รายงานวิชาการ

# การปรับปรุงคุณภาพสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากฝุ่นเหล็ก โดยวิธีให้ความร้อนด้วยเตาเหนี่ยวนำ

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

รายงานวิชาการ

# การปรับปรุงคุณภาพสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากฝุ่นเหล็ก โดยวิธีให้ความร้อนด้วยเตาเหนี่ยวนำ

นายณรงค์ ยืนยงหัตถภรณ์

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

**อธิบดีกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่**

นายวิษณุ ทับเที่ยง

**จัดพิมพ์โดย** กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่
ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ (662) 202 3888 โทรสาร (662) 354 0392

**พิมพ์ครั้งที่ 1** พ.ศ. 2563
จำนวน 20 เล่ม

**ข้อมูลการลงรายการบรรณานุกรม**

ณรงค์ ยืนยงหัตถภรณ์.
การปรับปรุงคุณภาพสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากฝุ่นเหล็กโดยวิธีให้ความร้อนด้วยเตาเหนี่ยวนำ/
โดย ณรงค์ ยืนยงหัตถภรณ์. กรุงเทพฯ :
กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2563.
159 หน้า : ภาพประกอบ : ตาราง ; 30 ซม.
รายงานวิชาการ

# บทคัดย่อ


ฝุ่นเหล็กของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ที่เก็บได้จากกระบวนการอุปกรณ์ดักจับฝุ่นที่รวบรวมได้จากกระบวนการหล่อหลอมเศษเหล็กโลหะทั่วไป รวมทั้งไอระเหิดและตะกรันจากการเผาฝุ่นเหล็กของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ถูกนำมาศึกษาเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการเผาของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด เนื่องจากฝุ่นสังกะสีออกไซด์ยังมีคุณภาพต่ำ

ในการทดลองนี้ได้นำฝุ่นเหล็กที่เป็นวัตถุดิบดังกล่าวมาดำเนินการ 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. ทดสอบการย่างฝุ่นเหล็กเพื่อตรวจสอบมลทินและการหลอมตัวเกาะติดก่อนการทำรีดักชัน

2. เปรียบเทียบการเผาฝุ่นเหล็กในสภาวะรีดักชันด้วยเตาเหนี่ยวนำเพื่อตรวจสอบฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่ได้กับฝุ่นสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ที่ได้จากการเผาด้วยเตา Blast Furnace

3. ปรับปรุงคุณภาพของสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด โดยวิธีการเผารีดักชันฝุ่นสังกะสีออกไซด์ดังกล่าวที่สภาวะต่าง ๆ

โดยใช้กระบวนการเผาทั้งออกซิเดชันและรีดักชันด้วยเตาสองชนิด ได้แก่ เตาเผาแบบเหนี่ยวนำและเตาไฟฟ้าแบบลวดความต้านทาน ยี่ห้อ Carbolite โดยได้ทำการสร้างเครื่องมือเพื่อจัดเก็บฝุ่นไอระเหิดด้วยน้ำที่เหมาะสมกับเบ้าหลอมของเตาเหนี่ยวนำ

ผลการศึกษาพบว่า ฝุ่นเหล็กที่เป็นวัตถุดิบของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ ที่เป็นมลทิน ได้แก่ ตะกั่ว กำมะถัน และธาตุฮาโลเจน (คลอรีน) เป็นต้น ซึ่งกำมะถันสลายตัวจากการเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 450 $^{o}$C และฝุ่นเหล็กยังเกิดการหลอมตัวเกาะติดกันเล็กน้อยของมลทินที่มีอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 900 – 1,000 $^{o}$C

ไอระเหิดจากการเผาฝุ่นเหล็ก ที่อุณหภูมิ 900 $^{o}$C ด้วยเตาเหนี่ยวนำ มีคุณสมบัติทาง XRF ใกล้เคียงกับไอระเหิดที่บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ผลิตได้ ในขณะเดียวกัน ผลการล้างไอระเหิดด้วยน้ำร้อนและกรดซัลฟูริกที่บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ผลิตได้ พบว่าธาตุฮาโลเจน (คลอรีน) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการลดมลทินจากธาตุดังกล่าว

เมื่อทำการศึกษาการเผารีดักชันฝุ่นไอระเหิดที่บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด เก็บได้ พบว่าที่อุณหภูมิ เวลา และปริมาณถ่านต่าง ๆ กันด้วยเตา Carbolite พบว่า ฝุ่นสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ที่เหลืออยู่ในเบ้ามีองค์ประกอบของสังกะสีออกไซด์ สังกะสีซิลิเกตและโลหะสังกะสี ในขณะที่ผลวิเคราะห์ไอระเหิดด้วย XRD พบองค์ประกอบของสังกะสีออกไซด์ Cerussite และ Galena

ผลการเผายังแสดงให้เห็นว่าสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้ามีค่าของเปอร์เซนต์สังกะสีสูงสุด 84.88% ปริมาณซิลิกาต่ำสุด 7,980 ppm ปริมาณตะกั่วต่ำสุดเท่ากับ 273 ppm และปริมาณกำมะถันต่ำสุดเท่ากับ 552 ppm

# ABSTRACT

Iron dust as waste of dust collector from various steel and recycle mills collected as raw material for P.S.P. Metal Industry Co., Ltd. including zinc oxide vapor and slag obtained from its blast furnace product were used in this investigation in order to develop techniques for improving zinc oxide vapor quality.

The experiments were carried on according to 3 categories:

1. Heating under oxidation state to determine effect of impurities and sintering behaviors of the iron dust waste,

2. Incinerating iron dust under induction furnace where all products collected and compared with company's products while determining alternative techniques of improving qualities of zinc oxide,

3. Improving company's zinc oxide vapor qualities under reduction condition of those.

The technique uses both oxidation and reduction conditions incinerating. Accordingly, the induction furnace and muffle furnace were used while developing a water collecting apparatus of zinc oxide vapor created from induction furnace.

The experiment showed that iron dust as raw material of P.S.P. Metal Industry Co., Ltd. contained impurities mainly as lead, sulphur, and halogen. The sulphur content tended to decompose under roasting at 450 $^{\circ}$C and the iron dust also sintered from its impurities at 900 – 1,000 $^{\circ}$C.

Zinc oxide vapor at 900 $^{\circ}$C collected under said apparatus were investigated under XRF showed resemble properties as the company's vapor product while halogen constituent of company's zinc oxide vapor were much lessen under hot washing and hot acid washing.

The previously collected zinc oxide vapor under said apparatus was investigated under XRD and found the composition of zinc oxide, Cerussite, and Galena. This led to the improving technique presented in this investigations. The company's zinc oxide vapors were then tested in muffle furnace under anthracite reduction incinerating condition where the zinc oxide left in the crucible should contain less or no such impurities.

The result showed the highest zinc percentage as 84.88%, the lowest silica content as 7,980 ppm, the lowest lead content as 273 ppm, and the lowest sulphur content as 552 ppm.

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ

- บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อฝุ่นเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

- บริษัท โกลบอล คอนซัลติ้ง แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือทดลอง

- เจ้าหน้าที่กลุ่มนวัตกรรมอุตสาหกรรมแร่และกลุ่มวิเคราะห์และตรวจสอบ กองนวัตกรรมวัตถุดิบและอุตสาหกรรมต่อเนื่อง กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ ที่ให้ความอนุเคราะห์การดำเนินการทดลอง

- นายตรีทิพย์ ศุภสุนทรกุล นายนรินทร์ มหายศนันท์ และนางสาวอาทิตยา สุวคันธกุล กลุ่มจัดหาแหล่งวัตถุดิบอุตสาหกรรม กองบริหารจัดการวัตถุดิบอุตสาหกรรม กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ ที่ให้ความอนุเคราะห์การดำเนินการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเครื่องมือ XRF และ XRD

ณรงค์ ยืนยงหัตถภรณ์

# สารบัญ


หน้า

**บทคัดย่อ** i

ABSTRACT ii

**กิตติกรรมประกาศ** ii

**สารบัญ** iv

**สารบัญตาราง** viii

**สารบัญรูป** x

**1. บทนำ** 1-1

1.1 วัตถุประสงค์ 1-2

1.2 ขอบเขตการศึกษา 1-2

1.3 แนวทางการศึกษา 1-2

1.4 ประโยชน์ 1-2

**2. ลักษณะวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา** 2-1

2.1 สังกะสี 2-1

2.1.1 สมบัติทั่วไป 2-1

2.1.2 แหล่งแร่สังกะสี 2-1

2.1.2.1 ลักษณะทางธรณีวิทยา 2-1

2.1.2.2 แหล่งแร่สังกะสีที่สำคัญของโลก 2-2

2.1.2.3 แหล่งแร่สังกะสีในประเทศไทย 2-4

2.1.3 การใช้ประโยชน์ 2-4

2.1.3.1 ชุบเคลือบเหล็ก 2-5

2.1.3.2 โลหะสังกะสีผสมใช้ฉีดชิ้นงาน 2-5

2.1.3.3 เคมีภัณฑ์ 2-5

2.1.3.4 ทองเหลือง 2-5

2.1.3.5 สังกะสีนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 2-6

2.1.4 การผลิตโลหะสังกะสีจากแร่ 2-6

2.1.4.1 การถลุงสังกะสี 2-7

2.1.4.2 กรรมวิธีการทำโลหะสังกะสีให้บริสุทธิ์ 2-8

2.1.5 อุตสาหกรรมสังกะสีของประเทศไทย 2-8

2.1.6 มาตรฐานของสังกะสี 2-9

# สารบัญ (ต่อ)


| | หน้า |
|---|---|
| 2.2 สังกะสีออกไซด์ | 2-11 |
| 2.2.1 สมบัติทั่วไป | 2-11 |
| 2.2.2 การเกิด | 2-12 |
| 2.2.3 กระบวนการผลิต | 2-12 |
| 2.2.3.1 American Process (direct type) | 2-12 |
| 2.2.3.2 French Process (indirect type) | 2-12 |
| 2.2.3.3 Secondary Zinc Oxide Type | 2-13 |
| 2.2.4 การใช้ประโยชน์ | 2-13 |
| 2.2.4.1 ด้านอุตสาหกรรม | 2-13 |
| 2.2.4.2 ด้านเกษตรกรรม | 2-15 |
| 2.2.4.3 ด้านเภสัชกรรม | 2-16 |
| 2.2.4.4 ด้านเครื่องสำอาง | 2-16 |
| 2.2.4.5 ด้านสิ่งแวดล้อม | 2-17 |
| 2.2.5 มาตรฐานของสังกะสีออกไซด์ | 2-17 |
| 2.3 ฝุ่นเหล็กจากเตาหลอมไฟฟ้า | 2-19 |
| 2.3.1 พัฒนาการของการผลิตเหล็ก | 2-21 |
| 2.3.2 กระบวนการผลิตเหล็ก | 2-24 |
| 2.3.2.1 อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น | 2-24 |
| 2.3.2.2 อุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลาง | 2-24 |
| 2.3.2.3 อุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย | 2-25 |
| 2.4 เทคโนโลยีการรีไซเคิลฝุ่นเหล็ก | 2-27 |
| 2.4.1 กระบวนการ Pyrometallurgy | 2-27 |
| 2.4.1.1 Waelz Process | 2-28 |
| 2.4.1.2 Primus Technology (Paul Wurth PRIMUS) | 2-30 |
| 2.4.1.3 Oxicup Technology | 2-32 |
| 2.4.1.4 ZincOx | 2-34 |
| 2.4.1.5 Fastmet | 2-34 |
| 2.4.1.6 Ausmelt | 2-34 |
| 2.4.1.7 Plasma furnace | 2-34 |
| 2.4.1.8 การสกัดสังกะสีในฝุ่นเหล็กด้วยปูนขาวเป็นตัวรีดิวซ์แทนถ่านโค้ก | 2-35 |
| 2.4.2 กระบวนการ Hydrometallurgy | 2-35 |
| 2.4.2.1 Ezinex | 2-37 |
| 2.4.2.2 ZincEx | 2-39 |

# สารบัญ (ต่อ)


หน้า

2.5 ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าและตะกรันจากเตาอุ่นน้ำเหล็ก 2-40

2.5.1 เทคโนโลยีการรีไซเคิลตะกรันเหล็กที่เกิดในเตาอาร์คไฟฟ้าและเตาอุ่นน้ำเหล็ก 2-41

2.5.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตะกรัน 2-42

2.5.3 การคัดขนาดและการบดย่อย 2-43

2.5.4 การบ่ม 2-43

2.5.5 การนำตะกรันไปใช้งาน 2-44

2.6 การศึกษาที่เกี่ยวข้อง 2-50

**3. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา 3-1**

3.1 เตาอุตสาหกรรม 3-1

3.1.1 เตาที่เปลวไฟสัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่จะเผา (Direct Fuel-Fired Furnace) 3-1

3.1.1.1 เตาสูง (Blast Furnace) 3-1

3.1.1.2 เตาคิวโปลา (Cupola Furnace) 3-4

3.1.1.3 เตาสะท้อนความร้อน (Reverberatory Furnace) 3-5

3.1.2 เตาที่เปลวไฟไม่สัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่จะเผา (Indirect Fuel-Fired Furnace) 3-6

3.1.2.1 เตาเบ้า (Crucible Furnace) 3-6

3.1.3 เตาที่ใช้พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า (Electric Furnace) 3-7

3.1.3.1 เตาแบบความต้านทานด้วยกระแสไฟฟ้า (Resistance Furnace) 3-7

3.1.3.2 เตาเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) 3-9

3.2 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) 3-14

3.3 เครื่องวิเคราะห์ชนิดแร่ด้วยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer, XRD) 3-16

3.4 เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์
(Laser Particle Size Distribution Analyzer) 3-17

3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา 3-18

**4. การดำเนินการศึกษา 4-1**

4.1 การทดสอบการย่างฝุ่นเหล็กเพื่อตรวจสอบมลทินและการหลอมตัวเกาะติดก่อนการทำรีดักชัน 4-1

4.1.1 การทดสอบการสลายกำมะถันโดยการย่าง 4-1

4.1.1.1 วิธีการทดลอง 4-1

4.1.1.2 ผลการทดลอง 4-2

4.1.2 การทดสอบการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) จากการเผา 4-4

4.1.2.1 เผาที่อุณหภูมิคงที่ 900 °C ณ เวลาต่าง ๆ 4-4

4.1.2.2 ระยะเวลาในการเผา 40 นาที ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 4-6

# สารบัญ (ต่อ)


หน้า

4.2 การเปรียบเทียบการเผาฝุ่นเหล็กในสภาวะรีดักชันด้วยเตาเหนี่ยวนำเพื่อตรวจสอบฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่ได้กับฝุ่นสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ที่ได้จากการเผาด้วยเตา Blast Furnace 4-7

4.2.1 การตรวจสอบขนาดถ่านแอนทราไซต์ที่ใช้เพื่อคัดเลือกขนาดที่เหมาะสม 4-7

4.2.1.1 วิธีการวิเคราะห์ขนาดของถ่าน 4-7

4.2.1.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดของถ่าน 4-7

4.2.2 การเผาฝุ่นเหล็กในสภาวะรีดักชันด้วยเตาเหนี่ยวนำเพื่อเปรียบเทียบผลของการเผาฝุ่นเหล็กของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด 4-9

4.2.2.1 วิธีการทดลอง 4-9

4.2.2.2 ผลการทดลอง 4-10

4.3 การปรับปรุงคุณภาพของสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด 4-13

4.3.1 การศึกษาคุณสมบัติของฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้จากการเผาฝุ่นสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ด้วยเตาเหนี่ยวนำ 4-13

4.3.1.1 วิธีการทดลอง 4-13

4.3.1.2 ผลการทดลอง 4-14

4.3.2 การศึกษาเพื่อลดปริมาณสารฮาโลเจนที่เจือปนอยู่ 4-15

4.3.2.1 วิธีการทดลอง 4-15

4.3.2.2 ผลการทดลอง 4-15

4.3.3 การศึกษาเพื่อลดปริมาณสารประกอบมลทินที่เจือปนอยู่ 4-16

4.3.3.1 วิธีการทดลอง 4-16

4.3.3.2 ผลการทดลอง 4-17

**5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 5-1**

5.1 สรุปผลการศึกษา 5-1

5.2 ข้อเสนอแนะ 5-2

**บรรณานุกรม xv**

**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก รายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF ของวัสดุที่นำมาศึกษา ก-1

ภาคผนวก ข ผลวิเคราะห์ขนาดของฝุ่นเหล็กด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Particle Size Distribution Analyzer) ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersizer 2000 ข-1

ภาคผนวก ค กรรมวิธีประกอบโลหกรรมถลุงแร่สังกะสีบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ค-1

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของแร่สังกะสีชนิดต่าง ๆ 2-2
ตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณสำรองแหล่งแร่สังกะสีที่สำคัญของโลกและปริมาณการผลิตแร่สังกะสีปี 2561 – 2562 2-3
ตารางที่ 2.3 การนำเข้าแร่สังกะสีและการส่งออกโลหะสังกะสีของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 – 2562 2-9
ตารางที่ 2.4 ลักษณะของโลหะสังกะสีเกรดต่าง ๆ ในทางการค้าตามมาตรฐาน ASTM B6 2-10
ตารางที่ 2.5 ลักษณะของสังกะสีแท่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.957-2533 2-11
ตารางที่ 2.6 สังกะสีออกไซด์ตามมาตรฐานอังกฤษ BS 254 2-17
ตารางที่ 2.7 สังกะสีออกไซด์สำหรับใช้ทำสีตามมาตรฐาน ASTM D79 2-17
ตารางที่ 2.8 สังกะสีออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมสี ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.221-2520 2-18
ตารางที่ 2.9 สังกะสีออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมยาง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.265-2521 2-19
ตารางที่ 2.10 แสดงผลวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ในฝุ่นเหล็ก 2-20
ตารางที่ 2.11 องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก Waelz Process 2-30
ตารางที่ 2.12 สรุปเทคนิคการรีไซเคิลฝุ่นเหล็กด้วยกระบวนการ Hydrometallurgy ตามชนิดของตัวทำละลาย 2-37
ตารางที่ 2.13 ส่วนผสมทางเคมีของตะกรันในกระบวนการหลอมเหล็กกล้า 2-41
ตารางที่ 2.14 องค์ประกอบทางแร่ของตะกรัน 2-42
ตารางที่ 2.15 ผลวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างฝุ่นเหล็กที่ได้จากโรงงานหลอมเศษเหล็กทั่วไป ไอระเหิดและตะกรันจากการถลุงฝุ่นเหล็ก (%) 2-60
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเตาเหนี่ยวนำ ยี่ห้อ HAIRUITUO รุ่น HT-25A 3-14
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักฝุ่นเหล็กภายหลังการย่างแร่ที่ 450 °C ที่เวลาต่าง ๆ 4-2
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการเผาออกซิเดชันฝุ่นเหล็กด้วยเตา Carbolite ที่อุณหภูมิต่าง ๆ นาน 1 ชั่วโมง 4-2
ตารางที่ 4.3 น้ำหนักฝุ่นเหล็กภายหลังการเผาออกซิเดชันที่ 900 °C ที่เวลาต่าง ๆ 4-5
ตารางที่ 4.4 การตรวจสอบการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ค้างตะแกรง 100 เมช ในฝุ่นเหล็กที่เทออกจากเบ้า 4-5
ตารางที่ 4.5 น้ำหนักฝุ่นเหล็กภายหลังการเผาออกซิเดชันนาน 40 นาที ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 4-6
ตารางที่ 4.6 การตรวจสอบการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ค้างตะแกรง 100 เมช ในฝุ่นเหล็กที่เทออกจากเบ้า 4-6
ตารางที่ 4.7 แสดงการกระจายตัวของขนาดของถ่านแอนทราไซต์ที่ใช้ 4-9
ตารางที่ 4.8 แสดงผลวิเคราะห์ XRF ของสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากการเผาฝุ่นเหล็กด้วยอัตราส่วนของถ่านแตกต่างกัน 4-10
ตารางที่ 4.9 แสดงผล XRF ของตะกรันที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C นาน 1 ชั่วโมงที่อัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่าน เท่ากับ 5:1 เปรียบเทียบกับตะกรันของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด 4-12
ตารางที่ 4.10 แสดงผลวิเคราะห์ XRF ของฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้จากการเผาสังกะสีออกไซด์ของบริษัทฯ 4-14
ตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบผลการล้างสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ด้วยน้ำร้อนและกรดซัลฟูริก 0.5 Normal 4-15

# สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.12 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 30 นาที 4-17
ตารางที่ 4.13 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 30 นาที 4-18
ตารางที่ 4.14 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 950 °C นาน 30 นาที 4-19
ตารางที่ 4.15 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 10 นาที 4-22
ตารางที่ 4.16 แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ และเวลาเผาต่าง ๆ 4-24

# สารบัญรูป

หน้า


รูปที่ 2.1 ก) แร่สังกะสี ข) โครงสร้างผลึก 2-1
รูปที่ 2.2 แสดงสัดส่วนการใช้ประโยชน์แร่สังกะสี 2-4
รูปที่ 2.3 แสดงวงโคจรการรีไซเคิลสังกะสี 2-6
รูปที่ 2.4 ระบบดูดฝุ่นของกระบวนการหลอมเหล็ก 2-20
รูปที่ 2.5 Bessemer Furnace 2-22
รูปที่ 2.6 Basic Oxygen Furnace 2-22
รูปที่ 2.7 Electric Arc Furnace 2-22
รูปที่ 2.8 Open Hearth Furnace 2-23
รูปที่ 2.9 ภาพจำลองแบบเตาหลอมเหล็กไฟฟ้า (Electric Arc Furnace) 2-23
รูปที่ 2.10 ผังกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมเหล็กแบบต่อเนื่อง 2-26
รูปที่ 2.11 กระบวนการ Waelz Process 2-28
รูปที่ 2.12 Rotary Hearth Furnace (RHF) 2-31
รูปที่ 2.13 กระบวนการ Paul Wurth PRIMUS 2-32
รูปที่ 2.14 กระบวนการ Oxicup และ Self-reducing agglomerates 2-33
รูปที่ 2.15 กระบวนการ Ezinex 2-38
รูปที่ 2.16 กระบวนการ ZincEx 2-39
รูปที่ 2.17 กรรมวิธีการบ่มตะกรันเหล็ก 2-44
รูปที่ 2.18 การนำตะกรันไปใช้งาน 2-45
รูปที่ 2.19 การนำตะกรันเตาอุ่นน้ำเหล็กสำหรับดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 2-45
รูปที่ 2.20 การนำตะกรันใช้แทนคอนกรีต 2-46
รูปที่ 2.21 Simple Refining Process 2-48
รูปที่ 2.22 การใช้ของเสียจากกระบวนการหลอมเศษเหล็กกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในเตาอาร์คไฟฟ้า 2-49
รูปที่ 2.23 แสดงผังการทดลองของ Hyk, Kitka and Rudnicki (2019) 2-50
รูปที่ 2.24 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการรีดิวซ์สังกะสีออกไซด์ 2-52
รูปที่ 2.25 แสดงผลของเวลาต่ออัตราการรีดิวซ์สังกะสีออกไซด์ 2-52
รูปที่ 2.26 แสดงแผนภาพการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดลองระเหิดไอสังกะสีด้วยไมโครเวฟ 2-53
รูปที่ 2.27 แสดงสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้ด้วยแผ่นกรอง 2-54
รูปที่ 2.28 (ซ้าย) สังกะสีเฟอร์ไรต์ก่อนเผารีดักชัน (ขวา) สังกะสีเฟอร์ไรต์ภายหลังการเผารีดักชัน 2-54
รูปที่ 2.29 แสดงบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด 2-55
รูปที่ 2.30 ผังการทำงานของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด 2-56

# สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า


รูปที่ 2.31 แสดงลักษณะภายในเตา Blast Furnace 2-57
รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะการเติมอากาศเพื่อให้ถ่านทำปฏิกิริยาให้ความร้อนแก่ฝุ่นเหล็กในเตา 2-57
รูปที่ 2.33 แสดงรูเติมอากาศภายในเตา Blast Furnace 2-58
รูปที่ 2.34 แสดงลักษณะถุงเก็บฝุ่นไอระเหิดสังกะสีออกไซด์ 2-58
รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะฝุ่นเหล็กก่อนเข้ากระบวนการเผาด้วยเตา Blast Furnace ของบริษัท พี.เอส.พี. อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด 2-59
รูปที่ 2.36 แสดงไอระเหิดที่ได้จากกระบวนการเผาฝุ่นเหล็กด้วยเตา Blast Furnace ของบริษัท พี.เอส.พี. อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด 2-59
รูปที่ 2.37 แสดงตะกรันจากการถลุงฝุ่นเหล็กด้วยเตา Blast Furnace ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรม โลหะกิจ จำกัด 2-59
รูปที่ 2.38 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของฝุ่นเหล็กก่อนเผาด้วย Blast Furnace ของบริษัท พี.เอส.พี. อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด และใช้เป็นตัวอย่างในการทดลองนี้ 2-60
รูปที่ 2.39 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของไอระเหิดที่ได้จากการเผาฝุ่นเหล็กด้วย Blast Furnace ของ บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด 2-61
รูปที่ 2.40 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของตะกรันที่ได้จากการเผาฝุ่นเหล็กด้วย Blast Furnace ของ บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด 2-61
รูปที่ 2.41 แสดงผลวิเคราะห์ขนาดของฝุ่นเหล็กด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Particle Size Distribution Analyzer) 2-62
รูปที่ 2.42 แสดงกระบวนการที่ใช้ในการผลิตสังกะสีของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) 2-63
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเตาสูง (Blast Furnace) 3-2
รูปที่ 3.2 เตาคิวโปลา (Cupola Furnace) 3-5
รูปที่ 3.3 สมดุลพลังงานจากถ่านโค้กของเตาคิวโปลา 3-5
รูปที่ 3.4 เตาสะท้อนความร้อน (Reverberatory Furnace) 3-6
รูปที่ 3.5 เตาเบ้า (Crucible Furnace) 3-6
รูปที่ 3.6 (บน) เตาไฟฟ้าแบบลวดความต้านทานที่ใช้ในการศึกษา ยี่ห้อ Carbolite รุ่น GSM 11/8 (ล่าง) 1) ผนังเตาภายในทำด้วย Silica 2) ปล่องระบายควัน 3-7
รูปที่ 3.7 ซิลิกอนคาร์ไบด์แบบต่าง ๆ 3-8
รูปที่ 3.8 ลวดโมลิบดีนัมไดซิลิไซด์แบบต่าง ๆ 3-9
รูปที่ 3.9 เตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ 3-10

# สารบัญรูป (ต่อ)


หน้า

รูปที่ 3.10 เบ้าหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ 3-10
รูปที่ 3.11 โครงสร้างของเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ 3-11
รูปที่ 3.12 ขดลวดเหนี่ยวนำของเตาหลอม 3-12
รูปที่ 3.13 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า 3-12
รูปที่ 3.14 เตาเหนี่ยวนำ (บน) เตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกน (ล่าง) เตาเหนี่ยวนำแบบช่อง 3-13
รูปที่ 3.15 เตาเหนี่ยวนำที่ใช้ในการศึกษายี่ห้อ HAIRUITUO รุ่น HT-25A 3-13
รูปที่ 3.16 ส่วนประกอบตัวเครื่อง XRF แบบพกพาของ OLYMPUS 3-15
รูปที่ 3.17 หลักการทำงานของเครื่อง XRF 3-15
รูปที่ 3.18 แสดง Limits of Detection ของเครื่องวิเคราะห์ XRF แบบพกพาของ OLYMPUS 3-16
รูปที่ 3.19 แสดงหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 3-17
รูปที่ 3.20 เครื่องวิเคราะห์ชนิดแร่ด้วยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer) แบบพกพาของ OLYMPUS 3-17
รูปที่ 3.21 แสดงเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ 3-18
รูปที่ 3.22 แสดงเครื่องชั่งน้ำหนัก 3-19
รูปที่ 3.23 แสดงตะแกรงคัดขนาด 3-19
รูปที่ 3.24 แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิด้วยแสงเลเซอร์ 3-19
รูปที่ 3.25 แสดงอุปกรณ์สำหรับกรองที่ใช้ในการทำความสะอาดไอระเหิดสังกะสีที่เก็บได้ 3-19
รูปที่ 3.26 แสดงลักษณะของท่อนำส่งและการจัดเรียงอุปกรณ์ภายในขวดเก็บไอระเหิดสังกะสี 3-20
รูปที่ 3.27 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ทดลองเผาฝุ่นเหล็กในระบบปิดที่จัดเก็บไอระเหิด
โดยการควบแน่นด้วยน้ำภายใต้แรงดูดสุญญากาศ 3-20
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของฝุ่นเหล็กก่อนย่าง และหลังย่างที่อุณหภูมิ 450 °C ที่เวลาต่าง ๆ 4-2
รูปที่ 4.2 แสดงผล XRD ของการย่างฝุ่นเหล็กที่ 450 °C ที่เวลา 60 นาที 4-3
รูปที่ 4.3 แสดงผล XRD ของการย่างฝุ่นเหล็กที่ 900 °C ที่เวลา 60 นาที 4-4
รูปที่ 4.4 แสดงสถานที่ทดลอง ณ บริษัท โกลบอล คอนซัลติ้ง แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด 4-5
รูปที่ 4.5 แสดงการเกิดการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ของฝุ่นเหล็กภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ
1,000 °C นาน 40 นาที 4-7
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของถ่านแอนทราไซต์ที่ใช้ 4-8
รูปที่ 4.7 แสดงการศึกษาการกระจายตัวของเม็ดถ่านแอนทราไซต์ด้วยตะแกรงมาตรฐาน 4-8
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการกระจายตัวของเม็ดถ่านแอนทราไซต์ 4-8
รูปที่ 4.9 เบ้ากราไฟต์ 4-9
รูปที่ 4.10 แสดงเตาเหนี่ยวนำและอุปกรณ์ต่อพ่วงสำหรับจัดเก็บไอระเหิดด้วยน้ำ 4-10

# สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า


รูปที่ 4.11 สังกะสีออกไซด์จากการเผาที่อัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่านแตกต่างกัน (ซ้าย) 5:2 (ขวา) 5:1 4-11

รูปที่ 4.12 แสดงผล XRD ของสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้จากการเผาฝุ่นเหล็กที่อัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่าน เท่ากับ 5:1 ที่อุณหภูมิ 900 °C นาน 1 ชั่วโมง 4-12

รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของตะกรันก้นเบ้าจากการทดลอง 4-12

รูปที่ 4.14 แสดงผล XRD ของตะกรันที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C นาน 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่าน เท่ากับ 5:1 4-13

รูปที่ 4.15 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้จากการเผาสังกะสีออกไซด์ของบริษัทฯ 4-14

รูปที่ 4.16 เตาความร้อนไฟฟ้า 4-15

รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะเบ้าเซรามิกที่ใช้ในการทดลอง 4-16

รูปที่ 4.18 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 30 นาที ที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ 4-17

รูปที่ 4.19 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 30 นาที ที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ 4-18

รูปที่ 4.20 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 950 °C นาน 30 นาที ที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ 4-19

รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 950 °C 1,050 °C และ 1,150 °C นาน 30 นาที ที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ 4-20

รูปที่ 4.22 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ 5% ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 4-20

รูปที่ 4.23 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ 10% ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 4-21

รูปที่ 4.24 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ 15% ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 4-21

รูปที่ 4.25 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ 20% ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 4-22

รูปที่ 4.26 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 10 นาที ที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ 4-23

# สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 30 และ 10 นาที ที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ 4-23
รูปที่ 4.28 การวิเคราะห์องค์ประกอบสังกะสีออกไซด์และน้ำหนักที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ และเวลาเผาต่าง ๆ 4-24
รูปที่ 4.29 แสดงโลหะสังกะสีที่เหลืออยู่ปะปนกับสังกะสีออกไซด์ในเบ้า 4-25
รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะของโลหะสังกะสีที่ปะปนอยู่กับฝุ่นที่เหลืออยู่ในเบ้าของตัวอย่างทั้งหมดที่ทำการศึกษา 4-26
รูปที่ 4.31 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่าง Q ที่มีโลหะสังกะสีต่ำสุด 4-27
รูปที่ 5.1 แสดงกระบวนการรีดักชันฝุ่นสังกะสีออกไซด์ 5-3
รูปที่ 5.2 แสดงระบบเก็บฝุ่นด้วยน้ำ 5-3
รูปที่ 5.3 ก) แสดง Drum Filter ข) แสดงผังการทำงานของ Drum Filter 5-4
รูปที่ 5.4 แสดง Rotary Dryer 5-5

# บทที่ 1
# บทนำ

สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวเป็นปุย มีการนำสังกะสีออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ตั้งแต่ เป็นส่วนผสมในเนื้อยางเพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับกำมะถัน (Vulcanization) ให้ยางแข็ง เหนียว และมีความทนทาน เป็นรงควัตถุสีขาวในเนื้อสี เพื่อทำให้เกิดการไหลลื่นที่ดีและไวต่อแสง ป้องกันแสง UV ในขณะที่สามารถทำปฏิกิริยากับกรดที่เกิดจากการสลายตัวของวัสดุประสาน นอกจากนี้ยังเป็นองค์ประกอบในการผลิตแก้ว เพื่อลดเวลาหลอมให้สั้นลง ลดความหนืดของเนื้อแก้วในขณะหลอม เป็นส่วนผสมของสารเคลือบเซรามิก เพิ่มความมันเงา ความขาว เพื่อให้สีสุกใส ยิ่งไปกว่านั้น ยังสามารถใช้เป็นโลหะเคลือบที่ทำหน้าที่เหมือนสารเคลือบโลหะพวกเหล็กและอะลูมิเนียม เช่น ผนังตู้เย็น อ่างอาบน้ำ เป็นต้น

Leclaire ชาวฝรั่งเศสเริ่มผลิตสังกะสีออกไซด์ในระดับอุตสาหกรรมเป็นคนแรกในปี ค.ศ. 1840 โดยการเผาสังกะสีในอากาศซึ่งเรียกขบวนการนี้ว่า French Process ปี ค.ศ. 1852 บริษัท The New Jersey Zinc Company ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ผลิตสังกะสีออกไซด์ขึ้นบ้าง แต่ได้พัฒนาขบวนการผลิตขึ้นมาใหม่โดยการหลอมแร่สังกะสีกับถ่านหินในเตาพิเศษโดยเฉพาะ เรียกขบวนการนี้ว่า American Process ปี ค.ศ. 1893 บริษัทนี้ได้ผลิตสังกะสีออกไซด์จากโลหะสังกะสีโดยตรงบ้าง ใช้ความรู้พื้นฐานทั้ง French Process และ American Process จากการพัฒนาขบวนการผลิตใหม่นี้ ทำให้สามารถผลิตสังกะสีออกไซด์ที่มีหลายขนาดหลายรูปร่าง และมีการเคลือบผิว (surface treatment และ fatty acid) เช่น stearic acid เพื่อเพิ่มสมบัติในการกระจายให้ดีขึ้น

ข้อมูลจากบริษัท โกลบอล คอนซัลติ้ง แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ซึ่งเป็นผู้ผลิตเตาหลอมประเภทต่าง ๆ ระบุว่า มีการใช้เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำในกระบวนการผลิตสังกะสีออกไซด์จากโลหะสังกะสีบริสุทธิ์ในประเทศไทย ซึ่งสามารถทำให้สังกะสีออกไซด์ที่ได้มีความบริสุทธิ์และราคาสูง

นอกจากกระบวนการผลิตสังกะสีออกไซด์จากโลหะสังกะสีบริสุทธิ์ข้างต้นแล้ว การผลิตสังกะสีออกไซด์จากกระบวนการรีไซเคิลโดยเฉพาะจากฝุ่นเหล็กที่รวบรวมได้จากกระบวนการหล่อหลอมเศษเหล็กเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ได้รับความสนใจและมีการดำเนินการเพื่อให้เกิดการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมแล้วในประเทศไทย

อย่างไรก็ดี ฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากฝุ่นเหล็กดังกล่าว ยังมีคุณสมบัติด้อยกว่าสังกะสีออกไซด์ที่ผลิตได้จากโลหะสังกะสีบริสุทธิ์ ยกตัวอย่างกระบวนการผลิตของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ที่พบว่ามีค่าเปอร์เซนต์สังกะสีเพียง 71.41% ในขณะที่ยังคงมีมลทินอื่น ๆ ได้แก่ ตะกั่ว กำมะถัน และธาตุฮาโลเจน (คลอรีน) ในระดับสูง ซึ่งมีผลต่อการนำสังกะสีออกไซด์ดังกล่าวไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น จึงเป็นเหตุผลในการศึกษานี้

## 1.1 วัตถุประสงค์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของฝุ่นเหล็ก ไอระเหิด และตะกรัน ของบริษัท พี.เอส.พี. อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด และหาแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของไอระเหิดสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้ที่เหมาะสม

## 1.2 ขอบเขตการศึกษา

1) รวบรวมข้อมูลและการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับสังกะสีออกไซด์ ฝุ่นเหล็ก เครื่องมือที่เหมาะสมในการเผาและจัดเก็บฝุ่นไอระเหิด

2) สร้างเครื่องมือเพื่อจัดเก็บฝุ่นไอระเหิด

3) ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลฝุ่นเหล็ก ไอระเหิดที่ได้

4) กำหนดแนวทางเพื่อพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพฝุ่นสังกะสีออกไซด์

5) ศึกษาผลจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีต่าง ๆ วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเครื่องมือ XRD และ XRF

4) สรุปผลการศึกษาและเสนอแนะการดำเนินการในเชิงอุตสาหกรรม

## 1.3 แนวทางการศึกษา

1) ทดสอบการย่างฝุ่นเหล็กเพื่อตรวจสอบมลทินและการหลอมตัวเกาะติดก่อนการทำรีดักชัน

2) เปรียบเทียบการเผาฝุ่นเหล็กในสภาวะรีดักชันด้วยเตาเหนี่ยวนำเพื่อตรวจสอบฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่ได้กับฝุ่นสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ที่ได้จากการเผาด้วยเตา Blast Furnace

3) ปรับปรุงคุณภาพของสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด โดยวิธีการเผารีดักชันฝุ่นสังกะสีออกไซด์ดังกล่าวที่สภาวะต่าง ๆ

## 1.4 ประโยชน์

1) ได้ข้อมูลทั่วไปที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตสังกะสีออกไซด์จากฝุ่นเหล็ก

2) ได้ข้อมูลจากการทดลองที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพสังกะสีออกไซด์

3) ได้แนวโน้มในการพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพเชิงอุตสาหกรรม

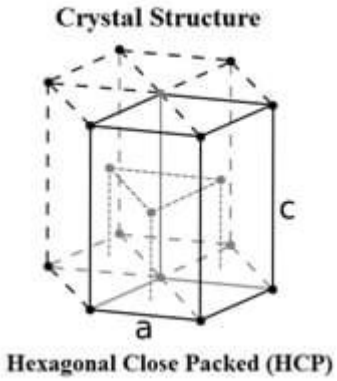
# บทที่ 2
# ลักษณะวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึง 6 หัวข้อ ได้แก่ สังกะสี สังกะสีออกไซด์ ฝุ่นเหล็กจากเตาหลอมไฟฟ้า เทคโนโลยีการรีไซเคิลฝุ่นเหล็ก ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าและตะกรันจากเตาอุ่นน้ำเหล็ก และการศึกษาที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

## 2.1 สังกะสี

### 2.1.1 สมบัติทั่วไป

สังกะสีเป็นโลหะที่มีสีขาวเงิน มีความเหนียวน้อยหรือเปราะ เพราะมีระบบผลึกเป็นรูปเฮกซะโกนาล (Hexagonal) อัตราการยืดตัวน้อย สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Zn สังกะสีที่บริสุทธิ์มากๆ มีสมบัติที่สามารถยืด ดึง และรีดเป็นแผ่นบางได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 $^{o}$C นอกจากนี้สังกะสีเมื่ออยู่ติดกับโลหะอื่น ๆ ส่วนใหญ่จะช่วยโลหะเหล่านี้ไม่ให้เกิดสนิม โดยสังกะสีจะรวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นสนิมแทน สมบัติข้อนี้ทำให้สังกะสีได้รับความนิยมอย่างมาก โดยใช้เป็นตัวเคลือบโลหะอื่นโดยเฉพาะเหล็ก สังกะสีมีลักษณะภายนอกคล้ายกับโลหะทั่วไป มีผิวมันวาว สีเทา ขาว ตามบริเวณผิวที่แตกใหม่ ๆ แต่ถ้าเป็นพื้นผิวที่ถูกอากาศจะเกิดฟิล์มบางๆ เคลือบ ทำให้ลักษณะมันวาวไม่ปรากฏ มีจุดหลอมเหลว 419.58 $^{o}$C จุดเดือด 907 $^{o}$C น้ำหนักอะตอม 65.38 ความหนาแน่น 7.14 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 25 $^{o}$C (Weast, 1987) (รูปที่ 2.1)




ก) ข)

รูปที่ 2.1 ก) แร่สังกะสี ข) โครงสร้างผลึก

### 2.1.2 แหล่งแร่สังกะสี

#### 2.1.2.1 ลักษณะทางธรณีวิทยา

แร่สังกะสีที่พบในแหล่งต่าง ๆ ของโลกจำแนกตามสภาพการเกิดทางธรณีวิทยาได้ 2 ประเภท คือ

**1) แร่สังกะสีปฐมภูมิ (Primary Zinc)** หมายถึง แร่สังกะสีที่เกิดขึ้นมาและยังไม่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติ ได้แก่ แร่สฟาเลอไรต์ (Sphalerite) และแร่เวิร์ตไซต์ (Wurtsite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีซัลไฟด์ (Sulphide) มักพบเป็นส่วนใหญ่ในแหล่งต่าง ๆ ของโลก นอกจากนี้ยังมีแร่สังกะสีซิงค์ไคต์ (Zincite) และแร่แฟรงคลิไนต์ (Franklinite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีออกไซด์ (Oxide) พบแหล่งใหญ่ในรัฐนิวเจอร์ซี สหรัฐอเมริกา

**2) แร่สังกะสีทุติยภูมิ (Secondary Zinc)** หมายถึง แร่สังกะสีที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติแล้ว ได้แก่ แร่วิลเลไมต์ (Willemite) และแร่เฮมิมอร์ไฟต์ (Hemimorphite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีซิลิเกต (Silicate) แร่สมิทซอไนต์ (Smithsonite) และแร่ไฮโดรซิงไคต์ (Hydrozincite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีคาร์บอเนต (Carbonate) แร่สังกะสีที่พบในประเทศไทยที่แหล่งผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ส่วนใหญ่เป็นแร่สังกะสีซิลิเกตและบางส่วนเป็นแร่สังกะสีคาร์บอเนต โดยสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของแร่สังกะสีแสดงในตารางที่ 2.1 (Wedow et al., 1973)

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของแร่สังกะสีชนิดต่าง ๆ (Wedow et al., 1973)

| แร่ | สูตรเคมี | สังกะสี (เปอร์เซ็นต์) | ความถ่วงจำเพาะ | ความแข็ง (สเกลของโมห์) | ระบบผลึก |
|---|---|---|---|---|---|
| Sphalerite | ZnS | 63-67 | 3.9-4.1 | 3.5-4.0 | isometric |
| Wurtzite | ZnS | 59-67 | 4.0 | 4.0 | hexagonal |
| Zincite | ZnO | 75-80 | 5.7 | 4.0-4.5 | hexagonal |
| Franklinite | $(Zn,Fe,Mn)(Fe,Mn)_2O_4$ | 14-27 | 5.1 | 6.0 | isometric |
| Smithsonite | $ZnCO_3$ | 48-52 | 4.3-4.4 | 5.0 | hexagonal |
| Hydrozinkite | $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$ | 59-78 | 3.6-3.8 | 2.0-2.5 | monoclinic |
| Willemite | $Zn_2SiO_4$ | 51-56 | 3.9-4.2 | 5.5 | hexagonal |
| Hemimorphite | $Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2.H_2O$ | 52-54 | 3.4-3.5 | 4.5-5.0 | orthorhombic |

### 2.1.2.2 แหล่งแร่สังกะสีที่สำคัญของโลก

ทวีปอเมริกาเหนือ พบบริเวณแถบเทือกเขาอัปปาเลเชียน (Appalachian) อยู่ในบริเวณมลรัฐนิวเจอร์ซี นิวยอร์ก เวอร์จิเนีย เพนซิลวาเนีย และแถบหุบเขามิสซิสซิปปี (Mississippi Valley) ซึ่งทั้ง 2 แหล่งอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา ส่วนประเทศแคนาดาถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตโลหะสังกะสีรายใหญ่ของโลกรายหนึ่ง มีอยู่ในรัฐนิวบรันสวิก (New Brunzwick) บริติชโคลัมเบีย (British Columbia) และนิวฟันด์แลนด์ (Newfoundland)

ทวีปอเมริกาใต้ พบในประเทศเปรู โบลิเวีย และประเทศอาร์เจนตินา

ทวีปออสเตรเลีย มีแหล่งแร่ใหญ่อยู่ 2 แหล่ง คือ เหมืองแร่ Broken Hill ในรัฐนิวเซาท์เวลส์ (New South Wales) เป็นแหล่งแร่สังกะสีที่มีปริมาณแร่สำรองมากที่สุดแหล่งหนึ่ง และแหล่ง Mount Isa District ในรัฐควีนส์แลนด์ (Queensland) เป็นแหล่งแร่ที่มีกลุ่มแร่โลหะพื้นฐานสะสมอยู่จำนวนมากและเป็นแนวกว้าง

ทวีปยุโรป มีแหล่งแร่สังกะสีกระจายอยู่ในแนว Alpine Belt ได้แก่ ประเทศฝรั่งเศส อิตาลี ออสเตรีย ยูโกสลาเวีย บัลแกเรีย และพบในแนวแดนแร่ยุโรป (European mineralized province) ได้แก่ ประเทศสเปน เยอรมนี โปแลนด์ สวีเดน และประเทศนอร์เวย์

ทวีปแอฟริกา มีแหล่งแร่สังกะสีอยู่ตามเทือกเขาแอตลาส จากประเทศโมร็อกโค อัลจีเรีย ตูนีเซีย เลยขึ้นไปจนถึงเกาะซิซิลีของประเทศอิตาลี

ทวีปเอเชีย พบในประเทศไทย ญี่ปุ่น พม่า สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว และประเทศสาธารณรัฐสังคมนิยมเวียดนาม เป็นต้น (อัปสร, 2531)

ทั้งนี้ ปริมาณสำรองแหล่งแร่สังกะสีที่สำคัญของโลกและปริมาณการผลิตแร่สังกะสีปี พ.ศ. 2561 – 2562 แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณสำรองแหล่งแร่สังกะสีที่สำคัญของโลกและปริมาณการผลิตแร่สังกะสีปี พ.ศ. 2561 - 2562 (U.S. Geological Survey, 2020)

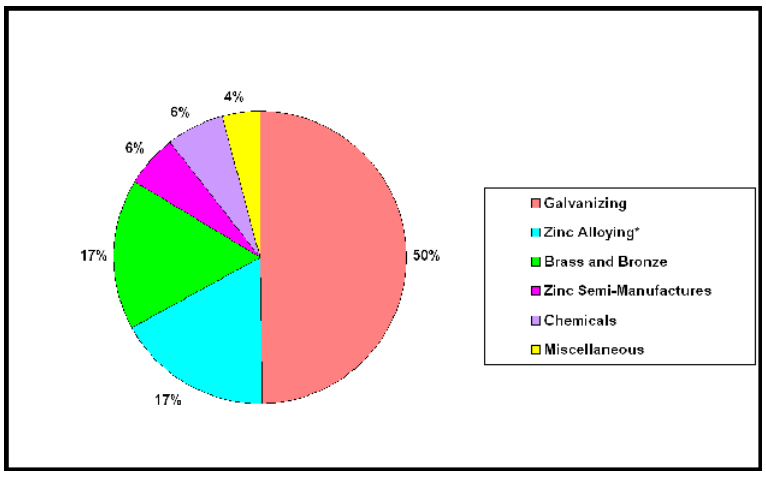
| **ประเทศ** | **ปริมาณการผลิตแร่สังกะสี (พันตันเนื้อโลหะ)** | | **ปริมาณสำรองแร่สังกะสี (พันตันเนื้อโลหะ)** |
|---|---|---|---|
| | **2561** | **2562** | |
| สหรัฐอเมริกา | 824 | 780 | 11,000 |
| ออสเตรเลีย | 1,110 | 1,300 | 68,000 |
| โบลิเวีย | 480 | 460 | 4,800 |
| แคนาดา | 287 | 300 | 2,200 |
| จีน | 4,170 | 4,300 | 44,000 |
| อินเดีย | 750 | 800 | 7,500 |
| คาซัคสถาน | 304 | 290 | 12,000 |
| เม็กซิโก | 691 | 690 | 22,000 |
| เปรู | 1,470 | 1,400 | 19,000 |
| รัสเซีย | 300 | 300 | 22,000 |
| สวีเดน | 234 | 230 | 3,600 |
| อื่น ๆ | 1,840 | 1,900 | 34,000 |
| **รวม** | **12,500** | **13,000** | **250,000** |

### 2.1.2.3 แหล่งแร่สังกะสีในประเทศไทย

เหมืองผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก เคยเป็นแหล่งแร่สังกะสีที่ใหญ่ที่สุดในประเทศ ซึ่งบริษัท ผาแดงอินดัสทรีจำกัด (มหาชน) ได้รับสัมปทานขุดหาแร่มายาวนานกว่า 32 ปี ก่อนจะปิดตัวลงในปี พ.ศ. 2560 เนื่องจากปริมาณแร่สำรองหมดแล้ว และปัจจุบันได้ดำเนินการฟื้นฟูพื้นที่เหมืองให้กลายเป็นพื้นที่ป่าอีกครั้ง เพื่อส่งมอบให้กรมป่าไม้ ต่อไป เนื่องจากพื้นที่นี้ตั้งอยู่ในพื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่สอด ซึ่งในแผนการฟื้นฟูได้มีการนำ “โครงการส่งเสริมการเรียนรู้เพื่อการอนุรักษ์และฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากพระราชดำริจังหวัดตาก” อันเป็นโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริพระบาทสมเด็จพระบรมชนกาธิเบศรมหาภูมิพลอดุลยเดชมหาราชบรมนาถบพิตรรัชกาลที่ 9 เป็นแนวทางพลิกฟื้นผืนดิน โดยกรมป่าไม้และสำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (สำนักงาน กปร.) ประสานงานระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อฟื้นฟูพื้นที่ให้เป็นศูนย์การพัฒนาและแหล่งเรียนรู้ทางธรรมชาติประกอบด้วย ศูนย์อบรมสัมมนาด้านการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ พิพิธภัณฑ์เหมืองแร่สังกะสีดอยผาแดง ศูนย์ฟื้นฟูสมรรถภาพผู้สูงอายุ ศูนย์อนุรักษ์พันธุ์กล้วยไม้ป่าและพืชท้องถิ่น ศูนย์พัฒนาและส่งเสริมการใช้หญ้าแฝกเพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำ และสถานที่ท่องเที่ยวเชิงนิเวศแลนด์มาร์คใหม่จังหวัดตาก (ไทยโพสต์, 2562)

### 2.1.3 การใช้ประโยชน์

แร่สังกะสีมีสัดส่วนการใช้ประโยชน์ทั่วโลกในปี ค.ศ. 2020 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ได้แก่ ชุบเคลือบเหล็ก (Galvanizing) เป็นสัดส่วน 50% โลหะสังกะสีผสมใช้ฉีดชิ้นงาน (Zinc Alloying) เป็นสัดส่วน 17% ทองเหลือง (Brass and Bronze) เป็นสัดส่วน 17% สังกะสีกึ่งสำเร็จรูป (Zinc Semi-Manufactures) เป็นสัดส่วน 6% เคมีภัณฑ์ (Chemicals) เป็นสัดส่วน 6% และอื่น ๆ (Miscellaneous) เป็นสัดส่วน 4% (International Lead & Zinc Study Group, 2020) โดยมีรายละเอียดการใช้ประโยชน์ในแต่ละด้านดังนี้




รูปที่ 2.2 แสดงสัดส่วนการใช้ประโยชน์แร่สังกะสี (International Lead & Zinc Study Group, 2020)

**2.1.3.1 ชุบเคลือบเหล็ก**

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

สังกะสีมีอัตราการผุกร่อนที่ช้ามาก ดังนั้น จึงป้องกันเหล็กไม่ให้เจอกับสภาพแวดล้อมที่จะทำให้เกิดสนิมได้เป็นเวลานาน จากการศึกษาของ ASTM แห่งสหรัฐอเมริกา พบว่าในเขตเมืองอัตราส่วนการผุกร่อนของสังกะสีเมื่อเทียบกับเหล็กเท่ากับ 1:20 และจะเท่ากับ 1:80 ในบริเวณชายทะเลหรือเขตอุตสาหกรรม ดังนั้น การชุบเคลือบเหล็กด้วยสังกะสีจึงเหมือนกับการสร้างเกราะป้องกันให้กับเหล็กนั่นเอง

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

**2.1.3.2 โลหะสังกะสีผสมใช้ฉีดขึ้นงาน**

สมบัติที่โดดเด่นของโลหะสังกะสีคือ การป้องกันเหล็กไม่ให้เป็นสนิม แต่สมบัตินี้เพียงประการเดียวอาจจะไม่เพียงพอต่อความต้องการของภาคอุตสาหกรรมบางประเภท ดังนั้น จึงได้มีการนำโลหะอื่นมาผสมเพื่อเพิ่มสมบัติให้กับโลหะสังกะสี ซึ่งได้แก่ อะลูมิเนียม แมกนีเซียมและทองแดง เป็นต้น โดยเรียกโลหะประเภทนี้ว่าโลหะสังกะสีผสม หรือ Zinc Alloys และเนื่องจากโลหะสังกะสีผสมมักนำไปใช้ในงานฉีดขึ้นรูป จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Zinc Diecasting Alloys

**2.1.3.3 เคมีภัณฑ์**

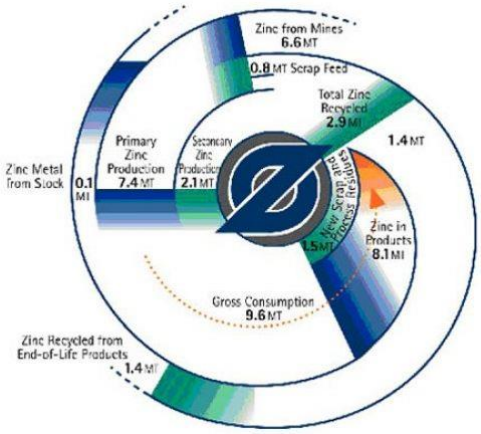
สังกะสีออกไซด์เป็นเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ซึ่งผ่านกระบวนการแปรสภาพมาจากโลหะสังกะสีแท่ง นำไปใช้ในการผลิตถ่านอัลคาไลน์และแบตเตอรี่ขนาดเล็ก อุตสาหกรรมผลิตสียางรถยนต์ เซรามิก เวชภัณฑ์และอาหารสัตว์

**2.1.3.4 ทองเหลือง**

ประโยชน์ของโลหะสังกะสีที่สำคัญอย่างยิ่งประการหนึ่งก็คือ เมื่อนาไปผสมกับโลหะทองแดงจะได้โลหะทองเหลือง ซึ่งสัดส่วนของสังกะสีที่ใช้ผสมกับโลหะทองแดงมีตั้งแต่ร้อยละ 10 จนถึงมากกว่าร้อยละ 40 การเติบโตของตลาดทองเหลืองจึงส่งผลดีต่อตลาดโลหะสังกะสีด้วยเช่นกัน ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมานี้ทองเหลืองทวีความนิยมมากขึ้น ในกลุ่มสถาปนิก มัณฑนากร รวมทั้งผู้บริโภคทั่วไป โดยนำมาใช้ในงานสถาปัตยกรรมและงานตกแต่งภายในทั้งอาคารพาณิชย์และบ้านเรือน ซึ่งได้รับความนิยมทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทวีปยุโรปและอเมริกาเหนือ เรามักจะพบเห็นทองเหลืองในรูปลักษณ์ที่คุ้นตาจนอาจจะมองข้ามไปไม่ว่าจะเป็นที่จับประตู ก๊อกน้ำ เครื่องใช้ในบ้านและส่วนประกอบต่างๆ ของโคมไฟ

**2.1.3.5 สังกะสีนำกลับมาใช้ใหม่ได้**

ปัจจุบันโลหะสังกะสีที่ผลิตได้จากทั่วโลก ประมาณร้อยละ 70 มาจากการทำเหมืองแร่ และอีกร้อยละ 30 มาจากการรีไซเคิล หรือการนำสังกะสีกลับมาใช้ใหม่ (รูปที่ 2.3) โดยในทุกๆ ปี จะมีการนำสังกะสีมารีไซเคิลเพิ่มสูงขึ้น ตามวิวัฒนาการที่ก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีในการผลิตสังกะสีและการรีไซเคิลสังกะสี ในปัจจุบันกว่าร้อยละ 80 ของสังกะสีที่ใช้กันอยู่ สามารถนำมารีไซเคิลได้ ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างประหยัด คุ้มค่าและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน), 2553)




รูปที่ 2.3 แสดงวงโคจรการรีไซเคิลสังกะสี (Kleen, 2011)

**2.1.4 การผลิตโลหะสังกะสีจากแร่**

แร่สังกะสีสำคัญที่นำมาใช้ในการถลุงโลหะสังกะสี ได้แก่ สังกะสีซัลไฟด์ (ZnS) หรือ Sphalerite ซึ่งเป็นแร่ที่พบในหลายประเทศ เช่น อเมริกา เม็กซิโก เปรู โบลิเวีย แคนาดา และออสเตรเลีย นอกจากนี้ยังมีแร่สังกะสีในรูปอื่นๆ เช่น สังกะสีคาร์บอเนต ($ZnCO_3$) หรือ Smithsonite สังกะสีออกไซด์ (ZnO) หรือ Zincite และแร่สังกะสีซิลิเกต ($Zn_2SiO_4$) ที่เรียกว่า Willemite โดยแหล่งแร่สังกะสีที่สำคัญอื่น ๆ ได้แก่ จีน อินเดีย พม่า เวียดนาม ไอร์แลนด์ รัสเซีย คาซัคสถาน และซาอีร์ เป็นต้น สำหรับแหล่งแร่สังกะสีของประเทศไทยที่ใหญ่ที่สุดคือ เหมืองผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งมีแร่สังกะสีซิลิเกตที่มีความเข้มข้นประมาณ 50% แต่บางครั้งก็จะพบปะปนอยู่กับหินปูนและมีความเข้มข้นไม่สูงนัก (ความเข้มข้น 2-12%) จึงอาจต้องนำไปแต่งแร่ให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยใช้วิธีการบดแร่ให้มีขนาดเล็กและนำไปแต่งแร่โดยวิธีการลอยแร่ ทั้งนี้ เหมืองผาแดงได้ปิดตัวลงในปี พ.ศ. 2560 เนื่องจากปริมาณแร่สำรองหมดแล้ว

การผลิตโลหะสังกะสีจากแร่แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักคือ การถลุงสังกะสีและการทำให้โลหะสังกะสีบริสุทธิ์ โดยมีรายละเอียดดังนี้ (กิตติพันธุ์, 2551)

**2.1.4.1 การถลุงสังกะสี**

กระบวนการถลุงสังกะสีมี 2 วิธีที่สำคัญคือ วิธีการใช้ความร้อนและวิธีการละลายด้วยสารเคมี ซึ่งสุดท้ายจะต้องนำไปผ่านกรรมวิธีการทำให้โลหะสังกะสีบริสุทธิ์ด้วยการแยกด้วยกระแสไฟฟ้า โดยการจะใช้กรรมวิธีใดจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะของแร่และคำนึงถึงด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย

**1) กรรมวิธีการใช้ความร้อน (Pyrometallurgy)**

การใช้ความร้อนจะเหมาะกับแร่ประเภทซัลไฟด์โดยมีรายละเอียดแบ่งเป็นขั้นตอน ดังนี้

1.1) เริ่มจากนำแร่สังกะสีซัลไฟด์ไปย่าง (Roasting) เพื่อเปลี่ยนสภาพของแร่ให้กลายเป็นสังกะสีออกไซด์ โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 700-800 $^{\circ}$C และมีการพ่นอากาศเข้าไปในเตาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดังสมการ สังกะสีออกไซด์ที่ได้จะถูกนำไปถลุงต่อให้เป็นโลหะสังกะสีโดยในขั้นตอนนี้อาจมีกำมะถันเหลืออยู่บ้างไม่เกิน 1% ส่วนก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกส่งไปบำบัดหรือผลิตเป็นกรดกำมะถันต่อไป

$$ZnS + 3/2\ O_2 \rightarrow ZnO + SO_2$$

1.2) การถลุงโลหะสังกะสีจากสังกะสีออกไซด์จะใช้คาร์บอนเป็นตัวรีดิวซ์โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 1,120 $^{\circ}$C แต่สังกะสีที่ได้จะอยู่ในสภาพที่เป็นไอและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในทางปฏิบัติจึงต้องทำในเตาที่ปิดสนิทเพื่อป้องกันไม่ให้ไอสังกะสีทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ

1.3) ไอสังกะสีที่ได้จะถูกส่งผ่านไปยังเตากลั่น (Condenser) และกลั่นตัวเป็นสังกะสีหลอมเหลว แต่ในช่วงแรกอาจมีโลหะแคดเมียมปะปนมาด้วย เนื่องจากแคดเมียมมีจุดอุณหภูมิการระเหยเป็นไอที่ 765 $^{\circ}$C ต่ำกว่าสังกะสี (970 $^{\circ}$C) การสกัดเอาโลหะแคดเมียมออกจากสังกะสีจะใช้การกลั่นลำดับส่วนอีกครั้งโดยการหลอมสังกะสีและควบคุมอุณหภูมิในอยู่ในช่วง 765 $^{\circ}$C เพื่อให้แคดเมียมกลายเป็นไอจะได้โลหะสังกะสีที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าเดิม

**2) กรรมวิธีการละลายด้วยสารเคมี (Hydrometallurgy)**

กระบวนการนี้เป็นการแยกเอาโลหะสังกะสีออกจากแร่และสารเจือปนอื่นๆ ด้วยการละลายสังกะสีหรือเปลี่ยนสภาพของสังกะสีออกไซด์ไปเป็นสารละลายสังกะสีซัลเฟต โดยใช้กรดกำมะถันเจือจางเป็นตัวทำละลาย (pH ประมาณ 5) ซึ่งมีปฏิกิริยาดังสมการ

$$ZnO + H_2SO_4 \rightarrow ZnSO_4 + H_2O$$

สำหรับสารเจือปนอื่น ๆ ที่ไม่ละลายหรือละลายได้ช้ากว่าเช่น เหล็กและซิลิกา จะถูกแยกจากสารละลายโดยการตกตะกอน จากนั้นจะนำเอาสารละลายสังกะสีซัลเฟตไปแยกสังกะสีออกด้วยกระแสไฟฟ้าต่อไป

**2.1.4.2 กรรมวิธีการทำโลหะสังกะสีให้บริสุทธิ์**

จะใช้การแยกด้วยไฟฟ้าโดยมีหลักการใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นขั้วแคโทด และแผ่นตะกั่วเป็นขั้วแอโนดเป็นลักษณะที่เรียกว่า โลหะแอโนดที่ไม่มีการละลาย (Insoluble electrode) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้จะเป็นสารละลายสังกะสีซัลเฟตที่มีความเป็นกรด (pH ประมาณ 5) ใช้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดประมาณ 3.5-3.7 โวลต์ ขึ้นอยู่กับความเป็นกรดของสารอิเล็กโทรไลต์และระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด ความเข้มของกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 700-1,000 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายสังกะสีซัลเฟตจะแตกตัวให้ไอออนของสังกะสีกับซัลเฟตและน้ำจะแยกตัวให้ไฮโดรเจนกับออกซิเจน ซึ่งไฮโดรเจนจะไปรวมกับซัลเฟตไอออนจับตัวเป็นกรดกำมะถัน ออกซิเจนจะไปรวมตัวที่ขั้วแอโนดเป็นฟองแก๊สหนีไป ส่วนไอออนสังกะสีจะไปจับบนขั้วแคโทด เมื่อสังกะสีมีปริมาณที่มากพอสมควรจะนำเข้ามาจากถังอิเล็กโทรไลติกเซลล์ลอกเป็นแผ่นออกมาแล้ว นำไปหลอมเป็นแท่งโลหะสังกะสีบริสุทธิ์ต่อไป ส่วนน้ำยาอิเล็กโทรไลต์เมื่อเปลี่ยนเป็นกรดกำมะถันจะนำกลับไปใช้สำหรับการละลายแร่สังกะสี

การหลอมโลหะสังกะสีส่วนใหญ่จะใช้เตาไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำประเภทความถี่ต่ำที่อุณหภูมิประมาณ 500 $^{o}$C โดยใช้แอมโมเนียมคลอไรด์เป็นฟลักซ์กำจัดออกไซด์

**2.1.5 อุตสาหกรรมสังกะสีของประเทศไทย**

ผู้ประกอบการผลิตโลหะสังกะสีในประเทศไทยมีเพียงรายเดียวคือ บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ซึ่งมีกำลังการผลิตโลหะสังกะสีบริสุทธิ์และโลหะสังกะสีผสมปริมาณ 105,000 และ 8,000 ตันต่อปี ตามลำดับ โรงงานผลิตสังกะสีของบริษัทฯ มี 2 แห่ง ได้แก่ โรงงานผลิตสังกะสีแคลไซน์ จังหวัดระยอง และโรงงานถลุงสังกะสี จังหวัดตาก โดยแต่เดิมการผลิตสังกะสีจะใช้แร่สังกะสีซิลิเกตที่ได้จากเหมืองแม่สอดจังหวัดตากเท่านั้น แต่จากการที่ปริมาณสำรองของแร่สังกะสีหมดลงทำให้ต้องนำเข้าแร่สังกะสีซัลไฟด์จากต่างประเทศ โดยจะส่งแร่สังกะสีซัลไฟด์ไปผ่านกระบวนการย่างแร่ก่อนที่โรงงานผลิตสังกะสีแคลไซน์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบในรูปสังกะสีออกไซด์หรือแคลไซน์รวมทั้งได้ผลิตภัณฑ์พลอยได้เป็นกรดกำมะถันเข้มข้นอีกด้วย

ในส่วนของโรงงานถลุงสังกะสีจะใช้แร่สังกะสีซิลิเกตร่วมกับสังกะสีแคลไซน์ ผ่านกระบวนการสกัดด้วยสารละลายเคมีแล้วนำไปแยกโลหะสังกะสีด้วยกระแสไฟฟ้าจนได้โลหะสังกะสีบริสุทธิ์ร้อยละ 99.995 (กิตติพันธุ์, 2551) สำหรับสถิติการนำเข้าแร่สังกะสี การนำเข้าและส่งออกโลหะสังกะสีแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การนำเข้าแร่สังกะสีและการส่งออกโลหะสังกะสีของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 – 2562 (กรมศุลกากร, 2563)

| Statistics (Metric Tonnes) | 2558 | 2559 | 2560 | 2561 | 2562 |
|---|---|---|---|---|---|
| นำเข้าแร่สังกะสี | 82,710 | 32,306 | 0.1 | 318 | 3,414 |
| นำเข้าโลหะสังกะสี | | | | | |
| สังกะสีที่ยังไม่ได้ขึ้นรูป | | | | | |
| - สังกะสีไม่เจือ | | | | | |
| - มีสังกะสีตั้งแต่ 99.99% ขึ้นไปโดยน้ำหนัก | 64,240 | 62,946 | 95,838 | 117,486 | 119,774 |
| - มีสังกะสีน้อยกว่า 99.99% โดยน้ำหนัก | 1,373 | 135 | 1,383 | 6,076 | 1,248 |
| - สังกะสีเจือ | 14,235 | 13,979 | 22,642 | 33,225 | 31,901 |
| เศษและของที่ใช้ไม่ได้ที่เป็นสังกะสี | 570 | 176 | 508 | 255 | 413 |
| ฝุ่นสังกะสี ผงสังกะสี และเกล็ดสังกะสี | | | | | |
| - ฝุ่นสังกะสี | 1,393 | 1,351 | 1,420 | 1,617 | 1,762 |
| - อื่น ๆ | 1,302 | 1,720 | 1,037 | 917 | 1,215 |
| ท่อน เส้น โพรไฟล์ และลวด ทำด้วยสังกะสี | 1,651 | 1,689 | 1,748 | 1,871 | 1,684 |
| แผ่น แผ่นบาง แถบ และฟอยล์ ทำด้วยสังกะสี | 1,852 | 1,991 | 2,124 | 1,173 | 1,416 |
| ของอื่น ๆ ทำด้วยสังกะสี | 1,561 | 1,368 | 1,696 | 1,800 | 1,944 |
| ส่งออกโลหะสังกะสี | | | | | |
| สังกะสีไม่เจือ | 1,030 | 3,284 | 799 | 2,324 | 643 |
| สังกะสีเจือ | 193 | 382 | 1,050 | 987 | 1,158 |

### 2.1.6 มาตรฐานของสังกะสี

คุณภาพการใช้งานและการซื้อขายแร่และโลหะสังกะสี มีการกำหนดมาตรฐานแตกต่างกัน สำหรับแร่สังกะสีซัลไฟด์ที่ซื้อขายในตลาดยุโรปแบ่งออกเป็น 2 เกรดคือ สังกะสี 49-55% และสังกะสี 56-61% ในส่วนของคุณภาพของโลหะสังกะสีที่ซื้อขายในตลาดโลกที่สำคัญ มีดังนี้

1. ตลาดโลหะลอนดอน (London Metal Exchange, LME) สังกะสีชนิด special high grade มีสังกะสี 99.99%

2. ประเทศออสเตรเลีย โลหะสังกะสีชนิด Electrolytic Zinc Metals (EZ Metals) มีสังกะสีต่ำสุด 99.95%

3. ประเทศแคนาดา สังกะสีชนิด high grade มีสังกะสี 99.95%

4. ประเทศฝรั่งเศส สังกะสีชนิด virgin มีสังกะสี 97.75%

5. ประเทศเยอรมนี สังกะสีชนิด virgin มีสังกะสี 97.75%

6. ประเทศอิตาลี กำหนดโลหะสังกะสี 3 เกรด คือ มีสังกะสี 99.995, 99.95 และ 98.50%

7. ประเทศสหราชอาณาจักร กำหนดโลหะสังกะสี 3 เกรด คือ Good ordinary brand producer price (GOB) มีสังกะสีต่ำสุด 98.0% high grade มีสังกะสีต่ำสุด 99.95% special high grade มีสังกะสีต่ำสุด 99.99%

8. ประเทศสหรัฐอเมริกา สังกะสีชนิด special high grade มีสังกะสีต่ำสุด 99.99%

สำหรับโลหะสังกะสีเกรดต่าง ๆ ในทางการค้าตามมาตรฐาน ASTM B6 และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.957-2533 แสดงในตารางที่ 2.4 – 2.5

ตารางที่ 2.4 ลักษณะของโลหะสังกะสีเกรดต่าง ๆ ในทางการค้าตามมาตรฐาน ASTM B6 (อุบลศรีและเยาวลักษณ์, 2537)

[หน่วย, เปอร์เซ็นต์]

| องค์ประกอบ | ตะกั่ว สูงสุด | เหล็ก สูงสุด | แคดเมียม สูงสุด | สังกะสี ต่ำสุด |
|---|---|---|---|---|
| special high grade[1](SHG) | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 99.99 |
| high grade (HG) | 0.07 | 0.02 | 0.03 | 99.90 |
| intermediate | 0.20 | 0.03 | 0.40 | 99.5 |
| brass special[2] | 0.60 | 0.03 | 0.50 | 99.0 |
| prime western (PW) | 1.60 | 0.05 | 0.50 | 98.0 |

[1] tin in special high grade shall not exceed 0.001 เปอร์เซ็นต์

[2] when specified for use in the manufacture of rolled zinc or brass, aluminium shall not exceed 0.0005 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.5 ลักษณะของสังกะสีแท่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.957-2533 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2533)

[หน่วย, เปอร์เซ็นต์]

| ส่วนประกอบทางเคมี | | ชั้นคุณภาพ | | |
|---|---|---|---|---|
| | | SHG[1] | HG[2] | PW[3] |
| ตะกั่ว | สูงสุด | 0.003 | 0.03 | 0.5 - 1.4 |
| เหล็ก | สูงสุด | 0.003 | 0.02 | 0.05 |
| แคดเมียม | สูงสุด | 0.003 | 0.02 | 0.20 |
| อะลูมิเนียม | สูงสุด | 0.002 | 0.01 | 0.01 |
| ทองแดง | สูงสุด | 0.002 | - | 0.20 |
| ดีบุก | สูงสุด | 0.001 | - | - |
| สังกะสี | ต่ำสุด | 99.990 | 99.90 | 98.0 |

1 Special High Grade

2 High Grade

3 Prime Western

## 2.2 สังกะสีออกไซด์

### 2.2.1 สมบัติทั่วไป

สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวเป็นปุย น้ำหนักโมเลกุล (M.W.) 81.38 จุดหลอมเหลว 1,975±25 °C ความถ่วงจำเพาะ 5.43-5.70 ละลายในน้ำได้น้อยมาก มีความเป็นด่างเล็กน้อย เมื่อนำมาเผาอุณหภูมิถึง 500 °C สีจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและจะกลับเป็นสีเดิมอีกเมื่อเย็นลง Omran, Fabritius, Heikkinen, and Chen (2017) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสังกะสีออกไซด์ต่ออุณหภูมิแล้วไม่พบการสูญหายของมวลของสังกะสีออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,200 °C และพบการหลอมตัวติดกัน (Sintering) ที่อุณหภูมิระหว่าง 1,235 – 1,391 °C เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติของสารประกอบที่หลอมตัวติดกันด้วยเครื่องวิเคราะห์ XRD ก็ยังไม่พบการเปลี่ยนแปลงของเฟสต่าง ๆ ของสังกะสีออกไซด์ แต่เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะรีดักชันโดยมีสารที่เข้าทำปฏิกิริยารีดิวซ์ การรีดักชันของสังกะสีออกไซด์จะเกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิ 1,025 °C เมื่ออุณหภูมิ 1,265 °C สังกะสีจะถูกรีดิวซ์จนหมดแล้วสลายตัวกลายเป็นไอ (Pickles, 2008) ตามปฏิกิริยาที่อ้างถึงโดย Pickles (2008) และ Kim, Yoo, Park, and Lee (2006) ดังนี้

$$ZnO_{(s)} + C_{(s)} \rightarrow Zn_{(g)} + CO_{(g)}$$

$$ZnO_{(s)} + CO_{(g)} \rightarrow Zn_{(g)} + CO_{2(g)}$$

$$CO_{2(g)} + C_{(s)} \rightarrow 2CO_{(g)}$$

สังกะสีออกไซด์มีสมบัติที่ดีหลายประการคือ มีขนาดอนุภาคที่เล็กมากประมาณ 0.1-0.3 ไมครอน อนุภาคเรียงตัวหนาแน่นจึงทึบแสง สามารถป้องกันแสงอัลตราไวโอเลต (UV) ได้ มีความจุความร้อนสูง จุดหลอมเหลวสูง สัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ การนำความร้อนสูง สามารถนำไฟฟ้าได้ในขณะเดียวกันก็สามารถกระทำให้มีความต้านทานต่อไฟฟ้าได้ จากสมบัติข้อนี้จึงได้มีการนำเอาสังกะสีออกไซด์มาผลิตสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ยังเป็นสาร Amphoteric คือ สามารถละลายได้ทั้งในกรดและด่าง ทำปฏิกิริยาได้ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ดังนั้นสังกะสีออกไซด์จึงเหมาะที่จะใช้เป็นตัวควบคุมความเป็นกรดด่าง (pH regulator)

**2.2.2 การเกิด**

ในสมัยโบราณไม่มีใครรู้จักส่วนประกอบที่แท้จริงของสังกะสีออกไซด์และธาตุสังกะสีจนกระทั่ง Paracelsus ค้นพบในปี ค.ศ. 1520 ปี ค.ศ. 1774 Priestley นักบวชชาวอังกฤษค้นพบธาตุออกซิเจน ประวัติศาสตร์สมัยใหม่ของสังกะสีออกไซด์เริ่มขึ้นราวกลางคริสต์ศตวรรษที่ 18 แต่ยังผลิตได้ในระดับห้องทดลอง ต่อมาปี ค.ศ. 1840 Leclaire ชาวฝรั่งเศสเริ่มผลิตสังกะสีออกไซด์ในระดับอุตสาหกรรมเป็นคนแรก ผลิตโดยการเผาสังกะสีในอากาศเรียกขบวนการนี้ว่า French Process ปี ค.ศ. 1852 บริษัท The New Jersey Zinc Company ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ผลิตสังกะสีออกไซด์ขึ้นบ้าง แต่ได้พัฒนาขบวนการผลิตขึ้นมาใหม่โดยการหลอมแร่สังกะสีกับถ่านหินในเตาพิเศษโดยเฉพาะ เรียกขบวนการนี้ว่า American Process ปี ค.ศ. 1893 บริษัทนี้ได้ผลิตสังกะสีออกไซด์จากโลหะสังกะสีโดยตรงบ้าง ใช้ความรู้พื้นฐานทั้ง French Process และ American Process จากการพัฒนาขบวนการผลิตใหม่นี้ ทำให้สามารถผลิตสังกะสีออกไซด์ที่มีหลายขนาดหลายรูปร่าง และมีการเคลือบผิว (surface treatment และ fatty acid) เช่น stearic acid เพื่อเพิ่มสมบัติในการกระจายให้ดีขึ้น

**2.2.3 กระบวนการผลิต**

สังกะสีออกไซด์แบ่งการผลิตตามขบวนการผลิตได้ 3 วิธีคือ

**2.2.3.1 American Process (direct type)**

ผลิตจากแร่สังกะสี (zinc ore) โดยการรีดิวซ์และรีออกซิเดชันด้วยถ่านโค้ก ปฏิกิริยาเคมีมีดังนี้

$2C + O_2 \longrightarrow 2CO$

$ZnO + CO \longrightarrow Zn\ (vapour) + CO_2$ (1,000-1,200 °C)

$CO_2 + C \longrightarrow 2CO$ (1,100-1,200 °C)

$2Zn\ (vapour) + O_2 \longrightarrow 2ZnO$

**2.2.3.2 French Process (indirect type)**

ผลิตจากโลหะสังกะสี (metallic zinc) ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99.9 ดังนั้นสังกะสีออกไซด์ที่ผลิตได้จากขบวนการนี้จึงมีความบริสุทธิ์สูง ปฏิกิริยาเคมีมีดังนี้

$Zn\ (metallic) \longrightarrow Zn\ (vapour)$ (1,300-1,400 °C)

$2Zn\ (vapour) + O_2 \longrightarrow 2ZnO$

**2.2.3.3 Secondary Zinc Oxide Type**

1) ผลิตจากปฏิกิริยาเคมี สังกะสีออกไซด์อาจเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการผลิตสารเคมีตัวอื่น ๆ ดังนั้น สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์จึงแตกต่างกันไปบ้างตามแหล่งของวัตถุดิบและชนิดของปฏิกิริยา

2) ผลิตจากการถลุงเศษโลหะสังกะสีซึ่งไม่ค่อยบริสุทธิ์ ความบริสุทธิ์ของสังกะสีออกไซด์ที่ได้จึงขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบที่ใช้

ประเภทและเกรดของสังกะสีออกไซด์แบ่งตามขบวนการผลิตและขนาดอนุภาคได้ 3 ประเภท สังกะสีออกไซด์ที่ผลิตได้จาก French Process ยังแบ่งตามความขาวสว่างและความหนาแน่นเรียกว่าซีล (seal) ได้ 3 เกรดคือ

1. White Seal สังกะสีออกไซด์เกรดนี้จะมีความขาวสว่างมากที่สุด ความหนาแน่นต่ำสุด
2. Green Seal สังกะสีออกไซด์เกรดนี้จะมีความขาวสว่างรองลงมา ความหนาแน่นปานกลาง
3. Red Seal สังกะสีออกไซด์เกรดนี้จะมีความขาวสว่างน้อยที่สุด ความหนาแน่นสูงสุด

**2.2.4 การใช้ประโยชน์**

ปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตสังกะสีออกไซด์ได้เองแล้ว แต่ยังไม่เพียงพอกับการใช้งาน ยังคงนำเข้าจากต่างประเทศ ทั้งนี้เป็นเพราะสังกะสีออกไซด์เข้ามามีบทบาทมากในชีวิตประจำวันโดยได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (สอิ้ง, 2539)

**2.2.4.1 ด้านอุตสาหกรรม**

1) ยาง

การผลิตยางจะต้องนำเอายางมาทำปฏิกิริยากับกำมะถัน (vulcanization) เพื่อให้ยางแข็งและเหนียวขึ้น มีความทนทานมากยิ่งขึ้น ปฏิกิริยาเกิดขึ้นยากหรือเกิดไม่สมบูรณ์ถ้าหากไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา สังกะสีออกไซด์เป็นตัวเร่งที่ดีสำหรับปฏิกิริยานี้ โดยการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน Zn-accelerator complex เร่งให้เกิด sulfur crosslinks ในโมเลกุลยางเร็วขึ้นจนปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ ใช้เป็นตัวเติม (filler) อีก เพื่อปรับปรุงการนำความร้อนและการทนต่อแสงแดดได้ดีขึ้น นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านขบวนการวัลคาไนซ์ (vulcanize) เมื่อทิ้งไว้นานจะมีการสลายตัวปล่อยกรดออกมาเรียกว่า aging ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง สังกะสีออกไซด์สามารถช่วยยืดอายุการใช้งานให้นานขึ้นโดยการทำปฏิกิริยากับกรดที่ปล่อยออกมา

อุตสาหกรรมยางเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้สังกะสีออกไซด์มากที่สุด คือประมาณร้อยละ 50 ของสังกะสีออกไซด์ทั้งหมด ปริมาณที่ใช้อยู่ระหว่าง 3-5 ส่วนต่อยาง 100 ส่วน ในอนาคตคาดว่าจะมีการใช้มากขึ้นตามปริมาณการผลิตรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นทุกปี

2) สี

จะใช้ปริมาณสังกะสีออกไซด์รองลงมาจากอุตสาหกรรมยาง โดยทำหน้าที่เป็นรงควัตถุสีขาว (white pigment) ปรับปรุงลักษณะการไหลให้ดีขึ้นคือลื่นและเรียบ ไวต่อแสง ยืดอายุการเคลือบให้นานขึ้น โดยป้องกันแสง UV และทำปฏิกิริยากับกรดที่เกิดจากการสลายตัวของวัตถุประสาน (binder) ให้เป็นกลาง สังกะสีออกไซด์

ชนิดที่มีตะกั่วปนอยู่ด้วยจะทำให้สีทนต่อลม ฟ้า อากาศ ได้ดีกว่า แต่ไม่ไวต่อแสงและสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทาเร็ว นอกจากนี้สังกะสีออกไซด์ยังสามารถฆ่าเชื้อราได้อีกด้วย

อุตสาหกรรมสีแบ่งออกเป็นสีเคลือบภายนอก สีรองพื้นโลหะ สีเคลือบภายใน ล้วนแต่ใช้สังกะสีออกไซด์เป็นส่วนผสมทั้งสิ้น ปริมาณที่ใช้อาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้ว่าต้องการให้ทำหน้าที่อะไร ตัวอย่างเช่น ใช้เป็นส่วนผสมของสารเคลือบโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อนและเพิ่มความเสถียร ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมความเป็นกรดด่าง ปริมาณที่ใช้ประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 4.0 โดยน้ำหนัก (Dacral, 1994) ผสมในสีเคลือบโลหะที่มีการดูดกลืนรังสีต่ำและแผ่รังสีออกมาสูง ปริมาณที่ใช้ประมาณร้อยละ 50 ถึง 90 โดยน้ำหนัก (McDonnell Douglas Corp., 1994)

3) เซรามิก

จัดเป็นตลาดที่สำคัญของสังกะสีออกไซด์ โดยอยู่อันดับสามรองจากอุตสาหกรรมยางและอุตสาหกรรมสี ผลิตภัณฑ์เซรามิกต่าง ๆ ได้แก่

3.1) แก้ว

ในการผลิตแก้ว สังกะสีออกไซด์ช่วยลดเวลาหลอมให้สั้นลง ลดความหนืดเพิ่มความต้านทานต่อสารเคมีและดัชนีหักเห ลดอุณหภูมิจุดอ่อนตัว เพิ่มความยืดหยุ่น ลดสัมประสิทธิ์การขยายตัว ลดการแตกร้าวเนื่องจากเครื่องจักรและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (temperature shock)

ปริมาณที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของแก้ว เช่น แก้วสำหรับผลิตเป็นอุปกรณ์หรือเครื่องมือ แก้วทนความร้อน ใช้สังกะสีออกไซด์ประมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ส่วนแก้วที่ทนต่อกรดกัดแก้ว (HF) ใช้สังกะสีออกไซด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

3.2) สารเคลือบ (glaze)

สารเคลือบที่ใช้กับผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทเครื่องดินเผานั้นมักจะมีสังกะสีออกไซด์ผสมอยู่ด้วย สังกะสีออกไซด์ช่วยเพิ่มการหลอมละลาย (fluxing agent) ลดการขยายตัว เพิ่มความเป็นมันเงา ความขาว ความยืดหยุ่น ช่วยให้สีสุกใสยิ่งขึ้น ป้องกันการเกิดรอยย่นหยักเป็นชั้น ๆ สังกะสีออกไซด์จะเกิดเป็นสังกะสีซิลิเกตในเคลือบผลึก ทำให้เกิดลวดลายผลึกขณะเย็นตัวลง ผลิตภัณฑ์เครื่องดินเผาชนิดนี้จะมีลวดลายสวยงาม แปลกตา ราคาแพง ได้แก่ แจกัน เครื่องประดับ ของตกแต่งต่าง ๆ เป็นต้น

3.3) โลหะเคลือบ (enamel)

สังกะสีออกไซด์ในผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโลหะเคลือบทำหน้าที่เหมือนกับในสารเคลือบ โลหะที่ใช้เป็นพวกเหล็กและอะลูมิเนียม ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีการเคลือบแบบนี้ ได้แก่ เครื่องสุขภัณฑ์ เช่น อ่างอาบน้ำ เครื่องซักผ้า ตู้เย็น เป็นต้น

4) สิ่งทอ

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอได้มีการใช้ประโยชน์ของสังกะสีออกไซด์มานานแล้ว เพราะความขาวโดยธรรมชาติและความสามารถเข้ากันได้กับเส้นใย ไม่ว่าจะเป็นใยธรรมชาติหรือใยสังเคราะห์ ใช้ในขบวนการปั่นด้าย (spinning) การย้อมสี (dying) และการขัดผิวขั้นสุดท้าย (finishing) หน้าที่ของสังกะสีออกไซด์ในอุตสาหกรรมสิ่งทอคือ

- เป็น fixing agent โดยรวมตัวกับ surface-active agent เกิดเป็น Zn-acetate หรือ Zn-formate ช่วยให้สีติดเส้นใยดีขึ้น

- อนุพันธ์ของสังกะสีออกไซด์โดยเฉพาะสังกะสีคลอไรด์ใช้เติมลงไปในผ้า เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อราเป็นจุดด่าง ๆ และการเน่าเสียซึ่งเกิดจากเชื้อราและแบคทีเรีย

- ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มน้ำหนัก หรือตัวเติม ทำให้ผ้านุ่มมีน้ำหนักและทนต่อน้ำ

- เป็นส่วนผสมสำคัญของสารกันน้ำ (water proofing agents) สารกันไฟ (flame proofing agents) โดยผสมกับ chlorinated wax หรือ resin เมื่อถูกเผา สังกะสีออกไซด์จะแตกออกเกิดปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดเป็นสังกะสีคลอไรด์ที่สามารถป้องกันไฟได้

5) สารหล่อลื่น

ใช้ในน้ำมันหล่อลื่น (lubricating oil) และจาระบี (grease) ทำหน้าที่เป็นรงควัตถุ ตัวเติม และสารเคมีเพื่อปรับปรุงการหล่อลื่นให้ดีขึ้น ป้องกันการกัดกร่อน ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของจาระบีและเป็นตัวทำลายกรด (antiacid)

6) เคมี

ตลาดของสังกะสีออกไซด์ในอุตสาหกรรมเคมีกำลังเพิ่มขึ้น เพราะว่าสังกะสีออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysts) ในขบวนการผลิตสารเคมีหลายปฏิกิริยา เช่น alkylation, oxidation, dehydrogenation, hydrogenation การผลิตเมทานอลก็เป็นขบวนการหนึ่งที่ใช้สังกะสีออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สังกะสีออกไซด์นอกจากจะมีประโยชน์มากมายในตัวเองแล้วยังเป็นสารเริ่มต้นในการผลิตสารประกอบสังกะสีตัวอื่นอีก เช่น $ZnCrO_4$, $ZnSO_4$, $ZnCl_2$, $Zn_3(PO_4)_2.4H_2O$, zincresinate, zinc stearate

7) อุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาสมบัติทางด้านไฟฟ้าของสังกะสีออกไซด์มาใช้ประโยชน์ในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การผลิตสารกึ่งตัวนำ (semi-conductor) เซลล์รับแสงอาทิตย์ (solar cell) การถอดแบบไมโครฟิล์ม การพิมพ์สีสัมผัส (colour contact prints) เป็นต้น

**2.2.4.2 ด้านเกษตรกรรม**

สังกะสีเป็นธาตุที่สำคัญสำหรับสิ่งมีชีวิตทุกชนิดไม่ว่า คน สัตว์ หรือพืช สังกะสีจะก่อตัวกับเอนไซม์เป็น Metallo-enzyme ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเมแทบอลิซึมของร่างกายหลายชนิด เช่น เร่งปฏิกิริยาสร้างเซลล์ใหม่ ควบคุมการเปลี่ยนแปลงระดับฮอร์โมนในร่างกาย ถ้าขาดธาตุสังกะสีจะมีอาการผิดปกติมากมายหลายประการ ทำให้เจริญเติบโตช้า ตัวเล็ก ระบบการทำงานของตับและม้ามผิดปกติ ไม่มีการพัฒนาทางเพศ เกิดโรคผิวหนังง่าย แผลหายช้า เบื่ออาหาร

คนที่ขาดสังกะสีต้องกินอาหารที่มีธาตุสังกะสีสูง เช่น อาหารทะเล พืชสีเขียว ถ้าหากยังไม่เพียงพอ ต้องกินธาตุสังกะสีเสริม องค์การอนามัยโลกได้ประกาศว่าในผู้ใหญ่ปกติต้องการธาตุสังกะสี 15 มิลลิกรัมต่อวัน สำหรับ

ผู้หญิงที่กำลังตั้งครรภ์ต้องการเพิ่มอีกเท่าตัว สังกะสีออกไซด์ใช้เติมในอาหารเสริมสุขภาพ (dietary supplement) เพื่อเป็นแหล่งให้ธาตุสังกะสี

สังกะสีออกไซด์ใช้เติมลงในอาหารสัตว์ (feed additive) เพื่อป้องกันการขาดธาตุสังกะสี เนื่องจากสังกะสีปริมาณเล็กน้อยมีผลที่สำคัญต่ออวัยวะสัตว์ อันเกี่ยวเนื่องกับเอนไซม์และฮอร์โมนต่าง ๆ มากกว่า 300 ชนิด ซึ่งไม่สามารถใช้ธาตุอื่นทดแทนในกระบวนเมแทบอลิซึมได้ การขาดธาตุสังกะสีจะทำให้การเจริญเติบโตของสัตว์ลดลง เบื่ออาหาร ภูมิต้านทานลดลง โดยทั่วไปอุตสาหกรรมอาหารสัตว์จะใช้สังกะสีออกไซด์ที่มี % สังกะสีระหว่าง 72 – 75% (Technical Grade)

นอกจากนี้สังกะสีออกไซด์ยังมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากสังกะสีออกไซด์ทำหน้าที่เป็นแหล่งให้ธาตุสังกะสีแก่พืช (plant nutrition) พืชที่ขาดธาตุสังกะสีจะมีลักษณะผิดปกติคือมีใบน้อย ใบเป็นจุดด่าง ๆ โตช้าและให้ผลผลิตน้อย ลักษณะการนำไปใช้จะทำให้อยู่ในรูปสารละลายแล้วฉีดพ่นไปบนใบ แต่ปัจจุบันได้พัฒนาลักษณะการใช้ให้ได้ผลมากยิ่งขึ้นโดยการเติมลงในปุ๋ย

**2.2.4.3 ด้านเภสัชกรรม**

การนำเอาสังกะสีออกไซด์มาใช้ประโยชน์ทางด้านนี้ยังน้อย แต่พอสรุปหน้าที่ได้ดังนี้

- เป็นสารดับกลิ่นตัว (mild deodorant) โดยทำปฏิกิริยากับเหงื่อที่ออกมา
- เป็นส่วนผสมของน้ำยาแก้ผด ผื่น คัน (calamine lotion)
- เป็นส่วนผสมของสารต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ (antimicrobial) ซึ่งสามารถทนต่อความร้อนและลมฟ้าอากาศได้ในช่วงอุณหภูมิ 100-500 $^{\circ}$C (Mitsubishi Denki Kabushiki Kaisha, 1993)
- ทำหน้าที่เป็นสารฆ่าเชื้อ (fungicide) ในสารสำหรับเคลือบอุปกรณ์เก็บอากาศ (air handling equipment) (Foster Products Corp., 1994)

**2.2.4.4 ด้านเครื่องสำอาง**

ด้วยสมบัติพิเศษที่ดีหลายประการของสังกะสีออกไซด์ จึงได้มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเครื่องสำอางชนิดต่าง ๆ เช่น แป้งฝุ่นทาหน้า แป้งน้ำ ลิปสติก น้ำยาทาเล็บ ฯลฯ โดยทำหน้าที่เป็นตัวช่วยให้แป้งติดหน้า เรียบ เนียนสวย ทำให้กลิ่นหอมของน้ำหอมติดทนทาน เป็นตัวเติมในเครื่องสำอางแต่งหน้า ปริมาณที่ใช้ร้อยละ 13-15 โดยน้ำหนัก (Revlon, Consumer Products Corp., 1993)

นอกจากนี้สังกะสีออกไซด์ยังใช้เป็นส่วนผสมของรงควัตถุป้องกันแสง UV ที่นำมาผลิตเป็นเครื่องสำอางโดยเคลือบที่ผิวอนุภาคสารอนินทรีย์ตัวอื่น ทำหน้าที่ป้องกันแสง UV และควบคุมความเป็นกรดด่างของผลิตภัณฑ์ให้เป็นกลาง คือจาก pH 9-11 มาเป็น ph 5.5-7.5 ซึ่งความเป็นกรดด่างช่วงนี้เหมาะสำหรับผิวคน สังกะสีออกไซด์ที่ใช้สำหรับเครื่องสำอางนี้ต้องเป็นผงละเอียดมาก ความบริสุทธิ์สูง ไม่มีโลหะหนักที่เป็นพิษเจือปน เช่น ตะกั่ว แคดเมียม สารหนู แมงกานีส เป็นต้น

**2.2.4.5 ด้านสิ่งแวดล้อม**

ปัจจุบันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเป็นพิษกำลังเป็นปัญหาหนักที่บ่อนทำลายสุขภาพจิตของคนในสังคมเมือง เนื่องจากความเจริญทางด้านอุตสาหกรรมมีมากขึ้น จำนวนโรงงานก็มากขึ้น ปริมาณของเสียที่เป็นพิษก็เพิ่มมากขึ้นทุกวัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาทางกำจัดสารพิษเหล่านี้ให้ลดน้อยลงไป

มลภาวะทางอากาศเกิดจากในอากาศมีก๊าซพิษปนอยู่มากเกินกว่ามาตรฐานกำหนด ก๊าซพิษเหล่านี้ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น สังกะสีออกไซด์ได้เข้ามามีส่วนช่วยกำจัดก๊าซพิษเหล่านี้โดยทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ (absorbent) (Allied – Signal Inc., 1993) ปฏิกิริยาเกิดดังนี้

$$SO_2 + ZnO \rightarrow ZnS + ZnSO_3 + ZnSO_4$$

$$CO_2 + ZnO \rightarrow 2ZnCO_3.3Zn(OH)_2$$

นอกจากนี้สังกะสีออกไซด์ยังทำหน้าที่เป็น solid oxidation catalyst ในขบวนการกำจัดน้ำเสีย (Process for the catalytic of wastewater) (Kao Corp., 1993)

**2.2.5 มาตรฐานของสังกะสีออกไซด์**

ลักษณะของสังกะสีออกไซด์ในอุตสาหกรรมสีและยาง ตามมาตรฐานอังกฤษ มาตรฐาน ASTM และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แสดงในตารางที่ 2.6 – 2.9

ตารางที่ 2.6 สังกะสีออกไซด์ตามมาตรฐานอังกฤษ BS 254 (อุบลศรีและเยาวลักษณ์, 2537)

[หน่วย, เปอร์เซ็นต์]

| องค์ประกอบ | ชนิดที่ 1 | ชนิดที่ 2 |
|---|---|---|
| ซิงค์ออกไซด์ต่ำสุด | 99.0 | 95.0 |
| ตะกั่วออกไซด์สูงสุด | 0.3 | 3.0 |
| สารที่ละลายได้ในน้ำสูงสุด | 0.5 | 1.0 |
| สารที่ระเหยได้ที่ 98-102 องศาเซลเซียส สูงสุด | 0.5 | 0.5 |

ตารางที่ 2.7 สังกะสีออกไซด์สำหรับใช้ทำสีตามมาตรฐาน ASTM D79 (อุบลศรีและเยาวลักษณ์, 2537)

[หน่วย, เปอร์เซ็นต์]

| องค์ประกอบ | French process | American process |
|---|---|---|
| ซิงค์ออกไซด์ต่ำสุด | 99.0 | 98.5 |
| กำมะถันสูงสุด | 0.1 | 0.2 |
| ความชื้นและสารที่ระเหยได้สูงสุด | 0.5 | 0.5 |
| สิ่งเจือปนอื่นๆ รวมทั้งความชื้นและสารระเหยได้สูงสุด | 1.0 | 1.5 |
| แร่ค้างบนตะแกรงคัดขนาด 45 ไมโครเมตร สูงสุด | 0.1 | 0.25 |

ตารางที่ 2.8 สังกะสีออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมสี ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.221-2520 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2520)

[หน่วย, เปอร์เซ็นต์]

| องค์ประกอบและสมบัติ | ชั้นคุณภาพ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ซิงค์ออกไซด์ | ต่ำสุด 99 | มากกว่า 94.0 ถึง 99.0 | มากกว่า 87.0 ถึง 94.0 | มากกว่า 68.0 ถึง 87.0 | มากกว่า 62.0 ถึง 68.0 |
| ตะกั่ว (สารประกอบของตะกั่วคิดเป็น ตะกั่ว) | สูงสุด 0.3 | มากกว่า 0.3 ถึง 3.0 | มากกว่า 3.0 ถึง 8.0 | มากกว่า 8.0 ถึง 22.0 | มากกว่า 22.0 ถึง 27.0 |
| กากที่ค้างบนตะแกรงขนาด 63 ไมโครเมตร สูงสุด | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| สารที่ระเหย ณ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส สูงสุด | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส สูงสุด | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| สารละลายในน้ำ สูงสุด | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |

| | |
|---|---|
| ความเป็นกลางของส่วนที่สกัดด้วยน้ำ | เป็นกลางต่อเมทิลเรด |
| สี | เป็นสีเดียวกับสีตัวอย่างที่ได้ตกลงกันระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย |
| พลังการออกสี (lightening-power) | เป็นไปตามข้อตกลงกันระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย |
| การดูดน้ำมัน น้ำหนักต่อน้ำหนัก | 12-20 |

ตารางที่ 2.9 สังกะสีออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมยาง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.265-2521 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2521)

| องค์ประกอบ | เปอร์เซ็นต์ |
|---|---|
| ซิงค์ออกไซด์ ต่ำสุด | 98. 5 |
| ตะกั่ว สูงสุด | 0. 10 |
| กากที่ค้างบนตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร สูงสุด | 0. 20 |
| สารที่ระเหย ณ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส สูงสุด | 0. 30 |
| สารละลายในน้ำ สูงสุด | 0. 60 |
| ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ 27/27 องศาเซลเซียส | 5.50 - 5.65 |
| แมงกานีส สูงสุด | 0. 005 |
| ทองแดง สูงสุด | 0. 004 |
| แคดเมียม สูงสุด | 0. 10 |
| คลอรีน สูงสุด | 0. 10 |
| กำมะถัน สูงสุด | 0. 15 |

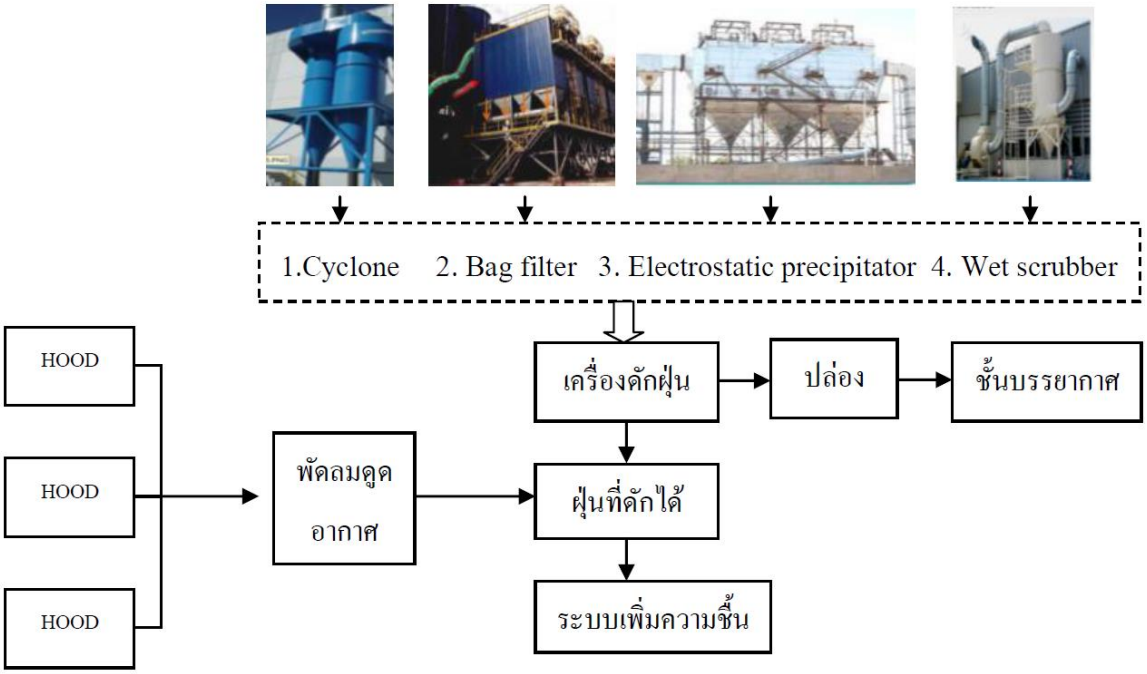
หมายเหตุ : ซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ทำยางสีขาวหรือสีอ่อน ต้องมีปริมาณซิงค์ออกไซด์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 และปริมาณตะกั่วต้องไม่เกินร้อยละ 0.03

## 2.3 ฝุ่นเหล็กจากเตาหลอมไฟฟ้า

ฝุ่นเหล็กเป็นกากของเสียที่เกิดจากกระบวนการบำบัดก๊าซภายในเตาหลอมไฟฟ้าชนิดเตาอาร์คไฟฟ้า (Electirc Arc Furnace, EAF) ของกระบวนการผลิตเหล็กที่ถูกดักจับโดยระบบดูดจับฝุ่น (Hood and Dedusting System) ในปล่องของเตาหลอมเล็ก (รูปที่ 2.4) ทั้งจากอุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลาง อุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย และอุตสาหกรรมต่อเนื่อง (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2551) ระบบดูดจับฝุ่นมีความสำคัญในการช่วยลดปริมาณการฟุ้งกระจายของฝุ่นในชั้นบรรยากาศ นอกจากปากดูดฝุ่น (Hood) และพัดลมดูดฝุ่น (Fan) แล้วยังประกอบด้วยเครื่องจับฝุ่น (Dedusting Equipment) โดยระบบที่ใช้ดูดจับฝุ่นแบบต่าง ๆ ได้แก่ ไซโคลน (Cyclone) ระบบถุงกรอง (Bag Filter) ระบบจับฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator) และระบบจับฝุ่นด้วยน้ำ (Wet Scrubber) เป็นต้น ซึ่งปากดูดฝุ่น (Hood) จะถูกติดตั้งให้ใกล้แหล่งกำเนิดมลภาวะหรือที่จะเกิดฝุ่นมากที่สุดเพื่อดูดจับฝุ่นให้ได้ทั้งหมด สำหรับฝุ่นที่ดูดได้ถือเป็นกากอุตสาหกรรมที่ต้องนำมากำจัด (กรม

อุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554) ทั้งยังเป็นของเสียอันตรายตามรหัส K061 ของสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อม สหรัฐอเมริกา (Environment Protection Agency: EPA) (Zunkel, 1997)

ฝุ่นเหล็กประกอบด้วยสารประกอบจำพวกเหล็กและสังกะสีเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีโลหะอื่น ๆ เจือปนอยู่อีก ได้แก่ โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) เป็นต้น (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554) ตารางที่ 2.10 แสดงผลวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ในฝุ่นเหล็ก (Horner, 2008) ในเศษเหล็ก 1 ตันจะทำให้เกิดฝุ่นเหล็กจากการหลอมประมาณ 15-18 กิโลกรัม (Huber et al., 1999)




รูปที่ 2.4 ระบบดูดฝุ่นของกระบวนการหลอมเหล็ก
(กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554)

ตารางที่ 2.10 แสดงผลวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ในฝุ่นเหล็ก (Charles, 2008)

| ธาตุ | O | Fe | Zn | Ca | Mn | Na | Cl | F | Pb | Cd | As | Hg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % | 30.8 | 25.0 | 22.0 | 7.0 | 2.0 | 1.0 | 3.0 | 0.08 | 3.0 | 0.08 | 0.004 | 0.0002 |

**2.3.1 พัฒนาการของการผลิตเหล็ก**

โลหะเหล็กเกิดจากการถลุงแร่เหล็กที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ทั้งที่เป็นองค์ประกอบของออกซิเจนและกำมะถัน แร่เหล็กที่สำคัญต่อการผลิตโลหะเหล็กคือแมกนีไทต์ ($Fe_3O_4$) มีเนื้อเหล็กอยู่ 75% และฮีมาไทต์ ($Fe_2O_3$) มีเนื้อเหล็กอยู่ 70%

การผลิตเหล็กเริ่มอย่างจริงจังเมื่อปี พ.ศ. 2398 โดยเซอร์ เฮนรี เบสเซเมอร์ (Sir Henry Bessemer, ค.ศ. 1813 - 1893, วิศวกรชาวอังกฤษ) เป็นผู้คิดค้นและประสบความสำเร็จในการถลุงเหล็กกล้าจากเหล็กดิบและสามารถขจัดสารเจือปน (impurity) ออกจากเหล็กดิบที่กำลังหลอมเหลวโดยใช้ออกซิเจนในอากาศทำปฏิกิริยากับสารเจือปนในเหล็กดิบหลอมเหลว โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) โดยอาศัยการเป่าอากาศเข้าไปในเตาทำให้เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกับออกซิเจนกับสารเจือปนในเหล็กดิบหลอมเหลว เตาที่ใช้ตั้งชื่อตามชื่อของเซอร์ เฮนรี เบสเซเมอร์ เรียกว่า เตาเบสเซเมอร์ สามารถผลิตและหลอมเหล็กได้เหล็กกล้าในเวลารวดเร็ว (กิตติพันธุ์, 2551)

การผลิตเหล็กกล้าจากเหล็กถลุงส่วนใหญ่เป็นการลดสารเจือปนและคาร์บอนในเหล็กถลุงให้ได้ปริมาณตามต้องการ ด้วยการเพิ่มออกซิเจนให้กับคาร์บอนและสารเจือปนโดยอาศัยปฏิกิริยาจากความร้อนและออกซิเจนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) โดยใช้ฟลักซ์ (Flux) ซึ่งได้แก่ หินปูน(Limestone) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ทำหน้าที่กำจัดสารเจือปนที่ติดมากับแร่เหล็ก หินปูนเมื่อถูกความร้อนจะแตกตัวและให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยที่ คาร์บอนไดออกไซด์ จะทำปฏิกิริยากับถ่านโค้กทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เกิดการลดออกซิเจนในแร่เหล็ก ส่วนแคลเซียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะช่วยกำจัดกำมะถันในเหล็กและกลายเป็นตะกรัน ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้ (กิตติพันธ์, 2551)

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

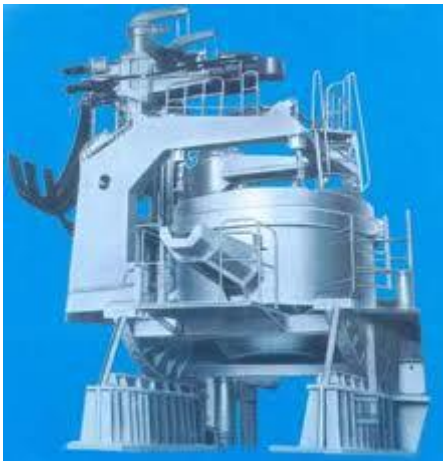
$$CO_2 + C \rightarrow 2CO$$

$$FeS + CaO + C \rightarrow CaS(slag) + Fe + CO$$

ส่งผลให้อังกฤษเป็นผู้นำในการผลิตเหล็กชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะกรรมวิธีการผลิตเหล็กแบบเบสเซเมอร์เรียกได้ว่าเป็นจุดเริ่มของการปฏิวัติอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก (Wangnaikul, 2011) หรือยุคเหล็ก (Iron Age) ที่มีการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีการผลิตโลหะที่สามารถหลอมโลหะประเภทเหล็กขึ้นมาทำเป็นเครื่องมือเครื่องใช้ได้ (Cunliffe, 2005) เตาเบสเซเมอร์ (Bessemer Furnace) แสดงในรูปที่ 2.5 เตาออกซิเจน BOF (Basic Oxygen Furnace) แสดงในรูปที่ 2.6 เตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Are Furnace) แสดงในรูปที่ 2.7 เตาโอเพนฮาร์ท (Open-Hearth) แสดงในรูปที่ 2.8 ปัจจุบันเตาเบสเซเมอร์นั้นถูกยกเลิกใช้ เพราะเตาออกซิเจนที่ถูกพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตออกซิเจนที่ได้ผลมากกว่าและรวดเร็วกว่าเข้ามาแทนที่ (สมชายและชูศักดิ์, 2518)

รูปที่ 2.5 Bessemer Furnace (Kelham Island Industrial Museum, 2012)

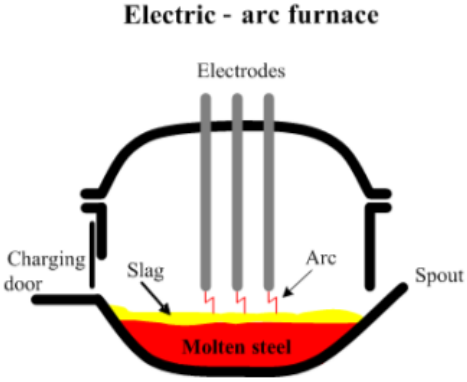
รูปที่ 2.6 Basic Oxygen Furnace (Siemens, 2012)



รูปที่ 2.7 Electric Arc Furnace (Xi'an Abundance Electric Technology, 2012)

รูปที่ 2.8 Open Hearth Furnace (Infrared Heating Technologies LLC, 2011)

กระบวนผลิตเหล็กกล้าทั้งหมดในประเทศไทย เป็นการผลิตจากเศษเหล็ก (EAF Route) เรียกว่า กระบวนการ EAF ทั้งหมด (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2551) โดยเริ่มจากการนำเศษเหล็ก (Steel Scrap) มาหลอมภายในเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace) ที่ใช้ไฟฟ้าเป็นพลังงานหลัก จากแท่งอิเล็คโทรด (Electrode) ทั้ง 3 แท่งโดยการอาร์ค (Arc) เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนสู่น้ำเหล็กภายในเตา ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (Peens, 2004) โดยใช้หลักเดียวกับการเกิดฟ้าผ่าคือ สร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแท่งอิเล็คโทรด เศษเหล็ก และน้ำ เหล็ก เกิดความต่างศักย์สูงมากกว่า 500 โวลต์ ก่อให้เกิดปฏิกิริยาเรียกว่า Arc column มีลักษณะคล้ายสายฟ้า มีอุณหภูมิมากกว่า 2,000 °C ร่วมกับพลังงานทางเคมีจากการรวมตัวของออกซิเจนกับคาร์บอนและจากการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติ กรณีอาร์คไฟฟ้าไม่ทั่วถึง (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2551) ซึ่งจะทำการหลอมเหลวเศษเหล็กร่วมกับวัตถุดิบอื่น ๆ ได้แก่ ฟลักซ์ หินปูน แมกนีไซด์ โดโลไมต์ เป็นต้น ทำให้ได้เหล็กกล้าหลอมเหลว ส่งผ่านสู่กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine) เพื่อทำการหล่อเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป กระบวนการผลิต EAF มีวัตถุดิบหลักคือ เศษเหล็กในลักษณะต่าง ๆ เช่น เหล็กถลุง (Pig Iron) และขี้ตะกรัน (Slag) (Wangnaikul, 2011)




รูปที่ 2.9 ภาพจำลองแบบเตาหลอมเหล็กไฟฟ้า (Electric Arc Furnace) (Kopeliovich, 2012)

**2.3.2 กระบวนการผลิตเหล็ก**

โครงสร้างอุตสาหกรรมเหล็กสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.10 คือ อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น,อุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลาง และอุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2551)

**2.3.2.1 อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น**

อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น เป็นขั้นตอนในการนำแร่เหล็กที่อยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์มาถลุงให้เป็นโลหะเหล็ก (Iron) ทำให้ได้เหล็กที่มีปริมาณสารเจือปนสูง โดยมีวัตถุดิบหลัก คือ แร่เหล็ก ถ่านหิน และหินปูน กระบวนการถลุงแร่เหล็กสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักคือ การถลุงสภาพของเหลว ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์คือ เหล็กถลุง (Pig Iron) และการถลุงสภาพของแข็ง ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์คือ เหล็กพรุน (Sponge Iron) ที่ใช้ในการผลิตเหล็กกล้า (Steel) และเหล็กหล่อ (Cast Iron) ชนิดต่าง ๆ

อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้นนี้จัดได้ว่าเป็นกระบวนการเริ่มต้นของอุตสาหกรรมเหล็กที่มีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กขั้นต่อ ๆ ไป รวมถึงอุตสาหกรรมที่ต่อเนื่องจากอุตสาหกรรมเหล็ก เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น เหล็กขั้นต้นเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง และจำเป็นต้องมีระบบโครงสร้างพื้นฐานและระบบสาธารณูปโภคที่เอื้ออำนวยเหมาะสมต่อการผลิตด้วย

**2.3.2.2 อุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลาง**

อุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลางจะใช้เหล็กถลุงและเหล็กพรุน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น รวมถึงเศษเหล็ก (Scrap) ที่นำกลับมาหลอมใช้ใหม่ เป็นวัตถุดิบหลักเพื่อผลิตเหล็กกล้า ซึ่งวิธีการผลิตที่นิยมใช้มีอยู่ 2 วิธี คือ

1) การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาพ่นออกซิเจน (Basic Oxygen Furnace: BOF) และ

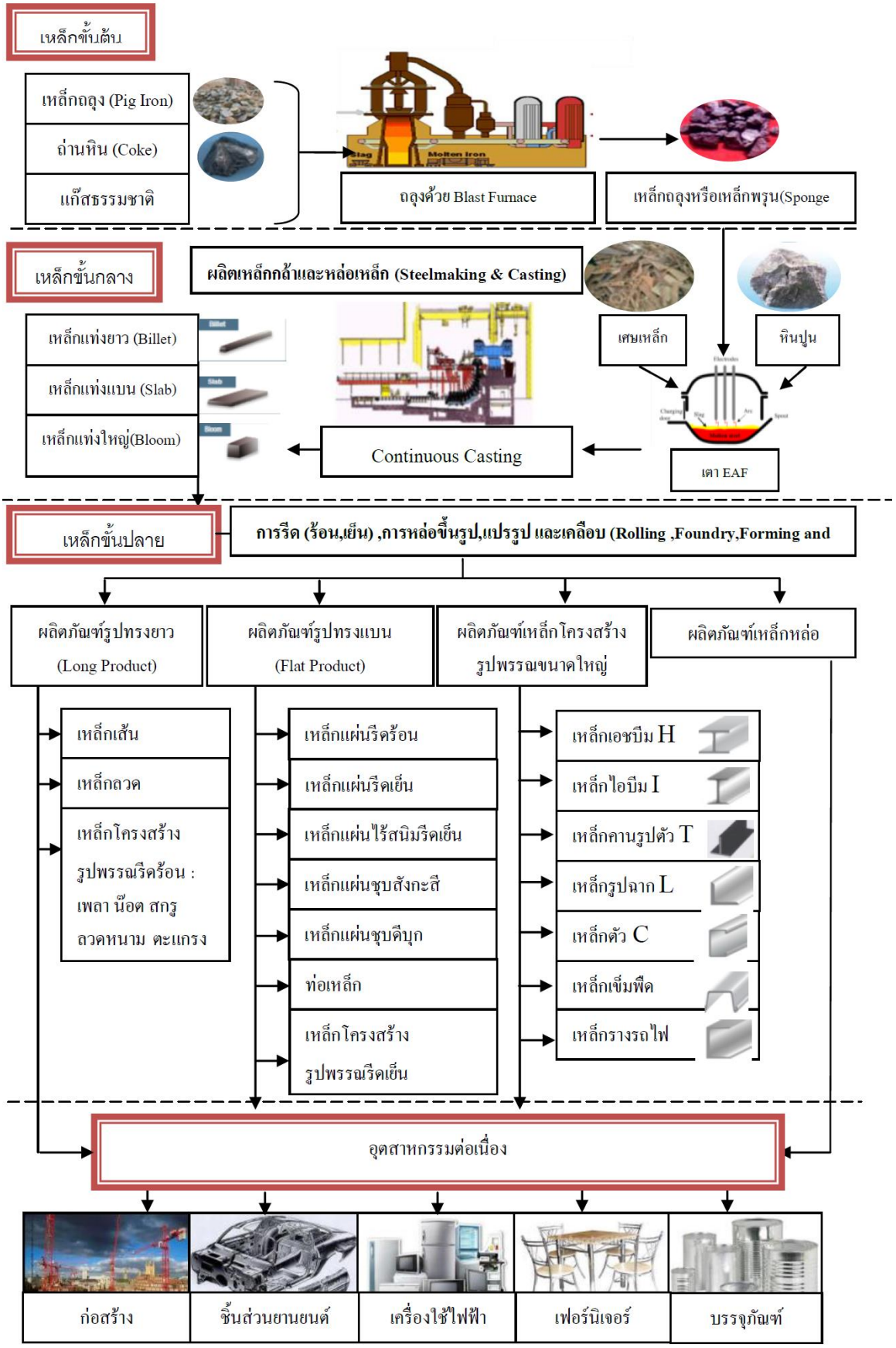
2) การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF)

สำหรับประเทศที่มีการจัดตั้งอุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลางภายในประเทศ ส่วนมากนิยมใช้วิธีการหลอมด้วยเตาพ่นออกซิเจน ซึ่งใช้เหล็กถลุงหรือเหล็กพรุนเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต วิธีการนี้มีกำลังการผลิตสูง สามารถผลิตได้ต่อเนื่องจากอุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น และสามารถควบคุมส่วนผสมและสมบัติของเหล็กกล้าได้ดี ขณะที่วิธีการหลอมด้วยเตาอาร์คไฟฟ้านั้นใช้เศษเหล็กเป็นวัตถุดิบหลัก ทำให้ต้นทุนมีราคาต่ำกว่าการใช้เหล็กถลุงหรือเหล็กพรุนเป็นวัตถุดิบหลัก เป็นเหตุให้ประเทศส่วนมากที่ไม่มีอุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลางนิยมใช้เตาชนิดนี้ แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีขีดจำกัดในเรื่องของคุณภาพที่ต่ำกว่าเช่นกัน สำหรับประเทศไทย เริ่มจากอุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลาง ซึ่งผลิตด้วยเตาอาร์ตไฟฟ้าโดยใช้เศษเหล็กเป็นวัตถุหลักในการผลิต นอกจากการผลิตเหล็กกล้าแล้ว อุตสาหกรรมขั้นกลางยังรวมถึงการหล่อเหล็กกล้าให้เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปที่มีอยู่ 3 ประเภท ได้แก่ เหล็กแท่งยาว (Billet) เหล็กแท่งแบน (Slab) และเหล็กแท่งใหญ่ (Bloom, Beam, Blanks)

**2.3.2.3 อุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย**

เป็นอุตสาหกรรมแปรรูปเหล็กกล้ากึ่งสำเร็จรูปที่ได้จากอุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลาง ผลิตให้ได้รูปร่างและลักษณะที่เหมาะสมต่อการใช้งานด้วยกระบวนการต่าง ๆ เช่น การรีดร้อน (Hot rolling) การรีดเย็น การชุบเคลือบผิว การผลิตท่อเหล็ก การตีขึ้นรูป รวมไปถึงการหล่อเหล็กด้วย ซึ่งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้จากขั้นตอนนี้ ได้แก่ เหล็กเส้น เหล็กลวด เหล็กแผ่นรีดร้อน เหล็กแผ่นรีดเย็น เหล็กแผ่นเคลือบ เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน เป็นต้น

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กของประเทศไทยมีการผลิตเฉพาะขั้นกลางและขั้นปลาย ได้แก่ การผลิตเหล็กกึ่งสำเร็จรูป (Semi-Finished Products) จากเศษโลหะโดยใช้เตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF) และการผลิตเหล็กสำเร็จรูปต่างๆ (Finished Products) เป็นหลัก สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันยังไม่มีการจัดตั้งโรงงานผลิตเหล็กต้นน้ำ ซึ่งแต่เดิมนั้นแนวทางการพัฒนาถูกกำหนดโดยความต้องการของตลาดในประเทศมากกว่าจากนโยบายของภาครัฐ จึงทำให้อุตสาหกรรมเหล็กเริ่มต้นพัฒนาจากปลายน้ำ เพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศมากกว่าการเริ่มต้นพัฒนาจากอุตสาหกรรมต้นน้ำ




รูปที่ 2.10 ผังกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมเหล็กแบบต่อเนื่อง (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2551)

## 2.4 เทคโนโลยีการรีไซเคิลฝุ่นเหล็ก

ฝุ่นเหล็กเป็นผลพลอยได้อย่างหนึ่งจากการหลอมรีไซเคิลเศษเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า ฝุ่นเหล็กประกอบด้วยโลหะเจือปนหลักที่สามารถนำกลับมาได้ ได้แก่ สังกะสีและเหล็ก โลหะทั้งสองชนิดจับตัวในรูปของสารประกอบซิงค์เฟอร์ไรท์ นอกจากนี้ ยังมีโลหะหนักอื่นๆ เจือปนอยู่อีกด้วย อาทิ ตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิล และโครเมียม เป็นต้น ซึ่งได้จากการหลอมรีไซเคิลเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กเครื่องมือ รวมทั้งเศษเหล็กใช้แล้วต่างๆ ฝุ่นเหล็กจัดอยู่ในกลุ่มกากของเสียอันตราย K061 เพราะมีโลหะหนักเจือปนอยู่มากกว่าที่มาตรฐานกำหนดโดยเฉพาะอย่างยิ่งตะกั่ว กรรมวิธีการสกัดนำเอาโลหะออกจากฝุ่นเหล็กแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ (1) การใช้ความร้อน (Pyrometallurgy) และ (2) การใช้ตัวทำละลาย (Hydrometallurgy) ในทางปฏิบัติพบว่ากระบวนการ Hydrometallurgy แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพสูงแต่กระบวนการ Pyrometallurgy ยังคงเป็นที่นิยมมากกว่าเนื่องจากมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากกว่า

เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการรีไซเคิลฝุ่นเหล็กหลักๆ แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ Pyrometallurgy กับ Hydrometallurgy

### 2.4.1 กระบวนการ Pyrometallurgy

กระบวนการ Pyrometallurgy ประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ ดังต่อไปนี้

1. Drying เป็นการไล่ความชื้นและน้ำที่ติดมากับเศษเหล็กก่อนป้อนสู่เตาหลอม

2. Calcining เป็นการเผาเพื่อให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบในวัสดุบางชนิดที่สลายตัวได้เมื่อได้รับความร้อน เช่น สารประกอบคาร์บอเนต สารประกอบออกไซด์

3. Roasting เป็นการเผาให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซและของแข็ง

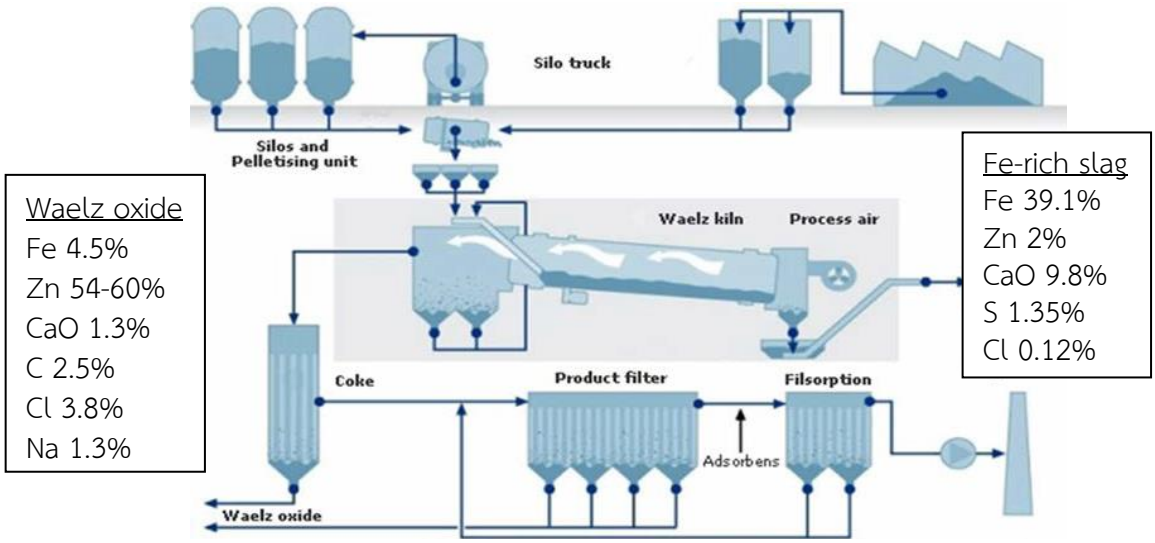
4. Smelting เป็นการถลุงเพื่อให้เกิดเฟสหลอมเหลวอย่างน้อย 1 เฟสในส่วนผสม

5. Refining เป็นการเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับโลหะที่ถลุงได้

การรีไซเคิลด้วยกรรมวิธี Pyrometallurgy ที่เป็นที่นิยมมากที่สุดได้แก่ Waelz process เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ได้รับการพัฒนาแล้ว มีความน่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพสูง มีความยืดหยุ่นของกระบวนการกล่าวคือสามารถปรับกระบวนการเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับกากของเสียอื่นๆ ได้ รวมไปถึงใช้พลังงานในกระบวนการต่ำ (ส่วนใหญ่ใช้ปริมาณถ่านโค้กน้อยกว่า 200 กิโลกรัมต่อฝุ่นเหล็ก 1 ตัน นอกจากนี้ ยังมี Pyrometallurgy กรรมวิธีอื่นๆ อีกโดยใช้ลักษณะของเตาเป็นเกณฑ์ อาทิ Rotary hearth, Multiple hearth, Shaft furnace, Plasma furnace และ Electrothermal เป็นต้น ซึ่งแต่ละกรรมวิธีมีชื่อเรียกต่างๆ กัน โดยกระบวนการ Pyrometallurgy ที่มีความเป็นไปได้สูงในทางปฏิบัติในการรีไซเคิลฝุ่นเหล็กเป็นหลักมีรายละเอียดดังนี้

**2.4.1.1 Waelz Process**

เป็นกระบวนการที่เก่าแก่และพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1910 เป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้มากที่สุดในการรีไซเคิลฝุ่นเหล็กและผงเหล็ก ในปี ค.ศ. 2006 ฝุ่นเหล็กกว่าร้อยละ 80 ใช้เทคโนโลยีนี้ในการรีไซเคิลเพื่อนำสังกะสีออกมา โดยอาศัยหลักการระเหิดของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น สังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม ออกจากส่วนผสมออกไซด์ในบรรยากาศ รีดักชันโดยมีถ่านโค้กเป็นแหล่งให้ความร้อน (ตัวรีดิวซ์) ภายในเตา Rotary kiln โดยไม่เกิดการหลอมเหลวของตะกรัน การรีไซเคิลฝุ่นเหล็กมีความเกี่ยวเนื่องกับอุตสาหกรรมการผลิตสังกะสีอย่างมาก ทั้งนี้ประมาณร้อยละ 60 ของสังกะสีที่ผลิตได้ในโลกใช้ในการเป็นสารป้องกันการกัดกร่อนในแผ่นเหล็กกล้าและเหล็กโครงสร้างต่างๆ เหล็กกล้าที่ผ่านการใช้งานแล้วจะถูกนำกลับมาหลอมใหม่ในเตาอาร์คไฟฟ้า ระหว่างกระบวนการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้านี้เองจะทำให้สังกะสีที่เคลือบผิวของเหล็กนั้นเปลี่ยนสภาพเป็นฝุ่น จากผังกระบวนการ Waelz Process ในรูปที่ 2.11 ขั้นตอนที่สำคัญของ Waelz process แบ่งออกไปเป็น 3 ส่วน คือ




รูปที่ 2.11 กระบวนการ Waelz Process (Global Steel Dust Limited, 2018)

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

(2) ส่วนของ Waelz line ส่วนผสมที่ผ่านการคลุกเคล้าเป็นอย่างดีแล้วจะถูกส่งผ่านไปยังเตาเผาย่างหรือ Waelz kiln ส่วนนี้ประกอบด้วยกระบวนการผสมฝุ่นเหล็กอัดก้อนกับส่วนประกอบอื่นๆ และการเผาไล่ก๊าซ โดยมีการชั่งน้ำหนักส่วนผสมอื่นๆ ป้อนไปยังเตา Rotary kiln ที่วางเอียงและหมุนด้วยความเร็ว 1 รอบต่อนาที อากาศถูกดูดเข้ามาในระบบ เพื่อทำให้ส่วนผสมแห้งและร้อนขึ้นจนเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิประมาณ 1,200 $^{o}$C ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการได้มาจากการเผาไหม้ของถ่านโค้ก ภายใต้สภาพปกติ Waelz process ไม่จำเป็นต้องอาศัยแหล่งพลังงานอื่นใดเพิ่มเติม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากส่วนนี้มี 2 ลักษณะด้วยกัน คือ (1) Waelz slag ได้จากกระบวนการแบบ Acidic route มีปริมาณของเหล็กค่อนข้างสูงและมีโลหะหนักเจือปนอยู่บ้าง แต่ไม่เป็นอันตรายหรือถูกชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมในระดับที่ต่ำมาก (ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด) สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างถนนได้ และ (2) Waelz oxide ประกอบด้วยออกไซด์ดิบของโลหะอื่นที่ไม่ใช่เหล็ก โดยมีออกไซด์ของสังกะสีเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 52-60 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถนำไปขายให้กับโรงงานอุตสาหกรรม อาทิ โรงถลุงสังกะสีหรือโรงงานเคมีได้โดยตรง หรือมีการปรับปรุงคุณภาพของออกไซด์ดิบด้วยกระบวนการ Dehalogenation ก่อนในส่วนล้างในขั้นตอนถัดไป องค์ประกอบทางเคมีของ Waelz oxide ที่ได้จากกระบวนการแสดงดังตารางที่ 2.11

อากาศที่เข้าสู่ระบบเป็นอากาศ ณ อุณหภูมิห้องแต่อากาศส่วนที่ออกจากระบบจะมีความร้อนประมาณ 700-800 $^{o}$C ส่วนการปลดปล่อยก๊าซออกจากกระบวนการนี้จะมีห้องดักจับฝุ่นซึ่งลอยออกมาจากส่วนผสมวัตถุดิบที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นของสังกะสีสูง ห้องดักฝุ่นนี้จะมีการสเปรย์น้ำเพื่อลดอุณหภูมิลง และมีการหมุนเวียนอากาศผ่านช่องระบายเพื่อลดความร้อนลงทางอ้อมร่วมด้วย ผง Waelz oxide จะถูกแยกออกมาจากก๊าซด้วยแผ่นกรอง ในขณะที่ก๊าซที่เหลือจะประกอบด้วย Dioxin จะถูกบำบัดด้วยเทคนิคการดูดซับด้วย Activated carbon หรือถ่านลิกไนต์

(3) ส่วนล้างผลิตภัณฑ์ ใช้ในการกำจัดสารฮาโลเจน (Dehalogenation) ใน Waelz oxide ดิบ บางโรงงานอาจไม่มีส่วนล้างผลิตภัณฑ์จึงไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียที่ต้องบำบัด สำหรับโรงงานที่มีส่วนล้างนี้มักออกแบบให้ล้างอย่างน้อย 2 ขั้นตอน จากนั้นทำการตกตะกอนออกไซด์ด้วยสารประกอบโซเดียมคาร์บอเนต ปริมาณของฮาโลเจน เช่น คลอรีน ฟลูออรีน คงเหลือในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 0.1 และร้อยละ 0.15 ตามลำดับ ส่วนสารละลายที่เหลือจากการล้างจะมีเกลือต่างๆ อาทิ โซเดียม โพแทสเซียมซัลเฟต จะถูกส่งต่อเพื่อบำบัดด้วยกรรมวิธี Evapocrystallization ต่อไป อย่างไรก็ตาม พบว่า ใน Waelz oxide ที่ผ่านการล้างแล้วยังคงมีคลอไรด์เจือปนอยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง (มากกว่า 1000 ppm) ในขณะที่ Waelz oxide ที่ไม่ผ่านการล้างจะมีปริมาณคลอไรด์ถึงกว่าร้อยละ 5-8 ซึ่งอาจเป็นปัญหาในกระบวนการสกัดโลหะสังกะสีต่อไป

กระบวนการ Waelz process จัดเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าใช้ได้ดีในการรีไซเคิลฝุ่นเหล็ก จัดเป็น Best Available Technology ปริมาณของสังกะสีที่ได้จาก

กระบวนการรีไซเคิลนี้จะอยู่ราวร้อยละ 92-96 ปริมาณของส่วนผสมต่างๆ สำหรับการรีไซเคิลฝุ่นเหล็ก 1 ตัน ด้วย Waelz process เป็นดังนี้

ถ่านโค้ก 180-350 กิโลกรัม

ทราย (Acid slag) 100-250 กิโลกรัม

ปูนขาว (Basic slag) 100-250 กิโลกรัม

พลังงานไฟฟ้า 150-300 kWh

ตารางที่ 2.11 องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก Waelz Process (Juergen, 2006)

| Composition | | EAF dust | Slag*) | Waelz Oxide | DL[2]) Waelz Oxide |
|---|---|---|---|---|---|
| Zn | [%] | 14-35 | 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

**2.4.1.2 Primus Technology (Paul Wurth PRIMUS)**

เป็นระบบที่ประกอบด้วย Rotary Hearth Furnace (RHF) หลายตัวประกอบกันเป็นชุด (Multiple Hearth Furnace, MHF) เชื่อมต่อโดยตรงกับเตา EAF เพื่อสกัดเอาเหล็กออกมาและมีตะกรันหลอมเหลวเป็นผลพลอยได้ เตา RHF ที่ต่อเรียงเป็นชั้นๆ นี้ทำให้โลหะที่เป็นเหล็กและไม่ใช่เหล็กระเหิดออกมาจากการเผาไหม้ที่มีถ่านโค้กเป็นแหล่งให้ความร้อนโดยไม่ก่อให้เกิดตะกรันหลอมเหลว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการมี 3 ชนิด คือ (1) เหล็กดิบ (Pig iron) และ Direct Reduced Iron (DRI) และ (2) ตะกรันที่มีปริมาณเหล็กสูง ใช้เป็น filler สำหรับงานก่อสร้างได้ (3) สังกะสีออกไซด์ RHF แสดงดังรูปที่ 2.12

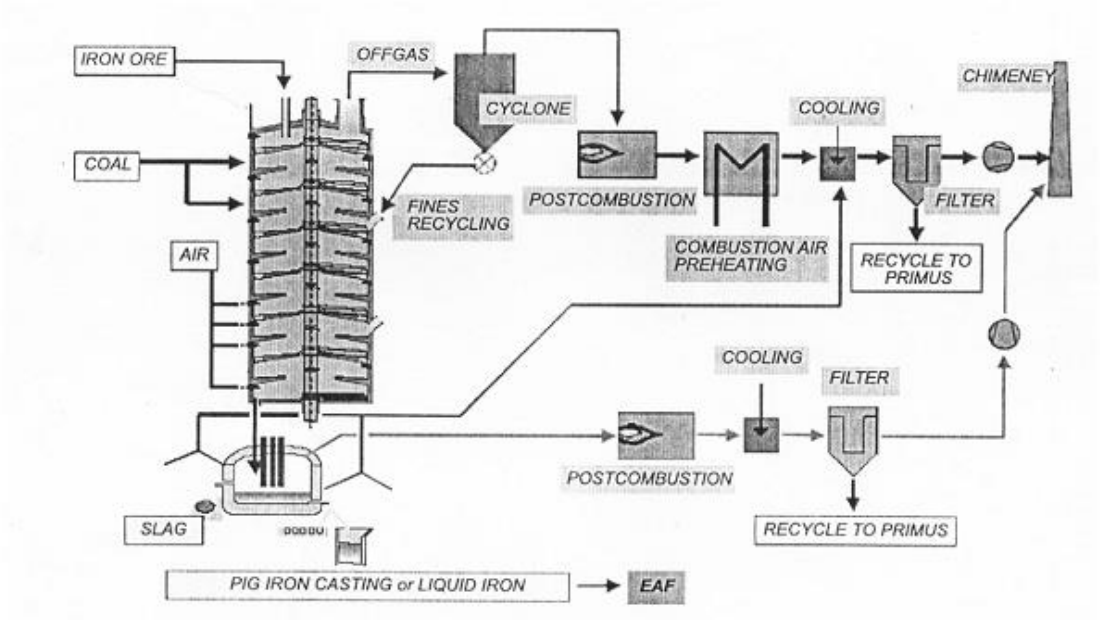
รูปที่ 2.12 Rotary Hearth Furnace (RHF) (Roth et al., 2001)

ขั้นตอนการรีไซเคิลด้วยเทคนิค PRIMUS แสดงดังรูปที่ 2.13 สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

(1) ส่วนเตรียมวัตถุดิบสำหรับเข้าระบบ ส่วนนี้จะคล้ายกับ Waelz process ทำหน้าที่ผสมส่วนผสมต่าง ๆ 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 $^{\circ}$C เพื่อป้องกันการเกาะตัวกันเป็นก้อนของของแข็งในเตา

(3) ส่วนของ Electric arc furnace เป็นเตาหลอมที่ติดตั้งอยู่ที่ด้านล่างหรือส่วนท้ายของ MHF เพื่อสกัดเอาเหล็กออกมา อยู่ในรูปของเหล็กปิกจาก Direct Reduced Iron (DRI) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหลอมส่วนนี้สามารถนำกลับไปใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กได้ใหม่และกากที่ได้ยังเปลี่ยนเป็นตะกรันที่มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีเอาไปใช้ในงานก่อสร้างได้ อุณหภูมิที่ใช้ในส่วน EAF อยู่ที่ประมาณ 1,300 $^{\circ}$C



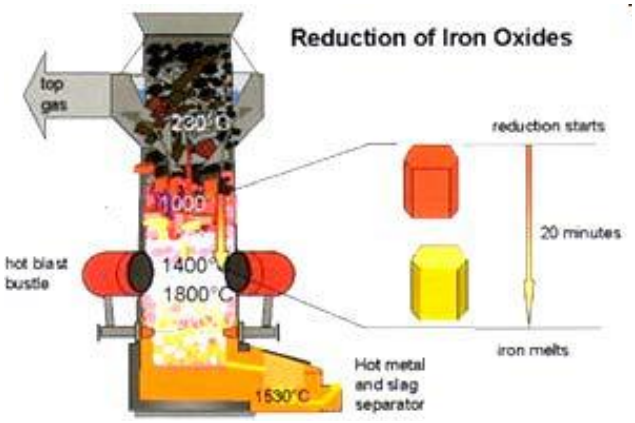

รูปที่ 2.13 กระบวนการ Paul Wurth PRIMUS (Roth et al., 2001)

**2.4.1.3 OxiCup Technology**

เป็นเทคโนโลยีอีกรูปแบบหนึ่งสำหรับการรีไซเคิลกากของเสียที่มีสังกะสีและ/หรือเหล็กออกไซด์เจือปนอยู่ในปริมาณมากได้ เริ่มมีการคิดค้นและพัฒนาตั้งแต่ปี 1980 เป็นต้นมา เตาที่ใช้เป็น Shaft furnace ถลุงได้ทั้งโลหะที่เป็นเหล็กและไม่ใช่เหล็กออกมาด้วยการใช้ถ่านโค้กก้อน หลักการทำงานของเตา Shaft furnace คล้ายกับเตาพ่นลม (Blast furnace) ใช้ในการรีไซเคิลกากได้หลายชนิด ส่วนผสมที่ใส่ลงในเตาประกอบด้วยเศษเหล็กและกากอื่นๆ ที่มีเหล็กเจือปนประมาณร้อยละ 60 ขึ้นไป รวมกับถ่านโค้กประมาณร้อยละ 13 เป็นแหล่งพลังงาน รวมไปถึงโลหะผสมเหล็ก-ซิลิคอน (FeSi) ร้อยละ 3.2 เพื่อปรับองค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก วัตถุดิบที่มีเหล็กออกไซด์เจือปนอยู่ในปริมาณมากไม่ว่าจะเป็นเศษเหล็ก แร่เหล็ก ผงเหล็กและอื่นๆ จะถูกผสมกับคาร์บอนและเตรียมให้อยู่ในรูปของวัตถุดิบอัดก้อนหรือ Self-reducing agglomerates เช่นเดียวกับเทคนิค Waelz process เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เอง (Self-reducing reduction) แล้วจึงป้อนเข้าสู่เตา Cupola การอัดก้อนกากวัตถุดิบสามารถทำได้ด้วยความชื้น ในบางกรณีจะใช้ตัวเชื่อมประสานอื่นๆ ด้วยเช่น ซีเมนต์ โซเดียมซิลิเกตหรือกากน้ำตาล (Molasse) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของก้อนที่อัดได้ สำหรับการอัดก้อนเป็น Self-reducing agglomerates จำเป็นต้องมีการผสมคาร์บอนลงไปด้วยนี้เรียกอีกอย่างว่า C-brick อัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ($CO_2$/CO) และอุณหภูมิซึ่งมักเกิดขึ้นอยู่ในช่วง 1,000-1,400 °C

เตาที่ใช้ในเทคโนโลยี OxiCup แบ่งออกได้เป็นเตาตอนบน ตอนกลางและตอนล่าง ดังรูปที่ 2.14 ตอนบนของเตาจะเป็นส่วนที่วัตถุดิบถูกป้อนเข้าสู่เตาทางด้านบน ส่วนกลางเป็นส่วนที่อุ่นวัตถุดิบที่เข้ามาจากด้านบนและหลอมวัตถุดิบ ตอนล่างของเตาจะเต็มไปด้วยถ่านโค้กซึ่งจะมีการพ่นเปลวไฟและอากาศผ่านถ่านโค้กเหล่านั้น ถ่าน

โค้กจะกลายเป็นก๊าซผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นไปถึง 1,900-2,500 °C ณ อุณหภูมิดังกล่าววัตถุดิบที่สัมผัสกับถ่านโค้กเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นละอองอย่างรวดเร็ว ก๊าซร้อนที่เกิดขึ้นจากถ่านโค้กเป็นปัจจัยสำคัญในการรีดิวซ์และหลอมเหล็กใน Self-reducing agglomerates อีกทั้งยังทำหน้าที่อุ่นวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่เตาจากตอนบนอีกด้วย ตอนล่างของเตายังเป็นส่วนที่เก็บกักน้ำเหล็กและตะกรันหลอมเหลวไว้ ซึ่งจะแตกต่างจากเตา Blast furnace ตรงที่ด้านล่างนี้สามารถกักเก็บส่วนที่หลอมเหลวแล้วไว้ได้หรืออาจส่งของเหลวนั้นผ่านไปยังภาชนะรองรับอื่นต่อไป




รูปที่ 2.14 กระบวนการ Oxicup และ Self-reducing agglomerates (Gudenau et al., 2005)

นอกจากนี้ เตายังเชื่อมต่อกับระบบการกำจัดและบำบัดก๊าซที่เกิดขึ้นด้วย กระบวนการ 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 °C และเป็นส่วนที่ปรับอุณหภูมิของอากาศให้ร้อนคงที่ก่อนที่เข้าสู่ Hot blast recuperator bundle ต่อไป

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

พลังงานที่ใช้ในการรีไซเคิลฝุ่นเหล็ก 1 ตัน ด้วยเทคนิค OxiCup นี้ต้องการ

ปริมาตรก๊าซร้อน 1100-1200 ลูกบาศก์เมตร (stp)

ออกซิเจน 150-200 ลูกบาศก์เมตร (stp)

ถ่านโค้ก 200-300 กิโลกรัม

อนึ่ง กระบวนการ OxiCup ไม่เน้นการนำสังกะสีกลับมาใช้ใหม่

**2.4.1.4 ZincOx**

เป็นกระบวนการ Hydrometallurgy เพื่อดึงสังกะสีที่อยู่ในวัตถุดิบออกมาด้วยตัวทำละลายแอมโมเนีย สังกะสีจะถูกทำให้ตกตะกอนได้เป็นซิงค์คาร์บอเนตก่อนที่จะนำไปเผาย่างเพื่อให้ได้ซิงค์ออกไซด์ ขั้นตอนของกรรมวิธี ZincOx จะเริ่มจากการผสมฝุ่นเหล็กกับถ่านหินบดและทำให้เป็นก้อนหรือ Briquette จากนั้นป้อนฝุ่นเหล็กอัดก้อนเข้าสู่เตาเผา Rotary hearth ที่อุณหภูมิ 1,300 °C เป็นเวลาประมาณ 15 นาที สังกะสีและตะกั่วจะระเหิดออกไปกับก๊าซร้อนไปยังส่วนดักจับฝุ่นอยู่ในรูปของออกไซด์เรียกว่า Halide Zinc Oxide (HZO) ซึ่งประกอบด้วยสังกะสีร้อยละ 62 ตะกั่วร้อยละ 4 และเฮไลด์ ได้แก่ คลอรีนและฟลูออรีนอีกประมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก สามารถกำจัดเฮไลด์ใน HZO ออกไปได้ด้วยการล้างสังกะสีความบริสุทธิ์สูงสามารถถลุงเพื่อแยกสังกะสีมาใช้ได้ด้วยกระบวนการปกติ ก้อน Briquette ที่เหลือมีความพรุนตัวสูงจะถูกอัดเป็นก้อนที่ใหญ่และมีความหนาแน่นมากขึ้นเรียกว่า Zinc hot briquette iron (ZHBI) ซึ่งสามารถป้อนเข้าสู่เตาเพื่อรีดิวซ์ได้เป็นเหล็กปิกต่อไป จุดเด่นของเทคโนโลยี ZincOx มีหลายประการได้แก่ มีผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหลายชนิดและพร้อมนำไปใช้งานต่อ เช่น (1) ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นของสังกะสีสูง (HZO) (2) ออกไซด์ที่มีเหล็กสูง (ZHBI) นำไปถลุงได้เหล็กปิก (3) กากที่เหลือสามารถใช้เป็นมวลรวมหยาบ (Aggregate)ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ และไม่เกิดของเสียจำพวกของเสียอันตรายปลดปล่อย เช่น Dioxin ออกสู่สิ่งแวดล้อม

**2.4.1.5 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 1,000 °C และระยะเวลาที่ใช้ค่อนข้างสั้นประมาณ 6-12 นาทีเท่านั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ Direct Reduced Iron (DRI) ซึ่งจะนำมาหลอมเป็นเหล็กปิกด้วยกรรมวิธีแบบต่างๆ เช่น ด้วยเตา Submerged arc furnace เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ Crude ZnO ซึ่งสามารถนำมารีไซเคิลด้วยกระบวนการอื่นๆ ต่อไป

**2.4.1.6 Ausmelt**

เป็นเทคโนโลยีที่เดิมใช้ในการผลิตโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น ตะกั่ว และภายหลังนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมเหล็ก กระบวนการนี้ใช้การพ่นถ่านหินบดละเอียดและอากาศที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงผ่านท่อเข้าไปยังอ่างตะกรันหลอมเหลว วัตถุดิบจำพวกฝุ่นเหล็ก ถ่านหินและฟลักซ์ จะถูกลำเลียงไปเพื่อหลอมให้เป็นของเหลว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ ได้แก่ ตะกั่วและออกไซด์สังกะสี

**2.4.1.7 Plasma furnace**

ใช้สำหรับกำจัดขยะพิษและประยุกต์ใช้กับการรีไซเคิลโลหะ เริ่มจากนำฝุ่นเหล็กและกากของเสียจากกระบวนการผลิตเหล็กมาผสมกับน้ำและสารสร้างตะกรันและทำให้แห้ง พ่นส่วนผสมใน Plasma furnace ได้

ส่วนผสมหลอมเหลวแยกส่วนโลหะหลอมเหลวและตะกรันออกจากกัน โลหะหลอมเหลวถูกปล่อยออกมาด้านล่างของเตา ส่วนที่เป็นตะกรันมีสังกะสีอยู่มาก แต่มักพบปัญหาเรื่องสิ่งเจือปนและรูปแบบของสังกะสี ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปของซิงค์คลอไรด์หรือ Hard zinc ซึ่งยากต่อการนำไปใช้งาน

**2.4.1.8 การสกัดสังกะสีในฝุ่นเหล็กด้วยปูนขาวเป็นตัวรีดิวซ์แทนถ่านโค้ก**

การสกัดสังกะสีในฝุ่นเหล็กด้วยปูนขาวมีหลักการคล้ายกับ Waels process แต่ใช้ปูนขาว (Lime, CaO) เป็นตัวรีดิวซ์แทนถ่านโค้ก พบว่าปูนขาวสามารถใช้แทนถ่านโค้กได้เป็นอย่างดีและทำให้ปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิต่ำลงและใช้ระยะเวลาสั้นกว่า อีกทั้งยังไม่เกิดเฮไลด์เจือปนในผลิตภัณฑ์อีกด้วย เมื่อผสมปูนขาวกับฝุ่นเหล็กและเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,000-1,100 °C จะได้สังกะสีออกไซด์และสารประกอบแคลเซียมเฟอร์ไรท์ ($CaFe_2O_5$) ซึ่งสามารถแยกเอาสารประกอบทั้งสองชนิดออกจากกันด้วยแม่เหล็ก เผารีดิวซ์หรือใช้กระบวนการ Hydrometallurgy โดยไม่ต้องล้างเพื่อกำจัดคลอรีนและฟลูออรีน สังกะสีที่ได้มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ยังอยู่ระหว่างการศึกษาค้นคว้าวิจัยและยังไม่ถูกพัฒนาเป็นระดับอุตสาหกรรม (Chairaksa et al., 2010)

**ข้อจำกัดของกระบวนการ Pyrometallurgy**

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

**2.4.2 กระบวนการ Hydrometallurgy**

กระบวนการ Hydrometallurgy ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ๆ 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 นอกจากนี้ อาจพบ

สารประกอบเชิงซ้อนอื่นๆ เช่น $(ZnMnFe)_2O_4$ สารประกอบซิงค์เฟอร์ไรต์ ($ZnO.Fe_2O_3$) เป็นสารประกอบที่ไม่สามารถทำให้แตกตัวได้ง่ายด้วยตัวทำละลายทั่วไป เพื่อให้ได้สังกะสีความบริสุทธิ์สูงตกตะกอนลงมา ทั้งนี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นกับความเข้มข้นของตัวทำละลาย กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแยก ความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการละลายด้วย กระบวนการละลายต้องใช้ตัวทำละลายซึ่ง อาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่

(ก) กลุ่มที่เป็นกรด (เช่น $H_2SO_4$, HCl และกรดอะซิติกเจือจาง) กลุ่มตัวทำละลายที่เป็นกรดใช้กันทั่วไปและมีราคาถูก สังกะสีสามารถนำออกมาจากสารละลาย $H_2SO_4$ ได้ด้วยกระบวนการ Electrowinning แต่จะพบปัญหาเรื่องความสามารถในการละลายของไอออนของเหล็กจากซิงค์เฟอร์ไรท์ลงในสารละลาย นอกจากนี้ยังได้ Current efficiency ต่ำ ในขณะที่การใช้ Electrowinning ดึงสังกะสีออกด้วยตัวทำละลาย HCl จะยุ่งยากกว่าเนื่องจากจะเกิดก๊าซคลอรีนที่แอโนด อยู่ในระหว่างการพัฒนายังไม่ได้ออกสู่ตลาด ส่วนการใช้กรดไนตริก ($HNO_3$) ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก จะแตกต่างจากกรดตัวอื่นตรงที่จะได้สังกะสีหรือออกไซด์ของสังกะสี

(ข) กลุ่มที่เป็นด่าง (เช่น $NH_4Cl$ และ NaOH) ปัญหาการละลายของไอออนเหล็กในตัวทำละลายที่เป็นด่างไม่เกิดขึ้นแต่ตัวทำละลายดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม แม้ว่าเทคโนโลยีนี้จะได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องแต่กลับมีเพียงบางกระบวนการเท่านั้นที่ใช้ได้ทางการค้า ทั้งนี้เนื่องจาก (1) สิ่งเจือปนในฝุ่นเหล็ก (2) จำเป็นต้องมีกระบวนการล้างกากที่เหลือจากกระบวนการ Hydrometallurgical อีกซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง

กระบวนการ Hydrometallurgy ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้ในการบำบัดฝุ่นเหล็ก เริ่มแรกใช้กรดซัลฟิวริก แต่พบปัญหาเนื่องจากสัดส่วนระหว่างเหล็กกับสังกะสี (Fe/Zn ratio) มีค่าสูงและมีปริมาณของฮาโลเจนมาก ทำให้ไม่สามารถนำสังกะสีออกมาในรูปของซิงค์ซัลเฟต ระหว่างการทำ Electrolysis ได้ ต่อมาจึงมีการศึกษาใช้ตัวทำละลายอัลคาไล พบว่า สามารถละลายสังกะสีออกมาได้ในขณะที่ไม่ละลายเหล็กออกมาด้วย อย่างไรก็ตาม การดึงสังกะสีหลังจากการละลายทำได้ยากเนื่องจากในสารละลายที่ได้มีคลอรีนเจือปนอยู่มากอาจจำเป็นต้องมีกระบวนการทางความร้อนร่วมด้วย แม้ว่าจะมีการใช้ตัวทำละลายแบบด่างและใช้ฝุ่นสังกะสีและกระบวนการ Electrowining และได้ผล แต่ยังคงประสบปัญหาเรื่องค่าใช้จ่าย โดยเปรียบเทียบแล้วการใช้ตัวทำละลายที่เป็นกรดสามารถใช้สารละลายที่ไม่ต้องมีความเข้มข้นมากนักเมื่อเทียบกับตัวทำละลายที่เป็นด่าง อีกทั้งยังสามารถควบคุมสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่า เช่น การใช้ตัวทำละลายกรดอะซิติกเจือจาง เริ่มจากการละลายหินปูนให้เป็นแคลเซียมอะซิเตตแล้วตามด้วยการล้างด้วยแอมโมเนีย เพื่อดึงสังกะสีออกมาจากกากตะกอน จากนั้นจึงทำการตกตะกอนสารละลายด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นซิงค์คาร์บอเนต ($ZnCO_3$) ส่วนสารละลายแคลเซียมอะซิเตตจะนำมาทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกได้เป็นยิปซัมและกรดอะซิติก

เทคนิคการรีไซเคิลฝุ่นเหล็กด้วยกระบวนการ Hydrometallurgy มีหลายเทคโนโลยีด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.12 และกระบวนการ hydrometallurgy ที่น่าสนใจมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.12 สรุปเทคนิคการรีไซเคิลฝุ่นเหล็กด้วยกระบวนการ Hydrometallurgy ตามชนิดของตัวทำละลาย (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554)

| ตัวทำละลาย | ชื่อกระบวนการ | สถานภาพปัจจุบัน |
|---|---|---|
| Ammonium-based (e.g. $NH_4Cl$) | Ezinex<br>HST | Stopped plant/terminated<br>Pilot plant only |
| Sulphuric acid ($H_2SO_4$) | Recupac<br>HydroMet<br>Zincex | Pilot plant only<br>Co-treatment with other raw materials<br>Commercial production in Japan, Bilbao Spain (1976), Lisbon Portugal (1980), Barcelona Spain (1997) |
| Chloride-based (e.g. $FeCl_3$-HCl, HCl) | Terra Gaia<br>Cashman | |
| Caustic soda (i.e. NaOH) | Zimaval | Stopped plant/terminated |
| Alkali leaching | Amax (Cebedau process) | |

**2.4.2.1 Ezinex**

เป็นกระบวนการลูกผสมระหว่าง Pyrometallurgy และ Hydrometallurgy อีกกระบวนการหนึ่ง แต่ Ezinex จะเน้นจุดเด่นไปที่ Hydrometallurgy คือ การละลายด้วยตัวทำละลายและการแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้ามากกว่า เทคนิคนี้อาศัยตัวทำละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ ($NH_4Cl$) เพื่อละลายสังกะสีในฝุ่นเหล็ก เหมาะกับฝุ่นเหล็กที่มีความเข้มข้นของเหล็กต่ำ สำหรับกระบวนการนี้ฝุ่นเหล็กที่จะทำการรีไซเคิลอาจถูกนำไปละลายในสารละลาย $NH_4Cl$ หรือถลุงในเตาเหนี่ยวนำ (INDUTEC induction furnace) เพื่อสกัดให้ได้สังกะสีออกไซด์ดิบ เหล็กปิก และตะกรัน ในกรณีที่นำเอาฝุ่นเหล็กละลายในสารละลาย $NH_4Cl$ ส่วนที่ไม่ละลายได้แก่เหล็กออกไซด์และซิงค์เฟอร์ไรท์จะถูกแยกออกมาจากสารละลายก่อนแล้วนำไปใส่ลงในเตาอาร์คไฟฟ้าเพื่อนำเหล็กกลับคืนและสร้างละอองฝุ่นของสังกะสี อย่างไรก็ตาม ในสารละลายอาจมีโลหะหนักบางชนิด เช่น ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดงละลายออกมาด้วย ซึ่งจะทำให้ความบริสุทธิ์ของสังกะสีในสารละลายลดลง การทำให้สารละลายสังกะสีมีความบริสุทธิ์มากขึ้นเรียกว่า Cementation คือ การใส่ผงสังกะสีลงในสารละลายเพราะทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักดังกล่าวโดยเฉพาะอย่างยิ่งตะกั่วแยกตัวออกมาในรูปของโลหะ จากนั้นจะคัดแยกเอาตะกอนที่ตกออกมาด้วยการกรองเพื่อนำไปรีไซเคิลนำตะกั่วออกไปใช้ต่อไป ส่วนสารละลายที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นภายหลังการกำจัดตะกั่วออกไปแล้วจะเป็นสารละลายอิเลคโทรไลต์และป้อนเข้าสู่ Ezinex cell ประกอบด้วยขั้วแคโทดทำจากโลหะไททาเนียมและแอโนดที่ทำจากกราไฟต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

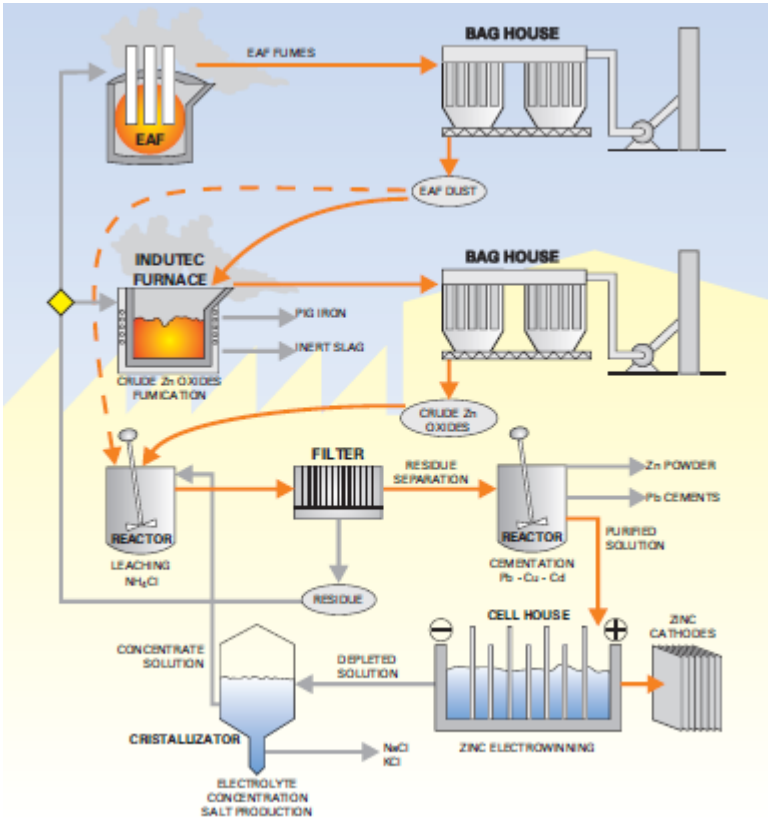
ปฏิกิริยาที่แคโทด $Zn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Zn$

ปฏิกิริยาที่แอโนด $2Cl^{-} \rightarrow Cl_2 + 2e^{-}$

$Cl_2 + 2/3NH_3 \rightarrow 1/3N_2 + 2HCl$

สารละลายที่ทำการสกัดเอาสังกะสีออกแล้วจะส่งไปยังบ่อพัก สารละลายดังกล่าวประกอบด้วย โซเดียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ จะถูกสกัดออกมาใช้งานต่อไป กระบวนการ Ezinex ไม่ก่อให้เกิดของเสียปลดปล่อยออกจากระบบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ Ezinex จะมีหลายตัวได้แก่ (1) สังกะสี (2) ตะกั่ว (3) สารประกอบอัลคาไลคลอไรด์ สำหรับงานหลอมอะลูมิเนียมรีไซเคิล (4) เหล็กปิก นำกลับเข้าเตาอาร์คไฟฟ้าได้ใหม่ และ (5) ตะกรันอัดเม็ดเพื่อใช้เป็นทรายกัดผิว (Blasting) หรือ Filler สำหรับสร้างถนน (รูปที่ 2.15)

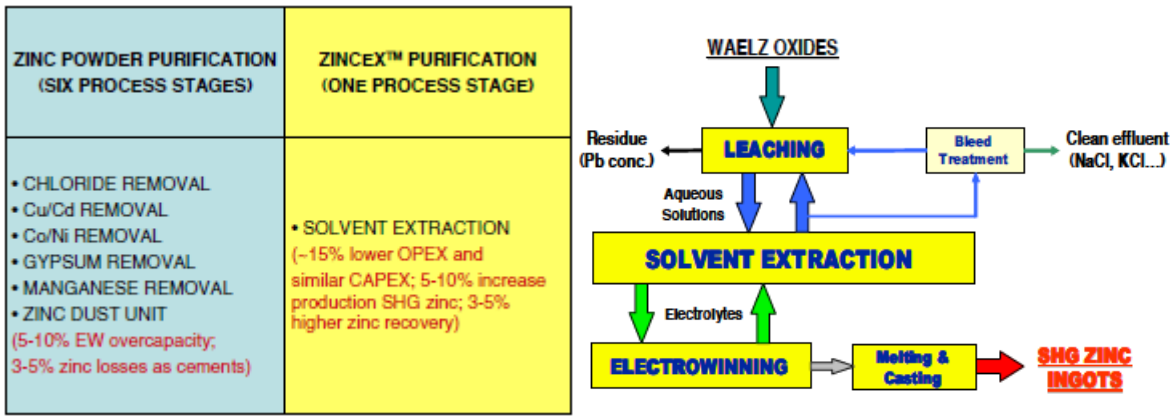
สำหรับระบบที่ประกอบด้วยแคโทดเดียวใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 350 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลาที่ใช้ใน stripping ประมาณ 48 ชั่วโมง และได้น้ำหนักสุทธิของสังกะสีประมาณ 7 ตันต่อปี




รูปที่ 2.15 กระบวนการ Ezinex (Engitec Technologies S.p.A., 2008)

### 2.4.2.2 ZincEx

เทคโนโลยี ZincEx เป็นกระบวนการที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีลักษณะเด่นคือเพื่อลดขั้นตอนการล้างเอาโลหะหนักและสิ่งเจือปนที่ละลายอยู่ในสารละลายร่วมกับสังกะสีออกมาด้วยวิธี Solvent Extraction (SX) สิ่งเจือปนที่ยังคงตกค้างอยู่ในสารละลายจะเป็นอุปสรรคต่อการแยกด้วยไฟฟ้า เช่น คลอรีนกัดกร่อนขั้วแอโนดหรือมีการปนเปื้อนของตะกั่วหรือก๊าซฮาโลเจนในขั้นตอนการแยกด้วยไฟฟ้าซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติการได้ ดังนั้นสังกะสีไม่ว่าจะได้จากกากที่มีสังกะสีออกไซด์อยู่มากหรือในรูปของ Waelz oxide จึงจำเป็นต้องผ่านการล้างก่อนเสมอหากต้องนำมาเข้ากระบวนการ Hydrometallurgy อย่างไรก็ดี การล้างเอาสิ่งเจือปนต่างๆ เหล่านี้ออกกลับเป็นจุดอ่อนที่สำคัญของกระบวนการ Hydrometallurgy กล่าวคือต้องใช้ปริมาณของน้ำในการกำจัดสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก ทำให้เกิดขั้นตอนที่ซับซ้อนและสูญเสียสังกะสีออกไปกับสิ่งเจือปนด้วย ต้องเลือกใช้สารช่วยเร่งการตกตะกอนที่เหมาะสม นอกจากนี้ การล้างอาจส่งผลต่อปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการสกัดอีกด้วย รูปที่ 2.16 แสดงแผนผังและการเปรียบเทียบขั้นตอนการล้างด้วยวิธีการปกติกับการล้างด้วยเทคนิค 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 (1) โลหะสังกะสีความบริสุทธิ์สูง ได้จากการ Electrolysis (2) ซิงค์ซัลเฟตความบริสุทธิ์สูง ได้จากการตกผลึก (3) ซิงค์ออกไซด์ ได้จากการตกตะกอนและการเผาแคลไซน์ (Calcinaion) และ (4) เกลือต่างๆ




รูปที่ 2.16 กระบวนการ ZincEx (Frias, 2009)

**ข้อจำกัดของกระบวนการ Hydrometallurgy**

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

## 2.5 ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าและตะกรันจากเตาอุ่นน้ำเหล็ก

ตะกรันเหล็กเป็นผลิตผลที่เกิดจากกระบวนการปรับปรุงสมบัติของน้ำเหล็ก ในการหลอมเศษเหล็กเศษเหล็กที่เป็นวัตถุดิบมักจะมีปริมาณองค์ประกอบที่เกินกว่ามาตรฐานที่ต้องการเสมอ อาทิ คาร์บอน ซิลิคอน แมงกานีส ไททาเนียม ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ การทำให้น้ำเหล็กมีองค์ประกอบตามต้องการ ต้องมีการกำจัดหรือลดปริมาณสารมลทินเหล่านี้ผ่านปฏิกิริยาทางเคมีด้วยการใส่สารสร้างตะกรัน เช่น หินฟันม้าหรือปูนขาว ลงไป ตะกรันจึงเป็นสารประกอบอโลหะที่ประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา หินปูน แมกนีเซีย เหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันน้ำเหล็กค่อนข้างไม่คงที่เท่าใดนัก ตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF slag) มีปริมาณเหล็กออกไซด์เจือปนค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 25-40 โดยน้ำหนัก มีแคลเซียมออกไซด์และซิลิกอนออกไซด์ที่ประมาณร้อยละ 30 และ 15 มีสีดำค่อนข้างเข้ม จัดเป็นวัสดุไม่ใช้แล้วที่ไม่มีพิษ ในขณะที่ตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาอุ่นน้ำเหล็ก (Ladle furnace) มีฤทธิ์เป็นด่างกว่ามาก เนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ (มาจากปูนขาว) ต่อซิลิกาค่อนข้างสูง มีแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 35-60 โดยน้ำหนัก มีสีเทาเข้ม แข็ง และมักมีเหล็กเจือปนมาด้วย ตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาอุ่นน้ำเหล็กจัดเป็นวัสดุไม่ใช้แล้วที่ไม่มีพิษเช่นเดียวกับตะกรันที่เกิดในเตาอาร์คไฟฟ้า

การนำตะกรันทั้งสองชนิดมาใช้ใหม่ต้องคำนึงถึงปริมาณของแคลเซียมและซิลิกาเป็นหลัก การนำตะกรันกลับมาใช้งานนอกจากการบดย่อยขนาดให้เหมาะสมแล้ว ยังต้องทำให้ส่วนผสมของตะกรันมีความเสถียรทางเคมีและลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตะกรันเนื่องจากความชื้นด้วยการบ่มก่อนนำไปใช้งาน ตะกรันที่เกิดในเตาอาร์คไฟฟ้าสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ นิยมใช้เป็นมวลรวมผสมในยางมะตอยสำหรับงานก่อสร้างถนน และวัสดุกรุพื้นถนนมากกว่าตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาอุ่นน้ำเหล็กเพราะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำกว่า อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวิจัยตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาอุ่นน้ำเหล็กสามารถนำกลับมาใช้ในรูปของวัสดุดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโครงสร้างสำหรับชายฝั่งทะเลและยังสามารถใช้เป็นฟลักซ์แทนปูนขาวในกระบวนการหลอมเศษเหล็กกล้าได้บางส่วน

### 2.5.1 เทคโนโลยีการรีไซเคิลตะกรันเหล็กที่เกิดในเตาอาร์คไฟฟ้าและเตาอุ่นน้ำเหล็ก

หลังจากกระบวนการหลอมวัตถุดิบ ได้แก่ เศษเหล็ก เหล็กปิก สารสร้างตะกรัน (ฟลักซ์) และสารปรับปรุงสมบัติของน้ำเหล็กแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้นอกจากจะเป็นเหล็กและฝุ่นเหล็กแล้วยังมีตะกรันออกมาด้วย ส่วนใหญ่มักนำไปใช้ในการทำเป็นวัสดุที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างถนน เป็นวัสดุปูพื้นถนนหรือเป็นมวลรวม (Aggregate) ผสมกับยางมะตอย ผสมกับซีเมนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังสามารถนำมาเป็นวัสดุตกแต่งผิวหรือใช้เป็นตัวปรับสภาพดินได้ ตะกรันที่ได้นี้จะต้องผ่านการบด การคัดขนาดและทำให้เสถียรเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรให้น้อยที่สุดก่อนนำไปใช้งานต่อไป การทำให้ตะกรันเสถียรมี 2ลักษณะคือ (1) ทำให้เย็นตัวลงในอากาศอย่างช้า ๆ แล้วตามด้วยการบ่มด้วยน้ำ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และ (2) ปรับสภาพด้วยทรายแล้วจึงนำมาคัดขนาด

ส่วนผสมทางเคมีของตะกรันแสดงตารางที่ 2.13 ตะกรันทั้งสองชนิดนี้แตกต่างกันตรงอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่อซิลิกา ($SiO_2$) โดยแคลเซียมออกไซด์มีฤทธิ์เป็นด่างในขณะที่ซิลิกามีฤทธิ์เป็นกรด อัตราส่วนนี้บ่งบอกถึงสมบัติความเป็นกรดเบสของตะกรัน กล่าวคือยิ่งอัตราส่วนมีค่าสูงตะกรันก็มีความเป็นเบสมาก นอกจากนี้ ในบางกรณีหากมีแมกนีเซีย (MgO) อยู่มากจะพิจารณาผลรวมของแคลเซียมออกไซด์กับแมกนีเซียต่อซิลิกา ทั้งแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียล้วนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อได้รับความชื้นของตะกรันทั้งสิ้น ส่วนเฟสองค์ประกอบของตะกรันเตาอาร์คไฟฟ้าและตะกรันเตาอุ่นน้ำเหล็กแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.14 ตะกรันเตาอาร์คไฟฟ้ามีปริมาณของเหล็กออกไซด์สูงกว่าตะกรันเตาอุ่นน้ำเหล็กจะเกิดสารประกอบที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่มาก ส่วนองค์ประกอบของตะกรันเตาอุ่นน้ำเหล็กจะมีสารประกอบไดแคลเซียมซิลิเกตและไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นหลัก

ตารางที่ 2.13 ส่วนผสมทางเคมีของตะกรันในกระบวนการหลอมเหล็กกล้า (Nippon Slag Association, 2008)

| Constituents (%) | BF slag | EAF slag | LF slag |
|---|---|---|---|
| CaO | 42.0 | 25-35 | 48-54 |
| $SiO_2$ | 33.8 | 8-18 | 12-18 |
| $Al_2O_3$ | 14.4 | 3-10 | 1-4 |
| MgO | 6.7 | 2-9 | 1-4 |
| $Fe_2O_3$ | 0.3 | 20-30 | 14-19 |
| others | ≈ 2 | 1.7-4 | 2.8-4 |

ตารางที่ 2.14 องค์ประกอบทางแร่ของตะกรัน (Bjorkman et al., 1996)

| Identified phase | Chemical composition | BOF slag | EAF slag | Ladle slag |
|---|---|---|---|---|
| Dicalcium silicate-calcium phosphate | $Ca_2SiO_4$-$Ca_3(PO_4)_2$ | X | X | |
| Dicalcium silicate | $Ca_2SiO_4$ | | | x |
| Tricalcium silicate | $(Ca, Mg, Mn, Fe)_3SiO_5$ | X | | x |
| Wustite | (Fe,Mg,Ca,Mn)O | X | X | |
| Magnesiowustite | (Mg,Fe,Mn,Ca)O | X | X | |
| Dicalciumferrite | $Ca_2(Fe,Al)_2O_5$-$Ca(Ti,Si)O_3$ | X | X | |
| Magnetite | $Fe_3O_4$ | X | | |
| Calcium ferrite | $CaFe_2O_4$ | X | | |
| Mervinite | $3CaO.MgO.2SiO_2$ | | X | x |
| Spinel | $(Mg,Fe)(Cr,Al)_2O_4$ | | X | x |
| Lime | (Ca,Mg,Mn)O | x | X | |
| Fluorspar | $CaF_2$ | | | x |

**2.5.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตะกรัน**

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตะกรันเหล็กในเตาอาร์คไฟฟ้าและเตาอุ่นน้ำเหล็กมี 3 ปัจจัย ได้แก่

(1) การดูดซับความชื้นของแคลเซียมออกไซด์ (หินปูน) และแมกนีเซียอิสระ แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียอิสระที่เกิดจากการละลายของฟลักซ์และส่วนผสมที่เกิดลงในระว่างการหลอมเหล็กไม่สมบูรณ์ สามารถเกิดการดูดซับความชื้น (Hydration) ขององค์ประกอบในตะกรันเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม ($Ca(OH)_2$) และแมกนีเซียม ($Mg(OH)_2$) ตามลำดับ เกิดขึ้นภายหลังที่ตะกรันเย็นตัวมายังอุณหภูมิห้องแล้ว แคลเซียมออกไซด์รวมตัวกับน้ำได้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่ามาก การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นนี้สามารถก่อให้เกิดการขยายตัวและปริแตกได้ ส่วนแมกนีเซียจะขึ้นกับอัตราการเย็นตัว แมกนีเซียจะตกเป็นผลึกหากเย็นตัวช้า แต่ถ้าเย็นตัวเร็วแมกนีเซียจะจับตัวเป็นเนื้อแก้วและสารละลายของแข็งที่ค่อนข้างเสถียร โดยที่แคลเซียมออกไซด์จะทำให้เกิดการบวมตัวภายในระยะเวลาไม่กี่วันจนถึงเป็นสัปดาห์ ในขณะที่แมกนีเซียใช้ระยะเวลายาวนานกว่าหลายเดือนกว่าจะเห็นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างชัดเจน ด้วยเหตุนี้ตะกรันที่เกิดในเตาอุ่นน้ำเหล็กมักเกิดการขยายตัวเนื่องจากความชื้นรุนแรงกว่าตะกรันในเตาอาร์คไฟฟ้าเนื่องจากส่วนผสมที่แตกต่างกันนั่นเอง

จากการที่มีทั้งหินปูนและแมกนีเซียอิสระอยู่ในตะกรันและเกิดการขยายตัว วิธีที่จะทำให้การขยายตัวเนื่องจากความชื้นเกิดขึ้นน้อยลงทำได้โดย (1) พิจารณาปัจจัยการละลายโดยอาศัยข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (2)

ควบคุมปริมาณการใช้ปูนขาวและโดโลไมต์ (3) เพิ่มกระแสไหลวนของน้ำเหล็ก เป็นส่งเสริมการละลายของปูนขาวหรือโดโลไมต์ให้ทั่วถึงมากขึ้น (4) ใช้ปูนขาวหรือโดโลไมต์ที่ละเอียดเพื่อให้ละลายได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม หากอนุภาคละเอียดเกินไปอาจทำให้เกิดการฟุ้งกระจายได้ (5) ควบคุมการเย็นตัวของตะกรันให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะช่วยแก้ปัญหาการบวมตัวจากแมกนีเซียอิสระได้

(2) การเปลี่ยนเฟสของไดแคลเซียมซิลิเกตขณะเย็นตัว ขณะที่ตะกรันเย็นตัวลงมาอย่าช้า ๆ จะเกิดการเปลี่ยนเฟสของเบต้า-ไดแคลเซียมซิลิเกต ($\beta$) เป็นแกมมา-ไดแคลเซียมซิลิเกต ($\gamma$) ส่งผลให้เกิดการขยายตัวประมาณร้อยละ 12 โดยปริมาตร และทำให้เกิดการป่นเป็นผงของตะกรันเรียกว่า Falling slag มีขนาดประมาณไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ดังนั้นควรทำให้ตะกรันเย็นตัวอย่างรวดเร็วหรืออาจใช้สารตัวเติมต่างๆเพื่อยับยั้งการเปลี่ยนเฟสและการตกตะกอน อีกทั้งลดจุดหลอมตัวของตะกรัน เช่น สารประกอบ Borate หรือสารประกอบ Phosphate ลงในตะกรันหลอมเหลว

(3) การหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกระหว่างการเย็นตัวของตะกรันค่อนข้างสูงเนื่องจากสภาพการนำความร้อนของตะกรันต่ำ ทำให้เกิดความเค้นภายในก้อนตะกรัน ทำให้ตะกรันแตกย่อยเป็นก้อนเล็กๆ ขนาดประมาณ 20 มิลลิเมตร

**2.5.3 การคัดขนาดและการบดย่อย**

เป็นการลดขนาดของตะกรันที่ได้จากกระบวนการให้เล็กลงก่อนนำไปใช้งาน ส่วนใหญ่จะใช้เป็นมวลรวมในงานก่อสร้าง การคัดขนาดใช้วิธีการและอุปกรณ์คล้ายกับงานทางเหมืองแร่ ได้แก่ เครื่องบดย่อยและตะแกรงคัดขนาด และจำเป็นต้องคัดแยกเอาเหล็กที่ติดตกค้างมากับตะกรันออกด้วย ขั้นตอนการเตรียมตะกรันมีลำดับดังนี้

1. Main steel slag jaw/cone crusher ให้มีขนาดประมาณ 25 มิลลิเมตร
2. Bucket conveyer ขนย้ายวัตถุดิบที่ผ่านการบดแล้วไปตามสายพานสู่เครื่องบดย่อยละเอียดขึ้น
3. Secondary slag milling machine ให้มีขนาดประมาณ ¾ มิลลิเมตร
4. Bucket conveyer ขนย้ายวัตถุดิบไปตามสายพานไปยังเครื่องแยกเหล็ก
5. Magnetic scrap/chips separating machine แยกเอาส่วนที่เป็นเหล็กด้วยการใช้แม่เหล็ก
6. Ball mill เป็นการบดในขั้นตอนสุดท้าย

**2.5.4 การบ่ม**

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าหินปูนอิสระสามารถก่อให้เกิดการบวมตัวของตะกรันได้อย่างรวดเร็วในขณะที่การเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่เกิดจากการบวมน้ำของแมกนีเซียในระยะยาว การทำให้ตะกรันดูดซับความชื้นในบรรยากาศและขยายตัวอย่างเต็มที่ก่อนนำไปใช้งานเป็นการเพิ่มความเสถียรของขนาดตะกรันได้เรียกว่า การบ่ม (Aging) ซึ่งมีหลายวิธีดังแสดงในรูปที่ 2.17 เทคนิคการบ่มหลักๆ มีดังต่อไปนี้

(1) ตากไว้ในกลางแจ้ง (Normal aging) กองทิ้งไว้ในพื้นที่เปิด ให้สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมอย่างเต็มที่ ใช้ระยะเวลาตั้งแต่ 6 เดือนขึ้นไป

(2) บ่มด้วยไอน้ำอิ่มตัว (Open air steam aging) กองตะกรันเหล็กไว้บนท่อพ่นไอน้ำและปิดไว้ด้วยฉนวนกันความร้อน ใช้ระยะเวลา 1-2 สัปดาห์

(3) บ่มด้วยไอน้ำอัดแรงดัน (Pressurized steam aging) ใส่ตะกรันไว้ในหม้ออัดความดันไอน้ำ ใช้ระยะเวลาตั้งแต่ 1-10 ชั่วโมง

(ก) ตากไว้ในกลางแจ้ง

(ข) บ่มด้วยไอน้ำอิ่มตัว

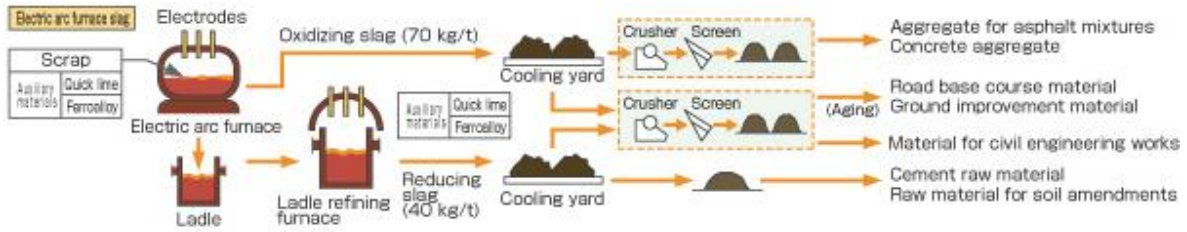
(ค) บ่มด้วยไอน้ำอัดแรงดัน

รูปที่ 2.17 กรรมวิธีการบ่มตะกรันเหล็ก (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554)

**2.5.5 การนำตะกรันไปใช้งาน**

1. ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทางและวัสดุกรุพื้นถนน สามารถใช้ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นมวลรวมผสมกับยางมะตอยราดปูพื้นทางได้ ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีสมบัติหลายประการที่จะใช้เป็นมวลรวมได้ สมบัติบางประการเหนือกว่ามวลรวมจากวัสดุธรรมชาติอีกด้วยเช่น มีความแข็งและความต้านทานการขัดสีค่อนข้างสูงกว่า

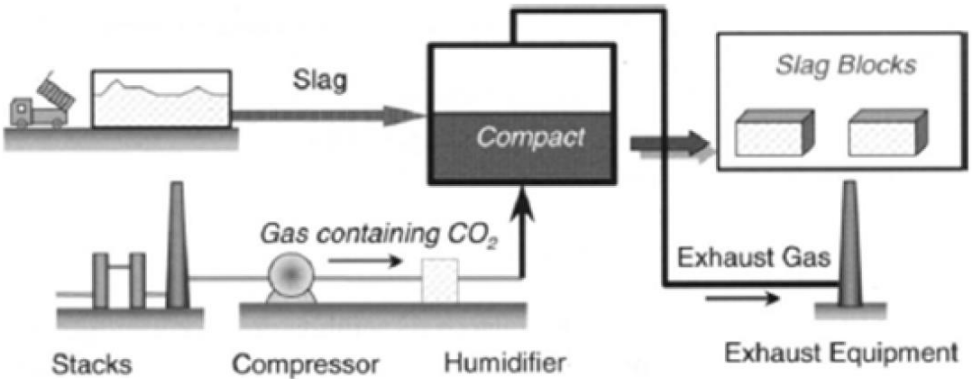
ความหนาแน่นสูงกว่าวัสดุธรรมชาติจึงแข็งแรง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงทำให้ไม่ลื่นไหล อีกทั้งสามารถเก็บความร้อนได้ดีทำให้ส่วนผสมยางมะตอยอุ่นอยู่ได้นาน ทำให้การเทราดและปรับระดับพื้นถนนง่ายขึ้น การนำไปใช้งานลักษณะนี้จัดว่าเป็น Best available practice ขั้นตอนการเตรียมตะกรันสำหรับงานก่อสร้างแสดงดังรูปที่ 2.18




รูปที่ 2.18 การนำตะกรันไปใช้งาน (Nippon Slag Association, 2008)

2. ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเม็ดปูน โดยการผสมในเตาเผาปูนร่วมกับส่วนผสมอื่นๆ ในบางกรณีสามารถใช้งานแทน Portland cement ได้เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดมีส่วนผสมทางเคมีค่อนข้างใกล้เคียงกัน

3. ใช้เป็นวัสดุดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และใช้เป็น Carbonated block ตะกรันจากเตาอุ่นน้ำเหล็กมีแนวโน้มที่จะดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เนื่องจากมีหินปูนอิสระอยู่มาก ตะกรันจากเตาอุ่นน้ำเหล็กถูกอัดกันอย่างหลวมๆ มีความพรุนตัวประมาณร้อยละ 20-40 แล้วให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไหลผ่าน ที่ผิวจะเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ที่ผิวได้ประมาณร้อยละ 1-7 โดยน้ำหนัก กลายเป็นสารประกอบคาร์บอเนต กระบวนการนี้เรียกว่า Carbonation หรือ Sequestration ซึ่งสามารถลดก๊าซเรือนกระจกได้ทางอ้อม ส่วนของตะกรันที่ดูดซับก๊าซไว้เรียบร้อยแล้วสามารถใช้ทำเป็น Carbonated block ใช้เป็นเรือนเพาะเลี้ยงสาหร่ายทะเลและเป็นสถานที่อนุบาลสัตว์น้ำ ขั้นตอนการเตรียมตะกรันสำหรับดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 2.19 อย่างไรก็ตามการใช้งานในลักษณะนี้ยังอยู่ในระหว่างการศึกษาวิจัยโดยบริษัท JFE steel ประเทศญี่ปุ่น




รูปที่ 2.19 การนำตะกรันเตาอุ่นน้ำเหล็กสำหรับดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Yabuta et al., 2006)

4. ใช้ผสมกับกากของเสียอื่นๆ ผลิตเป็น Block สำหรับงานก่อสร้าง เช่น FerroformTM ที่ได้รับการพัฒนาโดยบริษัท JFE steel ประเทศญี่ปุ่น ผลิตจากตะกรันของเหล็กผสมกับเถ้าลอย ตะกรันจากเตาพ่นลม (Blast furnace slag) น้ำและตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกอัลคาไลน์และขึ้นรูปเป็นชิ้นงานใช้แทนคอนกรีต พบว่ามีสมบัติใกล้เคียงกัน แต่สามารถลดปริมาณการใช้มวลรวมจากวัสดุธรรมชาติได้มากและมีความเสถียรทางเคมีและทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี ใช้งานเป็นแนวกั้นคลื่นตามชายฝั่งได้ดังแสดงในรูปที่ 2.20 หรือในประเทศอังกฤษ ปี 2007 มหาวิทยาลัย Leeds มีการพัฒนาวัสดุก่อสร้าง เนื้อวัสดุประกอบด้วยกากของเสียต่างๆทั้งหมด ได้แก่ ตะกรันเหล็กทั้งที่ได้จาดเตาอาร์คไฟฟ้าและเตาอุ่นน้ำเหล็ก เศษแก้วบด เถ้าลอย ตะกอนในท่อระบายน้ำผสมกับน้ำมันดิบ ผสมให้ทั่วถึงและขึ้นรูปเป็นรูปทรงต่างๆ จากนั้นจึงทำการอบด้วยความร้อนเพื่อให้น้ำมันดิบเกิดการเซตตัว สามารถใช้แทนคอนกรีตได้เช่นกัน ขณะนี้อยู่ระหว่างพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์

5. เป็นวัสดุปรับปรุงและปุ๋ยบำรุงพืช ในตะกรันเหล็กประกอบด้วยสารอาหารที่สามารถเป็นอาหารบำรุงพืชได้เมื่อนำตะกรันมาผ่านกระบวนการที่เหมาะสม นอกจากนี้ตะกรันเตาอุ่นน้ำเหล็กซึ่งมีฤทธิ์เป็นเบสยังช่วยลดสภาพความเป็นกรดของดินได้

Table 2 Comparison of various properties between Ferroform and normal-weight concrete

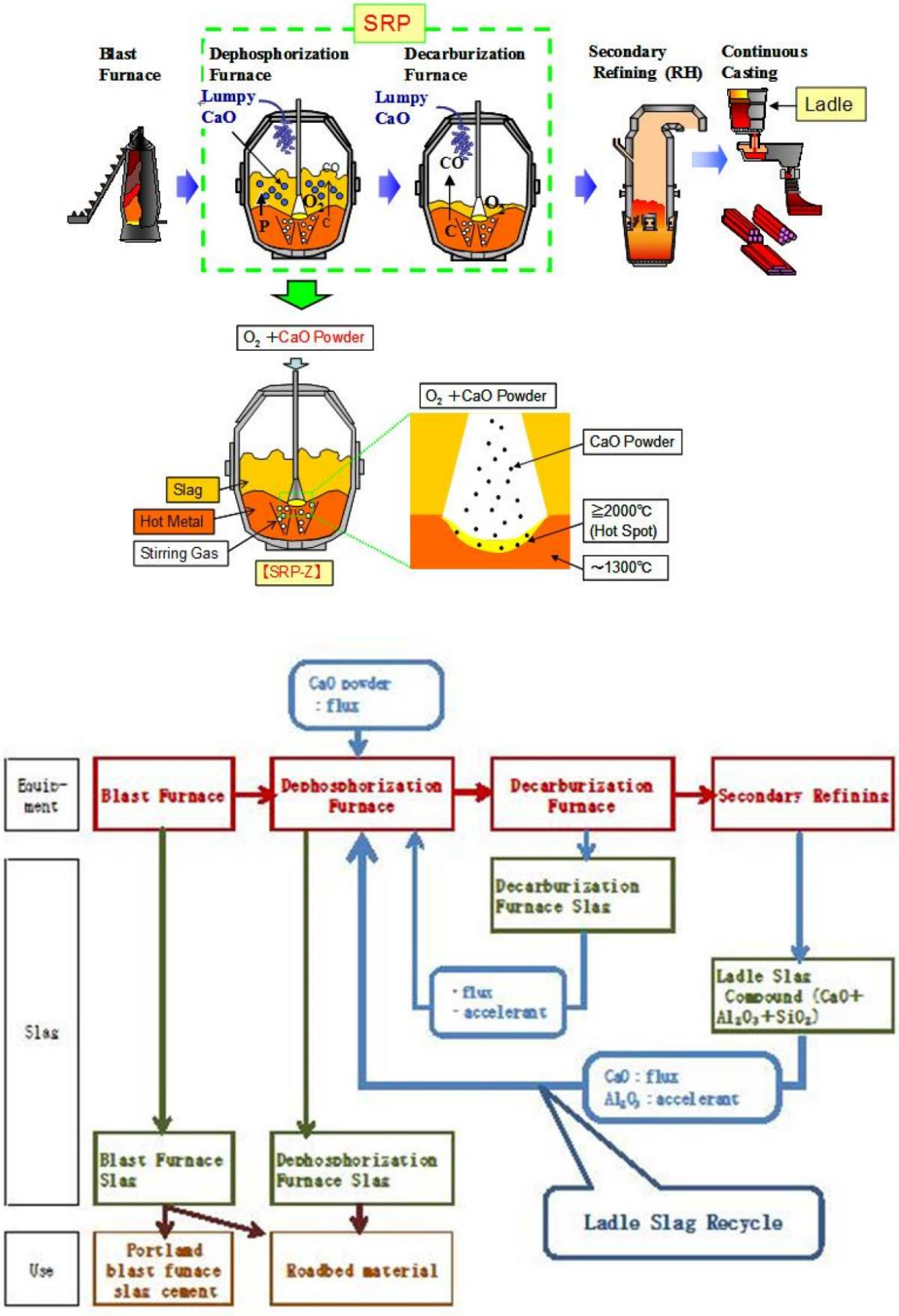
| Item | | Ferroform | Normal-weight concrete |
|---|---|---|---|
| Young's modulus* | (kN/mm²) | 24 | 25 |
| Tensile strength* | (N/mm²) | 2.2 | 1.9 |
| Flexural strength* | (N/mm²) | 4.0 | 3.4 |
| Abrasive coefficient** | (cm³/cm²) | 0.04 | 0.09 |
| Density | (t/m³) | 2.4–2.6 | 2.3 |
| Median pore size | (μm) | 0.02 | 0.09 |

*Compressive strength 24 N/mm² **30 N/mm²

รูปที่ 2.20 การนำตะกรันใช้แทนคอนกรีต (Yabuta et al., 2006)

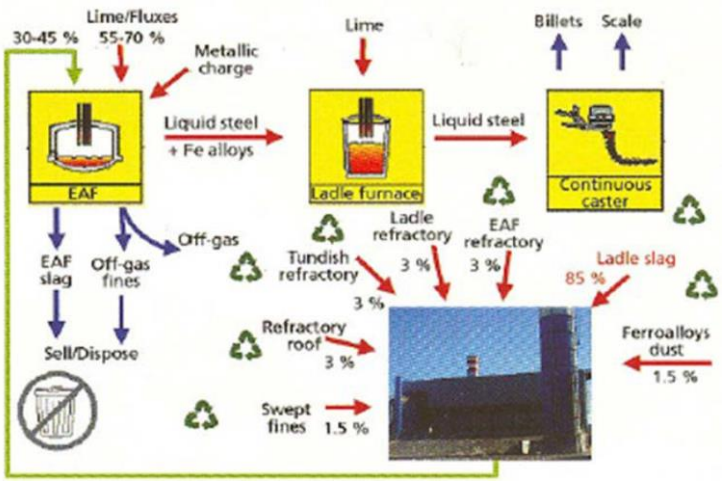
6. การใช้ตะกรันแทนปูนขาวในกระบวนการหลอมรีไซเคิลเศษเหล็ก พัฒนาโดย ปี 2006 บริษัท Sumitomo Metals Industries การนำ LF slag กลับมาใช้ใหม่เรียกว่า SRP (Simple Refining Process) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ (1) การปรับกระบวนการเพื่อให้ขั้นตอนการกำจัดคาร์บอนและฟอสฟอรัสส่วนเกินมีประสิทธิภาพและ (2) การนำกากของเสียที่ได้กลับมาใช้ในกระบวนการหลอมดังแสดงในรูปที่ 2.21 ในการหลอมเหล็กด้วยเตา Blast furnace จำเป็นต้องมีการกำจัดคาร์บอนและฟอสฟอรัสส่วนเกินใน Converter กระบวนการ SRP จะใช้ Converter 2 ตัว Converter ตัวหนึ่งกำจัดฟอสฟอรัส (Dephosphorization) และ Converter อีกตัวกำจัดคาร์บอน (Decarbulization) ฟลักซ์ที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสคือปูนขาว (Lime) ซึ่งมีจุด

หลอมตัวสูงประมาณ 2,000 $^{o}$C จึงหลอมละลายในเตาได้ยากและไม่สามารถทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสในน้ำเหล็กได้เท่าที่ควร กระบวนการ SRP ได้เพิ่มส่วนของท่อเป่าออกซิเจน ติดตั้งทางด้านบนของเตาเหนือผิวหน้าของเหล็กปิกหลอมเหลว พ่นออกซิเจนไปพร้อมๆกับผงปูนขาว ปูนขาวในรูปของผงมีพื้นที่ผิวมากทำอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น นอกจากนี้ การเป่าผงปูนขาวผ่านท่อออกซิเจนลงใน Converterในกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสสามารถลดปริมาณการใช้ปูนขาวเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปกติ (การเติมปูนขาวเป็นก้อนใหญ่ลงน้ำเหล็ก) ประมาณร้อยละ 15 น้ำเหล็กที่ได้ภายหลังจากการกำจัดคาร์บอนและฟอสฟอรัสส่วนเกินจะถูกส่งต่อมายังเตา Basic Oxygen Furnace (BOF) เพื่อปรับปรุงส่วนผสมของน้ำเหล็กให้ได้ตามต้องการ ตะกรันที่ได้จาก BOF สามารถนำกลับไปใช้อีกครั้งในกระบวนการ SRP ได้โดยตรง โดยตะกรันเหล่านี้จะมีอะลูมินาเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นตัวที่ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยา Dephosphorization และการสร้างตะกรันเหนือผิวน้ำเหล็ก นอกเหนือจากกระบวนการ SRP มีจุดเด่นก็คือสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการ Dephosphorization กระบวนการที่คิดค้นขึ้นมานี้ยังมีข้อดีอื่นอีก ได้แก่ (1) ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่ากระบวนการทั่วไป เนื่องจากปริมาณการใช้ปูนขาวในกระบวนการลดลง และ (2) ลดปริมาณการเกิดฝุ่นเหล็ก (3) ตะกรันที่เกิดขึ้นในกระบวนการ SRP มีปริมาณของ Lime น้อยกว่าตะกรันที่ได้จากกระบวนการหลอมดั้งเดิม ทำให้ระยะเวลาการบ่มสั้นลงเนื่องจากการบวมของตะกรันจากการดูดน้ำหรือความชื้นของตะกรันเหล่านี้น้อย จึงสามารถนำตะกรันไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับงานก่อสร้างได้เร็วกว่าเดิม (4) ตะกรันที่เกิดจากกระบวนการ SRP สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการได้ทันทีโดยไม่ต้องนำมาบำบัดด้วยวิธีการอื่นใด




รูปที่ 2.21 Simple Refining Process (Sumitomo Metal Industries Limited, 2010)

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกรันในเตาอุ่นน้ำเหล็กกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในการหลอมเหล็กอีกวิธีหนึ่ง โดยวิธีการนี้คิดค้นโดยบริษัท Techint Technology ประเทศอิตาลีในปี 2001 และได้ขยายขอบเขตการใช้งานในลักษณะดังกล่าวในระดับอุตสาหกรรมในปี 2003 โดยเน้นการนำเอาตะกรันในเตาอุ่นน้ำเหล็กผสมกับของเสียอื่นๆ ที่เกิดจากการหลอม ไม่ว่าจะเป็นอิฐทนไฟที่บุเตาอุ่นน้ำเหล็กและ Tundish ฝุ่นผงต่างๆ มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของตะกรันในเตาอุ่นน้ำเหล็กกว่าร้อยละ 85 โดยน้ำหนักใช้เป็นฟลักซ์แทนปูนขาวฉีดพ่นเข้าไปในเตาอาร์คไฟฟ้า จุดเด่นของการใช้ฟลักซ์ที่เตรียมจากกากของเสียต่างๆนี้คือ (1) สามารถลดปริมาณเหล็กที่ติดมากับตะกรันได้ (2) อิฐที่ใช้บุเตาอุ่นน้ำเหล็กเป็นอิฐชนิดแมกนีเซีย-คาร์บอนซึ่งเป็นชนิดเดียวกับอิฐทนไฟที่ใช้ในเตาอาร์คไฟฟ้า ฟลักซ์ตัวนี้จึงมีปริมาณของแมกนีเซียมค่อนข้างสูงจึงเป็นการลดโอกาสการกัดกร่อนของอิฐในเตาอาร์คไฟฟ้า ทำให้อายุการใช้งานของอิฐยาวนานขึ้นและ (3) ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกรันที่ส่งเสริมการเกิดฟองอากาศในชั้นตะกรันหรือ Slag foaming เพิ่มความหนาของชั้นตะกรัน ช่วยลดการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กได้ อย่างไรก็ตาม การใช้ตะกรันและของเสียดังกล่าวในกระบวนการหลอมรีไซเคิลเหล็กต้องควบคุมวิธีการเตรียมของเสียแต่ละชนิดอย่างเคร่งครัด เช่น ตะกรันในเตาอุ่นน้ำเหล็กต้องทำให้เกิดการเย็นตัวที่เหมาะสม โดยควบคุมการเปลี่ยนเฟสและการกลายเป็นผงของตะกรันในเตาอุ่นน้ำเหล็กอย่างทั่วถึง และต้องจัดเก็บผงตะกรันที่ได้ก่อนที่ตะกรันจะเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ ยังจำเป็นต้องผสมส่วนผสมของเสียต่างๆ และใช้แบบวันต่อวันเท่านั้น ไม่สามารถเตรียมไว้ล่วงหน้าได้เนื่องจากส่วนผสมมีโอกาสรวมตัวกับความชื้นได้ รวมไปถึงต้องใช้ส่วนผสมที่เตรียมไว้นี้ขณะที่ยังร้อนอยู่เท่านั้น จึงส่งผลทำให้การจัดเก็บและเคลื่อนย้ายส่วนผสมตะกรันและของเสียไม่สะดวก นอกจากนี้ ยังมีตัวแปรที่ส่งผลต่อการใช้งานลักษณะนี้ ได้แก่ สมบัติและลักษณะของเศษเหล็กที่นำมารีไซเคิล ซึ่งจะส่งผลต่อส่วนผสมและปริมาณการใช้ฟลักซ์จากกากของเสียดังกล่าว การใช้ของเสียจากกระบวนการหลอมเศษเหล็กในเตาอาร์คไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2.22




รูปที่ 2.22 การใช้ของเสียจากกระบวนการหลอมเศษเหล็กกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในเตาอาร์คไฟฟ้า (Memoli and Guzzon, 2006)

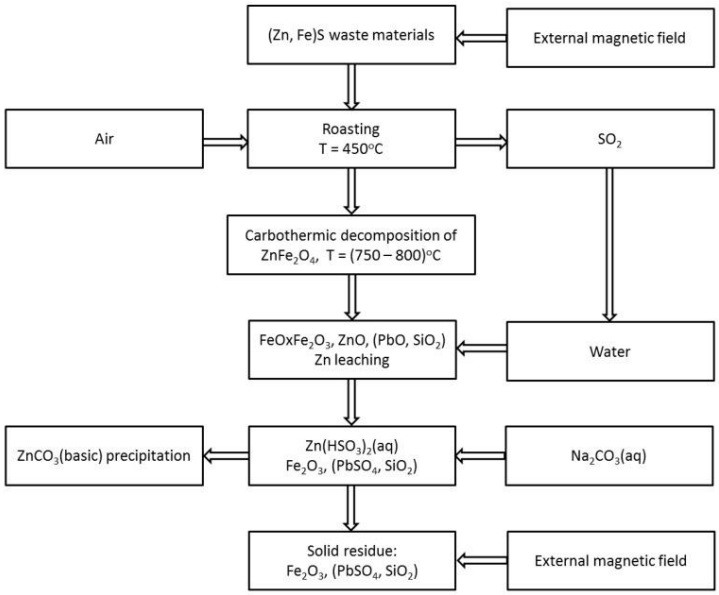
ตะกรันสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในงานโยธาต่างๆเป็นหลัก เช่น สร้างถนน ถมทะเลและขอบชายฝั่งได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายแร่ที่พบในธรรมชาติ และยังมีสมบัติบางอย่างที่เหมาะสมกับการใช้งานมากกว่าวัสดุทางธรรมชาติ สมบัติของตะกรันขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ส่วนผสมทางเคมี อัตราการเย็นตัว วิธีการหล่อหลอม วิธีการปรับสมบัติ เป็นต้น ปัญหาที่สำคัญคือตะกรันมีหินปูนอิสระอยู่ เมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดการขยายตัวอย่างมากโดยเฉพาะตะกรันจากเตาอุ่นน้ำเหล็ก จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการบ่ม (Aging) เพื่อเพิ่มความเสถียร อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตะกรันเหล็กไปใช้งานในรูปแบบอื่นๆ แล้วอาทิ ใช้เป็นฟลักซ์หรือสารสร้างตะกรัน

## 2.6 การศึกษาที่เกี่ยวข้อง

Hyk, Kitka and Rudnicki (2019) ศึกษาการเก็บสังกะสีจากกากของเสียที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลและกระบวนการผลิตสังกะสีจากแร่ดังรูปที่ 2.23 พบว่าในวัตถุดิบที่ได้จากกากอุตสาหกรรมการผลิตแร่สังกะสีและโลหะจะประกอบด้วยกำมะถัน ซึ่งมีความจำเป็นต้องสลายธาตุกำมะถันที่อุณหภูมิ 450 °C ผลการศึกษาจากการทดลองนี้จะใช้เป็นแนวทางในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการเผาไอระเหิดสังกะสีในขั้นตอนต่อไป

$$ZnFe_2S_4 + xO_2 \rightarrow (Zn,Fe)(S,O) + ySO_2$$

$$SO_2 + H_2O \Leftrightarrow H^+ + HSO_3^-$$




รูปที่ 2.23 แสดงผังการทดลองของ Hyk, Kitka and Rudnicki (2019)

Zeller (1924) ได้ทำการศึกษาการรีดักชันสังกะสีออกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 596 °C ความดันของไอจะเท่ากับ 4.6 มิลลิเมตรปรอท ในขณะที่ที่อุณหภูมิ 795 °C ความดันของไอจะเท่ากับ 1,253 มิลลิเมตรปรอท แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเผาที่สูงกว่า จะเกิดไอระเหิดของสังกะสีในปริมาณมาก สะท้อนให้เห็นว่าอาจใช้เวลาในการเผาสังกะสีออกไซด์ที่สั้นลงกว่าการเผาที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า โดยมีรายละเอียดดังนี้

ผลของอุณหภูมิ

จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้สำหรับรีดิวซ์สังกะสีออกไซด์ มีผลต่ออัตราการรีดักชันของสังกะสีออกไซด์อย่างรวดเร็ว ในที่นี้พบว่า ที่ยอดของกราฟในรูปที่ 2.24 ที่ใช้คาร์บอนทั้งสองชนิด มีอัตราการ รีดิวซ์ที่ลดลง อาจเป็นเพราะสังกะสีในตัวอย่างถูกใช้ไปเกือบหมดแล้วในกระบวนการ กราฟเหล่านี้ยังสามารถอธิบายผลการทดลองของผู้วิจัยอื่นผ่านมาแล้ว โดยใช้รีดิวเซอร์ต่างกัน เช่น แอนทราไซต์ ถ่านโค้ก เป็นต้น การ รีดิวซ์เริ่มตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 750 °C การเกิดรีดักชันของสังกะสีออกไซด์เกิดยากกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่าเมื่อใช้ถ่านรีดิวเซอร์ที่มีความหนาแน่นสูงกว่า อย่างไรก็ดี ผลการทดลองแสดงว่าปฏิกิริยาการเกิดรีดักชันสมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 °C

ผลของเวลา

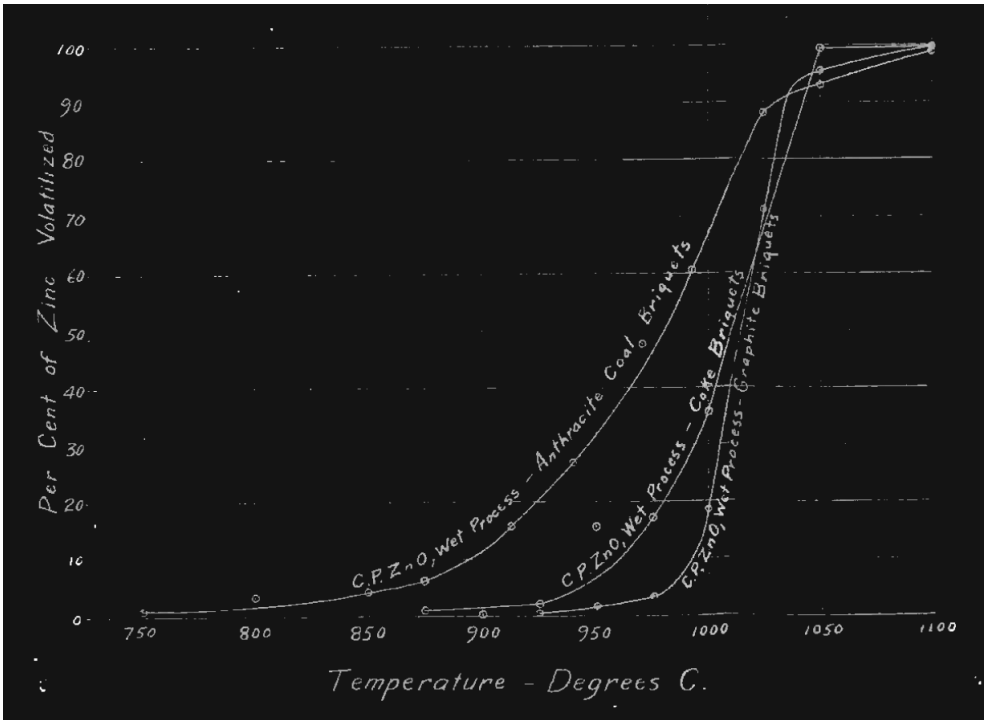
ในการทำรีดักชันด้วยถ่าน (รีดิวเซอร์) เกือบทุกกราฟในรูปที่ 2.25 พบความสัมพันธ์ของอัตราการ รีดักชันแปรผันตามเวลา โดยมีแนวโน้มเพียงเล็กน้อย อาจมาจากหลายสาเหตุ ได้แก่

- การให้ความร้อนเบื้องต้น (preheat) กับสังกะสีออกไซด์ ทำให้การรีดิวซ์ยากขึ้น
- การสัมผัสกันของสังกะสีออกไซด์กับคาร์บอน
- ปริมาณของสังกะสีออกไซด์ที่ลดลงในระหว่างทำปฏิกิริยา

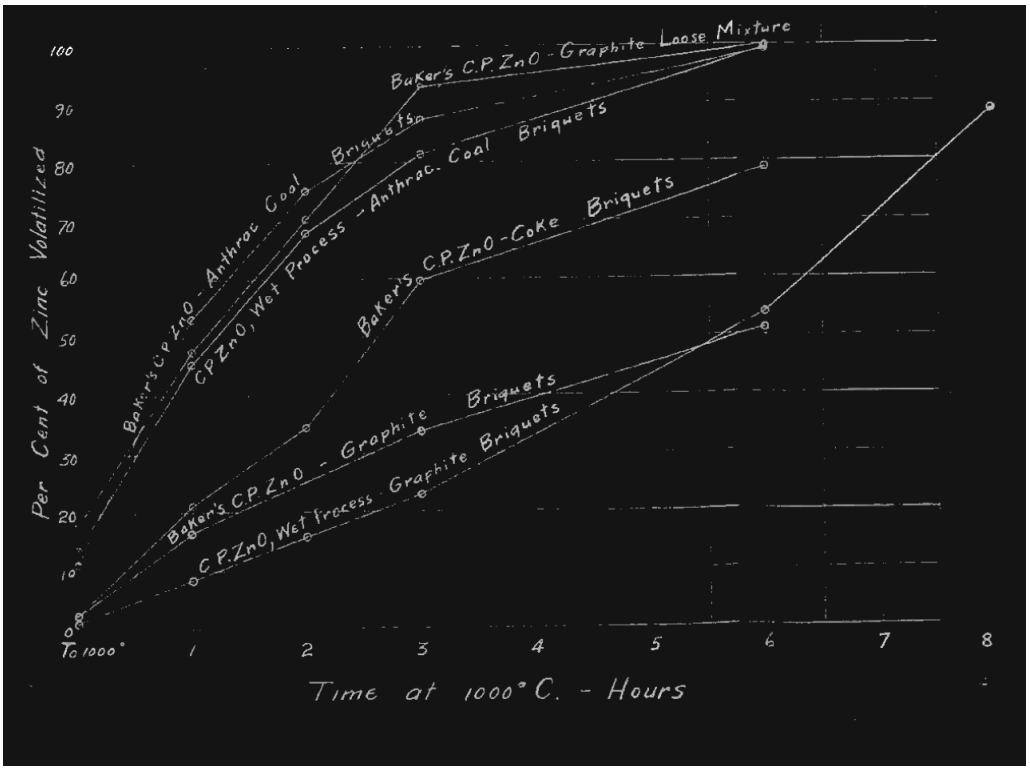
รูปแบบของถ่านที่ใช้ทั้งสองชนิดพบว่า แบบผง (special) ให้อัตราการรีดักชันที่รวดเร็วมากกว่าแบบก้อนอัดแน่น (briquette) ทั้งนี้ อาจเนื่องจากการระเหิดของไอสังกะสีเกิดได้ง่ายกว่า

ผลของคาร์บอน (รีดิวเซอร์)

อัตราการเกิดรีดักชันจะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของคาร์บอนที่ใช้อย่างมาก พบว่า ถ่านก้อนอัดแน่นให้อัตราการรีดักชันที่น้อยกว่าแบบผง ทั้งนี้เป็นไปตามที่ Johnson (1907) ได้ศึกษาไว้และสรุปว่า อุณหภูมิในการทำรีดักชันแปรผันตามกระบวนการในการให้ความร้อนเบื้องต้น (preheat) ในที่นี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำรีดักชันจะแปรผันตามถ่านก้อนมากกว่าถ่านผง




รูปที่ 2.24 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการรีดิวซ์สังกะสีออกไซด์ (Zeller, 1924)



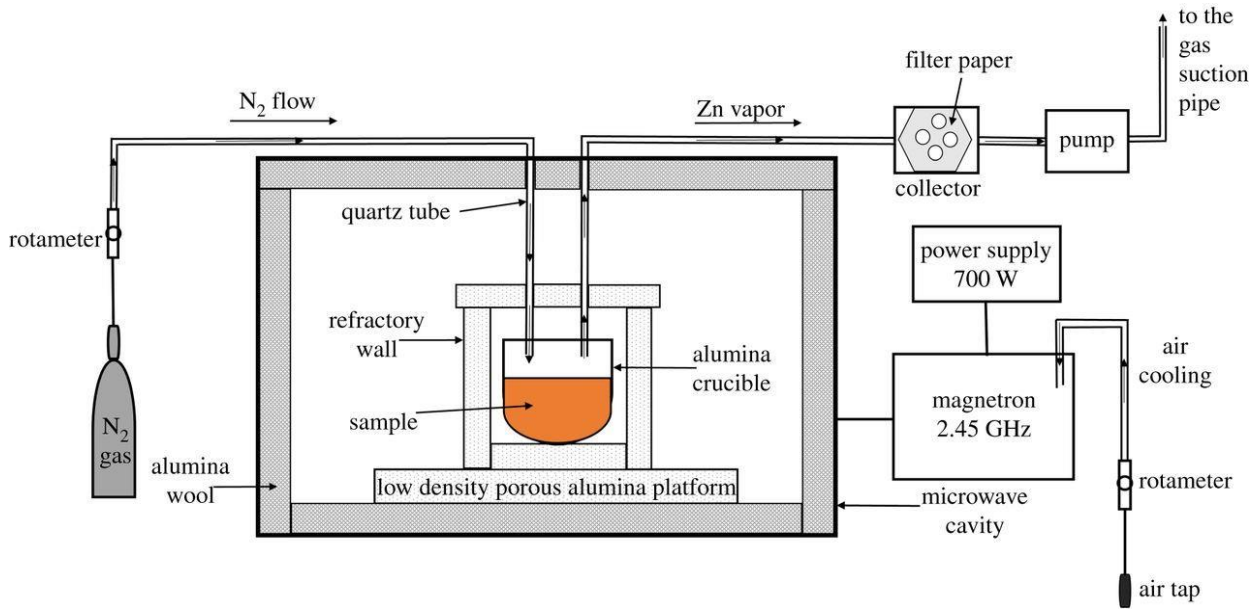

รูปที่ 2.25 แสดงผลของเวลาต่ออัตราการรีดิวซ์สังกะสีออกไซด์ (Zeller, 1924)

Omran, Fabritius, Heikkinen, and Chen (2017) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิของสังกะสีเฟอร์ไรต์ ($ZnFe_2O_4$) ด้วยเตาไมโครเวฟ (รูปที่ 2.26) และเก็บตัวอย่างสังกะสีออกไซด์ที่ได้ด้วยแผ่นกรอง (รูปที่ 2.27) เมื่อย่างที่สภาวะปกติพบว่ามีการสลายตัวของมวลเพียง 2% ระหว่างอุณหภูมิ 38 – 456 °C สันนิษฐานว่าเกิดจากการระเหยของน้ำที่มีอยู่ ที่อุณหภูมิ 1,144 – 1,310 °C เกิดการหลอมตัวจับเป็นก้อนแต่ผล XRD ไม่แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของเฟสต่าง ๆ ของสังกะสีเฟอร์ไรต์ ($ZnFe_2O_4$)

สำหรับการเผารีดักชันสังกะสีเฟอร์ไรต์ ($ZnFe_2O_4$) จะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 925 °C (Pickles, 2008) Omran, Fabritius, Heikkinen, and Chen (2017) ยังพบว่าการสลายตัวของสังกะสีเฟอร์ไรต์ ($ZnFe_2O_4$) จะมีมากถึง 50% ระหว่างอุณหภูมิ 823 – 1,165 °C โดยเกิดการระเหิดของสังกะสี (Zn) และการรีดิวซ์ของเหล็กเป็นโลหะเหล็ก (รูปที่ 2.28)

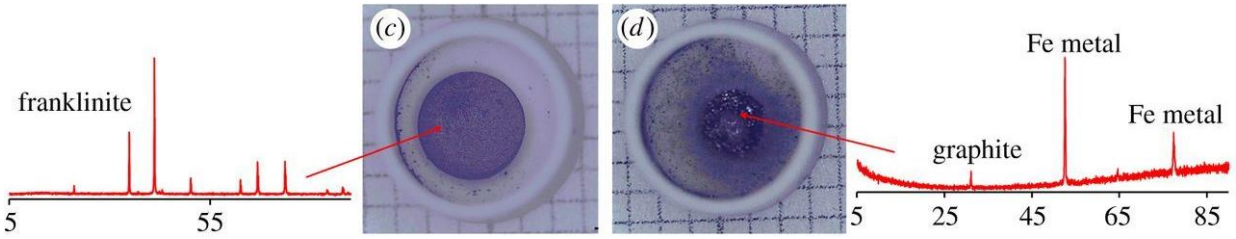
$$ZnFe_2O_{4(s)} + 4C_{(s)} \rightarrow Zn_{(g)} + 2Fe_{(s)} + 4CO_{(g)}$$

Lee, Lin, and Chen (2001) รายงานว่าสังกะสีเฟอร์ไรต์ ($ZnFe_2O_4$) สลายตัวที่อุณหภูมิ 925 °C ไปเป็นสังกะสีออกไซด์ (ZnO) และเหล็กออกไซด์ ($Fe_2O_3/Fe_3O_4$) หลังจากนั้นจึงเริ่มทำปฏิกิริยารีดักชันที่อุณหภูมิ 1,040 °C สังกะสีออกไซด์จะเปลี่ยนเป็นไอสังกะสีจนถึงอุณหภูมิ 1,159 °C $Fe_2O_3$ จะเปลี่ยนเป็น $Fe_3O_4$ FeO และ Fe ตามลำดับ




รูปที่ 2.26 แสดงแผนภาพการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดลองระเหิดไอสังกะสีด้วยไมโครเวฟ (Omran, Fabritius, Heikkinen, and Chen, 2017)

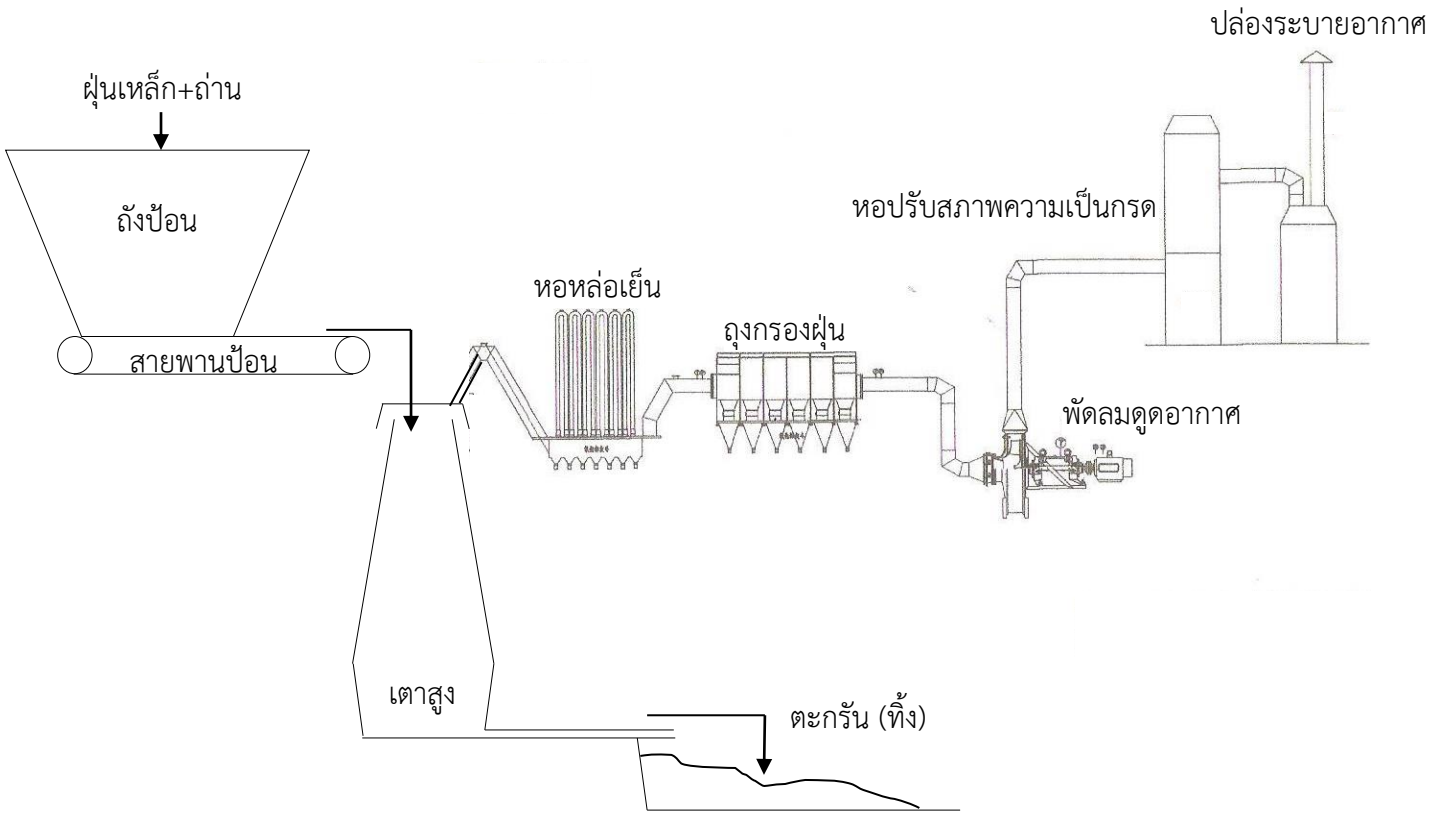
รูปที่ 2.27 แสดงสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้ด้วยแผ่นกรอง
(Omran, Fabritius, Heikkinen, and Chen, 2017)




รูปที่ 2.28 (ซ้าย) สังกะสีเฟอร์ไรต์ก่อนเผารีดักชัน (ขวา) สังกะสีเฟอร์ไรต์ภายหลังการเผารีดักชัน
(Omran, Fabritius, Heikkinen, and Chen, 2017)

บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด (รูปที่ 2.29) ทำการสกัดสังกะสีออกไซด์จากฝุ่นเหล็กที่ได้จากการรีไซเคิลจากกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตา Blast Furnace ตามผังการทำงานดังรูปที่ 2.30 และมีลักษณะเตา Blast Furnace แสดงดังรูปที่ 2.31 – 2.34 สำหรับการศึกษานี้จะนำฝุ่นเหล็กและสารประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ไอระเหิดของฝุ่นเหล็ก และตะกรันจากกระบวนการของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด (รูปที่ 2.35 – 2.37) มาทำการตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้น ได้แก่ องค์ประกอบของธาตุ (ตารางที่ 2.15) ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ (รูปที่ 2.38 – 2.40) และขนาด (รูปที่ 2.41) โดยผลวิเคราะห์ XRF มีรายละเอียดตามภาคผนวก ก และผลวิเคราะห์ขนาดของฝุ่นเหล็กด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์มีรายละเอียดตามภาคผนวก ข ทั้งนี้การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นมีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดทิศทางการศึกษาต่อไป

รูปที่ 2.29 แสดงบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด




รูปที่ 2.30 ผังการทำงานของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

รูปที่ 2.31 แสดงลักษณะภายในเตา Blast Furnace

รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะการเติมอากาศเพื่อให้ถ่านทำปฏิกิริยาให้ความร้อนแก่ฝุ่นเหล็กในเตา

รูปที่ 2.33 แสดงรูเติมอากาศภายในเตา Blast Furnace

รูปที่ 2.34 แสดงลักษณะถุงเก็บฝุ่นไอระเหิดสังกะสีออกไซด์

รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะฝุ่นเหล็กก่อนเข้ากระบวนการเผาด้วยเตา Blast Furnace ของ
บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

รูปที่ 2.36 แสดงไอระเหิดที่ได้จากกระบวนการเผาฝุ่นเหล็กด้วยเตา Blast Furnace ของ
บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

รูปที่ 2.37 แสดงตะกรันจากการถลุงฝุ่นเหล็กด้วยเตา Blast Furnace ของ
บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

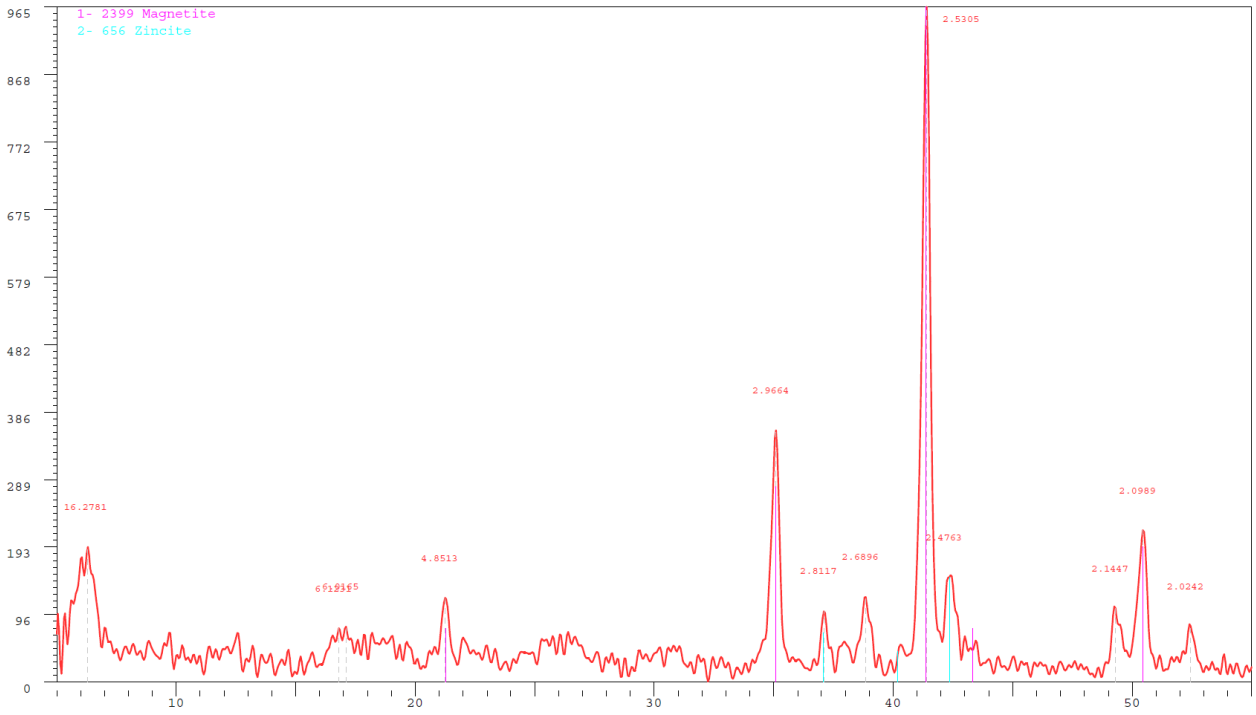
ตารางที่ 2.15 ผลวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างฝุ่นเหล็กที่ได้จากโรงงานหลอมเศษเหล็กทั่วไป ไอระเหิดและตะกรันจากการถลุงฝุ่นเหล็ก (%)

| ชนิด | Fe | Zn | Ca | Mg | Mn | Si | Cl | Pb | S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ฝุ่นเหล็ก* | 35.03 | 15.73 | 4.33 | 3.75 | 3.56 | 2.08 | 1.70 | 4957ppm | 9674ppm |
| ไอ* | 9132ppm | 71.41 | 1.11 | - | 4393ppm | 9290ppm | 3.19 | 3.40 | 2.54 |
| ตะกรัน* | 29.15 | 1.54 | 6.68 | 3.89 | 1.95 | 10.18 | - | 54ppm | 4569ppm |

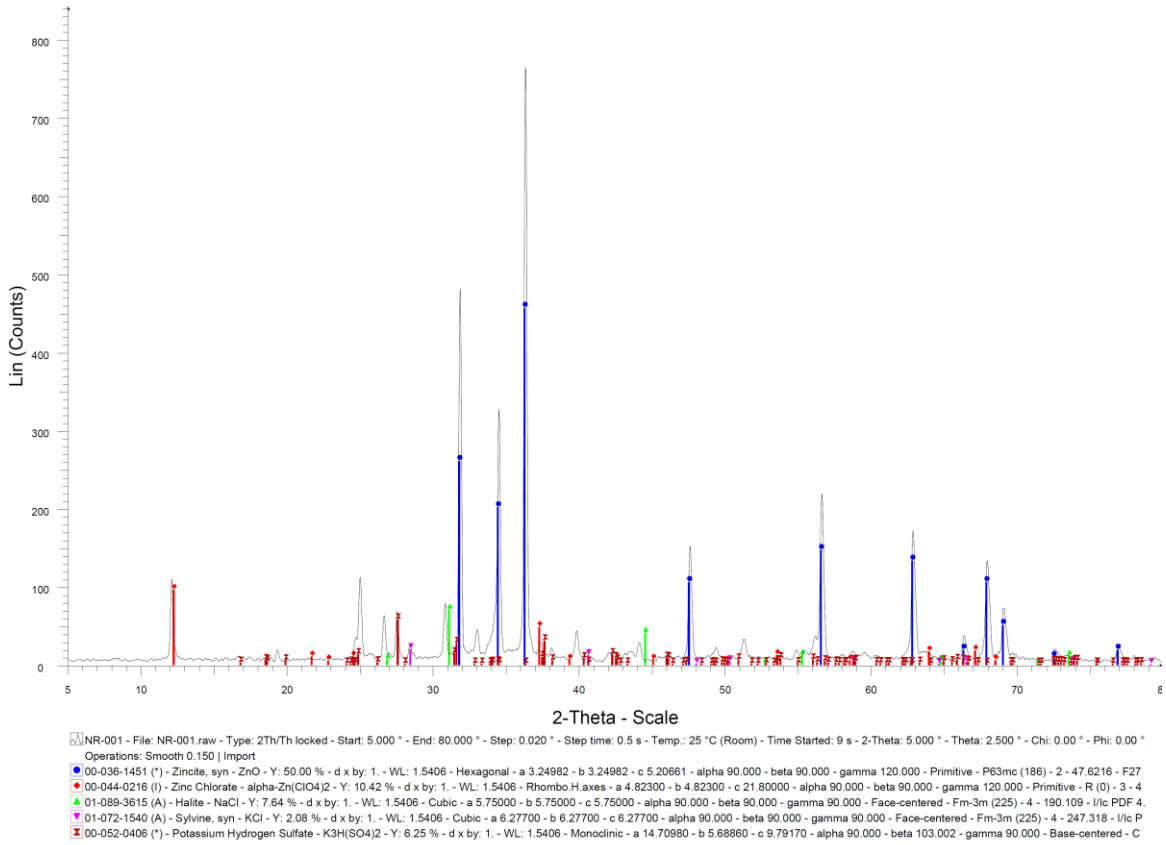
หมายเหตุ: ฝุ่นเหล็ก* คือ ฝุ่นเหล็กที่ได้จากโรงงานหลอมเศษเหล็กทั่วไป

ไอ* คือ ไอระเหิดจากการถลุงฝุ่นเหล็ก

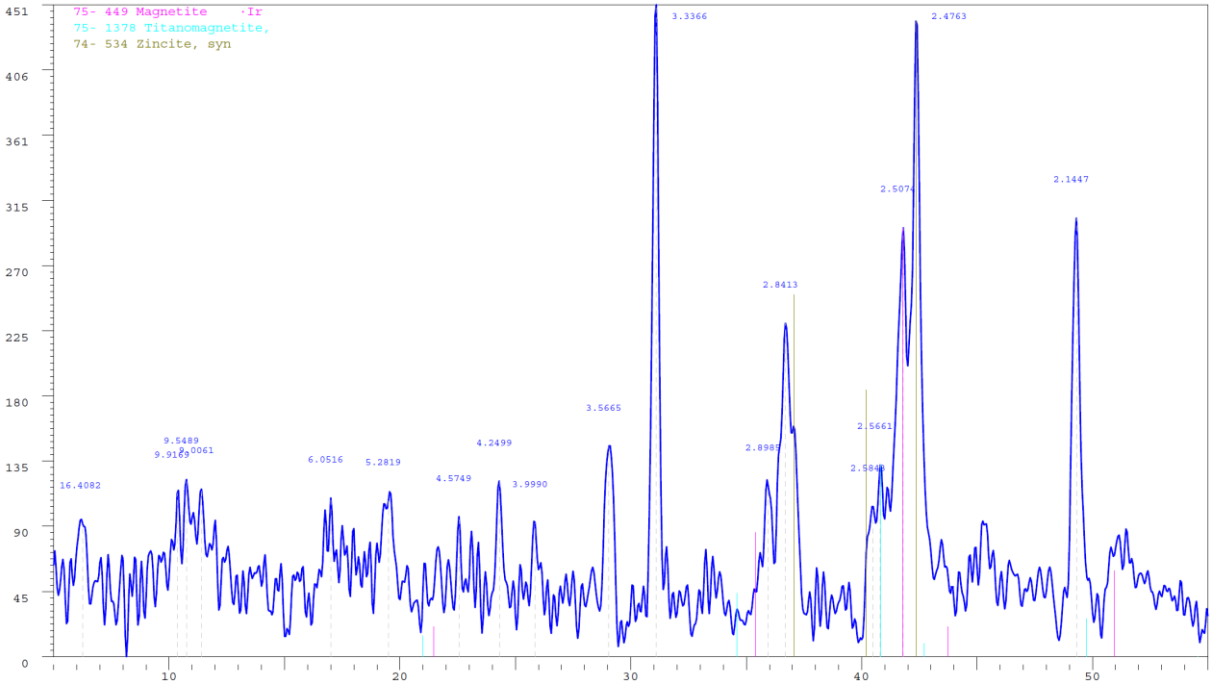
ตะกรัน* คือ ตะกรันจากการถลุงฝุ่นเหล็ก



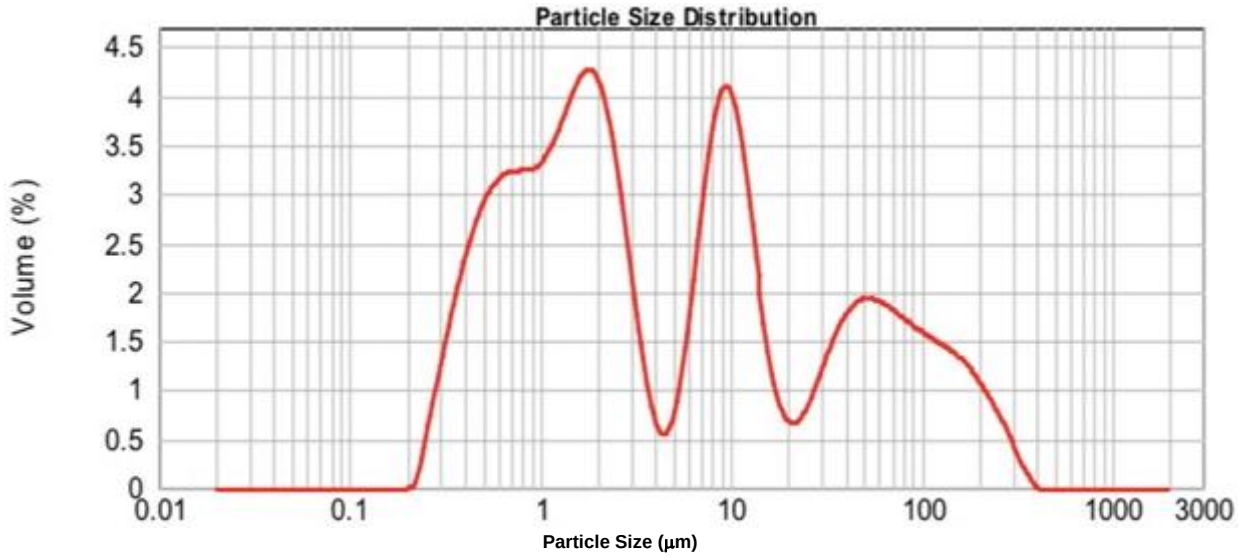

รูปที่ 2.38 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของฝุ่นเหล็กก่อนเผาด้วย Blast Furnace ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด และใช้เป็นตัวอย่างในการทดลองนี้




รูปที่ 2.39 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของไอระเหิดที่ได้จากการเผาฝุ่นเหล็กด้วย Blast Furnace ของ บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

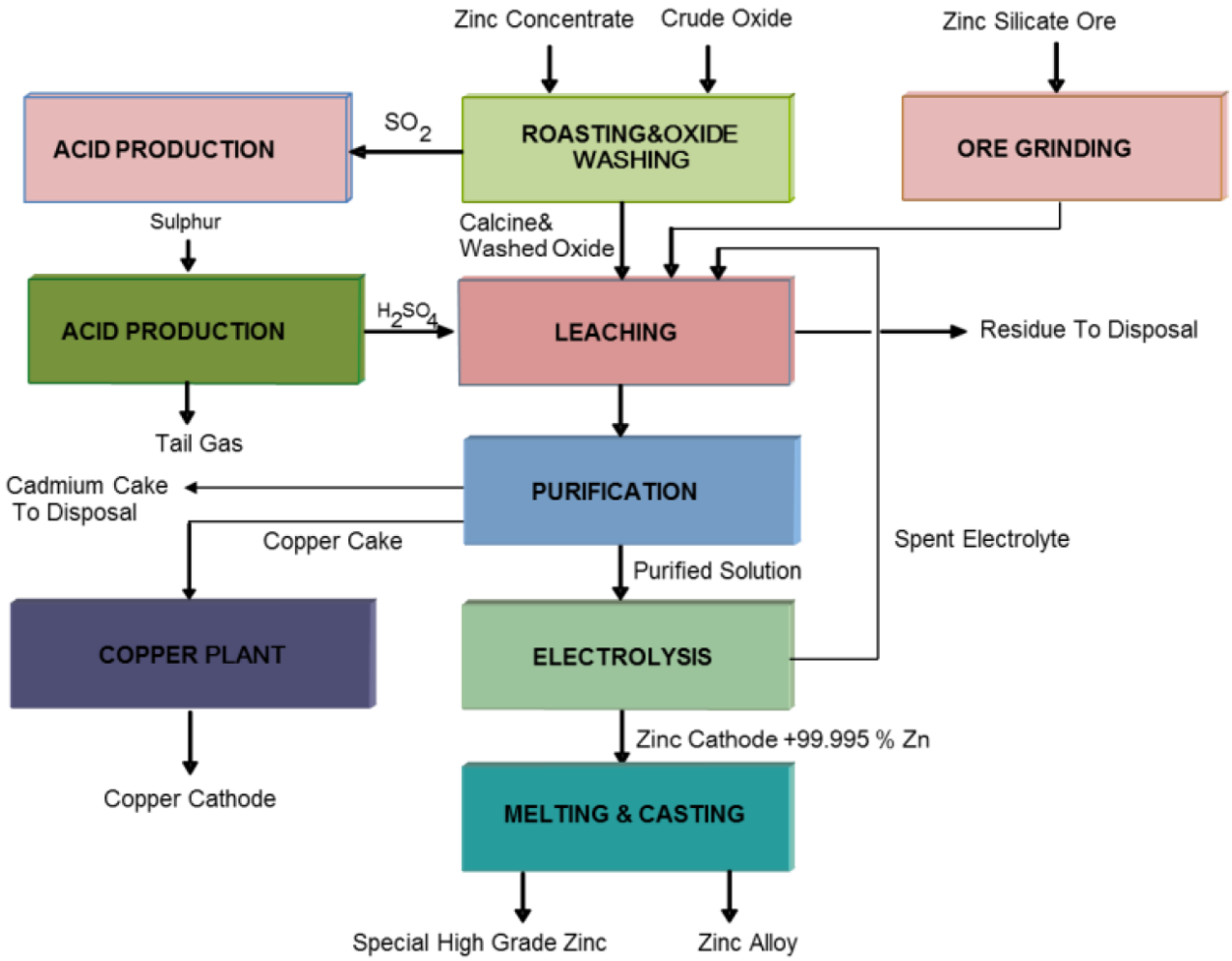



รูปที่ 2.40 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของตะกรันที่ได้จากการเผาฝุ่นเหล็กด้วย Blast Furnace ของ บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด




รูปที่ 2.41 แสดงผลวิเคราะห์ขนาดของฝุ่นเหล็กด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Particle Size Distribution Analyzer)

บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ทำการประกอบโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) สังกะสีเชิงอุตสาหกรรม โดยมีขั้นตอนต่าง ๆ ตามรูปที่ 2.42 โดยทำการผลิตโลหะสังกะสีจากแร่สังกะสีซัลไฟด์และซิลิเกต ซึ่งในกระบวนการต้องปรับสภาพสังกะสีซัลไฟด์ให้เป็นสังกะสีออกไซด์ก่อน ก่อนเข้าสู่กระบวนการโลหวิทยาสารละลายด้วยกรดกำมะถัน ในขณะเดียวกันโลหะที่เป็นมลทินต่าง ๆ จะถูกกำจัดออกจากสารละลายก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้าต่อไป รายละเอียดกรรมวิธีประกอบโลหะกรรมถลุงแร่สังกะสีของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) แสดงในภาคผนวก ค




รูปที่ 2.42 แสดงกระบวนการที่ใช้ในการผลิตสังกะสีของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

(บริษัท ผาแดง อินดัสทรี จำกัด (มหาชน), 2555)

# บทที่ 3
# เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา ได้แก่ เตาอุตสาหกรรม เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) เครื่องวิเคราะห์ชนิดแร่ด้วยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer, XRD) เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Particle Size Distribution Analyzer) และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังนี้

## 3.1 เตาอุตสาหกรรม

เตาอุตสาหกรรมมีอยู่หลายประเภทโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 3 ประเภทคือ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

1) เตาที่เปลวไฟสัมผัสโดยตรงกับโลหะ (Direct Fuel-Fired Furnace)

2) เตาที่เปลวไฟไม่สัมผัสโดยตรงกับโลหะ (Indirect Fuel-Fired Furnace)

3) เตาที่ใช้พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า (Electric Furnace) โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 3.1.1 เตาที่เปลวไฟสัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่จะเผา (Direct Fuel-Fired Furnace)

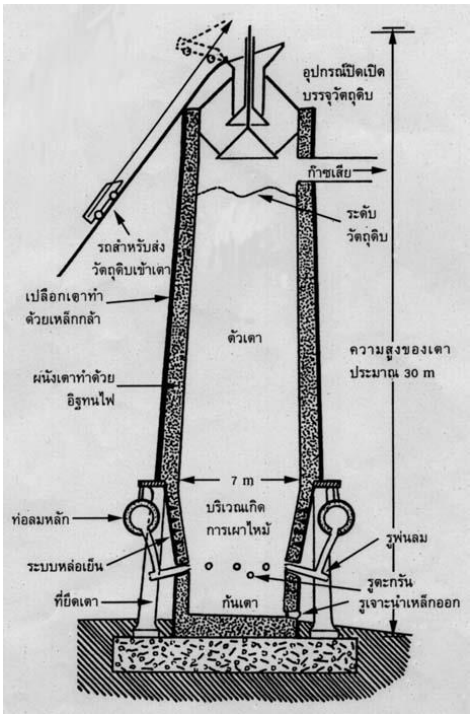
เป็นเตาที่เปลวไฟจากการสันดาปของเชื้อเพลิงหรือก๊าซร้อนจากการเผาไหม้สัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่จะเผา ตัวอย่างของเตาประเภทนี้ ได้แก่ เตาสูง (Blast Furnace) เตาคิวโปลา (Cupola Furnace) เตาสะท้อนความร้อน (Reverberatory Furnace)

#### 3.1.1.1 เตาสูง (Blast Furnace)

มีลักษณะเป็นปล่องสูงเรียวขึ้นไปจนถึงปากปล่อง ส่วนตรงกลางเตาจะป่องและค่อย ๆ เรียวลงมายังก้นเตา เปลือกนอกของเตาหุ้มด้วยเหล็กแผ่น ผนังภายในของเตาเรียงด้วยอิฐทนไฟชนิดต่าง ๆ ตามช่วงของความร้อนภายในเตาภายในผนังเตายังมีระบบน้ำหล่อเย็นเดินไว้ด้วย เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในเตาไม่ให้ร้อนจนเกินไปและมีท่อลมเป่าเข้าบริเวณท่อนกลางของเตา ซึ่งเป็นบริเวณหลอมละลายของเหล็ก ลมที่เป่าเข้าไปจะเป็นลมร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในการหลอม และช่วยประหยัดเชื้อเพลิง ขนาดของเตาสูงโดยทั่วไป มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10-20 เมตร ความสูงโดยประมาณ 30 เมตร ทำงานติดต่อกัน ตลอดเวลา 24 ชั่วโมง ราว 10 ปี จึงมีการหยุดเพื่อซ่อมแซมครั้งหนึ่ง (สุรสิทธิ์, 2553)

**1) ส่วนประกอบของเตาสูง** แสดงในรูปที่ 3.1 ดังนี้

1.1) ฐานเตา (Foundation) เป็นส่วนที่รองรับน้ำหนักของเตาทั้งหมด ทำด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนที่เป็นฐานรากจะต้องตอกเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงเพื่อป้องกันพื้นทรุด เนื่องจากขณะทำการถลุงจะมีน้ำหนักของตัวเตาเองแล้ว ยังต้องรวมของวัตถุดิบที่ใส่ลงไปในเตา และน้ำหนักเหล็กดิบที่กำลังหลอมละลายอีกด้วย




รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเตาสูง (Blast Furnace) (สุรสิทธิ์, 2553)

1.2) ก้นเตา (Hearth) เป็นส่วนรองรับน้ำหนักเหล็กดิบที่หลอมละลายแล้ว ซึ่งจะก่อด้วยอิฐทนไฟเรียงเป็นชั้นๆ ดังนั้นตัวอิฐจะต้องมีความสามารถทนความร้อนได้สูง ที่บริเวณก้นเตานี้ยังมีรูสำหรับเจาะเอาน้ำเหล็กออก ถัดสูงจากรูเจาะสำหรับเอาน้ำเหล็กออกแต่อยู่คนละข้างของเตา จะมรรูเจาะอีกรูหนึ่งสำหรับระบายขี้ตะกรัน (Slag) สาเหตุที่ต้องเจาะรูระบายขี้ตะกรันให้สูงกว่าเพราะขี้ตะกรันเบากว่าน้ำเหล็ก และลอยอยู่บนผิวหน้าของน้ำเหล็ก ดังนั้น ขี้ตะกรันจะถูกระบายออกก่อนน้ำเหล็ก เหนือรูทั้งสองขึ้นไปจะมีช่องสำหรับมองดูการหลอมละลายและดูระดับน้ำเหล็ก

1.3) ส่วนหลอมละลาย (Bosh) เป็นบริเวณหลอมละลายของวัตถุดิบที่ใส่ลงไปในเตาหรือบริเวณสิ้นสุดของปฏิกิริยาการเผาไหม้ภายในเตา ซึ่งบริเวณที่เกิดความร้อนสูงสุดภายในเตา ดังนั้นบริเวณนี้จะต้องเรียงด้วยอิฐทนไฟที่ทนความร้อนได้มากที่สุดของเตา ทางส่วนช่วงลาดของเตาจะมีรูลม (Tuyeres) อยู่รอบๆเตา มีจำนวนหลายรูที่รับลมร้อนมาจากท่อใหญ่อีกทีหนึ่ง

1.4) ปล่องเตา (Stack) คือบริเวณส่วนที่เรียงอยู่ถัดสูงขึ้นมาจากบริเวณหลอมละลาย ภายในเตาบริเวณนี้เป็นบริเวณช่วงกำลังเกิดปฏิกิริยาต่างๆ และเป็นช่วงอุ่นตัวของวัตถุดิบ ดังนั้น บริเวณนี้จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงล่าง สามารถเรียงด้วยอิฐทนไฟชนิดทนความร้อนได้ปานกลางได้

1.5) ส่วนบนเตา (Top) เป็นบริเวณบรรจุวัตถุดิบต่างๆ ลงในเตา ส่วนบนของเตาจะมีฝาปิดซึ่งมีลักษณะเป็นกรวย 2 ชั้น เพ่อป้องกันไม่ให้แก๊สในเตารั่วออก ขณะบรรจุวัตถุดิบจะเปิดกรวยชั้นแรกก่อนแล้วเติมวัตถุดิบลงไปแล้วปิด จากนั้นจึงเปิดกรวยที่อยู่ข้างล่างวัตถุดิบก็จะหล่นลงไปในปล่องเตา นอกจากนี้ ส่วนบนของเตายังประกอบด้วยท่อทางออกของแก๊สร้อนที่ได้จากการถลุง เพื่อนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการอุ่นลมที่จะป้อนเข้าเตา

1.6) อุปกรณ์ลำเลียง (Charging Apparatus) ประกอบด้วยรถลำเลียง (Skip Car) หรืออาจเป็นสายพานลำเลียง (Conveyer) เพื่อลำเลียงวัตถุดิบ เช่น แร่เหล็ก ถ่านโค้ก หินปูน เศษเหล็ก เป็นต้น

1.7) เตาเผาลมและอุปกรณ์พ่นลม (Chequer Chamber and Blower) เป็นส่วนที่แยกออกต่างหากจากเตาสูง มีลักษณะเป็นทรงกระบอกสูง ส่วนบนสุดโค้งเป็นครึ่งวงกลม ภายในเรียงด้วยอิฐทนไฟสลับกันเป็นชั้นๆ หลายแถว แก๊สร้อนจะเข้าทางด้านล่างของอิฐทนไฟ ทำการเผาอิฐทนไฟจนร้อนแดง เมื่ออิฐร้อนแดงจนได้ที่แล้วช่องแก๊สร้อนเข้าจะถูกปิด จากนั้นจะเปิดปั้มลมเพื่อปั้มลมเข้าเตา ลมจะวิ่งผ่านอิฐที่ร้อนแดงและจะนำเอาความร้อนไปด้วย กลายเป็นลมร้อนผ่านเข้าไปในท่อวงแหวนซึ่งมีท่อเล็กๆต่อแยกไปยังรูต่างๆ ที่อยู่ในบริเวณส่วนหลอมละลาย เตาสูง (Blast Furnace) สำหรับถลุงเหล็กดิบ 1 เตา จะมีเตาอุ่นลมอยู่ประมาณ 2-3 เตาขึ้นไป เพื่อใช้ในการสับเปลี่ยนหมุนเวียนทำให้เกิดลมร้อนอย่างต่อเนื่อง

**2) การบรรจุวัตถุดิบในเตาสูง**

การบรรจุวัตถุดิบในเตานั้น จะใส่ผสมรวมๆกันไปด้วยกันไม่ได้ จะต้องใส่เป็นชั้น ๆ ตามชนิดของวัตถุดิบ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพของปฏิกริยาในการหลอมละลายมากที่สุด ชั้นของวัตถุดิบที่ใส่ลงในเตาเรียงลำดับจากก้นเตาขึ้นมาถึงส่วนบนของเตา

ชั้นที่ 1 ถ่านโค้ก ตอนที่เริ่มจุดเตาเพื่อถลุงเหล็กนั้น ต้องใสถ่านโค้กก่อนเพื่อให้เป็นเชื้อเพลิง ทำให้เกิดปฏิกริยาภายในเตา

ชั้นที่ 2 หินปูน เมื่อถ่านโค้กติดไฟแล้วจะเกิดความร้อน ซึ่งจะทำให้หินปูนสลายตัวรอผสมกับสิ่งสกปรกที่จะเกิดขึ้นภายในเตา

ชั้นที่ 3 เศษเหล็ก สำหรับชั้นนี้ในบางเตาอาจไม่ใช้ ถ้าเป็นเช้านี้ให้ใส่ชั้นต่อไปได้เลย

ชั้นที่ 4 สินแร่เหล็ก จะต้องผ่านการเตรียมให้มีขนาดตามต้องการ คือก้อนโตประมาณ 10 – 15 มม.

**3) ผลผลิตที่ได้จากเตาสูง**

3.1) เหล็กดิบ (Pig Iron) ผลผลิตที่สำคัญซึ่งได้จากการถลุงแร่ในเตาสูง ได้แก่ เหล็กดิบ แต่เหล็กดิบที่ได้จากเตานั้นมีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับชนิดของแร่เหล็กและวัตถุดิบที่ใส่เข้าไป ชนิดของเหล็กดิบ มีดังนี้

3.1.1) เหล็กดิบสีเทา (Grey Pig Iron) เป็นเหล็กดิบที่มีซิลิกอนผสมอยู่มาก ซิลิกอนเป็นตัวช่วยแยกคาร์บอนในเหล็กดิบออกมาอยู่ในรูปแกรไฟต์ (Graphite) หรือคาร์บอน ดังนั้นถ้านำเหล็กดิบสีเทามาหักดูเนื้อในจะเห็นรอยหักเป็นเม็ดเล็กๆสีเทา เหล็กดิบสีเทานิยมเอาไปถลุงอีกครั้งเพื่อให้ได้เป็นเหล็กหล่อสีเทา (Grey Cast Iron) ต่อไป

3.1.2) เหล็กดิบสีขาว (White Pig Iron) เป็นเหล็กดิบที่ส่วนประกอบของแมงกานีสอยู่มาก คาร์บอนจะรวมตัวกับเหล็กในรูปของซีเมนไตท์ (Cementite) เมื่อสังเกตดูรอยหักจะเป็นเนื้อละเอียดขาว เหล็กดิบสีขาวนี้นิยมนำไปถลุงและผ่านกรรมวิธีต่างๆเพื่อให้ได้เป็นเหล็กกล้าที่จะนำมาใช้งานต่อไป

3.2) ขี้ตะกรัน (Slag)

เป็นสิ่งสกปรกที่อยู่ในสินแร่เหล็ก ซึ่งถูกกำจัดโดยหินปูน ขี้ตะกรันที่ได้จากเตาสูงจะมีเนื้อละเอียด ใช้เป็นส่วนผสมในการทำปูนซีเมนต์ และเป็นวัตถุดิบอย่างหนึ่งสำหรับผลิตใยหิน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนป้องกันความร้อน และเป็นกันความร้อน และเป็นฉนวนป้องกันเสียงได้ดี

3.3) แก๊สร้อน (Hot Gas) ที่ได้จากเตาสูงในการผลิตเหล็กดิบจำนวน 1 ตัน มีส่วนผสมดังนี้ $CO_2$ = 18.5% CO = 23.4% $H_2$ = 0.2% $N_2$ = 53.1% และ $H_2O$ = 4.8%

**4) ช่วงต่างๆของอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาภายในเตา** มีดังนี้

4.1) ช่วงให้ความร้อนล่วงหน้าหรือช่วงอุ่น (Preheating Zone) อุณหภูมิประมาณ 200 - 300 $^{o}$C ความชื้นหรือน้ำกลายเป็นไอ กำมะถันส่วนหนึ่งถูกไหม้เป็นก๊าซ

4.2) ช่วงลดออกซิเจน (Reduction Zone) อุณหภูมิประมาณ 600 - 800 $^{o}$C ก๊าซออกซิเจนรวมตัวกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

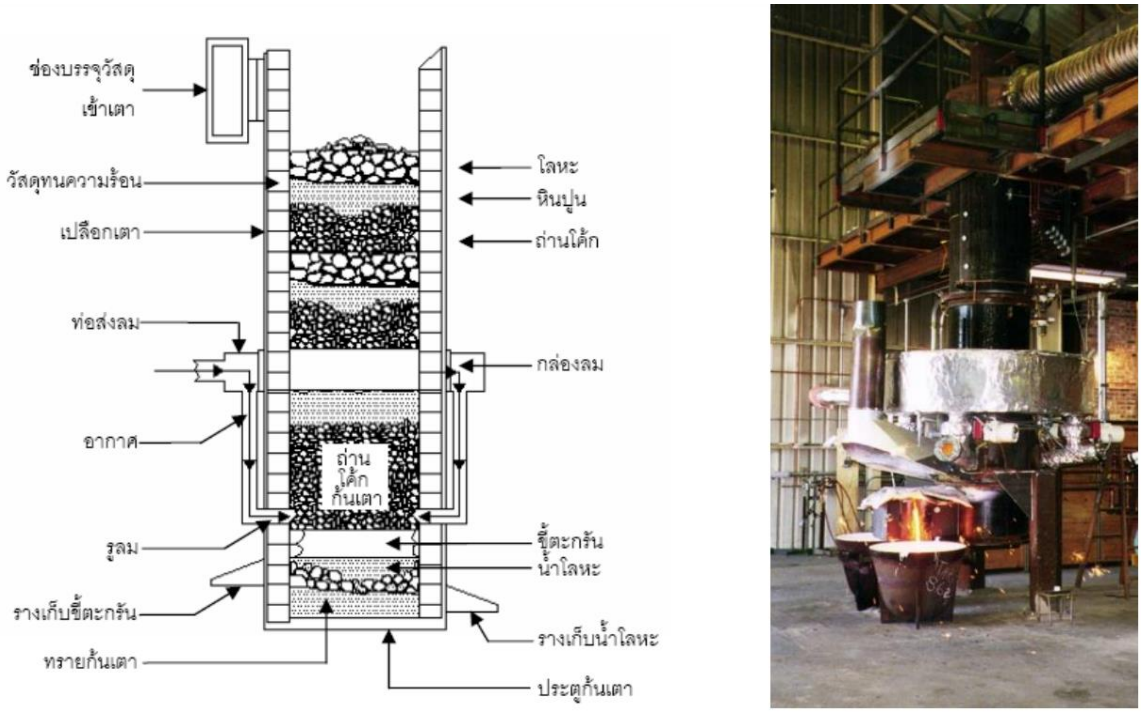
4.3) ช่วงเติมคาร์บอนของถ่านโค้ก (Carburizing Zone) อุณหภูมิประมาณ 1,000 – 1,100 $^{o}$C เป็นช่วงที่ถ่านโค้กรวมตัวกับก๊าซออกซิเจน

4.4) ช่วงหลอมละลาย (Melting Zone) อุณหภูมิประมาณ 1,400 – 1,600 $^{o}$C ได้เหล็กคาร์ไบด์กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

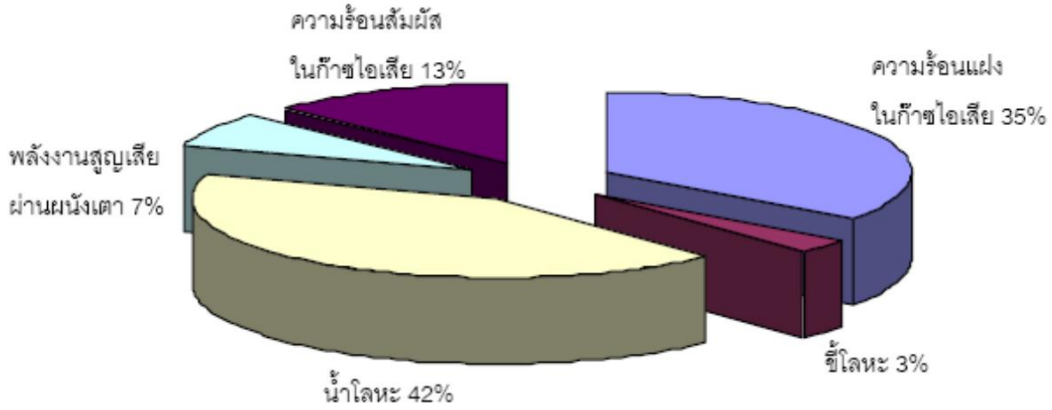
### 3.1.1.2 เตาคิวโปลา (Cupola Furnace)

เตาคิวโปลาใช้ในงานหลอมเหล็กหล่อ และใช้ถ่านโค้กเป็นเชื้อเพลิง เตาคิวโปลามีลักษณะเป็นแท่งเหล็กทรงกระบอกแนวตั้ง ภายในบุด้วยวัสดุทนความร้อน ที่ก้นของเตาเป็นแอ่ง (Well) พักน้ำโลหะที่หลอมเหลวก่อนที่น้ำโลหะจะถูกจ่ายออก (รูปที่ 3.2)

ภายในเตาคิวโปลาจะบรรจุด้วยชั้นของถ่านโค้ก หินปูน (Limestone) และเหล็กที่ใช้หล่อสลับกันไปผ่านทางช่องบรรจุวัสดุที่ด้านบนของเตา ชั้นของถ่านโค้กที่อยู่ใกล้กับรูปจ่ายลม (Tuyere) จะเกิดการสันดาป (เรียกเขตนี้ว่าเขตสันดาปหรือเขตเพิ่มออกซิเจน) ความร้อนจากการสันดาปจะหลอมชั้นของโลหะที่อยู่ใกล้กับเขตสันดาป โลหะที่หลอมเหลวจะไหลลงสู่แอ่งพักน้ำโลหะ เมื่อถ่านโค้กชั้นแรกถูกสันดาปจนหมด ถ่านโค้กชั้นถัดไปก็จะเลื่อนลงมาแทนที่ ด้วยวิธีนี้กระบวนการสันดาปและการหลอมก็สามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างสมดุลพลังงานจากถ่านโค้กของเตาคิวโปลา (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)




รูปที่ 3.2 เตาคิวโปลา (Cupola Furnace) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)




รูปที่ 3.3 สมดุลพลังงานจากถ่านโค้กของเตาคิวโปลา (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

**3.1.1.3 เตาสะท้อนความร้อน (Reverberatory Furnace)**

เตาสะท้อนความร้อนใช้ในงานหลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็กครั้งละปริมาณมาก ๆ โครงสร้างของเตาสะท้อนความร้อนจะเป็นห้องที่บุด้วยวัสดุทนไฟ ภายในห้องมีอ่างสำหรับบรรจุโลหะที่ใช้หลอม หัวเผา (Burner) จะฉีดเชื้อเพลิงซึ่งเป็นน้ำมันหรือก๊าซให้มาสันดาปในห้องดังกล่าว ความร้อนจากการสันดาปถ่ายเทเข้าสู่โลหะที่ใช้หลอมโดยวิธีการแผ่รังสีทั้งจากเปลวไฟโดยตรงและจากเพดานเตาที่ดูดซับความร้อนจากเปลวไฟ เตาสะท้อนความร้อนบางตัวอาจมีปั๊มหมุนเวียนน้ำโลหะเพื่อเพิ่มผลผลิต ลดการใช้เชื้อเพลิง และให้น้ำโลหะผสมเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของเตาสะท้อนความร้อน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

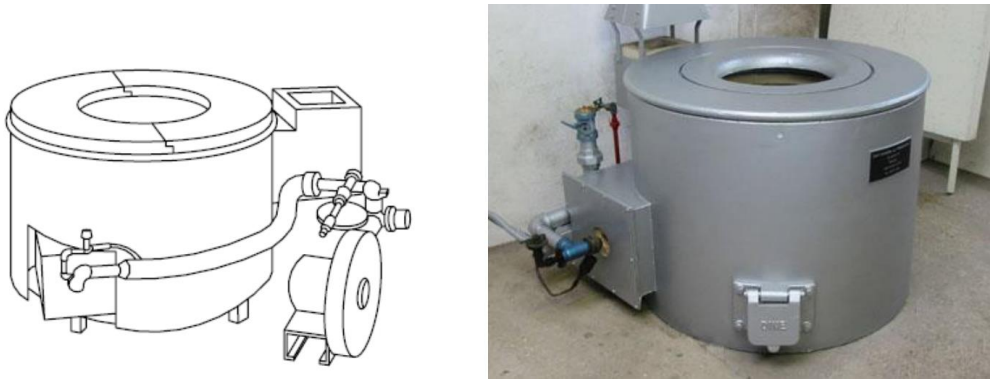
รูปที่ 3.4 เตาสะท้อนความร้อน (Reverberatory Furnace)
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

### 3.1.2 เตาที่เปลวไฟไม่สัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่จะเผา (Indirect Fuel-Fired Furnace)

มีลักษณะที่เปลวไฟของเชื้อเพลิงหรือก๊าซร้อนจากการเผาไหม้สัมผัสทางอ้อมหรือมีตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนอีกขั้นตอนหนึ่ง ตัวอย่างของเตาประเภทนี้ ได้แก่ เตาเบ้า (Crucible Furnace)

#### 3.1.2.1 เตาเบ้า (Crucible Furnace)

เตาเบ้ามักใช้ในงานหลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีปริมาณน้อย เตาเบ้าถือว่าเป็นเตาหลอมโลหะที่เก่าแก่ที่สุดและมีโครงสร้างง่ายที่สุด รูปที่ 3.5 แสดงรูปร่างของเตาเบ้า ซึ่งประกอบด้วยเบ้าบรรจุโลหะที่ทำจากแกรไฟต์ (Clay-Graphite) หรือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon-Carbine) และเปลือกที่ทำจากวัสดุทนความร้อนโดยมีเหล็กหุ้มอยู่ด้านนอก เปลือกดังกล่าวทำหน้าที่กักความร้อนจากการสันดาปให้ถ่ายเทไปเบ้าให้มากที่สุด ความร้อนจากการสันดาปจะไม่ได้สัมผัสกับโลหะที่ใช้หลอมโดยตรง แต่ถ่ายเทโดยเบ้าที่บรรจุโลหะ โดยทั่วไปแล้วเชื้อเพลิงที่ใช้กับเตาเบ้า ได้แก่ น้ำมัน และก๊าซ อย่างไรก็ตามบางครั้งอาจใช้ถ่านหินหรือถ่านโค้ก เตาเบ้าแบ่งออกเป็น 5 ชนิด ประกอบด้วย เตาเบ้าแบบยกเบ้าหลอมได้ (Lift-Out Furnace) เตาเบ้าแบบยกเบ้าหลอมไม่ได้ (Bate-Out Furnace) เตาเบ้าแบบเอียงเทน้ำโลหะได้ (Tilting Furnace) เตาเบ้าแบบถ่ายความร้อน (Immersed Crucible Furnace) เตาเบ้าแบบหมุน (Rotary Crucible Furnace) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)



รูปที่ 3.5 เตาเบ้า (Crucible Furnace) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

### 3.1.3 เตาที่ใช้พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า (Electric Furnace)

เป็นเตาที่ใช้พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 ชนิด ประกอบด้วย เตาแบบความต้านทานด้วยกระแสไฟฟ้า (Resistance Furnace) และเตาเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)

#### 3.1.3.1 เตาแบบความต้านทานด้วยกระแสไฟฟ้า (Resistance Furnace)

เตาแบบความต้านทานด้วยกระแสไฟฟ้า (Resistance Furnace) แบ่งตามชนิดของขดลวดความร้อนได้ 3 ชนิด คือ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

1) เตาไฟฟ้าแบบลวดความต้านทาน (Muffle Furnace)

เป็นเตาที่รู้จักกันดีและใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุด เตาชนิดนี้จะใช้ลวดความร้อน (heater) ที่มีความต้านทานสูงเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ลวดความร้อน และลวดความร้อนนั้นจะให้ความร้อนออกมา โดยในการศึกษานี้จะใช้เตาไฟฟ้าแบบลวดความต้านทานในการย่างฝุ่นเหล็ก ยี่ห้อ Carbolite รุ่น GSM 11/8/201 ที่สามารถเผาได้ถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ 1,100 $^{o}$C มีลวดความร้อนฝังอยู่ด้านข้างของผนังเตา 2 ด้าน ผนังเตาภายในทำด้วย Silica ส่วนควบคุมอุณหภูมิ Eurotherm รุ่น 201 ควบคุมการทำงานด้วยระบบ PID Microprocessor แสดงผลเป็นตัวเลขแบบ LED สามารถแสดงค่าของอุณหภูมิจริงภายในเตาและเลือกดูค่าที่ตั้งไว้ได้ หัววัดอุณหภูมิเป็นชนิด Type K thermocouple โครงสร้างภายนอกทำด้วยเหล็กกล้าเคลือบสี มีปล่องระบายควัน (Chimney) สามารถระบายควันที่เกิดจากการเผาได้ ใช้ไฟฟ้า 220 โวลท์ 50 ไซเคิล กำลังไฟฟ้าที่ 3 กิโลวัตต์ (รูปที่ 3.6)

รูปที่ 3.6 (บน) เตาไฟฟ้าแบบลวดความต้านทานที่ใช้ในการศึกษา ยี่ห้อ Carbolite รุ่น GSM 11/8
(ล่าง) 1) ผนังเตาภายในทำด้วย Silica 2) ปล่องระบายควัน

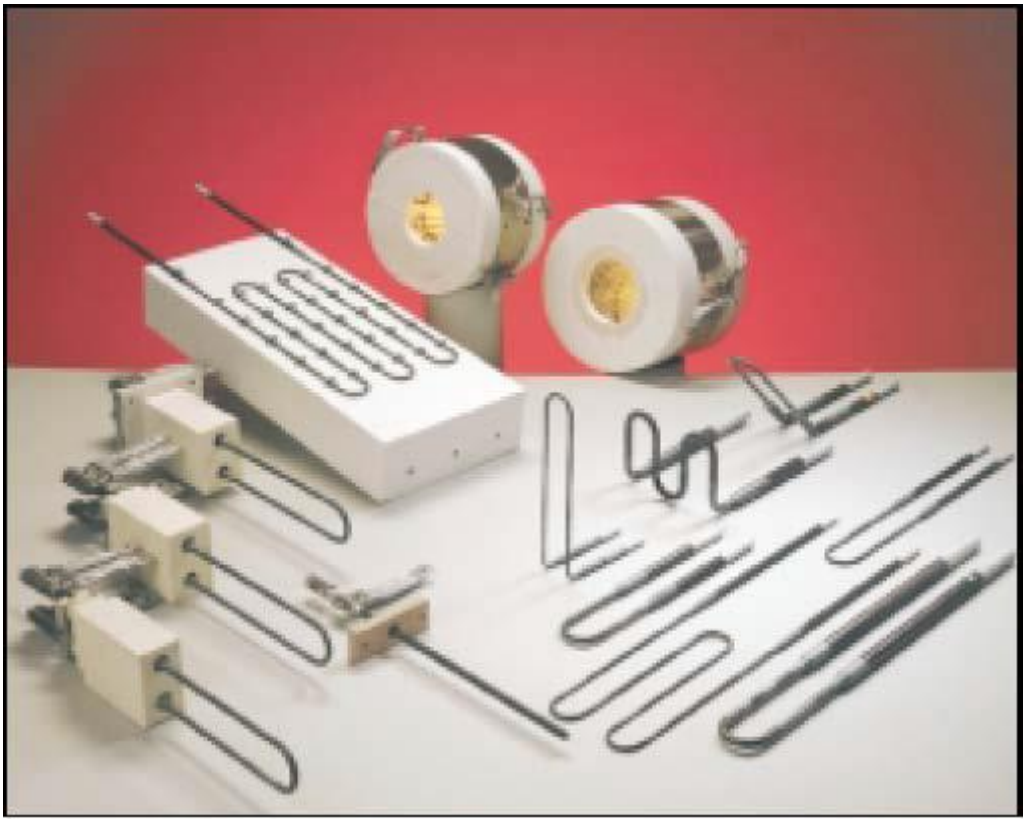
2) เตาไฟฟ้าที่ใช้แท่งซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide Muffle Furnace)

เตาชนิดนี้จะใช้ลวดความร้อนที่ทำด้วยแท่งซิลิกอนคาร์ไบด์ ทำให้เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กแล้ว ซิลิกอนคาร์ไบด์สามารถทนต่ออุณหภูมิใช้งานที่สูงกว่า ทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และทนต่อสภาวะการกัดกร่อนได้ดีกว่า จึงเหมาะกับงานประเภทที่มีความร้อนสูงมากและต้องสัมผัสกับอากาศ เช่น ไอระเหยของน้ำ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์หรือฮาโลเจน และสภาวะหลอมละลายของอัลคาไลน์ เกลืออัลคาไลน์ โลหะทุกชนิดและเหล็กออกไซด์ ซิลิกอนคาร์ไบด์จะทำปฏิกิริยาและถูกทำลายโดยสภาวะการกัดกร่อนและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอากาศ อายุการใช้งานของซิลิกอนคาร์ไบด์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจะทำปฏิกิริยาเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิในเตาเพิ่มสูงกว่า 1,400 °C เป็นผลให้อายุการใช้งานลดลง (รูปที่ 3.7)

รูปที่ 3.7 ซิลิกอนคาร์ไบด์แบบต่าง ๆ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

3) เตาไฟฟ้าที่ใช้ลวดโมลิบดีนัมไดซิลิไซด์ (Molybdenum Disilicide Box-Furnace)

เตาชนิดนี้ใช้ลวดความร้อนที่มีส่วนประกอบเป็นเซรามิกคือ Molybdenum Disilicide ซึ่งผลิตโดยบริษัท KANTHAL ประเทศสวีเดน สำหรับรุ่น KANTHAL SUPER สามารถให้อุณหภูมิถึง 1,900 °C และมีความสะดวกในการใช้งานอย่างมาก ลักษณะโครงสร้างของลวดจะเป็นรูปตัวยูเป็นส่วนใหญ่ การติดตั้งขดลวดจะติดตั้งจากด้านบน โดยวางตามยาวในลักษณะแนวดิ่ง คุณสมบัติที่พิเศษของขดลวดชนิดนี้ คือ มีความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิได้ในเวลาที่รวดเร็ว คือมีการไต่ขึ้นของอุณหภูมิได้เร็วมาก ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิ 1,200 °C ได้ภายใน 1 ชั่วโมง นอกจากนี้การเปลี่ยนขดลวดยังสามารถทำการเปลี่ยนใหม่ได้ในแต่ละเส้น และการเชื่อมโยงระหว่างเส้นจะใช้แถบลวดเงินเชื่อมต่อระหว่างขั้วของเส้นลวดเช่นเดียวกับเส้นลวดชนิดซิลิกอนคาร์ไบด์ (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 ลวดโมลิบดีนัมไดซิลิไซด์แบบต่าง ๆ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

**3.1.3.2 เตาเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)**

การให้ความร้อนและการหลอมโดยการเหนี่ยวนำเป็นการให้ความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้การถ่ายเทพลังงานผ่านสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าและเกิดความร้อนขึ้นในโลหะ โดยสามารถใช้กับกระบวนการให้ความร้อนลักษณะต่างๆในอุตสาหกรรมโลหะ ได้แก่ การให้ความร้อนโลหะทั้งชิ้น การให้ความร้อนเฉพาะผิวโลหะ และการหลอมโลหะ

การหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำอาศัยหลักการเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดที่พันอยู่รอบๆ เบ้าหลอมก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นโลหะเกิดจากการเสียดสีของโมเลกุลเนื่องจากความต้านทานสนามแม่เหล็กของชิ้นโลหะ (Reluctance) และเกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลวนจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กในชิ้นโลหะ (Eddy Current) (รูปที่ 3.9 และ 3.10) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

รูปที่ 3.9 เตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

รูปที่ 3.10 เบ้าหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

การหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดรอบเบ้าหลอมจะค่อย ๆ เหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลวนและความร้อนแก่ชิ้นโลหะจนหลอมเหลว โดยเมื่อโลหะเริ่มหลอมเหลวแล้วสนามแม่เหล็กก็ยังทำให้เกิดการหมุนวนของน้ำโลหะภายในเบ้าหลอมทำให้เกิดการกระจายความร้อนภายในเบ้าอย่างทั่วถึง ส่วนประกอบของเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำประกอบไปด้วย (รูปที่ 3.11)

1) โครงสร้างของเตาหลอม (Furnace body)

การออกแบบโครงสร้างของเตาหลอมนั้นเปลี่ยนแปลงตามขนาดและการผลิต โครงสร้างของเตาหลอมขนาดเหล็กส่วนใหญ่แล้วจะผลิตจากแผ่นฉนวนความแข็งแรงสูงและปิดหัวปิดท้ายด้วยวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ ในกรณีของเตาหลอมขนาดใหญ่ (ขนาดพิกัดการหลอมเกินกว่า 1 ตัน) โครงสร้างจะทำจากเหล็กแผ่นม้วนโดยอาจมีการติดตั้งคอยล์ไว้ภายในเฟรมเดียวกันเลยก็ได้

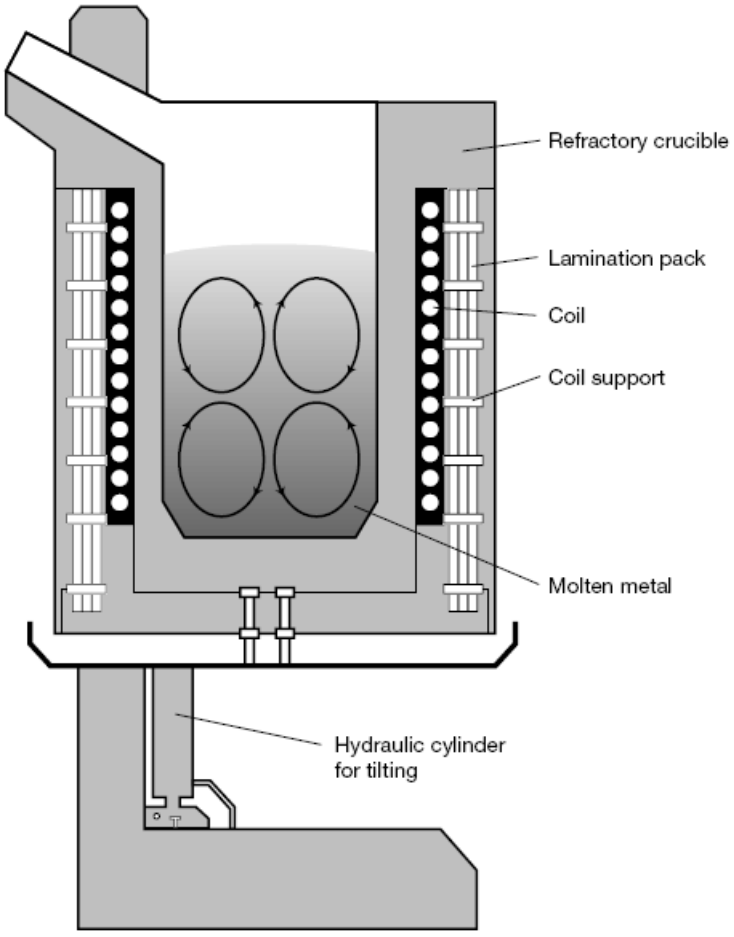
2) วัสดุบุภายในเตา (Refractory linings)

วัสดุไม่ติดไฟที่ใช้บุภายในเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำนั้นต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- สามารถทนทานต่ออุณหภูมิได้ตามอุณหภูมิใช้งานที่ต้องการ
- ทนทานต่อปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในขณะหลอมโลหะ
- ทนทานต่อวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
- แข็งแรงและทนทานต่อการกระแทกโดยไม่การทะลุ

3) ขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Coil)

ทำด้วยลวดตัวนำไฟฟ้า เช่นทองแดง เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวมันจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในชิ้นงานโลหะเกิดเป็นพลังงานความร้อน และเนื่องจากกระแสที่ป้อนให้กับขดเหนี่ยวนำมักจะมีปริมาณที่สูงมาก จึงต้องมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำภายในขดเหนี่ยวนำเพื่อลดกำลังสูญเสียที่ขดลวดเหนี่ยวนำ รูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำจะแตกต่างกันตามลักษณะของวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน ส่วนในการหลอมโลหะจะติดตั้งขดลวดเหนี่ยวนำในลักษณะเดียวกันพันรอบเบ้าหลอม (รูปที่ 3.12)

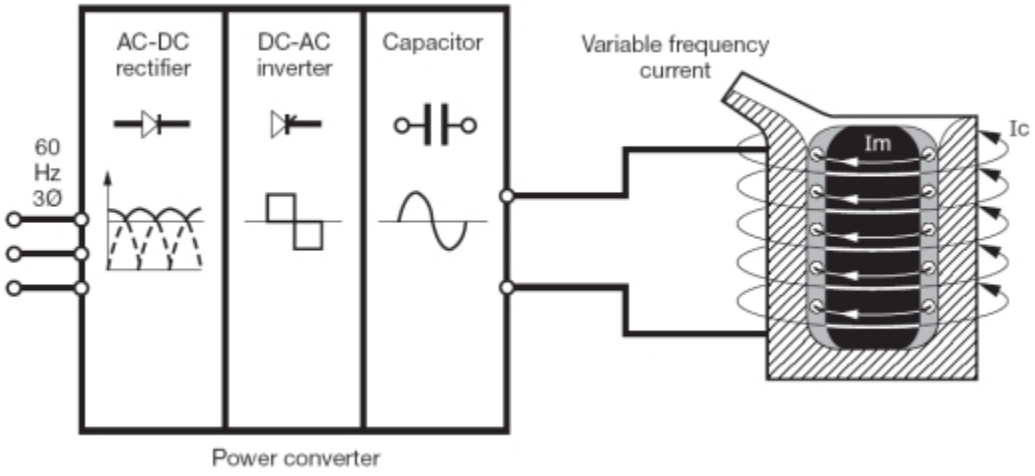



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

รูปที่ 3.12 ขดลวดเหนี่ยวนำของเตาหลอม (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

4) ส่วนจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply)

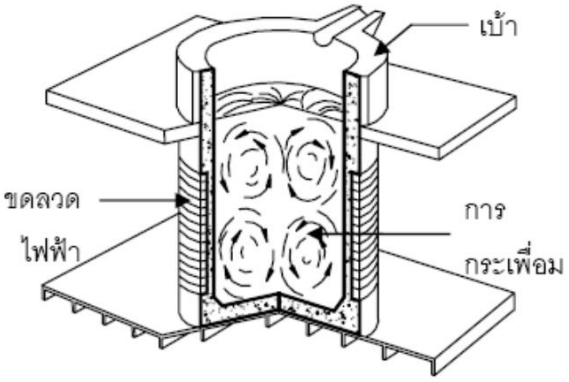
ในส่วนนี้เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ที่ต้องการ เพื่อป้อนเข้ากับขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อให้ความร้อนหรือหลอมโลหะ (รูปที่ 3.13)



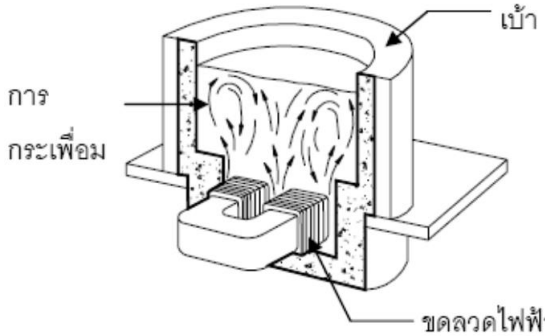

รูปที่ 3.13 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

เตาเหนี่ยวนำจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกน (Coreless Type) และเตาเหนี่ยวนำแบบช่อง (Channel Type) ดังรูปที่ 3.14 แสดงรูปร่างของเตาเหนี่ยวนำทั้งสองแบบ เตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกนมีขดลวดพันอยู่รอบเบ้า ในขณะที่เตาเหนี่ยวนำแบบช่องมีขดลวดพันอยู่รอบแกนที่ติดตั้งอยู่ส่วนนอกของเบ้าหลอม

ในการศึกษานี้จะใช้เตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกนในการเผาฝุ่นเหล็กยี่ห้อ HAIRUITUO รุ่น HT-25A (รูปที่ 3.15) โดยคุณสมบัติของเตาแสดงในตารางที่ 3.1



(บน) เตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกน



(ล่าง) เตาเหนี่ยวนำแบบช่อง

รูปที่ 3.14 เตาเหนี่ยวนำ (บน) เตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกน (ล่าง) เตาเหนี่ยวนำแบบช่อง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

รูปที่ 3.15 เตาเหนี่ยวนำที่ใช้ในการศึกษายี่ห้อ HAIRUITUO รุ่น HT-25A

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของเตาเหนี่ยวนำ ยี่ห้อ HAIRUITUO รุ่น HT-25A

| Model | HT-25A |
|---|---|
| Work Power | Three phase 380V 50/60HZ |
| Output Power | 25KW |
| Fluctuating Frequency | 30-100KHZ |
| Output current | 200-1200A |
| Timing | 1-99s |
| The flow rate of cooling water | 0.06-0.12Mpa 7.5L/Min |
| Water temperature protection point | 40℃ |
| Weight | 30kg |
| Dimension(mm) | 560*220*505 |

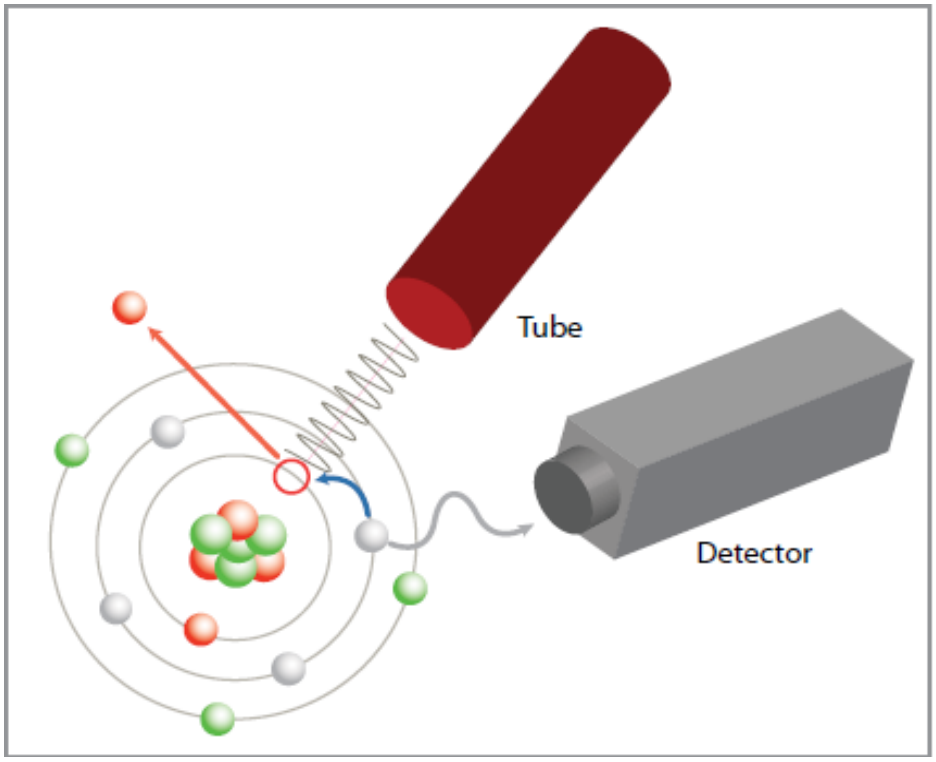
## 3.2 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF)

ในการศึกษานี้จะใช้เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เกิดจากกระบวนการทดลองขั้นตอนต่างๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) แบบพกพาของ OLYMPUS (รูปที่ 3.16) ซึ่งรังสีเอกซ์เป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 10 ถึง 0.01 นาโนเมตร ตรงกับความถี่ในช่วง 30 ถึง 30,000 พีต้า เฮิรตซ์ (1015 เฮิรตซ์) ในเบื้องต้นมีการใช้รังสีเอกซ์สำหรับถ่ายภาพเพื่อการวินิจฉัยโรค และงานผลึกศาสตร์ รังสีเอกซ์เป็นการแผ่รังสีแบบแตกตัวเป็นไอออน และมีอันตรายต่อมนุษย์ โดยปกติการวิเคราะห์ธาตุจะเรียกรังสีเอกซ์ตามขนาดของพลังงาน เช่น รังสีเอกซ์ 10 KeV (Kiloelectron Volt) การวิเคราะห์รักสีเอกซ์เรืองแสงใช้วิเคราะห์ทั้งคุณภาพและปริมาณ (Qualitative and Quantitative Analysis)

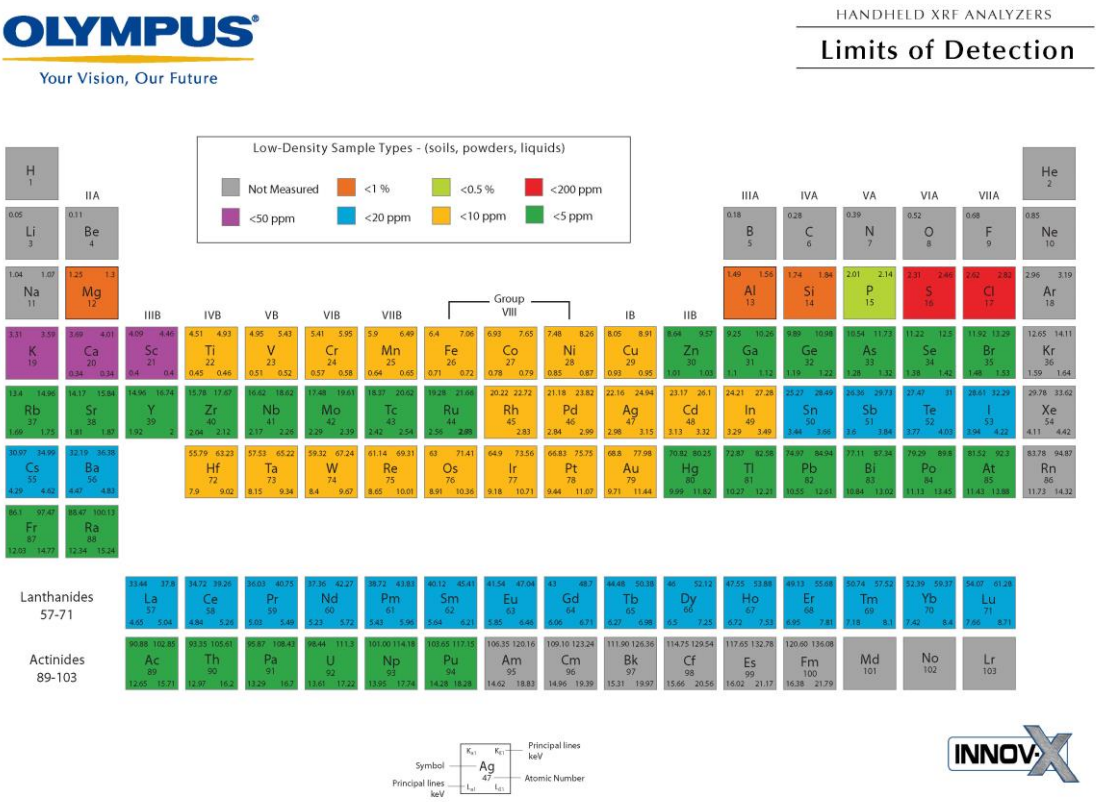
ทฤษฎีอิเล็กตรอน สมัยปัจจุบัน อธิบายถึงการเกิด รังสีเอกซ์ว่า ธาตุประกอบด้วยอะตอมจำนวนมาก ในอะตอมแต่ละตัวมีนิวเคลียสเป็นใจกลาง และมีอิเล็กตรอนวิ่งวนเป็นชั้นๆ ธาตุเบาจะมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่น้อยชั้น และธาตุหนักจะมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่หลายชั้น เมื่ออะตอมธาตุถูกยิงด้วยกระแสอิเล็กตรอน จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในถูกชนกระเด็นออกมาวิ่งวนอยู่รอบนอกซึ่งมีภาวะไม่เสถียรและจะหลุดตกไปวิ่งวนอยู่ชั้นในอีก พร้อมกับปล่อยพลังงานออกในรูปรังสี (Photons หรือ Photoelectron) ทำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) หรือ รังสีเอกซ์เรือง (Fluorescence X-Ray) แล้วแต่ชนิดของธาตุ เมื่อทำการวัดรังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดรังสี (Detector) ดังรูปที่ 3.17 ความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองแสงของธาตุที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของธาตุนั้นในตัวอย่าง

สำหรับเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) แบบพกพาของ OLYMPUS ไม่สามารถจำแนกธาตุได้ชัดเจนสำหรับธาตุที่มีมวลอะตอมต่ำกว่า 18 ยกเว้นธาตุ 6 ชนิด ได้แก่ Mg Al Si P S Cl ที่มีปริมาณเพียงพอตามที่แสดงในรูปที่ 3.18 ทำให้ผลวิเคราะห์ XRF อาจแสดงค่า Light Element (LE) รวมของธาตุที่มีมวลอะตอมต่ำกว่า 18 ดังกล่าวได้

รูปที่ 3.16 ส่วนประกอบตัวเครื่อง XRF แบบพกพาของ OLYMPUS




รูปที่ 3.17 หลักการทำงานของเครื่อง XRF




รูปที่ 3.18 แสดง Limits of Detection ของเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยอาศัยการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) แบบพกพาของ OLYMPUS

## 3.3 เครื่องวิเคราะห์ชนิดแร่ด้วยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer, XRD)

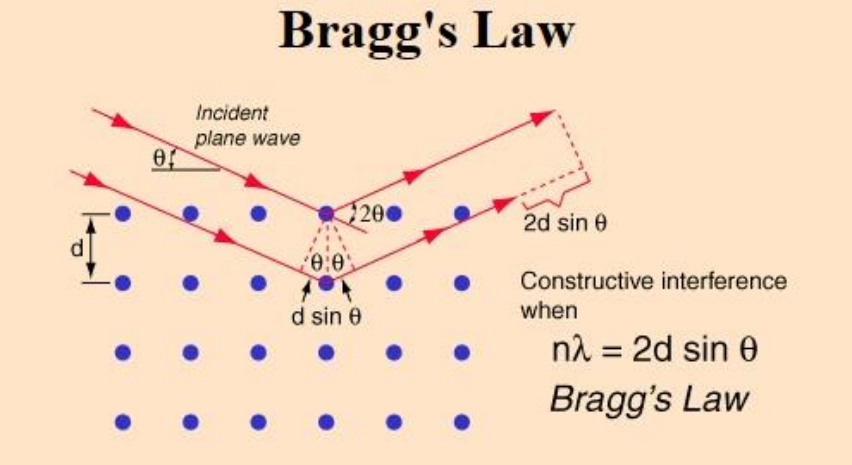
โดยปกติหน้าผลึกของแร่มีลักษณะเป็นระนาบ (Plane) ซึ่งมีขนาดเล็กและขนานกันเป็นจำนวนมาก ระยะห่างระหว่างระนาบ (D-Spacing) ของแต่ละหน้าผลึกจะมีค่าคงที่ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละชนิดแร่ เมื่อรังสีเอกซ์ปฐมภูมิชนิดต่าง ๆ จากหลอดรังสีเอกซ์มากระทบกับระนาบของผลึกแร่ จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีตามสมการด้านล่าง (รูปที่ 3.19) ทำให้สามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบได้ โดยแสดงผลออกมาเป็นความเข้มของการนับ (Count) หรือยอด (Peak) การแปลค่าความหมายของความเข้มของการนับมุม $2\theta$ และระยะห่างระหว่างระนาบ สามารถกระทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าดังกล่าวจาก Standard หรือข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งเปรียบเทียบกันจนจำแนกชนิดแร่ที่นำมาวิเคราะห์ได้ ทั้งนี้ ในการศึกษานี้จะใช้เครื่องวิเคราะห์ชนิดแร่ด้วยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer) แบบพกพาของ OLYMPUS (รูปที่ 3.20)

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

โดย $\lambda$ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ

d = ระยะห่างระหว่างระนาบ

$\theta$ = มุมที่เกิดจากการเลี้ยวเบน




รูปที่ 3.19 แสดงหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

รูปที่ 3.20 เครื่องวิเคราะห์ชนิดแร่ด้วยรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer) แบบพกพาของ OLYMPUS

## 3.4 เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Particle Size Distribution Analyzer)

เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer) (ที่มีลักษณะเป็นผง เป็นอิมัลชั่น หรือเป็นสารแขวนลอย) โดยใช้หลักการ Laser diffraction ด้วยการกระจายตัวอย่างในสารตัวกลางที่ไม่ทำละลายตัวอย่าง (dispersant) สามารถเลือกตัวกลางเป็นของเหลว (วัดแบบ Wet) หรือ ตัวกลางเป็นอากาศ (วัดแบบ Dry) วัดขนาดของอนุภาคในช่วงระหว่าง 0.02–2,000 ไมโครเมตร ในส่วนของการศึกษานี้จะใช้เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersizer 2000 (รูปที่ 3.21)

รูปที่ 3.21 แสดงเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์
(Laser Particle Size Distribution Analyzer) ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersizer 2000

## 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนัก (รูปที่ 3.22) ตะแกรงคัดขนาด (รูปที่ 3.23) เครื่องวัดอุณหภูมิด้วยแสงเลเซอร์ (รูปที่ 3.24) กระดาษกรองและขวดกรอง (รูปที่ 3.25) ปั๊มสุญญากาศ และขวดหล่อเย็นเก็บไอระเหิด

ทั้งนี้ อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นเองคือขวดหล่อเย็นเก็บไอระเหิดแสดงในรูปที่ 3.26 ประกอบด้วยขวดแก้วปากกว้างขนาดปาก 4.5 นิ้ว พร้อมฝาเกลียวเหล็ก สูง 6 นิ้ว ที่ฝาเจาะรูเพื่อสอดท่อนำส่งไอระเหิดจากเบ้าหลอมและรูสำหรับท่อทองแดงดูดอากาศเพื่อสร้างแรงดูดสุญญากาศ ขนาดท่อทองแดงที่ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.5 เซนติเมตร ดัดโค้งเพื่อดักไอระเหิดเข้าสู่ขวดแก้ว ที่ปลายท่อก่อนเข้าขวดแก้วจะหุ้มด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว เชื่อมปิดปลายทั้งสองด้านโดยด้านบนและด้านล่างของท่อมีรูเปิด เพื่อใช้ส่งผ่านน้ำหล่อเย็น (water jacket) ให้ไอระเหิดที่ผ่านท่อทองแดงด้านในมีความเย็นตัวลงก่อนที่จะถูกเก็บด้วยน้ำภายในขวดแก้ว ซึ่งในขณะทำการทดลองจะบรรจุน้ำเพื่อดักเก็บไอระเหิดตามที่แสดงในรูปที่ 3.27

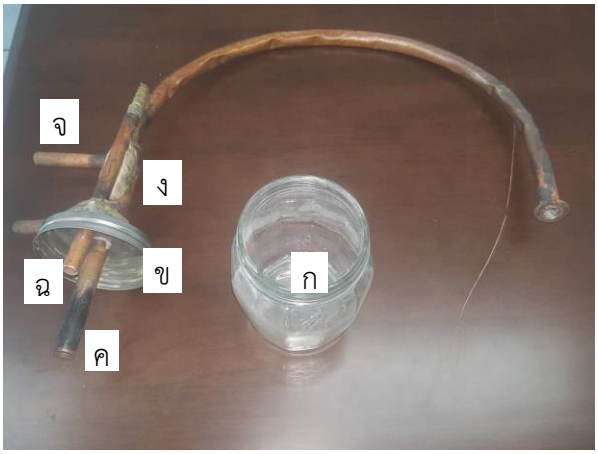
การเตรียมอุปกรณ์การเก็บฝุ่นไอระเหิดลักษณะนี้ได้รับแนวคิดจาก Omran, Fabritius, Heikkinen, and Chen (2017) ซึ่งทำการศึกษาค่าความเป็นตัวกลาง Dielectric ของสารประกอบ โดยในการศึกษาที่อ้างถึง ได้ทำการระเหิดโลหะสังกะสีด้วยเตาไมโครเวฟแล้วเก็บไอระเหิดสังกะสีออกไซด์ด้วยแผ่นกรองแบบแห้งภายใต้แรงดูดสุญญากาศ

รูปที่ 3.22 แสดงเครื่องชั่งน้ำหนัก

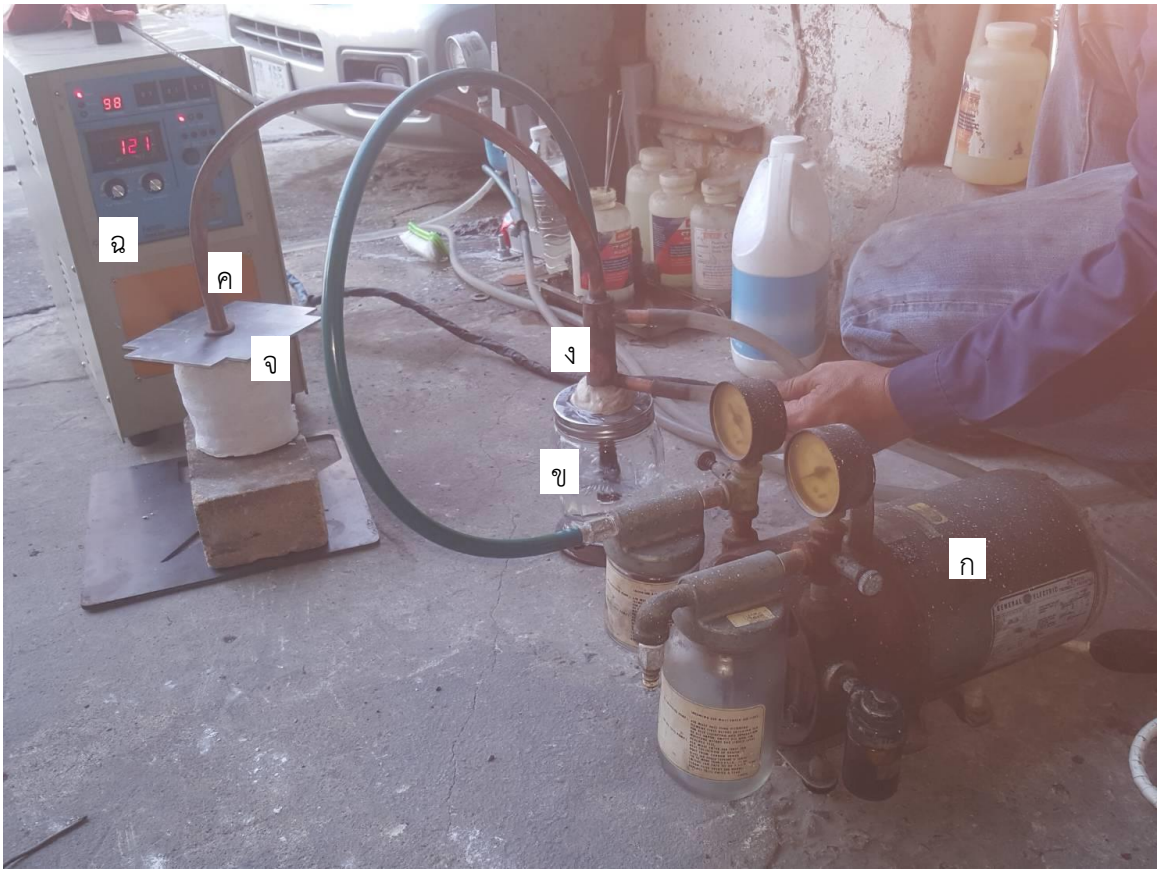
รูปที่ 3.23 แสดงตะแกรงคัดขนาด

รูปที่ 3.24 แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิด้วยแสงเลเซอร์

รูปที่ 3.25 แสดงอุปกรณ์สำหรับกรองที่ใช้ในการทำความสะอาดไอระเหิดสังกะสีที่เก็บได้




รูปที่ 3.26 แสดงลักษณะของท่อนำส่งและการจัดเรียงอุปกรณ์ภายในขวดเก็บไอระเหิดสังกะสี
ก) ขวดแก้วเก็บไอระเหิด ข) ฝาขวดแบบปิดผนึก ค) ท่อส่งไอระเหิด ง) ท่อหุ้มหล่อเย็น
จ) ท่อส่งน้ำหล่อเย็น ฉ) ท่อดูดสุญญากาศ




รูปที่ 3.27 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ทดลองเผาฝุ่นเหล็กในระบบปิดที่จัดเก็บไอระเหิด
โดยการควบแน่นด้วยน้ำภายใต้แรงดูดสุญญากาศ
ก) เครื่องดูดอากาศ ข) ขวดเก็บไอระเหิดสังกะสี ค) ท่อนำส่งไอระเหิด ง) ส่วนลดอุณหภูมิไอระเหิด
จ) เบ้าเผาฝุ่นเหล็กที่ปิดกั้นอากาศให้ไหลเข้าได้ตามแรงดูดสุญญากาศ ฉ) เตาเหนี่ยวนำ

# บทที่ 4
# การดำเนินการศึกษา

ในการศึกษานี้จะนำฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากการเผาฝุ่นเหล็กด้วยเตา Blast Furnace ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ซึ่งมีคุณภาพไม่เหมาะสมตามที่ตลาดต้องการ ซึ่งจนถึงปัจจุบันมีการศึกษาบางกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเก็บฝุ่นสังกะสีออกไซด์ด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ รวมทั้งการสกัดสังกะสีจากสังกะสีออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์มากในอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น การศึกษาโดยวิธีให้ความร้อนของ Omran, Fabritius, Heikkinen, and Chen (2017) และกรรมวิธีการประกอบโลหกรรมของบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ในขั้นตอนการผลิตโลหะสังกะสีจากสังกะสีออกไซด์โดยวิธีโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) สำหรับการศึกษานี้จะทำการศึกษาโดยวิธีให้ความร้อนและเก็บสังกะสีออกไซด์ด้วยเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่ออนุกรมกับอุปกรณ์เก็บฝุ่นสังกะสีออกไซด์จากไอระเหิดด้วยน้ำ เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงคุณภาพตามขั้นตอนต่าง ๆ โดยแบ่งเป็น 3 หัวข้อหลัก ดังนี้

4.1 ทดสอบการย่างฝุ่นเหล็กเพื่อตรวจสอบมลทินและการหลอมตัวเกาะติดก่อนการทำรีดักชัน

4.2 เปรียบเทียบการเผาฝุ่นเหล็กในสภาวะรีดักชันด้วยเตาเหนี่ยวนำเพื่อตรวจสอบฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่ได้กับฝุ่นสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ที่ได้จากการเผาด้วยเตา Blast Furnace

4.3 ปรับปรุงคุณภาพของสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด โดยวิธีการเผารีดักชันฝุ่นสังกะสีออกไซด์ดังกล่าวที่สภาวะต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

## 4.1 การทดสอบการย่างฝุ่นเหล็กเพื่อตรวจสอบมลทินและการหลอมตัวเกาะติดก่อนการทำรีดักชัน

### 4.1.1 การทดสอบการสลายกำมะถันโดยการย่าง

วัตถุประสงค์การทดลองเพื่อทดสอบการสลายธาตุกำมะถันที่มีอยู่ในฝุ่นเหล็กก่อนทำการเผาไอระเหิดสังกะสีออกไซด์ที่ระยะเวลาในการสลายต่าง ๆ กัน โดยทำการศึกษาตามแนวคิดของ Hyk, Kitka and Rudnicki (2019)

#### 4.1.1.1 วิธีการทดลอง

1. ชั่งฝุ่นเหล็ก 100 กรัม ใส่เบ้า
2. เปิดเตา Carbolite เร่งอุณหภูมิไปที่ 450 $^{o}$C คงอุณหภูมิไว้ 15 นาที
3. ปิดเตา นำตัวอย่างออกจากเตา ทิ้งให้เย็นแล้วเทฝุ่นเหล็กออกชั่งน้ำหนัก
4. บันทึกน้ำหนักหลังการย่าง
5. ทดสอบลักษณะเดิมใช้เวลานาน 30 45 นาทีและ 60 นาที

6. ตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุและชนิดของสารประกอบในตัวอย่างภายหลังการย่าง 60 นาที ด้วยเครื่องมือ XRF และ XRD ยี่ห้อ OLYMPUS โดยรายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF แสดงในภาคผนวก ก
7. ทำตามข้อ 1 – 4 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 900 °C นาน 60 นาที
8. รายงานผลตามตารางที่ 4.1 – 4.2 และรูปที่ 4.1 – 4.3
9. เปรียบเทียบผล XRF และ XRD ของฝุ่นเหล็กที่ย่างที่ 450 °C และ 900 °C นาน 60 นาที

**4.1.1.2 ผลการทดลอง**

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของฝุ่นเหล็กก่อนย่าง และหลังย่างที่อุณหภูมิ 450 °C ที่เวลาต่าง ๆ ซึ่งพบว่าฝุ่นเหล็กยังคงลักษณะเดิมโดยมีการเปลี่ยนแปลงหลอมรวมเป็นมวลขนาดเล็กอยู่บ้าง แต่ยังมีการกระจายตัวของฝุ่นเหล็กในลักษณะเดิม ทั้งนี้ลักษณะสีฝุ่นเหล็กไม่เปลี่ยนแปลง และน้ำหนักของฝุ่นเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย อาจเป็นเพราะความชื้นที่มีอยู่ในฝุ่นตามตารางที่ 4.1

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของฝุ่นเหล็กก่อนย่าง และหลังย่างที่อุณหภูมิ 450 °C ที่เวลาต่าง ๆ

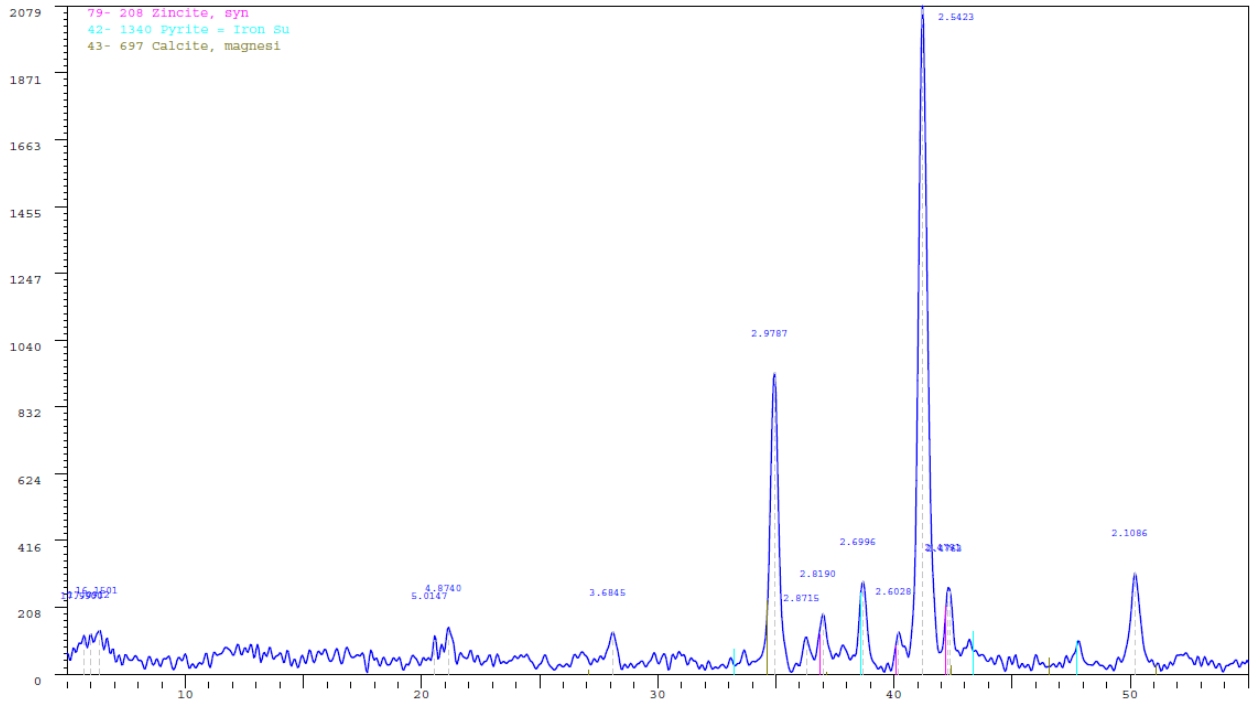
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักฝุ่นเหล็กภายหลังการย่างแร่ที่ 450 °C ที่เวลาต่าง ๆ

| ตัวอย่าง | น้ำหนักฝุ่นเหล็กภายหลังการย่างแร่ที่ 450 °C ที่เวลาต่าง ๆ (กรัม) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 15 นาที | | 30 นาที | | 45 นาที | | 60 นาที | |
| | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง |
| ฝุ่นเหล็ก | 100.0 | 95.0 | 100.0 | 89.2 | 100.0 | 91.6 | 100.0 | 92.3 |

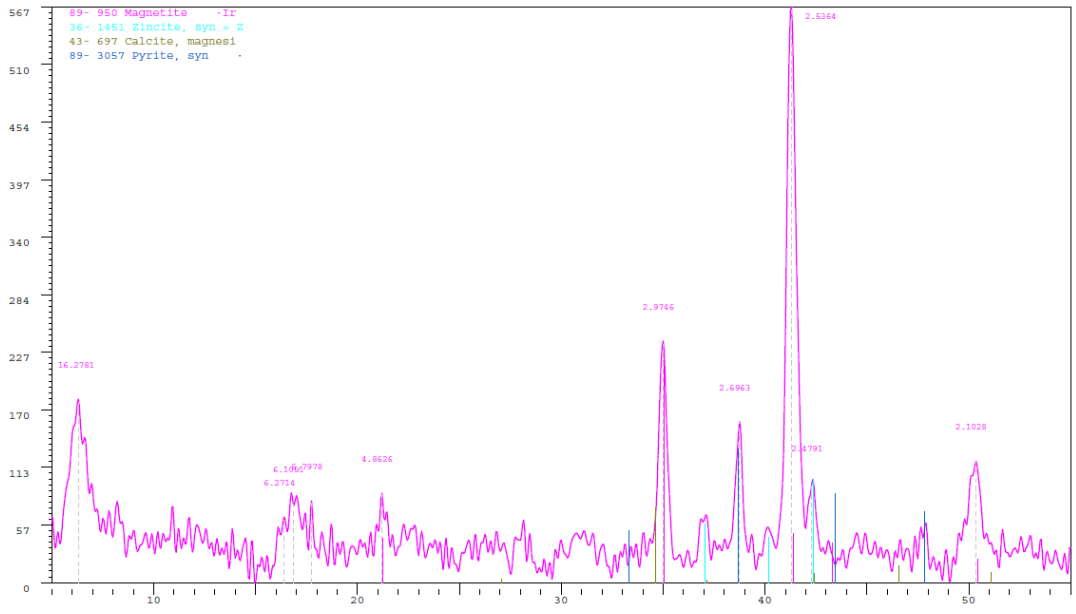
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการเผาออกซิเดชันฝุ่นเหล็กด้วยเตา Carbolite ที่อุณหภูมิต่าง ๆ นาน 1 ชั่วโมง

| อุณหภูมิ °C | Zn (%) | Fe (%) | Pb (ppm) | S (ppm) | Si (%) | Mn (%) | Mg (%,ppm) | Ca (%) | Light Element (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 450 | 20.03 | 32.93 | 4,486 | 8,463 | 2.39 | 3.55 | 9,464 | 4.59 | 30.76 |
| 900 | 21.77 | 38.15 | 548 | 8,621 | 3.09 | 4.09 | 1.28 | 6.23 | 21.16 |

Hyk, Kitka and Rudnicki (2019) พบว่าในกระบวนการเผาสังกะสีเฟอไรต์จำเป็นต้องทำการย่างวัตถุดิบที่อุณหภูมิ 450 °C เพื่อกำจัดกำมะถันที่มีอยู่ในองค์ประกอบ ทั้งนี้ จากการทดลองย่างฝุ่นเหล็กด้วยเตา Carbolite ที่อุณหภูมิ 450 °C และ 900 °C นาน 1 ชั่วโมงในสภาวะออกซิเดชันตามตารางที่ 4.2 พบว่าธาตุกำมะถันลดลงจาก 2.54% เหลือประมาณ 0.8% และไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะใช้อุณหภูมิที่ 450 °C หรือ 900 °C ซึ่งยืนยันผลการศึกษาของ Hyk, Kitka and Rudnicki (2019) อย่างไรก็ดี ผลการศึกษาองค์ประกอบด้วย XRD ตามรูปที่ 4.2 – 4.3 พบว่ามีองค์ประกอบหลักของตัวอย่างฝุ่นเหล็กที่ย่างที่ 900 °C ยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกับองค์ประกอบหลักของตัวอย่างฝุ่นเหล็กที่ย่างที่ 450 °C แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบบางชนิดเพิ่มขึ้น สันนิษฐานว่าธาตุเหล็กที่มีอยู่ในฝุ่นเหล็กเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกไปบางส่วน




รูปที่ 4.2 แสดงผล XRD ของการย่างฝุ่นเหล็กที่ 450 °C ที่เวลา 60 นาที




รูปที่ 4.3 แสดงผล XRD ของการย่างฝุ่นเหล็กที่ 900 °C ที่เวลา 60 นาที

### 4.1.2 การทดสอบการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) จากการเผา

วัตถุประสงค์ในการทดลองเพื่อตรวจสอบว่ามีการหลอมเหลวของมลทินทำให้เกิดการเกาะติดกันของมวลในระหว่างเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน ในสภาวะปกติไม่เกิดการรีดักชัน

#### 4.1.2.1 เผาที่อุณหภูมิคงที่ 900 °C ณ เวลาต่าง ๆ

**วิธีการทดลอง**

1. ชั่งฝุ่นเหล็กที่ผ่านการย่าง 100 กรัม ใส่เบ้า
2. เปิดเตาเหนี่ยวนำของบริษัท โกลบอล คอนซัลติ้ง แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด (รูปที่ 4.4) เร่งอุณหภูมิไปที่ 900 °C คงอุณหภูมิไว้ 20 นาที
3. ปิดเครื่อง เทฝุ่นเหล็กออก น้ำหนักที่หายไปเป็นน้ำหนักของ Scale ที่เกาะก้นเบ้า
4. ตรวจสอบการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ที่อาจปะปนมากับฝุ่นเหล็กด้วยตะแกรงมาตรฐาน 100 เมช
5. ดำเนินการตามข้อ 1 – 4 โดยคงอุณหภูมิ 40 นาทีและ 60 นาที
6. รายงานผลตามตารางที่ 4.3 – 4.4

**ผลการทดลอง**

ตารางที่ 4.3 พบว่าน้ำหนักของฝุ่นเหล็กที่เผาออกซิเดชันที่ 900 °C โดยคงอุณหภูมิไว้ที่เวลาต่าง ๆ กัน ไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ น้ำหนักที่ลดลงเล็กน้อยอาจเป็นเพราะความชื้นที่มีอยู่ในตัวอย่าง เมื่อทดสอบการตรวจสอบการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ตามตารางที่ 4.4 ไม่พบการหลอมตัวเกาะติดกันเพิ่มขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 900 °C นาน 40 นาที ขึ้นไป ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมลทินที่มีอยู่ในฝุ่นเหล็กบางชนิดที่หลอมตัวที่อุณหภูมิ 900 °C ถูกใช้หมดไปในกระบวนการหลอมตัวเกาะติดกัน

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักฝุ่นเหล็กภายหลังการเผาออกซิเดชันที่ 900 °C ที่เวลาต่าง ๆ

| ระยะเวลาเผา (นาที) | น้ำหนักฝุ่นเหล็กภายหลังการเผาออกซิเดชันที่ 900 °C ที่เวลาต่าง ๆ (กรัม) | |
|---|---|---|
| | ก่อน | หลัง |
| 20 | 100.0 | 98.1 |
| 40 | 100.0 | 98.4 |
| 60 | 100.0 | 99.0 |

ตารางที่ 4.4 การตรวจสอบการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ค้างตะแกรง 100 เมช ในฝุ่นเหล็กที่เทออกจากเบ้า

| ระยะเวลาเผา (นาที) | น้ำหนักฝุ่นเหล็ก (กรัม) | |
|---|---|---|
| | ค้างตะแกรง | ลอดตะแกรง |
| 20 | 3.0 | 95.1 |
| 40 | 9.4 | 89.0 |
| 60 | 9.9 | 89.1 |

รูปที่ 4.4 แสดงสถานที่ทดลอง ณ บริษัท โกลบอล คอนซัลติ้ง แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด

**4.1.2.2 ระยะเวลาในการเผา 40 นาที ที่อุณหภูมิต่าง ๆ**

**วิธีการทดลอง**

1. ชั่งฝุ่นเหล็กที่ผ่านการย่าง 100 กรัม ใส่เบ้าขนาด 1 กิโลกรัม
2. เปิดเตาเหนี่ยวนำของบริษัท โกลบอล คอนซัลติ้ง แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด เร่งอุณหภูมิไปที่ 800 °C คงอุณหภูมิไว้ 40 นาที
3. ปิดเครื่อง เทฝุ่นเหล็กออก น้ำหนักที่หายไปเป็นน้ำหนักของ Scale ที่เกาะก้นเบ้า
4. ตรวจสอบการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ที่อาจปะปนมากับฝุ่นเหล็กด้วยตะแกรงมาตรฐาน 100 เมช
5. ดำเนินการตามข้อ 1 – 4 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 1,000 °C
6. รายงานผลตามตารางที่ 4.5 – 4.6 และรูปที่ 4.5

**ผลการทดลอง**

ตารางที่ 4.5 พบว่าน้ำหนักของฝุ่นเหล็กที่เผาออกซิเดชันนาน 40 นาที ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ น้ำหนักที่ลดลงเล็กน้อยอาจเป็นเพราะมีบางธาตุที่สามารถสลายตัวที่อุณหภูมิดังกล่าว เมื่อทดสอบการตรวจสอบการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ตามตารางที่ 4.6 พบว่ามีการหลอมตัวเกาะติดกันมากขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C นาน 40 นาที ทั้งนี้คาดว่ามลทินที่มีอยู่บางชนิดมีการเปลี่ยนแปลงสภาพและหลอมตัวดังรูปที่ 4.5 แนวโน้มการเกิดการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ก่อนการทำรีดักชันแปรผันตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น สอดคล้องกับ Omran, Fabritius, Heikkinen, and Chen (2017)

ตารางที่ 4.5 น้ำหนักฝุ่นเหล็กภายหลังการเผาออกซิเดชันนาน 40 นาที ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

| อุณหภูมิเผา (°C) | น้ำหนักฝุ่นเหล็กภายหลังการเผาออกซิเดชันนาน 40 นาที ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (กรัม) | |
|---|---|---|
| | ก่อน | หลัง |
| 800 | 100.0 | 98.7 |
| 900 | 100.0 | 98.4 |
| 1,000 | 100.0 | 96.5 |

ตารางที่ 4.6 การตรวจสอบการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ค้างตะแกรง 100 เมช ในฝุ่นเหล็กที่เทออกจากเบ้า

| อุณหภูมิเผา (°C) | น้ำหนักฝุ่นเหล็ก (กรัม) | |
|---|---|---|
| | ค้างตะแกรง | ลอดตะแกรง |
| 800 | 0.4 | 98.3 |
| 900 | 9.4 | 89.0 |
| 1,000 | 26.0 | 70.5 |

รูปที่ 4.5 แสดงการเกิดการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ของฝุ่นเหล็กภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 $^{o}$C นาน 40 นาที

## 4.2 การเปรียบเทียบการเผาฝุ่นเหล็กในสภาวะรีดักชันด้วยเตาเหนี่ยวนำเพื่อตรวจสอบฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่ได้ กับฝุ่นสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ที่ได้จากการเผาด้วยเตา Blast Furnace

### 4.2.1 การตรวจสอบขนาดถ่านแอนทราไซต์ที่ใช้เพื่อคัดเลือกขนาดที่เหมาะสม

วัตถุประสงค์ในการทดลองเพื่อหาขนาดของถ่านที่เหมาะสมและลดภาระการเตรียมขนาดของถ่านก่อนนำไปใช้

#### 4.2.1.1 วิธีการวิเคราะห์ขนาดของถ่าน

1. ชั่งน้ำหนักถ่าน 1 กิโลกรัม โดยถ่านมีลักษณะตามรูปที่ 4.6
2. เลือกตะแกรงมาตรฐานขนาด 3, 6, 10, 30 และ 48 เมช (รูปที่ 4.7)
3. ค่อย ๆ ใส่ถ่านลงในตะแกรงมาตรฐานขนาด 3 เมช ทำการคัดขนาด
4. ชั่งน้ำหนักถ่านที่ค้างตะแกรง บันทึกผล
5. ถ่านที่ลอดผ่านตะแกรง นำมาคัดขนาดตามขนาดของตะแกรงลำดับถัดไป บันทึกน้ำหนักถ่านที่ค้างตะแกรงทั้งหมด (รูปที่ 4.8)
6. ศึกษาการกระจายตัวของขนาดของถ่านตามตารางที่ 4.7
7. เลือกขนาดของถ่านที่มีขนาดและปริมาณการกระจายตัวที่เหมาะสม

#### 4.2.1.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดของถ่าน

ตารางที่ 4.7 แสดงการกระจายตัวของขนาดของถ่าน พบว่าขนาดของถ่านและปริมาณที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่างขนาด -3 +6 เมช ซึ่งจะทำให้ภาระในการเตรียมขนาดของถ่านน้อยที่สุด

รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของถ่านแอนทราไซต์ที่ใช้

รูปที่ 4.7 แสดงการศึกษาการกระจายตัวของเม็ดถ่านแอนทราไซต์ด้วยตะแกรงมาตรฐาน

รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการกระจายตัวของเม็ดถ่านแอนทราไซต์

ตารางที่ 4.7 แสดงการกระจายตัวของขนาดของถ่านแอนทราไซต์ที่ใช้

| ขนาด | น้ำหนัก | | Cumulative % | |
|---|---|---|---|---|
| | กรัม | % | Retain | Passing |
| +3 | 501.0 | 51.3 | 51.3 | 100.0 |
| -3 +6 | 279.0 | 28.6 | 79.9 | 48.7 |
| -6 +10 | 134.0 | 13.7 | 93.6 | 20.1 |
| -10 +30 | 43.0 | 4.4 | 98.0 | 6.4 |
| -30 +48 | 6.6 | 0.7 | 98.7 | 2.0 |
| -48 | 13.0 | 1.3 | 100.0 | 1.3 |
| **รวม** | **976.6** | **100.0** | **-** | **-** |

### 4.2.2 การเผาฝุ่นเหล็กในสภาวะรีดักชันด้วยเตาเหนี่ยวนำเพื่อเปรียบเทียบผลของการเผาฝุ่นเหล็กของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

วัตถุประสงค์ในการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการเผาฝุ่นเหล็กด้วยเตาเหนี่ยวนำเปรียบเทียบกับการเผาด้วยเตา Blast Furnace ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

#### 4.2.2.1 วิธีการทดลอง

1. ชั่งฝุ่นเหล็ก 50 กรัม ผสมกับถ่าน 10 กรัม คลุกเคล้าให้ทั่ว
2. เทส่วนผสมลงในเบ้าหลอมกราไฟต์ขนาด 1 กิโลกรัม (รูปที่ 4.9)
3. นำเบ้าใส่เตาเหนี่ยวนำ จัดเตรียมอุปกรณ์เก็บฝุ่นด้วยน้ำ (รูปที่ 4.10)
4. เร่งอุณหภูมิไปที่ 900 $^{o}$C นาน 1 ชั่วโมง
5. กรองเก็บฝุ่นไอระเหิดที่ได้ อบแห้ง วิเคราะห์ผล XRF/XRD
6. วิเคราะห์ XRF/XRD ของตะกรันที่เหลืออยู่ในเบ้า โดยรายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF แสดงในภาคผนวก ก
7. ดำเนินการตามข้อ 1 – 5 โดยเปลี่ยนปริมาณถ่านเป็น 20 กรัม

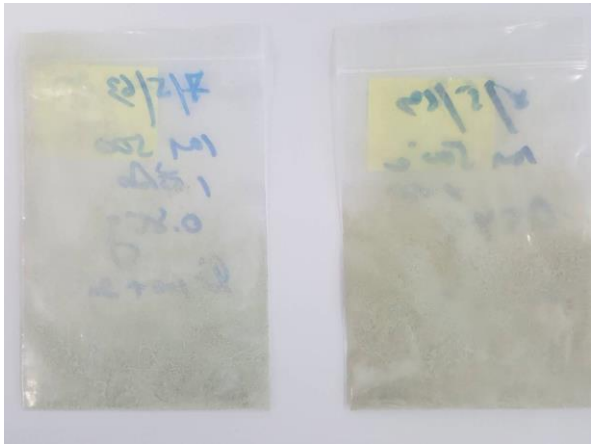
รูปที่ 4.9 เบ้ากราไฟต์

รูปที่ 4.10 แสดงเตาเหนี่ยวนำและอุปกรณ์ต่อพ่วงสำหรับจัดเก็บไอระเหิดด้วยน้ำ

**4.2.2.2 ผลการทดลอง**

ตารางที่ 4.8 แสดงผลวิเคราะห์ XRF ของสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากการเผาฝุ่นเหล็กด้วยอัตราส่วนของถ่านแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับไอของฝุ่นเหล็กที่ได้จากการเผาด้วยเตา Blast Furnace ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

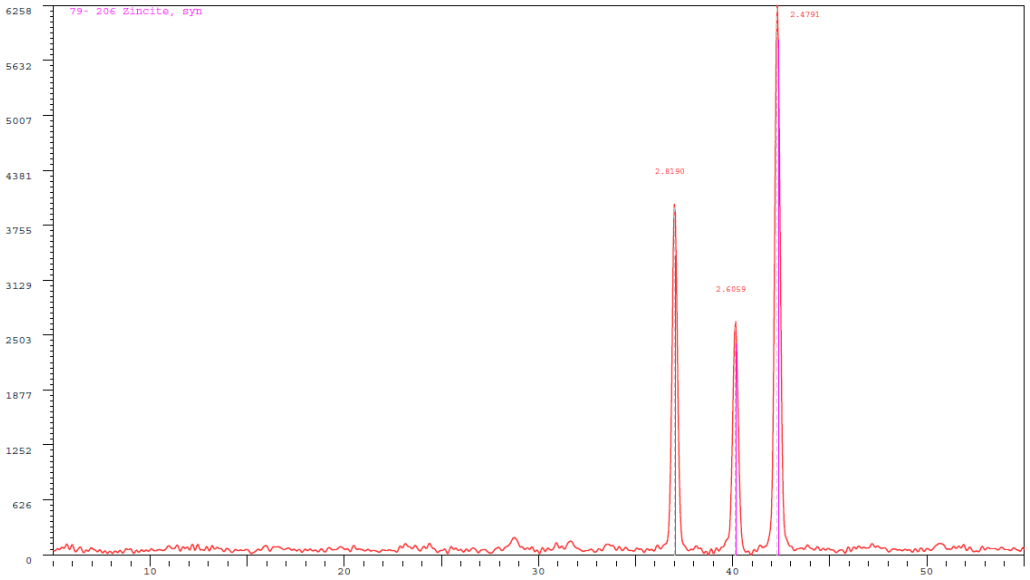
| สัดส่วน | | Zn | Fe | Pb | S | Si | Mn | Mg | Ca | Light Element |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ฝุ่นเหล็ก | ถ่าน | % | ppm | % | % | %, ppm | ppm | ppm | %, ppm | % |
| 5 | 2 | 73.35 | 342 | 5.98 | 3.39 | 1.16 | 4,431 | 3,592 | 1,502 | 11.73 |
| 5 | 1 | 79.32 | - | 2.22 | 1.10 | 1.18 | 3,971 | 2,458 | 1,889 | 11.30 |
| ไอของฝุ่นเหล็กของ บจก.พี.เอส.พี.ฯ | | 71.41 | 9,132 | 3.40 | 2.54 | 9,290 | 4,393 | - | 1.11 | 14.54 |



รูปที่ 4.11 สังกะสีออกไซด์จากการเผาที่อัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่านแตกต่างกัน
(ซ้าย) 5:2 (ขวา) 5:1

จากรูปที่ 4.11 จะพบว่าสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากการเผาฝุ่นเหล็กที่อัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่าน เท่ากับ 5:2 มีความสว่างมากกว่าสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากการเผาฝุ่นเหล็กที่อัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่าน เท่ากับ 5:1 ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ XRF ตามตารางที่ 4.8 ที่ว่าเปอร์เซนต์ของธาตุสังกะสีที่ได้จากการฝุ่นเหล็กในอัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่าน เท่ากับ 5:1 ในเวลาและอุณหภูมิเท่ากัน มีความบริสุทธิ์สูงกว่าเนื่องจากการเผาฝุ่นเหล็กที่อัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่าน เท่ากับ 5:2 ยังคงเกิดปฏิกิริยารีดักชันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจทำให้มลทินที่มีอยู่ในฝุ่นเหล็กมีโอกาสสลายตัวปะปนเข้าไปในสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้ ทั้งนี้ สารประกอบที่เก็บได้เมื่อนำมาวิเคราะห์ XRD จะพบว่าเป็นสารประกอบในรูปของ Synthetic Zincite หรือ Zinc Oxide สังเคราะห์ ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.12 ในขณะที่ XRD ไม่สามารถแสดงผลของมลทินปริมาณต่ำที่ปนเปื้อนในสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้

เมื่อเปรียบเทียบไอระเหิดที่ได้จากการเผาฝุ่นเหล็กด้วยเตา Blast Furnace ของของบริษัท พี.เอส.พี. อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด กับไอระเหิดที่ได้จากการเผาด้วยเตาเหนี่ยวนำของการทดลองนี้ ที่อัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่านเท่ากับ 5:1 เท่ากัน พบว่า ถึงแม้ค่าโลหะสังกะสีที่ตรวจพบจากการเผาด้วยเตาเหนี่ยวนำมีค่าสูงกว่า แต่ค่ามลทินอื่นได้แก่ ตะกั่ว และซิลิกา มีค่าสูงตามด้วย สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ข้างต้น ในขณะที่ตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเผาฝุ่นเหล็กโดยใช้ถ่านในเตาเหนี่ยวนำจะให้ตะกรันที่มีลักษณะเป็นการหลอมตัวเกาะติดกัน (Sintering) ของเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และพบสังกะสีในรูปของ Zincite ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ทั้งนี้ธาตุสังกะสีที่คงเหลืออยู่ในตะกรันก้นเบ้ามีปริมาณใกล้เคียงกับตะกรันของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด เมื่อพิจารณาจากปริมาณธาตุเหล็กที่เหลืออยู่ของทั้งสองตัวอย่างพบว่า สัดส่วนของธาตุสังกะสีและธาตุเหล็กของทั้งสองตัวอย่างสอดคล้องกัน ทั้งนี้ ความแตกต่างที่เกิดขึ้นอาจเป็นเพราะชนิดของถ่านที่ใช้ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ถ่านแอนทราไซต์บริสุทธิ์ในขณะที่บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ใช้ถ่านผสมเพื่อให้สะดวกต่อการนำตะกรันหลอมเหลวออกจากเตาของบริษัทฯ ซึ่งอาจมีการปนเปื้อนของธาตุอื่น ๆ เข้าไปในตะกรัน ซึ่งผลวิเคราะห์ XRD ของบริษัทฯ ตามรูปที่ 2.40 บ่งชี้ข้อสันนิษฐานข้างต้น

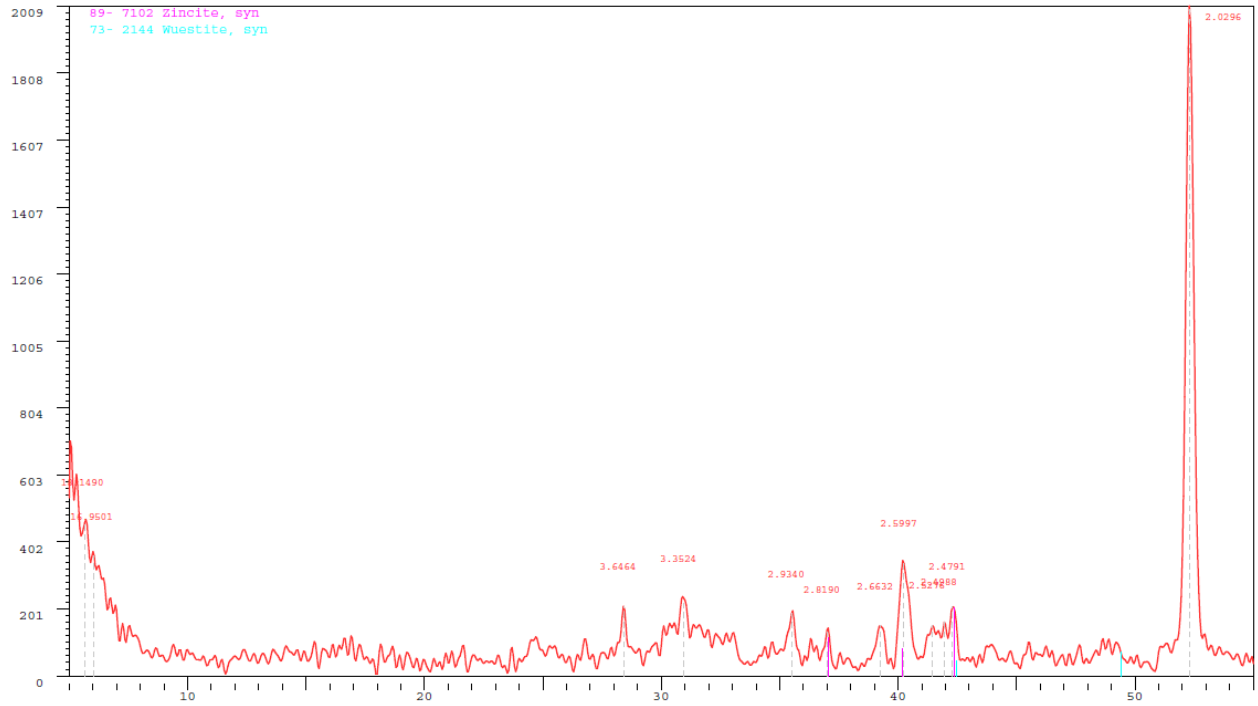



รูปที่ 4.12 แสดงผล XRD ของสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้จากการเผาฝุ่นเหล็กที่อัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่าน เท่ากับ 5:1 ที่อุณหภูมิ 900 °C นาน 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.9 แสดงผล XRF ของตะกรันที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C นาน 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่าน เท่ากับ 5:1 เปรียบเทียบกับตะกรันของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

| **ตัวอย่าง** | Zn (%) | Fe (%) | Pb (ppm) | S (%,ppm) | Si (%) | Mn (%) | Mg (%) | Ca (%) | Light Element (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| จากการทดลอง | 1.04 | 16.22 | 1,031 | 2.06 | 7.23 | 2.39 | 1.04 | 2.73 | 63.31 |
| บจก. พี.เอส.พี.ฯ | 1.54 | 29.15 | 54 | 4,569 | 10.18 | 1.95 | 3.89 | 6.68 | 42.37 |

รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของตะกรันก้นเบ้าจากการทดลอง




รูปที่ 4.14 แสดงผล XRD ของตะกรันที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C นาน 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่าน เท่ากับ 5:1

## 4.3 การปรับปรุงคุณภาพของสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

เนื่องจากสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากการเผาฝุ่นเหล็กของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ยังมีคุณภาพต่ำ การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการนำฝุ่นสังกะสีออกไซด์ดังกล่าวมาปรับปรุงคุณภาพโดยเริ่มตั้งแต่ การเผาในเบ้าหลอมด้วยเตาเหนี่ยวนำ แล้วเก็บฝุ่นไอระเหิดด้วยน้ำ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่ได้ก่อนดำเนินการปรับปรุงคุณภาพตามวิธีการในลำดับต่อไป

### 4.3.1 การศึกษาคุณสมบัติของฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้จากการเผาฝุ่นสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี. อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ด้วยเตาเหนี่ยวนำ

#### 4.3.1.1 วิธีการทดลอง

1. ชั่งสังกะสีออกไซด์ 50 กรัม ผสมกับถ่าน 10 กรัม คลุกเคล้าให้ทั่ว
2. เทส่วนผสมลงในเบ้าหลอมกราไฟต์ขนาด 1 กิโลกรัม
3. นำเบ้าใส่เตาเหนี่ยวนำ จัดเตรียมอุปกรณ์เก็บฝุ่นด้วยน้ำ
4. เร่งอุณหภูมิไปที่ 900 °C นาน 1 ชั่วโมง
5. กรองเก็บฝุ่นไอระเหิดที่ได้ อบแห้ง วิเคราะห์ผล XRF/XRD โดยรายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF แสดงในภาคผนวก ก

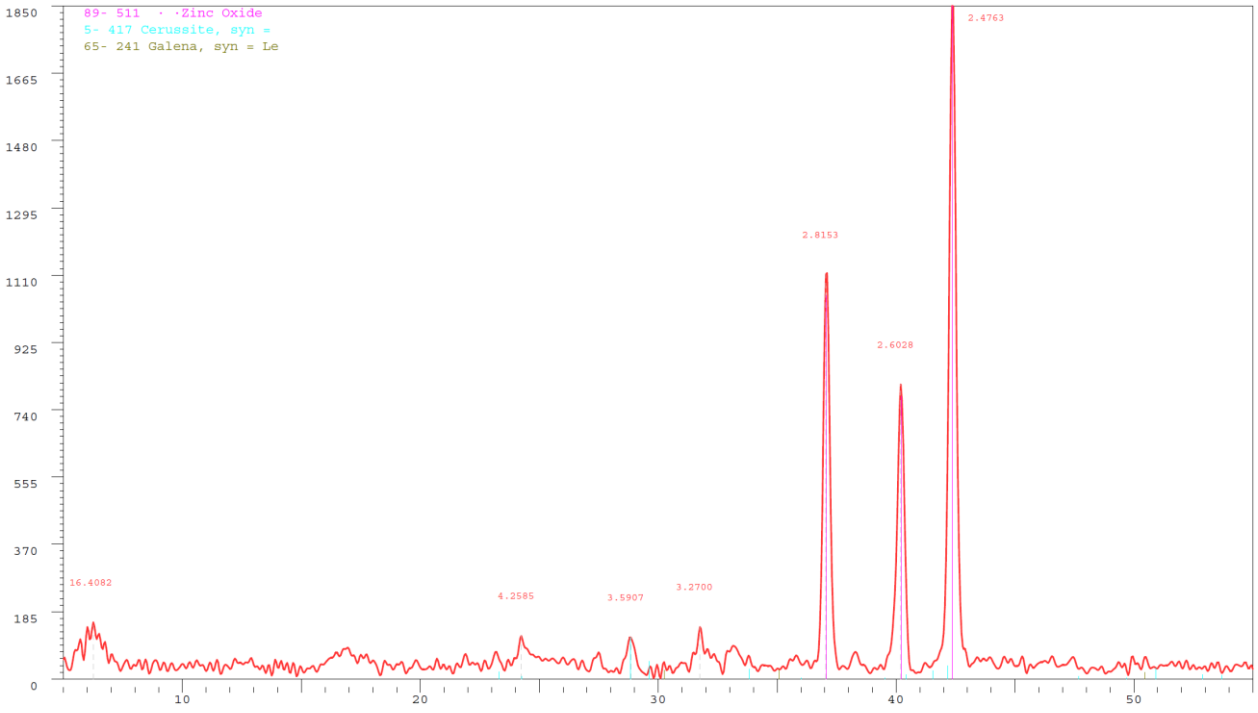
**4.3.1.2 ผลการทดลอง**

จากตารางที่ 4.10 จะพบว่าฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากการทดลอง มีองค์ประกอบของสังกะสีต่ำเท่ากับ 69.47% ในขณะที่มีตะกั่วสูงเท่ากับ 7.33% ซึ่งผล XRD ตามรูปที่ 4.15 ยังแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของฝุ่นดังกล่าวประกอบด้วย สังกะสีออกไซด์ Cerussite และ Galena ซึ่ง Cerussite และ Galena มีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุตะกั่ว ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณตะกั่วที่ตรวจสอบได้

เมื่อเปรียบเทียบผลการเผาฝุ่นสังกะสีออกไซด์ตามที่ได้ทำการศึกษานี้กับสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ชี้ให้เห็นว่า สามารถแยกตะกั่วและกำมะถันออกจากฝุ่นสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ได้ ซึ่งส่งผลให้สังกะสีออกไซด์ของบริษัทฯ ที่เหลืออยู่มีคุณภาพสูงขึ้น

ตารางที่ 4.10 แสดงผลวิเคราะห์ XRF ของฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้จากการเผาสังกะสีออกไซด์ของบริษัทฯ

| ตัวอย่าง | Zn (%) | Fe (ppm) | Pb (%) | S (%) | Si (ppm) | Mn (ppm) | Mg (ppm) | Ca (%,ppm) | Light Element (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| จากการทดลอง | 69.47 | - | 7.33 | 3.53 | 7,859 | 4,210 | 4,448 | 5,840 | 13.66 |
| ZnO ของบริษัทฯ | 71.41 | 9,132 | 3.40 | 2.54 | 9,290 | 4,393 | - | 1.11 | 14.54 |




รูปที่ 4.15 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้จากการเผาสังกะสีออกไซด์ของบริษัทฯ

### 4.3.2 การศึกษาเพื่อลดปริมาณสารฮาโลเจนที่เจือปนอยู่

วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อศึกษาแนวทางเบื้องต้นในการลดปริมาณสารฮาโลเจนที่เจือปนอยู่ในสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากการฝุ่นเหล็กของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

#### 4.3.2.1 วิธีการทดลอง

1. ชั่งฝุ่นสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด 100 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร
2. วางบีกเกอร์ที่มีส่วนผสมข้างต้นบนเตาความร้อนไฟฟ้า (รูปที่ 4.16)
3. ต้มส่วนผสมนาน 30 นาที กรองเก็บตัวอย่างฝุ่นที่ผ่านการต้มแล้ว อบแห้ง วิเคราะห์ผล XRF
4. เติมกรดซัลฟูริกให้สารละลายมีความเข้มข้นของกรด 0.5 N ต้มส่วนผสมนาน 30 นาที ล้างและกรองเก็บตัวอย่างฝุ่นที่ผ่านการต้มแล้ว อบแห้ง วิเคราะห์ผล XRF โดยรายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF แสดงในภาคผนวก ก

รูปที่ 4.16 เตาความร้อนไฟฟ้า

#### 4.3.2.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบผลการล้างสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ด้วยน้ำร้อนและกรดซัลฟูริก 0.5 Normal

| วิธีการล้างสังกะสีออกไซด์ | Zn | Fe | Pb | S | Si | Mn | Mg | Ca | Cl | Light Element |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | ppm | % | % | ppm | ppm | ppm | %,ppm | %,ppm | % |
| ไม่ล้าง (ไอ) | 71.41 | 9,132 | 3.40 | 2.54 | 9,290 | 4,393 | - | 1.11 | 3.19 | 14.54 |
| น้ำร้อน | 71.79 | 6,295 | 2.93 | 1.72 | 9,450 | 4,015 | 3,338 | 2,123 | 1.45 | 17.87 |
| น้ำร้อน+ 0.5 N $H_2SO_4$ | 58.21 | 5,928 | 2.70 | 4.57 | 8,729 | 3,428 | 5,358 | 1,885 | 5,613 | 29.60 |

จากตารางที่ 4.11 พบว่าการล้างสังกะสีออกไซด์ด้วยน้ำร้อนจะทำให้เปอร์เซนต์ของธาตุสังกะสีไม่เปลี่ยนแปลง แต่ธาตุคลอรีนมีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 3.19% เหลือ 1.45% ในขณะที่เมื่อนำสังกะสีออกไซด์ที่ผ่านการล้างน้ำร้อนแล้วมากัดกรดซัลฟูริก 0.5 N ($H_2SO_4$) พบว่าธาตุสังกะสีลดลงและธาตุคลอรีนลดลงจนหมด แสดงให้เห็นว่าสังกะสีออกไซด์สามารถละลายในกรดซัลฟูริกได้ แต่กลับเพิ่มปริมาณของธาตุกำมะถันโดยไม่สามารถลดปริมาณของธาตุตะกั่วและเหล็กได้ ในขณะที่ค่า Light Element จากการกัดกรดซัลฟูริกมีค่าสูง อาจเป็นความคาดเคลื่อนจากการเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ XRF

ธาตุคลอรีนในสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากการเผาในเบ้าของการทดลองนี้มีปริมาณต่ำ อาจเป็นเพราะคุณภาพของถ่านที่ใช้ในการรีดักชันและฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้โดยวิธีที่ใช้ในการทดลองนี้ ทำให้ไอสังกะสีออกไซด์ถูกล้างด้วยน้ำในระหว่างการจัดเก็บ

### 4.3.3 การศึกษาเพื่อลดปริมาณสารประกอบมลทินที่เจือปนอยู่

วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อศึกษาแนวทางเบื้องต้นในการลดปริมาณสารประกอบมลทินที่เจือปนอยู่ในสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากการฝุ่นเหล็กของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

#### 4.3.3.1 วิธีการทดลอง

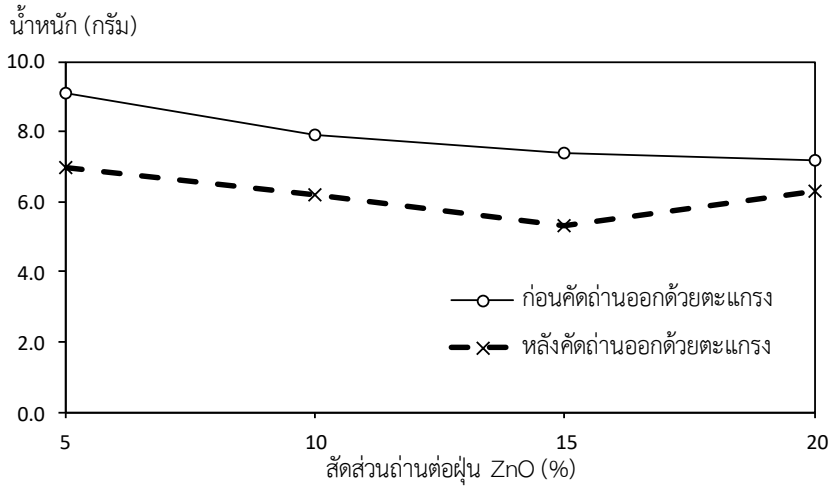
1. ชั่งถ่านขนาด -3 +6 เมช ปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในก้นเบ้าเซรามิก (รูปที่ 4.17)
2. ชั่งสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ใส่ในเบ้าเซรามิกปริมาณ 10.0 กรัม
3. ปิดคลุมปากเบ้าด้วยแผ่นเซรามิกโดยเผยอให้มีทางออกของไอระเหิดเล็กน้อย
4. ใส่เบ้าลงในเตา Carbolite ตั้งอุณหภูมิให้เผาที่ 1,150 $^{o}$C นาน 30 นาที (Soaking Time)
5. ภายหลังการเผา นำมวลสารที่ได้ภายในเบ้ามาทำการคัดขนาดด้วยตะแกรง 48 เมช ในน้ำ เพื่อคัดเอาเศษถ่านและเถ้าแข็งออก นำมวลที่ลอดตะแกรงมาอบแห้ง ชั่งน้ำหนัก และวิเคราะห์ XRF โดยรายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF แสดงในภาคผนวก ก
6. บันทึกผล
7. ดำเนินการตามข้อ 1 – 6 โดยเปลี่ยนปริมาณถ่านเป็น 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม ตามลำดับ
8. ดำเนินการตามข้อ 1 – 7 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 950 $^{o}$C และ 1,050 $^{o}$C ตามลำดับ
9. ดำเนินการตามข้อ 1 – 7 โดยเผาที่อุณหภูมิ 1,050 $^{o}$C นาน 10 นาที
10. คัดเลือกตัวอย่างที่มีผลวิเคราะห์โลหะสังกะสีสูงสุดและต่ำสุดวิเคราะห์ XRD

รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะเบ้าเซรามิกที่ใช้ในการทดลอง

**4.3.3.2 ผลการทดลอง**

ตารางที่ 4.12 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 30 นาที

| ตัวอย่าง | สัดส่วน (กรัม) | | น้ำหนัก (กรัม) | | สังกะสี | ซิลิกา |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ฝุ่นสังกะสีออกไซด์ | ถ่าน | ก่อนคัดถ่านออกด้วยตะแกรง | หลังคัดถ่านออกด้วยตะแกรง | % | % |
| A | 10.0 | 0.5 | 9.1 | 7.0 | 75.45 | 3.45 |
| B | 10.0 | 1.0 | 7.9 | 6.2 | 76.10 | 3.01 |
| C | 10.0 | 1.5 | 7.4 | 5.3 | 76.61 | 3.40 |
| D | 10.0 | 2.0 | 7.2 | 6.3 | 80.33 | 2.23 |

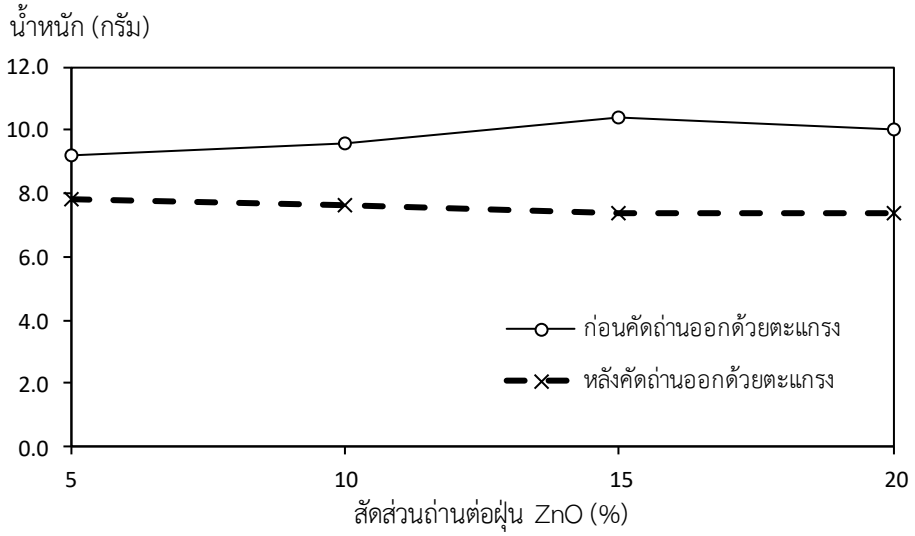



รูปที่ 4.18 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 30 นาที ที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ

จากการทดลองตามตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.18 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 30 นาที พบว่าถ่านเผาไหม้จนหมดเมื่อใช้ปริมาณถ่าน 5% ด้วยการตรวจสอบถ่านค้างตะแกรงเบอร์ 48 เมช ดังนั้น จะพบว่ามีถ่านเหลือเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านไปจนถึง 20% ในขณะที่ผลวิเคราะห์โลหะสังกะสีแสดงให้เห็นว่า เปอร์เซนต์สังกะสีแปรผกผันกับเปอร์เซนต์ซิลิกาที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ดี เปอร์เซนต์ซิลิกามีค่าสูงอาจมาจากเถ้าของถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งประกอบด้วยเถ้าสองชนิดคือเถ้าลอยและเถ้าจมที่ขึ้นอยู่กับขนาดของเถ้า โดยเถ้าจมและเถ้าลอยมีองค์ประกอบของธาตุซิลิกาเป็นหลัก ซึ่งเถ้าลอยที่เหลืออยู่ในฝุ่นที่อยู่ก้นเบ้าเมื่อถูกกระบวนการล้างคัดขนาดเพื่อคัดถ่านที่เหลือออกจากฝุ่นภายหลังการเผา เถ้าลอยจะลอยไปกับน้ำทิ้ง แม้ว่าจะพบว่าเปอร์เซนต์สังกะสีที่ใช้ปริมาณถ่าน 20% มีค่าสูงถึง 80% แต่เปอร์เซนต์ซิลิกากลับต่ำมาก อีกทั้งถ่านที่เหลือก็มีอยู่น้อยที่สุดด้วย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคุณสมบัติถ่านที่ใช้ ณ ขณะนั้น

ตารางที่ 4.13 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 30 นาที

| ตัวอย่าง | สัดส่วน (กรัม) | | น้ำหนัก (กรัม) | | สังกะสี | ซิลิกา |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ฝุ่นสังกะสีออกไซด์ | ถ่าน | ก่อนคัดถ่านออกด้วยตะแกรง | หลังคัดถ่านออกด้วยตะแกรง | % | % |
| I | 10.0 | 0.5 | 9.2 | 7.8 | 78.21 | 2.43 |
| J | 10.0 | 1.0 | 9.6 | 7.6 | 76.88 | 2.50 |
| K | 10.0 | 1.5 | 10.4 | 7.4 | 78.13 | 2.04 |
| L | 10.0 | 2.0 | 10.0 | 7.4 | 81.87 | 1.24 |

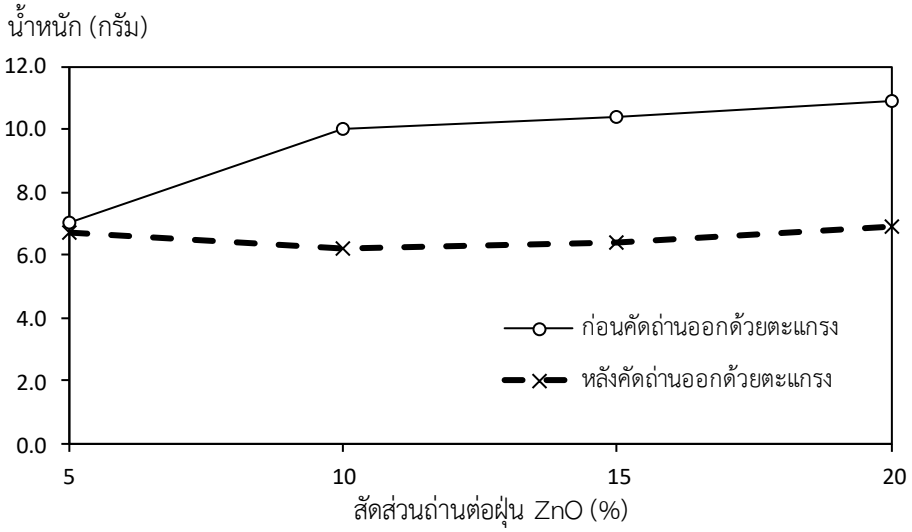



รูปที่ 4.19 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 30 นาที ที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ

ปรากฏการณ์ข้างต้นใกล้เคียงกับกรณีที่ทดลองเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 30 นาที ตามตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.19 เมื่อปริมาณถ่านที่ใช้ 20% สามารถให้ค่าเปอร์เซนต์สังกะสีสูงถึง 82% ได้ อาจเป็นเพราะโอกาสในการสลายตัวของมลทินต่าง ๆ รวมทั้งสังกะสีเองมีมากกว่าที่ใช้ปริมาณถ่านน้อย ในขณะที่ค่าเปอร์เซนต์ซิลิกากลับน้อยลง ซึ่งคาดว่าโอกาสเกิดเถ้าลอยและปริมาณถ่านที่เหลืออยู่มีมาก ทำให้ค่าเปอร์เซนต์ซิลิกาที่เกิดจากเถ้าจมลดลงด้วย

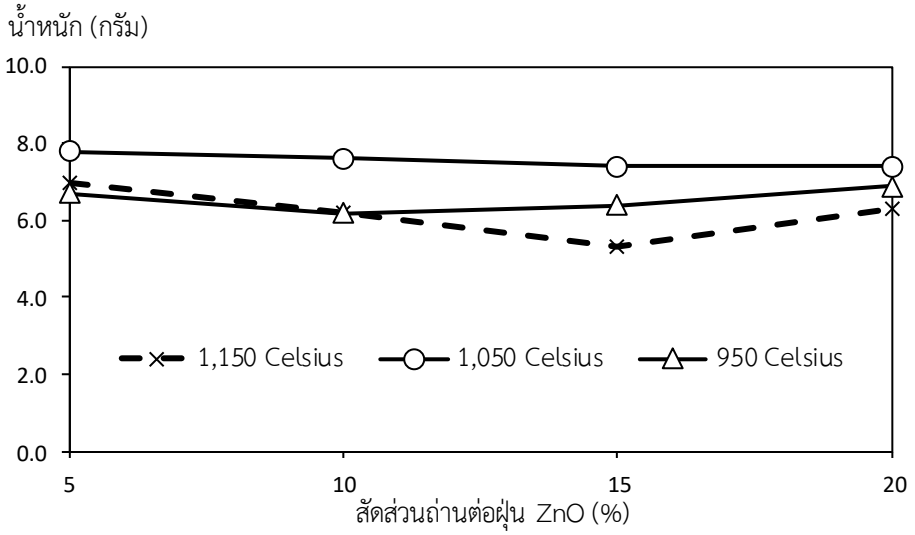
ตารางที่ 4.14 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 950 °C นาน 30 นาที

| ตัวอย่าง | สัดส่วน (กรัม) | | น้ำหนัก (กรัม) | | สังกะสี | ซิลิกา |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ฝุ่นสังกะสีออกไซด์ | ถ่าน | ก่อนคัดถ่านออกด้วยตะแกรง | หลังคัดถ่านออกด้วยตะแกรง | % | %, ppm |
| M | 10.0 | 0.5 | 7.0 | 6.7 | 84.88 | 7,980 |
| N | 10.0 | 1.0 | 10.0 | 6.2 | 82.47 | 1.20 |
| O | 10.0 | 1.5 | 10.4 | 6.4 | 81.26 | 9,154 |
| P | 10.0 | 2.0 | 10.9 | 6.9 | 81.79 | 8,311 |



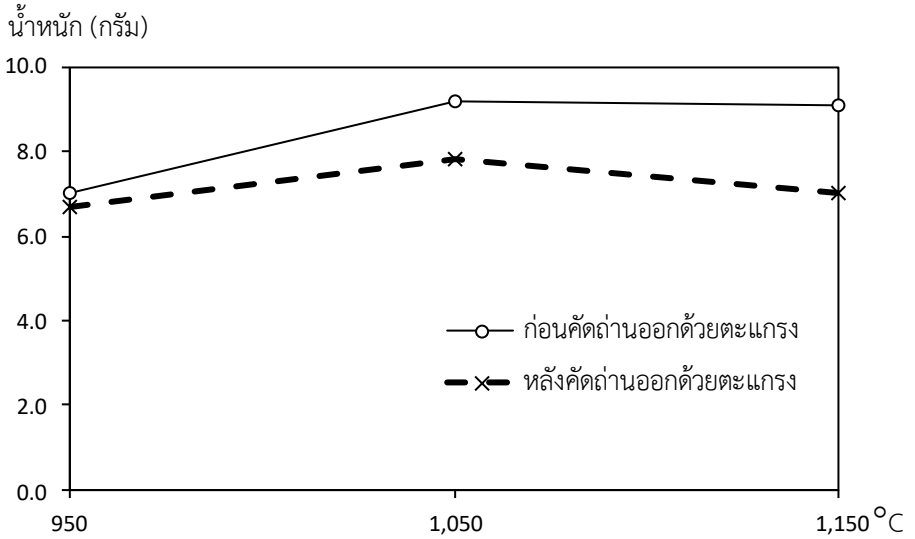

รูปที่ 4.20 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 950 °C นาน 30 นาที ที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ

อย่างไรก็ดี เมื่อทดลองเผาที่อุณหภูมิต่ำ 950 °C นาน 30 นาที ตามตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.20 ปริมาณถ่านถูกใช้หมดไปตั้งแต่ 5% แรก และปริมาณถ่านยังคงเหลือเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของถ่านที่เพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าอุณหภูมิที่ต่ำทำให้เกิดการสูญเสียถ่านน้อยที่สุดและเพียงพอแล้วตั้งแต่การใช้ถ่านเพียง 5% แรก ในขณะที่สามารถให้ค่าเปอร์เซนต์สังกะสีสูงสุดถึง 84.88% และเถ้าจมน้อย โดยเฉพาะปริมาณฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้ามีค่าคงที่



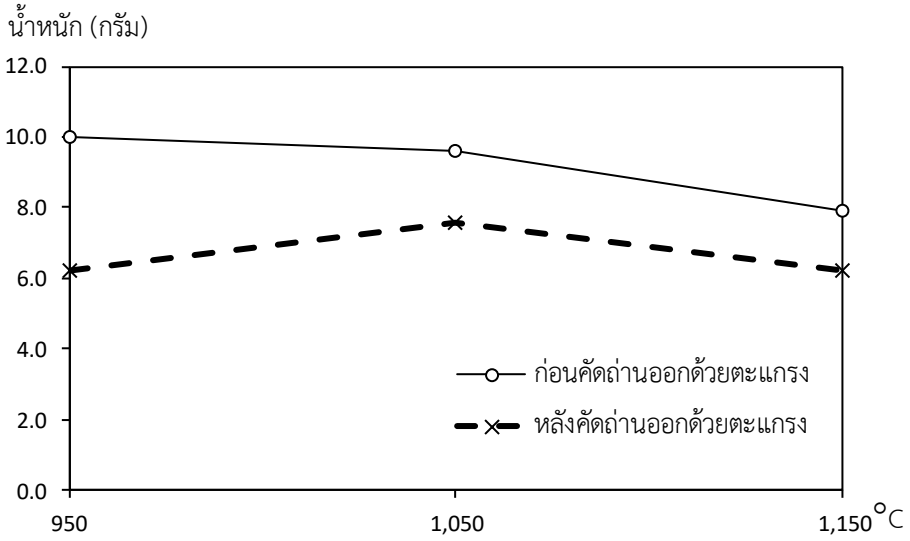

รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 950 °C 1,050 °C และ 1,150 °C นาน 30 นาที ที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักของสังกะสีที่เหลืออยู่ในเบ้าที่อุณหภูมิการเผาต่าง ๆ ตามปริมาณถ่านที่เปลี่ยนแปลงไป (รูปที่ 4.21) พบว่าน้ำหนักของฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าที่เผาที่ 1,050 °C มีค่าสูงสุดทุกช่วงของปริมาณถ่านที่ใช้ และน้ำหนักของฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าที่เผาที่ 1,150 °C มีค่าน้อยที่สุด โดยเฉพาะเมื่อใช้ปริมาณถ่าน 15% ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดจากปริมาณเถ้าซิลิกาเป็นปัจจัยสำคัญ และอาจเกิดจากข้อผิดพลาดในขณะทำการคัดขนาดด้วยน้ำในระหว่างคัดแยกถ่านได้ด้วย

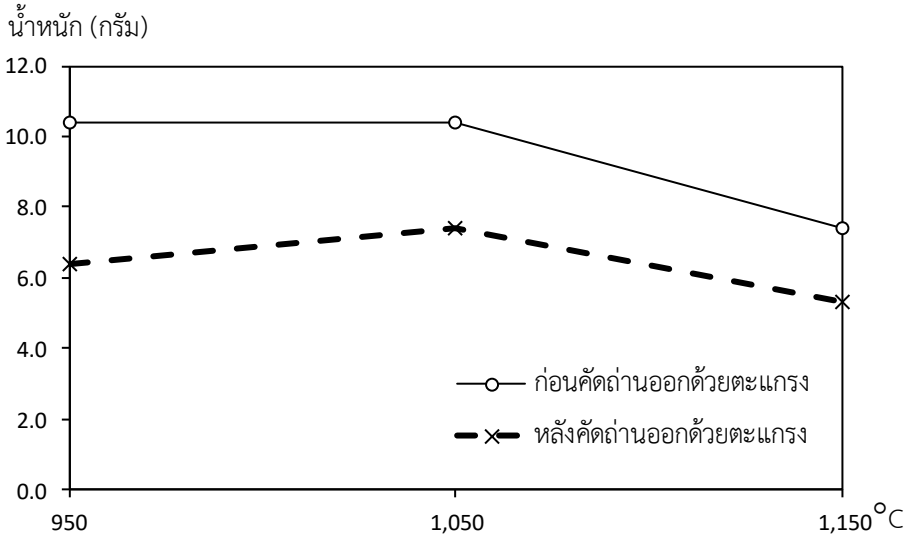



รูปที่ 4.22 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ 5% ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

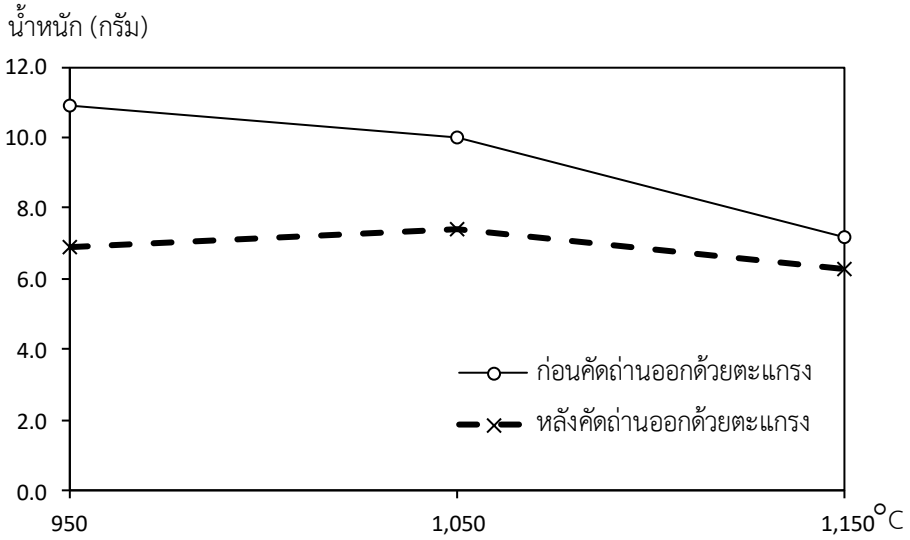
เมื่อทำการวิเคราะห์น้ำหนักของฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าที่เผาด้วยปริมาณถ่าน 5% ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (รูปที่ 4.22) พบว่าแม้ว่าปริมาณถ่านเพียง 5% แต่เผาที่อุณหภูมิสูงกลับเหลือเถ้ามากที่สุด ทำให้เปอร์เซนต์ซิลิกามีค่าสูงและส่งผลให้เปอร์เซนต์สังกะสีมีค่าน้อยที่สุดด้วย อาจเป็นเพราะอุณหภูมิที่สูงทำให้ถ่านสลายตัวเร็วและเหลือเถ้าจมที่มีขนาดใหญ่แทนที่จะค่อย ๆ สลายที่อุณหภูมิต่ำและสร้างเถ้าลอย ปรากฏการณ์นี้ส่งผลให้การเผาที่อุณหภูมิ 950 °C ได้เปอร์เซนต์สังกะสีสูงมากประมาณ 85%




รูปที่ 4.23 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ 10 % ที่อุณหภูมิต่าง ๆ




รูปที่ 4.24 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ 15% ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



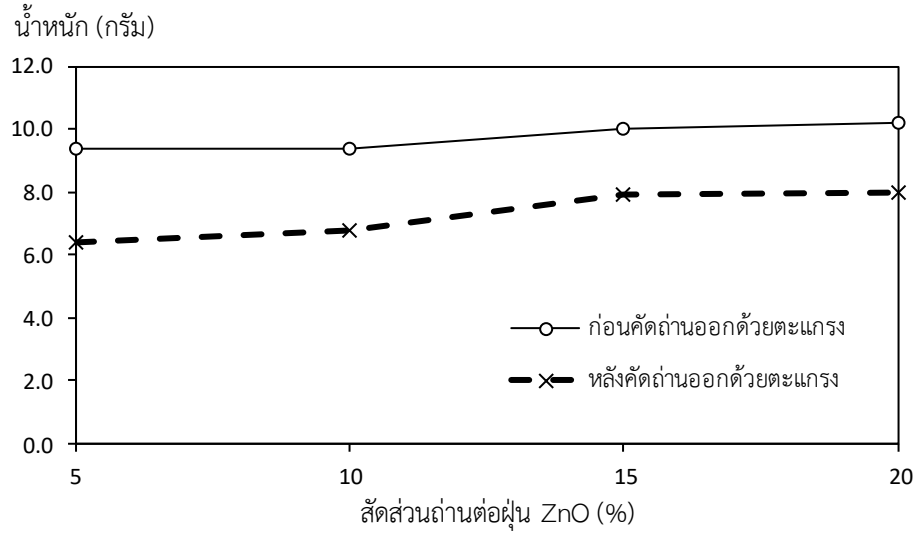

รูปที่ 4.25 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ 20% ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

รูปที่ 4.23 – 4.25 แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซนต์ถ่านที่เพิ่มขึ้นทำให้ถ่านเหลือมากเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 950 °C และเหลือน้อยลงตามลำดับตามอุณหภูมิที่ใช้เผาเพิ่มขึ้น โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ที่ผ่านมา

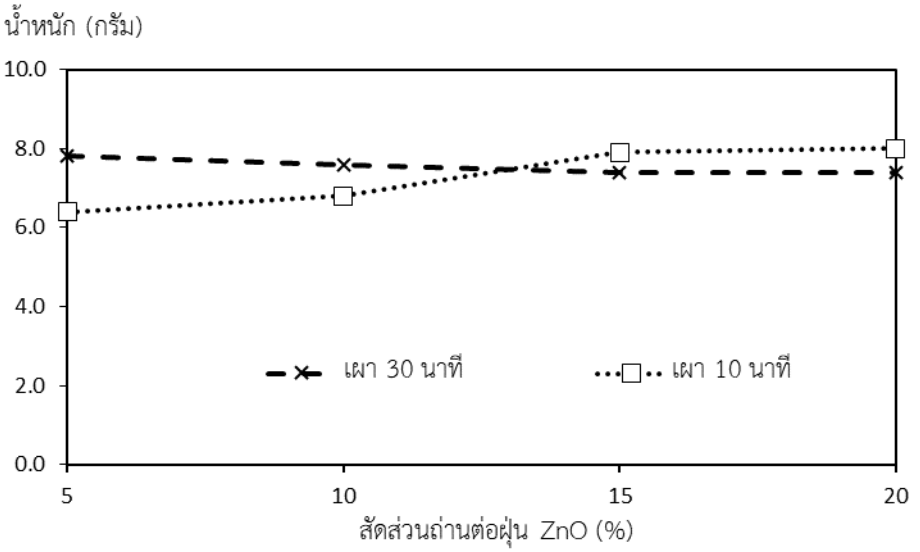
เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบการเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 10 นาที (ตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.26) กับการเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 30 นาที ที่ปริมาณถ่านต่าง ๆ กัน (รูปที่ 4.27) พบว่า ปริมาณฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณถ่านที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำหนักของเถ้าจมที่มีอยู่และยังคงมีถ่านเหลือจากการเผาทุกปริมาณถ่านอีกด้วย ในขณะที่เปอร์เซนต์สังกะสีมีค่าใกล้เคียงกัน ลักษณะดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าอาจไม่มีความจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการเผาฝุ่นสังกะสีออกไซด์นานเกินไป

ตารางที่ 4.15 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 10 นาที

| **ตัวอย่าง** | **สัดส่วน (กรัม)** | | **น้ำหนัก (กรัม)** | | **สังกะสี** | **ซิลิกา** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **ฝุ่นสังกะสีออกไซด์** | **ถ่าน** | **ก่อนคัดถ่านออกด้วยตะแกรง** | **หลังคัดถ่านออกด้วยตะแกรง** | **%** | **%** |
| Q | 10.0 | 0.5 | 9.4 | 6.4 | 74.98 | 3.09 |
| R | 10.0 | 1.0 | 9.4 | 6.8 | 77.28 | 2.44 |
| S | 10.0 | 1.5 | 10.0 | 7.9 | 78.18 | 2.65 |
| T | 10.0 | 2.0 | 10.2 | 8.0 | 75.01 | 2.12 |



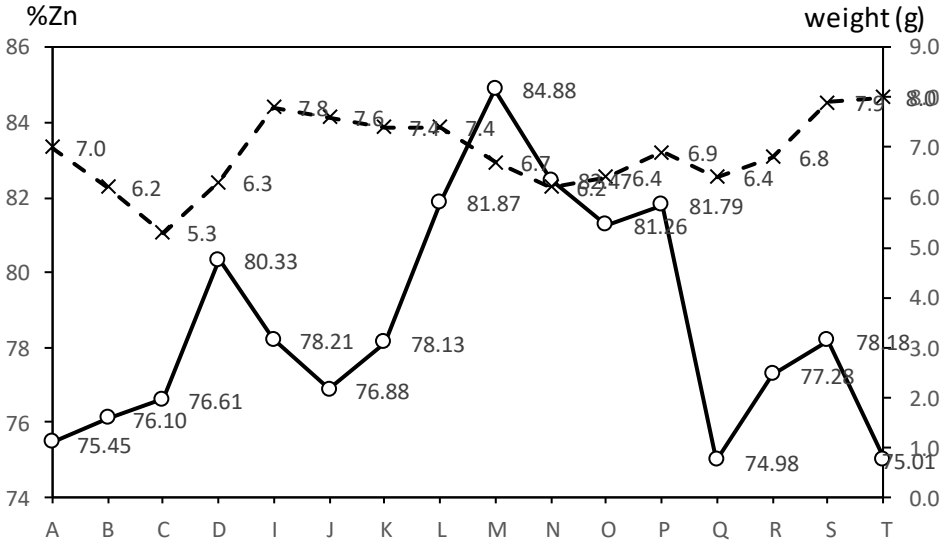

รูปที่ 4.26 แสดงน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 10 นาที ที่สัดส่วนถ่านฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ




รูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักของสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 30 และ 10 นาที ที่สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ

ตารางที่ 4.16 แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ และเวลาเผาต่าง ๆ

| No. | Zn (%) | Fe (ppm) | Pb (%,ppm) | S (ppm) | Si (%,ppm) | Mn (ppm) | Mg (ppm) | Ca (ppm) | Light Element (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 75.45 | 7,465 | 273 | 569 | 3.45 | 3,679 | - | 1,533 | 17.24 |
| B | 76.10 | 9,350 | 5,100 | 3,928 | 3.01 | 3,819 | 2,762 | 1,946 | 15.72 |
| C | 76.61 | 9,677 | 1,000 | 1,592 | 3.40 | 3,791 | 2,912 | 2,225 | 15.45 |
| D | 80.33 | 7,557 | 932 | 1,181 | 2.23 | 3,879 | 2,069 | 2,632 | 13.15 |
| I | 78.21 | 6,992 | 476 | 552 | 2.43 | 3,772 | 2,302 | 1,482 | 15.57 |
| J | 76.88 | 7,151 | 1,029 | 836 | 2.50 | 3,783 | 3,021 | 1,478 | 16.50 |
| K | 78.13 | 7,773 | 4,888 | 3,214 | 2.04 | 3,917 | - | 1,328 | 15.33 |
| L | 81.87 | 7,953 | 5,721 | 3,548 | 1.24 | 3,981 | 3,121 | 828 | 12.17 |
| M | 84.88 | 7,891 | 3,511 | 2,236 | 7,980 | 4,154 | 2,319 | 1,612 | 9.68 |
| N | 82.47 | 7,319 | 5,549 | 3,504 | 1.20 | 4,029 | - | 1,497 | 11.81 |
| O | 81.26 | 7,423 | 7,497 | 5,003 | 9,154 | 3,961 | 2,221 | 1,160 | 12.93 |
| P | 81.79 | 7,307 | 6,064 | 4,054 | 8,311 | 3,964 | - | 1,170 | 12.90 |
| Q | 74.98 | 7,181 | 3,000 | 2,004 | 3.09 | 3,715 | 3,377 | 1,690 | 17.41 |
| R | 77.28 | 7,160 | 3,260 | 2,021 | 2.44 | 3,752 | 3,283 | 1,556 | 15.67 |
| S | 78.18 | 7,684 | 1.21 | 6,485 | 2.65 | 4,014 | 3,379 | 1,628 | 13.02 |
| T | 75.01 | 7,098 | 8,645 | 4,812 | 2.12 | 3,813 | 2,110 | 1,526 | 17.56 |




รูปที่ 4.28 การวิเคราะห์องค์ประกอบสังกะสีออกไซด์และน้ำหนักที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ และเวลาเผาต่าง ๆ

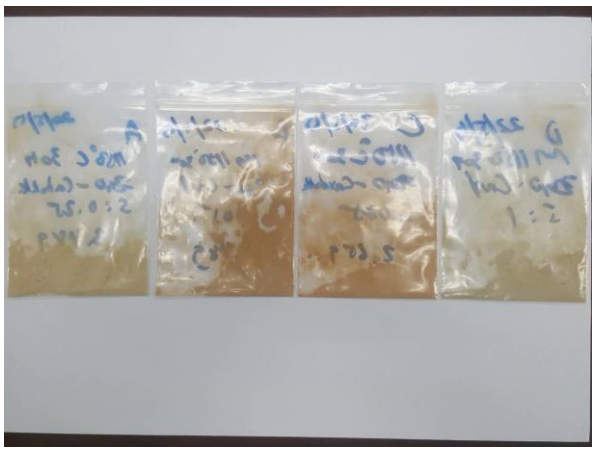
จากตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.28 ค่าเปอร์เซนต์สังกะสีสูงสุดที่เหลืออยู่ในเบ้าคือ 84.88% ที่สภาวะการเผา 950 °C นาน 30 นาที โดยมีปริมาณถ่าน 5% และค่าเปอร์เซนต์สังกะสีต่ำสุดที่เหลืออยู่ในเบ้าคือ 74.98% ที่สภาวะการเผา 1,050 °C นาน 10 นาที โดยมีปริมาณถ่าน 5% ในขณะที่เปอร์เซนต์สังกะสีที่ต่ำสุดจากการเผานาน 30 นาทีที่สภาวะการเผา 1,150 °C โดยมีปริมาณถ่าน 5% อยู่ที่ 75.45% ซึ่งจะเห็นว่าแม้ว่าระยะเวลาการเผานานอาจไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของเปอร์เซนต์สังกะสีที่ได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ยังคงทำให้เปอร์เซนต์สังกะสีเหลืออยู่ในเบ้าสูงกว่า ในขณะที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ค่าเปอรเซนต์ตะกั่วและเปอร์เซนต์กำมะถันลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าที่ลดต่ำสุดจะอยู่ที่ 273 ppm ที่ปริมาณถ่าน 5% อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 30 นาที และ 552 ppm ที่ปริมาณถ่าน 5% อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 30 นาที ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากเปอร์เซนต์ของสังกะสีที่ตรวจสอบได้พบว่า ในบางตัวอย่าง เช่น ตัวอย่าง L M N O และ P มีค่าของธาตุสังกะสีเกินกว่าค่าที่ควรจะเป็นของสังกะสีออกไซด์ 100% ทั้งนี้ เนื่องจากฝุ่นสังกะสีออกไซด์ถูกกระบวนการรีดักชันเปลี่ยนเป็นโลหะสังกะสีบางส่วนและยังคงหลงเหลืออยู่ในฝุ่นที่เผาดังแสดงในรูปที่ 4.29

อย่างไรก็ดีปริมาณของตะกั่ว กำมะถันและซิลิกาที่เหลืออยู่ในเบ้า ยังคงอยู่ในระดับที่น่าพอใจ แต่ผลของการให้ความร้อนในกระบวนการรีดักชันอาจทำให้ฝุ่นที่เหลืออยู่ในเบ้ามีลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนไปที่เห็นได้ชัด คือสีหลังเผาดังแสดงในรูปที่ 4.30 ซึ่งจะพบว่าในการเผาที่อุณหภูมิต่ำและใช้ปริมาณถ่านน้อยจะให้สีของอุณหภูมิหลังเผาอ่อนที่สุด และเข้มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและปริมาณถ่านที่ใช้มากขึ้น

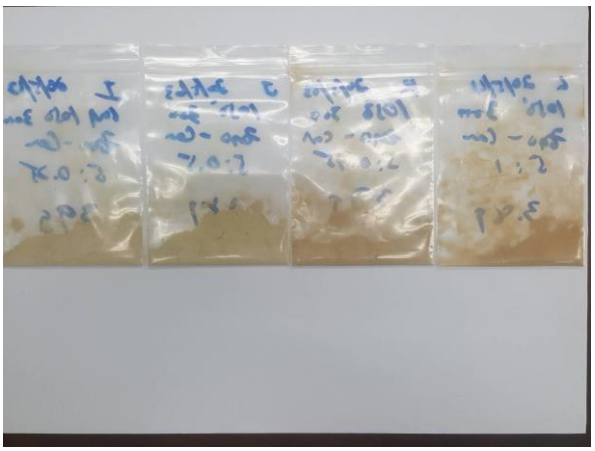
นอกจากนี้ ผลการตรวจสอบชนิดขององค์ประกอบฝุ่นที่เหลืออยู่ในเบ้าด้วย XRD ไม่สามารถระบุสารประกอบของตะกั่วและกำมะถันได้ แต่กลับพบสังกะสีสังเคราะห์ในรูปของ Willemite (รูปที่ 4.31) ในขณะที่ฝุ่นที่เก็บได้จากไอระเหิดของการเผาด้วยเตาเหนี่ยวนำกลับพบสารประกอบของ Zincite Cerrusite และ Galena ซึ่งเป็นองค์ประกอบของการสลายตัวของธาตุสังกะสี กำมะถัน และตะกั่ว ตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.15 ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ต้องการ

รูปที่ 4.29 แสดงโลหะสังกะสีที่เหลืออยู่ปะปนกับสังกะสีออกไซด์ในเบ้า



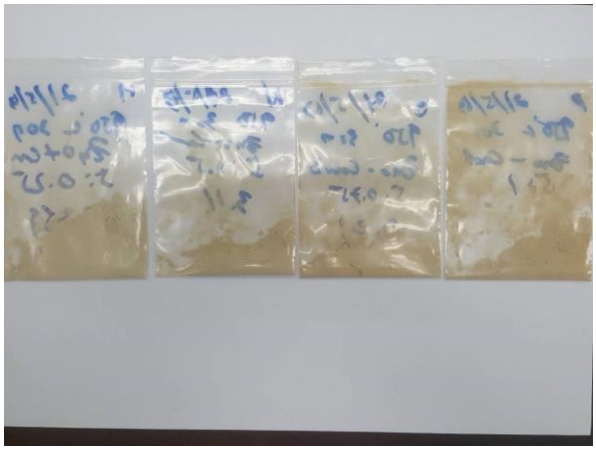
5% 10% 15% 20%

ก) อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 30 นาที



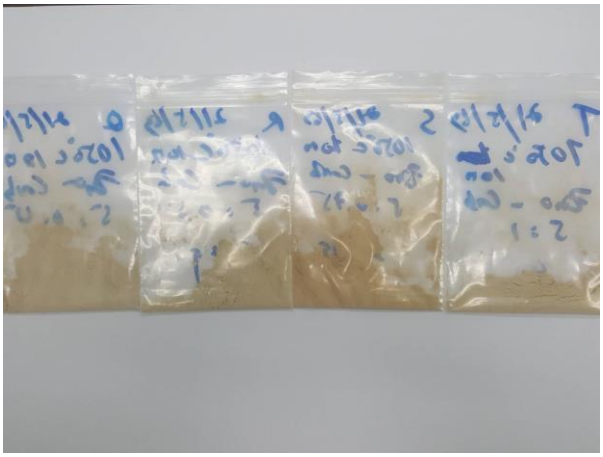
5% 10% 15% 20%

ข) อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 30 นาที



5% 10% 15% 20%

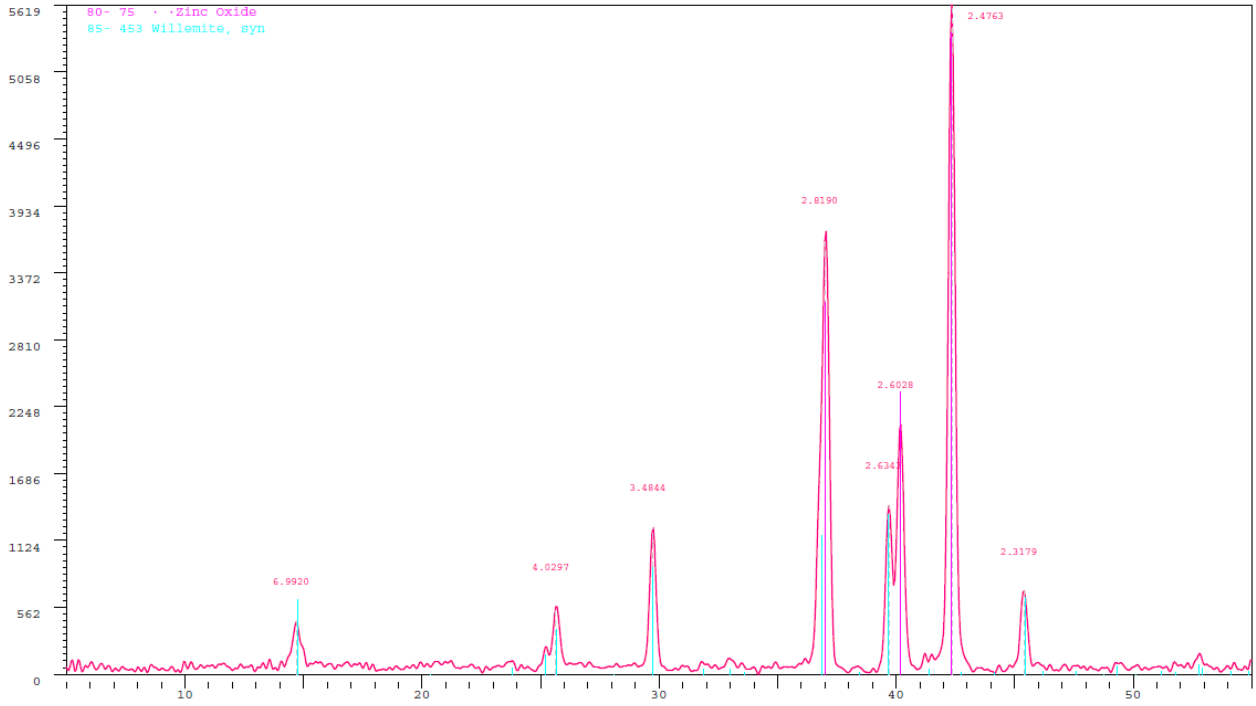
ค) อุณหภูมิ 950 °C นาน 30 นาที



5% 10% 15% 20%

ง) อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 10 นาที

รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะของโลหะสังกะสีที่ปะปนอยู่กับฝุ่นที่เหลืออยู่ในเบ้าของตัวอย่างทั้งหมดที่ทำการศึกษา




รูปที่ 4.31 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่าง Q ที่มีโลหะสังกะสีต่ำสุด

# บทที่ 5
# สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการศึกษา

1. เมื่อย่างฝุ่นเหล็กในสภาวะออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 450 °C ค่ากำมะถันลดลงจาก 2.54% เหลือ 0.8% และไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเพิ่มอุณหภูมิไปถึง 900 °C
2. ผลวิเคราะห์ XRD ของฝุ่นเหล็กที่ย่างที่อุณหภูมิ 450 °C และ 900 °C มีลักษณะขององค์ประกอบหลักเช่นเดียวกัน
3. เมื่อเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 °C ที่เวลาต่าง ๆ กัน น้ำหนักของฝุ่นเหล็กเปลี่ยนแปลงจากเดิมไปเล็กน้อยประมาณ 1 - 2% และเกิดการหลอมตัวเกาะติด
4. เมื่อเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,000 °C นาน 40 นาที เกิดการหลอมตัวเกาะติดกันมากกว่าปกติถึง 3.5%
5. เมื่อเผาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงขึ้นและระยะเวลานานขึ้น การหลอมตัวเกาะติดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น
6. ฝุ่นเหล็กที่เผาในสภาวะรีดักชันด้วยเตาเหนี่ยวนำ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณถ่านที่ใช้เป็น 40% และ 20% มีค่าเปอร์เซนต์สังกะสี 73.35% และ 79.32% ตามลำดับ เปอร์เซนต์ตะกั่ว 5.98% และ 2.22% ตามลำดับ และเปอร์เซนต์กำมะถัน 3.39% และ 1.10% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับไอของฝุ่นเหล็กของบริษัท พี.เอส.พี. อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ที่เปอร์เซนต์สังกะสี ตะกั่ว และกำมะถัน 71.41% 3.40% และ 2.54% ตามลำดับ
7. ตะกรันที่เหลืออยู่ในเบ้า พบเปอร์เซนต์ของสังกะสี เหล็ก ตะกั่ว และกำมะถัน ดังนี้ 1.04% 16.22% 1,031 ppm และ 2.06% ตามลำดับ ในขณะที่ตะกรันของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด พบเปอร์เซนต์ของสังกะสี เหล็ก ตะกั่ว และกำมะถัน ดังนี้ 1.54% 29.15% 54 ppm และ 4,569 ppm ตามลำดับ
8. ค่าเปอร์เซนต์สารประกอบฮาโลเจน (คลอรีน) เมื่อล้างไอของฝุ่นสังกะสีของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ด้วยน้ำร้อนเท่ากับ 1.45% และเมื่อล้างด้วยน้ำร้อนและทำการกัดกรดซัลฟูริกในภายหลัง จะได้ปริมาณคลอรีนเท่ากับ 5,613 ppm เปรียบเทียบกับสภาวะก่อนล้างที่ 3.19%
9. ฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่ผ่านการเผารีดักชันแล้วประกอบด้วยสังกะสีออกไซด์สังเคราะห์ (Synthetic Zincite) สังกะสีซิลิเกตสังเคราะห์ (Synthetic Willemite) และโลหะสังกะสีบางส่วน
10. ไอระเหิดของฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่ผ่านการเผารีดักชันประกอบด้วย สังกะสีออกไซด์สังเคราะห์ (Synthetic Zincite) Cerussite สังเคราะห์ และ Galena สังเคราะห์
11. หลังการเผารีดักชันฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 30 นาที โดยใช้ถ่าน 20% จะได้เปอร์เซนต์สังกะสีสูงสุด 80.33% และเปอร์เซนต์ซิลิกาต่ำสุด 2.23%

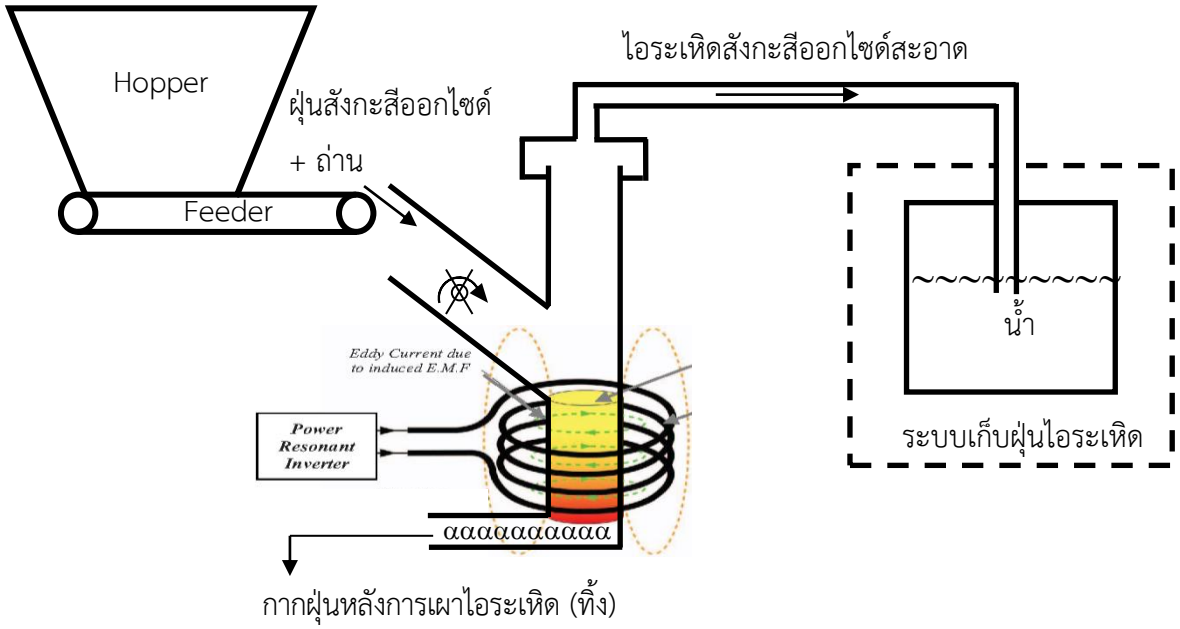
12. หลังการเผารีดักชันฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 30 นาที โดยใช้ถ่าน 20% จะได้เปอร์เซนต์สังกะสีสูงสุด 81.87% และเปอร์เซนต์ซิลิกาต่ำสุด 1.24%
13. หลังการเผารีดักชันฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่อุณหภูมิ 950 °C นาน 30 นาที โดยใช้ถ่าน 5% จะได้เปอร์เซนต์สังกะสีสูงสุด 84.88% และเปอร์เซนต์ซิลิกาต่ำสุด 7,980 ppm
14. หลังการเผารีดักชันฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 10 นาที โดยใช้ถ่าน 15% จะได้เปอร์เซนต์สังกะสีสูงสุด 78.18% และเมื่อใช้ถ่าน 20% จะได้เปอร์เซนต์ซิลิกาต่ำสุด 2.12%
15. ปริมาณตะกั่วในฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าสูงสุดเท่ากับ 8,645 ppm เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 10 นาที โดยใช้ถ่าน 20% ในขณะที่ปริมาณตะกั่วต่ำสุดเท่ากับ 273 ppm เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 30 นาที โดยใช้ถ่าน 5%
16. ปริมาณกำมะถันในฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าสูงสุดเท่ากับ 6,485 ppm เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 10 นาที โดยใช้ถ่าน 15% ในขณะที่ปริมาณกำมะถันต่ำสุดเท่ากับ 552 ppm เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,050 °C นาน 30 นาที โดยใช้ถ่าน 5%
17. ปริมาณซิลิกาในฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าสูงสุดเท่ากับ 3.45% เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,150 °C นาน 30 นาที โดยใช้ถ่าน 5% ในขณะที่ปริมาณซิลิกาต่ำสุดเท่ากับ 7,980 ppm เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 950 °C นาน 30 นาที โดยใช้ถ่าน 5%
18. สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองจะให้เปอร์เซนต์สังกะสีสูงสุด 84.88% เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 950 °C นาน 30 นาที โดยใช้ถ่าน 5%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา กระบวนการที่คาดว่าสามารถนำมาใช้ได้จะประกอบด้วย

**1. กระบวนการรีดักชันฝุ่นสังกะสีออกไซด์**

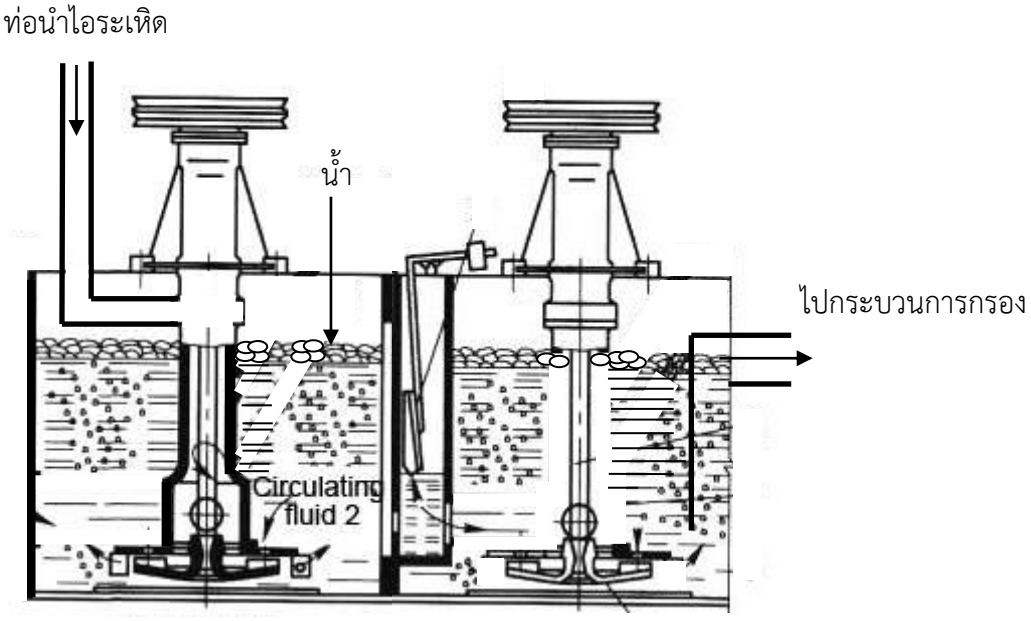
สังกะสีออกไซด์ที่ได้จากการเผาฝุ่นเหล็กที่มีสารปนเปื้อนต่าง ๆ สามารถกำจัดออกได้ด้วยวิธีต่าง ๆ หลายวิธี จากการศึกษาการเผาสังกะสีออกไซด์ทำให้ได้สังกะสีออกไซด์ที่มีความสะอาดมากขึ้น โดยสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการเผาทั่วไปจะถูกนำมาผสมกับถ่านในอัตราส่วนที่เหมาะสมเติมลงในถังป้อน (Hopper) ที่มีสายพานป้อน (Feeder) เข้าสู่เตาเผาแบบต่าง ๆ เช่น เตาเผาแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) เป็นต้น โดยมีอุปกรณ์ป้อนที่มีลักษณะปิดกั้นไอระเหิด (Rotary Feeder) และเตายังต้องประกอบด้วยอุปกรณ์ดูดจับไอระเหิด เพื่อบังคับให้ไอระเหิดไหลผ่านกระบวนการจัดเก็บด้วยน้ำ ตัวอย่างตามรูปที่ 5.1




รูปที่ 5.1 แสดงกระบวนการรีดักชันฝุ่นสังกะสีออกไซด์

**2. ระบบเก็บฝุ่น**

จากรูปที่ 5.2 ไอระเหิดที่ได้จากเตาเผาจะถูกแรงดูดไอระเหิดผ่านท่อนำเข้าสู่ถังดักจับฝุ่นด้วยน้ำ ในที่นี้ถังดักจับฝุ่นด้วยน้ำมีลักษณะเป็นถังกวนที่เรียงติดกัน (อาจมีลักษณะอื่น เช่น หอดักจับไอระเหิดด้วยหยดน้ำ) โดยใบกวนจะทำหน้าที่ดูดอากาศซึ่งประกอบด้วยไอระเหิดของฝุ่นสังกะสีออกไซด์สะอาด โดยจะมีการเติมน้ำสะอาดเข้าสู่ระบบตลอดเวลา เมื่อไอระเหิดสัมผัสน้ำจะตกตะกอนแขวนลอยอยู่ในน้ำ ในขณะที่มลทินที่ละลายน้ำได้และปนเปื้อนมากับไอระเหิดจะละลายทิ้งไปพร้อมกับน้ำโดยกระบวนการกรองในลำดับต่อไป

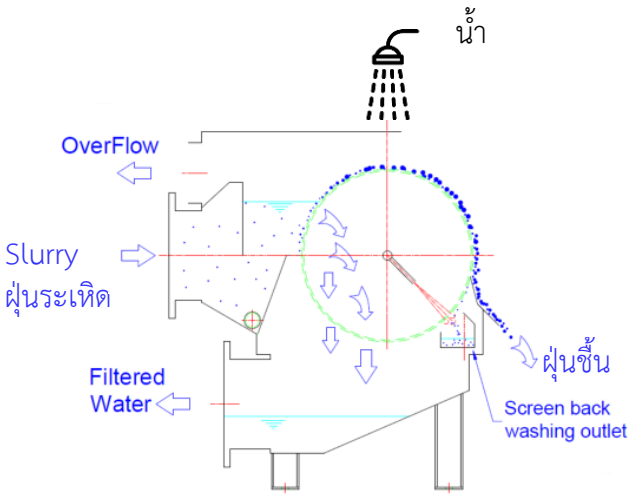



รูปที่ 5.2 แสดงระบบเก็บฝุ่นด้วยน้ำ

**3. การกรอง**

สารแขวนลอยและน้ำที่มีมลทินที่ละลายอยู่จะล้นออกจากกระบวนการดักเก็บไอระเหิดฝุ่นสังกะสีออกไซด์ด้วยน้ำเข้าสู่ถังกรองแบบทรงกระบอก (Drum Filter) โดยที่ทรงกระบอกวางตัวอยู่ในแนวนอนและจุ่มลงในอ่างบรรจุสารแขวนลอยของสังกะสีออกไซด์ เมื่อทรงกระบอกหมุน แรงดูดภายในทรงกระบอกจะดูดเอาสารแขวนลอยเกาะติดไปที่ผิวและกรองเอาสารละลายที่มีมลทินที่ละลายอยู่ออกไปทิ้ง ในขณะที่ฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เกาะติดอยู่ที่ผิวจะถูกล้างด้วยน้ำสะอาดในขณะที่ทรงกระบอกหมุนและถูกปาดเก็บออกที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ก่อนที่ผิวของทรงกระบอกจะจุ่มลงไปในอ่างสารแขวนลอยอีกครั้งหนึ่ง (รูปที่ 5.3)

ก)

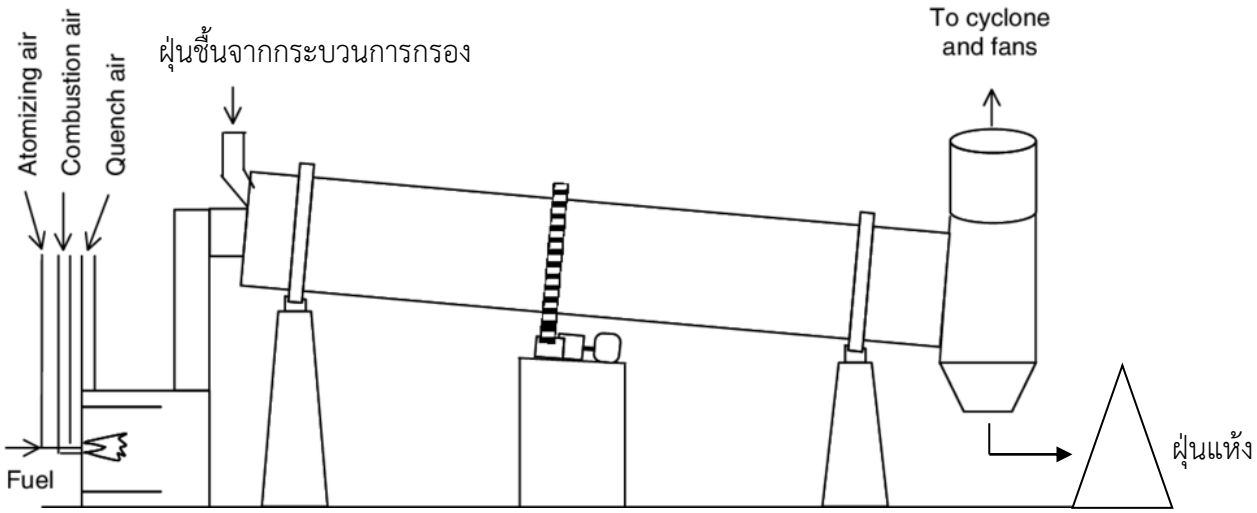



ข)

รูปที่ 5.3 ก) แสดง Drum Filter ข) แสดงผังการทำงานของ Drum Filter

**4. การอบแห้ง**

ฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากการกรองจะยังคงมีความชื้นอยู่ ซึ่งจะถูกส่งผ่านเข้าสู่กระบวนการอบให้แห้งด้วยเตาหมุน (Rotary Dryer) ฝุ่นจะถูกส่งผ่านที่ปลายด้านหนึ่งของเตาและเคลื่อนตัวผ่านเตาในขณะที่เตาหมุนช้า ๆ ไปที่ปลายเตา ความร้อนจะถูกส่งผ่านเข้าเตาที่ปลายด้านใดด้านหนึ่งด้วยหัวเผา ฝุ่นที่แห้งแล้วจะถูกเก็บกองในขณะที่ฝุ่นขนาดเล็กและไอความชื้นจะถูกดูดและเก็บด้วยพัดลมดูดอากาศและไซโคลน (รูปที่ 5.4)




รูปที่ 5.4 แสดง Rotary Dryer

# บรรณานุกรม


กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2552). *เอกสารเผยแพร่ภาคอุตสาหกรรม โครงการส่งเสริมและเผยแพร่เทคโนโลยีการอนุรักษ์พลังงาน DISPLAY CENTER และบ้านประหยัดพลังงาน หมวดที่ 3: การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Heating)*. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2553). *คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (โรงงาน) พ.ศ. 2553*. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.

กรมศุลกากร. (2563). *สถิติการนำเข้าและส่งออกสังกะสี HS CODE 79*. Retrieved from www.customs.go.th

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2554). *เทคโนโลยีการผลิตพลังงาน/เชื้อเพลิงจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว: โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการนำวัสดุเหลือใช้และกากของเสียมาใช้ประโยชน์.* กรุงเทพฯ: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2554). *เทคโนโลยีการรีไซเคิลตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าและเตาอุ่นน้ำเหล็ก: โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการนำวัสดุเหลือใช้และกากของเสียมาใช้ประโยชน์.* กรุงเทพฯ: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2554). *เทคโนโลยีการรีไซเคิลฝุ่นเหล็ก: โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการนำวัสดุเหลือใช้และกากของเสียมาใช้ประโยชน์.* กรุงเทพฯ: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2563). สถานการณ์แร่ของประเทศไทย ปี 2558 – 2562. กรุงเทพฯ: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน. (2551). *โลหะกับการพัฒนาประเทศ* (รายงานวิชาการฉบับที่ สอพ. 3/2551). กรุงเทพฯ: สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

ไทยโพสต์. (2562). จากเหมือง"สู่ ‘สวนพฤกษศาสตร์ผาแดง’ แนวพระราชดำริกรมสมเด็จพระเทพฯ รักษาป่าตะวันตก. Retrieved from https://www.thaipost.net/main/detail/36702

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]

บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน). (2555). *บันทึกการเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มเติมแผนผังและกรรมวิธีประกอบโลหกรรมครั้งที่ 1/2555 สำหรับใบอนุญาตประกอบโลหกรรมที่ 2/2527*. เอกสารหมายเลข 2 กรรมวิธีประกอบโลหกรรมถลุงแร่สังกะสีบริษัท ผาแดงอินดัสทรี (จำกัด) มหาชน.

# บรรณานุกรม (ต่อ)


วงกต วงศ์อภัย. (2550, 23 กรกฎาคม). มูลค่าเพิ่มของยางรถยนต์เก่า. *มติชน*, 30.

วารี ลิ้มพัฒนสกุล. (2555). *การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฝุ่นละอองจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าประยุกต์ใช้แทนแม่สีในสีรองพื้นกันสนิม.* รายงานวิชาการค้นคว้าอิสระ คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

ศิริรัตน์ จิตการค้า. (2551). *จากขยะสู่น้ำมัน เทคโนโลยีผลิตพลังงาน ทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม.* กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. (2551). *การใช้พลังงานกับอุตสาหกรรมเหล็ก*. Retrieved from https://sites.google.com/site/aluminium9999/kar-chi-phlangngan-kab-xutsahkrrm-helk

สมชาย พวงเพิกศึก และชูศักดิ์ แซ่มเกษม. (2518). การผลิตเหล็กกล้าจากเตาไฟฟ้า. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่มที่ 2 เรื่องที่ 5 อุตสาหกรรม. Retrieved from http://kanchanapisek.or.th/kp6/New/sub/book/book.php?book=2&chap=5&page=t2-5-infodetail04.html

สอิ้ง จักษุศิลา. (2539). ประโยชน์ของสังกะสีออกไซด์. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*. ปีที่ 43. ฉบับที่ 139. กันยายน 2539. กรุงเทพฯ: กรมวิทยาศาสตร์บริ

สุรสิทธิ์ แก้วพระอินทร์. (2553). โลหะวิทยาเบื้องต้น (Metallurgy). กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน).

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2520). *ซิงค์ออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมสี มอก.221-2520*. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2521). *ซิงค์ออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมยาง มอก.265-2521*. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2533). *สังกะสีแท่ง มอก.957-2533*. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.

อัปสร อัมพรมหา. (2531). เรื่องของสังกะสี : *ข่าวสารการธรณี*. ปีที่ 33. ฉบับที่ 5. กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี.

อุบลศรี ชัยสาม และเยาวลักษณ์ นิสสภา. (2537). *คุณลักษณะแร่ตามมาตรฐานการใช้งานและมาตรฐานการซื้อขายในตลาดแร่* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: กองวิชาการและวางแผน กรมทรัพยากรธรณี.

Allied – Signal Inc. (1993). Mixed-metal oxide absorbent for carbon dioxide and water removal. Chang, Chim – Hsiung. Int. CL. BOID 53/04. *US. Patent 5, 186, 727.* 1993-02-16.

Bjorkman, B., Eriksson, J., Nedar, I., Samuelsson, C. (1996). Waste reduction through process optimization and development. *Journal of Metals*, 48, 45-49.

Brown, R.C. and Holmgren, J. (2006). *Fast pyrolysis and bio-oil upgrading*. Iowa State University.

# บรรณานุกรม (ต่อ)


Chairaksa, R., Inoue, Y., Matsubae-Yokoyama, K., Hiraki, T. and Nagasaka, T. (2010). New Zinc Recovery Process from EAF Dust by Lime Addition. In *AISTech: Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. Tohoku: Tohoku University.

Cunliffe, B.W. (2005). Iron Age Communities in Britain, Fourth Edition: An Account of England, Scotland and Wales from the Seventh Century BC Until the Roman Conquest. Retrieved from http://en.wikipedia.org/wiki/British_Iron_Age

Dacral, SA. (1994). Anticorrosion coating composition with improved atability and coated substrate. Marguier, Gilbert. Int. CL.C23U 22/26. *US. Patent RE 34707*. 1994-08-03.

Engitec Technologies S.p.A. (2008). From C.Z.O. To Zinc Cathode Without Any Pre-treatment: The Ezinex Process. In *International Symposium on Lead and Zinc Processing* (pp. 85-98). Johannesburg: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.

Foster Products Corp. (1994). Fungicidal protective coating for air handling equipment. Batdorf, Vernon and Brendle, William J. Int. CL. CD9D 5/14. *US. Patent 5,314,719*. 1994-05-24.

Frias, C. (2009). Secondary Zinc. *International Mining*, 28-29. Retrieved from http://www.Infomine.com/library/publications/docs/InternationalMining/Frias2009.pdf

GAIA Corporation. (2010). *Renewable energy (Tire, Plastic, Bio-gas)*. South Korea.

Global Steel Dust Limited. (2018). *Proven Waelz Kiln Technology*. Retrieved from http://www.globalsteeldust.com/waelz_kiln_technology

Gudenau, H.W., Senk, D., Wang, S., De Melo Martins, K. and Stephany, C. (2005). Research in the Reduction of Iron Ore Agglomerates Including Coal and C-containing Dust. *ISIJ International*, 45, 603-608.

Horner, C. (2008). *Electric Arc Furnace Dust Recycling*. ZincOx Thailand. Retrieved from http://eco-town.dpim.go.th/webdatas/articles/ArticleFile1284.pdf

Huber, J.C., Ptisson, F., Rocabois, P., Birat, J.C., Ablitzer, D. (1999). Some means to reduce emissions and improve the recovery of electric arc furnace dust by controlling the formation mechanisms. In: *Proc. Rewas'99-Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology Vol II*. TMS San Sebastian: 1483-1492.

Hyk, W., Kitka, K. and Rudnicki, D. (2019). Selective Recovery of Zinc from Metallurgical Waste Materials from Processing Zinc and Lead Ores. *Molecules*. 24(12): 2275.

Infrared Heating Technologies LLC. (2011). *Open Hearth Furnace: picture*. Retrieved from http://www.infraredheating.com/batch_systems.htm

# บรรณานุกรม (ต่อ)


International Lead & Zinc Study Group. (2020). *End Uses of Zinc*. Retrieved from http://www.ilzsg.org/static/enduses.aspx?from=1

Islam, M.N. and Beg, M.R.A. (2004). Fixed Bed Pyrolysis of waste plastic for alternative fuel production. *Journal of Energy and Environment*. 3. 69-80.

Islam, M.R., Parveen, M. and Haniu H. (2010). Feasibility study for thermal treatment of solid tire waste in Bangladesh by using fixed bed firte tube heating pyrolysis technology. In *Proceedings Venice 2010, Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste*. Venice, Italy, 8-11 November 2010.

Johnson W. M. (1907). Physical factors in the metallurgical reduction of zinc oxide. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*. 38. 656-63.

Jones, G. (2010). *Korean Trip: Review of Pyrolysis Technology*. Southern Waste Information eXchange, Inc.

Juergen, R. (2006). Application of Waelz technology on resources recycling of steel mill dust. *Seaisi Quarterly*, 35, 13-19.

Kao Corp. (1993). Liquid detergent composition. Kamegai. Jun et al. Int. CL. CIID 3/48 CIID 1/03. *US. Patent 5,234,618*. 1993-08-10.

Kelham Island Industrial Museum. (2012). *Bessemer Furnace: picture*. Retrieved from http://www.britannica.com/EBchecked/media/120834/Bessemer-furnace-Kelham-Island-Museum-Sheffield-England.

Kim, B., Yoo, J., Park, J., and Lee, J. (2006). A Kinetic Study of the Carbothermic Reduction of Zinc Oxide with Various Additives. *Materials Transactions*. 47. 2421-2426.

Kleen, C. (2011). *Zinc Recycling*. U.S.A.: American Galvanizers Association. Retrieved from https://galvanizeit.org/knowledgebase/article/zinc-recycling

Kopeliovich, D. (2012). *Electric Are Furnace: picture*. SubsTech. Retrieved from http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=electric_arc_furnace_eaf

Laboy-Nieves, E.N. (2014). Energy Recovery from Scrap Tires: A Sustainable Option for Small Islands like Puerto Rico. *Sustainability*. 6(5). 3105-3121.

Lee, J., Lin, C., Chen, H. (2001). Carbothermal Reduction of Zinc Ferrite. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 32. 1033-1040.

# บรรณานุกรม (ต่อ)


McDonnell Douglas Corp. (1994). High emittance low absorptance coatings, Babel, Henry W. and Le, Huong G. Int. CL. B32B 7102. *US. Patent 5,296,285*. 1994-03-22.

Memoli F. and Guzzon M. (2006). Recycling of furnace by-products by injecting into the EAF-experience and prospect. *Stahl und Eisen*, 8, 137-148.

Mitsubishi Denki Kabushiki Kaisha. (1993). Process for preparing mica-containing ceramic composite. Tadaki, Murakami et al. Int CL. CO4B35/71 B28D 1/32. US. Patent 5,180,532. 1993-01-19.

Murugan, S., Ramaswamy, M.C. and Nagarajan, G. (2008). Running a diesel engine with tyre pyrolysis oil diesel blend at different injection pressure. *Thammasat International Journal of Science and Technology*. 13(1). January-March 2008.

Nippon Slag Association. (2008). *Iron and Steel Products – Environmentally friendly Material*. Retrieved from http://www.slg.jp/publication/slag.html

Omran, M., Fabritius, T., Heikkinen, E-P. and Chen, G. (2017). Dielectric properties and carbothermic reduction of zinc oxide and zinc ferrite by microwave heating. *Royal Society Open Science*. 4. 170710.

Paul Wurth S.A. (2008). *PRIMUS® Recycling of Residues and Wastes from Ironmaking, Steelmaking and Non-Ferrous Metallurgy*. Retrieved from http://brochures.paulwurth.com/recycling/brochures/(Brochure)-PRIMUS-en.pdf

Peens, M. (2004). *Modelling and control of an electrode System for a three-Phase Electric Arc Furnace*. Master Degree of Engineering (Electronic Engineering). University of Pretoria etd-2006.

Phillips Petroleum Comp. (1993). Process for removing sulfur compounds. Lowery, Richard E. and Engelbert, Donald R. Int CL. C01B 17/16 C01B 31/20 C01B 17/20 B01J 8/100. *US. Patent 5,219,542*. 1993-06-15.

Pickles, C.A. (2008). Thermodynamic Analysis of the Selective Carbothermic Reduction of Electric Arc Furnace Dust. *Journal of Hazardous Materials*. 150. 265-278.

Promduang, M. (2008). *Used tyres recycling with KAHL - Flat die granulation mills*. KAHL Group.

Revlon, Consumer Products Corp. (1993). Cosmetic compositions. Macchio, Ralph A. et al. Int CL. A61K 7/021. *US. Patent 5,234,682*. 1993-08-10.

Roth, J.L., Frieden, R., Hansmann, T. and Monia, J. (2001). PRIMUS, a new process for recycling by-products and producing virgin iron. *Revue de Metallurgie*, 98, 987-996.

# บรรณานุกรม (ต่อ)


Siemens. (2012). *Basic Oxygen Furnace: picture*. Retrieved from http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2012/industry/metals-technologies/imt201202065.htm

Sumitomo Metal Industries Limited. (2010). *Sumitomo Metals Realizes High Efficiency Production of Low Phosphor Steel with Low Environmental Load: Development of New Molten Pig Iron Dephosphorization Technology with Powder Top Blowing*. Retrieved from https://www.nipponsteel.com/en/news/old_smi/2010/news2010-10-20-02.html

U.S. Geological Survey. (2020). *Mineral Commodity Summaries*. January 2020. U.S.A.: USGS.

Wangnaikul, A. (2011). Building Materials. เอกสารประกอบการสอน รหัสวิชา 5561104 วัสดุก่อสร้าง ชุดที่ 10 การใช้งานและวิธีการเก็บรักษาของวัสดุเหล็ก สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา. คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง.

Weast, R.C. (1987). *Handbook of Chemistry and Physics* (67th ed.). U.S.A.: Chemical Rubber Publishing Company.

Wedow, H. Jr., Kiilsgaard, T.H., Heyl, A.V., and Hall, R.B. (1973). Zinc : *U.S. Geol. Survey Prof*., 820 p.

Xi'an Abundance Electric Technology Co., Ltd. (2012). *Electric Arc Furnace: picture*. Retrieved from http://ae-bds.en.made-in-china.com/product/GMzxdQOlgbWJ/China-Electric-Arc-Furnace

Yabuta K., Tozawa H., and Takahashi T. (2006). New Applications of Iron and Steelmaking Slag Contributing to a Recycling-oriented Society. *JFE Technical Report*, 8, 17-23.

Zeller, G.A. (1924). *The Reduction of Zinc Oxide by Carbon*. Masters Theses. 4683. Scholars' Mine, Missouri University of Science and Technology.

Zunkel, A.D. (1997). *Electric arc furnace dust management: A review of technologies*. Iron and Steel Engineer. 33.

# ภาคผนวก ก

## รายละเอียดผลวิเคราะห์ XRF ของวัสดุที่นำมาศึกษา

ตารางที่ ก.1 แสดงผลวิเคราะห์ XRF ของฝุ่นเหล็กที่ได้จากโรงงานหลอมเศษเหล็กทั่วไป ไอระเหิดและตะกรัน จากการถลุงฝุ่นเหล็ก ตามตารางที่ 2.15

| ฝุ่นเหล็ก | | | ไอระเหิด | | | ตะกรัน | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| El | PPM | +/- | El | PPM | +/- | El | PPM | +/- |
| Fe | 35.03% | 0.2154% | Zn | 71.41% | 0.2852% | LE | 42.37% | 0.3286% |
| LE | 30.67% | 0.3604% | LE | 14.54% | 0.3355% | Fe | 29.15% | 0.1815% |
| Zn | 15.73% | 0.1006% | Pb | 3.40% | 0.0270% | Si | 10.18% | 0.0694% |
| Ca | 4.33% | 0.0271% | Cl | 3.19% | 0.0146% | Ca | 6.68% | 0.0410% |
| Mg | 3.75% | 0.3129% | S | 2.54% | 0.0128% | Mg | 3.89% | 0.2502% |
| Mn | 3.56% | 0.0325% | Ca | 1.11% | 0.0066% | Al | 3.23% | 0.0598% |
| Si | 2.08% | 0.0231% | Si | 9290 | 161.25 | Mn | 1.95% | 0.0240% |
| Cl | 1.70% | 0.0113% | Fe | 9132 | 131.03 | Zn | 1.54% | 0.0151% |
| S | 9674 | 75.11 | Cr | 6549 | 75.07 | S | 4569 | 44.04 |
| Al | 7618 | 545.31 | Mn | 4393 | 57.62 | Cr | 2369 | 108.85 |
| Cr | 5243 | 106.01 | Al | 2913 | 574.74 | P | 1307 | 57.79 |
| Pb | 4957 | 73.01 | Sn | 2077 | 24.57 | Cu | 1067 | 67.85 |
| Cu | 2025 | 133.90 | Cd | 984 | 15.42 | Ba | 318 | 7.45 |
| P | 900 | 52.04 | Bi | 775 | 32.50 | Sr | 156 | 4.77 |
| Sn | 226 | 7.07 | Cu | 707 | 168.85 | Zr | 120 | 3.93 |
| Rb | 150 | 7.21 | Rb | 451 | 16.31 | Sn | 85 | 4.71 |
| Ba | 119 | 4.73 | Sb | 315 | 13.74 | Pb | 54 | 9.53 |
| Sr | 103 | 5.05 | Mo | 206 | 9.53 | Nb | 31 | 2.78 |
| Bi | 91 | 10.68 | Zr | 197 | 6.46 | Rb | 12 | 2.70 |
| Sb | 87 | 6.14 | Y | 66 | 21.08 | Mo | 12 | 1.57 |
| Mo | 42 | 2.43 | | | | Y | 10 | 1.97 |
| Zr | 35 | 3.21 | | | | | | |
| Cd | 29 | 3.40 | | | | | | |

ตารางที่ ก.2 แสดงผลการเผาออกซิเดชันฝุ่นเหล็กด้วยเตา Carbolite ที่อุณหภูมิต่างๆ นาน 1 ชั่วโมงตามตารางที่ 4.2

| อุณหภูมิ 450 °C | | | อุณหภูมิ 900 °C | | |
|---|---|---|---|---|---|
| El | PPM | +/- | El | PPM | +/- |
| Fe | 32.93% | 0.1841% | Fe | 38.15% | 0.1615% |
| LE | 30.76% | 0.3680% | Zn | 21.77% | 0.0969% |
| Zn | 20.03% | 0.1145% | LE | 21.16% | 0.3037% |
| Ca | 4.59% | 0.0260% | Ca | 6.23% | 0.0270% |
| Mn | 3.55% | 0.0313% | Mn | 4.09% | 0.0320% |
| Si | 2.39% | 0.0272% | Si | 3.09% | 0.0309% |
| Cl | 1.67% | 0.0103% | Mg | 1.28% | 0.0698% |
| Al | 9688 | 570.44 | Al | 1.19% | 0.0635% |
| Mg | 9464 | 625.23 | Cl | 1.11% | 0.0064% |
| S | 8463 | 65.14 | S | 8621 | 61.04 |
| Cr | 5056 | 106.70 | Cr | 5697 | 112.46 |
| Pb | 4486 | 71.04 | Cu | 1490 | 157.73 |
| Cu | 1923 | 143.52 | P | 1283 | 65.65 |
| P | 870 | 55.12 | Ta | 922 | 275.25 |
| Sn | 207 | 7.27 | Pb | 548 | 28.09 |
| Rb | 142 | 7.47 | Sn | 223 | 7.67 |
| Ba | 135 | 4.93 | Ba | 143 | 5.06 |
| Bi | 130 | 11.63 | Bi | 113 | 7.95 |
| Sb | 95 | 6.94 | Sr | 100 | 5.41 |
| Sr | 89 | 5.07 | Sb | 89 | 7.35 |
| Mo | 41 | 2.67 | Mo | 47 | 2.86 |
| Zr | 31 | 3.24 | Rb | 45 | 5.14 |
| Cd | 28 | 3.57 | Zr | 37 | 3.26 |
| | | | Cd | 24 | 3.63 |

ตารางที่ ก.3 แสดงผลวิเคราะห์ XRF ของสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากการเผาฝุ่นเหล็กด้วยอัตราส่วนของถ่านแตกต่างกัน ตามตารางที่ 4.8

ฝุ่นเหล็ก:ถ่าน = 5:2

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 73.35% | 0.2289% |
| LE | 11.73% | 0.2614% |
| Pb | 5.98% | 0.0337% |
| S | 3.39% | 0.0134% |
| Si | 1.16% | 0.0177% |
| Cl | 9308 | 51.88 |
| Cu | 7513 | 175.27 |
| Cr | 6928 | 67.80 |
| Al | 5375 | 460.63 |
| Mn | 4431 | 49.55 |
| Mg | 3592 | 624.48 |
| Ta | 1707 | 388.95 |
| Sn | 1543 | 19.66 |
| Ca | 1502 | 26.08 |
| Bi | 822 | 38.56 |
| Fe | 342 | 63.68 |
| Mo | 248 | 10.34 |
| Zr | 217 | 7.23 |
| Rb | 181 | 12.28 |
| Y | 137 | 25.82 |
| Cd | 29 | 5.16 |

ฝุ่นเหล็ก:ถ่าน = 5:1

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 79.32% | 0.2424% |
| LE | 11.30% | 0.2573% |
| Pb | 2.22% | 0.0202% |
| Cu | 1.85% | 0.0202% |
| Si | 1.18% | 0.0189% |
| S | 1.10% | 0.0062% |
| Al | 7213 | 509.91 |
| Cr | 6485 | 61.54 |
| Cl | 5776 | 39.90 |
| Mn | 3971 | 42.67 |
| Mg | 2458 | 725.17 |
| Ca | 1889 | 25.35 |
| Bi | 899 | 26.72 |
| Sn | 794 | 15.28 |
| Mo | 323 | 11.38 |
| Zr | 231 | 5.60 |
| Rb | 175 | 9.10 |
| Y | 53 | 16.73 |
| Cd | 18 | 4.96 |

ตารางที่ ก.4 แสดงผล XRF ของตะกรันที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 $^{o}$C นาน 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนฝุ่นเหล็ก:ถ่าน เท่ากับ 5:2 เปรียบเทียบกับตะกรันของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ตามตารางที่ 4.9

จากการทดลอง

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| LE | 63.31% | 0.2452% |
| Fe | 16.22% | 0.1132% |
| Si | 7.23% | 0.0563% |
| Al | 2.76% | 0.0617% |
| Ca | 2.73% | 0.0186% |
| Mn | 2.39% | 0.0253% |
| S | 2.06% | 0.0146% |
| Mg | 1.04% | 0.0472% |
| Zn | 1.04% | 0.0106% |
| Cl | 3427 | 37.06 |
| Cr | 2983 | 104.33 |
| Cu | 2640 | 65.69 |
| P | 1422 | 48.80 |
| Pb | 1031 | 22.46 |
| Sn | 198 | 5.03 |
| Rb | 153 | 4.77 |
| As | 75 | 17.45 |
| Ba | 72 | 6.03 |
| Mo | 67 | 2.01 |
| Sr | 60 | 2.57 |
| Zr | 46 | 2.16 |
| Sb | 28 | 4.11 |
| Nb | 15 | 1.94 |
| Y | 15 | 2.67 |
| Bi | 13 | 4.39 |

บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| LE | 42.37% | 0.3286% |
| Fe | 29.15% | 0.1815% |
| Si | 10.18% | 0.0694% |
| Ca | 6.68% | 0.0410% |
| Mg | 3.89% | 0.2502% |
| Al | 3.23% | 0.0598% |
| Mn | 1.95% | 0.0240% |
| Zn | 1.54% | 0.0151% |
| S | 4569 | 44.04 |
| Cr | 2369 | 108.85 |
| P | 1307 | 57.79 |
| Cu | 1067 | 67.85 |
| Ba | 318 | 7.45 |
| Sr | 156 | 4.77 |
| Zr | 120 | 3.93 |
| Sn | 85 | 4.71 |
| Pb | 54 | 9.53 |
| Nb | 31 | 2.78 |
| Rb | 12 | 2.70 |
| Mo | 12 | 1.57 |
| Y | 10 | 1.97 |

ตารางที่ ก.5 แสดงผลวิเคราะห์ XRF ของฝุ่นสังกะสีออกไซด์ที่เก็บได้จากการเผาสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ตามตารางที่ 4.10

จากการทดลอง

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 69.47% | 0.2610% |
| LE | 13.66% | 0.3115% |
| Pb | 7.33% | 0.0417% |
| S | 3.53% | 0.0158% |
| Cl | 9180 | 56.63 |
| Si | 7859 | 162.04 |
| Cr | 7176 | 80.92 |
| Sn | 5865 | 42.73 |
| Ca | 5840 | 42.15 |
| Al | 4693 | 479.84 |
| Cu | 4616 | 178.48 |
| Mg | 4448 | 679.58 |
| Ta | 4420 | 398.44 |
| Mn | 4210 | 53.73 |
| Bi | 802 | 43.48 |
| Mo | 240 | 9.71 |
| Zr | 199 | 8.04 |
| Sb | 189 | 11.89 |
| Rb | 176 | 13.61 |
| Cd | 169 | 7.85 |
| Y | 87 | 29.01 |

บริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 71.41% | 0.2852% |
| LE | 14.54% | 0.3355% |
| Pb | 3.40% | 0.0270% |
| Cl | 3.19% | 0.0146% |
| S | 2.54% | 0.0128% |
| Ca | 1.11% | 0.0066% |
| Si | 9290 | 161.25 |
| Fe | 9132 | 131.03 |
| Cr | 6549 | 75.07 |
| Mn | 4393 | 57.62 |
| Al | 2913 | 574.74 |
| Sn | 2077 | 24.57 |
| Cd | 984 | 15.42 |
| Bi | 775 | 32.50 |
| Cu | 707 | 168.85 |
| Rb | 451 | 16.31 |
| Sb | 315 | 13.74 |
| Mo | 206 | 9.53 |
| Zr | 197 | 6.46 |
| Y | 66 | 21.08 |

ตารางที่ ก.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการล้างสังกะสีออกไซด์ของบริษัท พี.เอส.พี.อุตสาหกรรมโลหะกิจ จำกัด ด้วยน้ำร้อนและกรดซัลฟูริก 0.5 Normal ตามตารางที่ 4.11

ไม่ล้าง (ไอ)

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 71.41% | 0.2852% |
| LE | 14.54% | 0.3355% |
| Pb | 3.40% | 0.0270% |
| Cl | 3.19% | 0.0146% |
| S | 2.54% | 0.0128% |
| Ca | 1.11% | 0.0066% |
| Si | 9290 | 161.25 |
| Fe | 9132 | 131.03 |
| Cr | 6549 | 75.07 |
| Mn | 4393 | 57.62 |
| Al | 2913 | 574.74 |
| Sn | 2077 | 24.57 |
| Cd | 984 | 15.42 |
| Bi | 775 | 32.50 |
| Cu | 707 | 168.85 |
| Rb | 451 | 16.31 |
| Sb | 315 | 13.74 |
| Mo | 206 | 9.53 |
| Zr | 197 | 6.46 |
| Y | 66 | 21.08 |

น้ำร้อน

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 71.79% | 0.3168% |
| LE | 17.87% | 0.3549% |
| Pb | 2.93% | 0.0242% |
| S | 1.72% | 0.0097% |
| Cl | 1.45% | 0.0079% |
| Si | 9450 | 168.96 |
| Fe | 6295 | 101.16 |
| Cr | 6119 | 66.15 |
| Al | 5736 | 478.73 |
| Mn | 4015 | 48.74 |
| Mg | 3338 | 667.17 |
| Ca | 2123 | 26.98 |
| Sn | 2085 | 23.42 |
| Cu | 1113 | 153.25 |
| Bi | 852 | 29.04 |
| Cd | 270 | 8.38 |
| Sb | 270 | 12.89 |
| Mo | 231 | 9.97 |
| Zr | 220 | 6.04 |
| Rb | 196 | 10.43 |
| Y | 104 | 18.50 |

น้ำร้อน + 0.5 N $H_2SO_4$

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 58.21% | 0.3832% |
| LE | 29.60% | 0.4586% |
| S | 4.57% | 0.0314% |
| Pb | 2.70% | 0.0255% |
| Si | 8729 | 167.07 |
| Fe | 5928 | 101.13 |
| Al | 5654 | 495.48 |
| Cl | 5613 | 52.87 |
| Mg | 5358 | 704.32 |
| Cr | 5350 | 69.93 |
| Mn | 3428 | 49.01 |
| Ta | 3165 | 320.58 |
| Ca | 1885 | 28.25 |
| Sn | 1836 | 22.45 |
| Bi | 668 | 26.01 |
| As | 499 | 143.26 |
| Sb | 193 | 10.17 |
| Mo | 192 | 7.83 |
| P | 156 | 40.87 |
| Zr | 154 | 5.03 |
| Cd | 151 | 6.48 |
| Rb | 128 | 8.47 |
| Y | 50 | 16.06 |

ตารางที่ ก.7 แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ และเวลาเผาต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.16

A

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 75.45% | 0.3069% |
| LE | 17.24% | 0.3329% |
| Si | 3.45% | 0.0303% |
| Al | 9104 | 481.02 |
| Fe | 7465 | 99.70 |
| Cr | 5616 | 57.82 |
| Mn | 3679 | 42.11 |
| Cl | 3404 | 31.60 |
| Sn | 2352 | 24.46 |
| Cu | 2069 | 146.63 |
| Ca | 1533 | 22.61 |
| Bi | 792 | 11.68 |
| Zr | 649 | 11.33 |
| S | 569 | 22.46 |
| P | 333 | 39.85 |
| Pb | 273 | 32.76 |
| Sb | 262 | 11.63 |
| Mo | 228 | 10.80 |
| Cd | 165 | 7.00 |
| Rb | 159 | 6.47 |

B

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 76.10% | 0.2900% |
| LE | 15.72% | 0.3124% |
| Si | 3.01% | 0.0278% |
| Al | 1.15% | 0.0501% |
| Fe | 9350 | 110.41 |
| Cr | 5679 | 56.89 |
| Pb | 5100 | 93.91 |
| S | 3928 | 37.21 |
| Mn | 3819 | 43.18 |
| Cl | 3626 | 32.68 |
| Mg | 2762 | 634.08 |
| Ca | 1946 | 24.52 |
| Cu | 1469 | 149.57 |
| Bi | 839 | 16.05 |
| Sn | 576 | 12.78 |
| P | 295 | 39.96 |
| Mo | 235 | 10.43 |
| Zr | 215 | 4.44 |
| Rb | 176 | 7.49 |
| Sb | 167 | 10.26 |

C

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 76.61% | 0.2744% |
| LE | 15.45% | 0.2949% |
| Si | 3.40% | 0.0283% |
| Al | 1.08% | 0.0461% |
| Fe | 9677 | 107.27 |
| Cr | 5779 | 55.55 |
| Mn | 3791 | 41.04 |
| Cl | 3148 | 29.08 |
| Mg | 2912 | 576.07 |
| Ca | 2225 | 23.81 |
| S | 1592 | 25.75 |
| Cu | 1513 | 145.15 |
| Pb | 1000 | 45.51 |
| Bi | 787 | 11.96 |
| Zr | 787 | 12.39 |
| P | 481 | 39.04 |
| Sn | 254 | 9.49 |
| Mo | 242 | 10.99 |
| Rb | 165 | 6.54 |
| Sb | 154 | 9.63 |

D

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 80.33% | 0.2612% |
| LE | 13.15% | 0.2707% |
| Si | 2.23% | 0.0235% |
| Al | 8076 | 465.08 |
| Fe | 7557 | 98.23 |
| Cr | 6061 | 56.67 |
| Mn | 3879 | 41.60 |
| Cl | 3661 | 30.85 |
| Ca | 2632 | 25.20 |
| Sn | 2388 | 23.94 |
| Mg | 2069 | 627.07 |
| Ta | 1628 | 379.35 |
| S | 1181 | 24.78 |
| Pb | 932 | 46.33 |
| Bi | 850 | 11.35 |
| Cu | 539 | 152.94 |
| Mo | 312 | 11.24 |
| Sb | 304 | 11.78 |
| Zr | 210 | 3.70 |
| P | 199 | 38.10 |
| Cd | 194 | 7.24 |
| Rb | 181 | 6.88 |

I

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 78.21% | 0.2958% |
| LE | 15.57% | 0.3105% |
| Si | 2.43% | 0.0254% |
| Al | 7549 | 478.45 |
| Fe | 6992 | 95.98 |
| Cr | 5758 | 55.78 |
| Mn | 3772 | 41.34 |
| Cl | 3630 | 31.93 |
| Sn | 2326 | 24.15 |
| Mg | 2302 | 673.57 |
| Ca | 1482 | 22.09 |
| Cu | 1097 | 150.45 |
| Bi | 848 | 11.84 |
| S | 552 | 22.52 |
| Pb | 476 | 37.86 |
| Sb | 272 | 11.76 |
| Mo | 265 | 10.88 |
| Cd | 239 | 8.09 |
| Zr | 209 | 3.86 |
| Rb | 168 | 6.54 |

J

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 76.88% | 0.3073% |
| LE | 16.50% | 0.3243% |
| Si | 2.50% | 0.0257% |
| Al | 8407 | 479.05 |
| Fe | 7151 | 97.73 |
| Cr | 5786 | 57.04 |
| Mn | 3783 | 42.48 |
| Cl | 3550 | 32.03 |
| Mg | 3021 | 660.05 |
| Sn | 2261 | 23.92 |
| Ca | 1478 | 22.29 |
| Ta | 1213 | 371.49 |
| Pb | 1029 | 47.78 |
| S | 836 | 23.77 |
| Bi | 823 | 12.55 |
| Cu | 599 | 150.30 |
| Mo | 283 | 10.71 |
| Cd | 263 | 8.16 |
| Sb | 254 | 11.71 |
| Zr | 203 | 3.91 |
| Rb | 172 | 6.54 |
| P | 129 | 37.74 |

K

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 78.13% | 0.2883% |
| LE | 15.33% | 0.3086% |
| Si | 2.04% | 0.0229% |
| Al | 8530 | 472.55 |
| Fe | 7773 | 101.24 |
| Cr | 5897 | 58.03 |
| Pb | 4888 | 92.59 |
| Mn | 3917 | 43.58 |
| Cl | 3772 | 32.26 |
| S | 3214 | 33.74 |
| Sn | 2291 | 23.94 |
| Ca | 1328 | 21.59 |
| Cu | 1259 | 151.13 |
| Bi | 872 | 16.38 |
| Sb | 255 | 11.67 |
| Mo | 243 | 10.77 |
| P | 232 | 38.28 |
| Zr | 217 | 4.49 |
| Rb | 171 | 7.30 |
| Cd | 143 | 6.81 |
| Sr | 25 | 7.21 |

L

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 81.87% | 0.2514% |
| LE | 12.17% | 0.2585% |
| Si | 1.24% | 0.0184% |
| Al | 8013 | 476.49 |
| Fe | 7953 | 100.58 |
| Cr | 6105 | 56.05 |
| Pb | 5721 | 100.08 |
| Mn | 3981 | 42.01 |
| Cl | 3844 | 31.60 |
| S | 3548 | 34.51 |
| Mg | 3121 | 670.20 |
| Sn | 1448 | 18.98 |
| Bi | 921 | 16.94 |
| Ca | 828 | 19.79 |
| Cu | 730 | 155.16 |
| Mo | 312 | 11.59 |
| Zr | 213 | 4.12 |
| Sb | 184 | 10.66 |
| Rb | 180 | 7.48 |
| P | 146 | 37.62 |
| Cd | 42 | 5.09 |

M

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 84.88% | 0.2174% |
| LE | 9.68% | 0.2176% |
| Si | 7980 | 158.57 |
| Fe | 7891 | 100.56 |
| Al | 7500 | 475.62 |
| Cr | 6155 | 54.80 |
| Cl | 4356 | 32.49 |
| Mn | 4154 | 42.69 |
| Pb | 3511 | 81.56 |
| Sn | 2405 | 24.24 |
| Mg | 2319 | 669.36 |
| S | 2236 | 29.63 |
| Cu | 2176 | 158.58 |
| Ca | 1612 | 22.23 |
| Bi | 953 | 16.24 |
| Mo | 289 | 12.05 |
| Sb | 264 | 11.78 |
| Zr | 231 | 4.34 |
| Rb | 196 | 7.71 |
| Cd | 156 | 7.30 |

N

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 82.47% | 0.2475% |
| LE | 11.81% | 0.2598% |
| Si | 1.20% | 0.0186% |
| Fe | 7319 | 99.48 |
| Al | 7130 | 478.95 |
| Cr | 6089 | 56.96 |
| Pb | 5549 | 100.82 |
| Cl | 4324 | 33.64 |
| Mn | 4029 | 43.07 |
| S | 3504 | 35.09 |
| Sn | 2148 | 23.43 |
| Ca | 1497 | 22.50 |
| Cu | 1394 | 158.11 |
| Bi | 897 | 17.13 |
| Mo | 306 | 11.89 |
| Sb | 251 | 11.81 |
| Zr | 223 | 4.52 |
| P | 202 | 39.50 |
| Rb | 192 | 7.98 |
| Cd | 102 | 6.56 |

O

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 81.26% | 0.2628% |
| LE | 12.93% | 0.2723% |
| Si | 9154 | 161.74 |
| Pb | 7497 | 113.88 |
| Fe | 7423 | 98.29 |
| Al | 6317 | 447.52 |
| Cr | 6055 | 56.16 |
| S | 5003 | 39.86 |
| Cl | 4223 | 32.82 |
| Mn | 3961 | 41.89 |
| Mg | 2221 | 630.55 |
| Cu | 1551 | 153.40 |
| Sn | 1466 | 18.98 |
| Ca | 1160 | 20.67 |
| Bi | 902 | 18.04 |
| Mo | 294 | 11.53 |
| Sb | 237 | 11.18 |
| Zr | 224 | 4.50 |
| P | 199 | 37.51 |
| Rb | 188 | 7.78 |
| Cd | 59 | 5.42 |

P

| El | PPM | +/- |
|---|---|---|
| Zn | 81.79% | 0.2600% |
| LE | 12.90% | 0.2728% |
| Si | 8311 | 156.74 |
| Fe | 7307 | 97.38 |
| Al | 6825 | 454.10 |
| Cr | 6109 | 56.49 |
| Pb | 6064 | 103.30 |
| Cl | 4202 | 32.62 |
| S | 4054 | 36.32 |
| Mn | 3964 | 41.77 |
| Cu | 1724 | 154.10 |
| Sn | 1254 | 17.76 |
| Ca | 1170 | 20.65 |
| Bi | 926 | 17.70 |
| Mo | 306 | 11.80 |
| Sb | 247 | 11.19 |
| P | 239 | 38.07 |
| Zr | 223 | 4.32 |
| Rb | 183 | 7.52 |
| Cd | 31 | 5.09 |

ตารางที่ ก.7 แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบสังกะสีออกไซด์ที่เหลืออยู่ในเบ้าภายหลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ สัดส่วนถ่านต่อฝุ่นสังกะสีออกไซด์ต่าง ๆ และเวลาเผาต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.16 (ต่อ)

| Q | | | R | | | S | | | T | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| El | PPM | +/- | El | PPM | +/- | El | PPM | +/- | El | PPM | +/- |
| Zn | 74.98% | 0.3079% | Zn | 77.28% | 0.2914% | Zn | 78.18% | 0.2540% | Zn | 75.01% | 0.3138% |
| LE | 17.41% | 0.3311% | LE | 15.67% | 0.3095% | LE | 13.02% | 0.2720% | LE | 17.56% | 0.3370% |
| Si | 3.09% | 0.0286% | Si | 2.44% | 0.0250% | Si | 2.65% | 0.0255% | Si | 2.12% | 0.0239% |
| Al | 9595 | 488.22 | Al | 9850 | 481.16 | Pb | 1.21% | 0.0143% | Al | 9995 | 497.43 |
| Fe | 7181 | 97.75 | Fe | 7160 | 97.20 | Al | 9757 | 485.37 | Pb | 8645 | 121.36 |
| Cr | 5740 | 57.92 | Cr | 5829 | 57.77 | Fe | 7684 | 102.46 | Fe | 7098 | 98.58 |
| Cl | 3770 | 32.85 | Cl | 3873 | 32.57 | S | 6485 | 45.67 | Cr | 5871 | 59.35 |
| Mn | 3715 | 42.14 | Mn | 3752 | 41.68 | Cr | 6071 | 59.62 | S | 4812 | 41.51 |
| Mg | 3377 | 663.20 | Mg | 3283 | 639.92 | Cl | 4250 | 33.87 | Cl | 4232 | 35.19 |
| Pb | 3000 | 72.43 | Pb | 3260 | 76.09 | Mn | 4014 | 44.51 | Mn | 3813 | 43.44 |
| Sn | 2321 | 23.99 | Sn | 2233 | 23.55 | Mg | 3379 | 634.53 | Sn | 2199 | 23.52 |
| S | 2004 | 28.89 | S | 2021 | 28.66 | Sn | 2438 | 24.38 | Mg | 2110 | 663.70 |
| Ca | 1690 | 22.98 | Ca | 1556 | 22.43 | Ca | 1628 | 23.39 | Ca | 1526 | 22.89 |
| Cu | 929 | 147.36 | Cu | 1067 | 150.30 | Cu | 1437 | 153.97 | Cu | 868 | 148.59 |
| Bi | 793 | 13.73 | Bi | 865 | 14.77 | Bi | 860 | 20.90 | Bi | 834 | 18.72 |
| Sb | 262 | 11.44 | Mo | 294 | 10.94 | Sb | 274 | 11.86 | Mo | 254 | 10.42 |
| Mo | 245 | 10.22 | Sb | 278 | 11.65 | Mo | 260 | 10.93 | Sb | 249 | 11.45 |
| Zr | 199 | 3.90 | Cd | 237 | 7.95 | P | 237 | 38.84 | Cd | 207 | 7.41 |
| Cd | 167 | 7.11 | Zr | 202 | 3.79 | Zr | 217 | 4.84 | Zr | 205 | 4.43 |
| Rb | 164 | 6.63 | Rb | 181 | 7.23 | Cd | 180 | 7.58 | Rb | 164 | 7.46 |
| | | | P | 139 | 37.15 | Rb | 177 | 8.37 | | | |

# ภาคผนวก ข

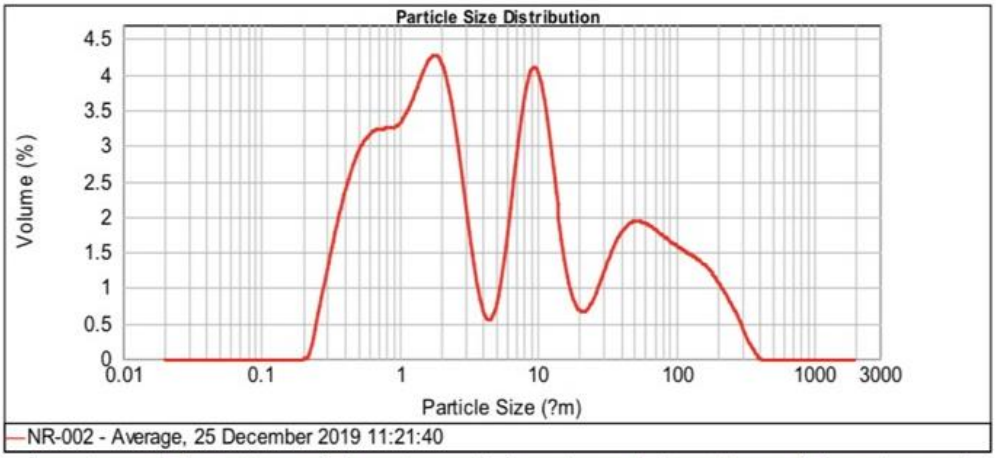
## ผลวิเคราะห์ขนาดของฝุ่นเหล็กด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Particle Size Distribution Analyzer) ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersizer 2000

MASTERSIZER 2000

# Result Analysis Report

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Sample Name:** NR-002 - Average | **SOP Name:** | **Measured:** 25 December 2019 11:21:40 | |
| **Sample Source & type:** | **Measured by:** User | **Analysed:** 25 December 2019 11:21:41 | |
| **Sample bulk lot ref:** | **Result Source:** Averaged | | |
| **Particle Name:** Kaolinite high | **Accessory Name:** Hydro 2000SM (A) | **Analysis model:** General purpose | **Sensitivity:** Normal |
| **Particle RI:** 1.570 | **Absorption:** 0.1 | **Size range:** 0.020 to 2000.000 um | **Obscuration:** 13.05 % |
| **Dispersant Name:** Water | **Dispersant RI:** 1.330 | **Weighted Residual:** 2.783 % | **Result Emulation:** Off |
| **Concentration:** 0.0040 %Vol | **Span :** 28.720 | **Uniformity:** 8.3 | **Result units:** Volume |
| **Specific Surface Area:** 3.83 m²/g | **Surface Weighted Mean D[3,2]:** 1.568 um | **Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 27.049 um | |

**d(0.1):** 0.539 um **d(0.5):** 3.109 um **d(0.9):** 89.844 um




| Size (?m) | Volume In % | Size (?m) | Volume In % | Size (?m) | Volume In % | Size (?m) | Volume In % | Size (?m) | Volume In % | Size (?m) | Volume In % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.010 | 0.00 | 0.105 | 0.00 | 1.096 | 3.18 | 11.482 | 2.72 | 120.226 | 1.31 | 1258.925 | 0.00 |
| 0.011 | 0.00 | 0.120 | 0.00 | 1.259 | 3.43 | 13.183 | 1.84 | 138.038 | 1.24 | 1445.440 | 0.00 |
| 0.013 | 0.00 | 0.138 | 0.00 | 1.445 | 3.70 | 15.136 | 1.13 | 158.489 | 1.15 | 1659.587 | 0.00 |
| 0.015 | 0.00 | 0.158 | 0.00 | 1.660 | 3.85 | 17.378 | 0.72 | 181.970 | 1.03 | 1905.461 | 0.00 |
| 0.017 | 0.00 | 0.182 | 0.00 | 1.905 | 3.75 | 19.953 | 0.60 | 208.930 | 0.87 | 2187.762 | 0.00 |
| 0.020 | 0.00 | 0.209 | 0.07 | 2.188 | 3.33 | 22.909 | 0.70 | 239.883 | 0.68 | 2511.886 | 0.00 |
| 0.023 | 0.00 | 0.240 | 0.57 | 2.512 | 2.64 | 26.303 | 0.95 | 275.423 | 0.48 | 2884.032 | 0.00 |
| 0.026 | 0.00 | 0.275 | 1.07 | 2.884 | 1.83 | 30.200 | 1.24 | 316.228 | 0.22 | 3311.311 | 0.00 |
| 0.030 | 0.00 | 0.316 | 1.58 | 3.311 | 1.07 | 34.674 | 1.49 | 363.078 | 0.04 | 3801.894 | 0.00 |
| 0.035 | 0.00 | 0.363 | 2.03 | 3.802 | 0.59 | 39.811 | 1.66 | 416.869 | 0.00 | 4365.158 | 0.00 |
| 0.040 | 0.00 | 0.417 | 2.40 | 4.365 | 0.53 | 45.709 | 1.74 | 478.630 | 0.00 | 5011.872 | 0.00 |
| 0.046 | 0.00 | 0.479 | 2.67 | 5.012 | 0.94 | 52.481 | 1.74 | 549.541 | 0.00 | 5754.399 | 0.00 |
| 0.052 | 0.00 | 0.550 | 2.84 | 5.754 | 1.73 | 60.256 | 1.69 | 630.957 | 0.00 | 6606.934 | 0.00 |
| 0.060 | 0.00 | 0.631 | 2.91 | 6.607 | 2.65 | 69.183 | 1.61 | 724.436 | 0.00 | 7585.776 | 0.00 |
| 0.069 | 0.00 | 0.724 | 2.93 | 7.586 | 3.41 | 79.433 | 1.53 | 831.764 | 0.00 | 8709.636 | 0.00 |
| 0.079 | 0.00 | 0.832 | 2.94 | 8.710 | 3.71 | 91.201 | 1.45 | 954.993 | 0.00 | 10000.000 | |
| 0.091 | 0.00 | 0.955 | 3.01 | 10.000 | 3.43 | 104.713 | 1.38 | 1096.478 | 0.00 | | |
| 0.105 | | 1.096 | | 11.482 | | 120.226 | | 1258.925 | | | |

**Operator notes:**

# ภาคผนวก ค

# กรรมวิธีประกอบโลหกรรมถลุงแร่สังกะสีบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

## กรรมวิธีประกอบโลหกรรมถลุงแร่สังกะสี
## บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

ขั้นตอนกรรมวิธีประกอบโลหกรรมโดยสรุปจะอยู่ใน "Padaeng Zinc Refinery Process Diagram – Zinc Ingot and Zinc Alloy Ingot Production" สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนต่างๆมีดังนี้

1. **การผลิตกรดกำมะถัน**

โรงผลิตกรดกำมะถันของบริษัทฯสามารถผลิตกรดกำมะกันที่มีความเข้มข้นร้อยละ 98.5 ได้สูงสุดวันละ 275 เมตริกตัน วิธีการผลิตคือหลอมกำมะถันด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสหรือใช้กำมะถันเหลวจากผู้จำหน่ายโดยตรง จากนั้นกำมะถันเหลวจะถูกสูบเข้าเตาสันดาปเพื่อให้กำมะถันทำปฏิกิริยากับอากาศแห้งจากหอทำอากาศแห้ง (Drying Tower) ได้เป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ($SO_2$) ที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสแล้วผ่านก๊าซดังกล่าวไปเข้าหอเร่งปฏิกิริยา (Converter) ซึ่งมีวานาเดียมเพนตอกไซด์ ($V_2O_5$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ($SO_2$) จะเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ($SO_3$) ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นที่เตาสันดาปจะถูกนำไปใช้ใน Waste Heat Boiler เพื่อผลิตไอน้ำ จากนั้นจึงผ่านก๊าซ $SO_3$ ที่ได้ไปยังหอผลิตกรด (Absorption Tower) ซึ่งน้ำในกรดกำมะถันเจือจางที่ผ่านเข้าไปจะดูดกลืนก๊าซ $SO_3$ ตามปฏิกิริยา $SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$ ให้เป็นกรดกำมะถันที่มีความเข้มข้นร้อยละ 98.5 จากนั้นจึงส่งไปยังถังเก็บกรดขนาด 2,500 เมตริกตัน จำนวน 2 ถัง ก๊าซที่ออกจากโรงผลิตกรดซึ่งปราศจาก $SO_3$ แต่มี $SO_2$ เหลือค้างอยู่จะผ่านเข้าสู่หอฟอกอากาศ (Wet Scrubber) ซึ่งใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารฟอกเพื่อดักจับ $SO_2$ ก่อนระบายออกสู่บรรยากาศทางปล่องควัน

2. **การผลิตโลหะสังกะสี**

แร่ที่ใช้ในกระบวนการผลิต แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ Calcine, Silicate Ore และ Zinc Oxide แร่ Calcine สามารถป้อนเข้ากระบวนการผลิตได้โดยตรง สำหรับแร่ Silicate Ore ต้องผ่านการบดเปียกให้แร่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน ก่อนป้อนเข้ากระบวนการผลิต ส่วน Zinc Oxide มีฟลูออไรด์สูงเกินค่ากำหนดของวัตถุดิบป้อน จึงไม่สามารถป้อนเข้ากระบวนการผลิตได้โดยตรงเนื่องจากจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตต่ำลง ดังนั้นจึงต้องทำการล้างฟลูออไรด์ออกก่อน

2.1 **การละลาย (Leaching)**

Calcine ที่ขนส่งมาจากโรงย่างแร่จังหวัดระยอง จะถูกลำเลียงเข้าสู่ถังเก็บ (Storage Bin) และลำเลียงต่อไปยังถังป้อน (Day Bin) เพื่อป้อนเข้าสู่ขั้นตอน Neutral Leaching ในขณะที่ Silicate Ore จะถูกป้อนเข้าโม่บดเพื่อลดขนาดแล้วป้อนเข้าขั้นตอน Silicate Leaching ส่วน Zinc Oxide จะล้างฟลูออไรด์ออกแล้วป้อนเข้าขั้นตอน Silicate Ore ขั้นตอนการละลายแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนย่อย คือ

เอกสารนี้ได้ผ่านการตรวจแล้ว เมื่อวันที่ ๒๗ ก.ย. ๒๕๕๕
ลงนาม.....วิศวกรโลหการ
(นางสาวฉวีวรรณ จันทร์เณร)
วิศวกรโลหการชำนาญการพิเศษ



PADAENG INDUSTRY PUBLIC COMPANY LIMITED
บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

2.1.1 ขั้นตอน Neutral Leaching

ในขั้นตอนนี้ประกอบด้วยถังปฏิกิริยา 4 ถัง ทำหน้าที่ในการละลายสังกะสีในรูปของ ZnO ที่อยู่ใน Calcine ออกมาให้มากที่สุด โดยใช้สารละลายอิเล็กโตรไลท์ที่ได้จากโรงแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้าและสารละลายที่ได้จากขั้นตอนการกำจัดเหล็ก ทำหน้าที่ในการปรับความเป็นกรด/ด่างให้เหมาะสม จากนั้นจะแยกสารละลายและตะกอนออกจากกันโดยใช้ถังตกตะกอนข้น (Thickener) 3 ตัวตกตะกอนต่อเนื่อง สารละลายส่วนที่ใสจะถูกส่งไปเข้าขั้นตอนการทำสารละลายให้บริสุทธิ์ (Cold purification 1) ส่วนที่เป็นตะกอนที่อยู่ในรูปของ Slurry จะถูกส่งไปเข้าขั้นตอน Low Acid Leaching ต่อไป

2.1.2 ขั้นตอน Low Acid Leaching

ในขั้นตอนนี้จะละลายสังกะสีในรูปของ $ZnO.Fe_2O_3$ ที่ไม่สามารถละลายได้ในขั้นตอน Neutral Leaching โดยการควบคุมให้ถังปฏิกิริยามีความเป็นกรด (Acidity) 15 กรัม/ลิตร และอุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส แล้วส่งไปเข้าถังตกตะกอนข้นเพื่อแยกเอาส่วนสารละลายใสไปเข้าขั้นตอน Jarosite Precipitation และแยกเอาส่วนที่เป็นตะกอนข้นไปเข้าขั้นตอน Hot Acid Leaching 1 ต่อไป

2.1.3 ขั้นตอน Hot Acid Leaching 1

ตะกอนข้นจากขั้นตอน Hot Acid Leaching 1 จะถูกส่งเข้าถังปฏิกิริยา 3 ถังต่อเนื่องกันซึ่งจะปรับความเป็นกรด 100-120 กรัม/ลิตร และอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นจะถูกส่งไปเข้าถังตกตะกอนข้น เพื่อแยกเอาส่วนสารละลายใสไปเข้าขั้นตอน Low Acid Leaching และแยกเอาส่วนที่เป็นตะกอนข้นไปเข้าขั้นตอน Hot Acid Leaching 2 ต่อไป

2.1.4 ขั้นตอน Hot Acid Leaching 2

ตะกอนข้นจากขั้นตอน Hot Acid Leaching 1 จะถูกส่งเข้าถังปฏิกิริยา 2 ถังต่อเนื่องกันซึ่งจะปรับความเป็นกรด 150 กรัม/ลิตร และอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วสังกะสีใน Calcine จะถูกสกัดออกมามากกว่าร้อยละ 99 จากนั้นจะถูกส่งไปเข้าถังตกตะกอนข้น เพื่อแยกเอาส่วนสารละลายใสกลับไปเข้าขั้นตอน Hot Acid Leaching1 และแยกเอาส่วนที่เป็นตะกอนข้นไปเข้าขั้นตอน Silver Cake Recovery ต่อไป

2.1.5 ขั้นตอน Silicate Leaching

Silicate Ore จะถูกบดให้ละเอียดในโม่บดชนิด Sag Mill อย่างต่อเนื่อง โดยผสมกับสารละลายสังกะสีจากขั้นตอน Neutral Leaching จากนั้นจะถูกป้อนเข้ากระบวนการ Silicate Leaching รวมกับสารละลายสังกะสีที่ส่งมาจากขั้นตอนต่างๆ เช่น จาก Zinc Oxide Leaching, Dross Leaching, Zinc Repulping และ Slurry ที่มีความเป็นกรดและอุณหภูมิสูงจากขั้นตอน Hot Acid Leaching 1 โดยควบคุมความเป็นกรดด้วย Basic Salt Slurry จากขั้นตอนการกำจัด Mg และน้ำออกจากกระบวนการ การผลิตในขั้นตอนนี้จะถูกควบคุมอุณหภูมิที่พอเหมาะโดยใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อน จากนั้น Slurry ทั้งหมดจะถูกส่งไปขั้นตอนการกำจัดเหล็กออกจากสารละลายต่อไป



PADAENG INDUSTRY PUBLIC COMPANY LIMITED
บริษัท ปาดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

2.2 <u>การกำจัดเหล็ก (Jarosite Precipitation)</u>

ในขั้นตอนของการละลายสังกะสีออกจากวัตถุดิบจะมีเหล็กและสารมลทินอื่นๆถูกละลายออกมาด้วย การกำจัดเหล็กจะใช้กระบวนการ Jarosite Precipitation โดยที่ Slurry จากขั้นตอน Silicate Leaching จะถูกส่งเข้าถังปฏิกิริยาที่ควบคุมความเป็นกรดและอุณหภูมิให้พอดี พร้อมกับเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เหล็กที่ละลายอยู่ในสารละลายจะตกตะกอนอยู่ในรูปของสารประกอบ Jarosite ($Na_2[Fe_6(SO_4)_4\ (OH)_{12}]$) และเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิด Jarosite จะมีกรดเกิดขึ้นด้วย จึงต้องมีการเติมสารที่ทำให้เป็นกลาง (Neutralizer) เพื่อกำจัดกรดส่วนเกินและควบคุมค่าความเป็นกรดให้มีค่าที่ค่อนข้างคงที่ตลอดเวลา Neutralizer ที่ใช้คือ Limestone บด และน้ำปูนขาว กากตะกอน Jarosite จากขั้นตอนนี้จะถูกส่งไปกรองแยกที่เครื่องกรองแบบสายพาน ซึ่งจะส่งกากเหล่านี้ไปสู่กระบวนการบำบัดกากแร่ (Residue Treatment) ส่วนสารละลายที่กรองได้จะส่งกลับไปเข้าขั้นตอน Neutral Leaching

2.3 <u>การกำจัด Mg และน้ำออกจากกระบวนการผลิต (Basic Salt Precipitation)</u>

สารละลายสังกะสีจะมี Mg ละลายออกมาด้วย ถ้า Mg ในสารละลายสูงจะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้าลดลง จึงต้องกำจัดออก โดยนำสารละลายสังกะสีบางส่วนมาเติมปูนขาวและหินปูนเพื่อให้โลหะสังกะสีในสารละลายตกตะกอนในรูป $3ZnO.ZnSO_4.xH_2O$ (Basic Salt) แล้วกรองตะกอนออกด้วยเครื่องกรองแบบสายพาน และส่ง Basic Salt Slurry กลับเข้าไปที่ขั้นตอน Silicate Leaching เพื่อละลายสังกะสีกลับเข้าสู่กระบวนการใหม่ ส่วนสารละลายที่มี Mg จะส่งไปบำบัดที่ขั้นตอนบำบัดน้ำเสียต่อไป ในขั้นตอนนี้นอกจาก Mg แล้ว ยังกำจัดน้ำส่วนเกินออกจากระบบอีกด้วย

2.4 <u>การทำสารละลายให้บริสุทธิ์ (Purification)</u>

ในขั้นตอนของการละลายสังกะสีออกจากวัตถุดิบจะมีสารมลทินเช่น Cd, Cu, Ni, Co, Sb, Ge ละลายออกมาพร้อมกับสังกะสีด้วย ซึ่งจำเป็นต้องมีกระบวนการในการกำจัดสารมลทินเหล่านี้ออก โดยแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนย่อย คือ

2.4.1 <u>ขั้นตอน Cold purification 1</u>

ขั้นตอนการผลิตนี้เป็นการกำจัด Cu ออกจากสารละลาย โดยการเติมฝุ่นสังกะสี (Zinc Dust) ในสารละลายที่ได้จากขั้นตอน Neutral Leaching ด้วยอัตราการเติม เวลา และอุณหภูมิที่เหมาะสม $Cu^{2+}$ จะเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับฝุ่นสังกะสี (Zinc Dust) และเข้าจับเกาะที่ผิวของฝุ่นสังกะสี เมื่อกรองแยกตะกอนและสารละลายออกจากกันด้วยเครื่องกรองแบบอัด ตะกอนที่ได้คือ Copper Cake ซึ่งจะถูกนำไปผลิตเป็น Copper cathode เพื่อจำหน่าย (ข้อ 3.1) ส่วนสารละลายสังกะสีที่ได้จะถูกส่งไปขั้นตอน Cold purification 2 ต่อไป



PADAENG INDUSTRY PUBLIC COMPANY LIMITED
บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

2.4.2 ขั้นตอน Cold purification 2

ขั้นตอนการผลิตนี้เป็นการกำจัด Cd ออกจากสารละลาย โดยการเติมฝุ่นสังกะสี (Zinc Dust) เข้าไปในสารละลายที่ได้จากขั้นตอน Cold Purification 1 ด้วยอัตราการเติม เวลา และอุณหภูมิที่เหมาะสม $Cd^{2+}$ จะเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับฝุ่นสังกะสีและเข้าจับเกาะที่ผิวของฝุ่นสังกะสี ในขณะที่สังกะสีจะละลายออกไปโดยมี $Cu^{2+}$ ที่ยังเหลืออยู่ในสารละลายเกิดปฏิกิริยาร่วมด้วย และเป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนของ Cd เกิดได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นสารละลายจะถูกส่งไปกรองแยกเอาตะกอนและสารละลายออกจากกันด้วยเครื่องกรองแบบอัด สารละลายสังกะสีที่ได้จะถูกส่งไปขั้นตอน Hot Purification ต่อไป ส่วนตะกอน Cd Cake ที่ได้จะส่งไปขั้นตอน Zinc Repulping (ข้อ 2.5)

2.4.3 ขั้นตอน Hot Purification

สารละลายจากขั้นตอน Cold Purification 2 จะถูกส่งเข้ากระบวนการผลิตในขั้นตอนนี้เพื่อทำการกำจัด Co, Ni, Ge, Sb ออกจากสารละลายด้วยการเติมฝุ่นสังกะสีและสารเคมีเสริม คือ $CuSO_4$ จากขั้นตอนการละลาย Copper cake ของกระบวนการผลิต Copper Cathode, $Sb_2O_3$, $3PbO.PbSO_4$ โดยควบคุมให้มีอุณหภูมิสูงและเวลาที่เหมาะสม จากนั้นจะกรองด้วยเครื่องกรองแบบอัด ตะกอน Ni-Co ที่ได้ซึ่งยังมีโลหะสังกะสีสูงนั้นจะถูกนำไปกวนผสมกับน้ำจากการล้างผ้ากรองและสารละลาย Hot purification แล้วส่งกลับไปป้อนเข้าที่ขั้นตอน Cold purification 2 อีกครั้งหนึ่ง ส่วนสารละลายสังกะสีที่ได้จะถูกส่งไปเข้าถังตกตะกอนขนาดเล็ก (Settler) เพื่อแยกตะกอนยิปซั่มออกในเบื้องต้น จากนั้นทำการปรับให้มีความเป็นกรดเล็กน้อย เพื่อป้องกันไม่ให้สังกะสีตกตะกอนเมื่ออุณหภูมิลดลง และส่งผ่านเข้าหอลดอุณหภูมิ (Cooling tower) เพื่อลดอุณหภูมิของสารละลายลงก่อนที่จะปล่อยลงสู่ถังตกตะกอนขนาดใหญ่ (Super Settler) เพื่อทำการตกตะกอนแยกยิปซั่มอีกครั้งหนึ่ง สารละลายที่ได้จะถูกส่งไปเก็บไว้ในถังเก็บ (Purified Stock Tank) เพื่อรอป้อนเข้ากระบวนการแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้าต่อไป

2.5 **การละลายสังกะสีกลับเข้าสู่กระบวนการผลิต (Zinc Repulping)**

ตะกอนที่ได้จากขั้นตอน Cold Purification 2 นั้นจะมีสังกะสีเหลืออยู่ จึงจำเป็นต้องทำการละลายเอาสังกะสีเหล่านี้กลับเข้ากระบวนการผลิตใหม่ ตะกอนแต่ละชนิดจะถูกละลายโดยการควบคุมความเป็นกรดและเวลาให้พอเหมาะ สังกะสีจะถูกละลายออกมาโดยที่ Cd, Ni, Co, Ge และ Sb จะไม่ละลายออกมาด้วย จากนั้นจะกรองแยกตะกอนและสารละลายออกจากกันโดยใช้เครื่องกรองแบบอัด สารละลายที่ได้จะถูกส่งกลับไปเข้ากระบวนการผลิต โดยตะกอน Cd, Ni, Co, Ge และ Sb จะถูกส่งไปบำบัดและฝังกลบตามมาตรฐานที่กำหนด

2.6 **การแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้า**

สารละลายสังกะสีซัลเฟตที่ผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์แล้วจากถังเก็บ จะถูกส่งเข้าโรงเซลล์เฮ้าส์เพื่อแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้า โรงเซลล์เฮ้าส์ประกอบไปด้วยโรงเซลล์เฮ้าส์ 1 และโรงเซลล์เฮ้าส์ 2



RADAENG INDUSTRY PUBLIC COMPANY LIMITED
บริษัท มาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

โรงเซลล์เฮ้าส์ 1 ประกอบไปด้วยเซลล์ไฟฟ้า 2 แถวๆละ 36 บ่อเซลล์ รวมเป็น 72 บ่อเซลล์ แต่ละบ่อเซลล์ยาว 9.24 ม. กว้าง 1.33 ม. ลึกเฉลี่ย 2.50 ม. และประกอบไปด้วยแผ่น Cathode 101 แผ่นและแผ่น Anode 100 แผ่น มีพื้นที่ของแผ่น Anode ที่ให้สังกะสีจับเกาะ 3.20 ตร.ม.ต่อแผ่น

โรงเซลล์เฮ้าส์ 2 ประกอบไปด้วยเซลล์ไฟฟ้า 1 แถวมี 11 บ่อเซลล์ แต่ละบ่อเซลล์ยาว 4.26 ม. กว้าง 0.84 ม. ลึกเฉลี่ย 1.685 ม. และประกอบไปด้วยแผ่น Cathode 41 แผ่นและแผ่น Anode 40 แผ่น มีพื้นที่ของ Anode ที่ให้สังกะสีจับเกาะ 1.56 ตร.ม./แผ่น

แผ่น Anode เป็นตะกั่วเจือเงิน ซึ่งมีส่วนผสมของเงินร้อยละ 0.50 และแผ่น Cathode เป็นอลูมิเนียมบริสุทธิ์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ประมาณ 500 แอมแปร์/ตารางเมตร แรงเคลื่อนไฟฟ้า 3.50 โวลต์ สารละลายสังกะสีบริสุทธิ์จะถูกส่งเข้าไปผสมกับสารละลายอิเล็กโตรไลท์ที่ไหลเวียนตลอดเวลาและถูกปรับสภาพด้วยสารเคมีที่เติมเข้าไปให้เหมาะสม และผ่านเข้าไปในบ่อเซลล์ เมื่อไหลออกจากบ่อเซลล์ก็จะถูกส่งไปเก็บไว้ในถังสำหรับสารละลายไหลเวียน (Circulating tank) จากนั้นจะถูกส่งไปที่หอระบายความร้อนซึ่งติดตั้งอยู่บนหลังคาของโรงเซลล์เฮ้าส์ เพื่อลดอุณหภูมิของสารละลายลงมา ก่อนที่จะไหลกลับไปผสมกับสารละลายสังกะสีบริสุทธิ์และสารเคมีปรับสภาพ แล้วไหลกลับเข้าไปในบ่อเซลล์อีก สารละลายดังกล่าวจะไหลวนเวียนอยู่เช่นนี้หลายรอบก่อนที่ถูกส่งไปยังถังเก็บสารละลายอิเล็กโตรไลท์ที่ใช้แล้ว ปฏิกิริยาการแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้านี้จะทำให้ได้กรดกำมะถัน 1.5 หน่วยน้ำหนักต่อโลหะสังกะสี 1 หน่วยน้ำหนัก ดังนั้นสารละลายที่ใช้แล้วนี้จะสามารถนำกลับไปใช้ในขั้นตอนการสกัดได้ โดยผสมกับกรดกำมะถันเข้มข้นร้อยละ 98.5 ให้มีความเข้มข้นสูงขึ้นพอเหมาะเสียก่อน

กระแสไฟฟ้าจะผ่านจากแผ่น Anode เข้าสู่สารละลายไปยังแผ่น Cathode และเมื่อครบ 24-36 ชั่วโมงแล้ว จะมีโลหะสังกะสีจับเต็มแผ่น Cathode แต่ละแผ่นทั้ง 2 ด้าน ซึ่งจะถูกยกขึ้นจากบ่อเซลล์ไปจุ่มล้างสารละลายอิเล็กโตรไลท์ออกด้วยน้ำ แล้วจึงนำไปลอกแผ่นโลหะสังกะสีออกด้วยเครื่องลอกที่มีอยู่ 2 เครื่อง แต่ละเครื่องสามารถลอกสังกะสีออกจากแผ่น Cathodeได้ 132 แผ่น/ชั่วโมง ซึ่งจะได้แผ่นโลหะสังกะสีทั้งหมดประมาณ 300 เมตริกตัน/วัน แผ่นโลหะสังกะสีซึ่งเรียกว่าสังกะสีแคดโทด (Zinc Cathode) จะถูกนำไปหลอมและหล่อเป็นแท่ง ส่วนแผ่น Cathode ที่ผ่านการลอกเอาโลหะสังกะสีออกแล้ว จะถูกนำไปเข้าเครื่องขัดทำความสะอาดและตรวจหาข้อบกพร่องก่อนนำกลับไปใช้ในบ่อเซลล์ต่อไป

2.7 **<u>การหลอมและการหล่อโลหะ</u>**

แผ่นโลหะสังกะสีแคดโทดจะถูกนำไปหลอมในเตาไฟฟ้าชนิด Inductive Furnace ที่มีอยู่ 2 เตา ซึ่งมีกำลังการผลิตสูงสุดรวมกันเป็น 18.8 เมตริกตัน/ชั่วโมง โดยควบคุมอุณหภูมิในการหลอมอยู่ที่ประมาณ 480 องศาเซลเซียส และมีการสุ่มตัวอย่างไปตรวจวัดคุณภาพ โลหะสังกะสีแท่งที่นำเข้าจากต่างประเทศก็จะถูกนำเข้าหลอมในเตานี้ด้วยเช่นเดียวกัน

น้ำโลหะส่วนหนึ่งจะถูกปล่อยลงราง และไหลลงแบบหล่อบนสายพานซึ่งจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับการแข็งตัวของแท่งโลหะ และถูกพลิกลงสู่เครื่องจัดวางอัตโนมัติ (Stacking Machine) ซึ่งจะจัดวางซ้อน



PADAENG INDUSTRY PUBLIC COMPANY LIMITED
บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

กันเป็นตั้ง จากนั้นจึงทำการรัดให้แน่นด้วยลวดเหล็ก ชั่งน้ำหนักและส่งเข้าเก็บไว้ในคลังสินค้าเพื่อรอจำหน่ายต่อไป

น้ำโลหะอีกส่วนหนึ่ง จะถูกแบ่งไปเข้าเตาผสมซึ่งจะผสมด้วยโลหะอะลูมิเนียม แมกนีเซียม ทองแดง หรือโลหะอื่นๆ ตามสูตรกำหนดของโลหะสังกะสีผสมแต่ละชนิด แล้วทำการหล่อแท่ง รัดเป็นมัด ชั่งน้ำหนัก และส่งเข้าไปเก็บในคลังสินค้าเพื่อรอจำหน่าย

เถ้าโลหะ (Zinc Dross) ที่เกิดขึ้นจากการหลอมนั้น จะนำไปบดเพื่อแยกเศษโลหะนำกลับไปหลอมและผลิตเป็นฝุ่นสังกะสี ส่วนเถ้าที่แยกเศษโลหะออกแล้วจะนำไปล้างคลอไรด์ (Cl) ออกก่อน แล้วป้อนกลับเข้าไปในกระบวนการผลิตที่ขั้นตอน Silicate Leaching

สำหรับฝ้าโลหะ (Skim) ที่ปาดออกจากผิวหน้าขณะโลหะสังกะสีบริสุทธิ์แข็งตัวในแบบหล่อจะถูกนำกลับไปเข้าเตาหลอมใหม่ แต่ฝ้าโลหะจากการปาดออกจากผิวหน้าและตักออกจากเตาของสังกะสีผสม จะถูกทำให้เป็นก้อนแข็งและรวบรวมไว้เพื่อนำไปหลอมใหม่ในเตา Skim Recovery ซึ่งจะทำให้ได้โลหะมากกว่าร้อยละ 50 กลับมาป้อนกระบวนการหลอมและหล่อใหม่

2.8 <u>การหลอมโลหะสังกะสีผสมจากฝ้าโลหะ (Zinc Alloy Skim Recovery)</u>

ฝ้าโลหะสังกะสีผสมจะถูกนำมาหลอมใหม่ในเตาหลอมที่ใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) เป็นเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ ประมาณ 450 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราประมาณ 0.5 ตัน/ชั่วโมง ซึ่งน้ำโลหะที่ได้จะถูกหล่อเป็นแท่งด้วยอัตราการผลิตประมาณ 0.25 ตัน/ชั่วโมง และเก็บรวบรวมไว้เพื่อป้อนกลับเข้าสู่กระบวนการหลอมและหล่อสังกะสีผสมต่อไป

2.9 <u>การผลิตฝุ่นสังกะสี (Zinc Dust)</u>

ฝุ่นสังกะสีที่ใช้ในกระบวนการทำสารละลายให้บริสุทธิ์บางส่วนซื้อมาจากต่างประเทศในรูปของ Zinc Powder แต่ส่วนใหญ่ผลิตใช้เอง โดยการหลอมโลหะสังกะสีในเตาที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงสูบน้ำโลหะไปที่รางเพื่อให้ไหลลงในเบ้าซึ่งมีรูที่ก้นขนาดพอประมาณ น้ำโลหะจะไหลออกมาจากเบ้าลงมาเป็นสาย ขณะเดียวกันก็ทำการพ่น Compressed Air ขนาด 6 - 7 บาร์ ไปที่สายน้ำโลหะ แรงลมจะทำให้น้ำโลหะที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส กลายเป็นฝุ่นขนาด 75 – 150 ไมครอน ซึ่งจะตกลงสู่ถังลดแรงดัน (Expansion Chamber) จากนั้นฝุ่นสังกะสีจะถูกส่งไปที่ถังเก็บ และคัดขนาดด้วยตะแกรง ขนาด 100 เมช เพื่อแยกฝุ่นโลหะที่มีขนาดใหญ่กว่า 150 ไมครอนกลับไปหลอมใหม่ ส่วนฝุ่นที่ได้ขนาดจะถูก นำไปใช้ในขั้นตอนการทำสารละลายให้บริสุทธิ์ต่อไป ฝุ่นสังกะสีอีกส่วนหนึ่งซึ่งได้จากเครื่องกรองชนิดถุง (Bag Filter) ที่ติดตั้งอยู่กับถังลดแรงดันนั้นและมีขนาดเล็กมากนั้น ก็สามารถนำไปใช้งานที่ขั้นตอนการทำสารละลายให้บริสุทธิ์เช่นกัน อากาศที่ปราศจากฝุ่นโลหะแล้วจะถูกปล่อยออกทางปล่องระบายอากาศ



PADAENG INDUSTRY PUBLIC COMPANY LIMITED
บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

3. <u>การผลิตผลิตภัณฑ์พลอยได้</u>

ในแร่ Zinc Sulfide Concentrate ที่ใช้ผลิตเป็น Calcine จะมีโลหะมลทินที่มีมูลค่าปนอยู่บ้าง เช่น ทองแดง (Copper หรือ Cu) และ เงิน (Silver หรือ Ag) เป็นต้น จึงมีขั้นตอนเพื่อแยกโลหะเหล่านี้ออกจำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิด

3.1. <u>Copper Cathode</u>

ตะกอนทองแดง (Copper Cake) หลังจาก Repulp และกรองเอาสารละลายสังกะสีซัลเฟตคืนกลับไปเข้ากระบวนการผลิตสังกะสีแล้ว ตะกอนทองแดงที่ได้ซึ่งมีความเข้มข้นของทองแดงสูงขึ้นกว่าเดิมจะถูกนำไปผลิตเป็นโลหะทองแดงในรูป Copper Cathode แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนย่อย คือ

3.1.1 <u>ขั้นตอน Copper Cake Repulping</u>

ตะกอนทองแดง (Copper Cake) จะถูกล้างด้วยกรดกำมะถันเจือจาง หรือ Spent จากโรงเซลล์ไฟฟ้าแยกทองแดง เพื่อลดปริมาณสังกะสีที่ปนอยู่ในตะกอนทองแดงออก แยกตะกอนและสารละลายออกจากกันโดยเครื่องกรองแบบอัด สารละลายที่ได้จะถูกส่งกลับคืนกระบวนการผลิตสังกะสี ส่วนตะกอนจะถูกส่งไปสกัดในขั้นตอนละลายทองแดงจาก Copper Cake ต่อไป

3.1.2 <u>ขั้นตอนละลายตะกอนทองแดง (Copper Leaching)</u>

กากตะกอนทองแดงที่ได้ในขั้นตอน 3.1.1 จะถูกละลายด้วยกรดกำมะถันเจือจางและ Spent (pH 1.5-2.0) ภายใต้อุณหภูมิ 70°C ระยะเวลาประมาณ 27 ชั่วโมง และพ่นอากาศให้อยู่ในภาวะ Oxidation ช่วยให้การละลายของโลหะทองแดงใน Cake เร็วขึ้น สารละลายที่ได้จะถูกส่งไปยังถังตกตะกอน แยกตะกอนก้นถังไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบอัด แล้วส่งไปบำบัดร่วมกับกากแร่ก่อนฝังในบ่อฝังกลบ ส่วนสารละลายใสส่วนบนเป็นสารละลายทองแดงซัลเฟต ($CuSO_4$) มีองค์ประกอบทองแดง (Cu) ละลายอยู่ประมาณ 50 กรัม/ลิตร ใช้เป็นสารละลายป้อนบ่อเซลล์ไฟฟ้าเพื่อแยกทองแดงต่อไป

3.1.3 <u>ขั้นตอนแยกทองแดงด้วยไฟฟ้า (Copper Electrowinning)</u>

เซลล์ไฟฟ้าประกอบด้วยบ่อเซลล์จำนวน 17 บ่อ ต่อแบบอนุกรมกัน แต่ละบ่อประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (Electrodes) คือ แผ่นขั้วลบ (Cathode) ซึ่งทำด้วย Stainless Steel 316 L ขนาดความกว้าง X ยาว X หนา เท่ากับ 600 X 800 X 3 มม. จำนวน 26 แผ่น และแผ่นขั้วบวก (Anode) ทำด้วยตะกั่วเจือเงิน 0.5% จำนวน 27 แผ่น

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจาก Transformer rectifier ขนาด 4.5 kA ป้อนกระแสไฟฟ้าตรง (Direct Current) แรงเคลื่อนไฟฟ้า 50 โวลต์ ความเข้มกระแสบนแผ่น Cathode ประมาณ 200 แอมแปร์/ตารางเมตร ให้กับบ่อเซลล์ ทองแดงอิออนจะถูก reduced ที่แผ่นขั้วลบ cathode กลายเป็นโลหะทองแดงเกาะติดกับแผ่น cathode เมื่อครบเวลาจุ่ม 48 ชั่วโมง จึงทำการยกแผ่น cathode ออกมา ทำการลอกแผ่นทองแดงที่เกาะติดอยู่ออก ทองแดงคาโทดที่ได้มีความบริสุทธิ์เทียบเท่ามาตรฐานยุโรป BSEN 1978-1998



PADAENG INDUSTRY PUBLIC COMPANY LIMITED
บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

ชนิด Cu-CATH-2 Grade ส่วนสารละลายที่ออกจากบ่อเซลล์ หรือ Spent จะถูกส่งกลับไปในขั้นตอน 3.1.1 และ 3.1.2 ต่อไป

3.2 **ตะกอนเงิน (Silver Cake)**

3.2.1 หน่วยแยกตะกอนเงิน(Silver Cake Recovery)

ตะกอนข้นจากขั้นตอน Hot Acid Leaching 2 จะถูกส่งเข้าถังปฏิกิริยา 2 ถังต่อเนื่องกัน โดยปรับความเป็นกรดให้ลดลงเหลือ 10-15 กรัมต่อลิตร (pH 1.0-1.5) เพื่อไม่ให้มีความเป็นกรดสูงเกินไปที่จะกัดกร่อนอุปกรณ์การกรองในขั้นตอนต่อไป ด้วยการเติมสังกะสีออกไซด์ชนิดทุติยภูมิ จากนั้นจึงส่งไปเข้าเครื่องกรองชนิดอัด (Press filter) สารละลายสังกะสีที่ได้มีความเข้มข้นของฟลูโอไรด์ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จะถูกส่งไปเข้าหน่วยสกัดวัตถุดิบสังกะสีออกไซด์ชนิดทุติยภูมิพร้อมกับกำจัดฟลูโอไรด์ ส่วนตะกอนที่กรองได้จะถูกส่งไปเข้าถังกวนด้วยน้ำเพื่อล้างสารละลายสังกะสีที่ติดตะกอนมาออกไปอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นจึงถูกส่งไปเข้าเครื่องกรองชนิดอัดและบีบ (Press and squeeze filter) สารละลายที่กรองได้จะถูกส่งไปเข้าขั้นตอนตกตะกอนสังกะสีคืนกลับ (Basic Zinc Sulfate Precipitation) และตะกอนของแข็งที่กรองได้จะมีความชื้นประมาณร้อยละ 30 มีองค์ประกอบเป็น เงินซัลเฟต (Silver sulfate) ประมาณร้อยละ 0.3 และตะกั่วซัลเฟต (Lead sulfate) ประมาณร้อยละ 60 ซึ่งจะถูกนำไปผึ่งให้ความชื้นลดลงแล้วจำหน่ายต่อไป

**ตารางที่** 1 องค์ประกอบของตะกอนเงิน (Silver Cake)

| องค์ประกอบ | % |
|---|---|
| เงินซัลเฟต | 0.3 |
| สังกะสีซัลเฟต | 2.3 |
| เหล็กซัลเฟต | 2.4 |
| อะลูมิเนียมซัลเฟต | 4.3 |
| แคลเซียมซัลเฟต | 9.0 |
| แอนติโนมีซัลเฟต | 2.0 |
| ตะกั่วซัลเฟต | 60.0 |
| อื่น ๆ | 19.7 |
| รวม | 100 |



PADAENG INDUSTRY PUBLIC COMPANY LIMITED
บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

3.2.2 <u>หน่วยสกัดวัตถุดิบสังกะสีออกไซด์ชนิดทุติยภูมิและกำจัดฟลูโอไรด์ (Secondary Zinc Oxide Leaching and Fluoride Removal)</u>

สารละลายสังกะสีจาก 3.2.1 จะถูกส่งเข้าถังปฏิกิริยาที่ 1 พร้อมกับสังกะสีออกไซด์ชนิดทุติยภูมิ สารละลายกรดกำมะถันเจือจางและแมงกานีสไดออกไซด์ ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) 1.0-1.5 และ 80 องศาเซลเซียสเพื่อเปลี่ยนเฟอร์รัสอิออนไปเป็นเฟอร์ริคอิออน จากนั้นจึงถูกส่งไปเข้าถังปฏิกิริยาที่ 2 ที่มีสารละลายหินปูนบดและสารละลายปูนขาวให้มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เพิ่มเป็น 3.8-4.0 และ 80 องศาเซลเซียส เพื่อให้เฟอร์ริคอิออนตกตะกอนไปเป็นเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์พร้อมกับดูดซับฟลูโอไรด์ออกจากสารละลายไปด้วยประมาณร้อยละ 40 จากนั้นจะถูกส่งไปเข้าเครื่องกรองชนิดอัด (Press Filter) เพื่อแยกตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ซึ่งจะถูกส่งไปบำบัดพร้อมกับกากแร่ ส่วนสารละลายที่ได้จะถูกส่งต่อเข้าหน่วยกำจัดฟลูโอไรด์ซึ่งเป็นถังรูปทรงกระบอกบรรจุด้วย Activated Alumina ที่จะคอยดูดซับฟลูโอไรด์ออกจากสารละลายสังกะสี โดยที่สารละลายสังกะสีที่ไหลผ่านออกจากหน่วยกำจัดฟลูโอไรด์จะมีความเข้มข้นของ ฟลูโอไรด์ 20-50 มิลลิกรัมต่อลิตรจะถูกส่งไปเข้ากระบวนการ Silicate Leaching ต่อไป

---

เอกสารนี้ได้ผ่านการตรวจแล้ว เมื่อวันที่ 7 ก.ย. ๒๕๕๕

ลงนาม.....วิศวกรโลหการ

(นางสาวฉวีวรรณ จันทร์เณร)
วิศวกรโลหการชำนาญการพิเศษ



PADAENG INDUSTRY PUBLIC COMPANY LIMITED
บริษัท มาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

หนังสืออนุญาตของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ ที่ อกง5111/ 5480
ลงวันที่ ๒๘ ก.ย. ๒๕๕๕

# Padaeng Zinc Refinery Process Diagram
## Zinc Ingot and Zinc Alloy Ingot Production

เอกสารหมายเลขที่ 2.1
แนบท้ายบันทึกการเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มเติม
แผนผังและกรรมวิธีประกอบโลหกรรมครั้งที่ 1/2555
สำหรับใบอนุญาตประกอบโลหกรรมที่ 2/2527

CALCINE (ZnO)
CALCINE STORAGE BIN
Silicate Ore
GRINDING PLANT
HEAD TANK
$MnO_2$,$KMnO_4$
NEUTRAL LEACHING
Flocculant
THICKENER
O/F
U/F
LOW ACID LEACHING
HOT ACID LEACHING 1
HOT ACID LEACHING 2
$H_2SO_4$ 98.5%
ACID MIXING TANK
Washed ZnO
Ag CAKE NEUTRALIZATION
$ZnSO_4$ high F solution
Water
Ag CAKE WASHING
Zn rich water
Ag CAKE
F rich water
FLUORIDE REMOVAL
$ZnSO_4$ low F solution
SILICATE LEACHING
50% NaOH
JAROSITE PRECIPITATION
Flocculant
BELT FILTER
Residue
Filtrate
Lime
RESIDUE STABILIZATION
Treated Residue
RESIDUE POND
Lime Milk
WASTEWATER TREATMENT
THICKENER
Solid
Treated Waste Water
BUFFER POND
Lime
Limestone
BASIC SALT PRECIPITATION
BELT FILTER
Filtrate
WASTEWATER POND
SPENT
Neutral Solution
Zn Dust
COLD PURIFICATION 1
Filtrate
Zn – Cu Cake
COLD PURIFICATION 2
Zn–Cd Cake
Zn REPULPING
Cement powder
Solid
Cd Solidification & Stabilization
Cemented Cd pond
Zn repulping
Cu Cake
$H_2SO_4$ 98.5%
Cu Cake Leaching
Cu Cake Leaching
Zn dust
$CuSO_4$
$Sb_2O_3$
$3PbO.PbSO_4$
$CuSO_4$
Spent
Hot Purification
Cu Cell house
Cu Cathode
Zn-Cu-Ni Cake
Filtrate
Purified Solution
CELLHOUSE1
SPENT
CELLHOUSE2
Zn Cathode
SETTLER
O/F
GYPSUM
SUPER SETTLER
O/F
GYPSUM
$NH_4Cl$
MELTING/CASTING
ZINC DUST PLANT
Zn Dust
DROSS LEACHING
Dross
Molten Zinc
ZINC INGOT
Mg Al
Molten Zinc
ZINC ALLOY PREPARATION
Skim
CASTING
ZINC ALLOY
Skim remelting
Recoverd Zinc alloy

เอกสารนี้ได้ผ่านการตรวจแล้ว เมื่อวันที่ - ๗ ก.ย. ๒๕๕๕
ลงนาม.....วิศวกรโลหการ
(นางสาวฉวีวรรณ จันทร์เณร)
วิศวกรโลหการชำนาญการพิเศษ

PADAENG INDUSTRY PUBLIC COMPANY LIMITED
บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)
PADAENG INDUSTRY PUBLIC Co.,LTD.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| TITLE: Zn REFINERY PROCESS ( Zn SULFIDE ORE & Zn SILICATE ORE ) | | | | |
| DRWN. S.Anusek | CHECKED | APPROVED | SCALE Not to scale | DATE 10-5-12 |
| JOB. | Code P | Section 0 5 0 | Grp P 0 1 | Drawing No. 0 5 0 1 Rev 0 5 |
| FILE NAME | Benyat\ผังโลหการ\Zn Process01-05 | | | |