การเก็บกลับคืนสังกะสีจากฝุ่นเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยวิธีการชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจาง

นางสาววิสารัช มั่นประพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

RECOVERY OF ZINC FROM ELECTRIC ARC FURNACE DUST

BY DILUTE SULPHURIC ACID LEACHING

Miss Wisarat Manpraphan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Georesources Engineering

Department of Mining and Petroleum Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเก็บกลับคืนสังกะสีจากฝุ่นเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยวิธีการชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจาง
โดย	นางสาววิสารัช มั่นประพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมทรัพยากรธรณี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ณัฐวดี วิสิฐเรืองสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…………………………………………. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ มีชำนะ)

…………………………………………... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์)

…………………………………………... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.ณัฐวดี วิสิฐเรืองสกุล)

…………………………………………… กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรธนะเดช)

…………………………………………… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน)

วิสารัช มั่นประพันธ์ : การเก็บกลับคืนสังกะสีจากฝุ่นเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยวิธีการชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจาง. (RECOVERY OF ZINC FROM ELECTRIC ARC FURNACE DUST BY DILUTE SULPHURIC ACID LEACHING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. ณัฐวดี วิสิฐเรืองสกุล, 87 หน้า.

ฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ประกอบด้วย โลหะเจือปนหลักที่สามารถนำกลับมาได้ ได้แก่ สังกะสีและเหล็ก มีองค์ประกอบหลัก คือ สังกะสี ประมาณร้อยละ 24-27 โดยที่โลหะทั้งสองชนิดจับตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบซิงค์ออกไซด์ และซิงค์เฟอร์ไรท์อยู่ในรูปที่มีเสถียรภาพสูง ซึ่งชะละลายได้ยาก งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาคุณลักษณะของฝุ่นจากเตาหลอมไฟฟ้า และศึกษากระบวนการชะละลายโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางและกระบวนการทางความร้อน ทำการชะละลายภายใต้สภาวะปกติโดยไม่มีการปรับสภาพของตัวอย่าง และทำการชะละลายร่วมกับกระบวนการทางความร้อน โดยทำการเผาตัวอย่างด้วยโซเดียมคลอไรด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการชะละลายของซิงค์เฟอร์ไรท์ การออกแบบและการทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชะละลาย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ เวลาที่ใช้ในการชะละลาย และปริมาณของตัวอย่างที่เหมาะสมในการชะละลาย พบว่าความสามารถในการชะละลายสังกะสีขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการชะละลาย คือ 1 โมลต่อลิตร และมีการเก็บกลับคืนสูงสุดถึงร้อยละ 92

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม	ลายมือชื่อนิสิต....................................
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก....................
ปีการศึกษา 2554	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม....................

5270508621 : MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING
KEYWORDS : ZINC RECOVERY/ ELECTRIC ARC FURNACE DUST/ THERMAL TREATMENT/ SULPHURIC ACID/ LEACHING

WISARAT MANPRAPHAN: RECOVERY OF ZINC FROM ELECTRIC ARC FURNACE DUST BY DILUTE SULPHURIC ACID LEACHING. ADVISOR : ASSOC. PROF. QUANCHAI LEEPOWPANTH, Ph.D., CO-ADVISOR : NATTAWADEE WISITRUANGSAKUL, Ph.D., 87 pp.

Electric arc furnace dust (EAFD) containing iron, zinc, and lead are generated. The largest metallic portion of EAFD is zinc, which varies between 24-27%. Zinc in EAFD mainly presents as franklinite ($ZnFe_2O_4$) and zincite (ZnO). Zinc ferrite (franklinite) is considerably refractory against leaching. In this research, the EAFD characterization and its leaching process by thermal treatment and dilute sulphuric acid (H_2SO_4) are performed. The leaching process was based on the zinc extraction with dilute sulphuric acid from EAFD under atmospheric conditions, without any using preliminary treatment and using thermal treatment by roasting with salts (NaCl) to increase dissolution of refractory zinc. Statistical design and analysis of experiments is carried out to determine the main effects of the leaching process factors, with acid normality, shaking time and solid to liquid ratio. Zinc was extracted by using an EAFD. Sulfuric acid was used at different concentrations to recover zinc from dust particles. The highest zinc extraction was obtained at low acid concentration 1 mol/L. The kinetics of zinc extraction showed a maximum zinc recovery of 92%

Department: Mining and Petroleum Engineering. Student's Signature ....
Field of study: Georesources Engineering Advisor's Signature ....
Academic Year: 2011 Co-advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับการอนุคราะห์จากบุคคลและองค์กรหลายฝ่าย ได้แก่ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักเป็นอย่างสูง ในการให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการวิจัย ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ตั้งแต่การนำเสนอโครงร่างวิทยานิพนธ์จนกระทั่งวิทยานิพนธ์แล้วเสร็จ

ขอขอบพระคุณ ดร.ณัฐวดี วิสิฐเรืองสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม นักวิจัยของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้คำแนะนำในการวิจัยและให้ความช่วยเหลือในการจัดหาตัวอย่างฝุ่นจากเตาอาร์คหลอมไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ มีชำนะ รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรธนะเดช และ ดร.กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน สำหรับคำแนะนำต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วง และสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้เงินทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต เพื่อสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์และครูปฏิบัติการประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

นอกจากนี้ขอขอบคุณ ธุรการภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ได้ให้การสนับสนุนคอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำวิจัยในครั้งนี้มาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

				หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย				ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ				จ
กิตติกรรมประกาศ				ฉ
สารบัญ				ช
สารบัญตาราง				ญ
สารบัญภาพ				ฎ
บทที่				
1	บทนำ			1
	1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา		1
	1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย		2
	1.3	ขอบเขตของการวิจัย		2
	1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ		2
	1.5	วิธีดำเนินการวิจัย		3
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง			4
	2.1	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า		4
	2.2	เทคโนโลยีการรีไซเคิลฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า		5
		2.2.1	วิธีการโลหวิทยาความร้อน (Pyrometallurgy)	6
		2.2.2	วิธีการโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy)	16
	2.3	ธรรมชาติของแร่สังกะสี		23
		2.3.1	สมบัติทั่วไป	23
		2.3.2	การเกิด	24
		2.3.3	แหล่งแร่	24
		2.3.4	การค้นพบ	24
	2.4	การใช้ประโยชน์		25
		2.4.1	การใช้ประโยชน์ของสังกะสีต่อภาคอุตสาหกรรม	25

บทที่		หน้า
	2.5 แนวโน้มเกี่ยวกับแร่สังกะสี..	29
	2.5.1 แนวโน้มเกี่ยวกับแร่สังกะสีในประเทศไทย..........................	29
	2.5.2 แนวโน้มเกี่ยวกับแร่สังกะสีโลก.......................................	32
	2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..	33
3	วิธีการดำเนินการวิจัย...	36
	3.1 ขั้นตอนการวิจัย..	36
	3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..	36
	3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..	36
	3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย..	37
	3.4.1 ศึกษาหลักการและวิธีการเก็บกลับคืนสังกะสีของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า..	37
	3.4.2 ศึกษาคุณลักษณะของตัวอย่างฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า......	37
	3.4.3 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกของตัวอย่างฝุ่นทั้ง 3 แหล่ง............................	38
	3.4.4 ศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในการชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริกโดยใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมด้วย..........	39
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล...	41
	4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า..	41
	4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง X-ray fluorescence spectrometry..	41
	4.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแร่ของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยใช้ เครื่อง X-ray Diffractometer	44
	4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างพื้นผิวของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยใช้ เครื่อง Scanning Electron Microscopy	47
	4.2 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการชะละลายของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า..	50
	4.2.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลาย............	50

บทที่		หน้า
	4.2.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการละลาย………………	52
	4.2.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของความข้นที่ใช้ในการละลาย………….	56
	4.2.4 ผลการศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกโดยใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมด้วย………………………………………	58
5	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ………………………………………………	60
	5.1 สรุปผลการวิจัย……………………………………………………....	60
	5.2 ข้อเสนอแนะ………………………………………………………………	61
รายการอ้างอิง………………………………………………………..........................		62
ภาคผนวก…………………………………………………………...............................		64
	ภาคผนวก ก………………………………………..................................	65
	ภาคผนวก ข………………………………………..................................	69
	ภาคผนวก ค………………………………………..................................	71
	ภาคผนวก ง………………………………………..................................	74
	ภาคผนวก จ………………………………………..................................	76
	ภาคผนวก ฉ………………………………………..................................	78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์………………………………………..............................		87

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบหลักของตัวอย่างฝุ่นที่เกิดจากการถลุงด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า…..	5
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก Waelz Process…………………...	9
2.3	สรุปเทคนิคการรีไซเคิลฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยวิธีโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) ตามชนิดของตัวทำละลาย………………..……	19
2.4	แสดงราคาแร่สังกะสี ปี 2551-2555……………………………………………	29
2.5	แสดงความเคลื่อนไหวของแร่สังกะสี……………………………………………	31
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.1………………………………..	41
	องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.2…………………………….…..	42
	องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.3………………………………...	43
4.2	ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนที่ความเข้มข้นที่ต่างๆ กันที่ใช้ในการชะละลายในตัวอย่างฝุ่นแต่ละแหล่ง…………………………………………………...….	51
4.3	ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนที่เวลาที่ต่างๆ กันที่ใช้ในการชะละลายในตัวอย่างฝุ่นแต่ละแหล่ง……………..………………………………………………..	54
4.4	ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนที่ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการละลายต่างๆ กัน……	57
4.5	ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนที่การชะละลายโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเพียงอย่างเดียวกับการชะละลายโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับกระบวนการทางความร้อน……………………………..…………………	59

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า…..…………………………………………………….	4
2.2	กระบวนการ Waelz Process……………………………………….…………	7
2.3	Rotary hearth furnace (RHF) ……………………………………..…………	11
2.4	กระบวนการ Paul Wurth PRIMUS……………………………………………	12
2.5	กระบวนการ Oxicup และ กระบวนการ Self-reducing agglomerates………...	13
2.6	กระบวนการ Ezinex…………………………………………………………….	21
2.7	กระบวนการ ZincEx……………………………………………………………	22
2.8	ตัวอย่างสังกะสี…………………………………………………………………..	23
2.9	สัดส่วนการใช้งานของแร่สังกะสี………………………………………………..	25
2.10	แสดงตัวอย่างของสังกะสีชุบเคลือบเหล็ก………………………………………	26
2.11	แสดงตัวอย่างสังกะสีที่ใช้ฉีดชิ้นงาน…………………………………..……….	26
2.12	แสดงตัวอย่างเคมีภัณฑ์จากสังกะสี…………………………………………….	27
2.13	แสดงตัวอย่างทองเหลือง……………………………………………………..….	28
2.14	แสดงวงโคจรของการรีไซเคิลสังกะสี……………………………………………	28
2.15	กราฟแสดงราคาแร่สังกะสี ปี 2551-2555……………………………………...	30
2.16	แนวโน้มและการประมาณราคาแร่สังกะสี……………………………………...	32
2.17	แสดงปริมาณของโลหะที่ถูกชะละลายจากตัวอย่างฝุ่นจาก EAF โดยการใช้สารละลายกรดที่แตกต่างกันในการละลาย……………...…………	34
2.18	ผลการชะละลายสังกะสีของสังกะสีเฟอร์ไรท์และเหล็กด้วยโซเดียมคาร์บอเนต….	35
4.1	ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางแร่ของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.1…………………………...	44
4.2	ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางแร่ของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.2…………………………...	45
4.3	ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางแร่ของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.3…………………………...	46
4.4	ผลวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของพื้นผิวของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ตัวอย่าง EAFD.1 ที่กำลังขยาย 300 เท่า…………….………………………	47
4.5	ผลวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของพื้นผิวของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ตัวอย่าง EAFD.1 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า…………….………………………	47

ภาพที่ หน้า

4.6 ผลวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของพื้นผิวของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ตัวอย่าง EAFD.1หลังจากชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก 6 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 300 เท่า…………………….……………………………………………………….. 48

4.7 ผลวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของพื้นผิวของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ตัวอย่าง EAFD.1 หลังจากชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก 6 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 1000 เท่า…………………………………………………………………..…. 49

4.8 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางที่ใช้ ในการชะละลายตัวอย่างฝุ่นแต่ละแหล่ง………………………………………… 50

4.9 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการชะละลายในตัวอย่างฝุ่นแต่ละแหล่ง……………….. 52

4.10 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนของสังกะสีและเหล็ก จากฝุ่นตัวอย่าง EAFD.1 ที่เวลาต่างๆ กัน……………………………….………. 52

4.11 การวิเคราะห์ฝุ่นจากเตาหลอมไฟฟ้าก่อนการชะละลาย และหลังการ ชะละลาย…………………….……………………………………………..…… 55

4.12 อิทธิพลของความข้นในการชะละลาย…………………………………………. 56

4.13 เปรียบเทียบการชะละลายโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกและการชะ ละลายโดยใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมด้วย…………..……………………. 58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยในปัจจุบันกระบวนการผลิตเหล็กกล้าส่วนใหญ่ในประเทศไทยใช้เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace) ในระหว่างกระบวนการผลิตเหล็กดังกล่าวนั้นก่อให้เกิดฝุ่นจากเตาอาร์คหลอมไฟฟ้า (Electrical Arc Furnace Dust: EAFD) ซึ่งถือเป็นกากของเสียอันตรายตามอนุสัญญาบาเซล (Basel Convention) ที่ว่าด้วยการควบคุมการเคลื่อนย้ายและการกำจัดของเสียอันตรายข้ามแดน ซึ่งส่งผลทำให้การขนส่งเคลื่อนย้ายและกำจัดทำได้ลำบาก โดยในปี 2553 โรงงานผลิตเหล็กกล้าที่ใช้เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในประเทศไทย ได้มีการผลิตเหล็กกล้ารวมกันมากกว่า 4,000,000 ตันซึ่งทำให้เกิดฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าประมาณ 90,000 ตัน คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 2 ของปริมาณเหล็กกล้าที่ผลิตได้ทั้งหมด ซึ่งฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าดังกล่าวนอกจากจะก่อให้เกิดอันตรายแล้วยังต้องหาวิธีในการกำจัดที่ถูกวิธีเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ ซึ่งโรงงานผลิตเหล็กในประเทศไทยจะใช้วิธีส่งไปกำจัดและฝังกลบ ซึ่งสารอันตรายต่างๆ อาจแพร่สู่สิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้ฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ายังประกอบด้วยโลหะที่สามารถนำกลับมาใช้ได้ ได้แก่ สังกะสีและเหล็ก โดยโลหะทั้งสองชนิดจับตัวกันในรูปของสารประกอบซิงค์เฟอร์ไรท์ ซึ่งมีสังกะสีประมาณร้อยละ 15-30 และโลหะเหล็กประมาณร้อยละ 20-30 โดยที่ความต้องการใช้สังกะสีและราคาสังกะสีในปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจะเห็นว่าฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ยังเป็นแหล่งทรัพยากรทุติยภูมิที่น่าสนใจในการเก็บกลับคืนสังกะสีมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตต่อไปได้

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาและศึกษาเปรียบเทียบการเก็บกลับคืนสังกะสีของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการเก็บกลับคืนสังกะสี รวมไปถึงแนวทางที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนสังกะสี

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นนั้นการเก็บกลับคืนสังกะสีจากฝุ่นที่เกิดจากการผลิตด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า นอกจากจะเป็นการหมุนเวียนทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อลดภาระในด้านต้นทุน ยังสามารถค่าลดใช้จ่ายที่เกิดขึ้นการกำจัดกากของเสีย และยังสามารถช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งถือได้ว่าเป็นกระบวนการในการจัดการของเสียจากกระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการแยกสกัดสังกะสีโดยการชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก

2. ศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการชะละลายสังกะสีจากฝุ่นที่เกิดจากการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยการใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมกับการชะละลาย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนสังกะสีจากฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยเริ่มจากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและทางแร่ของตัวอย่างฝุ่น ทำการชะลายสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง รวมทั้งศึกษาตัวแปรที่สำคัญในการชะละลายต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย เวลาที่ใช้ในการทำละลาย ปริมาณฝุ่นที่ใช้เทียบกับสารละลาย และเปรียบเทียบกับการใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมด้วย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการชะละลายการละลายสังกะสีเฟอร์ไรท์ที่มีเสถียรภาพสูงซึ่งไม่สามารถละลายได้ง่าย

2. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการชะละลายการละลายสังกะสีของฝุ่นที่เกิดจากการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยใช้กระบวนการทางความร้อน

3. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปปรับปรุงประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนฝุ่นที่เกิดจากการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าไปใช้หรือประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่มีการใช้เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

4. ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากของเสีย

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาคุณลักษณะของตัวอย่างฝุ่นที่เกิดจากการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและวิธีการแยกสกัดแบบต่างๆ

2. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและทางแร่ของตัวอย่างฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD), X-Ray Fluorescence spectrometry (XRF), Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)

3. ศึกษาโครงสร้างและขนาดของตัวอย่างฝุ่น ด้วยกล้องจุลทรรศน์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน SEM-EDX (Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive X-Ray Analyzer

4. ศึกษาตัวแปรที่สำคัญในการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง และการชะละลายด้วยกระบวนการทางความร้อน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ เวลาในการชะละลาย ปริมาณตัวอย่างที่เหมาะสมในการชะละลาย

5. วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องเกี่ยวกับฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

ฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ภาพที่ 2.1 เป็นผลพลอยได้อย่างหนึ่งที่เกิดจากการผลิตเหล็กกล้า และการรีไซเคิลเศษเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าประกอบด้วยโลหะเจือปนหลักที่สามารถนำกลับมาได้ ได้แก่ สังกะสีและเหล็ก โดยโลหะทั้งสองชนิดจับตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบซิงค์เฟอร์ไรท์ นอกจากนี้ยังมีโลหะหนักอื่นๆ เจือปนอยู่อีกด้วย อาทิเช่น ตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิล และโครเมียม รายละเอียดดังตารางที่ 2.1 เป็นต้น ซึ่งเกิดจากการหลอมรีไซเคิลเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กเครื่องมือ รวมทั้งเศษเหล็กใช้แล้วต่างๆ ฝุ่นดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่มกากของเสียอันตราย เพราะมีโลหะหนักเจือปนอยู่มากกว่าที่มาตรฐานกำหนดโดยเฉพาะตะกั่ว ซึ่งวิธีการสกัดเอาโลหะออกจากฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านั้น แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ วิธีโลหวิทยาความร้อน (Pyrometallurgy) และวิธีโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) ในทางปฏิบัติพบว่าวิธีโลหวิทยาสารละลาย แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพสูง แต่วิธีโลหวิทยาความร้อน ยังคงเป็นที่นิยมมากกว่าเนื่องจากมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากกว่า แต่ในทางกลับกันก็มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่อนข้างสูง

ภาพที่ 2.1 ฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของตัวอย่างฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (P. Oustadakis and P.E. Tsakiridis, 2010)

Oxides	% Weight
SiO_2	1.145
Al_2O_3	0.5190
Fe_2O_3	24.78
CaO	18.6
MgO	3.949
K2O	1.804
Na2O	2.44
SO_3	3.214
Cr_2O_3	0.194
PbO	6.016
ZnO	25.29
MnO	2.452
CoO	0.24
CuO	0.454
Cl	3.622
LOI	6.450

2.2 **เทคโนโลยีการรีไซเคิลฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า** (R. Chairaksa et al., 2010)

เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการรีไซเคิลฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าหลักๆ แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ วิธีโลหวิทยาความร้อน (Pyrometallurgy) และวิธีโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy)

2.2.1 **วิธีโลหวิทยาความร้อน** (Pyrometallurgy) ประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ ดังต่อไปนี้

1. Drying เป็นการไล่ความชื้นและน้ำที่ติดมากับเศษเหล็กก่อนป้อนสู่เตาหลอม
2. Calcining เป็นการเผาเพื่อให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบในวัสดุบางชนิดที่สลายตัวได้เมื่อได้รับความร้อน เช่น สารประกอบคาร์บอเนต สารประกอบออกไซด์
3. Roasting เป็นการเผาให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซและของแข็ง
4. Smelting เป็นการถลุงเพื่อให้เกิดเฟสหลอมเหลวอย่างน้อย 1 เฟสในส่วนผสม
5. Refining เป็นการเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับโลหะที่ถลุงได้

การรีไซเคิลฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยวิธีโลหวิทยาความร้อน (Pyrometallurgy) ที่เป็นที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ Waelz process เนื่องจากเป็นวิธีการที่ได้รับการพัฒนาแล้ว ซึ่งมีความน่าเชื่อถือ มีประสิทธิภาพสูง และมีความยืดหยุ่น กล่าวคือสามารถปรับกระบวนการเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับกากของเสียอื่นๆ ได้ รวมไปถึงใช้พลังงานในกระบวนการค่อนข้างต่ำ ส่วนใหญ่ใช้ปริมาณถ่านโค้กน้อยกว่า 200 กิโลกรัมต่อฝุ่นเหล็ก 1,000 กิโลกรัม นอกจากนี้ยังมีการใช้ความร้อนกรรมวิธีอื่นๆ อีกโดยจำแนกตามลักษณะของเตาหลอมเป็นเกณฑ์ อาทิเช่น Rotary hearth, Multiple hearth, Shaft furnace, Plasma furnace และ Electrothermal เป็นต้น ซึ่งแต่วิธีมีชื่อเรียกต่างๆ กัน โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดของวิธีโลหวิทยาความร้อน (Pyrometallurgy) ที่มีความเป็นไปได้สูงในเชิงปฏิบัติในการรีไซเคิลฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเป็นหลัก

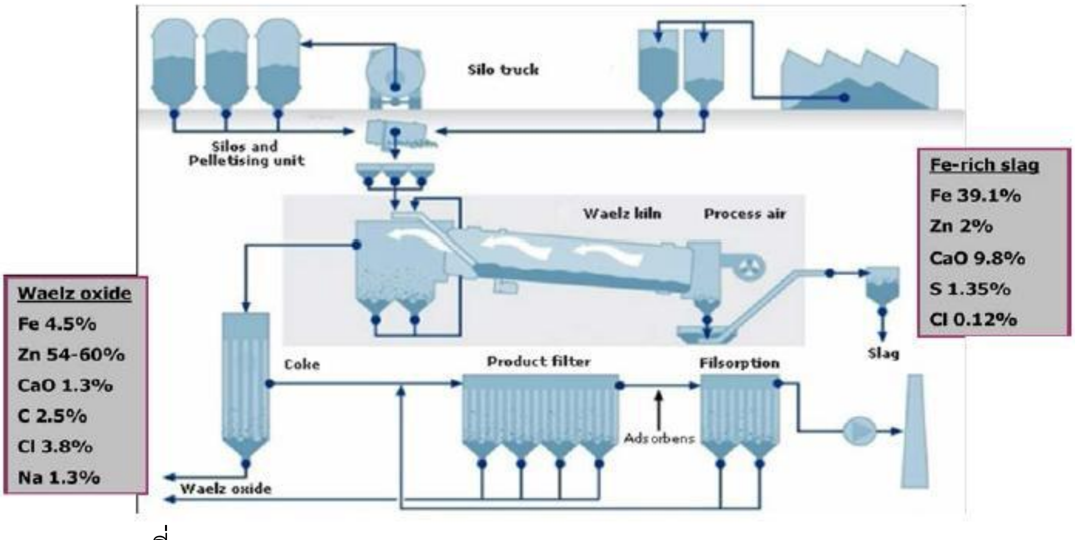
วิธีโลหวิทยาความร้อน (Pyrometallurgy) ที่น่าสนใจมีดังต่อไปนี้

1. Waelz Process

เป็นกระบวนการที่เก่าแก่และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1910 เป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้มากที่สุดในการรีไซเคิลฝุ่นเหล็กและผงเหล็ก ในปี ค.ศ. 2006 ฝุ่นเหล็กกว่าร้อยละ 80 ใช้เทคโนโลยีนี้ในการรีไซเคิลเพื่อนำสังกะสีออกมา โดยอาศัยหลักการระเหิดของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น สังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม ออกจากส่วนผสมออกไซด์ในบรรยากาศ รีดักชันโดยมีถ่านโค้กเป็นแหล่งให้ความร้อน (ตัวรีดิวซ์) ภายในเตา Rotary kiln โดยไม่เกิดการหลอมเหลวของ

ตะกรัน การรีไซเคิลฝุ่นเหล็กมีความเกี่ยวเนื่องกับอุตสาหกรรมการผลิตสังกะสีอย่างมาก ทั้งนี้ประมาณร้อยละ 60 ของสังกะสีที่ผลิตได้ในโลกใช้ในการเป็นสารป้องกันการกัดกร่อนในแผ่นเหล็กกล้าและเหล็กโครงสร้างต่างๆ เหล็กกล้าที่ผ่านการใช้งานแล้วจะถูกนำกลับมาหลอมใหม่ในเตาหลอมไฟฟ้า ระหว่างกระบวนการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาหลอมไฟฟ้านี้เองจะทำให้สังกะสีที่เคลือบผิวของเหล็กนั้นเปลี่ยนสภาพเป็นฝุ่น จากผังกระบวนการ Waelz Process ภาพที่ 2.2 ขั้นตอนที่สำคัญของ Waelz process แบ่งออกไปเป็น 3 ส่วน คือ

(1) ส่วนเตรียมวัตถุดิบ เป็นส่วนที่เตรียมผสมต่างๆ ให้เป็นเนื้อเดียวกันและมีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอก่อนที่จะส่งผ่านส่วนผสมต่อไป วัตถุดิบนี้ประกอบด้วยฝุ่นเหล็กที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบอยู่มาก จากโรงหลอมต่างๆ คลุกเคล้าผสมร่วมกับถ่านโค้กบดและสารสร้างตะกรัน (Slag former) ซึ่งอาจจะใช้ทราย (สำหรับกระบวนการแบบกรด หรือ Acidic route) หรือปูนขาว (สำหรับกระบวนการแบบเบส หรือ Basic route) อย่างทั่วถึง ใช้น้ำผสมเพื่อทำให้กลายเป็นก้อนเพื่อความสะดวกในการขนย้าย ได้เป็นก้อนฝุ่นเหล็กที่ เรียกว่า Self-Reducing Pellet (SRP) ภายหลังการอัดแล้วจะพักไว้ชั่วคราว ก่อนที่จะส่งไปยังขั้นตอนถัดไป



ภาพที่ 2.2 กระบวนการ Waelz Process (Globalsteeldust, 2012 : online)

(2) ส่วนของ Waelz line ส่วนผสมที่ผ่านการคลุกเคล้าเป็นอย่างดีแล้วจะถูกส่งผ่านไปยังเตาเผาย่างหรือ Waelz kiln ส่วนนี้ประกอบด้วยกระบวนการผสมฝุ่นเหล็กอัดก้อนกับส่วนประกอบอื่นๆ และการเผาไล่ก๊าซ โดยมีการชั่งน้ำหนักส่วนผสมอื่นๆ ป้อนไปยังเตา Rotary kiln ที่วางเอียงและหมุนด้วยความเร็ว 1 รอบต่อนาที อากาศถูกดูดเข้ามาในระบบเพื่อทำให้

ส่วนผสมแห้งและร้อนขึ้น จนเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการได้มาจากการเผาไหม้ของถ่านโค้ก ภายใต้สภาพปกติ Waelz process ไม่จำเป็นต้องอาศัยแหล่งพลังงานอื่นใดเพิ่มเติม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากส่วนนี้มี 2 ลักษณะด้วยกัน คือ Waelz slag ได้จากกระบวนการแบบ Acidic route มีปริมาณของเหล็กค่อนข้างสูงและมีโลหะหนักเจือปนอยู่บ้าง แต่ไม่เป็นอันตราย หรือถูกชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมในระดับที่ต่ำมาก (ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด) สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างถนนได้ และ Waelz oxide ประกอบด้วยออกไซด์ดิบของโลหะอื่นที่ไม่ใช่เหล็ก โดยมีออกไซด์ของสังกะสีเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 52-60 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถนำไปขายให้กับโรงงานอุตสาหกรรม อาทิ โรงถลุงสังกะสีหรือโรงงานเคมีได้โดยตรง หรือมีการปรับปรุงคุณภาพของออกไซด์ดิบด้วยกระบวนการ Dehalogenation ก่อนในส่วนล้างในขั้นตอนถัดไป ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีของ Waelz oxide ที่ได้จากกระบวนการแตกต่างกัน ตารางที่ 2.2

อากาศที่เข้าสู่ระบบเป็นอากาศ ณ อุณหภูมิห้อง แต่อากาศส่วนที่ออกจากระบบจะมีความร้อนประมาณ 700-800 องศาเซลเซียส ส่วนการปลดปล่อยก๊าซออกจากกระบวนการนี้จะมีห้องดักจับฝุ่นซึ่งลอยออกมาจากส่วนผสมวัตถุดิบที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นของสังกะสีสูง ห้องดักฝุ่นนี้จะมีการสเปรย์น้ำเพื่อลดอุณหภูมิลง และมีการหมุนเวียนอากาศผ่านช่องระบายเพื่อลดความร้อนลงทางอ้อม ร่วมด้วย ผง Waelz oxide จะถูกแยกออกมาจากก๊าซด้วยแผ่นกรอง ในขณะที่ก๊าซที่เหลือจะประกอบด้วย Dioxin จะถูกบำบัดด้วยเทคนิคการดูดซับด้วย Activated carbon หรือถ่านลิกไนต์

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก Waelz Process (R. Juergen, 2007)

composition	EAFD	Slag*)	Waelz Oxide	DL[2]) Waelz Oxide
Zn [%]	4-35	0.2-2.0	55-58	60-68
Pb [%]	2-8	0.1-2.0	7-10	9-11
Cd [%]	0.1-0.2	< 0.002	0.3-0.5	0.4-0.6
Cl [%]	1-5	0.1-0.5	4-8	0.05-0.1
F [%]	0.2-0.5	0.1-0.2	0.4-0.7	0.08—0.15
Na_2O [%]	1.5-2.0	1.2-1.6	2.0-2.5	0.1-0.2
K_2O [%]	1.0-1.5	0.7-0.9	1.5-2.0	0.1-0.2
C [%]	1-5	3-8	0.5-1.5	0.5-1.5
FeO [%]	20-45	30-50	2-5	2-5
SiO_2 [%]	3-6	25-40*	0.5-1.5	0.5-1.5
CaO [%]	3-10	4-10*	0.3-1.0	0.3-1.0
Hg [ppm]	1-5	< 0.1	3-30	4-40

หมายเหตุ: *) acidic slag [2]) double washed

(3) ส่วนล้างผลิตภัณฑ์ ใช้ในการกำจัดสารฮาโลเจน (Dehalogenation) ใน Waelz oxide ดิบบางโรงงานอาจไม่มีส่วนล้างผลิตภัณฑ์จึงไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียที่ต้องบำบัด สำหรับโรงงานที่มีส่วนล้างนี้มักออกแบบให้ล้างอย่างน้อย 2 ขั้นตอน จากนั้นทำการตกตะกอนออกไซด์ด้วยสารประกอบโซเดียมคาร์บอเนตปริมาณของฮาโลเจน เช่น คลอรีน ฟลูออรีน คงเหลือในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 0.1 และร้อยละ 0.15 ตามลำดับ ส่วนสารละลายที่เหลือจากการล้างจะมีเกลือต่างๆ อาทิเช่น โซเดียม โพแตสเซียมซัลเฟต จะถูกส่งต่อเพื่อบำบัดด้วยกรรมวิธี Evapocrystallization ต่อไป อย่างไรก็ตามพบว่า ใน Waelz oxide ที่ผ่านการล้างแล้วยังคงมีคลอไรด์เจือปนอยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง (มากกว่า 1000 ppm) ในขณะที่ Waelz oxide ที่ไม่ผ่านการ

ล้างจะมีปริมาณคลอไรด์ถึงกว่าร้อยละ 5-8 ซึ่งอาจเป็นปัญหาในกระบวนการสกัดโลหะสังกะสีต่อไป

กระบวนการ Waelz process จัดเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าใช้ได้ดีในการรีไซเคิลฝุ่นเหล็ก จัดเป็น Best Available Technology ปริมาณของสังกะสีที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลนี้จะอยู่ประมาณร้อยละ 92-96 ปริมาณของส่วนผสมต่างๆ สาหรับการรีไซเคิลฝุ่นเหล็ก 1ตัน ด้วย Waelz process เป็นดังนี้

- ถ่านโค้ก 180-350 กิโลกรัม
- ทราย (Acid slag) 100-250 กิโลกรัม
- ปูนขาว (Basic slag) 100-250 กิโลกรัม
- พลังงานไฟฟ้า 150-300 kWh

2. **Primus Technology** (Paul Wurth PRIMUS)

เป็นระบบที่ประกอบด้วย Rotary Hearth Furnace (RHF) หลายตัวประกอบกันเป็นชุด (Multiple hearth furnace, MHF) เชื่อมต่อโดยตรงกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เพื่อสกัดเอาเหล็กออกมาและมีตะกรันหลอมเหลวเป็นผลพลอยได้ เตา RHF ที่ต่อเรียงเป็นชั้น ๆ นี้ทำให้โลหะเหล็กและไม่ใช่เหล็กระเหิดออกมาจากการเผาไหม้ ที่มีถ่านโค้กเป็นแหล่งให้ความร้อนโดยไม่ก่อให้เกิดตะกรันหลอมเหลว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการมี 3 ชนิด คือ (1) เหล็กดิบ (Pig iron) และ Direct Reduced Iron (DRI) และ (2) ตะกรันที่มีปริมาณเหล็กสูง ใช้เป็น fillerสาหรับงานก่อสร้างได้ (3) สังกะสีออกไซด์ RHF ภาพที่ 2.3

ภาพที่ 2.3 Rotary hearth furnace (RHF) (R. Juergen, 2007)

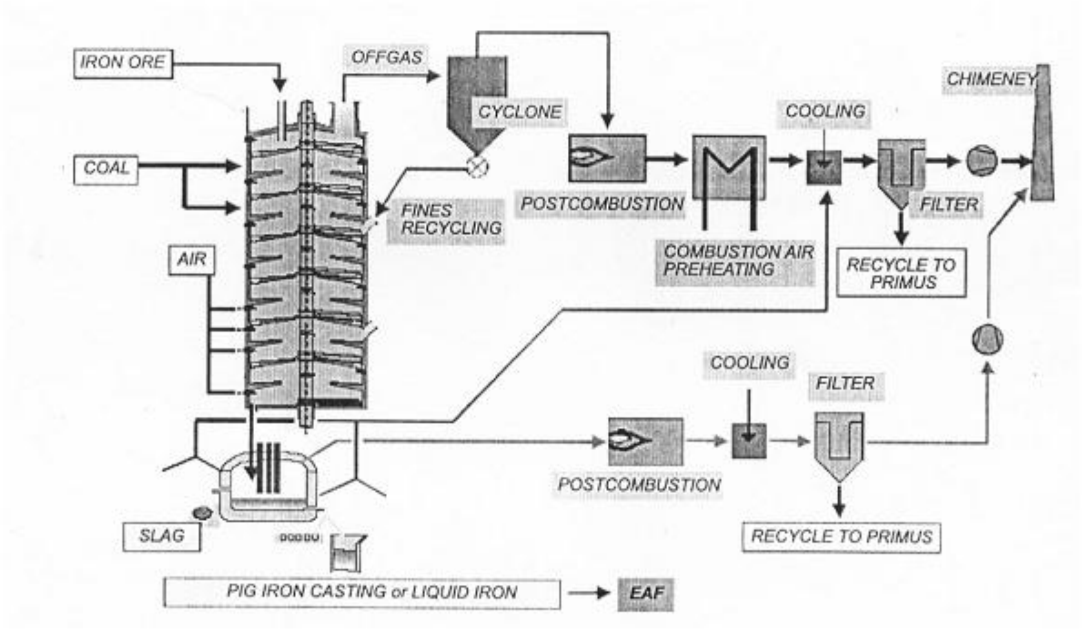
ขั้นตอนการรีไซเคิลด้วยเทคนิค PRIMUS ภาพที่ 2.4 สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

(1) ส่วนเตรียมวัตถุดิบสำหรับเข้าระบบ ส่วนนี้จะคล้ายกับ Waelz process ทำหน้าที่ผสมส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ ฝุ่นเหล็กและกากที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบมารวมกับตัวช่วยรีดิวซ์ (ถ่านโค้ก) ให้เข้ากันและเพิ่มความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ โดยไม่จำเป็นต้องอัดเป็นก้อนเช่นเดียวกับ Waelz process จากนั้นจะทำการผสมและทำให้แห้งก่อนป้อนเข้าสู่ส่วนถัดไป

(2) ส่วนของ Multiple Hearth Furnace (MHF) เป็นเตาที่แบ่งเป็นชั้นๆ เรียงซ้อนกัน แต่ละส่วนจะมีช่องที่เชื่อมต่อถึงกันและกันได้ ซึ่งวัตถุดิบจะร่วงไปตามช่องนี้สู่ชั้นที่อยู่ด้านล่าง มีทางลำเลียงวัตถุดิบไปยังแต่ละชั้น ออกไซด์ในวัตถุดิบที่อยู่ตามชั้นต่างๆ จะเกิดการรีดิวซ์ สังกะสี ตะกั่ว อัลคาไลน์และคลอรีนจะระเหิดออกไปในรูปของก๊าซและฝุ่นผงละเอียด ฝุ่นผงจะถูกดักเก็บไว้ในภาชนะรองรับในขณะที่เหล็กจะยังคงอยู่ในรูปของของแข็งหรือ Direct Reduced Iron (DRI) ณ ส่วนนี้ใช้อุณหภูมิในกระบวนการประมาณ 1,050-1,080 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเกาะตัวกันเป็นก้อนของของแข็งในเตา

(3) ส่วนของ Electric arc furnace เป็นเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ที่ด้านล่างหรือส่วนท้ายของ MHF เพื่อสกัดเอาเหล็กออกมา อยู่ในรูปของเหล็กดิบ จาก Direct Reduced Iron (DRI) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหลอมในส่วนนี้ สามารถนำกลับไปใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กได้

ใหม่และกากที่ได้ยังเปลี่ยนเป็นตะกรันที่มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี เอาไปใช้ในงานก่อสร้างได้ อุณหภูมิที่ใช้ในส่วน EAF อยู่ที่ประมาณ 1300 องศาเซลเซียส



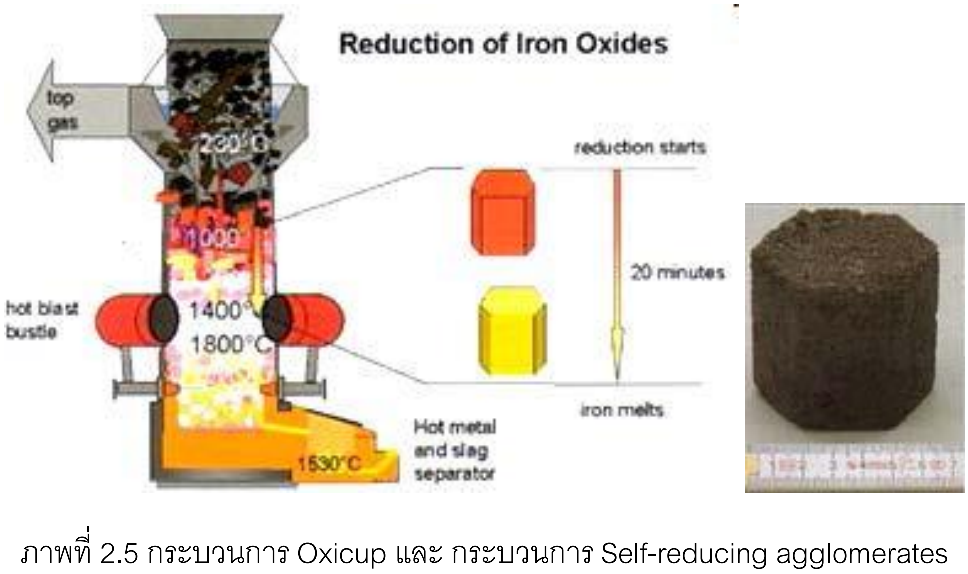
ภาพที่ 2.4 กระบวนการ Paul Wurth PRIMUS (R. Juergen, 2007)

3. OxiCup Technology

เป็นเทคโนโลยีอีกรูปแบบหนึ่งสำหรับการรีไซเคิลกากของเสียที่มีสังกะสีและหรือเหล็กออกไซด์เจือปนอยู่ในปริมาณมากได้ เริ่มมีการคิดค้นและพัฒนาตั้งแต่ปี 1980 เป็นต้นมา เตาหลอมที่ใช้เป็น Shaft furnace ถลุงได้ทั้งโลหะที่เป็นเหล็กและไม่ใช่เหล็กออกมาด้วยการใช้ถ่านโค้กก้อน หลักการทำงานของเตา Shaft furnace คล้ายกับเตาพ่นลม (Blast furnace) ใช้ในการรีไซเคิลกากได้หลายชนิด ส่วนผสมที่ใส่ลงในเตาหลอมประกอบด้วยเศษเหล็กและกากอื่นๆ ที่มีเหล็กเจือปนประมาณร้อยละ 60 ขึ้นไป รวมกับถ่านโค้กประมาณร้อยละ 13 เป็นแหล่งพลังงานรวมไปถึงโลหะผสมเหล็ก-ซิลิคอน (FeSi) ร้อยละ 3.2 เพื่อปรับองค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก วัตถุดิบที่มีเหล็กออกไซด์เจือปนอยู่ในปริมาณมากไม่ว่าจะเป็นเศษเหล็ก แร่เหล็ก ผงเหล็กและอื่นๆ จะถูกผสมกับคาร์บอนและเตรียมให้อยู่ในรูปของวัตถุดิบอัดก้อนหรือ Self-reducing agglomerates เช่นเดียวกับเทคนิค Waelz process เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เอง (Self-reducing reduction) แล้วจึงป้อนเข้าสู่เตาหลอม Cupola การอัดก้อนกากวัตถุดิบสามารถทำได้ด้วยความชื้น ในบางกรณีจะใช้ตัวเชื่อมประสานอื่นๆ ด้วยเช่น ซีเมนต์ โซเดียมซิลิเกตหรือกากน้ำ

ตาล (Molasse) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของก้อนที่อัดได้ สำหรับการอัดก้อนเป็น Self-reducing agglomerates จำเป็นต้องมีการผสมคาร์บอนลงไปด้วยนี้เรียกอีกอย่างว่า C-brick อัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO_2/CO) และอุณหภูมิซึ่งมักเกิดขึ้นอยู่ในช่วง 1000-1400 องศาเซลเซียส

เตาหลอมที่ใช้ในเทคโนโลยี OxiCup แบ่งออกได้เป็นเตา ตอนบน ตอนกลางและตอนล่าง ดังภาพที่ 2.5 ตอนบนของเตาจะเป็นส่วนที่วัตถุดิบถูกป้อนเข้าสู่เตาทางด้านบน ส่วนกลางของเตาเป็นส่วนที่อุ่นวัตถุดิบที่เข้ามาจากด้านบนและหลอมวัตถุดิบ ตอนล่างของเตาจะเต็มไปด้วยถ่านโค้กซึ่งจะมีการพ่นเปลวไฟและอากาศผ่านถ่านโค้กเหล่านั้น ถ่านโค้กจะกลายเป็นก๊าซผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นไปถึง 1,900-2,500 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมิดังกล่าววัตถุดิบที่สัมผัสกับถ่านโค้กเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นละอองอย่างรวดเร็ว ก๊าซร้อนที่เกิดขึ้นจากถ่านโค้กเป็นปัจจัยสำคัญในการรีดิวซ์และหลอมเหล็กใน Self-reducing agglomerates อีกทั้งยังทำหน้าที่อุ่นวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่เตาจากตอนบนอีกด้วย ตอนล่างของเตายังเป็นส่วนที่เก็บกักน้ำเหล็กและตะกรันหลอมเหลวไว้ ซึ่งจะแตกต่างจากเตา Blast furnace ตรงที่ด้านล่างนี้สามารถกักเก็บส่วนที่หลอมเหลวแล้วไว้ได้หรืออาจส่งของเหลวนั้นผ่านไปยังภาชนะรองรับอื่นต่อไป



ภาพที่ 2.5 กระบวนการ Oxicup และ กระบวนการ Self-reducing agglomerates

(Briket, 2012 : online)

นอกจากนี้เตายังเชื่อมต่อกับระบบการกำจัดและบำบัดก๊าซที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการ OxiCup ประกอบด้วย การแยกอนุภาคขนาดใหญ่ (Coarse particle separator) ห้องเผา (Combustion chamber) ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) และ Integrated shock bundle, Hot blast recuperator bundle, Cooler bundle ภาชนะดักฝุ่นและปล่องระบาย ส่วนแรกทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของอากาศและให้ความร้อนแก่วัตถุดิบหรือ Pre-heating ประกอบด้วย Hot blast bundle, Gas cooler และ Heat exchanger โดยที่ Shock bundle จะเป็นตัวลดอุณหภูมิของอากาศลงประมาณ 100 องศาเซลเซียส และเป็นส่วนที่ปรับอุณหภูมิของอากาศให้ร้อนคงที่ก่อนที่เข้าสู่ Hot blast recuperator bundle ต่อไป

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการจะเป็นเหล็กในรูปของ HBI (Hot Briquette Iron) และ DRI (Direct Reduced Iron) เหล็กปิก (Pig iron) และ Slag อันเกิดจากการสันดาปอย่างไม่สมบูรณ์ของถ่านโค้ก อนึ่ง กระบวนการ OxiCup ไม่เน้นการนำสังกะสีกลับมาใช้ใหม่

พลังงานที่ใช้ในการรีไซเคิลฝุ่นเหล็ก 1 ตัน ด้วยเทคนิค OxiCup นี้ต้องการ

- ปริมาตรก๊าซร้อน 1100-1200 ลูกบาศก์เมตร (stp)
- ออกซิเจน 150-200 ลูกบาศก์เมตร (stp)
- ถ่านโค้ก 200-300 กิโลกรัม

4. กระบวนการโลหวิทยาความร้อนอื่น ๆ ที่น่าสนใจ

1. ZincOx

เป็นกระบวนการเพื่อดึงสังกะสีที่อยู่ในวัตถุดิบออกมาด้วยตัวทำละลายแอมโมเนีย สังกะสีจะถูกทำให้ตกตะกอนได้เป็นซิงค์คาร์บอเนตก่อนที่จะนำไปเผาย่างเพื่อให้ได้ซิงค์ออกไซด์ ขั้นตอนของกรรมวิธี ZincOx จะเริ่มจากการผสมฝุ่นเหล็กกับถ่านหินบดและทำให้เป็นก้อนหรือ Briquette จากนั้นป้อนฝุ่นเหล็กอัดก้อนเข้าสู่เตาเผา Rotary hearth ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 15 นาที สังกะสีและตะกั่วจะระเหิดออกไปกับก๊าซร้อนไปยังส่วนดักจับฝุ่นอยู่ในรูปของออกไซด์เรียกว่า Halide Zinc Oxide (HZO) ซึ่งประกอบด้วยสังกะสีร้อยละ 62 ตะกั่วร้อยละ 4 และเฮไลด์ ได้แก่ คลอรีนและฟลูออรีนอีกประมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก สามารถกำจัดเฮไลด์ใน HZO ออกไปได้ด้วยการล้างสังกะสีความบริสุทธิ์สูงสามารถถลุงเพื่อแยกสังกะสีมาใช้ได้ด้วยกระบวนการปกติ ก้อน Briquette ที่เหลือมีความพรุนตัวสูงจะถูกอัดเป็น

ก้อนที่ใหญ่และมีความหนาแน่นมากขึ้นเรียกว่า Zinc hot briquette iron (ZHBI) ซึ่งสามารถป้อนเข้าสู่เตาเพื่อรีดิวซ์ได้เป็นเหล็กปิกต่อไป จุดเด่นของเทคโนโลยี ZincOx มีหลายประการได้แก่ มีผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหลายชนิดและพร้อมนำไปใช้งานต่อ เช่น ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นของสังกะสีสูง (HZO) ออกไซด์ที่มีเหล็กสูง (ZHBI) นำไปถลุงได้เหล็กปิก กากที่เหลือสามารถใช้เป็นมวลรวมหยาบ(Aggregate)ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ และไม่เกิดของเสียจำพวกของเสียอันตรายปลดปล่อย เช่น Dioxin ออกสู่สิ่งแวดล้อม

2. Fastmet

กระบวนการนี้เริ่มจากการนำวัตถุดิบที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ (Fe-bearing waste) เช่น BF slag, BF dust, BOF dust, Mill scale มาผสมกับถ่านหิน ปูนขาวหรือเบนโตไนท์ใช้เป็นตัวเชื่อมประสาน ทำให้เป็นเม็ด (Pellet) แล้วส่งไปยังเตา Rotary hearth furnace ใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายไม่ว่าจะเป็นก๊าซธรรมชาติ LPG ถ่านโค้ก น้ำมัน หรือวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบก็ได้ อุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 1000 องศาเซลเซียสและระยะเวลาที่ใช้ค่อนข้างสั้นประมาณ 6-12 นาทีเท่านั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ Direct Reduced Iron (DRI) ซึ่งจะนำมาหลอมเป็นเหล็กปิกด้วยกรรมวิธีแบบต่างๆ เช่น ด้วยเตา Submerged arc furnace เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ Crude ZnO ซึ่งสามารถนำมารีไซเคิลด้วยกระบวนการอื่นๆ ต่อไป

3. Ausmelt

เป็นเทคโนโลยีที่เดิมใช้ในการผลิตโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น ตะกั่ว และภายหลังนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมเหล็ก กระบวนการนี้ใช้การพ่นถ่านหินบดละเอียดและอากาศที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงผ่านท่อเข้าไปยังอ่างตะกรันหลอมเหลว วัตถุดิบจำพวกฝุ่นเหล็ก ถ่านหินและฟลักซ์ จะถูกลำเลียงไปเพื่อหลอมให้เป็นของเหลว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ ได้แก่ ตะกั่วและออกไซด์สังกะสี

4. Plasma furnace

ใช้สำหรับกำจัดขยะพิษและประยุกต์ใช้กับการรีไซเคิลโลหะ เริ่มจากนำฝุ่นเหล็กและกากของเสียจากกระบวนการผลิตเหล็กมาผสมกับน้ำและสารสร้างตะกรันและทำให้แห้ง พ่นส่วนผสมใน Plasma furnace ได้ส่วนผสมหลอมเหลวแยกส่วนโลหะหลอมเหลวและตะกรันออกจากกัน โลหะหลอมเหลวถูกปล่อยออกมาด้านล่างของเตา ส่วนที่เป็นตะกรันมีสังกะสีอยู่มาก แต่

มักพบปัญหาเรื่องสิ่งเจือปนและรูปแบบของสังกะสี ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปของซิงค์คลอไรด์หรือ Hard zinc ซึ่งยากต่อการนำไปใช้งาน

5. **การสกัดสังกะสีในฝุ่นเหล็กด้วยปูนขาวเป็นตัวรีดิวซ์แทนถ่านโค้ก**

การสกัดสังกะสีในฝุ่นเหล็กด้วยปูนขาวมีหลักการคล้ายกับ Waels process แต่ใช้ปูนขาว(Lime, CaO) เป็นตัววีดิวซ์แทนถ่านโค้ก พบว่าปูนขาวสามารถใช้แทนถ่านโค้กได้เป็นอย่างดีและทำให้ปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิต่ำลงและใช้ระยะเวลาสั้นกว่า อีกทั้งยังไม่เกิดเฮไลด์เจือปนในผลิตภัณฑ์อีกด้วย เมื่อผสมปูนขาวกับฝุ่นเหล็กและเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1000-1100 องศาเซลเซียสจะได้สังกะสีออกไซด์และสารประกอบแคลเซียมเฟอร์ไรท์ ($CaFe_2O_5$) ซึ่งสามารถแยกเอาสารประกอบทั้งสองชนิดออกจากกันด้วยแม่เหล็ก เผารีดิวซ์หรือใช้กระบวนการ Hydrometallurgy โดยไม่ต้องล้างเพื่อกำจัดคลอรีนและฟลูออรีน สังกะสีที่ได้มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังอยู่ระหว่างการศึกษาค้นคว้าวิจัยและยังไม่ถูกพัฒนาเป็นระดับอุตสาหกรรม

ข้อจำกัดของวิธีโลหวิทยาความร้อน (Pyrometallurgy)

- กระบวนการเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Carbothermic reaction) เพื่อรีดิวซ์โลหะออกมา
- เกิดที่อุณหภูมิสูง ใช้พลังงานสูงและเชื้อเพลิงในปริมาณมาก
- ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์สู่บรรยากาศ
- ต้องการความเข้มข้นของสังกะสีค่อนข้างสูง (กรณีต้องการประสิทธิภาพการสกัดสูง)

2.2.2 **วิธีโลหวิทยาสารละลาย** (Hydrometallurgy) ประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ ดังต่อไปนี้

1. Washing เป็นการล้างกำจัดสิ่งเจือปน ได้แก่ คลอรีนและฟลูออรีนออกให้มากที่สุด
2. Leaching เป็นการละลายโลหะที่ต้องการสกัดออกมาจากฝุ่นเหล็กให้อยู่ในสารละลายด้วยตัวทำละลายกรดหรือด่าง ขั้นตอนนี้รวมไปถึงการกำจัดโลหะหนักด้วย

3. Solution concentration และ Purification เป็นการทำให้สารละลายที่มีโลหะที่ต้องการสกัดละลายอยู่เข้มข้นสูงขึ้นหรือทำให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น

4. Metal recovery การสกัดโลหะออกจากสารละลาย ส่วนมากจะใช้ไฟฟ้าเข้าช่วยหรือ Electrolysis จ่ายกระแสไฟฟ้าจากขั้วแอโนดผ่านสารละลายเพื่อให้โลหะที่ต้องการมาเกาะขั้วแคโทด

หากพิจารณาองค์ประกอบทางแร่ของฝุ่นเหล็กแล้ว พบว่าฝุ่นเหล็กมีทั้งเหล็ก สังกะสี เหล็กจะอยู่ในรูปของฮีมาไทต์ (Hematite, Fe_2O_3) แมกนีไทต์ (Magnetite, Fe_3O_4) และแฟรงลิไนต์ (Franklinite, $ZnO.Fe_2O_3$) หรือซิงค์เฟอร์ไรท์ ในขณะที่สังกะสีจะอยู่ในรูปของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และซิงค์เฟอร์ไรท์ ($ZnFe_2O_4$) นอกจากนี้ อาจพบสารประกอบเชิงซ้อนอื่นๆ เช่น $(ZnMnFe)_2O_4$ ซึ่งสารประกอบซิงค์เฟอร์ไรต์ ($ZnO.Fe_2O_3$) เป็นสารประกอบที่มีเสถียรภาพสูงไม่สามารถทำให้แตกตัวได้ง่ายด้วยตัวทำละลายทั่วไป เพื่อให้ได้สังกะสีความบริสุทธิ์สูงตกตะกอนลงมานั้นคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นกับความเข้มข้นของตัวทำละลาย กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแยก ความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการละลายด้วย กระบวนการละลายต้องใช้ตัวทำละลายซึ่ง อาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่

(1) กลุ่มที่เป็นกรด (เช่น H_2SO_4, HCl และ กรดอะซิติกเจือจาง) กลุ่มตัวทำละลายที่เป็นกรดใช้กันทั่วไปและมีราคาถูก สังกะสีสามารถนำออกมาจากสารละลาย H_2SO_4 ได้ด้วยกระบวนการ Electrowinning แต่จะพบปัญหาเรื่องความสามารถในการละลายของไอออนของเหล็กจากสังกะสี

(2) กลุ่มที่เป็นด่าง (เช่น NH_4Cl และ NaOH) ปัญหาการละลายของไอออนเหล็กในตัวทำละลายที่เป็นด่างไม่เกิดขึ้นแต่ตัวทำละลายดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม แม้ว่าเทคโนโลยีนี้จะได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องแต่กลับมีเพียงบางกระบวนการเท่านั้นที่ใช้ได้ทางการค้า ทั้งนี้เนื่องจากสิ่งเจือปนในฝุ่นเหล็กและจำเป็นต้องมีกระบวนการล้างกากที่เหลือจากกระบวนการ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง

วิธีการโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้ในการบำบัดฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เริ่มแรกใช้กรดซัลฟิวริก แต่พบปัญหาเนื่องจากสัดส่วนระหว่างเหล็กกับสังกะสี (Fe/Zn ratio) มีค่าสูง และมีปริมาณของฮาโลเจนมาก ทำให้ไม่สามารถนำสังกะสีออกมาในรูปของซิงค์ซัลเฟต ระหว่างการทำ Electrolysis ได้ ต่อมาจึงมีการศึกษาใช้ตัวทำ

ละลายอัลคาไลน์ พบว่าสามารถละลายสังกะสีออกมาได้ แต่ไม่ละลายเหล็กออกมาด้วย อย่างไรก็ตาม การเก็บกลับคืนสังกะสีหลังจากการละลายทำได้ยากเนื่องจากในสารละลายที่ได้มีคลอรีนเจือปนอยู่มาก อาจจำเป็นต้องมีกระบวนการทางความร้อนร่วมด้วย แม้ว่าจะมีการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มที่เป็นด่าง และกระบวนการ Electrowining ได้ผล แต่ก็ยังคงประสบปัญหาเรื่องค่าใช้จ่าย โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวทำละลายที่เป็นกรด สามารถใช้สารละลายที่ไม่ต้องมีความเข้มข้นมากนักเมื่อเทียบกับตัวทำละลายที่เป็นด่าง อีกทั้งยังสามารถควบคุมสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่า เช่น การใช้ตัวทำละลายกรดอะซิติกเจือจาง เริ่มจากการละลายหินปูนให้เป็นแคลเซียมอะซิเตตแล้วตามด้วยการล้างด้วยแอมโมเนีย เพื่อดึงสังกะสีออกมาจากกากตะกอน จากนั้นจึงทำการตกตะกอนสารละลายด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นซิงค์คาร์บอเนต ($ZnCO_3$) ส่วนสารละลายแคลเซียมอะซิเตตจะนำมาทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกได้เป็นยิปซัมและกรดอะซิติก

เทคนิคการรีไซเคิลฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยวิธีโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) มีหลายเทคโนโลยีด้วยกัน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปเทคนิคการรีไซเคิลฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยวิธีโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) ตามชนิดของตัวทำละลาย

ตัวทำละลาย	ชื่อกระบวนการ	สถานภาพปัจจุบัน
Ammonium-based (e.g. NH4Cl)	Ezinex HST	Stopped plant/terminated Pilot plant only
Sulphuric acid (H_2SO_4)	Recupac HydroMet Zincex	Pilot plant only Co-treatment with other raw materials Commercial production in Japan, Bilbao Spain(1976), Lisbon Portugal(1980), Barcelona Spain (1997)
Chloride-based (e.g. $FeCl_3$-HCl, HCl)	Terra Gaia Cashman	
Caustic soda (i.e. NaOH)	Zimaval	Stopped plant/terminated
Alkali leaching	Amax (Cebedau process)	

(กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554 : ออนไลน์)

วิธีโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) ที่น่าสนใจมีดังต่อไปนี้

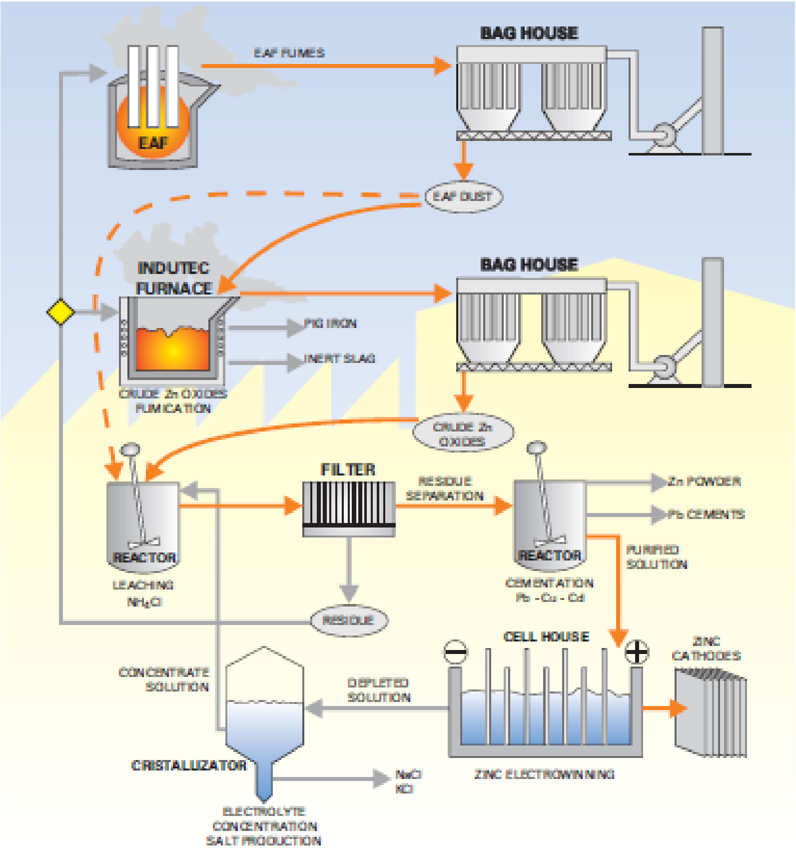
1. Ezinex

เป็นกระบวนการลูกผสมระหว่าง วิธีโลหวิทยาความร้อน (Pyrometallurgy) และวิธีโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) แต่ Ezinex จะเน้นจุดเด่นไปที่ วิธีโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) คือ การละลายด้วยตัวทำละลายและการแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้ามากกว่า เทคนิคนี้อาศัยตัวทำละละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เพื่อละลายสังกะสีในฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เหมาะกับฝุ่นที่มีความเข้มข้นของเหล็กต่ำ สำหรับกระบวนการนี้ฝุ่นที่จะทำการรีไซเคิล อาจถูกนำไปละลายในสารละลาย NH_4Cl หรือถลุงในเตาเหนี่ยวนำ (INDUTEC induction

furnace) เพื่อสกัดให้ได้สังกะสีออกไซด์ดิบ เหล็กดิบและตะกรัน ในกรณีที่นำเอาฝุ่นละลายในสารละลาย NH_4Cl ส่วนที่ไม่ละลายได้แก่เหล็กออกไซด์และซิงค์เฟอร์ไรท์จะถูกแยกออกมาจากสารละลายก่อนแล้วนำไปใส่ลงในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เพื่อนำเหล็กกลับคืนและสร้างละอองฝุ่นของสังกะสี อย่างไรก็ตามในสารละลายอาจมีโลหะหนักบางชนิด เช่น ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง ละลายออกมาด้วย ซึ่งจะทำให้ความบริสุทธิ์ของสังกะสีในสารละลายลดลง การทำให้สารละลายสังกะสีมีความบริสุทธิ์มากขึ้นเรียกว่า Cementation คือ การใส่ผงสังกะสีลงในสารละลายเพราะทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักดังกล่าวโดยเฉพาะอย่างยิ่งตะกั่วแยกตัวออกมาในรูปของโลหะ จากนั้นจะคัดแยกเอาตะกอนที่ตกออกมาด้วยการกรองเพื่อนำไปรีไซเคิลนำตะกั่วออกไปใช้ต่อไป ส่วนสารละลายที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นภายหลังการกำจัดตะกั่วออกไปแล้วจะเป็นสารละลายอิเลคโทรไลต์และป้อนเข้าสู่ Ezinex cell ประกอบด้วยขั้วแคโทด ทำจากโลหะไททาเนียมและแอโนดที่ทำจากกราไฟต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

ปฏิกิริยาที่แคโทด	$Zn^{2+} + 2^{e-}$	$\rightarrow$	Zn
ปฏิกิริยาที่แอโนด	$2Cl^{-}$	$\rightarrow$	$Cl_2 + 2^{e-}$
	$Cl_2 + 2/3NH_3$	$\rightarrow$	$1/3N_2 + 2HCl$

สารละลายที่ทำการสกัดเอาสังกะสีออกแล้วจะส่งไปยังบ่อพัก สารละลายดังกล่าวประกอบด้วย โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ จะถูกสกัดออกมาใช้งานต่อไป กระบวนการ Ezinex ไม่ก่อให้เกิดของเสียปลดปล่อยออกจากระบบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ Ezinex ดังภาพที่ 2.6 จะมีหลายตัวได้แก่ สังกะสี ตะกั่ว สารประกอบอัลคาไลคลอไรด์สำหรับงานหลอมอะลูมิเนียมรีไซเคิล เหล็กปิก (Iron pig) ซึ่งนำกลับเข้าเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าได้ใหม่ และตะกรันอัดเม็ดเพื่อใช้เป็นทรายกัดผิว (Blasting) หรือ Filler สำหรับสร้างถนน

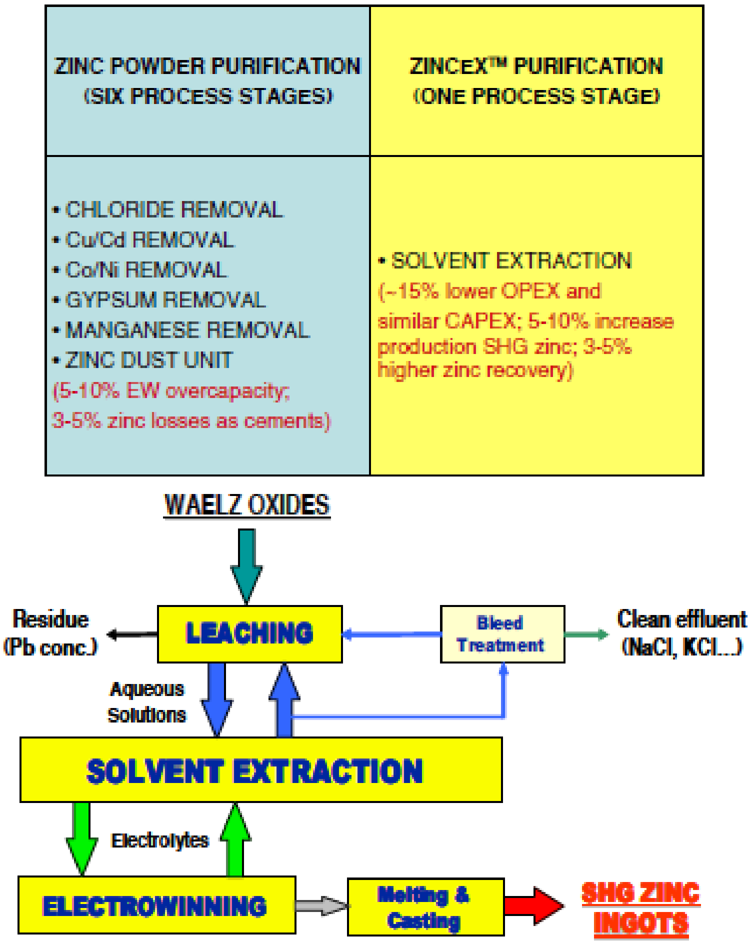


ภาพที่ 2.6 กระบวนการ Ezinex (Engitec Tecnnologies S.P.A.)

2. ZincEx

เทคโนโลยี ZincEx เป็นกระบวนการที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยมีลักษณะเด่นคือเพื่อลดขั้นตอนการล้างเอาโลหะหนักและสิ่งเจือปนที่ละลายอยู่ในสารละลายร่วมกับสังกะสีออกมาด้วยวิธี Solvent Extraction (SX) สิ่งเจือปนที่ยังคงตกค้างอยู่ในสารละลายจะเป็นอุปสรรคต่อการแยกด้วยไฟฟ้า เช่น คลอรีนกัดกร่อนขั้วแอโนดหรือมีการปนเปื้อนของตะกั่วหรือก๊าซฮาโลเจนในขั้นตอนการแยกด้วยไฟฟ้าซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติการได้ ดังนั้น สังกะสีไม่ว่าจะได้จากกากที่มีสังกะสีออกไซด์อยู่มากหรือในรูปของ Waelz oxide จึงจำเป็นต้องผ่านการล้างก่อนเสมอหากต้องนำมาเข้ากระบวนการโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) อย่างไรก็ดีการล้างเอาสิ่งเจือปนต่างๆ เหล่านี้ออกกลับเป็นจุดอ่อนที่สำคัญของกระบวนการ กล่าวคือต้องใช้ปริมาณของน้ำในการกำจัดสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก ทำให้เกิดขั้นตอนที่ซับซ้อนและสูญเสียสังกะสีออกไปกับสิ่งเจือปนด้วย ต้องเลือกใช้สารช่วยเร่งการตกตะกอนที่เหมาะสม นอกจากนี้ การล้างอาจส่งผลต่อปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการสกัดอีกด้วย ดังภาพที่ 2.7 แสดงแผนผังและการเปรียบเทียบขั้นตอน

การล้างด้วยวิธีการปกติกับการล้างด้วยเทคนิค Solvent extraction จะเห็นได้ว่าขั้นตอนการทำให้ออกไซด์สังกะสีบริสุทธิ์สั้นลงมาก อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องใช้สังกะสีสำหรับขั้นตอน Cementation (ที่ปรากฏในเทคโนโลยี Ezinex) และลดการสูญเสียสังกะสีระหว่างการทำ Electrolysis ได้ จากแผนผังจะเห็นได้ว่ากระบวนการเริ่มต้นจากวัตถุดิบที่มีสังกะสีเจือปน จากนั้นทำการละลายวัตถุดิบเหล่านั้นด้วยตัวทำละลายกรดและปรับสภาพกรดด่างของสารละลายเพื่อกำจัดเหล็กและซิลิกา ขั้นตอนการทำ Solvent extraction จะใช้ตัวทำละลายที่เลือกสกัดเอาแต่สังกะสี ได้ออกมาเป็นสารละลายซิงค์ซัลเฟตที่มีความบริสุทธิ์สูง (Ultra-pure zinc sulphate) เพื่อการแยกด้วยไฟฟ้าต่อไป ข้อดีอีกประการของกระบวนการนี้คือสามารถนำโลหะหนักอื่นๆ เช่น ตะกั่ว เงิน กลับมาได้อีกด้วย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเทคโนโลยีนี้คือ โลหะสังกะสีความบริสุทธิ์สูง ได้จากการ Electrolysis ซิงค์ซัลเฟตความบริสุทธิ์สูงได้จากการตกผลึก ซิงค์ออกไซด์ได้จากการตกตะกอนและการเผาแคลไซน์ (Calcinaion) และเกลือต่างๆ



ภาพที่ 2.7 กระบวนการ ZincEx (C.Frias, 2009)

ข้อจำกัดของวิธีโลหวิทยาสารละลายการ (Hydrometallurgy)

- ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลาย
- คุณภาพของวัตถุดิบตั้งต้น (ตัวอย่างฝุ่น)
- ต้องใช้ปริมาณตัวทำละลายมาก
- ซิงค์เฟอร์ไรท์ ($ZnFe_2O_4$) มีความสามารถในการละลายต่ำ
- วิธีการกำจัดสิ่งปลอมปนที่มากับสารละลายซับซ้อน
- มักละลายได้แต่สังกะสี ไม่สามารถเอาเหล็กออกมาได้
- หากมีการอัดความดัน กระบวนการจะยิ่งซับซ้อน
- ค่าใช้จ่ายของกระบวนการสูง

2.3 ธรรมชาติของแร่สังกะสี

2.3.1 สมบัติทั่วไป

สังกะสี (Zinc) ภาพที่ 2.8 เป็นธาตุแรกของหมู่ II B จัดเป็นธาตุโลหะ มีเลขอะตอม 30 น้ำหนักอะตอม 65.37 amu จุดหลอมเหลว 419.5 องศาเซลเซียส จุดเดือด 907 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 7.133 g/cc ที่ 25 องศาเซลเซียส เลขออกซิเดชันสามัญ +2

ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างสังกะสี

2.3.2 การเกิด

สังกะสีเป็นแร่โลหะชนิดหนึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีคุณประโยชน์และสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตทั้ง คน สัตว์และพืช แร่สังกะสี (Zinc Mineral) ประกอบด้วยธาตุต่างๆ ที่มีธาตุสังกะสีเป็นหลัก เมื่อนำแร่สังกะสีมาถลุงจะได้โลหะสังกะสีที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย จึงนับเป็นแร่ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง

2.3.3 แหล่งแร่

แร่สังกะสีที่พบในแหล่งต่างๆ ของโลกจำแนกตามสภาพการเกิดทางธรณีวิทยาได้ 2 ประเภท คือ

1. แร่สังกะสีปฐมภูมิ (Primary Zinc) หมายถึง แร่สังกะสีที่เกิดขึ้น มาและยังไม่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติ ได้แก่ แร่สฟาเลอไรต์ (Sphalerite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีซัลไฟด์ (Sulphide) มักพบเป็นส่วนใหญ่ในแหล่งต่างๆของโลก นอกจากนียังมีแร่สังกะสีซิงค์ไซต์ (Zincite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีออกไซด์ (Oxide) พบแหล่งใหญ่ในรัฐนิวเจอร์ซี สหรัฐอเมริกา

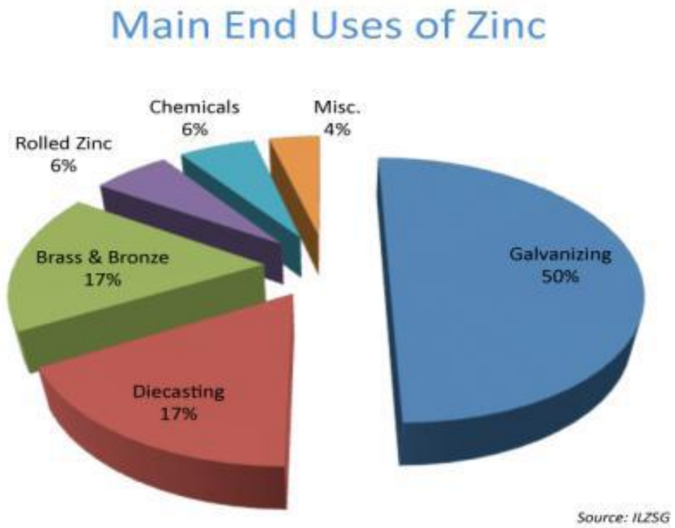
2. แร่สังกะสีทุติยภูมิ (Secondary Zinc) หมายถึง แร่สังกะสีที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติแล้ว ได้แก่ แร่เฮมิมอร์ไฟต์ (Hemimorphite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีซิลิเกต (Silicate), แร่สมิทซอไนต์ (Smithsonite) และแร่ไฮโดรซิงไคต์ (Hydrozincite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีคาร์บอเนต (Carbonate) แร่สังกะสีที่พบในประเทศไทยที่แหล่งผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ส่วนใหญ่เป็นแร่สังกะสี ซิลิเกตและบางส่วนเป็นแร่สังกะสีคาร์บอเนต

2.3.4 การค้นพบ

มนุษย์รู้จักนำสังกะสีมาใช้ประโยชน์เป็นเวลานานมาแล้ว แต่เพิ่งจะรู้จักสังกะสีที่อยู่ในรูปของโลหะหรือธาตุอิสระ เมื่อเปรียบเทียบกับทองแดงและตะกั่ว ในสมัยอดีตจะใช้สังกะสีที่อยู่ในรูปของโลหะเจือ เริ่มมีการถลุงและสกัดสังกะสีที่ไม่บริสุทธิ์ในประเทศจีน และอินเดีย ประมาณปี ค.ศ. 1000 และนำสังกะสีที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ (slab zinc or spelter) ไปที่ยุโรปในศตวรรษที่ 17 ในขณะนั้นยังไม่มีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการโดยมีชื่อเรียกที่แตกต่างๆกัน เช่น Indian tin, calamine, tutanege หรือ spiauter ในปี ค.ศ. 1697 Lohneyes ได้เรียกชื่อธาตุนี้ว่า “Zink” ต่อมากลายเป็น Zinc

2.4 การใช้ประโยชน์

2.4.1 การใช้ประโยชน์ของสังกะสีต่อภาคอุตสาหกรรม



ภาพที่ 2.9 สัดส่วนการใช้งานของแร่สังกะสี (Ilzsg, 2011 : online)

1. **ชุบเคลือบเหล็ก**

การใช้งานสังกะสีที่เด่นชัดที่สุดคือ ชุบเคลือบเหล็กป้องกันการผุกร่อน ชั้นสังกะสีจะป้องกันไม่ให้เหล็กผุกร่อนเป็นสนิมได้อย่างดีเยี่ยม เนื่องจากสังกะสีจะทำหน้าที่ป้องกันเหล็กใน 2 ทาง คือ เป็นชั้นป้องกันไม่ให้เหล็กผุกร่อน (Barrier Protection) และผุกร่อนแทนเหล็ก (Cathodic Protection)

สังกะสีมีอัตราการผุกร่อนที่ช้ามาก ดังนั้นจึงป้องกันเหล็กไม่ให้เจอกับสภาพแวดล้อมที่จะทำให้เกิดสนิมได้เป็นเวลานาน จากการศึกษาของ ASTM แห่งสหรัฐอเมริกา พบว่าในเขตเมืองอัตราส่วนการผุกร่อนของสังกะสีเมื่อเทียบกับเหล็กเท่ากับ 1:20 และจะเท่ากับ 1:80 ในบริเวณชายทะเลหรือเขตอุตสาหกรรม ดังนั้นการชุบเคลือบเหล็กด้วยสังกะสีจึงเหมือนกับการสร้างเกราะป้องกันให้กับเหล็กนั่นเอง

เหล็กชุบสังกะสีเหมาะกับงานก่อสร้างสาธารณูปโภค สามารถป้องกันเหล็กในระยะยาว โดยไม่ต้องมีการซ่อมบำรุง ได้แก่ ราวกั้น ขอบทาง สะพาน เสาไฟฟ้า สถานีส่งไฟฟ้า ท่อเหล็กชุบสังกะสี แผ่นเหล็กชุบสังกะสี (มุงหลังคา ทาผนังอาคาร รั้ว บ้าน) ลวดเหล็กและตะปู ดังภาพที่ 2.10 เป็นต้น

ภาพที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของสังกะสีชุบเคลือบเหล็ก (Zincinfothailand, 2011 : online)

2. โลหะสังกะสีผสมใช้ฉีดชิ้นงาน

คุณสมบัติที่โดดเด่นของโลหะสังกะสีคือ การป้องกันเหล็กไม่ให้เป็นสนิม แต่คุณสมบัตินี้เพียงประการเดียวอาจจะไม่เพียงพอต่อความต้องการของภาคอุตสาหกรรมบางประเภท ดังนั้น จึงได้มีการนำโลหะอื่นมาผสมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้กับโลหะสังกะสี ซึ่งได้แก่ อลูมิเนียม แมกนีเซียมและทองแดง เป็นต้น โดยเรียกโลหะประเภทนี้ว่าโลหะสังกะสีผสม หรือ Zinc Alloys และเนื่องจากโลหะสังกะสีผสมมักนำไปใช้ในงานฉีดขึ้นรูป ดังภาพที่ 2.11 จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Zinc Diecasting Alloys

ภาพที่ 2.11 แสดงตัวอย่างสังกะสีที่ใช้ฉีดชิ้นงาน (Zincinfothailand, 2011 : online)

3. เคมีภัณฑ์

สังกะสีออกไซด์ เป็นเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ซึ่งผ่านกระบวนการแปรสภาพมาจากโลหะสังกะสีแท่ง นำไปใช้ในการผลิตถ่านอัลคาไลน์และแบตเตอรี่ขนาดเล็ก อุตสาหกรรมผลิตสี ยางรถยนต์ เซรามิก เวชภัณฑ์และอาหารสัตว์ ดังภาพที่ 2.12 เป็นต้น

ภาพที่ 2.12 แสดงตัวอย่างเคมีภัณฑ์จากสังกะสี (Zincinfothailand, 2011 : online)

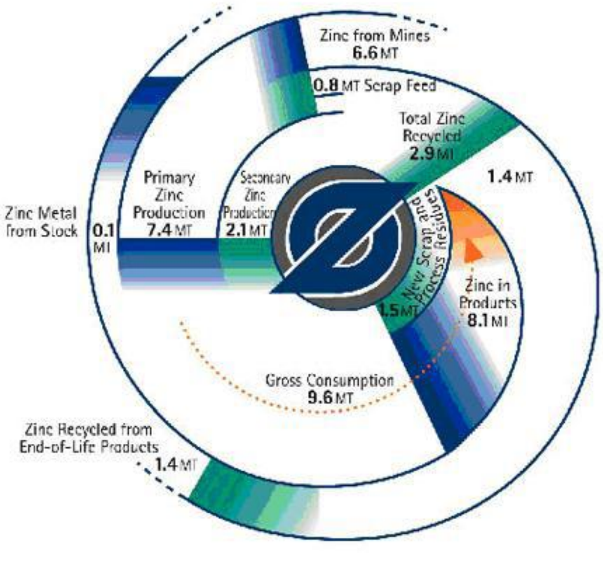
4. ทองเหลือง

ประโยชน์ของโลหะสังกะสีที่สำคัญอย่างยิ่งประการหนึ่งก็คือ เมื่อนำไปผสมกับโลหะทองแดงจะได้โลหะทองเหลือง ซึ่งสัดส่วนของสังกะสีที่ใช้ผสมกับโลหะทองแดงมีตั้งแต่ร้อยละ 10 จนถึงมากกว่าร้อยละ 40 การเติบโตของตลาดทองเหลืองจึงส่งผลดีต่อตลาดโลหะสังกะสีด้วยเช่นกัน ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมานี้ทองเหลืองทวีความนิยมมากขึ้น ในกลุ่มสถาปนิก มัณฑนากร รวมทั้ง ผู้บริโภคทั่วไป โดยนำมาใช้ในงานสถาปัตยกรรมและงานตกแต่งภายในทั้ง อาคารพาณิชย์และบ้านเรือน ซึ่งได้รับความนิยมทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทวีปยุโรปและอเมริกาเหนือ เรามักจะพบเห็นทองเหลืองในรูปลักษณ์ที่คุ้นตาจนอาจจะมองข้ามไปไม่ว่าจะเป็นที่จับประตู ก๊อกน้ำ เครื่องใช้ในบ้าน และส่วนประกอบต่างๆ ของโคมไฟ ดังภาพที่ 2.13

ภาพที่ 2.13 แสดงตัวอย่างทองเหลือง (Zincinfothailand, 2011 : online)

5. สังกะสีนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ปัจจุบันโลหะสังกะสีที่ผลิตได้จากทั่วโลก ประมาณร้อยละ 70 มาจากการทำเหมืองแร่ และอีกร้อยละ 30 มาจากการรีไซเคิล หรือการนำสังกะสีกลับมาใช้ใหม่ ภาพที่ 2.14 โดยในทุกๆ ปี จะมีการนำสังกะสีมารีไซเคิลเพิ่มสูงขึ้น ตามวิวัฒนาการที่ก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีในการผลิตสังกะสีและการรีไซเคิลสังกะสี ในปัจจุบันกว่าร้อยละ 80 ของสังกะสีที่ใช้กันอยู่ สามารถนำมารีไซเคิลได้ ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างประหยัด คุ้มค่าและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 2.14 แสดงวงโคจรของการรีไซเคิลสังกะสี (Zinc : online)

สังกะสีสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ในทุกขั้นตอน ตั้งแต่กระบวนการผลิตสังกะสีในอุตสาหกรรมต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ เช่น การผลิตโลหะสังกะสีแท่งและโลหะสังกะสีผสมในอุตสาหกรรมต้นน้ำจะมีเศษโลหะหรือ Scrap ที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิต ซึ่งสามารถนำมาหลอมใหม่ได้ ส่วนอุตสาหกรรมกลางน้ำ ที่นำโลหะสังกะสีแท่งมาใช้ชุบเคลือบแผ่นเหล็กหรือนำโลหะสังกะสีผสมมาฉีดชิ้นงานต่างๆ ก็จะมีเศษโลหะเกิดขึ้นระหว่างการผลิตเช่นกัน เมื่อนำผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมกลางน้ำมาใช้ในอุตสาหกรรมปลายน้ำ เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปสำหรับใช้ในชีวิตประจำวัน เมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานแล้ว สามารถนำผลิตภัณฑ์เหล่านั้นกลับมารีไซเคิลได้เช่นกัน การรีไซเคิลทำให้สังกะสีที่เป็นทรัพยากรแร่ที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างประหยัดและคุ้มค่า

เหล็กชุบสังกะสีและผลิตภัณฑ์อื่นที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบนั้น กว่าจะนำไปเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลค่อนข้างใช้ระยะเวลานาน เนื่องจากคุณลักษณะของสังกะสีทำให้ผลิตภัณฑ์มีความทนทานสูง

2.5 แนวโน้มเกี่ยวกับแร่สังกะสี

2.5.1 แนวโน้มเกี่ยวกับแร่สังกะสีในประเทศไทย

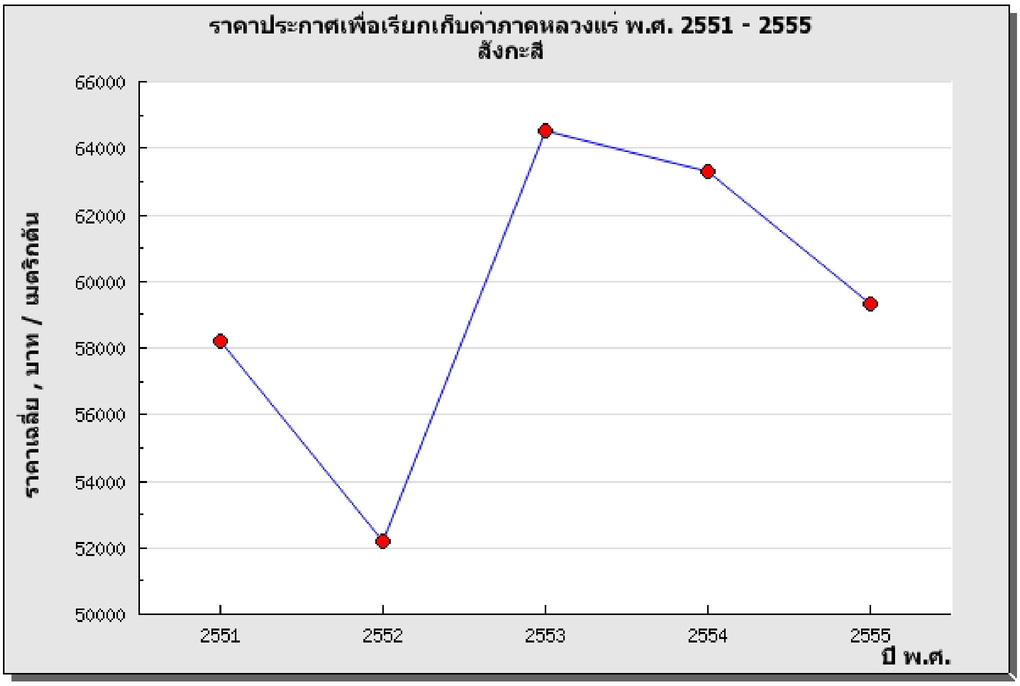
ตารางที่ 2.4 แสดงราคาแร่สังกะสี ปี 2551-2555

ปี พ.ศ.	ราคาเฉลี่ยต่อเมตริกตัน
2555	59,307.77
2554	63,315.24
2553	64,537.91
2552	52,179.58
2551	58,200.78

(กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2555 : ออนไลน์)

หมายเหตุ ราคาเฉลี่ยปี พ.ศ. 2555 เป็นราคาเฉลี่ยในเดือนมกราคม-มีนาคม

จากแนวโน้มราคาแร่สังกะสีในประเทศไทย แสดงให้เห็นว่าเมื่อปีพ.ศ. 2552 นั้นราคาแร่สังกะสีปรับตัวลดลงมากที่สุด ด้วยราคาแร่เฉลี่ย 52,179.58 บาทต่อเมตริกตัน และปรับตัวสูงขึ้น มากที่สุดที่ราคา 64,537.91 บาทต่อเมตริกตัน และเริ่มปรับตัวลดลงตามลำดับ จนในปัจจุบันแร่สังกะสีมีราคา 59,307.77 บาทต่อเมตริกตัน ตารางที่ 2.4 และภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 กราฟแสดงราคาแร่สังกะสี ปี 2551-2555
(กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2555 : ออนไลน์)

ตารางที่ 2.5 แสดงความเคลื่อนไหวของแร่สังกะสี

Category	Mineral	2010		2011		Percentage	
		Quantity	Value	Quantity	Value	Quantity	Value
Import	Zinc ore	168,315	3,341.70	123,662	3,161.20	-26.53%	-5.40%
Consumption	Zinc alloy	30,021	2,329.00	16,350	1,274.70	-45.54%	45.27%
	Zinc metal	60,368	4,332.00	78,940	5,645.50	30.76%	30.32%
Export	Zinc alloy	51	3.3	130	9.60	157.67%	190.91%
	Zinc metal	4,086	296.40	5,479	402.30	34.09%	35.73%
Production	Zinc ore	163,157	2,361.60	128,256	1,846.60	-21.39%	21.81%

(กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2555 : ออนไลน์)

จากตารางที่ 2.5 แสดงการนำเข้า ความต้องการการใช้แร่สังกะสี การส่งออก และปริมาณแร่สังกะสีของประเทศไทยในช่วงปี ค.ศ.2010- 2011

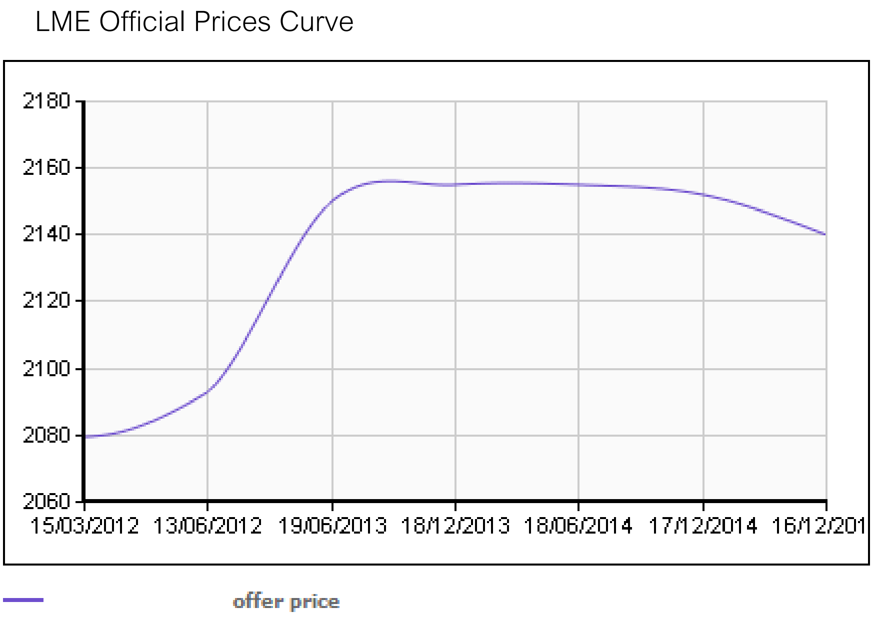
ซึ่งจะเห็นได้ว่าการนำเข้าแร่สังกะสีของประเทศไทยมีอัตราการนำเข้าน้อยลงถึง 26.53% และในทางกลับกันการส่งออกแร่ของประเทศไทยมีอัตราการส่งออกสูงขึ้น 191.91% สำหรับ Zinc alloy และ 35.73% สำหรับ Zinc metal ส่วนปริมาณความต้องการแร่ Zinc alloy ลดลง 45.27% แต่ความต้องการ Zinc metal เพิ่มมากขึน้ กว่าปี ค.ศ. 2010 ถึง 30.32% และสุดท้าย ปริมาณแร่สังกะสีภายในประเทศไทยมีอัตราลดลงถึง 21.81%

ในประเภทของ Zinc alloy มีความต้องการการใช้แร่น้อยลง ทำให้มีอัตราการส่งออกที่เพิ่มมากขึ้นส่วนในประเภทของ Zinc metal มีความต้องการใช้ในประเทศที่มากขึ้น ทำให้การส่งออกก็เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

ปัจจุบันการผลิตโลหะสังกะสีของประเทศไทยมีผู้ผลิตเพียงรายเดียวคือบริษัท ผาแดง อินดัสทรี จำกัด(มหาชน) ซึ่งใช้วัตถุดิบแร่สังกะสีจากเหมืองแม่สอดและแร่สังกะสีนำเข้าจากต่างประเทศ และเพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้ทรัพยากรธรรมชาติโดยเฉพาะแร่สังกะสีภายในประเทศซึ่งมีปริมาณแร่สำรองลดลงมาก บริษัทฯ จึงได้ปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยนำฝุ่นเตาหลอมไฟฟ้าที่ได้จากอุตสาหกรรมเหล็กซึ่งมีสังกะสีเป็นส่วนประกอบมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน

แร่สังกะสี โดยวางแผนจะใช้ฝุ่นเหล็กดังกล่าวเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตประมาณ 10,000 ตันต่อปี

2.5.2 แนวโน้มเกี่ยวกับแร่สังกะสีโลก



ภาพที่ 2.16 แนวโน้มและการประมาณราคาแร่สังกะสี (lme, 2011 : online)

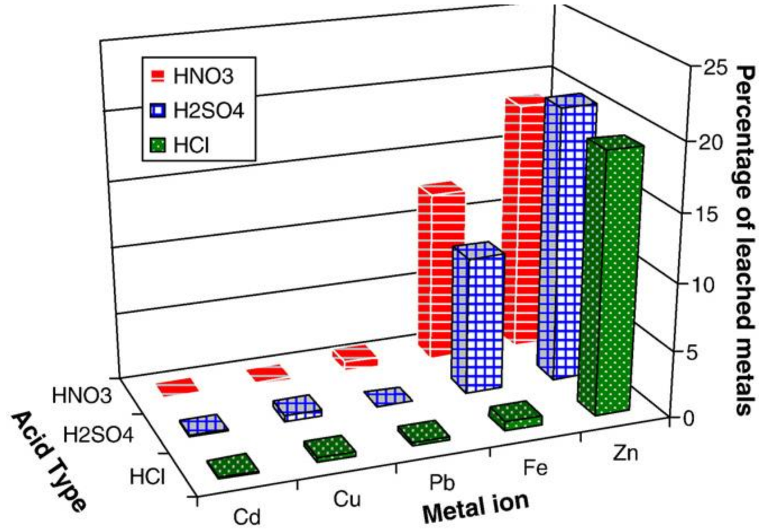
กราฟแสดงแนวโน้มและการประมาณราคาแร่สังกะสี ภาพที่ 2.16 สามารถสรุปได้ว่า ถึงแม้ว่าอัตราการผันผวนของราคาแร่สังกะสีทั่วโลกยังมีอยู่ แต่ตั้งแต่ปี ค.ศ.2012 เป็นต้นมาแล้วนั้น แร่สังกะสีจะมีมูลค่าสูงขึ้นจากปี ก่อนๆ ค่อนข้างมาก แต่พอเริ่มเข้าสู่ปี ค.ศ.2013 แล้วอัตราการเติบโตของแร่สังกะสีมีน้อยและมีแนวโน้มที่แร่สังกะสีจะมีมูลค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามราคาแร่สังกะสีในอนาคตนั้น ก็ยังเป็นที่น่าพอใจเหมาะที่จะทำการลงทุนต่างๆ ต่อไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

T. Havlik, A.M. Bernardes, A. Miskufova (2006) ได้ศึกษาเรื่อง Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust โดยศึกษากระบวนการ Hydrometallurgical ของฝุ่นที่เกิดจากเตาถลุงไฟฟ้า โดยศึกษาภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ โดยใช้กรดซัลฟิวริกในการชะละลาย การทดลองมีการเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มข้นของตัวทำละลาย โดยมีจุดประสงค์เพื่อแลกเปลี่ยนสังกะสีกับสารละลาย ในขณะที่เหล็กยังคงหลงเหลืออยู่ในรูปของกากตะกอนซึ่งต้องนำไปกำจัดต่อไป

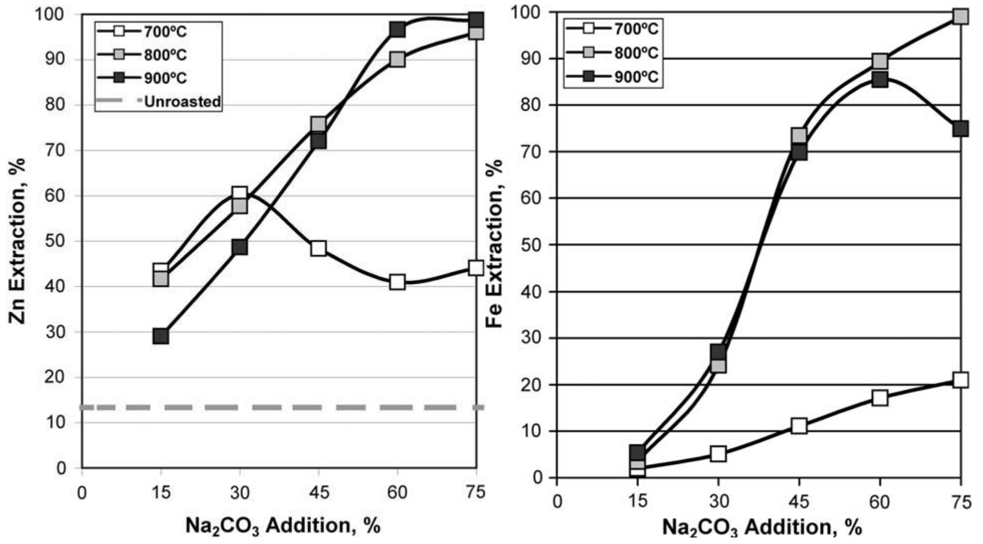
A.J.B. Dutra, P.R.P. Paiva, L.M. Tavares (2006) ได้ศึกษาเรื่อง Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust พบว่าในการถลุงเหล็กเกิดฝุ่นจากการถลุงเหล็ก 10-20 กิโลกรัม ต่อเหล็ก 1 ตัน ซึ่งฝุ่นเหล่านั้นมีโลหะที่เป็นอันตรายปนอยู่ด้วย ซึ่งได้ทำการศึกษาโดยใช้เทคนิคการละลายอัลคาไลน์ที่แตกต่างกันได้ทำการทดสอบเพื่อที่จะละลายสังกะสีในตัวอย่างฝุ่นโดยการชะล้างกวนธรรมดา ใช้ความดันในการละลาย การชะล้างแบบเดิมแต่ใช้รังสีไมโครเวฟในการปรับสภาพ และละลายโดยใช้การกวนด้วย Ultra-Sonic อุณหภูมิและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์คือตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ พบว่ามีอัตราการเก็บกลับคืนได้ร้อยละ 74

Reyad A. Shawabkeh (2010) ได้ศึกษาเรื่อง Hydrometallurgical extraction of zinc from Jordanian electric arc furnace dust โดยศึกษาเกี่ยวกับการสกัดสังกะสีในอุตสาหกรรมหลอมเหล็กกล้าของประเทศจอร์แดนที่ใช้เตาอาร์คไฟฟ้าในกระบวนการผลิต ทดลองโดยใช้ตัวทำละลายและความข้มข้นที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการชะละลาย พบว่าการชะละลายที่ดีที่สุดโดยใช้ความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดคือ ใช้ตัวทำละลายที่เป็นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ในความเข้มข้น 1 mol/L ตัวทำละลายที่ทำละลายได้ดีรองลงมาคือกรดไนตริก (HNO_3) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ภาพที่ 2.18 ตามลำดับ โดยการทำละลายด้วยกรดซัลฟิวริกนั้นมีอัตราการเก็บกลับคืนได้ร้อยละ 72



ภาพที่ 2.17 แสดงปริมาณของโลหะที่ถูกชะละลายจากตัวอย่างฝุ่นจาก EAF
โดยการใช้สารละลายกรดที่แตกต่างกันในการละลาย

Preston C. Holloway, Thomas H. Etsell (2007) ได้ศึกษาเรื่อง Roasting of La Oraya Zinc Ferrite with Na_2CO_3 โดยทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการเก็บกลับคืนโลหะสังกะสีเฟอร์ไรท์ของฝุ่นจากเตาหลอมไฟฟ้า โดยใช้กระบวนการย่างแร่ด้วยโซเดียมคาร์บอเนต ผลจากการเก็บกลับคืนสังกะสีเฟอร์ไรท์จากตัวอย่างฝุ่นจากเตาหลอมไฟฟ้า ของ Doe Run Peru_s La Oroya plant ซึ่งประกอบด้วย(% by weight) สังกะสี19.5 เหล็ก 26.6 โดยสังกะสีในตัวอย่างที่ใช้กว่าร้อยละ 87 อยู่ในรูปของ franklinite $ZnFe_2O_4$ เมื่อทำการทดลองชะละลายด้วยกรดซัลฟุริกเจือจางที่มีความเข้มข้น 200 กรัม/ลิตร พบว่าความสามารถในการชะละลายสังกะสีและเหล็กได้เพิ่มขึ้นสูงที่สุดในช่วงของสภาวะการย่างแร่ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส และสัดส่วนโซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 80 ภาพที่ 2.19 โดยมีอัตราการเก็บกลับคืนสังกะสีได้เกือบทั้งหมด และเหล็กได้ร้อยละ 81



ภาพที่ 2.18 ผลการชะละลายสังกะสีของสังกะสีเฟอร์ไรท์และเหล็กด้วยโซเดียมคาร์บอเนต

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

3.1.1 ศึกษาหลักการและวิธีการเก็บกลับคืนสังกะสีของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

3.1.2 ศึกษาคุณลักษณะของตัวอย่างฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

3.1.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางของตัวอย่างฝุ่นทั้ง 3 แหล่ง ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ เวลาในการชะละลาย ความข้นที่เหมาะสมในการชะละลาย

3.1.4 ศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางโดยใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมด้วย

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) รุ่น Bruker AXS model D8 Discover

3.2.2 เครื่อง X-ray fluorescence spectrometry (XRF) รุ่น Philips model PW2400

3.2.3 เครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) รุ่น Jobin Yvon Horiba model Ultima 2C

3.2.4 เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) Hitachi model S-3400N

3.2.5 เครื่องเขย่าแนวราบ รุ่น GFL 3005

3.2.6 เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด

3.2.7 เตาเผาอุณหภูมิสูง

3.2.8 Sieve

3.2.9 ตู้อบ

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 ตัวอย่างฝุ่น EAFD.1

3.3.2 ตัวอย่างฝุ่น EAFD.2

3.3.3 ตัวอย่างฝุ่น EAFD.3

3.3.4 กรดซัลฟิวริก ความบริสุทธิ์มากกว่า 98%

3.3.5 กรดไนตริก ความบริสุทธิ์มากกว่า 98%

3.3.6 โซเดียมคลอไรด์

3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 ศึกษาหลักการและวิธีการเก็บกลับคืนสังกะสีของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

1. ศึกษาข้อมูลการเก็บกลับคืนสังกะสีของฝุ่นจากเตาหลอมไฟฟ้า (Electric Arc Furnace) จากรายงานเทคโนโลยีการรีไซเคิลฝุ่นเหล็ก และรายงานการวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการชะละลายสังกะสี เพื่อเลือกวิธีที่จะใช้ในการเก็บกลับคืนสังกะสีพบว่า วิธีที่จะสามารถเก็บกลับคืนสังกะสีได้ 2 วิธี คือ กระบวนการโลหวิทยาความร้อน (Pyrometallurgical Process) และกระบวนการโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgical Process)

2. เลือกกระบวนการแยกโลหะด้วยวิธีโลหวิทยาสารละลาย ในการเก็บกลับคืนสังกะสีของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า กระบวนการดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนและความบริสุทธิ์มากกว่า

3.4.2 ศึกษาคุณลักษณะของตัวอย่างฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

1. ทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นจากเตาหลอมไฟฟ้า จำนวน 3 แหล่ง ได้แก่ ตัวอย่างฝุ่น EAFD.1 (บริษัทในจังหวัดระยอง) ตัวอย่างฝุ่น EAFD.2 และตัวอย่างฝุ่นจาก EAFD.3 (บริษัทในจังหวัดสมุทรปราการ)

2. เตรียมตัวอย่างฝุ่นโดยการคัดขนาด เลือกใช้ตัวอย่างขนาด 75 ไมครอน (200 meshes) เพื่อเป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนและเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับตัวทำละลายช่วยให้การชะละลายดีขึ้น และอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวอย่าง

3. ทำการวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีรวมถึงธาตุต่างๆของตัวอย่างฝุ่นดังกล่าว โดยใช้เครื่องX-ray Diffractometer (XRD) และเครื่อง X-ray fluorescence spectrometry (XRF) เพื่อหาแนวโน้มและปริมาณสังกะสีที่มีอยู่ในตัวอย่างฝุ่นแต่ละแหล่ง

3.4.3 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกของตัวอย่างฝุ่นทั้ง 3 แหล่ง

โดยศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชะละลายดังนี้

3.4.3.1 **ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลาย** (Acid Normality)

1. เตรียมสารละลายซัลฟิวริกจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ความเข้มข้น 0.5 1.0 และ 2.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการชะละลาย
2. เติมตัวอย่างในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 10 กรัม (10% Solid)
3. นำตัวอย่างแต่ละชุดไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำตัวอย่างที่ทดลองกรองผ่านกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 41
5. ส่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและทดสอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตามวิธีของห้องปฏิบัติการ เพื่อหาปริมาณของสังกะสีที่ถูกชะละลายออกมา นำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน (% Recovery)

3.4.3.2 **ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการชะละลาย** (Shaking Time)

1. เตรียมสารละลายซัลฟิวริกจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ความเข้มข้น ที่เหมาะสมตามเงื่อนไขข้อ 3.4.3.1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการชะละลายที่เหมาะสม
2. เติมตัวอย่างในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 10 กรัม (10% Solid)
3. นำตัวอย่างแต่ละชุดไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที 1 ชั่วโมง 2ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง
4. นำตัวอย่างที่ทดลองกรองผ่านกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 41

5. ส่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) ที่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและทดสอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตามวิธีของห้องปฏิบัติการ เพื่อหาปริมาณของสังกะสีที่ถูกชะละลายออกมา นำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน (% Recovery)

3.4.3.3 ศึกษาอิทธิพลของความข้นที่เหมาะสมในการชะละลาย (Solid/Liquid Ratio)

1. เตรียมสารละลายซัลฟิวริกจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ความเข้มข้น ที่เหมาะสมตามเงื่อนไขข้อ 3.4.3.1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการชะละลาย

2. เติมตัวอย่างในขวดแต่ละใบ ปริมาณ 10 กรัม และ 20 กรัม (10% Solid และ 20% Solid)

3. นำตัวอย่างแต่ละชุดไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที 1 1 ชั่วโมง 2ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง

4. นำตัวอย่างที่ทดลองกรองผ่านกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 41

5. ส่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและทดสอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตามวิธีของห้องปฏิบัติการ เพื่อหาปริมาณของสังกะสีที่ถูกชะละลายออกมา นำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน (% Recovery)

3.4.4 ศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกโดยใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมด้วย (Thermal Leaching)

1. เตรียมตัวอย่างฝุ่นนำไปเผาร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ในอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2. เลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลาย และปริมาณตัวอย่างที่ใช้ ที่เหมาะสมตามเงื่อนไขข้อ 3.4.3.1 และ 3.4.3.3 ตามลำดับ

3. นำตัวอย่างแต่ละชุดไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที 1 ชั่วโมง 2ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง

4. นำตัวอย่างที่ทดลองกรองผ่านกระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 41

5. ส่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและทดสอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตามวิธีของห้องปฏิบัติการ เพื่อหาปริมาณของสังกะสีที่ถูกชะละลายออกมา นำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน (% Recovery)

จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางและการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางโดยใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมด้วย

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.1

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก	องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก
MgO	5.384	Fe_2O_3	36.525
Al_2O_3	0.356	NiO	0.026
SiO_4	1.968	CuO	0.247
P_2O_5	0.194	ZnO	34.106
SO_3	1.767	Br	0.190
Cl	5.258	AgO	0.010
K_2O	2.731	CdO	0.030
CaO	5.588	SnO	0.070
TiO_2	0.082	Sb_2O_3	0.030
Cr_2O_3	0.367	BaO	0.100
MnO_2	3.432	PbO	1.540
Total	100.001		

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.1 จากบริษัทแห่งหนึ่งในจังหวัดระยอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่าสารประกอบหลักที่พบในตัวอย่างนั้น ประกอบด้วย ZnO (34.106%) และ Fe_2O_3 (36.525%) สารประกอบอื่นๆ ได้แก่ CaO (5.588%) MgO (5.384%) และCl (5.258%) โดยคิดเป็น สังกะสี (Zn) (27.403%) เหล็ก (Fe) (12.773%) และออกไซด์ในรูปของออกซิเจน (38.033%)

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่น EAFD.2

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก	องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก
MgO	2.306	Fe_2O_3	40.671
Al_2O_3	1.030	NiO	-
SiO_4	4.915	CuO	0.315
P_2O_5	0.195	ZnO	29.465
SO_3	1.463	Br	0.130
Cl	5.190	AgO	0.010
K_2O	1.532	CdO	0.020
CaO	5.520	SnO	0.300
TiO_2	0.079	Sb_2O_3	0.020
Cr_2O_3	0.677	BaO	0.090
MnO_2	4.103	PbO	1.970
Total			100.001

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.2 จากบริษัทแห่งหนึ่งในจังหวัดกรุงเทพมหานคร ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 สารประกอบหลักที่พบในตัวอย่างนั้นประกอบด้วย ประกอบด้วย ZnO (29.465%) และ Fe_2O_3 (40.671%) สารประกอบอื่นๆ ได้แก่ CaO (5.520%) Cl (5.190%) และ SiO_4 (4.915%) โดยคิดเป็น สังกะสี (Zn) (23.660%) เหล็ก (Fe) (14.223%) และออกไซด์ในรูปของออกซิเจน (43.100%)

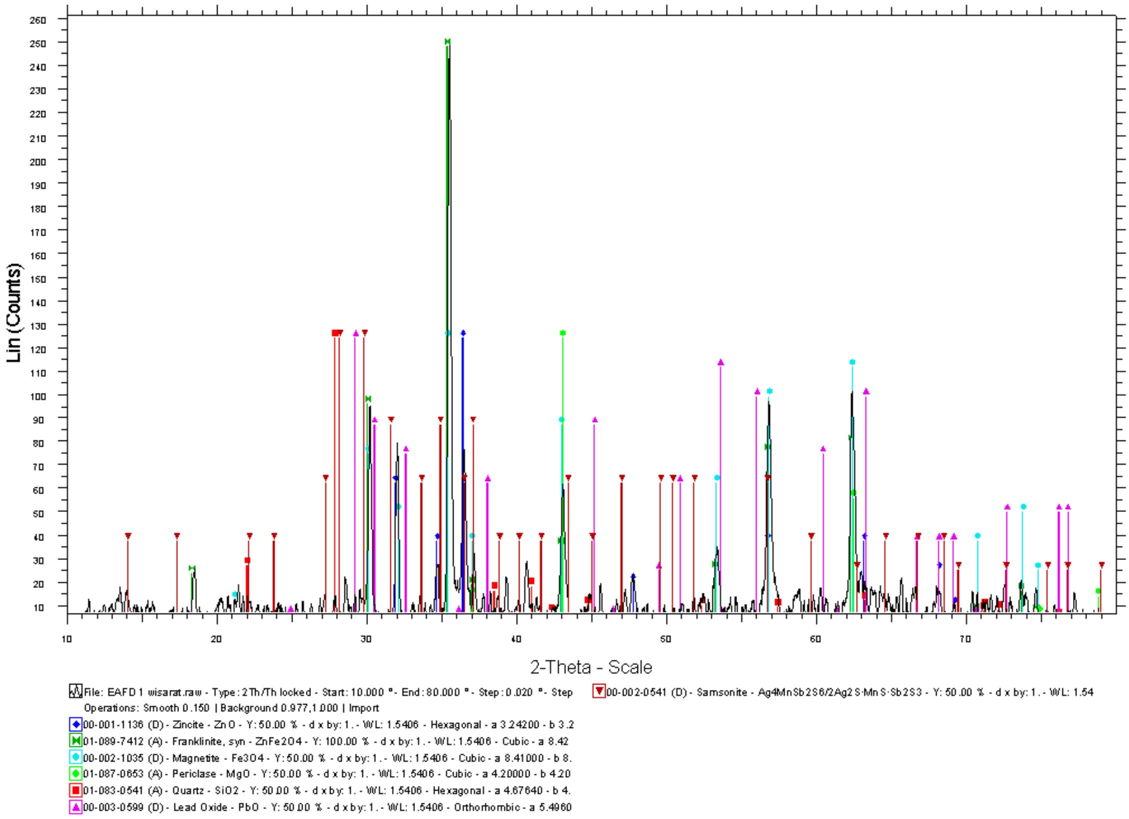
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.3

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก	องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก
MgO	4.242	Fe_2O_3	28.49
Al_2O_3	17.217	NiO	-
SiO_4	3.009	CuO	0.136
P_2O_5	0.173	ZnO	24.901
SO_3	3.222	Br	0.09
Cl	4.255	AgO	0.01
K_2O	2.052	CdO	0.03
CaO	2.650	SnO	0.11
TiO_2	0.028	Sb_2O_3	0.02
Cr_2O_3	0.257	BaO	0.05
MnO_2	5.937	PbO	3.12
Total			99.999

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.3 จากบริษัทแห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 พบว่าสารประกอบหลักที่พบในตัวอย่างนั้นประกอบด้วย ZnO (24.901%) และ Fe_2O_3 (28.49%) สารประกอบอื่นๆ Al_2O_3 (17.217%) MnO_2 (5.937%) และ Cl (4.255%) คิดเป็นสังกะสี (Zn) (19.514%) เหล็ก (Fe) (9.963%) และออกไซด์ในรูปของออกซิเจน (47.028%)

4.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแร่ของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

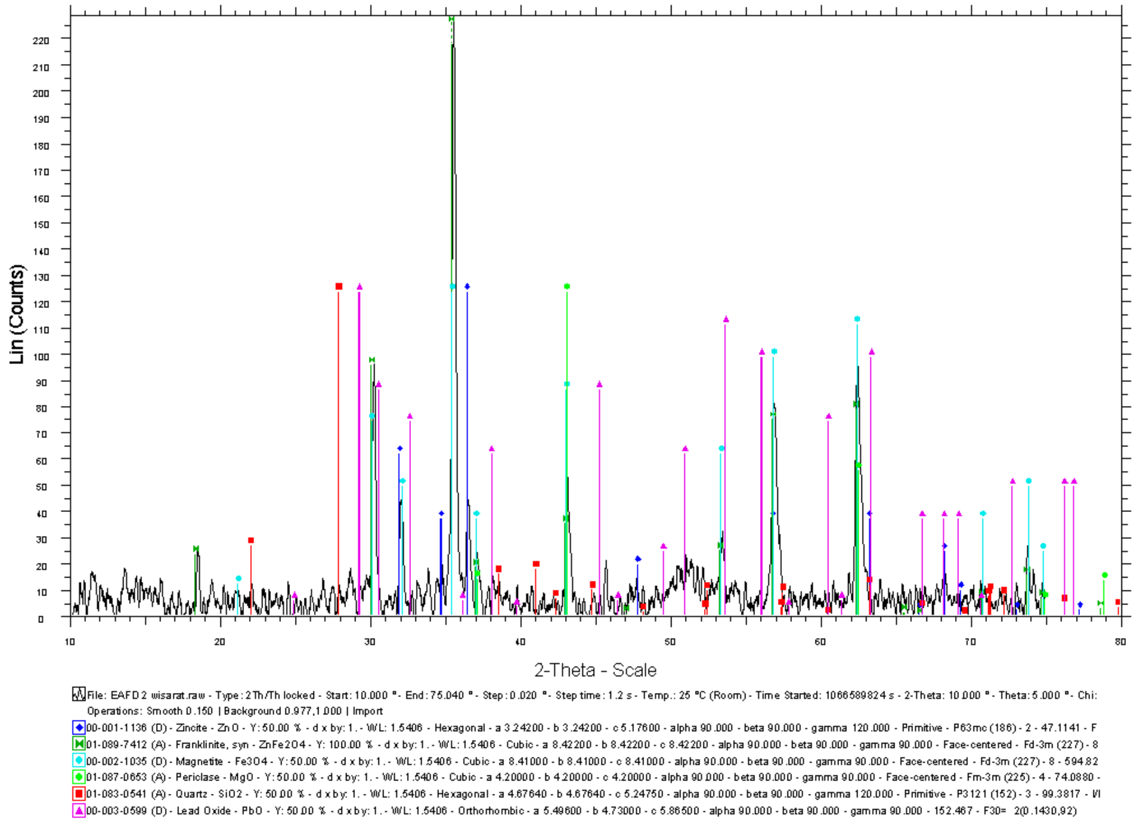
ฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าตัวอย่าง EAFD.1



ภาพที่ 4.1 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางแร่ของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.1

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแร่ของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยเทคนิค X-ray Diffraction พบว่าสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลักของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.1 ประกอบไปด้วยซิงค์ออกไซด์และเหล็กออกไซด์ อยู่ในรูปของ Zincite, Franklinite และ Magnetite และส่วนประกอบอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.1

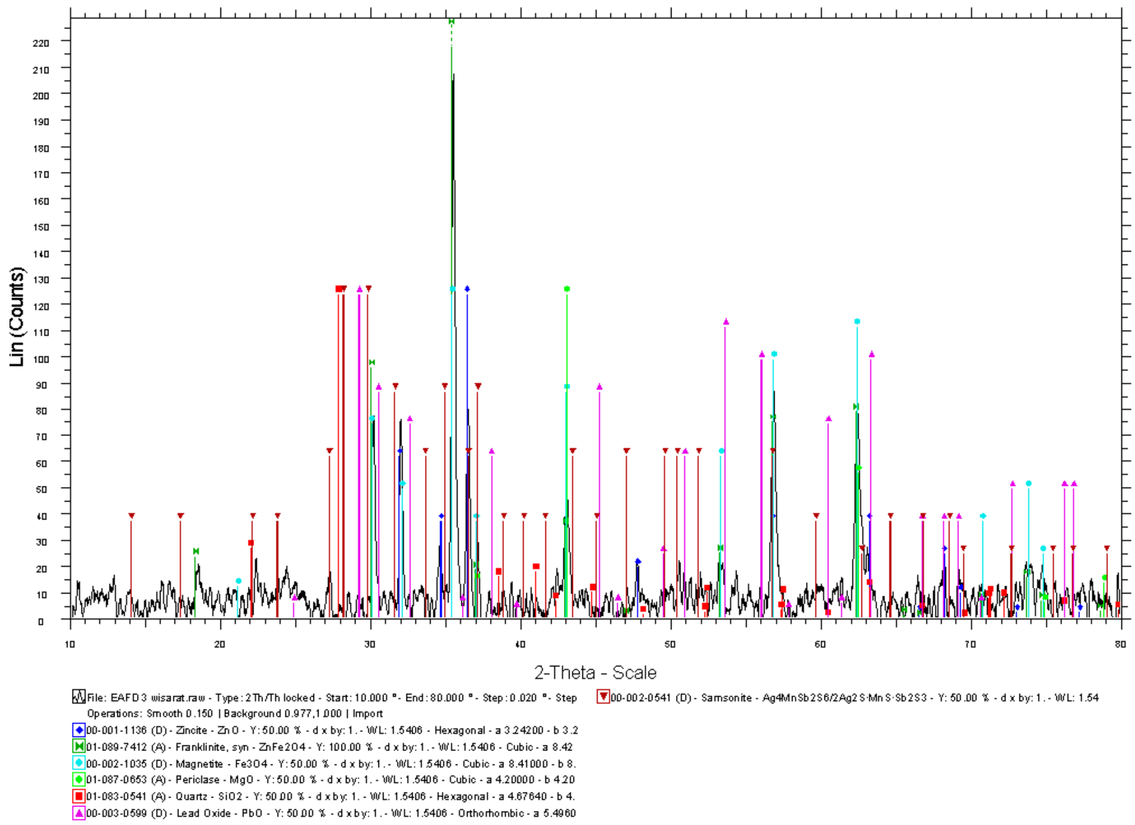
<u>ฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าตัวอย่าง EAFD.2</u>



ภาพที่ 4.2 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางแร่ของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.2

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแร่ของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยเทคนิค X-ray Diffraction พบว่าสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลักของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.2 ประกอบไปด้วยซิงค์ออกไซด์และเหล็กออกไซด์ อยู่ในรูปของ Zincite, Franklinite และ Magnetite และส่วนประกอบอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.2

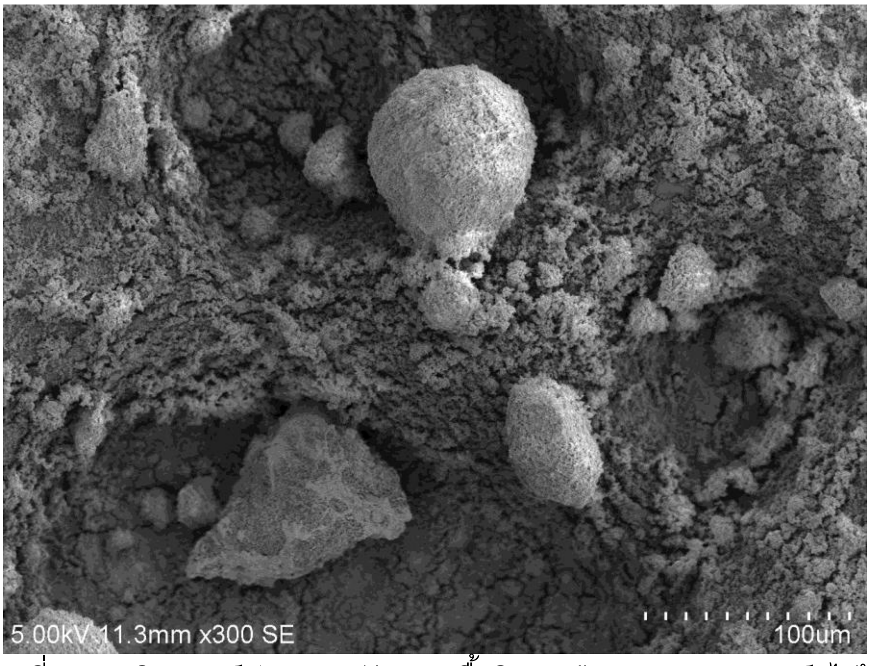
<u>ฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าตัวอย่าง EAFD.3</u>



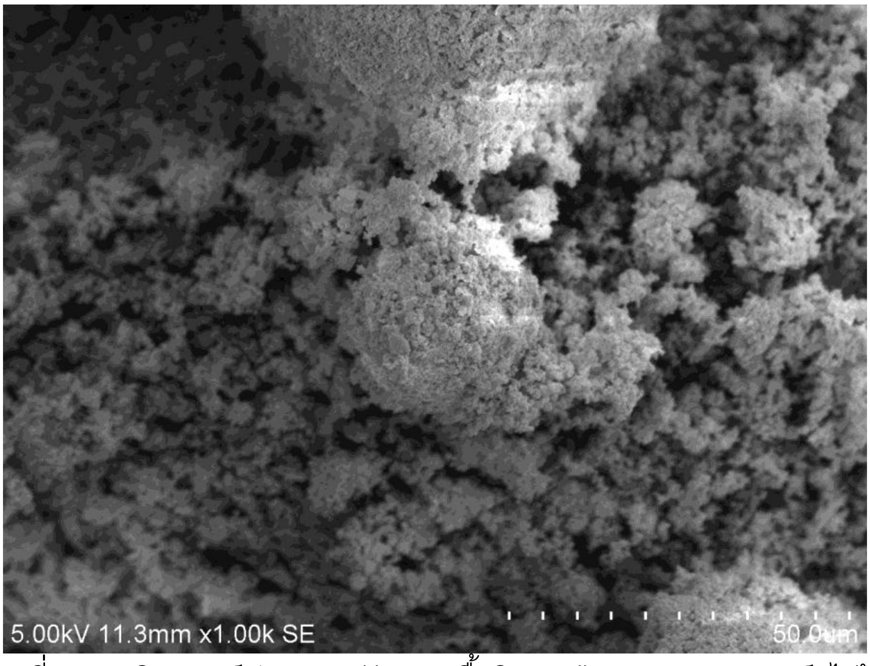
ภาพที่ 4.3 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางแร่ของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.3

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแร่ของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยเทคนิค X-ray Diffraction พบว่าสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลักของฝุ่นตัวอย่าง EAFD.3 ประกอบไปด้วยซิงค์ออกไซด์และเหล็กออกไซด์ อยู่ในรูปของ Zincite, Franklinite และ Magnetite และส่วนประกอบอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.3

4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างพื้นผิวของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

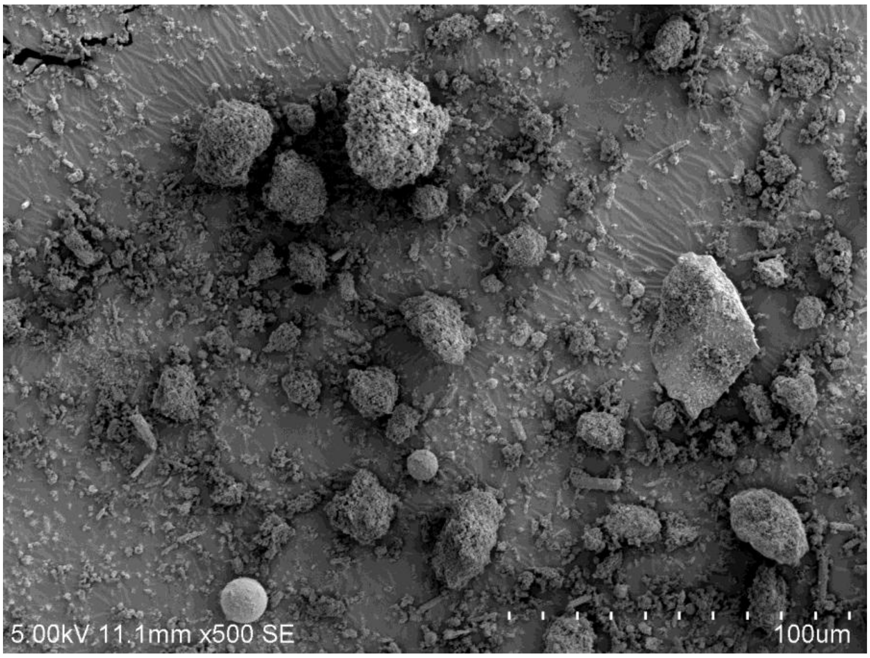


ภาพที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของพื้นผิวของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ตัวอย่าง EAFD.1 ที่กำลังขยาย 300 เท่า



ภาพที่ 4.5 ผลวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของพื้นผิวของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ตัวอย่าง EAFD.1 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากผลการศึกษาลักษณะรูปร่างของพื้นผิวของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy จากภาพถ่ายที่กำลังขยายที่ 300 เท่า และ 1,000 เท่า พบว่าฝุ่นดังกล่าว มีขนาดของอนุภาคประมาณ 1–5 ไมครอน มีการจับตัวกันเป็นก้อนกลมขนาดแตกต่างกันไป ดังภาพที่ 4.4 และ ภาพที่ 4.5 ดังนั้นในการนำตัวอย่างมาการทดลองจึงต้องมีคัดขนาดเพื่อกำจัดมลทิน และเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการชะละลาย



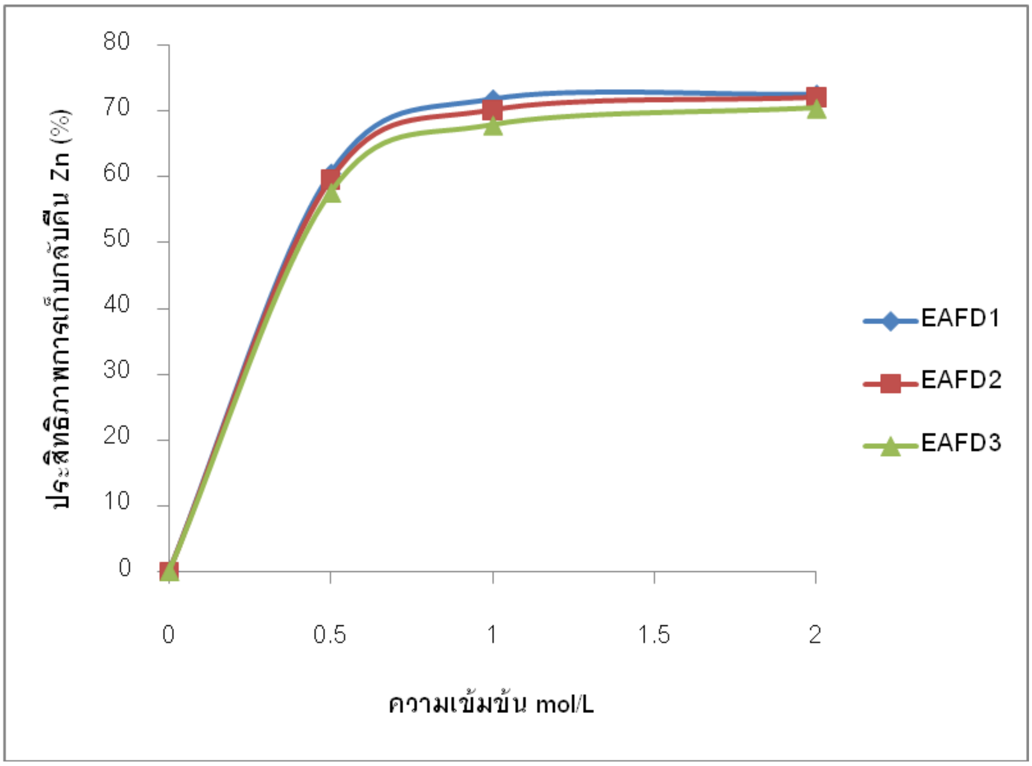
ภาพที่ 4.6 ผลวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของพื้นผิวของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าตัวอย่าง EAFD.1 หลังจากชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจาง 6 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 300 เท่า

ภาพที่ 4.7 ผลวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของพื้นผิวของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าตัวอย่าง EAFD.1 หลังจากชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจาง 6 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากผลการศึกษาลักษณะรูปร่างของพื้นผิวของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าภายหลังการชะลายด้วยสารละละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร หลังจากการชะละลายเป็นเวลา 6 ชั่วโมงด้วยเทคนิค SE M จากภาพถ่ายที่กำลังขยายที่ 300 เท่า และ 1,000 เท่า พบว่าอนุภาคของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ามีความพรุนเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.4 และ ภาพที่ 4.5

4.2 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการชะละลายของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

4.2.1 **อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลาย** (Acid Normality)



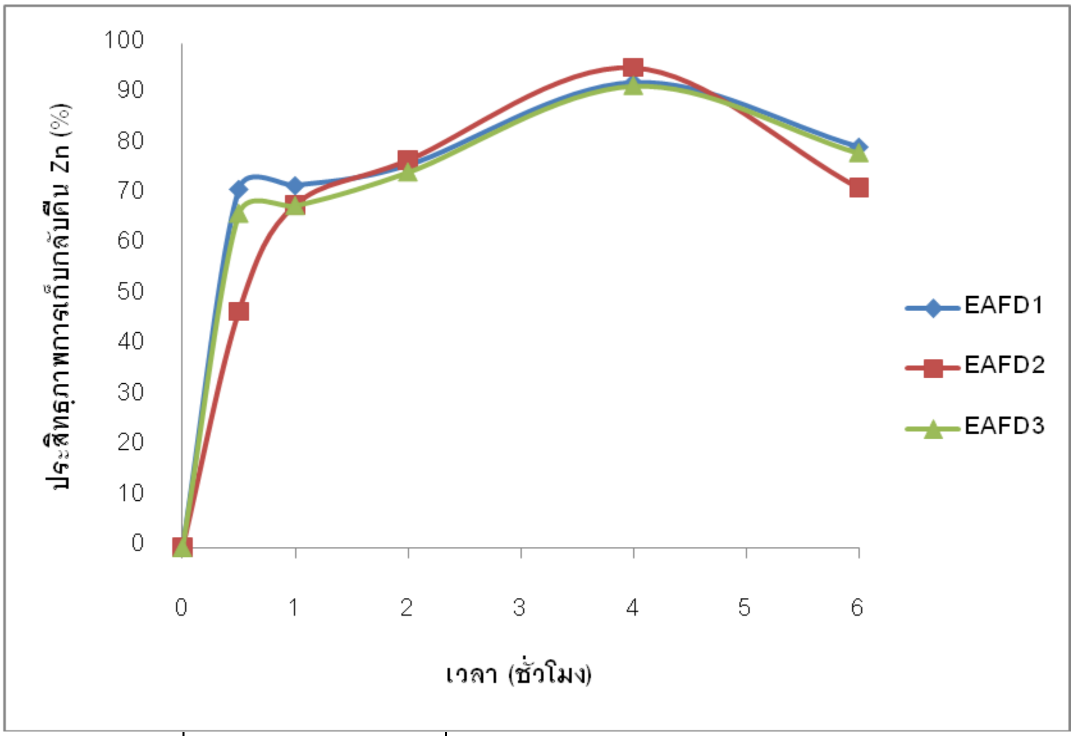
ภาพที่ 4.8 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางที่ใช้ในการชะละลายตัวอย่างฝุ่นแต่ละแหล่ง

จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนสังกะสี จากฝุ่น 10 กรัม ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง 100 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 2.0 โมลต่อลิตร ตามลำดับ ทำการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนสังกะสีเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนที่ความเข้มข้น 2.0 โมลต่อลิตรเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากความเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนสังกะสีดังกล่าวอยู่ในช่วงร้อยละ 57-72 ภาพที่ 4.8 และปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.4

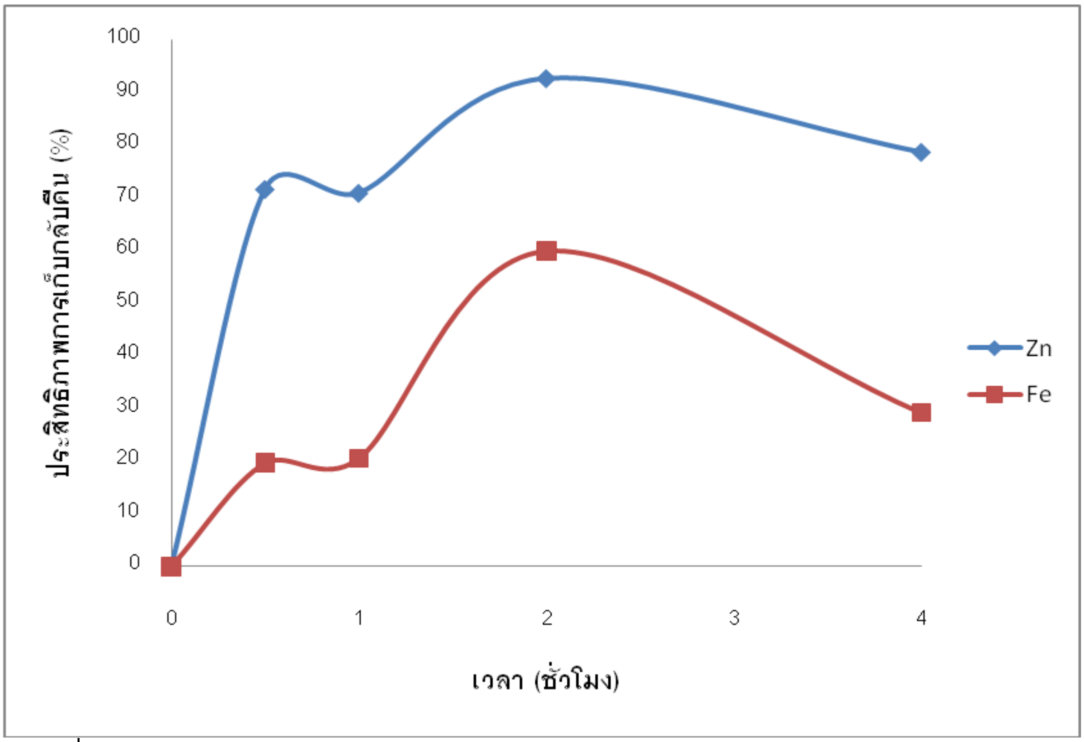
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนที่ความเข้มข้นที่ต่างๆ กันที่ใช้ในการชะละลายในตัวอย่างฝุ่นแต่ละแหล่ง

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (mol/L)	ปริมาณZinc ในสารละลาย (g)	ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน (%)
EAFD1	0.5	1.661	60.60
	1	1.950	71.16
	2	1.990	72.62
EAFD2	0.5	1.410	59.59
	1	1.660	70.16
	2	1.705	72.06
EAFD3	0.5	1.125	57.65
	1	1.325	67.90
	2	1.375	70.46

4.2.2 **อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการชะละลาย** (Shaking Time)



ภาพที่ 4.9 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการชะละลายในตัวอย่างฝุ่นแต่ละแหล่ง



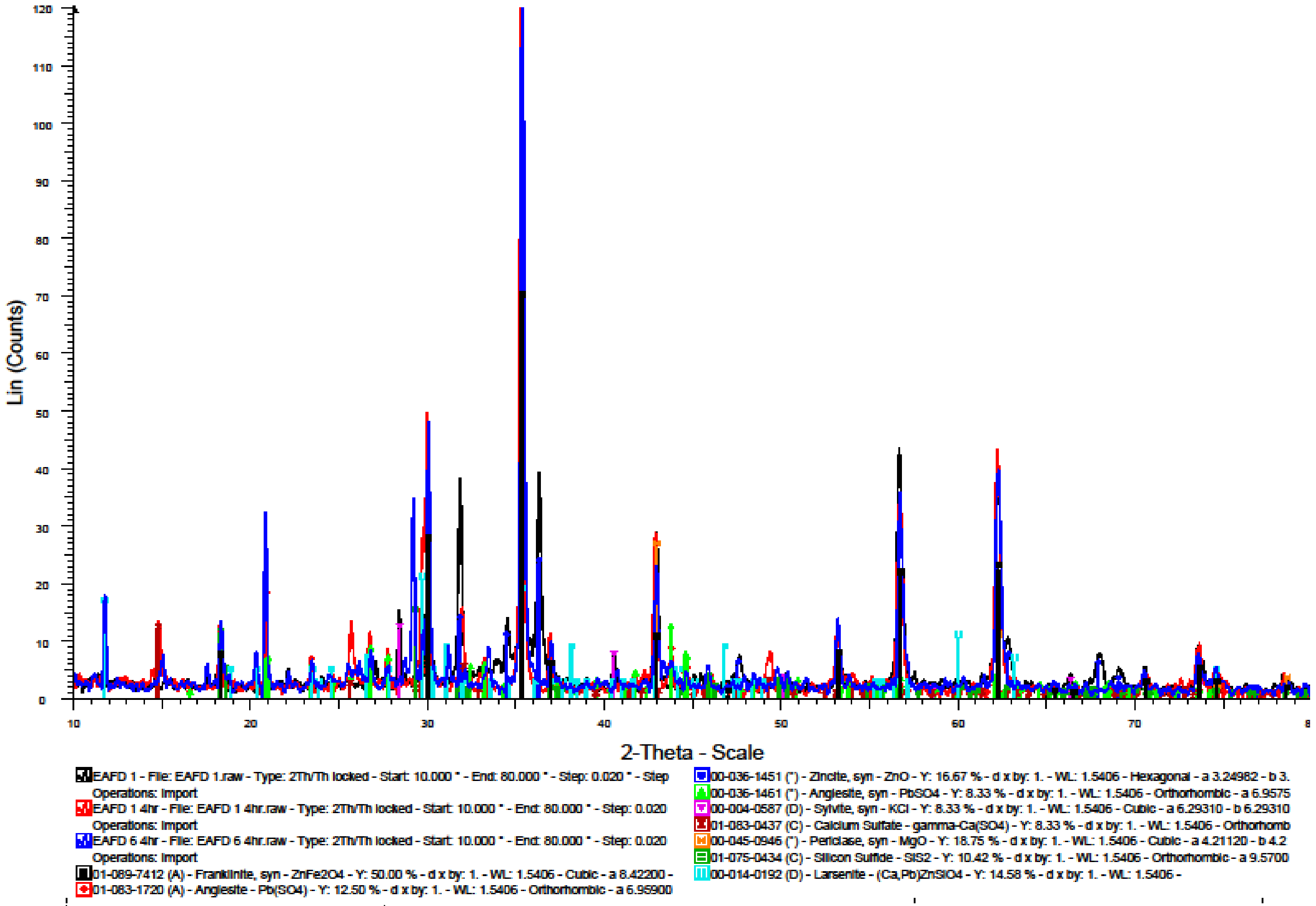
ภาพที่ 4.10 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนของสังกะสีและเหล็กจากฝุ่นตัวอย่าง EAFD.1 ที่เวลาต่างๆ กัน

จากการทดลองทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการชะละลาย ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร โดยใช้กรดซัลฟิวริกเจือจางจำนวน 100 มิลลิลิตรต่อตัวอย่างฝุ่น 10 กรัม (10%Solid) ใช้ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4.9 พบว่าประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนสังกะสีโดยรวมเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจนถึงที่เวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนสังกะสีมีแนวโน้มลดลง โดยเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนของสังกะสีจะพบว่ามีค่าไม่ต่างกันมากและมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจากผลการทดลองเมื่อพิจารณาการถูกชะละลายของเหล็กด้วย จะเห็นว่ายิ่งใช้เวลาในการชะละลายเพิ่มมากขึ้น สังกะสีจะถูกละลายออกมาได้ใกล้เคียงกันในขณะที่เหล็กจะถูกชะละลายเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.10 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าปริมาณของซัลเฟตอิออน (SO_4^{2-}) ที่ทำปฏิกิริยากับโลหะนั้นไม่เพียงพอในการละลายสังกะสีออกมาได้ เพราะในฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านี้นอกจากจะประกอบด้วยสังกะสีเป็นส่วนใหญ่แล้ว ยังมีส่วนประกอบที่เป็นโลหะอื่นๆ ผสมอยู่ ได้แก่พวก Fe_2O_3 ซึ่งมีอยู่ถึง 28.49-40.67, Al_2O_3 0.3-17.2 และ MgO 2.3-5.38 โดยน้ำหนักเป็นต้น จึงทำให้เกิดการแย่งชิงซัลเฟตอิออน (SO_4^{2-}) จากโลหะอื่น ปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.5

จากการทดลองนำกากตะกอนของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าหลังผ่านการชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจาง ไปวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกที่ไม่ถูกชะละลาย เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนทำการทดลองชะละลายด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) นั้น ดังภาพที่ 4.11 พบว่าสังกะสีที่อยู่ในรูป Zincite มีจุดยอดของกราฟ (peak) ลดต่ำลงจนในการชะละลายที่ 4 ชั่วโมงจากจุดยอดเดิมก่อนการชะละลาย ส่วน Franklinite มีจุดยอดของกราฟลดต่ำลงกว่าจุดยอดเดิมก่อนการชะละลายในการชะละลายที่ 4 ชั่วโมง ซึ่งพบว่ามีจุดยอดของกราฟ ต่ำกว่า การชะละลายที่ 6 ชั่วโมง ซึ่งแสดงว่าสังกะสีที่ถูกชะละลายออกมาส่วนใหญ่จะมาจากสังกะสีในรูปของ Zincite ส่วนสังกะสีในรูปของ Franklinite มีความสามารถในการละลายในกรดซัลฟิวริกต่ำกว่าสังกะสี และมีการตกตะกอนกลับไปในช่วงหลังการชะละลายที่ 6 ชั่วโมง จึงทำให้ยังคงหลงเหลืออยู่ในกากตะกอน และทำให้ประสิทธิภาพในการเก็บกลับคืนของสังกะสีลดลงที่เวลา 6 ชั่วโมง

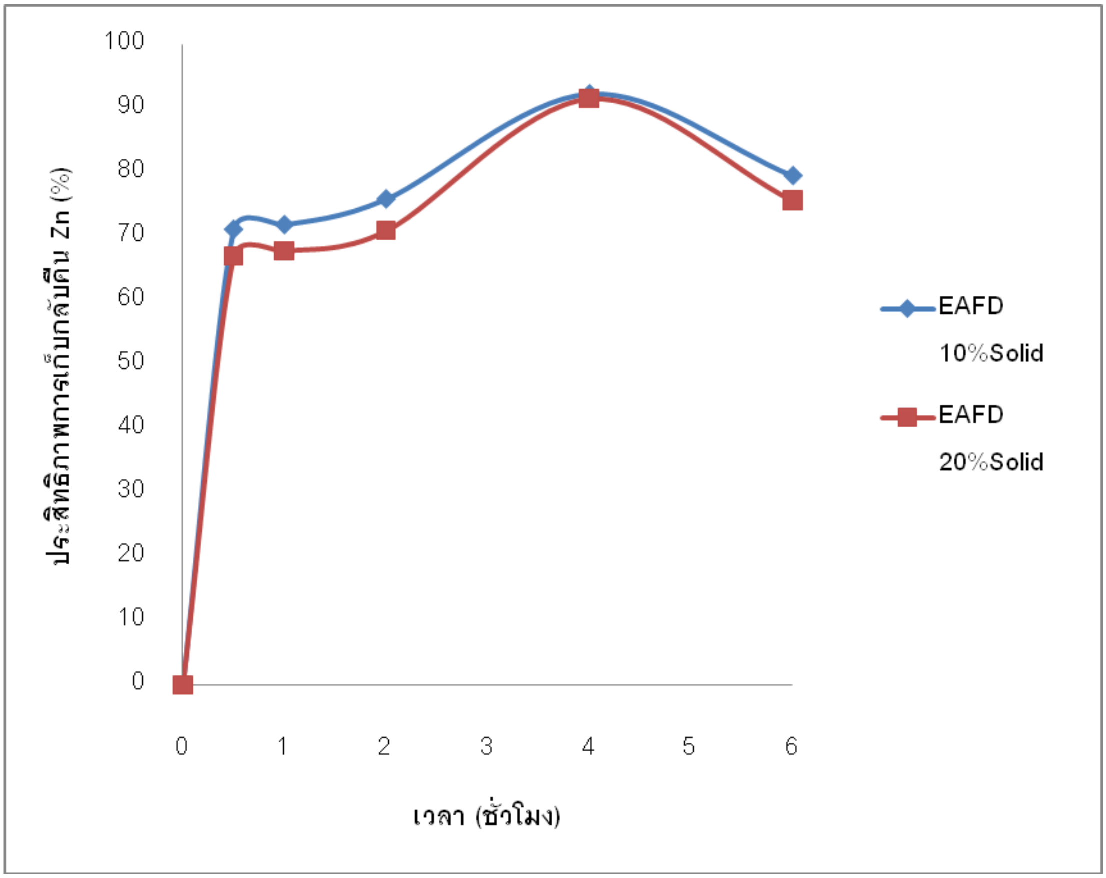
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนสังกะสีที่เวลาที่ต่างๆ กันที่ใช้ในการชะละลายในตัวอย่างฝุ่นแต่ละแหล่ง

ตัวอย่าง	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณZinc ในสารละลาย (g)	ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน (%)
EAFD1	0.5	1.970	71.16
	1	1.950	71.89
	2	2.080	75.90
	4	2.530	92.32
	6	2.180	79.55
EAFD2	0.5	1.110	46.91
	1	1.610	68.05
	2	1.820	76.92
	4	2.255	95.31
	6	1.690	71.42
EAFD3	0.5	1.295	66.36
	1	1.325	67.90
	2	1.455	74.56
	4	1.790	91.73
	6	1.530	78.41



ภาพที่ 4.11 ฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าก่อนการชะละลาย (ดำ) หลังชะละลาย 4 ชั่วโมง (แดง) หลังชะละลาย 6 ชั่วโมง (น้ำเงิน)

4.2.3 **อิทธิพลของความข้นที่ใช้ในการชะละลาย** (Solid/Liquid Ratio)



ภาพที่ 4.12 อิทธิพลของความข้นในการชะละลาย

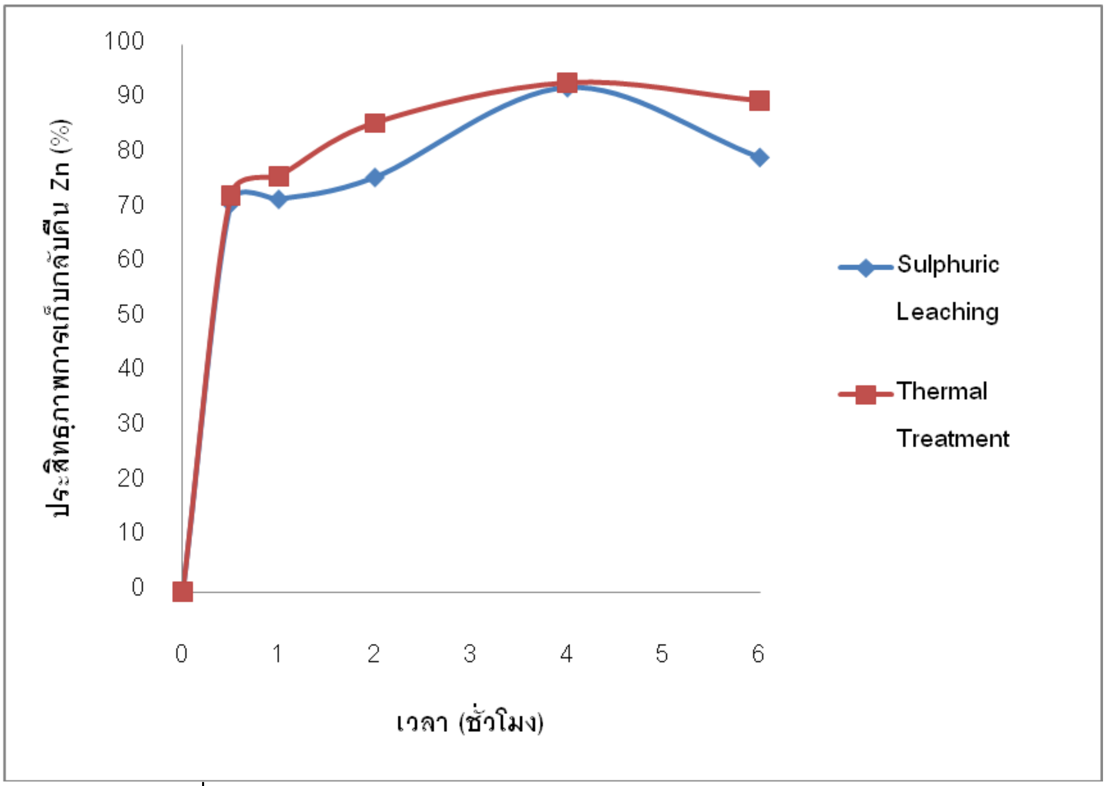
จากการทดลองทำการเปรียบเทียบความข้น (Solid/Liquid Ratio) ที่ในการชะละลาย ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร โดยใช้กรดซัลฟิวริกเจือจางจำนวน 100 มิลลิลิตรและใช้ตัวอย่างฝุ่น 10 กรัม (10% Solid) และ 20 กรัม (20% Solid) ใช้ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4.12 พบว่าประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน พบว่าตัวอย่างฝุ่น 10 กรัม (10% Solid) มีประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนสูงกว่า ตัวอย่างฝุ่น 20 กรัม (20% Solid) ในช่วงเวลาเริ่มต้น และมีประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนลดลงต่ำกว่า ที่เวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าปริมาณของซัลเฟตอิออน (SO_4^{2-}) ที่ทำปฏิกิริยากับโลหะนั้นในตัวอย่างฝุ่น 20 กรัม (20% Solid) ไม่เพียงพอจึงทำให้เกิดการแย่งชิงซัลเฟตอิออน (SO_4^{2-}) จากโลหะอื่น ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

การเก็บกลับคืนสังกะสีโดยรวมปริมาณตัวอย่างที่ในการชะละลายที่เหมาะสม คือ ตัวอย่างฝุ่น 10 กรัม (10% Solid) อยู่ในช่วงร้อยละ 70-92 ปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนที่ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการชะละลายต่างๆ กัน

ตัวอย่าง	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณZinc ในสารละลาย (g)	ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน (%)
EAFD1 10% Solid	0.5	1.970	71.16
	1	1.950	71.89
	2	2.080	75.90
	4	2.530	92.32
	6	2.180	79.55
EAFD 20% Solid	0.5	3.672	77.00
	1	3.718	67.83
	2	3.892	71.01
	4	5.136	93.71
	6	4.150	75.72

4.2.4 ผลการศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกโดยใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมด้วย (Thermal Treatment)



ภาพที่ 4.13 เปรียบเทียบการชะละลายโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกและ
การชะละลายโดยใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมด้วย

จากการทดลองทำการเปรียบเทียบระหว่างการชะละลายโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเพียงอย่างเดียวกับการชะละลายโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับกระบวนการทางความร้อนที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร โดยใช้กรดซัลฟิวริกเจือจางจำนวน 100 มิลลิลิตรและใช้ตัวอย่างฝุ่น 10 กรัม (10% Solid) ใช้ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ภาพที่ 4.13 พบว่าประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน โดยประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนโดยใช้กระบวนการทางความร้อนนั้นสูงกว่า โดยมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 10-15 และมีประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนสังกะสีได้มากสูงสุดถึง ร้อยละ 94 และปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนที่การชะละลายโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเพียงอย่างเดียวกับการชะละลายโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับกระบวนการทางความร้อน

ตัวอย่าง	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณZinc ในสารละลาย (g)	ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน (%)
Sulphuric Leaching	0.5	1.970	71.16
	1	1.950	71.89
	2	2.080	75.90
	4	2.530	92.32
	6	2.180	79.55
Thermal Treatment	0.5	1.986	72.48
	1	2.084	76.04
	2	2.350	85.76
	4	2.550	93.05
	6	2.460	89.77

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการชะละลายของฝุ่นจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลาย (Acid Normality)

จากผลการทดลองทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการชะละลาย ที่ความเข้มข้น 0.5 1 และ 2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตรและใช้ตัวอย่างฝุ่น 10 กรัม (10%Solid) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในการเก็บกลับคืนสังกะสีจากฝุ่นจากเตาหลอมไฟฟ้าโดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นต่างๆพบว่า ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลเพียงเล็กน้อย โดยความเข้มข้นที่เหมาะสม คือ 1 โมลต่อลิตร โดยจะเห็นว่าปริมาณสังกะสีที่ถูกชะละลายออกมาได้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนดังกล่าวอยู่ในช่วงร้อยละ 57-72

2. อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการชะละลาย (Shaking Time)

จากผลการทดลองการเก็บกลับคืนสังกะสีจากฝุ่นเหล็กจากเตาหลอมไฟฟ้า ด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาที, 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนของสังกะสีจะมีค่าไม่ต่างกันมากและมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจากผลการทดลองเมื่อพิจารณาการถูกชะละลายของเหล็กด้วย จะเห็นว่ายิ่งใช้เวลาในการชะละลายเพิ่มมากขึ้น สังกะสีจะถูกละลายออกมาได้ใกล้เคียงกันในขณะที่เหล็กจะถูกชะละลายเพิ่มขึ้น

3. อิทธิพลของความข้นที่เหมาะสมในการชะละลาย (Solid/Liquid Ratio)

จากผลการทดลองทำการเปรียบเทียบปริมาณตัวอย่างที่ในการชะละลาย ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตรและใช้ตัวอย่างฝุ่น 10 กรัม (10% Solid) และ 20 กรัม (20% Solid) เป็นเวลา 30 นาที, 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมงพบว่า

ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนสังกะสีโดยรวมปริมาณตัวอย่างที่ในการชะละลายที่เหมาะสม คือ ตัวอย่างฝุ่น 10 กรัม (10% Solid) อยู่ในช่วงร้อยละ 70-92

4. แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในการชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกโดยใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมด้วย

จากผลการทดลองทำการเปรียบเทียบระหว่างการชะละลายโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเพียงอย่างเดียวกับการชะละลายโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับกระบวนการทางความร้อน ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และใช้ตัวอย่างฝุ่น 10 กรัม (10% Solid) ใช้ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที, 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนสังกะสีโดยใช้กระบวนการทางความร้อนนั้นสูงกว่าเพียงเล็กน้อย และมีประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนสังกะสีได้มากสูงสุดถึงร้อยละ 94

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดลองชะละลายในเรื่องอิทธิพลของอุณหภูมิ เพื่อเปรียบเทียบกับการทดลองชะละลายด้วยสารละลายเคมี
2. ควรศึกษาทดลองชะละลายด้วยสารเคมีชนิดอื่นเปรียบเทียบ
3. ควรมีการนำผลการทดลองไปประยุกต์กับการทดลองในระดับขยายผล เพื่อใช้กับการเก็บกลับคืนสังกะสีในภาคอุตสาหกรรม

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน. 2552. รายงานฉบับสมบูรณ์ โลหะกับการพัฒนาประเทศ สังกะสี. สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์. 2553. การเก็บกลับคืนทรัพยากรและนำกลับมาใช้ใหม่. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน). 2553. ความรู้เกี่ยวกับสังกะสี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.zincinfothailand.com/index.php?lay=show&ac=article&Ntype=3[2012, March 21]

บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน). 2553. ประโยชน์ของสังกะสีต่อภาคอุตสาหกรรม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.zincinfothailand.com/index.php?lay=show&ac=article&Ntype=5 [2012, March 21]

ภิญโญ มีชำนะ. 2550. เอกสารประกอบคำสอนรายวิชา Mineral and Processing Engineering. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, กรม. 2554. เทคโนโลยีการรีไซเคิลตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าและเตาอุ่นน้ำเหล็ก. โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการนำวัสดุเหลือใช้และกากของเสียมาใช้ประโยชน์.

อุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, กรม. 2554. เทคโนโลยีการรีไซเคิลฝุ่นเหล็ก. โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการนำวัสดุเหลือใช้และกากของเสียมาใช้ประโยชน์.

ภาษาอังกฤษ

A.R. Burkin. 1966. The Chemical of Hydrometallurgical Processes. E. & F. N. Spon Ltd. London.

E.C. Barretta, E.H. Nenniger and Jacek Dziewinski. 1992. A hydrometallurgical process to treat carbon steel electric arc furnace dust. Hydrometallurgy, 30: 59-68 pp.

Lee et al. 2002. Hydrometallurgical method for recovery of zinc from electric arc furnace dust. United States Patent.

Nathalie Leclerc, Eric Meux and Jean-Marie Lecuire. 2003. Hydrometallurgical extraction of zinc from zinc ferrites. Hydrometallurgy 70: 175–183 pp.

P. Oustadakis, P.E. Tsakiridis, A. Katsiapi and S. Agatzini-Leonardou. 2010. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD) Part I: Characterization and leaching by diluted sulphuric acid. Journal of Hazardous Materials, 179: 1–7 pp.

Preston C. Holloway, Thomas H. Etsell, and Andrea L. Murland. 2007. Roasting of La Oroya Zinc Ferrite with Na2CO3. The Minerals Metals & Materials Society and ASM International: 781-791 pp.

Reyad A. Shawabkeh. 2010. Department of Chemical Engineering, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran, Saudi Arabia. Hydrometallurgical extraction of zinc from Jordanian electric arc furnace dust. Hydrometallurgy, 104: 61–65 pp.

Sarka Langova, Juraj Leako and Dalibor Matysek. 2009. Selective leaching of zinc from zinc ferrite with hydrochloric acid. Hydrometallurgy, 95: 179–182 pp.

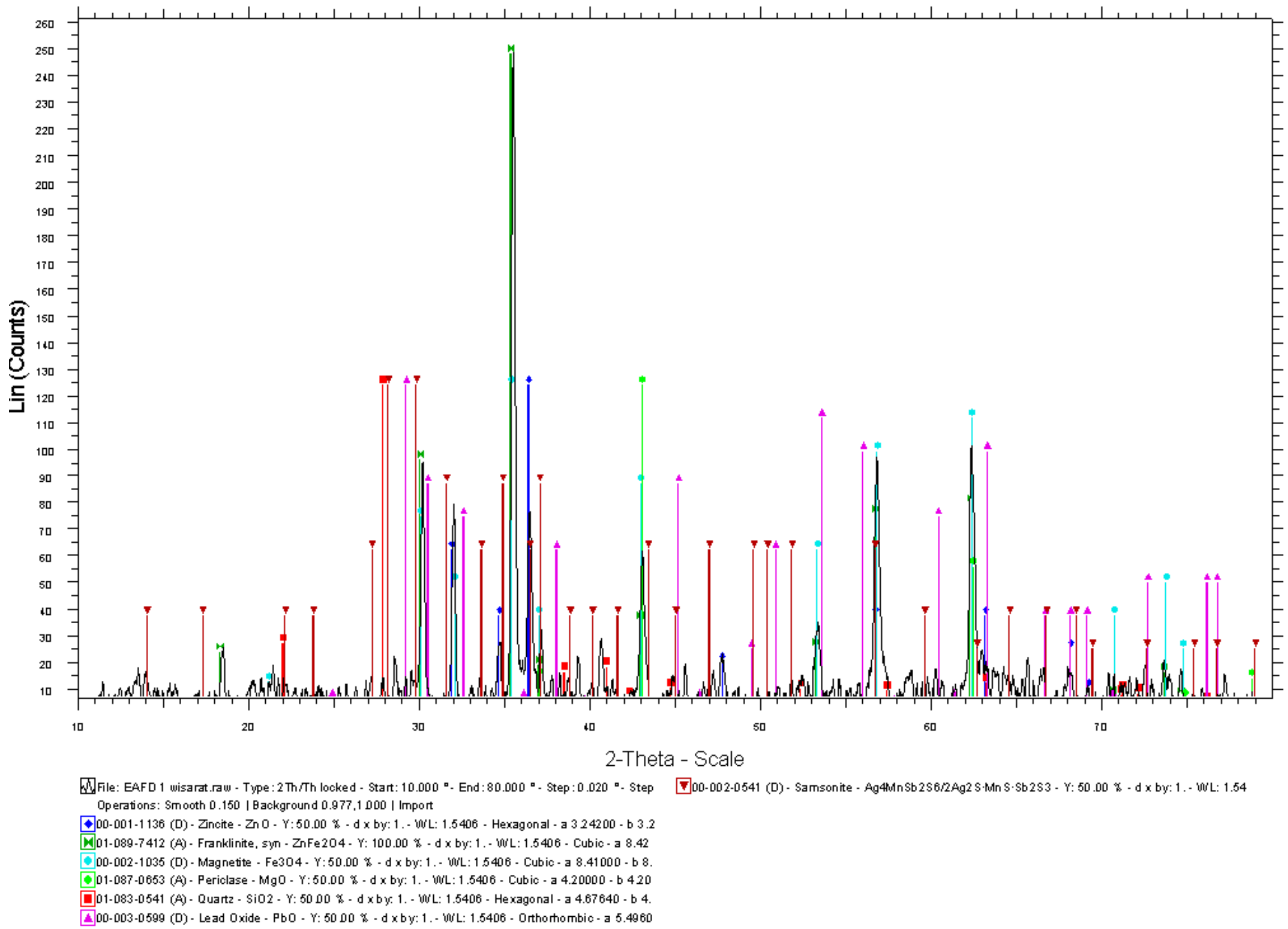
Sureerat Sukonthanit. 1998. Zinc Metal Recovery from Electric Arc Furnace Dust. Thailand: Master's Thesis, Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

W. Derda and K. Mierzwa. 2008. The thermal treatment of electric arc furnace dust under low gas phase pressure. Metalurgija, 48: 91-94 pp.

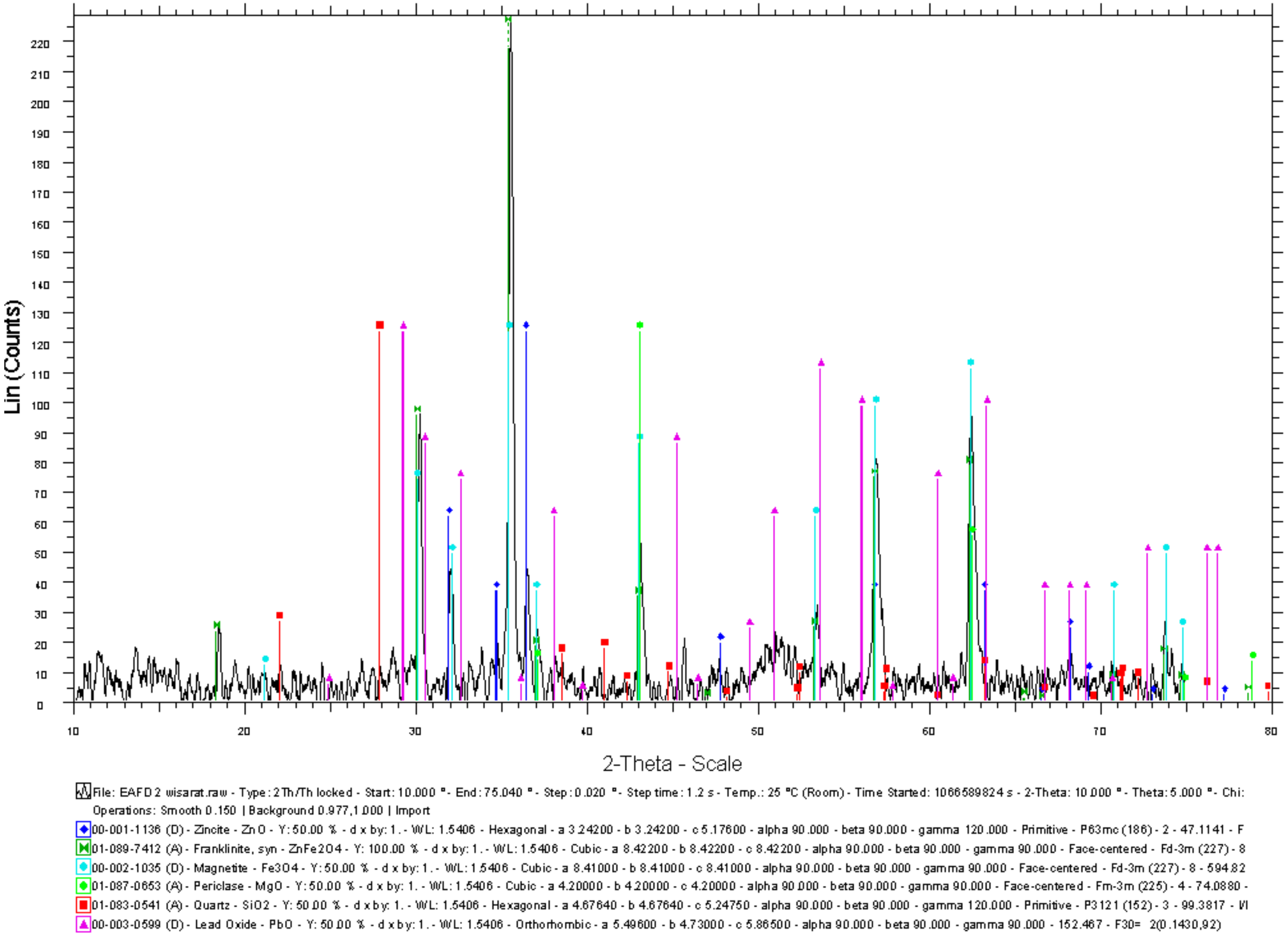
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

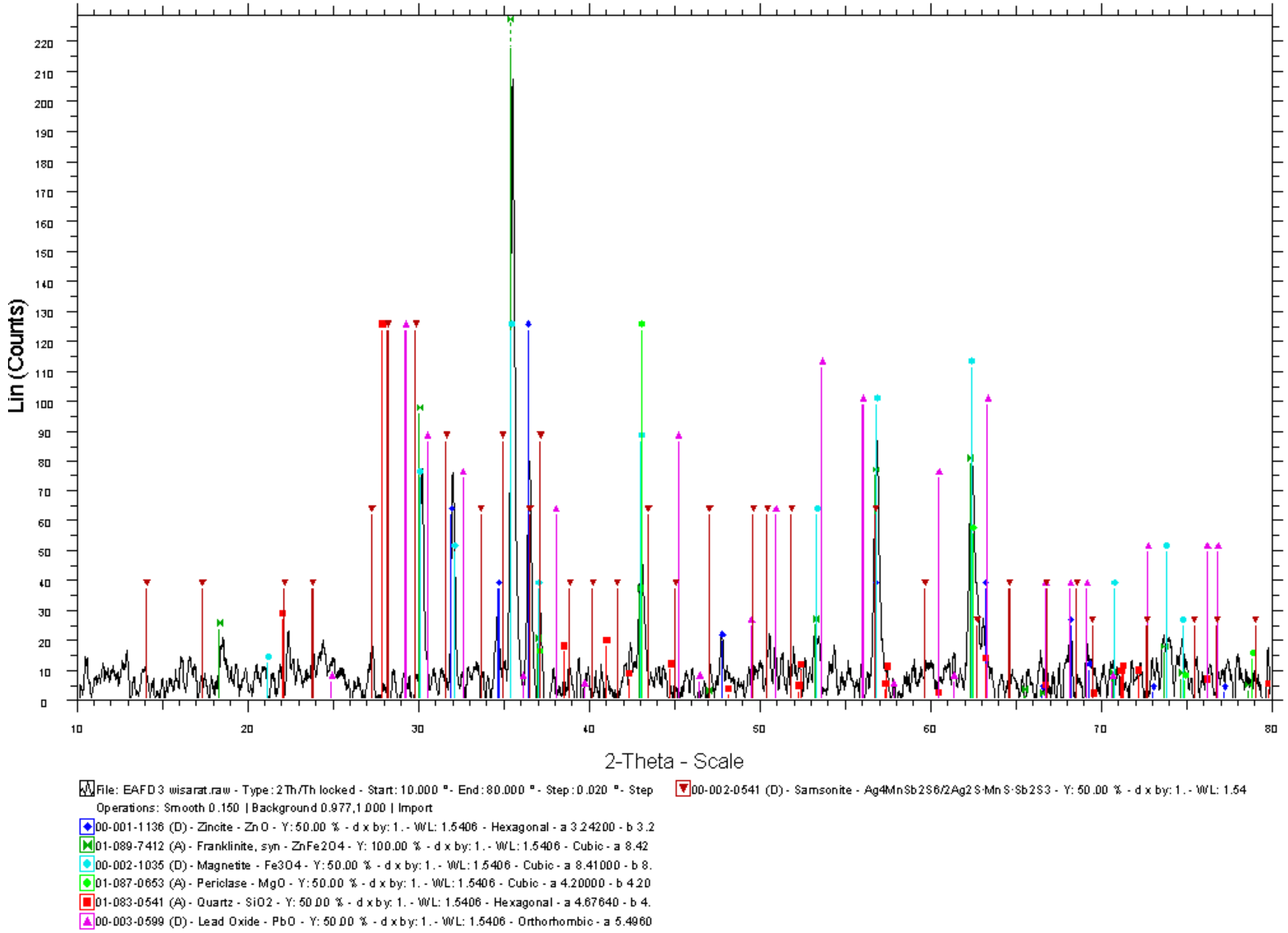
ข้อมูลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของฝุ่นจากเตาหลอมไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)



ภาพที่ ก.1 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของฝุ่นจากเตาหลอมไฟฟ้าจากจังหวัดระยอง (EAFD.1)



ภาพที่ ก.2 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของฝุ่นจากเตาหลอมไฟฟ้าจากจังหวัดกรุงเทพมหานคร (EAFD.2)



ภาพที่ ก.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของฝุ่นจากเตาหลอมไฟฟ้าจากจังหวัดสมุทรปราการ (EAFD.3)

ภาคผนวก ข

ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลาย (Acid Normality)

ตาราง ข.1 ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนที่ความเข้มข้นที่ต่างๆ กันที่ใช้ในการชะละลายในตัวอย่างฝุ่นแต่ละแหล่ง เวลา 1 ชั่วโมง ปริมาณสารตัวอย่าง 10 กรัม

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (mol/L)	ปริมาณ Zinc เริ่มต้น (g)	ปริมาณ Zinc ที่ละลายได้ (ppm)	ปริมาณ Zinc ที่ละลายได้ (g)	ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน (%)
EAFD1	0.5	2.7403	16607.5	1.661	60.60
	1		19500	1.950	71.16
	2		19955	1.990	72.62
EAFD2	0.5	2.3660	14100	1.410	59.59
	1		16600	1.660	70.16
	2		17050	1.705	72.06
EAFD3	0.5	1.9514	11250	1.125	57.65
	1		13250	1.325	67.90
	2		13750	1.375	70.46

ภาคผนวก ค

ผลการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการชะละลาย (Shaking Time)

ตาราง ค.1 ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนที่เวลาที่ต่างๆ กันที่ใช้ในการชะละลายในตัวอย่างฝุ่นแต่ละแหล่ง ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ปริมาณสารตัวอย่าง 10 กรัม

ตัวอย่าง	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ Zinc เริ่มต้น (g)	ปริมาณ Zinc ที่ละลายได้ (ppm)	ปริมาณ Zinc ที่ละลายได้ (g)	ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน (%)
EAFD1	0.5	2.7403	19700	1.970	71.16
	1		19500	1.950	71.89
	2		20800	2.080	75.90
	4		25300	2.530	92.32
	6		21800	2.180	79.55
EAFD2	0.5	2.3660	11100	1.110	46.91
	1		16100	1.610	68.05
	2		18200	1.820	76.92
	4		22550	2.255	95.31
	6		16900	1.690	71.42
EAFD3	0.5	1.9514	12950	1.295	66.36
	1		13250	1.325	67.90
	2		14550	1.455	74.56
	4		17900	1.790	91.73
	6		15300	1.530	78.41

ตาราง ค.2 ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนเหล็กที่เวลาที่ต่างๆ กันที่ใช้ในการชะละลายในตัวอย่างฝุ่นแต่ละแหล่ง ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ปริมาณสารตัวอย่าง 10 กรัม

ตัวอย่าง	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ Zinc เริ่มต้น (g)	ปริมาณ Zinc ที่ละลายได้ (ppm)	ปริมาณ Zinc ที่ละลายได้ (g)	ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน (%)
EAFD1	0.5	1.2733	2515	0.2515	19.69
	1		2625	0.2625	20.55
	2		7662.5	0.7662	59.99
	4		3738.75	0.3738	29.27
	6		3280	0.3280	25.68

ภาคผนวก ง

ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวอย่างที่เหมาะสมในการชะละลาย

(Solid/Liquid Ratio)

ตาราง ง.1 ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนที่ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการชะละลายต่างๆ กัน ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร

ตัวอย่าง	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ Zinc เริ่มต้น (g)	ปริมาณ Zinc ที่ละลายได้ (ppm)	ปริมาณZinc ที่ละลายได้ (g)	ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน (%)
EAFD1	0.5		19700	1.970	71.16
10%	1		19500	1.950	71.89
Solid	2	2.7403	20800	2.080	75.90
	4		25300	2.530	92.32
	6		21800	2.180	79.55
	0.5		36720	3.672	77.00
EAFD1	1		37185	3.718	67.83
20%	2	5.4806	38920	3.892	71.01
Solid	4		51364	5.136	93.71
	6		41500	4.150	75.72

ภาคผนวก จ

ผลศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในการชะละลาย ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกโดยใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมด้วย

ตาราง จ.1 ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืนที่การชะละลายโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเพียงอย่างเดียวกับการชะละลายโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับกระบวนการทางความร้อน ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ 10 กรัม

ตัวอย่าง	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณ Zinc เริ่มต้น (g)	ปริมาณ Zinc ที่ละลายได้ (ppm)	ปริมาณZinc ที่ละลายได้ (g)	ประสิทธิภาพการเก็บกลับคืน (%)
Sulphuric Leaching	0.5	2.7403	19700	1.970	71.16
	1		19500	1.950	71.89
	2		20800	2.080	75.90
	4		25300	2.530	92.32
	6		21800	2.180	79.55
Thermal Treatment	0.5	2.7403	19860	1.986	72.48
	1		20845	2.084	76.04
	2		23500	2.350	85.76
	4		25500	2.550	93.05
	6		24600	2.460	89.77

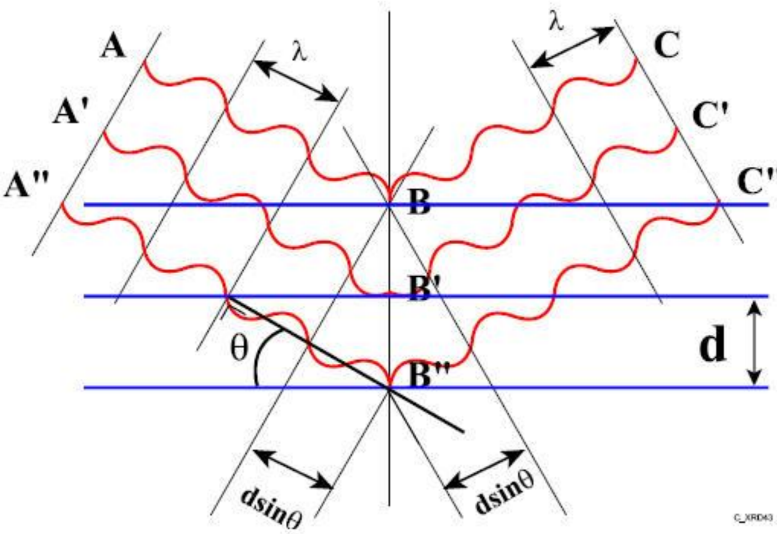
ภาคผนวก ฉ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ฉ.1 X-ray Diffractometer (XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาองค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหา ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบางและคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัหลักการของ Bragg's law หรือ $2d\sin\theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ



ภาพที่ ฉ.1 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในมุมต่าง ๆ

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือหาองค์ประกอบตัวอย่างที่เป็น amorphous ได้ เนื่องสารตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหาปริมาณของส่วนที่เป็น amorphous ในตัวอย่าง ว่ามีสัดส่วนกี่ % ได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

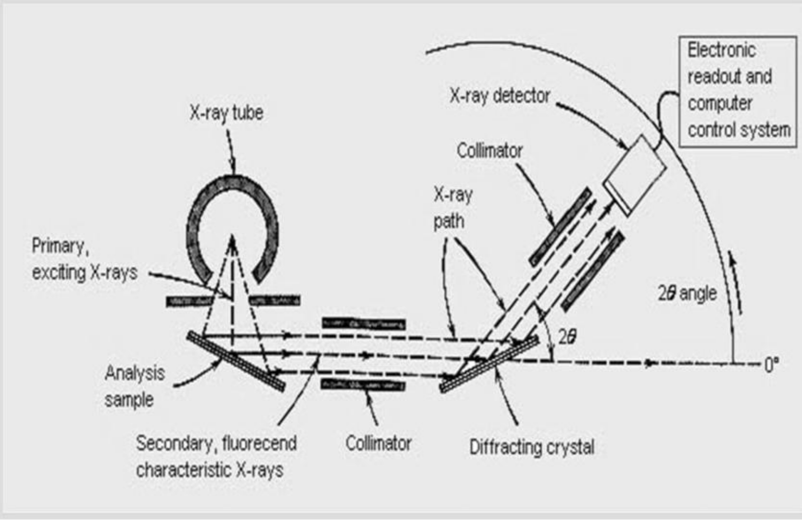
เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็น powder ได้ ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผง จะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 mesh หรือ ประมาณ 40 micron (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้งจะอยู่ประมาณ 1-2 กรัม

ภาพที่ ฉ.2 เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) **รุ่น** Bruker AXS Model D8 Discover

ฉ.2 X-ray Fluorescence spectrometry (XRF)

X-ray fluorescence spectrometry (XRF) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่างหลักการและวิธีการวิเคราะห์ เมื่อรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray photon) จากหลอดรังสีเอ็กซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างจะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโต้อิเล็กตรอน (photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอน ซึ่งที่สภาวะนี้อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทน ที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการ ปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray photon ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ฟลูออเรสเซนต์”(Fluorescence) พลังงานของรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนวงนอกที่เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานกับระดับพลังงานของช่องว่างที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ รังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟลูออเรสเซนต์จะเป็นรังสีเอ็กซ์ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ดังนั้นเทคนิค XRF จึงใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบของสารตัวอย่าง อย่างไรก็ตามเทคนิค XRF จะไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุ 11 ธาตุแรกของตารางธาตุได้

รังสีเอ็กซ์ฟูออเรสเซนต์ที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่าน collimator ในรูปลำรังสีขนานไปยัง Diffracting crystal ซึ่งมีค่าระยะห่างระหว่างระนาบผลึก(d) ที่แน่นอนเช่น ควอทซ์ , ลิเทียม-ฟูออไรด์ , ไมกาฯลฯ โดย Diffracting crystal จะทำให้รังสีเอ็กซ์เกิดการเลี้ยวเบนเข้าสู่เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ (X-ray detector) โดยปกติ Diffracting crystal จะทำมุม Theta กับระนาบรังสีขนานจากcollimator และทำมุม 2Theta กับเครื่องตรวจวัดดังภาพที่ ฉ.3



ภาพที่ ฉ.3 แสดงการทำมุม Theta กับระนาบรังสีขนานจาก colimator และทำมุม 2Theta กับเครื่องตรวจวัด

การคำนวณหาค่าความยาวคลื่น (Wavelength,l)ของรังสีเอ็กฟูออเรสเซนต์จากสารตัวอย่าง จะทำได้โดยแทนค่าในสมการ Bragg's law

$$2\mathrm{d}\sin\theta = \mathrm{n}\lambda$$

ค่าความยาวคลื่นที่คำนวณได้จะสามารถชี้บอกได้ว่ารังสีเอ็กซ์-ฟูออเรสเซนต์ของสารตัวอย่างประกอบด้วยธาตุใดบ้าง เทคนิคการวิเคราะห์นี้ เรียกว่า Wavelength dispersive XRF

ภาพที่ ฉ.4 เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) รุ่น Philips model PW2400

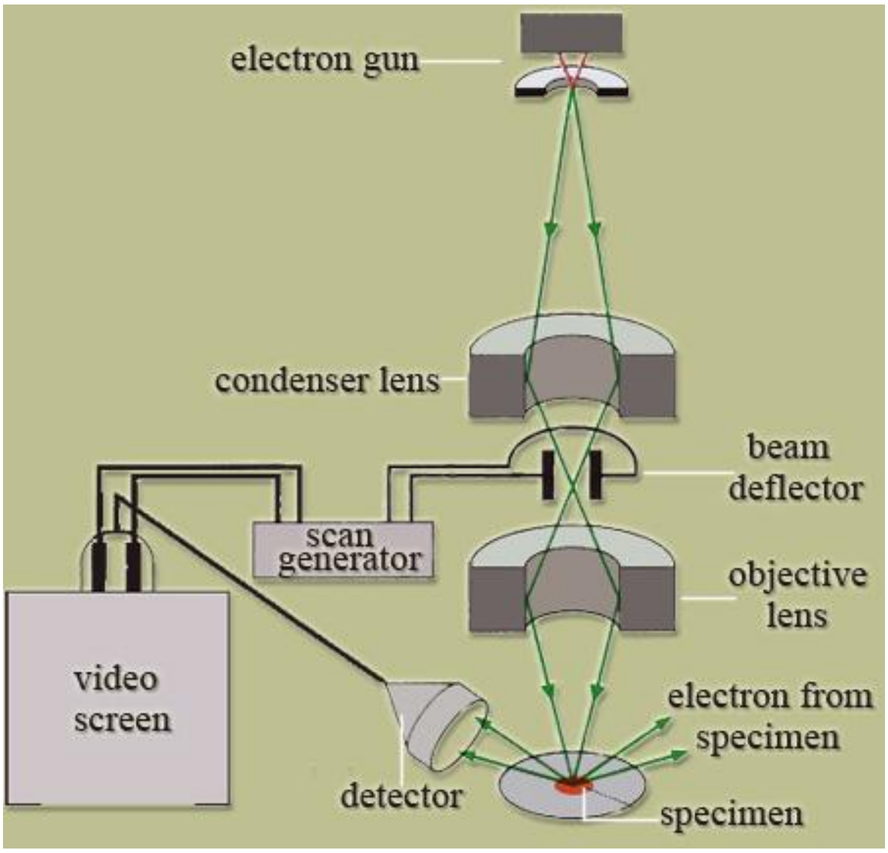
ฉ.4 Inductively Coupled Plasma- Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุต่างๆ ในสารตัวอย่าง สามารถจะวิเคราะห์ธาตุได้ 70 ธาตุ (ตามตารางธาตุ) ใช้ประโยชน์ในการทดสอบตัวอย่างด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม ธรณีวิทยา สิ่งแวดล้อม วิทยาศาสตร์การแพทย์ เช่นหาปริมาณธาตุในดินเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของดินที่เป็นอาหารในพืช ผัก ผลไม้ วิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่เป็นพิษในสิ่งแวดล้อม เช่น ฝุ่น ดิน แหล่งน้ำ น้ำทิ้งจากที่อยู่อาศัยและโรงงานอุตสาหกรรม วิเคราะห์หาชนิดของแร่ธาตุในชั้นดิน หิน และวิเคราะห์หาธาตุแคดเมียม ตะกั่ว ในปลาหมึกและอาหารทะเล หาปริมาณธาตุโบรอนในไม้ยางพารา และสารเคมีรักษาเนื้อไม้ เป็นต้น การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICPs นี้ก้าวหน้ามาก สามารถทำการวิเคราะห์ทั้งทางคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ วิเคราะห์ธาตุได้ในปริมาณน้อยระดับส่วนในพันล้านส่วน หรือ ppb และส่วนในล้านส่วน หรือ ppm รวมทั้งวิเคราะห์ได้หลายๆธาตุในขณะเดียวกัน (Simutaneouse multielements analysis) โดยใช้เวลาไม่ถึงนาที สารตัวอย่างจะอยู่ในรูปของแข็งจะเป็นผงหรือเป็นก้อนก็ได้ ของเหลวหรือแก๊ส สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสิ้นซึ่งตัวอย่างในรูปของแข็งต้องเตรียมตัวอย่างให้กลายเป็นสารละลายโดยทำการย่อยตัวอย่างด้วยเทคนิค Dry- ashing หรือ Acid digestion ก่อนการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วย ICPs

ภาพที่ ฉ.5 เครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) **รุ่น** Jobin Yvon Horiba model Ultima

ฉ.5 Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



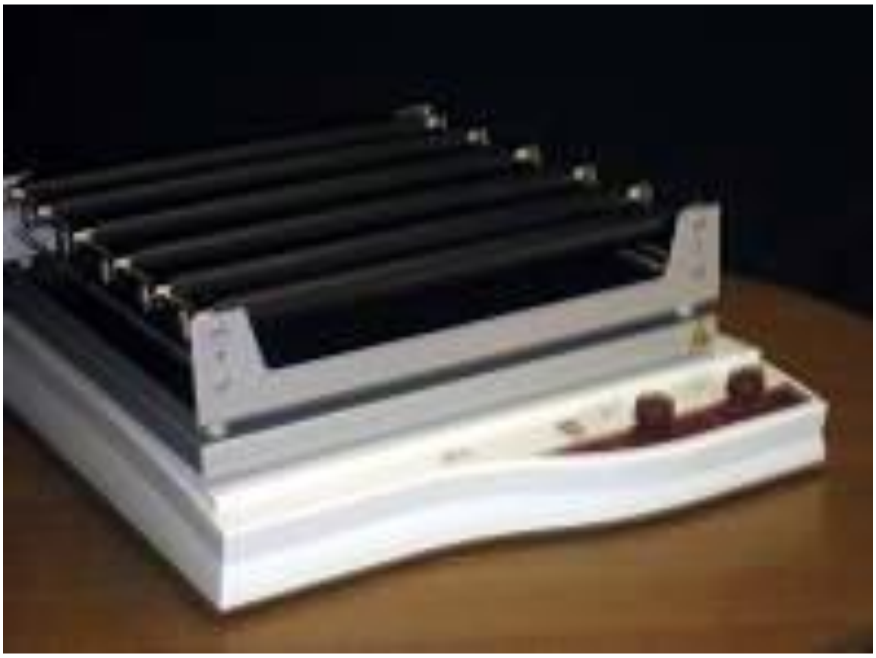
ภาพที่ ฉ.6 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens)เพื่อทำให้กลุ่ม

อิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอกนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

ภาพที่ ฉ.7 เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) Hitachi model S-3400N

ฉ.6 เครื่องเขย่าแนวราบ รุ่น GFL 3005



ภาพที่ ฉ.8 เครื่องเขย่าแนวราบ รุ่น GFL 3005

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์	:	นางสาว วิสารัช มั่นประพันธ์
วัน เดือน ปี เกิด	:	26 กันยายน พ.ศ. 2528
ที่อยู่ที่ติดต่อได้	:	4/2 หมู่ที่ 9 ตำบลบางกอบัว อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ 10130
อีเมล์	:	wisaratm@gmail.com
การศึกษา		
ประถมศึกษา	:	โรงเรียนลาซาล จังหวัดกรุงเทพมหานคร
มัธยมศึกษาตอนต้น	:	โรงเรียนลาซาล จังหวัดกรุงเทพมหานคร
มัธยมศึกษาตอนปลาย	:	โรงเรียนพระโขนงพิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ปริญญาตรี	:	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2550
ปัจจุบัน	:	ได้เข้ารับการศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552