสารดูดซับจากการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ
6. สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับต่ำ	การดูดซับเป็นแบบไม่ผันกลับและมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสูง
7. อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็วและถูกควบคุมโดยความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของสารดูดซับ	ช้าและถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวภายในของสารดูดซับ

(ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลในกระบวนการดูดซับสาร (Eckenfelder, 1981)

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่ง ๆ การขนส่งฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าหากพบว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

2.6.4 ประเภทของสารดูดซับ

2.6.4.1 สารอนินทรีย์ (inorganic adsorbent)

พื้นที่ผิวของสารดูดซับชนิดนี้มีค่าต่ำ คือ อยู่ในช่วง 200-200 m^2/g และมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลหรือคอลลอยด์เพียงไม่กี่ชนิด ซึ่งเมื่อใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการใช้ความร้อน ตัวอย่างสารดูดซับประเภทนี้ ได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ เช่น $Mg(OH_2)$ ถ่านกระดูก ซีโอไลท์ และ activated silica

2.6.4.2 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

จัดเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงมาก คือ อยู่ในช่วง 6000-1,000 m^2/g ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับได้เป็นอย่างดี ถ่านกัมมันต์จึงได้รับความนิยมในการใช้อย่างแพร่หลาย และด้วยคุณสมบัติในการดูดซับมลสารได้หลากหลายและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลายกระบวนการต่าง ๆ ทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ถ่านกัมมันต์มันมี 2 แบบ ได้แก่ แบบเกล็ด (granular) และ แบบผง (powdered)

2.6.4.3 สารอินทรีย์สังเคราะห์ (synthesized organic resin)

มีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 300-500 m^2/g โดยทั่วไปมักสร้างขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และมีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ (regeneration) สูงกว่าการใช้สารดูดซับประเภทอื่น ๆ โดยใช้สารราคาถูก เช่น เกลือแกง

2.6.5 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

1) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (size and surface area) โดยอัตราเร็วในการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ ดังนั้น สารดูดซับชนิดผง (powder) จึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าชนิดเกล็ด (granular) ส่วนพื้นที่ผิวของสารดูดซับจะมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับ โดยพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าชนิดที่มีพื้นที่ผิวน้อย ในขณะที่ขนาดจะมีผลต่อพื้นที่ผิวน้อยเนื่องจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ได้มาจากโครงภายในมากกว่าพื้นที่ภายนอก

2) ความสามารถในการละลายและขนาดของสารที่ถูกดูดติด (solute solubility and size) กล่าวได้ว่าขนาดของสารหรือโมเลกุลที่อยู่ในสารละลายมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในโพรงของสารดูดซับ โดยการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเมื่อสารถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของสารดูดซับ

3) อุณหภูมิ (temperature) การดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (exothermic reaction) ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยา นอกจากนี้อุณหภูมิจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิซึ่งโดยปกติจะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงอีกทางหนึ่งด้วย

4) ความปั่นป่วน (turbulence or mixing) อัตราเร็วในการดูดซับเกิดขึ้นกับการแพร่ภายนอก (ฟิล์ม) และการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับ ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำ (ของไหล) ที่อยู่รอบสารดูดซับจะมีความหนาแน่นและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาผิวของสารดูดซับ ดังนั้น การแพร่ภายนอกก็เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงข้าม ถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ๆ ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราการเร็วการดูดซับแทน

5) ค่าพีเอช (pH value) ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดซับเนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถถูกดูดซับได้ค่อนข้างแข็งแรงเมื่อเปรียบเทียบกับการดูดซับไอออนอื่น ๆ นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนแล้วยังมีผลต่อการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ด้วย

2.6.6 สมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium)

ในกระบวนการดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลายในสารละลายมีค่าสูงต่อจากนั้นตัวถูกละลายจะค่อย ๆ สัมผัสกับผิวของตัวดูดซับ ส่วนหนึ่งจะค่อย ๆ แพร่เข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ในระยะนี้อัตราการดูดซับจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันอาจมีอนุภาคของตัวดูดซับหลุดออกจากผิวของตัวดูดซับ กระบวนการนี้เรียกว่า การคายซับ (desorption) ในระยะแรกอัตราการดูด

ซับมีค่าสูงกว่าอัตราการคายซับ เมื่อมีสารถูกดูดซับที่ผิวของของแข็งมากขึ้นทำให้มีช่องว่างและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับน้อยลงอัตราการดูดซับจะค่อย ๆ ลดลง ในที่สุดความเข้มข้นของตัวดูดซับในสารละลายมีค่าคงที่ แสดงว่าเกิดสมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) ที่สภาวะนี้จะมีกระบวนการดูดซับและคายซับเกิดขึ้นตลอดเวลาในอัตราที่เท่ากัน ถือว่าระบบอยู่ในภาวะสมดุล ปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่สมดุลหนึ่ง ๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะและความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ซึ่งเป็นแรงขับ (driving force) ให้สารเคลื่อนไปยังตัวดูดซับหรือหลุดจากการดูดซับ โดยทั่วไปสามารถหาปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิคงที่ได้จากไอโซเทอร์มการดูดซับ (isotherm adsorption) (พรรษวรรณ ศรีนาค, 2556)

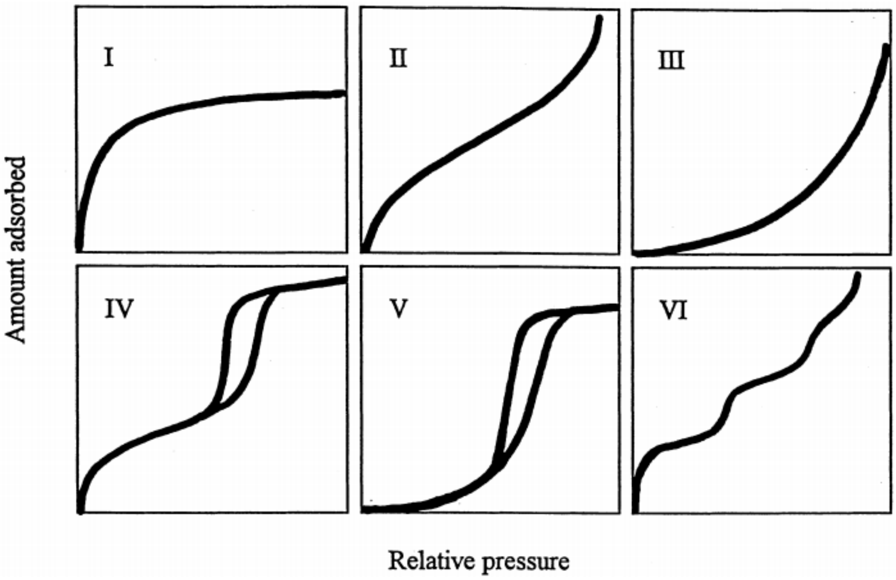
รูปร่างไอโซเทอร์มการดูดซับ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ และปริมาณของสารดูดซับ โดยรูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับของ IUPAC มี 6 แบบดังรูปที่ 2.6

แบบ I แสดงถึงการดูดซับที่มีพื้นที่จำกัด มักใช้อธิบายสำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous)

แบบ II และ III ใช้อธิบายสำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (macroporous) มีปฏิกิริยาการดูดซับที่แข็งแรงและอ่อนลงตามลำดับ

แบบ IV และ V แสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และหลายชั้น (multilayer)

แบบ VI แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้มากกว่า 1ครั้ง



รูปที่ 2.6 รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับตามของ IUPAC (Donohue and Aranovich, 1998)

โดยมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับที่เกิดขึ้น แบบจำลองที่นิยมใช้ ได้แก่ ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และ ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) รายละเอียด ดังนี้

2.6.6.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

สมมติฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ คือ โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นที่ผิวของสารดูดซับที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous surface) และมีจำนวนพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับที่จำกัด (Langmuir, 1918) สมการที่ (2.17)

$$q_e = \frac{q_{mx} k_L C_e}{1 + k_L C_e} \qquad (2.17)$$

เมื่อ q_e = ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุล (mg/g)

q_{mx} = ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ยังเหลืออยู่ในสารละลายที่ภาวะสมดุล (mg/l)

k_L = ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (l/mg)

จากสมการที่ 2.17 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง ดังสมการที่ (2.18)

$$\frac{C_e}{q} = \left(\frac{1}{k_L q_{mx}}\right) + \left(\frac{C_e}{q_{mx}}\right) \qquad (2.18)$$

2.6.6.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิช (Freundlich isotherm)

สมมติฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช คือ การดูดซับในระบบของเหลวหลายโมเลกุลหรือหลายชั้นของสารถูกดูดซับบนตัวกลาง (multilayer) ที่มีลักษณะพื้นผิวต่างกัน (homogenous surface) (Freundlich, 1906) ดังสมการที่ (2.19)

$$q_e = k_F C_e^{1/n} \qquad (2.19)$$

เมื่อ q_e = ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุล (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ยังเหลืออยู่ในสารละลายที่ภาวะสมดุล (mg/l)

k_F = ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของฟรุนด์ลิช (mg/g)

$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ

จากสมการที่ 2.19 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง ดังสมการที่ (2.20)

$$\log q_e = \log k_F + \left(\frac{1}{n}\right)\log C_e \qquad (2.20)$$

2.6.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetics)

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย คือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order) และอันดับสอง (pseudo-second order) ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ รายละเอียด ดังนี้

2.6.7.1 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order)

สมมติฐานของสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม คือ อัตราการดูดซับขึ้นกับความสามารถในการดูดซับของของแข็ง สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren (Lagergren, 1898) ดังสมการที่ (2.21)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \qquad (2.21)$$

เมื่อ q_t = ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (mg/g)

q_e = ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุล (mg/g)

k_1 = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (1/min)

t = เวลาใด ๆ (min)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.21) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ จนถึง $q_t = q_t$ และเขียนเป็นสมการเส้นตรงจะได้ดังสมการที่ (2.22)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303}t \qquad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.22) สามารถจัดรูปสมการให้ q_t อยู่ในรูปฟังก์ชันของ t ได้ดังสมการ (2.23)

$$q_t = q_e - \frac{q_e}{10^{\frac{k_1}{2.303}t}} \qquad (2.23)$$

2.6.7.2 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second order)

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับสำหรับอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่นิยมอีกสมการหนึ่ง คือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ใช้อธิบายการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้ดังสมการที่ (2.24) (Ho, 2006)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2\left(q_e - q_t\right)^2 \qquad (2.24)$$

เมื่อ q_t = ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (mg/g)

q_e = ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุล (mg/g)

k_2 = ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (g/mg/min)

t = เวลาใด ๆ (min)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.24) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ จนถึง $q_t = q_t$ และเขียนเป็นสมการเส้นตรงจะได้ดังสมการที่ (2.25)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e}t \qquad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.25) สามารถจัดรูปสมการให้ q_t อยู่ในรูปฟังก์ชันของ t ได้ดังสมการ (2.26)

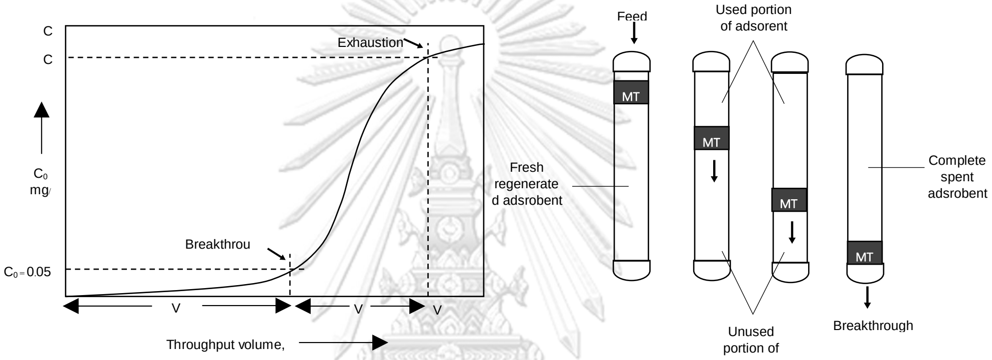
$$q_t = \frac{k_2 q_e^2}{1 + k_2 q_e t}t \qquad (2.26)$$

2.6.8 ระบบดูดซับแบบคอลัมน์ (column adsorption)

การประยุกต์ใช้กระบวนการดูดซับสารในทางอุตสาหกรรมสำหรับกระบวนการแยกสาร (separation) และการทำบริสุทธิ์ (purification) ส่วนใหญ่มักใช้ระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง (fix bed adsorption) หรือเรียกว่า ระบบดูดซับแบบคอลัมน์ (column adsorption) การทำงานของระบบเริ่มจากการบรรจุอนุภาคของสารดูดซับลงในคอลัมน์และป้อนของไหลซึ่งประกอบด้วยสารถูกดูดซับ (adsorbate) ที่ต้องการแยก ให้ไหลสัมผัสกับชั้นอนุภาคสารดูดซับอย่างต่อเนื่อง การดูดซับจะเกิดเป็นบริเวณ ตั้งแต่ทางเข้าคอลัมน์จนถึงทางออก โดยที่คอลัมน์จะเกิดการอิ่มตัวเนื่องจากการดูดซับเมื่อเวลาผ่านไป และขยายบริเวณกว้างขึ้นจนเกิดสภาวะอิ่มตัวตลอดทั่วทั้งคอลัมน์ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารถูกดูดซับตรงทางออกเกินระดับที่กำหนดหรือยอมรับได้ ทำให้การทำงานของระบบดูดซับต้องยุติลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลักษณะการทำงานของระบบจะเห็นว่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับจะขึ้นกับตำแหน่งและเวลา โดยที่การกระจายความเข้มข้นของสารถูกดูดซับจะขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ รูปร่างของไอโซเทอร์มการดูดซับ ความต้านทานการถ่ายโอนมวลและความร้อนทั้งภายในและภายนอกอนุภาคการผสมตามแนวแกน ดังนั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลในการออกแบบที่ถูกต้อง รวมถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบแบบคอลัมน์ตามที่ต้องการ จึงต้องทำการทดลองโดยประยุกต์ใช้การทดลองในคอลัมน์ขนาดเล็กเพื่อวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นขาออก และปริมาตรหรือระยะเวลาเดินระบบ กล่าวคือ การสร้าง breakthrough curve ดังรูปที่ 2.7



(ก) (ข)

รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟ breakthrough curve (ก)
และกลไกการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ (ข) (พิสุทธิ์ เพียรมลกุล, 2557)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ กล่าวได้ว่าความยาวของคอลัมน์จะพบส่วนของการถ่ายเทมวลสารจากกระบวนการดูดซับ เรียกว่า mass transfer zone (MTZ) เป็นส่วนที่มีการเคลื่อนที่จากเฟสของสารที่ต้องการแยก (ของเหลว) ไปยังส่วนของสารดูดซับ โดยที่ส่วน MTZ จะเคลื่อนที่ลงมาด้านล่างของคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.9 จนกระทั่งเมื่อมีองค์ประกอบของสารบางส่วนที่เคลื่อนที่เลยความหนาชั้นตัวกลางไป จะส่งผลต่อความเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มข้นขาออก (เนื่องจากมีการใช้งานสารตัวกลางจนถึงสภาวะสมดุลหรือไม่สามารถดักจับมลสารอื่น ๆ ได้อีกต่อไป) โดยที่สภาวะ (ระยะเวลา) ดังกล่าวเป็นจุดเริ่มต้นของ breakthrough curve (break point time) จากนั้นความเข้มข้นขาออกจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งเท่ากับความเข้มข้นขาเข้า สอดคล้องกับช่วงเวลาที่สารตัวกลางในคอลัมน์ที่ไม่มีความสามารถในการดูดซับได้ (exhaustion time) อีกต่อไป

สำหรับ breakthrough curve ได้ใช้แบบจำลองต่าง ๆ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 และเวลาเดินระบบ โดยแบบจำลองที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ แบบจำลองของโทมัส (Thomas model) สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.27 (Thomas, 1948)

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1+\exp\left(\frac{k_{Th}q_0 m}{Q} - k_{Th}C_0 t\right)} \tag{2.27}$$

เมื่อ k_{Th} คือ ค่าคงที่อัตราโทมัส (มล./มก. นาที)

q_0 คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ภาวะสมดุล (มก./ก.)

m คือ น้ำหนักวัสดุดูดซับในคอลัมน์ (กรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำขาเข้า (มก./ล.)

C คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของน้ำขาออก (มก./ล.)

Q คือ อัตราการไหล (มล./นาที)

t คือ เวลาใด ๆ

จากสมการที่ 2.27 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ ดังสมการที่ 2.30

$$In\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_{Th}q_0 m}{Q} - k_{Th}C_0 t \tag{2.28}$$

2.7 การดูดติดบนพื้นผิวไฮดรัสโลหะออกไซด์

2.7.1 ลักษณะของไฮดรัสโลหะออกไซด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ไฮดรัสโลหะออกไซด์ (hydrous metal oxide) เป็นของแข็งซึ่งประกอบด้วยไอออนโลหะประจุบวกตั้งแต่ 1 ขึ้นไปที่รวมตัวกับอนุภาคของน้ำ คือออกซิเจน (O) และไฮโรเจน (H) ซึ่งรวมถึงสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชันออกไซด์ (-O) ไฮดรอกไซด์ (-OH) และออกซี่ไฮดรอกไซด์ (-OOH) โดยจะแสดงลักษณะเป็นทั้งกรดและเบสในน้ำ หมู่ ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวหน้าออกไซด์สามารถจับหรือปล่อยโปรตอน ทำให้ออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยาสามารถย้ายโปรตรอนและเกิดประจุบนพื้นผิว โดยไฮดรัสโลหะออกไซด์มีคุณสมบัติที่สำคัญ ได้แก่ พื้นผิวที่มีความเป็นกรด เนื่องจากการมีหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวจะมีความสัมพันธ์ต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น การจับตัวเป็นก้อนและปฏิกิริยาการดูดติด โดยหมู่ไฮดรอกซิลบริเวณพื้นผิวจะเกิดพันธะเคมีกับไอออนโลหะ ดังสมการ ที่ (2.29) และ (2.30)

$$SOH + M^{2+} \leftrightarrow (SO\text{-}M^{2+}) + H^+ \quad (2.29)$$

$$SOH + M^{2+} + H_2O \leftrightarrow (SO\text{-}MOH^{2+}) + 2H^+ \quad (2.30)$$

เมื่อ SOH คือ พื้นผิวไฮดรัสโลหะออกไซด์

$SO\text{-}MOH^{2+}$ คือ สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะออกไซด์กับไอออนประจุบวก

M^{2+} คือ ไอออนประจุบวก 2

H^+ คือ ไฮโดรเจนไอออน

นอกจากนี้ ไฮดรัสโลหะออกไซด์ยังมีคุณสมบัติทางกายภาพเกี่ยวการกระจายตัวของประจุซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมการดูดซับไอออนจากสารละลาย เรียกว่า Zero Point of Charge (ZPC) หรือ Isoeletric Point of the Solid (IEP_s) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการจำแนกลักษณะของตัวดูดซับ โดยใช้ค่าพีเอชเป็นตัวแปรหลัก ZPC เป็นค่าพีเอชที่ประจุบนผิวของของแข็งมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อไฮดรัสโลหะออกไซด์ได้รับ OH^- ในสภาวะเป็นด่าง ทำให้ประจุรวมที่พื้นผิวเป็นลบสามารถดูดซับประจุบวกได้ดี ในทางกลับกันในสภาวะที่เป็นกรด ไฮดรัสโลหะออกไซด์จะได้รับ H^+ ทำให้ประจุรวมที่พื้นผิวเป็นลบสามารถดูดซับประลบได้ดี ดังนั้น ค่าพีเอชจึงเป็นตัวแปรสำคัญในการดูดติดไอออนบวกหรือไอออนลบด้วยไอดรัสโลหะออกไซด์ (Parks, 1965)

2.7.2 การดูดติดผิวไอออนบวกด้วยไฮดรัสโลหะออกไซด์

การดูดติดผิวไอออนบวกด้วยไฮดรัสโลหะออกไซด์จะเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนอย่างรวดเร็ว โดยพื้นผิวไฮดรัสโลหะออกไซด์พร้อมรับไออนจากสารละลาย โดยจะเกิดได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะเคมีและกายภาพของไฮดรัสโลหะออกไซด์ ได้แก่ ส่วนประกอบทางเคมี การกระจายของขนาดอนุภาค ลักษณะรูปร่างของสาร พื้นที่ผิวสัมผัส ความพรุน และปริมาณ เป็นต้น นอกจากนั้นพีเอชยังเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดูดติดไอออนบวกบนผิวไฮดรัสโลหะออกไซด์ โดยจะดูดติดได้ดีที่พีเอชสูง ในทางกลับกันที่พีเอชต่ำจะดูดติดไอออนลบได้ดี

สำหรับกลไกการดูดติดไอออนบวกบนผิวไฮดรัสโลหะออกไซด์ เมื่อโลหะออกไซด์สัมผัสกับน้ำทำให้พื้นผิวเกิดหมู่ไฮดรอกซิลด้วยโปรตอนที่ได้จากโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดติดผิวเอาไว้ โมเลกุลของน้ำจะแตกตัวให้โปรตรอนสามารถจับกับออกซิเจนที่อยู่บนพื้นผิวและสามารถดูดติดผิวน้ำเพิ่มได้อีกกลายเป็นไฮดรอกซิลบนพื้นผิว

2.7.3 การดูดติดผิวไอออนลบด้วยไฮดรัสโลหะออกไซด์

สำหรับการดูดติดผิวไอออนลบยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างแน่ชัด แต่หากพิจารณาการดูดติดผิวจะเป็นการดูดติดผิวที่จำเพาะเจาะจง (specific adsorption) หรือการดูดติดผิวเชิงเคมี (chemical adsorption) ซึ่งการดูดติดผิวนี้เกิดจากแรงดึงดูดยึดแบบไฟฟ้าสถิตย์ หรือแบบคูลอมน์

โดยปริมาณที่ดูดติดผิวไม่จำเป็นต้องมีสมมูลเท่ากับประจุบวกบนผิวสารดูดติดผิว นอกจากนั้นดินที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักจะเกิดการดูดติดผิวไอออนประจุลบได้ดี เช่น CrO_4^{2-}, AsO_4^{3-} และ SeO_4^{2-} เป็นต้น

2.7.4 เหล็กออกไซด์ (iron oxide)

เหล็กออกไซด์เป็นไฮดรัสโลหะออกไซด์ เนื่องจากเป็นของแข็งที่มีส่วนประกอบของไอออนบวกของโลหะรวมอยู่กับธาตุของน้ำ ได้แก่ ไฮโดรเจนและออกซิเจนซึ่งครอบคลุมถึงสารประกอบโลหะที่มีหมู่ฟังก์ชันนั่นเป็นไฮดรอกไซด์ (-OH) ออกซีไฮดรอกไซด์ (-OOH) และออกไซด์ (-O) ที่มีลักษณะทางเคมีของพื้นผิวที่ถูกไฮเดรตได้ง่าย สามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติในดิน ดินเหนียวและตะกอนต่าง ๆ โดยจะเคลือบอยู่บนผิวของแร่ธาตุเหล่านั้น โดยเหล็กออกไซด์มีอยู่ 2 รูปแบบขึ้นอยู่กับจำนวนออกซิเจนที่เกาะอยู่กับเหล็กว่ามากน้อยเพียงใด โดยอยู่ในรูปของสารประกอบเฟอร์รัส (Fe^{2+}) มีสีเขียว เทา หรือน้ำเงิน และสารประกอบเฟอร์ริค (Fe^{3+}) มีสีเหลือง แดง หรือน้ำตาล ในดินส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปของสินแร่ ที่เรียกว่า hematite (Fe_2O_3) และ goethite (FeO(OH)) ซึ่งมีสีส้มโดย goethite เกิดมาจากการสลายตัวของแร่ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ไพไรต์ (pyrite) และ ซิเดอร์ไลต์ (siderite) โดยอาศัยแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดออกซิเดชันจาก Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} (เบญจวรรณ วงศ์ศิริ, 2547) ดังสมการที่ (2.31)-(2.33)

$$\underset{\text{(pyrite)}}{2FeS_2} + 7.5O_2 + 4H_2O \rightarrow \underset{\text{(hematite)}}{Fe_2O_3} + 4H_2SO_4 \quad (2.31)$$

หรือ

$$\underset{\text{(siderite)}}{2FeCO_3} + 0.5O_2 + 2H_2O \rightarrow \underset{\text{(hematite)}}{Fe_2O_3} + 2H_2CO_3 \quad (2.32)$$

จากนั้น

$$\underset{\text{(hematite)}}{Fe_2O_3} + H_2O \rightarrow \underset{\text{(goethite)}}{2FeO(OH)} \quad (2.33)$$

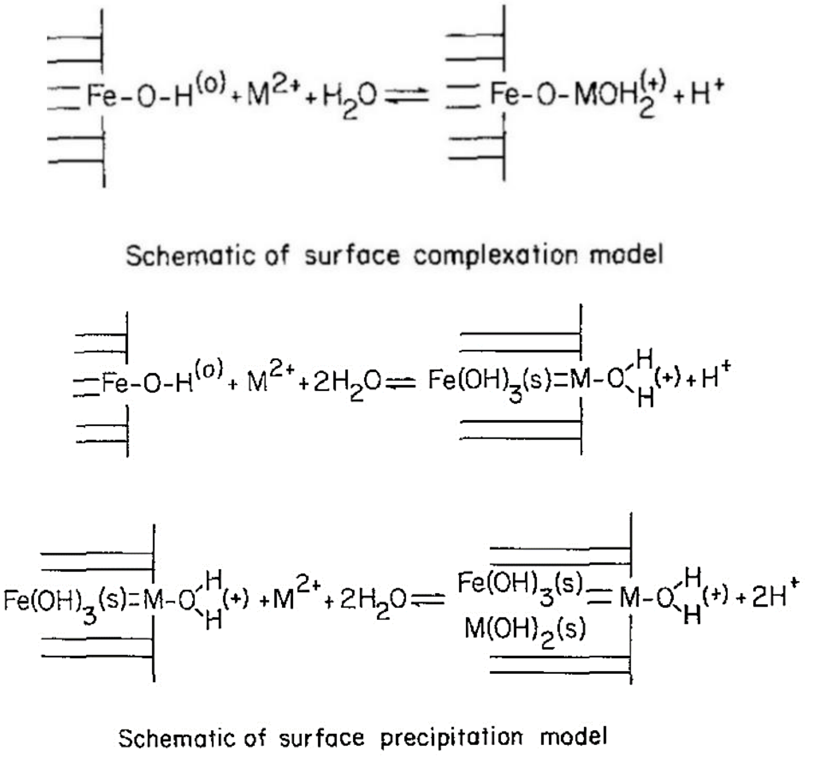
ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ในธรรมชาติ โดยสารประกอบของเหล็กเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของดินและส่งผลอย่างมากกับสีของดินที่ปรากฏ

เหล็กออกไซด์จะขึ้นอยู่ในรูปแบบใดขึ้นอยู่กับสภาวะในการก่อตัว ตัวอย่างเช่น เกอร์ไทต์ (FeO(OH)) และฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) เกิดจากเหล็กที่อยู่ในรูปของออกซิไฮดรอกไซด์และออกไซด์ตามลำดับ ซึ่งเกิดได้จากการตกตะกอนหรือกระบวนการโซลเจล (sol-gel processing) ของสารละลายของเกลือเฟอร์ริค (Fe^{3+}) โดยจะเกิดจากภาวะที่แตกต่างกัน สำหรับ (FeO(OH)) จะเกิดในภาวะที่พีเอชสูงแต่อุณภูมิต่ำ ส่วน Fe_2O_3 จะเกิดในภาวะที่พีเอชต่ำ อุณหภูมิสูง แต่เมื่อพีเอชสูงขึ้นโดยที่อุณหภูมิยังต่ำ เกลือ ferric (Fe^{3+}) หรือสารละลายจะเกิดเป็น amorphous oxide แต่ถ้าให้ความ

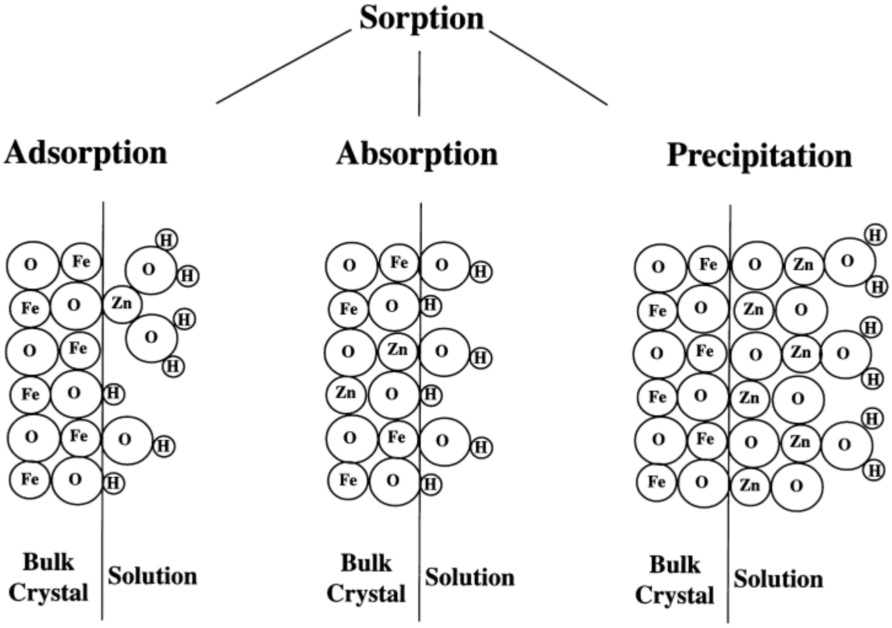
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ร้อนที่ 400-700 องศาเซลเซียส ก็จะทำให้เกิดเป็นฮีมาไทต์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตร โดยมีพื้นที่ผิวลดลงเหลือน้อยกว่า 20 ตารางเมตรต่อกรัม และเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงเฉลี่ยเป็น 100 นาโนเมตร ส่วนแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) เกิดจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Fe_2O_3 หรือจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ $Fe(OH)_2$

สำหรับการเกิดปฏิกิริยาบนผิวสัมผัสของเหล็กออกไซด์ เมื่อเหล็กออกไซด์สัมผัสกับน้ำจะทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นที่บริเวณพื้นผิว ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมที่เป็นได้ทั้งกรดและเบส (amphoteric) กล่าวคือ สามารถรับอิเล็กตรอนหรือปล่อยโปรตรอนก็ได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับโลหะจะมีหลายแบบเรียกโดยรวมว่า sorption ซึ่งมีทั้งการดูดซับหรือการดูดติดผิว (adsorption) การดูดซึม (absorption) และการตกตะกอน (preciptation) ซึ่งการดูดซับโลหะหนักอาจเกิดเพียงกระบวนการเดียว สองกระบวนการ หรือทั้งหมดร่วมกัน ดังรูปที่ 2.8 และ 2.9



รูปที่ 2.8 แผนภาพเปรียบเทียบรูปแบบการเกิดสารประกอบและการตกตะกอนที่พื้นผิวของเหล็กไฮดรอกไซด์สำหรับการดูดซับไอออนบวก (Ferley, Dzombak and Morel, 1985)



รูปที่ 2.9 การดูดซับ (adsorption) การดูดซึม (absorption) และการตกตะกอน (precipitation) ของไอออนสังกะสีบนผิวของเหล็กออกไซด์ (Koretsky, 2000)

2.7.5 อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide)

อลูมิเนียมออกไซด์ที่บริสุทธิ์เป็นผลึกสีขาว 1 โมเลกุลประกอบด้วย อลูมิเนียม (Al) 2 อะตอม และออกซิเจน (O) 3 อะตอม โดยมีสูตรเคมี คือ Al_2O_3 มีชื่อเรียกทั่วไปว่า อลูมิน่า (alumina) ชนิดที่บริสุทธิ์เกือบร้อยละ 100 และที่เกิดในธรรมชาติเรียกว่า Corundum ทั้ง alumina และ Corundum เป็นสารที่มีความแข็งแรงแต่ไม่แข็งเท่าเพชร (Corborundum) ราคาถูกกว่า และใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น Corundum ชิ้นเล็ก ๆ ใช้ประกอบในเครื่องจักรนาฬิกาและเครื่องมืออื่น ๆ Al_2O_3 มีโครงสร้างที่แข็งแรงและต่อกันอย่างซับซ้อน และที่เกิดในธรรมชาติจะอยู่ในแร่ Corundum เป็นผลึกใส ไม่มีสีแต่ที่เกิดเป็นพลอยสีต่าง ๆ เนื่องจากมีออกไซด์ของโลหะที่มีสีปะปนอยู่อยู่ด้วย

อลูมิเนียมออกไซด์ เป็นส่วนประกอบหลักของแร่บอกไซต์ (buaxite) ซึ่งเป็นแร่ที่ไม่บริสุทธิ์และมีส่วนปนะกอบอื่น ๆ ได้แก่ฮีมาไทด์และซิลิกาออกไซด์ ในทางอุตสาหกรรมจะใช้ความร้อนเพื่อทำให้แร่บอกไซต์กลายเป็นอลูมิเนียมออกไซด์บริสุทธิ์ด้วยความร้อน เรียกว่ากระบวนการไบเออร์ (Bayer process) ดังสมการที่ 2.34 และสามารถเปลี่ยนเป็นโลหะอลูมิเนียมผ่านกระบวนการ Hall-Heroult

$$Al_2O_3 + 3H_2O + 2NaOH \rightarrow 2NaAl(OH)_4 \qquad (2.34)$$

โดยฮีมาไทด์จะไม่ละลายที่พีเอชสูง ส่วนซิลิกาออกไซด์จะละลายเป็นซิลิเกต $(Si(OH)_6^{-6}$ และการกรองฮีมาไทด์จะถูกกำจัดออกไป ส่วน $Al(OH)_3$ จะตกตะกอนเมื่อเติมกรดลงไป และซิลิเกตจะเหลืออยู่ในสารละลาย

$$Al(OH)_3 \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2O \qquad (2.35)$$

อลูมิเนียมจะเกิดเป็นออกไซด์ได้ง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำหรือสัมผัสกับความชื้น ดังสมการที่ (2.34)

$$2Al + 3H_2O \leftrightarrow Al_2O_3 + 6H \qquad (2.36)$$

โดยสาเหตุของการเกิดออกไซด์สูงเนื่องจาก 1) โลหะที่มีออกไซด์อยู่แล้ว 2) เกิดจากการสั่นสะเทือนหรือการกวนโลหะเหลวขณะหลอมเหลว 3) เกิดการ turbulent ขณะขนถ่ายและเทหล่อ 4) เศษโลหะมีธาตุแมกนีเซียม (Mg) เจือปนอยู่ในปริมาณมาก 5) บรรยากาศของเตาหลอมมีความชื้นสูง และ 6) หลอมที่อุณหภูมิสูงมากเกินไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เหล็กหรือผงเหล็กช็อตบลาสท์เป็นวัสดุดูดซับ

นคร ศรีธิวงศ์ (2549) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมไอออน (II) ในสารละลายโดยใช้เหล็กออกไซด์ จากสเกลเหล็ก โรงงานผลิตเหล็กรีดร้อนเป็นตัวดูดซับ แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ พีเอชและระยะเวลาเข้าสู่สมดุล พบว่าเหล็กออกไซด์กำจัดแคดเมียมได้ดีที่พีเอช 9.2 และใช้เวลา 36 ชั่วโมงในการเข้าสู่สมดุล โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยร้อยละ 72 และอีกส่วน คือ การทดลองแบบต่อเนื่องโดยการใช้คอลัมน์ดูดซับที่ความสูง 20, 50, 80 เซนติเมตร ผลการทดลอง พบว่า ที่ความสูง 80 เซนติเมตร มีเวลาการใช้งานจนถึงจุดเบรคธรู (breakthough) เท่ากับ 66 ชั่วโมง ปริมาณน้ำที่บำบัดจนมีค่าความเข้มข้นของแคดเมียมเหลืออยู่ไม่เกินมาตรฐาน 50.36 ลิตร ดังนั้น ที่ความสูง 80 เซนติเมตร มีความเหมาะสมทั้งด้านประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดแคดเมียมเท่ากับร้อยละ 98.61 และในด้านค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

Smith (1995) ศึกษาการใช้ผงเหล็กช็อตบลาสท์ (shot blast) ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากการตกแต่งชิ้นงานในอุตสาหกรรมหลอมโลหะมาเป็นตัวดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้แก่ สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) โดยทำการทดสอบไอโซเทอร์มและการอัตราการดูดซับโลหะหนัก พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของฟรุนด์ลิช โดยค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (r^2) มากกว่า 0.90 ทุกการทดลอง จลศาสตร์การดูดซับเกิดขึ้นค่อนข้างรวดเร็วโดยสามารถดูดซับโลหะหนักได้ถึงร้อยละ 90 ภายใน 5-10 ชั่วโมงแรกของการดูดซับสำหรับตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด ส่วนอนุภาคตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะใช้ระยะเวลาที่นานและเข้าสู่สมดุลได้ช้ากว่า เมื่อพิจารณาความพร้อมใช้งานและความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของผงเหล็กช็อตบลาสท์ ที่นำกลับมาใช้ใหม่ก่อให้เกิดประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อมและทางเศรษฐกิจสำหรับภาคอุตสาหกรรมได้

Yang et al. (2009) ศึกษาการกำจัดทองแดง (Cu) ด้วยถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็ก ทำการทดลองแบบกะ ศึกษาผลของพีเอชในช่วง 2-7 พบว่าที่พีเอช 7 ให้ประสิทธิในการบำบัดสูงสุดมากกว่าร้อยละ 90 นอกจากนั้นได้ทำการทดลองแบบคอลัมน์ ใช้วัสดุดูดซับ 30 กรัม โดยควบคุมอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ได้แก่ 5 และ 10 มล./นาที ผลการทดลองพบว่า อัตราการไหล 5 มล./นาที สามารถกำจัด Cu ได้ดีกว่าที่อัตราการไหล 10 มล./นาที

Phuengprasop, Sittiwong and Unob (2011) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้กากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ โดยศึกษาผลของพีเอชในช่วง 1-9 ต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะ 4 ชนิด ได้แก่ ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) และตะกั่ว (Pb) พบว่าเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 1-9 ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นทุกกรณี และได้ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดพบว่าสอดคล้องกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second order)

Zahar, Kusin and Muhammad (2015) ศึกษาการดูดซับแมงกานีส (Mn) ในสารละลายด้วยตะกรันเหล็ก (steel slag) ในการทดลองได้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ เวลาในการสัมผัส ปริมาณตัวดูดซับ ค่าพีเอช และความเข้มข้นเริ่มต้นของแมงกานีส ผลการทดลองพบว่าเวลาสัมผัสเข้าสู่สมดุลที่เวลา 10 ชั่วโมง ปริมาณสารดูดซับ 1 กรัมถือว่าเพียงพอที่จะกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลาย ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับแมงกานีสไปยังตะกรันเหล็กเท่ากับ 6 ความเข้มข้นเริ่มต้นที่สูงกว่าจะนำไปสู่การลดการกำจัดแมงกานีสจากสารละลาย แต่เพิ่มความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นตะกรันเหล็กมีความสามารถในการกำจัดสารละลาย Mn จากน้ำได้มากกว่าร้อยละ 95 การทดลองแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการใช้งานในสถานที่จริง

Sarkar and Biswas (2017) ศึกษาการนำแร่เหล็ก (iron ore slime) ซึ่งเป็นของเสียจากการทำเหมืองแร่มาใช้ประโยชน์ โดยนำมาดูดซับตะกั่ว (Pb) และปรอท (Hg) ในสารละลาย ในการศึกษาได้ทำการทดลองแบบกะโดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ เวลาอุณหภูมิ ความเข้มข้นของโลหะหนัก และพีเอช พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโลหะ 100 มก./ล. การดูดซับเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 และ 180 นาที สำหรับ Pb และ Hg ตามลำดับ โดยอุณหภูมิไม่มีผลต่อการดูดซับ ผลของการเพิ่มความเข้มข้นข้นจาก 50-2,000 มก./ล. ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะทั้ง 2 ขนิด ลดจากร้อยละ 95 เป็น 80 และประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่พีเอช 2 เป็นร้อยละ 99.5 และ 96.5 สำหรับสำหรับ Pb และ Hg ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาการดูดซับแบบคอลัมน์โดยการบรรจุแร่เหล็กไว้ชั้นบนสุด ชั้นกลางเป็นทราย และชั้นล่างสุดเป็นก้อนกรวด เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลและเวลาในการดูดซับ พบว่า อัตราการไหล 15-35 มล./นาที ให้ประสิทธิภาพการกำจัดไม่แตกต่างกันโดยสามารถกำจัดได้เกือบทั้งหมด และใช้เวลา 120 นาทีการดูดซับจึงเข้าสู่สมดุลสำหรับโลหะทั้ง 2 ชนิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัสดุดูดซับที่มีส่วนประกอบของเหล็ก

ผู้วิจัย	วัสดุดูดซับ	สารที่ถูกดูดซับ	ตัวแปรที่ศึกษา	ผลการศึกษา
1. นคร ศรีธิวงศ์ (2549)	เหล็กออกไซด์จากสเกลเหล็ก (10 ก./ล.)	Cd (3 มก./ล.)	พีเอช 2-9	ประสิทธิภาพในการกำจัด Cd เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพีเอชจาก 2-9 เท่ากับร้อยละ 21-42 ดังนั้นพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 9.2
		Cd (3 มก./ล, pH 9.2)	เวลา 0.25-36 ชม.	การดูดซับเข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลา 36 ชม. ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับร้อยละ 72
2. Smith (1995)	ผงเหล็กช็อตบลาสท์ (0.05-0.8 ก./ล.)	Cd (5 มก./ล, pH 4, 5.5, 7)	ไอโซเทอร์ม	Freundlich isotherm: r^2 = 0.98, 0.98 และ 0.99 ที่ pH 4, 5.5 และ 7 ตามลำดับ
		Zn (5 มก./ล, pH 4, 5.5, 7)	ไอโซเทอร์ม	Freundlich isotherm: r^2 = 0.97, 0.99 และ 0.98 ที่ pH 4, 5.5 และ 7 ตามลำดับ
		Pb (5 มก./ล, pH 4, 5.5)	ไอโซเทอร์ม	Freundlich isotherm: r^2 = 0.99 ทั้ง pH 4 และ 5.5
3. Yang et al. (2009)	ถ่านกัมมันต์เคลือบเหล็ก	Cu (5 มก./ล, pH 4.5)	อัตราการไหล 5 และ 10 มล./นาที	ที่อัตราการไหล 5 มล./นาที สามารถกำจัดทองได้ดีกว่าที่ 10 มล./นาที โดยสามารถกำจัดทองแดงให้มีค่า C/C_0 = 0 ได้เป็นระยะเวลา 5 และ 60 นาที และ breakthough time เท่ากับ 60 และ 360 นาที สำหรับอัตราการไหล 5 และ 10 มล./นาที ตามลำดับ
4. Phuengprasop et al. (2011)	กากตะกอนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ (1 ก./ล.)	Cu และ Cd (20 มก./ล) Ni และ Pb (30 มก./ล)	พีเอช 1-9	ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นทุกกรณีเมื่อเพิ่มพีเอชจาก 1-9 โดยภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด Cd และ Ni เท่ากับ 7 ส่วน Cu และ Pb เท่ากับ 6 และ 5 ตามลำดับ
			จลนศาสตร์	pseudo-second order: r^2 > 0.99 ทุกกรณี โดยความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 13.1, 7.9, 14.2 และ 34.1 สำหรับ Cu, Cd, Ni และ Pb ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผู้วิจัย	วัสดุดูดซับ	สารที่ถูกดูดซับ	ตัวแปรที่ศึกษา	ผลการศึกษา
5. Zahar et al. (2015)	ตะกรันเหล็ก (steel slag)	Mn (30 มก./ล)	เวลา 0-12 ชม.	2 ชม. แรกความเข้มข้นของ Mn ลดลงอย่างรวดเร็วเหลือ 10 มก./ล และเข้าสู่สมดุลภายใน 10 ชม.
			ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1-2 ก./ล.	ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.37-97.37 เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจาก 0.1-2 ก./ล.
			พีเอช 3-8	ประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าร้อยละ 93 ทุกช่วงพีเอชโดยการกำจัดสูงสุดที่ pH 6-7 เท่ากับร้อยละ 98
			ความเข้มข้นเริ่มต้น 5-100 มก./ล	เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 5-100 mg/l ทำให้ประสิทธิภาพลดลงจากร้อยละ 100 เป็นร้อยละ 40
6. Sarkar and Biswas (2017)	แร่เหล็ก (40 ก./ล.)	Pb และ Hg (100 มก./ล, pH 7)	เวลา 0-240 นาที	เข้าสู่สมดุลภายใน 120 (ร้อยละร้อย) และ 180 นาที (ร้อยละ 90) สำหรับ Pb และ Hg ตามลำดับ
		Pb และ Hg (100 มก./ล, pH 7)	ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1-10 ก./ล.	ปริมาณวัสดุดูดซับ 4 ก./ล. เพียงพอสำหรับการดูดซับ ประสิทธิภาพการกำจัดเป็นร้อยละ 22-100 สำหรับ Pbและร้อยละ 10-90 สำหรับ Hg
		Pb และ Hg (5 มก./ล, pH 7)	อุณหภูมิ 10-40 °C	ประสิทธิภาพการกำจัดเป็นร้อยละ 92-99 ทุกช่วงอุณหภูมิ ดังนั้นอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด
		Pb และ Hg	พีเอช 2-10	ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่พีเอช 2 ทั้ง Pb และ Hg
		Pb และ Hg	ความเข้มข้นเริ่มต้น 50-2,000 มก./ล	ทั้ง Pb และ Hg ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงจากร้อยละ 95 เป็น 80 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 50 เป็น 2,000 มก./ล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้อลูมิเนียมหรือตะกรันอลูมิเนียมเป็นวัสดุดูดซับ

Alvarez-Ayuso, Garcia-Sanchez and Querol (2007) ศึกษาการดูดซับโครเมียม (Cr^{6+}) จากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplating) ด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ ทำการทดลองแบบกะ สำหรับสารละลายสังเคราะห์ได้ศึกษาผลของเวลาในการดูดซับตั้งแต่ 0.5-48 ชั่วโมง พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มก./ล. ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลเพียง 30 นาที และที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 มก./ล. ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลถึง 24 ชั่วโมง และที่พีเอช 3-6 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียง และสำหรับน้ำเสียจริงจากกระบวนการชุบโลหะได้ศึกษาผลของเวลาในการดูดซับ พบว่าผลการทดลองมีแนวโน้มไปในลักษณะเดียวกับสารละลายสังเคราะห์ ส่วนผลของปริมาณตัวดูดซับได้ศึกษาในช่วง 0.2-10 กรัมต่อลิตร พบว่าที่ความเข้มข้นของโครเมียม 57, 119 และ 223 มก./ล. ใช้ปริมาณตัวดูดซับเพียง 1, 2 และ 5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ สามารถกำจัดโครเมียมได้ทั้งหมด จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าอลูมิเนียมออกไซด์สามารถวัสดุดูดซับที่ดีสำหรับกำจัดโครเมียมในระบบบำบัดน้ำเสียได้

Nadaroglu, Kalkan and Demir (2010) ศึกษาการกำจัดทองแดงด้วย red mud ซึ่งเป็นของเสียที่มีลักษณะเป็นตะกอนสีแดงจากการผลิตอลูมิเนียม ทำการทดลองแบบกะโดยศึกษาผลของเวลา พีเอช อุณหภูมิ ปริมาณวัสดุดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง พบว่าทุกปัจจัยมีผลต่อการกำจัดทองแดง เมื่อเพิ่มเวลา พีเอชอุณหภูมิ และปริมาณวัสดุดูดซับทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนลิชด์ ผลการศึกษาสอดคล้องกับทั้งสองไอโซเทอร์ม แสดงให้เห็นว่า red mud เป็นของเสียที่สามารถกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลาย มีแนวโน้มในการนำไปใช้และสามารถลดต้นทุนในการดำเนินงานได้

Sarangi et al. (2012) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม (Cd) ด้วยตะกรันอลูมิเนียม โดยศึกษาอิทธิพลของพีเอช เวลาสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพกำจัด พบว่าความแตกต่างของพีเอชเริ่มต้นแสดงให้เห็นว่าตะกรันอลูมิเนียมมีประจุลบอยู่ที่พื้นผิว โดยที่พีเอชต่ำ มีปริมาณ H^+ มาก Cd จะถูกดูดซับได้น้อยกว่าที่พีเอชสูงซึ่งมีที่ OH^- พื้นผิวสูง ในการทดลองใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่ 120 นาที และผลจากการความเข้มข้นเริ่มต้น พบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 10-15 มก./ล. ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง

Tsakiridis (2012) ศึกษาลักษณะและการใช้ประโยชน์ตะกรันเกลืออลูมิเนียม (aluminium salt slag) ซึ่งเกิดจากอุตสาหกรรมการหลอมอลูมิเนียม จัดเป็นของเสียที่เป็นพิษและอันตราย โดย

ตะกรันที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตที่มี Al เป็นส่วนประกอบมากกว่าร้อยละ 45 จะเรียกว่า "skimming" ถ้าน้อยกว่าจะเรียกว่า "dross" โดยที่ aluminium dross อาจะเป็นแบ่งเป็น white dross และ black dross โดยปกติแล้ว black dross จะประกอบไปด้วย โลหะอลูมิเนียม (ร้อยละ 10-20) เกลือผสมที่ช่วยในการหลอม (ร้อยละ 40-55) และอลูมิเนียมออกไซด์ (ร้อยละ 20-50) และจากการศึกษาถึงการใช้ประโยชน์ของตะกรันเกลืออลูมิเนียมเหลือทิ้งพบว่า สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับได้ เนื่องจากของเสียชนิดนี้ มีส่วนผสมของออกไซด์ ซึ่งมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวสูงและสามารถกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้หลายชนิด

Gil, Albeniz and Korili (2014) ศึกษาการบำบัดโลหะ 4 ชนิด ได้แก่ ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ด้วยตะกรันเกลือจากการหลอมอลูมิเนียม โดยศึกษาผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการกำจัดในช่วง 0-1500 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มก./ล. และพีเอชเท่ากับ 4 พบว่าทุกรณีเข้าสู่สมดุลภายใน 2 ชั่วโมง และได้ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ ซึ่งสอดคล้องการสมการ Peudo second order นอกจากนั้นยังศึกษาผลของพีเอชต่อความสามารถในการกำจัดโลหะทั้ง 4 ชนิด พบว่า เมื่อเพิ่มพีเอชจาก 4 เป็น 6 ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 8.2, 6.3, 54.5 และ 10.3 เป็น 11.1, 11.7, 71.7 และ 14.5 สำหรับ Cd, Cu, Pb และ Zn ตามลำดับ

Bhat et al. (2015) ศึกษาการกำจัดไอออนของตะกั่ว (Pb) โดยใช้ γ-Alumina จากการวิเคราะห์ลักษณะของวัสดุดูดแสดงให้เห็นถึงพื้นผิวที่มีรูพรุนสูงซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุดูดซับที่ดี โดยมีพื้นที่ผิว 243 ตร.ม./ก. และขนาดรูพรุน 41 อังสตรอม โดยศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นตะกั่ว และเวลาสัมผัส พบว่าเมื่อเพิ่มพีเอชจาก 2-7 และปริมาณวัสดุดูดซับจาก 0.1-0.5 กรัม ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้น โดยการทดลองเข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลา 35-40 นาทีสำหรับการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น 10-100 มก./ล. และได้อธิบายถึงกลไกในการกำจัดตะกั่วด้วย γ-Alumina ซึ่งเกิดจากกลไกกาตกตะกอนทางเคมีและการดูดซับ

Han et al. (2016) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักด้วยเหล็กประจุศูนย์ (ZVI) และอลูมิเนียมประจุศูนย์ (ZVAl) ทำการทดลองแบบคอลัมน์โดยบรรจุ ZVI 80 กรัม และ ZVAl 40 กรัม ควบคุมอัตราการไหล 1 มล./นาที น้ำเสียเริ่มต้นพีเอช 5.4 ผลการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ Cr, Cd, Ni, Cu และ Zn มากกว่าร้อยละ 99.5 โดยใช้เวลา 6 ชั่วโมง และยังอธิบายถึงกลไกในการกำจัดโลหะซึ่งเกิดจาก 3 กลไก ได้แก่ รีดักชั่น การดูดซับ และการตกตะกอนร่วม

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัสดุดูดซับที่มีส่วนประกอบของอลูมิเนียม

ผู้วิจัย	วัสดุดูดซับ	สารที่ถูกดูดซับ	ตัวแปรที่ศึกษา	ผลการศึกษา
1. Alvarez-Ayuso et al. (2007)	อลูมิเนียมออกไซด์ 2 ก./ล.	Cr^{6+} (150 มก./ล. pH 6)	เวลา 0.5-48 ชม.	ที่ความเข้มข้น 50 และ 150 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าร้อยละ 99 ภายใน 30 นาที และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ
		Cr^{6+} (150 มก./ล. pH 6)	พีเอช 3-9	ความสามารถในการดูดซับสูงสุด คือ พีเอช 3-6
		Cr^{6+} (10-200 มก./ล. pH 6)	ไอโซเทอร์ม	Langmuir isotherm: r^2 = 0.9998 ความสามารถในการดูดซับสูงสุด = 78.1 มก./ก.
2. Nadaroglu et al. (2010)	Red mud (ของเสียจากการหลอมอลูมิเนียม) 100 ก./ล.	Cu (3 มก./ล. pH 5.5)	เวลา 0-250 นาที	การกำจัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 30 นาทีแรก และเข้าสู่สมดุลภายใน 60 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าร้อยละ 90
			พีเอช 2-10	ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพีเอชจาก 2-10 แต่ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะ คือ 5.5 เนื่องจากที่พีเอช >5.5 จะเกิดการตะกอนไฮดรอกไซด์
			อุณหภูมิ 0-90°c	ความสามารถในการบำบัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 0-50°c และคงที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 90°c
			ปริมาณวัสดุดูดซับ 0-300 มก./ล.	ความสามารถในการบำบัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจาก 0-200 มก. โดยความสามารถในการบำบัดเท่ากับ 150 มก./ก. เมื่อใช้ปริมาณวัสดุดูดซับ 200 กรัม และเมื่อเพิ่มถึง 300 มก. การบำบัดเริ่มคงที่
			ไอโซเทอร์ม	Freundlich isotherm: r^2 = 0.99, q_e = 5.40 มก./ก. Langmuir isotherm: r^2 = 0.99, k_f = 1.40 มก./ก.

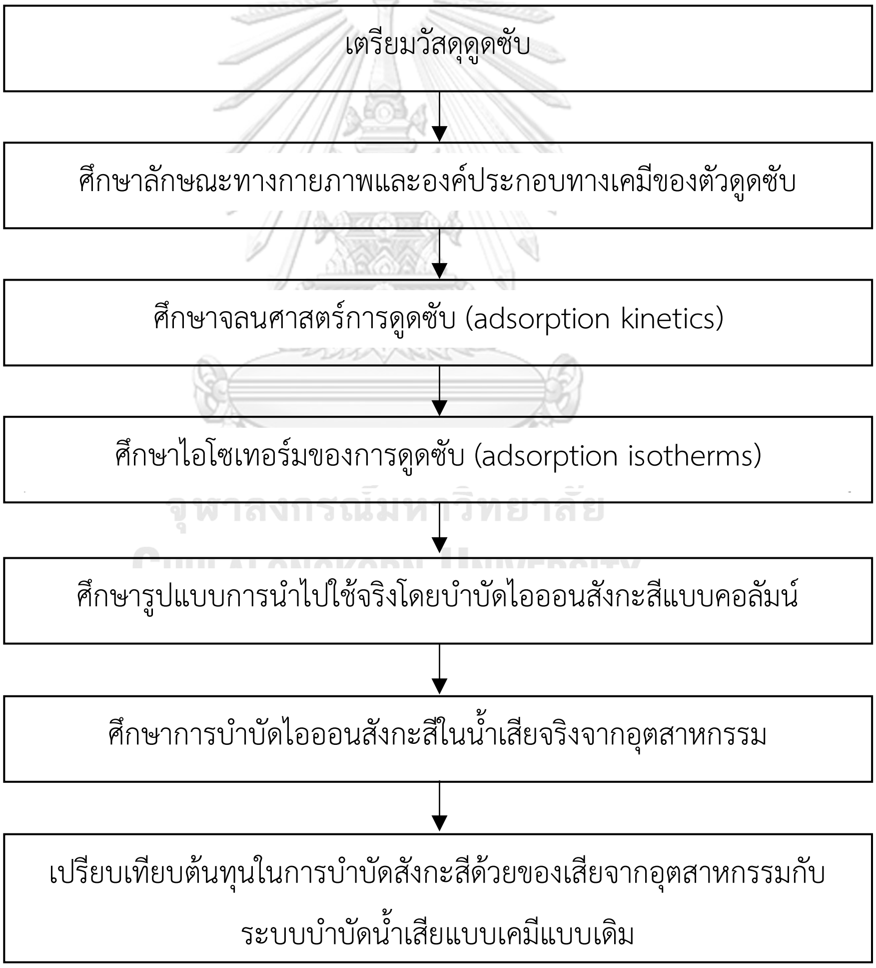
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผู้วิจัย	วัสดุดูดซับ	สารที่ถูกดูดซับ	ตัวแปรที่ศึกษา	ผลการศึกษา
3. Sarangi et al. (2012)	ตะกรัน อลูมิเนียม 5 ก./ล.	Cd (pH 6)	ความเข้มข้นเริ่มต้น 4-50 มก./ล.	เมื่อเพื่อความเช้นข้นเริ่มต้นจาก 4-50 มก./ล. ทำให้ประสิทธฺภาพในการบำบัดลงจากร้อยละ100-60
		Cd (21.86 มก./ล.)	พีเอช 2-9	ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 95 เมื่อเพิ่มพีเอชจาก2-9
4. Gil et al. (2014)	ตะกรันเกลือจากการหลอมอลูมิเนียม	Cd, Cu, Pb, Zn (300 มก./ล. pH 4)	จลนศาสตร์ 0-1500 นาที	Peudo second order: r^2= 0.97 (Cd, Cu) ,0.66 (Pb) และ 0.34 (Zn) โดยการทดลองเข้าสู่สมดุลภายใน 2 ชั่วโมงทุกกรณี
		Cd, Cu, Pb, Zn	พีเอช 4 และ 6	เมื่อเพิ่มพีเอช จาก 4 เป็น 6 ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นทุกกรณีโดยมีค่าเท่า 11.1, 11.7, 71.7 และ 14.5 มก./ล. สำหรับ Cd, Cu, Pb และ Zn ตามลำดับ
5. Bhat et al. (2015)	γ-Alumina (5 ก./ล.)	Pb (100 มก./ล. pH 5)	ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1-0.5 ก.	ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10.89 เป็น 47.48 เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจาก 0.1 เป็น 0.5 กรัม
		Pb (pH 5)	ความเข้มข้นเริ่มต้น 10-100 มก./ล.	ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงจากร้อยละ 85.82 เป็น 30.63 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 10 เป็น 100 มก./ล.
		Pb (10-100 มก./ล. pH 5)	เวลา 0-90 นาที	อัตราการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 40 นาทีแรกและเริ่มคงที่เมื่อใช้เวลาทดลองเพิ่มขึ้น
		Pb (100 มก./ล.)	พีเอช 2-10	ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 27 เป็น 99 เมื่อเพิ่มพีเอชจาก 2 ถึง 7 และเมื่อเพิ่มพีเอชถึง 10 ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่อย ๆ ลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำของเสียจากอุตสาหกรรม 2 ชนิด ได้แก่ ผงเหล็กช็อตบลาสท์ (shot blast) และตะกรันอลูมิเนียม (aluminium dross) มาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับ (adsorbent) ซึ่งของเสียดังกล่าวได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่ง ในนิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร จังหวัดชลบุรี โดยจะศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง การทดลองดำเนินการในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีรายละเอียดดังนี้ (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 แผนผังสรุปวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

	ยี่ห้อ: รุ่น
1) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง	Mettler Toledo: MS204S
2) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง	Mettler Toledo: ML1602
3) เครื่องเขย่าสาร (shaker)	Gerhardt: RO500
4) เครื่องวัดพีเอช (pH meter)	Denver: UB-10
5) เครื่อง Flame Atomic Adsorption Spectrophotometer (FAAS)	Agilent: AA240
6) เครื่อง Inductively coupled plasma (ICP)	PerkinElmer: Avio 200
7) เครื่อง Particle Size Analyzer (PSA)	Malvern: Master 3000 Malvern: Zetasizer nano ZS
8) เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	JEOL: JSM-6610 LV
9) เครื่อง Surface Area Analyzer (SAA)	Micromeritics: 3flex
10) เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)	Bruker AXS: S4 Pioneer
11) เครื่อง X-Ray Driffraction (XRD)	Bruker AXS: D8 Advance
12) กระดาษกรอง Whatman no.5	Whatman
13) ตะแกรงคัดขนาดมาตรฐานเบอร์ 35 และ 70	Endecott
14) เครื่องบดแบบลูกบอล (ball mill)	Sprecher Schuh: 06T14FC7A
15) ปั๊มสูบน้ำ	Dymax: PH200 TOM aquarium: AW-20
16) โถดูดความชื้น (desiccator)	
17) เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)	
18) ชุดเครื่องแก้ว	
19) ขวดพลาสติกขนาด 120 และ 60 มิลลิลิตร	
20) คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว	
21) อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล	
22) ใยแก้ว (glass wool)	
23) แกลลอนพลาสติก	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.2 สารเคมี

		คุณสมบัติ
1)	Zinc nitrate ($Zn(NO_3)_2$•$6H_2O$) (Ajax)	analytical reagent grade
2)	Nitric acid (HNO_3) (Qrëc)	analytical reagent grade
3)	Sodium hydroxide (NaOH) (Ajax)	analytical reagent grade
4)	Sodium acetate (CH_3COONa) (Ajax)	analytical reagent grade
5)	Acetic acid (CH_3COOH) (Qrëc)	analytical reagent grade
6)	Zinc standard 1000 mg/l (Ajax)	standard solution
7)	Iron standard 1000 mg/l (Agilent)	standard solution
8)	Copper standard 1000 mg/l (Agilent)	standard solution
9)	Manganese standard 1000 mg/l (Agilent)	standard solution
10)	Chromium standard 1000 mg/l (Agilent)	standard solution
11)	Nickel standard 1000 mg/l (Agilent)	standard solution

3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ

การศึกษาจะเตรียมวัสดุดูดซับจากของเสียทั้ง 2 ชนิด คือ ผงเหล็กช็อตบลาสท์ (รูปที่ 3.2ก) และตะกรันอลูมิเนียม (รูปที่ 3.2ข) โดยนำของเสียดังกล่าวมาคัดแยกขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 35 และ 70 จะได้วัสดุดูดซับที่มีขนาด 0.2-0.5 มิลลิเมตร สำหรับตะกรันอลูมิเนียมต้องนำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (ball mill) ก่อนนำไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน จากนั้นให้นำวัสดุดูดซับที่เตรียมได้เก็บไว้ในโถดูดความชื้นสำหรับใช้ทดลองในขั้นตอนต่อไป

รูปที่ 3.2 วัสดุดูดซับก่อนการคัดขนาด
(ก) ผงเหล็กช็อตบลาสท์ และ (ข) ตะกรันอลูมิเนียม

3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ในการทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์โดยการเจือจางสารละลายสต๊อกที่มีไอออนสังกะสีให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้นข้น 400 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับการทดลองแบบกะ (batch) และแบบคอลัมน์ (column) ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ การทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ จะทำการปรับพีเอชเพียงอย่างเดียว และการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียโดยจะปรับพีเอชให้ได้ตามต้องการ จากนั้นจะเติมสารละลายบัฟเฟอร์ก่อนนำไปทดลอง มีรายละเอียด ดังนี้

3.2.2.1 การเตรียมสารละลายสต๊อก

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนสังกะสีเตรียมจาก Zinc nitrate ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) (เกลือไนเตรดมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 297.47 กรัม และสังกะสี (Zn) มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 65.38 กรัม) ต้องการเตรียมสารละลายสต๊อกที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการชั่ง Zinc nitrate ปริมาณ 4.5499 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายสต๊อกไปเจือจางให้ได้น้ำเสียสังเคราะห์ตามความเข้มข้นที่ต้องการ สามารถคำนวณความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ได้ ดังสมการที่ (3.1)

$$C_1V_1 = C_2V_2 \tag{3.1}$$

โดย
C_1 = ความเข้มข้นของสารละลายสต๊อก (มก./ล.)
V_1 = ปริมาตรของสารละลายสต๊อกที่ต้องการ (มล.)
C_2 = ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ต้องการ (มก./ล.)
V_2 = ปริมาตรของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ต้องการ (มล.)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.2.2 การเตรียมสารปรับพีเอช

เมื่อได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นตามต้องการแล้ว ให้นำมาปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 3, 4, 5 และ 6 (อ้างอิงจากค่าพีเอชของน้ำเสียจริงที่ปนเปื้อนสังกะสีจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์) ด้วยสารปรับพีเอชที่เป็นกรด ได้แก่ กรดไนตริก (HNO_3) สามารถเตรียมได้โดยการปิเปตต์กรดไนตริกเข้มข้น 65% ปริมาตร 13.7 และ 1.3 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 200 มิลลิลิตร จะได้กรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ ตามลำดับ และสารปรับพีเอชที่เป็นด่าง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สามารถเตรียมได้โดยการชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 0.8 และ 8 กรัม มาละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 200 มิลลิลิตร จะได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 และ 1 โมลาร์ ตามลำดับ

3.2.2.3 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

สำหรับการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียงสังเคราะห์จะรักษาพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ให้คงที่ตลอดการทดลองเพื่อให้เกิดผลกระทบต่อการทดลองน้อยที่สุด จึงต้องใช้สารละลายบัพเฟอร์ โดยเตรียมจากกรดอ่อน ได้แก่ กรดอะซิติก (CH_3COOH) และเกลือของกรดอ่อน ได้แก่ โซเดียมอะซิเตต (CH_3COONa) สามารถเตรียมได้โดยการคำนวณจากสมการ Henderson-Hasselbalch ดังสมการที่ (3.2)

$$pH = pK_a + \log \frac{[A^-]}{[HA]} \tag{3.2}$$

โดย pH = ค่าพีเอชที่ต้องการ

pK_a = ค่าคงที่ของกรดอะซิติก คือ 4.76

A^- = เกลือของกรดอ่อน

HA = กรดอ่อน

3.2.4 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดูดซับ

การศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับ มีลักษณะที่ต้องการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือ/เทคนิคที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ

ลักษณะ	เครื่องมือ/เทคนิคที่ใช้
1. ลักษณะพื้นผิว	Scanning Electron Microscope (SEM)
2. การกระจายตัวของอนุภาคขนาด	Particle Size Analyzer (PSA)
3. พื้นที่ผิวสัมผัส ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน	Surface Area Analyzer (SAA) / BET
4. องค์ประกอบของธาตุ	X-Ray Fluorescence (XRF)
5. ชนิดของสารประกอบ	X-Ray Diffraction (XRD)
6. ประจุพื้นผิว	Particle Size Analyzer (PSA) / Zeta potential

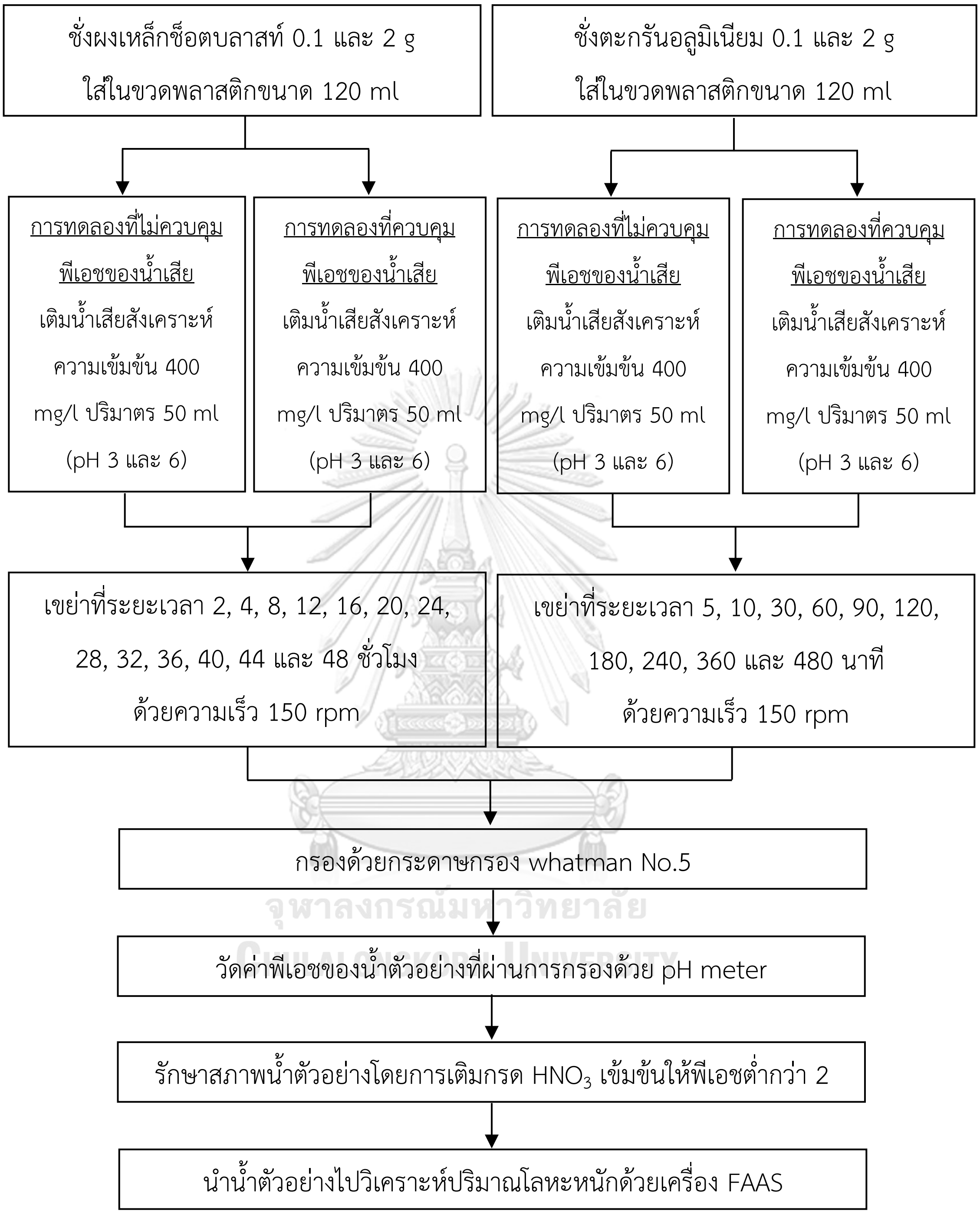
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.5 ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetics)

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับทำการทดลองแบบกะ (batch) ควบคุมอุณหภูมิในการทดลองที่ 25±1 องศาเซลเซียส โดยใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.1 ทั้ง 2 ชนิดเพื่อหาเวลาที่การดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลสำหรับการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับในขั้นตอนต่อไป แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองจลนศาสตร์การดูดซับ ดังรูปที่ 3.3 มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1) ชั่งวัสดุดูดซับแต่ละชนิดปริมาณ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดพลาสติกขนาด 120 มิลลิลิตร
2) เติมน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมได้จากข้อ 3.2.2 ความเข้มข้น 400 มก./ล. ที่ปรับพีเอชเป็น 3 และ 6 ลงในขวดพลาสติกแต่ละขวดด้วยปิเปตต์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยจะทำการทดลองทั้งน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรับพีเอชเพียงอย่างเดียว (การทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย) และน้ำเสียที่ใช้สารละลายบัฟเฟอร์ในการควบคุมพีเอช (การทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย)
3) นำตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารแบบหมุนวงกลมที่ระยะเวลา 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44 และ 48 ชั่วโมง สำหรับการทดลองที่ใช้ผงเหล็กช็อตบลาสท์เป็นวัสดุดูด และเขย่าที่ระยะเวลา 5, 10, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 360 และ 480 นาที สำหรับการทดลองที่ใช้ตะกรันอลูมิเนียมเป็นวัสดุดูดซับด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที
4) เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้แยกสารละลายใสออกจากวัสดุดูดซับโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.5
5) วัดค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองด้วย pH meter
6) เก็บน้ำตัวอย่างในขวดพลาสติกขนาด 60 มิลลิลิตร และรักษาสภาพน้ำตัวอย่างโดยการเติมกรดไนตริกเข้มข้นให้มีค่าพีเอชต่ำกว่า 2
7) นำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง FAAS
8) ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1) ถึง 7) โดยเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับเป็น 2 กรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



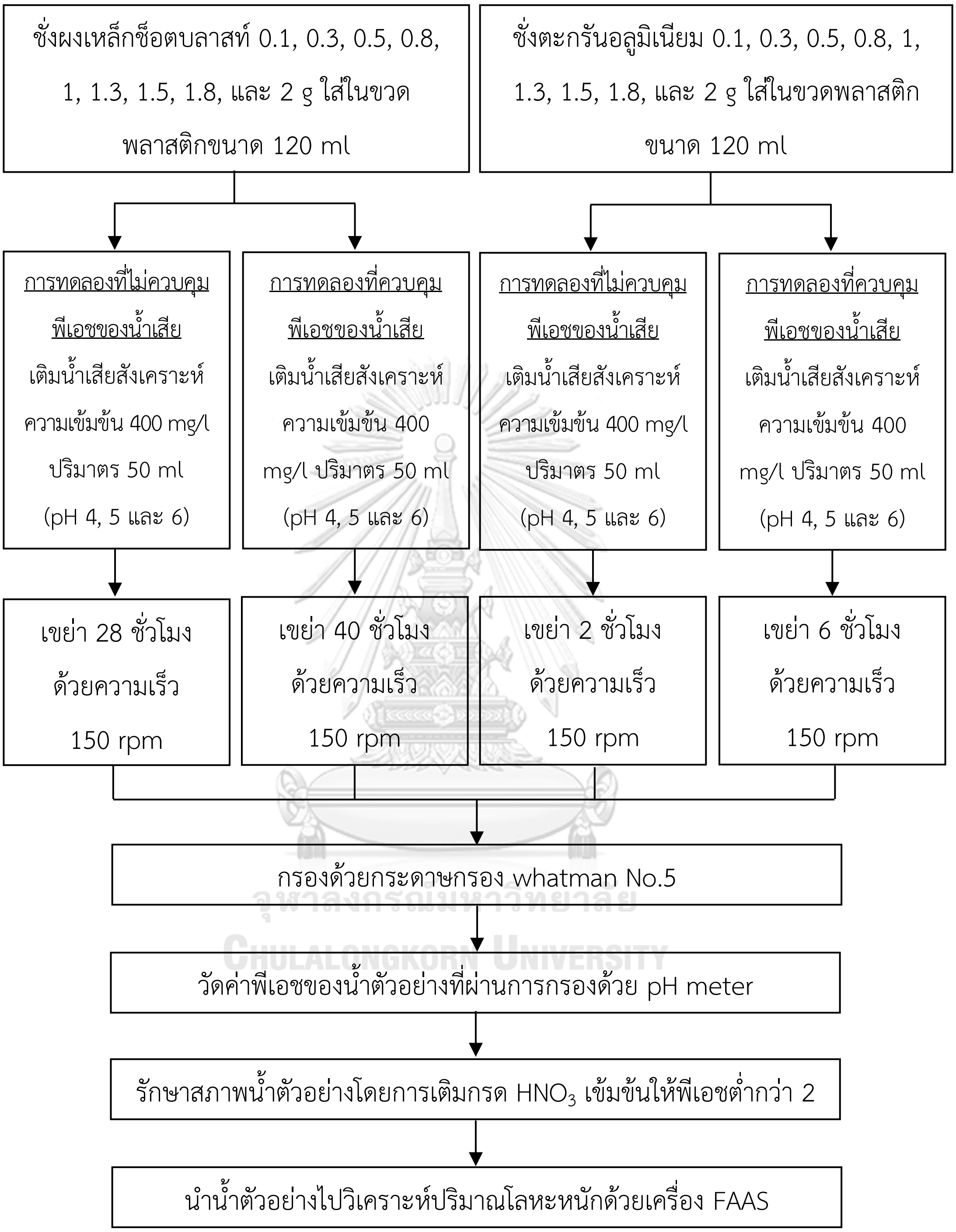
รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองจลนศาสตร์การดูดซับ

3.2.6 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm)

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับทำการทดลองแบบกะ (batch) ควบคุมอุณหภูมิในการทดลองที่ 25±1 องศาเซลเซียส โดยใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.1 ทั้ง 2 ชนิดโดยกำหนดเวลาในการดูดซับซึ่งได้จากการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับตามข้อ 3.2.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองไอโซเทอร์มการดูดซับ ดังรูปที่ 3.4 มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1) ชั่งวัสดุดูดซับแต่ละชนิดปริมาณ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดพลาสติกขนาด 120 มิลลิลิตร
2) เติมน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมได้จากข้อ 3.2.2 ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปรับพีเอชเป็น 4, 5 และ 6 ลงในขวดพลาสติกแต่ละขวดด้วยปิเปตต์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยจะทำการทดลองทั้งน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรับพีเอชเพียงอย่างเดียว (การทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย) และน้ำเสียที่ใช้สารละลายบัฟเฟอร์ในการควบคุมพีเอช (การทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย)
3) นำตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารแบบหมุนวงกลมตามระยะเวลาที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองข้อ 3.2.5
4) เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้แยกสารละลายใสออกจากวัสดุดูดซับโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.5
5) วัดค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองด้วย pH meter
6) เก็บน้ำตัวอย่างในขวดพลาสติกขนาด 60 มิลลิลิตร และรักษาสภาพน้ำตัวอย่างโดยการเติมกรดไนตริกเข้มข้นให้มีค่าพีเอชต่ำกว่า 2
7) นำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง FAAS
8) ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1) ถึง 7) โดยเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับเป็น 0.3, 0.5, 0.8, 1, 1.3, 1.5, 1.8 และ 2 กรัม

นอกจากนี้ยังศึกษาการชะละลายของโลหะหนักอื่น ๆ ที่พบว่าเป็นส่วนประกอบที่มีอยู่ในวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ Fe, Mn, Pb, Cr, Al, Ni และ Cu โดยจะนำน้ำตัวอย่างหลังการบำบัดจากการทดลองที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดในการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP และ FAAS



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองไอโซเทอร์มการดูดซับ

3.2.7 ศึกษารูปแบบการนำไปใช้จริงโดยดูดซับไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์

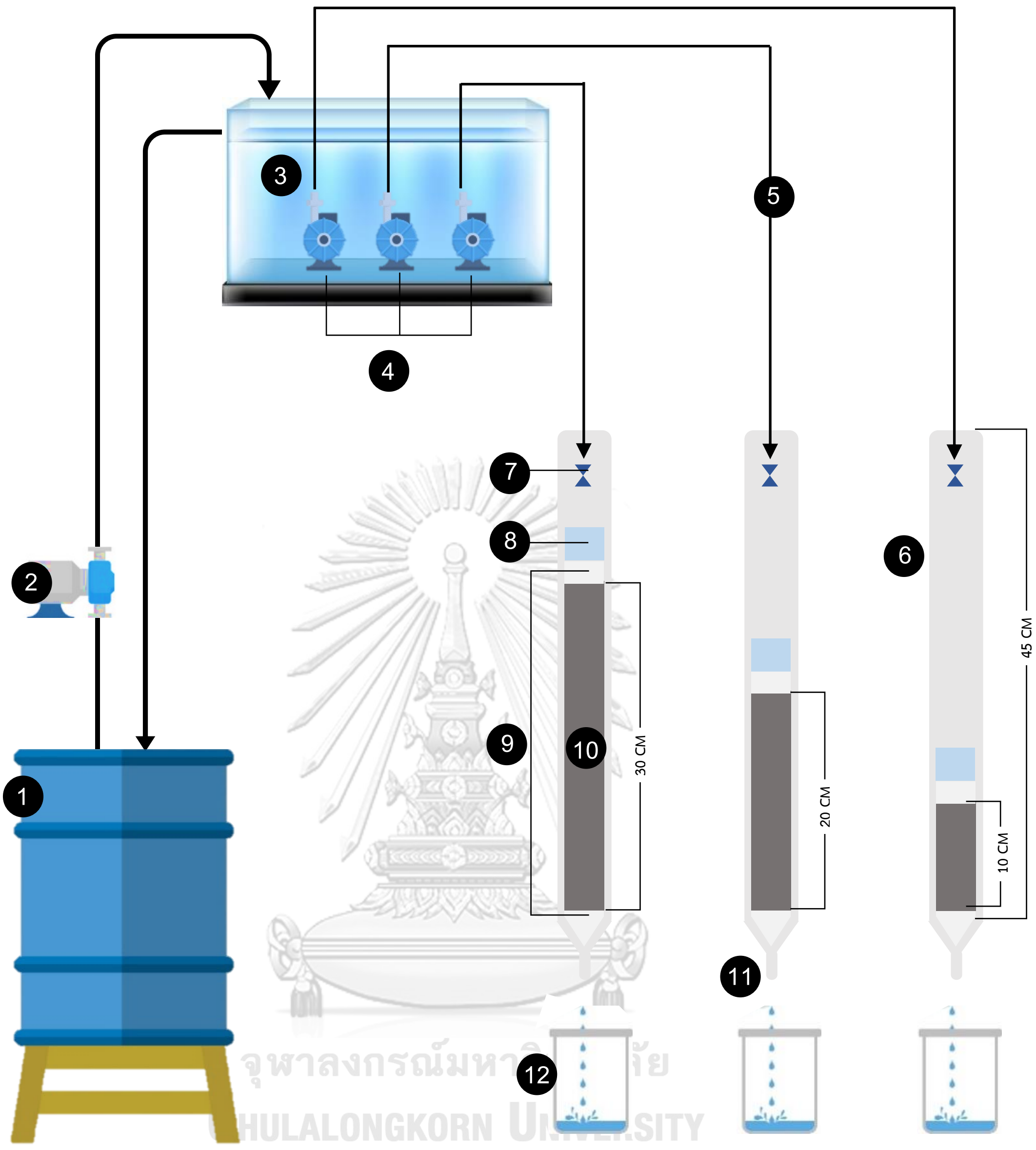
ในการศึกษารูปแบบการนำไปใช้จริงโดยการดูดซับไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ จะพิจารณาจากผลการทดลองแบบกะ โดยเลือกวัสดุดูดซับที่เหมาะสม ใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 400 มก./ล. และปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ให้เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองข้อ 3.2.6 มาทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว และบรรจุวัสดุดูดซับไว้ภายในคอลัมน์ที่ความลึกแตกต่างกัน คือ 10, 20 และ 30 เซนติเมตร ในการบรรจุวัสดุดูดซับลงในคอลัมน์ เมื่อได้ความสูงตามต้องการจะชั่งน้ำหนักของวัสดุดูดซับสำหรับการทำซ้ำจะบรรจุวัสดุดูดซับโดยการชั่งน้ำหนัก ทำการทดลองเป็นระบบไหลแบบต่อเนื่องโดยใช้ปั๊มสูบน้ำเสียสังเคราะห์ให้ไหลผ่านคอลัมน์แบบไหลลงสู่ด้านล่าง (down flow) ควบคุมอัตราการไหลที่ 3 มิลลิลิตร/นาที ทำการเก็บตัวอย่างของน้ำที่ปลายของคอลัมน์ทุก ๆ 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้วัดปริมาตรน้ำเสียด้วยกระบอกตวงและค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างทันที รักษาสภาพน้ำตัวอย่างโดยการเติมกรดไนตริกเข้มข้นให้มีค่าพีเอชต่ำกว่า 2 และนำไปตรวจวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีด้วยเครื่อง FAAS แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองแบบคอลัมน์ดังรูปที่ 3.5

3.2.8 ศึกษาการดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรม

ในการศึกษาจะทำการทดลองแบบคอลัมน์ โดยใช้น้ำเสียจริงซึ่งเก็บรวบรวมมาจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่งในนิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร จังหวัดชลบุรี ก่อนนำน้ำเสียไปทดลองจะศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสีย ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความขุ่น และปริมาณโลหะสังกะสีและโลหะตัวอื่น ๆ จากนั้นให้ปรับพีเอชของน้ำเสียให้เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองข้อ 3.2.6 และนำไปทดลองดูดซับโดยบรรจุวัสดุดูดซับตามความลึกที่เหมาะสมและทดลองตามขั้นตอนจากข้อ 3.2.7

3.2.9 เปรียบเทียบต้นทุนในการบำบัดสังกะสีด้วยของเสียจากอุตสาหกรรมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมีแบบเดิม

กระบวนการดูดซับสารในทางอุตสาหกรรมสำหรับกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย จะใช้ระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ ในการวิจัยนี้จึงประเมินต้นทุนเบื้องต้นในการบำบัดสังกะสีออกจากน้ำเสียด้วยของเสียจากอุตสาหกรรมสำหรับการใช้งานแบบคอลัมน์ (จากผลการทดลองข้อ 3.2.8) นำมาเปรียบเทียบกับการบำบัดสังกะสีด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมีแบบเดิม โดยคิดต้นทุนจากค่าสารเคมีที่ใช้ปรับพีเอช ค่ากำจัดตะกอน และค่าไฟฟ้า ซึ่งจะคิดต้นทุนที่ใช้ต่อปริมาตรน้ำเสียที่บำบัดได้ โดยที่น้ำเสียต้องมีความเข้มข้นของสังกะสีต่ำกว่าค่ามาตรฐาน (5 มก./ล.)



1. ถังสต๊อคน้ำเสีย
2. ปั๊มสูบน้ำไปยังถังพักน้ำเสีย
3. ถังพักน้ำเสีย (ปรับระดับน้ำ)
4. ปั๊มสูบน้ำเข้าคอลัมน์
5. น้ำขาเข้า
6. คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์ 5 ซม. สูง 45 ซม.
7. อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล
8. ระดับน้ำขังในคอลัมน์
9. ใยแก้ว
10. วัสดุดูดซับ
11. น้ำขาออก
12. บีกเกอร์รองรับน้ำขาออก

รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองแบบคอลัมน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย

การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา จะใช้วิธีวิเคราะห์ตามวิธีของ Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA and WEF, 2012) แสดงรายละเอียด ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
สังกะสี (Zn)	Standard Methods 3111 B. Direct Air-Acetylene Flame method
เหล็ก (Fe)	Standard Methods 3111 B. Direct Air-Acetylene Flame method
อลูมิเนียม (Al)	Standard Methods 3120 B. Inductively Coupled Plasma (ICP) method
พีเอช (pH)	pH meter

3.3.2 แบบจำลองและหลักสถิติที่ใช้

ตารางที่ 3.3 แบบจำลองและสถิติที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลอง/สมการ	สถิติที่ใช้
1. การทดลองแบบกะ (batch experiments)	- $\overline{X}$
1) จลนพลศาสตร์การดูดซับ	- ร้อยละ
- สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order)	- S.D.
$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303}t$ และ $q_t = q_e - \frac{q_e}{10^{\frac{k_1}{2.303}t}}$	
- สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second order)	
$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e}t$ และ $q_t = \frac{k_2 q_e^2}{1 + k_2 q_e t}t$	
- ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใด ๆ จากการทดลอง	
$q_{t,\exp} = \frac{(C_0 - C_t) \times v}{m}$	
- ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัด	
$r = \frac{(C_0 - C_t) \times 100}{C_0}$	

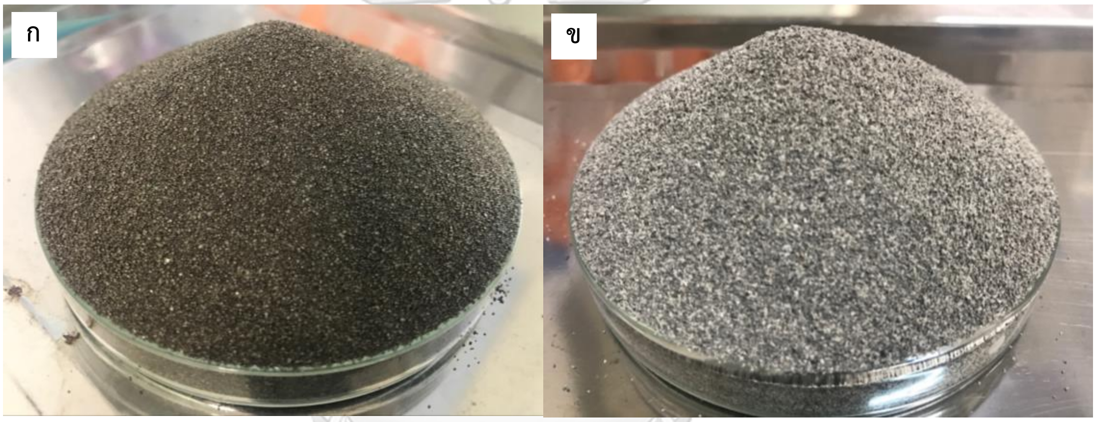
ตารางที่ 3.3 แบบจำลองและสถิติที่ใช้ในการศึกษา (ต่อ)

แบบจำลอง/สมการ	**สถิติที่ใช้**
2) ไอโซเทอร์มการดูดซับ - ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) - $\frac{C_e}{q_e} = \left(\frac{1}{k_L q_{mx}}\right) + \left(\frac{C_e}{q_{mx}}\right)$ และ $q_e = \frac{q_{mx} k_L C_e}{1 + k_L C_e}$ - ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิช (Freundlich isotherm) $\log q_e = \log K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e$ และ $q_e = k_F C_e^{1/n}$ - ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุลจากการทดลอง $q_{e,\exp} = \frac{(C_0 - C_e) \times v}{m}$ - ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัด $r = \frac{(C_0 - C_e) \times 100}{C_0}$	- $\overline{X}$ - ร้อยละ - S.D.
2. การทดลองแบบคอลัมน์ (column experiment) - แบบจำลองของ Thomas $ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_{Th} q_0 m}{Q} - k_{Th} C_0 t$ และ $\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{k_{Th} q_0 m}{Q} - k_{Th} C_0 t\right)}$	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยในห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ของเสียอุตสาหกรรม 2 ชนิด ได้แก่ ผงเหล็กช็อตบลาสท์ (รูปที่ 4.1ก) และตะกรันอลูมิเนียม (รูปที่ 4.1ข) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่งในนิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร จังหวัดชลบุรี มาเป็นวัสดุดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสีย แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ การทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชและการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย มีรายละเอียดผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.1 วัสดุดูดซับขนาด 0.2-0.5 มิลลิเมตร
(ก) ผงเหล็กช็อตบลาสท์ และ (ข) ตะกรันอลูมิเนียม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

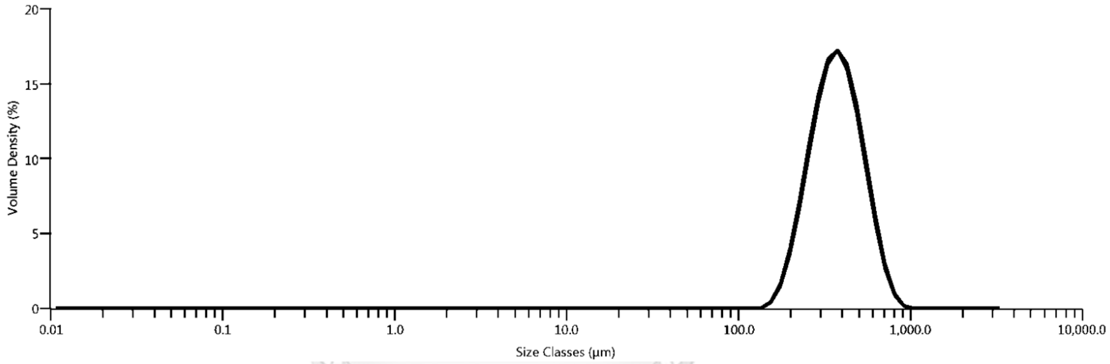
4.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุดูดซับ

วัสดุดูดซับที่ใช้ในการศึกษาถูกตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์การกระจายของขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer (PSA) ยี่ห้อ Malvern รุ่น Master 3000 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610 LV การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเครื่อง surface area and pore size analyzer ด้วยเทคนิค BET ยี่ห้อ Micrometrics รุ่น 3Flexs การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence spectrometer (XRF) ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น S4 Pioneer การวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8 Advance และการวิเคราะห์ประจุพื้นผิวโดยการหาค่า Zeta potential ด้วยเครื่อง PSA ยี่ห้อ Malvern รุ่น Zetasizer nano ZS ผลการศึกษาลักษณะของวัสดุดูดซับมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 ผงเหล็กช็อตบลาสท์

4.1.1.1 ลักษณะทางกายภาพของผงเหล็กช็อตบลาสท์

จากการศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer (PSA) ในช่วง 0.01-3,000 μm พบว่าผงเหล็กช็อตบลาสท์มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 144-859 μm แสดงดังรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1 ซึ่งจากการเตรียมผงเหล็กช็อตบลาสท์โดยการคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานขนาด 35 และ 70 mesh จะได้วัสดุดูดซับที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 200-500 μm (0.2-0.5 มิลลิเมตร) ทำให้อนุภาคส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 80 ของผงเหล็กช็อตบลาสท์มีปริมาณการกระจายตัวของขนาดอยู่ในช่วงดังกล่าว ได้แก่ 211 μm (ร้อยละ 5.68) 240 μm (ร้อยละ 8.79) 272 μm (ร้อยละ 11.73) 310 μm (ร้อยละ 13.81) 352 μm (ร้อยละ 14.50) 400 μm (ร้อยละ 13.58) และ 454 μm (ร้อยละ 11.26)



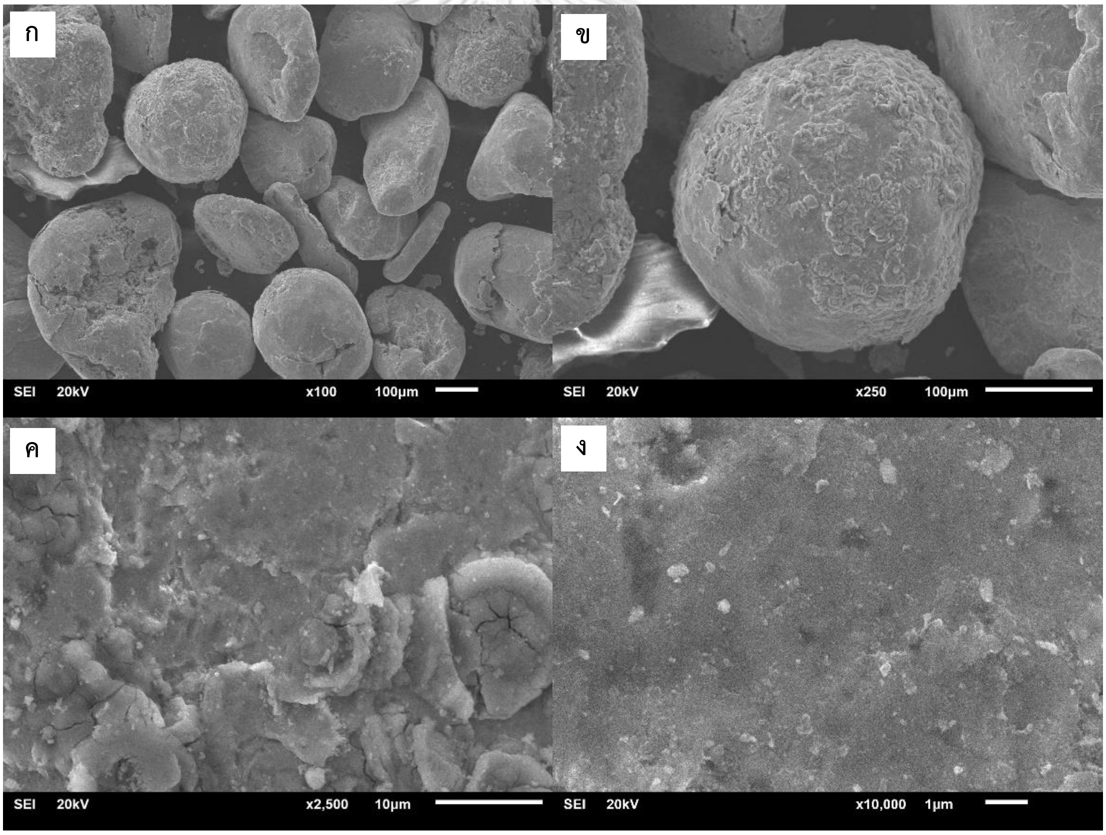
รูปที่ 4.2 ผลการศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงเหล็กช็อตบลาสท์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

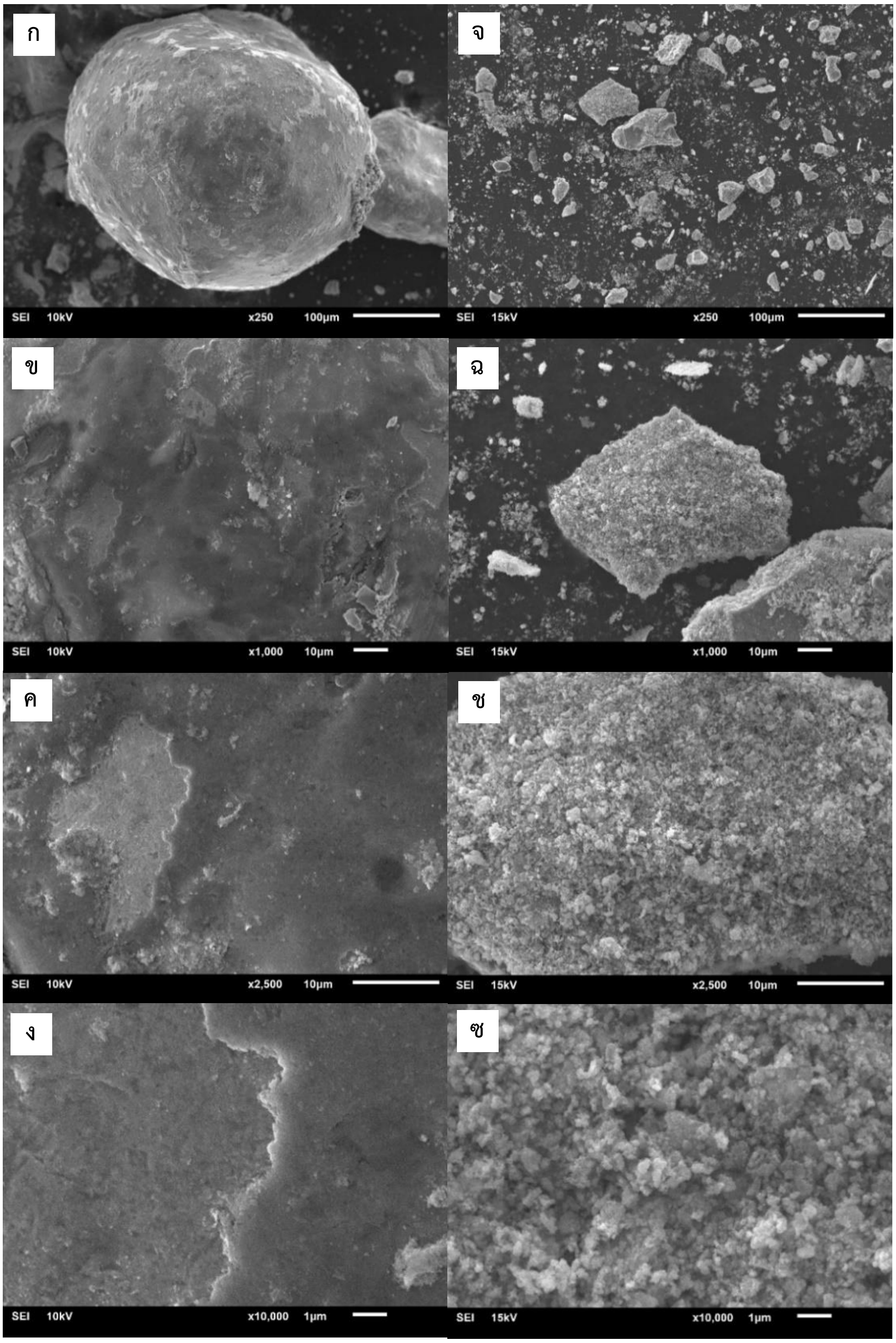
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงเหล็กช็อตบลาสท์

ขนาด (μm)	ปริมาณ (ร้อยละ)	ขนาด (μm)	ปริมาณ (ร้อยละ)
0.01-143	-	400	13.58
144	0.27	454	11.26
163	1.21	516	8.12
186	3.03	586	4.90
211	5.68	666	2.31
240	8.79	756	0.72
272	11.73	859	0.09
310	13.81	860-3,000	-
352	14.50	รวม	100

นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะพื้นผิวของผงเหล็กช็อตบลาสท์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ทั้งก่อนและหลังการบำบัดไอออนสังกะสีที่กำลังขยายต่าง ๆ ตั้งแต่ 100-10,000 เท่า สำหรับภาพถ่าย SEM ของผงเหล็กช็อตบลาสท์ก่อนการบำบัดไอออนสังกะสี แสดงดังรูปที่ 4.3 จากภาพถ่ายที่กำลังขยาย 100 เท่า (รูปที่ 4.3ก) และ 250 เท่า (รูปที่ 4.3ข) พบว่าผงเหล็กช็อตบลาสท์มีลักษณะค่อนข้างกลมแต่รูปทรงบิดเบี้ยวไปบ้าง เนื่องจากในขั้นตอนการตกแต่งผิวชิ้นงาน ผงเหล็กช็อตบลาสท์ถูกใช้เป็นเม็ดกระสุนเพื่อยิงไปยังผิวชิ้นงาน ทำให้ผงเหล็กช็อตบลาสท์เสียรูปทรงไปจากเดิมเนื่องจากแรงอัดของกระสุน และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 2,500 เท่า (รูปที่ 4.3ค) และ 10,000 เท่า (รูปที่ 4.3ง) จะเห็นได้ว่ามีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ เนื่องจากการปะปนของทรายจากชิ้นงานที่ใช้ผงเหล็กช็อตบลาสท์ในการยิงตกแต่งผิว ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF พบ SiO_2 เป็นส่วนประกอบอยู่ร้อยละ 11.67



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายผงเหล็กช็อตบลาสท์ก่อนใช้บำบัดไอออนสังกะสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ (ก) 100 เท่า (ข) 250 เท่า (ค) 2,500 เท่า (ง) 10,000 เท่า



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายผงเหล็กช็อตบลาสท์หลังใช้บำบัดไอออนสังกะสีจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอช (ก-ง) และการทดลองที่ควบคุมพีเอช (จ-ซ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ (ก,จ) 250 เท่า (ข,ฉ) 1,000 เท่า (ค,ช) 2,500 เท่า (ง,ซ) 10,000 เท่า (จากชุดการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 ปริมาณวัสดุดูดซับ 2 กรัม)

รูปที่ 4.4ก-ง แสดงภาพถ่าย SEM จากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย จะเห็นได้ว่าผงเหล็กช็อตบลาสท์ยังคงมีลักษณะรูปทรงค่อนข้างกลม ซึ่งคล้ายกับผงเหล็กช็อตบลาสท์ก่อนใช้บำบัดไอออนสังกะสี (รูปที่ 4.3) แต่พื้นผิวมีความเรียบมากขึ้น ซึ่งคาดว่าเกิดจากการหลุดออกของทรายที่เกาะอยู่บนผิวของผงเหล็กช็อตบลาสท์เมื่อสัมผัสกับน้ำเสียสังเคราะห์ระหว่างการทดลอง และรูปที่ 4.4จ-ซ แสดงภาพถ่าย SEM จากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย พบว่ากำลังขยาย 250 เท่า (รูปที่ 4.4จ) และ 100 เท่า (รูปที่ 4.4ฉ) ผงเหล็กช็อตบลาสท์ถูกละลายจนกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดเริ่มต้นที่กำลังขยายเดียวกัน (รูปที่ 4.3ข) และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 2,500 (รูปที่ 4.4ช) และ 10,000 เท่า (รูปที่ 4.4ซ) จะเห็นลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระเป็นกลุ่มก้อนซึ่งแสดงถึงลักษณะของออกไซด์

จากการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนของผงเหล็กช็อตบลาสท์ก่อนการใช้บำบัดไอออนสังกะสีด้วยเครื่อง surface area analyzer ตามทฤษฎีของ BET (Brunauer Emmett Teller) พบว่าผงเหล็กช็อตบลาสท์มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.3550 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.0006 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุน 63.8621 อังสตรอม แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของผงเหล็กช็อตบลาสท์

ลักษณะ	ผลการวิเคราะห์และทดสอบ
พื้นที่ผิวจำเพาะ	0.3550 m^2/g
ปริมาตรรูพรุน	0.0006 cm^3/g
ขนาดรูพรุน	63.8621 Å

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.1.2 ลักษณะทางเคมีของผงเหล็กช็อตบลาสท์

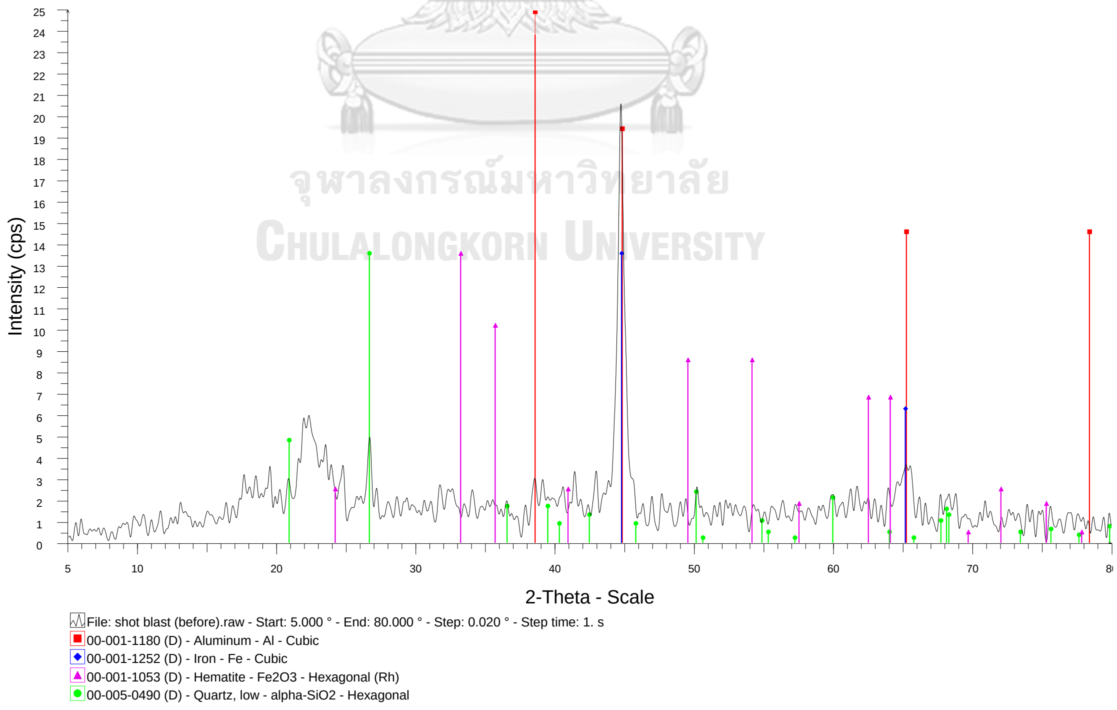
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence spectrometer (XRF) พบว่าผงเหล็กช็อตบลาสท์มีองค์ประกอบหลักเป็น Fe_2O_3 ร้อยละ 83.39 รองลงมา คือ SiO_2 และ Al_2O_3 ร้อยละ 11.67 และ 3.00 ตามลำดับ สำหรับองค์ประกอบอื่น ๆ ที่พบได้แก่ MnO, Cr_2O_3, TiO_2, CaO, K_2O, Cl, CuO, SO_3, P_2O_5, MoO_3, ZnO และ Zr แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.3

นอกจากนั้นยังพบว่าผงเหล็กช็อตบลาสท์หลังการใช้บำบัดไอออนสังกะสีมี ZnO เพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 1.62 และ 1.65 สำหรับการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชและควบคุมพีเอชของน้ำเสีย ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเหล็กช็อตบลาสท์ด้วยเครื่อง XRF

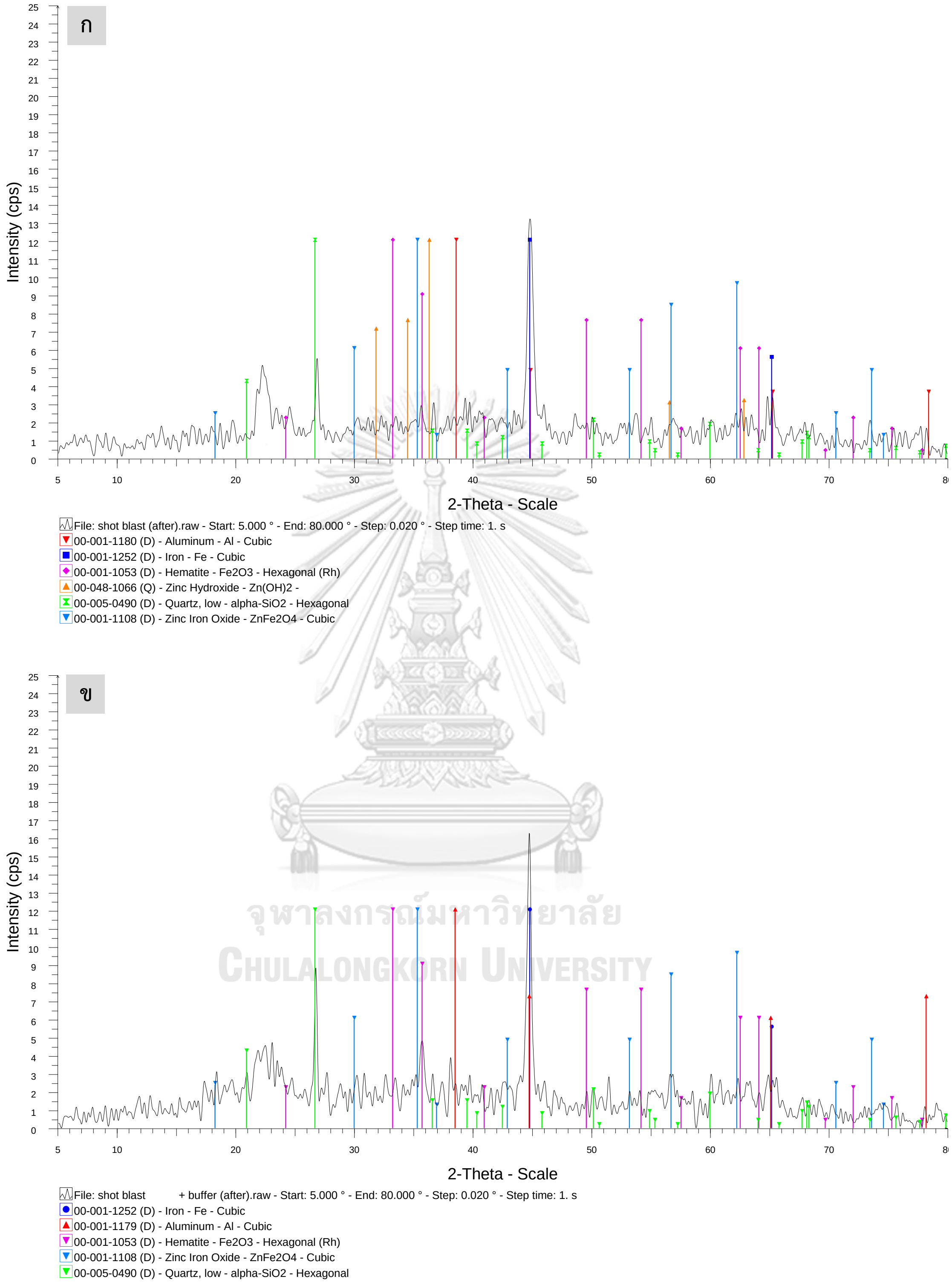
องค์ประกอบ	ร้อยละ	องค์ประกอบ	ร้อยละ
Fe_2O_3	83.39	Cl	0.13
SiO_2	11.67	CuO	0.05
Al_2O_3	3.00	SO_3	0.03
MnO	0.69	P_2O_5	0.03
Cr_2O_3	0.32	MoO_3	0.03
TiO_2	0.22	ZnO	0.01
CaO	0.25	Zr	0.01
K_2O	0.02	รวม	100

ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffracttion (XRD) ที่ตำแหน่ง 5-80° (2-Theta) ของผงเหล็กช็อตบลาสท์ก่อนการใช้บำบัดไอออนสังกะสี แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าผงเหล็กช๊อตบลาสท์มีโครงสร้างผลึกตรงกับ iron cubic (JCPDS 01-1252), Aluminium cubic (JCPDS 01-1180), hematite (Fe_2O_3, JCPDS 01-1053) และ Quartz (α-SiO_2, JCPDS 05-0490)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.5 รูปแบบ XRD ของผงเหล็กช็อตบลาสท์ก่อนใช้บำบัดไอออนสังกะสี

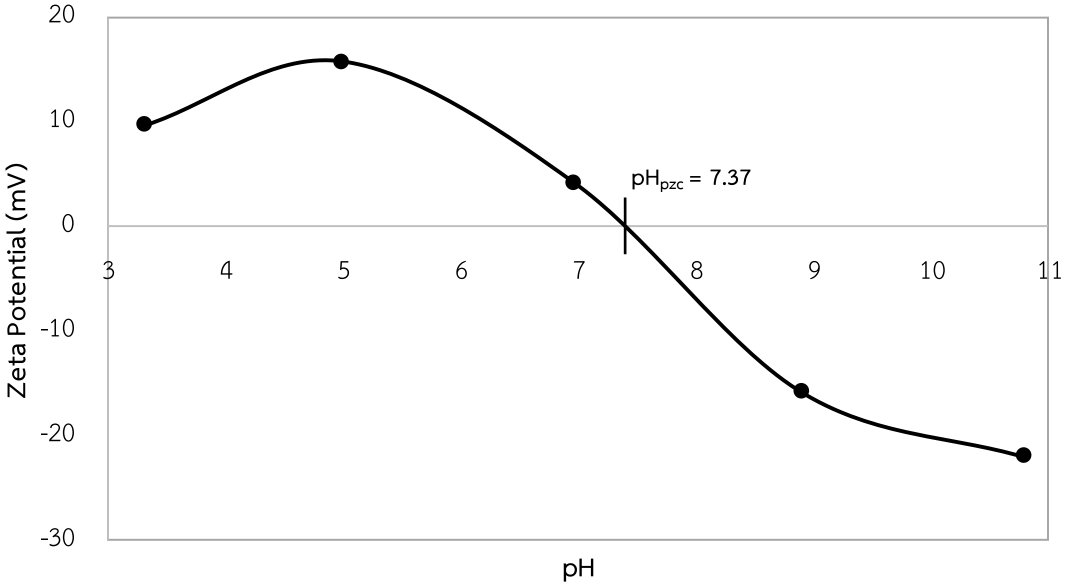


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.6 รูปแบบ XRD ของผงเหล็กช็อตบลาสท์หลังใช้บำบัดไอออนสังกะสีจากการทดลองที่ (ก) ไม่ควบคุมพีเอช (ข) ควบคุมพีเอช

รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบ XRD ของผงเหล็กช็อตบลาสท์หลังใช้บำบัดไอออนสังกะสีจากการทดลองที่ไม่ควบคุม (รูปที่ 4.6ก) และควบคุมพีเอชของน้ำเสีย (รูปที่ 4.6ข) พบว่ามีโครงสร้างผลึกของสังกะสีที่อยู่ในรูป Zinc hydroxide ($Zn(OH)_2$, JCPDS 48-1066) และ Zinc iron oxide ($ZnFe_2O_4$, JCPDS 01-1108) ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง XRF

นอกจากนี้ยังศึกษาประจุที่พื้นผิวโดยการวิเคราะห์ค่า Zeta potential (ศักย์ซีตา) ด้วยเทคนิค pH titration ที่พีเอช 3, 5, 7, 9 และ 11 แสดงผลดังรูปที่ 4.7 จากผลการศึกษาพบว่ามีค่า Zeta potential เท่ากับ 9.67, 15.73, 4.10, -15.83 และ -22.03 mV ที่พีเอช 3, 5, 7, 9 และ 11 ตามลำดับ โดยที่พีเอชต่ำจะมีประจุบวกจาก H^+ ในปริมาณมากทำให้มีค่า Zeta potential เป็นบวก และที่พีเอชสูงจะมีประจุลบจาก OH^- ในปริมาณมากซึ่งทำให้ค่า Zeta potential เป็นลบ โดยจุดที่พื้นผิวของผงเหล็กช็อตบลาสท์มีประจุรวมเป็นศูนย์ (point of zero charge: pH_{pzc}) เท่ากับ 7.37 ซึ่งเป็นจุดที่ประจุลบและประจุบวกที่พื้นผิวมีปริมาณสมดุลกันทำให้ค่า Zeta potential มีค่าเท่ากับ 0

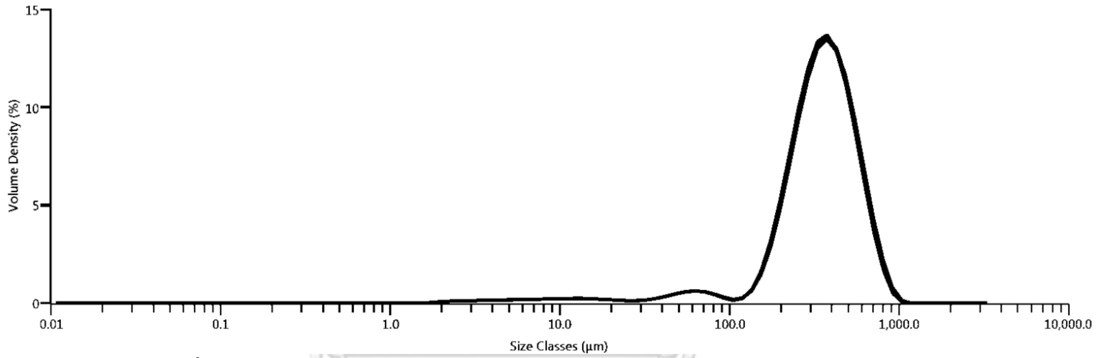


รูปที่ 4.7 ค่า Zeta potential ของผงเหล็กช็อตบลาสท์

4.1.2 ลักษณะของตะกรันอลูมิเนียม

4.1.2.1 ลักษณะทางกายภาพของตะกรันอลูมิเนียม

จากการศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer (PSA) ในช่วง 0.01-3,000 μm พบว่าตะกรันอลูมิเนียมมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 1.88-976 μm แสดงดังรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.4 ซึ่งจากการเตรียมตะกรันอลูมิเนียมโดยการนำมาบดและคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานขนาด 35 และ 70 mesh เช่นเดียวกับผงเหล็กช็อตบลาสท์ จะได้วัสดุดูดซับที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 200-500 μm (0.2-0.5 มิลลิเมตร) ทำให้อนุภาคส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 66 มีปริมาณการกระจายตัวของขนาดอยู่ในช่วงดังกล่าว ได้แก่ 211 μm (ร้อยละ 5.83) 240 μm (ร้อยละ 7.83) 272 μm (ร้อยละ 9.62) 310 μm (ร้อยละ 10.87) 352 μm (ร้อยละ 11.36) 400 μm (ร้อยละ 10.95) 454 μm (ร้อยละ 9.71) 516 μm (ร้อยละ 7.83) และ 586 μm (ร้อยละ 5.64)



รูปที่ 4.8 ผลการศึกษาการกระจายตัวขนาดอนุภาคของตะกรันอลูมิเนียม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แต่เนื่องจากตะกรันอลูมิเนียมมีลักษณะเป็นก้อนตะกรัน ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุดูดซับจึงต้องนำไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (ball mill) ก่อนนำมาคัดขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 35 และ 70 mesh ทำให้ตะกรันอลูมิเนียมบางส่วนถูกบดจนกลายเป็นผงละเอียด จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าตะกรันอลูมิเนียมบางส่วนประมาณร้อยละ 14 มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1.88-186 μm ซึ่งเกิดจากการโดนบดจนละเอียดและยึดเกาะอยู่กับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า เมื่อนำมาร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดจึงไม่สามารถคัดออกได้หมด ทำให้พบการกระจายตัวของอนุภาคบางส่วนที่มีขนาดเล็กกว่า 200 μm ดังตารางที่ 4.4

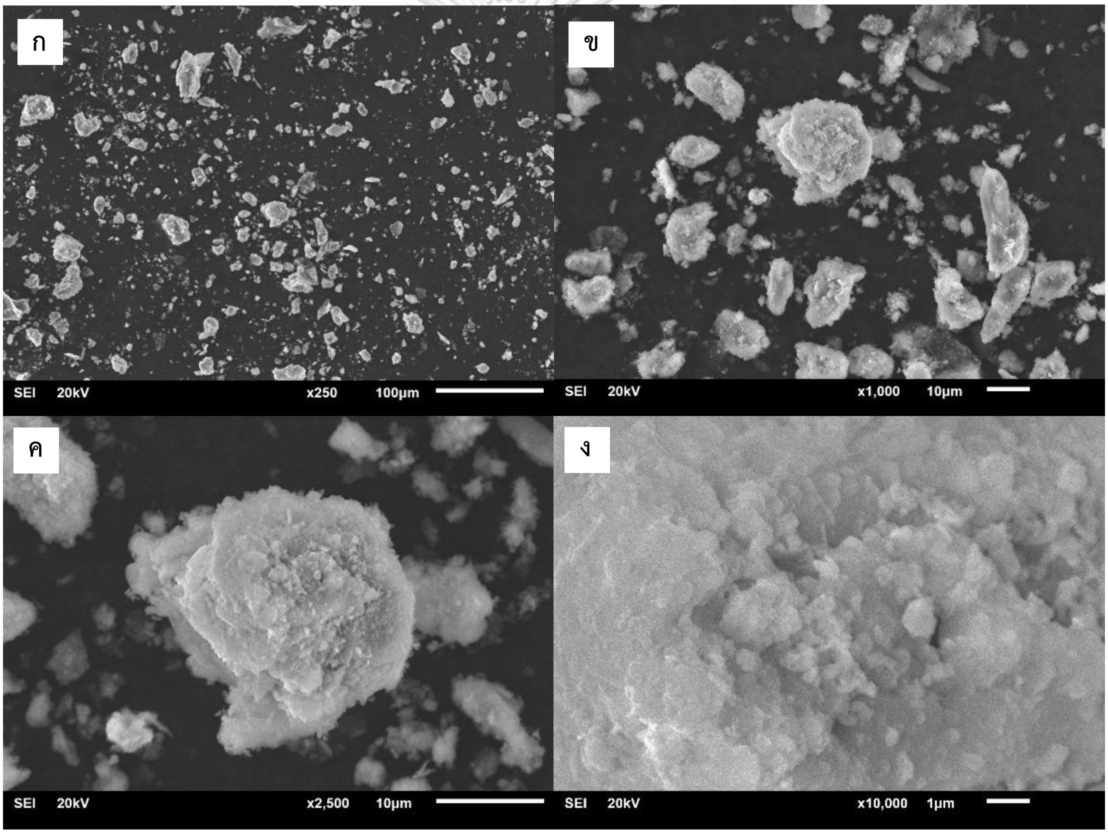
นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะพื้นผิวของตะกรันอลูมิเนียมด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ทั้งก่อนและหลังการบำบัดไอออนสังกะสีที่กำลังขยายต่าง ๆ ตั้งแต่ 250-10,000 เท่า สำหรับภาพถ่าย SEM ของตะกรันอลูมิเนียมก่อนการบำบัดไอออนสังกะสี แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าตะกรันอลูมิเนียมมีรูปร่างไม่แน่นอนหรือลักษณะพื้นผิวแบบอสัณฐาน (amorphous)

ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาการกระจายตัวขนาดอนุภาคของตะกรันอลูมิเนียม

ขนาด (μm)	ปริมาณ (ร้อยละ)	ขนาด (μm)	ปริมาณ (ร้อยละ)
0.01-1.87	-	45.6	0.39
1.88	0.07	51.8	0.47
2.13	0.08	58.9	0.52
2.42	0.09	66.9	0.49
2.75	0.10	76.0	0.40
3.12	0.11	86.4	0.26
3.55	0.12	98.1	0.16
4.03	0.12	111	0.19
4.58	0.13	127	0.49
5.21	0.14	144	1.17
5.92	0.15	163	2.32
6.72	0.16	186	3.91
7.64	0.17	211	5.83
8.68	0.18	240	7.83
9.86	0.19	272	9.62
11.2	0.19	310	10.87
12.7	0.19	352	11.36
14.5	0.18	400	10.95
16.4	0.17	454	9.71
18.7	0.15	516	7.83
21.2	0.12	586	5.64
24.1	0.11	666	3.51
27.4	0.11	756	1.77
31.4	0.14	859	0.61
35.3	0.20	976	0.08
40.1	0.29	977-3,000	-
		<u>รวม</u>	100

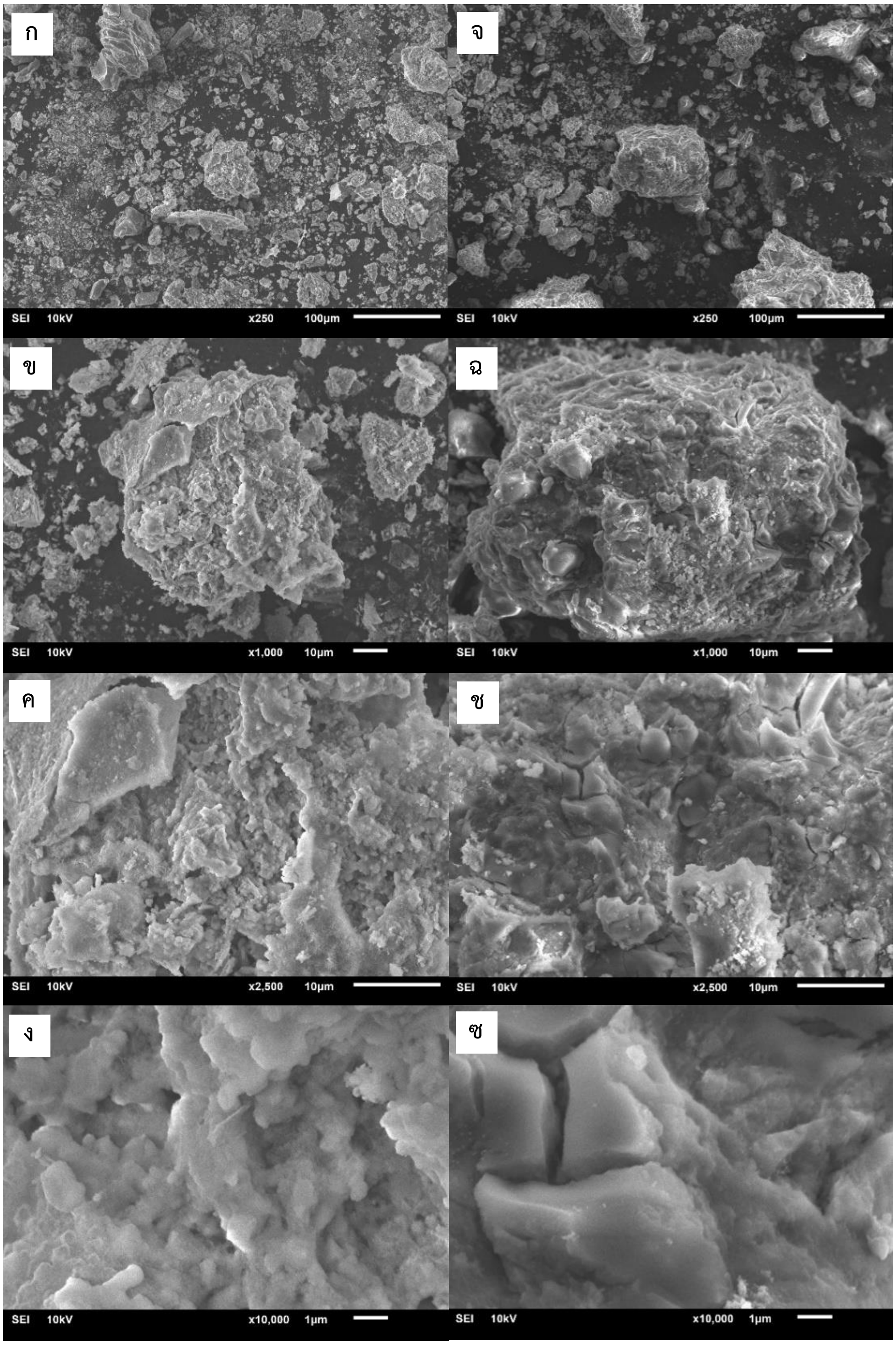
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากรูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่าย SEM ของตะกรันอลูมิเนียมหลังจากใช้บำบัดไอออนสังกะสี พบว่ายังคงมีลักษณะแบบอสัณฐาน แต่เมื่อพิจารณาจากภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (backscattered electron) พบว่าภาพถ่ายตะกรันอลูมิเนียมมีความสว่างในแต่ละจุดที่แตกต่างกัน โดยจุดที่สัญญานอิเล็กตรอนกระเจิงกลับสูง (จุดที่ภาพสว่างกว่า) เกิดจากการปรากฏสารที่มีเลขอะตอมเฉลี่ยสูงกว่าหรือมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันกับจุดที่ภาพสว่างน้อยกว่า จึงคาดว่าลักษณะดังกล่าวเกิดจากการปรากฏของไอออนสังกะสีที่ถูกบำบัดโดยตะกรันอลูมิเนียม เมื่อพิจารณาจากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF ของตะกรันอลูมิเนียมหลังการบำบัดไอออนสังกะสียืนยันได้ว่ามีปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้นจากตะกรันอลูมิเนียมก่อนใช้งาน และยังพบว่าภาพถ่ายไม่คมชัดซึ่งเกิดจากการปรากฏตัวของออกไซด์ในตะกรันอลูมิเนียม



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายตะกรันอลูมิเนียมก่อนใช้บำบัดไอออนสังกะสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ (ก) 250 เท่า (ข) 1,000 เท่า (ค) 2,500 เท่า (ง) 10,000 เท่า

การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนของตะกรันอลูมิเนียมก่อนการใช้บำบัดไอออนสังกะสีด้วยเครื่อง surface area analyzer ตามทฤษฎีของ BET (Brunauer Emmett Teller) พบว่าตะกรันอลูมิเนียมมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1.9903 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.0034 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุน 67.3588 อังสตรอม แสดงดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายตะกรันอลูมิเนียมหลังการใช้งานจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอช (ก-ง) และการทดลองที่ควบคุมพีเอช (จ-ซ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ (ก,จ) 250 เท่า (ข,ฉ) 1,000 เท่า (ค,ช) 2,500 เท่า (ง,ซ) 10,000 เท่า (จากชุดการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 ปริมาณวัสดุดูดซับ 2 กรัม)

ตารางที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของตะกรันอลูมิเนียม

ลักษณะ	**ผลการวิเคราะห์และทดสอบ**
พื้นที่ผิวจำเพาะ	1.9903 m^2/g
ปริมาตรรูพรุน	0.0034 cm^3/g
ขนาดรูพรุน	67.3588 Å

4.1.2.2 `ลักษณะทางเคมีของตะกรันอลูมิเนียม

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence spectrometer (XRF) พบว่าตะกรันอลูมิเนียมมีองค์ประกอบหลักเป็น Al_2O_3 ร้อยละ 41.15 รองลงมา คือ Cl และ Na_2O ร้อยละ 21.29 และ 13.00 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Das et al. (2007) และ Ewais et al. (2009) สำหรับองค์ประกอบอื่น ๆ ที่พบ ได้แก่ MgO, SiO_2, K_2O, SO_3, CaO, CuO, Fe_2O_3, ZnO, MnO, Br, Cr_2O_3, NiO, HfO_2, V_2O_5, Br และ SrO แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.6 และจะเห็นได้ว่าตะกรันอลูมิเนียมมีส่วนผสมของเกลือในปริมาณมาก เนื่องจากในกระบวนการหลอมอลูมิเนียมนิยมใช้ NaCl และ KCl สำหรับการกู้คืนอลูมิเนียมจากการหลอมขั้นปฐมภูมิ ซึ่งเป็นเกลือที่พบได้มากที่สุดในตะกรันอลูมิเนียม (Gil, 2005)

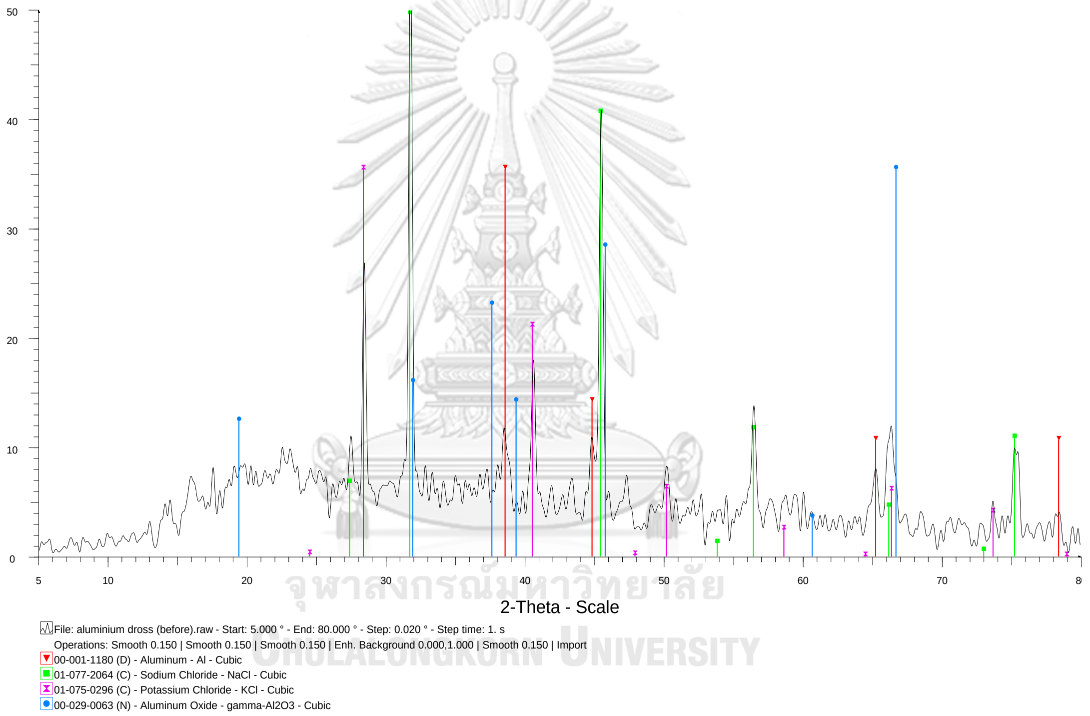
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันอลูมิเนียมด้วยเครื่อง XRF

องค์ประกอบ	**ร้อยละ**	**องค์ประกอบ**	**ร้อยละ**
Al_2O_3	41.15	ZnO	0.33
Cl	21.29	MnO	0.16
Na_2O	13.00	TiO_2	0.09
MgO	5.79	Cr_2O_3	0.03
SiO_2	5.72	NiO	0.03
K_2O	5.59	HfO_2	0.02
SO_3	3.45	V_2O_5	0.02
CaO	1.48	Br	0.02
CuO	0.99	SrO	0.02
Fe_2O_3	0.78	รวม	99.97

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สำหรับตะกรันอลูมิเนียมหลังการใช้บำบัดไอออนสังกะสีพบว่ามี ZnO เพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 1.90 และ 0.72 สำหรับการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชและควบคุมพีเอชของน้ำเสียตามลำดับ

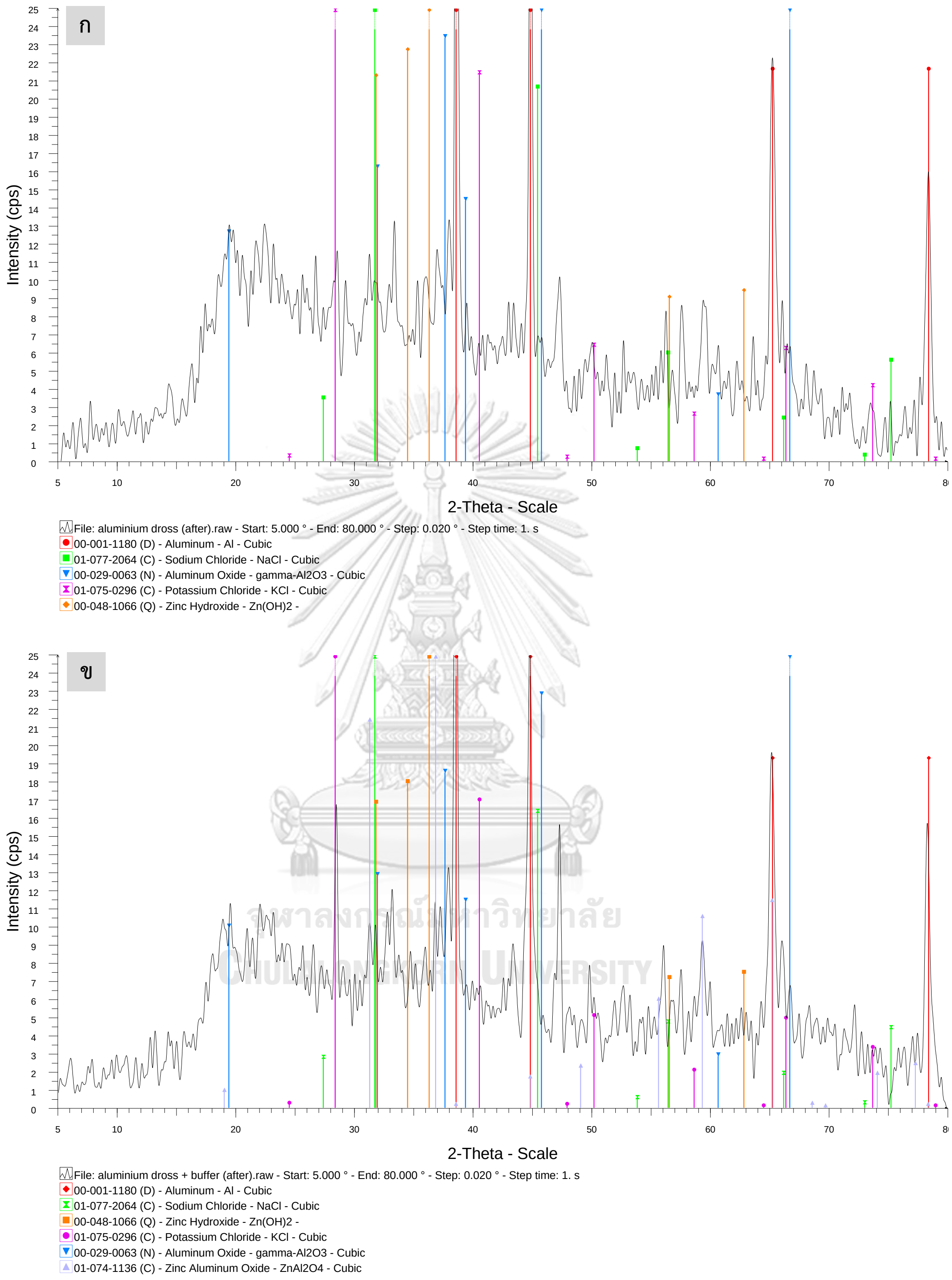
ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffracttion (XRD) ที่ตำแหน่ง 5-80° (2-Theta) ของตะกรันอลูมิเนียมก่อนการใช้บำบัดไอออนสังกะสี แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าตะกรันอลูมิเนียมมีโครงสร้างผลึกตรงกับ Aluminium cubic (JCPDS 01-1180), Aluminium oxide (γ-Al_2O_3, JCPDS 29-0063), Sodium chloride (NaCl, JCPDS 05-0490) และ Potassium chloride (KCl, JCPDS 75-2096)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

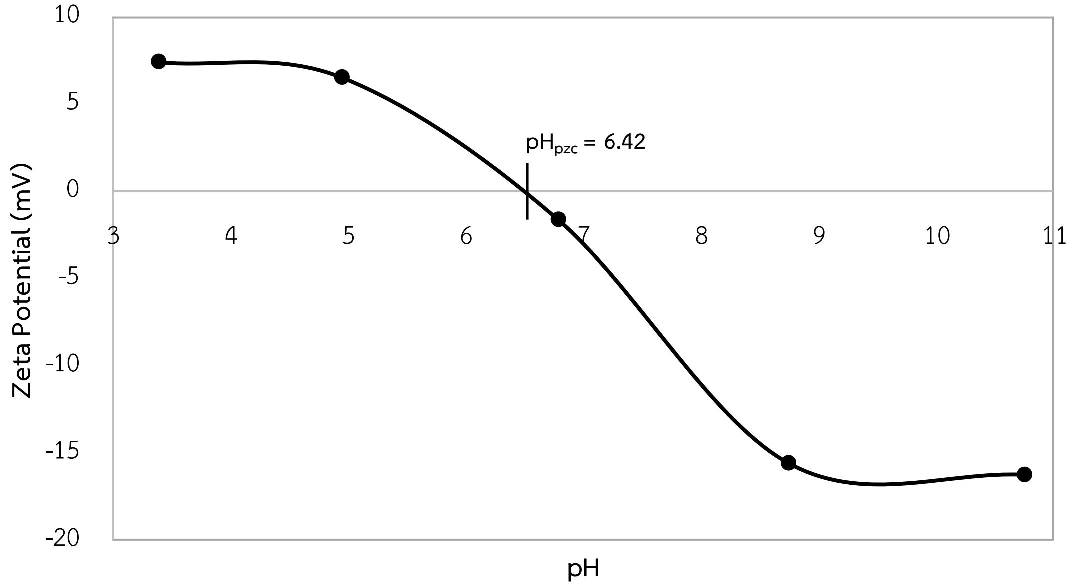
รูปที่ 4.11 รูปแบบ XRD ของตะกรันอลูมิเนียมก่อนใช้บำบัดไอออนสังกะสี

รูปที่ 4.12 แสดงรูปแบบ XRD ของผงตะกรันอลูมิเนียมหลังใช้บำบัดไอออนสังกะสีจากการทดลองที่ไม่ควบคุม (รูปที่ 4.12ก) และควบคุมพีเอชของน้ำเสีย (รูปที่ 4.12ก) พบว่ามีโครงสร้างผลึกของสังกะสีที่อยู่ในรูป Zinc hydroxide ($Zn(OH)_2$, JCPDS 48-1066) และ Zinc aluminium oxide ($ZnAl_2O_4$, JCPDS 74-1136) ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง XRF



รูปที่ 4.12 รูปแบบ XRD ของตะกรันอลูมิเนียมหลังใช้บำบัดไอออนสังกะสีจากการทดลองที่ (ก) ไม่ควบคุมพีเอช (ข) ควบคุมพีเอช

นอกจากนี้ยังศึกษาประจุที่พื้นผิวโดยการวิเคราะห์ค่า Zeta potential (ศักย์ซีตา) ด้วยเทคนิค pH titration ที่พีเอช 3, 5, 7, 9 และ 11 แสดงผลดังรูปที่ 4.13 จากผลการศึกษาพบว่ามีค่า Zeta potential เท่ากับ 7.39, 6.50, -1.68, -15.67 และ -16.33 mV ที่พีเอช 3, 5, 7, 9 และ 11 ตามลำดับ โดยจุดที่พื้นผิวของตะกรันอลูมิเนียมมีประจุรวมเป็นศูนย์ (point of zero charge: pH_{pzc}) เท่ากับ 6.42 ซึ่งเป็นจุดที่ประจุลบและประจุบวกที่พื้นผิวมีปริมาณสมดุลกันทำให้ค่า Zeta potential มีค่าเท่ากับ 0



รูปที่ 4.13 ค่า Zeta potential ของตะกรันอลูมิเนียม

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไอออนสังกะสี

ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม ทำการทดลองแบบกะและควบคุมอุณภูมิให้คงที่ตลอดการทดลองที่ 25±1 องศาเซลเซียส โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ การทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชและการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย มีตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ เวลา ปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้น ผลการศึกษามีรายละเอียด ดังนี้

4.2.1 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสี

ในการศึกษาผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัด ได้ออกแบบการทดลองให้ครอบคลุมการศึกษาในหัวข้อถัดไปและสอดคล้องกับลักษณะของน้ำเสียจริง โดยในการทดลองได้ใช้ปริมาณวัสดุ

ดูดซับ 0.1 และ 2 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 400 มก./ล. ซึ่งปรับเป็นพีเอชเป็น 3 และ 6 โดยเลือกศึกษาในช่วงดังกล่าวเนื่องจากเป็นค่าพีเอชที่พบในน้ำเสียจริง ผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

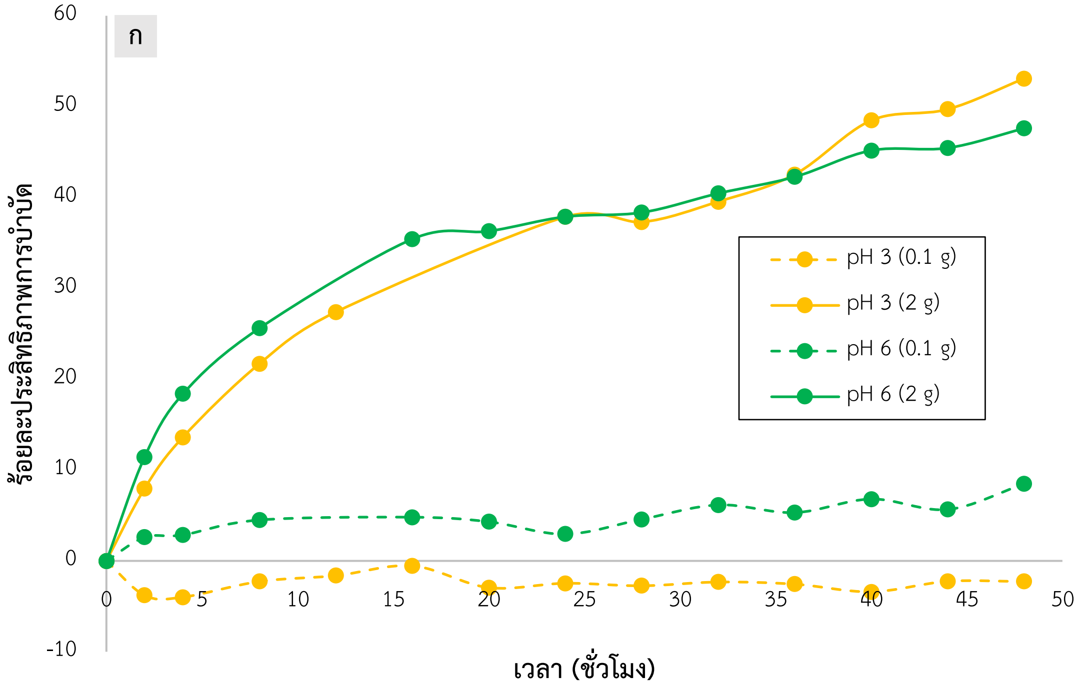
4.2.1.1 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์

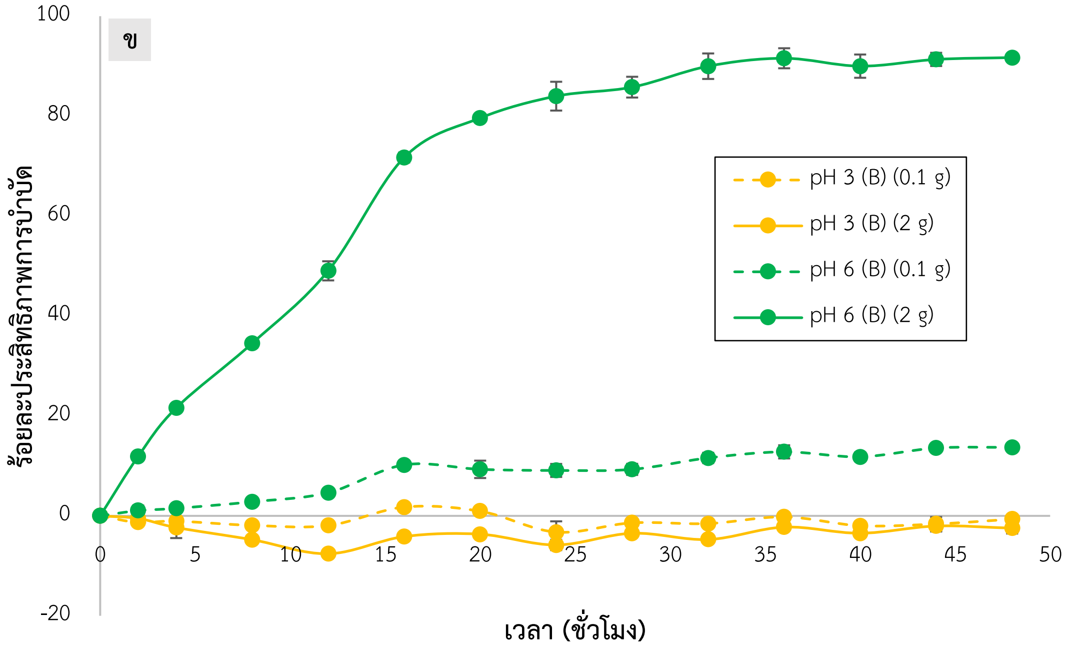
ศึกษาผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์ โดยกำหนดเวลาในการทดลองที่ 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44 และ 48 ชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.14

จากรูปที่ 4.14ก แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดไอออนสังกะสีจากการทดลองที่ไม่ควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสีย พบว่าในกรณีที่ใช้วัสดุดูดซับ 2 กรัม ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในช่วง 28 ชั่วโมงแรกของการทดลองมีค่าเท่ากับร้อยละ 37.29 และร้อยละ 38.36 สำหรับพีเอช 3 และ 6 ตามลำดับ และเมื่อใช้เวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นถึง 48 ชั่วโมง ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เท่ากับร้อยละ 47.60 และ 53.09 ตามลำดับ กรณีพีเอช 6 ใช้วัสดุดูดซับ 0.1 กรัม พบว่าที่เวลา 28 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับร้อยละ 4.58 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 8.47 เมื่อใช้เวลาในการทดลอง 48 ชั่วโมง ส่วนการทดลองที่พีเอช 3 ใช้วัสดุดูดซับ 0.1 กรัม พบว่าไม่สามารถบำบัดไอออนสังกะสีได้ และไอออนสังกะสีมีความเข้มข้นมากกว่าความเข้มข้นเริ่มต้น และเมื่อทำการทดลองชุดควบคุมเพื่อศึกษาการชะละลายของสังกะสีซึ่งเป็นส่วนประกอบที่พบอยู่ในผงเหล็กช็อตบลาสท์ก่อนนำมาใช้ทดลอง ผลการทดลองยืนยันได้ว่ามีสังกะสีชะละลายออกมาจากผงเหล็กช็อตบลาสท์

จากรูปที่ 4.14ข แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดไอออนสังกะสีจากการทดลองที่ควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสีย พบว่าที่พีเอช 6 ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 16 ชั่วโมงแรกของการทดลองเท่ากับร้อยละ 10.20 และ 71.01 เมื่อใช้วัสดุดูดซับ 0.1 และ 2 กรัม ตามลำดับ และการทดลองเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเพิ่มเวลาเป็น 40 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับร้อยละ 11.82 และ 90.00 เมื่อใช้วัสดุดูดซับ 0.1 และ 2 กรัม ตามลำดับ และเมื่อใช้เวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นเป็น 48 ชั่วโมงประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างคงที่ สำหรับพีเอช 3 พบว่าไม่สามารถบำบัดไอออนสังกะสีได้เช่นเดียวกับการทดลองที่ไม่ควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์

ดังนั้น จึงใช้ระยะเวลาการทดลองที่ 28 ชั่วโมงสำหรับการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอช และ 40 ชั่วโมงสำหรับการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย โดยจะใช้กำหนดระยะเวลาในการทดลองในขั้นตอนต่อไป





รูปที่ 4.14 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์ (ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 3 และ 6 ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1 และ 2 กรัม) (ก) ไม่ควบคุมพีเอช (ข) ควบคุมพีเอช

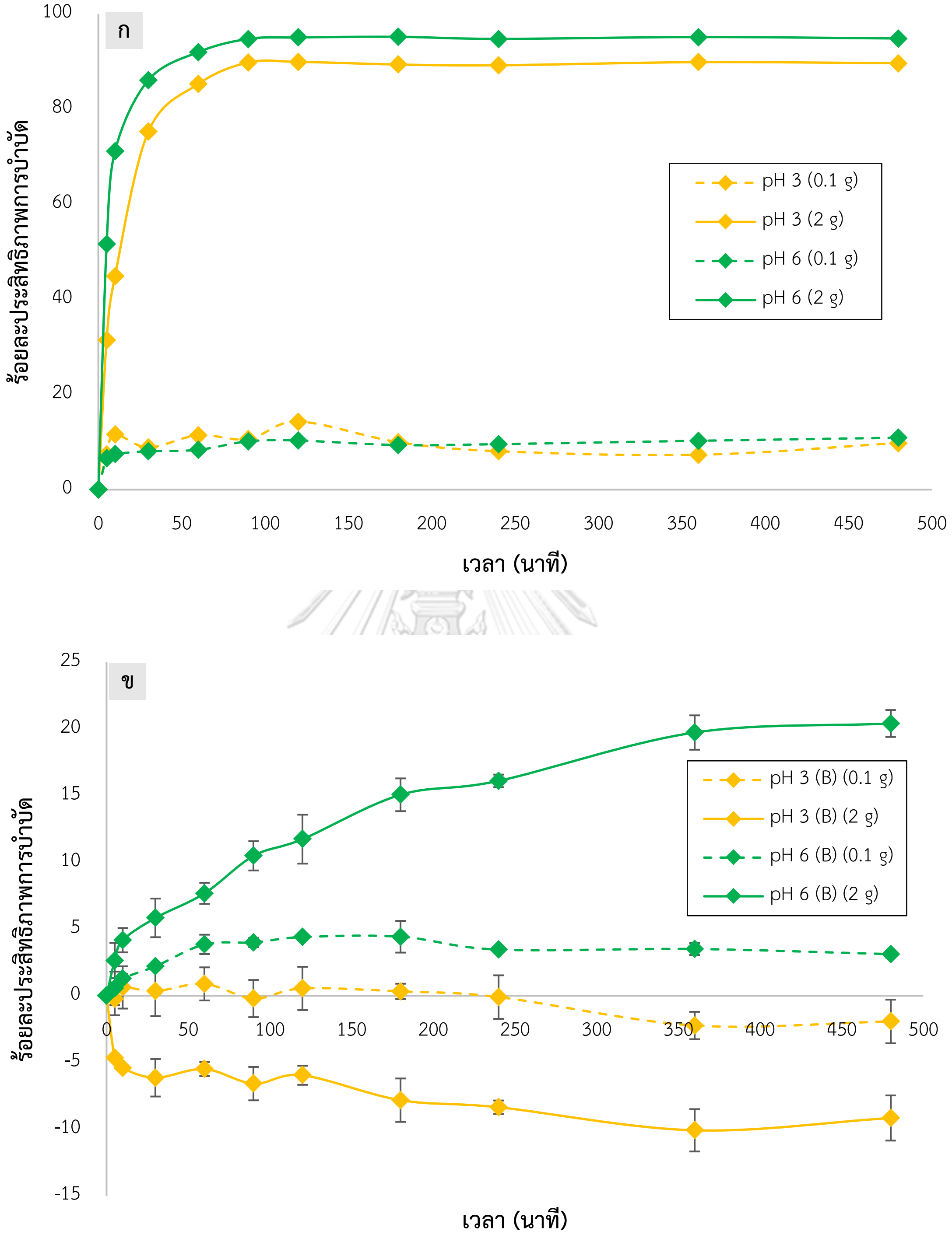
4.2.1.2 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียม

ศึกษาผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียม โดยกำหนดในการทดลองที่ 5, 10, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 360 และ 480 นาที ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.15

จากรูปที่ 4.15ก แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดไอออนสังกะสีจากการทดลองที่ไม่ควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสีย พบว่าการบำบัดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในช่วง 30 นาทีแรกทุกกรณี และเข้าสู่สมดุลภายในระยะเวลา 120 นาที โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับร้อยละ 14.30 (0.1 กรัม) และ 89.91 (2 กรัม) สำหรับพีเอช 3 และร้อยละ 10.33 (0.1 กรัม) และ 95.04 (2 กรัม) สำหรับพีเอช 6 และเมื่อใช้เวลาในการทดลองที่เพิ่มขึ้นถึง 2 กรัม ประสิทธิภาพในการบำบัดคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sarangi et al. (2012) ได้ศึกษาการบำบัดแคดเมี่ยม (Cd) ด้วยตะกรันอลูมิเนียมเช่นเดียวกัน โดยปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 2, 3, 4, 7, 8 และ 9 พบว่าการทดลองเข้าสู่ภาวะสมดุลภายใน 120 นาทีทุกกรณี

จากรูปที่ 4.15ข แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดไอออนสังกะสีจากการทดลองที่ควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ที่พีเอช 6 กรณีใช้วัสดุดูดซับ 0.1 กรัม การบำบัดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.21 ส่วนกรณีใช้วัสดุดูดซับ 2 กรัม พบว่าการบำบัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 180 นาทีแรก มีค่าเท่ากับร้อยละ 15.07 โดยทั้ง 2 กรณีให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลที่เวลา 360 นาที มีค่าเท่ากับร้อยละ 5.81 และ 19.74 สำหรับการทดลองที่ใช้วัสดุดูดซับ 0.1 และ 2 กรัม ตามลำดับ ส่วนการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 3 ทั้งกรณีที่ใช้วัสดุดูดซับ 0.1 และ 2 กรัม พบว่าไม่สามารถบำบัดไอออนสังกะสีได้ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองชุดควบคุมเพื่อตรวจสอบการชะละลายของไอออนสังกะสีจากตะกรันอลูมิเนียม พบว่าเมื่อใช้เวลาในการทดลอง 8 ชั่วโมง พบการชะละลาบของไอออนสังกะสี ดังนั้นที่พีเอชเริ่มต้น 3 จึงทำให้ความเข้มข้นของสังกะสีมีค่าเพิ่มขึ้น

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าระยะเวลาที่การทดลองเข้าสู่สมดุลเป็น 120 นาที สำหรับการทดลองที่ไม่ควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสีย และ 360 นาทีสำหรับการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย



รูปที่ 4.15 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียม (ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 3 และ 6 ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1 และ 2 กรัม) (ก) ไม่ควบคุมพีเอช (ข) ควบคุมพีเอช

จากการศึกษาผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลประสิทธิภาพบำบัดจะคงที่ เนื่องจากเริ่มต้นทุกตำแหน่งบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับยังว่างและความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับยังมีความเข้มข้นสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปพื้นที่ว่างบนผิววัสดุดูดซับเต็มไปด้วยสารที่ถูกดูดซับและความเข้มข้นของสารถูกดูดซับลดลงจนเข้าสู่ภาวะสมดุล (Rahmani, Mousavi and Fazli, 2010)

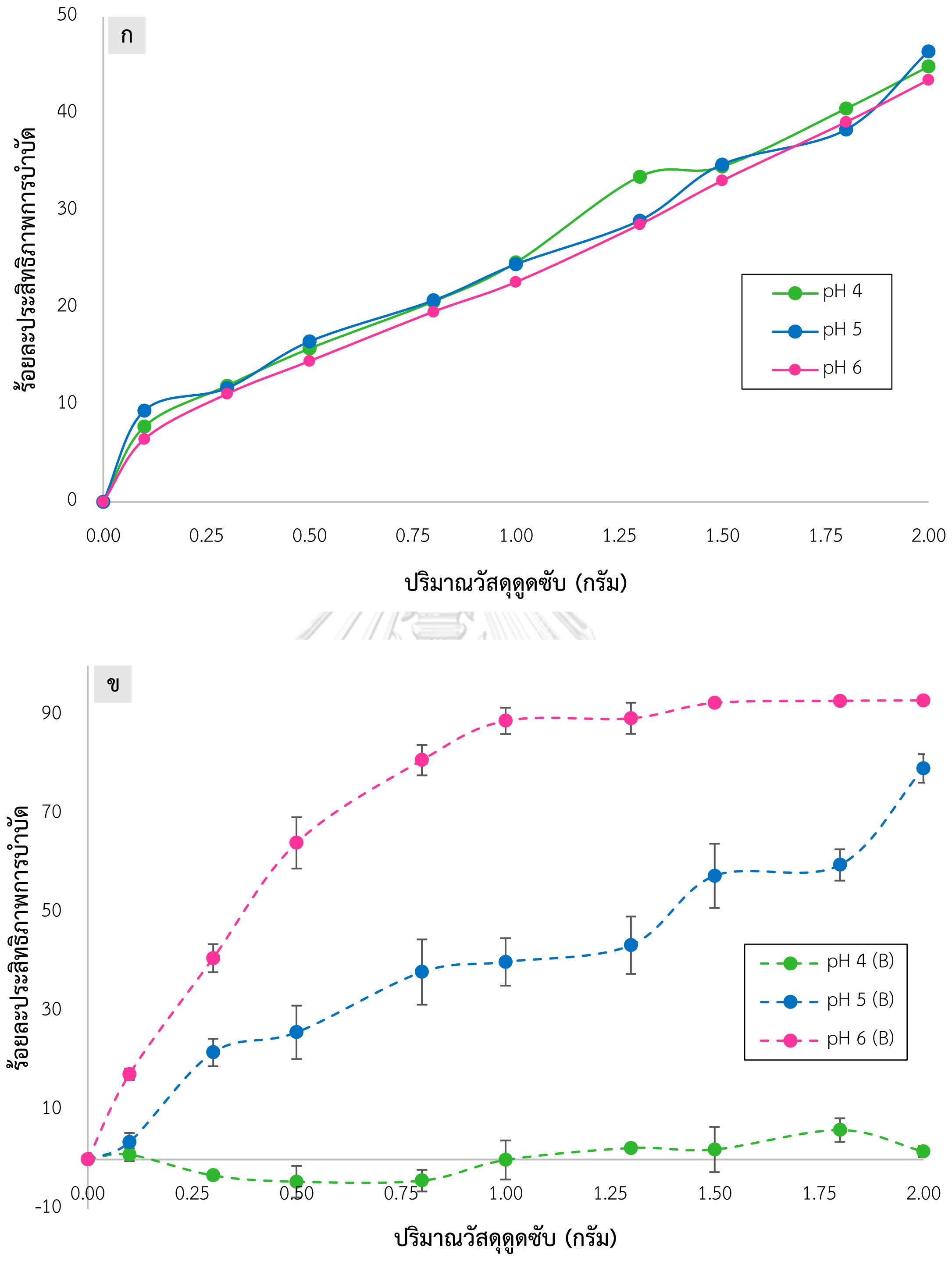
4.2.2 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสี

ในการศึกษาผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม ในการทดลองได้ใช้ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 1.3, 1.5, 1.8, และ 2 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 400 มก./ล. ซึ่งจากการศึกษาผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัด (หัวข้อ 4.2.1) พบว่า มีหลายกรณีที่น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชเริ่มต้น 3 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ต่ำ และบางกรณีไม่สามารถบำบัดไอออนสังกะสีได้ หากพิจารณาถึงการนำไปใช้จริงจึงไม่สมควรปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับ 3 ดังนั้นการศึกษาในหัวข้อนี้จึงเลือกศึกษาที่พีเอช 4, 5 และ 6 เท่านั้น ผลการศึกษามีรายละเอียด ดังนี้

4.2.2.1 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์

รูปที่ 4.16 แสดงผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์ จากรูปที่ 4.16ก เป็นผลจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย โดยกำหนดเวลาในการทดลองที่ 28 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1 กรัม จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับร้อยละ 6.48, 9.42 และ 7.77 สำหรับพีเอช 4, 5 และ 6 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับถึง 2 กรัม ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นทุกกรณีมีค่าเท่ากับร้อยละ 44.87, 46.44 และ 43.39 สำหรับพีเอช 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.16ข แสดงผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย โดยกำหนดเวลาในการทดลองที่ 40 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า ที่พีเอช 4 เมื่อใช้วัสดุดูดซับน้อยกว่า 1 กรัม ยังไม่สามารถบำบัดไอออนสังกะสีได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับเป็น 1.3-2 กรัม จึงเริ่มบำบัดไอออนสังกะสีได้เล็กน้อย ส่วนที่พีเอช 5 พบว่าประสิทธิภาพบำบัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุ เท่ากับร้อยละ 3.55-79.25 เมื่อใช้วัสดุดูดซับ 0.1-2 กรัม และที่พีเอช 6 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจาก 0.1-1 กรัม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.80-88.88 และเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับถึง 2 กรัม ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเป็นร้อยละ 92.01 ดังนั้นที่พีเอช 6 ใช้วัสดุดูดซับเพียง 1 กรัม ก็ถือว่าเพียงต่อการบำบัดไอออนสังกะสี 400 มก./ล.



รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์ (ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 4-6 ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1-2 กรัม/50 มล.) (ก) ไม่ควบคุมพีเอช (เวลาที่ใช้ 28 ชั่วโมง) (ข) ควบคุมพีเอช (เวลาที่ใช้ 40 ชั่วโมง)

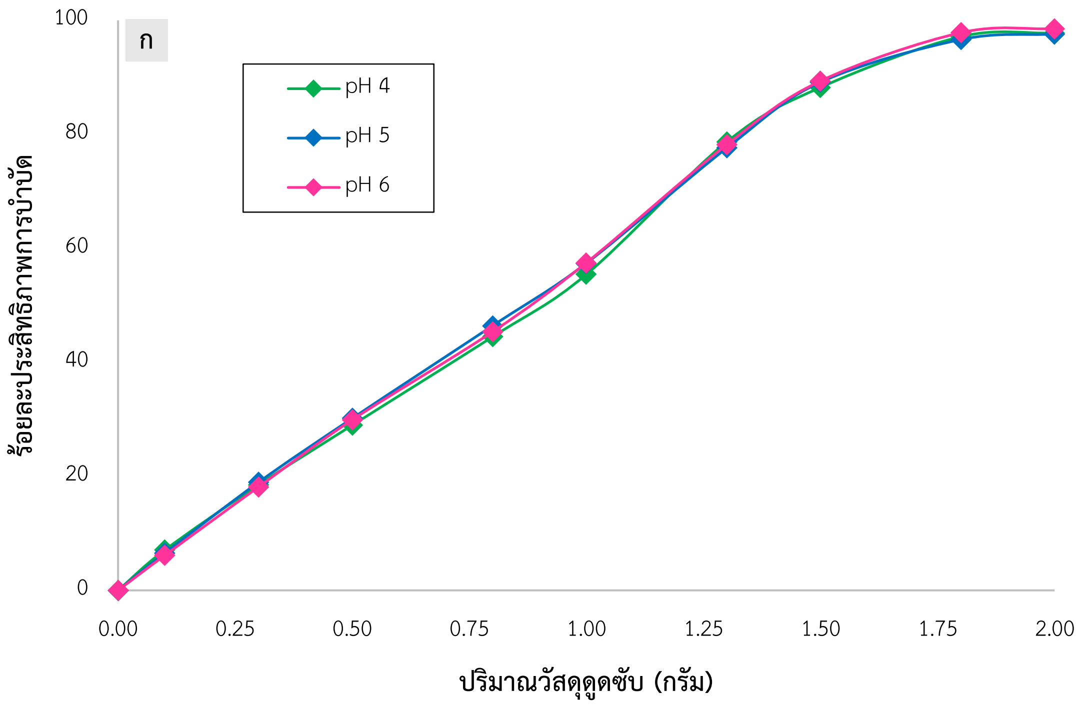
4.2.2.2 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียม

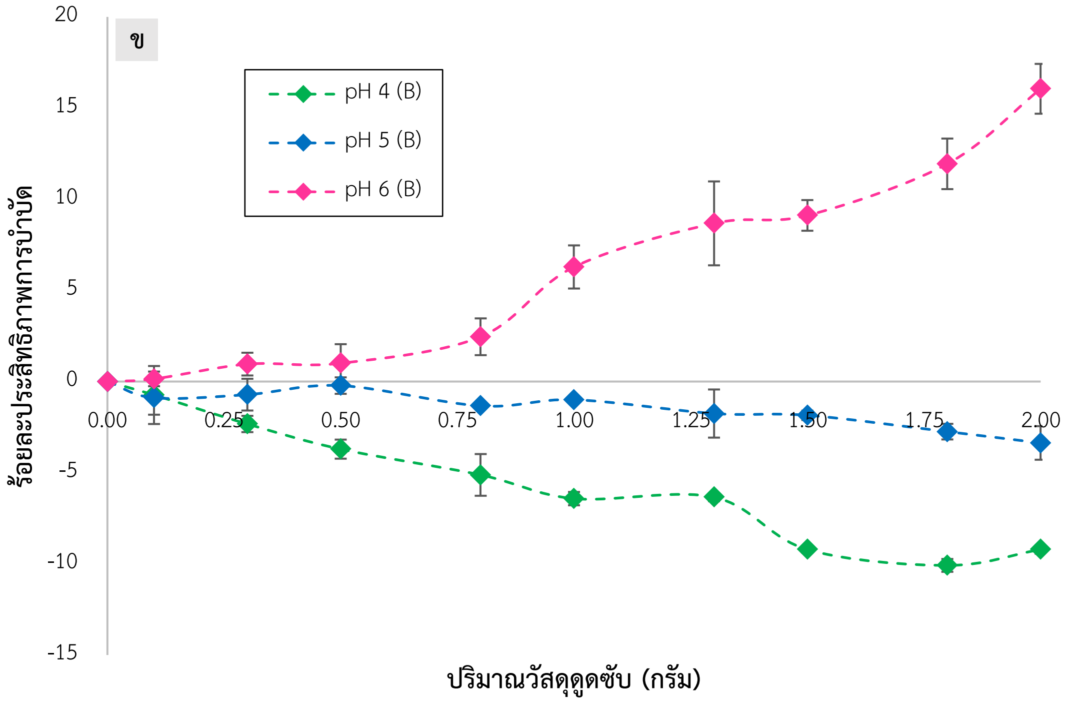
รูปที่ 4.17 แสดงผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียม จากรูปที่ 4.17ก แสดงผลจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย โดยกำหนดเวลาในการทดลองที่ 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า ทุกกรณีให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่แตกกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 6.06-7.08 เมื่อใช้วัสดุดูดซับ 0.1 กรัม และเมื่อเพิ่มเป็น 2 กรัมประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 97.60-98.54

จากรูปที่ 4.17ข แสดงผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย โดยกำหนดเวลาในการทดลองที่ 6 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า กรณีพีเอช 6 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.14 เป็น 16.06 สำหรับวัสดุดูดซับ 0.1 กรัม และ 2 กรัม ตามลำดับ โดย Bhargava and Sheldarkar (1992) ได้อธิบายว่าการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับ ทำให้การแข่งขันระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่สำหรับดูดซับลดลง ดังนั้นปริมาณโลหะหนักจึงถูกกำจัดได้มากขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับสารที่เพิ่มขึ้น ส่วนกรณีพีเอช 4 และ 5 พบว่าไม่สามารถบำบัดไอออนสังกะสีได้ และพบว่ามีปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีเพิ่มขึ้นตามปริมาณของตะกรันอลูมิเนียมที่ใช้ เมื่อทำการทดลองชุดควบคุมจึงยืนยันได้ว่าเกิดจากการชะลายของสังกะสีจากวัสดุดูดซับตามที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.2.1.2

4.3 กลไกการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช๊อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม

จากผลการศึกษาพบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสี เนื่องจากประจุรวมที่พื้นผิวของวัสดุดูดซับจะเป็นบวกหรือลบ ขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย ในการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียและใช้ตะกรันอลูมิเนียมเป็นวัสดุดูดซับ พบว่าพีเอชสุดท้ายมีค่าเพิ่มขึ้นจากพีเอชเริ่มต้นตามปริมาณของตะกรันอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง เมื่อใช้ตะกรันอลูมิเนียมเพียง 0.1 กรัม ทำให้พีเอชเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 6.19-6.30 และเมื่อเพิ่มตะกรันอลูมิเนียมเป็น 2 กรัม ทำให้ค่าเพิ่มขึ้นถึง 7.68-7.96 ในทุกการทดลอง (ภาคผนวก ก) โดย Mahinroosta and Allahverdi (2018) ได้อธิบายถึงลักษณะดังกล่าวว่า ในทางปฏิกิริยาเคมีตะกรันอลูมิเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ ไอน้ำ หรือความชื้นในอากาศเพื่อผลิตก๊าซบางชนิด เช่น มีเทน ฟอสฟีน ไฮโดรเจนซัลไฟด์และแอมโมเนีย เนื่องจากองค์ประกอบของ Al_4C_3, AlP, Al_2S_3 และ Al_5O_6N ที่มีอยู่ในตะกรันอลูมิเนียม ดังสมการที่ 4.1-4.5





รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียม (ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 4-6 ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.1-2 กรัม/50 มล.) (ก) ไม่ควบคุมพีเอช (เวลาที่ใช้ 2 ชั่วโมง) (ข) ควบคุมพีเอช (เวลาที่ใช้ 6 ชั่วโมง)

$$AlN + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + NH_3 \quad (4.1)$$

$$2Al_5O_6N + 3H_2O \rightarrow 5Al_2O_3 + 2NH_3 \quad (4.2)$$

$$AlP + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + PH_3 \quad (4.3)$$

$$Al_2S_3 + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3H_2S \quad (4.4)$$

$$Al_4C_3 + 12H_2O \rightarrow 4Al(OH)_3 + 3CH_4 \quad (4.5)$$

สำหรับก๊าซแอมโมเนียถูกปลดปล่อยอย่างมีนัยสำคัญจากการทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่งก๊าซแอมโมเนียจะถูกละลายน้ำได้ง่ายและสามารถเพิ่มค่าพีเอชของน้ำได้ถึง 9 หรือมากกว่านั้น ดังสมการที่ 4.6

$$NH_3 + H_2O \leftrightarrow NH_4^+ + OH^- \quad (4.6)$$

ดังนั้นในการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชจะเกิด OH^- ที่ทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียสูงขึ้น ไอออนโลหะจึงถูกกำจัดโดยการฟอร์มตัวกับ OH^- แบบ double layer เกิดการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ดังสมการที่ 4.7 และ 4.8 (Abdullah et al., 1999) และสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์รูปแบบผลึกของตะกรันอลูมิเนียมหลังใช้บำบัดไอออนสังกะสีด้วยเครื่อง XRD พบว่าผลึกอยู่ในรูป Zinc Hydroxide ($Zn(OH)_2$)

$$Zn^{2+} + OH^- \rightarrow ZnOH^+ \quad (4.7)$$

$$ZnOH^+ + OH^- \rightarrow Zn(OH)_2 \quad (4.8)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สำหรับการทดลองที่ควบคุมพีเอช ทำให้ค่าพีเอชสุดท้ายเปลี่ยนแปลงจากพีเอชเริ่มต้นน้อยกว่าการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอช เนื่องจากสารละลายบัฟเฟอร์ที่ใช้ทำหน้าที่รักษาค่าพีเอชให้คงที่หรือเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย สำหรับสมดุลในระบบที่มีสารละลายบัฟเฟอร์ที่ประกอบด้วย CH_3COOH (กรดอ่อน) และ CH_3COONa (เกลือของกรดอ่อน) แสดงดังสมการที่ 4.9-4.10

$$CH_3COONa \leftrightarrow CH_3COO^- + Na^+ \quad (4.9)$$

$$CH_3COOH + H_2O \leftrightarrow CH_3COO^- + H_2O^+ \quad (4.10)$$

เมื่อระบบมี H_3O^+ ที่ทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียลดลง จะถูกกำจัดโดย CH_3COO^- และเมื่อมี OH^- ที่ทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียเพิ่มขึ้นจะถูกกำจัดโดย CH_3COOH ดังสมการที่ 4.11-4.12

$$H_3O^+ + CH_3COO^- \leftrightarrow CH_3COOH + H_2O \quad (4.11)$$

$$OH^- + CH_3COOH \leftrightarrow CH_3COO^- + H_2O \quad (4.12)$$

ดังนั้นค่าพีเอชสุดท้ายจากการทดลองที่ใช้สารละลายบัฟเฟอร์จึงเปลี่ยนแปลงไปจากพีเอชเริ่มต้นน้อยกว่าการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอช จึงเกิดตกตะกอนทางเคมีได้น้อยกว่าการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอช โดย Farghali et al. (2013) ได้ศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนตะกั่ว (Pb) จากสารละลายด้วยออกไซด์ของทองแดง ที่พีเอชเริ่มต้น 3.0-6.5 เพื่อหลีกเลี่ยงการตกตะกอนทางเคมี พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น และได้อธิบายว่าที่พีเอชต่ำ ประสิทธิการดูดซับไอออนโลหะหนักจะต่ำ เนื่องจากโปรตอนในสารละลายกับไอออนบวกของโลหะเกิดการแข่งขันสำหรับพื้นที่ดูดซับ และทำให้พื้นผิวของวัสดุดูดซับส่วนใหญ่เป็นประจุบวก ไอออนบวกของโลหะจึงถูกดูดซับไปยังพื้นผิวของวัสดุดูดซับได้ยากขึ้น เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นประจุบวกที่พื้นผิวจะค่อย ๆ ลดลง จึงลดการสูญเสียอิเล็กตรอนระหว่างพื้นผิวของวัสดุและไอออนบวก ดังนั้นประจุรวมที่พื้นผิวของวัสดุดูดซับจะเป็นบวกหรือลบจึงขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย และเมื่อพิจารณาถึงค่าศักย์ซีตา พบว่า pH_{pzc} ของตะกรันอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 6.42 ซึ่งการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอช มีค่าพีเอชสุดท้ายอยู่ในช่วง 7.68-7.96 ซึ่งมากกว่าค่า pH_{pzc} ($pH_{final} > pH_{pzc}$) พื้นผิวของวัสดุดูดซับจึงมีประจุรวมเป็นลบ (Liu et al., 2012) สามารถที่จะดูดซับไอออนบวกของโลหะหนักได้ดีกว่าการทดลองที่ควบคุมพีเอช ซึ่งมีค่าพีเอชสุดท้ายใกล้เคียงกับค่า pH_{pzc}

และจากการศึกษารูปแบบผลึกของตะกรันอลูมิเนียมก่อนการใช้บำบัดไอออนสังกะสี พบว่าผลึกอยู่ในรูป Aluminium Oxide (Al_2O_3) (รูปที่ 4.11) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น Aluminium Hydroxide ดังสมการที่ 4.13 และเกิดปฏิกิริยาการดูดซับไอออนสังกะสีโดยหมู่ฟังก์ชัน hydroxyl ที่พื้นผิวของวัสดุดูดซับโดยการสร้างสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งจากการศึกษารูปแบบผลึกของตะกรันอลูมิเนียมหลังจากการใช้บำบัดไอออนสังกะสีพบผลึกอยู่ในรูป Zinc Aluminium Oxide ($ZnAl_2O_4$) (รูปที่ 4.12) สามารถแสดงปฏิกิริยาการดูดซับได้ดังสมการที่ 4.14

$$Al_2O_3 + H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 \quad (4.13)$$

$$2Al(OH)_3 + Zn^{2+} \rightarrow ZnAl_2O_4 + 2H^+ + H_2O \quad (4.14)$$

เช่นเดียวกันพีเอชของน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์ โดย Liang et al. (2014) ได้อธิบายถึงปฏิกิริยาการกำจัดสังกะสีโดยใช้เหล็กประจุศูนย์ (Fe^0) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของผงเหล็กช็อตบลาสท์ โดยในภาวะที่เป็นกรดเหล็กประจุศูนย์จะทำปฏิกิริยากับ H^+ และออกซิเจน ทำให้เหล็กประจุศูนย์ละลายเป็น Fe^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งจะยับยั้งการสร้างเหล็กออกไซด์บริเวณพื้นผิวที่เป็นส่วนสำคัญในการดูดซับไอออนโลหะหนัก ดังสมการที่ 4.15-4.17

$$Fe^0 + 2H^+ \rightarrow Fe^{2+} + H_2 \quad (4.15)$$

$$2Fe^0 + O_2 + 4H^+ \rightarrow 2Fe^{2+} + 2H_2O \quad (4.16)$$

$$4Fe^{2+} + O_2 + 4H^+ \rightarrow 4Fe^{3+} + 2H_2O \quad (4.17)$$

และเมื่อพีเอชสูงขึ้นพื้นผิวของเหล็กประจุศูนย์จะถูกกัดกร่อนโดยน้ำและออกซิเจน สามารถฟอร์มตัวเป็น Iron hydroxide ดังสมการที่ 4.18-4.20 ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับสำหรับการดูดซับไอออนโลหะได้ และสามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดซับไอออนสังกะสีโดยหมู่ฟังก์ชัน hydroxyl ที่พื้นผิวของวัสดุดูดซับ ดังสมการที่ 4.21 ซึ่งจากการศึกษารูปแบบผลึกของผงเหล็กช็อตบลาสท์หลังจากการใช้บำบัดไอออนสังกะสีพบผลึกอยู่ในรูป Zinc Iron Oxide ($ZnFe_2O_4$) (รูปที่ 4.6)

$$Fe^0 + 2H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2OH^- + H_2 \quad (4.18)$$

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 \quad (4.19)$$

$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3 \quad (4.20)$$

$$2Fe(OH)_3 + Zn^{2+} \rightarrow ZnFe_2O_4 + 2H^+ + H_2O \quad (4.21)$$

นอกจากนั้น OH^- ซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนของน้ำและออกซิเจนดังสมการที่ 4.18 สามารถฟอร์มตัวกับไอออนโลหะหนัก เกิดการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ดังสมการที่ 4.7 และ 4.8 เช่นเดียวกับตะกรันอลูมิเนียม

จากปฏิกิริยาที่ได้กล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การบำบัดไอออนสังกะสีไม่ได้เกิดจากกลไกการดูดซับเพียงอย่างเดียว แต่รวมไปถึงกลไกการตกตะกอนทางเคมี และจากการศึกษารูปแบบผลึกของวัสดุดูดซับหลังจากการใช้บำบัดไอออนสังกะสีด้วยเครื่อง XRD สามารถยืนยันได้ว่าการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียมและผงเหล็กช็อตบลาสท์มีรูปแบบของผลึกที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4 การชะละลายของไอออนโลหะจากผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม

ในการศึกษาการชะลายของไอออนโลหะตัวอื่น ๆ ได้ใช้น้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดจากภาวะการทดลองที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดในหัวข้อ 4.2.2 ทั้งการทดลองที่ควบคุมพีเอชและไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักตัวอื่น ๆ ซึ่งพบว่าการทดลองที่ใช้วัสดุดูดซับ 2 กรัม และพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้น 6 เป็นภาวะที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดทั้งผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม และสำหรับโลหะหนักที่เลือกวิเคราะห์จะพิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิดเป็นหลัก ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาการชะละลายของไอออนโลหะจากผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม

โลหะ	ผงเหล็กช็อตบลาสท์		ตะกรันอลูมิเนียม		ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (มก./ล.)[ก]
	ไม่ควบคุมพีเอช (มก./ล.)	ควบคุมพีเอช (มก./ล.)	ไม่ควบคุมพีเอช (มก./ล.)	ควบคุมพีเอช (มก./ล.)	
$Zn_{เริ่มต้น}$	382.89	388.26	375.28	387.72	
$Zn_{สุดท้าย}$	216.37	27.02	5.49	328.87	5
Al	-	-	0.275	2.96	-
Fe	10.86	161.41	1.135	1.100	10
Mn	6.78	27.65	0.075	0.490	5.00
Cu	0.05	0.13	0.140	0.165	2.00
Ni	0.27	<0.10	<0.035	<0.035	1.00
Cr	-	-	0.045	0.050	0.75 (Cr^{3+}) 0.25 (Cr^{6+})

[ก]ประกาศนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ที่ 76/2560 เรื่อง กำหนดมาตรฐานทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางที่ 4.7 แสดงความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดจากการศึกษาการชะละลายของไอออนโลหะชนิดอื่น ๆ จากผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม หากพิจารณาเฉพาะความเข้มข้นของโลหะชนิดอื่น ๆ (Al, Fe, Mn, Cu, Ni และ Cr) ที่ชะละลายในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์ มีการชะละลายของแมงกานีส (Mn) และเหล็กทั้งหมด (total Fe) เกินค่ามาตรฐานกำหนด ส่วนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยตะกรันอลูมิเนียมไม่พบการชะละลายของโลหะที่เกินค่ามาตรฐานทั้ง 2 การทดลอง ซึ่งการเลือกวัสดุดูดซับหนึ่งชนิดไปทดลองบำบัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียจริงแบบคอลัมน์ จะพิจารณาจากประสิทธิภาพการบำบัดใน

หัวข้อ 4.2 เป็นหลัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ไม่ควบคุม พีเอชให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดถึงร้อยละ 98.54 โดยที่ใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลน้อยที่สุดเพียง 2 ชม. ประกอบกับไม่พบการชะละลายของไอออนโลหะตัวอื่น ๆ เกินค่ามาตรฐาน จึงเลือกใช้ตะกรันอลูมิเนียมสำหรับการทดลองบำบัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียจริงแบบคอลัมน์ในขั้นต่อไป

สำหรับผงเหล็กช็อตบลาสท์จากการทดลองที่ควบคุมพีเอช ให้ประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่าร้อยละ 90 เช่นเดียวกัน แต่จากการศึกษาผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดในหัวข้อ 4.2.1.1 แสดงให้เห็นว่าการบำบัดด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์ต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่นานถึง 40 ชั่วโมง ในขณะที่ตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลเพียง 2 ชั่วโมง เนื่องจากปฏิกิริยาในการบำบัดโลหะหนักด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์จะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อพื้นผิวของเหล็กถูกกัดกร่อนด้วยน้ำและออกซิเจนจนเกิดเป็นชั้นออกไซด์ที่เป็นส่วนสำคัญในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัดนานกว่าตะกรันอลูมิเนียมซึ่งการบำบัดเกิดจากการตกตะกอนทางเคมี และเมื่อผงเหล็กช็อตบลาสท์ถูกน้ำกัดกร่อนยังเป็นสาเหตุที่ทำให้มีการชะละลายของเหล็กทั้งหมดออกมาเกินค่ามาตรฐาน ดังตารางที่ 4.7 และเมื่อพิจารณาถึงการใช้งานจริง การบำบัดโดยที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียสามารถลดความซับซ้อนในการดำเนินงานได้อีกด้วย

ดังนั้น จากเหตุผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าตะกรันอลูมิเนียมมีความเหมาะสมในการนำไปทดลองแบบคอลัมน์มากกว่าผงเหล็กช็อตบลาสท์ ทั้งในแง่ของเวลา ประสิทธิภาพการบำบัดและไม่พบการชะละลายของโลหะชนิดอื่น ๆ ออกมาเกินค่ามาตรฐาน

4.5 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetic)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับได้นำผลการทดลองจากหัวข้อ 4.2.1 มาคำนวณค่าคงที่จลนศาสตร์ตามสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second order) โดยจะใช้ผลการทดลองที่สามารถบำบัดไอออนสังกะสีมาคำนวณ สำหรับการทดลองที่ไม่สามารถบำบัดไอออนสังกะสีได้จะไม่ถูกนำมาศึกษาในหัวข้อนี้

สำหรับแบบจำลอง pseudo-first order ให้นำผลการทดลองมาพล็อตกราฟสมการเส้นตรงโดยให้แกน x เป็น t และแกน y เป็น $\log(q_e - q_t)$ จะได้ความชันมีค่าเท่ากับค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (k_1) และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$ และจะคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับ (q_e) ได้จากจุดตัดแกน y ของสมการเส้นตรง และสำหรับแบบจำลอง Pseudo-second order ให้นำผลการทดลองมาพล็อตกราฟเส้นตรงโดยให้แกน x เป็น t และแกน y เป็น t/q_t จะได้ความชันมีค่าเท่ากับ $1/q_e$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/k_2q_e^2$ โดยจะคำนวณค่า

q_e ได้จากความชัน และค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (k_2) ได้จากจุดตัดแกน y ของสมการเส้นตรง เมื่อได้ค่าคงที่ต่าง ๆ จากการคำนวณแล้วสามารถใช้ค่าคงที่ดังกล่าวมาทำนายค่าความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใด ๆ ($q_{t,\mathrm{cal}}$) ตามแบบจำลองที่สอดคล้องกับการทดลอง ผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

4.5.1 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของผงเหล็กช็อตบลาสท์

จากรูปที่ 4.18 แสดงกราฟเส้นตรงของการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย พบว่ากรณีที่พีเอช 3 ใช้วัสดุดูดซับ 2 กรัม มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) ตามสมการ pseudo-second order เท่ากับ 0.9643 และ กรณีพีเอช 6 มีค่า r^2 เท่ากับ 0.9636 และ 0.9909 เมื่อใช้วัสดุดูดซับ 0.1 กรัม และ 2 กรัม ตามลำดับ

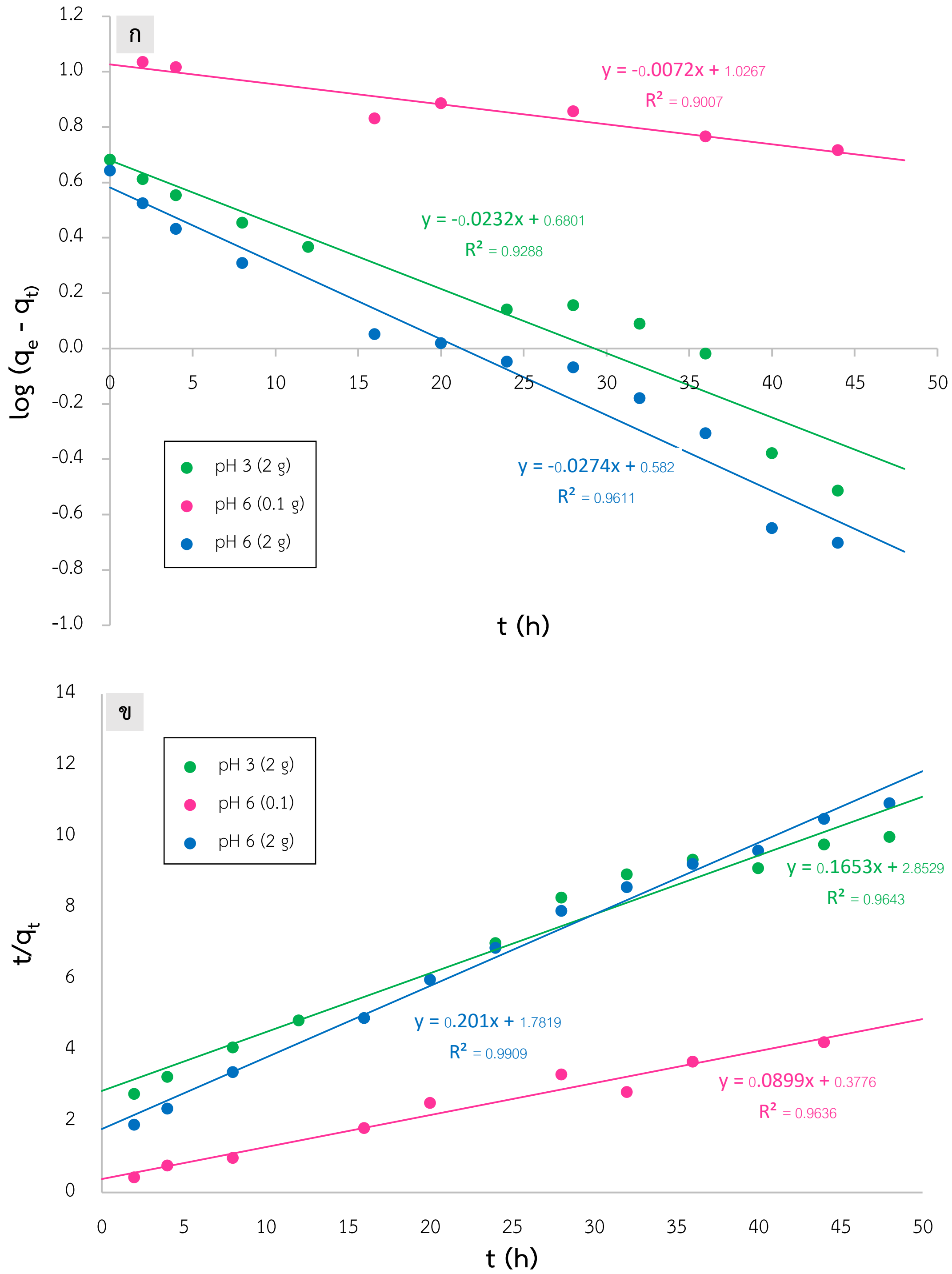
รูปที่ 4.19 แสดงกราฟเส้นตรงจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย พบว่าค่า r^2 ตามสมการ pseudo-second order กรณีพีเอช 6 เท่ากับ 0.9960 และ 0.9959 เมื่อใช้วัสดุดูดซับ 0.1 และ 2 กรัม ตามลำดับ สำหรับกรณีที่พีเอชเริ่มต้น 3 ไม่สามารถบำบัดไอออนสังกะสีได้จึงไม่สามารถคำนวณหาค่าคงที่จลนศาสตร์ได้ เมื่อพิจารณาค่า r^2 ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ pseudo-second order มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการ pseudo-first order และเมื่อพิจารณาค่า q_e ที่ได้จากการคำนวณยังมีค่าใกล้เคียงกับ q_e ที่ได้จากการทดลองมากกว่าด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงใช้ค่า q_e และ k_2 ที่ได้จากสมการเส้นตรงมาคำนวณความสามารถในการดูดซับ ($q_{t,\mathrm{cal}}$) ณ เวลาใดๆ ตามสมการ pseudo-second order โดยสามารถจัดรูปสมการให้ q_t อยู่ในรูปฟังก์ชันของ t ได้ดังสมการที่ 4.19

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2}{1 + k_2 q_e t} t \qquad (4.19)$$

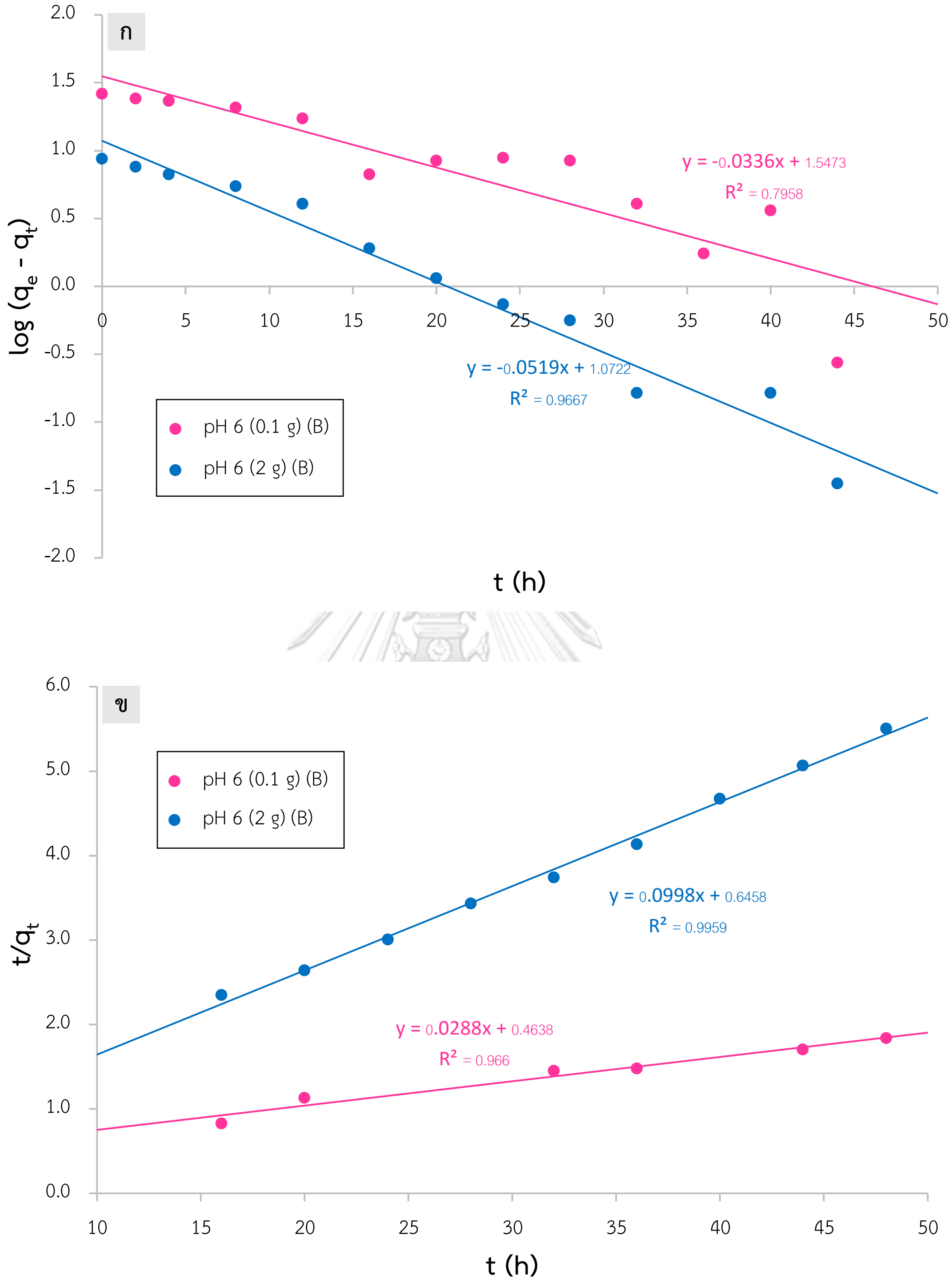
เมื่อคำนวณ q_t ตามสมการที่ 4.19 แล้ว สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ ($q_{t,\mathrm{cal}}$) กับเวลาใด ๆ ตามสมการ pseudo-second order ดังรูปที่ 4.20

จากการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์ จึงสรุปได้ว่าสอดคล้องกับสมการ pseudo-second order รายละเอียดค่าคงที่จลนศาสตร์แสดงดังตารางที่ 4.8

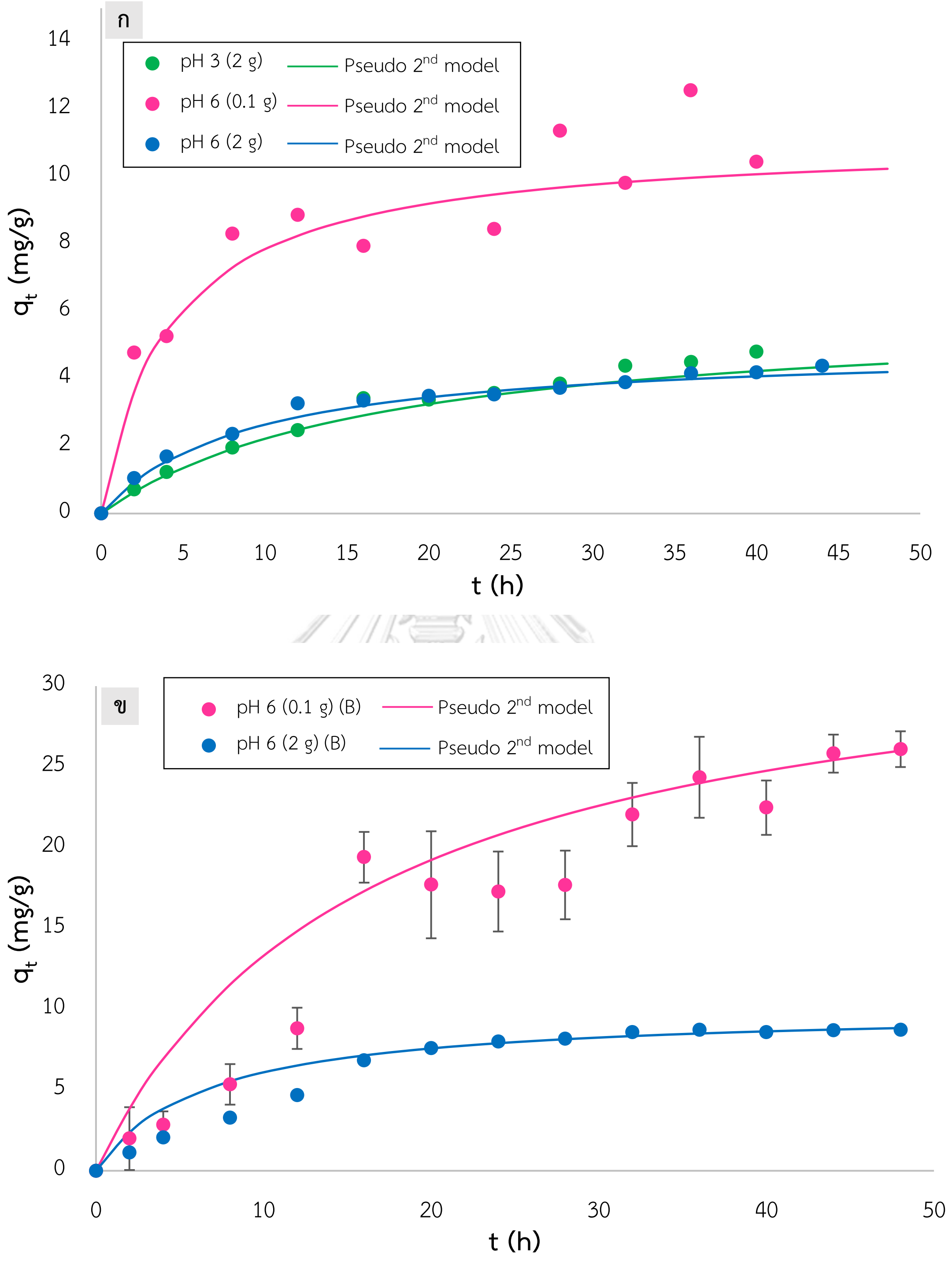
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.18 กราฟสมการเส้นตรงของผงเหล็กช็อตบลาสท์จากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย ตามสมการ (ก) pseudo-first order และ (ข) pseudo-second order



รูปที่ 4.19 กราฟสมการเส้นตรงของผงเหล็กช็อตบลาสท์จากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย ตามสมการ (ก) pseudo-first order และ (ข) pseudo-second order



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ ($q_{t,cal}$) กับเวลาใด ๆ (t) ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ pseudo-second order เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ($q_{t,exp}$) ของผงเหล็กช็อตบลาสท์ (ก) การทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย (ข) การทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย

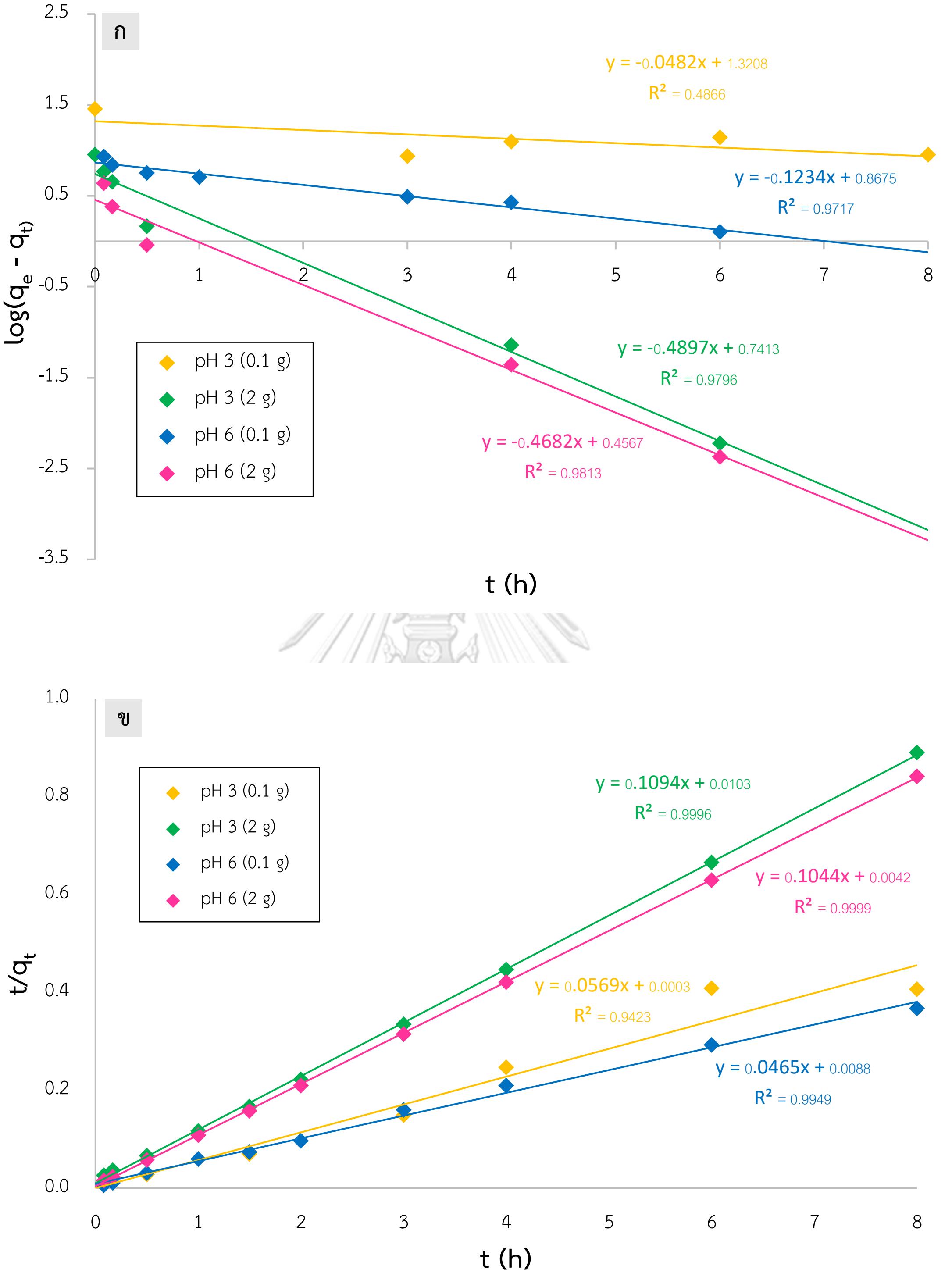
ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่จลนศาสตร์การดูดซับตามแบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order ของผงเหล็กช็อตบลาสท์จากการคำนวณโดยสมการเส้นตรง

การทดลอง		$q_{e,\exp}$ (mg/g)	แบบจำลอง					
			Pseudo-first order			Pseudo-second order		
			k_1 1/min	$q_{e,\mathrm{cal}}$ (mg/g)	r^2	k_2 (g/mg.h)	$q_{e,\mathrm{cal}}$ (mg/g)	r^2
ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย	pH 3 (2 g)	4.81	-0.0232	4.79	0.9288	0.0096	6.05	0.9643
	pH 6 (0.1 g)	15.64	-0.0072	10.63	0.9007	0.0214	11.13	0.9635
	pH 6 (2 g)	4.39	-0.0274	3.82	0.9611	0.0227	4.98	0.9909
ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย	pH 6 (0.1 g)	26.10	-0.0336	35.27	0.7958	0.0018	34.72	0.9960
	pH 6 (2 g)	8.72	-0.0519	11.81	0.9667	0.0154	10.02	0.9959

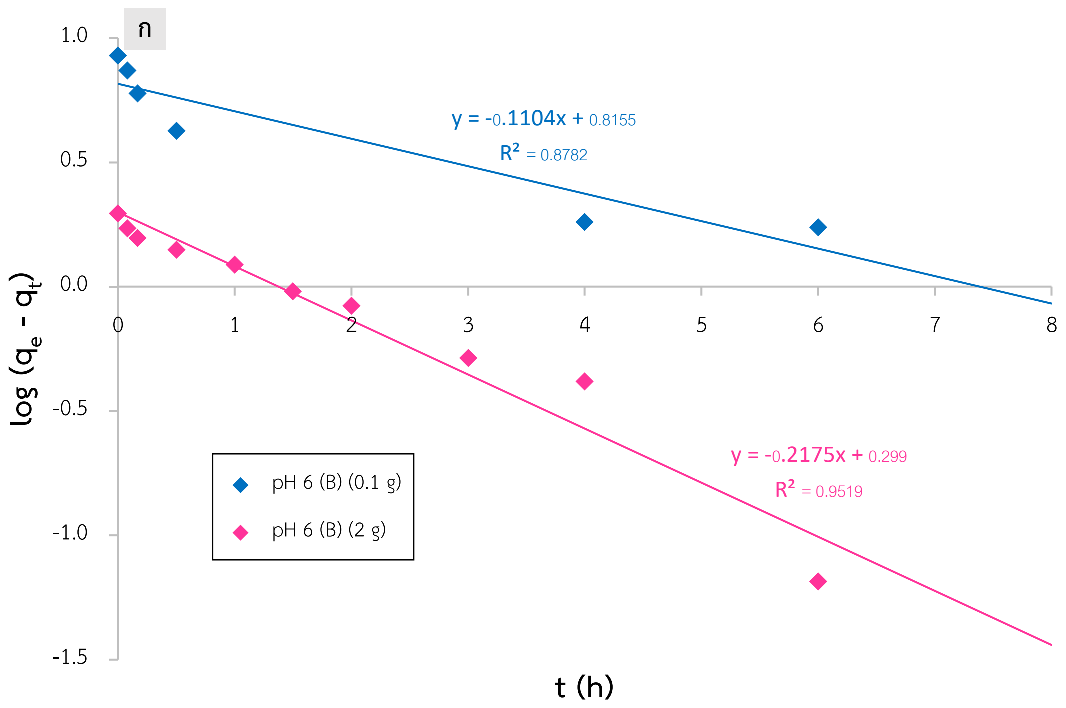
4.5.2 ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของตะกรันอลูมิเนียม

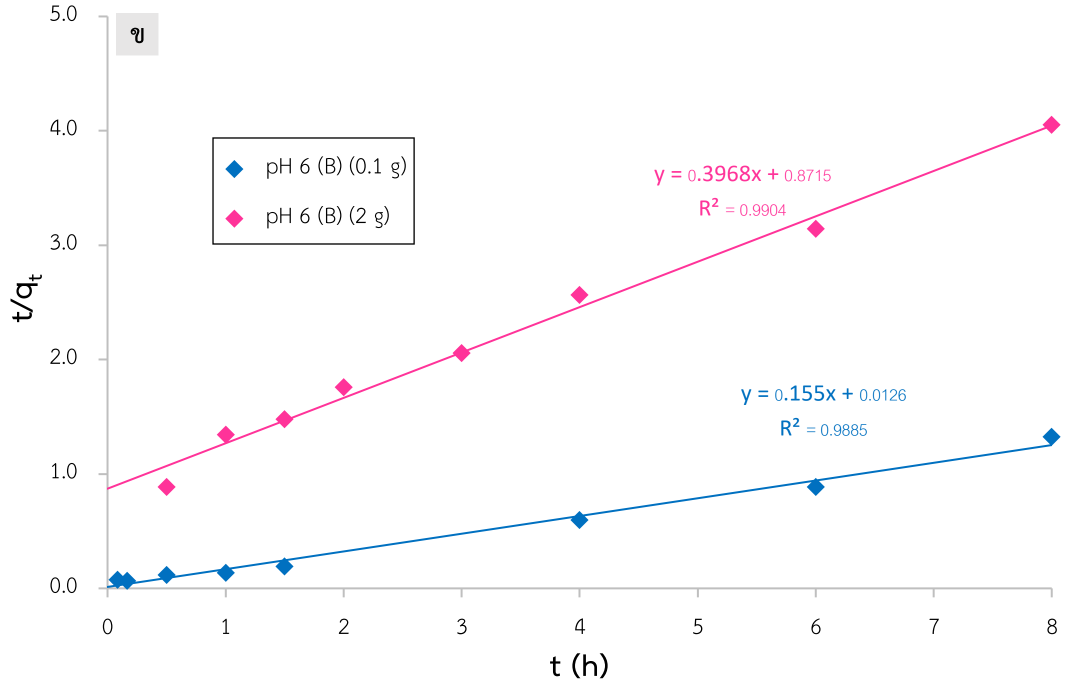
การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของตะกรันอลูมิเนียมพบว่าค่า r^2 จากสมการ pseudo-second order มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการ pseudo-first order ทุกกรณี จากรูปที่ 4.21 แสดงกราฟเส้นตรงจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย พบว่ากรณีที่พีเอช 3 มีค่า r^2 ตามสมการ pseudo-second order เท่ากับ 0.9423 และ 0.9996 เมื่อใช้วัสดุดูดซับ 0.1 กรัม และ 2 กรณี ตามลำดับ ส่วนกรณีพีเอช 6 มีค่า r^2 เท่ากับ 0.9949 และ 0.9999 เมื่อใช้วัสดุดูดซับ 0.1 กรัม และ 2 กรณี ตามลำดับ

รูปที่ 4.22 แสดงกราฟเส้นตรงจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย พบว่าค่า r^2 ตามสมการ pseudo-second order กรณีพีเอช 6 เท่ากับ 0.9883 และ 0.9904 เมื่อใช้วัสดุดูดซับ 0.1 และ 2 กรัม ตามลำดับ สำหรับกรณีที่พีเอชเริ่มต้น 3 ไม่สามารถคำนวณหาค่าคงที่จลนศาสตร์ได้ เนื่องจากไม่สามารถบำบัดไอออนสังกะสีได้ได้เช่นเดียวกับผงเหล็กช็อตบลาสท์ และเมื่อพิจารณาค่า q_e ที่ได้จากการคำนวณยังมีค่าใกล้เคียงกับ q_e จากการทดลองมากกว่าสมการ pseudo-first order ด้วยเช่นกันแม้ว่าบางกรณีค่า q_e จากสมการ pseudo-first order มีค่าใกล้เคียงกว่าก็ตาม แต่หากพิจารณาจากค่า k_1 จากสมการ pseudo-first order แล้ว จะเห็นได้ว่ามีค่าติดลบจึงไม่สามารถอธิบายถึงความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาได้ ดังนั้นจลนศาสตร์การดูดซับไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียมมีความสอดคล้องกับสมการ pseudo-second order มากกว่า pseudo-first order รายละเอียดค่าคงที่จลนศาสตร์แสดงดังตารางที่ 4.9 และ เมื่อคำนวณ q_t ตามสมการที่ 4.19 แล้ว สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ ($q_{t,\mathrm{cal}}$) กับเวลาใด ๆ ตามสมการ pseudo-second order ดังรูปที่ 4.23

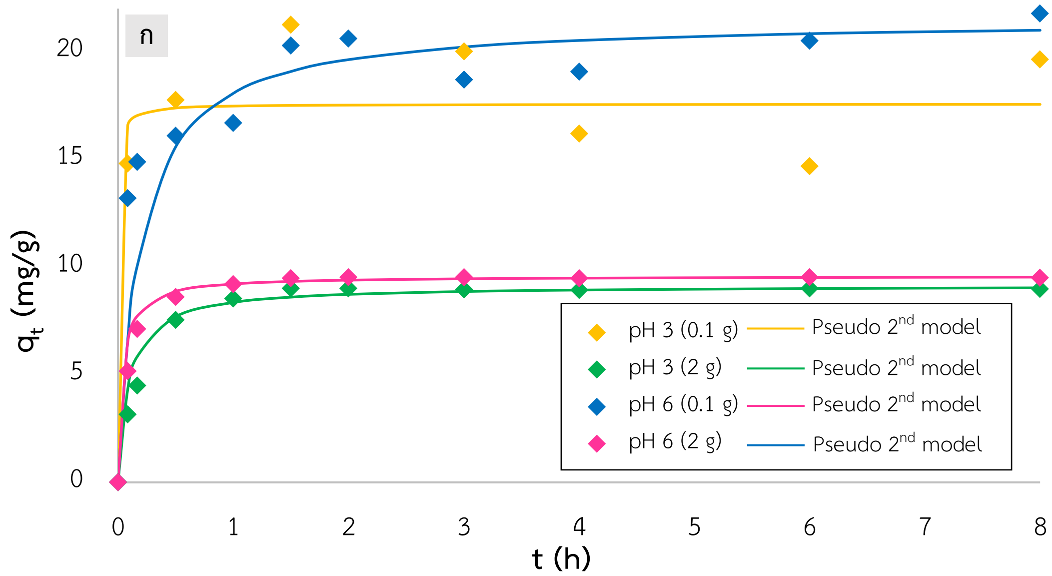


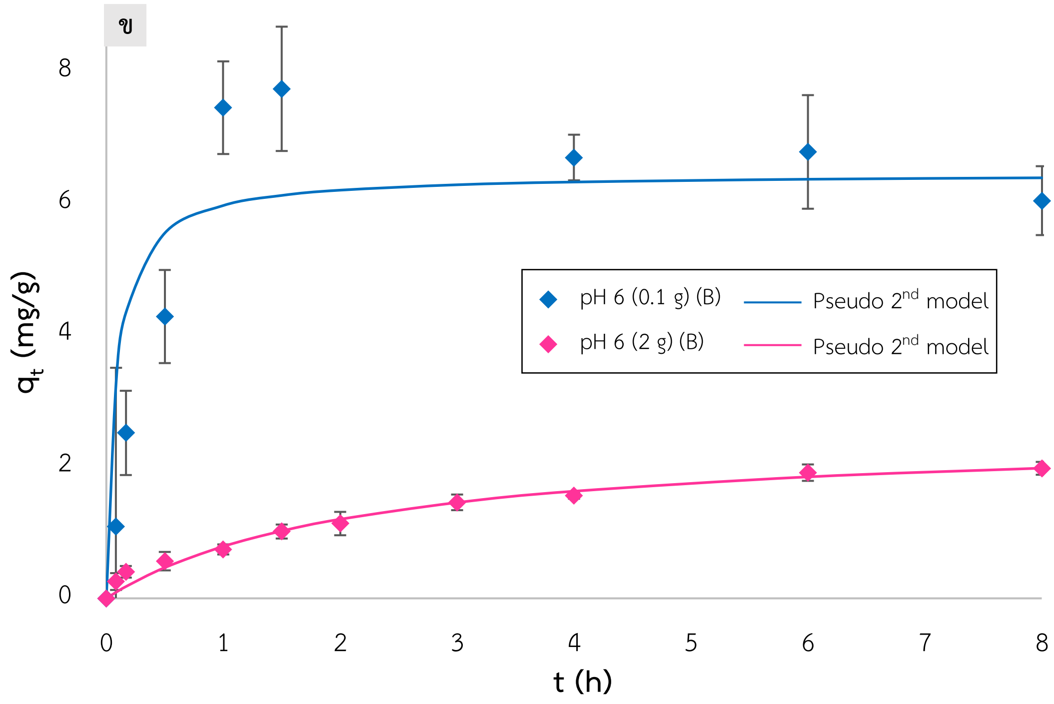
รูปที่ 4.21 กราฟสมการเส้นตรงของตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียตามสมการ (ก) pseudo-first order และ (ข) pseudo-second order





รูปที่ 4.22 กราฟสมการเส้นตรงของตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียตามสมการ (ก) pseudo-first order และ (ข) pseudo-second order





รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ ($q_{t,cal}$) กับเวลาใด ๆ (t) ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ pseudo-second order เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ($q_{t,exp}$) ของตะกรันอลูมิเนียม (ก) การทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย (ข) การทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่จลนศาสตร์การดูดซับตามแบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order ของตะกรันอลูมิเนียมจากการคำนวณโดยสมการเส้นตรง

การทดลอง		$q_{e,\exp}$ (mg/g)	แบบจำลอง					
			Pseudo-first order			Pseudo-second order		
			k_1 1/min	$q_{e,\text{cal}}$ (mg/g)	r^2	k_2 (g/mg.h)	$q_{e,\text{cal}}$ (mg/g)	r^2
ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย	pH 3 (0.1 g)	28.68	-0.05	20.93	0.9796	10.99	17.57	0.9423
	pH 3 (2 g)	9.01	-0.49	5.51	0.4866	1.16	9.14	0.9996
	pH 6 (0.1 g)	21.78	-0.12	7.37	0.9717	0.25	21.0	0.9949
	pH 6 (2 g)	9.52	-0.47	2.86	0.9813	2.60	9.58	0.9999
ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย	pH 6 (0.1 g)	6.78	-0.11	6.54	0.8782	2.09	6.45	0.9883
	pH 6 (2 g)	1.91	-0.22	8.95	0.9519	0.18	2.52	0.9904

จากการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม พบว่ามีความสอดคล้องกับสมการ pseudo-second order โดย Ho and McKay (1999) ได้อธิบายว่าเกิดจากกลไกทางเคมีโดยการสร้างพันธะระหว่างวัสดุดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกัน

4.6 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ (adsorption isotherm)

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับจะใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับที่เกิดขึ้น ซึ่งจะใช้เฉพาะผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชเท่านั้น เนื่องจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชเป็นกลไกการตกตะกอนทางเคมีจึงไม่นำมาศึกษาในหัวข้อนี้ และจะใช้ผลการทดลองที่สามารถบำบัดไอออนสังกะสีมาคำนวณเท่านั้น

สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ให้นำผลการทดลองมาพล็อตกราฟสมการเส้นตรงโดยให้แกน x เป็น C_e และแกน y เป็น C_e / q_e จะได้ความชันมีค่าเท่ากับ $1/ q_{mx}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/ k_L q_{mx}$ และสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิช ให้นำผลการทดลองมาพล็อตกราฟเส้นตรงโดยให้แกน x เป็น $\log C_e$ และแกน y เป็น $\log q_e$ จะได้ความชันมีค่าเท่ากับ $1/ n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log k_F$ จากนั้นคำนวณหาค่าคงที่ไอโซเทอร์มตามสมการเส้นตรง และสามารถใช้ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ได้ เพื่อทำนายค่าความสามารถในการดูดซับ ($q_{e,\text{cal}}$) ตามแบบจำลองของแลงเมียร์ ดังสมการ 4.20 และแบบจำลองของฟรุนด์ลิช ดังสมการที่ 4.21

$$q_e = \frac{q_{mx} k_L C_e}{1 + k_L C_e} \quad (4.20)$$

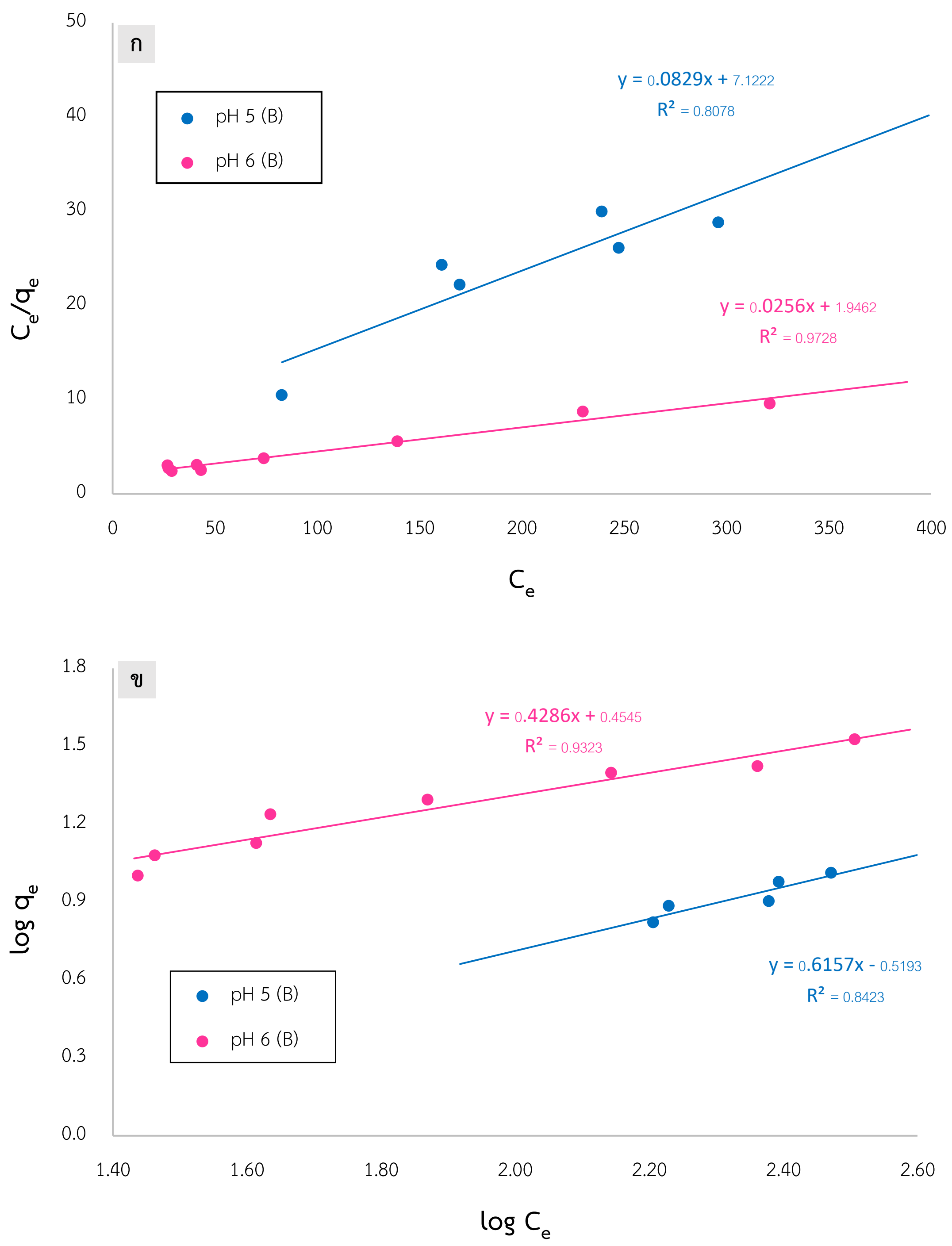
$$q_e = k_F C_e^{1/n} \quad (4.21)$$

4.6.1 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของผงเหล็กช็อตบลาสท์

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของผงเหล็กช็อตบลาสท์ได้ใช้ผลการทดลองจากหัวข้อ 4.2.2.1 ซึ่งทำการทดลองโดยใช้ปริมาณวัสดุดูดซับที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0.1-2 กรัม และใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น 400 มก./ล. จากนั้นให้นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาพล็อตกราฟสมการเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 4.24

จากรูปที่ 4.24 แสดงกราฟเส้นตรงของผงเหล็กช็อตบลาสท์จากการทดลองที่ควบคุมพีเอช พบว่าจากรูปที่ 4.24ก กรณีที่พีเอช 5 และ 6 มีค่า r^2 ตามไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์เท่ากับ 0.8078 และ 0.9728 ตามลำดับ และรูปที่ 4.24ข แสดงค่า r^2 ตามไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิชที่พีเอช 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 0.8423 และ 0.9323 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากค่า r^2 ในแต่ละกรณีพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงใช้วิธีการทางสถิติเพื่อทดสอบความแตกต่างของค่า r^2 โดยใช้สถิติ t-test แบบ Paired Two Sample ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.10

จากการทดสอบความแตกต่างของค่า r^2 พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 โดยพิจารณาจากค่า t stat และค่า t critical (-12.7062 < 0.0799 < 12.7062) และเมื่อพิจารณาจากค่า q_{mx} และ k_F พบว่าที่พีเอช 6 มีค่าสูงกว่าพีเอช 5 นั่นหมายความว่าที่พีเอช 6 ผงเหล็กช็อตบลาสท์มีความสามารถในการดูดซับไอออนสังกะสีได้มากกว่าที่พีเอช 5 ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดลอง โดยที่พีเอช 6 มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{mx}) เท่ากับ 39.08 มก./ก. ตามไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ สำหรับค่าคงที่ไอโซเทอร์มจากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.11 และเมื่อนำค่าคงที่ไอโซเทอร์มมาทำนายค่า $q_{e,\mathrm{cal}}$ ตามสมการที่ 4.20 และ 4.21 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ $q_{e,\mathrm{cal}}$ กับความเข้มข้นที่คงเหลือในสารละลาย ณ จุดสมดุล (C_e) ดังรูปที่ 4.26ก ซึ่งพบว่าทั้งสองไอโซเทอร์มให้ค่า $q_{e,\mathrm{cal}}$ ที่ใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ($q_{e,\exp}$)



รูปที่ 4.24 กราฟสมการเส้นตรงของผงเหล็กช็อตบลาสท์จากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย ตามแบบจำลองของ (ก) Langmuir และ (ข) Freundlich

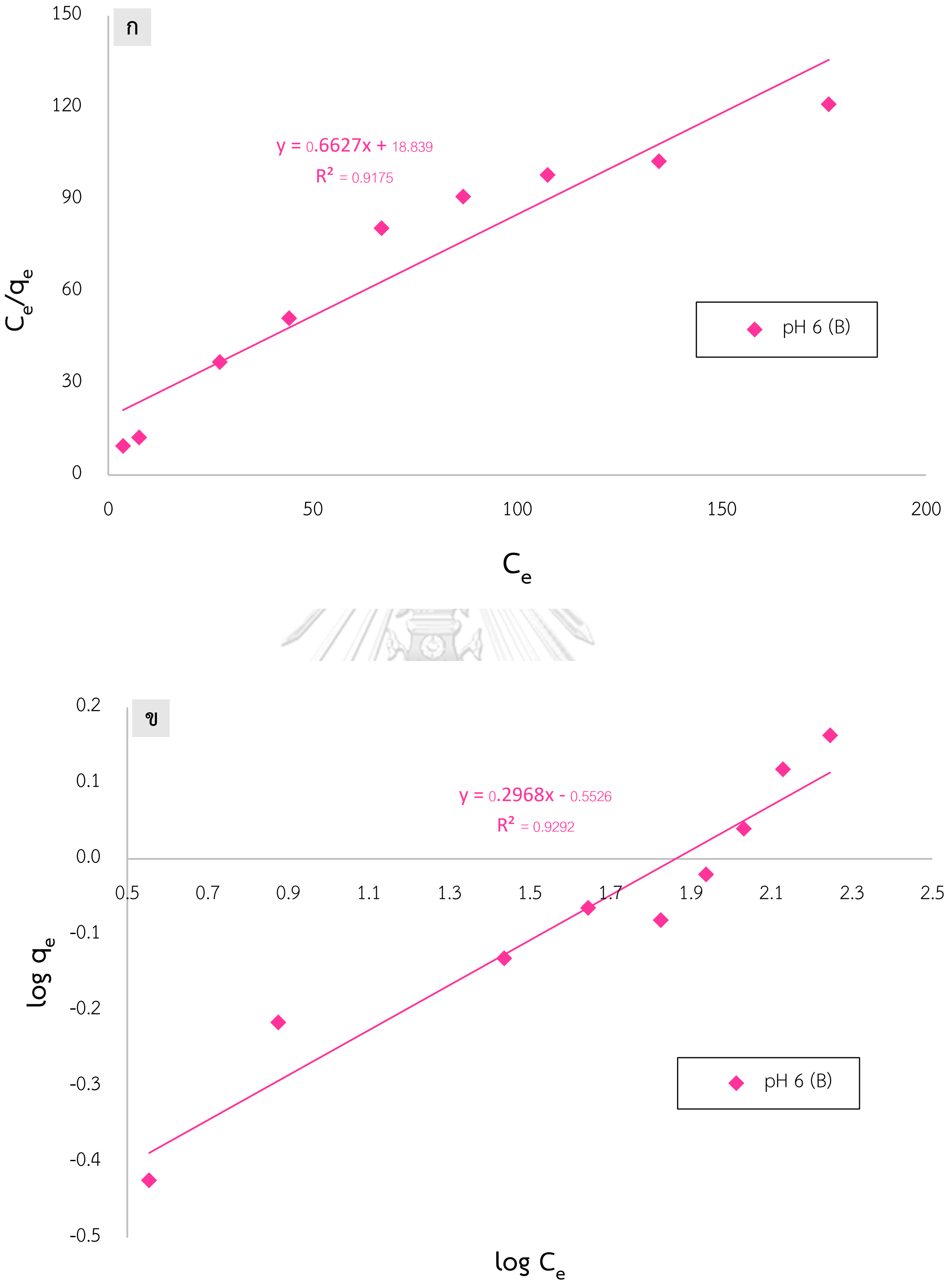
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่า r^2 จากไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิชที่ใช้ผงเหล็กช็อตบลาสท์เป็นวัสดุดูดซับด้วยสถิติ t-test

	Langmuir isotherm	Freundlich isotherm
Mean	0.8903	0.8873
Variance	0.0136	0.0040
Observations	2	2
Pearson Correlation	1	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	1	
t Stat	0.0799	
P(T<=t) one-tail	0.4746	
t Critical one-tail	6.3137	
P(T<=t) two-tail	0.9492	
t Critical two-tail	12.7062	

4.6.2 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของตะกรันอลูมิเนียม

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของตะกรันอลูมิเนียมได้ใช้ผลการทดลองจากหัวข้อ 4.2.2.2 ซึ่งทำการทดลองโดยใช้ปริมาณวัสดุดูดซับที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0.1-2 กรัม และใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น 400 มก./ล. เมื่อนำข้อมูลมาพล็อตกราฟสมการเส้นตรงพบว่าทั้งสองไอโซเทอร์ม ให้ความสัมพันธ์เชิงลบซึ่งไม่สามารถคำนวณค่าคงที่ไอโซเทอร์มได้ เมื่อพิจารณาผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.2.2 หรือรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดที่พีเอช 6 ยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อใช้วัสดุดูดซับตั้งแต่ 0.1-2 กรัม (กรณีที่ใช้พีเอชเริ่มต้นเป็น 4 และ 5 จะไม่นำมาศึกษาไอโซเทอร์มเนื่องจากไม่สามารถบำบัดไอออนสังกะสีได้) โดยยังไม่แสดงค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ซึ่งไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ในการดูดซับตามไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนด์ลิชได้ จึงได้ทำการทดลองอีก 1 ชุด โดยออกแบบการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันตั้งแต่ 10-200 มก./ล. และใช้วัสดุดูดซับ 1 กรัม จากนั้นให้นำข้อมูลมาพล็อตกราฟเป็นสมการเส้นตรง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.25 กราฟสมการเส้นตรงของตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียตามแบบจำลองของ (ก) Langmuir และ (ข) Freundlich

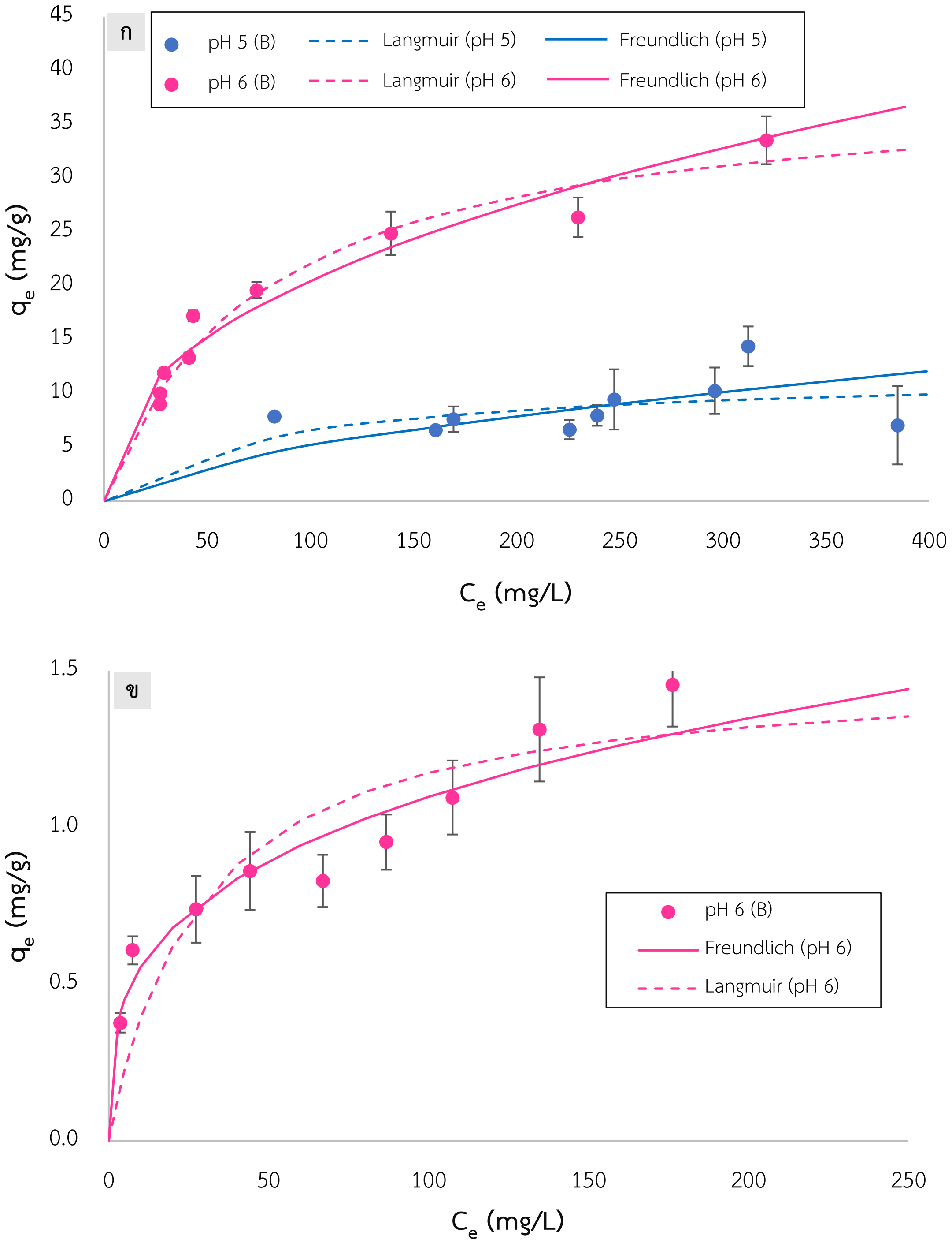
จากรูปที่ 4.25 แสดงกราฟเส้นตรงของตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ควบคุมพีเอช พบว่าที่พีเอช 6 มีค่า r^2 ตามไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์เท่ากับ 0.9175 และตามไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิชเท่ากับ 0.9292 ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งสองไอโซเทอร์ม และเมื่อนำค่าคงที่ไอโซเทอร์มดังตารางที่ 4.11 มาทำนายค่า $q_{e,\mathrm{cal}}$ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ ($q_{e,\mathrm{cal}}$) กับความเข้มข้นที่คงเหลือในสารละลาย ณ จุดสมดุล (C_e) ดังรูปที่ 4.26ข ซึ่งพบว่าทั้งสองไอโซเทอร์มให้ค่า $q_{e,\mathrm{cal}}$ ที่ใกล้เคียงกับค่า $q_{e,\mathrm{exp}}$ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 1.51 มก./ก. ตามไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์

ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับของผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียมจากการคำนวณโดยสมการเส้นตรงของ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm

วัสดุดูดซับ/การทดลอง		$q_{mx,\mathrm{exp}}$ (mg/g)	แบบจำลอง					
			Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
			q_{mx} (mg/g)	k_L (l/mg)	r^2	k_F (mg/g)	$1/n$	r^2
ผงเหล็กช็อตบลาสท์	pH 5	14.41	12.06	0.01	0.8078	0.30	0.62	0.8423
	pH 6	33.57	39.08	0.01	0.9728	2.85	0.43	0.9323
ตะกรันอลูมิเนียม	pH 6	1.46	1.51	0.04	0.9175	0.28	0.30	0.9292

เมื่อพิจารณาค่า r^2 จากทั้งสองไอโซเทอร์มพบว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน และยังมีค่า q_{mx} ที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองทั้งสองไอโซเทอร์ม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียมมีความสอดคล้องทั้งสองไอโซเทอร์ม โดยไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ได้อธิบายถึงพฤติกรรมการดูดซับโมเลกุลของสารแบบชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นที่ผิวของสารดูดซับที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous surface) และมีจำนวนพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับที่จำกัด (Langmuir, 1918) และ ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนด์ลิชได้อธิบายถึงพฤติกรรมการดูดซับในระบบของเหลวหลายโมเลกุลหรือหลายชั้นของสารถูกดูดซับบนตัวกลาง (multilayer) ที่มีลักษณะพื้นผิวต่างกัน (homogenous surface) (Freundlich, 1906)

และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะประจุ 2+ ด้วยวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายกันจากงานวิจัยที่ผ่านมา สำหรับความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับที่มีลักษณะคล้ายกับผงเหล็กช็อตบลาสท์แสดงดังตารางที่ 4.12 พบว่าจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชมีความสามารถในการดูดซับที่ดีกว่าวัสดุดูดซับหลายชนิด เช่น ตะกรันเหล็ก อิฐเคลือบเหล็กออกไซด์ ของเสียจากการบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน และตะกอนน้ำเสียเคลือบเหล็กออกไซด์ เป็นต้น ทั้งนี้ค่าความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนักที่ถูกดูดซับและวัสดุดูดซับที่ใช้ด้วย



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับ ($q_{e,\mathrm{cal}}$) กับความเข้มข้นที่คงเหลือในสารละลาย ณ จุดสมดุล (C_e) ที่ได้จากการคำนวณตามแบบจำลองของ Langmuir และ Freundlich เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ($q_{e,\mathrm{exp}}$) ของการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย (ก) ผงเหล็กช็อตบลาสท์ และ (ข) ตะกรันอลูมิเนียม

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะประจุ 2+ ด้วยวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ กับผงเหล็กช็อตบลาสท์

วัสดุดูดซับ (adsorbent)	สารที่ถูกดูดซับ (adsorbate)	ความสามารถในการดูดซับสูงสุด [q_{mx} (mg/g)]	อ้างอิง
1. ผงเหล็กช็อตบลาสท์	Zn (ควบคุม pH)	39.08	งานวิจัยนี้
	Zn (ไม่ควบคุม pH)	12.41	
2. superparamagnetic Fe_3O_4-SH nanoparticles	Ni	50.48	Lin et al. (2017)
	Cu	36.22	
	Pb	128.85	
	Zn	48.40	
3. nano zero valent Iron (nZVI) particles	Ni	19.98	Azzam et al. (2016)
	Cu	24.9	
	Cd	19.99	
	Pb	249.9	
4. steel slag (ตะกรันเหล็ก)	Mn	1.20	Zahar et al. (2015)
5. brick coated Iron oxyhydroxide	Fe	0.37	Allahdin et al. (2013)
6. sewage sludge coated Iron oxide (ตะกอนน้ำเสียเคลือบเหล็กออกไซด์)	Ni	7.8	Phuengprasop et al. (2011)
	Cu	17.3	
	Cd	14.7	
	Pb	42.4	
7. waste Iron oxide (ของเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน)	Cu	13.34	Huang et al. (2007)
8. Shot blast	Cd	10.72	Smith (1995)
	Pb	28.89	
	Zn	15.38	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สำหรับความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับที่มีลักษณะคล้ายกับตะกรันอลูมิเนียมแสดงดังตารางที่ 4.13 เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับจะเห็นได้ว่า ตะกรันอลูมิเนียมมีค่าที่ค่อนค้างใกล้เคียงกับวัสดุดูดซับชนิดอื่น เช่น ตะกรันเกลือจากกระบวนการหลอมอลูมิเนียม และอลูมิน่า เป็นต้น

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะประจุ 2+ ด้วยวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ กับตะกรันอลูมิเนียม

วัสดุดูดซับ (adsorbent)	สารที่ถูกดูดซับ (adsorbate)	ความสามารถในการดูดซับสูงสุด [q_{mx} (mg/g)]	อ้างอิง
1. ตะกรันอลูมิเนียม	Zn (ควบคุม pH) Zn (ไม่ควบคุม pH)	1.51 11.55	งานวิจัยนี้
2. γ-alumina nanoparticle	Ni Cu	49.7 31.3	Fouladgar, Beheshti and Sabzyan (2015)
3. saline slag (ตะกรันเกลือจากกระบวนการหลอมอลูมิเนียม)	Cu Cd Zn	11.7 11.1 14.5	Gil et al. (2014)
4. Alumina	Ba Mg	3.67 1.10	Syhood (2014)
5. ตะกรันอลูมิเนียม	Cd	6.50	Sarangi et al. (2012)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.7 ผลการศึกษารูปแบบการนำไปใช้จริงโดยบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียม

การศึกษารูปแบบการนำไปใช้จริงได้พิจารณาเลือกวัสดุดูดซับเพียงหนึ่งชนิดสำหรับการบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ โดยใช้ตะกรันอลูมิเนียมเป็นวัสดุดูดซับสำหรับการทดลอง เนื่องจากไม่พบการชะละลายของโลหะชนิดอื่น ๆ เกินค่ามาตรฐานและสามารถเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดไอออนสังกะสีที่เร็วกว่า โดยที่ลักษณะทางกายภาพของตะกรันอลูมิเนียมไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากสภาพเดิม สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้มีความเข้มข้น 400 มก./ล. และปรับพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ในการศึกษาได้บรรจุตะกรันอลูมิเนียมไว้ภายในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ที่ความลึกแตกต่างกัน คือ 10,

20 และ 30 เซนติเมตร หรือเทียบเป็นน้ำหนักเท่ากับ 160, 320 และ 480 กรัม ตามลำดับ ควบคุมอัตราการไหลที่ 3 มิลลิลิตร/นาที โดยอ้างอิงจากเวลาที่การบำบัดเข้าสู่ภาวะสมดุลจากการทดลองแบบกะในการคำนวณเพื่อกำหนดอัตราการไหลดังกล่าว ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียม

ความลึกของวัสดุดูดซับ (ซม.)	น้ำหนักของวัสดุดูดซับ (กรัม)	อัตราการไหล (มล./นาที)
10	160	3
20	320	3
30	480	3

4.7.1 เปรียบเทียบการบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชและไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย

ในการศึกษาได้เปรียบเทียบผลการบำบัดไอออนสังกะสีจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชและควบคุมพีเอชของน้ำเสีย โดยบรรจุตะกรันอลูมิเนียมความลึก 30 ซม. แสดงดังรูปที่ 4.27 ผลการทดลองพบว่า ภายใน 20 ชั่วโมงแรกของการทดลองสามารถบำบัดไอออนสังกะสีได้ดีทั้ง 2 การทดลอง และเมื่อใช้เวลาทดลองเพิ่มขึ้นเริ่มมีปริมาณสังกะสีในน้ำขาออกสูงขึ้น โดยที่เวลาเดียวกัน การทดลองที่ควบคุมพีเอชมีค่า C/C_0 มากกว่าการทดลองที่ไม่ควบคุมค่าพีเอช นั่นหมายความว่าการบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียมสามารถบำบัดน้ำเสียที่ไม่ควบคุมค่าพีเอชได้ดีกว่าน้ำเสียที่ถูกควบคุมค่าพีเอช ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองแบบกะ

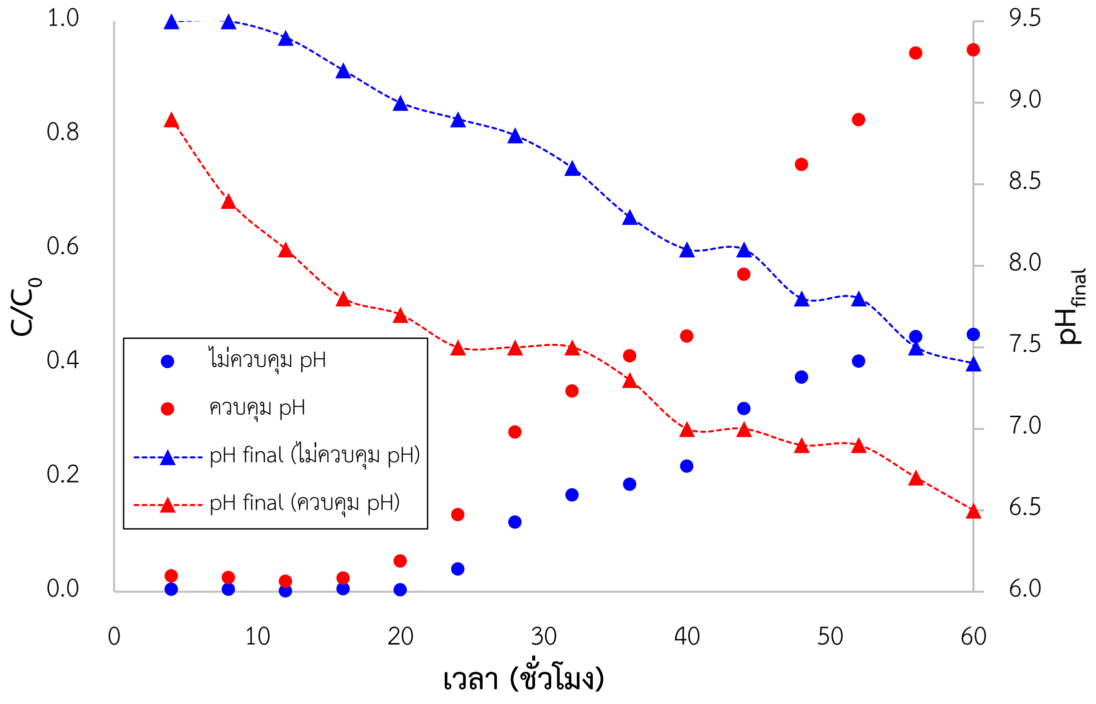
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อพิจารณาจากค่าพีเอชสุดท้ายของการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอช จะเห็นได้ว่าในช่วงระยะเวลา 20 ชั่วโมงแรกของการทดลอง น้ำขาออกมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 9.0-9.5 โดยไอออนสังกะสีสามารถตกตะกอนไฮดรอกไซด์ได้ดีเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 9-11 เมื่อพีเอชของน้ำเสียมีค่าสูง จึงเกิดการตะตกกอนของไอออนสังกะสีในรูป Zinc Hydroxide ($Zn(OH)_2$) ดังสมการที่ 4.7 และ 4.8 ทำให้ในระยะเวลา 20 ชั่วโมงแรกของการทดลองมีค่า C/C_0 เท่ากับศูนย์ และเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นค่าพีเอชสุดท้ายเริ่มมีค่าลดลง ไอออนสังกะสีจึงเกิดการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ได้น้อยลง ทำให้ค่า C/C_0 ค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดลอง

สำหรับการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอช จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการทดลองค่าพีเอชสุดท้ายมีค่าอยู่ระหว่าง 7.5-8.9 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่ไอออนสังกะสีเริ่มเกิดการตกตะกอนได้ แม้ว่าจะใช้สารละลายบัฟเฟอร์สำหรับควบคุมพีเอชของน้ำเสียแล้วก็ตาม แต่เนื่องจากตะกรันอลูมิเนียมปริมาณมากที่บรรจุ

ในคอลัมน์ทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียสูงขึ้น จึงไม่สามารถควบคุมค่าพีเอชได้ในช่วงแรกของการทดลอง ซึ่งเป็นไปได้ว่า 20 ชม. แรกของการทดลองที่ควบคุมพีเอช ไอออนสังกะสีบางส่วนจะเกิดการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ร่วมกับการดูดซับ ซึ่งทำให้ค่า C/C_0 อยู่ระหว่าง 0.02-0.05 และเมื่อระยะเวลาในการทดลองมากกว่า 20 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าค่า C/C_0 ทั้ง 2 การทดลองเริ่มมีค่าต่างกันจนกระทั่งการทดลองเข้าสู่ชั่วโมงที่ 60 ค่า C/C_0 แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยการทดลองที่ควบคุมค่าพีเอช มีค่าพีเอชสุดท้ายลดลงกลับสู่ค่าพีเอชเริ่มต้น และทำให้ค่า C/C_0 เพิ่มขึ้นถึง 0.95 ที่ระยะเวลา 60 ชั่วโมง เนื่องจากการตกตะกอนของไอออนสังกะสีที่น้อยลงตามค่าพีเอชสุดท้าย และการบำบัดอาจเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการดูดซับมากขึ้น วัสดุดูดซับจึงเริ่มอิ่มตัวจนไม่สามารถใช้งานได้อีก

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชของน้ำเสียเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการบำบัดโลหะหนัก ซึ่งการบำบัดไอออนสังกะสีโดยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าการดูดซับเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.27 ผลการศึกษาการบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชและควบคุมพีเอชของน้ำเสีย (น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 อัตราการไหล 3 มล./นาที และความลึก 30 ซม.)

4.7.2 ผลการศึกษาบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย

ในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียมจะควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียเพื่อหลีกเลี่ยงการตกตะกอนทางเคมีและสามารถนำผลจากการทดลองมาคำนวณค่าคงที่อัตราตามแบบจำลองของ Thomas จาก breakthough curve เนื่องแบบจำลองของโทมัสได้ใช้ตัวแปรที่ครอบครุมสำหรับการทำนายค่า C/C_0 แสดงรายละเอียดดังนี้

จากรูปที่ 4.28 แสดงค่า C/C_0 ณ เวลาใด ๆ ที่ได้จากการทดลองพบว่าในช่วงแรกของการทดลองมีปริมาณสังกะสีในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ต่ำทำให้ค่า C/C_0 ยังคงเข้าใกล้ 0 แต่เมื่อเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นเริ่มมีปริมาณสังกะสีในน้ำที่ออกจากคอลัมน์สูงขึ้นทำให้ค่า C/C_0 เริ่มเข้าใกล้ 1 ซึ่งหมายความว่าเป็นจุดที่ตะกรันอลูมิเนียมเริ่มหมดสภาพในการดูดซับไอออนสังกะสี จนกระทั่งความเข้มข้นของน้ำที่ออกจากคอลัมน์เท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0 = 1) โดยคอลัมน์ที่มีความลึก 30 ซม. ใช้ปริมาณวัสดุดูดซับที่เยอะกว่าจึงมีระยะเวลาการใช้งานที่มากกว่าคอลัมน์ความลึก 10 และ 20 ซม. ตามลำดับ

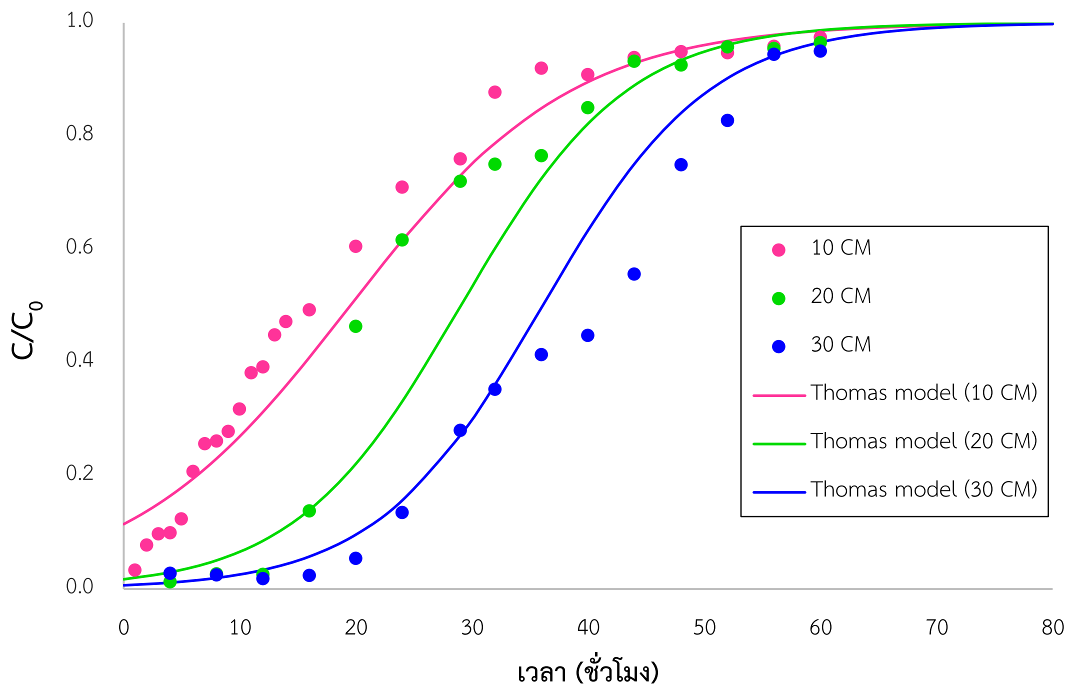
จากผลการทดลองสามารถนำมาคำนวณค่าคงที่ต่าง ๆ จากสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Thomas ได้ โดยให้นำผลการทดลองมาพล๊อตกราฟความความสัมพันธ์ระหว่าง $ln\left(\frac{C_0}{C}-1\right)$ (แกน y) และ t (แกน x) ดังสมการที่ 2.30 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.29

รูปที่ 4.29 แสดงกราฟสมการเส้นตรงตามแบบจำลองของ Thomas จากนั้นสามารถคำนวณหาค่า k_{Th} ความชันจากและค่า q_0 จุดตัดแกน Y เพื่อใช้ในการทำนายค่า C/C_0 ณ เวลาใด ๆ ตามสมการที่ 4.22

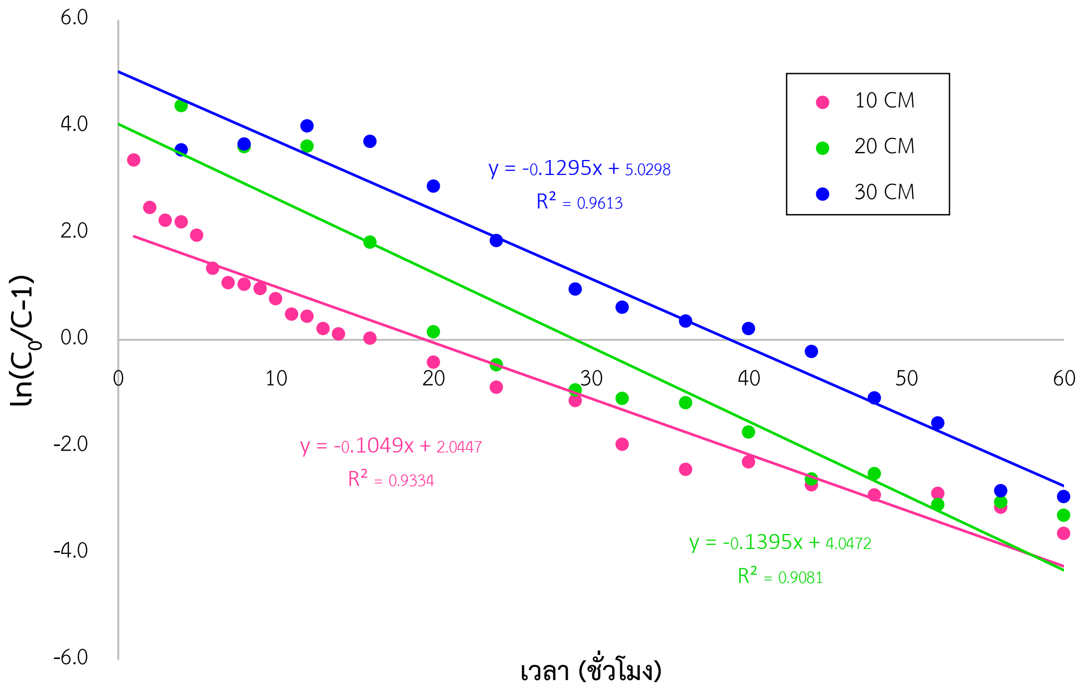
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\frac{C}{C_0}=\frac{1}{1+\exp\left(\frac{k_{Th}q_0m}{Q}-k_{Th}C_0t\right)} \quad (4.22)$$

ค่าคงที่อัตราจากแบบจำลองของ Thomas ที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4.15 และเมื่อนำค่า k_{Th} และค่า q_0 มาคำนวณ C/C_0 ณ เวลาใด ๆ สามารถแสดงกราฟ breakthough ได้ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ผลของความลึกต่อ breakthougt curve จากการทดลองและการคำนวณตามแบบจำลองของ Thomas (น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 400 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 อัตราการไหล 3 มล./นาที และความลึก 10, 20 และ 30 ซม.)



รูปที่ 4.29 กราฟสมการเส้นตรงตามแบบจำลองของ Thomas

ตารางที่ 4.15 ค่าคงที่อัตราจากการคำนวณตามแบบจำลองของ Thomas

ความลึก (ซม.)	Thomas model		
	k_{Th} (mL/mg/min)	q_0 (mg/g)	r^2
10	2.75 x 10^{-4}	139.00	0.9344
20	3.50 x 10^{-4}	108.53	0.9081
30	3.25 x 10^{-4}	96.86	0.9613

รูปที่ 4.28 แสดงค่า C/C_0 ที่ได้จากการคำนวณ ($C/C_{o,\text{cal}}$) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง ($C/C_{o,\text{exp}}$) พบว่ากรณีที่ใช้ความลึกของวัสดุดูดซับ 10 และ 30 ซม. สามารถแสดงกราฟ breakthough ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับผลการทดลอง แต่สำหรับกรณีที่ใช้ความลึกของคอลัมน์ 20 ซม. ให้ค่า r^2 ที่ต่ำกว่ากรณีอื่น ๆ และเมื่อเปรียบเทียบค่า C/C_0 ที่คำนวณได้ มีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองไปบ้าง โดยการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบค่า C/C_0 จากการทดลองที่ไม่ควบคุมและควบคุมพีเอชดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.7.1 แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียมแบบคอลัมน์ไม่สามารถควบคุมพีเอชของน้ำเสียให้ใกล้เคียงกับค่าพีเอชเริ่มต้นได้ ทำให้ค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้นและมีการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ร่วมกับการดูดซับ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลการทดลองไม่สอดคล้องกับแบบจำลองของ Thomas ทำให้ค่า C/C_0 ที่คำนวณได้คลาดเคลื่อนจากการทดลองในบางกรณี

4.8 ผลการศึกษาการบำบัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

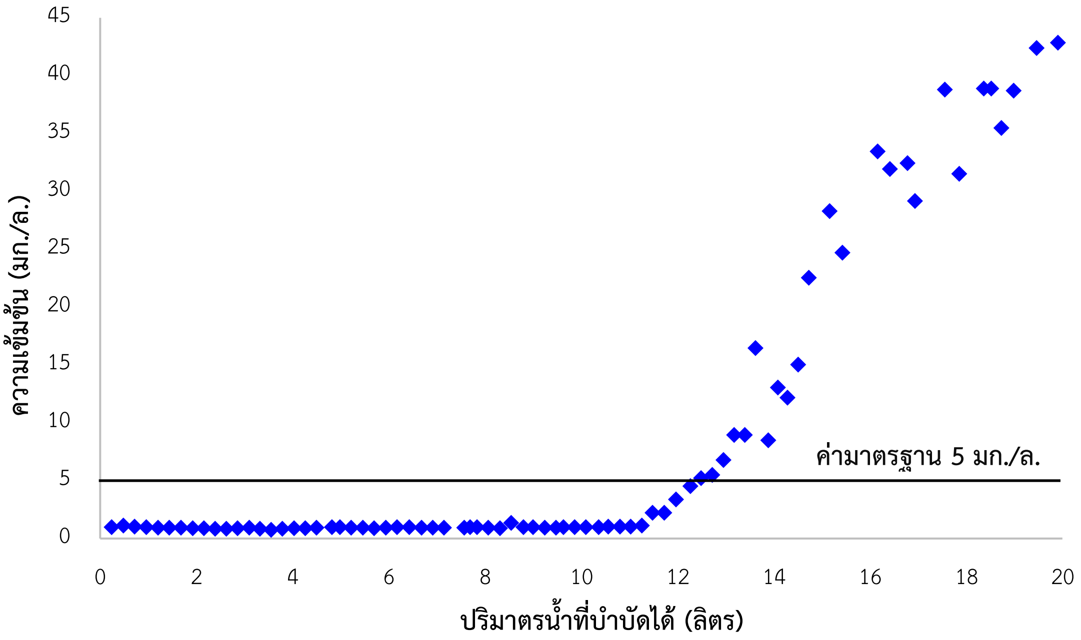
ในการศึกษาน้ำเสียจริงได้ทำการเก็บรวบรวมน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะสังกะสี ซึ่งน้ำเสียดังกล่าวมาจากการล้างชิ้นงานที่ผ่านการชุบสารละลายโลหะสังกะสีเข้มข้น (zinc plating water rinse) โดยได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่ง ในนิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร จังหวัดชลบุรี ก่อนการทดลองบำบัดไอออนสังกะสีได้วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียเบื้องต้น แสดงดังตารางที่ 4.16

สำหรับการทดลองบำบัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียจริงได้เลือกใช้คอลัมน์ที่บรรจุตะกรันอลูมิเนียมที่ความลึก 10 ซม. (160 กรัม) ควบคุมอัตราการไหลที่ 1 มล./นาที และปรับพีเอชของน้ำเสียเป็น 6 ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.30 ผลการทดลองพบว่าในช่วงแรกของการบำบัด ความเข้มข้นของน้ำขาออกมีค่า <1 มก./ล. โดยปริมาตรรวมของน้ำออกที่ความเข้มข้นของสังกะสีผ่านมาตรฐานเท่ากับ 12.27 ลิตร ดังนั้นจะใช้ปริมาตรน้ำเสียที่ออกจากคอลัมน์ที่ผ่านมาตรฐานสำหรับการประเมินต้นทุนในการบำบัดไอออนสังกะสีในขั้นตอนถัดไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียจริง

พารามิเตอร์	**ผลการวิเคราะห์**
สี	ใส เหลืองเล็กน้อย
ค่าพีเอช	3.78
ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	5.63
ค่าความขุ่น (NTU)	14.9
โลหะหนัก (mg/l)	
1) สังกะสี (Zn)	144.29
2) เหล็ก (Fe)	<0.06
3) แมงกานีส (Mn)	0.09
4) ตะกั่ว (Pb)	<0.01
5) นิกเกิล (Ni)	<0.01
6) ทองแดง (Cu)	0.11



รูปที่ 4.30 ผลการศึกษาการบำบัดไอออนสังกะสีจากน้ำเสียจริงแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียม (น้ำเสียความเข้มข้น 144.29 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น 6 อัตราการไหล 1 มล./นาที ความลึกของคอลัมน์ 10 ซม.)

4.9 การเปรียบเทียบต้นทุนในการบำบัดสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียมแบบคอลัมน์กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมี

ในการประเมินต้นทุนเบื้องต้นสำหรับการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียแบบคอลัมน์จะอ้างอิงข้อมูลผลจากการทดลองข้อ 4.8 โดยจะคิดต้นทุนที่ใช้ต่อปริมาตรน้ำเสียที่บำบัดได้ (ลบ.ม) ซึ่งน้ำเสียต้องมีความเข้มข้นของสังกะสีต่ำกว่าค่ามาตรฐาน (5 มก./ล.) ในการคำนวณต้นทุนจะพิจารณาเฉพาะต้นทุนแปรผัน ได้แก่ ค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า และค่ากำจัดตะกอน รายละเอียดการคำนวณต้นทุนแสดงในภาคผนวก ง และผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบต้นทุนในการบำบัดไอออนสังกะสีจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมีกับการบำบัดแบบคอลัมน์

รายการต้นทุนแปรผัน	ราคา (บาท/ปริมาตรน้ำ 1 ลบ.ม.)	
	ระบบบำบัดน้ำแบบเคมี[ก]	ระบบบำบัดแบบคอลัมน์
ค่าสารเคมี[ข]	59.96	12.61
ค่าไฟฟ้า	9.02	0.09
ค่ากำจัดตะกอน[ค]	32.65	39.12
<u>รวม</u>	101.63	51.82

[ก]อ้างอิงข้อมูลจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่งในนิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร จังหวัดชลบุรี

[ข]สารเคมีที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมี ได้แก่ $FeCl_3$, $Ca(OH)_2$ และ polymer และสารเคมีที่ใช้ในระบบบำบัดแบบคอลัมน์ ได้แก่ NaOH

[ค]อัตราการค่ากำจัดตะกอน 3 บาท/กิโลกรัม (รวมค่าขนส่ง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนจากค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า และค่ากำจัดตะกอน แสดงให้เห็นว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบคอลัมน์มีต้นทุนที่ต่ำกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมีอย่างชัดเจน โดยเฉพาะต้นทุกจากค่าสารเคมี และค่าไฟฟ้า เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมีมีหน่วยบำบัดที่ซับซ้อน โดยทั่วไปประกอบด้วยหน่วยบำบัดหลัก ๆ ได้แก่ ถังสร้างตะกอน (coagulation tank) ถังปรับพีเอช (pH adjust tank) ถังรวมตะกอน (flocculation tank) ถังตกตะกอน (sedimentation tank) หน่วยทำตะกอนข้น (sludge thickener) และหน่วยรีดตะกอน (filter press) เป็นต้น ซึ่งต้องใช้สารเคมีที่แตกต่างกันในแต่ละหน่วยบำบัดทั้งยังต้องใช้ไฟฟ้าในระบบจ่ายสารเคมีและการสูบน้ำไปยังหน่วยบำบัดต่าง ๆ ทำให้มีต้นทุนจากค่าสารเคมีและค่าไฟฟ้าที่สูง สำหรับระบบบำบัดแบบคอลัมน์จะปรับพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับ 6 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 3-6 จึงไม่เป็นในต้องใช้สารปรับพีเอชที่เป็นกรด โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารที่หา

ซื้อได้ง่ายและราคาถูก ส่วนค่าไฟฟ้าในการดำเนินงานจะมาจากปั๊มจ่ายสารเคมีในการปรับพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นและปั๊มจ่ายน้ำเข้าคอลัมน์เท่านั้น จึงใช้ไฟฟ้าในปริมาณที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับระบบบำบัดแบบเคมี สำหรับค่ากำจัดตะกอนทั้ง 2 ระบบบำบัดใช้ต้นทุนที่ใกล้เคียงกัน แต่ทั้งนี้หากตะกรันอลูมิเนียมไม่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ก็จะถูกส่งกำจัดตามระบบการกำจัดของเสียอยู่แล้ว หากไม่คิดต้นทุนในการกำจัดตะกอนจากระบบบำบัดแบบคอลัมน์ จะใช้ต้นทุนในการบำบัดที่ต่ำมาก จากการประเมินต้นทุนเบื้องต้นแสดงให้เห็นตะกรันอลูมิเนียมมีแนวโน้มในการนำไปใช้งานจริง ทั้งยังสามารถลดขั้นตอนในการดำเนินงานอีกด้วยเมื่อเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการใช้ของเสียอุตสาหกรรม ได้แก่ ผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียมมาเป็นวัสดุดูดซับไอออนสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม

1) ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงเหล็กช็อตบลาสท์

จากการศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 211-454 μm มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.3550 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.0006 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุน 63.8621 อังสตรอม สำหรับองค์ประกอบทางเคมีพบว่ามี Fe_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 83.39 รองลงมาคือ SiO_2 ร้อยละ 11.67

2) ลักษณะทางกายภาพและเคมีของตะกรันอลูมิเนียม

การกระจายตัวของขนาดอนุภาค ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 211-586 μm มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1.9903 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.0034 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุน 67.3588 อังสตรอม สำหรับองค์ประกอบทางเคมีพบว่ามี Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 41.15 รองลงมาคือ Cl และ Na_2O ร้อยละ 21.29 และ 13.00 ตามลำดับ

5.1.2 ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม

1) ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช๊อตบลาสท์

การทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียใช้เวลาเข้าสู่สมดุลที่ 28 ชั่วโมง โดยพีเอชเริ่มต้น 4, 5 และ 6 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่แตกต่างกันเท่ากับร้อยละ 44.87, 46.66 และ 43.49 ตามลำดับ และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 12.41 มก./ก. ส่วนการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียใช้เวลาเข้าสู่สมดุล 40 ชั่วโมง โดยพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดเท่ากับร้อยละ 93.04 และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 33.57 มก./ก. ดังนั้นการบำบัดไอออนสังกะด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์จากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย

2) ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียม

การทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียจะเข้าสู่สมดุลที่ 2 ชั่วโมง โดยพีเอชเริ่มต้น 4, 5 และ 6 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่แตกต่างกันเท่ากับร้อยละ 97.79, 97.60 และ 98.54 ตามลำดับ

และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 13.25 มก./ก. ส่วนการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียใช้เวลาเข้าสู่สมดุล 6 ชั่วโมง โดยที่พีเอช 6 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดเท่ากับร้อยละ 16.06 และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 1.46 มก./ก. ดังนั้นการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสียให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย

5.1.3 กลไกการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม

กลไกในการบำบัดไอออนสังกะสีเกิดได้จากหลายกลไก สำหรับการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชเกิดจากการตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) เป็นหลัก และการทดลองที่ควบคุมพีเอชจะเกิดจากการดูดซับ (adsorption)

5.1.4 การชะละลายของไอออนโลหะจากผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม

เมื่อบำบัดน้ำเสียด้วยตะกรันอลูมิเนียม น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของโลหะผ่านค่ามาตรฐานทุกชนิด สำหรับการทดลองที่ใช้ผงเหล็กช็อตบลาสท์มีการชะละลายของแมงกานีส (Mn) และเหล็กทั้งหมด (total Fe) เกินค่ามาตรฐานกำหนด

5.1.5 จลนศาสตร์การดูดซับ

พบว่าการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาส์และตะกรันอลูมิเนียมสอดคล้องกับสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second order) โดยที่พีเอช 6 ผงเหล็กช็อตบลาส์มีค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (k_2) เท่ากับ 0.023 และ 0.015 ก./มก./ชม. สำหรับการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชและควบคุมพีเอช ตามลำดับ ส่วนตะกรันอลูมิเนียมมีค่า k_2 เท่ากับ 0.25 และ 2.09 ก./มก./ชม. สำหรับการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชและควบคุมพีเอช ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.1.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

การบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาส์ทและตะกรันอลูมิเนียมมีความสอดคล้องทั้งไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และฟรุนด์ลิช (Freundlich isotherm) โดยที่พีเอช 6 ผงเหล็กช็อตบลาสท์มีค่าคงที่สมดุลการดูดซับตามไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (q_{mx}) และฟรุนด์ลิช (k_F) เท่ากับ 39.08 และ 2.85 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนตะกรันอลูมิเนียมมีค่า q_{mx} และ k_F เท่ากับ 1.51 และ 0.28 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

5.1.7 รูปแบบการนำไปใช้จริงโดยบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียม

จากการทดลองบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์โดยบรรจุตะกรันอลูมิเนียมใส่ในคอลัมน์ที่ความลึกแตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้คอลัมน์ที่ความลึกสูงขึ้นสามารถบำบัดน้ำเสียได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ภาวะสมดุลตามแบบจำลองของโทมัสเท่ากับ 139.00 มก./ก.

5.1.8 การบำบัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

จากการทดลองบำบัดไอออนน้ำเสียสังกะสีในน้ำเสียจริงที่ความเข้นข้น 144.29 มก./ล. โดยใช้ตะกรันอลูมิเนียมที่ความลึก 10 ซม. (160 กรัม) พบว่าสามารถบำบัดน้ำให้มีความเข้มข้นสังกะสีผ่านมาตรฐานได้ 12.27 ลิตร

5.1.9 การเปรียบเทียบต้นทุนในการบำบัดสังกะสีด้วยของเสียจากอุตสาหกรรมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมี

เมื่อประเมินต้นทุนแปรผันในการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบคอลัมน์เปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียเคมี ซึ่งคิดจากค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า และค่ากำจัดตะกอน พบว่าระบบบำบัดแบบคอลัมน์โดยใช้ตะกรันอลูมิเนียมมีต้นทุนในการบำบัดที่ต่ำกว่า โดยมีค่าเท่ากับ 51.82 บาท/ลบ.ม. สำหรับระบบบำบัดแบบคอลัมน์ และ 101.63 บาท/ลบ.ม. สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมี

จากการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าทั้ง 3 ปัจจัยที่ศึกษา มีผลต่อความสามารถในการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียม ได้แก่ เวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณวัสดุดูดซับที่ใช้ และพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการบำบัดไอออนโลหะหนัก เมื่อใช้ผงเหล็กช็อตบลาสท์บำบัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียที่มีการควบคุมค่าพีเอชให้คงที่ และเมื่อใช้ตะกรันอลูมิเนียมบำบัดไอออนสังกะสีที่ไม่ควบคุมค่าพีเอช ทั้ง 2 กรณีนี้ให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงเกินร้อยละ 90 หากพิจารณาในการนำไปใช้จริงตะกรันอลูมิเนียมมีความเหมาะสมมากกว่าผงเหล็กช็อตบลาสท์ทั้งในเชิงของระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด ลักษณะทางกายภาพของวัสดุดูดซับ และประสิทธิภาพการบำบัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตะกรันอลูมิเนียมเป็นของเสียอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มในการนำไปใช้งานจริง ทั้งยังใช้ต้นทุนในการดำเนินงานที่ต่ำ และหากพิจารณาถึงการใช้งานจริงโดยการบรรจุใส่คอลัมน์ดูดซับยังสามารถลดขั้นตอนการบำบัดได้เมื่อเทียบกับระบบแบบเดิมซึ่งประกอบไปด้วยหลายหน่วยบำบัด และเป็นการนำของเสียมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่าที่สุดก่อนนำไปกำจัด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตะกรันอลูมิเนียมร่วมกับวัสดุอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

5.2.2 ศึกษาการบำบัดไอออนโลหะสังกะสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทอื่น ๆ เพื่อให้วัสดุดูดซับสามารถรองรับการบำบัดน้ำเสียที่มีความหลากหลาย

5.2.3 ศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มเติม เช่น อุณหภูมิ หรือขนาดวัสดุดูดซับเพื่อให้ง่ายต่อการนำมาใช้งานจริง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

Abdullah, S. S., Rahman, R. K., Mohamad, B. A., Mustafa, M. M. and Khadum, H. A. (1999). Removal of mixed heavy metal by hydroxide precipitation. Jumal Kejunneraan 11(2): 85-101.

Ahmad, R., Kumar, R. and Haseeb, S. (2012). Adsorption of Cu^{2+} from aqueous solution onto iron oxide coated eggshell powder: Evaluation of equilibrium, isotherms, kinetics, and regeneration capacity. Arabian Journal of Chemistry. 5: 353-359.

Allahdin, O. et al. (2013). Performance of FeOOH-brick based composite for Fe(II) removal from water in fixed bed column and mechanistic aspects. Chemical Engineering Research and Design. 91: 2732-2742.

Alvarez-Ayuso, E., Garcia-Sanchez, A. and Querol, X. (2007). Adsorption of Cr(VI) from synthetic solutions and electroplating wastewaters on amorphous aluminium oxide. Journal of Hazard Materials. 142: 191-8.

APHA, AWWA and WEF. (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater. 22^{nd} ed. Washiton, DC: American Public Health Association.

Azzam, A. M., El-Wakeel, S. T., Mostafa, B. B. and El-Shahat, M. F. (2016). Removal of Pb, Cd, Cu and Ni from aqueous solution using nano scale zero valent iron particles. Journal of Environmental Chemical Engineering. 4: 2196-2206.

Bhargava, D. S. and Sheldarkar, S. B. (1992). Effects of adsorbent dose and size on phosphate-removal from wastewaters. Environmental Pollution. 76: 51-60.

Bhat, A. et al. (2015). Adsorption and optimization studies of lead from aqueous solution using γ-Alumina. Journal of Environmental Chemical Engineering. 3: 30-39.

Burakov, A. E. et al. (2018). Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: A review. Ecotoxicology and Environmental Safety. 148: 702-712.

Chan, Y. T., Kuan, W. H., Chen, T. Y. and Wang, M. K. (2009). Adsorption mechanism of selenate and selenite on the binary oxide systems. Water Research. 43: 4412-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

20.

Das, B. R., Dash, B., Tripathy, B. C., Bhattacharya, I. N. and Das, S. C. (2007). Production of η-alumina from waste aluminium dross. Minerals Engineering. 20: 252-258.

Dobrowolski, R. and Otto, M. (2013). Preparation and evaluation of Fe-loaded activated carbon for enrichment of selenium for analytical and environmental purposes. Chemosphere. 90: 683-90.

Donohue, D. M. and Aranovich, L. G. (1998). Classification of Gibbs adsorption isotherms. Advances in Colloid and Interface Science. 76–77: 137–152.

Eckenfelder, W. W. (1981). Application of adsorption to wastewater treatment. Nashville Tenessee: Enviropress.

EPA. (1980). Summary Report: Contril and treatment Technology for the Metal Finishing Industry: Sulfide Precipitation. Cincinnati Oh: Industrial Environmental Research Laboratory.

Ewais, E. M. M., Khalil, N. M., Amin, M. S., Ahmed, Y. M. Z. and Barakat, M. A. (2009). Utilization of aluminum sludge and aluminum slag (dross) for the manufacture of calcium aluminate cement. Ceramics International. 35: 3381- 3388.

Farghali, A. A., Bahgat, M., Enaiet Allah, A. and Khedr, M. H. (2013). Adsorption of Pb(II) ions from aqueous solutions using copper oxide nanostructures. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences. 2: 61-71.

Ferley, J. K., Dzombak, A. D. and Morel, M. F. (1985). A Surface Precipitation Model for the Sorptionof Cations on Metal Oxides. Journal of Colloid and Interface Science. 106: 226–242.

Fouladgar, M., Beheshti, M. and Sabzyan, H. (2015). Single and binary adsorption of nickel and copper from aqueous solutions by γ-alumina nanoparticles: Equilibrium and kinetic modeling. Journal of Molecular Liquids. 211: 1060- 1073.

Freundlich, H. (1906). Over the Adsorption in Solution. The Journal of Physical Chemistry. 57: 385-471.

Fu, F. and Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. Journal of Environmental Management. 92: 407-18.

Gil, A. (2005). Management of the Salt Cake from Secondary Aluminum Fusion Processes. Industrial & Engineering Chemistry Research. 44: 8852-8857.

Gil, A., Albeniz, S. and Korili, S. A. (2014). Valorization of the saline slags generated during secondary aluminium melting processes as adsorbents for the removal of heavy metal ions from aqueous solutions. Chemical Engineering Journal. 251: 43-50.

Han, W., Fu, F., Cheng, Z., Tang, B. and Wu, S. (2016). Studies on the optimum conditions using acid-washed zero-valent iron/aluminum mixtures in permeable reactive barriers for the removal of different heavy metal ions from wastewater. Journal of Hazardous Materials. 302: 437-446.

Ho, Y. S. (2006). Review of second-order models for adsorption systems. Journal of Hazardous Materials. 136: 681-9.

Ho, Y. S. and McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. Process Biochemistry. 34: 451-465.

Holzknecht, E. (2005). Shot blasting goes high tech: Case studies document how new systems reduced manufacturing costs for end users. Metal Finishing. 103: 25-27.

Huang, Y.-H., Hsueh, C.-L., Cheng, H.-P., Su, L.-C. and Chen, C.-Y. (2007). Thermodynamics and kinetics of adsorption of Cu(II) onto waste iron oxide. Journal of Hazardous Materials. 144: 406-411.

Koretsky, C. (2000). The significance of surface complexation reactions in hydrologic systems: a geochemist’s perspective. Journal of Hydrology. 230: 127–171.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Lagergren, S. (1898). About the theory of so-called adsorption of soluble substances. Kungliga Svenska Ventenskapsakademiens Handlingar Band 24: 1-39.

Langmuir. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. Am. Chem. Soc. 40: 1361-1403.

Liang, W., Dai, C., Zhou, X. and Zhang, Y. (2014). Application of Zero-Valent Iron Nanoparticles for the Removal of Aqueous Zinc Ions under Various Experimental Conditions. PLOS ONE. 9: e85686.

Lin, S., Liu, L., Yang, Y., Zhang, W., Lian, C. and Lin, K. (2017). Comparison of the adsorption preference using superparamagnetic Fe3O4-SH nanoparticles to remove aqueous heavy metal contaminants. Chemical Engineering Research and Design. 125: 319-327.

Liu, R., Gong, W., Lan, H., Yang, T., Liu, H. and Qu, J. (2012). Simultaneous removal of arsenate and fluoride by iron and aluminum binary oxide: Competitive adsorption effects. Separation and Purification Technology. 92: 100-105.

Mahinroosta, M. and Allahverdi, A. (2018). Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: A critical review. Journal of Environmental Management. 223: 452-468.

Nadaroglu, H., Kalkan, E. and Demir, N. (2010). Removal of copper from aqueous solution using red mud. Desalination. 251: 90-95.

Parks, A. G. (1965). The isoelectric points of solid oxides, solid hydroxides, and aqueous hydroxo complex system. Chemical reviews. 65: 177–198.

Phuengprasop, T., Sittiwong, J. and Unob, F. (2011). Removal of heavy metal ions by iron oxide coated sewage sludge. Journal of Hazardous Materials. 186: 502-507.

Rahmani, A., Mousavi, H. Z. and Fazli, M. (2010). Effect of nanostructure alumina on adsorption of heavy metals. Desalination. 253: 94-100.

Sarangi, K. C., Sahu, K. N., Tripathy, C. B. and Bhattacharya, N. I. (2012). An evaluation of cadmium sorption potential of waste aluminium dross. Desalination and Water Treatment. 50: 360–366.

Sarkar, S. and Biswas, P. (2017). Effective utilization of iron ore slime, a mining waste as adsorbent for removal of Pb(II) and Hg(II). Journal of Environmental Chemical Engineering. 5: 38-44.

Smith, H. E. (1995). Removal of Cadmium, Zinc, and Lead from Wastewater Using Recycled Shot-Blast Fines. Metal Finishing. 11: 13–25.

Syhood, R. (2014). Study the Feasibility of Alumina for the Adsorption of Metal Ions from Water. 15,

Thomas, H. C. (1948). chromatography: a problem in kinetics. Annals of the New york Academy of Sciences. 49: 161-182.

Tsakiridis, P. E. (2012). Aluminium salt slag characterization and utilization--a review. J Hazard Mater. 217-218: 1-10.

United Nation. (2009). Transport of dangerous goods. USA: United Nation Newyork and Geneva.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Wan, M.-W., Kan, C.-C., Rogel, B. D. and Dalida, M. L. P. (2010). Adsorption of copper (II) and lead (II) ions from aqueous solution on chitosan-coated sand. Carbohydrate Polymers. 80: 891-899.

Wang, X., Zhang, G., Lan, H., Liu, R., Liu, H. and Qu, J. (2017). Preparation of hollow Fe-Al binary metal oxyhydroxide for efficient aqueous fluoride removal. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 520: 580-589.

Yang, J.-K., Park, H.-J., Lee, H.-D. and Lee, S.-M. (2009). Removal of Cu(II) by activated carbon impregnated with iron(III). Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 337: 154-158.

Zahar, M. S., Kusin, F. M. and Muhammad, S. N. (2015). Adsorption of Manganese in Aqueous Solution by Steel Slag. Procedia Environmental Sciences. 30: 145-150.

กรมควบคุมมลพิษ. (2556). คู่มือการประเมินการปลดปล่อยและเคลื่อนย้ายมลพิษสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์ ชิ้นส่วนและอะไหล่ยานยนต์ ในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. (2559). ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. (2558). (ร่าง) รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2557. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. (2559). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2559. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. ข้อมูลโรงงานที่ได้รับอนุญาตประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535. [ออนไลน์]. 2560. แหล่งที่มา: http://www.diw.go.th/hawk/content.php? mode=dataservice [7 ตุลาคม 2560]

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2558). คู่มือการจัดการกากอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2554). คู่มือหลักปฏิบัติที่ดีสำหรับการให้บริการบำบัด กำจัดกากอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงาน

อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
กระทรวงอุตสาหกรรม. (2548). ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. ๒๕๔๘. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.
กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน. (2551). โลหะกับการพัฒนาประเทศ. กรุงเทพมหานคร: สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2553). ของเสียอันตราย (hazardous wastes). พิมพ์ครั้งที่ 2. ปทุมธานี: ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต.
ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย. (2554). กระบวนการดูดซับสาร. นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
ดิษยพงศ์ หกสุวรรณ. (2555). การบำบัดผงตะกรันอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
นคร ศรีธิวงศ์. (2549). การกำจัดแคดเมียมไอออน (II) ในสารละลายโดยใช้เหล็กออกไซด์จากสเกลเหล็กโรงงานผลิตเหล็กรีดร้อนเป็นตัวดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
เบญจวรรณ วงศ์ศิริ. (2547). การกำจัดตะกั่วและทองแดงจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
พรรษวรรณ ศรีนาค. (2556). การควบคุมมลพิษทางน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: มีนเซอร์วิส ซัพพลาย.
พิสุทธิ์ เพียรมนกุล. (2557). พื้นฐานกระบวนการถ่ายเทมวลสารและการแยกทางกายภาพในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์แห่งมหาวิทยาลัย.
วราวุธ วัดขนาด. (2552). ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมไอออน (II) โดยใช้ทรายที่ใช้แล้วจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
สยามเคมี. เคมีอุตสาหกรรม. [ออนไลน์]. ม.ป.ป. แหล่งที่มา: http://www.siamchemi.com [6 ตุลาคม 2560]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

จลนศาสตร์การดูดซับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 1 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์

ผลจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย						
ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	เวลา (ชม.)	$pH_{เริ่มต้น}$ = 3				
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{t,\exp}$	$q_{t,\mathrm{cal}}$
0.1	0	362.39	0.00	3.00	0.00	N/A
	2	376.13	-3.79	3.78	-6.87	N/A
	4	376.86	-3.99	3.82	-7.24	N/A
	8	370.62	-2.27	3.77	-4.12	N/A
	12	368.28	-1.63	4.05	-2.94	N/A
	16	364.38	-0.55	4.14	-1.00	N/A
	20	373.06	-2.94	4.42	-5.34	N/A
	24	371.32	-2.46	4.05	-4.47	N/A
	28	372.32	-2.74	4.11	-4.97	N/A
	32	370.83	-2.33	4.03	-4.22	N/A
	36	371.67	-2.56	4.04	-4.64	N/A
	40	374.71	-3.40	4.06	-6.16	N/A
	44	370.56	-2.25	4.06	-4.09	N/A
	48	370.61	-2.27	4.12	-4.11	N/A
2	0	362.39	0.00	3.00	0.00	0
	2	333.51	7.97	3.89	0.72	0.63
	4	313.05	13.62	4.05	1.23	1.14
	8	283.78	21.69	4.14	1.97	1.91
	12	263.12	27.39	4.12	2.48	2.48
	16	N/A	N/A	N/A	N/A	2.91
	20	N/A	N/A	N/A	N/A	3.25
	24	225.17	37.87	4.59	3.43	3.52
	28	227.25	37.29	4.52	3.38	3.74
	32	219.09	39.54	4.18	3.58	3.93
	36	208.23	42.54	4.15	3.85	4.09
	40	186.70	48.48	4.95	4.39	4.22
	44	182.25	49.71	4.87	4.50	4.35
	48	170.00	53.09	5.02	4.81	4.45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย						
ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	เวลา (ชม.)	$pH_{เริ่มต้น}$ = 6				
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{t,\mathrm{exp}}$	$q_{t,\mathrm{cal}}$
0.1	0	369.16	0.00	6.00	0.00	0.00
	2	359.59	2.59	3.87	4.79	3.59
	4	358.63	2.85	4.31	5.27	5.43
	8	352.54	4.50	4.18	8.31	7.29
	12	N/A	N/A	N/A	N/A	8.24
	16	351.42	4.81	4.20	8.87	8.81
	20	353.26	4.31	4.16	7.95	9.19
	24	358.29	2.94	4.12	5.44	9.47
	28	352.26	4.58	4.20	8.45	9.67
	32	346.42	6.16	4.20	11.37	9.83
	36	349.54	5.31	4.15	9.81	9.96
	40	344.04	6.80	4.25	12.56	10.07
	44	348.28	5.66	4.38	10.44	10.15
	48	337.89	8.47	4.33	15.64	10.23
2	0	369.16	0.00	6.00	0.00	0.00
	2	326.93	11.44	4.04	1.06	0.92
	4	301.33	18.37	4.16	1.70	1.55
	8	274.64	25.60	3.94	2.36	2.36
	12	N/A	N/A	N/A	N/A	2.86
	16	238.41	35.42	4.30	3.27	3.20
	20	235.20	36.29	4.33	3.35	3.45
	24	229.31	37.88	4.35	3.50	3.63
	28	227.60	38.35	4.34	3.54	3.78
	32	219.84	40.45	5.55	3.73	3.90
	36	213.13	42.27	4.58	3.90	3.99
	40	202.41	45.17	4.54	4.17	4.07
	44	201.38	45.45	4.74	4.19	4.14
	48	193.43	47.60	4.65	4.39	4.20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย						
ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	เวลา (ชม.)	$pH_{เริ่มต้น}$ = 3				
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{t,\text{exp}}$	$q_{t,\text{cal}}$
0.1	0	369.16	0.00	3.00	0.00	N/A
	2	374.03	-1.32	3.13	-2.43	N/A
	4	373.07	-1.06	3.11	-1.95	N/A
	8	376.20	-1.91	3.29	-3.52	N/A
	12	376.31	-1.94	3.65	-3.57	N/A
	16	362.68	1.76	3.72	3.24	N/A
	20	365.73	0.93	3.70	1.72	N/A
	24	381.16	-3.25	3.79	-6.00	N/A
	28	374.31	-1.40	3.85	-2.57	N/A
	32	374.86	-1.54	3.82	-2.85	N/A
	36	369.93	-0.21	3.81	-0.38	N/A
	40	376.44	-1.97	3.94	-3.64	N/A
	44	375.18	-1.63	3.92	-3.01	N/A
	48	371.63	-0.67	3.95	-1.23	N/A
2	0	369.16	0.00	3.00	0.00	N/A
	2	371.05	-0.51	3.74	-0.05	N/A
	4	377.76	-2.33	4.08	-0.21	N/A
	8	386.78	-4.77	4.67	-0.44	N/A
	12	397.15	-7.58	5.19	-0.70	N/A
	16	384.46	-4.14	5.45	-0.38	N/A
	20	382.71	-3.67	5.41	-0.34	N/A
	24	390.66	-5.82	5.28	-0.54	N/A
	28	382.01	-3.48	5.21	-0.32	N/A
	32	386.63	-4.73	5.28	-0.44	N/A
	36	377.49	-2.26	5.39	-0.21	N/A
	40	381.98	-3.47	5.52	-0.32	N/A
	44	376.67	-2.03	5.57	-0.19	N/A
	48	378.25	-2.46	5.57	-0.23	N/A

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย						
ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	เวลา (ชม.)	$pH_{เริ่มต้น}$ = 6				
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{t,\exp}$	$q_{t,\mathrm{cal}}$
0.1	0	380.32	0.00	5.77	0.00	0.00
	2	376.34	1.05	5.78	1.99	3.84
	4	374.65	1.49	5.78	2.84	6.91
	8	369.63	2.81	5.81	5.35	11.52
	12	362.69	4.64	6.00	8.82	14.83
	16	341.51	10.20	5.98	19.41	17.30
	20	344.92	9.31	5.98	17.70	19.23
	24	346.25	8.96	5.93	17.04	20.78
	28	344.94	9.30	5.98	17.69	22.04
	32	336.22	11.60	6.00	22.05	23.10
	36	331.61	12.81	6.02	24.36	23.99
	40	335.37	11.82	6.05	22.48	24.76
	44	328.68	13.58	6.06	25.82	25.42
	48	328.13	13.72	6.09	26.10	26.00
2	0	380.32	0.00	5.77	0.00	0.00
	2	335.03	11.91	5.81	1.13	2.37
	4	298.16	21.60	5.92	2.05	3.83
	8	248.99	34.53	6.11	3.28	5.54
	12	193.83	49.04	6.26	4.66	6.51
	16	107.56	71.72	6.38	6.82	7.13
	20	77.50	79.62	6.40	7.57	7.57
	24	60.87	84.00	6.12	7.99	7.89
	28	54.01	85.80	5.80	8.16	8.14
	32	38.06	89.99	5.98	8.56	8.33
	36	32.02	91.58	5.73	8.71	8.49
	40	38.02	90.00	6.64	8.56	8.62
	44	32.90	91.35	6.60	8.69	8.74
	48	31.49	91.72	5.77	8.72	8.83

$q_{t,\exp}$ คือ ความสามารถในการดูดซับจากการทดลอง

$q_{t,\mathrm{cal}}$ คือ ความสามารถในการดูดซับจากการคำนวณตามสมการ pseudo-second order

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียม

ผลจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย						
ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	**เวลา (นาที)**	**pH$_{เริ่มต้น}$ = 3**				
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	**ร้อยละ**	**pH$_{สุดท้าย}$**	$q_{t,\mathrm{exp}}$	$q_{t,\mathrm{cal}}$
0.1	0	400.97	0.00	3.05	0	0.00
	5	371.35	7.39	4.17	14.81	16.53
	10	354.42	11.61	4.11	23.28	17.04
	30	365.43	8.86	4.29	17.77	17.39
	60	355.05	11.45	4.32	22.96	17.48
	90	358.47	10.60	4.63	21.25	17.51
	120	343.62	14.30	5.20	28.68	17.53
	180	360.94	9.98	4.60	20.02	17.54
	240	368.58	8.08	4.91	16.20	17.55
	360	371.58	7.33	4.66	14.70	17.56
	480	361.68	9.80	4.54	19.65	17.56
2	0	400.97	0.00	3.05	0.00	0.00
	5	274.82	31.46	6.30	3.15	4.29
	10	221.14	44.85	5.99	4.50	5.84
	30	99.29	75.24	6.38	7.54	7.69
	60	59.04	85.28	6.48	8.55	8.35
	90	40.98	89.78	7.11	9.00	8.60
	120	40.44	89.91	7.89	9.01	8.73
	180	42.70	89.35	8.23	8.96	8.86
	240	43.34	89.19	8.36	8.94	8.93
	360	40.68	89.85	8.54	9.01	9.00
	480	41.60	89.63	8.99	8.98	9.03

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย						
ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	เวลา (นาที)	$pH_{เริ่มต้น}$ = 6				
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{t,exp}$	$q_{t,cal}$
0.1	0	399.11	0.00	6.00	0.00	0.00
	5	372.69	6.62	5.70	13.21	6.57
	10	369.34	7.46	5.10	14.89	10.07
	30	366.90	8.07	5.27	16.11	15.60
	60	365.71	8.37	5.36	16.70	18.08
	90	358.55	10.16	5.27	20.28	19.10
	120	357.88	10.33	5.63	20.62	19.65
	180	361.71	9.37	5.66	18.70	20.23
	240	360.95	9.56	5.61	19.08	20.53
	360	358.10	10.28	5.55	20.51	20.85
	480	355.56	10.91	4.64	21.78	21.01
2	0	400.73	0.00	6.00	0.00	0.00
	5	193.73	51.66	6.81	5.18	6.46
	10	115.63	71.15	6.88	7.13	7.72
	30	55.85	86.06	6.95	8.62	8.87
	60	32.16	91.97	7.05	9.21	9.21
	90	21.09	94.74	7.43	9.49	9.33
	120	19.86	95.04	7.95	9.52	9.39
	180	19.34	95.17	8.23	9.53	9.45
	240	21.09	94.74	8.47	9.49	9.48
	360	19.51	95.13	8.73	9.53	9.51
	480	20.74	94.82	8.69	9.50	9.53

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย						
ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	เวลา (นาที)	$pH_{เริ่มต้น}$ = 3				
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{t,\text{exp}}$	$q_{t,\text{cal}}$
0.1	0	373.85	0.00	3.04	0	N/A
	5	374.71	-0.23	3.09	-0.43	N/A
	10	371.52	0.62	3.09	1.17	N/A
	30	372.55	0.35	3.11	0.65	N/A
	60	370.52	0.89	3.12	1.67	N/A
	90	374.63	-0.21	3.19	-0.39	N/A
	120	371.78	0.55	3.14	1.03	N/A
	180	372.62	0.33	3.14	0.61	N/A
	240	374.21	-0.10	3.16	-0.18	N/A
	360	382.18	-2.23	3.16	-4.16	N/A
	480	381.05	-1.93	3.17	-3.60	N/A
2	0	373.85	0.00	3.04	0	N/A
	5	391.25	-4.65	3.45	-0.43	N/A
	10	394.13	-5.42	3.55	-0.51	N/A
	30	396.84	-6.15	3.69	-0.57	N/A
	60	394.39	-5.49	3.69	-0.51	N/A
	90	398.48	-6.59	3.75	-0.62	N/A
	120	396.14	-5.96	3.81	-0.56	N/A
	180	403.12	-7.83	3.82	-0.73	N/A
	240	405.10	-8.36	3.83	-0.78	N/A
	360	411.56	-10.09	3.90	-0.94	N/A
	480	408.11	-9.16	3.88	-0.86	N/A

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย						
ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	เวลา (นาที)	$pH_{เริ่มต้น}$ = 6				
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{t,exp}$	$q_{t,cal}$
0.1	0	386.89	0.00	5.82	0.00	0.00
	5	384.72	0.56	5.82	1.09	3.41
	10	381.87	1.30	5.80	2.51	4.46
	30	378.33	2.21	5.80	4.28	5.61
	60	371.32	4.02	5.80	7.79	6.00
	90	371.41	4.00	5.80	7.74	6.14
	120	369.86	4.40	5.80	8.51	6.21
	180	369.76	4.43	5.81	8.57	6.29
	240	373.50	3.46	5.81	6.69	6.33
	360	373.33	3.50	5.81	6.78	6.36
	480	374.81	3.12	5.81	6.04	6.38
2	0	386.89	0.00	5.82	0.00	0.00
	5	376.68	2.64	6.10	0.26	0.09
	10	370.76	4.17	6.21	0.40	0.18
	30	364.30	5.84	6.41	0.56	0.47
	60	357.17	7.68	6.48	0.74	0.79
	90	346.30	10.49	6.52	1.01	1.02
	120	341.46	11.74	6.56	1.14	1.20
	180	328.58	15.07	6.64	1.46	1.45
	240	324.55	16.11	6.72	1.56	1.63
	360	310.53	19.74	6.77	1.91	1.84
	480	307.91	20.41	6.81	1.97	1.98

$q_{t,exp}$ คือ ความสามารถในการดูดซับจากการทดลอง

$q_{t,cal}$ คือ ความสามารถในการดูดซับจากการคำนวณตามสมการ pseudo-second order

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข

ไอโซเทอร์มการดูดซับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์จากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย

pH เริ่มต้น	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	ผลจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย			
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{e,\exp}$
4	0.00	391.18	0.00	4.00	N/A
	0.10	360.79	7.77	4.04	15.20
	0.30	344.34	11.97	4.05	7.81
	0.50	329.34	15.81	4.15	6.18
	0.80	310.42	20.65	4.13	5.05
	1.00	294.67	24.67	4.17	4.83
	1.30	260.01	33.53	4.49	5.05
	1.50	255.99	34.56	4.32	4.51
	1.80	232.62	40.53	4.40	4.40
	2.00	215.66	44.87	4.49	4.39
5	0.00	390.74	0.00	5.00	N/A
	0.10	353.92	9.42	3.92	18.41
	0.30	344.92	11.73	4.11	7.64
	0.50	326.12	16.54	4.19	6.46
	0.80	309.61	20.76	4.11	5.07
	1.00	295.04	24.49	4.20	4.79
	1.30	277.40	29.01	4.25	4.36
	1.50	254.80	34.79	4.30	4.53
	1.80	240.81	38.37	4.12	4.16
	2.00	209.27	46.44	4.38	4.54

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

pH เริ่มต้น	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	ผลจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย			
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{e,\exp}$
6	0.00	382.89	0.00	6.00	N/A
	0.10	358.07	6.48	4.07	12.41
	0.30	340.25	11.14	4.08	7.11
	0.50	327.31	14.52	4.09	5.56
	0.80	307.85	19.60	4.28	4.69
	1.00	296.13	22.66	4.15	4.34
	1.30	273.41	28.59	4.51	4.21
	1.50	256.09	33.12	4.24	4.23
	1.80	232.99	39.15	4.24	4.16
	2.00	216.37	43.49	4.25	4.16

ตารางที่ 4 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย

pH เริ่มต้น	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	ผลจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย			
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{e,\exp}$
4	0.00	374.05	0.00	4.00	N/A
	0.10	347.55	7.08	6.19	13.25
	0.30	304.81	18.51	6.22	11.54
	0.50	265.71	28.96	6.35	10.83
	0.80	207.60	44.50	6.58	10.40
	1.00	166.75	55.42	6.62	10.37
	1.30	79.74	78.68	6.78	11.32
	1.50	44.01	88.23	6.99	11.00
	1.80	10.70	97.14	7.44	10.09
	2.00	8.27	97.79	7.68	9.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

pH เริ่มต้น	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	ผลจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย			
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{e,\exp}$
5	0.00	376.63	0.00	5.00	N/A
	0.10	351.94	6.56	6.30	12.35
	0.30	305.20	18.97	6.32	11.91
	0.50	262.98	30.18	6.41	11.37
	0.80	201.75	46.43	6.51	10.93
	1.00	160.53	57.38	6.65	10.81
	1.30	84.35	77.60	6.87	11.24
	1.50	40.88	89.15	7.00	11.19
	1.80	12.70	96.63	7.30	10.11
	2.00	9.05	97.60	7.89	9.19
6	0.00	375.28	0.00	6.00	N/A
	0.10	352.18	6.16	6.35	13.25
	0.30	307.20	18.14	6.44	11.54
	0.50	263.02	29.91	6.52	10.83
	0.80	205.01	45.37	6.80	10.40
	1.00	159.59	57.47	6.86	10.37
	1.30	81.78	78.21	6.97	11.32
	1.50	39.93	89.36	7.01	11.00
	1.80	8.11	97.84	7.47	10.09
	2.00	5.49	98.54	7.96	9.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์จากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย

pH เริ่มต้น	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	ผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย					
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{e,\mathrm{exp}}$	$q_{e,\mathrm{cal}}$ (Langmuir)	$q_{e,\mathrm{cal}}$ (Freundlich)
4	0.00	373.80	0.00	4.00	N/A	N/A	N/A
	0.10	370.20	0.96	4.33	1.80	N/A	N/A
	0.30	385.91	-3.24	4.71	-2.02	N/A	N/A
	0.50	390.60	-4.49	5.07	-1.68	N/A	N/A
	0.80	389.78	-4.28	5.50	-1.00	N/A	N/A
	1.00	374.17	-0.10	5.52	-0.02	N/A	N/A
	1.30	365.12	2.32	5.59	0.33	N/A	N/A
	1.50	366.21	2.03	5.55	0.25	N/A	N/A
	1.80	351.51	5.96	5.57	0.62	N/A	N/A
	2.00	367.82	1.60	5.39	0.15	N/A	N/A
5	0.00	398.86	0.00	4.90	N/A	9.93	12.08
	0.10	384.70	3.55	5.17	7.08	9.86	11.81
	0.30	312.39	21.68	5.49	14.41	9.46	10.39
	0.50	295.73	25.86	5.87	10.28	9.35	10.05
	0.80	247.34	37.99	5.91	9.47	8.95	9.00
	1.00	239.12	40.05	5.97	7.99	8.88	8.81
	1.30	225.66	43.42	5.92	6.66	8.74	8.51
	1.50	169.59	57.48	5.96	7.64	8.01	7.13
	1.80	160.82	59.68	5.95	6.61	7.86	6.90
	2.00	82.77	79.25	5.68	7.90	5.92	4.59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

pH เริ่มต้น	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	ผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย					
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{e,\exp}$	$q_{e,\mathrm{cal}}$ (Langmuir)	$q_{e,\mathrm{cal}}$ (Freundlich)
6	0.00	388.26	0.00	5.82	N/A	32.68	36.66
	0.10	321.13	17.29	5.97	33.57	31.60	33.80
	0.30	229.19	40.97	6.24	26.40	29.36	29.29
	0.50	139.12	64.17	6.41	24.91	25.27	23.62
	0.80	74.03	80.93	6.46	19.64	19.28	18.02
	1.00	43.18	88.88	6.45	17.25	14.15	14.30
	1.30	41.14	89.41	6.47	13.35	13.72	14.01
	1.50	29.05	92.52	6.45	11.97	10.80	12.07
	1.80	27.40	92.94	6.45	10.02	10.35	11.77
	2.00	31.02	92.01	6.48	9.03	10.25	11.70

ตารางที่ 6 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับและพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย

pH เริ่มต้น	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	ผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย					
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{e,\exp}$	$q_{e,\mathrm{cal}}$ (Langmuir)	$q_{e,\mathrm{cal}}$ (Freundlich)
4	0.00	382.7	0.00	4.06	N/A	N/A	N/A
	0.10	385.5	-0.74	4.06	-1.41	N/A	N/A
	0.30	391.6	-2.33	4.11	-1.48	N/A	N/A
	0.50	396.9	-3.71	4.14	-1.42	N/A	N/A
	0.80	402.3	-5.12	4.17	-1.23	N/A	N/A
	1.00	407.3	-6.42	4.21	-1.23	N/A	N/A
	1.30	407.0	-6.34	4.26	-0.93	N/A	N/A
	1.50	418.0	-9.21	4.25	-1.18	N/A	N/A
	1.80	421.3	-10.08	4.29	-1.07	N/A	N/A
	2.00	418.0	-9.21	4.31	-0.88	N/A	N/A

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

pH เริ่มต้น	ปริมาณวัสดุดูดซับ (กรัม)	ผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย					
		ความเข้มข้น (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{e,\text{exp}}$	$q_{e,\text{cal}}$ (Langmuir)	$q_{e,\text{cal}}$ (Freundlich)
5	0.00	373.2	0.00	4.91	N/A	N/A	N/A
	0.10	376.5	-0.89	4.92	-1.66	N/A	N/A
	0.30	375.9	-0.72	4.98	-0.45	N/A	N/A
	0.50	374.0	-0.22	5.01	-0.08	N/A	N/A
	0.80	378.2	-1.34	5.05	-0.31	N/A	N/A
	1.00	376.9	-1.00	5.07	-0.19	N/A	N/A
	1.30	379.7	-1.76	5.14	-0.25	N/A	N/A
	1.50	380.1	-1.85	5.20	-0.23	N/A	N/A
	1.80	383.4	-2.75	5.09	-0.28	N/A	N/A
	2.00	385.8	-3.37	5.22	-0.31	N/A	N/A
6	0.00	387.7	0.00	5.89	N/A	N/A	N/A
	0.10	387.2	0.14	5.90	0.28	N/A	N/A
	0.30	384.0	0.96	5.93	0.61	N/A	N/A
	0.50	383.9	1.00	5.99	0.38	N/A	N/A
	0.80	378.4	2.46	6.08	0.59	N/A	N/A
	1.00	363.7	6.29	6.18	1.20	N/A	N/A
	1.30	355.6	8.68	6.39	1.24	N/A	N/A
	1.50	353.6	9.11	6.50	1.14	N/A	N/A
	1.80	343.5	11.94	6.66	1.23	N/A	N/A
	2.00	328.9	16.06	6.85	1.47	N/A	N/A

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต่อประสิทธิภาพการบำบัดไอออนสังกะสีด้วยตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย (ทดลองเพิ่มเติมสำหรับการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ)

pH เริ่มต้น	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	ผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย					
		ความเข้มข้นสุดท้าย (มก./ล.)	ร้อยละ	$pH_{สุดท้าย}$	$q_{e,\mathrm{exp}}$	$q_{e,\mathrm{cal}}$ (Langmuir)	$q_{e,\mathrm{cal}}$ (Freundlich)
6	11.12	3.59	67.76	6.24	0.38	0.17	0.41
	19.67	7.51	61.85	6.33	0.61	0.32	0.51
	42.11	27.33	35.11	6.33	0.74	0.74	0.75
	61.43	44.20	28.05	6.39	0.86	0.92	0.86
	83.49	66.89	19.88	6.35	0.83	1.06	0.98
	105.87	86.80	18.02	6.30	0.95	1.14	1.05
	129.39	107.47	16.94	6.33	1.10	1.19	1.12
	160.98	134.71	16.32	6.33	1.31	1.25	1.20
	205.34	176.24	14.17	6.35	1.46	1.30	1.30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองแบบคอลัมน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 8 ผลการศึกษาการบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย (ความลึกของคอลัมน์ 30 ซม.)

ผลจากการทดลองที่ไม่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย ($pH_{เริ่มต้น}$ = 6)					
ความลึก (ซม.)	**เวลา (ชม.)**	C_0	C	**$pH_{สุดท้าย}$**	$C / C_{o,\exp}$
	4		1.50	9.5	0.00
	8		1.61	9.5	0.00
	12		0.40	9.4	0.00
	16		1.96	9.2	0.01
	20		1.34	9.0	0.00
	24		15.07	8.9	0.04
	28		46.63	8.8	0.12
30	32	383.235	64.90	8.6	0.17
	36		72.08	8.3	0.19
	40		84.45	8.1	0.22
	44		123.02	8.1	0.32
	48		143.94	7.8	0.38
	52		154.93	7.8	0.40
	56		171.45	7.5	0.45
	60		172.81	7.4	0.45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 9 ผลการศึกษาการบำบัดไอออนสังกะสีแบบคอลัมน์ด้วยตะกรันอลูมิเนียมจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย

ผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย ($pH_{เริ่มต้น}$ = 6)						
ความลึก (ซม.)	เวลา (ชม.)	C_0	C	$pH_{สุดท้าย}$	$C/C_{o,\exp}$	$C/C_{o,cal}$
	1		12.61	8.5	0.03	0.13
	2		29.48	8.4	0.08	0.14
	3		36.78	8.0	0.10	0.15
	4		37.54	7.6	0.10	0.16
	5		47.02	7.2	0.12	0.18
	6		78.92	7.1	0.21	0.20
	7		97.34	7.0	0.26	0.21
	8		99.2	7.1	0.26	0.23
	9		105.56	6.8	0.28	0.25
	10		120.65	6.6	0.32	0.27
	11		145.19	6.8	0.38	0.29
	12		149.09	6.8	0.39	0.31
	13		170.67	6.7	0.45	0.34
	14		179.61	6.7	0.47	0.36
	16		196.6	6.7	0.49	0.41
10	20	383.235	241.32	6.8	0.60	0.51
	24		283.23	6.3	0.71	0.62
	29		302.86	6.2	0.76	0.73
	32		350.02	6.2	0.88	0.79
	36		366.73	6.2	0.92	0.85
	40		362.45	6.1	0.91	0.90
	44		374.52	6.0	0.94	0.93
	48		378.55	6.0	0.95	0.95
	52		377.86	6.0	0.95	0.97
	56		382.45	5.9	0.96	0.98
	60		388.78	5.9	0.97	0.99
	64		N/A	N/A	N/A	0.99
	68		N/A	N/A	N/A	0.99
	72		N/A	N/A	N/A	1.00
	76		N/A	N/A	N/A	1.00
	80		N/A	N/A	N/A	1.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลจากการทดลองที่ควบคุมพีเอชของน้ำเสีย ($pH_{เริ่มต้น}$ = 6)						
ความลึก (ซม.)	เวลา (ชม.)	C_0	C	$pH_{สุดท้าย}$	$C / C_{o,\exp}$	$C / C_{o,\mathrm{cal}}$
20	4	383.235	4.88	8.5	0.01	0.03
	8		10.42	8.4	0.03	0.05
	12		10.3	8.0	0.03	0.09
	16		55.04	7.6	0.14	0.14
	20		185.04	7.2	0.46	0.22
	24		246.03	6.9	0.62	0.33
	29		287.37	6.8	0.72	0.50
	32		299.25	6.6	0.75	0.60
	36		305.34	6.5	0.77	0.73
	40		338.99	6.6	0.85	0.82
	44		371.69	6.4	0.93	0.89
	48		369.02	6.3	0.92	0.93
	52		381.76	6.3	0.96	0.96
	56		380.89	6.2	0.95	0.98
	60		384.75	6.2	0.96	0.99
	64		N/A	N/A	N/A	0.99
	68		N/A	N/A	N/A	1.00
	72		N/A	N/A	N/A	1.00
	76		N/A	N/A	N/A	1.00
	80		N/A	N/A	N/A	1.00
30	4	383.235	11.05	8.9	0.03	0.01
	8		9.89	8.4	0.02	0.02
	12		7.09	8.1	0.02	0.03
	16		9.47	7.8	0.02	0.06
	20		21.31	7.7	0.05	0.10
	24		53.83	7.5	0.13	0.16
	29		111.69	7.5	0.28	0.27
	32		140.49	7.5	0.35	0.36
	36		164.97	7.3	0.41	0.50
	40		178.67	7.0	0.45	0.63
	44		221.97	7.0	0.56	0.75
	48		298.67	6.9	0.75	0.84
	52		330.05	6.9	0.83	0.90
	56		376.76	6.7	0.94	0.94
	60		379.04	6.5	0.95	0.97
	64		N/A	N/A	N/A	0.98
	68		N/A	N/A	N/A	0.99
	72		N/A	N/A	N/A	0.99
	76		N/A	N/A	N/A	1.00
	80		N/A	N/A	N/A	1.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 10 ผลการศึกษาการบำบัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียจริงด้วยตะกรันอลูมิเนียม ($pH_{เริ่มต้น}$ = 6, C_0 = 144.18, ความลึกของคอลัมน์ 10 ซม.)

เวลา (ชม.)	C	$pH_{สุดท้าย}$	$C/C_{o,\exp}$
4	0.98	9.0	0.01
8	1.12	8.3	0.01
12	1.04	8.6	0.01
16	1.00	8.6	0.01
20	0.94	8.6	0.01
24	0.95	8.6	0.01
28	0.95	8.5	0.01
32	0.92	8.4	0.01
36	0.89	8.5	0.01
40	0.87	8.5	0.01
44	0.87	8.6	0.01
48	0.90	8.7	0.01
52	0.95	8.5	0.01
56	0.86	8.6	0.01
60	0.78	8.6	0.01
64	0.85	8.6	0.01
68	0.92	8.7	0.01
72	0.92	8.5	0.01
76	0.94	8.4	0.01
80	0.97	8.2	0.01
84	1.00	8.3	0.01
88	0.95	8.4	0.01
92	0.94	8.5	0.01
96	0.92	8.4	0.01
100	0.94	8.4	0.01
104	0.99	8.3	0.01
108	0.97	8.4	0.01
112	0.95	8.6	0.01
116	0.94	8.5	0.01
120	0.94	8.5	0.01
124	0.95	8.4	0.01
128	0.98	8.4	0.01
132	1.00	8.3	0.01
136	0.94	8.4	0.01
140	0.92	8.5	0.01
144	1.37	8.4	0.01
148	0.99	8.3	0.01
152	0.98	8.2	0.01
156	0.94	8.2	0.01
160	0.96	8.2	0.01
164	1.01	8.2	0.01
168	0.97	8.3	0.01
172	0.99	8.2	0.01
176	1.00	8.3	0.01
180	1.03	8.3	0.01
184	1.04	8.4	0.01
188	1.05	8.3	0.01
192	1.15	8.0	0.01
196	2.24	7.7	0.02
200	2.24	7.7	0.02
204	3.38	7.8	0.02
208	4.56	7.8	0.03
212	5.22	7.8	0.04
216	5.52	7.4	0.04
220	6.78	7.5	0.05
224	8.95	7.5	0.06
228	8.95	7.5	0.06
232	16.45	7.5	0.11
236	8.52	7.4	0.06
240	13.08	7.4	0.09
244	12.18	7.2	0.08
248	15.03	7.2	0.10
252	22.55	7.3	0.16
256	11.62	7.3	0.08
260	28.3	7.3	0.20
264	24.72	7.2	0.17
272	16.68	7.2	0.12
276	33.46	7.3	0.23
280	31.94	7.3	0.22
284	32.44	7.2	0.22
288	29.16	7.2	0.20
292	18.06	7.3	0.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง

การคำนวณต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียด้วยตะกรันอลูมิเนียมแบบคอลัมน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การคำนวณต้นในการบำบัดน้ำเสียจริงด้วยตะกรันอลูมิเนียมประกอบด้วยต้นทุนแปรผัน 3 รายการ ได้แก่ ค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า และค่ากำจัดตะกอน มีรายละเอียด ดังนี้

1. การคำนวณค่าสารเคมี

<u>ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ</u>

- ราคา NaOH 50% = 23.68 ฿/kg
- ความหนาแน่น NaOH = 2.13

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> คำนวณความหนาแน่นของ NaOH 50% (commercial grade)

= 2.14/2

= 1.07 g/cm^3

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> คำนวณหาปริมาตรน้ำที่ใช้ต่อน้ำ 1 m^3

ปริมาณที่ใช้ต่อน้ำ 1 L = 0.5 ml (อ้างอิงจากการทดลอง)

ปริมาณที่ใช้ต่อน้ำ 1 m^3 = 0.5 X 1000

= 500 ml

<u>ขั้นตอนที่ 3</u> คำนวณหา NaOH 50% น้ำหนักต้องใช้ต่อน้ำ 1 m^3

สูตร M = D X V

= 1.07 g/cm^3 X 500 ml

= 535 g

หรือ = 535/1000

= 0.53 kg

<u>ดังนั้น</u>	ค่า NaOH 50%	=	23.68 ฿/kg x 0.53 kg
		=	12.61 ฿/ m^3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. การคำนวณค่าไฟฟ้า (สำหรับคอลัมน์ที่บรรจุตะกรันอลูมิเนียม 1 ตัน)

<u>ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ</u>

- อัตราการไหล = 1 ml/min หรือ 0.06 L/h
- ปริมาณ Al dross = 160 g หรือ 0.16 kg (จากการทดลอง)
- ปริมาตรน้ำที่บำบัดได้ (ค่า Zn ผ่านมาตรฐาน) = 12.27 L (จากการทดลอง)

2.1 ค่าไฟฟ้าของปั๊มจ่ายน้ำเข้าระบบ

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> คำนวณหาปริมาตรน้ำที่บำบัดได้ผ่านมาตรฐาน

ตะกรันอลูมิเนียม 0.16 kg บำบัดน้ำผ่านมาตรฐานได้ = 12.27 L

ดังนั้น ตะกรันอลูมิเนียม 1000 kg บำบัดน้ำผ่านมาตรฐานได้ = (12.27 x 1000)/0.16

= 76,688 L

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> คำนวณหาอัตราการไหล

ระบบบำบัดมีขนาดใหญ่ขึ้น (up scale) = 1000/0.16

= 6,250 เท่า

ต้องใช้อัตราการไหล = 0.06 L/h x 6250 เท่า

= 375 L/h

ดังนั้น ต้องใช้ปั๊มกำลังฟ้า 6.5 W เพื่อให้สามารถสูบน้ำได้ 375 L/h

<u>ขั้นตอนที่ 3</u> คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้

สูตร พลังงานไฟฟ้า (unit) = [กำลังไฟฟ้า (W) x เวลา (h)] / 1000

= (6.5 W x 1 h)/1000

= 0.0065 unit

<u>ขั้นตอนที่ 4</u> คำนวณค่าไฟฟ้า (กำหนดอัตราค่าไฟฟ้าสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม 4.1283 ฿/unit)

สูตร ค่าไฟฟ้า = unit x อัตราค่าไฟต่อ unit

= 0.0065 x 4.1283 + (0.07 x 0.0065 x 4.1283)

= 0.03 ฿/น้ำเสีย 375L

หรือ = (0.03 x 1000)/375

= 0.08 ฿/น้ำเสีย 1 m^3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2 ค่าไฟฟ้าของปั๊มจ่ายสารเคมี

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาอัตราการไหล

น้ำเสีย 1 L ใช้ NaOH 50% = 0.5 ml

ดังนั้น น้ำเสีย 375 L ใช้ NaOH 50% = (0.5 X 375)/1

= 187.5 ml/h

ดังนั้น ต้องใช้ปั๊มกำลังฟ้า 4 W เพื่อให้สามารถสูบน้ำได้ 187.5 L/h

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้

สูตร พลังงานไฟฟ้า (unit) = [กำลังไฟฟ้า (W) x เวลา (h)] / 1000

= (4 W x 1 h)/1000

= 0.0040 unit

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าไฟฟ้า (กำหนดอัตราค่าไฟฟ้าสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม 4.1283 ฿/unit)

สูตร ค่าไฟฟ้า = unit x อัตราค่าไฟต่อ unit

= 0.0040 x 4.1283 + (0.07 x 0.0040 x 4.1283)

= 0.02 ฿/น้ำเสีย 375L

หรือ = (0.02 x 1000)/375

= 0.05 ฿/น้ำเสีย 1 m^3

ดังนั้น ค่าไฟทั้งหมด	=	ค่าไฟฟ้าของปั๊มจ่ายน้ำเข้าระบบ + ค่าไฟฟ้าของปั๊มจ่ายสารเคมี
	=	0.08 + 0.05
	=	0.12 ฿/ m^3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. การคำนวณค่ากำจัดตะกอน

- ค่ากำจัดตะกอน = 3 ฿/kg (รวมค่าขนส่ง)
- ปริมาณ Al dross = 160 g หรือ 0.16 kg (จากการทดลอง)
- ปริมาตรน้ำที่บำบัดได้ (ค่า Zn ผ่านมาตรฐาน) = 12.27 (จากการทดลอง)

<u>ขั้นตอนที่ 1</u> หาปริมาตรน้ำเสียที่บำบัดได้

ตะกรันอลูมิเนียม 0.16 kg บำบัดน้ำผ่านมาตรฐานได้ = 12.27 L

ดังนั้น ตะกรันอลูมิเนียม 1 kg บำบัดน้ำผ่านมาตรฐานได้ = (12.27 x 1)/0.16

= 76.69 L/kg

<u>ขั้นตอนที่ 2</u> หาน้ำหนักตะกรันอลูมิเนียมที่ต้องใช้ต่อน้ำ 1 m^3

น้ำเสีย 76.69 L ใช้ ตะกรันอลูมิเนียม = 1 kg

ดังนั้น น้ำเสีย 1000 L ใช้ ตะกรันอลูมิเนียม = (1000 x 1)/76.69

= 13.04 kg/m^3

ดังนั้น ค่ากำจัดตะกอน = 13.04 x 3

= 39.12 ฿/m^3

<u>สรุป</u> ต้นทุนทั้งหมดที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย = ค่าสารเคมี + ค่าไฟฟ้า + ค่ากำจัดตะกอน

= 12.61 + 0.12 + 39.12

= 51.85 ฿/m^3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาว นราทิพย์ รักษ์เดช
วัน เดือน ปี เกิด	1 กันยายน 2536
สถานที่เกิด	สุราษฎร์ธานี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ในปีการศึกษา 2558 และปีการศึกษา 2559 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	43/5 หมู่ 8 ตำบลท่าเคย อำเภอท่าฉาง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84150
ผลงานตีพิมพ์	การจัดประชุมวิชาการระดับชาติครั้งที่ 3 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ในวันที่ 30 สิงหาคม 2561 ชื่อบทความ: การบำบัดไอออนสังกะสีจากน้ำเสียด้วยตะกรันอลูมิเนียมเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ (Treatment of Zinc ion from Wastewater by used Aluminium Dross from Auto Parts Manufacturing)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY