การนำอะลูมิเนียมกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ

นายศุภลักษณ์ ชัยภูริมาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Aluminium recycling from aluminium dross in secondary aluminium industry

Mr. Supaluk Chaipurimas

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำอะลูมิเนียมกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ
โดย	นายศุภลักษณ์ ชัยภูริมาศ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป ผาริโน)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(กัญญา เตมีย์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ศุภลักษณ์ ชัยภูริมาศ : การนำอะลูมิเนียมกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ (Aluminium recycling from aluminium dross in secondary aluminium industry) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.มนัสกร ราชากรกิจ, 90 หน้า.

ตะกรันอะลูมิเนียม (Aluminium Dross) จัดเป็นของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิที่ต้องมีการจัดการตามกฎหมาย เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของตะกรันที่ออกมาจากเตาหลอม พบว่า มีอะลูมิเนียมที่อยู่ในรูปอะลูมิเนียมออกไซด์อยู่ร้อยละ 70 หากสามารถนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาได้ นอกจากจะเป็นการลดต้นทุนในการผลิตแล้วยังเป็นการลดปริมาณของเสียที่จะต้องนำไปจัดการอีกด้วย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการนำอะลูมิเนียมกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมด้วยการใช้ความร้อนโดยเครื่องต้นแบบที่ผู้วิจัยจัดทำขึ้นซึ่งใช้เตาครูซิเบิลแกรไฟต์ (Graphite Crucible) ในการทดลอง แต่ละการทดลองจะใช้ตะกรันอะลูมิเนียม 5 กิโลกรัม ซึ่งตะกรันอะลูมิเนียมที่ใช้ในกระบวนการนำโลหะกลับคืนจะมี 2 ลักษณะ คือ ตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องและตะกรันอะลูมิเนียมร้อนที่ถูกกวาดออกจากเตาหลอมโลหะอะลูมิเนียมของโรงงาน ในการทดลองโดยใช้ตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องมาให้ความร้อนจนโลหะอะลูมิเนียมที่มีอยู่ในตะกรันละลาย สามารถนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาได้เฉลี่ยร้อยละ 40.42 โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้เวลาในการหลอมประมาณ 60 นาที และในการทดลองโดยใช้ตะกรันอะลูมิเนียมร้อนจะให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิลไว้ในช่วง 300-900 องศาเซลเซียส ก่อนนำตะกรันอะลูมิเนียมร้อนที่ถูกกวาดออกมาจากเตาหลอมของโรงงานมาใส่และกวนในทันที พบว่า ในปัจจัยที่อุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิลอยู่ระหว่าง 700-900 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการกวน 4 นาที สามารถนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาได้เฉลี่ยร้อยละ 44.36 โดยน้ำหนัก เมื่อนำโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากทั้งสองการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Optical Emission Spectrometer พบว่า โลหะที่ได้กลับคืนมาจากทั้งสองการทดลองมีองค์ประกอบของธาตุต่างๆคล้ายคลึงกันและมีโลหะอะลูมิเนียมอยู่ร้อยละ 97–99

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

5670411721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS:

SUPALUK CHAIPURIMAS: Aluminium recycling from aluminium dross in secondary aluminium industry. ADVISOR: ASST. PROF. MANASKORN RACHAKORNKIJ, Ph.D., 90 pp.

Aluminium dross, a byproduct from secondary aluminium production and a classified hazardous waste, has been regulated under Thai regulations. In this study, the dross contains more than 70% aluminium in the oxide form by weight. Recovery of aluminium metal from the dross can reduce production cost and reduce quantity of waste to be managed as well. The objective of this research was to study the process of the aluminium recycling from aluminium dross using a prototype graphite crucible designed by the researcher which was installed at an aluminium factory. The prototype graphite crucible utilizes a graphite crucible embedded in a specially designed heating unit. Each experiment used 5 kg of aluminium dross. Two types of dross were examined; aluminium dross at room temperature and hot skimmed aluminium dross from factory furnace. The aluminium dross extraction at room temperature aluminium recovery 40.42% by weight of aluminium within 60 minutes of melting time. As for the hot aluminium dross, each batch was skimmed out of the factory furnace and immediately poured into the preheated crucible. Preheating temperatures were set to vary from 300 to 900°C. Approximately 44.36% by weight aluminium was recovered with the preheating temperature of crucible furnace between 700 and 900°C with 4 minutes of stirring. Extraction samples from both types of aluminium dross had similar compositions and contained 97-99% aluminum metal when analyzed with an optical emission spectrometer.

Department: Environmental Engineering
Field of Study: Environmental Engineering
Academic Year: 2016

Student's Signature .....
Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และคุณกัญญา เตมีย์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทาง รวมทั้งช่วยเหลือและสนับสนุนในการวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณท่านคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ อันประกอบด้วยรองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ประธานคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล และรองศาสตราจารย์ ดร. ชนาธิป ผาริโน คณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นและแนวทางในการปรับปรุงเพิ่มเติมให้วิทยานิพนธ์นี้เกิดความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรบสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ และมอบความปรารถนาดีให้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดมา

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ ภายใต้โครงการจัดทำแนวปฏิบัติที่เป็นเลิศ (Best Practice) การบริหารจัดการของเสียจากอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม ที่สนับสนุนทุนในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว รวมทั้งพี่น้องและเพื่อนที่สนับสนุนส่งเสริมและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญรูป ..... ญ
สารบัญตาราง ..... ฏ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอะลูมิเนียม 5
2.2 โครงสร้างของอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม 8
2.3 กระบวนการการผลิตอะลูมิเนียม 10
2.3.1 การสกัดอะลูมินา 10
2.3.2 การหลอมหล่ออะลูมิเนียมปฐมภูมิ 12
2.3.3 การหลอมหล่ออะลูมิเนียมทุติยภูมิ 13
3.3.4 การแปรรูปอะลูมิเนียม 15
2.4 ชนิดของอะลูมิเนียม 18
2.5 อุตสาหกรรมอะลูมิเนียมในประเทศไทย 20
2.6 ฟลักซ์ 21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย....31
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย....31
3.1.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น....33
3.1.2 การเลือกโรงงานตัวอย่างที่จะศึกษา....34
3.1.3 การลงพื้นที่สำรวจและเก็บข้อมูล....34
3.1.4 การเตรียมอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือ....34
3.1.5 การดำเนินการทดลอง....35
3.1.6 การวิเคราะห์ตัวอย่าง....35
3.1.7 สรุปผลการทดลอง....36
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง....36
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการในห้องปฏิบัติการ....36
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสร้างเตาต้นแบบ....37
3.2.3 เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง....44
3.3 การดำเนินการทดลอง....45
3.3.1 ขั้นตอนการทดลองที่ 1 การทดลองในห้องปฏิบัติการ....46
3.3.2 ขั้นตอนการทดลองที่ 2 การทดลองด้วยเตาต้นแบบในพื้นที่โรงงาน....48
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการอภิปรายข้อมูล....51
4.1 องค์ประกอบของตะกรันอะลูมิเนียม....51
4.2 ผลการทดลองที่ 1 การหลอมตะกรันอะลูมิเนียมในห้องปฏิบัติการ....52
4.3 ผลการทดลองที่ 2 การหลอมตะกรันอะลูมิเนียมด้วยเครื่องต้นแบบในพื้นที่ของโรงงาน....53
4.3.1 ผลการทดลองที่ 2.1 การนำโลหะกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องด้วยเตาต้นแบบ....54

หน้า

4.3.2 ผลการทดลองที่ 2.2 การนำโลหะกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมร้อนด้วยเตาต้นแบบ 56
4.4 องค์ประกอบของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน 60
4.5 การเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิง.....61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 63
5.1 สรุปผลการวิจัย.....63
5.2 ข้อเสนอแนะ 64
รายการอ้างอิง 67
ภาคผนวก.....69
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....70
ภาคผนวก ข รายงานผลวิเคราะห์ตัวอย่าง.....76
ภาคผนวก ค รายละเอียดแสดงมาตรส่วนของเครื่องต้นแบบ 86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ปริมาณธาตุที่พบบนเปลือกโลก 5
รูปที่ 2.2 ภาพรวมโครงสร้างของอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม 9
รูปที่ 2.3 กระบวนการเบเยอร์ 11
รูปที่ 2.4 กระบวนการแยกอะลูมิเนียมของ Hall และ Heroult 13
รูปที่ 2.5 วงจรการหมุนเวียนของอะลูมิเนียม 14
รูปที่ 2.6 สัดส่วนกระบวนการผลิตระหว่างอะลูมิเนียมปฐมภูมิกับอะลูมิเนียมทุติยภูมิในประเทศจีน 14
รูปที่ 2.7 สัดส่วนการบริโภคอะลูมิเนียมของโลกจำแนกตามอุตสาหกรรม ปี 2011 15
รูปที่ 2.8 แบบหล่อแม่พิมพ์อะลูมิเนียม 15
รูปที่ 2.9 ล้อแม็กซ์อะลูมิเนียม 16
รูปที่ 2.10 การอัดรีดโดยตรง 16
รูปที่ 2.11 การอัดรีดโดยอ้อม 17
รูปที่ 2.12 อะลูมิเนียมแท่งแบนที่ใช้ในกระบวนการรีดแผ่น 17
รูปที่ 2.13 ฟลักซ์ 22
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันอะลูมิเนียม 23
รูปที่ 2.15 คุณสมบัติทางกายภาพของตะกรันอะลูมิเนียม 24
รูปที่ 2.16 Dross Press 25
รูปที่ 2.17 Rotary Drum 25
รูปที่ 2.18 ประเภทของเตาหลอมแบบต่างๆ 26
รูปที่ 2.19 เตาครูซิเบิล 28
รูปที่ 3.1 ตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมในโรงงาน 31
รูปที่ 3.2 ลักษณะของตะกรันที่เย็นตัวแล้ว 32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.3 ลักษณะของตะกรันที่ยังร้อนอยู่.....32
รูปที่ 3.4 แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....33
รูปที่ 3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ 37
รูปที่ 3.6 มาตราส่วนด้านข้างของชุดใบกวน 38
รูปที่ 3.7 มาตราส่วนด้านข้างของชุดเตาหลอม.....39
รูปที่ 3.8 ฐานของเครื่องต้นแบบ 42
รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกวน 42
รูปที่ 3.10 การสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการให้ความร้อนของเครื่องต้นแบบ.....43
รูปที่ 3.11 เครื่องต้นแบบสำหรับใช้ในการทดลองในพื้นที่โรงงาน 44
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการทดลองที่ 1 การทดลองในห้องปฏิบัติการ 47
รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการทดลองที่ 2.2 การทดลองในพื้นที่ของโรงงาน.....49
รูปที่ 4.1 โลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ 52
รูปที่ 4.2 เครื่องต้นแบบที่ติดตั้งภายในพื้นที่ของโรงงาน 54
รูปที่ 4.3 ตะกรันอะลูมิเนียมที่อยู่โรงเก็บตะกรันอะลูมิเนียมของโรงงาน.....54
รูปที่ 4.4 ผลการนำโลหะกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้อง 56
รูปที่ 4.5 ตะกรันอะลูมิเนียมที่ถูกกวาดออกมาจากเตาหลอมของโรงงาน.....56
รูปที่ 4.6 ขั้นตอนการเทน้ำโลหะอะลูมิเนียมลงในแม่พิมพ์.....57
รูปที่ 4.7 ร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ.....58
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างตะกรันอะลูมิเนียมหลังจากผ่านการทดลองที่อุณหภูมิเริ่มต้น ของเตาครูซิเบิล น้อยกว่า 300 องศาเซลเซียส.....59
รูปที่ 4.9 ตะกรันอะลูมิเนียมที่ลุกไหม้.....59
รูปที่ 4.10 โลหะที่นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer 60

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารประกอบที่พบบนเปลือกโลก.....6

ตารางที่ 2.2 ตารางการแบ่งเกรดของอะลูมิเนียมตามมาตรฐาน Aluminum association.....19

ตารางที่ 2.3 การใช้งานเตาหลอมแบบต่างๆในโรงงานผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ 27

ตารางที่ 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องต้นแบบ 40

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตะกรันอะลูมิเนียมด้วยเครื่อง XRF-EDX.....52

ตารางที่ 4.2 การหลอมตะกรันอะลูมิเนียมในห้องปฏิบัติการ 53

ตารางที่ 4.3 ตารางบันทึกผลการนำโลหะกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้อง 55

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์โลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน 60

ตารางที่ 4.5 การใช้เชื้อเพลิงของการทดลองที่ใช้ตะกรันอะลูมิเนียมร้อน.....61

ตารางที่ 4.6 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงต่อโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน.....62

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมนับว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนาและขับเคลื่อนประเทศให้มีความเจริญก้าวหน้า ทำให้เกิดการแข่งขันและพัฒนาอุตสาหกรรมในด้านต่างๆอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมการผลิตได้มีการใช้เครื่องมือต่างๆ ทั้งเทคโนโลยีในการผลิต การปรับปรุงกระบวนการผลิต การจัดการต่างๆภายในโรงงาน รวมไปถึงการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น เพื่อให้อุตสาหกรรมมุ่งการไปสู่ “การพัฒนาอย่างยั่งยืน”(Sustainable Development) ซึ่งถือเป็นเป้าหมายหลักในการพัฒนาอุตสาหกรรม ซึ่งสอดคล้องกับแผนแม่บทการพัฒนาอุตสาหกรรมไทย พ.ศ. 2555-2574

การจัดการของเสียเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญของการพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งแนวคิดของการจัดการของเสีย คือการใช้วัตถุดิบอย่างคุ้มค่าที่สุด โดยหลักเกณฑ์ในการจัดการของเสียนั้น เริ่มตั้งแต่การลดการเกิดของเสีย การนำกลับมาใช้ใหม่ ไปจนถึงการกำจัดหรือบำบัดของเสียอย่างเหมาะสม โดยการเลือกวิธีการจัดการของเสียนั้นก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น คุณสมบัติของของเสีย เทคโนโลยีการจัดการ ความยุ่งยากในการดำเนินการ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งผู้ผลิตแต่ละรายมีแนวทางในการจัดการที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการแข่งขันเพื่อยกระดับการจัดการของเสีย โดยกำหนดเกณฑ์ต่างๆขึ้นมาเพื่อใช้ในการรับรองมาตรฐานของผู้ผลิต

อุตสาหกรรมอะลูมิเนียมถือเป็นอุตสาหกรรมประเภทโลหการที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศ เนื่องจากอะลูมิเนียมถูกใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญหลากหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมไฟฟ้า อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายเป็นอันดับ 2 ของปริมาณโลหะทั้งหมดที่มีการนำมาใช้ประโยชน์รองจากเหล็กและเหล็กกล้า อีกทั้งยังมีแนวโน้มความต้องการที่สูงขึ้นทุกปี อันเนื่องมาจากคุณสมบัติที่ดีหลายประการของอะลูมิเนียม เช่น น้ำหนักเบา ไม่เป็นสนิม มีความยืดหยุ่นสูง จุดหลอมเหลวต่ำ ขึ้นรูปได้ง่าย ทำให้อะลูมิเนียมถูกนำไปแปรรูปเพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้อย่างหลากหลาย ทั้งอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆภายในบ้าน บรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนยานยนต์ และวัสดุอื่นๆอีกมากมาย โดยโครงสร้างของอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ อุตสาหกรรมต้นน้ำ อุตสาหกรรมกลางน้ำ และอุตสาหกรรมปลายน้ำ ปัจจุบันอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมในประเทศไทยยังไม่มีการประกอบกิจการอุตสาหกรรมต้นน้ำ ซึ่งเป็นการนำเอาสินแร่บอกไซต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหลัก นำมาผ่าน

กระบวนการถลุงจนได้เป็นผงอะลูมินาบริสุทธิ์ (Alumina, Al_2O_3) เพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์ตั้งต้นในอุตสาหกรรมกลางน้ำต่อไป ซึ่งอุตสาหกรรมกลางน้ำของอะลูมิเนียมจะแบ่งการหลอมหล่อออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. การหลอมหล่ออะลูมิเนียมขั้นปฐมภูมิ คือ การนำเอาอะลูมินาจากอุตสาหกรรมต้นน้ำมาผ่านกระบวนการถลุงด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) เพื่อให้ได้แท่งอะลูมิเนียม (Aluminium Ingot) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูง (Pure Aluminium) 2. การหลอมหล่ออะลูมิเนียมขั้นทุติยภูมิ คือ การนำเอาเศษอะลูมิเนียมที่เหลือจากกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมที่ใช้แล้ว หรือตะกรันอะลูมิเนียม (Aluminium Dross) ที่เกิดจากกระบวนการหลอมหล่อ มาผ่านกระบวนการคัดแยกสิ่งเจือปนออกแล้วจึงนำไปทำการหลอมและหล่อขึ้นรูปใหม่ได้เป็นแท่งอะลูมิเนียม

เนื่องจากประเทศไทยไม่มีแหล่งแร่บอกไซต์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการหลอมหล่อขั้นปฐมภูมิ อุตสาหกรรมอะลูมิเนียมกลางน้ำจึงถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมในประเทศไทย ซึ่งทั้งหมดเป็นการหลอมหล่ออะลูมิเนียมขั้นทุติยภูมิ ดังนั้นอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมที่มีอยู่ในประเทศไทยจึงเป็นการใช้วัตถุดิบที่นำเข้าจากต่างประเทศควบคู่ไปกับการนำเอาเศษอะลูมิเนียมที่ใช้แล้วภายในประเทศมาผ่านกระบวนการทางอุตสาหกรรมแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อผลิตเป็นอะลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆในอุตสาหกรรมปลายน้ำต่อไป จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า ประเทศไทยยังต้องพึ่งพาวัตถุดิบในการผลิตอะลูมิเนียมจากต่างประเทศ เพราะฉะนั้นเราจึงต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อก่อให้เกิดของเสียน้อยที่สุด และนำของเสียเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่หรือนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ให้มากที่สุด

ในกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมก่อให้เกิดของเสียที่สำคัญ คือ ตะกรันอะลูมิเนียม (Aluminium Dross) ซึ่งพบปัญหาการลักลอบทิ้งในประเทศไทยอยู่บ่อยครั้ง โดยตะกรันอะลูมิเนียมถูกจัดว่าเป็นของเสียอันตราย เนื่องจากเมื่อตะกรันอะลูมิเนียมสัมผัสกับน้ำหรือความชื้น จะก่อให้เกิดก๊าซแอมโมเนียซึ่งเป็นก๊าซพิษส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งระบบนิเวศน์และเป็นอันตรายต่อมนุษย์ โดยก๊าซแอมโมเนียจะทำลายระบบทางเดินหายใจและกัดกร่อนผิวหนัง ดังนั้นปัญหาการลักลอบทิ้งตะกรันอะลูมิเนียมจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรได้รับการแก้ไข สิ่งหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาลักลอบทิ้ง คือ การนำไปกำจัดอย่างถูกวิธีหรือการนำเอาตะกรันอะลูมิเนียมไปใช้ประโยชน์

ในงานวิจัยนี้ศึกษากระบวนนำอะลูมิเนียมกลับคืนมาจากตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ โดยการนำเอาตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตมาทำการทดลองด้วยการนำกลับมาหลอมใหม่ ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดลองในห้องปฏิบัติการเบื้องต้น และการทดลองด้วยเตาต้นแบบในพื้นที่ของโรงงานภายใต้สภาวะของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการหลอม โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้เป็นแนวทางให้แก่โรงงานผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ เพื่อนำอะลูมิเนียมที่อยู่ในตะกรันกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถช่วยในการลดปริมาณของเสียและนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด นอกจากนั้นแล้วตะกรัน

อะลูมิเนียมที่เหลือจะนำไปวิเคราะห์เพื่อศึกษาองค์ประกอบ สำหรับใช้เป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆต่อไป

ในการดำเนินงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในโครงการจัดทำแนวปฏิบัติที่เป็นเลิศ (Best Practice) การบริหารจัดการของเสียจากอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นโครงการที่เกิดขึ้นภายใต้กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ โดยมอบหมายให้ทางศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตรายเป็นผู้ดำเนินโครงการ ทั้งนี้ได้มีการนำอุปกรณ์ต้นแบบและผลการทดลองไปนำเสนอในการการสัมมนาและฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเมื่อวันที่ 17-18 ธันวาคม 2558 ณ โรงแรมคัลเลอร์ ลีฟวิ่ง จังหวัดสุมทรปราการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการบริการจัดการของเสียอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งเสริมและพัฒนาเทคโนโลยีในการรีไซเคิล ส่งผลให้อุตสาหกรรมอะลูมิเนียมนั้นสามารถนำของเสียกลับมาใช้ได้เกือบทั้งหมด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ประกอบของตะกรันอะลูมิเนียม

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยในการนำอะลูมิเนียมกลับคืนมาจากตะกรันอะลูมิเนียม

1.2.3 เพื่อพัฒนาเป็นแนวทางสำหรับโรงงานผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ ในการนำอะลูมิเนียมกลับคืนมาจากตะกรันอะลูมิเนียมต่อไป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะเป็นการนำตะกรันอะลูมิเนียมมาทำการหลอมใหม่ เพื่อนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมา โดยแบ่งการทดลองจะแบ่งตะกรันอะลูมิเนียมออกเป็นออกเป็น 2 แบบ คือ ตะกรันที่อุณหภูมิห้องและตะกรันร้อนที่ออกมาจากเตาหลอมของโรงงาน ซึ่งจะใช้เตาต้นแบบทำการทดลองในพื้นที่ของโรงงานตัวอย่าง ส่วนการทดลองเบื้องต้นจะทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดจะมีขอบเขตในการทดลอง ดังนี้

1.3.1 โรงงานตัวอย่างที่ทำการสำรวจ เก็บข้อมูล และทำการทดลอง เป็นที่มีกระบวนการผลิตที่ได้มาตรฐาน ผ่านการรับรองมาตรฐานต่างๆ เช่น ISO 9001 ISO 14001 และมีกระบวนการหลอมอะลูมิเนียมทุติยภูมิ

1.3.2 การทดลองในงานวิจัยนี้ จะใช้ตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นในเตาหลอมของโรงงานผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ

1.3.3 การทดลองที่ใช้ตะกรันอะลูมิเนียมที่เย็นตัวแล้ว จะใช้ตะกรันอะลูมิเนียม 5 กิโลกรัม และนำมาหลอมโดยให้ความร้อนเท่ากันเป็นเวลา 60 นาที เพื่อหาร้อยละของอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในแต่ละการทดลอง

1.3.4 การทดลองที่ใช้ตะกรันอะลูมิเนียมร้อน จะทำการศึกษาปัจจัย 2 ปัจจัย ที่ส่งผลต่อร้อยละของอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของเตาต้นแบบและเวลาที่ใช้ในการกวน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ข้อมูลองค์ประกอบของตะกรันอะลูมิเนียมจากเตาหลอมอะลูมิเนียมทุติยภูมิ

1.4.2 ทราบถึงปัจจัยต่างๆในการนำอะลูมิเนียมกลับคืนมาจากตะกรันอะลูมิเนียม

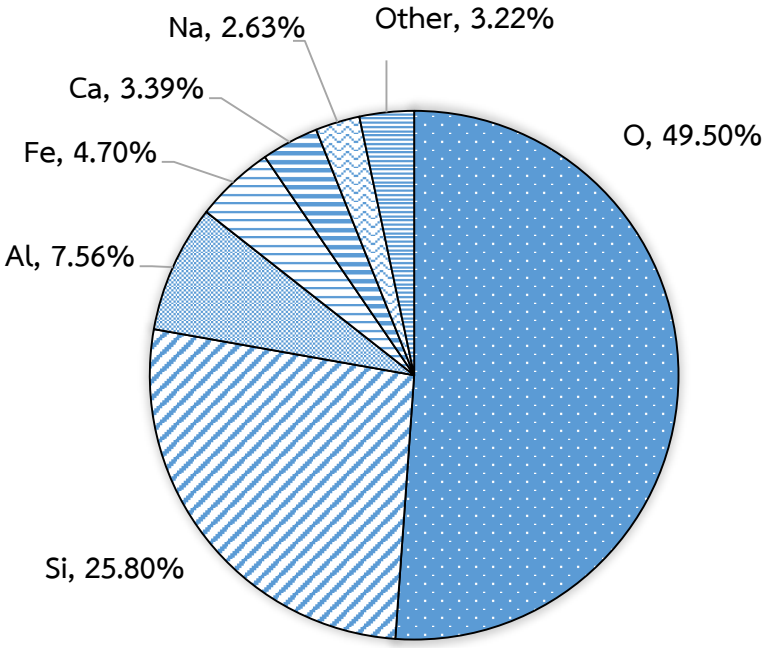
1.4.3 แนวทางสำหรับโรงงานผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิเพื่อพัฒนาการนำอะลูมิเนียมกลับคืนมาจากตะกรันอะลูมิเนียม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมจัดเป็นธาตุที่พบบนเปลือกโลกมากที่สุดเป็นอันดับที่สาม รองจากออกซิเจนและซิลิกอน และนับเป็นธาตุโลหะที่พบมากที่สุดบนเปลือกโลก (รูปที่ 2.1) เนื่องจากอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับธาตุอื่นๆได้ดี เราจึงไม่พบอะลูมิเนียมอยู่ในรูปของโลหะบริสุทธิ์ในธรรมชาติ โดยทั่วไปจะพบอะลูมิเนียมอยู่ในรูปของสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งอะลูมิเนียมออกไซด์นั้นเป็นองค์ประกอบสำคัญที่อยู่ในแร่บอกไซต์ (Wedepohl, 1995)



รูปที่ 2.1 ปริมาณธาตุที่พบบนเปลือกโลก
(Wedepohl, 1995)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารประกอบที่พบบนเปลือกโลก (Wedepohl, 1995)

สารประกอบ	ปริมาณที่พบร้อยละ
SiO_2	61.5
Al_2O_3	15.1
Fe_2O_3	6.28
CaO	5.5
MgO	3.7
Na_2O	3.2
K_2O	2.4
TiO_2	0.68
P_2O_5	0.18
MnO	0.10

อะลูมิเนียมเป็นโลหะทรานซิชันที่อยู่ในตารางธาตุ มีสัญลักษณ์ Al และมีเลขอะตอมเท่ากับ 13 มีลักษณะมันวาวและอ่อนดัดง่าย มีคุณสมบัติเด่น คือ ต่อต้านการออกซิเดชันเป็นเยี่ยม (เนื่องจากปรากฏการณ์ passivation) อะลูมิเนียมถูกจัดอยู่ในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) และมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ (กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน, 2551)

คุณสมบัติทางฟิสิกส์

- น้ำหนักอะตอม 26.98
- ระบบผลึก FCC
- ความหนาแน่น (ที่ 20 องศาเซลเซียส) 2.70 $g.cm^{-3}$
- จุดหลอมเหลว 660 องศาเซลเซียส
- จุดเดือด 2,519 องศาเซลเซียส
- ความต้านทานไฟฟ้า (ที่ 20 องศาเซลเซียส) 26.50 nΩ.m
- สัมประสิทธิ์การขยายตัว (ที่ 20 องศาเซลเซียส) 23.1 $\mu m.m^{-1}.K^{-1}$

คุณสมบัติเชิงกล

- Youngs Modulus 70 GPa
- Shear Modulus 26 GPa
- Brinell Hardness 245 MPa

จากคุณสมบัติข้างต้น ทำให้อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย และถูกจัดอยู่ในอันดับสองของโลหะที่มีการนำมาใช้ประโยชน์รองจากเหล็กและเหล็กกล้า โดยสามารถนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้หลายประเภท โดยคุณสมบัติที่เด่นของอะลูมิเนียมที่เหมาะแก่การนำไปแปรรูป มีดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

1. มีความหนาแน่นน้อย ทำให้น้ำหนักเบาและมีกำลังวัสดุต่อหน่วย (Strength to Weight Ratio) สูง จึงเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลดน้ำหนักของชิ้นงานลง

2. มีความเหนียวมากและยืดตัวได้ง่าย ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายโดยไม่แตกหัก สามารถปั๊มอัดขึ้นรูปหรือรีดให้เป็นแผ่นบางได้

3. มีจุดหลอมเหลวต่ำและมีคุณสมบัติการไหลของน้ำโลหะที่ดี ทำให้การหลอมหล่อสามารถทำได้โดยง่าย และสามารถหล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

4. เนื่องจากอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย และเกิดเป็นฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มาเคลือบที่ผิวซึ่งฟิล์มมีความหนาแน่นสูงมาก จึงทำให้อะลูมิเนียมมีความทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนในสภาวะอากาศทั่วไป แต่ไม่สามารถทนทานต่อสภาพการกัดกร่อนของกรดและด่างได้

5. ผิวหน้าของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีดัชนีการสะท้อนกลับของแสงสูง จึงเหมาะสมที่จะทำแผ่นสะท้อน แสงในแฟลชถ่ายรูป จานสะท้อนแสงในโคมไฟหรือไฟหน้ารถยนต์

6. มีค่าการนำไฟฟ้าร้อยละ 64.94 IACS (International Annealed Copper Standard) แม้ไม่สูงมากนัก แต่เนื่องจากมีน้ำหนักเบา จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ต้องคำนึงถึงเรื่องน้ำหนักเบาเป็นสำคัญ เช่น สายไฟแรงสูงขนาดใหญ่

7. เป็นโลหะที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ (Nontoxic) และมีค่าการนำความร้อนสูง ทำให้เหมาะสมกับการใช้ทำเป็นภาชนะหุงต้มหรือหีบห่อรองรับอาหาร

8. โลหะอะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะอื่น ๆ ได้หลายชนิด เช่น ทองแดง ซิลิกอน แมกนีเซียม หรือสังกะสี ซึ่งโลหะผสมแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถเลือกใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

จากคุณสมบัติที่ดีหลายประการของอะลูมิเนียมที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ส่งผลให้ในปัจจุบันมีความพยายามในการนำเอาอะลูมิเนียมมาพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพสูงขึ้นเหมาะกับการใช้งาน ซึ่งอะลูมิเนียมถือเป็นวัสดุหนึ่งที่สามารถแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติต่างๆ ตามกระบวนการผลิตและธาตุโลหะที่มีการเติมเข้าไป

2.2 โครงสร้างของอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม

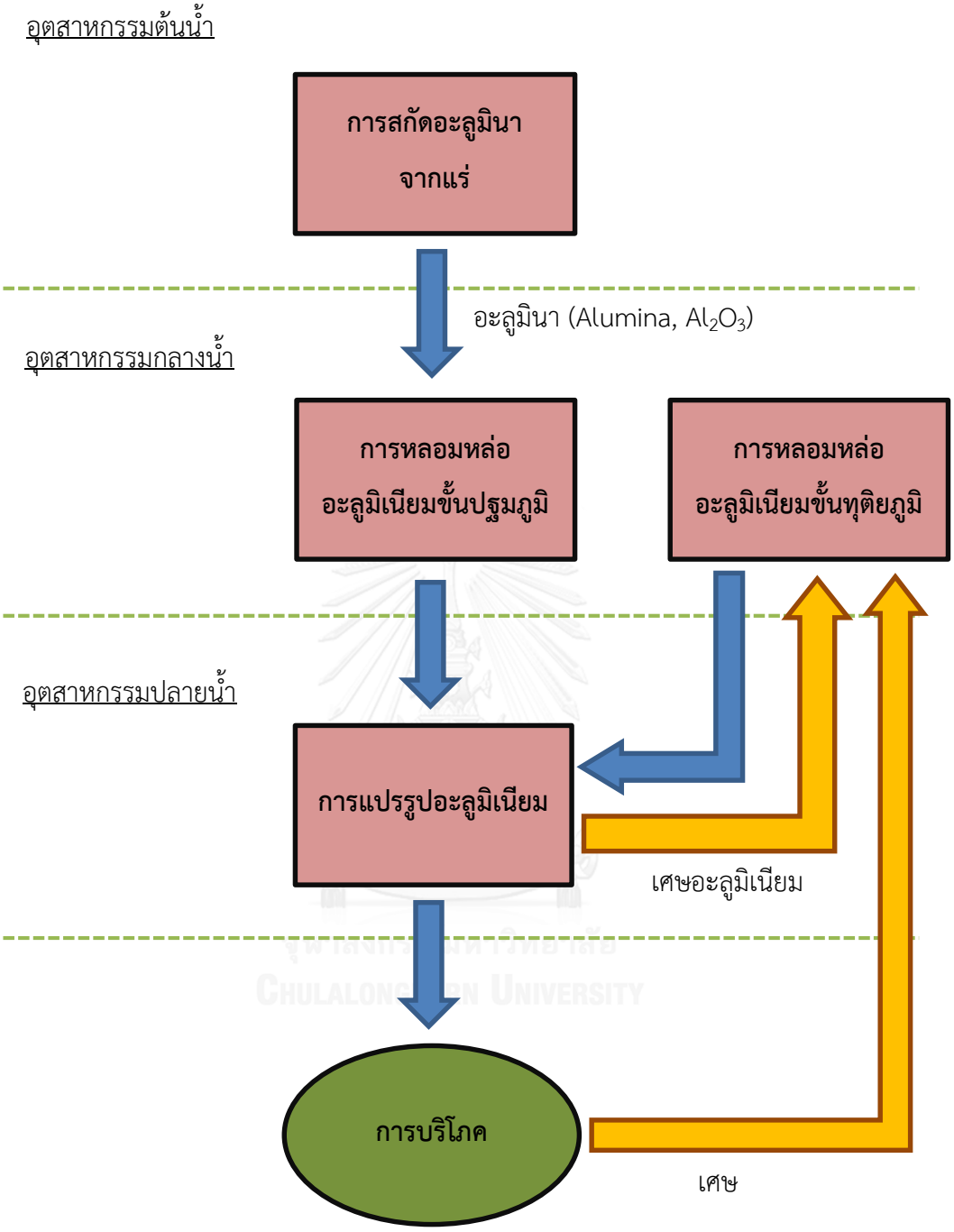
โครงสร้างของอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551) แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ อุตสาหกรรมต้นน้ำ อุตสาหกรรมกลางน้ำ และอุตสาหกรรมปลายน้ำ (รูปที่ 2.2) โดยที่แต่ละส่วนมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกัน เริ่มจากอุตสาหกรรมต้นน้ำที่นำเอาสินแร่บอกไซต์ (Bauxite) มาผ่านกระบวนการต่างๆ จนได้เป็นอะลูมิเนียมออกไซด์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอะลูมินา (Alumina, Al_2O_3) จากนั้นอะลูมินาที่ได้ก็จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการในอุตสาหกรรมกลางน้ำต่อไป ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การหลอมหล่ออะลูมิเนียมขั้นปฐมภูมิ เป็นการนำเอาอะลูมินามาผ่านกระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าจนได้เป็นโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure Aluminium) ซึ่งเรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ว่า อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary Aluminium)

2. การหลอมหล่ออะลูมิเนียมขั้นทุติยภูมิ เป็นการนำเศษอะลูมิเนียม (Scrap Aluminium) มาทำการหลอมหล่อใหม่ โดยเรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ว่า อะลูมิเนียมทุติยภูมิ (Secondary Aluminium)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมกลางน้ำจะถูกส่งต่อไปยังอุตสาหกรรมปลายน้ำ ซึ่งเป็นการแปรรูปอะลูมิเนียมให้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ และส่งต่อไปยังผู้บริโภคหรืออาจส่งต่อไปยังอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.2 ภาพรวมโครงสร้างของอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

จากโครงสร้างของอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมข้างต้นจะเห็นว่ามีการหมุนเวียนของเศษอะลูมิเนียม 2 อยู่ ประเภท ได้แก่ เศษอะลูมิเนียมใหม่และเศษอะลูมิเนียมเก่า

- เศษอะลูมิเนียมใหม่ (New Scrap) เป็นเศษชิ้นส่วนที่เหลือจากการผลิตชิ้นงาน เช่น เศษที่เหลือการตัดแต่งชิ้นงาน การไส การกลึง หรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่เสียจากการหล่อขึ้นรูป เศษอะลูมิเนียมเหล่านี้มักจะถูกจัดเก็บไว้ในโรงงานที่ผลิต จึงมีสิ่งเจือปนไม่มากนัก

- เศษอะลูมิเนียมเก่า (Old Scrap) เป็นเศษชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมที่ไม่ใช้แล้ว

2.3 กระบวนการการผลิตอะลูมิเนียม

2.3.1 การสกัดอะลูมินา

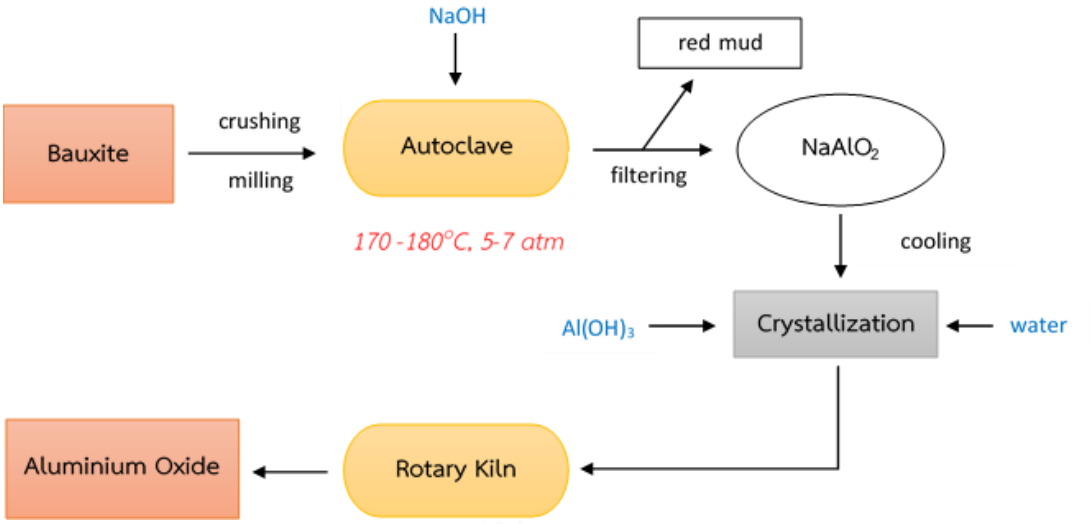
ในการสกัดอะลูมินาจะต้องนำแร่อะลูมิเนียมที่มีปริมาณอะลูมินาหรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) สูง และซิลิกอน (SiO_2) ต่ำ ซึ่งได้แก่ แร่บอกไซต์ (Bauxite) และแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) มาทำการบดให้ละเอียดและนำไปผ่านกระบวนการเพื่อแยกเอาอะลูมินาออก ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียมมี 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการเบเยอร์ (Bayer Process) และกระบวนการฟิวชั่น (Fusion Process) โดยมีรายละเอียดดังนี้

<u>กระบวนการเบเยอร์</u> (ณรงค์ฤทธิ์ โสสะ, 2555)

1. นำแร่ที่ผ่านการบดละเอียดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 170 – 180 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปชะละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในถังปฏิกรณ์ชนิดหม้อนึ่งอัดไอ (Autoclave) ภายใต้ความดัน 5 - 7 บรรยากาศ (atm) อะลูมินาในแร่จะทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นโซเดียมอะลูมิเนต ($NaAlO_2$) ดังแสดงในสมการที่ 1 และรูปที่ 2.3

$$Al_2O_3(s) + 2Na(OH)(aq) \longrightarrow 2NaAlO_2(aq) + H_2O(l) \quad (1)$$

สำหรับสารเจือปนอื่นๆ (red mud) ที่ติดมากับแร่ เช่น เหล็กและไทเทเนียม (II) ออกไซด์จะไม่ละลายและตกตะกอนอยู่ที่ก้นถัง จึงนำมากรองเพื่อแยกเอาสิ่งเจือปนเหล่านี้ออกไป



รูปที่ 2.3 กระบวนการเบเยอร์

2. นำสารละลายโซเดียมอะลูมิเนตที่ได้จากการกรอง ไปทำให้เจือจางโดยเติมน้ำภายในถังและรักษาอุณหภูมิไว้ที่ประมาณ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมผงอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการตกผลึก (Seeding Agent) โดยจะเหนี่ยวนำให้สารละลายอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มาจับตัวกันและตกผลึกกลายเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3(s)$) ดังแสดงในสมการที่ 2

$$2NaAlO_2(aq) + 4H_2O(l) \longrightarrow 2Al(OH)_3(s) + 2Na(OH)(aq) \quad (2)$$

3. เมื่อกรองเอาอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ออกมาแล้วนำไปล้างน้ำให้สะอาด จากนั้นจึงนำไปอบในเตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ที่อุณหภูมิประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส จะได้ผงอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาว ดังแสดงในสมการที่ 3

$$Al(OH)_3(s) \longrightarrow Al_2O_3(s) + H_2O(l) \quad (3)$$

ในกระบวนการสกัดอะลูมินาจากแร่ด้วยกระบวนการเบเยอร์จะมีอะลูมิเนียมส่วนหนึ่งสูญเสียไปกับตะกอนแร่ ถ้าหากในแร่มีปริมาณซิลิกาสูงก็จะทำให้มีการสูญเสียอะลูมิเนียมไปกับตะกอนแร่มากขึ้นไปอีกด้วย ดังนั้นกระบวนการเบเยอร์จึงเหมาะสำหรับแร่อะลูมิเนียมที่มีปริมาณซิลิกาต่ำ หรือแร่ที่ผ่านการแต่งโดยเติมปูนขาวลงไปผสมกับแร่อะลูมิเนียมในขั้นตอนการบดแร่

<u>กระบวนการฟิวชั่น</u> (ณรงค์ฤทธิ์ โสสะ, 2555)

กระบวนการนี้จะใช้โซดาแอช (Na_2CO_3) แทนการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการเผารวมกับแร่อะลูมิเนียมที่อุณหภูมิประมาณ 800 – 1,200 องศาเซลเซียส โดยอะลูมินาจะทำปฏิกิริยากับโซดาแอชได้เป็นโซเดียมอะลูมิเนต ($NaAlO_2$) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในสมการที่ 4

$$Al_2O_3 + Na_2CO_3 \longrightarrow 2NaAlO_2 + CO_2 \qquad (4)$$

โซเดียมอะลูมิเนตที่ได้จะนำไปละลายน้ำ และทำให้ตกตะกอนเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) จากนั้นจึงกรองแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ผงอะลูมินา (Al_2O_3) เหมือนกับกระบวนการเบเยอร์ ดังแสดงในสมการที่ 3

2.3.2 การหลอมหล่ออะลูมิเนียมปฐมภูมิ

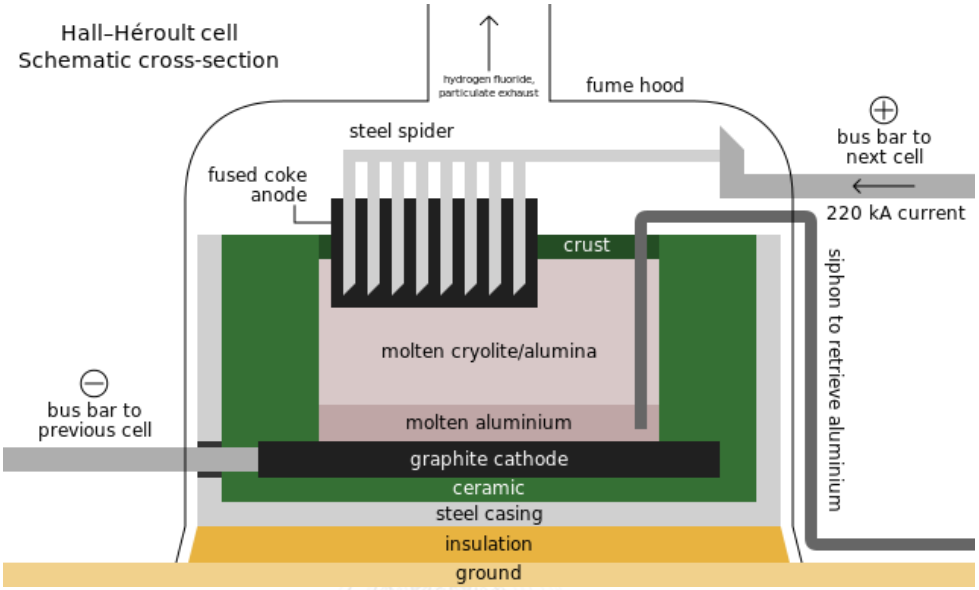
การหลอมหล่ออะลูมิเนียมปฐมภูมินี้เป็นการแยกเอาโลหะอะลูมิเนียมออกจากอะลูมินา ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมทำกันในอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมปัจจุบัน คือวิธีของ Hall และ Heroult ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นการแยกอะลูมิเนียมจากอะลูมินาด้วยกระแสไฟฟ้า หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) โดยการใช้สารละลายไครโอไลต์ (Na_3AlF_6) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 2.4 โดยมีขั้นตอนกระบวนการ ดังนี้

1. หลอมละลายผงไครโอไลต์ที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ในบ่อเซลล์ที่ผนังทำด้วยเหล็กบุด้วยคาร์บอน และมีแท่งทองแดงฝังอยู่ภายในโดยจะต่อสายไฟไปยังขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าด้านบนของบ่อเซลล์จะมีแท่งคาร์บอนแขวนไว้ด้วยแท่งทองแดงบัสบาร์ โดยต่อสายไฟไปยังขั้วบวกแท่งคาร์บอนจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและแผ่นคาร์บอนที่ก้นบ่อเซลล์จะทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด

2. เติมผงอะลูมินาลงไปในไครโอไลต์หลอมเหลว ขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวของสารละลายอะลูมินาและไครโอไลต์ ดังสมการที่ 5

$$Al_2O_3 \longrightarrow Al^{3+} + AlO_3^{3-} \qquad (5)$$

3. ไอออนบวกของอะลูมิเนียมจะวิ่งไปยังขั้วแคดโทด และจะปล่อยอิเล็กตรอนผ่านไปยังขั้วแคดโทด ทำให้ได้โลหะอะลูมิเนียมหลอมละลายอยู่ก้นบ่อเซลล์ เมื่ออะลูมิเนียมเพิ่มปริมาณมากขึ้นจะถูกเจาะเอาออกหรือดูดออกเพื่อนำไปเทลงไปแบบหล่อต่อไป

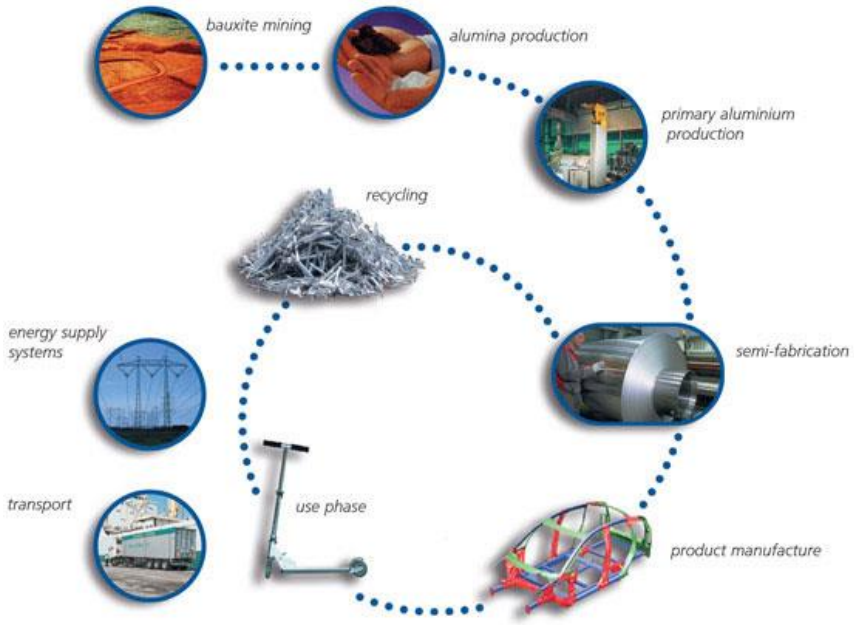


รูปที่ 2.4 กระบวนการแยกอะลูมิเนียมของ Hall และ Heroult

การแยกอะลูมิเนียมด้วยวิธีของ Hall และ Heroult จะใช้กระแสไฟฟ้าประมาณ 16,600-18,000 Kwh โดยใช้อะลูมินาประมาณ 1.98 ตัน ไครโอไลต์ 0.1 ตัน และแท่งคาร์บอน 0.6 ตันต่อการผลิตโลหะอะลูมิเนียมจำนวน 1 ตัน ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้าจำนวนมากที่ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้บางประเทศที่มีอัตราค่าไฟฟ้าที่สูงเช่นประเทศไทย ไม่สามารถดำเนินอุตสาหกรรมถลุงโลหะอะลูมิเนียมได้เพราะต้นทุนที่ใช้ในการผลิตจะสูงมาก

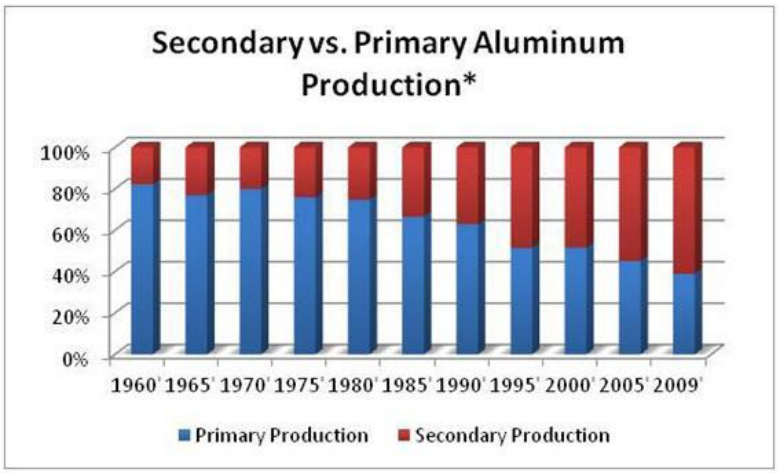
2.3.3 การหลอมหล่ออะลูมิเนียมทุติยภูมิ

ในการหลอมหล่อขั้นทุติยภูมินี้ถือเป็นกระบวนการหมุนเวียนอะลูมิเนียมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะใช้พลังงานไฟฟ้าเพียงร้อยละ 5 ของการหล่อหลอมขั้นปฐมภูมิ ทำให้ต้นทุนในการผลิตอะลูมิเนียมทั้ง 2 วิธีนั้นแตกต่างกันมาก เนื่องจากประเทศไทยไม่มีแหล่งแร่บอกไซต์ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตอะลูมินาเพื่อใช้ในการหลอมหล่อขั้นปฐมภูมิและค่าไฟฟ้าที่แพง ทำให้อุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียมในประเทศไทยมีเพียงการหลอมหล่อประเภทเดียว คือการหลอมหล่อขั้นทุติยภูมิ จึงถือได้ว่าการหลอมหล่อขั้นทุติยภูมิเป็นจุดเริ่มต้นของอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมในประเทศไทย



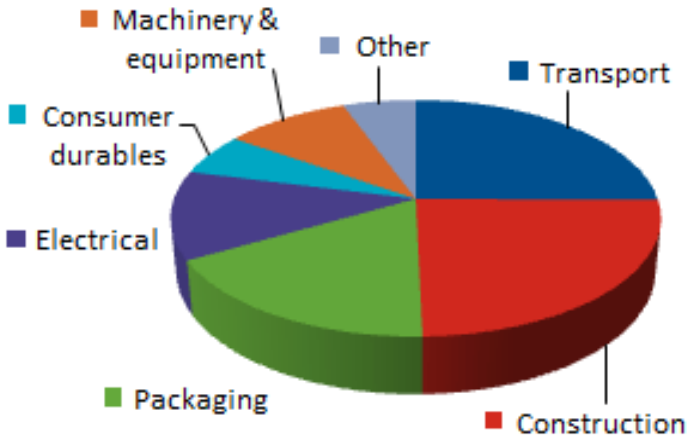
รูปที่ 2.5 วงจรการหมุนเวียนของอะลูมิเนียม

ในปัจจุบันมีการพัฒนากระบวนการรีไซเคิลอะลูมิเนียมเพื่อนำอะลูมิเนียมหมุนเวียนกลับคืนมาให้ได้มากที่สุด เนื่องจากกระบวนการหลอมหล่อทุติยภูมิใช้พลังงานน้อยกว่าการหลอมหล่อปฐมภูมิมาก ดังนั้นกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมจึงมีแนวโน้มที่จะใช้เศษอะลูมิเนียมมาหลอมใหม่เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นแผนภูมิแท่งแสดงสัดส่วนกระบวนการผลิตระหว่างอะลูมิเนียมปฐมภูมิกับอะลูมิเนียมทุติยภูมิในประเทศจีน ซึ่งจีนเป็นประเทศที่มีกำลังการผลิตอะลูมิเนียมสูงเป็นอันดับต้นๆ ของโลก (Margalit, 2014)



รูปที่ 2.6 สัดส่วนกระบวนการผลิตระหว่างอะลูมิเนียมปฐมภูมิกับอะลูมิเนียมทุติยภูมิในประเทศจีน

อะลูมิเนียมที่ผลิตได้ถูกนำไปแปรรูปเพื่อใช้ในงานด้านต่างๆ และส่งต่อผลิตภัณฑ์ให้แก่อุตสาหกรรมต่อเนื่องของอะลูมิเนียม โดยมีสัดส่วนการบริโภคอะลูมิเนียมของอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สัดส่วนการบริโภคอะลูมิเนียมของโลกจำแนกตามอุตสาหกรรม ปี 2011 (CRU International Ltd, 2012)

3.3.4 การแปรรูปอะลูมิเนียม

การนำอะลูมิเนียมที่ได้จากการผลิตในขั้นกลางน้ำมาแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานสำหรับผู้บริโภค ซึ่งโดยทั่วไปการแปรรูปมีด้วยกัน 3 แบบ (บริษัทคอนซัลแตนท์ ออฟ เทคโนโลยี, 2551) คือ

1. การหล่อแบบ (Casting)

คือ การขึ้นรูปโลหะโดยการทำให้น้ำโลหะแข็งตัวภายในแบบหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เป็นรูปทรงตามต้องการ ซึ่งการหล่ออะลูมิเนียมมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การหล่อแบบความดันต่ำ การหล่อแบบความดันสูง เป็นต้น

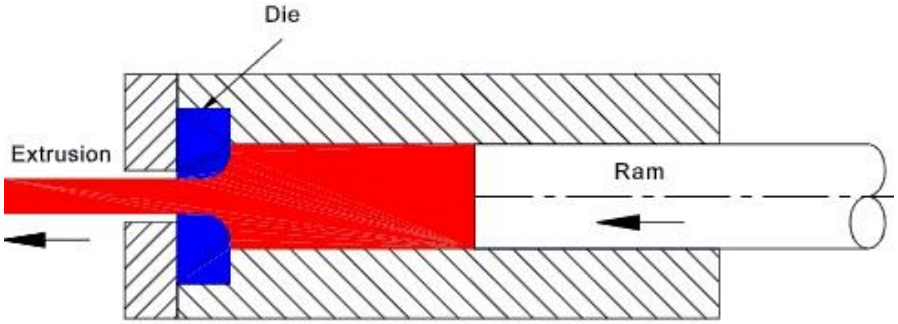
รูปที่ 2.8 แบบหล่อแม่พิมพ์อะลูมิเนียม

โลหะอะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติทางด้านหล่อหลอมที่ดี เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำและความสามารถในการไหลของน้ำโลหะดี ทำให้สามารถหล่อเป็นรูปร่างได้โดยง่าย แม้ชิ้นงานจะมีรูปร่างซับซ้อนหรือมีความหนาไม่มากก็ตาม ดังนั้นการหล่ออะลูมิเนียมจึงเป็นที่นิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ มากมาย เช่น เครื่องยนต์ ล้อแม็กซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เป็นต้น

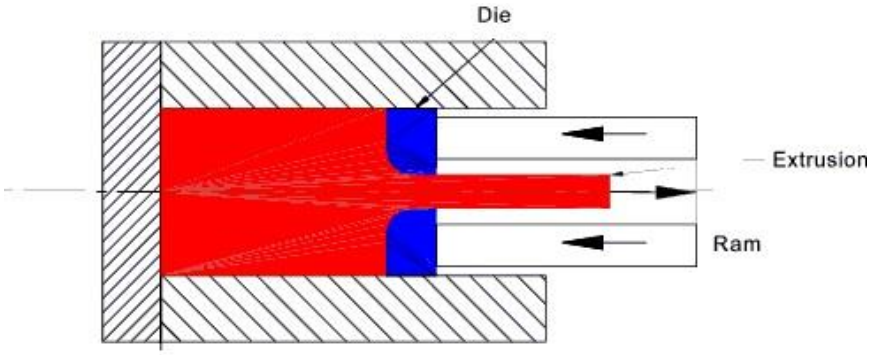
รูปที่ 2.9 ล้อแม็กซ์อะลูมิเนียม

2. การรีดดึง (Extrusion)

คือ การรีดดึงอะลูมิเนียมใช้ในการผลิตอะลูมิเนียมเส้นเป็นรูปหน้าตัดต่างๆ เช่น กรอบประตู ขอบหน้าต่าง เป็นต้น ด้วยวิธีการนำอะลูมิเนียมแท่งยาว (Billet) มาอบจนได้อุณหภูมิตามต้องการ จากนั้นนำเข้าสู่เครื่องอัดไฮดรอลิกซึ่งจะอัดแท่งโลหะผ่านรูของแม่พิมพ์ (Die) ออกมาเป็นเส้นรูปทรงหน้าตัดต่างๆตามลักษณะภาคตัดขวางของรูแม่พิมพ์ ซึ่งวิธีการรีดดึงมีด้วยกัน 2 แบบ คือ การอัดรีดโดยตรง (direct extrusion) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และการอัดรีดโดยอ้อม (indirect extrusion) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 การอัดรีดโดยตรง



รูปที่ 2.11 การอัดรีดโดยอ้อม

3. การรีดแผ่น (Rolling)

การรีดอะลูมิเนียมแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการคือ การรีดร้อนและการรีดเย็น โดยการรีดร้อนเริ่มต้นจากนำอะลูมิเนียมแท่งแบน (Slab) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 มาอบในเตาจนได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วจึงเข้าสู่เครื่องรีดเพื่อลดขนาด แต่การรีดร้อนไม่สามารถลดความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมได้บางมากนัก เพราะโลหะจะขาดความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น จึงต้องใช้การรีดเย็นซึ่งสามารถลดความหนาของอะลูมิเนียมได้ตามความต้องการของผู้ใช้ จนกระทั่งบางเป็นแผ่นฟอยล์ (0.7–0.8 ไมครอน) โดยการบิดเบี้ยวของโครงสร้างอะตอมในขณะรีดเย็นจะสามารถเพิ่มความแข็งแรงของโลหะแผ่นขึ้นด้วย ซึ่งในการรีดแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความบางมากๆ จำเป็นต้องใช้การอบ (Annealing) เพื่อคลายความเครียดของโลหะแผ่นป้องกันการแตกหักในระหว่างการรีด

รูปที่ 2.12 อะลูมิเนียมแท่งแบนที่ใช้ในกระบวนการรีดแผ่น
(Schnell, 2012)

2.4 ชนิดของอะลูมิเนียม

ชนิดของอะลูมิเนียมสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือแบ่งตามการผลิตหรือแบ่งตามเกรดของอะลูมิเนียม โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. แบ่งตามการผลิต

การแบ่งตามการผลิตนี้จะแบ่งอะลูมิเนียมออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1.1 อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เป็นอะลูมิเนียมที่ได้จากการถลุงแร่หรือการหลอมให้มีความบริสุทธิ์ตั้งแต่ร้อยละ 99.00 ขึ้นไปและมีสิ่งเจือปนไม่เกินร้อยละ 1 เป็นอะลูมิเนียมที่มีความเหนียวสูง สามารถขึ้นรูปได้ดี

1.2 อะลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloys) เป็นอะลูมิเนียมที่ได้จากการหลอมร่วมกับโลหะชนิดอื่นตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไป เช่น ทองแดง แมกนีเซียม แมงกานีส โครเมียม ซิลิกอน นิกเกิล ดีบุก สังกะสี เป็นต้น เพื่อให้โลหะผสมมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

2. แบ่งตามเกรดอะลูมิเนียม

การแบ่งเกรดอะลูมิเนียม มีการแบ่งเกรดจากสมาคมอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา (Aluminium Association) โดยใช้หลักเกณฑ์ของโลหะที่เป็นส่วนผสมเป็นเกณฑ์ด้วยเลข 4 หลัก สำหรับใช้แทนเป็นสัญลักษณ์เกรดอะลูมิเนียมขึ้นรูป

- หลักที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุด บ่งบอกถึงชนิดของโลหะผสมที่ผสมอยู่ โดยแบ่งออก 8 กลุ่มตามธาตุที่ผสม ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.2 เช่น 1xxx แทนหมวดโลหะอะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99.00 โดยน้ำหนัก

- หลักที่สอง เป็นตัวเลขที่บ่งบอกถึงชนิดของโลหะอื่นผสมอยู่กับอะลูมิเนียม เช่น 2024 ที่ประกอบด้วย 4.5Cu, 1.5Mg, 0.5Si และ0.1Cr เมื่อเปลี่ยนเป็น 2218 จะประกอบด้วย 4.0Cu, 1.5Mg, 0.2Si และ 2.0Ni ซึ่งเป็นการผสม Ni แทน Cr

- หลักที่สาม และสี่ เป็นตัวเลขที่แสดงชนิดย่อยของโลหะผสมที่เป็นชนิดเดียวกัน แต่แสดงส่วนผสมที่แตกต่างกัน เช่น 2014 ที่ประกอบด้วย 4.4Cu, 0.8Si, 0.8Mn และ0.4Mg เมื่อเปลี่ยนเป็น 2017 จะประกอบด้วย 4.0Cu, 0.8Si, 0.5Mn และ0.1Cr

ตารางที่ 2.2 ตารางการแบ่งเกรดของอะลูมิเนียมตามมาตรฐาน Aluminum association (Anderson, 2009)

หมายเลขอนุกรม	ธาตุที่ผสม
1xxx	อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มากกว่า 99.00%
2xxx	ทองแดง
3xxx	แมงกานีส
4xxx	ซิลิกอน
5xxx	แมกนีเซียม
6xxx	แมกนีเซียม + ซิลิกอน
7xxx	สังกะสี
8xxx	ผสมธาตุอื่นๆนอกเหนือจากธาตุที่กล่าว

การแบ่งเกรดอะลูมิเนียมตามมาตรฐาน Aluminum association ถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานในการแบ่งแยกประเภทของอะลูมิเนียมที่ใช้การอย่างแพร่หลาย และประเทศไทยก็มีการแบ่งเกรดของอะลูมิเนียมตามมาตรฐานของ Aluminum association โดยมีรายละเอียดดังนี้

- อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (1xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99.00 เป็นอะลูมิเนียมทางการค้า มักพบในช่วงความบริสุทธิ์ที่ร้อยละ 99.30 - 99.70 เหมาะสำหรับนำมาใช้งานในด้านตัวนำไฟฟ้า และแผ่นสะท้อนแสง เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- อะลูมิเนียมผสมทองแดง (2xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่ผสมทองแดง โดยพบว่า ทองแดงสามารถละลายได้ในอะลูมิเนียมสูงสุดที่ร้อยละ 5.65 ที่อุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส และจะละลายได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนเหลือประมาณร้อยละ 0.5 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านความร้อน

- อะลูมิเนียมผสมแมงกานีส (3xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่ผสมกับแมงกานีส หากเพิ่มแมงกานีสที่ร้อยละ 1.2 จะทำให้เป็นโลหะผสมที่มีความแข็งแรงพอควร เหมาะสำหรับใช้งานในด้านโครงสร้างต่างๆ

- อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน (4xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่ผสมด้วยซิลิกอนพร้อมกับธาตุอื่นๆ แต่มีอัตราส่วนน้อยกว่า เช่น ซิลิกอนร้อยละ 11.0 - 13.5 ทองแดงร้อยละ 0.5 - 1.3 สังกะสีร้อยละ 0.5

เหล็กร้อยละ 1 แมกนีเซียร้อยละ 0.8 - 1.3 และนิกเกิลร้อยละ 0.5 - 1.3 เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้งานประเภทที่ทนความร้อน เช่น กระบอกสูบ ลูกสูบ ก้านสูบ ห้องเครื่อง เป็นต้น

- อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (5xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่ผสมกับแมกนีเซียม ส่วนมากมักใช้ผสมร่วมกับธาตุอื่นๆ เนื่องจากแมกนีเซียมมีความสามารถในการละลายและหลอมรวมกับอะลูมิเนียมได้ไม่ดี หากใช้เป็นส่วนผสมมากจะทำให้วัสดุแข็งและเปราะหักง่าย

- อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมกับซิลิกอน (6xxx) เป็นอะลูมิเนียมผสมที่มีสัดส่วนของแมกนีเซียม และ ซิลิกอนในอัตราส่วนน้อย โดยทั่วไปผสมแมกนีเซียมร้อยละ 0.6 - 1.2 ซิลิกอนร้อยละ 0.4 - 1.3 นอกจากนี้อาจมีการผสมโครเมียมหรือทองแดงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงด้วย

- อะลูมิเนียมผสมสังกะสี (7xxx) มักเป็นอะลูมิเนียมผสมที่มีสัดส่วนของสังกะสีหรืออาจผสมธาตุอื่นๆร่วมด้วยเล็กน้อย เช่น แมกนีเซียม กลุ่มอะลูมิเนียมนี้มักประยุกต์ใช้ในด้านความทนทานแข็งแรงสูง เช่น ยานอวกาศ โครงสร้างขนาดใหญ่ เป็นต้น

- อะลูมิเนียมผสมแร่อื่นๆ (8xxx) เป็นอะลูมิเนียมผสมที่ใช้ธาตุผสมชนิดอื่นนอกเหนือจากข้างต้น เช่น นิกเกิล ไททาเนียม โครเมียม บิสมัท และตะกั่ว เป็นต้น

2.5 อุตสาหกรรมอะลูมิเนียมในประเทศไทย

ปัจจุบันกลุ่มโรงงานผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิของไทยสามารถผลิตโลหะอะลูมิเนียมอัลลอยด์ชนิดต่างๆ เพื่อเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมต่อเนื่องได้ประมาณปีละ 50,000-100,000 ตัน ซึ่งหากคิดตามกำลังการผลิตจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อยได้ดังนี้ (ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่, 2552)

1. โรงงานขนาดใหญ่ ได้แก่โรงงานที่มีกำลังการผลิตตั้งแต่ 600 ตันต่อเดือนขึ้นไป โรงงานประเภทนี้เป็นโรงงานผลิตอะลูมิเนียมผสมที่มีคุณภาพดี เนื่องจากมีอุปกรณ์และระบบควบคุมคุณภาพที่ดี นอกจากนี้ยังมีระบบการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ปลอดภัยด้วย ปัจจุบันโรงงานผลิตโลหะอะลูมิเนียมจากเศษโลหะขนาดใหญ่มีอยู่ 3 ราย ได้แก่ บริษัท แอลแคนนิคเคไทย จำกัด บริษัท เอ็ม.ซี. อะลูมินั่ม (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท มิยูกิ อินดัสทรี่ จำกัด

2. โรงงานขนาดกลาง ได้แก่โรงงานที่มีกำลังการผลิต 200 - 600 ตันต่อเดือน โรงงานประเภทนี้ทำการผลิตอะลูมิเนียมผสมคุณภาพค่อนข้างดี แต่ใช้เทคโนโลยีที่ไม่ทันสมัยนัก และระบบการจัดการสิ่งแวดล้อมก็อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง โดยอาจมีแค่อุปกรณ์กำจัดฝุ่นควัน ทำให้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำและมีความน่าเชื่อถือของคุณภาพน้อยกว่าโรงงานขนาดใหญ่ ปัจจุบันมีโรงงานขนาดกลางประมาณ 10 ราย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นบริษัทของคนไทย และบางแห่งเป็นโรงงานในเครือของกลุ่มผู้ค้าเศษโลหะเอง

3. โรงงานขนาดเล็ก ได้แก่โรงงานที่มีกำลังการผลิตไม่เกิน 200 ตันต่อเดือน โรงงานประเภทนี้มีอยู่กระจัดกระจายทั่วไป โดยเป็นโรงงานรับจ้างหลอมเศษโลหะที่ไม่มีการควบคุมคุณภาพมากนักและไม่มีระบบการจัดการสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงสามารถขายโลหะอะลูมิเนียมผสมได้ในราคาถูก โดยจะขายในตลาดล่างที่ไม่คำนึงถึงคุณภาพของวัตถุดิบ หรืออาจขายให้กับโรงงานหลอมเศษโลหะขนาดกลางหรือขนาดใหญ่เพื่อนำไปเป็นวัตถุดิบร่วมกับเศษโลหะและใช้ปรับส่วนผสมทางเคมีต่อไป

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีการใช้ในประเทศไทยมากที่สุดเป็นอันดับสอง รองจากเหล็ก เช่นเดียวกับภาพรวมของอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมโลก โดยในปี 2551 ความต้องการใช้โลหะอะลูมิเนียมมีปริมาณถึง 450,000 ตัน โดยมีสัดส่วนการใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มากที่สุด รองลงมาได้แก่อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ และอุตสาหกรรมยานยนต์ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มการใช้โลหะอะลูมิเนียมยังคงมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามสภาพการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากผู้ผลิตอะลูมิเนียมในประเทศยังมีจำนวนไม่มากนัก ทำให้ประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าโลหะอะลูมิเนียมจากต่างประเทศเป็นหลัก ซึ่งประเทศคู่ค้าที่สำคัญได้แก่ ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา สหรัฐอาหรับเอมิเรสต์ บราซิล และฮ่องกง เป็นต้น

2.6 ฟลักซ์

ในการหลอมอะลูมิเนียมขั้นทุติยภูมิ จะมีการเติมสารเคมีเพื่อคัดแยกสิ่งเจือปนที่มากับเศษอะลูมิเนียมออกไป และทำให้อะลูมิเนียมที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆของอะลูมิเนียม สารเคมีที่ใช้ในการหลอมนี้ เรียกว่า ฟลักซ์ (Flux) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

รูปที่ 2.13 ฟลักซ์

1. ฟลักซ์ควบคุมผิวหน้า ฟลักซ์ตัวนี้ทำหน้าที่ควบคุมผิวหน้าน้ำโลหะไว้เป็นการป้องกันทั้งไม่ให้เกิดออกไซด์ และการละลายของก๊าซไฮโดรเจน ฟลักซ์ชนิดนี้จึงต้องมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจุดหลอมตัวของอะลูมิเนียม และมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าด้วย ฟลักซ์พวกนี้ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโพแตสเซียมคลอไรด์ (KCl)

2. ฟลักซ์ทำให้สะอาด ฟลักซ์พวกนี้ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดออกไซด์และช่วยทำให้ออกไซด์และสิ่งเจือปนอื่นๆลอยขึ้นมาอยู่ที่ผิวหน้า ฟลักซ์ชนิดนี้ประกอบด้วยเกลือโซเดียมคลอไรด์และเกลือโพแตสเซียมคลอไรด์เช่นเดียวกับ ฟลักซ์คลุมผิวหน้า แต่จะต้องผสมฟลูออไรด์เข้าไปด้วย ทำให้มีจุดหลอมเหลวและความถ่วงจำเพาะต่ำ

3. ฟลักซ์จำกัดขี้โลหะ เป็นฟลักซ์ที่ใช้กำจัดโลหะโดยเฉพาะ ส่วนใหญ่จะใช้ฟลักซ์ชนิดนี้ในตอนที่จะเทโลหะลงแบบหล่อ ฟลักซ์พวกนี้จะเป็นตัวไปจับพวกออกไซด์ต่างๆ ให้รวมกันอยู่ในลักษณะเหนียว ทำให้เรากวาดออกได้ง่าย และก็ช่วยทำให้พวกขี้โลหะไม่ไหลตามน้ำโลหะลงไปในแบบหล่อจำกัดออกได้ง่าย ฟลักซ์พวกนี้ประกอบด้วยเกลือโซเดียมคลอไรด์และเกลือโปรแตสเซียมคลอไรด์รวมกับไครโอไลต์ร้อยละ 5-10 หรือโซเดียมฟลูออไรด์ก็ได้

4. ฟลักซ์ไล่ก๊าซ ฟลักซ์พวกนี้ปกติมักใช้ก๊าซคลอรีนและไฮโดรเจน โดยเป่าผ่านเข้าไปในน้ำโลหะเกิดฟองพาเอาก๊าซไฮโดรเจนและพวกออกไซด์ต่างๆออกมาด้วย

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตะกรันอะลูมิเนียม

ตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตอะลูมิเนียม สามารถจำแนกประเภทของตะกรันอะลูมิเนียมตามกระบวนการผลิตและองค์ประกอบได้ 3 ประเภท (Manfredi et al., 1997) ดังนี้

1. ตะกรันขาว (White Dross) คือ ตะกรันที่เกิดจากกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมปฐมภูมิซึ่งเป็นกระบวนการนำเอาอะลูมินามาผลิตเป็นแท่งอะลูมิเนียม องค์ประกอบโดยส่วนใหญ่มีอะลูมิเนียมมากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งตะกรันชนิดนี้ไม่พบในประเทศไทยเนื่องจากประเทศไทยไม่มีกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมปฐมภูมิ

2. ตะกรันดำ (Black Dross) คือ ตะกรันที่เกิดจากกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิซึ่งเป็นการนำเศษอะลูมิเนียมมาหลอมใหม่ องค์ประกอบโดยส่วนใหญ่คืออะลูมิเนียม แต่ตะกรันในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยธาตุโลหะอื่นๆและเกลือฟลักซ์ซึ่งเกิดจากการใช้งานในกระบวนการหลอม

3. ตะกรันเกลือ (Salt Slag) คือ ตะกรันที่เกิดจากการนำตะกรันดำไปผ่านกระบวนการนำโลหะกลับคืนแล้วตะกรันส่วนที่เหลือจะประกอบไปด้วยเกลือเป็นส่วนใหญ่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตะกรันอะลูมิเนียมโดยทั่วไปมีองค์ประกอบทางเคมีที่หลากหลาย (Lucheva et al., 2005) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และมีคุณสมบัติของกายภาพ (Dai, 2012) ดังรูปที่ 2.14

Al_2O_3	64,45	ZnO	0,37
MgO	3,85	TiO_2	0,23
SiO_2	4,41	CaO	0,88
MnO	0,14	Na_2O	0,67
Fe_2O_3	2,63	K2O	1,20
CuO	0,75	P2O5	0,07

รูปที่ 2.14 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันอะลูมิเนียม

Properties	Granular Dross	Compact Dross
Alloy Content (%)		
Melt	2.44–11.77	1.34–10.03
Recovered Metal	1.03–5.51	0.33–6.80
Distribution(q) (mm^{-1})	0.08 (coarse)–0.452 (fine)	—
Density (t/m^3)	0.828–1.118 (bulk)	2.396–2.528 (apparent)
Metal Content (%)	46.9–69.1	71–93
Lixiviate (pH)	9.52–10.14	9.03–9.48
Salt Content (%)	0.18–6.21	0.01–0.03
Gas Evolution (l/kg dross)	0.25–1.17	No evolution

รูปที่ 2.15 คุณสมบัติทางกายภาพของตะกรันอะลูมิเนียม

ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตอะลูมิเนียม หากจำแนกตามรหัสของเสีย 6 หลัก (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) จะอยู่ในหมวด 10 03 xx หมายถึง ของเสียจากการหลอมถลุงอะลูมิเนียม (Wastes from aluminium thermal metallurgy) โดยที่ตะกรันอะลูมิเนียมจะมีรหัสของเสีย 6 หลัก คือ 10 03 09 HA หมายถึง กากตะกรันดำจากกระบวนการผลิตทุติยภูมิ (Black dross from secondary production) จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าตะกรันอะลูมิเนียมจัดอยู่ในของเสียประเภทของเสียอันตราย เนื่องจากตะกรันอะลูมิเนียมมีองค์ประกอบทางเคมีหลายอย่างที่ส่งผลต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ในเอกสารข้อมูลความปลอดภัยระบุว่าตะกรันอะลูมิเนียมมีความเป็นอันตรายทั้งในด้านกายภาพและสุขภาพ โดยที่ตะกรันอะลูมิเนียมจัดอยู่ในหมวดของเสียอันตรายที่ทำปฏิกิริยากับน้ำและก่อให้เกิดก๊าซติดไฟ เป็นอันตรายต่อสุขภาพทั้งในระยะสั้นและระยะยาว คือ ระคายเคืองเมื่อได้รับสัมผัสและเป็นสารก่อมะเร็ง (Pennex aluminum company, 2015)

เมื่อตะกรันอะลูมิเนียมสัมผัสกับน้ำหรือความชื้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรุนแรงได้ (Tsakiridis, 2012) ดังสมการต่อไปนี้

$$2AlN + 3H_2O \longrightarrow 2NH_3 + Al(OH)_3$$

$$2AlN + 4H_2O \longrightarrow Al(OH)_3 + NH4OH$$

$$Al_5O_6N + 4H_2O \longrightarrow 2Al_2O_3 + Al(OH)_3 + NH4OH$$

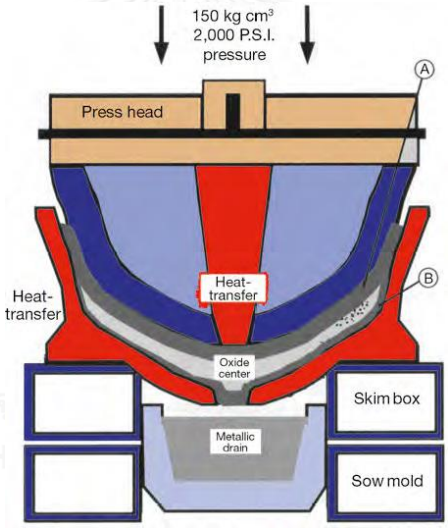
$$NH_3 + H_2O \longrightarrow NH_4OH$$

$$2Al + 3H_2O \longrightarrow Al_2O_3 + 3H_2(+heat)$$

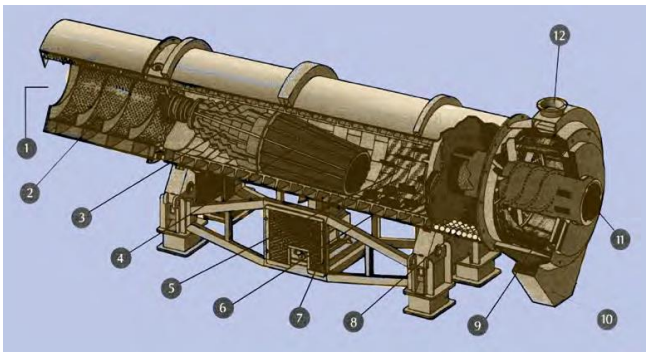
$$\text{Hot } H_2 + O_2 \text{ (air)} + \text{combustibles} \longrightarrow \text{fire}$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า ตะกรันอะลูมิเนียมสามารถทำให้เกิดก๊าซแอมโมเนียที่มีกลิ่นฉุนรุนแรงและเป็นอันตรายต่อระบบการหายใจ อีกทั้งก่อให้เกิดก๊าซและความร้อนสามารถลุกติดไฟได้เองอีกด้วย นอกจากนั้นแล้วหากตะกรันอะลูมิเนียมถูกนำไปทิ้งหรือฝังกลบอย่างไม่ถูกวิธี สามารถก่อให้เกิดองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นอันตรายต่างๆมากมาย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซมีเทน (CH_4) ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) เฟสฟีน (PH_3) ดังนั้น การจัดการตะกรันอะลูมิเนียมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

กระบวนการจัดการตะกรันอะลูมิเนียมร้อนที่เกิดขึ้นในโรงงานมีด้วยกัน 2 ลักษณะคือ การทำให้ตะกรันเย็นตัวหรือการนำไปผ่านกระบวนการนำโลหะกลับคืน (Schmitz, 2014) ซึ่งในกระบวนการที่เป็นที่นิยมคือ การอัดตะกรันด้วยไฮดรอลิก (Dross Press) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และการใช้เตาแบบหมุน (Rotary Drum) ดังแสดงในรูปที่ 2.17



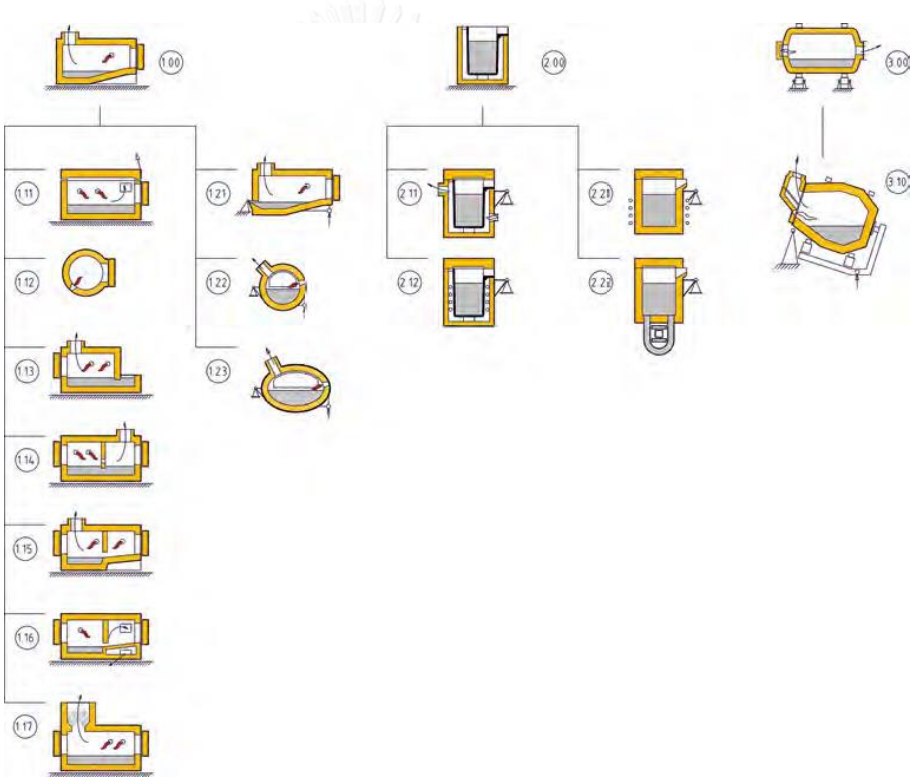
รูปที่ 2.16 Dross Press



รูปที่ 2.17 Rotary Drum

เครื่องมือทั้งสองชนิดนี้มีความสามารถที่ต่างกันโดย การอัดตะกรันด้วยใช้ไฮดรอลิก มีจุดประสงค์หลักในการลดความร้อนจากที่จะตะกรันให้ได้อย่างรวดเร็ว โดยที่ได้โลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาเพียงน้อย แต่การใช้ Rotary Drum จะมีจุดประสงค์เพื่อนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมา แต่การจะใช้เครื่องมือนี้ต้องมีตะกรันที่มากพอ เนื่องจากต้นทุนด้านเครื่องจักรที่สูงกว่า

ประเภทของเตาหลอมที่ใช้ในโรงงานผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 คือ 1. เตาแบบกระทะ 2. เตาครูซิเบิล และ 3. เตาแบบหมุนเท เตาแต่ละแบบก็ลักษณะและกลไกในการทำงานที่แตกต่างกันออกไป



1.00 - hearth furnace (reverberatory furnace), 1.11 - top-loaded furnace, 1.12 - round furnace, 1.13 - side-well furnace, 1.14 - closed well furnace, 1.15 - dry hearth furnace, 1.16 - dry hearth furnace with bottom heating, 1.17 - tower furnace, 1.21 - reverberatory furnace,1.22 - barrel-shaped furnace, 1.23 - oval furnace, 2.00 - crucible furnaces, 2.11 - gas-heated crucible furnace, 2.12 - electrically-heated crucible furnace, 2.21 - crucible induction furnace, 2.22 - channel induction furnace, 3.00 - rotary drum furnace, 3.10 - tiltable rotary drum furnace

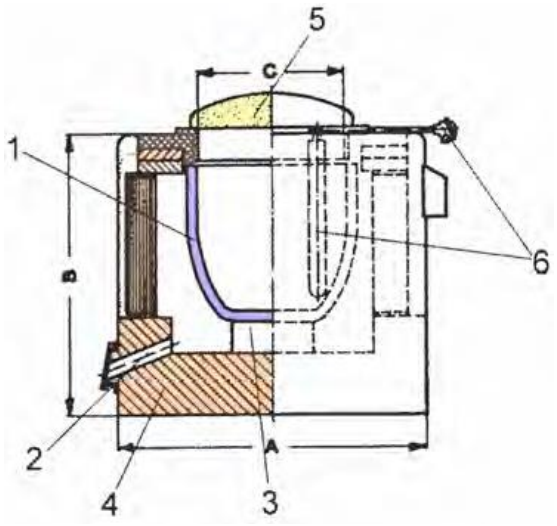
รูปที่ 2.18 ประเภทของเตาหลอมแบบต่างๆ

นอกจากลักษณะของเตาจะแบ่งออกเป็น 3 แบบแล้ว ในแต่ละแบบยังมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะการใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การใช้งานเตาหลอมแบบต่างๆในโรงงานผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ

No.	Type of furnace	Remelter	Refiner	Foundry	Primary
1.00	Reverberatory furnace, stationary	4	3	3	0
1.11	Top-loading furnace	2	1	0	0
1.12	Round furnace	1	0	0	0
1.13	Open side-well furnace	0	0	2	0
1.14	Twin chamber furnace	3	1	1	0
1.15	Dry-hearth furnace	0	3	0	0
1.16	Quick-melting furnace	0	0	3	0
1.17	Tower furnace	0	0	3	0
1.21	Reverberatory furnace,tiltable	4	3	3	4
1.22	Barrel-type furnace	2	3	0	0
1.33	Oval furnace	2	3	0	0
2.00	Crucible furnace	0	0	3	0
2.21	Crucible induction furnace	2	1	3	1
2.21	Channel induction furnace	2	0	1	2
3.00	Rotary drum furnace	0	4	0	0
denomination: 0 - not used, 1- used in special cases, 2 - frequently used, 3 - standard technology, 4 - key technology					

เตาประเภทครูซิเบิลทำมาจากซิลิกอนคาไบด์ (SiC) สามารถใช้ในงานสำหรับการหลอมโลหะผสมได้อย่างหลากหลาย แต่นิยมใช้เป็นเตาพักหรือเตาเพื่อการบำบัด ข้อกำจัดของเตาครูซิเบิลคือปริมาณที่ใช้ในการหลอมแต่ละครั้งมีได้ไม่มาก เชื้อเพลิงที่ใช้ ได้แก่ ก๊าซหรือน้ำมันซึ่งจะให้ความร้อนจากผนังด้านนอกของเตาทำให้การเผาไหม้ไม่สัมผัสกับวัสดุที่นำมาหลอมโดยตรง ลักษณะของเตาจะมีฝาด้านบนและผนังล้อมรอบเตา ดังแสดงในรูปที่ 2.19



1 - crucible, 2 - burner, 3 - crucible support, 4 - furnace housing, 5 – lid

รูปที่ 2.19 เตาครูซิเบิล

Singh et al. (2016) ได้ศึกษากระบวนการนำโลหะที่เหลืออยู่ในตะกรันออกมาให้มากที่สุด โดยการนำมาหลอมใหม่ โดยควบคุมอุณหภูมิในช่วง 850-1000 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้ในการหลอม 1-2 ชั่วโมง โดยใช้ตะกรันอะลูมิเนียมแต่ละครั้งประมาณ 15-25 กิโลกรัม จากผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิที่ดีที่สุดที่สามารถนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาได้ คือ 950 องศาเซลเซียส โดยโลหะที่กลับคืนมาอยู่ที่ร้อยละ 97 ของอะลูมิเนียมที่เหลืออยู่ในตะกรันเริ่มต้น

Soto et al. (1986) ได้ศึกษาตะกรันอะลูมิเนียมซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 10 เมซนั้นไม่คุ้มค่าที่จะหลอมเพื่อนำอะลูมิเนียมกลับมาใช้งาน แต่หากใช้วิธีลอยแร่ (froth flotation) ร่วมกับการเติมทองแดงลงไปเผื่อเคลือบผิวของเศษอะลูมิเนียม จะสามารถนำอะลูมิเนียมซึ่งมีขนาดเล็กตั้งแต่ 65 จนถึง 400 เมซ กลับมาใช้ใหม่ได้ แต่วิธีการนี้ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่ออนุภาคของตะกรันมีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถแก้ไขโดยการเติมสารช่วยในการยึดเกาะอะลูมิเนียมเพื่อให้เกิดการลอยตัวได้

K. MAH (1986) ได้ศึกษาเกี่ยวกับตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นในการหลอมอะลูมิเนียมขั้นทุติยภูมิและถูกนำไปหลอมใหม่ แต่ตะกรันที่มีขนาดเล็กกว่า -10 เมซนั้นมักจะถูกทิ้งไป ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาการแยกโลหะอะลูมิเนียมด้วยไฟฟ้า การทดลองในขั้นต้นพบว่า หากเตรียมเศษอะลูมิเนียม

อย่างเหมาะสม จะสามารถใช้ไฟฟ้าแยกส่วนที่เป็นโลหะและออกไซด์ (เฟสเกลือ) ออกจากกันได้ ซึ่งคำนวณแล้วคุ้มค่าที่จะแยกโลหะออกจากตะกรันด้วยวิธีนี้ก่อนนำเอาไปใส่เตาหลอม

Lazzaro (1994) ได้ศึกษาวิธีการรีไซเคิลตะกรันอะลูมิเนียม โดยใช้เตาหลอมเล็กโทรไลต์แทนการใช้เตาหลอมแบบธรรมดา ซึ่งผลที่ได้คือ เปอร์เซ็นต์อะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนเพิ่มสูงขึ้นจากการหลอมด้วยเตาหลอมอิเล็กโทรไลต์ และสามารถแยกเอาเกลือและสิ่งเจือปนอื่นๆออกไปได้ด้วย

Friendrich et al (2001) ได้ศึกษาขนาดของตะกรันอะลูมิเนียมว่ามีผลต่อปริมาณอะลูมิเนียมที่ได้เมื่อนำไปหลอมหล่อใหม่อย่างไร โดยพบว่า ตะกรันที่มีขนาดใหญ่จะมีปริมาณอะลูมิเนียมมากกว่าตะกรันที่มีขนาดเล็กในน้ำหนักที่เท่ากัน โดยตะกรันขนาดใหญ่จะนำไปหลอมเพื่อนำอะลูมิเนียมกลับมาใช้ใหม่ ตะกรันขนาดเล็กสามารนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ และผงตะกรันสามารถนำไปเข้าโรงงาน slag ต่อไป

Puga et al. (2009) ได้ศึกษาพัฒนาวิธีรีไซเคิลเศษอะลูมิเนียมโดยใช้เครื่องอัด พบว่า ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณอะลูมิเนียมที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลเศษอะลูมิเนียม ได้แก่ ความชื้น แรงดันที่ใช้ในการอัดเศษอะลูมิเนียมก่อนเข้าเตาหลอม อุณหภูมิ พื้นที่ผิวหน้าของเตาที่ใช้หลอมมีผลต่อการเกิดตะกรันอะลูมิเนียม ทำให้อะลูมิเนียมที่ได้มีความคล้ายคลึงกับแท่งอะลูมิเนียมที่มีจำหน่ายในท้องตลาด และตะกรันที่ได้ยังปราศจากฟลักซ์อีกด้วย

Tsakiridis et al. (2013) ได้ศึกษากระบวนการรีไซเคิลตะกรันอะลูมิเนียม โดยใช้วิธีการบดและร่อนผ่านตะแกรง จนมีขนาดเล็กกว่า 100 ไมครอน พบว่าสามารถนำเอาโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาได้ร้อยละ 10.25 ของน้ำหนักตะกรัน แต่หากทำไปชะละลายเพื่อนำฟลักซ์หรือเกลือออกไปก่อน พบว่า สามารถนำอะลูมิเนียมกลับคืนมาได้ถึงร้อยละ 57.5

ไพบูลย์ แย้มเผื่อน (2555) ได้ศึกษาแนวคิดที่จะนำขี้ตะกรันอะลูมิเนียมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำไปผสมกับพอลิเมอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาและทดลองนำขี้ตะกรันอะลูมิเนียมมาเป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิโพรพิลีน โดยการนำขี้ตะกรันอะลูมิเนียมไปบดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร จากนั้นนำมาผสมกับพอลิโพรพิลีน ด้วยกระบวนการผสมแบบหลอมละลาย ที่สัดส่วนการผสมขี้ตะกรันอะลูมิเนียมในพอลิโพรพิลีนร้อยละ 1, 3, 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนัก จากนั้นขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแล้วทดสอบสมบัติทางกล โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางความร้อน การวิจัยพบว่าขี้ตะกรันอะลูมิเนียมสามารถนำมาเป็นสารเสริมแรงให้กับ

พอลิโพรพิลีนได้ เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าขี้ตะกรันอะลูมิเนียมส่งผลให้ ค่าความแข็ง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และค่าการต้านทานการเสียดทานของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการนำอะลูมิเนียมกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียม ซึ่งตะกรันอะลูมิเนียมเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ ในการดำเนินงานวิจัยใช้ตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นในเตาหลอมโลหะอะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 มาทดลองเพื่อนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาด้วยวิธีการใช้ความร้อนและทำให้โลหะอะลูมิเนียมที่อยู่ในตะกรันหลอมและเกิดการแยกตัวโดยชนิดของเตาหลอมที่ใช้ในการทดลอง คือ เตาครูซิเบิลแกร์ไฟต์

รูปที่ 3.1 ตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมในโรงงาน

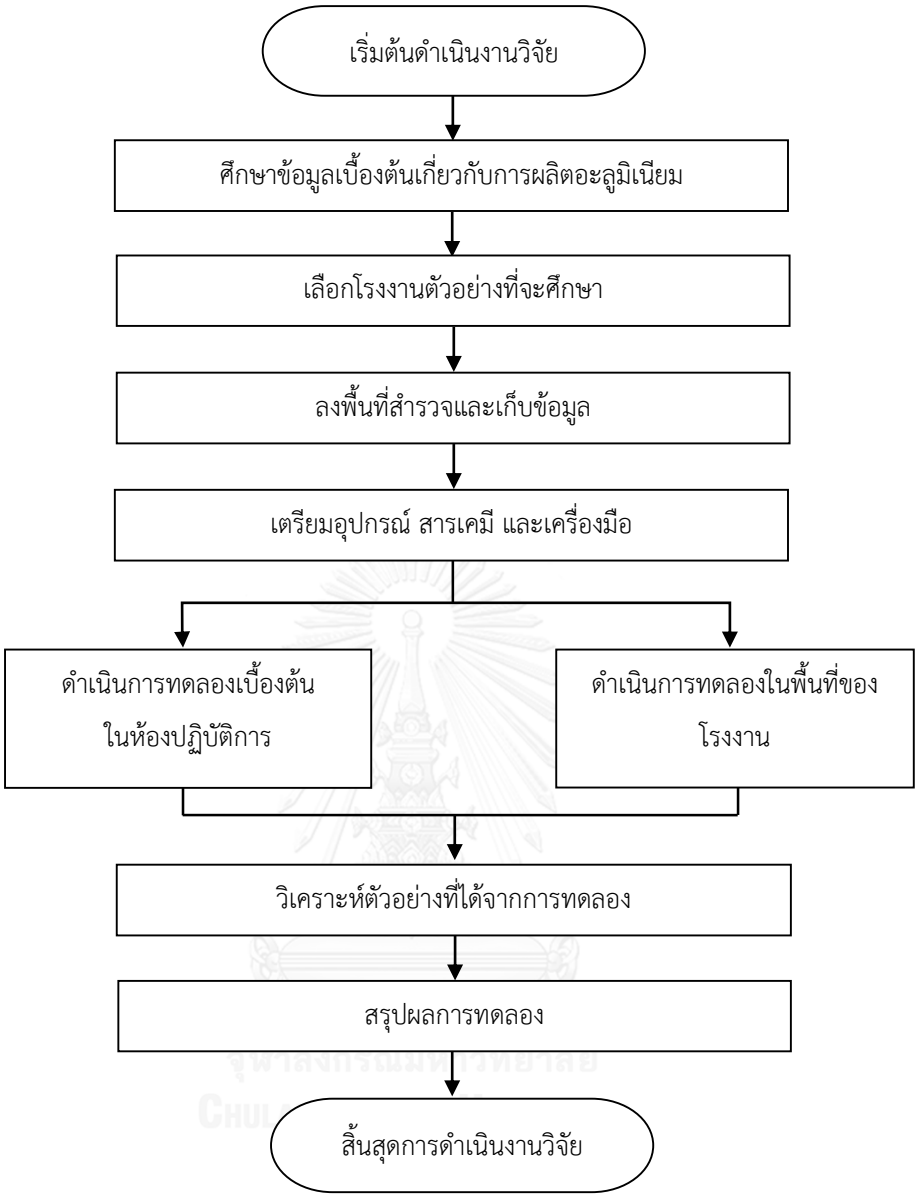
ในการดำเนินงานวิจัยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดลองที่ 1 การทดลองหลอมตะกรันอะลูมิเนียมในห้องปฏิบัติ โดยนำตัวอย่างตะกรันอะลูมิเนียมจากโรงงานที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 3.2) มาทำการทดลองเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และการทดลองที่ 2 การทดลองหลอมตะกรันอะลูมิเนียมด้วยเตาต้นแบบในพื้นที่ของโรงงาน โดยนำเครื่องต้นแบบที่ผู้วิจัยจัดทำขึ้นไปใช้ในการดำเนินการทดลอง โดยการทดลองที่ 2 นี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบตามลักษณะของตะกรันอะลูมิเนียมเริ่มต้นที่นำมาใช้ในการทดลอง ดังนี้ การทดลองที่ 2.1 เป็นการนำตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องมาทำการให้ความร้อนเพื่อทำให้

โลหะอะลูมิเนียมที่มีอยู่ในตะกรันหลอมและแยกตัวออกจากตะกรัน ส่วนการทดลองที่ 2.2 เป็นการนำตะกรันร้อน (รูปที่ 3.3) ที่เกิดขึ้นจากการกวาดตะกรันอะลูมิเนียมออกจากเตาหลอมของโรงงานมาใช้ทดลองในทันที ซึ่งยังคงมีความร้อนหลงเหลืออยู่ในตะกรันอะลูมิเนียมนี้

รูปที่ 3.2 ลักษณะของตะกรันที่เย็นตัวแล้ว

รูปที่ 3.3 ลักษณะของตะกรันที่ยังร้อนอยู่

จากการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นเป็นกระบวนการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์และลดปริมาณของเสียที่จะต้องถูกนำไปกำจัด ซึ่งแผนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดจะแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

3.1.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

เป็นการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับประเภทของอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมที่มีอยู่ในประเทศไทย ทั้งในด้านการประกอบกิจการ กระบวนการผลิต ประเภทของโรงงาน เพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกโรงงานตัวอย่างที่จะศึกษา โดยเฉพาะข้อมูลด้านปริมาณของตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตและวิธีการจัดการตะกรันของโรงงานในปัจจุบัน นอกจากนั้นแล้ว ยังทำการศึกษา

ข้อมูลทั่วไปของโรงงาน เช่น ที่ตั้งโรงงาน ประเภทของโรงงาน กำลังการผลิต และมาตรฐานการดำเนินงาน

3.1.2 การเลือกโรงงานตัวอย่างที่จะศึกษา

หลักเกณฑ์การพิจารณาการเลือกโรงงานตัวอย่างที่จะศึกษา มีดังต่อไปนี้

1. โรงงานประกอบกิจการผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิที่มีมาตรฐานด้านคุณภาพ สิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย ซึ่งได้การรับรองจากสถาบันต่างๆ เช่น ISO 9001 ISO14001 และมีประวัติการดำเนินกิจการมาอย่างต่อเนื่องยาวนาน

2. โรงงานที่มีกำลังการผลิตที่ถือเป็นโรงงานขนาดกลางหรือขนาดใหญ่ เพื่อใช้เป็นแบบอย่างหรือแนวทางให้แก่โรงงานผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิอื่นๆ ที่ประกอบกิจการในลักษณะเดียวกัน

3. โรงงานที่มีความสนใจและให้ความร่วมมือในการทำการศึกษาวิจัยเพื่อนำโลหะอะลูมิเนียมที่อยู่ในตะกรันกลับคืนมา หรือต้องการนำตะกรันอะลูมิเนียมมาใช้ให้เกิดประโยชน์

4. โรงงานที่มีความพร้อมในการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการจัดการของเสียให้ดียิ่งขึ้น

3.1.3 การลงพื้นที่สำรวจและเก็บข้อมูล

จากเกณฑ์ในการเลือกโรงงานข้างต้น เมื่อได้โรงงานเป้าหมายที่จะศึกษาแล้ว จึงติดต่อขออนุญาตเข้าโรงงาน จากนั้นจึงเข้าไปสำรวจและเก็บข้อมูลของโรงงาน ได้แก่ ข้อมูลทั่วไปของโรงงาน ขั้นตอนกระบวนการผลิต ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับตะกรันอะลูมิเนียมของโรงงาน ทั้งในด้านปริมาณที่เกิดขึ้นและวิธีการจัดการในปัจจุบัน จากนั้นจึงเก็บตัวอย่างตะกรันอะลูมิเนียมบางส่วนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในตะกรันอะลูมิเนียม และใช้สำหรับการทดลองเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการ นอกจากการสำรวจและเก็บข้อมูลแล้วยังต้องพิจารณาบริเวณที่จะใช้สำหรับการทดลองในพื้นที่ของโรงงานอีกด้วย ในการสำรวจและเก็บข้อมูลนี้ควรมีผู้เชี่ยวชาญหรือเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานซึ่งรับผิดชอบในแต่ละส่วนเป็นผู้ให้ข้อมูล

3.1.4 การเตรียมอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือ

หลังจากการลงพื้นที่สำรวจและเก็บข้อมูลโรงงานที่จะศึกษาแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การเตรียมอุปกรณ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อใช้ในการทดลองในพื้นที่ของโรงงาน โดยเครื่องต้นแบบนี้จะใช้สำหรับการหลอมตะกรันอะลูมิเนียมโดยชนิดของเตาหลอมที่ใช้เป็น เตาครูซิเบิลแกรไฟต์ ลักษณะของเตาเป็นแบบหมุนเท สำหรับขั้นตอนการสร้างเครื่องต้นแบบและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่างๆที่อยู่ในตะกรันอะลูมิเนียมและ

โลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ต่อไป

3.1.5 การดำเนินการทดลอง

ในการดำเนินการทดลองเริ่มจากการเก็บตัวอย่างตะกรันอะลูมิเนียมจากโรงงานมาวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในตะกรันอะลูมิเนียม จากนั้นจึงนำตะกรันอะลูมิเนียมมาทดลองเบื้องต้น คือ การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้เตาครูซิเบิลแกรไฟต์ซึ่งมีน้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง มีวัตถุประสงค์เพื่อหาร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียม และในการทดลองที่ 2 จะใช้เตาต้นแบบที่ผู้วิจัยจัดทำขึ้นในการหลอมตะกรันอะลูมิเนียม โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะของตะกรันอะลูมิเนียมที่นำมาใช้หลอม คือ ตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องและตะกรันอะลูมิเนียมร้อน ซึ่งตะกรันทั้งสองส่วนเป็นตะกรันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหลอมอะลูมิเนียมของโรงงาน

ในการทดลองที่ 2 นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบปริมาณร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียม 2 แบบ และในการทดลองโดยใช้ตะกรันร้อนนี้จะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนอีกด้วย ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิลและเวลาที่ใช้ในการกวน โดยรายละเอียดขั้นตอนในดำเนินการทดลองหลอมตะกรันทั้งหมดจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.3 การดำเนินการทดลอง ต่อไป

3.1.6 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ในการดำเนินงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ตัวอย่างดังนี้

- **ตะกรันอะลูมิเนียมก่อนการทดลอง** จะวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ XRF-EDX เพื่อดูองค์ประกอบของตะกรันอะลูมิเนียมจากเตาหลอมของโรงงาน
- **โลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน** มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Optical Emission Spectrometer เพื่อหาองค์ประกอบและปริมาณของธาตุต่างๆที่มีอยู่ในโลหะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.7 สรุปผลการทดลอง

ในขั้นตอนนี้เป็นการนำผลการทดลองมาพิจารณาว่าในกระบวนการนำอะลูมิเนียมกลับคืนมาจากตะกรันนั้นจากการทดลองที่ 1 และ 2 สามารถนำโลหะอะลูมิเนียมกลับมาได้ร้อยละเท่าไหร่ และปัจจัยด้านอุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิลและเวลาที่ใช้ในการกวนส่งผลอย่างไรต่อโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองโดยใช้ตะกรันอะลูมิเนียมร้อน ข้อสังเกตของตะกรันที่เหลืออยู่หลังจากการทดลองมีลักษณะเป็นอย่างไร รวมถึงการเปรียบเทียบองค์ประกอบและปริมาณของอะลูมิเนียมที่มีอยู่ในโลหะที่ได้กลับคืนจากการทดลองแต่ละแบบ

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ในส่วนของเครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ สามารถแบ่งออกตามขั้นตอนการดำเนินการทดลองซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ คือ

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองที่ 1 ในห้องปฏิบัติการ
2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองที่ 2 ในพื้นที่ของโรงงาน
3. เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการในห้องปฏิบัติการ

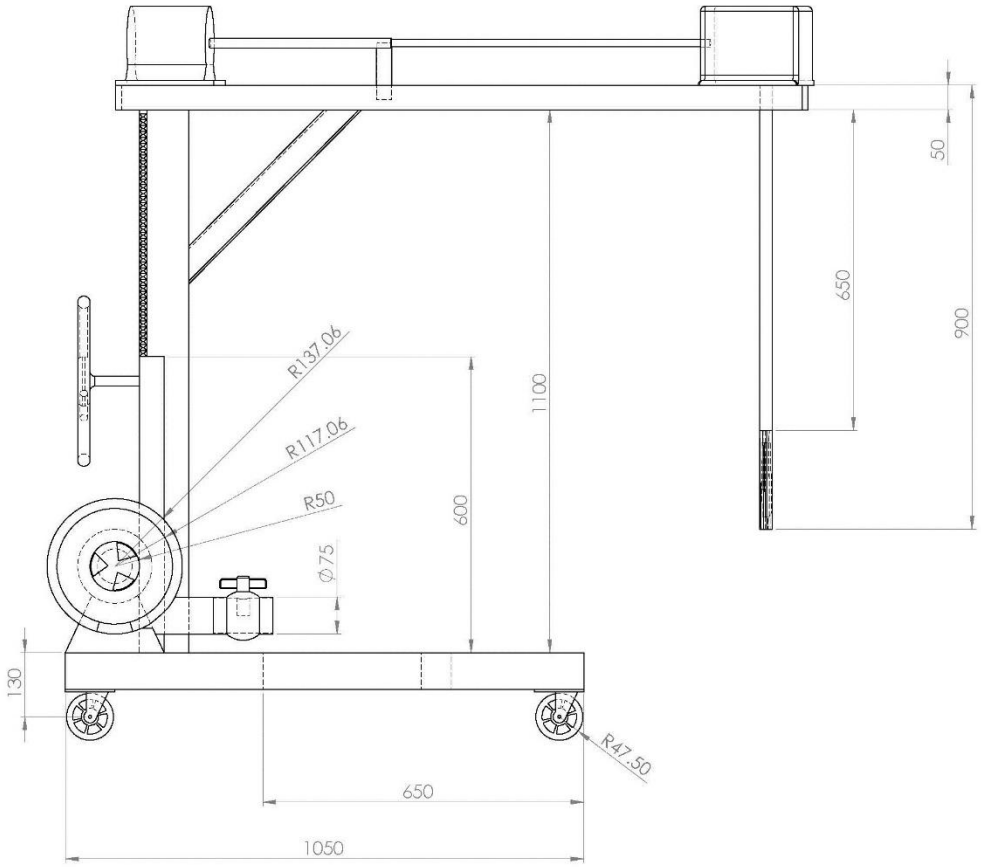
ในการทดลองที่ 1 เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วย

1. เตาหลอมครูซิเบิลแกรไฟต์ เส้นผ่าศูนย์กลางปากด้านใน 190 มิลลิเมตร ลึก 330 มิลลิเมตร
2. ชุดเตาหลอมที่ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง
3. ภาชนะของรับน้ำโลหะที่ได้จากเตาหลอม
4. แม่พิมพ์โลหะ

รูปที่ 3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

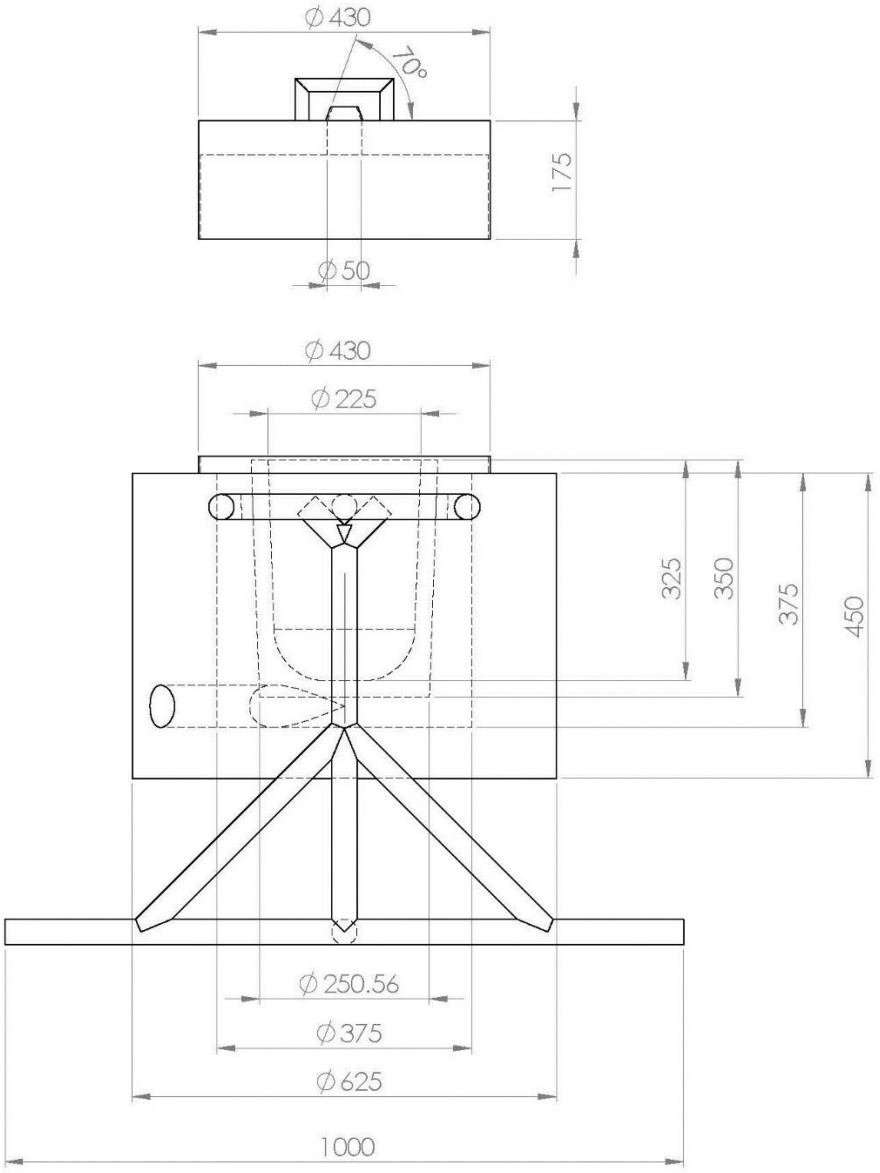
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสร้างเตาต้นแบบ

ในการทดลองที่ 2 นี้ได้มีการออกแบบเตาหลอมเพื่อใช้ในการทดลอง มีการทดสอบทั้งก่อนติดตั้งในโรงงานและทดสอบใช้งานจริง ซึ่งในช่วงแรกของการทดลองยังมีปัญหาเรื่องการให้ความร้อน เนื่องจากเครื่องต้นแบบตัวแรกนั้นยังไม่ได้มีการติดตั้งปั๊มลม จากนั้นได้มีการนำกลับมาปรับปรุงแก้ไขทำการติดตั้งปั๊มลมและเพิ่มความหนาของผนังเตาจนสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถให้ความร้อนแก่เตาครูซิเบิลได้มากกว่า 800 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 30 นาที สามารถรองรับตะกรันอะลูมิเนียมได้สูงสุด 20 กิโลกรัม รายละเอียดแสดงมาตรส่วนของอุปกรณ์บางส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 ส่วนรายละเอียดแสดงมาตรส่วนของอุปกรณ์ทั้งหมด ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ค



รูปที่ 3.6 มาตราส่วนด้านข้างของชุดใบกวน (หน่วย : มิลลิเมตร)

Chulalongkorn University



รูปที่ 3.7 มาตราส่วนด้านข้างของชุดเตาหลอม (หน่วย : มิลลิเมตร)

ในขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์นั้นมีการสร้างเครื่องต้นแบบในการหลอมตะกรันอะลูมิเนียมแบบหมุนเท โดยมีรายการวัสดุและอุปกรณ์ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องต้นแบบ

รายการ	ยี่ห้อ	รายละเอียด	จำนวน
เตาหลอมครูซิเบิลแกรไฟต์	มอร์แกน	รุ่น A60 เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกปากเบ้า 11 นิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลางภายในปากเบ้า 9 นิ้ว ความสูง 14 นิ้ว ขนาดความจุ 17 ลิตร สามารถรองรับน้ำโลหะอะลูมิเนียมได้สูงสุด 20 กิโลกรัม	1
มอเตอร์สำหรับใช้ในการกวน	Mitsubishi	รุ่น SF-JR (L) มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ความเร็วรอบ 1450 รอบต่อนาที	1
ปั๊มลม (blower)	VENZ	รุ่น SB-30 มอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้า ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที ปริมาณลมที่ผลิตได้ 1-7 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที	1
ชุดเกียร์ทดรอบ	Kimpo	Gear Reducer Motor Series KVB อัตราทดรอบ 1/60	1
ชุดขับเคลื่อนใบกวน	-	วัสดุทำจากเหล็ก ประกอบด้วย เพลา ข้อต่อตรง ตลับลูกปืน	
ใบกวน	-	ทำจากสแตนเลส ส่วนก้านใบกวนมีความยาว 90 เซนติเมตร ใบกวนเป็นแบบ Anchor Stirrer รัศมี 8 เซนติเมตร หนา 6 มิลลิเมตร	1
ท่อพลาสติก (PVC)	ไทยเฟิง	บอลวาล์ว PVC ขนาด 2-1/2 นิ้ว	1
ท่ออากาศ	-	ท่อยางสังเคราะห์เสริมใยเหล็ก	1
ถังก๊าซ	ปตท.	ขนาด 15 กิโลกรัม	1
เกจวัดความดันก๊าซ	HAMP	LPG Regulator HAMP 76-3.5M-LP	1
ล้อ		ล้อโพลียูรีเทน ชนิดมีที่เบรค	4

รายการ	ยี่ห้อ	รายละเอียด	จำนวน
ชุดขับเคลื่อนขึ้นลง	-	เฟืองตรง เฟืองสะพานและพวงมาลัย	1
สวิตช์ เปิด-ปิด	-	เป็นสวิตช์ไฟชนิด 3 เฟส	1
สายไฟ	-	สายไฟชนิด 3 เฟส	-
เหล็กแบบต่างๆ	-	เหล็กกล่อง เหล็กแผ่น ฯลฯ	-
ฉนวนใยแก้ว	-	ฉนวนใยแก้วชนิดทนความร้อนสูง	-

นอกจากนั้นแล้วยังมีอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในการทดลองดังต่อไปนี้

- แม่พิมพ์โลหะที่ทำจากเหล็ก

- แผ่นเหล็กกั้นน้ำโลหะ

- พลั่วเหล็ก

- Thermocouple Type K สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ในช่วง -200 ถึง 1200 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนในการสร้างเครื่องต้นแบบสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการกวนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการให้ความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการกวน

จะเริ่มสร้างจากฐานตัวเครื่องโดยใช้เหล็กกล่องมาทำการตัดและเชื่อมติดเพื่อความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา ตัวฐานมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมพื้นผ้า มีความกว้าง 80 เซนติเมตร ยาว 105 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) จากนั้นถึงทำการสร้างส่วนเคลื่อนที่ขึ้นลงโดยการใช้ฟันเฟืองและสะพานเฟือง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ข)

(ก) (ข)

รูปที่ 3.8 ฐานของเครื่องต้นแบบ

ขั้นตอนต่อมา คือ การสร้างคานซึ่งคานนี้จะใช้สำหรับการวางมอเตอร์ ชุดขับเคลื่อนใบกวน เกียร์ทดรอบ และใบกวน ทั้งหมดนี้นำมาติดตั้งลงบนคานเป็นอันเสร็จในส่วนที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกวน ดังแสดงในรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกวน

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการให้ความร้อน

จะเริ่มจากนำแผ่นเหล็กมาตัดเป็นวงกลมสำหรับใช้เป็นฝาด้านบนและส่วนก้นของเตา จากนั้นนำเหล็กแผ่นมาม้วนให้เป็นทรงกระบอกสำหรับใช้เป็นผนังที่ล้อมรอบเตาครูซิเบิล ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งทุกด้านของส่วนที่เป็นผนังเตาจะทำเป็นผนัง 2 ชั้น ภายในบรรจุฉนวนใยแก้ว (fiber grass) ทนความร้อนเอาไว้จนเต็ม เพื่อลดการสูญเสียความร้อนซึ่งช่วยในการรักษาอุณหภูมิของเตาครูซิเบิลและป้องกันความร้อนที่แผ่ออกมาสู่ผู้ปฏิบัติงานอีกด้วย จากนั้นทำการเชื่อมติดส่วนประกอบต่างๆเข้าด้วยกัน และส่วนประกอบสุดท้าย คือ ขาตั้งสำหรับใช้วางเตาและเป็นจุดหมุนสำหรับการเอียงเท จะใช้วัสดุเป็นท่อสแตนเลส โดยการเจาะรูที่ผนังที่ล้อมรอบเตาแล้วสอดท่อที่ใช้เป็นแกนเข้าไป จากนั้นถึงเชื่อมติดกับส่วนที่เป็นเตาครูซิเบิล

รูปที่ 3.10 การสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการให้ความร้อนของเครื่องต้นแบบ

หลังจากที่ประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการกวนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการให้ความร้อนเสร็จแล้ว จะนำอุปกรณ์ทั้งสองส่วนมาต่อเข้าด้วยกัน โดยนำท่อเหล็กต่อกับท่อยางที่เสริมใยเหล็ก พร้อมทั้งติดตั้งบอลวาวล์เชื่อมต่อเข้ากับปั้มลมและตัวเตา รวมทั้งสายยางก๊าซ LPG ต่อเข้ากับท่อเหล็กซึ่งได้ติดตั้งวาวล์สำหรับควบคุมการเปิด-ปิดก๊าซ LPG ที่จะเข้าสู่เตาอีกด้วย ขั้นตอนสุดท้ายคือการติดตั้งระบบไฟต่อเข้ากับมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนใบกวนและปั้มลม ส่วนที่เป็นสวิตซ์ไฟจะติดเข้ากับเสาที่เป็นฐานของเครื่องต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.11

รูปที่ 3.11 เครื่องต้นแบบสำหรับใช้ในการทดลองในพื้นที่โรงงาน

3.2.3 เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองนอกจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการหลอมตะกรันอะลูมิเนียมแล้ว ยังมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังต่อไปนี้

- เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 2 ตำแหน่ง สำหรับการชั่งน้ำหนักตะกรันอะลูมิเนียมและโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน

- เครื่อง Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF-EDX) ยี่ห้อ PANalytical รุ่น Axios เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุต่างๆที่อยู่ในตะกรันอะลูมิเนียม

- เครื่อง Optical Emission Spectrometer ยี่ห้อ Bruker รุ่น Q8 เพื่อใช้ในการหาปริมาณของธาตุต่างๆที่อยู่ในโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน

3.3 การดำเนินการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษากระบวนนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาจากตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดในกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ โดยการนำเอาตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตในโรงงานตัวอย่างมาทำการทดลอง ด้วยวิธีการใช้ความร้อนเพื่อให้โลหะอะลูมิเนียมที่อยู่ในตะกรันหลอมและเกิดการแยกตัวโดยอาศัยความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันของโลหะอะลูมิเนียมและตะกรัน ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองที่ 1 การหลอมตะกรันในห้องปฏิบัติการ และการทดลองที่ 2 เป็นการหลอมตะกรันโดยใช้เครื่องต้นแบบที่ทางผู้วิจัยสร้างขึ้นสำหรับการดำเนินการทดลองในพื้นที่ของโรงงาน โดยตะกรันเริ่มต้นที่ใช้การทดลองนี้จะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ตะกรันอะลูมิเนียมที่เย็นตัวแล้วกับตะกรันอะลูมิเนียมร้อนที่ออกมาจากเตาหลอม ในแต่ละครั้งที่ทำการทดลองจะใช้ตะกรันอะลูมิเนียม 5 กิโลกรัม

ดังนั้น การหาร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนต่อตะกรันอะลูมิเนียมเริ่มต้น สามารถคำนวณได้ 2 แบบ ตามลักษณะของตะกรันอะลูมิเนียมเริ่มต้นที่ใช้ ดังสมการต่อไปนี้

- การคำนวณหาร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนจากการใช้ตะกรันอะลูมิเนียมที่เย็นตัวแล้ว

$$\frac{\text{โลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน } (\text{kg})}{5\ (\text{kg})}\ x\ 100\ = \text{ร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน}$$

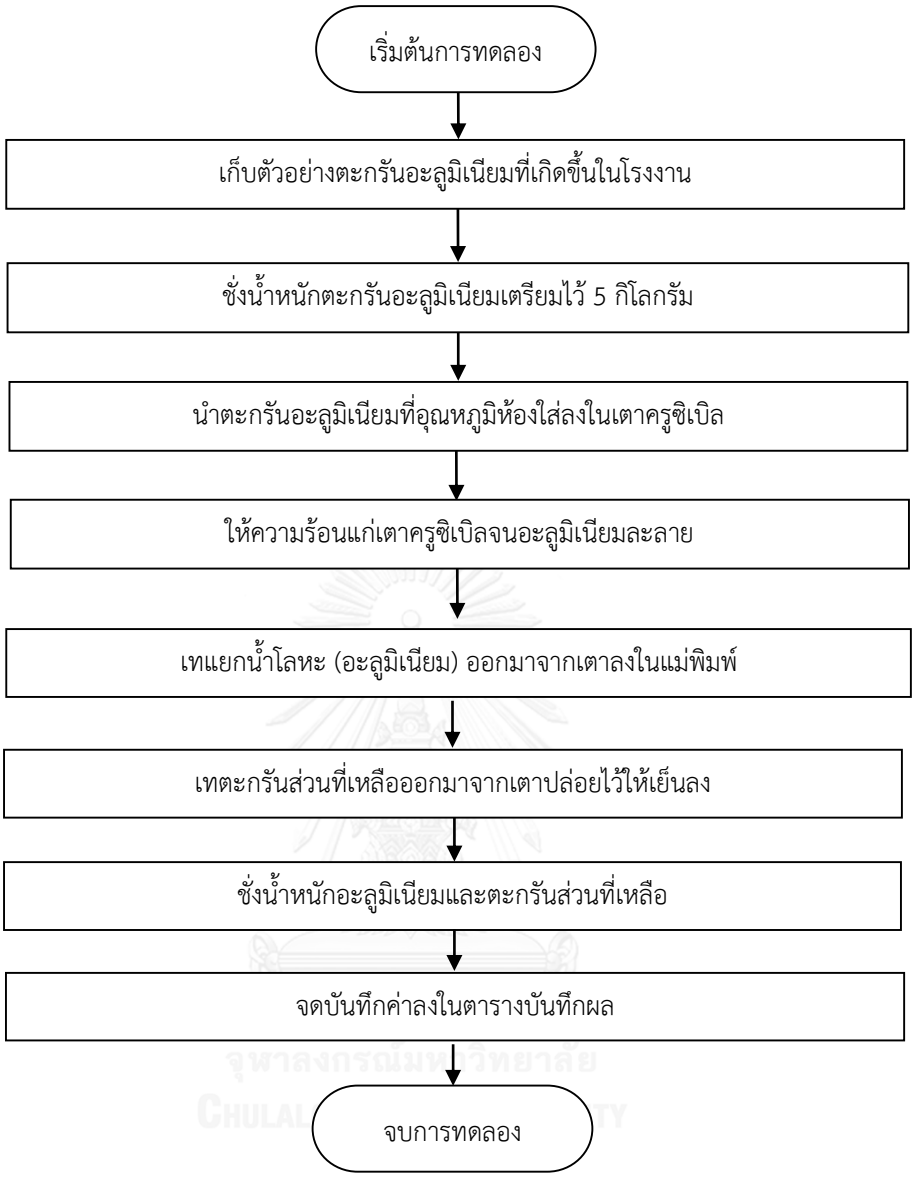
- การคำนวณหาร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนจากการใช้ตะกรันอะลูมิเนียมร้อน

$$\frac{\text{โลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน } (\text{kg})}{\text{โลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน } (\text{kg}) + \text{ตะกรันที่เหลือ} (\text{kg})}\ x\ 100 = \text{ร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน}$$

3.3.1 ขั้นตอนการทดลองที่ 1 การทดลองในห้องปฏิบัติการ

ในการทดลองที่ 1 นี้เป็นการดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการ ของภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการนำตะกรันที่เกิดขึ้นจากการหลอมในกระบวนการผลิตของโรงงานตัวอย่างมาทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการให้ความร้อนด้วยเตาครูซิเบิลแบบหมุนเทซึ่งใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง และให้ความร้อนแก่ตะกรันอะลูมิเนียมจากอุณหภูมิห้องจนกระทั่งโลหะอะลูมิเนียมในตะกรันเกิดการละลายและแยกชั้นระหว่างน้ำโลหะกับตะกรัน ต่อมาทำการเทน้ำโลหะออกจากเตาครูซิเบิลลงในแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ จากนั้นจึงเทตะกรันส่วนที่เหลืออยู่ในเตาครูซิเบิลออกมาและทิ้งไว้ให้เย็นตัวลง จึงนำโลหะแข็งตัวแล้วออกจากแม่พิมพ์และตะกรันส่วนที่เหลือมาชั่งน้ำหนัก จากนั้นบันทึกค่าลงในตารางบันทึกผล ขั้นตอนการทดลองที่ 1 ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



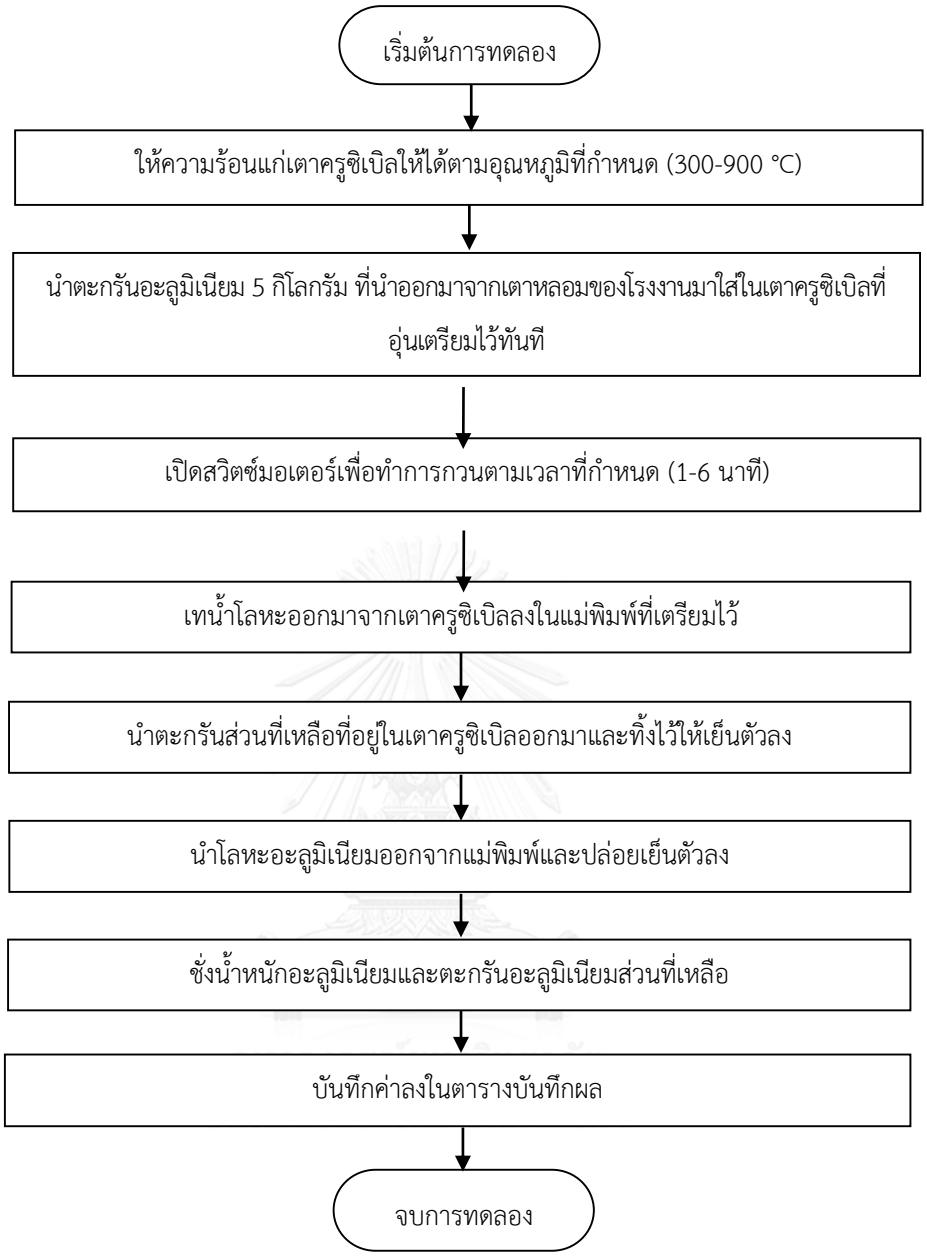
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการทดลองที่ 1 การทดลองในห้องปฏิบัติการ

3.3.2 ขั้นตอนการทดลองที่ 2 การทดลองด้วยเตาต้นแบบในพื้นที่โรงงาน

ในการทดลองที่ 2 นี้เป็นการดำเนินการทดลองหลอมตะกรันอะลูมิเนียมด้วยเตาต้นแบบในพื้นที่ของโรงงานตัวอย่างที่จะทำการศึกษา โดยทำการขออนุญาตใช้พื้นที่ของโรงงาน เพื่อนำเครื่องต้นแบบไปติดตั้งและทดลองในบริเวณพื้นที่ของแผนกเตาหลอมของโรงงาน โดยในการทดลองนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะของตะกรันอะลูมิเนียมที่นำมาใช้ในการทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 2.1 การนำตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องซึ่งเก็บไว้ในส่วนของโรงเก็บตะกรันของโรงงานมาชั่งน้ำหนัก โดยแต่ละการทดลองจะใช้ตะกรันอะลูมิเนียม 5 กิโลกรัมมาใส่ในเครื่องต้นแบบและให้ความร้อนจนโลหะอะลูมิเนียมละลาย จากนั้นเทน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่ได้ลงในแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ จากนั้นเทตะกรันส่วนที่เหลือออกมา ปล่อยให้เย็นตัวแล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนัก

การทดลองที่ 2.2 การนำตะกรันอะลูมิเนียมร้อนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการกวาดตะกรันอะลูมิเนียมออกจากเตาหลอมของโรงงานมาใช้ทดลองในทันที ซึ่งตะกรันอะลูมิเนียมยังคงมีความร้อนหลงเหลืออยู่ ในการทดลองนี้เริ่มต้นโดยการอุ่นเตาครูซิเบิลด้วยเครื่องต้นแบบที่นำมาติดตั้ง ซึ่งใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้ตามอุณหภูมิที่กำหนดและรักษาอุณหภูมิให้คงที่ (300-900 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำตะกรันอะลูมิเนียมที่ถูกกวาดออกมาจากเตาหลอมในขณะที่ยังร้อนประมาณ 5 กิโลกรัม มาใส่ในครูซิเบิลแกรไฟต์ที่ให้ความร้อนไว้แล้ว จากนั้นเปิดสวิตซ์มอเตอร์เพื่อทำการกวนตามเวลาที่กำหนด (1-6 นาที) และปิดสวิตซ์มอเตอร์แล้วเทน้ำโลหะออกมาใส่แม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ และเทตะกรันอะลูมิเนียมส่วนที่เหลือออกมากองไว้ ปล่อยให้น้ำโลหะและตะกรันที่เหลืออยู่เย็นตัวลง จึงชั่งน้ำหนักทั้งโลหะที่แข็งตัวแล้วและตะกรันอะลูมิเนียมส่วนที่เหลือ จากนั้นบันทึกค่าลงในตารางบันทึกผล โดยขั้นตอนการทดลองที่ 2.2 ทั้งหมด แสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการทดลองที่ 2.2 การทดลองในพื้นที่ของโรงงาน

ในการทดลองที่ 2 นี้ นอกจากตัวแปรต่างๆที่ทำการจดบันทึกแล้ว ยังต้องมีการจดบันทึกปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไปในการทดลองแต่ละครั้งด้วย เพื่อนำมาคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ คือ ก๊าซ LPG ที่บรรจุในถังขนาด 15 กิโลกรัม ซึ่งมีวิธีการคำนวณค่าใช้จ่าย ดังนี้

- การคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไป

น้ำหนักของถังก๊าซ LPG (ก่อนทำการทดลอง –หลังทำการทดลอง) = น้ำหนักของเชื้อเพลงที่ใช้ไป (kg)

- การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่ใช้ไป

น้ำหนักของเชื้อเพลงที่ใช้ไป (kg) x ราคาเชื้อเพลิงต่อหน่วย (baht/kg)= ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานการ (baht)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลอง และการอภิปรายข้อมูล

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนนำอะลูมิเนียมกลับคืนมาจากตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดในกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ โดยการนำตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตในโรงงานตัวอย่างมาหลอมใหม่ ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองในห้องปฏิบัติการและการทดลองโดยใช้เครื่องต้นแบบในพื้นที่ของโรงงาน จากขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดสามารถเสนอผลการดำเนินงานได้ดังนี้

- การวิเคราะห์องค์ประกอบของตะกรันอะลูมิเนียม
- ร้อยละโดยน้ำหนักของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน
- ปัจจัยด้านอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อการนำอะลูมิเนียมกลับคืน
- การวิเคราะห์องค์ประกอบของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน
- การเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิง

4.1 องค์ประกอบของตะกรันอะลูมิเนียม

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ได้เก็บตัวอย่างตะกรันอะลูมิเนียมจากโรงงาน เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตะกรันอะลูมิเนียมด้วยเครื่อง XRF-EDX เพื่อต้องการทราบชนิดและปริมาณของธาตุต่างๆ ของตะกรันอะลูมิเนียม ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าธาตุต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF นี้อยู่ในรูปของออกไซด์ โดยธาตุที่มีปริมาณมากที่สุดคือ Al_2O_3 มีปริมาณร้อยละ 73.61 รองลงมาคือ MgO มีปริมาณร้อยละ 5.14 ส่วนธาตุอื่นๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงไว้ในภาคผนวก ข (ตารางที่ ข-1) จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่า ตะกรันอะลูมิเนียมประกอบด้วยธาตุต่างๆ ที่หลากหลาย ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของอะลูมิเนียมที่นำมาหลอมในโรงงาน ฟลักซ์ที่ใช้ในการหลอม รวมถึงธาตุต่างๆ ที่ติดมากับเศษอะลูมิเนียม อย่างไรก็ดีตะกรันอะลูมิเนียมก็ยังคงมีปริมาณของธาตุอะลูมิเนียมสูงว่าธาตุอื่นๆอยู่มาก ตะกรันอะลูมิเนียมนี้จึงเหมาะแก่การนำมาทดลองเพื่อนำอะลูมิเนียมกลับคืนมา

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตะกรันอะลูมิเนียมด้วยเครื่อง XRF-EDX

ชนิดของธาตุ	ปริมาณธาตุ (ร้อยละ)
Al_2O_3	73.61
Si_2O_3	8.33
MgO	6.54
Cl	1.89
Na_2O	1.88
Fe_2O_3	1.45
K_2O	0.87

4.2 ผลการทดลองที่ 1 การหลอมตะกรันอะลูมิเนียมในห้องปฏิบัติการ

การทดลองในห้องปฏิบัติการนี้ได้เก็บตะกรันอะลูมิเนียมจากโรงงานมาทดลอง โดยเริ่มจากนำตะกรันที่อุณหภูมิห้องมาใส่ในเตาครูซิเบิล จากนั้นให้ความร้อนแก่เตาครูซิเบิลจนอะลูมิเนียมที่อยู่ในตะกรันละลายและเกิดการแยกชั้นจึงเทน้ำโลหะออกมาใส่ลงในแม่พิมพ์ ได้เป็นแท่งอะลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากนั้นนำไปวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในโลหะที่ได้กลับคืนมาต่อไป

รูปที่ 4.1 โลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า ร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนเฉลี่ยอยู่ที่ 40.4 ของน้ำหนักตะกรันที่ใส่เข้าไป ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งใช้เวลาในการให้ความร้อนแก่เตาครูซิเบิลเป็นเวลา 60 นาที ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การหลอมตะกรันอะลูมิเนียมในห้องปฏิบัติการ

การทดลองที่	น้ำหนักตะกรันอะลูมิเนียมที่ใส่เข้าไป (kg)	เวลาที่ใช้ (min)	น้ำหนักโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน (kg)	น้ำหนักตะกรันส่วนที่เหลือ (kg)	ร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน
1	5.00	60	1.99	3.01	39.80
2	5.00	60	1.92	3.08	38.40
3	5.00	60	2.15	2.85	43.00
Average	5.00	60	2.02	2.98	40.40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 ผลการทดลองที่ 2 การหลอมตะกรันอะลูมิเนียมด้วยเครื่องต้นแบบในพื้นที่ของโรงงาน

ในการทดลองที่ 2 นี้แบ่งออกเป็น 2 แบบตามลักษณะของตะกรันอะลูมิเนียมเริ่มต้นที่นำมาใช้ในการทดลอง ได้แก่ การทดลองที่ 2.1 เป็นการหลอมตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิเพื่อแยกเอาโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาจากตะกรันอะลูมิเนียม และการทดลองที่ 2.2 เป็นการหลอมตะกรันอะลูมิเนียมร้อนจากเตาหลอมของโรงงานเพื่อแยกเอาโลหะอะลูมิเนียมกลับมา ซึ่งจำเป็นต้องดำเนินการทดลองในพื้นที่ของโรงงานตัวอย่าง โดยนำเครื่องต้นแบบไปติดตั้งและทำการทดลองในพื้นที่บริเวณที่ใกล้กับเตาหลอมของโรงงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เนื่องจากการหลอมตะกรันอะลูมิเนียมร้อนเป็นกระบวนการที่ต้องทำต่อเนื่องจากกระบวนการผลิตของโรงงานในทันที

รูปที่ 4.2 เครื่องต้นแบบที่ติดตั้งภายในพื้นที่ของโรงงาน

4.3.1 ผลการทดลองที่ 2.1 การนำโลหะกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องด้วยเตาต้นแบบ

เป็นการนำตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องจากโรงเก็บตะกรันอะลูมิเนียมของโรงงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 นำมาใส่ในเครื่องต้นแบบและให้ความร้อนจนโลหะอะลูมิเนียมละลาย จากนั้นจึงเทน้ำโลหะอะลูมิเนียมลงในแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้

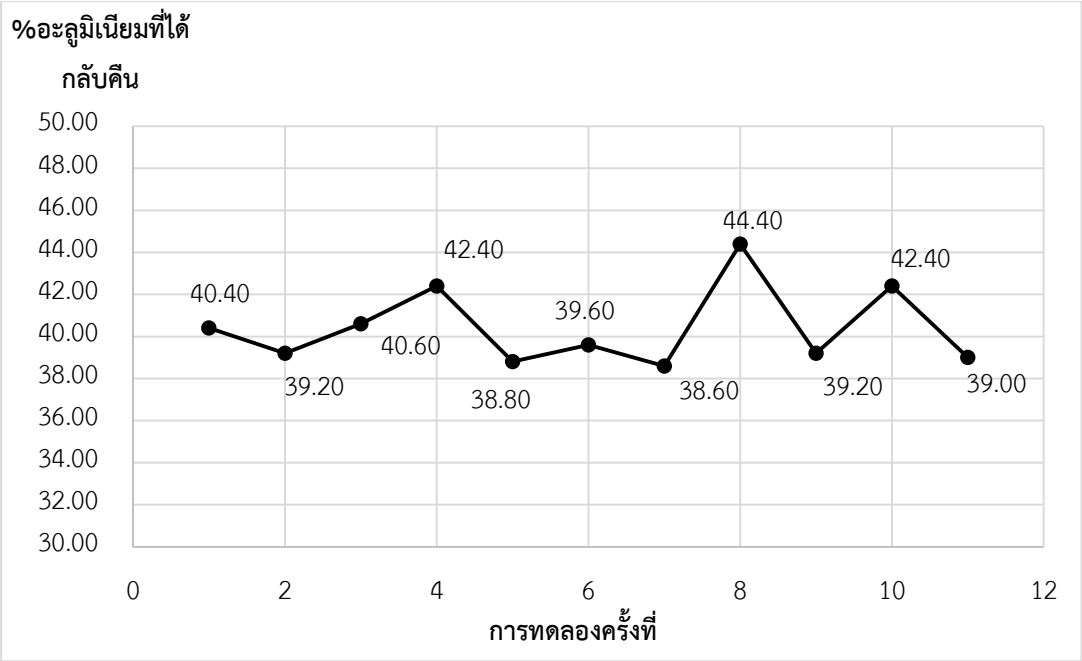
รูปที่ 4.3 ตะกรันอะลูมิเนียมที่อยู่โรงเก็บตะกรันอะลูมิเนียมของโรงงาน

จากการทดลองหลอมตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องโดยเตาต้นแบบ พบว่า โลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 40.42 โดยมีค่าระหว่างร้อยละ 38.7 – 44.6 ของน้ำหนักตะกรันที่ใส่เข้าไป เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบตะกรันอะลูมิเนียม ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ตารางบันทึกผลการนำโลหะกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้อง

การทดลองที่	**น้ำหนักตะกรันอะลูมิเนียมที่ใส่เข้าไป (kg)**	**เวลาที่ใช้ (min)**	**น้ำหนักโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน (กิโลกรัม)**	**น้ำหนักตะกรันอะลูมิเนียมที่เหลือ (กิโลกรัม)**	**ร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน**
1	5	60	2.02	2.91	40.40
2	5	60	1.96	3.00	39.20
3	5	60	2.03	2.97	40.60
4	5	60	2.12	2.85	42.40
5	5	60	1.94	3.04	38.80
6	5	60	1.98	2.98	39.60
7	5	60	1.93	3.06	38.60
8	5	60	2.22	2.76	44.40
9	5	60	1.96	3.02	39.20
10	5	60	2.12	2.87	42.40
11	5	60	1.95	3.03	39.00
เฉลี่ย	**5**	**60**	**2.02**	**2.95**	**40.42**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



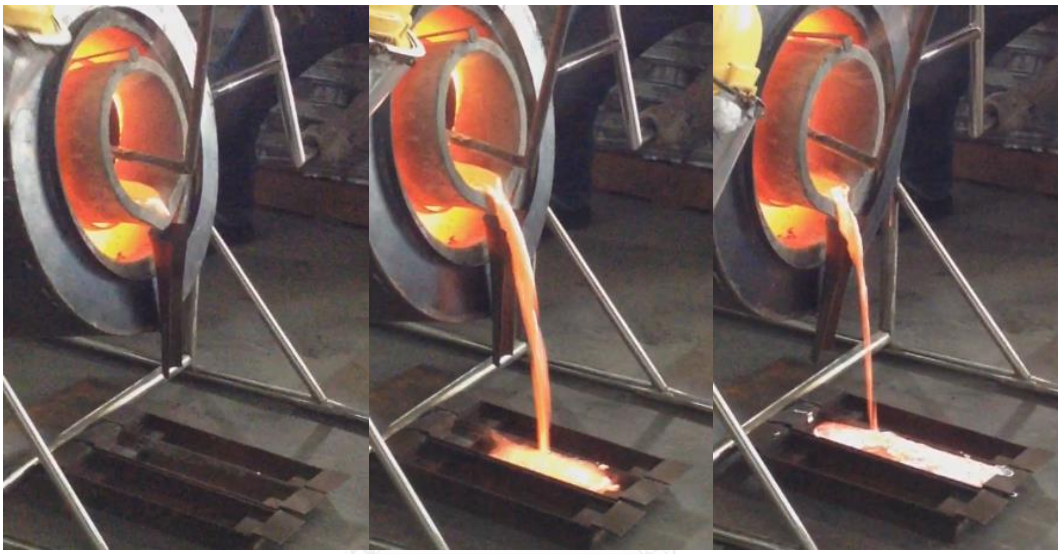
รูปที่ 4.4 ผลการนำโลหะกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้อง

4.3.2 ผลการทดลองที่ 2.2 การนำโลหะกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมร้อนด้วยเตาต้นแบบ

เป็นการนำตะกรันอะลูมิเนียมร้อนที่ได้จากขั้นตอนการกวาดตะกรันอะลูมิเนียมออกจากเตาหลอมของโรงงานในขณะที่ยังร้อนมาใช้ทดลองในทันที ซึ่งตะกรันอะลูมิเนียมยังคงมีความร้อนหลงเหลืออยู่มาก จากการวัดอุณหภูมิด้วย Thermocouple Type K พบว่า ตะกรันอะลูมิเนียมที่ถูกกวาดออกมาจากเตาหลอมมีอุณหภูมิสูงถึง 800-890 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.5 ตะกรันอะลูมิเนียมที่ถูกกวาดออกมาจากเตาหลอมของโรงงาน

เริ่มต้นการทดลองนี้โดยการให้ความร้อนแก่เตาครูซิเบิลของเครื่องต้นแบบที่นำมาติดตั้งเพื่อให้ได้ตามอุณหภูมิที่กำหนดและรักษาอุณหภูมิไว้ให้คงที่ตามที่กำหนด จากนั้นนำตะกรันอะลูมิเนียมที่ถูกกวาดออกมาจากเตาหลอมในขณะที่ยังร้อน มาใส่ในครูซิเบิลแกรไฟต์ที่ให้ความร้อนไว้แล้ว จากนั้นเปิดสวิตซ์มอเตอร์เพื่อกวนตามเวลาที่กำหนด จากนั้นปิดสวิตซ์มอเตอร์แล้วเทน้ำโลหะออกมาใส่แม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ (รูปที่ 4.6) แล้วจึงเทตะกรันอะลูมิเนียมส่วนที่เหลือแยกออกมา เมื่อทั้งสองส่วนเย็นตัวลงแล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละของอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน

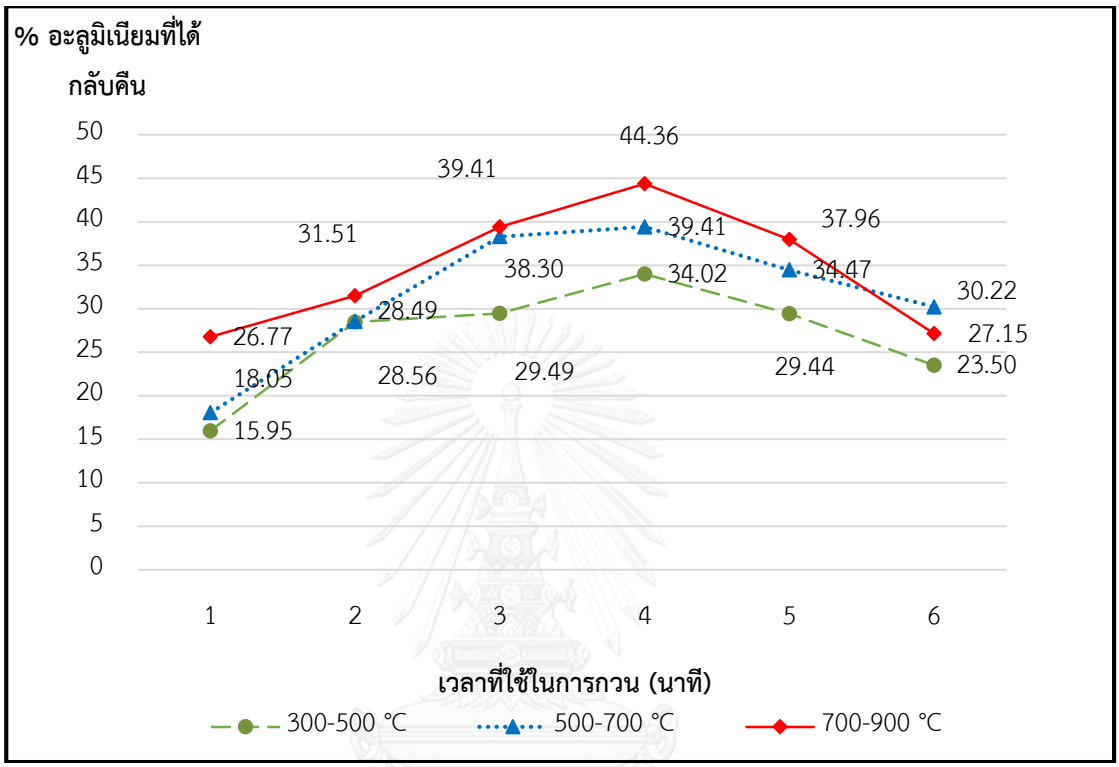


รูปที่ 4.6 ขั้นตอนการเทน้ำโลหะอะลูมิเนียมลงในแม่พิมพ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในการทดลองโดยใช้ตะกรันร้อนนี้ ทำการแบ่งอุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิลแกรไฟต์ออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 อุณหภูมิช่วง 300-500 องศาเซลเซียส กลุ่มที่ 2 อุณหภูมิช่วง 500-700 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ 3 อุณหภูมิช่วง 700-900 องศาเซลเซียส และการควบคุมเวลาที่ใช้ในการกวนตั้งแต่ 1-6 นาที พบว่า ปัจจัยด้านอุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิลส่งผลต่อร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน โดยเมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิลสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนสูงขึ้นด้วย ส่วนปัจจัยด้านเวลาในการกวนนั้น จะเห็นได้ชัดเจนว่า เวลาที่ใช้ในกวนในช่วงแรก คือ 1-4 นาที ปริมาณโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนมีแนวโน้มสูงขึ้นตามเวลาในการกวนที่เพิ่มขึ้น และสูงที่สุดในช่วง 4 นาที ซึ่งจะสามารถนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาได้ร้อยละ 44.36 ในช่วงอุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส แต่หากใช้เวลาในการกวนมากกว่า 4 นาที พบว่า ร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนมีแนวโน้มลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการกวนที่นานเกินไปจะทำออกไซด์ที่อยู่ในตะกรันอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะอะลูมิเนียมซึ่งมีความไวในการทำปฏิกิริยา

กับออกซิเจน อีกทั้งการใช้เวลากวนที่มากขึ้นจะเพิ่มโอกาสที่ออกซิเจนในอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมกลายเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ จึงทำให้ปริมาณโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนมานั้นลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

จากการทดลองพบว่า หากการให้ความร้อนแก่เตาครูซิเบิลที่อุณหภูมิน้อยกว่า 300 องศาเซลเซียส ตะกรันอะลูมิเนียมจะสูญเสียความร้อนอย่างรวดเร็วทำให้โลหะอะลูมิเนียมแข็งตัวและไม่สามารถแยกเอาโลหะอะลูมิเนียมออกจากตะกรันอะลูมิเนียมได้ (เนื่องจากอะลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวที่ 660 องศาเซลเซียส) และตะกรันอะลูมิเนียมหลังจากผ่านกระบวนการการทดลองนี้จะมีลักษณะของเศษอะลูมิเนียมชิ้นเล็กๆ รวมตัวอยู่กับตะกรันอะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จึงไม่สามารถนำมาชั่งน้ำหนักในการคำนวณหาร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน

รูปที่ 4.8 ตัวอย่างตะกรันอะลูมิเนียมหลังจากผ่านการทดลองที่อุณหภูมิเริ่มต้น
ของเตาครูซิเบิลน้อยกว่า 300 องศาเซลเซียส

ในการทดลองให้อุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิลมากกว่า 800 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการกวนมากกว่า 5 นาที ผลที่ได้คือ ตะกรันอะลูมิเนียมร้อนที่นำมาหลอมเกิดการลุกไหม้และติดไฟ เนื่องจากการหลอมที่อุณหภูมิสูงทำให้โลหะอะลูมิเนียมอยู่ในสภาพที่เป็นของเหลว และการกวนที่นานเกิดไปจะทำให้โลหะอะลูมิเนียมกลายไปเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์มากขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาที่อะลูมิเนียมเปลี่ยนไปเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์นั้นเป็นปฏิกิริยาชนิดคายความร้อน (Exothermic Reaction) (Schmitz, 2014) ทำให้การทดลองโดยปัจจัยดังกล่าวนั้นเกิดเขม่าควันจำนวนมาก ปริมาณอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนลดลงและตะกรันที่เหลือจากการทดลองเมื่อเทออกมาจากเตาครูซิเบิลแล้วหากปล่อยทิ้งไว้จะยังลุกติดไฟได้อยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

รูปที่ 4.9 ตะกรันอะลูมิเนียมที่ลุกไหม้

4.4 องค์ประกอบของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน

หลังจากทำการนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมแล้ว เมื่อนำโลหะอะลูมิเนียมที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer พบว่า ในโลหะอะลูมิเนียมที่นำกลับคืนจากการทดลองหลอมตะกรันในห้องปฏิบัติการ มีองค์ประกอบที่เป็นธาตุโลหะอะลูมิเนียมเฉลี่ยร้อยละ 98.28 ส่วนในการทดลองหลอมตะกรันด้วยเครื่องต้นแบบ พบว่าทั้งการหลอมตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องและตะกรันอะลูมิเนียมร้อน ทำให้โลหะที่ได้กลับคืนมีองค์ประกอบที่เป็นธาตุโลหะอะลูมิเนียมโดยเฉลี่ยเท่ากันอยู่ที่ร้อยละ 99.24 ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์โลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน

การทดลองที่	**คำอธิบาย**	**ร้อยละของโลหะอะลูมิเนียม**
1	การหลอมตะกรันเย็นในห้องปฏิบัติการ	98.28
2.1	การหลอมตะกรันเย็นด้วยเตาต้นแบบ	99.24
2.2	การหลอมตะกรันร้อนด้วยเตาต้นแบบ	99.24

ลักษณะของโลหะที่นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ส่วนธาตุอื่นๆ ที่พบในโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนแสดงไว้ในภาคผนวก ข

รูปที่ 4.10 โลหะที่นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การนำอะลูมิเนียมกลับคืนโดยการให้ความร้อนแก่ตะกรันทั้งตะกรันอะลูมิเนียมอุณหภูมิและตะกรันอะลูมิเนียมร้อน ไม่ทำให้องค์ประกอบของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนมานั้นแตกต่างกัน ซึ่งอะลูมิเนียมที่ได้กลับมานี้สามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการหลอมของโรงงานได้

4.5 การเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิง

การทดลองโดยใช้เครื่องต้นแบบนี้ใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งได้ทำการบันทึกน้ำหนักของเชื้อเพลิงที่สูญเสียไปในแต่ละครั้งของการทดลอง สรุปผลได้ดังนี้

การทดลองที่ 2.1 ใช้ตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้อง 5 กิโลกรัมมาทำการทดลองจะใช้ปริมาณเชื้อเพลิงเฉลี่ย 1.78 กิโลกรัม ซึ่งเวลาที่ใช้ในการหลอม 60 นาที อุณหภูมิของเตาครูซิเบิลประมาณ 800 องศาเซลเซียส สามารถนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาได้ร้อยละ 40.42 ของน้ำหนักตะกรันที่ใส่เข้าไป เมื่อคิดปริมาณเชื้อเพลิงต่อน้ำหนักของอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน 1 กิโลกรัม จะใช้เชื้อเพลิงไปทั้งสิ้น 0.88 กิโลกรัม

การทดลองที่ 2.2 ใช้ตะกรันอะลูมิเนียมร้อน 5 กิโลกรัม จะใช้ปริมาณเชื้อเพลิงแตกต่างกันตามช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิล ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การใช้เชื้อเพลิงของการทดลองที่ใช้ตะกรันอะลูมิเนียมร้อน

อุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิล (°C)	**เชื้อเพลิงที่ใช้ไป (kg/5 kg dross)**	**ร้อยละของอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน (ที่เวลากวน 4 นาที)**
300-500	0.40	34.02
500-700	0.66	39.31
700-900	0.80	44.34

ที่อุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิลอยู่ในช่วง 700-900 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการกวน 4 นาที สามารถนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาได้ร้อยละ 44.36 ของน้ำหนักตะกรันอะลูมิเนียมที่ใส่เข้าไป ซึ่งใช้ปริมาณเชื้อเพลิงเฉลี่ยอยู่ที่ 0.80 กิโลกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้อง จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การทดลองโดยใช้ตะกรันอะลูมิเนียมร้อนจะใช้ปริมาณเชื้อเพลิงน้อยกว่าการทดลองโดยใช้ตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งตารางบันทึกปริมาณการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมดจะแสดงไว้ในภาคผนวก ก

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิง LPG ในการให้ความร้อนแก่เตาครูซิเบิล โดยคิดต่อน้ำหนักโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนสำหรับการทดลองโดยใช้ตะกรันร้อน พบว่า ที่ช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิล 300-500 °C มีการใช้เชื้อเพลิง 0.24 กิโลกรัมต่อโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน 1 กิโลกรัม ซึ่งใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่าในช่วงอุณหภูมิอื่นๆ โดยที่ช่วงอุณหภูมิ 500-700 °C และ 700-900 °C ใช้เชื้อเพลิง 0.33 และ 0.36 กิโลกรัมต่อโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน 1 กิโลกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงต่อโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน

		A	B	A / B
อุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิล (°C)	**เชื้อเพลิงที่ใช้ไป (kg/5 kg dross)**	**เชื้อเพลิงที่ใช้ไป (kg/kg dross)**	**อะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน (kg/kg dross)**	**เชื้อเพลิงที่ใช้ (kg) ต่ออะลูมิเนียม 1 กิโลกรัมที่ได้กลับคืน**
300-500	0.40	0.08	0.34	0.24
500-700	0.66	0.13	0.39	0.33
700-900	0.80	0.16	0.44	0.36

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาจากตะกรันอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมทุติยภูมิ ซึ่งสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยได้ดังนี้

1. องค์ประกอบของตะกรันอะลูมิเนียมที่ออกมาจากเตาหลอมอะลูมิเนียมทุติยภูมิมีส่วนประกอบของธาตุอะลูมิเนียมในรูปอะลูมิเนียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 70

2. การทดลองนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนจากการหลอมตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้อง พบว่า เมื่อนำตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องมาผ่านกระบวนการหลอม ทั้งการหลอมที่ห้องปฏิบัติการและการหลอมโดยเตาต้นแบบ สามารถนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาได้เฉลี่ยร้อยละ 40.40 และ 40.42 ของน้ำหนักตะกรันที่ใส่เข้าไป ซึ่งในการนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องนี้ ใช้เวลาประมาณ 60 นาที ในการทำให้อะลูมิเนียมเกิดการละลายและแยกชั้นกับตะกรัน

3. การทดลองนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาจากตะกรันอะลูมิเนียมร้อนโดยเตาต้นแบบ พบว่า ปัจจัยด้านอุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิลและเวลาที่ใช้ในการกวนมีผลต่อปริมาณโลหะอะลูมิเนียมกลับคืน โดยสรุปผลได้ดังนี้

- โลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นของเตาครูซิเบิล โดยอุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิลที่เหมาะสมที่สุดในการนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืน คือ ช่วงอุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส
- เวลาที่ใช้ในการกวนตะกรันอะลูมิเนียมที่ 4 นาที เป็นเวลาที่ดีที่สุดในการนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืน
- ปัจจัยที่ดีสุดในการนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาจากตะกรันอะลูมิเนียมร้อนโดยเตาต้นแบบอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการกวน 4 นาที สามารถนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนมาได้เฉลี่ยร้อยละ 44.4 ของน้ำหนักตะกรันที่ใส่เข้าไป

- หากอุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิลนั้นน้อยกว่า 300 องศาเซลเซียส จะทำให้โลหะอะลูมิเนียมแข็งตัวอย่างรวดเร็วและรวมตัวอยู่กับตะกรันอะลูมิเนียม ทำให้ไม่สามารถแยกเอาโลหะอะลูมิเนียมออกมาได้
- หากอุณหภูมิเริ่มต้นของเตาครูซิเบิลมากกว่า 800 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการกวนนานเกินกว่า 5 นาทีจะทำให้ตะกรันอะลูมิเนียมเกิดการลุกไหม้และติดไฟ ส่งผลให้ปริมาณของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนมีแนวโน้มลดลง

4. องค์ประกอบของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องและตะกรันอะลูมิเนียมร้อนที่ออกจากเตามีความคล้ายคลึงกัน โดยมีโลหะอะลูมิเนียมอยู่ในช่วงร้อยละ 97-99 ซึ่งสามารถนำโลหะที่ได้กลับคืนมานี้กลับเข้าสู่กระบวนการหลอมของโรงงานได้

5. เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิง LPG ในการนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืนจากตะกรันอะลูมิเนียมทั้ง 2 ลักษณะ พบว่า กระบวนการที่ใช้ตะกรันอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้องจะใช้เชื้อเพลิง 0.88 กิโลกรัมต่อโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน 1 กิโลกรัม ในขณะที่กระบวนการที่ใช้ตะกรันอะลูมิเนียมร้อน ในการกวนที่เวลา 4 นาที (สามารถนำโลหะกลับคืนมาได้มากที่สุด) ที่ช่วงอุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียส เชื้อเพลิงเพียง 0.24 กิโลกรัมต่อโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน 1 กิโลกรัม ซึ่งใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่าในช่วงอุณหภูมิอื่นๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. **การพัฒนาเครื่องต้นแบบ**

    - **การเพิ่มประสิทธิภาพ** ควรมีการพัฒนาเครื่องต้นแบบให้สามารถปรับความเร็วรอบของใบกวน รวมทั้งมีการทดลองใช้ใบกวนรูปแบบต่างๆเพื่อความยืดหยุ่นและเพิ่มประสิทธิภาพในการทดลองมากยิ่งขึ้น
    - **การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย** ควรทำการหลอมตะกรันในระบบปิดเพื่อความปลอดภัยและลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากฝุ่นหรือควันในกระบวนการ

- **ความทนทานของเตาต้นแบบ** หากใช้เตาที่ทำมาจากเหล็กหล่อแทนการใช้เตาครูซิเบิลแกร์ไฟต์ จะสามารถเพิ่มอายุการใช้งานและความคงทนแข็งแรงของเตา อีกทั้งเตาเหล็กหล่อสามารถปรับรูปแบบของเตาได้ตามที่ต้องการ ทำให้รูปแบบในการทำงานของเตามีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น เพื่อความสะดวกในการทำงานหรือเพิ่มประสิทธิภาพในการนำโลหะอะลูมิเนียมกลับคืน เช่น วิธีนำน้ำโลหะออกจากเตาหลอมทางช่องเปิดด้านข้างหรือด้านล้าง แทนการตักหรือวิธีการหมุนเท

2. **แนวทางการขยายผลนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม** สิ่งที่เห็นได้อย่างชัดเจนหลังจากที่ได้ทำการแยกโลหะอะลูมิเนียมนำกลับไปใช้ใหม่แล้ว ตะกรันอะลูมิเนียมที่เหลือท้ายสุด เมื่อนำไปปรับปรุงขนาดให้เหมาะสมแล้ว สามาถนำไปใช้ประโยชน์ต่อในอุตสาหกรรมเหล็ก โดยการใส่ตะกรันอะลูมิเนียมเข้าไปในเตาหลอมเหล็ก ที่ได้มีการทดสอบการนำไปใช้จริงตามข้อมูลในโครงการจัดทำแนวปฏิบัติที่เป็นเลิศ (Best Practice) การบริหารจัดการของเสียจากอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม ผลการทดลองใช้ในโรงงานนั้นสามารถทำให้ผลผลิตของการหลอมเหล็กเพิ่มขึ้น

3. **การควบคุมกระบวนการ** หากเกิดการลุกไหม้ของตะกรันอะลูมิเนียมระหว่างการหลอม สามารถนำตะกรันอะลูมิเนียมที่เย็นตัวแล้วมาใส่ในเตาและทำการกวน สามารถช่วยลดอุณหภูมิของตะกรันอะลูมิเนียมในเตาได้อย่างรวดเร็ว

4. **ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์** ควรมีการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติมทั้งกระบวนการผลิตโดยคำนึงถึงต้นทุนของอุปกรณ์ที่ใช้ อายุการใช้งานของอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายในด้านการจัดการของเสียที่เหลืออยู่อีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

Anderson, T. (2009). Welding aluminum. Retrieved 2015, April 14, from http://www.thefabricator.com/article/aluminumwelding/welding-aluminum

CRU International Ltd. (2012). Aluminium production and consumption. Retrieved July 21st, 2016, from https://www.lme.com/en-gb/metals/non-ferrous/aluminium/production-and-consumption/

Dai, C. (2012). *Development of Aluminum Dross-Based Material for Engineering Applications.* Worcester Polytechnic Institute.

Friendrich et al. (2001). Improved Aluminium Recovery at Recycling.

K. MAH, J. M. T. a. H. W. S. (1986). Electrostatic separation of aluminum from dross. *Conservation & Recycling, 9*(4), 325 - 334.

Lazzaro, G. E., M.

Pranovi, F. (1994). Recycling of aluminium droos in electrolytric pots. *Conservation and Recycling, 10*, 153-159.

Lucheva, B., Tsonev, T., and Petkov, R. (2005). Non-waste aluminium dross recycling. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 40*(4), 335-338.

Manfredi, O., Wuth, W., and Bohlinger, I. (1997). Characterizing the physical and chemical properties of aluminum dross. *JOM, 49*(11), 48-51.

Margalit, J. (2014). Advocating for Increased Scrap Usage at China's International Aluminium Conference. Retrieved June 12th, 2016, from https://www.thermofisher.com/blog/metals/advocating-for-increased-scrap-usage-at-chinas-international-aluminium-conference/

Pennex aluminum company. (2015). Safety data sheet (aluminum skim and dross). Greenville, South Carolina.

Puga, H., Barbosa, J., Soares, D., Silva, F., and Ribeiro, S. (2009). Recycling of aluminium swarf by direct incorporation in aluminium melts. *Journal of Materials Processing Technology, 209*(11), 5195-5203.

Schmitz, C. (2014). Handbook of Aluminium Recycling Deutsche Nationalbibliothek.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Schnell, J. K. (2012). Aluminium from WWII bomber headed for memorial. Retrieved 2015, Apirl 12, from http://www.hydro.com/en/Press-room/Feature-stories/Aluminium/Aluminium-from-WWII-bomber-headed-for-memorial-/

Singh, U., Ansari, M., Puttewar, S., and Agnihotri, A. (2016). Studies on process for conversion of waste aluminium dross into value added products. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 57*(4), 296-300.

Soto, H. and Toguri, J. M. (1986). Aluminum recovery from dross by flotation.

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

Tsakiridis, P. E., Oustadakis, P., and Agatzini-Leonardou, S. (2013). Aluminium recovery during black dross hydrothermal treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 1*(1-2), 23-32.

Wedepohl, K. H. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et cosmochimica Acta, 59*(7), 1217-1232.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2551). คู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมหลอมหล่อเศษและตะกรันอลูมิเนียม. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ดี เอ็ม พริ้นติ้ง จำกัด.

กระทรวงอุตสาหกรรม. (2548). ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548.

กิตติพันธุ์ บางยี่ขัน. (2551). โลหะกับการพัฒนาประเทศ. กรุ่งเทพมหานคร: สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐานกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

ณรงค์ฤทธิ์ โสสะ. (2555). โลหะอะลูมิเนียมผสม.

บริษัทคอนซัลแตนท์ ออฟ เทคโนโลยี. (2551). คู่มือการกำกับดูแลโรงงาน : อุตสาหกรรมหลอมหล่อเศษและตะกรันอลูมิเนียม. กรุงเทพมหานคร: กรมโรงงานอุตสาหกรรม.

ไพบูลย์ แย้มเผื่อน. (2555). การศึกษาอิทธิพลของขี้ตะกรันอลูมิเนียมจากโรงหล่อที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์-พื้นหลังพอลิพรอพิลีน.

ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่. (2552). อุตสาหกรรมอะลูมิเนียมของประเทศไทย. Retrieved 2015, April 30, from http://lc.dpim.go.th/kb/1097

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองที่ 1

การทดลองที่	น้ำหนักตะกรันอะลูมิเนียมที่ใส่เข้าไป (kg)	น้ำหนักโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน (kg)	น้ำหนักตะกรันส่วนที่เหลือ (kg)	ร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน
1	5.00	1.99	3.01	39.80
2	5.00	1.92	3.08	38.40
3	5.00	2.15	2.85	43.00

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองที่ 2.1

การทดลองที่	น้ำหนักโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน (kg)	น้ำหนักตะกรันอะลูมิเนียมที่เหลือ (kg)	ร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน (%)
1	2.02	2.91	40.40
2	1.96	3.00	39.20
3	2.03	2.97	40.60
4	2.12	2.85	42.40
5	1.94	3.04	38.80
6	1.98	2.98	39.60
7	1.93	3.06	38.60
8	2.22	2.76	44.40
9	1.96	3.02	39.20
10	2.12	2.87	42.40
11	1.95	3.03	39.00

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่ 2.2

การทดลองที่	อุณหภูมิของเตาครูซิเบิลก่อนใส่ตะกรันอะลูมิเนียม (℃)	เวลาที่ใช้ในการกวน (min)	ร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน
1	387	1.00	16.67
2	480	1.00	15.23
3	542	1.00	17.24
4	612	1.00	18.86
5	750	1.00	25.34
6	776	1.00	28.20
7	365	2.00	29.67
8	480	2.00	27.31
9	574	2.00	25.00
10	640	2.00	33.67
11	665	2.00	25.77
12	672	2.00	29.79
13	709	2.00	30.82
14	720	2.00	32.20
15	498	3.00	26.80
16	315	3.00	32.17
17	525	3.00	41.14
18	583	3.00	35.20
19	635	3.00	40.80
20	679	3.00	36.07
21	781	3.00	45.92
22	810	3.00	41.76
23	810	3.00	30.54
24	468	4.00	31.40
25	488	4.00	36.63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่ 2.2 (ต่อ)

การทดลองที่	อุณหภูมิของเตาครูซิเบิลก่อนใส่ตะกรันอะลูมิเนียม (°C)	เวลาที่ใช้ในการกวน (min)	ร้อยละของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืน
26	557	4.00	37.86
27	650	4.00	44.60
28	698	4.00	35.78
29	706	4.00	46.46
30	761	4.00	46.00
31	786	4.00	40.62
32	486	5.00	30.30
33	343	5.00	28.57
34	560	5.00	29.79
35	620	5.00	31.07
36	680	5.00	42.55
37	790	5.00	35.30
38	814	5.00	35.29
39	780	5.00	43.30
40	497	6.00	23.50
41	412	6.00	21.60
42	566	6.00	27.69
43	639	6.00	25.16
44	654	6.00	37.82
45	800	6.00	25.20
46	710	6.00	29.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-4 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการทดลองที่ 2.1

การทดลองที่	น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ใช้ไป (kg)
1	1.9
2	1.8
3	1.7
4	1.7
5	1.7
6	1.7
7	1.7
8	1.9
9	1.9
10	1.8
11	1.8

ตารางที่ ก-5 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการทดลองที่ 2.2

การทดลองที่	อุณหภูมิของเตาครูซิเบิลก่อนใส่ตะกรันอะลูมิเนียม (°C)	เวลาที่ใช้ในการกวน (min)	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
1	387	1.00	0.35
2	480	1.00	0.42
3	542	1.00	0.49
4	612	1.00	0.58
5	750	1.00	0.84
6	776	1.00	0.87
7	365	2.00	0.36
8	480	2.00	0.41
9	574	2.00	0.58
10	640	2.00	0.60

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-5 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการทดลองที่ 2.2 (ต่อ)

การทดลองที่	อุณหภูมิของเตาครูซิเบิลก่อนใส่ตะกรันอะลูมิเนียม (°C)	เวลาที่ใช้ในการกวน (min)	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
11	665	2.00	0.64
12	672	2.00	0.66
13	709	2.00	0.80
14	720	2.00	0.75
15	315	3.00	0.33
16	498	3.00	0.44
17	525	3.00	0.46
18	583	3.00	0.59
19	635	3.00	0.61
20	679	3.00	0.74
21	781	3.00	0.90
22	810	3.00	0.91
23	810	3.00	0.97
24	468	4.00	0.36
25	488	4.00	0.44
26	557	4.00	0.53
27	650	4.00	0.68
28	698	4.00	0.77
29	706	4.00	0.71
30	761	4.00	0.82
31	786	4.00	0.87
32	343	5.00	0.34
33	486	5.00	0.40
34	560	5.00	0.52
35	620	5.00	0.59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

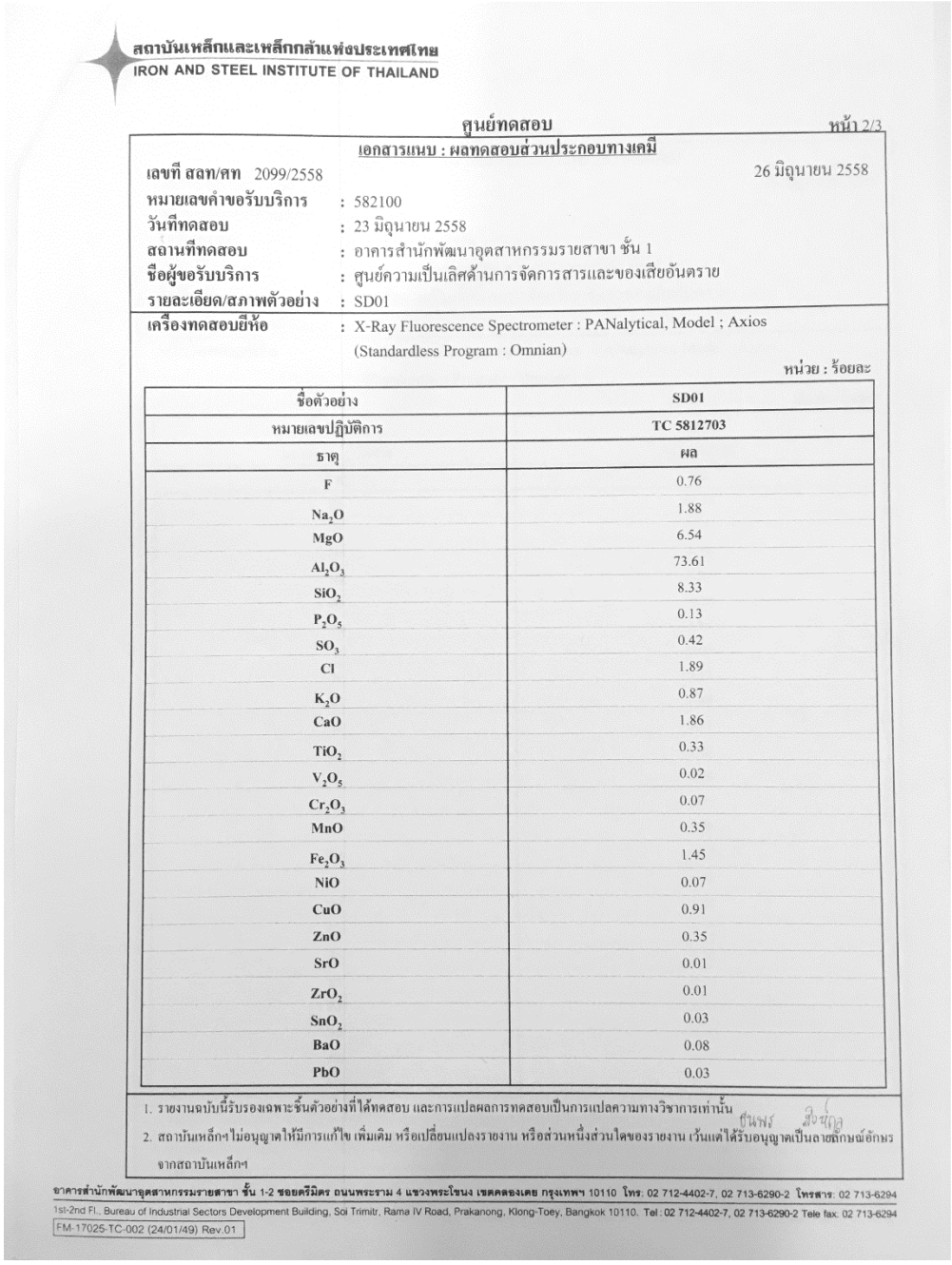
ตารางที่ ก-5 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการทดลองที่ 2.2 (ต่อ)

การทดลองที่	อุณหภูมิของเตาครูซิเบิลก่อนใส่ตะกรันอะลูมิเนียม (°C)	เวลาที่ใช้ในการกวน (min)	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
36	680	5.00	0.68
37	780	5.00	0.80
38	790	5.00	0.93
39	814	5.00	0.99
40	412	6.00	0.35
41	497	6.00	0.45
42	566	6.00	0.51
43	639	6.00	0.62
44	654	6.00	0.69
45	710	6.00	0.74
46	800	6.00	0.90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข
รายงานผลวิเคราะห์ตัวอย่าง

รูปที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันอะลูมิเนียมจากโรงงานตัวอย่าง



สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย
IRON AND STEEL INSTITUTE OF THAILAND

ศูนย์ทดสอบ หน้า 2/3

เอกสารแนบ : ผลทดสอบส่วนประกอบทางเคมี

เลขที่ สลท/ศท 2099/2558 26 มิถุนายน 2558

หมายเลขคำขอรับบริการ : 582100
วันที่ทดสอบ : 23 มิถุนายน 2558
สถานที่ทดสอบ : อาคารสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา ชั้น 1
ชื่อผู้ขอรับบริการ : ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย
รายละเอียด/สภาพตัวอย่าง : SD01
เครื่องทดสอบยี่ห้อ : X-Ray Fluorescence Spectrometer : PANalytical, Model ; Axios (Standardless Program : Omnian)

หน่วย : ร้อยละ

ชื่อตัวอย่าง	SD01
หมายเลขปฏิบัติการ	TC 5812703
ธาตุ	ผล
F	0.76
Na_2O	1.88
MgO	6.54
Al_2O_3	73.61
SiO_2	8.33
P_2O_5	0.13
SO_3	0.42
Cl	1.89
K_2O	0.87
CaO	1.86
TiO_2	0.33
V_2O_5	0.02
Cr_2O_3	0.07
MnO	0.35
Fe_2O_3	1.45
NiO	0.07
CuO	0.91
ZnO	0.35
SrO	0.01
ZrO_2	0.01
SnO_2	0.03
BaO	0.08
PbO	0.03

1. รายงานฉบับนี้รับรองเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบ และการแปลผลการทดสอบเป็นการแปลความทางวิชาการเท่านั้น
2. สถาบันเหล็กฯไม่อนุญาตให้มีการแก้ไข เพิ่มเติม หรือเปลี่ยนแปลงรายงาน หรือส่วนหนึ่งส่วนใดของรายงาน เว้นแต่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสถาบันเหล็กฯ

อาคารสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา ชั้น 1-2 ซอยตรีมิตร ถนนพระราม 4 แขวงพระโขนง เขตคลองเตย กรุงเทพฯ 10110 โทร. 02 712-4402-7, 02 713-6290-2 โทรสาร. 02 713-6294
1st-2nd Fl., Bureau of Industrial Sectors Development Building, Soi Trimitr, Rama IV Road, Prakanong, Klong-Toey, Bangkok 10110. Tel : 02 712-4402-7, 02 713-6290-2 Tele fax. 02 713-6294
FM-17025-TC-002 (24/01/49) Rev.01

รูปที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 1

SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH EQUIPMENT CENTRE CHULALONGKORN UNIVERSITY Chulalongkorn Soi 62 Phaya-Thai Rd. Bangkok 10330 Thailand Tel:0-2218-8032 Fax. 0-2254-0211

ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาคารสถาบัน 3 จุฬาลงกรณ์ซอย 62 พญาไท กรุงเทพฯ 10330 โทร. 0-2218-8032 โทรสาร. 0-2254-0211

รายงานผลการทดสอบ

รายงานเลขที่ 291/2558 วันที่อนุมัติ 27 เมษายน 2558 หน้า 1/1

รหัสตัวอย่าง : MTL/15/371-373	วัตถุประสงค์ : เพื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี
ประเภทตัวอย่าง :-Aluminium alloy	วิธีวิเคราะห์ : Spark source optical emission spectrometry
ลักษณะตัวอย่างที่ได้รับ : เหมาะสมที่จะวิเคราะห์	เครื่องมือวิเคราะห์ : Optical emission spectrometer; BRUKER Q8
เจ้าของตัวอย่าง : ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย	วันที่วิเคราะห์ : 24 เมษายน 2558
ที่อยู่ : อาคารวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ชั้น 8 ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330	ผู้วิเคราะห์ : นายสมนึก นพนิตย์ (การเตรียมตัวอย่าง) : -

ปริมาณธาตุ (%โดยน้ำหนัก)

ชื่อตัวอย่าง	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Pb
1. Al 01	0.419	0.256	0.034	0.039	0.025	0.012	0.0062	0.032	0.016	0.00360
2. Al 02	0.562	0.975	0.119	0.062	0.030	0.016	0.024	0.228	0.022	0.011
3. Al 03	0.569	1.011	0.133	0.066	0.036	0.018	0.026	0.253	0.027	0.013
	Sn	Ag	B	Be	Bi	Ca	Cd	Na	P	Sb
1. Al 01	0.00490	<0.00010	0.00063	<0.00001	0.00069	0.00029	0.00083	0.00026	0.00047	0.0046
2. Al 02	0.0066	<0.00050	0.00095	<0.00050	0.0012	0.0010	<0.0010	0.0019	<0.0010	0.013
3. Al 03	0.0077	<0.00050	0.0011	<0.00050	0.0013	0.0015	<0.0010	0.00087	<0.0010	0.013
	Sr	V	In	Zr	Ce	Co	Al			
1. Al 01	<0.00010	0.014	0.00023	0.00078	0.00077	0.00018	99.13			
2. Al 02	<0.0010	0.013	<0.0050	0.0011	<0.00050	<0.00050	97.90			
3. Al 03	<0.0010	0.014	<0.0050	0.0011	<0.00050	<0.00050	97.80			

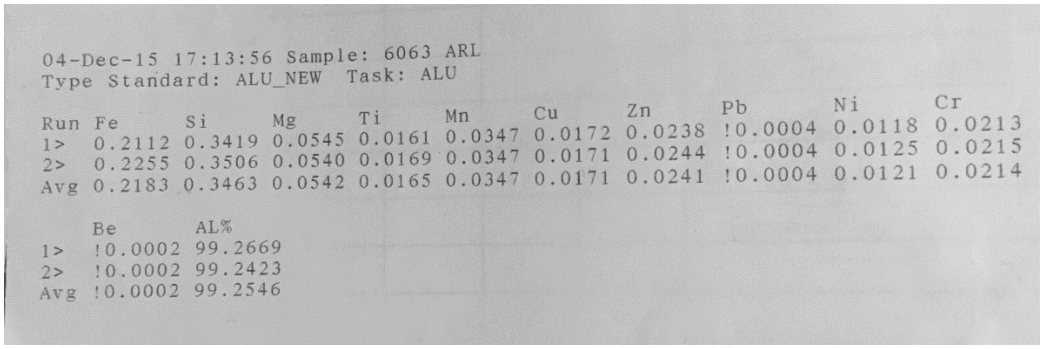
(นายสมนึก นพนิตย์) ผู้วิเคราะห์

(นายอุทัย ติยะวิสุทธิศรี) ผู้บริหารวิชาการ

(รศ.ดร.อมร เพชรสม) ผู้อำนวยการ

หมายเหตุ : 1. ผลการทดสอบนี้เป็นผลเฉพาะของตัวอย่างที่ส่งให้ทดสอบเท่านั้น 2. รายงานผลวิเคราะห์ห้องไม่ถูกทำสำเนาเผยแพร่นอกจากจะได้รับการยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากศูนย์เครื่องมือฯ ยกเว้นการทำทั้งฉบับ

รูปที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.1 ตัวอย่าง A



04-Dec-15 17:13:56 Sample: 6063 ARL
Type Standard: ALU_NEW Task: ALU

Run	Fe	Si	Mg	Ti	Mn	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr
1>	0.2112	0.3419	0.0545	0.0161	0.0347	0.0172	0.0238	!0.0004	0.0118	0.0213
2>	0.2255	0.3506	0.0540	0.0169	0.0347	0.0171	0.0244	!0.0004	0.0125	0.0215
Avg	0.2183	0.3463	0.0542	0.0165	0.0347	0.0171	0.0241	!0.0004	0.0121	0.0214

	Be	AL%
1>	!0.0002	99.2669
2>	!0.0002	99.2423
Avg	!0.0002	99.2546

รูปที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.1 ตัวอย่าง B

Date/Time	12/25/2015 3:43:31 PM				
Signature					
Analysis Type	NA				
Task	Conc_Al				
Method	ALGLAL				
Grade	PURE				
TS					
SID#	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Prompt	***Sample Name***	***Customer Name***	***Analyze No***	***Inspector By***	***Batch No***
Value	27-NOV-2015	4th			
	Run Info				
Element		**Cu**	**Si**	**Mg**	**Zn**
Channel		***Cu0***	***Si0***	***Mg0***	***Zn4***
Type		INS	INS	INS	INS
Unit		%	%	%	%
Run 1	2	0.02381	0.34857	0.02489	0.02614
Run 2	2	0.02543	0.37331	0.0261	0.02518
Run 3	2	0.02442	0.35605	0.02551	0.02511
Run 4	2	0.02338	0.34199	0.02455	0.02467
Grade High		0	0	0	0
Average		**0.02426**	**0.35498**	**0.02526**	**0.02527**
Grade Low		0	0	0	0
SD		0.000891	0.013503	0.000685	0.000618
SD%		3.67	3.8	2.71	2.45
Last SCT Value		0	0	0	0
Nom. SCT Value		0	0	0	0
Flags					

รูปที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.1 ตัวอย่าง B (ต่อ)

Element	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Bi	Na	Ca	Sb	Sr
Channel	*Fe0*	*Mn0*	*Ni0*	*Ti4*	*Pb6*	*Sn5*	*Cr0*	*Bi4*	*Na0*	*Ca2*	*Sb5*	*Sr4*
Type	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Run 1	0.27269	0.03522	0.01595	0.01362	0.00221	0.00359	0.0309	0.00008	0.00042	0.00018	0.00278	2E-05
Run 2	0.29168	0.03597	0.01704	0.01357	0.0022	0.00365	0.03101	0.00006	0.00035	0.00015	0.00255	2E-05
Run 3	0.26481	0.03539	0.01569	0.01361	0.0021	0.00335	0.03064	0.00011	0.00037	0.00017	0.00234	2E-05
Run 4	0.25615	0.03501	0.01506	0.01391	0.00208	0.00338	0.03116	0.00009	0.0004	0.00024	0.00245	2E-05
Grade High	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Average	**0.27133**	**0.0354**	**0.01594**	**0.01368**	**0.00215**	**0.00349**	**0.03093**	**0.00008**	**0.00038**	**0.00019**	**0.00253**	**2E-05**
Grade Low	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SD	0.015155	0.00041	0.000824	0.000157	0.000069	0.000152	0.000218	0.00002	0.00003	0.000039	0.000188	1E-06
SD%	5.59	1.16	5.17	1.15	3.23	4.35	0.71	24.59	7.83	20.86	7.43	7.5
Last SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nom. SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flags											(	(

รูปที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.1 ตัวอย่าง B (ต่อ)

Element	P	Zr	V	B	Be	Cd	Co	Ga	In	Li	Hg	W	Al%
Channel	*P1*	*Zr1*	*V4*	*B2*	*Be3*	*Cd3*	*Co4*	*Ga1*	*In1*	*Li0*	*Hg1*	*W1*	*Matrix*
Type	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	MTX
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Run 1	0.00096	-0.00378	0.01157	0.00027	2E-05	-0.00024	0.00048	0.01333	2E-05	0	-0.00001	0.00088	99.17547
Run 2	0.00082	-0.00383	0.01131	0.00027	2E-05	-0.00023	0.00047	0.01322	0	-1E-05	-0.0001	0.00072	99.12908
Run 3	0.00083	-0.00384	0.01138	0.00024	2E-05	-0.00022	0.00043	0.01293	0	-1E-05	-0.00007	0.00069	99.17796
Run 4	0.00083	-0.00382	0.01167	0.00024	2E-05	-0.00021	0.00043	0.0127	0	-1E-05	-0.00007	0.00071	99.203
Grade High	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99.7
Average	**0.00086**	**-0.00382**	**0.01148**	**0.00026**	**2E-05**	**-0.00022**	**0.00045**	**0.01304**	**0**	**-1E-05**	**-0.00006**	**0.00075**	**99.17138**
Grade Low	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SD	0.000069	0.000028	0.000166	0.000018	0	0.000012	0.000028	0.000285	8E-06	3E-06	0.000038	0.000086	0.030818
SD%	8.04	0.73	1.44	7.24	1.99	5.52	6.16	2.19	183.4	34.68	60.23	11.48	0.03
Last SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nom. SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flags		!(				!			!	!	!		

รูปที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.1 ตัวอย่าง C

Date/Time	12/25/2015 3:32:03 PM				
Signature					
Analysis Type	NA				
Task	Conc_Al				
Method	ALGLAL				
Grade	PURE				
TS					
SID#	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Prompt	***Sample Name***	***Customer Name***	***Analyze No***	***Inspector By***	***Batch No***
Value	27-NOV-2015	2nd			
	Run Info				
Element		**Cu**	**Si**	**Mg**	**Zn**
Channel		***Cu0***	***Si0***	***Mg0***	***Zn4***
Type		INS	INS	INS	INS
Unit		%	%	%	%
Run 1	2	0.02296	0.29926	0.0293	0.02144
Run 2	2	0.02242	0.29222	0.02884	0.02101
Run 3	2	0.02051	0.26971	0.02771	0.02074
Run 4	2	0.01994	0.26011	0.02636	0.01923
Grade High		0	0	0	0
Average		**0.02146**	**0.28032**	**0.02805**	**0.0206**
Grade Low		0	0	0	0
SD		0.001458	0.018449	0.001311	0.000962
SD%		6.8	6.58	4.67	4.67
Last SCT Value		0	0	0	0
Nom. SCT Value		0	0	0	0
Flags					

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.1 ตัวอย่าง C (ต่อ)

Element	**Fe**	**Mn**	**Ni**	**Ti**	**Pb**	**Sn**	**Cr**	**Bi**	**Na**	**Ca**	**Sb**	**Sr**
Channel	***Fe0***	***Mn0***	***Ni0***	***Ti4***	***Pb6***	***Sn5***	***Cr0***	***Bi4***	***Na0***	***Ca2***	***Sb5***	***Sr4***
Type	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Run 1	0.26876	0.03174	0.01337	0.01118	0.00181	0.00265	0.02507	0.00007	0.00048	0.00019	0.00268	2E-05
Run 2	0.24176	0.03139	0.0122	0.01384	0.00166	0.00252	0.02507	0.00003	0.00046	0.00017	0.00236	2E-05
Run 3	0.21742	0.03076	0.01086	0.01508	0.00156	0.00227	0.02553	0.00008	0.00044	0.00015	0.00217	2E-05
Run 4	0.20273	0.03012	0.01068	0.02051	0.00163	0.00226	0.02581	0.00005	0.00043	0.00014	0.00224	2E-05
Grade High	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Average	**0.23267**	**0.031**	**0.01178**	**0.01515**	**0.00167**	**0.00242**	**0.02537**	**0.00006**	**0.00045**	**0.00016**	**0.00236**	**2E-05**
Grade Low	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SD	0.028947	0.000715	0.001259	0.003924	0.000107	0.000191	0.000364	0.000024	0.000024	0.000021	0.000225	1E-06
SD%	12.44	2.31	10.69	25.89	6.44	7.88	1.44	42.21	5.25	12.69	9.52	6.43
Last SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nom. SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flags											(	(

รูปที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.1 ตัวอย่าง C (ต่อ)

Element	P	Zr	V	B	Be	Cd	Co	Ga	In	Li	Hg	W	Al%
Channel	*P1*	*Zr1*	*V4*	*B2*	*Be3*	*Cd3*	*Co4*	*Ga1*	*In1*	*Li0*	*Hg1*	*W1*	*Matrix*
Type	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	MTX
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Run 1	0.00089	-0.00381	0.01139	0.00024	2E-05	-0.00024	0.00044	0.01201	0	-1E-05	-0.00005	0.00071	99.24744
Run 2	0.00076	-0.00379	0.012	0.00024	2E-05	-0.00025	0.00039	0.01178	0	-1E-05	-0.00005	0.00057	99.28237
Run 3	0.00081	-0.00379	0.01276	0.00022	2E-05	-0.00024	0.00036	0.01149	-1E-05	-1E-05	-0.00001	0.00062	99.33277
Run 4	0.00066	-0.00369	0.0151	0.00022	2E-05	-0.00023	0.00034	0.01054	0	-1E-05	0.00003	0.00057	99.35421
Grade High	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99.7
Average	**0.00078**	**-0.00377**	**0.01281**	**0.00023**	**2E-05**	**-0.00024**	**0.00038**	**0.01146**	**0**	**-1E-05**	**-0.00002**	**0.00062**	**99.3042**
Grade Low	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SD	0.000095	0.000054	0.001627	0.000012	2E-06	0.000006	0.000041	0.000649	4E-06	1E-06	0.000037	0.000064	0.048356
SD%	12.19	1.44	12.69	5.17	9.15	2.47	10.72	5.67	161.39	8.55	190.84	10.3	0.05
Last SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nom. SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flags		!(				!			!	!	!		

รูปที่ ข-6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.2 ตัวอย่าง A

Date/Time	12/25/2015 3:28:12 PM					
Signature						
Analysis Type	NA					
Task	Conc_Al					
Method	ALGLAL					
Grade	PURE					
TS						
SID#	1	2	3	4	5	
Prompt	*Sample Name*	*Customer Name*	*Analyze No*	*Inspector By*	*Batch No*	
Value	26-NOV-2015	4th				
	Run Info					
Element		Cu	Si	Mg	Zn	
Channel		*Cu0*	*Si0*	*Mg0*	*Zn4*	
Type		INS	INS	INS	INS	
Unit		%	%	%	%	
Run 1	2	0.02687	0.33415	0.00469	0.04028	
Run 2	2	0.02857	0.3544	0.00485	0.04111	
Run 3	2	0.02657	0.32895	0.00464	0.03999	
Run 4	2	0.02765	0.34157	0.00476	0.04049	
Grade High		0	0	0	0	
Average		**0.02741**	**0.33977**	**0.00473**	**0.04047**	
Grade Low		0	0	0	0	
SD		0.000892	0.011044	0.000088	0.000476	
SD%		3.25	3.25	1.87	1.18	
Last SCT Value		0	0	0	0	
Nom. SCT Value		0	0	0	0	
Flags						

รูปที่ ข-6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.2 ตัวอย่าง A (ต่อ)

Element	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Bi	Na	Ca	Sb	Sr
Channel	*Fe0*	*Mn0*	*Ni0*	*Ti4*	*Pb6*	*Sn5*	*Cr0*	*Bi4*	*Na0*	*Ca2*	*Sb5*	*Sr4*
Type	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Run 1	0.24022	0.02756	0.01315	0.0141	0.00272	0.00573	0.02783	0.00008	0.00039	0.00016	0.00242	2E-05
Run 2	0.25863	0.028	0.01405	0.01369	0.00283	0.00594	0.02749	0.00012	0.00036	0.00017	0.00231	2E-05
Run 3	0.21949	0.02763	0.01262	0.01636	0.00255	0.00549	0.02811	0.00012	0.00034	0.00032	0.00224	2E-05
Run 4	0.24331	0.02762	0.0136	0.0146	0.00274	0.00583	0.02775	0.00013	0.00036	0.00017	0.00246	2E-05
Grade High	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Average	**0.24041**	**0.0277**	**0.01335**	**0.01469**	**0.00271**	**0.00574**	**0.0278**	**0.00011**	**0.00036**	**0.00021**	**0.00236**	**2E-05**
Grade Low	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SD	0.016104	0.000201	0.000611	0.001176	0.000118	0.00019	0.000254	0.000022	0.00002	0.000078	0.000102	1E-06
SD%	6.7	0.73	4.58	8	4.37	3.31	0.91	19.13	5.46	37.95	4.31	4.56
Last SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nom. SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flags											(	(

รูปที่ ข-6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.2 ตัวอย่าง A (ต่อ)

Element	P	Zr	V	B	Be	Cd	Co	Ga	In	Li	Hg	W	Al%
Channel	*P1*	*Zr1*	*V4*	*B2*	*Be3*	*Cd3*	*Co4*	*Ga1*	*In1*	*Li0*	*Hg1*	*W1*	*Matrix*
Type	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	MTX
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Run 1	0.00069	-0.00379	0.01199	0.00019	2E-05	-0.00024	0.00044	0.01241	-1E-05	-1E-05	-0.00003	0.00069	99.23729
Run 2	0.00083	-0.0038	0.01187	0.00019	2E-05	-0.00023	0.00045	0.01276	0	-1E-05	-0.00005	0.00073	99.19472
Run 3	0.00069	-0.00373	0.01304	0.00018	2E-05	-0.00024	0.00041	0.01227	0	-1E-05	0	0.00079	99.26114
Run 4	0.00049	-0.00378	0.01228	0.00018	2E-05	-0.00023	0.00044	0.01249	0	-1E-05	-0.00003	0.00073	99.22437
Grade High	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99.7
Average	**0.00068**	**-0.00378**	**0.01229**	**0.00019**	**2E-05**	**-0.00023**	**0.00043**	**0.01248**	**0**	**-1E-05**	**-0.00003**	**0.00073**	**99.22938**
Grade Low	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SD	0.000137	0.000029	0.000523	8E-06	1E-06	0.000004	0.00002	0.000206	6E-06	1E-06	0.000023	0.000044	0.027676
SD%	20.3	0.78	4.26	4.27	3.33	1.71	4.53	1.65	522.14	11.6	81.74	6	0.03
Last SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nom. SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flags		(				!			!	!	!		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ ข-7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.2 ตัวอย่าง B

Date/Time	12/25/2015 3:24:44 PM				
Signature					
Analysis Type	NA				
Task	Conc_Al				
Method	ALGLAL				
Grade	PURE				
TS					
SID#	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Prompt	***Sample Name***	***Customer Name***	***Analyze No***	***Inspector By***	***Batch No***
Value	3-DEC-2015	1ST			
	Run Info				
Element		**Cu**	**Si**	**Mg**	**Zn**
Channel		***Cu0***	***Si0***	***Mg0***	***Zn4***
Type		INS	INS	INS	INS
Unit		%	%	%	%
Run 1	2	0.03589	0.3297	0.0139	0.02063
Run 2	2	0.03621	0.33137	0.0137	0.02075
Run 3	2	0.03701	0.33713	0.01383	0.02105
Run 4	2	0.03796	0.32723	0.01431	0.02094
Grade High		0	0	0	0
Average		**0.03676**	**0.33136**	**0.01393**	**0.02084**
Grade Low		0	0	0	0
SD		0.000925	0.004207	0.000265	0.000192
SD%		2.52	1.27	1.9	0.92
Last SCT Value		0	0	0	0
Nom. SCT Value		0	0	0	0
Flags					

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ ข-7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.2 ตัวอย่าง B (ต่อ)

Element	**Fe**	**Mn**	**Ni**	**Ti**	**Pb**	**Sn**	**Cr**	**Bi**	**Na**	**Ca**	**Sb**	**Sr**
Channel	***Fe0***	***Mn0***	***Ni0***	***Ti4***	***Pb6***	***Sn5***	***Cr0***	***Bi4***	***Na0***	***Ca2***	***Sb5***	***Sr4***
Type	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Run 1	0.20279	0.0292	0.04031	0.01304	0.0074	0.00326	0.01613	0.00004	0.00068	0.00039	0.0022	2E-05
Run 2	0.2062	0.02929	0.04119	0.0131	0.00708	0.00322	0.01616	0.00002	0.00063	0.00026	0.00221	2E-05
Run 3	0.21152	0.02925	0.04289	0.01315	0.00769	0.00346	0.01605	0.00005	0.00065	0.00035	0.00225	2E-05
Run 4	0.20228	0.02941	0.0442	0.01332	0.00743	0.00328	0.01625	0.00006	0.00072	0.0004	0.00222	2E-05
Grade High	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Average	**0.2057**	**0.02929**	**0.04215**	**0.01315**	**0.0074**	**0.0033**	**0.01615**	**0.00004**	**0.00067**	**0.00035**	**0.00222**	**2E-05**
Grade Low	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SD	0.004252	0.000091	0.001737	0.000122	0.000249	0.000105	0.000081	0.000017	0.000038	0.000066	0.000021	1E-06
SD%	2.07	0.31	4.12	0.92	3.36	3.16	0.5	43.03	5.75	18.97	0.96	2.62
Last SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nom. SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flags											(	

รูปที่ ข-7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.2 ตัวอย่าง B (ต่อ)

Element	P	Zr	V	B	Be	Cd	Co	Ga	In	Li	Hg	W	Al%
Channel	*P1*	*Zr1*	*V4*	*B2*	*Be3*	*Cd3*	*Co4*	*Ga1*	*In1*	*Li0*	*Hg1*	*W1*	*Matrix*
Type	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	MTX
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Run 1	0.0008	-0.00391	0.01032	0.00025	1E-05	-0.00022	0.00049	0.01421	-1E-05	-1E-05	0	0.00034	99.26215
Run 2	0.00098	-0.00391	0.01039	0.00024	1E-05	-0.00023	0.00048	0.01435	-1E-05	-1E-05	-0.00002	0.00034	99.25597
Run 3	0.00096	-0.00392	0.01056	0.00026	1E-05	-0.00022	0.00051	0.01474	-1E-05	-1E-05	0	0.00036	99.24039
Run 4	0.00095	-0.00392	0.01067	0.00026	1E-05	-0.00021	0.00051	0.01454	-1E-05	-1E-05	0.00001	0.00037	99.2568
Grade High	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99.7
Average	**0.00092**	**-0.00392**	**0.01049**	**0.00025**	**1E-05**	**-0.00022**	**0.0005**	**0.01446**	**-1E-05**	**-1E-05**	**0**	**0.00035**	**99.25383**
Grade Low	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SD	0.00008	0.000003	0.000156	0.000012	0	0.000006	0.000015	0.000229	2E-06	0	0.000012	0.000012	0.009364
SD%	8.73	0.09	1.49	4.7	0.36	2.9	3.11	1.59	28.17	4.29	1094.87	3.38	0.01
Last SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nom. SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flags		!				!			!	!	!		

รูปที่ ข-8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.2 ตัวอย่าง C

Date/Time	12/25/2015 3:20:11 PM					
Signature						
Analysis Type	NA					
Task	Conc_Al					
Method	ALGLAL					
Grade	PURE					
TS						
SID#	1	2	3	4	5	
Prompt	*Sample Name*	*Customer Name*	*Analyze No*	*Inspector By*	*Batch No*	
Value	2-DEC-2015	2nd				
	Run Info					
Element		Cu	Si	Mg	Zn	
Channel		*Cu0*	*Si0*	*Mg6*	*Zn4*	
Type		INS	INS	INS	INS	
Unit		%	%	%	%	
Run 1	2	0.05317	0.31772	0.0743	0.01805	
Run 2	2	0.05108	0.30592	0.06991	0.0168	
Run 3	2	0.05335	0.31582	0.07534	0.01816	
Run 4	2	0.05544	0.33058	0.07373	0.01783	
Grade High		0	0	0	0	
Average		**0.05326**	**0.31751**	**0.07332**	**0.01771**	
Grade Low		0	0	0	0	
SD		0.001783	0.010131	0.002368	0.000622	
SD%		3.35	3.19	3.23	3.51	
Last SCT Value		0	0	0	0	
Nom. SCT Value		0	0	0	0	
Flags						

รูปที่ ข-8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.2 ตัวอย่าง C (ต่อ)

Element	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Bi	Na	Ca	Sb	Sr
Channel	*Fe0*	*Mn0*	*Ni0*	*Ti4*	*Pb6*	*Sn5*	*Cr0*	*Bi4*	*Na0*	*Ca2*	*Sb5*	*Sr4*
Type	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Run 1	0.18021	0.02753	0.00917	0.0141	0.00176	0.00593	0.01841	0.00006	0.00077	0.00036	0.00182	2E-05
Run 2	0.18799	0.02679	0.00979	0.01642	0.00179	0.00596	0.01872	0.00003	0.00067	0.0004	0.00173	2E-05
Run 3	0.16655	0.02741	0.00853	0.01397	0.00154	0.00531	0.01807	0	0.00053	0.00038	0.00161	2E-05
Run 4	0.2169	0.02766	0.01108	0.01423	0.0021	0.00706	0.0186	0.00002	0.00072	0.00046	0.00191	2E-05
Grade High	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Average	**0.18791**	**0.02735**	**0.00964**	**0.01468**	**0.0018**	**0.00607**	**0.01845**	**0.00003**	**0.00067**	**0.0004**	**0.00177**	**2E-05**
Grade Low	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SD	0.021259	0.000384	0.001086	0.001167	0.000231	0.000729	0.000281	0.000028	0.000103	0.000044	0.000128	0
SD%	11.31	1.4	11.26	7.95	12.84	12.02	1.52	102.08	15.3	11	7.27	1.93
Last SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nom. SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flags								!			(	(

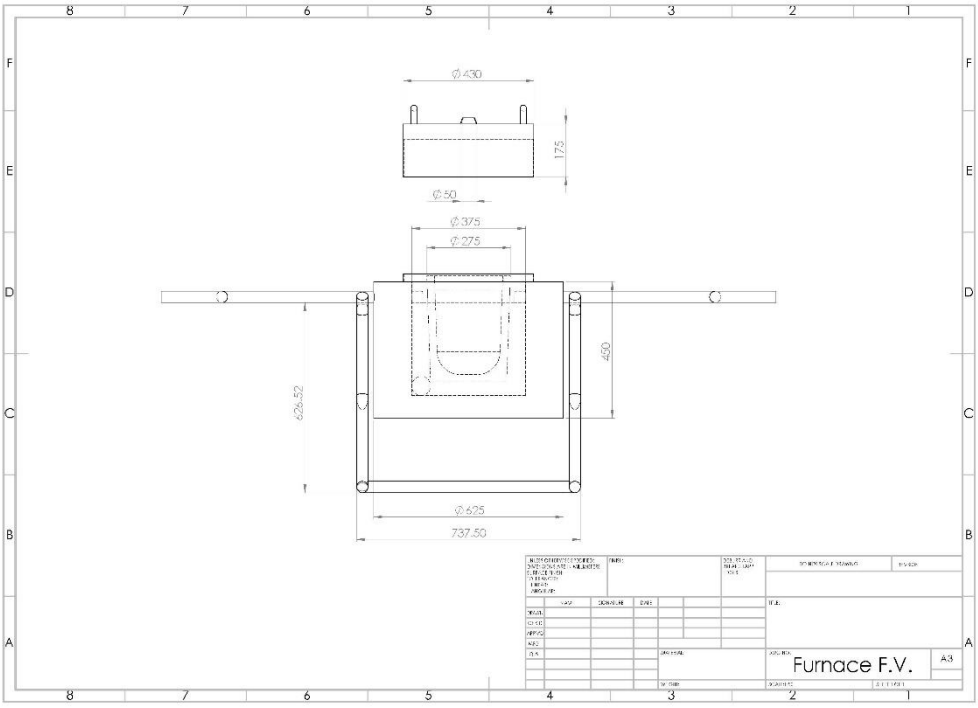
รูปที่ ข-8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะอะลูมิเนียมที่ได้กลับคืนในการทดลองที่ 2.2 ตัวอย่าง C (ต่อ)

Element	P	Zr	V	B	Be	Cd	Co	Ga	In	Li	Hg	W	Al%
Channel	*P1*	*Zr1*	*V4*	*B2*	*Be3*	*Cd3*	*Co4*	*Ga1*	*In1*	*Li0*	*Hg1*	*W1*	*Matrix*
Type	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	INS	MTX
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Run 1	0.00077	-0.00389	0.01239	0.00027	2E-05	-0.00023	0.00029	0.01317	-1E-05	-1E-05	0.00003	0.00037	99.25345
Run 2	0.00079	-0.00382	0.01394	0.00028	2E-05	-0.00024	0.0003	0.01189	-1E-05	-1E-05	0.00007	0.0004	99.26237
Run 3	0.00096	-0.0039	0.01213	0.00032	2E-05	-0.00024	0.00027	0.01296	-1E-05	-1E-05	0.00004	0.00036	99.27052
Run 4	0.00083	-0.00388	0.01249	0.00031	2E-05	-0.00022	0.00034	0.01296	-1E-05	-1E-05	0.00001	0.0004	99.19842
Grade High	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99.7
Average	**0.00084**	**-0.00388**	**0.01274**	**0.0003**	**2E-05**	**-0.00023**	**0.0003**	**0.01274**	**-1E-05**	**-1E-05**	**0.00004**	**0.00038**	**99.24619**
Grade Low	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SD	0.000082	0.000037	0.000816	0.000024	1E-06	0.000007	0.00003	0.000581	3E-06	0	0.000024	0.000019	0.0326
SD%	9.78	0.95	6.41	8.05	4.81	2.94	10.13	4.56	30.43	4.06	64.3	4.97	0.03
Last SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nom. SCT Value	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flags		!(				!			!	!			

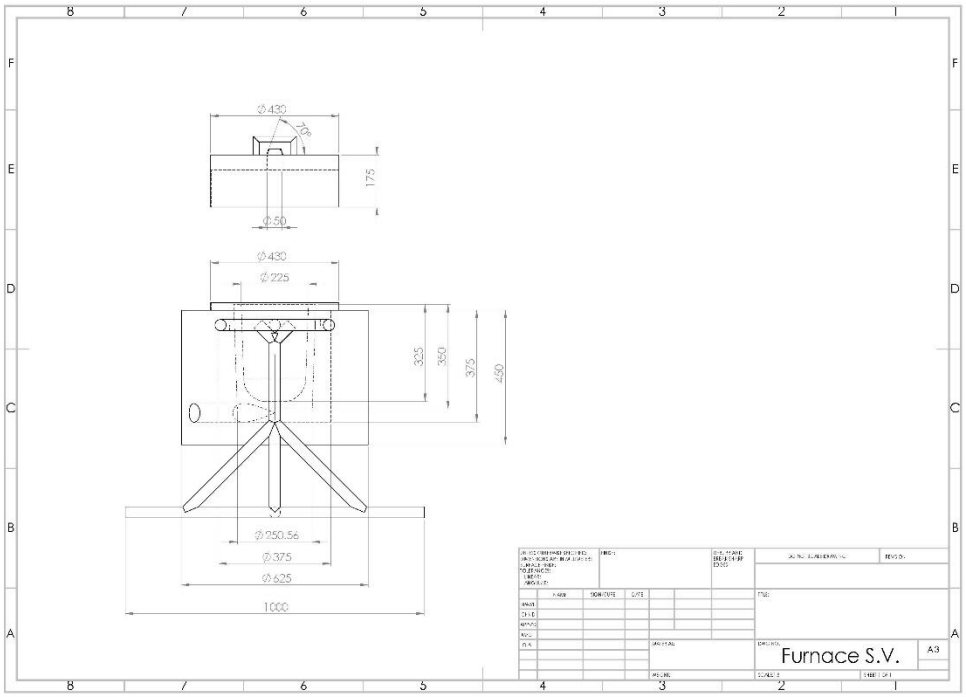
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค

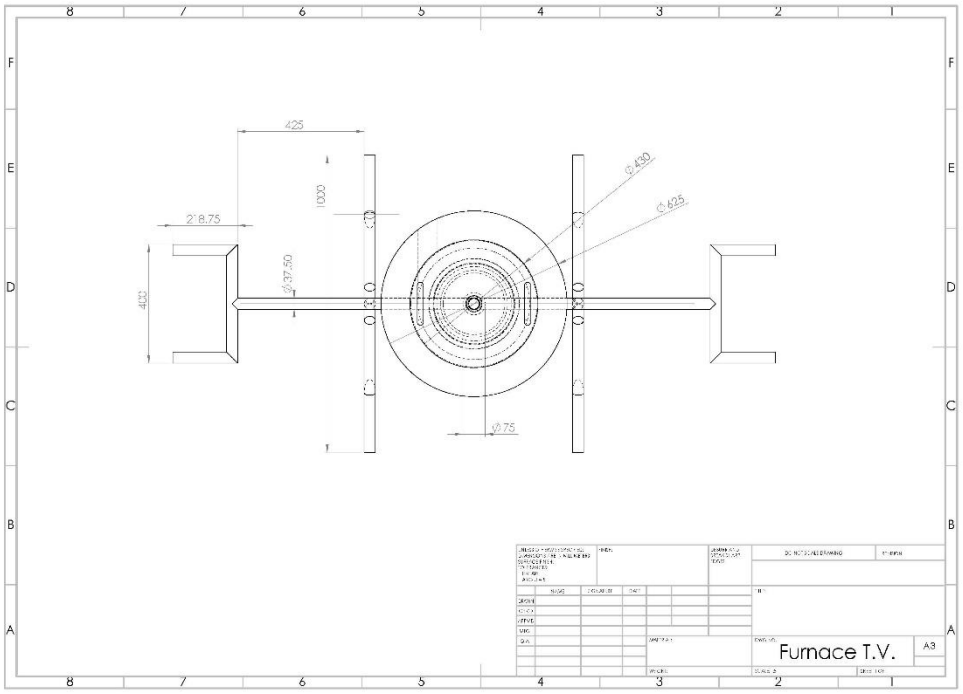
รายละเอียดแสดงมาตรส่วนของเครื่องต้นแบบ



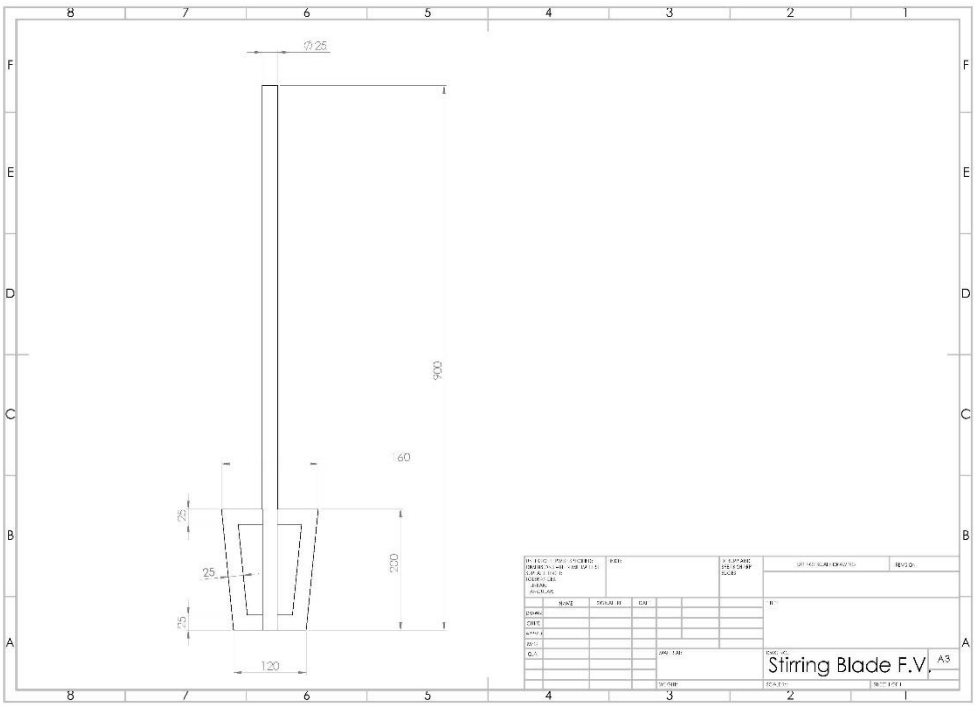
รูปที่ ค-1 มาตราส่วนด้านหน้าของชุดเตาหลอม (หน่วย : มิลลิเมตร)



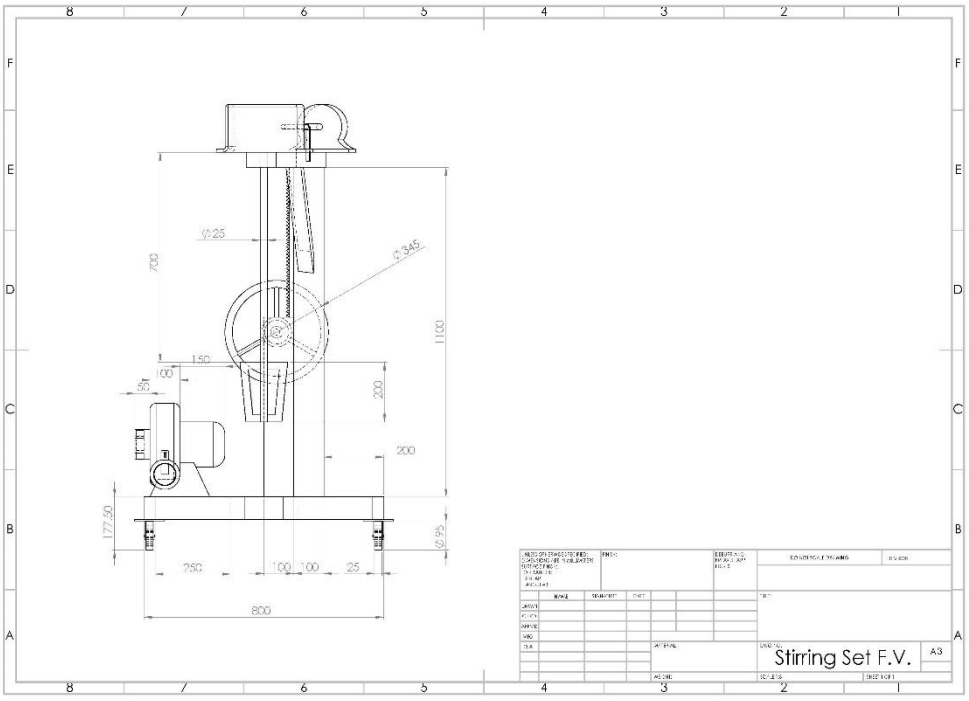
รูปที่ ค-2 มาตราส่วนด้านข้างของชุดเตาหลอม (หน่วย : มิลลิเมตร)



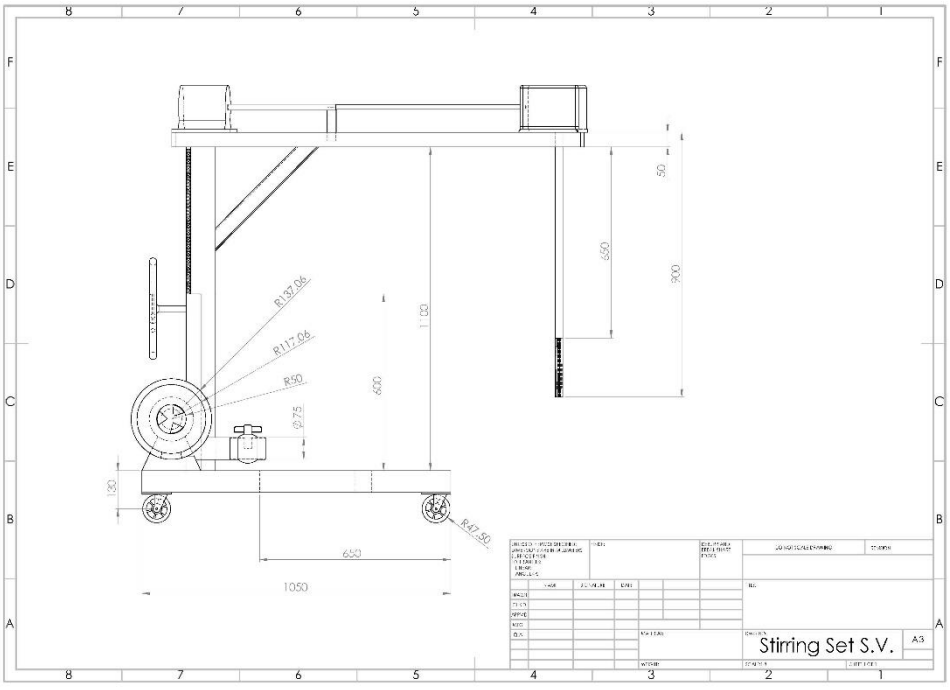
รูปที่ ค-3 มาตราส่วนด้านบนของชุดเตาหลอม (หน่วย : มิลลิเมตร)



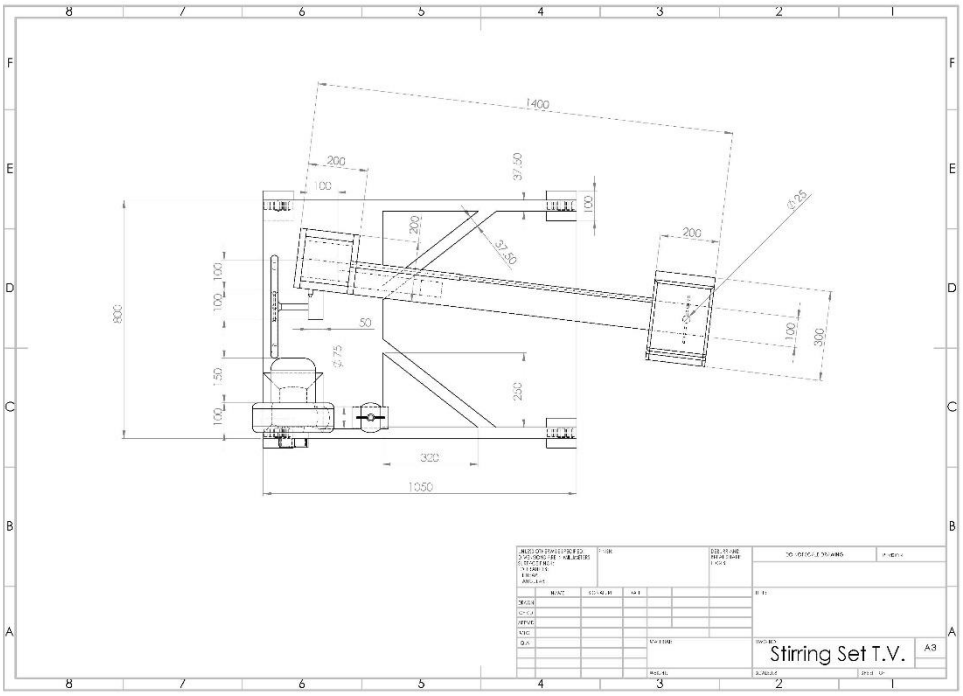
รูปที่ ค-4 มาตราส่วนใบกวน (หน่วย : มิลลิเมตร)



รูปที่ ค-5 มาตราส่วนด้านหน้าของชุดใบกวน (หน่วย : มิลลิเมตร)



รูปที่ ค-6 มาตราส่วนด้านข้างของชุดใบกวน (หน่วย : มิลลิเมตร)



รูปที่ ค-7 มาตราส่วนด้านบนของชุดใบกวน (หน่วย : มิลลิเมตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศุภลักษณ์ ชัยภูริมาศ เกิดวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการในปีการศึกษา 2551 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2555 ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2556

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University