

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การศึกษาผลกระทบของความสูงของชั้นงาน
ที่มีต่อลักษณะของอนุภาคของอคูมิเนียมผสม**



ร.พ.
๘๘๓๓๓
๒๕๕๐

เลขานุ...
เลขทะเบียน... **83718** ...
วัน,เดือน,ปี... **15 ก.ย. 2551** ...

b. **11982317**
i.

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE INFLUENCE OF THE CASTING ALUMINIUM
HEIGHT ON PARTICLE CHARACTERISTICS OF
ALUMINIUM ALLOY**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

ACADEMIC YEAR 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญา

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การศึกษาผลกระทบของความสูงของชิ้นงานที่มีต่อลักษณะของอนุภาคของ
อลูมิเนียมผสม
THE INFLUENCE OF THE CASTING ALUMINIUM HEIGHT ON
PARTICLE CHARACTERISTICS OF ALUMINIUM ALLOY


นักศึกษา

นายสุกเทพ ธนจรัสธำรง รหัสประจำตัว 47012328

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์



(ดร. อนิรุท ไชยจารูวณิช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของความสูงของชิ้นงานที่มีต่อลักษณะของอนุภาคของ อลูมิเนียมผสม
นักศึกษา	นาย สุภเทพ ธนจรัสธารัง
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร. อนิรุท ไชยจารุณิช

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความสูงของชิ้นงานที่มีต่อลักษณะของอนุภาคของอลูมิเนียมผสม โดยทำการหล่อชิ้นงานด้วยวิธีหล่อทรายซึ่งมีความสูงแตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 2.5 , 5 และ 8 เซนติเมตร และมีการควบคุมอุณหภูมิเทให้เท่ากัน โดยกำหนดบริเวณที่จะศึกษาไว้ที่บริเวณขอบชิ้นงาน 2 จุด กึ่งกลางชิ้นงาน 1 จุด และระหว่างขอบชิ้นงานกับกึ่งกลางชิ้นงาน 2 จุด แล้วนำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อมาวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์และโปรแกรม Image Pro เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคที่เกิดในชิ้นงาน ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งเดียวกันชิ้นงานที่มีความสูงน้อยกว่าจะมี ขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า มีความกว้างของอนุภาคที่เล็กกว่า แต่มีความหนาแน่นมากกว่า ชิ้นงานที่มีความสูงมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title THE INFLUENCE OF THE CASTING ALUMINIUM HEIGHT ON PARTICLE CHARACTERISTICS OF ALUMINIUM ALLOY

Student Mr. Supathep Tanajaratthamrong

Degree Bachelor of Engineering in Industrial Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2007

Thesis Advisor Dr. Anirut Chaijaruwanich

Abstract

This project is aimed to investigate the influence of the casting aluminium height on particle characteristics of aluminium alloy. Three sand castings with different heights; 2.5, 5 and 8 cm. were cast and controlled the pouring temperatures. The five samples for each condition; 2 samples at the edge, 1 sample at the center and 2 samples between the edge and the center were prepared. After that, the samples have been analyzed using the optical microscope and Image Pro program to characterize the particles appeared in the castings. The results showed that at the same position the particle size in the less height sample was smaller and the width was narrower but higher particle density than those in the more height sample.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรเรื่อง การศึกษาผลของความสูงของชิ้นงานหล่อต่อลักษณะอนุภาคของอลูมิเนียม สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอความขอบพระคุณบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ดร.อนิรุท ไชยจารุวิช อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาบัตรฉบับนี้ รวมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกด้าน ตลอดเวลาที่ผ่านไป

รศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาบัตรฉบับนี้ คำแนะนำ ความเอาใจใส่และทุกสิ่งทุกอย่างตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน สำหรับคำแนะนำ กำลังใจในการทำงาน ความเอาใจใส่ ความเป็นห่วงเป็นใย ความช่วยเหลือในทุกๆด้านและทุกสิ่งทุกอย่างตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรีในสถาบันแห่งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนสำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจจนทำให้ปริญญาบัตรสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบิดา มารดา ที่ช่วยส่งเสริมการเรียนรู้ และเป็นกำลังใจจนจบหลักสูตรปริญญาตรี

นาย สุกเทพ ธนจรัสธารัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของ โครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของ โครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การหล่อ	2
2.2 ทราซหล่อ	2
2.2.1 คุณสมบัติทราซหล่อ.....	2
2.2.2 ลักษณะของทราซหล่อ.....	3
2.2.3 ส่วนประกอบของทราซหล่อ.....	3
2.3 การออกแบบแม่พิมพ์.....	5
2.4 การแข็งตัวของโลหะ	6
2.4.1 นิวคลีเอชันในโลหะที่หลอมเหลว.....	8
2.4.2 การเกิดผลึกในโลหะเหลว.....	8
2.5 การหัดตัวของโลหะ.....	9
2.6 การเทน้ำโลหะ	9
2.7 ความสามารถในการไหล.....	10
2.8 การหลอมโลหะ	11
2.8.1 เตาหลอมกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	11
2.8.2 ผลกระทบของอุณหภูมิหลอมและเวลาหลอม.....	12
2.9 คุณสมบัติของอลูมิเนียม	12
2.10 การเกิดเกรนและการตกผลึกของโลหะ.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10.1 การแยกตัวของสารมลทิน	14
2.10.2 ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของเกรน	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 บทนำ	16
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	16
3.2.1 เครื่องผสมทราย	16
3.2.2 ชุดแบบหล่อทราย	17
3.2.3 อุปกรณ์เสริมในการหล่อทราย	17
3.2.4 เตาหลอมโลหะและชุดควบคุม	18
3.2.5 เครื่องฉีดผิวหน้าแบบละเอียด	18
3.2.6 กล้องจุลทรรศน์และคอมพิวเตอร์	19
3.3 วิธีทำการทดลอง	19
3.3.1 การทำแบบหล่อทราย	19
3.3.2 การหลอมอลูมิเนียมและเทน้ำโลหะ	20
3.3.3 การเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค	20
3.3.4 นำชิ้นงานไปวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค	21
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 บทนำ	22
4.2 ผลการทดลองชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร	24
4.3 ผลการทดลองชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	29
4.2 ผลการทดลองชิ้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร	34
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	41
4.2 สรุปผลการทดลอง	41
บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	42
5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการดำเนินงาน	42
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูเอชเห็นจำเป็นต้องใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

หนังสืออ้างอิง.....	43
ภาคผนวก ก	ผก1
ภาคผนวก ข	ผข1
ภาคผนวก ค	ผค1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แม่พิมพ์แบบเปิด (a) แม่พิมพ์แบบปิด (b)	5
รูปที่ 2.2 กราฟการเย็นตัวของโลหะบริสุทธิ์	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างชิ้นงานหล่อ โลหะบริสุทธิ์	8
รูปที่ 2.4 การทดสอบความสามารถของการไหล	9
รูปที่ 2.5 เตาหลอมกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบ Coreless	11
รูปที่ 2.6 การเกิด Grain และ Grain Boundary ในสภาวะการตกผลึกของโลหะ	12
รูปที่ 2.7 การแยกตัวของสารมลทินออกจากผลึกโลหะ	13
รูปที่ 2.8 การแตกหักในเนื้อโลหะ	13
รูปที่ 3.1 เครื่องผสมทราย	16
รูปที่ 3.2 ชุดทำแบบหล่อทราย (a) หีบหล่อ (b) กระสวน	17
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์เสริมในการทำแบบหล่อทราย (a) เหล็กกระทงทรายและเหล็กปิดหน้า (b) ช้อนและท่อพีวีซี ..	17
รูปที่ 3.4 เตาหลอมโลหะและชุดควบคุม	18
รูปที่ 3.5 เครื่องฉีดผิวหน้าแบบละเอียด	18
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์วิเคราะห์อนุภาค (a) ชุดคอมพิวเตอร์ควบคุม (b) กล้องจุลทรรศน์	19
รูปที่ 3.7 กระบวนการ (a) การหลอมอลูมิเนียม (b) การเทอลูมิเนียม	19
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน	21
รูปที่ 3.9 นำชิ้นงานทดสอบส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์และหาขนาดของอนุภาค	21
รูปที่ 4.1 ลักษณะของอนุภาคภายในชิ้นงานที่ถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (SEM)	22
รูปที่ 4.2 หน้าตัดที่นำมาวัดขนาด	23
รูปที่ 4.3 หน้าตัดของชิ้นงาน	23
รูปที่ 4.4 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร	24
รูปที่ 4.5 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร	25
รูปที่ 4.6 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=7$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร	26
รูปที่ 4.7 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=10$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร	27
รูปที่ 4.8 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=14$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร	28
รูปที่ 4.9 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	29
รูปที่ 4.10 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	30
รูปที่ 4.11 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=7$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	31
รูปที่ 4.12 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=10$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	32
รูปที่ 4.13 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=14$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	33
รูปที่ 4.14 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และซ้ำอย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.15 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	35
รูปที่ 4.16 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=7$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	36
รูปที่ 4.17 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=10$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	37
รูปที่ 4.18 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=14$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	38
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับตำแหน่งของชิ้นงาน	39
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของชิ้นงานกับตำแหน่งของชิ้นงาน.....	40
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่กับตำแหน่งของชิ้นงาน	41
รูปที่ ผข 1 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร	ผข 1
รูปที่ ผข 2 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร	ผข 1
รูปที่ ผข 3 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=7$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร	ผข 2
รูปที่ ผข 4 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=10$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร	ผข 2
รูปที่ ผข 5 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=14$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร	ผข 3
รูปที่ ผข 6 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	ผข 3
รูปที่ ผข 7 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	ผข 4
รูปที่ ผข 8 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=7$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	ผข 4
รูปที่ ผข 9 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=10$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	ผข 5
รูปที่ ผข 10 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=14$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	ผข 5
รูปที่ ผข 11 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร	ผข 6
รูปที่ ผข 12 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	ผข 6
รูปที่ ผข 13 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=7$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	ผข 7
รูปที่ ผข 14 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=10$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	ผข 7
รูปที่ ผข 15 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=14$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร	ผข 8
รูปที่ ผค 1 ตำแหน่งชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์อนุภาคบนชิ้นงาน.....	ผค 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และฉ้อฉลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันมีปริมาณการใช้งานอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอะลูมิเนียมหล่อ (Cast aluminium) พบว่าในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ มีหลายชิ้นส่วนที่ใช้อะลูมิเนียมทดแทนการใช้งานของเหล็กหล่อ หรือเหล็กกล้าหล่อ อันเนื่องมาจากสมบัติที่ดีเด่นของอะลูมิเนียมหล่อ เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง จุดหลอมเหลวต่ำ มีความต้านทานต่อการเป็นสนิม มีลักษณะผิวที่สวยงาม มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ มีความสามารถในการหล่อลอม (Castability) ที่ดี และสามารถนำมาผลิตได้ง่าย เป็นต้น

การหล่ออะลูมิเนียมนั้นขนาดอนุภาคก็มีส่วนสำคัญในการหล่อ ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงมากขนาดของอนุภาคจะเล็กและละเอียดตรงกันข้ามกับชิ้นงานที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และหยาบชิ้นงานจะมีความแข็งแรงน้อยกว่า ชิ้นงานที่มีการหล่อที่มีขนาดขึ้นกับความสูงก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มคุณภาพของชิ้นงาน งานวิจัยนี้จึงจะศึกษาชิ้นงานที่มีความสูงต่างกันเพื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคที่เกิดในชิ้นงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อชิ้นงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาผลกระทบของความสูงชิ้นงานที่มีต่อขนาดอนุภาคของอะลูมิเนียม

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ใช้แบบหล่อทราย
2. ศึกษาลักษณะของอนุภาคที่ปรากฏในชิ้นงาน
3. กำหนดลักษณะชิ้นงานเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดกว้าง 14 เซนติเมตร ยาว 14 เซนติเมตร โดยมีความหนา 3 ขนาดคือ 2.5 เซนติเมตร 5 เซนติเมตร และ 8 เซนติเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงลักษณะอนุภาคที่เกิดภายในชิ้นงาน
2. ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อของชิ้นงานที่มีขนาดขึ้นกับความสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การหล่อ

การหล่อทรายเป็นกระบวนการหล่อชิ้นงานชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมใช้งานมากที่สุดในการหล่อทั้งหลายและยังสามารถหล่อโลหะได้เกือบทุกชนิด การหล่อทรายยังสามารถใช้หล่อโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงได้ เช่น ไทเทเนียม เหล็กกล้า นิกเกิล เมื่อเทโลหะเหลวลงในแม่แบบและชิ้นงานแข็งตัวอย่างสมบูรณ์แล้ว แม่แบบทรายจะถูกทำลายเพื่อนำชิ้นงานหล่อออกมา หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการอื่นๆ เช่น การทำความสะอาด ตัด ขัด เป็นต้น แต่การหล่อทรายมีข้อด้อย คือ บริเวณพื้นผิวชิ้นงานที่ได้อาจมีคุณภาพไม่ดีมากนักเมื่อเทียบกับกระบวนการหล่อชนิดอื่น และอาจเกิดความบกพร่อง (defects) ขึ้นภายในชิ้นงาน

2.2 ทรายหล่อ

การนำทรายมาในการหล่อ ต้องมีการศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของการนำทรายมาใช้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีในการหล่อดังที่จะกล่าวต่อไป

2.2.1 คุณสมบัติทรายหล่อ

ทรายหล่อจะต้องมีคุณสมบัติต่อไปนี้

1. ขึ้นรูปได้ง่าย (Formability) และทำแบบหล่อได้สะดวก โดยที่มีความแข็งแรงพอ แบบหล่อที่ทำเสร็จแล้วจะต้องแข็งแรงพอที่จะยกไปได้ และเทน้ำโลหะเข้าไปได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ดังนั้นจะต้องมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง และมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง (Hot strength)
2. จะต้องให้อากาศไหลผ่านได้ (Permeability) ถ้าอากาศที่เกิดขึ้นภายในไม่สามารถซึมผ่านเม็ดทรายออกไปจากแบบหล่อเร็วพอในขณะที่เทน้ำโลหะแล้วอาจเกิดจุดเสียประเภทรูโหว่ที่เกิดจากการหดตัวและรูพรุนที่ผิว
3. ขนาดของเม็ดทรายและปริมาณของเม็ดทรายแต่ละขนาดต้องเหมาะสมถ้าใช้ทรายละเอียดทำแบบหล่อผิวของชิ้นงานจะละเอียดดี แต่ถ้าเม็ดทรายละเอียดเกินไป อากาศจะไหลออกมาไม่ได้ทำให้เกิดรูพรุน (Blow holes) ดังนั้นจะต้องจัดให้ขนาดของเม็ดทรายและปริมาณของเม็ดทรายแต่ละขนาดเหมาะสม ทั้งนี้โดยต้องคำนึงถึงทั้งสองประเด็นข้างต้น
4. ต้องมีความทนไฟ (Refractoriness) สูงพอไม่ละลายที่อุณหภูมิเม็ดทรายและตัวประสานจะต้องมีความทนทานไฟได้ในขณะที่เทน้ำโลหะ
5. มีส่วนผสมที่เหมาะสมเมื่อเม็ดทรายสัมผัสกับน้ำโลหะอุณหภูมิจะเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพ และทางเคมี ดังนั้นไม่ควรมีส่วนผสมใดๆที่จะทำให้เกิดแก๊สหรือเกิดการละลายในน้ำโลหะ

6. นำมาใช้ได้อีก ทรายที่คิดจะต้องใช้ได้หลายครั้งเพื่อความประหยัด

7. ทรายที่ใช้จะต้องมีราคาถูก

2.2.2 ลักษณะของทรายหล่อ

เม็ดทรายหล่อแบ่งออกได้หลายชนิด ดังแสดงในรูป ทรายเม็ดกลม (Round) ทรายเม็ดมุมมน (Sub angular) ทรายเม็ดมุมแหลม (Angular) และทรายเม็ดผลึก (Crystalline)

ทรายชนิดเม็ดกลมใช้เป็นทรายหล่อได้ดี เพราะใช้ตัวประสานน้อยๆก็ทำให้มีความแข็งแรง นอกจากนั้นยังปล่อยอากาศไหลผ่านได้ดีมากและทำให้น้ำโลหะไหลได้สะดวก ทรายเม็ดผลึกไม่เหมาะที่จะใช้ทำทรายหล่อ เพราะในการผสมทรายจะเกิดการหักเป็นชิ้นเล็กๆ ทำให้ความทนต่อความร้อนต่ำ อากาศผ่านได้ยากและใช้ตัวประสานมาก

2.2.3 ส่วนประกอบของทรายหล่อ

2.2.3.1 ทรายหล่อ

ทรายหล่อ ทรายหล่อส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยทรายผสมกับดินเหนียว ซึ่งดินเหนียวที่นิยมใช้กันคือ เบนโทไนต์ ทรายหล้อมีสมบัติดังนี้ ทรายที่สามารถทนความร้อนสูงๆได้ ทำให้เป็ยกหรือหดได้ง่าย มีการอัดตัวแน่นพอดี ไม่เกิดการร่วนตัวง่าย ขึ้นเป็นรูปต่างๆได้ง่าย มีอายุยืนยาว ด้านทานต่อน้ำหนักของโลหะได้ดี มีอัตราการผ่านดี มีปริมาณของน้ำพอดี เมื่อมีอุณหภูมิจะไม่ร่วนและผิวหน้าของรอยที่หักจะต้องเรียบยิ่งดี

ทรายหล่อโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) ทรายธรรมชาติ (Natural Molding Sand)

ประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) ผสมกับดินเหนียว (Clay) ชนิด Aluminium Silicate โดยเป็นไปตามธรรมชาติ (Weathering) จึงเหมาะแก่การทำแบบหล่อเหล็กหล่อ และโลหะที่ไม่ใช่เหล็กบางชนิด ในทรายธรรมชาติเราจะพบสารอินทรีย์บางชนิดอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะช่วยป้องกันทรายในกรณีที่น้ำโลหะร้อนๆจึงเหมาะในการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ

ข้อดีของทรายธรรมชาติ

1. เม็ดทรายมีขนาดสม่ำเสมอ
2. อัดตัวได้ดีในแบบหล่อ (Molds)
3. ไม่แยกตัวในขณะที่ขนย้ายแบบหล่อ
4. ทำงานในช่วงความชื้นปกติ (4-8%) ได้ดี
5. ใช้งานง่าย สะดวก โดยไม่จำเป็นต้องควบคุมคุณภาพมาก ราคาถูก
6. ไม่แห้งเร็วเหมือนทรายวิทยาศาสตร์

ข้อเสียของทรายธรรมชาติ

1. ปริมาณความชื้นจะขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศรอบข้าง
2. มักจะมีรากไม้ ใบไม้ ปะปนอยู่มาก
3. มีปริมาณดินเหนียวมากจนเกินไป
4. ควบคุมส่วนผสมได้ลำบากมาก

5. ต้องนำไปผสมกับทรายต่างๆจึงจะใช้งานได้ดี
6. ถ้ากระทู้แบบแน่นเกินไป จะมีปัญหาเวลาเทน้ำลงแบบ

2) ทรายวิทยาศาสตร์ (Synthetic Molding Sand)

เป็นทรายที่ได้จากการรวมของทรายที่มีรูปร่างมุมแหลมคม และถูกชะล้างให้สะอาดแล้วนำมาผสมกับดินเหนียวเข้ากันในอัตราส่วน 5% และควรให้มีความชื้น (Moisture) ในปริมาณที่น้อยกว่า 5% ซึ่งจะทำให้ทรายมีการเกาะยึดตัวกันแข็งแรง

ทรายวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่จะเป็นทรายซิลิกา (SiO_2) ทราย Zircon, ทราย Olivine และทราย Chromite แล้วนำมาผสมกับตัวประสาน (Binder), น้ำ และสารเติมพิเศษต่างๆ ตัวประสานนิยมใช้เบนโทไนท์ (Bentonite)

ข้อดีของทรายวิทยาศาสตร์

1. อายุการใช้งานนานกว่าทรายธรรมชาติ
2. อัตราลมผ่าน (P.M.) ดีกว่าทรายธรรมชาติ
3. มีแก๊สอยู่น้อยเนื่องจากใช้วัตถุดิบที่บริสุทธิ์เป็นตัวประสาน
4. สามารถกระทู้ให้แน่นได้มากกว่าทรายธรรมชาติ โดยไม่มีปัญหาในการเทน้ำโลหะลงแบบ
5. คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสม ควบคุมคุณภาพได้ง่าย

ข้อเสียของทรายวิทยาศาสตร์

1. แห้งเร็ว
2. ขอบเขตน้ำพอดิ ทำให้ทั้งแบบไว้นานไม่ได้
3. ต้องใช้น้ำสะอาดผสมเท่านั้น
4. ต้องมีอัตราส่วนผสมที่แน่นอน
5. ใช้เครื่องทำการผสมทรายให้เข้าด้วยกัน (Muller)
6. ต้องใช้ความรู้และความชำนาญในการตรวจสอบเม็ดทราย

2.2.3.2 ดินเหนียว

ดินเหนียวประกอบด้วยดินเหนียวขาวบริสุทธิ์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) และมอนทอมอริลโลไนท์ (Montmorillonite) ตลอดจนควออร์ทซ์ เฟลด์สปาร์ ไมคาและสิ่งเจือปนอื่นๆ ถ้าเติมน้ำเข้าไปจะเหนียว (Sticky) และถ้ามีน้ำมากจะมีลักษณะคล้ายแป้งเปียก (Pasty) ถ้าน้ำแห้งลงไปความเหนียวจะลดลง ขนาดของเม็ดดินเหนียวอยู่ระหว่าง 0.005-0.02 mm.

สำหรับชิ้นงานหล่อขนาดใหญ่ที่ใช้แบบหล่อทรายแห้งจะใช้ทรายซิลิกาที่มีดินเหนียวทนไฟได้สูงผสมอยู่บางครั้งก็ใช้เบนโทไนท์ (Bentonite) ซึ่งเป็นดินเหนียวชนิดหนึ่งผสมเข้ากับทราย เบนโทไนท์ประกอบด้วยเม็ดเล็ก ๆ ขนาด 10-0.01 μ ส่วนประกอบสำคัญของเบนโทไนท์คือมอนทอมอริลโลไนท์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ความเหนียวยึด (Plasticity) เกิดขึ้นเนื่องจากการพองของเม็ดเล็ก ๆ ของเบนโทไนท์เมื่อเติมน้ำลงไป

2.2.3.3 ตัวประสานชนิดอื่นๆ

บางครั้งได้แบบทำด้วยทรายซึ่งมีน้ำมันพืชผสมอยู่ 1.5-3.0% แล้วอย่างที่อุณหภูมิ 200-250°C น้ำมันประเภทนี้มีน้ำมันละหุ่ง (Linseed oil) น้ำมันถั่วเหลือง (Soy bean oil) และน้ำมันโคลซา (Colza oil) เป็นต้น ได้แบบนี้เรียกว่าได้แบบทรายผสมน้ำมัน (Oil sand core) ได้แบบนี้ความชื้นและสลายตัวได้ง่ายในคอนกรีตแบบ ถ้ามีแต่น้ำมันผสมกับทรายจะมีความแข็งแรงไม่เพียงพอที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นจะต้องใช้เบนโทไนท์หรือแป้งผสมเข้าด้วยกันเล็กน้อย เพื่อให้ขึ้นรูปและปรับแต่ง ได้ถึงแม้จะกระทำที่อุณหภูมิห้อง

นอกจากใช้ดินเหนียวเป็นตัวประสานในการทำแบบหล่อแล้ว ในบางกรณีก็ใช้เดกซ์ทริน (Dextrine) ซึ่งทำจากแป้งเป็นตัวประสานอีกด้วย เดกซ์ทรินนี้เหนียวถึงแม้จะมีความชื้นต่ำ ดังนั้นจึงช่วยทำให้เม็ดทรายเกาะกันดีสำหรับทรายที่ผิวแบบหล่อของแบบหล่อทรายเปียกแลแบบหล่อทรายแห้ง

2.2.3.4 ส่วนผสมพิเศษ

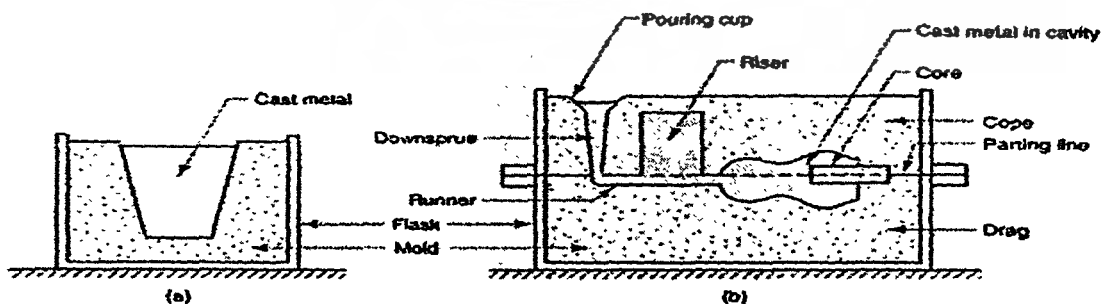
ใช้ผงถ่านหิน ผงยางมะตอย (Pitch powders) ผงถ่านโคก (Coke-breeze) หรือผงกราไฟท์ (Graphitic powder) ประมาณ 1% ผสมกับทรายทำแบบหล่อ เพื่อให้ผิวงานหล่อละเอียด ทำให้แกะแบบง่าย และกันไม่ให้เกิดรอยขีดข่วน (Scabs) ในบางกรณีถ้าใส่ส่วนผสมเหล่านี้เข้าไปมากเกินไปจะทำให้เกิดจุดเสียนื่องจากเกิดแก๊สขึ้น ดังนั้นการใช้ส่วนผสมในปริมาณที่เหมาะสมจึงเป็นเรื่องสำคัญ นอกจากนี้ยังอาจเกิดผลตรงข้ามกับที่ต้องการใช้ของที่มีคุณภาพไม่ดี

2.3 การออกแบบแม่พิมพ์

เครื่องมือพื้นฐานในการหล่อ คือ แม่พิมพ์ ซึ่งจะประกอบด้วยช่องว่างภายใน (Cavity) ที่มีรูปร่างที่ใช้ในการกำหนดรูปร่างของชิ้นงานหล่อ ขนาดและรูปร่างของแม่พิมพ์จะออกแบบเพื่อการหดตัวของโลหะที่เกิดขึ้นขณะแข็งตัวและเย็นตัวลง แม่พิมพ์ที่สามารถที่จะผลิตมาได้จากวัสดุหลายชนิดด้วยกัน เช่น ทราย ปูนปลาสเตอร์ เซรามิกส์ และโลหะแม่พิมพ์ สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ด้วยกัน

1. แม่พิมพ์แบบเปิด (Open mold) แสดงดังรูปที่ 2.1 (a) สำหรับแม่พิมพ์ชนิดนี้โลหะเหลวจะถูกเทลงไปโดยตรงในช่องว่างภายในแม่แบบ รูปร่างของแม่พิมพ์จะไม่ซับซ้อนมาก

2. แม่พิมพ์แบบปิด (Closed mold) แสดงดังรูปที่ 2.1 (b) โลหะเหลวจะถูกเทจากภายนอกทางเดินที่เรียกว่า Gating system ก่อนที่จะไหลสู่ช่องว่างภายในแม่แบบ โดยที่ Gating system ใช้สำหรับควบคุมการไหลของโลหะเหลว แม่พิมพ์ชนิดนี้มีความสำคัญต่องานหล่อมกกว่าแม่แบบชนิดแรก



รูปที่ 2.1 แม่พิมพ์แบบเปิด (a) แม่พิมพ์แบบปิด (b)

การออกแบบแม่พิมพ์ควรจะให้ความสำคัญกับการออกแบบชิ้นงานด้วย เพราะถ้าชิ้นงานมีความซับซ้อนน้อยจะทำแม่พิมพ์ขึ้นมาก่อนข้างง่ายและได้คุณสมบัติที่ต้องการ เช่น อาจออกแบบเป็นรูปเรขาคณิตเพื่อให้ง่ายขึ้นในการออกแบบ หลีกเลี่ยงการออกแบบชิ้นงานให้เป็นมุมแหลม เนื่องจากจะมีการสะสมความเค้นและอาจทำให้เกิดการแตกร้าวของชิ้นงานได้ แต่ควรจะใช้ส่วนโค้งแทน การออกแบบชิ้นงานให้มีความหนาสม่ำเสมอเพื่อลดโอกาสการเกิดโพรงภายในชิ้นงานเนื่องจากการหดตัวซึ่งความบกพร่องชนิดนี้มีโอกาสเกิดมากขึ้นถ้าชิ้นงานมีความหนาแตกต่างกัน เป็นต้น แม่แบบควรจะมีลักษณะเอียง (taper หรือ draft) เล็กน้อยเพื่อให้ถอดกระสวยออกจากแม่แบบได้ง่าย เอียงประมาณ 1-3 องศา แม่พิมพ์ควรมีลักษณะที่สมบูรณ์ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ใส่แบบ เนื่องจากมีโอกาสทำให้เกิดความบกพร่องในชิ้นงานได้ง่าย การเลือกวิธีการหล่อให้เหมาะสมก็จะทำให้แม่พิมพ์สามารถผลิตชิ้นงานที่ดีและเหมาะสมได้ เนื่องจากวิธีการหล่อแต่ละวิธีมีคุณลักษณะที่แตกต่างกันทั้งในเรื่องของความคลาดเคลื่อนยินยอม (tolerances) และคุณภาพของผิวชิ้นงาน ในการหล่อบางวิธีควรออกแบบแม่พิมพ์เพื่อไว้เพื่อเป็นระยะเวลาในตกแต่งชิ้นงาน (machining allowances) เช่น การหล่อโดยใช้แม่แบบทรายควรมีระยะเผื่อการตัดแต่ง 0.16 ถึง 0.63 เซนติเมตร เช่น ในการออกแบบแม่พิมพ์ที่ผลิตชิ้นงานที่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 4 เซนติเมตร ควรออกแบบแม่พิมพ์ขนาด 4.16 ถึง 4.63 เซนติเมตร เพื่อเป็นระยะการตกแต่งชิ้นงาน เป็นต้น

การพิจารณาคุณภาพในการทำแม่แบบในการหล่อทราย

1. จะต้องทนความร้อนได้สูงโดยไม่เกิดการหลอมละลาย หรือเสื่อมสภาพ
2. ความแข็งแรง (Strength) แม่แบบในการหล่อทรายที่ดีจะต้องมีความแข็งแรงพอที่จะสามารถคงรูปได้ระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ต้องทนต่อสภาพในการสีกกร่อนที่จะเกิดขึ้นจากการไหลของโลหะเหลวด้วย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น รูปร่างของแม่ทราย ความสามารถในการยึดเหนี่ยวของตัวประสาน
3. ความสามารถในการยุบตัว (Collapsibility) เป็นความสามารถของแม่แบบในการอนุญาตให้ชิ้นงานได้โดยไม่ทำให้เกิดการแตกร้าวของชิ้นงาน โดยทั่วไปแล้วแม่แบบที่มีความแข็งแรงสูงจะมีความสามารถในการยุบตัวต่ำ นอกจากนี้ยังหมายถึง ความยากง่ายในการกำจัดทรายออกจากชิ้นงานระหว่างการทำความสะอาด
4. ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (Permeability) แม่แบบในการหล่อทรายจะต้องมีรูพรุนขนาดเล็กสำหรับให้ก๊าซ หรืออากาศอื่น ที่เกิดขึ้นระหว่างการหล่อซึมผ่านแม่แบบไปได้
5. ความเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) เป็นความสามารถของทรายที่เป็นผิวภายในของแม่แบบในการต้านทานการแตกร้าวและการ โกงงอ (Buckling) เนื่องจากการสัมผัสกับ โลหะเหลวที่อุณหภูมิสูง
6. ความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ (Reusability) แม่แบบทรายที่ดีควรที่จะสามารถนำทรายกลับมาใช้ใหม่

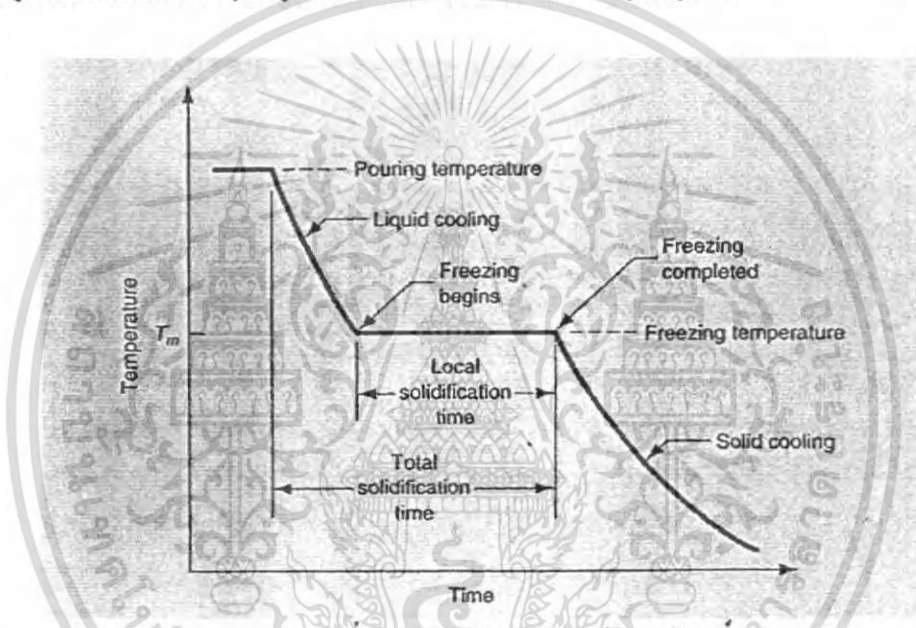
2.4 การแข็งตัวของโลหะ

การแข็งตัวของโลหะ (solidification) เป็นปรากฏการณ์ที่โลหะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็งอีกครั้งหนึ่งเมื่ออุณหภูมิลดลง กระบวนการแข็งตัวของโลหะจะแตกต่างกันไปนั้นขึ้นอยู่กับว่าโลหะชนิดนั้นเป็นโลหะบริสุทธิ์หรือโลหะผสม (Alloy) มี 2 ขั้นตอน คือ

1. นิวเคลียชัน (nucleation) เป็นขั้นตอนการเกิด นิวคลีไอ (nuclei) ที่อยู่ในมวลโลหะที่หลอมเหลว

2. การเติบโตของนิวคลีโอ โดย นิวคลีโอในโลหะเหลว จะโตขึ้นจนเป็นผลึก และผลึกเหล่านี้ จะต่อกันเป็นโครงสร้างของเกรน (grains) เรียกบริเวณที่เกรนสัมผัสกัน ว่า ขอบเขตเกรน (grain boundaries)

การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ เกิดจากการแข็งตัวที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งก็คืออุณหภูมิที่เป็นจุดหลอมเหลวของโลหะบริสุทธิ์ รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะเส้นกราฟของการเย็นตัว (Cooling curve) ของโลหะบริสุทธิ์ การแข็งตัวของโลหะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ (T_m) และจะอาศัยระยะเวลาช่วงหนึ่งซึ่งเรียกว่า Local solidification time ซึ่งเป็นช่วงที่โลหะใช้ไปในการคายพลังงานความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Latent heat of fusion) ออกไปให้กับสิ่งแวดล้อม เวลาที่ใช้ตั้งแต่การเทโลหะเหลวเข้าแม่แบบจนกระทั่งโลหะเหลวเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์เรียก Total solidification time เมื่อโลหะเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์แล้วการลดลงของอุณหภูมิจึงลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิห้อง



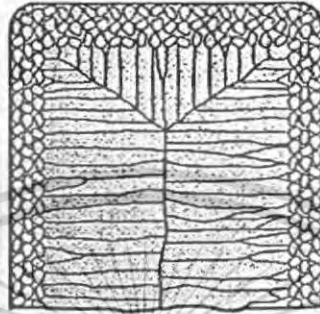
รูปที่ 2.2 กราฟการเย็นตัวของโลหะบริสุทธิ์

เนื่องจากอุณหภูมิของแม่แบบมีค่าทำให้โลหะเหลวที่สัมผัสกับผิวแม่แบบเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วเกิดเป็นชั้นบางๆ ซึ่งชั้นบางๆนี้จะกลายเป็นเปลือกห่อหุ้มโลหะเหลวไว้ข้างใน การแข็งตัวจะเกิดไปอย่างค่อเนื่องจากผิวภายนอกไล่เข้าไปสู่ศูนย์กลางของชิ้นงาน อัตราเร็วในการแข็งตัวขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นผ่านแม่แบบรวมทั้งคุณสมบัติทางความร้อนของโลหะ

โลหะที่ขึ้นที่ผนังแม่แบบเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากการสูญเสียความร้อนให้กับผนังแม่แบบ ทำให้เกรนของโลหะที่เกิดขึ้นมีลักษณะเล็ก ละเอียด มีรูปร่างคล้ายทรงกลม (Equiaxed) และมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (randomly oriented) เมื่ออุณหภูมิลดลงต่อไปก็จะมีเกรนใหม่ๆเกิดขึ้นและเกิดขึ้นในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับทิศทางที่สูญเสียความร้อน เกรนที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะเกิดขึ้นในทิศทางที่ขึ้นเข้าไปในศูนย์กลางของชิ้นงานและมีรูปร่างคล้ายเข็ม และเมื่อเกรนเหล่านี้เติบโตขึ้นจะแตกกิ่งออกมาเรื่อยๆ ในลักษณะคล้ายกับกิ่งที่มันแตกออกมา ลักษณะการเติบโตของเกรนแบบนี้เรียกว่า Dendritic growth ซึ่งการเติบโตของเกรนในลักษณะนี้สามารถพบได้ระหว่างการแข็งตัวของโลหะผสมเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างลักษณะคล้ายต้นไม้หรือที่เรียกว่า เคนไครต์ นี้จะค่อยๆเจริญเติบโตไปเรื่อยๆจนเกิดการแข็งตัวของโลหะอย่างสมบูรณ์ โดยปกติแล้วส่วนของโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่จะจัดเรียงตัวไปในทิศศูนย์กลางของชิ้นงานดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างชิ้นงานหล่อโลหะบริสุทธิ์

2.4.1 นิวคลีเอชันในโลหะที่หลอมเหลว

การเกิดนิวคลีไอ ในโลหะเหลว มี 2 ลักษณะ ดังนี้

1. โฮโมจีเนียส นิวคลีเอชัน (homogeneous nucleation) อะตอมโลหะที่หลอมเหลว จะเกาะกันเป็นอนุภาคเล็กๆ ที่เรียกว่า นิวคลีไอ และ โตขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งอนุภาคมีขนาดเท่ากับขนาดวิกฤติ (critical size) และกลายเป็นนิวเคลียส (nucleus) ซึ่งจะเสถียร และเป็นผลึกต่อไป อย่างไรก็ตามหากอนุภาคที่มีขนาดเท่ากับขนาดวิกฤตินั้น เล็กลง เรียกว่า เอ็มบริโอ (embryo) อาจหลอมลงไปกลายเป็นโลหะเหลวใหม่ได้ นิวคลีไอ ก็อาจหลอมกลับไปเป็นของเหลวใหม่ได้ เช่นเดียวกัน โฮโมจีเนียส นิวคลีเอชัน จะเกิดขึ้นในการแข็งตัวของ โลหะเดี่ยว บริสุทธิ์ ไม่มีสิ่งเจือปน

2. เฮเทอโรจีเนียส นิวคลีเอชัน (heterogeneous nucleation) จะเกิดขึ้น ในกระบวนการหล่อโลหะ ในอุตสาหกรรม ซึ่งมีการผสมสารที่ทำให้เกรนละเอียด (grain refiner) ตามที่ต้องการ หรือมีสิ่งเจือปนอื่นๆ หรือ การเกิดนิวคลีไอ บริเวณผิวของแบบหล่อ ซึ่งเย็นเร็วกว่าบริเวณอื่น เป็นต้น

2.4.2 การเกิดผลึกในโลหะเหลว

เมื่อนิวเคลียส โตเป็นผลึก อะตอมภายในผลึก จะจัดเรียงตัวกัน อย่างเป็นระเบียบ และสม่ำเสมอ แต่ละผลึกจะสัมผัสกันในทิศทางที่ต่างกัน เรียกโลหะที่ประกอบด้วยผลึกจำนวนมากนี้ว่า โลหะ หลายผลึก (poly crystalline) เรียกแต่ละผลึกนี้ว่า เกรน ผิวสัมผัสระหว่างผลึก เรียกว่า ขอบเขตเกรน

จำนวนนิวคลีไอ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการแข็งตัว จะมีผลต่อจำนวนผลึกในโลหะ ถ้ามีนิวคลีไอน้อย จำนวนผลึกจะน้อยตามไปด้วย โลหะนั้นจะมีเกรนหยาบ และใหญ่ (coarse grain) เป็นผลสืบเนื่องจากการเย็นตัวช้า และถ้าให้โลหะเย็นตัวเร็ว จำนวนนิวคลีไอ จะมาก เนื่องจากจะไม่หลอมใหม่ ทำให้ได้จำนวนผลึกในโลหะมาก ได้เกรนละเอียด (fine grain)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากผสมโลหะบางชนิดลงไปโลหะเหลว ในปริมาณเล็กน้อย เช่น Al, Zr, B และ Ti จะได้จำนวนเกรน มาก เมื่อแข็งตัวแล้ว จะได้โลหะ เกรนละเอียด เรียก โลหะที่ใช้เติมว่า grain refiner เมื่อนำโลหะเหลว ไปเทลงในแบบหล่อที่อยู่ กับที่ โดยไม่เติม grain refiner จะมีโครงสร้างเกรนเกิดขึ้น 2 แบบ คือ

.1.เกรนชนิด อีควิแอกซ์ (equiaxed grains) เป็นเกรนที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้ผิวแบบหล่อ เย็นตัวเร็ว จะมีเกรน จำนวนมาก ได้เป็นเกรนละเอียด

.2.เกรนชนิด คอลัมนา (columnar grains) เป็นเกรนที่มีลักษณะ ขาว และ หยาบ เกิดขึ้นบริเวณกลางแบบหล่อ ซึ่ง เย็นตัวช้ากว่าบริเวณขอบ

2.5 การหดตัวของโลหะ

การหดตัว (Shrinkage) เนื่องจากการแข็งตัวมักจะเกิดกับโลหะเกือบทุกชนิด เนื่องจากของแข็งมีความหนาแน่น มากกว่าของเหลว การเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งทำให้อัตราส่วนปริมาตรค่อนน้ำหนักของโลหะลดลง

เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานลดลง การหดตัวของชิ้นงานจะเกิดขึ้นซึ่งการหดของชิ้นงานจะเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน คือ

1. การหดตัวในสถานะของเหลวเนื่องจากอุณหภูมิที่ลดลง

2. การหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ซึ่งเรียกการหดตัวเนื่องจากการการแข็งตัว

(Solidification shrinkage)

3. การหดตัวของชิ้นงานเนื่องจากอุณหภูมิที่ลดลงหลังจากการกลายเป็นของแข็งแล้ว

2.6 การเทโลหะเหลว

การเทโลหะเหลวลงในแม่แบบจำเป็นต้องให้โลหะเหลวบรรจุลงในแม่แบบจนเต็มก่อนที่จะเกิดการแข็งตัว ปัจจัย ที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการเทโลหะเหลวได้แก่ อุณหภูมิเท (Pouring Temperature) อัตราการเท (Pouring rate) ความปั่นป่วนของโลหะเหลว (Turbulence)

อุณหภูมิเท คือ อุณหภูมิของโลหะเหลวขณะเทลงไปในแม่แบบ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเทกับอุณหภูมิที่ โลหะแข็งตัวซึ่งจะเรียกว่า Superheat ซึ่งจะเป็นปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกไปก่อนที่จะเกิดการแข็งตัวของโลหะ

อัตราการเท คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของโลหะเหลวที่ไหลเข้าไปในแม่แบบ ถ้าอัตราการเทต่ำเกินไปโลหะ จะเกิดการแข็งตัวก่อนที่บรรจุได้เต็มแม่แบบ แต่ถ้าอัตราการเทสูงเกินไปความปั่นป่วนของโลหะเหลวจะเกิดขึ้นมากและ ทำให้เกิดปัญหาต่างๆในการหล่อ

ความปั่นป่วนของโลหะเหลว คือ การไหลไม่เป็นระเบียบของโลหะเหลว การไหลแบบนี้จะเร่งให้เกิดออกไซด์ ของโลหะขึ้น ซึ่งเมื่อชิ้นงานเกิดการแข็งตัวออกไซด์เหล่านี้จะฝังอยู่ในเนื้อโลหะทำให้คุณภาพของชิ้นงานลดลง นอกจากนี้ ความปั่นป่วนของ โลหะเหลวยังเร่งให้เกิดการสึกกร่อนของแม่แบบ (Mold erosion) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ผิวหน้าของ แม่แบบเกิดการสึกกร่อนเนื่องจากการไหลของโลหะเหลว ที่อุณหภูมิสูงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นได้เร็วและความ หนาแน่นของ โลหะที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดการสึกกร่อนขึ้น และการสึกกร่อนจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นถ้าโลหะเหลวเกิดการไหล แบบปั่นป่วน การสึกกร่อนจะทำความเสียหายให้กับการหล่อมากยิ่งขึ้นถ้าเกิดขึ้นในช่องว่างภายในแม่แบบ (Mold cavity) เนื่องจากจะทำให้รูปร่างของชิ้นงานผิดเพี้ยนไปจากเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการไหล (Flow characteristics) ของของไหล เช่น โลหะเหลวจะสามารถแบ่งได้ 3 ช่วง ด้วยกันคือ

1. การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) เป็นการไหลที่ต้องการให้เกิดชั้นขณะที่เทน้ำโลหะเหลวลงในแม่แบบ เนื่องจากเป็นการไหลที่เกรนของของไหลเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบ
2. การไหลในช่วงเปลี่ยนแปลง (Transition flow) เป็นการไหลที่เกรนของของไหลเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน
3. การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence flow) เป็นการไหลที่มีความไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลของของไหลสูง และเป็นการไหลที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น

2.7 ความสามารถในการไหล

ในที่นี้หมายถึงความสามารถของโลหะเหลวในการไหลเข้าไปในช่องว่างภายในแม่แบบก่อนที่จะเกิดการแข็งความสามารถในการไหลเป็นคุณสมบัติตรงข้ามกับความหนืด ถ้าของไหลชนิดใดมีความหนืดมากก็จะมีความสามารถในการไหลต่ำ การทดสอบความสามารถในการไหลของของเหลวในรูปที่ 2.4 ถ้าโลหะเหลวชนิดใดไหลไปได้ระยะทางที่ไกลกว่าก่อนที่จะเกิดการแข็งตัวแสดงว่าโลหะชนิดนั้นมีความสามารถในการไหลดีกว่าและปัจจัยต่างๆที่กำหนดความสามารถในการไหลของโลหะเหลวได้แก่



รูปที่ 2.4 การทดสอบความสามารถของการไหล

1. คุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนืด ถ้าความหนืดเพิ่มขึ้นความสามารถในการไหลก็จะลดลง ความตึงผิวก็มีอิทธิพลต่อความสามารถของการไหลของโลหะเหลวเช่นกัน เมื่อความตึงผิวของโลหะเหลวเพิ่มขึ้นความสามารถในการไหลก็จะลดลง สิ่งเจือปน (Inclusions) ที่ผสมอยู่ในโลหะเหลวก็ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการไหล ถ้าในโลหะเหลวมีสิ่งเจือปนผสมอยู่มากความสามารถในการไหลก็จะลดลง ความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว ก็มีผลต่อความสามารถในการไหล เนื่องจากเป็นปริมาณความร้อนที่โลหะเหลวจะต้องสูญเสียออกไปเพื่อกลายเป็นของแข็ง ดังนั้นถ้าความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวมีมากก็ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล นอกจากนี้ลักษณะแข็งตัวของโลหะชนิดนั้นก็ยังมีอิทธิพลต่อความสามารถในการไหล โลหะชนิดนั้นเกิดการแข็งตัวที่อุณหภูมิค่าใดค่าหนึ่งเพียงค่าเดียวหรือมีช่วงแข็ง ตัวความสามารถของการไหลเป็นช่วงสั้นๆก็จะมีความสามารถของการไหลสูง ส่วนโลหะผสมที่มีช่วงของการแข็งตัวกว้างจะมีความสามารถในการไหลต่ำเนื่องจากโลหะที่เกิดการแข็งตัวก่อนจะขัดขวางการไหลของโลหะเหลว

2. ปัจจัยในการหล่อ เช่น ลักษณะของแม่แบบ ถ้าแม่แบบที่ซับซ้อนมากจะทำให้ความสามารถของการไหลของโลหะเหลวลดลง นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ทำแม่แบบและคุณภาพผิวก็มีอิทธิพลต่อความสามารถของการไหลของโลหะเหลวเช่นกัน ถ้าวัสดุที่ใช้ทำแม่แบบนำความร้อนได้ดีโลหะเหลวจะสูญเสียความร้อนออกไปมาก ทำให้ความสามารถของการไหลลดลง และหากผิวภายในของแม่แบบมีความหยาบสูงก็จะทำให้ความสามารถของการไหลของน้ำโลหะลดลงเช่นกัน อุณหภูมิของโลหะเหลวเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของการไหล ถ้าโลหะถูกหลอมจนมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวมากขึ้นเท่าใดความสามารถของการไหลก็จะสูงมากขึ้นเท่านั้น แต่จะต้องไม่ลืมว่าถ้าอุณหภูมิของโลหะเหลวสูงเกินไปจะทำให้เกิดความเสียหายต่อแม่แบบและชิ้นงานได้ เช่น โลหะที่มีความสามารถในการไหลสูงเกินไปจะแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างแบบได้ ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีส่วนเกินเกิดขึ้น อัตราการเทมีผลต่อความสามารถของการไหล ถ้าอัตราการเทต่ำจะมีการสูญเสียความร้อนออกจากโลหะเหลวเป็นปริมาณมากก่อนที่การเทจะสิ้นสุดดังนั้นถ้าอัตราการเทต่ำจะทำให้ความสามารถของการไหลโดยรวมต่ำเช่นกัน นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการหล่อก็มีผลต่อความสามารถของการไหล ถ้ามีการสูญเสียความร้อนออกจากระบบมากความสามารถของการไหลของโลหะเหลว

2.8 การหลอมโลหะ

การผลิตงานโลหะหล่อให้ได้ขนาดตามต้องการและมีคุณภาพดีนั้น จำเป็นจะต้องควบคุมตัวแปรสำคัญหลักสามอย่าง คือ การควบคุมการหลอม การควบคุมสภาพแบบหล่อโลหะ และส่วนผสมของโลหะกับอุณหภูมิน้ำโลหะมีผลอย่างไรต่อคุณภาพงานหล่อ ทั้งนี้เพื่อให้ได้น้ำโลหะที่ถูกต้องทั้งในส่วนผสมเคมีและอุณหภูมิน้ำโลหะ

การหลอมโลหะไม่ใช่เป็นเพียงการให้ความร้อนกับก้อนโลหะเพื่อทำให้โลหะหลอมละลายเท่านั้น การหลอมจะมีผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของเนื้อโลหะหลังการแข็งตัว ความแข็งแรงของเนื้อโลหะหลังการแข็งตัวและในการที่จะหลอมอลูมิเนียมนั้นก็คือการที่จะศึกษาคุณสมบัติของอลูมิเนียมให้ละเอียดเพื่อนำมาประกอบในการทำการหลอมอลูมิเนียม

2.8.1 เตาหลอมกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

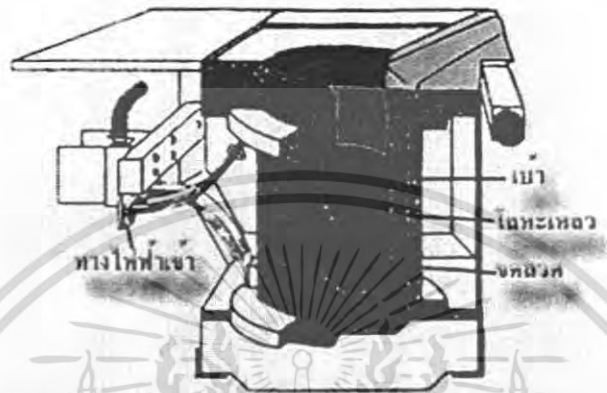
การหลอมอลูมิเนียมด้วยเตาเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า (Induction Furnace) เตาหลอมเหล็กด้วยการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้านี้สามารถใช้ได้ตั้งแต่ 1 ถึง 60 ตัน ใช้ในการหลอมอลูมิเนียม การหลอมละลายกระทำโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าสลับให้ไหลผ่านท่อทองแดง (มีน้ำหล่อเย็นอยู่ภายในท่อ) ที่พื้นผิวรอบเตา ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในท่อทองแดงให้เกิดกระแสไหลวนทำให้โลหะในเตาร้อนแล้วหลอมละลายอย่างรวดเร็ว

ข้อดีของเตาชนิดนี้

- ใช้คลื่นความถี่ปานกลางสามารถเริ่มทำการหลอมจากสภาพเย็นได้
- หลังจากหลอมละลายสามารถอุ่นน้ำโลหะได้เป็นเวลานานตามความจำเป็นได้
- หลังจากหลอมละลายสามารถเทน้ำโลหะให้ไหลออกหมดเกลี้ยง ซึ่งทำให้สามารถหลอมโลหะชนิดอื่นได้ตลอดเวลา
- การหลอมในเตานี้มีเปลวไฟน้อยจึงทำให้การสูญเสียของธาตุที่เจือน้อยที่สุด

การบำรุงรักษาเตาหลอมทำได้โดยหลังจากทำการหลอมสิ้นสุดลง ควรทำความสะอาดภายในเตาด้วยท่อนไม้หรือพายเหล็กโค้ง ในขณะที่ตัวเตายังมีอุณหภูมิสูงอยู่ การทำความสะอาดดังกล่าวจะทำให้การขูด dross และเศษโลหะที่เกาะติดผิวเตาออกไป จะไม่ให้เกิดความเสียหายกับตัวเตา อย่างไรก็ตามเวลาขูดเตาควรทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจาก

การทำความสะอาดเบ้าควรจะทำในขณะที่เบ้ายังร้อนแดงจัดอยู่ การกระทบกระเทือนอย่างรุนแรงอาจทำให้เบ้าแตกเสียหายได้



รูปที่ 2.5 เตาหลอมกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบ Coreless

2.8.2 ผลกระทบของอุณหภูมิหลอมและเวลาหลอม

ในระหว่างการเตรียมน้ำโลหะสำหรับงานหล่อถึงที่ต้องพึงระวังเสมอ คือจะต้องหลีกเลี่ยงการหลอมน้ำโลหะที่ระดับอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายมาก พร้อมทั้งหลีกเลี่ยงการการปล่อยเข้าน้ำโลหะที่ระดับอุณหภูมิดังกล่าวเป็นระยะเวลานานเกินความจำเป็น ทั้งนี้เพราะการหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายมากเป็นเวลานานมาก จะทำให้เนื้อโลหะชิ้นงานที่ได้มีเกรนหยาบ เนื้อโลหะจะมีคุณสมบัติทางกลด้อยมาก นอกจากนี้การหลอมโลหะที่ระดับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน จะมีผลทำให้น้ำโลหะละลายก๊าซชนิดต่างๆที่อยู่ในบรรยากาศเหนือหน้าโลหะในปริมาณมากขึ้น ซึ่งจะทำให้มีปัญหาค้ำหินชิ้นงานหล่อที่เกิดจากก๊าซได้ง่ายขึ้น หรือมาจากการเกิดออกไซด์ (dross) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

2.9 คุณสมบัติของอลูมิเนียม

อลูมิเนียมในปัจจุบันเป็นโลหะที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ จักรยานยนต์ และอาจจะรวมไปถึงของใช้ต่างๆในชีวิตประจำวัน เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าอลูมิเนียมนี้มีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตประจำวันมาก ทำให้เล็งเห็นว่าอลูมิเนียมที่ใช้นั้นควรมีคุณภาพดีและเหมาะกับการใช้งานในแต่ละประเภท เราจึงนำความรู้ในด้านวัสดุศาสตร์เพื่อมาศึกษาชิ้นงานหล่ออลูมิเนียมที่ผลิตขึ้นมาให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพดีและเหมาะกับการใช้งาน อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีอุณหภูมิหลอมละลายที่ 660 องศาเซลเซียส อลูมิเนียมมีคุณสมบัติทางกายภาพที่เด่นอยู่หลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการใช้ทั่วไป มีค่าความหนาแน่นที่ต่ำกว่าเหล็กมาก มีความหนาแน่นเท่ากับ 2.7 กรัม/ซม³ ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเหล็ก 7.8 กรัม/ซม³ อลูมิเนียมจึงมีน้ำหนักเบากว่ามากข้อได้เปรียบนี้ จึงนำอลูมิเนียมมาใช้แทนเหล็กในอุตสาหกรรมรถยนต์ โดยในด้านชิ้นส่วนรถยนต์มีการเปลี่ยนจากการใช้เหล็กมาเป็นอลูมิเนียมแทนทำให้ตัวรถมีน้ำหนักเบาขึ้น จึงประหยัดเชื้อเพลิงขึ้น นอกจากนี้การตัดแต่งอลูมิเนียมโดยเครื่องมือนักกระทำ

ได้ง่ายกว่าเหล็ก อลูมิเนียมไม่มีพิษ จึงมักนิยมทำภาชนะต่างๆ ส่วนข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับเหล็ก เช่น มีราคาสูงกว่า ไม่ทนต่อการขัดสี (abrasion) และการสึกหรอเท่าเหล็ก เป็นต้น ปริมาณความร้อนหลอมละลายมีค่า (92.7 แคลอรี/กรัม) ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น (0.226 แคลอรี/กรัม) ที่การเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลว-แข็งจะทำให้ปริมาตรลดลง 6.5-8.5% ของปริมาตรเดิม อลูมิเนียมซึ่งสูงอุณหภูมิจะยังมีความรวดเร็วในการจับตัวกับออกซิเจนกลายเป็นออกไซด์ เกิดขึ้นกับอลูมิเนียมได้เพิ่มขึ้น

2.10 การเกิดอนุภาคและการตกผลึกของโลหะ

ในสภาวะที่โลหะบริสุทธิ์แข็งตัว ผลึกแต่ละผลึกจะเริ่มแข็งแรงจากนิวเคลียส หรือจากจุดศูนย์กลางของผลึกก่อน นิวเคลียส คือ ผลึกเล็ก ๆ ที่ก่อตัวขึ้นเป็นผลึกแรก ซึ่งการก่อตัวของนิวเคลียสนี้ อาจจะทำขึ้นหลาย ๆ จุดพร้อม ๆ กันและจากนั้นผลึกจะโตขึ้นเรื่อย ๆ จากการจับตัวกันเพิ่มขึ้นของอะตอม ที่เข้าร่วมตัวกันตามรูปทรงของผลึกของโลหะนั้น ๆ การรวมตัวกันของอะตอมจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อม ๆ กันกับการเย็นตัวของโลหะ ซึ่งการจับยึดตัวของอะตอมต่อไปเรื่อย ๆ เช่นนี้ เรียกว่า "Dendrite" การเจริญเติบโตของ Dendrite จะแผ่ขยายออกไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งโลหะนั้นแข็งตัวหมด จึงจะหยุดการเจริญเติบโต Dendrite ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน มันจะขยายตัวออกไปจนกระทั่งแขนงขยายตัวแผ่ออกไปชนกับแขนงของตัวข้างเคียง ซึ่งหมายถึงการเจริญเติบโตของผลึกสิ้นสุดลงในช่วงนี้ของโลหะก็จะแข็งตัวหมดพอดี ผลึกแต่ละผลึกจะมีขนาดไม่เท่ากันเนื่องจากการเติบโตของ Dendrite แต่ละตัวเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกันจากการที่ผลึกแต่ละผลึกไม่เท่ากันนี้เอง ทำให้มีลักษณะเป็นเส้นแบ่งเขตแดนของเกรนแต่ละเกรนซึ่งเรียกว่า Grain Boundary



รูปที่ 2.6 การเกิด Grain และ Grain Boundary ในสภาวะการตกผลึกของโลหะ

- นิวเคลียสเริ่มก่อตัวเล็ก ๆ ตามตำแหน่งต่าง ๆ
- จากผลึกขยายตัวเป็น Dendrite ใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ
- Dendrite แต่ละตัวแผ่ขยายใหญ่จนแขนง (Tertiary Arm) ของแต่ละตัวเกือบจะชนกัน
- Dendrite แต่ละตัวแผ่ขยายใหญ่จนแขนงของแต่ละตัวชนกันผลึกเริ่มหยุดก่อตัว
- เกิดเป็น Grain Boundary บริเวณขอบผลึก

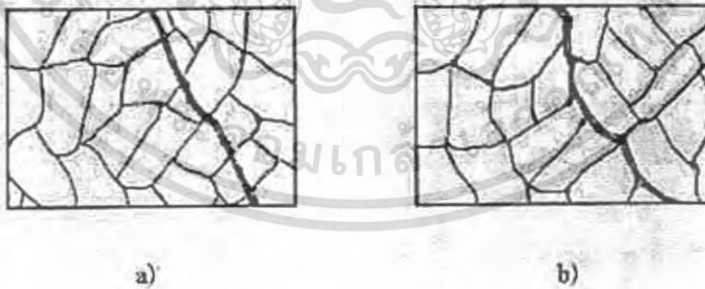
2.10 .1 การแยกตัวของสารมลทิน

โลหะที่พบเห็นและนำมาใช้งาน ส่วนใหญ่แล้วจะเป็น โลหะบริสุทธิ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมักจะมีสิ่งอื่น ๆ เจือปนอยู่ด้วยเสมอ ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้เรียกว่า สารมลทิน (Impurity) สารมลทินเหล่านี้จะมีจุดหลอมตัวต่ำกว่าเนื้อโลหะบริสุทธิ์นั้น ๆ ขณะที่โลหะแข็งตัว ลักษณะ Dendrite อดอมของโลหะบริสุทธิ์จะเริ่มจับตัวก่อนเนื่องจากมีจุดหลอมตัวสูงกว่า เมื่อจับตัวใหญ่ขึ้นก็จะไล่พวกสารมลทินซึ่งยังเหลวตัวอยู่ให้หนีออกไปบริเวณผลึก ดังนั้นเมื่อโลหะแข็งตัวหมดสารมลทินจะมารวมตัวกันอยู่บริเวณ Grain Boundary



รูปที่ 2.7 การแยกตัวของสารมลทินออกจากผลึกโลหะ

ดังนั้นบริเวณ Grain Boundary ของโลหะที่ไม่บริสุทธิ์ จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Grain Boundary ของโลหะบริสุทธิ์ การแตกหักของโลหะที่ไม่บริสุทธิ์จะแตกหักตามแนว Grain Boundary เราเรียกการแตกหักแบบนี้ว่า Inter Crystalline Failure โลหะบริสุทธิ์บริเวณ Grain Boundary จะมีความแข็งแรงกว่าแบบไม่บริสุทธิ์ โอกาสจะแตกตามแนว Grain Boundary จึงมีน้อย ส่วนใหญ่จะแตกตามแนวแรงที่มากระทำ เรียกรอยแตกหักแบบนี้ว่า Tran Crystalline Failure



รูปที่ 2.8 การแตกหักในเนื้อโลหะ

- a) การแตกหักแบบ Tran Crystalline Failure
- b) การแตกหักแบบ Inter Crystalline Failure

2.10.2 ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของเกรน

1. อัตราการเย็นตัว (Cooling rate) เมื่ออัตราการเย็นตัวสูง เกรนจะมีขนาดเล็ก ตรงกันข้าม เมื่ออัตราการเย็นตัวต่ำ เกรนจะมีขนาดใหญ่

2. ส่วนผสม (เพิ่มจำนวน nucleus ของการตกผลึก)

3. ขบวนการทางความร้อน (Heat treatment ของโลหะ)



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 บทนำ

ในการจัดทำปริญาพนันท์ การศึกษาผลกระทบอนุภาคของอลูมิเนียมที่มีความสูงต่างกัันนั้น ได้มีการทำการทดลองโดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ โดยมีกระบวนการดำเนินงานดังนี้

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องผสมทราย

เป็นเครื่องที่ใช้ในการผสมทราย โดยก่อนการผสมต้องมีการนำทรายมาร้อนผ่านตะแกรง เพื่อให้ได้เม็ดทรายที่ละเอียดเหมาะกับการใช้งาน โดยมีสารเติมสารเบนโทไนท์ (Bentonite) เด็กซ์ตริน (dextrin) และน้ำ เป็นตัวประสาน เพื่อให้เกิดการจับตัวของทราย ตัวเครื่องมีช่องใส่ทราย ตัวประสาน โดยมีแกนหมุนอยู่ตรงกลางเพื่อใช้ในการผสมทรายเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.1



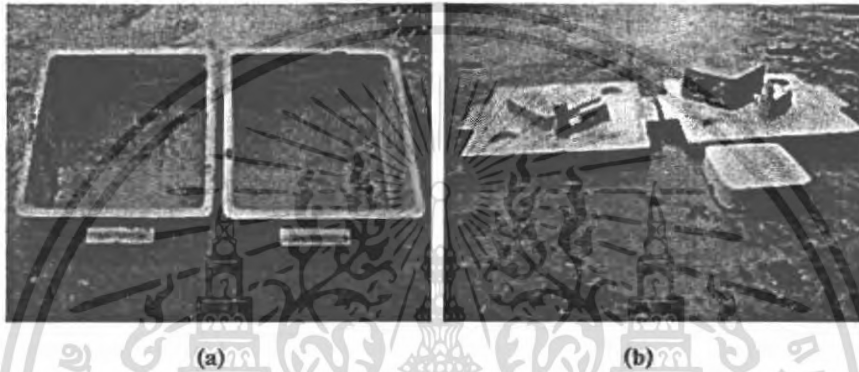
รูปที่ 3.1 เครื่องผสมทราย

3.2.2 ชุดแบบหล่อทราย

ชุดแบบหล่อทรายประกอบด้วย อุปกรณ์ 2 ชนิด คือ หีบหล่อทราย และ กระจกวน

หีบหล่อทราย เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการหล่อทราย เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้อัดทรายลงในแบบหล่อที่ต้องการ ในการทดลองมีการใช้หีบ 2 ชั้น คือหีบหล่อบน และหีบหล่อล่าง ทั้ง 2 หีบ มีลักษณะที่เหมือนกัน โดยหีบหล่อมีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมคางหมู เพื่อสะดวกในการถอดทรายออกจากหีบหล่อ ดังรูปที่ 3.2 (a)

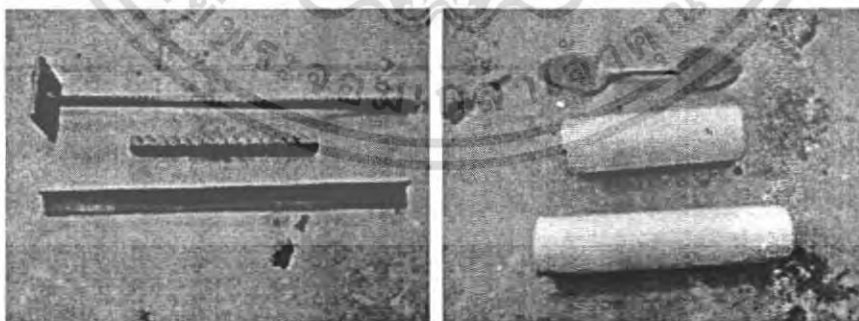
กระจกวนเป็นอุปกรณ์ในการทำแบบหล่อทราย เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดรูปร่างและขนาดแบบหล่อที่ต้องการ ในการทดลองเราใช้กระจกวนทรงสี่เหลี่ยม 3 ขนาดเพื่อใช้ในการหล่อ ดังรูปที่ 3.2 (b)



รูปที่ 3.2 ชุดทำแบบหล่อทราย (a) หีบหล่อ (b) กระจกวน

3.2.3 อุปกรณ์เสริมในการหล่อทราย

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตกแต่งแบบหล่อทราย โดยใช้เหล็กกระทิงทรายเพื่อให้ทรายจับตัวกันแน่นขึ้น และใช้ท่อพีวีซี ในการทำรูและรูสัน โดยใช้ซันตกแต่งขอบบริเวณรูเพื่อให้เกิดความสะดวกในการเทอลูมิเนียม



(a)

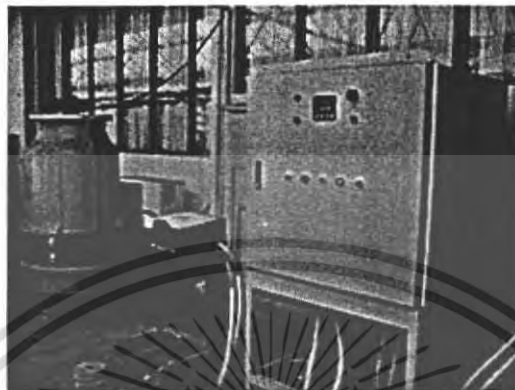
(b)

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์เสริมในการทำแบบหล่อทราย (a) เหล็กกระทิงทรายและเหล็กปาดหน้า (b) ซันและท่อพีวีซี

83718

3.2.4 เตาลอมโลหะและชุดควบคุม

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการหลอมอลูมิเนียม เพื่อนำอลูมิเนียมที่หลอมเหลวมาเทลงในแบบหล่อ มีการทำงาน กล่าวไว้หัวข้อ 2.9.1 โดยเตาลอมโลหะประกอบด้วย ชุดควบคุมการทำงาน เบ้าหลอม และเครื่องหล่อเย็น ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เตาลอมโลหะและชุดควบคุม

3.2.5 เครื่องขัดผิวหน้าแบบละเอียด

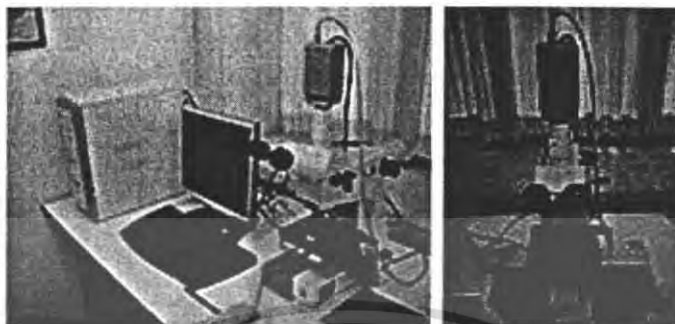
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการขัดผิวชิ้นงานทดสอบให้เรียบเพื่อที่จะนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยในตัวเครื่อง จะมีจานขัด 2 จาน จานข้างหนึ่งใช้ขัดด้วยกระดาษทรายและอีกข้างใช้ขัดด้วยผงขัดอลูมินา โดยสามารถกำหนด อัตราเร็วของเครื่องได้



รูปที่ 3.5 เครื่องขัดผิวหน้าแบบละเอียด

3.2.6 กล้องจุลทรรศน์และคอมพิวเตอร์

กล้องจุลทรรศน์ใช้ในการถ่ายภาพอนุภาคจากชิ้นงานทดสอบ โดยกล้องต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมอิมเมจโปร (Image Pro) ที่ใช้ในการวัดขนาดของอนุภาคในชิ้นงาน



(a)

(b)

รูปที่ 3.6 อุปกรณ์วิเคราะห์อนุภาค (a) ชุดคอมพิวเตอร์ควบคุม (b) กล้องจุลทรรศน์

3.3 วิธีทำการทดลอง

3.3.1 การทำแบบหล่อทราย

เริ่มจากการนำทราย สารเบนโทไนท์ (Bentonite) เด็กซ์ตริน (dextrin) และน้ำ มาผสมเข้าด้วยกันในเครื่องผสมทรายจากนั้นดำเนินการทำแบบหล่อตั้งขึ้นตอนต่อไปนี้

1. นำกระสวนวางลงบนกระดานทำแบบ โดยวางส่วนที่เป็นผิวด้านหน้าคว่ำลง
2. นำหีบชั้นล่างวางครอบกระสวน โดยจัดให้กระสวนอยู่กึ่งกลางของหีบ
3. ร้อนทรายละเอียดลงในหีบ โดยให้ความสูงของทรายเหนือกระสวนขึ้นมาประมาณ 1 นิ้ว
4. นำทรายที่ไม่ต้องร้อนใส่ให้เกือบเต็มหีบแล้วใช้เหล็กกระทงทรายรอบๆขอบของหีบ
5. หลังจากกระทงอัดทรายแล้วเติมทรายลงในหีบให้ล้น แล้วอัดทรายให้แน่นอีกครั้งหนึ่ง
6. ปาดทรายส่วนที่เกินออกให้ทรายมีระดับสูงเท่ากับความสูงของหีบด้วยเหล็กปาดทราย
7. พลิกหีบกลับแล้วใช้เกรียงหรือช้อนแต่งผิวหน้ารอบๆ กระสวนให้เรียบ แล้วโรยบริเวณผิวหน้าด้วยแป้งฝุ่นเพื่อให้สะดวกในการแยกหีบชั้นบนและชั้นล่าง
8. นำหีบชั้นบนมาวางครอบโดยให้สลักข้างหีบอยู่ในแนวเดียวกัน
9. ปักท่อพีวีซีรูเทโลหะและรูสันตรงมุมใดมุมหนึ่งของหีบ โดยให้ห่างจากกระสวนประมาณ 1 นิ้ว
10. ร้อนทรายละเอียดใส่ลงไปให้สูงประมาณ 1 นิ้ว ใส่ทรายหยาบแล้วดำเนินตามขั้นตอน 4-6
11. เจาะรูระบายอากาศด้วยเหล็กแทงรูโฮ โดยแทงผ่านผิวทรายลงมาให้ตรงกับบริเวณที่กระสวนฝังอยู่
12. ใช้แปรงจุ่มน้ำหารอบๆ เคาะให้หลวมแล้วดึงออก จากนั้นใช้ช้อนควักปากกรูให้มีขนาดโตขึ้น เพื่อสะดวกในการเทน้ำโลหะ
13. แยกหีบชั้นบนไปวางหงายไว้บนกระดานรองอีกแผ่นที่แล้วผิวหน้าให้เรียบตามผิวของโมลด์ด้วยแป้งฝุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. ชั้นล่างตรงรูเทและรูคดเลขใช้ซ้อนแต่งให้เป็นแอ่ง โดกว่าเคิมเล็กน้อยเพื่อทำเป็นแอ่งรูเท แล้วคัดทางไหลของน้ำ โลหะเข้าสู่โมลด์
15. ใช้แปรงน้ำทาบริเวณผิวรอบๆ กระสวน แล้วใช้เหล็กปลายแหลมคอกกลางกระสวนเพื่อคึงกระสวนออกจากทราย
16. ใช้ซ้อนแต่งผิวของ โมลด์ให้เรียบร้อยแล้วทาด้วยแป้งฝุ่น
17. นำหีบชั้นบนมาวางครอบลงไว้ตามเคิม แล้วนำไปวางไว้ในที่ซึ่งได้เตรียมไว้และหาน้ำหนักทับแบบเพื่อรอการเท

3.3.2 การหลอมอลูมิเนียมและเทน้ำโลหะ

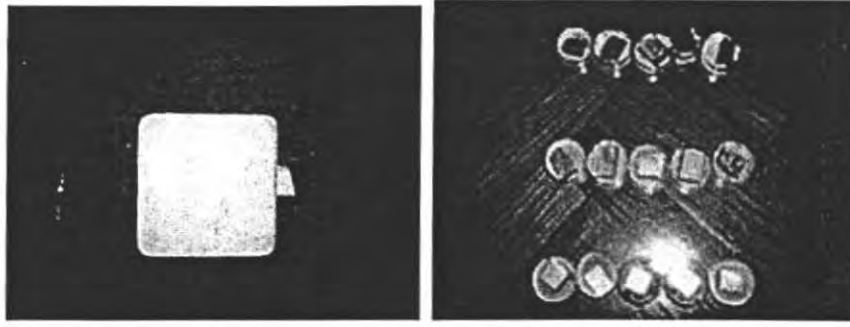
นำอลูมิเนียมที่ต้องการจะหลอมมาทำความสะอาดแล้วนำไปหลอมในเตาหลอมโลหะ โดยในตอนแรกปรับค่ากำลังไฟฟ้า ของเตาหลอมโลหะ ไว้ที่ 5 กิโลวัตต์ เมื่อโลหะหลอมละลายแล้วปรับค่ากำลังไฟฟ้าลดลงมาจนได้ช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ ใช้เทอโมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิและปรับค่ากำลังไฟฟ้าของเตาหลอมโลหะ ในการควบคุมอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาหลอมมีอุณหภูมิที่เราต้องการและคงที่ จากนั้นทำการเทน้ำโลหะลงบนแบบหล่อ จากนั้นร่อนชิ้นงานแข็งตัวและเย็นตัว



รูปที่ 3.7 กระบวนการ (a) การหลอมอลูมิเนียม (b) การเทอลูมิเนียม

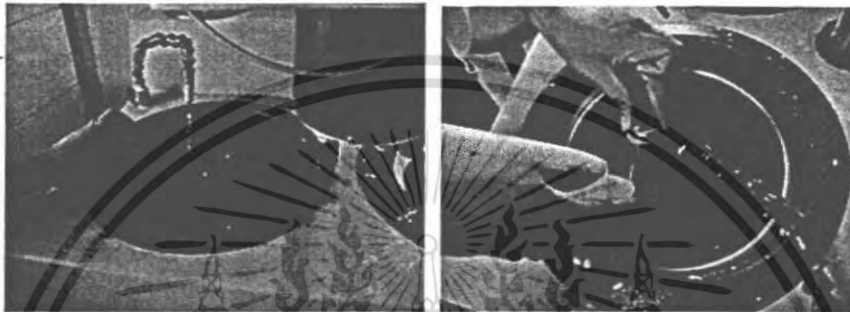
3.3.3 การเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค

นำชิ้นงานหล่อ ไปผ่าและตัดแบ่งด้วยเลื่อยมือเพื่อเป็นชิ้นงานทดสอบให้ได้ขนาดประมาณ $1.0 \times 1.0 \times 1.5$ ซม.³ รูปที่ 3.8 (a) โดยเลือกตรงตำแหน่งที่ $x=7$ ซม. ถึง $x=8$ ซม. และ $y=0$ ซม. $y=3$ ซม. $y=7$ ซม. $y=10$ ซม. และ $y=14$ ซม. โดยตำแหน่งความสูง(z)จากฐาน $z=1$ ถึง $z=2.5$ หลังจากนั้นไปหล่อด้วยเรซิน เมื่อได้ชิ้นงานที่หล่อด้วยเรซิน รูปที่ 3.8 (b) แล้วนำไปขัดกับกระดาษทรายเบอร์ 400 800 1000 และ ผงขัดอลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตรดัง รูปที่ 3.8 (c) และ (d) เครื่องขัดผิวหน้าแบบละเอียดโดยใช้อัตราเร็วของเครื่องขัด 300 รอบ/นาที จนผิวของชิ้นงานเรียบงา



(a)

(b)

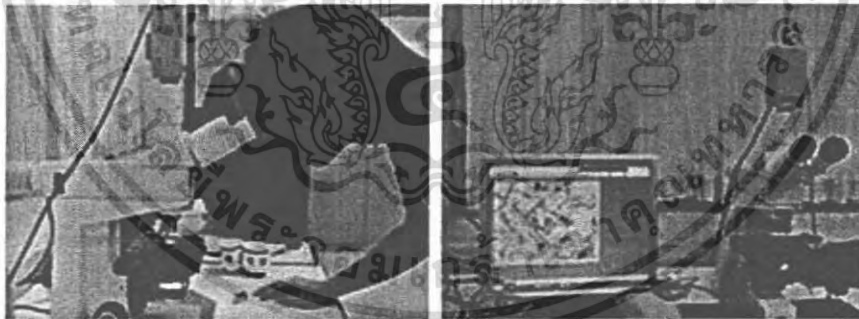


(c)

(d)

รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

3.3.4 นำชิ้นงานไปวิเคราะห์ขนาดอนุภาค



(a)

(b)

รูปที่ 3.9 ชิ้นงานทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์และหาขนาดของอนุภาค

นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ ไปส่องกล้องจุลทรรศน์โดยใช้โปรแกรมอิมเมจ โพร ในการถ่ายภาพ โดยถ่ายภาพ 5 ภาพ ต่อชิ้นงาน 1 ชิ้น และเก็บข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

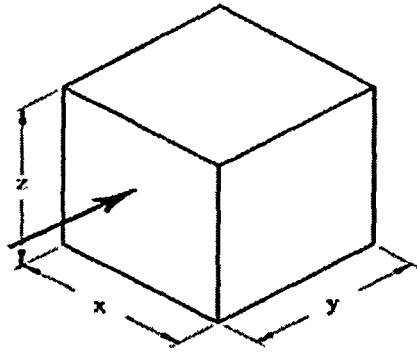
4.1 บทนำ

หลังจากเตรียมชิ้นงานทดสอบให้ได้ตามขนาดที่เราต้องการ จากนั้นนำชิ้นงานไปหล่อเรซิน เมื่อเรซิน แข็งตัวให้นำไปขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 400 800 และ 1000 จากนั้นทำการขัดด้วยผงอลูมินา เพื่อให้เกิดความเรียบและเงาของชิ้นงาน แล้วนำไปกัดด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH) เป็นเวลา 5 วินาที แล้วจึงนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์

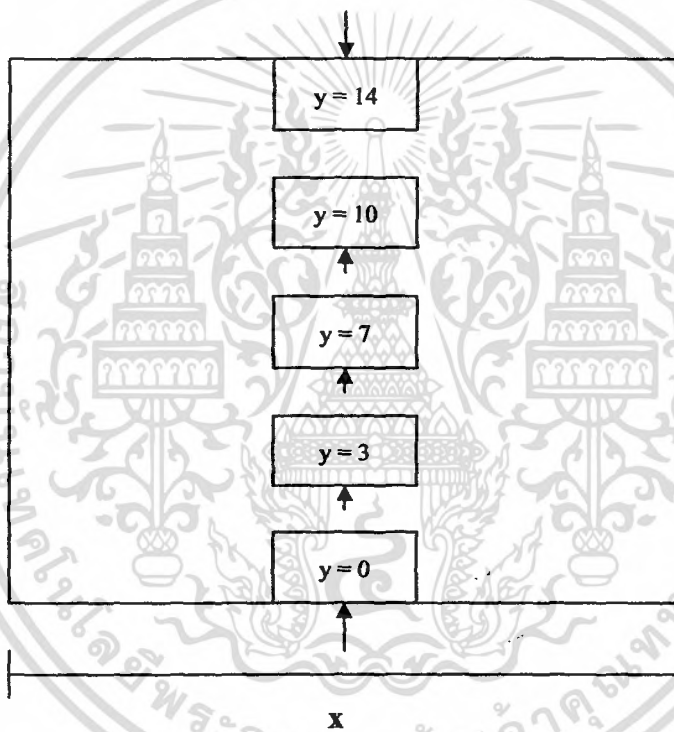


รูปที่ 4.1 ลักษณะ-ของอนุภาคภายในชิ้นงานที่ถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

หลังจากที่ได้นำชิ้นงานทดสอบของทั้ง 3 ขนาด ไปส่องกล้องจุลทรรศน์เพื่อถ่ายภาพชิ้นงานๆละ 5 ภาพ ที่กำลังขยาย 10x และนำมาวัดขนาดพื้นที่ของอนุภาค นำผลมาวิเคราะห์หาแนวโน้มว่า ความสูงมีผลอย่างไรต่อขนาดของอนุภาค โดยอนุภาคที่ถูกวิเคราะห์มี 2 อนุภาค (ดังรูปที่ 4.1) อนุภาคที่ 1 เป็นเฟสของ $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ และอนุภาคที่ 2 เป็นเฟสของ $\delta\text{-Al}_4\text{FeSi}_2$ ผลการวิเคราะห์เฟสที่ปรากฏนี้สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ค



รูปที่ 4.2 หน้าตัดที่นำมาวัดขนาด

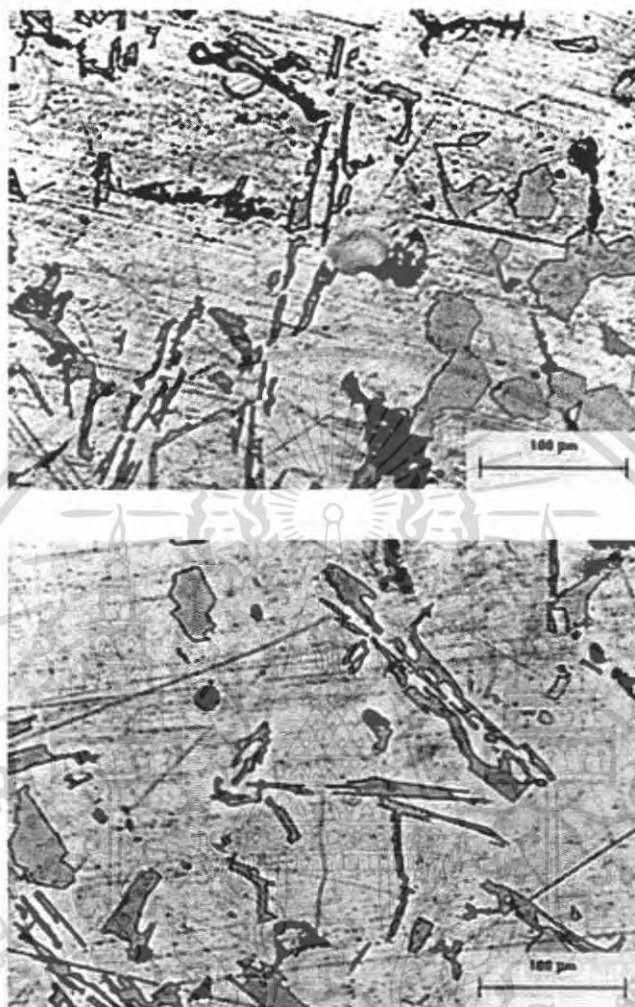


รูปที่ 4.3 หน้าตัดของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ โดยกำหนดตำแหน่ง z จากบนลงมาข้างล่าง 1 เซนติเมตร โดยตัดให้ชิ้นงานมีขนาดความสูง 1.5 เซนติเมตร และกำหนด x ที่ตำแหน่ง $x=7-8$ ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงาน โดยมีหน้าตัด y ที่จะนำมาวัดขนาดทดสอบทั้ง 3 ชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.3 ที่ตำแหน่ง $y=0$ คือตัวอย่างที่ 1, $y=3$ คือตัวอย่างที่ 2, $y=7$ คือตัวอย่างที่ 3, $y=10$ คือตัวอย่างที่ 4 และ $y=14$ คือตัวอย่างที่ 5

4.2 ผลการทดลองชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร

1. ตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร

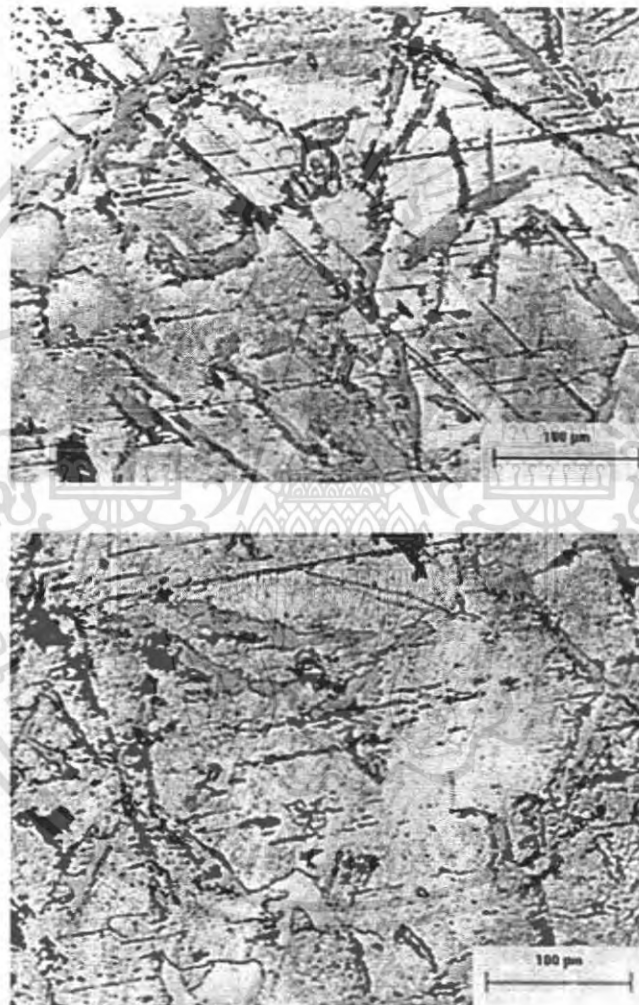
เนื่องจากขนาดของอนุภาคที่ปรากฏมีขนาดไม่แน่นอนทำให้ในบางอนุภาคต้องมีการแบ่งขนาดย่อยออกมาเพื่อวัดขนาดของอนุภาค ทำให้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดไป โดยในการถ่ายภาพเลือกกำลังขยายที่ 10x เพื่อหาขนาดอนุภาคที่สามารถมองเห็น แต่ถ้าเพิ่มกำลังขยายที่มากกว่านี้ จะยากต่อการคำนวณเพราะเนื่องจากบางอนุภาคมีขนาดที่ใหญ่จะครอบคลุมเนื้อที่ในภาพมาก

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคที่บริเวณขอบของชิ้นงานมีขนาดอนุภาคที่เล็ก เนื่องจากบริเวณที่ขอบของชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวที่มาก ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและละเอียด โดยขนาดของพื้นที่ที่จะนำมาวัดจะเป็นบริเวณพื้นที่สี่เหลี่ยม โดยไม่คำนวณส่วนที่เป็นสี่ค่า(รูพรุน) และรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน

ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	192	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	273.13	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชั้น	=	5.34	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	252.84	ต่อตารางมิลลิเมตร

2. ตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ ของชั้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.5 แสดงชั้นงานที่ตำแหน่งระหว่างขอบของชั้นงานกับกึ่งกลางของชั้นงาน ขนาดอนุภาคที่ปรากฏจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดอนุภาคที่บริเวณ $y=0$ เนื่องจากมีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่า ทำให้ขนาดอนุภาคมีขนาดที่ใหญ่กว่า โดยบริเวณนี้มีขนาดอนุภาคที่หยาบกว่าบริเวณที่ขอบของชั้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	170	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	409.03	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชั้น	=	5.64	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	223.87	ต่อตารางมิลลิเมตร

3. ตัวอย่างที่ 3



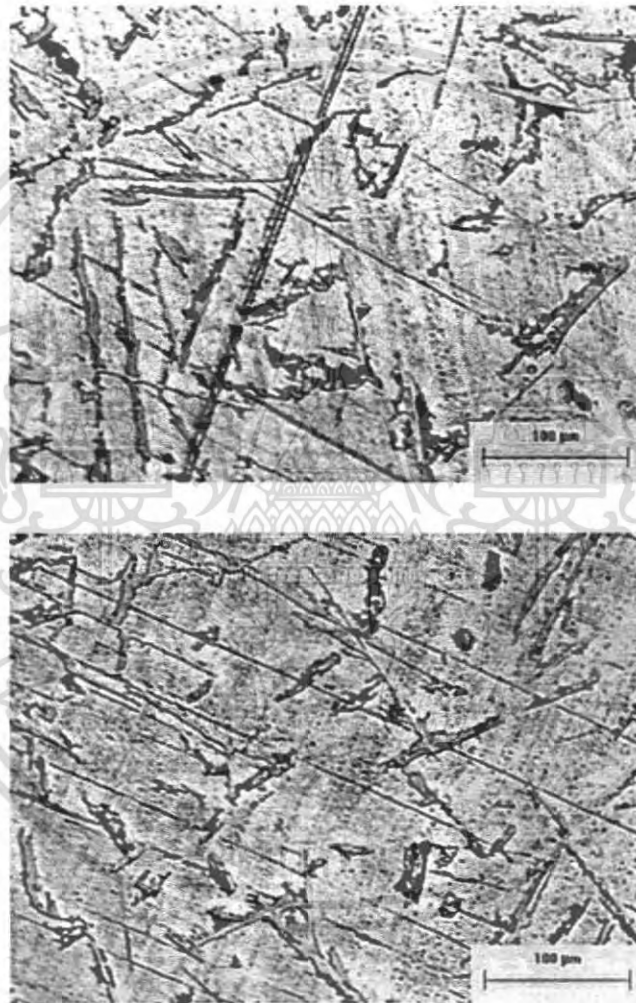
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=7$ ของชั้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.6 แสดงชั้นงานที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชั้นงาน เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีอัตราการเย็นตัวต่ำที่สุดในชั้นงานทำให้ขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าชั้นงานที่ตำแหน่ง $y=0$ และ $y=3$ โดยลักษณะของอนุภาคที่ปรากฏจะมีลักษณะเป็น โครงข่ายเชื่อมต่อกัน

ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	129	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	817.98	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชั้น	=	6.45	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	169.88	ต่อตารางมิลลิเมตร

4. ตัวอย่างที่ 4



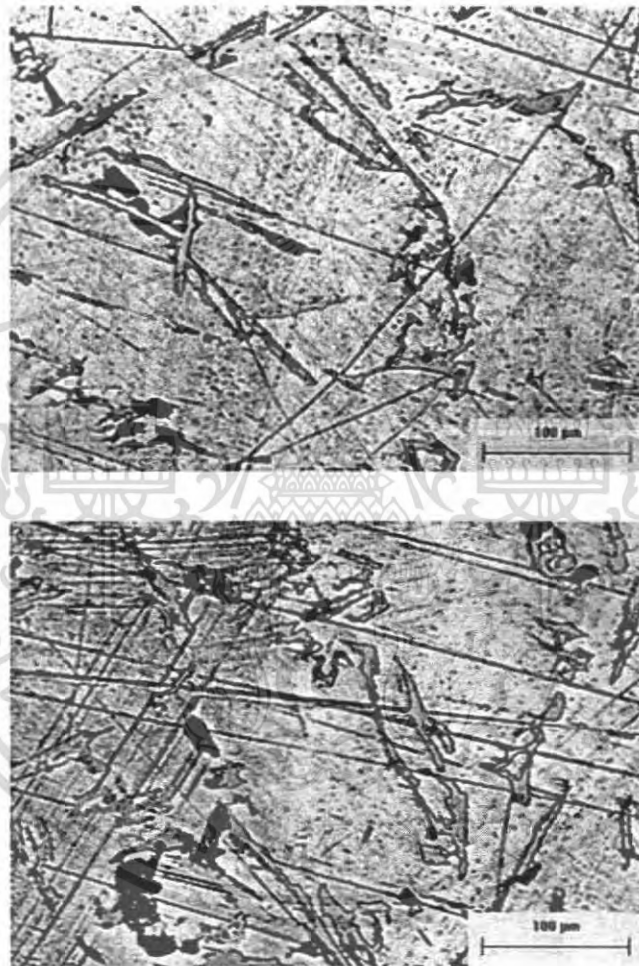
รูปที่ 4.7 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=10$ ของชั้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.7 แสดงชั้นงานที่ตำแหน่งระหว่างขอบของชั้นงานกับกึ่งกลางของชั้นงาน ขนาดอนุภาคที่ปรากฏจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ เล็กน้อยเพราะเมื่อลูมิเนียมไหลเข้าแบบหล่อจะไหลผ่านตำแหน่งที่ $y=0$ ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า โดยบริเวณนี้มีขนาดอนุภาคที่หยาบกว่าบริเวณที่ขอบของชั้นงาน

ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	180	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	469.97	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชั้น	=	5.74	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	237.04	ต่อตารางมิลลิเมตร

5. ตัวอย่างที่ 5



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=14$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคที่บริเวณขอบของชิ้นงานมีขนาดอนุภาคที่เล็ก โดยลักษณะจะคล้ายกับขนาดอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ แต่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า เนื่องจากอุณหภูมิจะไหลผ่านที่ตำแหน่ง $y=0$ แล้วมาถึงตำแหน่ง $y=14$ เป็นตำแหน่งสุดท้ายทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ แต่จะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าตำแหน่ง $y=10$ เนื่องจากบริเวณที่ขอบของชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวที่มากกว่า ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและละเอียดกว่าตำแหน่ง $y=10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	187	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	377.61	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชั้น	=	5.41	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	246.26	ต่อตารางมิลลิเมตร

4.2 ผลการทดลองชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร

1. ตัวอย่างที่ 1



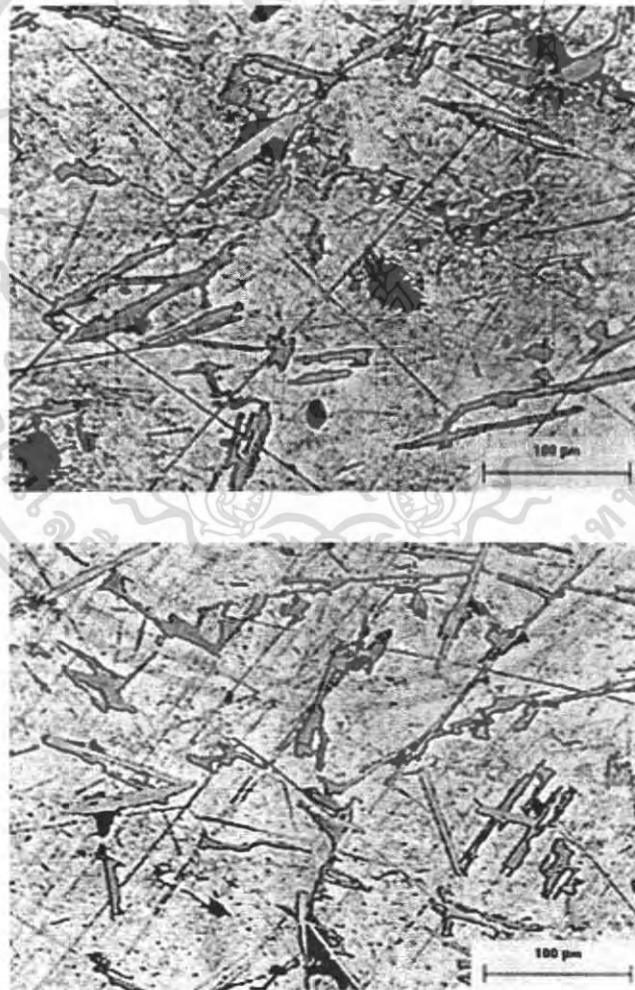
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา แะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคที่บริเวณขอบของชิ้นงานมีขนาดอนุภาคที่เล็ก เนื่องจากบริเวณที่ขอบของชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวมาก ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและละเอียดแต่เนื่องจากชิ้นงานนี้มีความหนา 5 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตร ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดที่ใหญ่กว่าอัตราการเย็นตัวจะช้ากว่าชิ้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	184	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	478.98	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชั้น	=	5.98	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	242.30	ต่อตารางมิลลิเมตร

2. ตัวอย่างที่ 2

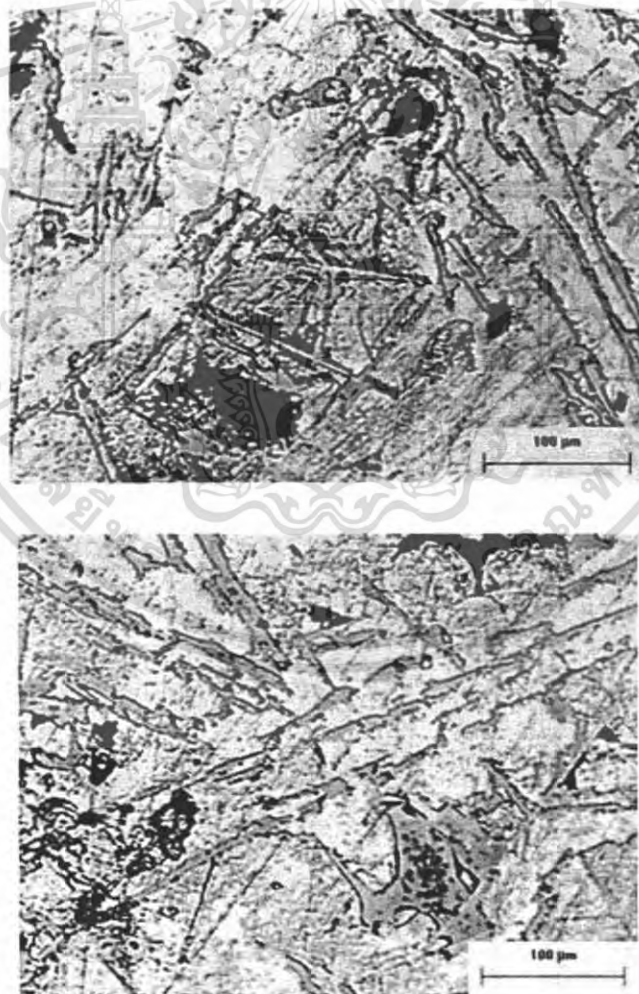


รูปที่ 4.10 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.10 แสดงชั้นงานที่ตำแหน่งระหว่างขอบของชั้นงานกับกึ่งกลางของชั้นงาน ขนาดอนุภาคที่ปรากฏจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดอนุภาคที่บริเวณ $y=0$ เนื่องจากมีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่า ทำให้ขนาดอนุภาคมีขนาดที่ใหญ่กว่า โดยบริเวณนี้มีขนาดอนุภาคที่หยากกว่าบริเวณที่ขอบของชั้นงาน แต่เนื่องจากชั้นงานนี้มีความหนา 5 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าชั้นงานที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตร ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากชั้นงานมีขนาดที่ใหญ่กว่าอัตราการเย็นตัวจะช้ากว่าชั้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	127	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	625.64	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชั้น	=	6.29	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	167.42	ต่อตารางมิลลิเมตร

3. ตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=7$ ของชั้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ31ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 แสดงชั้นงานที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชั้นงาน เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีอัตราการเย็นตัวต่ำที่สุดในชั้นงานทำให้ขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าชั้นงานที่ตำแหน่ง $y=0$ และ $y=3$ โดยลักษณะของอนุภาคที่ปรากฏจะมีลักษณะเป็น โครงข่ายเชื่อมต่อกัน แต่เนื่องจากชั้นงานนี้มีความหนา 5 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าชั้นงานที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตร ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากชั้นงานมีขนาดที่ใหญ่กว่าอัตราการเย็นตัวจะช้ากว่าชั้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า

ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	114	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	846.84	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชั้น	=	6.96	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	150.12	ต่อตารางมิลลิเมตร

4. ตัวอย่างที่ 4



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=10$ ของชั้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร

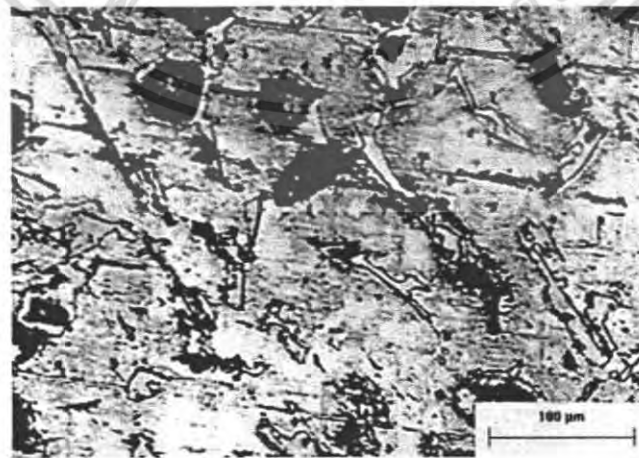
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 แสดงชั้นงานที่ตำแหน่งระหว่างขอบของชั้นงานกับกึ่งกลางของชั้นงาน ขนาดอนุภาคที่ปรากฏจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ เล็กน้อยเพราะเมื่ออุณหภูมิไหลเข้าแบบหล่อจะไหลผ่านตำแหน่งที่ $y=0$ ทำให้อนุภาคเกิดขึ้นมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า โดยบริเวณนี้มีขนาดอนุภาคที่หยาบกว่าบริเวณที่ขอบของชั้นงาน แต่เนื่องจากชั้นงานนี้มีความหนา 5 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าชั้นงานที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตร ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากชั้นงานมีขนาดที่ใหญ่อัตราการเย็นตัวจะช้ากว่าชั้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า

ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	121	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	657.60	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชั้น	=	6.40	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	159.34	ต่อตารางมิลลิเมตร

5. ตัวอย่างที่ 5



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=14$ ของชั้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

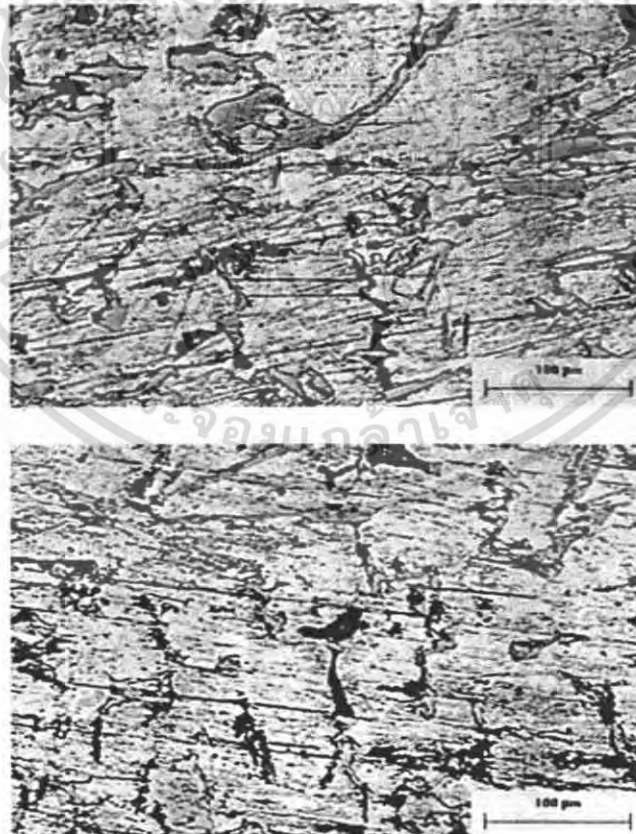
จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคที่บริเวณขอบของชิ้นงานมีขนาดอนุภาคที่เล็ก โดยลักษณะจะคล้ายกับขนาดอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ แต่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า เนื่องจากอุณหภูมิจะไหลผ่านที่ตำแหน่ง $y=0$ แล้วมาถึงตำแหน่ง $y=13-14$ เป็นตำแหน่งสุดท้ายทำให้อนุภาคที่เกิดมีขนาดใหญ่ แต่จะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าตำแหน่ง $y=10$ เนื่องจากบริเวณที่ขอบของชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวที่มากกว่า ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและละเอียดกว่าตำแหน่ง $y=10$ แต่เนื่องจากชิ้นงานนี้มีความหนา 5 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตร ทำให้อนุภาคที่เกิดมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดที่ใหญ่อัตราการเย็นตัวจะช้ากว่าชิ้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า

ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	170	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	520.91	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชั้น	=	5.84	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	223.87	ต่อตารางมิลลิเมตร

4.3 ผลการทดลองชิ้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร

1. ตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคที่บริเวณขอบของชิ้นงานมีขนาดอนุภาคที่เล็ก เนื่องจากบริเวณที่ขอบของชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวที่มาก ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและละเอียด แต่เนื่องจากชิ้นงานนี้มีความหนา 8 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตรและ 5 เซนติเมตร ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดที่ใหญ่กว่าอัตราการเย็นตัวจะช้ากว่าชิ้นงานที่ความหนาน้อยกว่า ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	179	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	502.74	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชิ้น	=	6.86	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	235.72	ต่อตารางมิลลิเมตร

2. ตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.15 แสดงชั้นงานที่ตำแหน่งระหว่างขอบของชั้นงานกับกึ่งกลางของชั้นงาน ขนาดอนุภาคที่ปรากฏจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดอนุภาคที่บริเวณ $y=0$ เนื่องจากมีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่า ทำให้ขนาดอนุภาคมีขนาดที่ใหญ่กว่า โดยบริเวณนี้มีขนาดอนุภาคที่หยาบกว่าบริเวณที่ขอบของชั้นงาน แต่เนื่องจากชั้นงานนี้มีความหนา 8 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าชั้นงานที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร ทำให้อนุภาคที่เกิดมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากชั้นงานมีขนาดที่ใหญ่กว่าอัตราการเย็นตัวจะช้ากว่าชั้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	120	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	686.47	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชั้น	=	7.44	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	158.02	ต่อตารางมิลลิเมตร

3. ตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=7$ ของชั้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 แสดงชิ้นงานที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงาน เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีอัตราการเย็นตัวต่ำที่สุดในชิ้นงานทำให้ขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าชิ้นงานที่ตำแหน่ง $y=0$ และ $y=3$ โดยลักษณะของอนุภาคที่ปรากฏจะมีลักษณะเป็น โครงข่ายเชื่อมต่อกัน แต่เนื่องจากชิ้นงานนี้มีความหนา 8 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตรและ 5 เซนติเมตร ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดที่ใหญ่กว่าอัตราการเย็นตัวจะช้ากว่าชิ้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า

ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	107	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	1027.68	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชั้น	=	7.95	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	140.91	ต่อตารางมิลลิเมตร

4. ตัวอย่างที่ 4



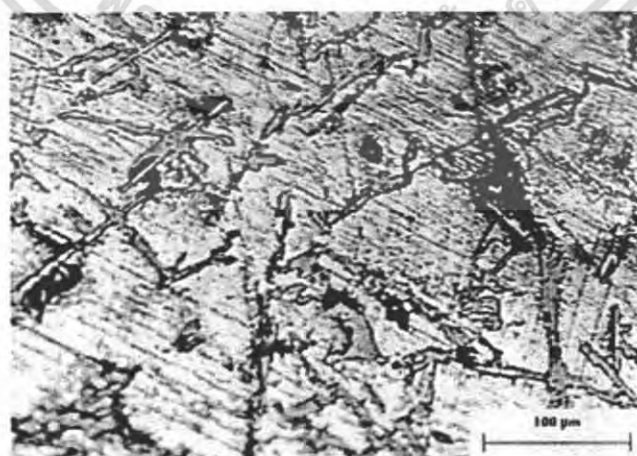
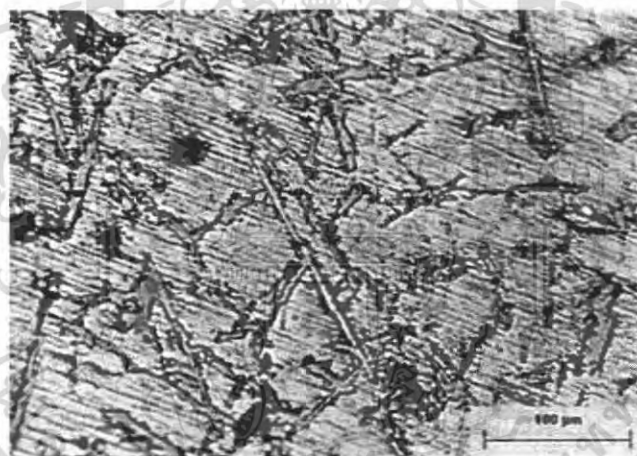
รูปที่ 4.17 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=10$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.17 แสดงชิ้นงานที่ตำแหน่งระหว่างขอบของชิ้นงานกับกึ่งกลางของชิ้นงาน ขนาดอนุภาคที่ปรากฏจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ เล็กน้อยเพราะเมื่ออุณหภูมิไหลเข้าแบบหล่อจะไหลผ่านตำแหน่งที่ $y=0$ ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า โดยบริเวณนี้มีขนาดอนุภาคที่หยากกว่าบริเวณที่ขอบของชิ้นงาน แต่เนื่องจากชิ้นงานนี้มีความหนา 8 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดที่ใหญ่อัตราการเย็นตัวจะช้ากว่าชิ้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า

ผลการทดลองมีดังนี้

1. จำนวนอนุภาค	=	114	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	780.79	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชิ้น	=	7.64	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	150.12	ต่อตารางมิลลิเมตร

5. ตัวอย่างที่ 5



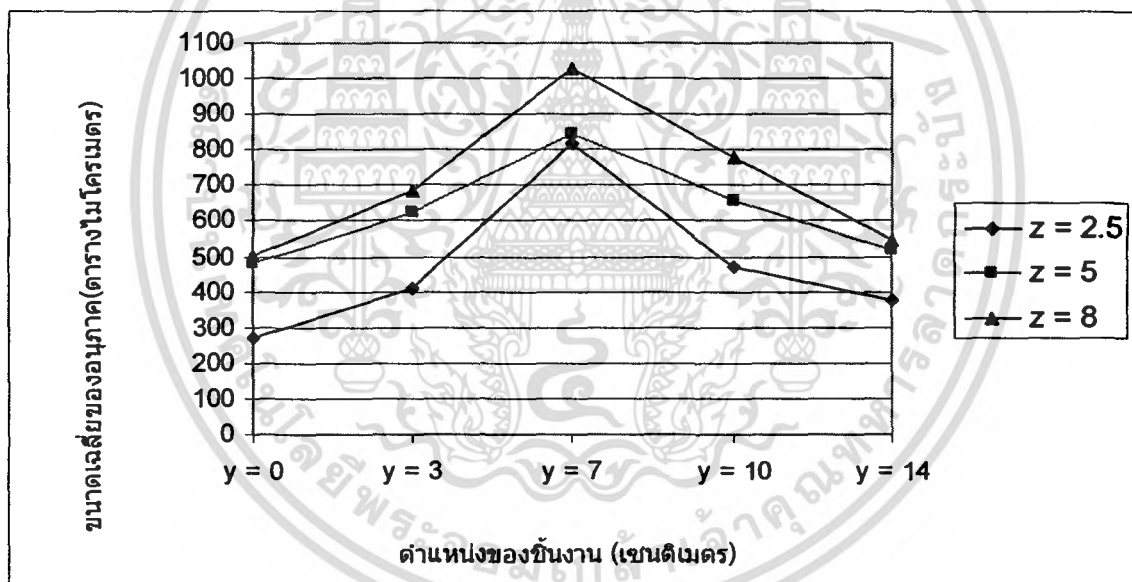
รูปที่ 4.18 ตัวอย่างภาพถ่ายของอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=14$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และส่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคที่บริเวณขอบของชิ้นงานมีขนาดอนุภาคที่เล็ก โดยลักษณะจะคล้ายกับขนาดอนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ แต่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า เนื่องจากอุณหภูมิจะไหลผ่านที่ตำแหน่ง $y=0$ แล้วมาถึงตำแหน่ง $y=13$ เป็นตำแหน่งสุดท้ายทำให้อนุภาคที่เกิดมีขนาดที่ใหญ่ แต่จะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าตำแหน่ง $y=10$ เนื่องจากบริเวณที่ขอบของชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวที่มากกว่า ทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและละเอียดกว่าตำแหน่ง $y=10$ แต่เนื่องจากชิ้นงานนี้มีความหนา 8 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร ทำให้อนุภาคที่เกิดมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดที่ใหญ่อัตราการเย็นตัวจะช้ากว่าชิ้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า

ผลการทดลองมีดังนี้

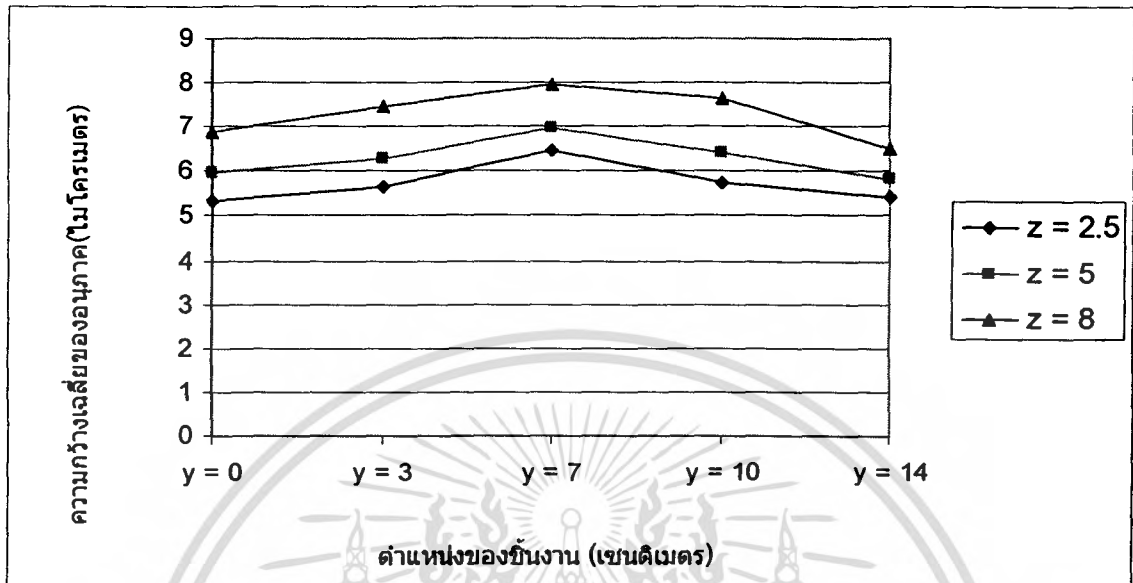
1. จำนวนอนุภาค	=	165	
2. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค	=	547.49	ตารางไมโครเมตร
3. พื้นที่ทั้งหมด	=	759375	ตารางไมโครเมตร
4. ความกว้างเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชั้น	=	6.59	ไมโครเมตร
5. ความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่	=	217.28	ต่อตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับตำแหน่งของชิ้นงาน

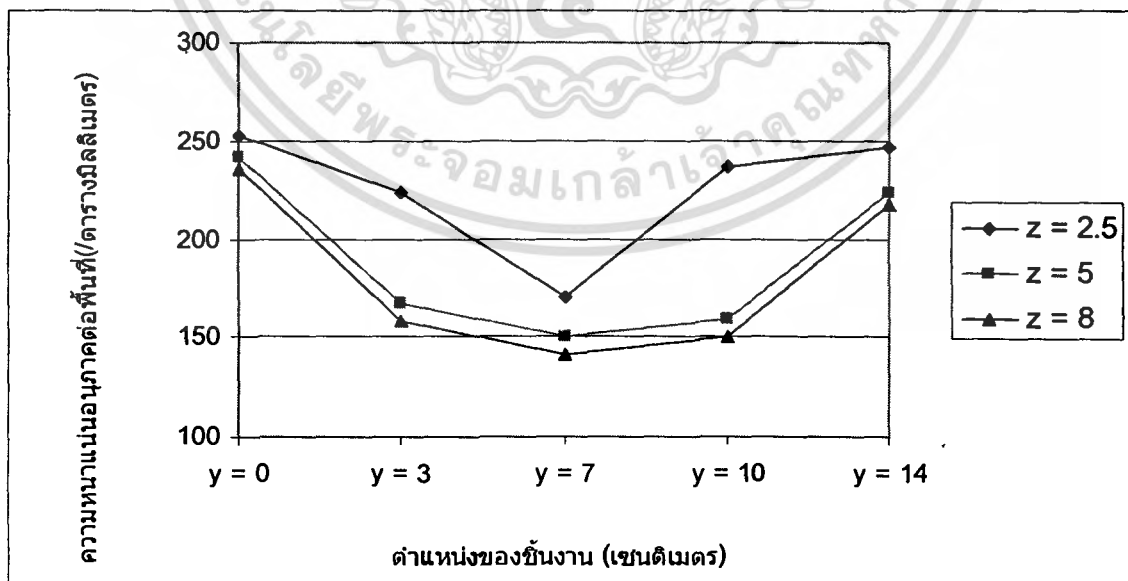
จากกราฟที่แสดงดังรูปที่ 4.19 สามารถสรุปได้ว่าชิ้นงานที่ตำแหน่ง $y=0$ และ $y=14$ จะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าตำแหน่งอื่น เนื่องจากที่ตำแหน่ง $y=0$ และ $y=14$ มีอัตราการเย็นตัวที่มากกว่าตำแหน่งอื่นทำให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและจากการที่อนุภาคมีขนาดเล็กส่งผลอนุภาคมีความละเอียดและมีความเหนียวและทนทานมากกว่าอนุภาคที่ตำแหน่งอื่น ที่ตำแหน่ง $y=7$ ซึ่งเป็นตำแหน่ง กึ่งกลางของชิ้นงานนั้น มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่มากกว่าอนุภาคที่ตำแหน่งอื่น เนื่องจากที่ตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงานจะมีความร้อนสะสมอยู่มากทำให้อัตราการเย็นตัวมีน้อย ส่งผลให้อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าตำแหน่งอื่น โคนอนุภาคที่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นทำให้ผิวของชิ้นงานบริเวณนั้นมีความหยาบกว่าผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งขอบของชิ้นงาน แต่เนื่องจากชิ้นงานนี้มีความหนา 8 เซนติเมตร ซึ่ง

มากกว่าชั้นงานที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตรและ 5 เซนติเมตร ทำให้อนุภาคที่เกิดมีขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคที่ตำแหน่งเดียวกัน เนื่องจากชั้นงานมีขนาดที่ใหญ่อยู่ตราการเย็นตัวจะช้ากว่าชั้นงานที่ความหนาน้อยกว่า



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของชั้นงานกับตำแหน่งของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าความยาวรอบรูปของอนุภาค ณ ตำแหน่งเดียวกันแต่ชิ้นงานที่มีความสูงมากกว่าจะมีความยาวมากกว่าชิ้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า ซึ่งเกิดจากชิ้นงานที่มีความสูงน้อยกว่ามีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานที่มีขนาดสูงมากกว่า เพราะชิ้นงานที่มีความสูงมากภายในชิ้นงานยังคงมีการสะสมความร้อนภายในทำให้อัตราการเย็นตัวด้านขนาดอนุภาคจึงมีขนาดที่ใหญ่



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคต่อพื้นที่กับตำแหน่งของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่แสดงดังรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นถึงจำนวนอนุภาคที่ก่อตัวขึ้นที่พื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นที่บริเวณผิวของชิ้นงาน จะมีจำนวนอนุภาคที่มากกว่าตำแหน่งที่กึ่งกลางของชิ้นงาน เนื่องจากอนุภาคที่บริเวณผิวเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กจำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นจึงมีมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ ตรงกันข้ามกับบริเวณกึ่งกลางชิ้นงานที่อนุภาคจะมีขนาดใหญ่ทำให้อนุภาคกินเนื้อที่บริเวณที่ทำการวิเคราะห์มากทำให้อนุภาคที่ปรากฏมีจำนวนน้อยกว่า

4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อนำผลการทดลองมาทำกราฟเพื่อเปรียบเทียบ ขนาดของพื้นที่ชิ้นงาน ในตำแหน่งที่บริเวณขอบของชิ้นงาน จะพบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 2.5 เซนติเมตร มีพื้นที่อนุภาคเฉลี่ยที่น้อยกว่า ชิ้นงานที่มีความหนา 5 และ 8 เซนติเมตร เนื่องจากผิวของชิ้นงานที่มีความหนาน้อยจะมีอัตราการเย็นตัว (Cooling rate) ที่สูงกว่าชิ้นงานที่มีความหนามากกว่า เมื่อชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวที่สูงจะส่งผลให้อนุภาคมีขนาดเล็ก เหนียวและมีความแข็งแรงมาก

ในตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงาน จะพบว่าชิ้นงานจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าบริเวณด้านผิวนอก เนื่องจากภายในชิ้นงานยังคงการสะสมความร้อน โดยด้านในชิ้นงานมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำ ขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่และหยาบกว่าที่บริเวณผิวนอก

4.5 สรุปผลการทดลอง

1. บริเวณชิ้นงานภายนอกมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าชิ้นงานด้านในเนื่องจากมีอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่า
2. ความสูงของชิ้นงานมีผลต่อขนาดของอนุภาคชิ้นงานที่มีความสูงน้อยจะมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าชิ้นงานที่มีความสูงมาก

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความสูงชั้นงานหล่อที่มีต่อขนาดอนุภาคของอูมิเนียมในชิ้นงานที่มีความสูงต่างกัน ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่า ชิ้นงานที่มีความหนาน้อยกว่าจะขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าชิ้นงานที่มีความหนามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ตำแหน่งเดียวกันเนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อน (cooling rate) ที่มีมากกว่าเนื่องจากบริเวณที่ผิวของชิ้นงานมีการถ่ายเทความร้อนให้กับทรายชิ้นงานจึงมีขนาดอนุภาคที่ละเอียด ส่วนในบริเวณที่กึ่งกลางของชิ้นงานอัตราการถ่ายเทความร้อนจะต่ำ เนื่องจากความร้อนไม่สามารถถ่ายเทให้กับผิวทรายได้ทำให้เกิดการสะสมความร้อนภายใน ขนาดอนุภาคที่ปรากฏจึงมีขนาดใหญ่

5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการดำเนินงาน

1. การวัดขนาดของอนุภาคอาจเกิดความคลาดเคลื่อน ได้เนื่องจากว่าลักษณะของอนุภาคมีลักษณะที่ไม่แน่นอน และมีรูปร่างซับซ้อน อาจทำให้เกิดการผิดพลาดในวัด อนุภาคที่เกิดอาจทับซ้อนกับรอยขีดซึ่งอาจจะมาจากการขีดที่ไม่เรียบ ทำให้ขนาดอนุภาคที่วัด ได้มีขนาด ^{ใหญ่} ^{เล็ก} มากกว่าหรือน้อยกว่าความเป็นจริง
2. การควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะอูมิเนียมทำได้ยาก เนื่องจากเตาหลอมที่ใช้เป็นแบบเปิด จึงมีการถ่ายเทอุณหภูมิเนื่องจากปัจจัยภายนอกเช่น ความชื้นในอากาศ อุณหภูมิภายนอกเตา ที่ไม่สามารถควบคุมได้ และการเทน้ำโลหะจากเข้าหลอมนั้นต้องเทผ่านเข้าเทก่อนถึงจะนำไปเทลงในแบบหล่อ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนทำให้อุณหภูมิเตาตกลงไป

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

1. นำเตาหลอมระบบสูญญากาศมาใช้ และทำการเทน้ำโลหะจากเข้าหลอมลงในแบบหล่อ
2. เครื่องวัดผิวหน้าแบบละเอียด ควรจะมีแขนกลจับชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานมีความเรียบสม่ำเสมอ



ภาคผนวก ก

ตารางค่าพื้นที่ของอนุภาคของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.1 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 2.5 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง $y = 0$

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	717	2	49	107	3	97	110	4	145	573
1	2	292	2	50	43	3	98	76	4	146	113
1	3	230	2	51	25	3	99	347	4	147	548
1	4	284	2	52	34	3	100	42	4	148	293
1	5	1018	2	53	164	3	101	84	4	149	264
1	6	56	2	54	356	3	102	145	4	150	192
1	7	66	2	55	311	3	103	39	4	151	53
1	8	564	2	56	373	3	104	74	4	152	216
1	9	111	2	57	84	3	105	84	4	153	425
1	10	746	2	58	109	3	106	76	4	154	541
1	11	184	2	59	51	3	107	21	4	155	62
1	12	67	2	60	68	3	108	48	4	156	67
1	13	164	2	61	47	3	109	96	5	157	1587
1	14	99	2	62	125	3	110	186	5	158	159
1	15	76	2	63	45	3	111	16	5	159	305
1	16	210	2	64	68	4	112	344	5	160	69
1	17	152	3	65	974	4	113	378	5	161	58
1	18	101	3	66	509	4	114	539	5	162	846
1	19	350	3	67	502	4	115	855	5	163	285
1	20	398	3	68	389	4	116	328	5	164	46
1	21	278	3	69	141	4	117	401	5	165	83
1	22	1964	3	70	356	4	118	250	5	166	65
1	23	289	3	71	68	4	119	135	5	167	30
1	24	379	3	72	88	4	120	441	5	168	32
1	25	149	3	73	77	4	121	872	5	169	409
1	26	150	3	74	125	4	122	497	5	170	70
1	27	124	3	75	141	4	123	324	5	171	153
1	28	74	3	76	417	4	124	444	5	172	77
1	29	42	3	77	546	4	125	1060	5	173	139
1	30	46	3	78	200	4	126	230	5	174	47
1	31	112	3	79	123	4	127	687	5	175	41
1	32	208	3	80	341	4	128	507	5	176	81
1	33	121	3	81	138	4	129	204	5	177	41
1	34	92	3	82	109	4	130	1256	5	178	56
2	35	531	3	83	131	4	131	210	5	179	112
2	36	486	3	84	132	4	132	142	5	180	188
2	37	278	3	85	154	4	133	68	5	181	148
2	38	269	3	86	123	4	134	360	5	182	77
2	39	1005	3	87	67	4	135	155	5	183	513
2	40	265	3	88	165	4	136	1183	5	184	814
2	41	252	3	89	102	4	137	1891	5	185	83
2	42	201	3	90	152	4	138	248	5	186	123
2	43	286	3	91	75	4	139	194	5	187	95
2	44	273	3	92	139	4	140	387	5	188	70
2	45	801	3	93	198	4	141	551	5	189	323
2	46	395	3	94	344	4	142	303	5	190	67
2	47	49	3	95	1081	4	143	277	5	191	126
2	48	460	3	96	40	4	144	259	5	192	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ผก.1 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.2 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 2.5 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง y = 3

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	667	2	49	504	3	97	63	4	145	1090
1	2	615	2	50	136	3	98	99	5	146	2952
1	3	267	2	51	911	3	99	101	5	147	86
1	4	960	2	52	231	3	100	52	5	148	179
1	5	165	2	53	579	3	101	43	5	149	196
1	6	118	2	54	974	3	102	192	5	150	393
1	7	357	2	55	151	3	103	357	5	151	160
1	8	55	2	56	627	3	104	141	5	152	439
1	9	138	2	57	2272	3	105	215	5	153	119
1	10	340	2	58	1143	3	106	112	5	154	124
1	11	105	2	59	95	3	107	195	5	155	1780
1	12	231	2	60	248	3	108	212	5	156	572
1	13	112	2	61	207	3	109	421	5	157	1129
1	14	69	2	62	101	3	110	391	5	158	290
1	15	339	2	63	239	3	111	1817	5	159	488
1	16	120	2	64	127	3	112	278	5	160	50
1	17	215	2	65	1026	3	113	1786	5	161	113
1	18	80	2	66	294	3	114	74	5	162	310
1	19	242	2	67	278	3	115	121	5	163	282
1	20	44	2	68	116	3	116	27	5	164	96
1	21	75	2	69	111	3	117	215	5	165	61
1	22	276	2	70	166	3	118	220	5	166	149
1	23	133	2	71	48	3	119	29	5	167	60
1	24	133	2	72	152	4	120	636	5	168	186
1	25	146	2	73	151	4	121	446	5	169	62
1	26	37	2	74	263	4	122	1041	5	170	47
1	27	78	2	75	76	4	123	4512			
1	28	384	2	76	149	4	124	339			
1	29	63	3	77	31	4	125	2080			
1	30	26	3	78	517	4	126	210			
1	31	23	3	79	193	4	127	83			
1	32	110	3	80	299	4	128	469			
1	33	70	3	81	82	4	129	1662			
1	34	168	3	82	97	4	130	378			
1	35	85	3	83	266	4	131	491			
1	36	54	3	84	53	4	132	307			
1	37	67	3	85	76	4	133	556			
1	38	72	3	86	257	4	134	387			
1	39	89	3	87	130	4	135	530			
1	40	235	3	88	90	4	136	230			
1	41	88	3	89	92	4	137	244			
1	42	88	3	90	35	4	138	307			
1	43	51	3	91	39	4	139	616			
1	44	39	3	92	181	4	140	55			
1	45	92	3	93	106	4	141	135			
2	46	4668	3	94	95	4	142	62			
2	47	688	3	95	586	4	143	168			
2	48	213	3	96	138	4	144	251			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.3 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 2.5 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง y = 7

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	599	3	49	5198	4	97	459
1	2	473	3	50	2229	4	98	46
1	3	711	3	51	456	4	99	52
1	4	116	3	52	313	5	100	651
1	5	836	3	53	252	5	101	679
1	6	410	3	54	576	5	102	651
1	7	786	3	55	116	5	103	248
1	8	120	3	56	218	5	104	219
1	9	203	3	57	509	5	105	523
1	10	187	3	58	439	5	106	236
1	11	340	3	59	494	5	107	1099
1	12	383	3	60	335	5	108	268
1	13	141	3	61	938	5	109	249
1	14	341	3	62	158	5	110	162
1	15	5439	3	63	619	5	111	557
1	16	885	3	64	336	5	112	159
1	17	579	3	65	919	5	113	861
1	18	212	3	66	165	5	114	361
1	19	216	3	67	119	5	115	823
1	20	582	3	68	391	5	116	597
1	21	347	3	69	211	5	117	1084
1	22	214	3	70	236	5	118	361
1	23	314	3	71	96	5	119	1322
1	24	3303	4	72	8322	5	120	615
1	25	98	4	73	727	5	121	839
1	26	98	4	74	789	5	122	163
2	27	996	4	75	1325	5	123	626
2	28	1119	4	76	875	5	124	516
2	29	447	4	77	616	5	125	91
2	30	310	4	78	219	5	126	243
2	31	1187	4	79	866	5	127	1332
2	32	503	4	80	1050	5	128	253
2	33	473	4	81	3342	5	129	57
2	34	121	4	82	531			
2	35	388	4	83	253			
2	36	945	4	84	410			
2	37	368	4	85	1029			
2	38	1312	4	86	424			
2	39	711	4	87	450			
2	40	265	4	88	155			
2	41	7533	4	89	351			
2	42	2939	4	90	166			
2	43	1714	4	91	408			
2	44	990	4	92	425			
2	45	3424	4	93	362			
2	46	1727	4	94	405			
2	47	473	4	95	478			
2	48	615	4	96	865			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.4 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 2.5 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง $y = 10$

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	1891	2	49	102	3	97	81	4	145	119
1	2	371	2	50	312	3	98	434	4	146	199
1	3	299	2	51	260	3	99	310	5	147	458
1	4	257	2	52	59	3	100	74	5	148	158
1	5	357	2	53	502	3	101	187	5	149	80
1	6	418	2	54	466	3	102	296	5	150	102
1	7	102	2	55	310	3	103	252	5	151	409
1	8	304	2	56	549	3	104	218	5	152	306
1	9	606	2	57	113	3	105	350	5	153	377
1	10	142	2	58	88	3	106	104	5	154	247
1	11	78	2	59	137	4	107	314	5	155	2000
1	12	555	2	60	178	4	108	1203	5	156	341
1	13	595	2	61	188	4	109	273	5	157	956
1	14	303	2	62	271	4	110	102	5	158	1002
1	15	879	2	63	177	4	111	261	5	159	391
1	16	207	2	64	705	4	112	484	5	160	642
1	17	152	2	65	888	4	113	284	5	161	673
1	18	272	2	66	821	4	114	523	5	162	4095
1	19	352	2	67	1702	4	115	206	5	163	569
1	20	508	2	68	747	4	116	99	5	164	272
1	21	490	2	69	434	4	117	180	5	165	321
1	22	160	2	70	257	4	118	190	5	166	401
1	23	84	2	71	46	4	119	146	5	167	123
1	24	284	2	72	193	4	120	533	5	168	222
1	25	1443	2	73	80	4	121	1849	5	169	307
1	26	468	2	74	44	4	122	565	5	170	505
1	27	617	3	75	636	4	123	158	5	171	328
1	28	111	3	76	245	4	124	285	5	172	547
1	29	446	3	77	355	4	125	613	5	173	257
1	30	303	3	78	117	4	126	3610	5	174	1061
1	31	374	3	79	839	4	127	402	5	175	337
1	32	462	3	80	489	4	128	155	5	176	245
1	33	130	3	81	284	4	129	218	5	177	1728
1	34	679	3	82	898	4	130	192	5	178	563
1	35	126	3	83	251	4	131	1063	5	179	245
1	36	143	3	84	462	4	132	172	5	180	56
1	37	756	3	85	257	4	133	82			
1	38	276	3	86	768	4	134	66			
2	39	5908	3	87	126	4	135	93			
2	40	497	3	88	263	4	136	54			
2	41	1645	3	89	427	4	137	331			
2	42	566	3	90	527	4	138	379			
2	43	103	3	91	336	4	139	478			
2	44	157	3	92	852	4	140	404			
2	45	213	3	93	453	4	141	143			
2	46	374	3	94	115	4	142	226			
2	47	112	3	95	246	4	143	1022			
2	48	46	3	96	238	4	144	117			

ผก 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.5 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 2.5 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง y = 14

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	1268	2	49	479	3	97	666	4	145	247
1	2	1410	2	50	110	3	98	194	4	146	53
1	3	693	2	51	368	3	99	1726	4	147	87
1	4	2868	2	52	101	3	100	508	4	148	69
1	5	412	2	53	225	3	101	544	4	149	167
1	6	319	2	54	494	3	102	231	4	150	346
1	7	111	2	55	131	3	103	176	4	151	96
1	8	263	2	56	145	3	104	193	4	152	611
1	9	256	2	57	309	3	105	765	4	153	301
1	10	213	2	58	267	3	106	119	4	154	126
1	11	463	2	59	129	3	107	103	4	155	2034
1	12	187	2	60	209	3	108	400	4	156	28
1	13	59	2	61	50	3	109	226	4	157	35
1	14	562	2	62	116	3	110	758	4	158	154
1	15	268	2	63	96	3	111	248	5	159	1837
1	16	247	2	64	373	3	112	375	5	160	545
1	17	93	2	65	152	3	113	175	5	161	676
1	18	457	2	66	107	3	114	698	5	162	442
1	19	76	2	67	1173	3	115	1143	5	163	116
1	20	94	2	68	64	3	116	249	5	164	242
1	21	297	2	69	71	3	117	2012	5	165	211
1	22	632	2	70	520	3	118	269	5	166	164
1	23	961	2	71	2157	3	119	265	5	167	413
1	24	353	2	72	107	3	120	670	5	168	765
1	25	491	2	73	509	3	121	954	5	169	202
1	26	215	2	74	549	3	122	1018	5	170	544
1	27	777	2	75	53	3	123	136	5	171	185
1	28	680	2	76	314	4	124	446	5	172	541
1	29	263	2	77	204	4	125	639	5	173	453
1	30	346	2	78	469	4	126	206	5	174	47
1	31	128	2	79	103	4	127	163	5	175	61
1	32	191	2	80	175	4	128	107	5	176	84
1	33	395	2	81	114	4	129	321	5	177	652
1	34	252	2	82	69	4	130	352	5	178	508
1	35	68	2	83	157	4	131	223	5	179	132
1	36	258	2	84	66	4	132	425	5	180	62
1	37	47	2	85	59	4	133	97	5	181	1377
1	38	75	2	86	168	4	134	91	5	182	387
2	39	1063	2	87	616	4	135	53	5	183	249
2	40	150	3	88	622	4	136	79	5	184	489
2	41	289	3	89	600	4	137	124	5	185	47
2	42	87	3	90	180	4	138	387	5	186	63
2	43	92	3	91	136	4	139	223	5	187	16
2	44	385	3	92	483	4	140	201			
2	45	689	3	93	234	4	141	446			
2	46	84	3	94	196	4	142	257			
2	47	365	3	95	287	4	143	197			
2	48	770	3	96	213	4	144	182			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อฝึกศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.6 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 5 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง $y = 0$

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	1012	2	49	274	3	97	97	4	145	257
1	2	200	2	50	427	3	98	87	4	146	136
1	3	524	2	51	1223	3	99	90	4	147	623
1	4	362	2	52	249	3	100	53	4	148	266
1	5	344	2	53	1052	3	101	173	4	149	282
1	6	310	2	54	305	3	102	47	4	150	39
1	7	651	2	55	242	3	103	26	4	151	28
1	8	488	2	56	75	3	104	56	4	152	70
1	9	1841	2	57	133	3	105	46	4	153	65
1	10	105	2	58	206	3	106	194	5	154	850
1	11	228	2	59	344	3	107	160	5	155	300
1	12	309	2	60	387	3	108	585	5	156	271
1	13	196	2	61	28	3	109	31	5	157	1659
1	14	111	2	62	235	3	110	69	5	158	910
1	15	279	2	63	266	3	111	36	5	159	302
1	16	148	2	64	651	3	112	28	5	160	231
1	17	355	3	65	107	4	113	157	5	161	89
1	18	172	3	66	70	4	114	1023	5	162	1402
1	19	75	3	67	76	4	115	261	5	163	168
1	20	94	3	68	87	4	116	151	5	164	38
1	21	635	3	69	82	4	117	173	5	165	328
1	22	163	3	70	200	4	118	252	5	166	685
1	23	2534	3	71	42	4	119	144	5	167	754
1	24	121	3	72	153	4	120	290	5	168	1193
1	25	600	3	73	42	4	121	468	5	169	2379
1	26	223	3	74	63	4	122	1705	5	170	493
1	27	91	3	75	50	4	123	568	5	171	100
1	28	1208	3	76	182	4	124	194	5	172	1783
1	29	226	3	77	51	4	125	346	5	173	219
1	30	755	3	78	293	4	126	398	5	174	259
1	31	90	3	79	92	4	127	756	5	175	74
1	32	126	3	80	253	4	128	580	5	176	996
1	33	772	3	81	69	4	129	96	5	177	1273
1	34	476	3	82	132	4	130	189	5	178	184
1	35	211	3	83	47	4	131	184	5	179	456
1	36	1151	3	84	36	4	132	277	5	180	275
2	37	250	3	85	1231	4	133	91	5	181	814
2	38	308	3	86	464	4	134	530	5	182	524
2	39	1817	3	87	57	4	135	267	5	183	357
2	40	1272	3	88	59	4	136	249	5	184	94
2	41	1638	3	89	79	4	137	272			
2	42	237	3	90	766	4	138	1080			
2	43	262	3	91	162	4	139	302			
2	44	767	3	92	235	4	140	179			
2	45	1367	3	93	677	4	141	46			
2	46	113	3	94	357	4	142	290			
2	47	101	3	95	179	4	143	54			
2	48	81	3	96	100	4	144	267			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ผก 6 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.7 ผลการวัดขนาดเฟสของชั้นงานความสูง 5 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง $y = 3$

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	264	2	49	762	4	97	1264
1	2	752	2	50	223	4	98	1456
1	3	410	2	51	323	4	99	1397
1	4	846	2	52	266	4	100	358
1	5	218	2	53	321	4	101	1573
1	6	233	2	54	134	4	102	176
1	7	1246	2	55	126	4	103	367
1	8	241	2	56	39	4	104	326
1	9	309	2	57	46	4	105	254
1	10	83	2	58	2552	5	106	2487
1	11	92	3	59	705	5	107	1704
1	12	202	3	60	738	5	108	2634
1	13	775	3	61	541	5	109	512
1	14	183	3	62	159	5	110	633
1	15	861	3	63	621	5	111	608
1	16	907	3	64	709	5	112	1342
1	17	4154	3	65	96	5	113	1325
1	18	162	3	66	727	5	114	2914
1	19	306	3	67	673	5	115	703
1	20	264	3	68	178	5	116	783
1	21	1557	3	69	77	5	117	408
1	22	702	3	70	418	5	118	5063
1	23	133	3	71	260	5	119	613
2	24	1167	3	72	438	5	120	498
2	25	1726	3	73	278	5	121	467
2	26	624	3	74	1522	5	122	657
2	27	625	3	75	1003	5	123	235
2	28	129	3	76	604	5	124	1008
2	29	74	3	77	634	5	125	598
2	30	231	3	78	151	5	126	985
2	31	1054	3	79	2507	5	127	635
2	32	500	3	80	1195			
2	33	236	3	81	189			
2	34	390	3	82	195			
2	35	775	4	83	924			
2	36	258	4	84	433			
2	37	361	4	85	546			
2	38	93	4	86	425			
2	39	186	4	87	275			
2	40	180	4	88	309			
2	41	901	4	89	391			
2	42	143	4	90	400			
2	43	564	4	91	1837			
2	44	804	4	92	487			
2	45	664	4	93	5687			
2	46	366	4	94	1063			
2	47	632	4	95	456			
2	48	166	4	96	1423			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ผก 7 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.8 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 5 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง $y = 7$

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	2710	3	49	491	5	97	402
1	2	3672	3	50	252	5	98	972
1	3	962	3	51	471	5	99	563
1	4	1675	3	52	378	5	100	223
1	5	1045	3	53	939	5	101	243
1	6	4721	3	54	195	5	102	64
1	7	305	3	55	125	5	103	113
1	8	1494	3	56	172	5	104	560
1	9	820	3	57	224	5	105	388
1	10	804	3	58	430	5	106	265
1	11	543	3	59	283	5	107	404
1	12	404	3	60	915	5	108	372
1	13	376	3	61	332	5	109	987
1	14	502	3	62	462	5	110	1725
1	15	210	3	63	169	5	111	907
2	16	1287	3	64	168	5	112	158
2	17	2378	4	65	1838	5	113	157
2	18	1138	4	66	859	5	114	110
2	19	2826	4	67	582			
2	20	1013	4	68	190			
2	21	176	4	69	184			
2	22	620	4	70	1455			
2	23	740	4	71	1058			
2	24	978	4	72	1756			
2	25	2329	4	73	281			
2	26	2870	4	74	734			
2	27	975	4	75	437			
2	28	2306	4	76	1200			
2	29	703	4	77	310			
2	30	1310	4	78	99			
2	31	287	4	79	263			
2	32	851	4	80	661			
2	33	401	4	81	391			
2	34	84	4	82	265			
2	35	155	4	83	358			
2	36	104	4	84	294			
3	37	798	4	85	53			
3	38	1517	4	86	47			
3	39	1814	4	87	417			
3	40	2486	4	88	186			
3	41	638	5	89	434			
3	42	1207	5	90	367			
3	43	252	5	91	257			
3	44	125	5	92	244			
3	45	965	5	93	981			
3	46	1223	5	94	1427			
3	47	1694	5	95	406			
3	48	398	5	96	304			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ผก 8 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.9 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 5 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง $y = 10$

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	812	2	49	1856	5	97	422
1	2	243	2	50	4544	5	98	306
1	3	363	2	51	914	5	99	112
1	4	474	3	52	3690	5	100	212
1	5	448	3	53	1177	5	101	176
1	6	179	3	54	1194	5	102	358
1	7	367	3	55	1174	5	103	351
1	8	236	3	56	2805	5	104	684
1	9	656	3	57	751	5	105	570
1	10	472	3	58	773	5	106	296
1	11	411	3	59	495	5	107	376
1	12	315	3	60	410	5	108	1725
1	13	805	3	61	1275	5	109	585
1	14	42	3	62	155	5	110	220
1	15	246	3	63	319	5	111	279
1	16	203	3	64	349	5	112	240
1	17	630	3	65	415	5	113	122
1	18	325	3	66	239	5	114	407
1	19	338	3	67	840	5	115	205
1	20	391	3	68	247	5	116	142
1	21	395	3	69	87	5	117	446
1	22	349	3	70	453	5	118	446
1	23	219	3	71	143	5	119	156
1	24	697	3	72	344	5	120	217
1	25	630	4	73	1146	5	121	165
1	26	179	4	74	754			
1	27	172	4	75	735			
1	28	110	4	76	382			
1	29	266	4	77	292			
1	30	308	4	78	504			
1	31	260	4	79	205			
1	32	115	4	80	420			
1	33	533	4	81	2465			
1	34	219	4	82	322			
1	35	420	4	83	313			
2	36	1075	4	84	348			
2	37	661	4	85	311			
2	38	1073	4	86	119			
2	39	853	4	87	1805			
2	40	1247	4	88	1126			
2	41	352	4	89	663			
2	42	256	4	90	324			
2	43	326	4	91	298			
2	44	1618	4	92	257			
2	45	1312	4	93	161			
2	46	520	4	94	110			
2	47	583	4	95	371			
2	48	196	5	96	1845			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ผก 9 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.10 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 5 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง y = 14

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	440	2	49	396	3	97	569	5	145	351
1	2	268	2	50	239	3	98	724	5	146	111
1	3	382	2	51	387	3	99	119	5	147	2149
1	4	1567	2	52	826	3	100	160	5	148	378
1	5	714	2	53	203	3	101	100	5	149	503
1	6	209	2	54	227	3	102	57	5	150	391
1	7	1009	2	55	1232	3	103	204	5	151	378
1	8	672	2	56	605	3	104	48	5	152	535
1	9	1295	2	57	58	3	105	686	5	153	115
1	10	461	2	58	1003	4	106	2321	5	154	93
1	11	1328	2	59	676	4	107	181	5	155	42
1	12	2667	2	60	1285	4	108	334	5	156	123
1	13	491	2	61	414	4	109	278	5	157	485
1	14	1798	2	62	46	4	110	141	5	158	227
1	15	327	2	63	27	4	111	661	5	159	76
1	16	63	2	64	209	4	112	143	5	160	53
1	17	439	2	65	301	4	113	163	5	161	316
1	18	163	2	66	225	4	114	297	5	162	135
1	19	736	2	67	92	4	115	796	5	163	504
1	20	132	2	68	71	4	116	315	5	164	649
1	21	90	3	69	2168	4	117	674	5	165	268
1	22	32	3	70	1164	4	118	5249	5	166	137
1	23	37	3	71	457	4	119	524	5	167	115
1	24	83	3	72	219	4	120	49	5	168	243
1	25	198	3	73	167	4	121	434	5	169	111
1	26	404	3	74	698	4	122	1780	5	170	588
1	27	274	3	75	472	4	123	655			
1	28	182	3	76	68	4	124	471			
1	29	43	3	77	165	4	125	193			
1	30	588	3	78	91	4	126	208			
1	31	216	3	79	52	4	127	212			
1	32	523	3	80	179	4	128	89			
1	33	112	3	81	283	4	129	329			
1	34	285	3	82	55	4	130	408			
1	35	133	3	83	341	4	131	250			
2	36	2405	3	84	163	4	132	72			
2	37	1810	3	85	1288	4	133	191			
2	38	848	3	86	265	4	134	3516			
2	39	1299	3	87	171	5	135	3775			
2	40	719	3	88	718	5	136	754			
2	41	342	3	89	1366	5	137	458			
2	42	133	3	90	565	5	138	606			
2	43	199	3	91	378	5	139	240			
2	44	254	3	92	692	5	140	286			
2	45	80	3	93	97	5	141	363			
2	46	273	3	94	535	5	142	376			
2	47	132	3	95	954	5	143	477			
2	48	145	3	96	230	5	144	155			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ผก 10 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.11 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 8 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง $y = 0$

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	238	2	49	743	3	97	1008	4	145	221
1	2	185	2	50	215	3	98	160	4	146	596
1	3	234	2	51	113	3	99	218	4	147	215
1	4	63	2	52	255	3	100	237	4	148	418
1	5	52	2	53	278	3	101	774	4	149	363
1	6	35	2	54	179	3	102	652	4	150	101
1	7	21	2	55	146	3	103	135	4	151	402
1	8	128	2	56	200	3	104	206	4	152	241
1	9	43	2	57	221	3	105	278	4	153	179
1	10	63	2	58	205	3	106	610	4	154	791
1	11	260	2	59	137	3	107	111	4	155	380
1	12	394	2	60	89	3	108	315	5	156	519
1	13	932	2	61	55	3	109	830	5	157	76
1	14	1096	2	62	118	3	110	228	5	158	590
1	15	524	2	63	63	3	111	2634	5	159	90
1	16	192	2	64	192	3	112	475	5	160	169
1	17	330	2	65	134	3	113	164	5	161	268
1	18	687	2	66	265	3	114	439	5	162	662
1	19	1114	2	67	223	3	115	175	5	163	851
1	20	326	2	68	132	3	116	797	5	164	232
1	21	401	2	69	233	3	117	92	5	165	434
1	22	166	2	70	278	3	118	820	5	166	249
1	23	85	2	71	173	3	119	635	5	167	173
1	24	203	2	72	205	3	120	521	5	168	62
1	25	125	2	73	214	3	121	705	5	169	138
1	26	116	2	74	126	3	122	735	5	170	392
1	27	81	2	75	48	3	123	128	5	171	93
1	28	42	2	76	98	3	124	305	5	172	41
1	29	547	2	77	525	3	125	319	5	173	1284
1	30	784	2	78	168	3	126	50	5	174	307
1	31	94	2	79	425	4	127	702	5	175	597
1	32	261	2	80	180	4	128	758	5	176	50
1	33	148	2	81	314	4	129	583	5	177	145
1	34	327	2	82	146	4	130	263	5	178	219
1	35	242	2	83	385	4	131	140	5	179	74
1	36	64	2	84	389	4	132	462			
1	37	383	2	85	65	4	133	1669			
1	38	79	2	86	326	4	134	151			
1	39	578	2	87	85	4	135	6195			
1	40	252	2	88	78	4	136	1284			
1	41	121	2	89	200	4	137	1244			
1	42	224	2	90	163	4	138	305			
1	43	396	3	91	1419	4	139	326			
1	44	135	3	92	278	4	140	408			
1	45	180	3	93	872	4	141	236			
1	46	265	3	94	687	4	142	194			
1	47	151	3	95	1260	4	143	136			
1	48	208	3	96	2556	4	144	190			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ผก 11 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.12 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 8 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง $y = 3$

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	3234	3	49	2171	5	97	489
1	2	180	3	50	90	5	98	300
1	3	238	3	51	116	5	99	261
1	4	296	3	52	150	5	100	226
1	5	269	3	53	134	5	101	180
1	6	263	3	54	94	5	102	232
1	7	200	3	55	190	5	103	110
1	8	1494	3	56	599	5	104	125
1	9	163	3	57	709	5	105	391
1	10	210	3	58	702	5	106	370
1	11	203	3	59	112	5	107	131
1	12	116	3	60	116	5	108	562
1	13	144	3	61	126	5	109	388
1	14	224	3	62	231	5	110	484
1	15	886	3	63	95	5	111	337
1	16	903	3	64	162	5	112	164
1	17	1039	3	65	413	5	113	94
1	18	439	3	66	384	5	114	135
1	19	1198	3	67	940	5	115	31
1	20	699	3	68	289	5	116	932
1	21	233	3	69	170	5	117	331
2	22	316	3	70	247	5	118	295
2	23	932	3	71	385	5	119	221
2	24	289	3	72	889	5	120	88
2	25	73	3	73	125			
2	26	143	3	74	290			
2	27	601	4	75	179			
2	28	190	4	76	294			
2	29	267	4	77	415			
2	30	93	4	78	167			
2	31	2615	4	79	881			
2	32	411	4	80	152			
2	33	1326	4	81	146			
2	34	934	4	82	136			
2	35	47	4	83	83			
2	36	138	4	84	145			
2	37	4020	4	85	127			
2	38	293	4	86	641			
2	39	255	4	87	177			
2	40	173	4	88	95			
3	41	152	4	89	191			
3	42	1271	4	90	49			
3	43	549	4	91	453			
3	44	279	4	92	842			
3	45	395	4	93	472			
3	46	653	4	94	113			
3	47	200	5	95	366			
3	48	402	5	96	43			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.13 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 8 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง $y = 7$

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	2551	3	49	718	5	97	333
1	2	270	3	50	806	5	98	357
1	3	765	3	51	530	5	99	232
1	4	826	3	52	250	5	100	956
1	5	547	3	53	76	5	101	681
1	6	872	3	54	1221	5	102	177
1	7	2300	4	55	2577	5	103	265
1	8	939	4	56	816	5	104	383
1	9	3044	4	57	630	5	105	508
1	10	2343	4	58	1185	5	106	131
1	11	1664	4	59	754	5	107	289
1	12	3572	4	60	313			
1	13	1777	4	61	473			
1	14	418	4	62	225			
1	15	526	4	63	1110			
2	16	825	4	64	186			
2	17	1572	4	65	434			
2	18	543	4	66	329			
2	19	278	4	67	494			
2	20	1525	4	68	344			
2	21	928	4	69	971			
2	22	339	4	70	1082			
2	23	994	4	71	2330			
2	24	496	4	72	977			
2	25	1577	4	73	516			
2	26	1082	4	74	578			
2	27	1303	4	75	232			
2	28	517	4	76	277			
2	29	489	4	77	67			
2	30	777	4	78	519			
2	31	2948	4	79	2408			
2	32	297	5	80	1145			
2	33	476	5	81	422			
2	34	2029	5	82	429			
3	35	2404	5	83	1146			
3	36	2045	5	84	472			
3	37	523	5	85	399			
3	38	260	5	86	321			
3	39	1383	5	87	591			
3	40	2687	5	88	1000			
3	41	394	5	89	823			
3	42	539	5	90	262			
3	43	164	5	91	2288			
3	44	1293	5	92	570			
3	45	7696	5	93	861			
3	46	342	5	94	158			
3	47	1801	5	95	863			

ผก 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.14 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 8 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง $y = 10$

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	1694	3	49	440	5	97	281
1	2	6875	3	50	157	5	98	431
1	3	1417	3	51	152	5	99	169
1	4	605	3	52	588	5	100	363
1	5	462	3	53	568	5	101	860
1	6	557	3	54	624	5	102	180
1	7	1221	3	55	2911	5	103	1704
1	8	482	3	56	694	5	104	585
1	9	672	3	57	1130	5	105	87
1	10	1406	3	58	343	5	106	468
1	11	233	3	59	585	5	107	283
1	12	4402	3	60	324	5	108	297
1	13	602	3	61	746	5	109	107
1	14	364	3	62	357	5	110	234
1	15	793	3	63	444	5	111	132
1	16	186	4	64	594	5	112	396
2	17	934	4	65	234	5	113	88
2	18	213	4	66	201	5	114	374
2	19	1350	4	67	511			
2	20	1031	4	68	1126			
2	21	1675	4	69	343			
2	22	2408	4	70	572			
2	23	707	4	71	3001			
2	24	281	4	72	659			
2	25	162	4	73	245			
2	26	2052	4	74	156			
2	27	962	4	75	154			
2	28	3887	4	76	914			
2	29	1279	4	77	621			
2	30	131	4	78	1268			
2	31	221	4	79	1167			
2	32	2715	4	80	2191			
2	33	159	4	81	903			
2	34	136	4	82	746			
2	35	300	4	83	284			
3	36	500	4	84	179			
3	37	263	4	85	2638			
3	38	373	4	86	839			
3	39	619	4	87	809			
3	40	1371	5	88	5145			
3	41	543	5	89	158			
3	42	403	5	90	247			
3	43	987	5	91	133			
3	44	1342	5	92	389			
3	45	336	5	93	455			
3	46	105	5	94	1467			
3	47	861	5	95	2478			
3	48	1334	5	96	478			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

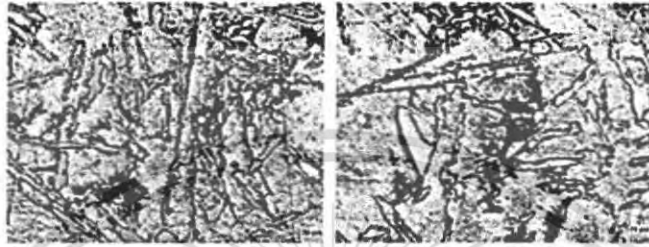
ตาราง ผก.15 ผลการวัดขนาดเฟสของชิ้นงานความสูง 8 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง $y = 14$

ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²	ภาพที่	ลำดับที่	ขนาด(μm) ²
1	1	141	2	49	153	3	97	401	4	145	424
1	2	256	2	50	168	3	98	735	4	146	215
1	3	278	2	51	1077	3	99	459	4	147	150
1	4	410	2	52	477	3	100	543	4	148	211
1	5	332	2	53	79	3	101	636	4	149	561
1	6	169	2	54	330	3	102	410	4	150	872
1	7	58	2	55	299	3	103	142	4	151	82
1	8	67	2	56	218	3	104	214	4	152	92
1	9	195	2	57	100	3	105	1018	4	153	23
1	10	127	2	58	439	3	106	356	4	154	524
1	11	428	2	59	294	3	107	119	4	155	506
1	12	659	2	60	553	3	108	143	5	156	380
1	13	177	2	61	69	3	109	392	5	157	37
1	14	2280	2	62	145	3	110	179	5	158	251
1	15	182	2	63	205	3	111	1424	5	159	149
1	16	899	2	64	269	3	112	542	5	160	149
1	17	272	2	65	100	3	113	1679	5	161	92
1	18	128	2	66	367	3	114	486	5	162	429
1	19	346	2	67	100	3	115	613	5	163	1614
1	20	243	2	68	484	3	116	205	5	164	630
1	21	601	2	69	51	3	117	133	5	165	709
1	22	682	2	70	220	3	118	305			
1	23	315	2	71	533	3	119	333			
1	24	95	2	72	554	4	120	181			
1	25	2998	2	73	872	4	121	206			
1	26	297	2	74	109	4	122	771			
1	27	738	2	75	3371	4	123	101			
1	28	861	2	76	212	4	124	55			
1	29	681	2	77	65	4	125	21			
1	30	550	2	78	69	4	126	40			
1	31	135	2	79	75	4	127	179			
1	32	571	2	80	140	4	128	655			
1	33	742	2	81	124	4	129	150			
1	34	1717	2	82	65	4	130	158			
1	35	1302	2	83	102	4	131	257			
1	36	838	2	84	228	4	132	107			
1	37	158	2	85	158	4	133	560			
2	38	320	2	86	1058	4	134	162			
2	39	275	3	87	762	4	135	70			
2	40	55	3	88	2486	4	136	299			
2	41	280	3	89	863	4	137	1224			
2	42	391	3	90	230	4	138	227			
2	43	182	3	91	156	4	139	90			
2	44	172	3	92	645	4	140	494			
2	45	393	3	93	88	4	141	244			
2	46	89	3	94	96	4	142	66			
2	47	87	3	95	761	4	143	346			
2	48	526	3	96	622	4	144	47			

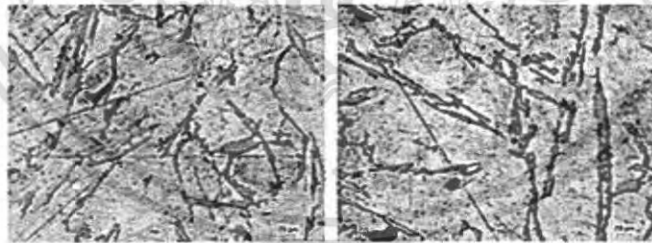
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ผก 15 ศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



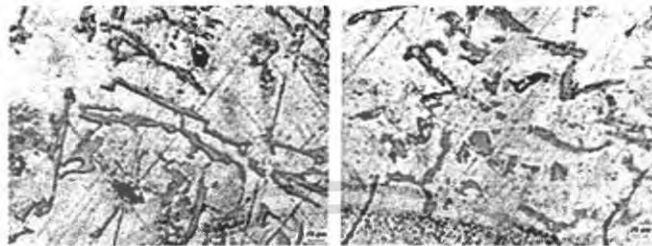
รูปที่ ผข.1 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ ของชั้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร



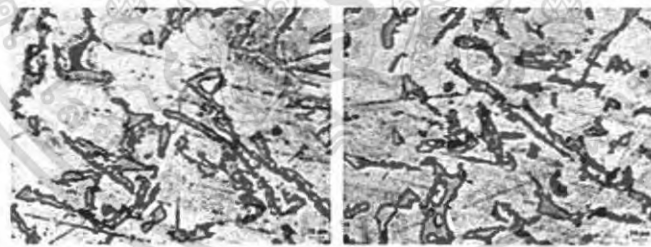
รูปที่ ผข.2 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ ถึง ของชั้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร

ผข 1

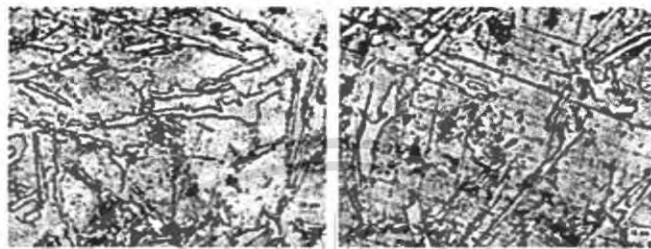
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



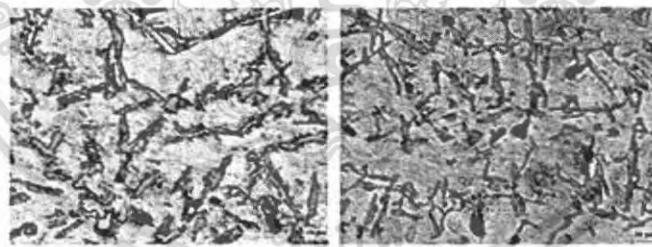
รูปที่ ผข.3 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=7$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร



รูปที่ ผข.4 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=10$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร



รูปที่ ผข.5 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=14$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 2.5 เซนติเมตร

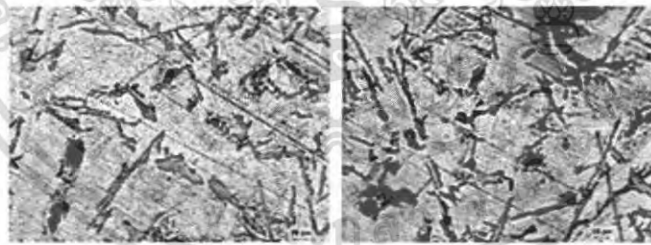


รูปที่ ผข.6 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

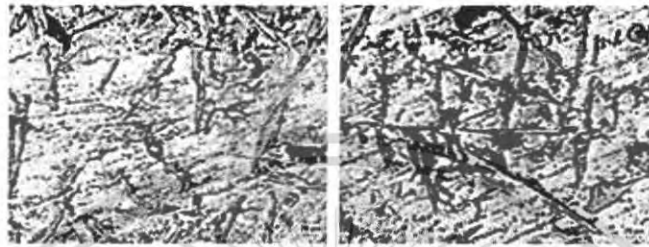
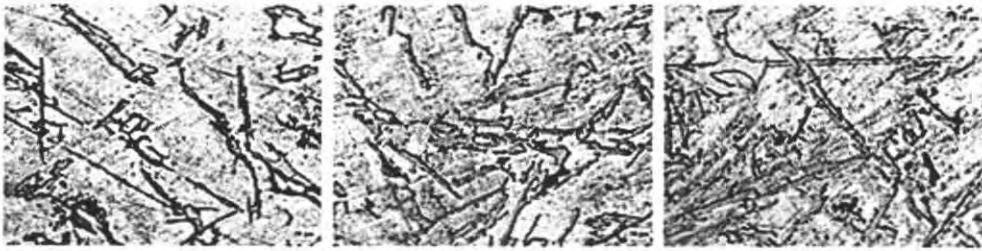


รูปที่ ผข.7 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร

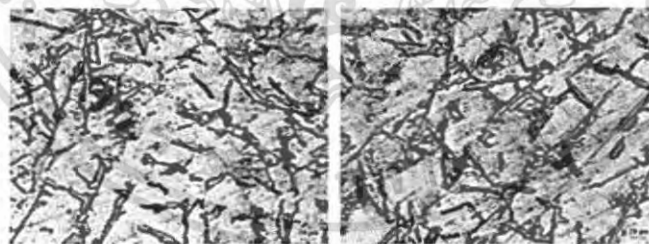
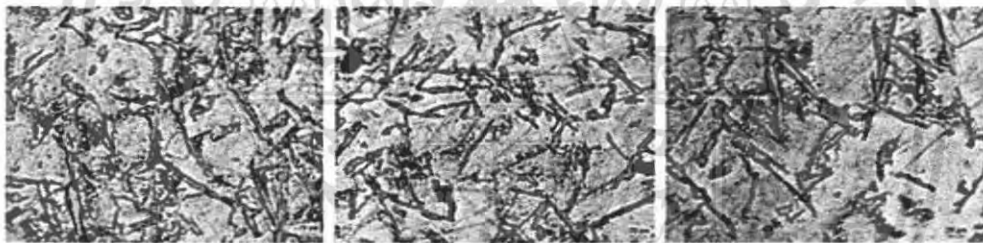


รูปที่ ผข.8 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=7$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผข.9 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=10$ ของชั้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร



รูปที่ ผข.10 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=14$ ของชั้นงานที่มีความสูง 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1

2

3



4

5

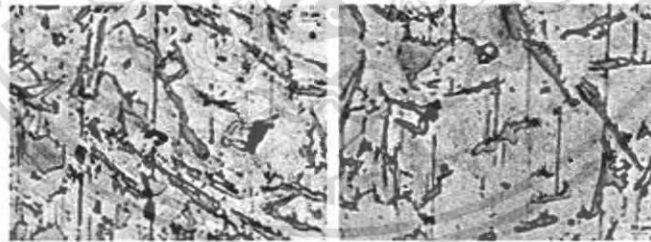
รูปที่ ผข.11 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=0$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร



1

2

3



4

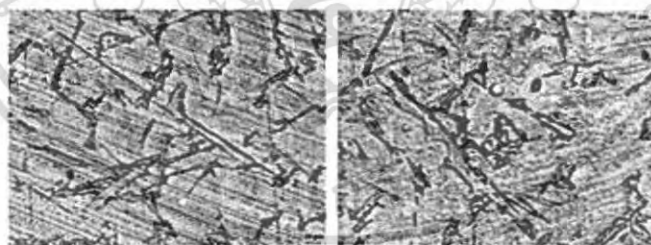
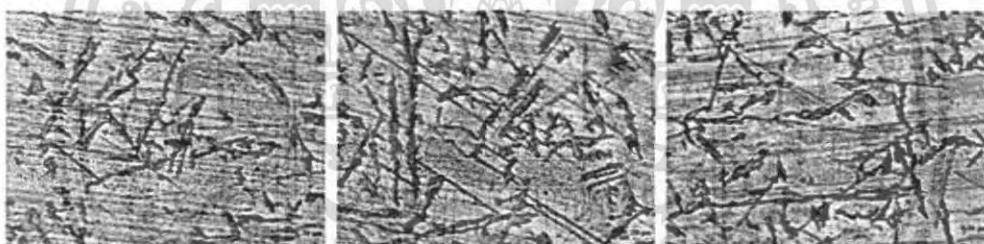
5

รูปที่ ผข.12 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=3$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผข.13 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=7$ ของชั้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร



รูปที่ ผข.14 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=10$ ของชั้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



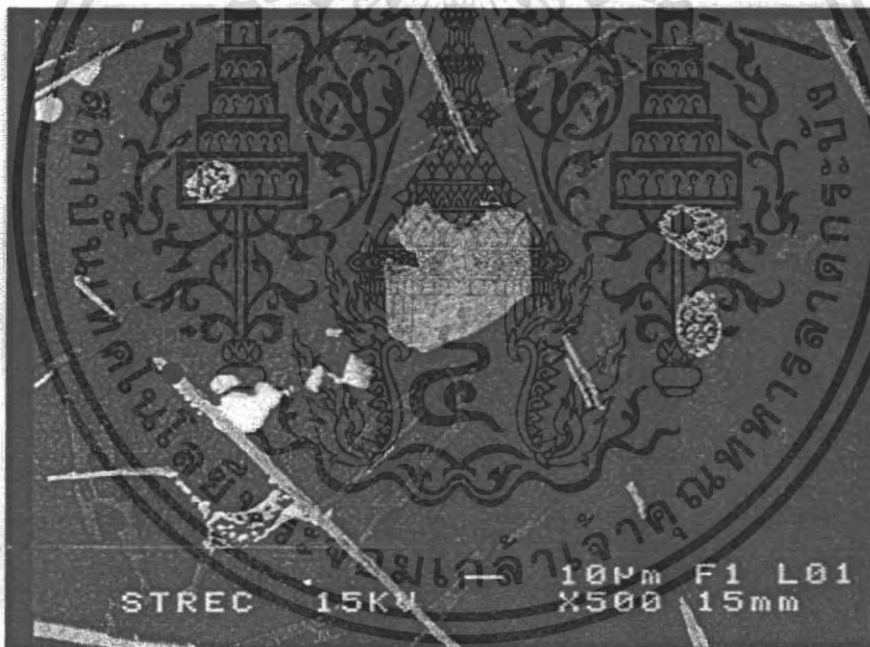
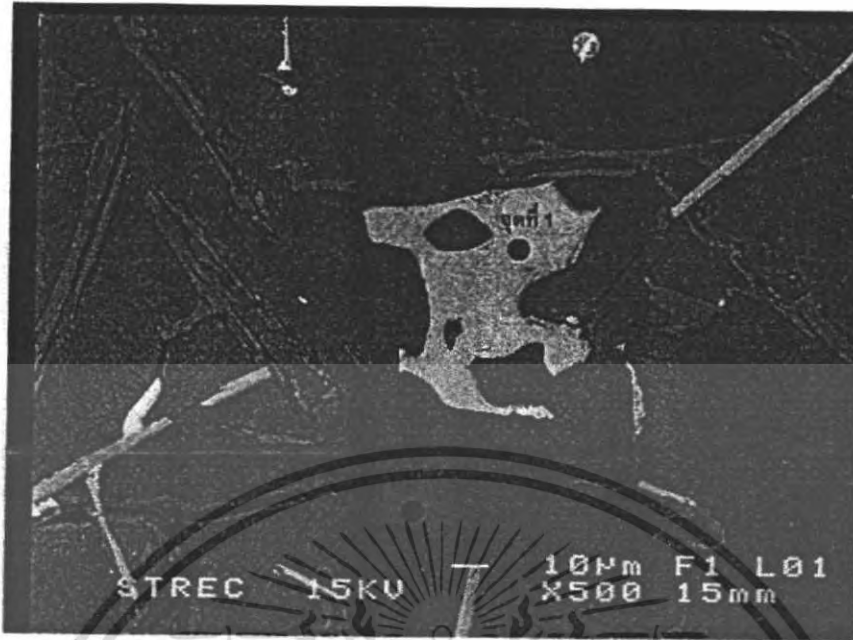
รูปที่ ผข.15 อนุภาคที่ตำแหน่ง $y=14$ ของชิ้นงานที่มีความสูง 8 เซนติเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



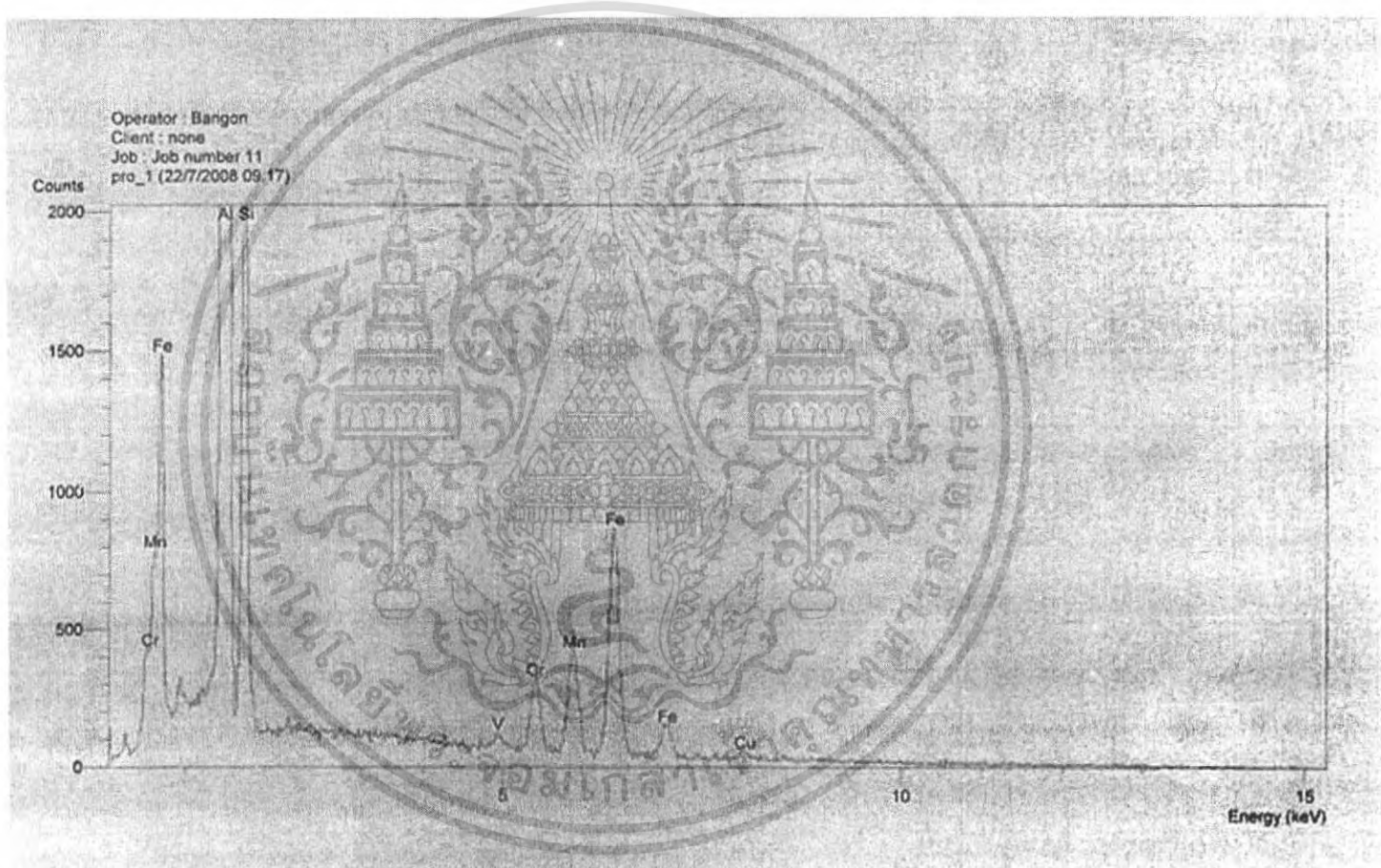
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผค 1 ตำแหน่งชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์ห่ออนุภาคบนชิ้นงาน

ผค 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SEMQuant results. Listed at 9:41:20 PM on 22/7/2008
Operator: Bangon
Client: none
Job: Job number 11
Spectrum label: pro_1

System resolution = 72 eV

Quantitative method: ZAF (4 iterations).
Analysed all elements and normalised results.

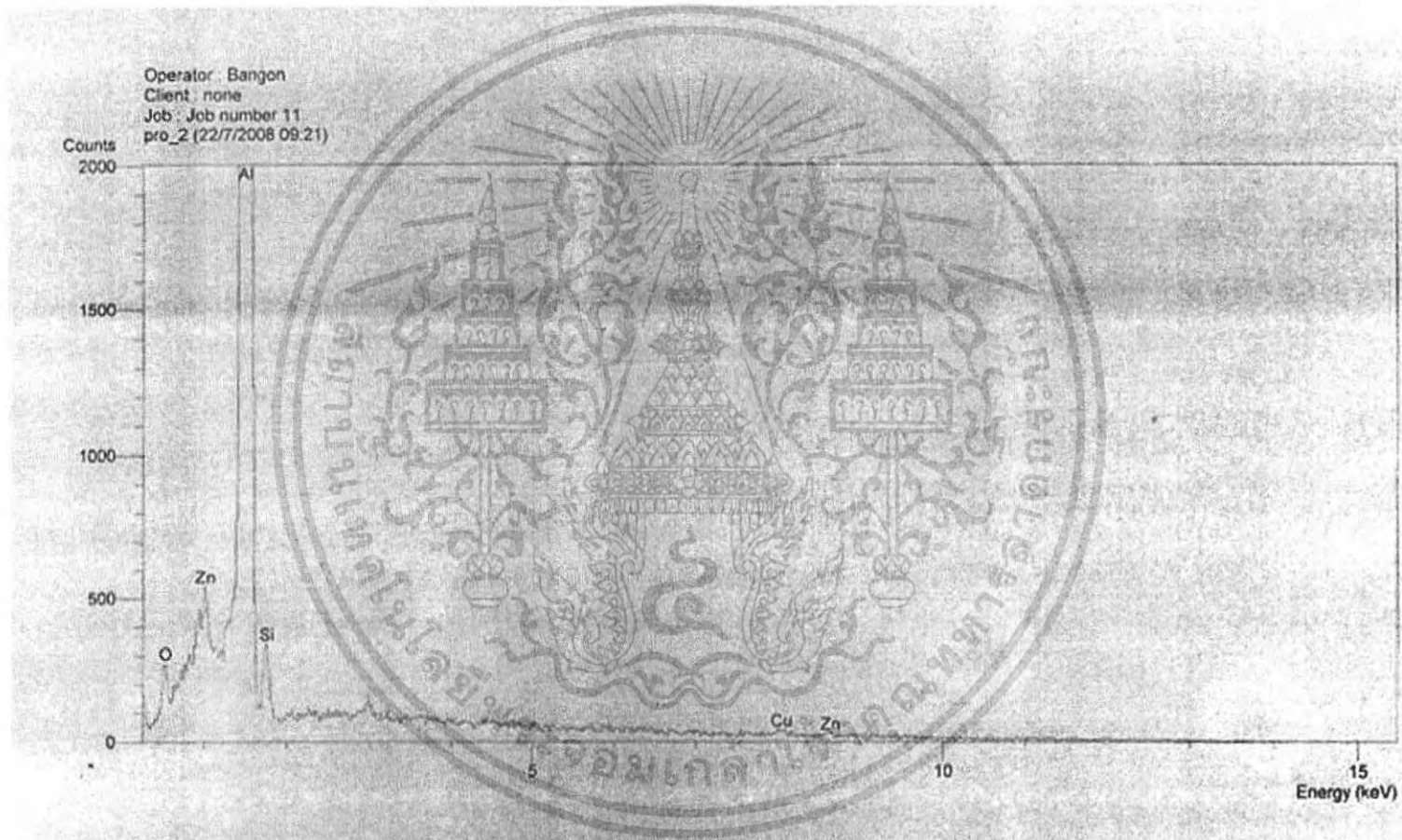
1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

Al K Al2O3 23/11/93
Si K Quartz 01/12/93
V K V 01/12/93
Cr K Cr 01/12/93
Mn K Mn 01/12/93
Fe K Fe 01/12/93
Cu K Cu 01/12/93

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
Al K	ED	64.93	73.19
Si K	ED	14.08	15.25
V K	ED	0.40	0.24
Cr K	ED	2.97	1.68
Mn K	ED	4.74	2.62
Fe K	ED	12.30	6.70
Cu K	ED	0.69	0.33
Total		100.00	100.00

* = <2 Signs



SEMQuant results. Listed at 9:43:09 PM on 22/7/2008
Operator: Bangon
Client: none
Job: Job number 11
Spectrum label: pro_2

System resolution = 61 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
Analysed all elements and normalised results.

2 peaks possibly omitted: 0.00, 2.98 keV

Standards :

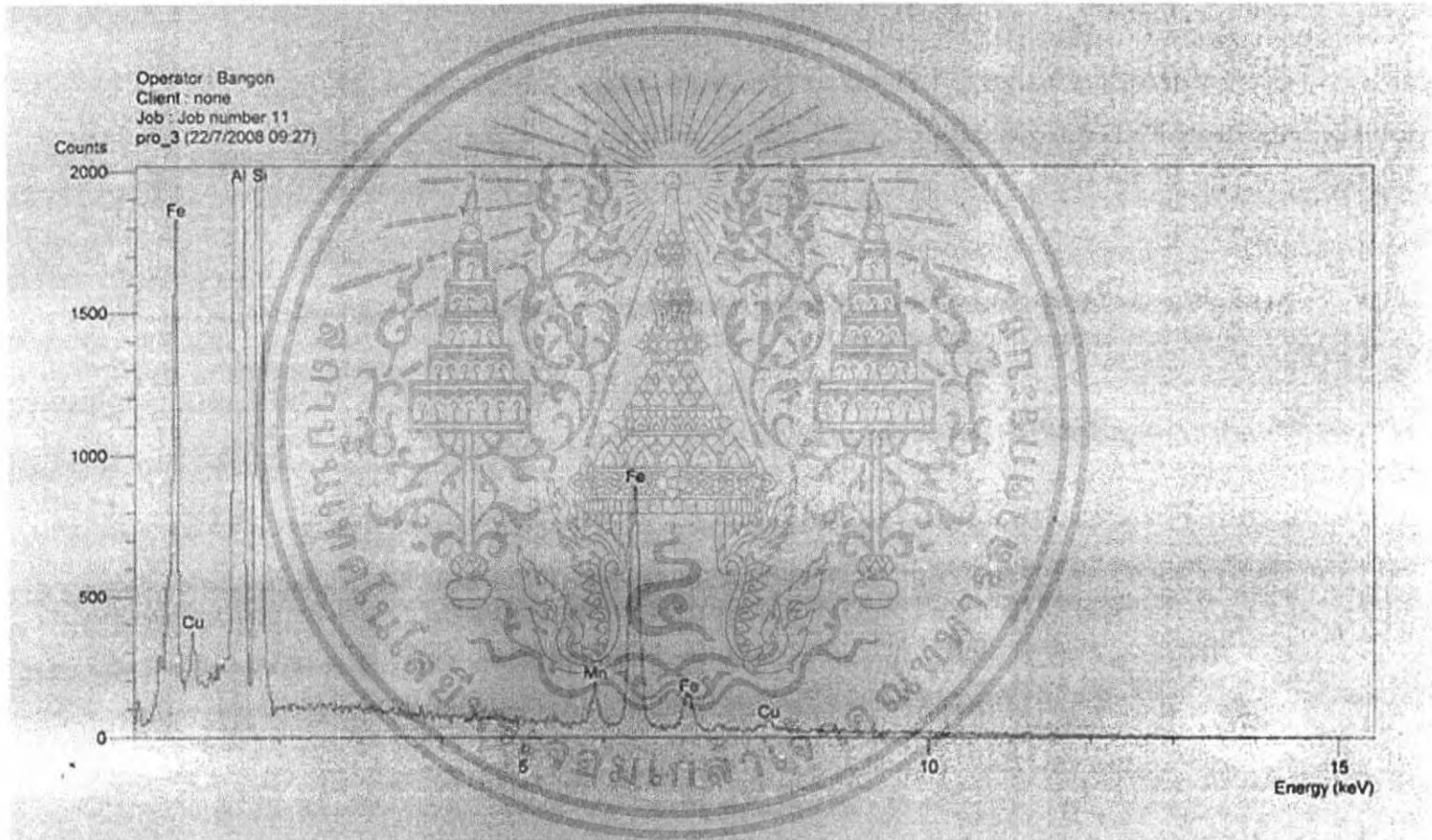
O K Quartz 01/12/93
Al K Al2O3 23/11/93
Si K Quartz 01/12/93
Cu K Cu 01/12/93
Zn X Zn 01/12/93

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
O K	ED	2.93	4.86
Al K	ED	93.80	92.57
Si K	ED	2.24	2.13
Cu K	ED	0.49	0.20
Zn K	ED	0.54	0.22
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 6



ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งที่ 3

SEMQuant results. Listed at 9:44:50 PM on 22/7/2008
Operator: Bangon
Client: none
Job: Job number 11
Spectrum label: pro_3

System resolution = 62 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
Analysed all elements and normalised results.

2 peaks possibly omitted: 0.00, 0.24 keV

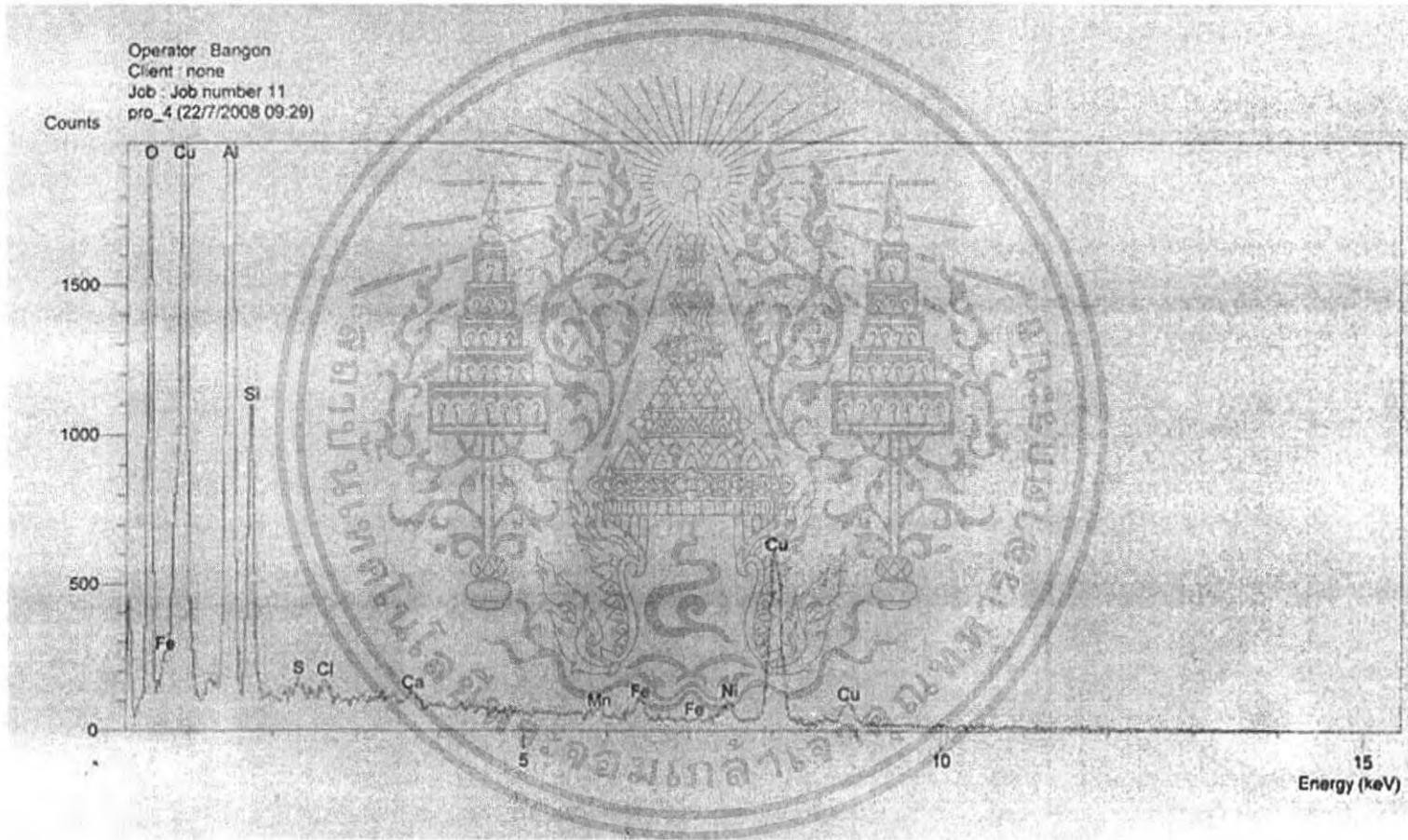
Standards :

Al K Al2O3 23/11/93
Si K Quartz 01/12/93
Mn K Mn 01/12/93
Fe K Fe 01/12/93
Cu K Cu 01/12/93

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
Al K	ED	59.51	66.33
Si K	ED	22.39	23.98
Mn K	ED	1.81	0.99
Fe K	ED	15.31	8.24
Cu K	ED	0.98	0.47
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 8

SEMQuant results. Listed at 9:45:38 PM on 22/7/2006
 Operator: Bangon
 Client: none
 Job: Job number 11
 Spectrum label: pro_4

System resolution = 62 eV

Quantitative method: ZAF (4 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

O K Quartz 01/12/93
 Al K Al2O3 23/11/93
 Si K Quartz 01/12/93
 S K FeS2 01/12/93
 Cl K KCl 15/02/94
 Ca K Wollas 23/11/93
 Mn K Mn 01/12/93
 Fe K Fe 01/12/93
 Ni K Ni 01/12/93
 Cu K Cu 01/12/93

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	36.61	55.65
Al K	ED	31.36	28.28
Si K	ED	6.97	6.04
S K	ED	0.30	0.23
Cl K	ED	0.40	0.27
Ca K	ED	0.39	0.24
Mn K	ED	0.45	0.20
Fe K	ED	1.07	0.47
Ni K	ED	1.62	0.67
Cu K	ED	20.81	7.96
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

ผลจากการวิเคราะห์อนุภาคด้วยเครื่องมือทดสอบ SEM ทำให้ทราบอนุภาคที่เราทำการวัดขนาด โดย อนุภาคที่มีลักษณะ ไม่นานอนเป็น β -Al₃FeSi และอนุภาคที่มีลักษณะเป็นเส้นเป็น δ -Al₄FeSi₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้