อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ และอุณหภูมิเทต่อโครงสร้างทางจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม A 356

INFLUENCE OF MOLD TEMPERATURE AND POURING TEMPERATURE TO MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF A 356 ALUMINUM ALLOYS

นายกิตติพล แพงขะ รหัส 49360082

นายเอกพันธ์ อินสาย รหัส 49364813

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 10 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน 1504427
เลขเรียกหนังสือ ฝร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ก674 ผ 2552

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2552

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ และอุณหภูมิเทต่อโครงสร้างทางจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม A 356

ผู้ดำเนินโครงงาน นายกิตติพล แพงขะ รหัส 49360082

นายเอกพันธ์ อินสาย รหัส 49364813

ที่ปรึกษาโครงงาน อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2552

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงงาน
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์นพวรรณ โม้ทอง)

.....กรรมการ
(อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ชุลีพรย์ ป่าไร่)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ และอุณหภูมิเทต่อโครงสร้างทางจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม A 356	
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายกิตติพล แพงขะ	รหัส 49360082
	นายเอกพันธ์ อินสาย	รหัส 49364813
ที่ปรึกษาโครงงาน	อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ	
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	
ปีการศึกษา	2552	

.....

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาอุณหภูมิเท และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด A 356 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่อโดยเปลี่ยนอุณหภูมิเทที่ 665 715 และ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้องและ 200 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ประกอบด้วยโครงสร้างอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ และโครงสร้างยูเทคติกอะลูมิเนียม ซิลิคอน ทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์ หาขนาดพื้นที่ของเกรน และค่าความกลมของเกรน ซึ่งผลการทดลองที่ได้คือ โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน มีเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ซึ่งมีโครงสร้างเดนไดร์ทที่มีลักษณะเป็นกิ่งไม้ และมีเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม - ซิลิคอน ที่เป็นการสลับกันของอะลูมิเนียม และซิลิคอน ที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียวแหลมแทรกอยู่ระหว่างแขนของอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ โดยทุกชิ้นงานจะมีลักษณะที่เหมือนกัน ขนาดพื้นที่ของเกรนจะมีพื้นที่มากขึ้นตามอุณหภูมิเท อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่สูงขึ้น และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิสูง ทำให้ค่าความกลมที่ได้มีค่าที่เข้าใกล้ความกลมที่สุด และมีผลทำให้ค่าความแข็งมีค่าความแข็งสูงเมื่ออุณหภูมิเท และอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญานิพนธ์สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงขอแสดงความขอบพระคุณบุคคลผู้มีพระคุณดังนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ ที่ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการทำวิจัย และคณะครูอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์นพวรรณ โม้ทอง อาจารย์ศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์ อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์ และอาจารย์ชุลีพรย์ ป่าไร่ ที่กรุณาสละเวลา เป็นอาจารย์สอบโครงงาน พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้โครงงานนี้

ครูช่างประเทือง โมรารายา ครูช่างธวัชชัย ชุลบุตร และครูช่างรณกฤต แสงผ่อง ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำโครงงาน อีกทั้งยังคอยแนะนำการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ อย่างถูกต้องอีกด้วย

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาในการทำโครงงานนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีอุปการะทุกคนที่มอบโอกาส และสิ่งดี ๆ มาโดยตลอดอีกทั้งคำปรึกษา แนะนำตักเตือน ทำให้ข้าพเจ้ามีความมานะอดทน จนปริญญานิพนธ์สำเร็จได้

ผู้ดำเนินโครงงาน
นายกิตติพล แพงชะ
นายเอกพันธ์ อินสาย

เมษายน 2554

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์.....ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....ข
กิตติกรรมประกาศ.....ค
สารบัญ.....ง
สารบัญตาราง.....ฉ
สารบัญรูป.....ช

บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 หลักการ และเหตุผล.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....1
1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย.....2
1.6 สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย.....2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย.....2
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงานวิจัย (Gantt Chart).....2

บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....3
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียม.....3
2.2 ซิลิคอน (Silicon).....4
2.3 อะลูมิเนียมผสมซิลิคอน.....4
2.4 ลักษณะโครงสร้างของอะลูมิเนียมผสมซิลิคอน.....6
2.5 อะลูมิเนียมเกรด A 356.....8
2.6 อุณหภูมิการเท (Pouring Temperature).....9
2.7 การหล่อโลหะ (Casting).....10
2.8 การแข็งตัวของโลหะ.....14
2.9 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค.....18
2.10 การวัดขนาดของเกรน.....20
2.11 การทดสอบความแข็ง.....23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน.....27

3.1 ศึกษาข้อมูล.....28

3.2 ออกแบบทำแม่พิมพ์.....28

3.3 การเปลี่ยนปัจจัยในการทดลอง.....28

3.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค.....29

3.5 การตรวจสอบขนาดเกรน.....33

3.6 การทดสอบความแข็ง.....33

3.7 วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผล.....34

3.8 ทำรูปเล่ม.....34

บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์.....35

4.1 การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล.....35

4.2 ออกแบบ และทำแม่พิมพ์.....35

4.3 การเปลี่ยนปัจจัยในการทดลอง.....36

4.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค.....37

4.5 การทดสอบความแข็ง.....59

บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....61

5.1 บทสรุป.....61

5.2 ข้อเสนอแนะ.....62

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขปัญหา.....62

เอกสารอ้างอิง.....63

ภาคผนวก ก.....64

ภาคผนวก ข.....67

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน.....98

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนการดำเนินงาน....2

2.1 รายละเอียดของกรดกัดชิ้นงานที่ตรวจสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก....20

2.2 ค่าของ Jeffriesi Multiplier....21

2.3 ชนิดของโลหะที่ใช้วัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์....24

2.4 แสดงตัวอย่างค่าเปรียบเทียบความแข็งที่วัดโดยวิธีต่าง ๆ....26

3.1 จำนวนชิ้นงานในการหล่อโดยเปลี่ยนอุณหภูมิเท และเปลี่ยนอุณหภูมิแม่พิมพ์....29

4.1 โครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)....39

4.2 โครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)....42

4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)....45

4.4 โครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส....48

4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส....51

4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส....54

4.7 จำนวนชิ้นงานในการหล่อโดยเปลี่ยนอุณหภูมิเท และเปลี่ยนอุณหภูมิแม่พิมพ์....59

ก.1 ค่าความแข็งที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) 65

ก.2 ค่าความแข็งที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส....66

ข.1 ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)....68

ข.2 ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)....71

ข.3 ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)....74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ข.4 ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส.....77

ข.5 ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส.....79

ข.6 ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส.....81

ข.7 ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส).....83

ข.8 ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส).....85

ข.9 ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส).....88

ข.10 ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส.....90

ข.11 ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส.....93

ข.12 ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส.....96

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แผนภาพสมดุลธาตุ อะลูมิเนียม - ซิลิคอนหล่อผสม	5
2.2	โครงสร้างโลหะผสมยูเทคติค	7
2.3	โครงสร้างโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติค	7
2.4	โครงสร้างทางจุลภาค ของอะลูมิเนียมผสม A 356	9
2.5	การเกิด Heterogeneous Nucleation บนผนังของแบบหล่อ	14
2.6	ลักษณะการเกิดผลึกของงานหล่อ	16
2.7	ลักษณะการแยกตัวของสารมลทินอยู่ตามของเกรน และกึ่งกลางของแท่งโลหะ	16
2.8	แสดงการโตของเกรน	17
2.9	ลักษณะแนวทางการขัดผิวของชิ้นงานที่ตรวจสอบสลับเป็นตาราง	19
2.10	ตัวอย่าง Planimetric Method	22
2.11	ตัวอย่าง Intercept Method	22
2.12	ลักษณะการกด และขนาดของการกดที่เกิดขึ้น	24
2.13	เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์	25
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	27
3.2	รูปชิ้นงานที่ได้จากการหล่อ ตามมาตรฐาน ASTM B 108	28
3.3	ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	30
3.4	ตัดส่วนเกินออก	31
3.5	ตัดชิ้นงานก่อนที่จะนำไปขัด	32
3.6	จุดที่ใช้ในการส่องดูโครงสร้างทางจุลภาค	33
3.7	จุดที่ใช้ทดสอบความแข็ง	34
4.1	การออกแบบขนาดแม่พิมพ์	35
4.2	แม่พิมพ์	36
4.3	เทน้ำโลหะลงแม่พิมพ์	36
4.4	รอแบบหล่อเย็นตัว	37
4.5	อะลูมิเนียมเกรด A356 ที่อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง	38
4.6	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเกรน ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.7 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเกรน ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส).....41

4.8 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเกรน ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส).....43

4.9 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเกรน ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส).....44

4.10 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเกรน ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส).....46

4.11 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเกรน ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส).....47

4.12 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเกรน ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....49

4.13 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเกรน ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....50

4.14 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเกรน ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....52

4.15 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเกรน ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....53

4.16 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเกรน ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....55

4.17 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเกรน ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....56

4.18 ค่าเฉลี่ยรวมพื้นที่ของเกรนที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และที่ 200 องศาเซลเซียส.....57

4.19 ค่าเฉลี่ยรวมขนาดความกลมของเกรนที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และที่ 200 องศาเซลเซียส.....58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.20 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด A356 ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส....60

บทที่ 1
บทนำ

1.1 หลักการ และเหตุผล

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมทุกโรงงานได้มีการใช้ทรัพยากรต่างๆ มากมาย ซึ่งนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องมือทางอุตสาหกรรม จนไปถึงอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ และเครื่องยนต์ต่าง ๆ โดยมีการเลือกใช้วัสดุ และวัตถุดิบที่แตกต่างกันไป ซึ่งอะลูมิเนียมก็เป็นวัตถุดิบที่มีบทบาทในงานอุตสาหกรรมที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย และมีความสำคัญต่องานด้านอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก

ในเชิงอุตสาหกรรมปัจจุบันได้มีการใช้อะลูมิเนียมอย่างมากมาย และได้มีการพัฒนาในด้านการนำอะลูมิเนียมไปผสมกับธาตุชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ เช่นการนำอะลูมิเนียมไปผสมกับซิลิคอน ทำให้มีสมบัติที่เหมาะกับการใช้งานมากมายหลายด้าน เช่นสามารถเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน และความสามารถด้านต้านทานต่อการกัดกร่อน ซึ่งชิ้นงานที่ผลิตออกมาจะเป็นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์

ซึ่งเราจะศึกษาเกี่ยวกับเรื่องของอะลูมิเนียมผสมกับซิลิคอนในงานหล่อ เหตุผลที่เลือกใช้อะลูมิเนียมผสมกับซิลิคอน เพราะมีสมบัติหลายด้านดังนี้ สมบัติของการไหลขณะหลอมดี ผลิตชิ้นส่วนที่ซับซ้อนได้ดี ในการทดลองเราจะไปประยุกต์ใช้ในด้านการหล่อ ซึ่งเป็นการหล่อที่ใช้แม่พิมพ์แบบหล่อถาวร แล้วเทอะลูมิเนียมลงสู่แม่พิมพ์เพื่อที่จะเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ได้จากการเทในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ต่างกันไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่แตกต่างกัน

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในอุณหภูมิเทที่แตกต่างกัน

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค และค่าความแข็งของชิ้นงาน

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

ความสัมพันธ์จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ได้จากการหล่ออะลูมิเนียมเกรด A356 ในอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ต่างกัน และอุณหภูมิในการเทที่ต่างกัน

1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 วัสดุ คืออะลูมิเนียมเกรด A356

1.5.2 ใช้หล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร

1.5.3 อุณหภูมิเท 665, 715 และ 765 องศาเซลเซียส

1.5.4 อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และ 200 องศาเซลเซียส

1.5.5 ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

1.5.6 ทดสอบความแข็งโดยใช้วิธีบริเนลล์

1.6 สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

อาคารปฏิบัติการทางวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

1 กันยายน พ.ศ. 2552 - 1 เมษายน พ.ศ. 2554

1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงานวิจัย (Gantt Chart)

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ลำดับ	การดำเนินงาน	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1	ศึกษาข้อมูล	←	→						
2	ออกแบบและทำแม่พิมพ์		←	→					
3	เปลี่ยนปัจจัยในการทดลอง		←	→					
4	การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค			←	→				
5	การทดสอบความแข็ง			←	→				
6	วิเคราะห์ข้อมูล				←	→			
7	สรุปผล					←	→		
8	ทำรูปเล่ม						←	→	

บทที่ 2
หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

ในบทนี้ได้จัดทำขึ้นเกี่ยวกับข้อมูลที่ใช้ในการทำการทดลองในด้าน การหล่ออะลูมิเนียมผสม ซึ่งมีเนื้อหาในด้านต่างๆ ที่บอกถึงจุดประสงค์ในการทำการทดลองครั้งนี้

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียม คือธาตุเคมีในตารางธาตุที่ มีสัญลักษณ์ Al และมีเลขอะตอม 13 เป็นโลหะหลังทรานซิชันที่มันวาว และอ่อนดัดง่าย ในธรรมชาติอะลูมิเนียมพบในรูปแร่บอกไซต์เป็นหลัก และมีสมบัติเด่น คือต่อต้านการออกซิเดชัน แข็งแรง น้ำหนักเบา มีการใช้อะลูมิเนียมในด้านอุตสาหกรรมหลายประเภท เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่นชิ้นส่วนโครงสร้างที่ผลิตจากอะลูมิเนียมสำคัญต่ออุตสาหกรรมอากาศยาน การขนส่ง และการสร้างอาคาร ซึ่งต้องการ น้ำหนักเบา ความทนทาน และความแข็งแรง ซึ่งอะลูมิเนียมมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจโลกเป็นอย่างมาก

อะลูมิเนียม จะเกิดการออกซิเดชันเป็นชั้นบางๆ และจะเกิดขึ้นเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ โลหะอะลูมิเนียมไม่เป็นสารพิษ ไม่เป็นแม่เหล็ก และไม่เกิดประกายไฟ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีแรงต้านการดึงประมาณ 49 ล้านปาสกาล (MPa) และ 400 ล้านปาสกาล (MPa) ถ้าทำเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม มีความหนาแน่นเป็น 1/3 ของเหล็กกล้า และทองแดงสามารถกลึง และหล่อแบบได้ง่าย และมีความสามารถต่อต้านการกร่อน และความทนเนื่องจากชั้นออกไซด์ที่ป้องกันพื้นหน้ากระจกเงาที่เป็นอะลูมิเนียมมีการสะท้อนแสงมากกว่าโลหะอื่น ๆ โดยมีสมบัติทางฟิสิกส์ดังต่อไปนี้

- ความหนาแน่น	2.7 g/cm³
- จุดหลอมเหลว	658 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิกลายเป็นไอ	1,800 องศาเซลเซียส
- ความร้อนจำเพาะ (0-100 องศาเซลเซียส)	0.2259 Cal/g
- ความต้านทานจำเพาะ (20 องศาเซลเซียส)	2.699 microhm.cm

และสมบัติทางกลดังต่อไปนี้

- ความแข็งแรง (Tensile Strength)	1140 - 1420 psi
- พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit)	430 psi
- โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	1109420 psi
- ความแข็ง (Hardness)	16 - 20 H_B
- อัตราการยืดตัว (Elongation)	40 - 45%

สมบัติพิเศษอย่างหนึ่งของอะลูมิเนียมก็คือสามารถเข้าไปแทนที่เหล็กได้ แทนที่ทองแดงได้ก็เพราะมีความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ต่ำรองจากทองแดงเพราะอะลูมิเนียมเมื่อทิ้งไว้ในอากาศ

บริเวณผิวจะรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศให้อะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งป้องกันไม่ให้ออกซิเจนแทรกซึมลงไปทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมภายในได้ สมบัติที่ดีอีกประการหนึ่งก็คือ สามารถรวมตัวกับโลหะอื่นให้โลหะผสมที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายประการ สมบัติที่ไม่ดีของอะลูมิเนียมอย่างเดียวคือพิกัดความยืดหยุ่น (Limit Elastic) ต่ำ ทำให้การใช้งานต้องอยู่ในขอบเขตจำกัดอะลูมิเนียมใกล้เคียงกับทองแดง คือการเป็นสื่อการนำความร้อน และไฟฟ้า โดยการนำเอาอะลูมิเนียมไปใช้งานส่วนใหญ่ คือ ทางด้านการขนส่ง เช่น รถยนต์ เครื่องบิน รถบรรทุก ตู้รถไฟ เรือทะเล จักรยาน ทางด้านภาชนะ เช่นกระป๋องฟอยล์ ทางด้าน งานก่อสร้างเช่นหน้าต่าง ประตู รางข้าง ลวด (JIS HAND BOOK, 1998)

2.2 ซิลิคอน (Silicon)

ซิลิคอน มีสารกึ่งตัวนำแตกต่างกันหลายชนิด แต่ซิลิคอนเป็นส่วนประกอบของทรายเป็นที่รู้จักกันแพร่หลายมากที่สุด ซิลิคอนสามารถทำให้โตเป็นผลึกขนาดใหญ่ และตัดออกเป็นแผ่นบาง (Wafer) สำหรับทำชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซิลิคอนบริสุทธิ์ไม่ค่อยมีประโยชน์มากนักดังนั้นผู้ผลิตจึงเพิ่มส่วนผสมด้วยฟอสฟอรัส โบรอน หรืออย่างอื่น

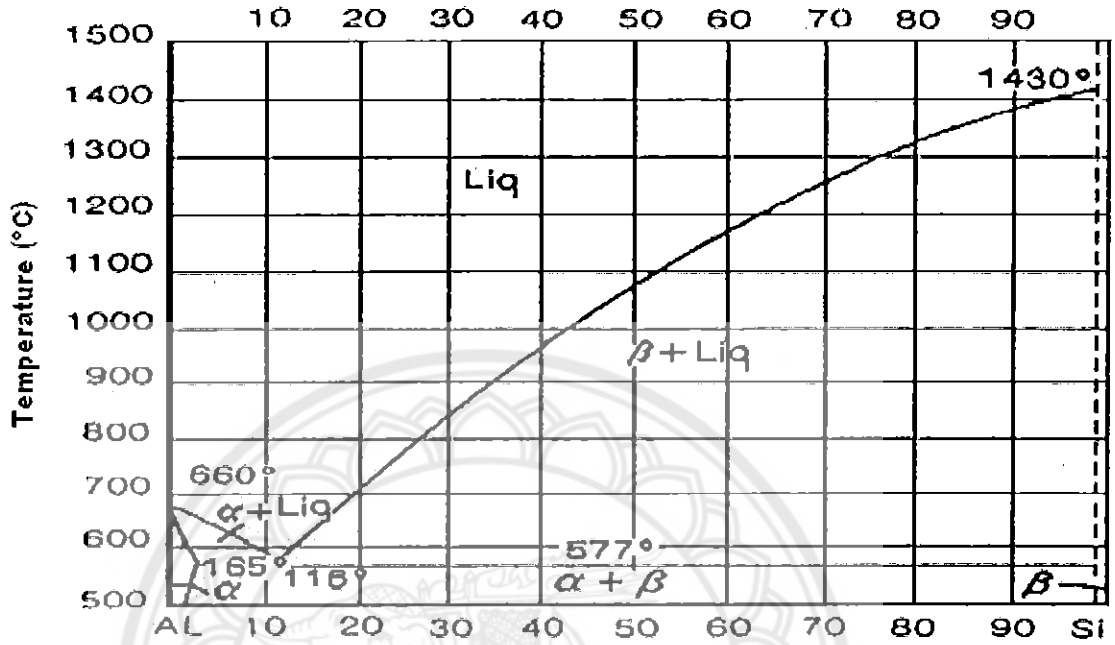
โครงสร้างอะตอมของซิลิคอนคล้ายกับเพชร แต่มีออกซิเจนอยู่ระหว่างคาร์บอนเป็นโครงสร้างผลึกร่างตาข่าย ซิลิคอน เป็นธาตุเคมีในตารางธาตุ ที่มีสัญลักษณ์ Si และเลขอะตอม 14 เป็นธาตุกึ่งโลหะแบบเตตระวาเลนต์ (คือมีวาเลนซ์เป็น 4) ซิลิคอนทำปฏิกิริยาน้อยกว่าธาตุที่คล้ายกัน คือ คาร์บอน เป็นธาตุที่มีมากที่สุดในเปลือกโลกเป็นอันดับ 2 มีปริมาตร ร้อยละ 25.7 โดยน้ำหนัก ปรากฏในดินเหนียว เฟลด์สปาร์ (Feldspar) หินแกรนิต ควอร์ตซ์ และทราย ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของซิลิคอน ไดออกไซด์ ซิลิกา และซิลิเกต (สารประกอบที่ประกอบจากซิลิคอน ออกซิเจน และโลหะ) ซิลิคอน เป็นส่วนประกอบหลักของแก้ว ซีเมนต์ เซรามิก อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่ และซิลิโคน ซิลิคอนใช้เป็นสารกึ่งตัวนำอย่างแพร่หลาย โดยมีสมบัติทางฟิสิกส์ดังต่อไปนี้ (มนัส, 2541)

- ความหนาแน่น (20 องศาเซลเซียส)	2.57 g/cm³
- จุดหลอมเหลว	1,415 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิกลายเป็นไอ	2,600 องศาเซลเซียส
- น้ำหนักอะตอม	28.06

2.3 อะลูมิเนียมผสมซิลิคอน

การผสมซิลิคอนในอะลูมิเนียมจะช่วยให้อะลูมิเนียมมีความสามารถในการไหลที่ดีขึ้นซึ่งส่งผลให้สามารถหล่อชิ้นงานที่มีลักษณะซับซ้อน หรือชิ้นงานที่มีขนาดค่อนข้างบางได้ การที่ความสามารถในการไหลดีขึ้นนั้นเป็นเพราะเมื่อซิลิคอนที่ละลายในอะลูมิเนียมมีปริมาณสูงขึ้นจุดเริ่มต้นการแข็งตัว (Liquidus) ของอะลูมิเนียมจะมีค่าต่ำลงนั่นเอง ส่วนการผสมธาตุอื่นๆ ลงในอะลูมิเนียมนั้นสามารถปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียมให้ดีขึ้นได้ แต่ในทางกลับกันก็จะส่งผลให้เกิดผลเสียด้วยเช่นกัน เช่น การเติมทองแดงลงไปในปริมาณที่กำหนดก็สามารถทำให้อะลูมิเนียมสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วย

กระบวนการทางความร้อน แต่ผลเสียที่เกิดขึ้นคือเพิ่มโอกาสการเกิดการแตกร้อน (Hot Tear) และความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนลดลง



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลธาตุ อะลูมิเนียม - ซิลิคอนหล่อผสม

ที่มา: JIS HAND BOOK (1998)

จากแผนภาพสมดุล รูปที่ 2.1 อธิบายได้ว่า ซิลิคอน มีคุณลักษณะหลายประการที่แตกต่างกับอะลูมิเนียม โดยเฉพาะโครงสร้างระบบผลึก และจุดหลอมเหลว ดังนั้นการรวมตัวระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิคอนจึงมีขอบเขตจำกัดมาก โดยซิลิคอนจะละลายให้สารละลายของแข็งกับอะลูมิเนียมได้สูงสุดร้อยละ 1.65 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส ให้เฟส α - อะลูมิเนียม และปริมาณของซิลิคอนจะละลายในเฟส α - อะลูมิเนียม ได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 544 องศาเซลเซียส จะเหลือปริมาณของซิลิคอนในเฟส α - อะลูมิเนียม เพียงร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จากแผนภูมิสมดุล รูปที่ 2.1 จะมีลักษณะเด่นชัดที่ซิลิคอนแยกตัวไม่ละลายในอะลูมิเนียม โดยให้ปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส และมีส่วนผสมของซิลิคอนร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก เฟส β - ซิลิคอน มีสมบัติที่แข็ง และเปราะถ้าในโครงสร้างมีการตกผลึกของเฟส β - ซิลิคอนขนาดใหญ่ จะเกิดมีลักษณะต่อเนื่อง มีผลทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงต่ำ และจะขาดสมบัติด้านความเหนียว อะลูมิเนียมผสมซิลิคอนเป็นโลหะผสม ที่มีจุดหลอมเหลวที่ไม่สูง ทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอน มีสมบัติทางด้านการหล่อที่ดี (High Castability) และมีอัตราการหดตัวต่ำ (Low Shrinkage) แต่ด้านความแข็งแรง และความเหนียวจะไม่สูงเทียบเท่าโลหะผสม อะลูมิเนียม - ทองแดง

โลหะผสมอะลูมิเนียม - ซิลิคอน ไม่สามารถเพิ่มความแข็งให้สูงได้ด้วยวิธีการอบชุบความร้อน การเพิ่ม หรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะผสม สามารถทำได้หลายวิธีคือ

- โดยการทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียม - ซิลิคอน มีอัตราการเย็นตัวภายในแบบหล่อให้สูงโดยการใช้แบบหล่อที่เป็นโลหะ เช่นเหล็กหล่อ

- ใช้เทคนิคการเพิ่มปริมาณของนิวเคลียสให้มีปริมาณมาก เพื่อลดขนาดของเกรนให้เล็กลง โดยการใช้นิวเคลียสเทียม (Heterogeneous Nucleation) คล้ายกับวิธีอินน็อคคูเลท (Inoculate) ที่ใช้กับเหล็กหล่อสีเทา

- ใช้เทคนิคโมดิฟิเคชั่น (Modification) ทำให้โลหะผสมเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากสภาพหลอมเหลว โดยใช้โซเดียมประมาณร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก บรรจุในภาชนะที่เป็นอะลูมิเนียมจุ่มลงในโลหะหลอมเหลวก่อนเทลงแบบหล่อ ซึ่งจะมีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวต่ำลงมาอยู่ที่อุณหภูมิ 564 องศาเซลเซียส และจุดยูเทคติคจะเคลื่อนไปทางขวาไปอยู่ที่ส่วนผสมซิลิคอนร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก (JIS HAND BOOK, 1998)

2.4 ลักษณะโครงสร้างของอะลูมิเนียมผสมซิลิคอน

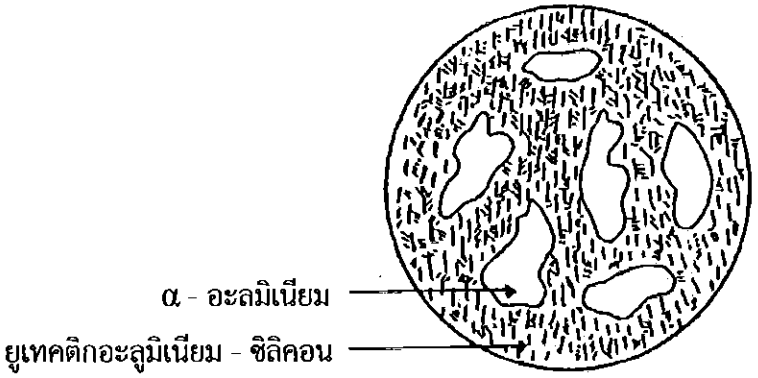
ในสภาพการเย็นตัวตามปกติในแบบหล่อทรายโดยไม่ได้ทำโมดิฟิเคชั่น แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

2.4.1 โลหะผสมประเภทไฮโปยูเทคติค

ซิลิคอนต่ำกว่าร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะแยกออก เป็น 2 ลักษณะ คือ

- โลหะผสมที่มีซิลิคอนต่ำกว่าร้อยละ 1.65 โดยน้ำหนัก โครงสร้างประกอบด้วย เฟส α - อะลูมิเนียม เฟสเดียว เป็นลักษณะของโลหะผสมในกลุ่มขึ้นรูปเย็น (Wrought)

- โลหะผสมที่มีซิลิคอนสูงกว่าร้อยละ 1.65 โดยน้ำหนัก แต่ไม่เกินร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก โครงสร้างประกอบด้วยเฟส α - อะลูมิเนียม มีโครงสร้างแบบยูเทคติค อะลูมิเนียม - ซิลิคอน อยู่รอบๆ ขอบเกรน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโลหะผสมยูเทคติค

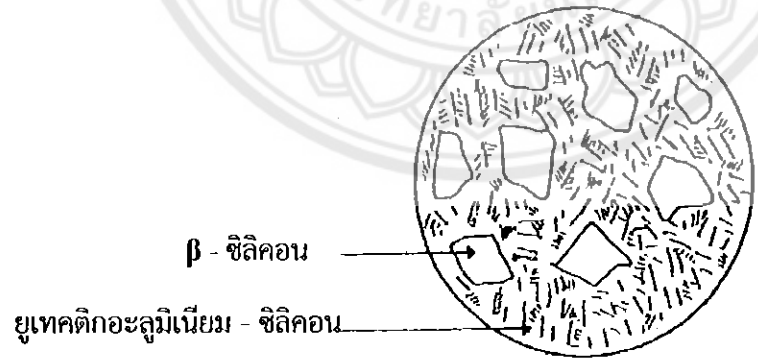
ที่มา: มนัส (2541)

2.4.2 โลหะผสมยูเทคติค

ซิลิคอนร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก โครงสร้างประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กของเฟส α - อะลูมิเนียม กับเฟส β - ซิลิคอน ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปเข็มเล็กๆ แทรกสลับกัน

2.4.3 โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติค

ซิลิคอนมากกว่าร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก โครงสร้างประกอบด้วยเฟส β - ซิลิคอน เป็นลักษณะรูปหลายเหลี่ยมกระจัดกระจาย โดยมีโครงสร้างแบบยูเทคติค อะลูมิเนียม - ซิลิคอน ล้อมรอบ ดังรูปที่ 2.3 (มนัส, 2541)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติค

ที่มา: มนัส (2541)

2.5 อะลูมิเนียมเกรด A 356

2.5.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับ A 356

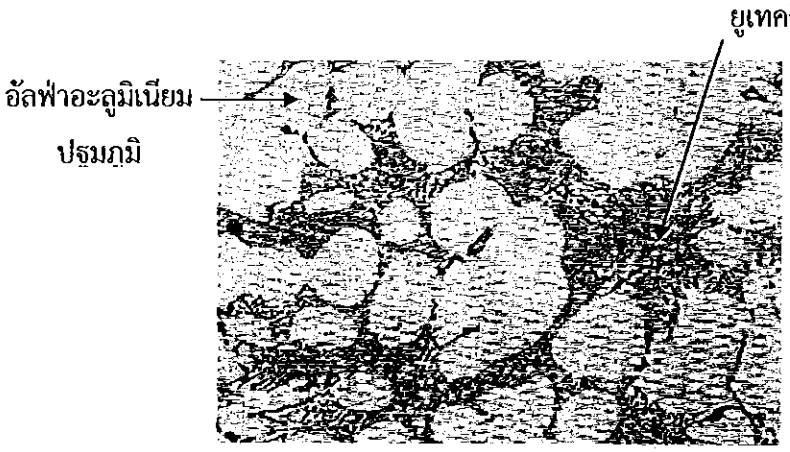
A 356 เป็นมาตรฐานที่เรียกตาม AA (Aluminum Association) เป็นค่ายอเมริกัน ส่วนหากเรียกเทียบเคียงกับญี่ปุ่น (JIS: Japanese Industrial Standard) คือ AC4C มีส่วนผสมเป็นร้อยละโดยน้ำหนักดังนี้ ซิลิคอน (Si) ร้อยละ 6.5 - 7.5 โดยน้ำหนัก ทองแดง (Cu) สูงสุดร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก แมกนีเซียม (Mg) ร้อยละ 0.30 - 0.45 โดยน้ำหนัก เหล็ก (Fe) สูงสุดร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก สังกะสี (Zn) สูงสุดร้อยละ 0.07 โดยน้ำหนัก และแมงกานีส (Mn) สูงสุดร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนัก

อะลูมิเนียมเกรด A 356 มีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้โดยกรรมวิธีทางความร้อนแบบการบ่มแข็ง (Precipitation Hardening หรือ Age Hardening) นอกจากนั้นแล้วยังมีโอกาสเกิดการแตกร้าวในขณะร้อนหลังจากการหล่อที่ต่ำ ดังนั้นอะลูมิเนียมเกรดนี้จึงสามารถนำไปผลิตโดยใช้ทั้งแบบหล่อทราย และแบบหล่อถาวรได้

จากแผนภาพสมดุลรูปที่ 2.1 อธิบายได้ว่า ซิลิคอนที่ร้อยละ 6.5 - 7.5 มีการรวมตัวกับอะลูมิเนียมที่อะลูมิเนียมร้อยละ 92.5 - 93.5 ที่อุณหภูมิบระมาณ 640 องศาเซลเซียส โดยซิลิคอนจะละลายให้สารละลายของแข็งกับอะลูมิเนียมได้สูงสุดร้อยละ 1.65 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส

2.5.2 โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด A 356

อะลูมิเนียมผสมเกรด A 356 มีการเปลี่ยนแปลงโดยการเพิ่มโซเดียมร้อยละ 0.025 โดยน้ำหนัก จะทำให้เกิดการละลายโครงสร้างยูเทคติคจากการหล่อ และอนุภาคของซิลิกอนในยูเทคติคจะมีขนาดเล็กกว่า และมีมุมน้อยลง วิธีการแก้ไขดังกล่าวบางครั้งจะเป็นการปรับปรุง สมบัติทางกลของการหล่อทราย ที่มีการแข็งตัวอย่างช้าๆ การปรับปรุงในลักษณะพิเศษของทรายทั้งสอง และการหล่อแบบหล่อถาวร (Permanent Mold) จะเกิดการผลิตอนุภาคซิลิกอนเล็กลง การรบกวนน้อยลงกับการไหลของน้ำโลหะ ในระหว่างการแข็งตัว ดังนั้นผลลัพธ์อะลูมิเนียม ที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยใส่โซเดียมในการผลิตทำให้ได้ผลผลิตที่ดีกว่าและช่องว่างเล็ก ๆ (Micro Shinkage) ระหว่างเดนไดรท์น้อยลงมากกว่าอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ปรับปรุง (JIS HAND BOOK, 1998)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางจุลภาค ของอะลูมิเนียมผสม A 356

ที่มา : JIS HAND BOOK (1998)

จากรูปที่ 2.4 อธิบายได้ว่าในแถบโครงสร้างที่เป็นสีขาว คืออัลฟ่า-อะลูมิเนียม ซึ่งอะลูมิเนียมจะเป็นเฟสแรกที่เกิดขึ้น ส่วนในแถบโครงสร้างที่เป็นสีเทาคือซิลิคอน เฟสนี้จะเกิดที่หลังอะลูมิเนียม และอีกเฟสหนึ่งที่เป็นสีขาวผสมดำคือยูเทคติกอะลูมิเนียมผสมซิลิคอน เฟสนี้เป็นเฟสที่เกิดหลังสุด ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างเป็นยูเทคติค โดยใช้แบบหล่อชนิดถาวร (Permanent Mould Casting)

2.6 อุณหภูมิการเท (Pouring Temperature)

อุณหภูมิเทมีผลต่อการเติมเต็มของชิ้นงาน คือเมื่ออุณหภูมิเทต่ำเกินไปจะทำให้เกิดน้ำอะลูมิเนียมเข้าไม่เต็มแบบ และข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานหล่อ ยิ่งกว่านั้นแก๊สที่ถูกปล่อยจากน้ำโลหะไม่มีเวลาพอที่จะระบายออกสู่บรรยากาศ ทำให้เกิดรูพรุนในงานหล่อ

เมื่ออุณหภูมิเทหล่อสูงเกินไป การรั่วของน้ำโลหะ การขยายตัวของแบบหล่อ และการไหม้ของทรายจะเกิดขึ้น ดังนั้นเราควรเลือกใช้อุณหภูมิเทหล่อที่เหมาะสม โดยการพิจารณาจากขนาด รูปร่าง และความหนาของงานหล่อ

อุณหภูมิเทหล่อสำหรับงานหล่อที่มีขนาดบาง และควรเทสูงขึ้น อุณหภูมิเทหล่อก็จะต้องสูงด้วยเช่นกัน เพราะว่าระยะทางที่น้ำโลหะไหลมีความยาว ดังนั้นจึงเกิดการลดอุณหภูมิ น้ำโลหะนี้เมื่อกลายเป็นของแข็งจะปนกับสิ่งเจือปนในโลหะ (Slag) ทำให้เกิดรูพรุนในโลหะในงานหล่อโดยถ้าอุณหภูมิของน้ำโลหะสูง สิ่งเจือปนเหล่านี้และฟองอากาศจะถูกรวมไว้ใน ช่องป้อนเติมน้ำโลหะ (Riser) (บัญชิต, 2527)

2.7 การหล่อโลหะ (Casting)

การหล่อโลหะ หมายถึงการขึ้นรูปโลหะโดยการนำเอาโลหะมาหลอมเหลวแล้วเท หรือฉีดเข้าสู่แบบหล่อ (Mold) หรือแม่พิมพ์ (Die) เมื่อโลหะแข็งตัวก็จะได้ชิ้นงานที่มีรูปร่าง ตามต้องการ ประกอบด้วยการเทน้ำโลหะลงในแบบที่ทำไว้เป็นรูปร่างต่างๆ แล้วปล่อยให้น้ำโลหะแข็งตัว จากนั้นจึงเอาชิ้นงานมาตกแต่ง หรือนำไปผ่านขบวนการทางความร้อนจึงจะได้ชิ้นงานสำเร็จที่จะนำไปใช้งานต่อไป ขนาดของชิ้นงานจะมีขนาดตั้งแต่น้ำหนักน้อยๆ ไปจนถึงขนาดใหญ่ที่มีน้ำหนักเป็นหลายตัน สมบัติของชิ้นงานหล่อจะเกี่ยวพันกับธรรมชาติของโลหะที่จะนำมาหล่อ ชนิดแบบหล่อ ขนาด รูปร่างของชิ้นงานหล่อ และอัตราการเย็นตัวเป็นอย่างมาก กระบวนการของการหล่อโลหะจะมีขั้นตอนการทำงานมากไปกว่าการเพิ่มความร้อนจนโลหะหลอมละลายแล้วนำโลหะไปเทลงแบบ โดยทั่วไปจะมีการเติมโลหะชนิดอื่นลงไปผสม และยังมีวิธีการขจัดสารมลทินแปลกปลอมเข้ามาเกี่ยวข้องอีกด้วย

กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีการหล่อโลหะ คือการอบชุบโลหะ (Heat Treatment) การชุบเคลือบผิว (Surface Treatment) และการเชื่อม (Welding & Joining) การทำงานหล่อมีขั้นตอนการทำที่แตกต่างกันไปตามชนิดของแบบหล่อ แบบที่ใช้ในงานหล่อมีหลายชนิด แยกได้ 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ แบบหล่อทราย และแบบหล่อถาวรซึ่งแบบหล่อทรายก็จะแยกได้อีกหลายชนิด เช่นใช้ทรายชื้น ทราย CO_2 แบบหล่อเปลือกหรือที่เรียกกันว่า Shell Molds ส่วนแบบหล่อถาวร เช่นแบบหล่อที่ใช้กับกรรมวิธีการหล่อโดยใช้ความดัน

ทรายที่นำมาใช้ในการทำแบบหล่อทรายมีหลายชนิด ชนิดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือ ทรายชื้น (Green Sand) เพราะราคาถูก ใช้งานได้หลากหลาย แต่ต้องมีการควบคุมสมบัติของทรายให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะ ขนาด และลักษณะของชิ้นงานเพราะว่าการใช้ทรายทำแบบหล่อ มีโอกาสที่จะเกิดข้อบกพร่อง (Defects) ง่ายมาก ซึ่งจะมีข้อพิจารณาในการหล่อดังนี้ ขนาด ความหนา รูปร่าง ความซับซ้อนของงาน ราคา จำนวนที่ต้องการผลิต ความเรียบผิว และชนิดของโลหะ การหล่อโลหะทำได้หลายวิธี เช่นการหล่อในแบบหล่อทราย การหล่อในแบบหล่อเซรามิก การหล่อแบบฉีดหรือไดคาสท์ การหล่อเหวี่ยง การหล่อต่อเนื่อง

2.7.1 การทำแบบหล่อทรายชื้น (Green Sand Molding)

การทำแบบหล่อทรายชื้น เป็นวิธีที่ทำสืบต่อกันมานานแล้ว กรรมวิธีทำแบบโดย อาศัยความชื้นเป็นตัวช่วยให้แบบแข็งแรง Green ในที่นี้ หมายถึงความชื้นที่มีอยู่ในทรายหล่อ รวมไปถึงความหมายถึง แบบหล่อที่ยังไม่แข็งหรือไม่แห้ง วัสดุทำแบบประกอบด้วย ทราย ซิลิกา ผสมกับ ดินเหนียว ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน และความชื้น การทำแบบจะอาศัยหีบหล่อช่วยเป็นกรอบเพื่อให้แบบทรายสามารถคงรูปอยู่ได้ ซึ่งหีบหล่ออาจทำมาจาก โลหะหรือไม้ หีบจะประกอบด้วยหีบบน และหีบล่าง สำหรับงานทำแบบหล่อหนึ่งชุด การทำแบบโดยวิธีนี้ มีทั้งการทำโดยใช้เครื่องจักร และการตำแบบโดยใช้มือ วิธีการใช้เครื่องอาศัยการออกแบบให้เครื่องจักรมีแรงกระแทก และการสั่นสะเทือน

เพื่อช่วยให้ทรายอัดแน่น โดยกระสวน และไส้แบบ จะสร้างให้ติดกับแผ่นกระดาน ทรายที่ผสมแล้วจะเทลงมาโดยใช้ชุดอุปกรณ์ลำเลียงช่วย หรือใช้มือตักใส่ขึ้นกับการออกแบบวิธีการทำงาน

2.7.2 แบบหล่อชนิดถาวร (Permanent Mold Casting)

การผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีการหล่อในแบบหล่อชนิดถาวร (Permanent Mold Casting) เป็นกรรมวิธีที่มีความสำคัญมากขึ้นในปัจจุบัน โดยถ้าหากรวมกรรมวิธีการหล่อโดยใช้แรงดัน (Die Casting) ด้วยแล้ว จะพบว่าชิ้นส่วนคุณภาพสูงซึ่งเป็นที่ต้องการสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์นั้น จะมาจากกรรมวิธีการหล่อที่ต้องใช้แบบหล่อชนิดถาวร (Permanent Mold) ซึ่งทำมาจากโลหะทั้งสิ้น ปัจจัยที่ควบคุมการถ่ายเทความร้อนจากโลหะหลอมเหลวไปสู่แบบหล่อ และจะส่งผลต่อสมบัติของงานหล่อที่ได้ คือการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นผิวรอยต่อระหว่างชิ้นงานหล่อทั้งในสภาพที่เป็นของเหลว และสภาพที่กลายเป็นของแข็งแล้วกับแบบหล่อโลหะ ซึ่งจะสามารถวัดออกมาในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ (Coefficient of Heat Transfer at Metal/Mold Interface) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสดังกล่าวนี้มีปรากฏอยู่ในเอกสารอ้างอิงต่างๆ น้อยมาก ทั้งๆ ที่เป็นข้อมูลที่สำคัญ งานวิจัยเท่าที่สำรวจพบ หากจะต้องคำนวณเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทางความร้อนที่เกิดขึ้นในงานหล่อด้วยแม่พิมพ์แบบถาวร (ไม่ว่าแบบธรรมดา หรือแบบใช้แรงดันช่วยในการป้อนโลหะเหลวเข้าแบบก็ตาม) จะต้องทำการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสนี้เองทั้งสิ้น ไม่ว่าจะด้วยวิธีการคำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ หรือการคำนวณจากแบบจำลองทางกายภาพก็ตาม เหล่านี้เป็นอุปสรรคในการพัฒนากระบวนการ และการพัฒนาผลิตภัณฑ์

ในงานหล่อ คำว่า Permanent Mold หมายถึง แบบหล่อที่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกหลายๆ ครั้ง ซึ่งแตกต่างจากแบบหล่อที่ทำจากทราย ซึ่งจะต้องทำลายถึงจะสามารถเอาชิ้นงานหล่อออกมาได้ สำหรับแบบหล่อถาวร จะต้องออกแบบให้แยกออกจากกันได้เพื่อที่จะนำชิ้นงานหล่อออกมาหลังจากที่ปล่อยให้งานแข็งตัวสมบูรณ์แล้ว วัสดุที่ทำแบบหล่อ ส่วนมากจะใช้ เหล็กหล่อหรือเหล็กกล้า งานหล่อวิธีนี้ใช้ได้กับโลหะเกือบทุกชนิด แต่ส่วนมากจะนิยมใช้กับโลหะเบา เช่นลิเทียม เบริลเลียม โซเดียม แมกนีเซียม และอะลูมิเนียม แบบหล่อถาวร แบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ตามลักษณะการนำพาโลหะเหลวเข้าไปในโพรงแบบได้ดังนี้

2.7.2.1 แบบหล่อแบบใช้แรงดึงดูดของโลก (Gravity Permanent Mold)

การเทโลหะเหลวเข้าไปในแบบหล่อ โดยอาศัยแรงดึงดูดของโลก มีเทคนิคการเท 2 แบบ คือ Static Pouring วิธีนี้เทน้ำโลหะเข้าด้านบนลงไปในรูเทโดยตรง ทำคล้ายกับแบบหล่อทรายและอีกวิธี คือ Tilt Pouring วิธีนี้เทน้ำโลหะลงไปในแอ่งเท ที่วางในตำแหน่งแนวนอน และไหลเข้าไปในแบบหล่อโดยอาศัยแรงดึงดูดของโลก แบบจะอยู่ในลักษณะเอียง และหมุน ในตำแหน่งแนวดิ่ง ปกติแล้วแบบหล่อชนิดนี้จะให้ความเที่ยงตรงสูงกว่าแบบชนิดเปลือก ดังนั้นสำหรับงานหล่อชิ้นส่วนที่ทำจากโลหะเบา จะนิยมใช้วิธีนี้มากกว่าทำแบบหล่อเปลือก

2.7.2.2 แบบหล่อถาวรที่ใช้แรงดันต่ำ (Low-Pressure Permanent Mold)

แบบหล่อถาวรที่ใช้แรงดันต่ำ เป็นวิธีการผลิตงานหล่อโดยอาศัยใช้ความดันในปริมาณน้อยๆ (ใช้ประมาณ 5 ถึง 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ในการช่วยเติมน้ำโลหะเข้าไปในแบบ วิธีนี้ช่วยในการลดช่องว่างระหว่างการหล่อแบบทราย และการหล่อที่ใช้แรงดันสูงเข้าแบบพิมพ์

2.7.2.3 แบบหล่อถาวรที่ใช้แรงดันสูง (High-Pressure Die Casting)

แบบหล่อชนิดนี้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง โลหะที่ใช้กันมาก คือสังกะสี อะลูมิเนียม และแมกนีเซียม แรงดันที่ใช้ปกติประมาณ 5,000 psi หรือมากกว่า อัตราของการผลิตขึ้นกับขนาดของชิ้นงาน ลักษณะของแบบที่ซับซ้อน ความหนา และสมบัติของโลหะหล่อ

2.7.3 กลไกการแข็งตัวของน้ำโลหะ (Solidification Mechanism of Metal)

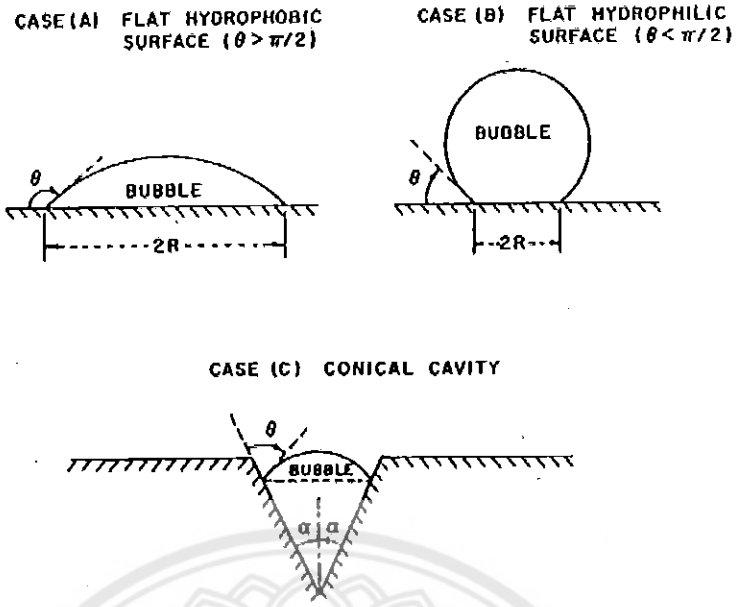
การแข็งตัวของน้ำโลหะ จะมีโครงสร้างอะตอมใกล้ชิดกันอย่างหนาแน่น และเป็นระเบียบ โดยอะตอมจะยึดเกาะกันด้วยพันธะไอออนิก (Ionic Bond) โดยมีระดับพลังงานอิสระ (Gibb s Free Energy) ต่ำ และเมื่อได้รับความร้อน หรือมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ระดับพลังงานอิสระมีค่าที่สูงขึ้นด้วย อะตอมจะมีการสั่นเกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้แรงดึงดูดระหว่างอะตอมของโลหะลดลง จากนั้นอะตอมจะกระจายตัวห่างออกจากกันมากขึ้นทำให้เกิดการขยายของก้อนโลหะ จนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงเกินจุดหลอมเหลวของโลหะนั้นๆ พลังงานอิสระของโลหะที่สภาวะของแข็งที่มีค่าสูงกว่าค่าพลังงานอิสระที่สภาวะของเหลว โลหะจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลว โดยการหลอมเหลวเพื่อรักษาพลังงานอิสระให้ต่ำลง อะตอมของโลหะจะเกาะกันอย่างหลวมๆ และเมื่ออุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น แล้วพลังงานอิสระของโลหะที่สภาวะของแข็งจะมีค่าต่ำกว่าพลังงานอิสระที่สภาวะของเหลว โลหะหลอมเหลวจะทำการลดพลังงานอิสระของระบบ โดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็ง ด้วยแรงขับสำหรับการแข็งตัว โดยอะตอมของโลหะ จะเกิดการสั่นน้อยลง และขยับเข้าใกล้ชิดกันมากขึ้นตามการลดลงของอุณหภูมิจนเข้ารวมกันเป็นจุดเล็กๆ ที่เรียกว่า นิวคลีไอ (Nuclei) เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นของการแข็งตัว จากนั้นอะตอมของโลหะรวมตัวกันมากขึ้นกลายเป็น นิวเคลียส (Nucleus) เมื่ออุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ จะเกิดการขยายตัวของนิวเคลียสออกไปเรื่อยๆ จนมีขนาดใหญ่ขึ้นกลายเป็นผลึก (Crystal) และเมื่อผลึกขยายตัวจนชนกันจะเรียกว่า เกรน (Grain) ขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่หรือมีขนาดเล็กนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของ นิวเคลียสเริ่มต้น ถ้าหากว่าปริมาณของนิวเคลียส เริ่มต้นมีจำนวนมาก จำนวนเกรนที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมาก ขนาดของเกรนมีขนาดเล็กและโครงสร้างเกรนละเอียด ในทางตรงกันข้ามหากปริมาณนิวเคลียสเริ่มต้นมีจำนวนน้อย จำนวนเกรนที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนน้อย การขยายตัวของเกรนนั้นจะขยายได้มากกว่า และส่งผลให้เกิดเกรนที่มีขนาดใหญ่ จะได้โครงสร้างที่หยาบ ซึ่งการเกิดนิวเครียสใหม่ในโลหะหลอมเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous nucleation) , กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous nucleation) ดังกล่าวดังนี้

2.7.3.1 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous nucleation)

กระบวนการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวเกิดจากอะตอมของโลหะชนิดเดียวกับโลหะหลอมเหลวที่มีหลายกลุ่มเกิดภาวะ Undercooling เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature) กลุ่มอะตอมเหล่านี้จะแยกตัวออกจากโลหะหลอมเหลว แล้วเคลื่อนที่เข้ารวมกันพร้อมกับมีพันธะยึดอะตอมเหล่านั้นให้กลายเป็นก้อนโลหะขนาดเล็ก โดยอะตอมที่เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มเล็กที่เรียกว่าเอมบริโอ (Embryo) ถ้าขนาดของเอมบริโอมีขนาดใหญ่กว่าขนาดวิกฤต ก็จะถูกละลายกลับสู่สภาพโลหะหลอมเหลวเช่นเดิมและการแข็งตัวจะไม่เกิดขึ้นได้เลยเพราะระบบดังกล่าวอยู่ในสภาพสมดุลของโลหะหลอมเหลว และของแข็ง พันธะโลหะที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะมีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของโลหะหลอมเหลวจะขัดขวางการแยกตัวของอะตอมออกจากโลหะเหลอมเหลว เป็นผลทำให้กระบวนการแข็งตัวแยกออกมาจากเนื้อโลหะมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีรัศมี r หน่วย ลอยในโลหะหลอมเหลว จะได้พลังงานทั้งหมดในนิวเคลียส พลังงานที่อะตอมใช้แยกตัวออกจากโลหะหลอมเหลวมาเกาะนิวเคลียสให้โตขึ้นจะมีความสัมพันธ์ต่อแรงตึงผิวของโลหะหลอมเหลว พลังงานทั้งหมดที่พื้นที่ผิวของโลหะแข็งที่แขวนลอยปะปนกับโลหะหลอมเหลวจะมีค่าเป็นบวกในขณะที่ พลังงานทั้งหมดในโลหะหลอมเหลวจะมีค่าเป็นลบ

2.7.3.2 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous nucleation)

เป็นกลไกการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวที่ไม่ได้เกิดจากนิวเคลียสของวัสดุเดียวกัน แต่เป็นกระบวนการเกิดการปนเปื้อนของโลหะหลอมเหลว ซึ่งการปนเปื้อนดังกล่าวเกิดจากการมีอนุภาคขนาดเล็กของวัสดุแปลกปลอมที่มีจุดหลอมละลายสูงกว่าโลหะหลอมเหลวทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสแทนนิวเคลียสเทียมเหล่านี้อาจมาจากผนังของแบบหล่อวัสดุทนไฟที่ใช้ทำผนังเตา และเบ้ารองรับโลหะหลอมเหลวที่กระแทกหลุดร่วง หรือการเติมธาตุอื่นลงไปก็ได้ อนุภาคของวัสดุเหล่านี้มักจะอยู่ในลักษณะสารแขวนลอย มีขนาดโตกว่ารัศมีวิกฤตทั้งเกิดผลึก และเป็นผลทำให้อะตอมของโลหะหลอมเหลวแพร่เข้ามารวมตัวและโตเป็นผลึกต่อไป โดยทั่วไปแล้วการอธิบายการเกิดกลไกของ Heterogeneous Nucleation สามารถอธิบายด้วยรูปของนิวเคลียสที่อยู่บนผนังแบบหล่อโดยการเกิดเฟสใหม่ ไม่ได้เกิดขึ้นภายในเนื้อโลหะของเฟสเดิม แต่จะเกิดบริเวณผิวสัมผัส (ณรงค์ศักดิ์, 2551)



รูปที่ 2.5 การเกิด Heterogeneous Nucleation บนผนังของแบบหล่อ

ที่มา: ณรงค์ศักดิ์ (2551)

2.8 การแข็งตัวของโลหะ

2.8.1 การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์

เมื่อเทน้ำโลหะที่บริสุทธิ์ลงสู่แบบแล้ว น้ำโลหะจะถ่ายเทความร้อนจนเกิดนิวเคลียส ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึก และจุดเริ่มต้นนั้นก็จะขยายตัวโตขึ้น ในขณะนั้นจุดเริ่มต้นใหม่ๆ ก็จะเกิดขึ้นด้วย ปฏิกิริยาต่างๆ ดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นทุกส่วนของน้ำโลหะ โดยจะเกิดบริเวณที่น้ำโลหะถ่ายเทความร้อนได้ก่อน ซึ่งได้แก่บริเวณที่น้ำโลหะสัมผัสกับแบบหล่อ และในที่สุดน้ำโลหะทั้งหมดก็จะกลายเป็นผลึก (Grains) หลายๆ ผลึก โดยมีขอบผลึก (Grain Boundary) แบ่งแยกผลึกทั้งหลายออกจากกัน ขนาดของผลึกจะขึ้นอยู่กับการเติบโตของผลึก และอัตราการเพิ่มของนิวเคลียสที่จุดเริ่มต้น คือถ้าอัตราการเติบโตของผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าอัตราการเพิ่มของนิวเคลียส ผลึกจะมีขนาดใหญ่ แต่ในทางตรงกันข้ามกัน ถ้าอัตราการเติบโตของผลึกช้ากว่าการเพิ่มของนิวเคลียสที่จุดเริ่มต้น ก็จะทำให้ผลึกนั้นมีขนาดเล็ก

2.8.2 การแข็งตัวของโลหะผสม

การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ที่กล่าวมานั้น จะเห็นว่าสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย แต่สำหรับโลหะผสมนั้นจะมีการแข็งตัวที่ซับซ้อน และแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ก็เพราะว่ามีการรวมตัวกันของโลหะ 2 ชนิด ซึ่งการรวมตัวกันนี้จะทำให้เกิดผลึกต่างๆ มากมาย โดยมีรายละเอียดดังนี้ หลังจากที่โลหะผสมที่เกิดจากการรวมกันของธาตุมากกว่า 1 ชนิดถูกเทลงสู่แบบหล่อโลหะ ผลึกของโลหะผสมที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากผลึกของโลหะบริสุทธิ์ ตัวอย่างเช่น โลหะผสมที่ประกอบด้วยธาตุ A และธาตุ

B เกิดการแข็งตัว ผลึกที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นผลึกของธาตุ A และธาตุ B แยกกันอยู่แต่จะเป็นผลึกที่ประกอบไปด้วยธาตุ A และธาตุ B รวมกันอยู่ในลักษณะที่ธาตุ A ถูกละลายเข้าไปในธาตุ B หรือธาตุ B ถูกละลายเข้าไปในธาตุ A และการรวมตัวกันทั้งสองลักษณะนั้นเรียกว่า สารละลายของแข็ง (Solid Solution) แต่ในบางครั้งอาจเกิดการรวมกันของธาตุ A และธาตุ B ซึ่งธาตุทั้งสองมีปริมาณใกล้เคียงกัน การรวมกันในลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า สารประกอบของโลหะ (Intermetallic Compound) นอกจากนั้นสารละลายของแข็ง และสารประกอบโลหะทั้ง 2 แล้ว ยังมีบางกรณีที่อาจจะพบได้ไม่บ่อยนัก คือกรณีที่ธาตุ A หรือธาตุ B จะปรากฏในสภาพผลึกบริสุทธิ์โดยไม่รวมตัวกัน

ดังนั้น จึงอาจจะสรุปได้ว่า โครงสร้างของโลหะผสมนั้นเกิดจากปฏิกิริยา 3 ลักษณะดังนี้ สารละลายของแข็ง สารประกอบโลหะ และโลหะบริสุทธิ์

2.8.3 โครงสร้างจากการแข็งตัวของชิ้นงานหล่อ

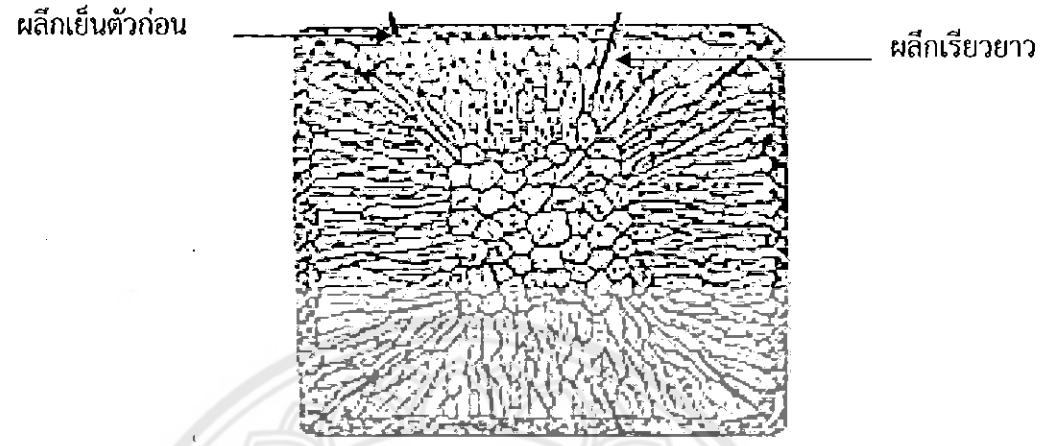
น้ำโลหะจากเตาหลอมเมื่อถูกเทลงสู่แบบหล่อ การแข็งตัวของน้ำโลหะก็จะเกิดขึ้น โดยชิ้นงานหล่อนั้นจะเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ และเมื่อความร้อนจากน้ำโลหะถูกส่งถ่ายไปยังแบบหล่อน้ำโลหะที่ส่วนนั้นจะเย็นตัวลงจนถึงจุดแข็งตัว และเกิดผลึก (Chill Crystals) ซึ่งผลึกเหล่านั้นจะมีจำนวนมากและในขณะเดียวกันบริเวณภายในของชิ้นงานหล่อจะเย็นตัวลงด้วยแต่การเย็นตัวจะเกิดขึ้นช้ากว่าภายนอก ดังนั้นผลึกจะขยายตัวจากจุดเริ่มต้นการเย็นตัวบริเวณภายนอกเข้าสู่ภายในของแบบหล่อ จึงทำให้ผลึกมีลักษณะเรียวยาว (Columnar) อีกประการหนึ่งก็คือ ในขณะหลอมละลายโลหะในเตาหลอมนั้น ย่อมมีสารมลทินเกิดขึ้น และสารมลทินเหล่านั้นจะรวมอยู่กับน้ำโลหะในขณะที่เทน้ำโลหะลงสู่แบบหล่อ และเมื่อน้ำโลหะเกิดการเย็นตัว สารมลทินก็จะแยกตัวออกมาโดยสารมลทินเหล่านั้นอาจจะรวมตัวกันอยู่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานหล่อ (Major Segregation) แต่ถ้าสารมลทินบางส่วนถูกผลักดันโดยเกรนที่กำลังเติบโตให้ออกไปอยู่บริเวณขอบเกรน ทั้งนี้ก็เพราะว่าเกรนทุกเกรนต่างก็เติบโต และผลักดันสารมลทินออกไปสู่ขอบเกรนทั้งสิ้น เราเรียกการรวมที่บริเวณนี้ว่า Minor Segregation ดังรูปที่ 2.7

จากสิ่งที่ได้กล่าวมาแล้ว อาจสรุปลักษณะสำคัญบางอย่างในการแข็งตัวของชิ้นงานหล่อดังนี้

- จะปรากฏผลึกลักษณะเรียวยาว (Columnar) อย่างชัดเจนในชิ้นงานหล่อก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิภายนอก และภายในชิ้นงานหล่อ ลักษณะเช่นนี้จะเกิดกับงานหล่อที่ผ่านการหล่อโดยใช้แบบหล่อที่ทำจากโลหะ หรืองานหล่อที่หลอมละลายโลหะที่อุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิเทมากเกินไป

- จะปรากฏผลึกลักษณะเรียวยาว (Columnar) ไม่ชัดเจน คือ เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากมีความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิภายนอก และภายในชิ้นงานไม่มากนัก ลักษณะเช่นนี้จะเกิดกับงานหล่อที่ผ่านการหล่อโดยใช้แบบหล่อทราย

อนึ่ง บริเวณตรงกลางของชิ้นงานหล่อจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่มาก และจะเกิดเป็นผลึกเล็กๆ รูปหลายเหลี่ยม (Fine - Axed Grain) ที่เติบโตได้หลายทิศทางจนทำให้ผลึกมีลักษณะเรียวยาวที่เกิดขึ้นภายนอกไม่สามารถขยายตัวออกไปได้



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเกิดผลึกของงานหล่อ

ที่มา: พรวสา (2551)

รูปที่ 2.7 ลักษณะการแยกตัวของสารมลทินอยู่ตามขอบเกรน และกึ่งกลางของแท่งโลหะ

ที่มา: พรวสา (2551)

2.8.4 การเกิดผลึกใหม่

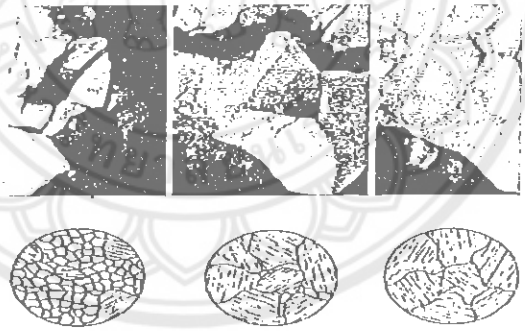
โลหะเมื่ออยู่ในสภาพที่หลอมละลาย อนุภาคของโลหะจะเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาเมื่ออุณหภูมิลดลงการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นจะลดความเร็วลงด้วยจนอนุภาคนั้นเข้าใกล้กัน และดึงดูดกันจนกลายเป็นนิวเคลียส นิวเคลียสจะขยายตัว กลายเป็นผลึก (Crystal) เล็กๆ และโตขึ้นจนกลายเป็นผลึกใหญ่ซึ่งเรียกว่า เกรน (Grains) การขยายตัวจะสิ้นสุดลงเมื่อปริมาณของโลหะ

หลอมเหลวหมดไป หรือไม่มีเกรนที่ขยายตัวนั้นไปชนกับเกรนข้างเคียงจนเกิดขอบเกรน (Grain Boundary) ขึ้น

ขนาดของผลึก หรือเกรนที่เกิดขึ้น จะพบว่าถ้าอัตราการเย็นตัวเร็ว จะปรากฏนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และการขยายตัวของแต่ละเกรนจะมีอัตราต่ำ เพราะแต่ละเกรนจะแย่งอะตอมของโลหะให้มาจับรวมตัวกับนิวเคลียสซึ่งมีจำนวนมากทำให้ได้โลหะที่มีเกรนขนาดเล็กละเอียด ในทางตรงกันข้ามถ้าอัตราเย็นตัวช้า ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นจะมีน้อย การขยายตัวของนิวเคลียสจะมีมาก ทำให้ได้โลหะที่มีเกรนขนาดใหญ่

2.8.5 การโตของผลึก

การเติบโตของผลึกได้กล่าวในเรื่องของการเกิดผลึก แต่จะนำมาสรุปเพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับการเติบโตของผลึก ในอันดับแรกจะเกิดมีจุดเริ่มต้นการตกผลึก แล้วผลึกก็จะโตขึ้นจากจุดเริ่มต้นไปในทุกทิศทาง ดังรูปที่ 2.8 ในขณะเดียวกันจุดเริ่มต้นใหม่ ๆ ก็จะเกิดขึ้น และในที่สุดน้ำโลหะทั้งหมด ก็จะกลายเป็นผลึก หรือเกรน ซึ่งจะเกิดมีขอบคั่นระหว่างผลึก เรียกว่าขอบผลึก หรือขอบเกรนขนาดของผลึกขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มของจุดเริ่มต้น และอัตราการโตขึ้นของผลึก ถ้าอัตราการโตของผลึกดีกว่าอัตราการเพิ่มของผลึก ก็จะเกิดผลึกขนาดใหญ่ และถ้าอัตราการเพิ่มของผลึกอัตราการโตของผลึกก็จะเกิดผลึกขนาดเล็ก (พรวสา, 2551)



รูปที่ 2.8 แสดงการโตของเกรน
ที่มา: พรวสา (2551)

2.8.6 ปัจจัยรูปร่าง (Shape Factor)

ปัจจัยรูปร่างเป็นจำนวนมิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ที่อธิบายรูปร่างของอนุภาคที่ไม่สมมาตร ปัจจัยรูปร่างจะคำนวณจากการวัดขนาด ได้แก่การวัดอนุภาคแบบ 2 มิติที่มาจากภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ ปัจจัยที่มีรูปร่างปกติที่ช่วงค่าจากศูนย์ถึงหนึ่งเท่ากับหนึ่งมักจะเป็นกรณีที่เหมาะ หรือสมมาตรสูงสุดเช่นวงกลม ทรงกลม สี่เหลี่ยม หรือก้อน ผลจากการคำนวณการหารูปร่างความกลมค่าที่คำนวณได้เท่ากับ 1 แสดงว่าขนาดของรูปร่างมีความกลม และถ้าผลจากการคำนวณได้ค่าที่น้อยกว่า 1 แสดงว่ามีความกลมที่ต่ำลง

ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมมีโครงสร้างพื้นของอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ จากกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมจะเทน้ำโลหะลงสู่แบบหล่อขณะที่น้ำโลหะเป็นของเหลวทั้งหมดทำให้การเย็นตัวของน้ำโลหะเป็นแบบปกติส่งผลให้เกิดโครงสร้างแบบเดนไดร์ท โดยลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะ และการโตของของแข็งนั้นเกิดในทิศทางตรงข้ามกับการถ่ายเทความร้อนในทิศทางต่างๆ ที่ไม่เท่ากันจนเกิดเป็นรูปร่างเดนไดร์ท เมื่อบริเวณส่วนปลายของของแข็งที่เกิดเป็นเดนไดร์ทมีความร้อนสะสมมากขึ้นก็จะไม่สามารถโตต่อไปได้อีก หรืออีกสาเหตุหนึ่งของการหยุดโตของเดนไดร์ท เนื่องจากเดนไดร์ทขยายตัวไปใกล้กับเดนไดร์ทอื่นที่อยู่ข้างเคียงทำให้เกิดการแย่งอะตอมกันทำให้การโตของเดนไดร์ทไม่สามารถดำเนินต่อได้ จึงทำให้ของเหลวส่วนที่เหลือเกิดเป็นโครงสร้างผสมของยูเทคติกอะลูมิเนียม - ซิลิคอน ที่หยาบอยู่ระหว่างแขนของเดนไดร์ท เนื่องจากแขนของเดนไดร์ทมีผลทำให้การกระจายตัวของยูเทคติกอะลูมิเนียม - ซิลิคอน ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การโตของยูเทคติกอะลูมิเนียม - ซิลิคอน ยังมีผลทำให้เดนไดร์ทหยุดโต เพราะยูเทกติกที่โตจะไปปิดกั้นการโตของเดนไดร์ท โครงสร้างที่ได้มีลักษณะเกรนกลม ทำให้นิวเคลียสไม่มีเวลามากพอที่จะเติบโตเป็นเดนไดร์ท

2.9 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

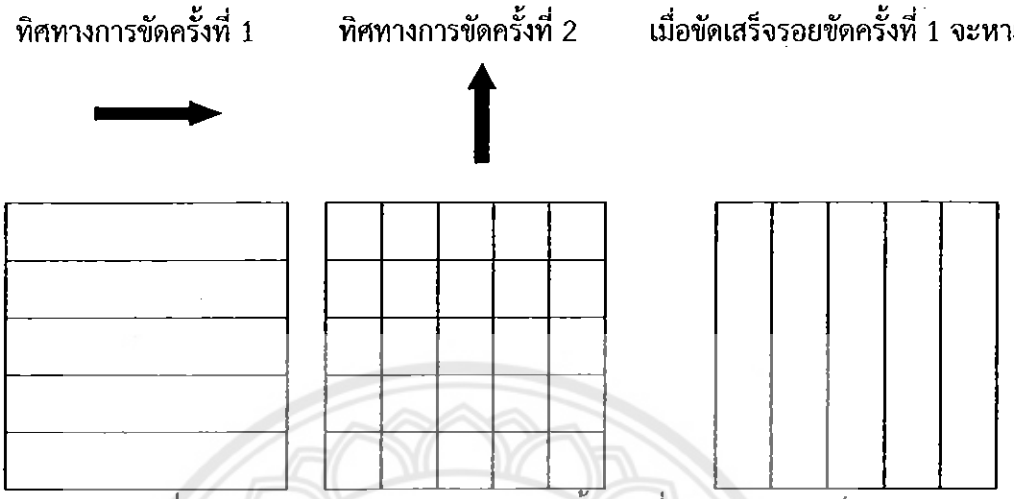
โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) คือโครงสร้างของโลหะที่มีกำลังขยาย 100 เท่าการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะเป็นการศึกษาถึงรูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัวของผลึก และลักษณะเกรน ในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะนั้น เพื่อนำไปใช้ในการเลือกวัสดุมาใช้งานให้เหมาะสมกับความต้องการเพราะวัสดุแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน

การที่จะทำให้วัสดุต่างๆ สามารถนำกลับมาใช้งานได้ตรงตามความต้องการได้นั้น เราต้องมาดูที่กระบวนการผลิตวัสดุชนิดนั้น และทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเนื่องจากโครงสร้างที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ คือโครงสร้างจุลภาคเท่านั้น เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุที่บการศึกษารูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัวของผลึก และลักษณะเกรนนั้น จึงต้องตัดชิ้นงานตามแนวที่การแล้วนำไปขัด กัดกรด โดยกรดจะกัดตามขอบเกรนรุนแรงกว่าส่วนอื่นของผลึก เพราะขอบเกรนมีเป็นส่วนที่มีข้อบกพร่องมากที่สุด หลังจากการกัดกรดแล้วขอบเกรนจะถูกกัดเป็นร่อง เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ การสะท้อนของลำแสงที่ตกกระทบเกรน และขอบเกรนหันเหออกนอกทิศทางเดิม

2.9.1 การขัดผิวของชิ้นงานที่ตรวจสอบ

ขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 180, 220, 360, 500, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนพื้นหนาเรียบแล้วขัดผิวของชิ้นงานที่ที่ตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะขัดนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรกออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดผิวของชิ้นงาน

ที่ตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย



รูปที่ 2.9 ลักษณะแนวทางการขัดผิวของชิ้นงานที่ตรวจสอบสลับเป็นตาราง

ที่มา: ชวลิต (2547)

2.9.2 การขัดผิวของชิ้นงานด้วยผงขัด

การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นงานที่ตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina) หรือแมกนีเซียม (Magnesium) โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05 - 0.3 ไมครอน การขัดผงขัดนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงผ้าสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

2.9.3 การกัดกรด

ชิ้นงานที่ตรวจสอบ ที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นถูกนำไปกัดด้วยกรด ซึ่งจะเป็นกรดอะไรนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ น้ำยาเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะชนิดต่างๆ ซึ่งแยกออกเป็น 2 ประเภท คือน้ำยาที่การตรวจสอบโครงสร้างของเหล็ก และกรดที่การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ซึ่งในการทดลองนี้เราใช้ อะลูมิเนียมผสม ในการตรวจสอบ กรดที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของกรดกัดชิ้นงานที่ตรวจสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก

กรดกัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โละที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid)	กรดไฮโดรฟลูออริก ½ - 2 มิลลิลิตรผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	อะลูมิเนียมผสม	จุ่มหรือเช็ดนาน 15 - 45 วินาที
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร	อะลูมิเนียมผสม	เช็ดด้วยสำลีนาน 10 - 15 วินาที

ที่มา: ชวลิต (2547)

2.9.4 กล้องที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

กล้องจุลทรรศน์ เป็นอุปกรณ์สำหรับมองดูวัตถุที่มีขนาดเล็กเกินกว่ามองเห็นด้วยตาเปล่า ศาสตร์ที่มุ่งสำรวจวัตถุขนาดเล็กโดยใช้เครื่องมือดังกล่าวนี้ เรียกว่า จุลทรรศน์ศาสตร์

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) เป็นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ที่มีต้นกำเนิดแสง อยู่ในช่วงคลื่นแสงที่มองเห็นได้ กำลังขยายตั้งแต่ 20 - 1,000 เท่า หรือศึกษาชิ้นงานตัวอย่างที่มีลักษณะเป็น 3 มิติ โดยการใช้กล้อง Stereomicroscope ซึ่งมีกำลังขยาย 10 - 75 เท่า (ชวลิต, 2547)

2.10 การวัดขนาดของเกรน

โครงสร้างจุลภาคของโลหะ (Microstructure of Metals) คืออะตอมหลายอะตอมเรียงตัวกันเป็นหน่วยเซลล์ (Unit Cell) และหน่วยเซลล์หลายหน่วยเรียงตัวกันเป็นเกรน (Grain) และเกรนหลายเกรน ประกอบกันเป็นชิ้นส่วนโลหะ ชิ้นส่วนโลหะหลายชิ้นส่วนประกอบกันเป็นเครื่องจักร การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะมีดังนี้

- ตัดชิ้นส่วนที่ต้องการ ขัดผิวให้เรียบด้วยกระดาษทราย โดยค่อยๆ เพิ่มความละเอียดของกระดาษทราย จนกระทั่งผิวของชิ้นงานเรียบไม่มีรอยขีดข่วน
- ขัดผิวละเอียดด้วยผงอะลูมินาและผ้าสักหลาด จนผิวชิ้นงานเรียบเหมือนกระจก
- นำชิ้นงานไปกัดกรด กรดจะกัดผิวหน้าชิ้นงานตามบริเวณขอบเกรน (Grain Boundary) ทำให้เกิดร่องที่ขอบเกรน นำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ วิธีที่ใช้หาขนาดของเกรนมี 4 วิธีคือ

2.10.1 Comparison Method

วิธีนี้เป็นการถ่ายภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยาย 100X แล้วนำไปเปรียบเทียบกับภาพทางโครงสร้างทางจุลภาคมาตรฐาน ซึ่งได้มีการเลือกภาพมาตรฐานที่มีขนาดเกรนใกล้เคียงกับขนาดเกรนของชิ้นงานที่ทดสอบมากที่สุด ซึ่งภาพมาตรฐานจะมีหมายเลขกำกับ เรียกว่า ASTM Grain Size Number ยิ่งมีหมายเลขมาก เกรนยิ่งมีขนาดละเอียด โดยใช้สูตรที่ใช้หาขนาดของโครงขอเกรน ดังนี้

$$N = 2^{n-1} \quad (2.1)$$

N = จำนวนเกรนในหนึ่งตารางนิ้วที่กำลังขยาย 100x

n = ASTM grain-size number

(ASTM = American Society of Testing Materials)

2.10.2 Planimetric Method

เป็นวิธีที่มีการวาดวงกลมลงบนโครงสร้างทางจุลภาค โดยให้วงกลมมีพื้นที่ 5000 mm^2 และเส้นผ่านศูนย์กลาง 79.8 mm ควรให้ภายในวงกลมมีเกรนอย่างน้อย 50 เกรนแล้วนับจำนวนเกรนภายในวงกลม หากเกรนถูกขอบวงกลมตัดผ่านให้นับเป็น ½ เกรน จากนั้นนำจำนวนเกรนไปคูณด้วย Jeffriesi Multiplier ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังขยายที่ใช้ถ่ายภาพดังตารางที่ 2.2 ดังนั้นค่าที่ได้จะเป็นจำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตร

ตารางที่ 2.2 ค่าของ Jeffriesi Multiplier

Magnification	Jeffries_ Multiplier
1x	0.0002
10x	0.02
50x	0.5
100x	2.0
200x	8.0
500x	50.0
1000x	200.0

ที่มา: คมสัน (2552)

สามารถคำนวณหา ASTM Grain Size Number ได้จากสูตร

$$G = 3.322 (\log N_A) - 2.95 \quad (2.2)$$

โดย N_A หาได้จากสูตร

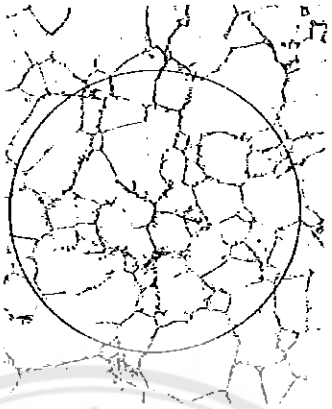
$$N_A = f (N_{inside} + N_{intercept} / 2) \quad (2.3)$$

NA = number of grain per mm^2

f = Jeffriesi Multiplier

N_{inside} = number of grains inside the test circle

$N_{intercept}$ = number of grains that intercept the test circle



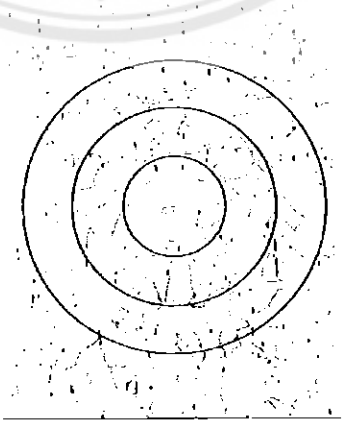
รูปที่ 2.10 ตัวอย่าง Planimetric Method

ที่มา: คมสัน (2552)

2.10.3 Intercept Method

วิธีนี้จะคล้ายกับวิธี Planimetric Method ตรงที่วาดรูปวงกลม แต่วิธีนี้จะใช้รูปวงลม 3 วง ดังรูปที่ 2.11 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 79.58 mm 53.05 mm 26.53 mm ตามลำดับ ซึ่งมีความยาวเส้นรวมเท่ากับ 500 mm พอดี แล้วนับจำนวนขอบเกรนที่ถูกตัดผ่าน หากเส้นตัดผ่านจุดที่เป็นรอยต่อระหว่าง 3 เกรน (Tripole Junction) ให้นับเป็น 1.5 แล้วนำผลรวมจำนวนขอบเกรนที่ได้หารด้วยความยาวแท้จริงที่กำลังขยายของภาพถ่าย ค่าที่ได้คือ P_l (Number of Point Intersections Per Unit Length of Test Line) สามารถคำนวณหา ASTM Grain Size Number ได้จากสูตร

$$G = -6.644 (\log 1/ P_l) - 3.288 \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.11 ตัวอย่าง Intercept Method

ที่มา: คมสัน (2552)

2.10.4 การหาขนาดด้วยวิธีแบบ Area

การหาขนาดด้วยวิธีนี้ จะเป็นการหาจากภาพโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่มีกำลังขยาย 200 เท่า โดยจะเป็นการวัดขนาดพื้นที่ของแต่ละเกรนภายใต้ขอบเขตพื้นที่ที่กำหนด จากนั้นใช้ขนาดพื้นที่ที่วัดได้ นำมาหาขนาดพื้นที่ของเกรน (Area) การหาขนาดของพื้นที่ที่ได้นั้น จะได้เป็นค่าตัวเลขหลายๆ ค่า เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยขนาดของพื้นที่ของเกรน และนำมาหาขนาดค่าความกลมของเกรน (Shape Factor) การหาค่าความกลมของเกรนที่ได้นั้น ได้เป็นค่าตัวเลขหลายๆ ค่า เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยขนาดค่าความกลมของเกรน (คมสัน, 2552)

2.11 การทดสอบความแข็ง

ความแข็ง (Hardness) คือสมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทานรอยกด อย่างไรก็ตามความแข็งอาจรวมถึงความต้านทานต่อการดัด การขีด การขัด และการตัด ความแข็งของวัสดุเกี่ยวพันกับการจับตัวของอะตอมและโมเลกุลภายในเนื้อวัสดุ เช่นเดียวกันกับความแข็งแรง ดังนั้นความแข็งมักจะเพิ่มเมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้นนั่นคือพวกโลหะ และเซรามิกจะแข็งกว่าพวกโพลิเมอร์

การทดสอบความแข็งมีอยู่หลายวิธี แต่ที่ใช้กันมากที่สุดมี 3 วิธี คือ

2.11.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)

วิธีการ คือใช้ลูกบอลเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm กดลงบนผิวเรียบของวัสดุที่จะวัด โดยใช้แรง 3000 kgF สำหรับวัสดุแข็ง และ 187.5 kgF สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลา 30 วินาที เป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (Indentation) ค่าความแข็งแรงแบบบริเนลล์

(Brinell Hardness Number) จะใช้สูตรคำนวณดังนี้คือ

$$Bhn = \frac{\text{แรงที่ใช้กด}}{\text{พื้นที่ของรอยบุ๋ม}} = \frac{P}{(\pi D/2)\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)} \qquad (2.5)$$

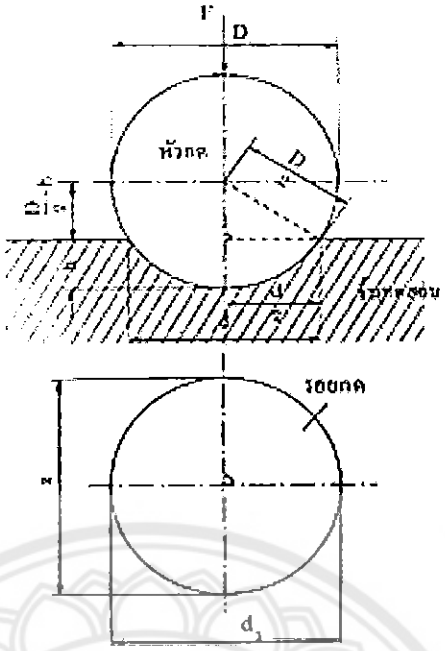
เมื่อ

Bhn = Brinell Hardness Number มีหน่วยเป็นแรง/หน่วยพื้นที่

P = แรงที่ใช้กด (มีหน่วยเป็น kgF)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล (Indenter) มีหน่วยเป็น mm

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด มีหน่วยเป็น mm



รูปที่ 2.12 ลักษณะการกด และขนาดของการกดที่เกิดขึ้น

ที่มา: ฐาปนีย์ (2550)

ตารางที่ 2.3 ชนิดของโลหะที่ใช้วัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

Diameter of Ball (mm.)	Load (kg.)			
	Steels and Cast Iron $F/D^2 = 30$	Copper and is Aluminum $F/D^2 = 10$	Aluminum $F/D^2 = 5$	Lead Tin and Their Alloys $F/D^2 = 1$
1	30	10	5	1
2	120	40	20	4
5	750	250	125	25
10	3,000	1,000	500	100

ที่มา: ฐาปนีย์ (2550)

หัวกดของบริเนลล์ มีอยู่ 2 ชนิด คือ

- Steels Ball หรือ Standard Ball ทำด้วยเหล็กกล้าผสมพิเศษ
- Tungsten Carbide Ball เป็นโลหะผสมพิเศษ

แรงกด (Load) และขนาดของหัวกด (Indenter) ขึ้นอยู่กับขนาด และความหนาของชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบหาความแข็งขนาดของแรงกด (Load) ขนาดของหัวกด (Indenter) และชนิดของโลหะที่ใช้วัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ ตามตารางที่ 2.3

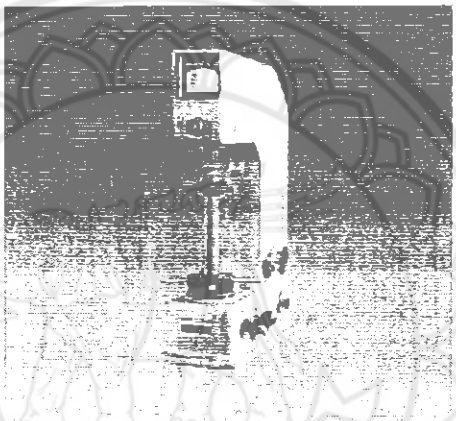
การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

- ชิ้นงานที่นำมาทดสอบจะต้องมีความหนาแน่นอย่างน้อย 10 เท่าของความลึกของรอยกด ส่วนมากจะใช้ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด

- ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของรอยกดแต่ละรอย หรือระยะห่างจากขอบชิ้นงานควรห่างอย่างน้อย 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด

- ผิวของชิ้นงานจะต้องเรียบสะอาด และขนาน เพื่อจะได้ค่าความแข็งที่ถูกต้อง

- ไม่เหมาะกับการวัดชิ้นงานหรือโลหะที่มีความแข็งเกิน 500 HB Standard Ball ไม่ควรใช้ชิ้นงานที่มีความแข็งเกิน 450 HB ถ้าหากชิ้นงานแข็งเกินควรใช้หัวกดแบบ Tungsten Carbide Ball



ว94 4727
ว5.
ว167ส0
2552

รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

ที่มา: ฐาปนีย์ (2550)

2.11.2 การทดสอบความแข็งแบบรอคเวล (Rockwell Hardness Test)

การทดสอบแบบนี้คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนลล์ แต่ใช้หัวกดเล็กกว่า และแรงน้อยกว่า ค่าของแรงที่ใช้ และชนิดหรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นกับสเกลของความแข็งแบบรอคเวลที่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่าวัสดุมีความแข็งมาก วิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อยคือ 10 kgF จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60 - 100 kgF ขึ้นอยู่กับขนาด และชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้อาจจะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบรอคเวลนี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุชนิดต่างๆ ได้มากกว่า สามารถวัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลล์วัดไม่ได้ การใช้งานสะดวกอ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่อง และเนื่องจากรอยกดมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ

2.11.3 การทดสอบความแข็งแบบวิคเกอร์ (Vickers Hardness Test)

การทดสอบแบบวิคเกอร์นี้คล้ายกับบริเนลล์ในแง่ที่ว่าค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่ต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปพีระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5 - 120 kgF ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ การคำนวณค่า Vickers Hardness Number (VHN) หรือ Diamond-Pyramid Hardness (DPH) ใช้สูตร (ฐาปนีย์, 2550)

$$DPH = \frac{1.8544F}{D^2} \tag{2.6}$$

โดยที่

F = น้ำหนักที่กด kgF

D = ความยาวเฉลี่ยของเส้นทะแยงมุม (mm)

1.8544 เป็นค่า 2 sin (θ/2) เมื่อ θ = มุมระหว่างหน้าตรงข้ามของเพชร ซึ่ง = 136 องศาเซลเซียส การทดสอบแบบนี้เหมาะกับตัวอย่างที่บาง และแข็งมากๆ

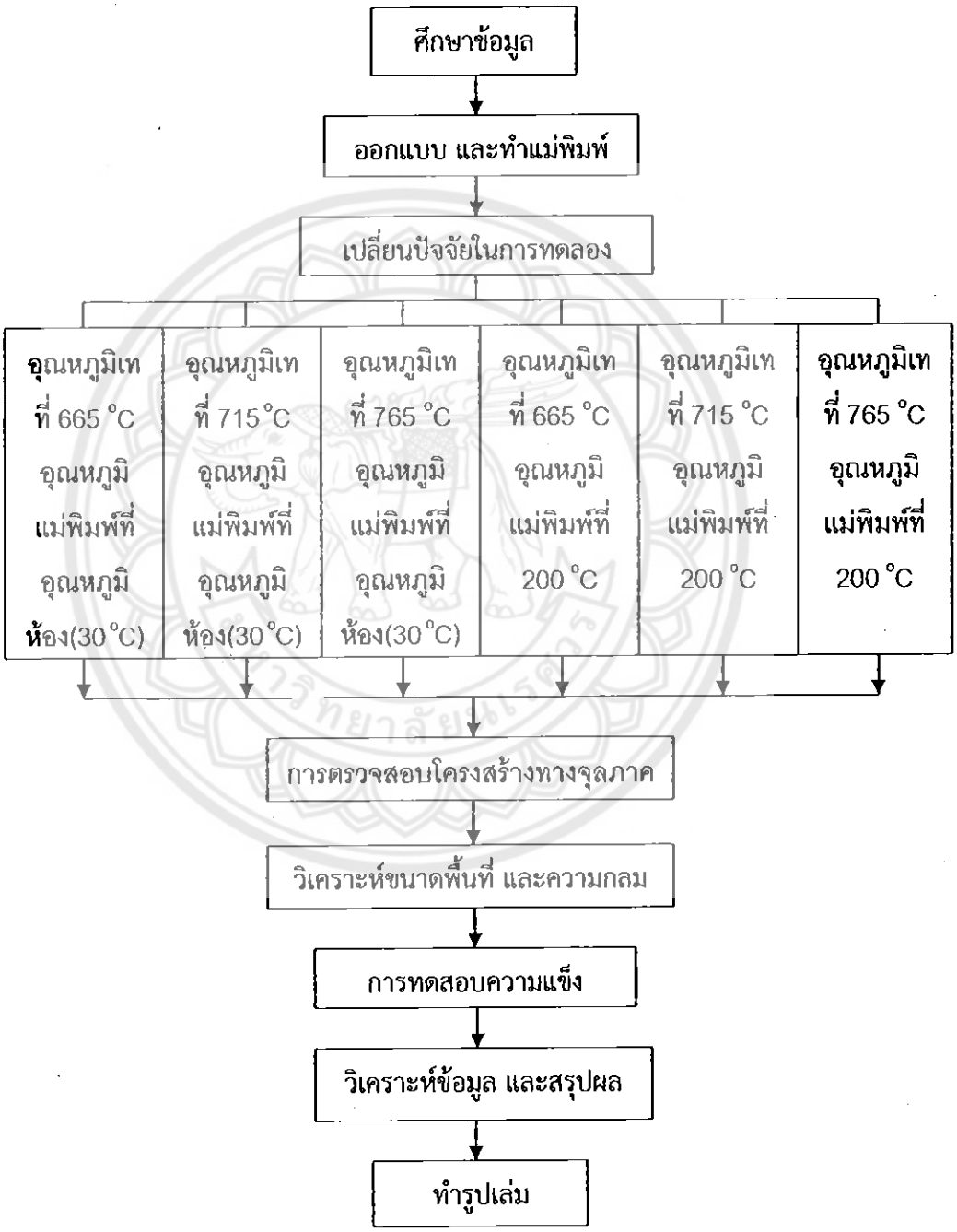
ตารางที่ 2.4 แสดงตัวอย่างค่าเปรียบเทียบความแข็งที่วัดโดยวิธีต่างๆ

Material	Brinell		Vickers	Rockwell		Shore
	Impression	BHN	Pyramid	Scale		
	dia, mm		Number	C	B	
Soft brass	-	60	61	-	-	-
Mild Steel	5.2	131	131	-	74	20
Soft Chisel Steel	3.95	235	235	22	99	34
White Cast Iron	3.00	415	437	44	144	57
Nitride Surface	2.25	745	1050	65	-	100

ที่มา: ฐาปนีย์ (2550)

บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน

โดยบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย เรื่อง อิทธิพลของอุณหภูมิแม่แบบ และอุณหภูมิเทต่อโครงสร้างทางจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม A 356



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ศึกษาข้อมูล

3.1.1 อุณหภูมิของแม่แบบ

ศึกษาอุณหภูมิของแม่แบบโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิ

3.1.2 อุณหภูมิเทของน้ำโลหะ

ศึกษาอุณหภูมิเทของน้ำโลหะโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิ

3.1.3 ความแข็งของอะลูมิเนียมผสม

ศึกษาเกี่ยวกับความแข็งที่ได้จากการหล่อแล้วไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแบบบริเนลล์

3.1.4 โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม

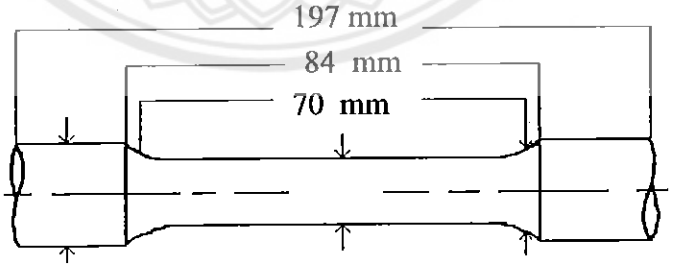
ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคโดยการไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.1.5 ขนาดของเกรน , ความกลมของเกรน

ศึกษาขนาดจากการคำนวณด้วยวิธีหาขนาดพื้นที่ของเกรน , ความกลมของเกรน

3.2 ออกแบบทำแม่พิมพ์

โดยแม่พิมพ์ที่ใช้เป็นแบบหล่อชนิดถาวร (Permanent Mold Casting) ที่ได้ตามมาตรฐาน ASTM B 108



รูปที่ 3.2 รูปชิ้นงานที่ได้จากการหล่อ ตามมาตรฐาน ASTM B 108

3.3 การเปลี่ยนปัจจัยในการทดลอง

3.3.1 ใช้อุณหภูมิเท 3 อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 665 , 715 , 765 องศาเซลเซียส

3.3.2 ใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ 2 อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) , 200 องศาเซลเซียส

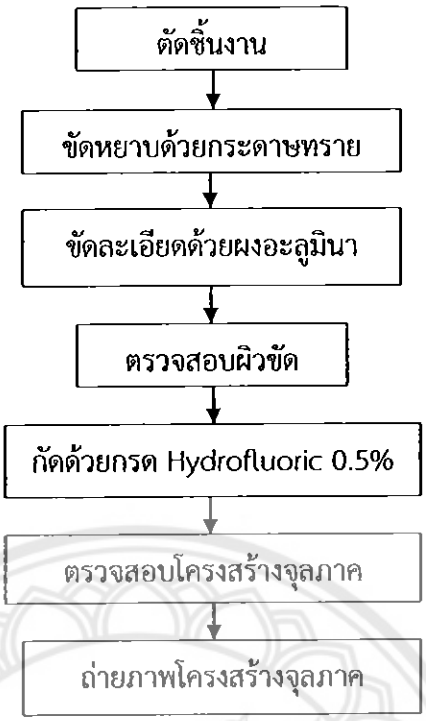
โดยจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียม A 356 อยู่ที่ 615 องศาเซลเซียส แต่การใช้อุณหภูมิในการเท ที่ 665 องศาเซลเซียส เพราะในกระบวนการหล่อต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวเพื่อให้สารต่างๆ ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ ถ้าพิจารณาในตาราง อุณหภูมิเทจะมีการเพิ่มทีละ 50 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียส ดังนี้

ตารางที่ 3.1 จำนวนชิ้นงานในการหล่อโดยเปลี่ยนอุณหภูมิเท และเปลี่ยนอุณหภูมิแม่พิมพ์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		ค่าความแข็ง	พื้นที่ของเกรน
อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)		
665	อุณหภูมิห้อง (30 °C)		
715	อุณหภูมิห้อง (30 °C)		
765	อุณหภูมิห้อง (30 °C)		
665	200		
715	200		
765	200		

3.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

เป็นการศึกษาโครงสร้างของโลหะ โดยส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ขั้นตอนการตรวจสอบดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.4.1 ตัดชิ้นงาน

โดยการนำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อ มาตัดส่วนตรงกลางของชิ้นงาน ตัดให้มีความหนา 2.5 เซนติเมตร

3.4.2 ขัดหยาบ

เริ่มต้นจากการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 , 220 , 360 , 500 , 600 , 800 , 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ

3.4.3 ขัดละเอียด

จากนั้นขัดละเอียดบนจานหมุนหุ้มด้วยกำมะหยี่ 2 ครั้ง ครั้งที่ 1 ใช้ผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน ครั้งที่ 2 ใช้ผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมครอน

3.4.4 ตรวจสอบผิวขัด

นำชิ้นงานที่ขัดจากกระดาษทรายไปล้างด้วยน้ำ เป่าให้แห้ง แล้วตรวจผิวงานด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า ถ้ายังเห็นรอยขีดอยู่ให้นำไปขัดละเอียดอีก ล้าง และเป่าให้แห้งแล้วตรวจผิวงานด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า จนกระทั่งไม่พบรอยขีด จึงนำไปกัดด้วยกรดต่อไป

3.4.5 กัดด้วยกรด Hydrofluoric

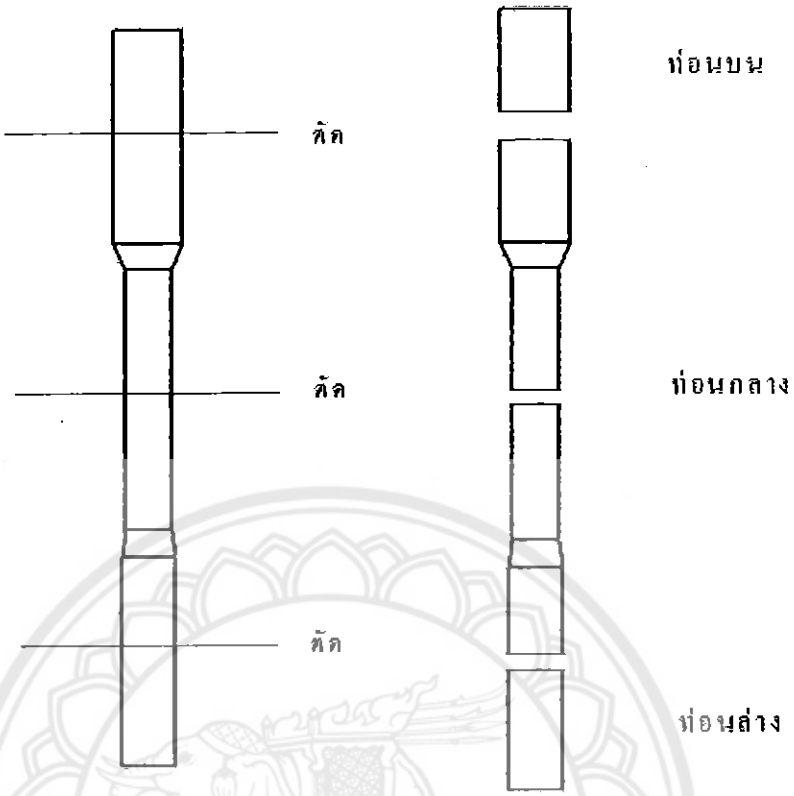
จึงทำการกัดด้วยกรด โดยจุ่มผิวงานในสารละลายร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก Hydrofluoric Acid นาน 15 วินาที

3.4.6 ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

3.4.6.1 ตัดชิ้นงาน

ทำการตัดส่วนเกินออก ดังรูปที่ 3.4 แล้วทำการตัดชิ้นงานเป็น 3 จุด คือ ตรงท่อนบนห่างจากด้านบนประมาณ 2.5 เซนติเมตร ท่อนกลางห่างจากด้านบนสุดประมาณ 9.5 เซนติเมตร ท่อนล่างห่างจากด้านล่างสุดประมาณ 2.5 เซนติเมตร เหตุที่ต้องตัดชิ้นงานออกเป็น 3 จุด เพราะว่าต้องการดูโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานให้ทั่วทั้งชิ้น ดังรูปที่ 3.5

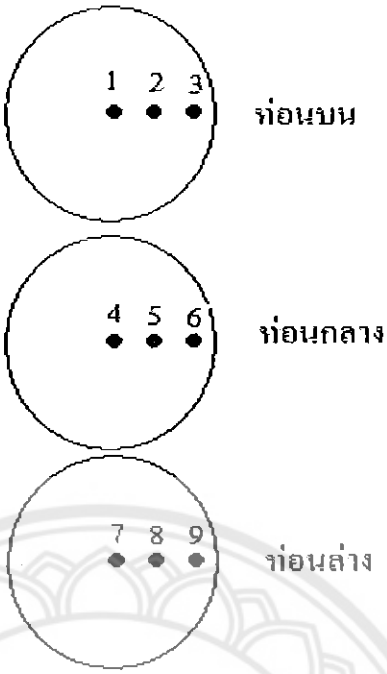
รูปที่ 3.4 ตัดส่วนเกินออก



รูปที่ 3.5 ตัดชิ้นงานก่อนที่จะนำไปขัด

3.4.6.2 ขัดชิ้นงาน

แล้วก็นำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่างๆ เมื่อขัดกระดาษทรายเสร็จแล้ว ทำการขัดชิ้นงานด้วยกำมะยี่ โดยใช้ผงอะลูมินาช่วยขัดจนชิ้นงานจนมันวาว ก็นำชิ้นงานไปล้างน้ำก่อน จากนั้นก็นำชิ้นงานไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก แล้วเป่าให้แห้งหลังจากนั้นก็นำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งในการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคนั้นทำการส่องที่ผิวชิ้นงานทั้งหมด 9 ตำแหน่ง ใน 1 ชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 จุดที่ใช้ในการส่องดูโครงสร้างทางจุลภาค

3.5 ตรวจสอบขนาดเกรน

โดยชิ้นงาน 1 ชิ้น ทำการตรวจสอบ 9 จุด จุดที่อยู่ตรงกลางของชิ้นงาน ขอบของชิ้นงาน และระหว่างตรงกลางกับขอบของชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.6 การหาขนาดของด้วยวิธีแบบ Area จะเป็นการวัดขนาดพื้นที่ของแต่ละเกรนภายใต้ขอบเขตพื้นที่ที่กำหนด จากนั้นใช้ขนาดพื้นที่ที่วัดได้ เพื่อหาขนาดพื้นที่ของเกรน และค่าความกลมของเกรน ดังนี้

3.5.1 ขนาดพื้นที่ของเกรน (Area)

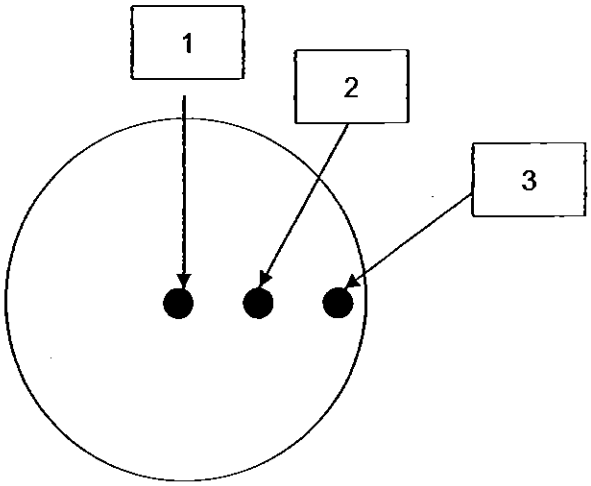
โดยการหาขนาดของพื้นที่ที่ได้นั้น จะได้เป็นค่าตัวเลขหลายๆ ค่า เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยขนาดของพื้นที่ของเกรน และจะนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาทำเป็นกราฟเพื่อเปรียบเทียบ

3.5.2 ค่าความกลมของเกรน (Shape Factor)

โดยการหาขนาดค่าความกลมของเกรนที่ได้นั้น จะได้เป็นค่าตัวเลขหลาย ๆ ค่า เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยขนาดค่าความกลมของเกรน และจะนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาทำเป็นกราฟเพื่อเปรียบเทียบ

3.6 การทดสอบความแข็ง

โดยนำมาวัดความแข็งโดยใช้แบบบริเนลล์ ชนิดหัวกดลูกบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm. กดลงบนผิวของวัสดุ โดยใช้แรง 500 kgF ระยะเวลาในการกด 30 วินาที จำนวนจุดทดสอบ 3 จุด บนชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.7 ได้ค่าความแข็งที่ได้จากทำการเปลี่ยนอุณหภูมิเท และอุณหภูมิแม่พิมพ์



รูปที่ 3.7 จุดที่ใช้ทดสอบความแข็ง

3.7 วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผล

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ อิทธิพลของอุณหภูมิแม่แบบและอุณหภูมิเทต่อโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม A 356 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและขนาดของโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน และอุณหภูมิของแม่พิมพ์กับอุณหภูมิเทที่มีความเกี่ยวข้องกัน และสรุปผลของข้อมูลที่ทำการทดลอง

3.8 ทำรูปเล่ม

โดยการนำข้อมูลที่ศึกษาและทดลองต่างๆ มาจัดทำเป็นรูปเล่มเพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่นำไปศึกษาต่อไป

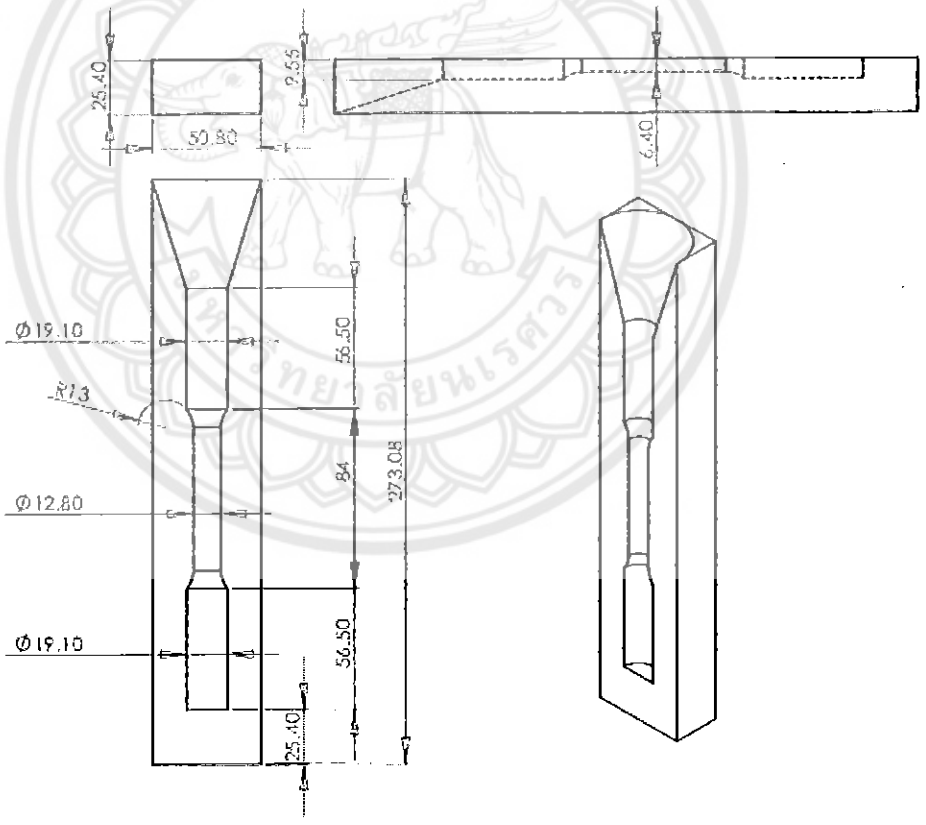
บทที่ 4
ผลการทดลอง และวิเคราะห์

4.1 การศึกษา และเก็บรวบรวมข้อมูล

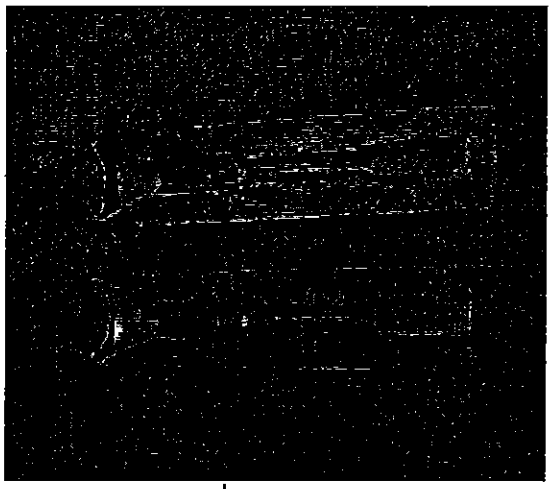
ในส่วนของการศึกษาข้อมูลนี้ ได้ผลจากการศึกษาข้อมูลคือ ได้ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับงานหล่อ อะลูมิเนียมเกรด A356 ทฤษฎีการแข็งตัวของโลหะ การหาค่าความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบ บริเนลล์ การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค และการหาขนาดของเกรน

4.2 ออกแบบ และทำแม่พิมพ์

โดยแม่พิมพ์ที่ใช้เป็นแบบหล่อชนิดถาวร (Permanent Mold Casting) ที่ได้ตามมาตรฐาน ASTM B 108



รูปที่ 4.1 การออกแบบขนาดแม่พิมพ์



รูปที่ 4.2 แม่พิมพ์

4.3 การเปลี่ยนปัจจัยในการทดลอง

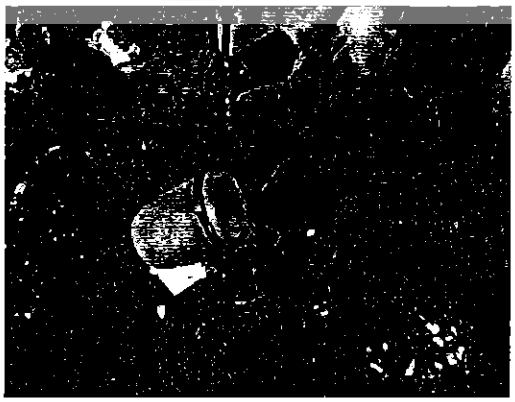
4.3.1 ใช้อุณหภูมิเท 3 อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส

4.3.2 ใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ 2 อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) , 200 องศาเซลเซียส โดยจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมเกรด A356 อยู่ที่ 615 องศาเซลเซียส แต่การใช้อุณหภูมิในการเทที่ 665 องศาเซลเซียส เพราะในกระบวนการหล่อต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลว เพื่อให้สารต่างๆ ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์

4.3.3 ทำการหล่ออะลูมิเนียมเกรด A356 หลังจากจัดเตรียมแม่พิมพ์ และเตาเบ้าหลอมเสร็จ ก็ทำการหล่ออะลูมิเนียมเกรด A356 ให้ได้อุณหภูมิตามที่จะใช้ในการทดลองคือที่อุณหภูมิ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส

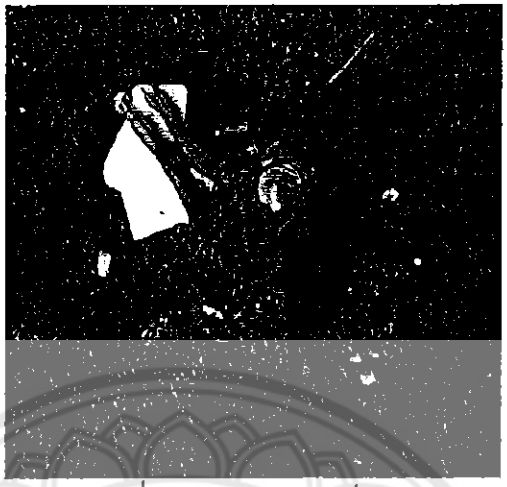
4.3.4 วัดอุณหภูมิเท โดยวัดอุณหภูมิเทก่อนการเทอะลูมิเนียมเกรด A356

4.3.5 เมื่อวัดอุณหภูมิได้อุณหภูมิตามที่ต้องการแล้วจึงทำการเทน้ำโลหะลงแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เทน้ำโลหะลงแม่พิมพ์

4.3.6 หลังจากที่เทอะลูมิเนียมเกรด A356 ลงแม่พิมพ์แล้ว รอจนแม่พิมพ์เย็นตัวลงแล้วนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จะได้ชิ้นงานออกมา และทำการทดลองแบบนี้จนครบทุกอุณหภูมิเท



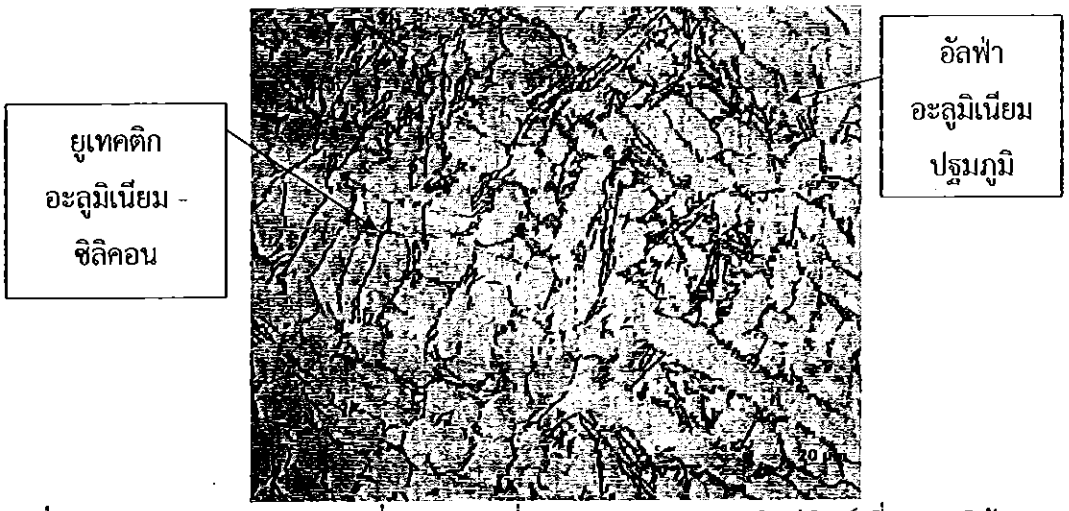
รูปที่ 4.4 รอแบบหล่อเย็นตัว

4.3.7 ได้ชิ้นงานออกมาแล้วจากนั้นทำการตัดส่วนเกินออกทำการตัดชิ้นงาน แล้วก็นำไปขัดต่อ

4.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

หลังจากที่ได้นำชิ้นงานไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก แล้วนำไปส่องกล้องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 200 เท่า ได้ส่องทั้งหมด 9 ตำแหน่งต่อ 1 ชิ้นงาน สาเหตุที่ส่องทั้งหมด 9 ตำแหน่ง เพราะว่าต้องการดูโครงสร้างของชิ้นงานให้ทั่วถึงทั้งหมด ถ้าส่องแค่จุดเดียวแล้วมาเป็นตัวแทนของพื้นที่ทั้งหมดอาจจะมีความคาดเคลื่อนได้ ด้วยเหตุนี้เราจะเลือกที่จะส่องดูโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานทั้งหมด 9 ตำแหน่ง ดังตารางที่ 4.1-4.6

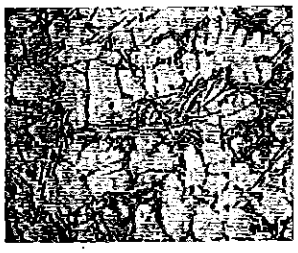
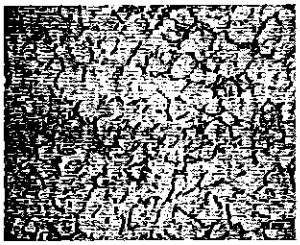
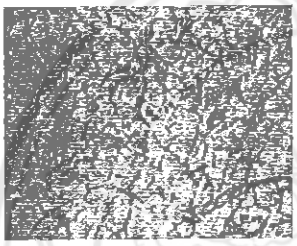
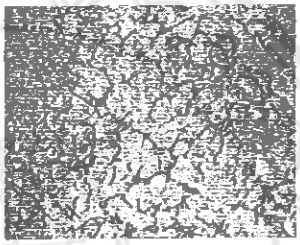
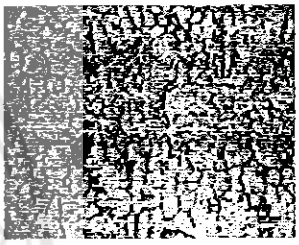
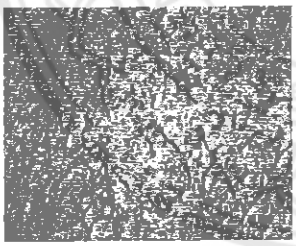
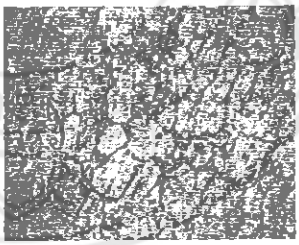
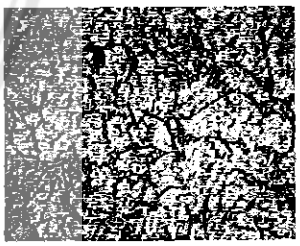
จากโครงสร้างของอะลูมิเนียมเกรด A356 สามารถอธิบายได้ว่า อุณหภูมิเท และอุณหภูมิแม่พิมพ์มีผลต่อ ลักษณะรูปร่าง ขนาด และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเกรด A356 โดยโครงสร้างของอะลูมิเนียมเกรด A356 มีลักษณะเป็น อัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีโครงสร้างเดนไดร์ท ที่มีลักษณะเป็นกิ่งไม้ และยูเทคติกอะลูมิเนียม - ซิลิคอน ที่เป็นการสลับกันของ อะลูมิเนียม และซิลิคอน และมีลักษณะเป็นแผ่นเรียวแหลมแทรกอยู่ระหว่างแขนของ อัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ



รูปที่ 4.5 อะลูมิเนียมเกรด A356 ที่อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 อุณหภูมิแม่พิมพ์ ที่อุณหภูมิห้อง

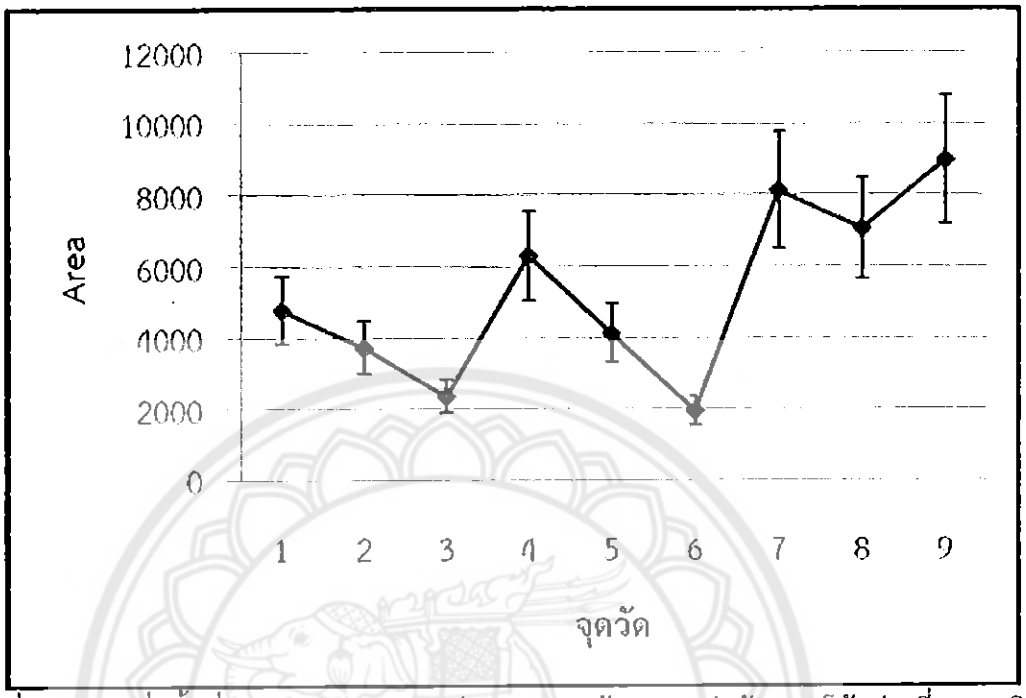
จากรูปที่ 4.5 จากโครงสร้างของอะลูมิเนียมเกรด A356 อธิบายได้ว่า ในโครงสร้างที่เป็นสีขาว คืออัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ซึ่งอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิเป็นเฟสแรกที่เกิดขึ้น และอีกเฟสหนึ่งที่เป็นสีขาวสลับดำ คือเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม - ซิลิคอน เฟสนี้เป็นเฟสที่เกิดขึ้นหลังสุดซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างเป็นยูเทคติค ซึ่งลักษณะเป็นอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีโครงสร้างเดนไดร์ทที่มีลักษณะเป็นกิ่งไม้ และยูเทคติกอะลูมิเนียม - ซิลิคอน ที่เป็นการสลับกันของ อะลูมิเนียม และซิลิคอน และมีลักษณะเป็นแผ่นเรียวแหลมแทรกอยู่ระหว่างแขนของอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ

ตารางที่ 4.1 โครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

ชิ้นบน	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
ชิ้นกลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
			
ชิ้นล่าง	ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
			

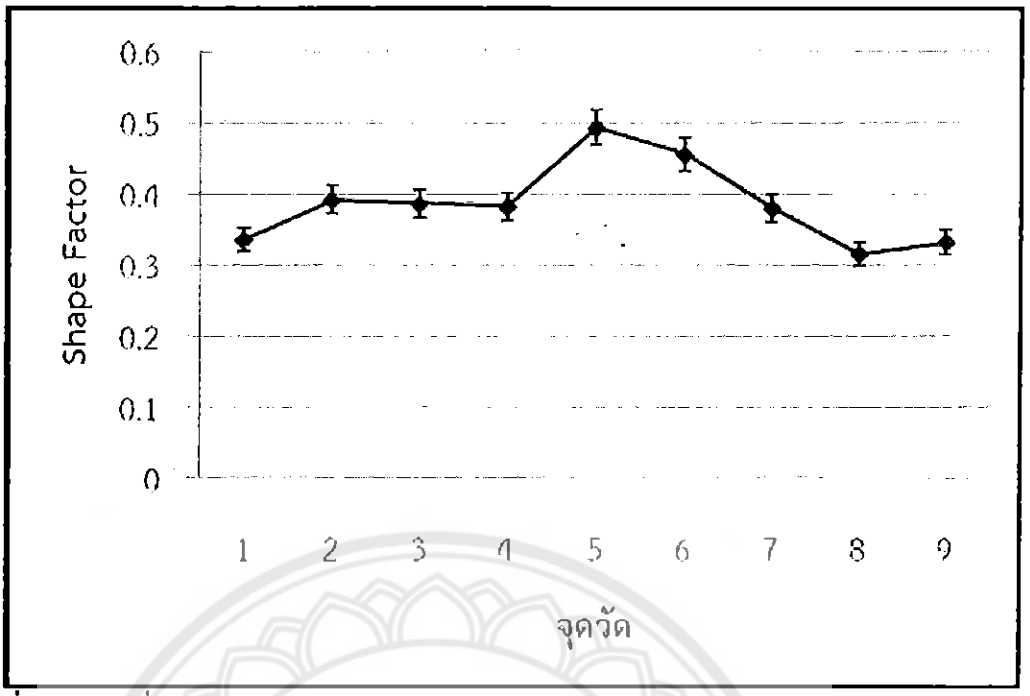
จากตารางที่ 4.1 รูปโครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคทั้ง 9 จุด อธิบายได้ว่า จุดที่ 1, 4, 7 มีโครงสร้างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ขนาดใหญ่ เพราะการแข็งตัวของน้ำโลหะเกิดขึ้นโดยชิ้นงานหล่อเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ และเมื่อความร้อนจากน้ำโลหะถูกส่งไปยังแบบหล่อ ส่วนนั้นจะเย็นตัวลง และในบริเวณภายในของชิ้นงานหล่อจะเย็นตัวลงด้วยแต่การเย็นตัวจะเกิดขึ้นช้ากว่าบริเวณภายนอกชิ้นงาน ทำให้ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีน้อย การขยายตัวของนิวเคลียสจะมีมาก ทำให้ได้เกรนขนาดใหญ่ และจุดที่ 3, 6, 9 มี

โครงสร้างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ขนาดเล็ก เพราะมีอัตราการเย็นตัวเร็ว ทำให้ปริมาณนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้พื้นที่ในการขยายตัวของนิวเคลียสมีน้อย



รูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียสอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

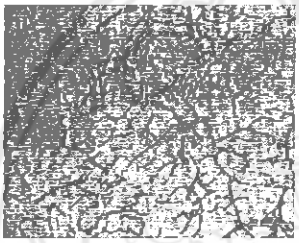
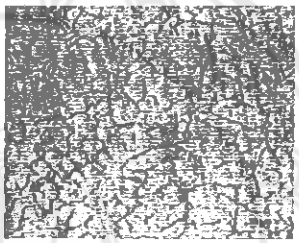
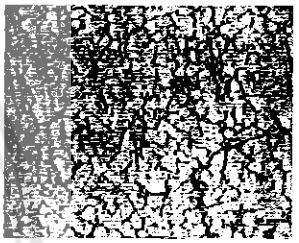
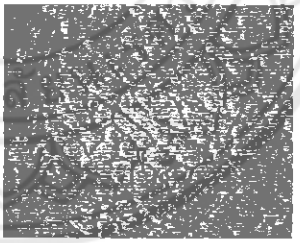
จากรูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเกรนของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) อธิบายได้ว่าในจุดวัดที่ 3, 6, 9 คือบริเวณขอบชิ้นงาน โดยจุดวัดที่ 3, 6 มีอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะที่เร็ว เพราะการแข็งตัวของน้ำโลหะจะเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ ทำให้ปริมาณนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และการขยายตัวของแต่ละเกรนจะมีน้อย ทำให้ได้พื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีขนาดเล็ก แต่จุดวัดที่ 9 ที่มีพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิขนาดใหญ่กว่าจุดวัดที่ 3, 6 เพราะมีความร้อนสะสมอยู่เนื่องจากอยู่บริเวณส่วนล่างของแม่พิมพ์ จึงทำให้จุดวัดที่ 9 มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่าจุดวัดที่ 3, 6 ส่วนพื้นที่ของ 1, 4, 7 มีขนาดเกรนที่ใหญ่ เพราะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ช้า



รูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

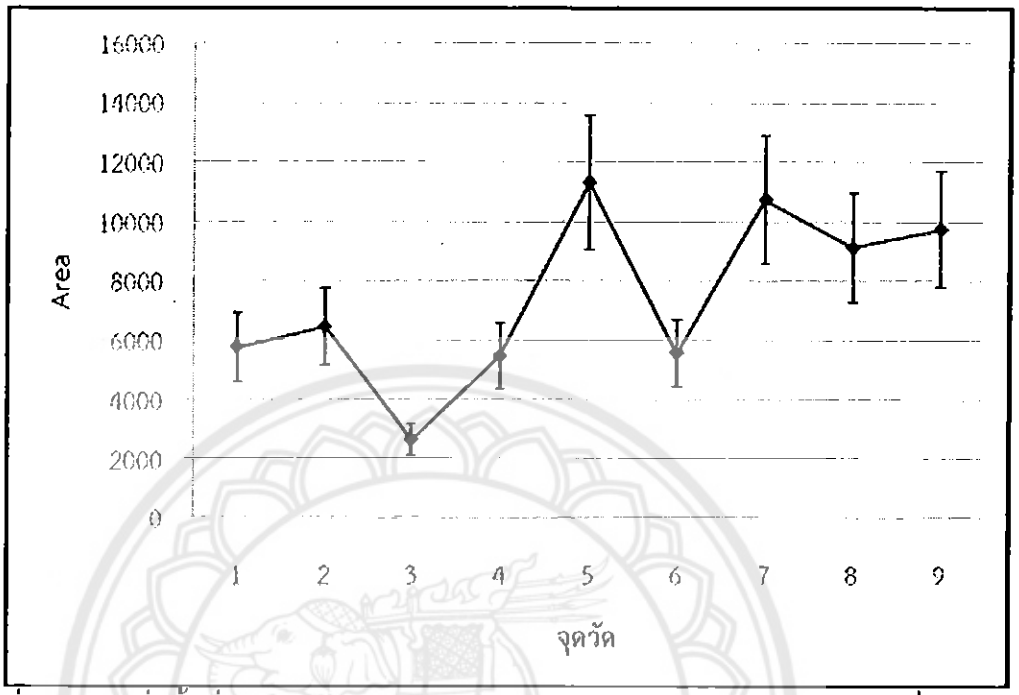
จากรูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) อธิบายได้ว่าจุดที่ทำการหาค่าทั้ง 9 จุด มีค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.3 - 0.5 ทำให้ทราบว่า การหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง มีค่าความกลมอยู่ในช่วงที่ต่ำ เพราะมีการถ่ายเทความร้อนเพียงด้านใดด้านหนึ่ง เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเทและอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่สูง ส่งผลให้ความกลมของของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิยังไม่กลม

ตารางที่ 4.2 โครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

ชิ้นบน	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
ชิ้นกลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
			
ชิ้นล่าง	ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
			

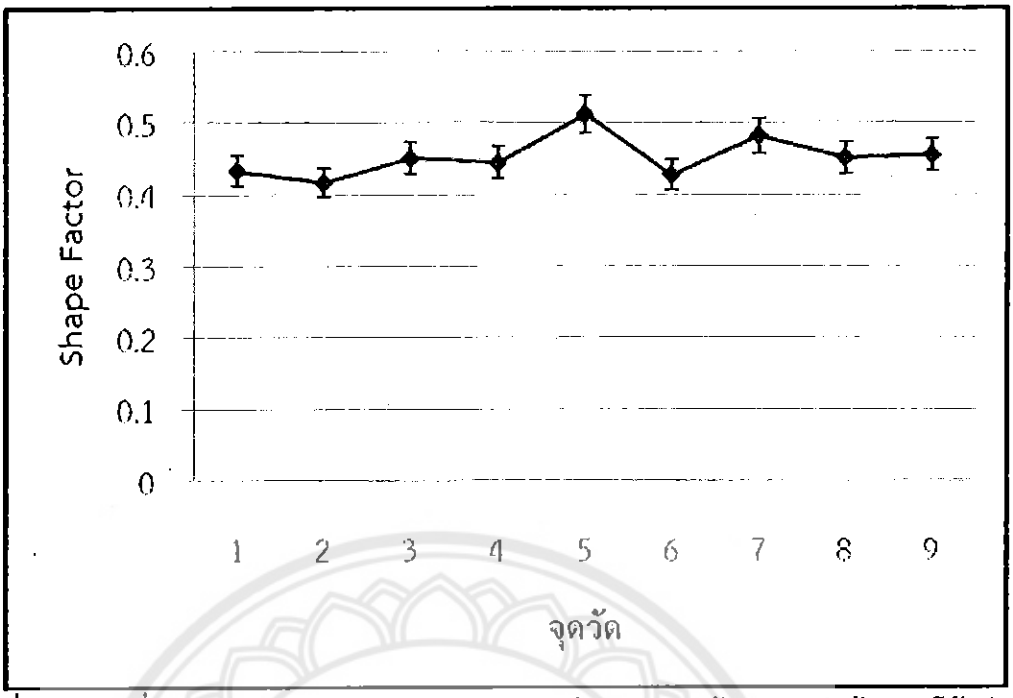
จากตารางที่ 4.2 รูปโครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคทั้ง 9 จุด อธิบายได้ว่า จุดที่ 1, 4, 7 มีโครงสร้างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ขนาดใหญ่ เพราะการแข็งตัวของน้ำโลหะเกิดขึ้นโดยชิ้นงานหล่อเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ และเมื่อความร้อนจากน้ำโลหะถูกส่งไปยังแบบหล่อ ส่วนนั้นจะเย็นตัวลง และในบริเวณภายในของชิ้นงานหล่อจะเย็นตัวลงด้วยแต่การเย็นตัวจะเกิดขึ้นช้ากว่าบริเวณภายนอกชิ้นงาน ทำให้ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีน้อย การขยายตัวของนิวเคลียสจะมีมาก ทำให้ได้เกรนขนาดใหญ่ และจุดที่ 3, 6, 9 มี

โครงสร้างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ขนาดเล็ก เพราะมีอัตราการเย็นตัวเร็ว ทำให้ปริมาณนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้พื้นที่ในการขยายตัวของนิวเคลียสมีน้อย



รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียสอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

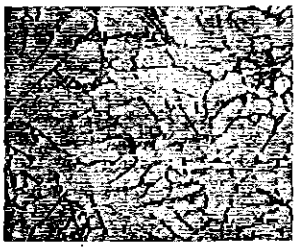
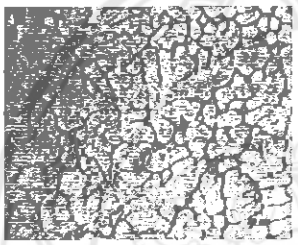
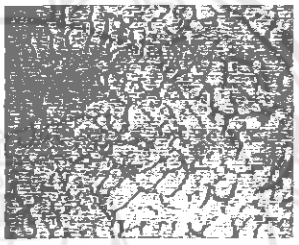
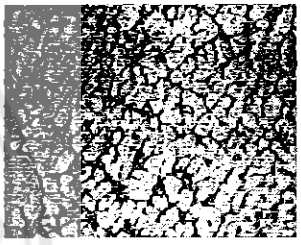
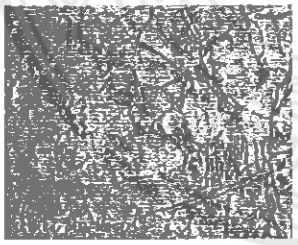
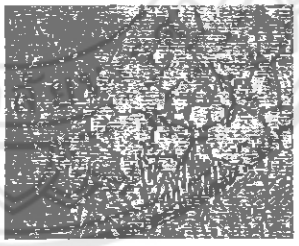
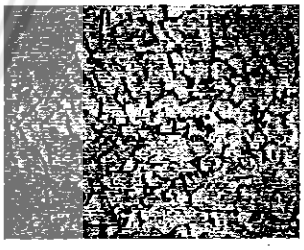
จากรูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) อธิบายได้ว่าในจุดวัดที่ 3, 6, 9 คือบริเวณขอบชิ้นงาน โดยจุดวัดที่ 3, 6 มีอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะที่เร็ว เพราะการแข็งตัวของน้ำโลหะจะเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ ทำให้ปริมาณนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และการขยายตัวของแต่ละเกรนจะมีน้อย ทำให้ได้พื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีขนาดเล็ก แต่จุดวัดที่ 9 ที่มีพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิขนาดใหญ่กว่าจุดวัดที่ 3, 6 เพราะมีความร้อนสะสมอยู่เนื่องจากอยู่บริเวณส่วนล่างของแม่พิมพ์ จึงทำให้จุดวัดที่ 9 มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่าจุดวัดที่ 3, 6 ส่วนพื้นที่ของ 1, 4, 7 มีขนาดเกรนที่ใหญ่ เพราะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ช้า



รูปที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

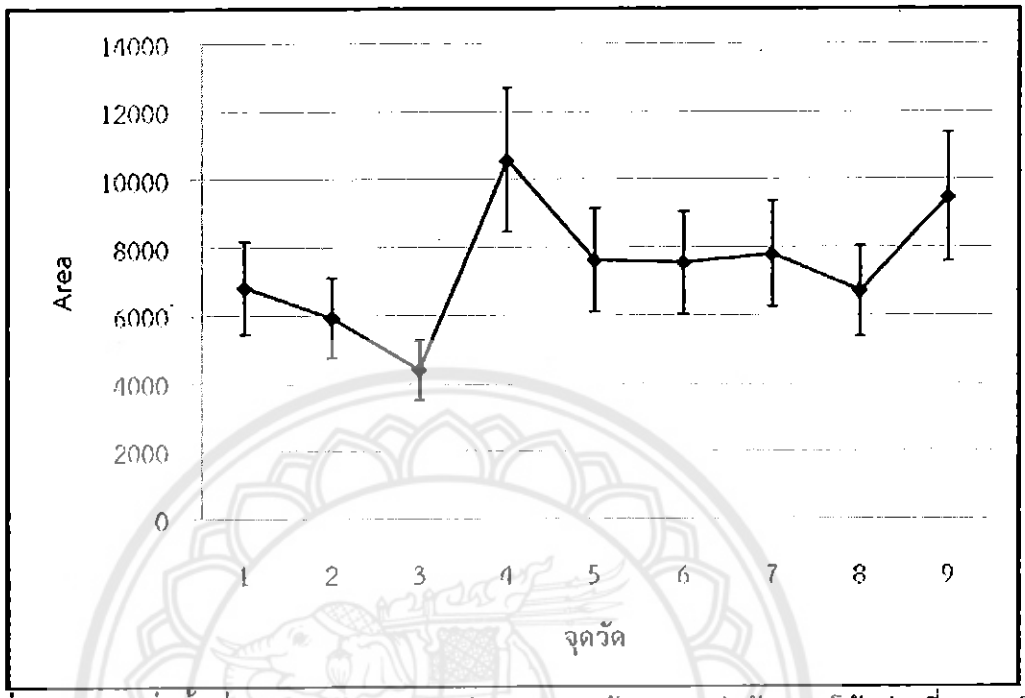
จากรูปที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) อธิบายได้ว่าจุดที่ทำการหาค่าทั้ง 9 จุด มีค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.4 - 0.5 ทำให้ทราบว่า การหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง มีค่าความกลมอยู่ในช่วงที่ต่ำ เพราะมีการถ่ายเทความร้อนเพียงด้านใดด้านหนึ่ง เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเทและอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่สูง ส่งผลให้ความกลมของของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิยังไม่กลม

ตารางที่ 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

ชิ้นบน	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
			
ชิ้นกลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
			
ชิ้นล่าง	ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
			

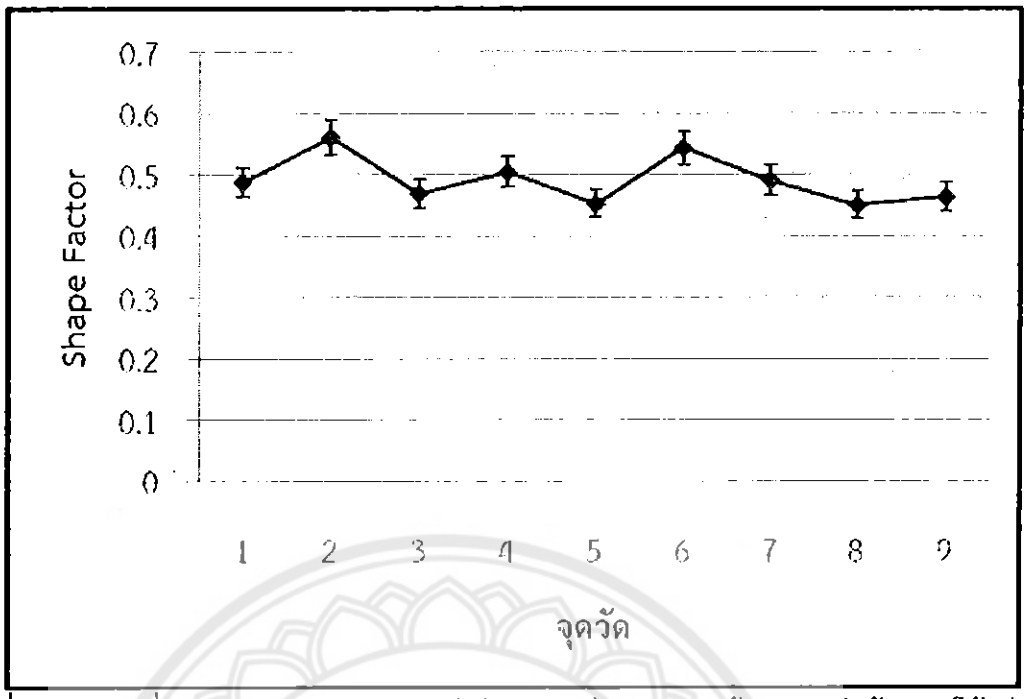
จากตารางที่ 4.3 รูปโครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคทั้ง 9 จุด อธิบายได้ว่า จุดที่ 1, 4, 7 มีโครงสร้างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ขนาดใหญ่ เพราะการแข็งตัวของน้ำโลหะเกิดขึ้นโดยชิ้นงานหล่อเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ และเมื่อความร้อนจากน้ำโลหะถูกส่งไปยังแบบหล่อ ส่วนนั้นจะเย็นตัวลง และในบริเวณภายในของชิ้นงานหล่อจะเย็นตัวลงด้วยแต่การเย็นตัวจะเกิดขึ้นช้ากว่าบริเวณภายนอกชิ้นงาน ทำให้ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีน้อย การขยายตัวของนิวเคลียสจะมีมาก ทำให้ได้เกรนขนาดใหญ่ และจุดที่ 3, 6, 9 มี

โครงสร้างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ขนาดเล็ก เพราะมีอัตราการเย็นตัวเร็ว ทำให้ปริมาณนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้พื้นที่ในการขยายตัวของนิวเคลียสมีน้อย



รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียสอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

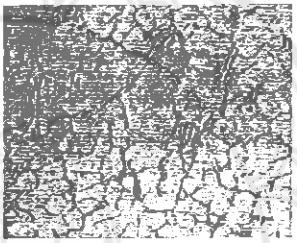
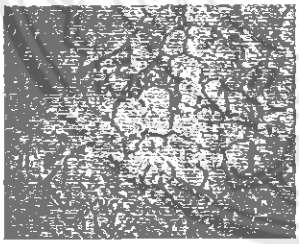
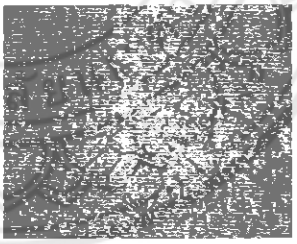
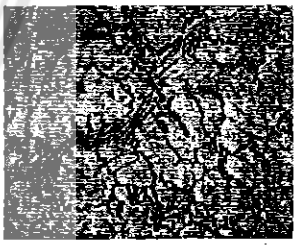
จากรูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) อธิบายได้ว่าในจุดวัดที่ 3, 6, 9 คือบริเวณขอบชิ้นงาน โดยจุดวัดที่ 3, 6 มีอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะที่เร็ว เพราะการแข็งตัวของน้ำโลหะจะเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ ทำให้ปริมาณนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และการขยายตัวของแต่ละเกรนจะมีน้อย ทำให้ได้พื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีขนาดเล็ก แต่จุดวัดที่ 9 ที่มีพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิขนาดใหญ่กว่าจุดวัดที่ 3, 6 เพราะมีความร้อนสะสมอยู่เนื่องจากอยู่บริเวณส่วนล่างของแม่พิมพ์ จึงทำให้จุดวัดที่ 9 มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่าจุดวัดที่ 3, 6 ส่วนพื้นที่ของ 1, 4, 7 มีขนาดเกรนที่ใหญ่ เพราะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ช้า



รูปที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

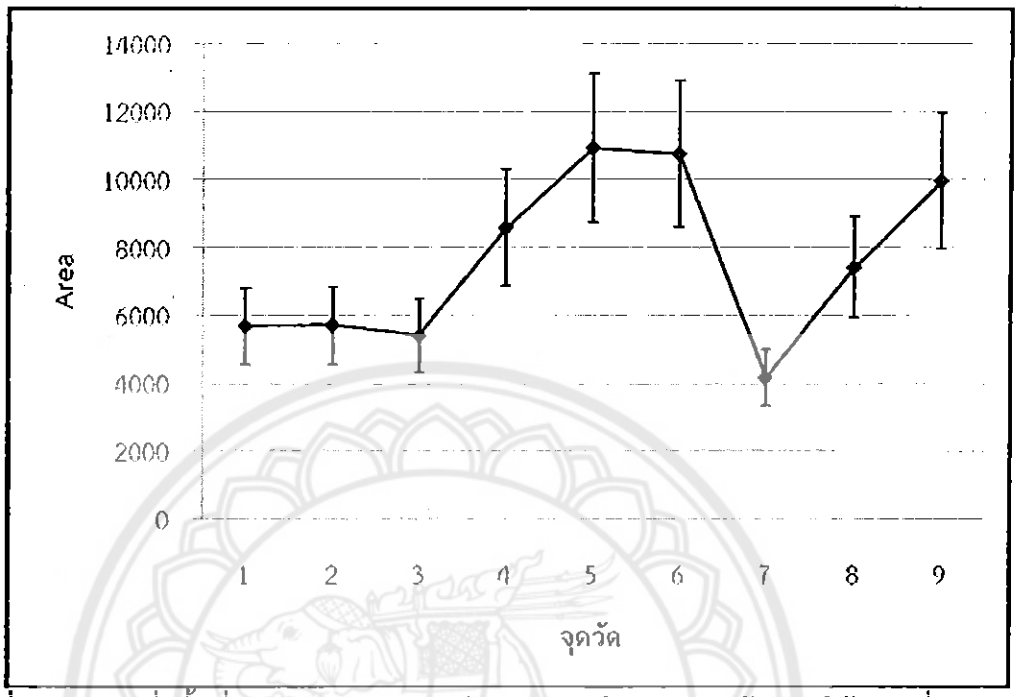
จากรูปที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) อธิบายได้ว่าจุดที่ทำการหาค่าทั้ง 9 จุด มีค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.4 - 0.5 ทำให้ทราบว่า การหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง มีค่าความกลมอยู่ในช่วงที่ต่ำ เพราะมีการถ่ายเทความร้อนเพียงด้านใดด้านหนึ่ง เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเทและอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่สูง ส่งผลให้ความกลมของของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิยังไม่กลม

ตารางที่ 4.4 โครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
ชิ้นบน			
	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
ชิ้นกลาง			
	ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
ชิ้นล่าง			

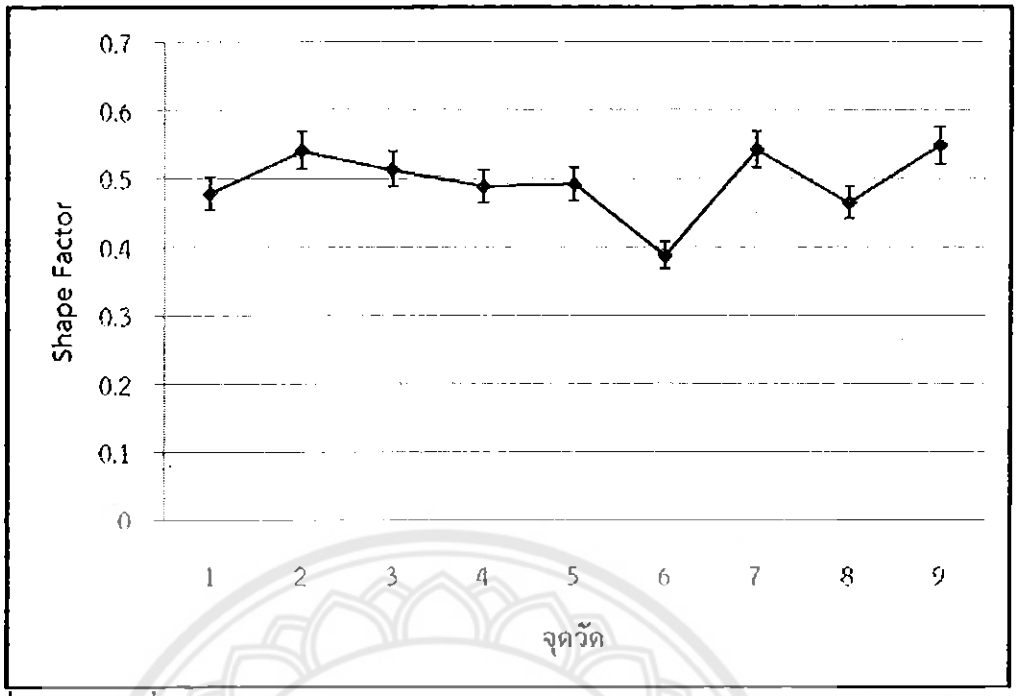
จากตารางที่ 4.4 รูปโครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคทั้ง 9 จุด อธิบายได้ว่า จุดที่ 1, 4, 7 มีโครงสร้างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ขนาดใหญ่ เพราะการแข็งตัวของน้ำโลหะเกิดขึ้นโดยชิ้นงานหล่อเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ และเมื่อความร้อนจากน้ำโลหะถูกส่งไปยังแบบหล่อ ส่วนนั้นจะเย็นตัวลง และในบริเวณภายในของชิ้นงานหล่อจะเย็นตัวลงด้วยแต่การเย็นตัวจะเกิดขึ้นช้ากว่าบริเวณภายนอกชิ้นงาน ทำให้ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีน้อย การขยายตัวของนิวเคลียสจะมีมาก ทำให้ได้เกรนขนาดใหญ่ และจุดที่ 3, 6, 9 มี

โครงสร้างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ขนาดเล็ก เพราะมีอัตราการเย็นตัวเร็ว ทำให้ปริมาณนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้พื้นที่ในการขยายตัวของนิวเคลียสมีน้อย



รูปที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

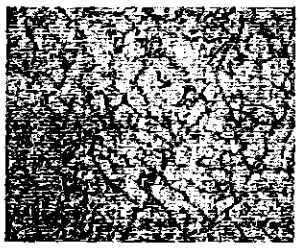
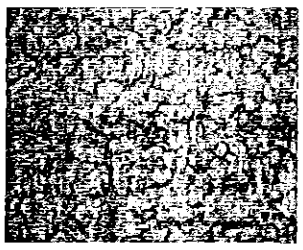
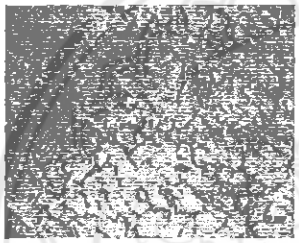
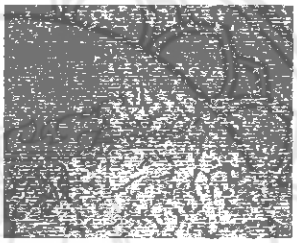
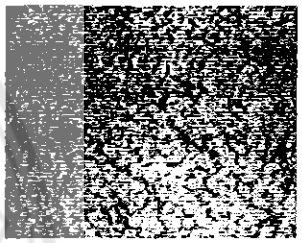
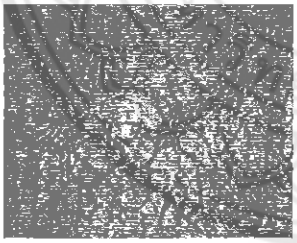
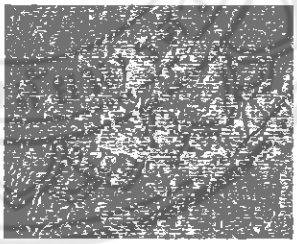
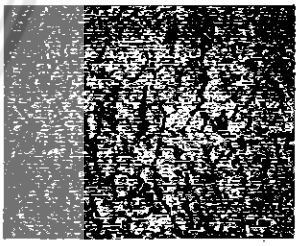
จากรูปที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อธิบายได้ว่าในจุดวัดที่ 3, 6, 9 คือบริเวณขอบชิ้นงาน โดยจุดวัดที่ 3, 6 มีอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะที่เร็ว เพราะการแข็งตัวของน้ำโลหะจะเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ ทำให้ปริมาณนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และการขยายตัวของแต่ละเกรนจะมีน้อย ทำให้ได้พื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีขนาดเล็ก แต่จุดวัดที่ 9 ที่มีพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิขนาดใหญ่กว่าจุดวัดที่ 3, 6 เพราะมีความร้อนสะสมอยู่เนื่องจากอยู่บริเวณส่วนล่างของแม่พิมพ์ จึงทำให้จุดวัดที่ 9 มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่าจุดวัดที่ 3, 6 ส่วนพื้นที่ของ 1, 4, 7 มีขนาดเกรนที่ใหญ่ เพราะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ช้า



รูปที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

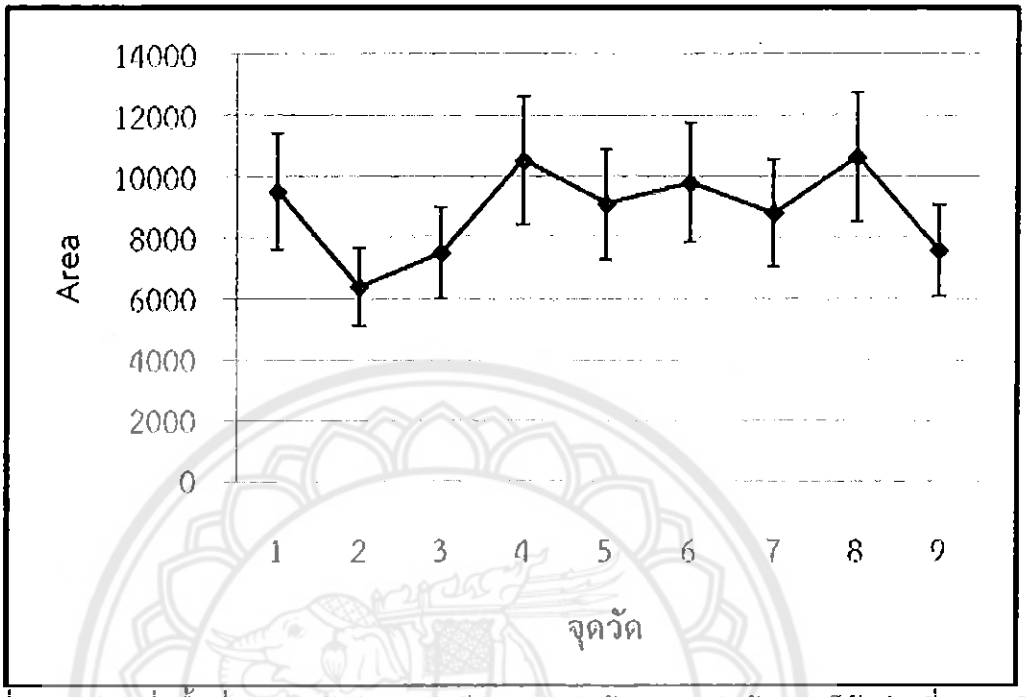
จากรูปที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อธิบายได้ว่าจุดที่ทำการหาค่าทั้ง 9 จุด มีค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.3 - 0.5 ทำให้ทราบว่า การหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส มีค่าความกลมอยู่ในช่วงที่ต่ำ เพราะมีการถ่ายเทความร้อนเพียงด้านใดด้านหนึ่ง เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเทและอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ต่ำ ส่งผลให้ความกลมของของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิยังไม่กลม

ตารางที่ 4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
ชิ้นบน			
	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
ชิ้นกลาง			
	ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
ชิ้นล่าง			

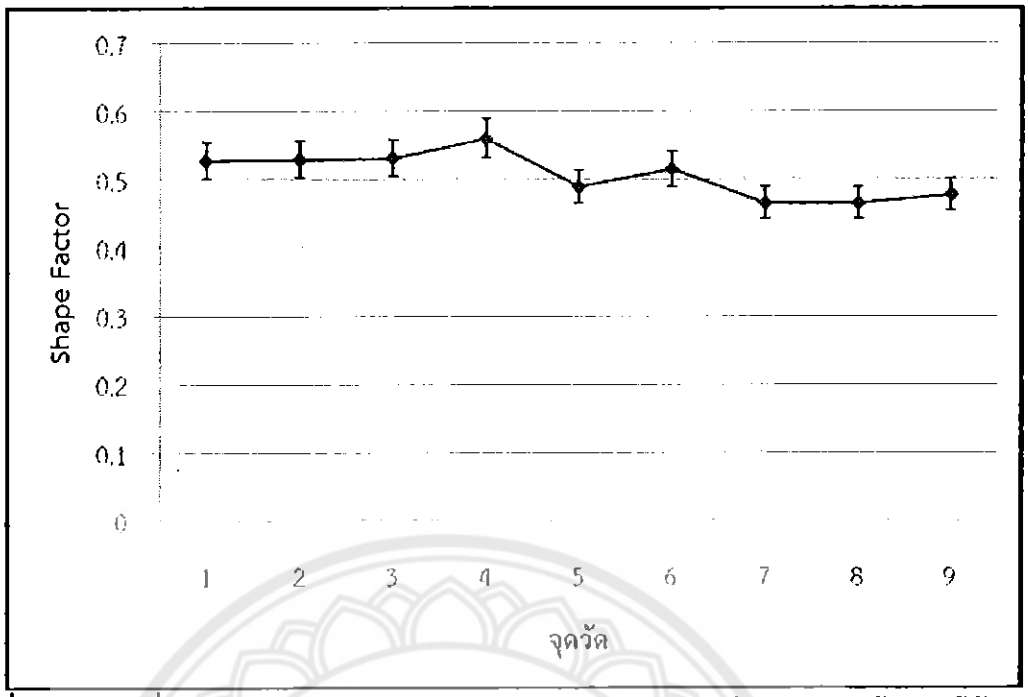
จากตารางที่ 4.5 รูปโครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคทั้ง 9 จุด อธิบายได้ว่า จุดที่ 1, 4, 7 มีโครงสร้างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ขนาดใหญ่ เพราะการแข็งตัวของน้ำโลหะเกิดขึ้นโดยชิ้นงานหล่อเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ และเมื่อความร้อนจากน้ำโลหะถูกส่งไปยังแบบหล่อ ส่วนนั้นจะเย็นตัวลง และในบริเวณภายในของชิ้นงานหล่อจะเย็นตัวลงด้วยแต่การเย็นตัวจะเกิดขึ้นช้ากว่าบริเวณภายนอกชิ้นงาน ทำให้ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีน้อย การขยายตัวของนิวเคลียสจะมีมาก ทำให้ได้เกรนขนาดใหญ่ และจุดที่ 3, 6, 9 มี

โครงสร้างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ขนาดเล็ก เพราะมีอัตราการเย็นตัวเร็ว ทำให้ปริมาณนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้พื้นที่ในการขยายตัวของนิวเคลียสมีน้อย



รูปที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

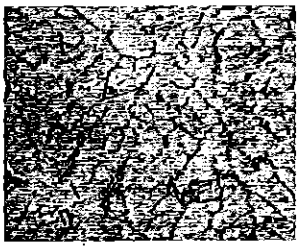
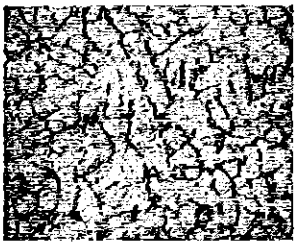
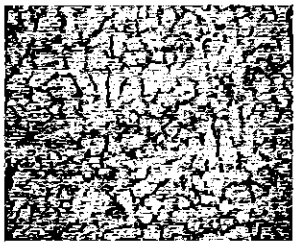
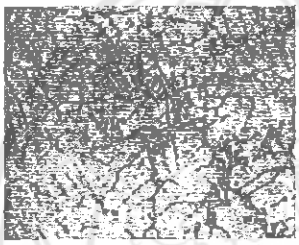
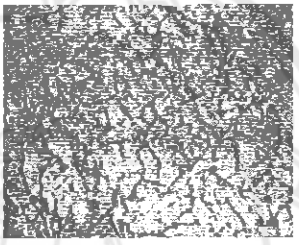
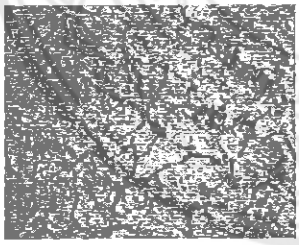
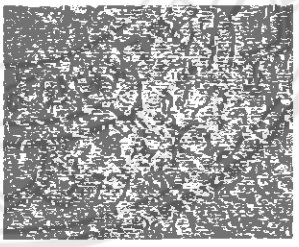
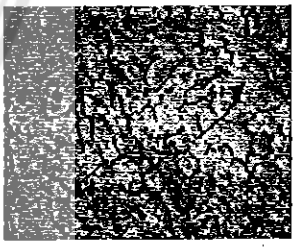
จากรูปที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อธิบายได้ว่าในจุดวัดที่ 3, 6, 9 คือบริเวณขอบชิ้นงาน โดยจุดวัดที่ 3, 6 มีอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะที่เร็ว เพราะการแข็งตัวของน้ำโลหะจะเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ ทำให้ปริมาณนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และการขยายตัวของแต่ละเกรนจะมีน้อย ทำให้ได้พื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีขนาดเล็ก แต่จุดวัดที่ 9 ที่มีพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิขนาดใหญ่กว่าจุดวัดที่ 3, 6 เพราะมีความร้อนสะสมอยู่เนื่องจากอยู่บริเวณส่วนล่างของแม่พิมพ์ จึงทำให้จุดวัดที่ 9 มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่าจุดวัดที่ 3, 6 ส่วนพื้นที่ของ 1, 4, 7 มีขนาดเกรนที่ใหญ่ เพราะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ช้า



รูปที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

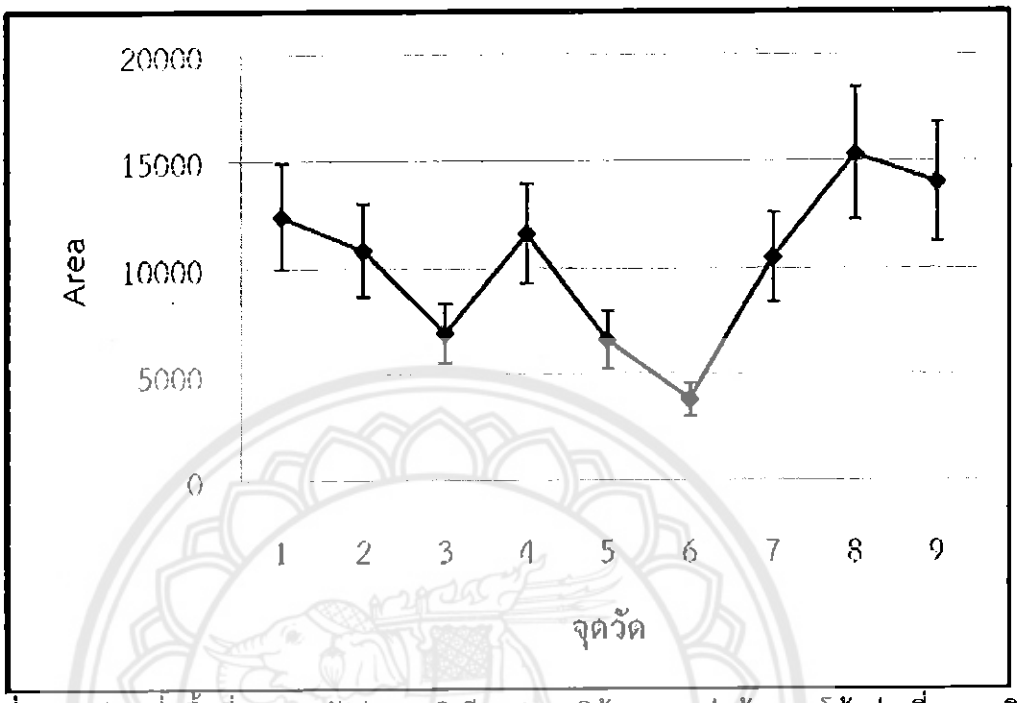
จากรูปที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อธิบายได้ว่าจุดที่ทำการหาค่าทั้ง 9 จุด มีค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.4 - 0.5 ทำให้ทราบว่า การหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส มีค่าความกลมอยู่ในช่วงที่ต่ำ เพราะมีการถ่ายเทความร้อนเพียงด้านใดด้านหนึ่ง เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเท และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ต่ำ ส่งผลให้ความกลมของของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิยังไม่กลม

ตารางที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
ชิ้นบน			
	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
ชิ้นกลาง			
	ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
ชิ้นล่าง			

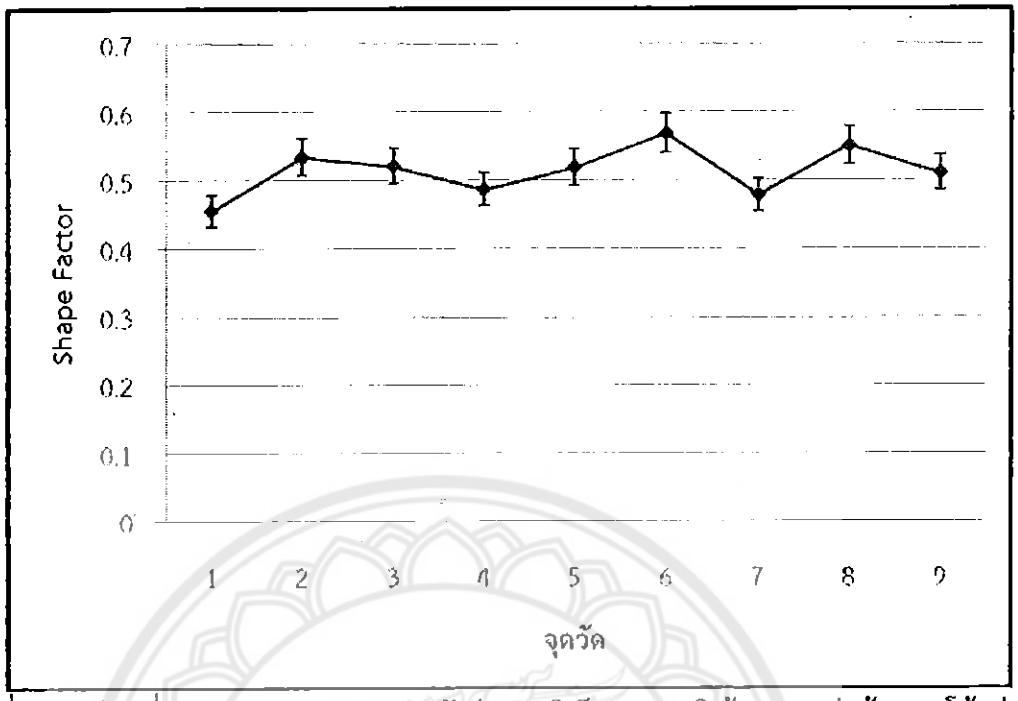
จากตารางที่ 4.6 รูปโครงสร้างทางจุลภาคของการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคทั้ง 9 จุด อธิบายได้ว่า จุดที่ 1, 4, 7 มีโครงสร้างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ขนาดใหญ่ เพราะการแข็งตัวของน้ำโลหะเกิดขึ้นโดยชิ้นงานหล่อเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ และเมื่อความร้อนจากน้ำโลหะถูกส่งไปยังแบบหล่อ ส่วนนั้นจะเย็นตัวลง และในบริเวณภายในของชิ้นงานหล่อจะเย็นตัวลงด้วยแต่การเย็นตัวจะเกิดขึ้นช้ากว่าบริเวณภายนอกชิ้นงาน ทำให้ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีน้อย การขยายตัวของนิวเคลียสจะมีมาก ทำให้ได้เกรนขนาดใหญ่ และจุดที่ 3, 6, 9 มี

โครงสร้างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ขนาดเล็ก เพราะมีอัตราการเย็นตัวเร็ว ทำให้ปริมาณนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้พื้นที่ในการขยายตัวของนิวเคลียสมีน้อย



รูปที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

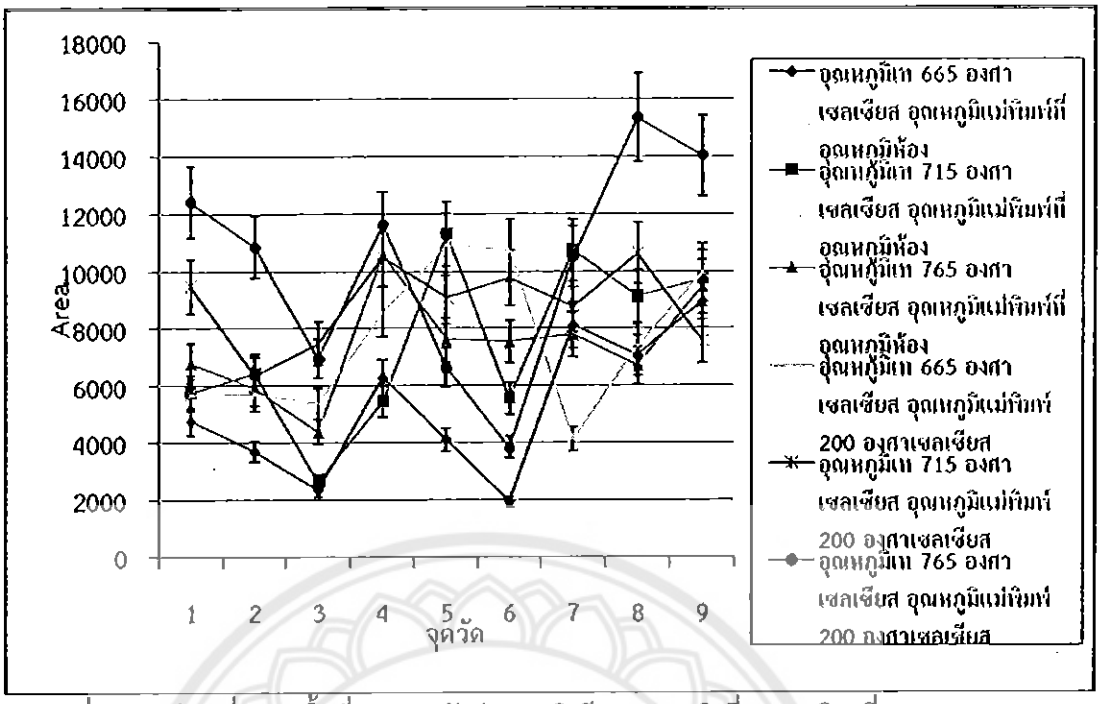
จากรูปที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อธิบายได้ว่าในจุดวัดที่ 3, 6, 9 คือบริเวณขอบชิ้นงาน โดยจุดวัดที่ 3, 6 มีอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะที่เร็ว เพราะการแข็งตัวของน้ำโลหะจะเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ ทำให้ปริมาณนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และการขยายตัวของแต่ละเกรนจะมีน้อย ทำให้ได้พื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีขนาดเล็ก แต่จุดวัดที่ 9 ที่มีพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิขนาดใหญ่กว่าจุดวัดที่ 3, 6 เพราะมีความร้อนสะสมอยู่เนื่องจากอยู่บริเวณส่วนล่างของแม่พิมพ์ จึงทำให้จุดวัดที่ 9 มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่าจุดวัดที่ 3, 6 ส่วนพื้นที่ของ 1, 4, 7 มีขนาดเกรนที่ใหญ่ เพราะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ช้า



รูปที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

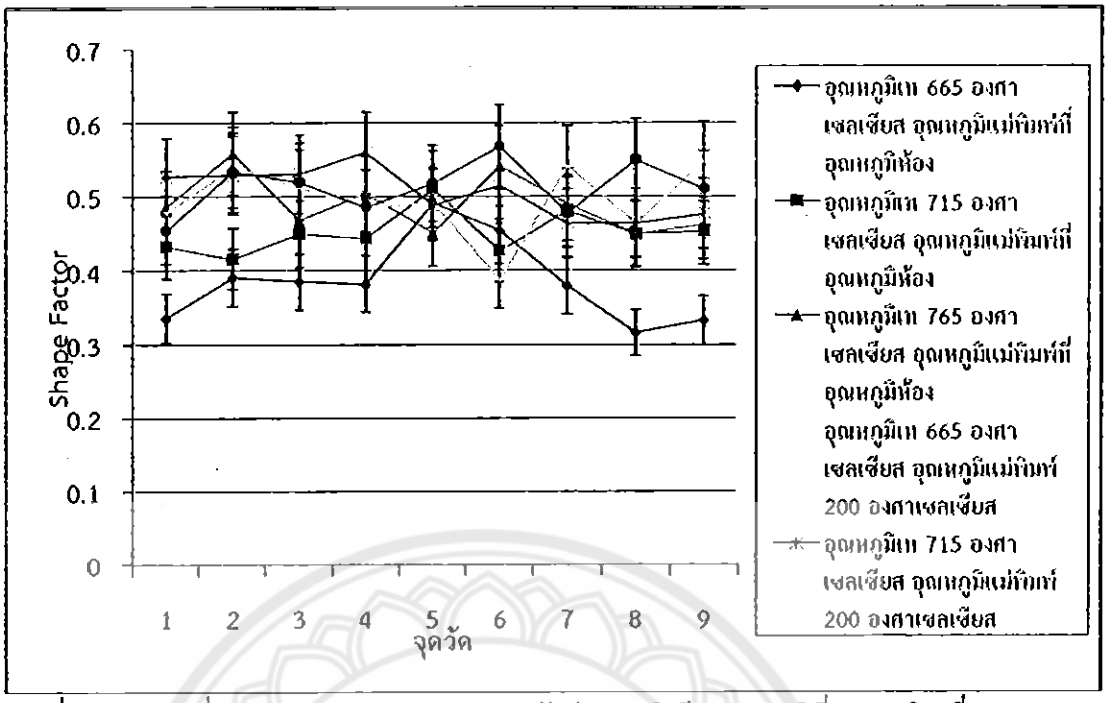
จากรูปที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยขนาดความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อธิบายได้ว่าจุดที่ทำการหาค่าทั้ง 9 จุด มีค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.4 - 0.5 ทำให้ทราบว่า การหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเท 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส มีค่าความกลมอยู่ในช่วงที่ต่ำ เพราะมีการถ่ายเทความร้อนเพียงด้านใดด้านหนึ่ง เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเทและอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ต่ำ ส่งผลให้ความกลมของของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิยังไม่กลม

สรุป การหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง และที่ 200 องศาเซลเซียส มีผลต่อค่าพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ค่าความกลมของเกรน เมื่ออุณหภูมิในการเทเพิ่มขึ้น อุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น ทำให้มีการเพิ่มพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิมากขึ้น และระยะของอุณหภูมิเท และอุณหภูมิแม่พิมพ์ใกล้เคียงกันทำให้กลม และระยะของอุณหภูมิเท และอุณหภูมิแม่พิมพ์ห่างกันทำให้ไม่กลม ดังรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยรวมพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และที่ 200 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยรวมพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และที่ 200 องศาเซลเซียส อธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และที่ 200 องศาเซลเซียส มีผลต่อพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ โดยที่อุณหภูมิเทสูง และอุณหภูมิแม่พิมพ์สูง ทำให้พื้นที่ขนาดของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ กราฟอุณหภูมิเทที่ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส มีขนาดพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ใหญ่สุด เพราะอัตราเย็นตัวของน้ำโลหะช้า จึงทำให้ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีน้อย การขยายตัวของนิวเคลียสมีมาก ทำให้พื้นที่ขนาดของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิมีขนาดใหญ่ และถ้าอุณหภูมิเทต่ำ และอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ จะทำให้พื้นที่ขนาดของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่เกิดขึ้นมีขนาดที่เล็ก กราฟอุณหภูมิเทที่ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) มีขนาดพื้นที่ของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่เล็กสุด เพราะอัตราการเย็นตัวมีอัตราการเย็นตัวของโลหะที่สูง ทำให้การขยายตัวของแต่ละเกรนมีอัตราต่ำ เพราะแต่ละเกรนจะแย่งอะตอมของโลหะให้มาจับรวมกับนิวเคลียสซึ่งมีจำนวนมาก ทำให้ได้โลหะที่มีเกรนขนาดเล็ก ซึ่งค่าในกราฟส่วนใหญ่จะมีขนาดของเกรนลดลงที่จุดวัดที่ 3, 6 เป็นหลัก เพราะความร้อนของน้ำโลหะเกิดขึ้นเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ และเมื่อความร้อนจากน้ำโลหะถูกส่งไปยังแบบหล่อ ส่วนนั้นจะเย็นตัวลงจึงทำให้เกรนมีขนาดเล็ก และในบริเวณภายในของชิ้นงานหล่อจะเย็นตัวลงด้วยแต่การเย็นตัวจะเกิดขึ้นช้ากว่าบริเวณภายนอกชิ้นงาน



รูปที่ 4.19 ค่าเฉลี่ยรวมขนาดความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และที่ 200 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.19 ค่าเฉลี่ยรวมปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และที่ 200 องศาเซลเซียส อธิบายได้ว่า มีผลต่อปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ถ้าที่อุณหภูมิเทสูงและอุณหภูมิแม่พิมพ์สูง จะส่งผลให้ปัจจัยรูปร่างมีค่าความกลมที่สูง ทำให้มีรูปร่างที่ใกล้เคียงความกลมมาก เพราะอัตราเย็นตัวของน้ำโลหะช้าทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ทุกด้าน ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นจะมีน้อย การขยายตัวของนิวเคลียสจะมีมากทำให้ได้โลหะที่มีเกรนขนาดใหญ่ และมีรูปร่างที่ใกล้เคียงความกลมมาก แต่ถ้าที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ จะทำให้อัตราการเย็นตัวเร็วทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพียงด้านใดด้านหนึ่ง จึงทำให้มีลักษณะที่มีรูปร่างที่ไม่มีความกลม

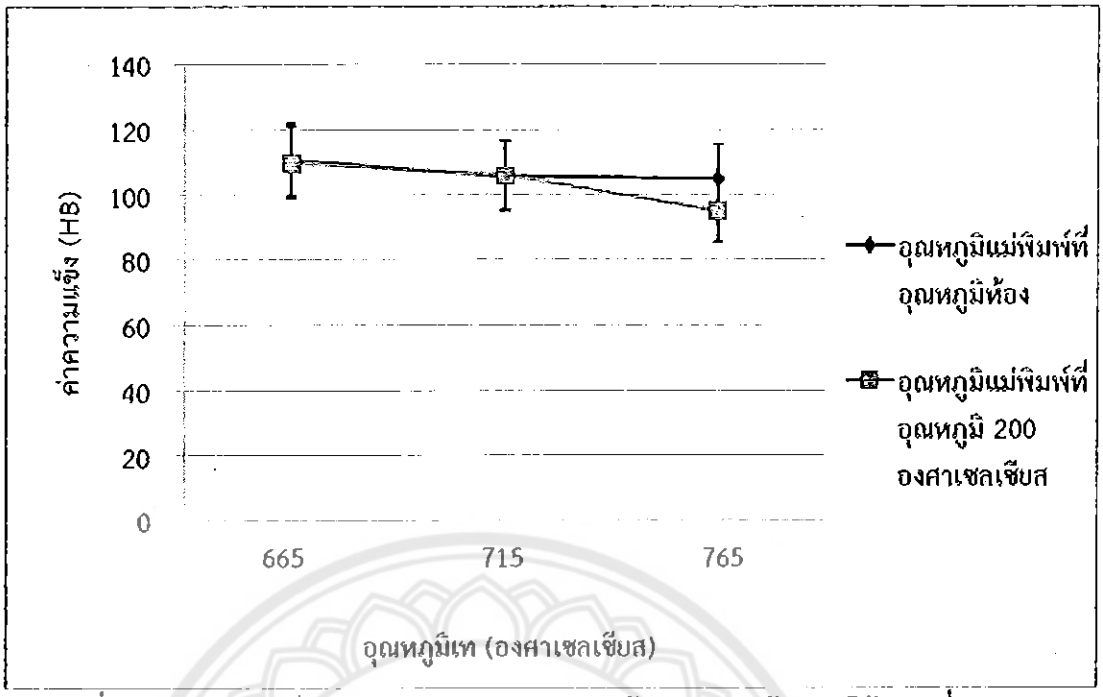
4.5 การทดสอบความแข็ง

นำมาวัดความแข็งโดยใช้สเกลบริเนลล์ ชนิดหัวกดลูกบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm น้ำหนักทดสอบ 187.5 kgF ระยะเวลาในการกด 30 วินาที จำนวนจุดทดสอบ 3 จุด บนชิ้นงาน โดยจะได้ค่าความแข็งที่ได้จากการเปลี่ยนอุณหภูมิเท และอุณหภูมิแม่พิมพ์ ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 จำนวนชิ้นงานในการหล่อโดยเปลี่ยนอุณหภูมิเท และเปลี่ยนอุณหภูมิแม่พิมพ์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		ค่าความแข็ง	พื้นที่
อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)		
665	อุณหภูมิห้อง (30 °C)	110.856	5262.262
715	อุณหภูมิห้อง (30 °C)	105.903	7433.367
765	อุณหภูมิห้อง (30 °C)	105.165	7433.599
665	200	109.853	7622.882
715	200	106.159	8857.123
765	200	95.274	10258.72

จากตารางที่ 4.7 อธิบายได้ว่า ชิ้นงานที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และที่ 200 องศาเซลเซียส ทั้ง 2 ปัจจัยนี้ มีผลต่อสมบัติทางกลทางด้านความแข็ง กล่าวคือ ที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้องมีค่าความแข็งคือ 110.856, 105.903, 105.165 และที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งคือ 109.853, 106.159, 95.274 ความแข็งมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเท และอุณหภูมิแม่พิมพ์มีอุณหภูมิต่ำ และทำให้มีพื้นที่ของเกรนมากขึ้น เพราะถ้าอัตราการเย็นตัวเร็ว จะปรากฏนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และการขยายตัวของแต่ละเกรนจะมีอัตราต่ำ เพราะแต่ละเกรนจะแย่งอะตอมของโลหะมารวมตัวกับนิวเคลียสซึ่งมีจำนวนมาก ทำให้ได้โลหะที่มีเกรนขนาดเล็กละเอียด ถ้าอุณหภูมิเทสูงอัตราเย็นตัวช้า ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นจะมีน้อย การขยายตัวของนิวเคลียสจะมีมากทำให้ได้โลหะที่มีเกรนขนาดใหญ่ จะทำให้ความแข็งมีค่าต่ำลง



รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด A356 ด้วยการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

จากกราฟที่ 4.15 อธิบายได้ว่า ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และที่ 200 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าความแข็งมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเท และอุณหภูมิแม่พิมพ์มีอุณหภูมิที่ต่ำ โดยกระบวนการหล่อที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าความแข็งมากกว่ากระบวนการหล่อที่อุณหภูมิเทที่ 665, 715, 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส เพราะมีอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะที่เร็วส่งผลให้มีขนาดเกรนที่เล็กจึงทำให้มีค่าความแข็งที่สูง

สรุป อุณหภูมิเทน้ำโลหะ และอุณหภูมิแม่พิมพ์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็ง พื้นที่ของเกรน และค่าความกลม ของอะลูมิเนียมเกรด A356

บทที่ 5
บทสรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากการดำเนินการศึกษาเก็บข้อมูล และทำการทดลองในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะนั้น มีการนำชิ้นงานมาผ่านการหล่อ โดยใช้อะลูมิเนียมเกรด A356 ในการทดลอง ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการเทน้ำโลหะคือ 665, 715 และ 765 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) กับที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จากการทำการทดลองจะได้ข้อมูล และผลการทดลอง ดังนี้

5.1.1 โครงสร้างทางจุลภาค

โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อที่เปลี่ยนอุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665, 715 และ 765 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และ 200 องศาเซลเซียส ทำให้ทราบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน มีเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ซึ่งมีโครงสร้างเดนไดร์ทที่มีลักษณะเป็นกิ่งไม้ และมีเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม - ซิลิคอน ที่เป็นการสลับกันของอะลูมิเนียม และซิลิคอน ที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียวแหลมแทรกอยู่ระหว่างแขนของอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ โดยทุกชิ้นงายจะมีลักษณะที่เหมือนกัน

5.1.2 พื้นที่ของเกรน

ขนาดพื้นที่ของเกรนจะมีพื้นที่มากขึ้นตามอุณหภูมิเท และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่สูงขึ้น

5.1.3 ปัจจัยรูปร่างของเกรน

ปัจจัยรูปร่างของเกรนที่ได้คำนวณจากกระบวนการหล่อที่เปลี่ยนอุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665, 715 และ 765 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และ 200 องศาเซลเซียส มีผลคือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิสูง ทำให้ค่าความกลมที่ได้มีค่าที่เข้าใกล้ความกลมที่สูง

5.1.4 ค่าความแข็ง

ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่ผ่านกระบวนการหล่อที่เปลี่ยนอุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665, 715 และ 765 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และ 200 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าความแข็งมีค่าความแข็งสูงเมื่ออุณหภูมิเท และ

อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ โดยกระบวนการหล่อที่อุณหภูมิเท 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) มีค่าความแข็งมากสุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ เช่นสัณฐานวิทยา การทดสอบแรงดึง เป็นต้น

5.2.2 ศึกษาอะลูมิเนียมผสมที่ต่างชนิดกัน เพื่อมาเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกายภาพ

5.2.3 ศึกษาการเติมธาตุอื่นๆ เพื่อเพิ่มความกลม และความแข็งของโครงสร้างทางจุลภาพ

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 ในการปฏิบัติงานควรทำด้วยความระมัดระวัง และควรสวมใส่ชุดป้องกันอันตรายในการเข้าปฏิบัติงานทุกครั้ง และทำการศึกษาขั้นตอนกระบวนการในการทดลอง และทดลองปฏิบัติงานก่อนการปฏิบัติงานจริงเพื่อให้เกิดความชำนาญ และความเข้าใจมากยิ่งขึ้น

5.3.2 การชำรุดของเตาหลอมอะลูมิเนียม เนื่องจากมีการใช้งานเตาหลอมหลายครั้ง และมีความชำนาญในการใช้งานเตาหลอมน้อย ทำให้เตาหลอมเกิดการชำรุดของสายไฟที่แสดงค่าอุณหภูมิในการหลอม จึงต้องให้ผู้มีความชำนาญมาแก้ไขให้

เอกสารอ้างอิง

คมสัน จิระภัทรศิลปะ. (18 มิถุนายน 2552). **ขนาดของเกรน (Grain Size).** สืบค้นเมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2552, จาก http://www.pteonline.org/imglib/staff/file/komson_000196.pdf

ชวลิต เชียงกุล. (2547). **โลหะวิทยากายภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 5.** กรุงเทพ. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย -ญี่ปุ่น)

เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร. (19 สิงหาคม 2551). **ส่วนผสมของ อลูมิเนียม A356.** สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2552, จาก http://www.cemct.net/web/images/stories//alsi001 .pdf

ฐาปนีย์ อุดมผล. (กันยายน 2550). **การทดสอบความแข็งตัว (Hardness Testing).** สืบค้นเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2552, จาก http://www.sut.ac.th/engineering/Metal/pdf/MechmetLab/1_2552/Mech%20met%20lab%20PDF/Mech%20met%20handout-Th/Lab_2Hardness_th.pdf

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2551). **กรรมวิธีการผลิตโลหะ.** สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2552, จาก http://www.mme.rmuti.ac.th/index.php?option=com...view...3&id...

บัญชิต ใจชื่น. (2527). โลหะวิทยากายภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพ. สำนักพิมพ์ประกอบเมไตร

พรวสา วงศ์ปัญญา. (กันยายน 2551). **การแข็งตัวของโลหะ (Solidification of Metal).** สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2552, จาก http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/PhyMet_II/%E0%B8%AD.%E0%B8%9E%E0%B8%A3%E0%B8%A7%E0%B8%AA%E0%B8%B2/01-Solidification_of_Metal.pdf

ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรรม. (2549). **คุณสมบัติของอลูมิเนียม.** สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2552, จาก http://www.aluminiumlearning.com/html/properties.html

มนัส สถิรจินดา. (2541). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพ. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

JIS HAND BOOK. (1998). **Non-Forrous Metals & Metallogy.** Japanese Standards associeate ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ภาคผนวก ก

ข้อมูลตารางค่าความแข็ง

ตารางที่ ก.1 ค่าความแข็งที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)	ชิ้น	จุด	d (mm)	HB
665	อุณหภูมิห้อง (30)	บน	กลาง	1.4337	105.5452419
			ข้าง	1.3365	123.3004346
			ขอบ	1.42155	107.6585582
		กลาง	กลาง	1.93725	111.8414209
			ข้าง	1.3851	114.0146769
			ขอบ	1.3729	116.2450926
		ล่าง	กลาง	1.42155	107.6585582
			ข้าง	1.44585	103.6816576
			ขอบ	1.42155	107.6585582
715	อุณหภูมิห้อง (30)	บน	กลาง	1.458	101.7661376
			ข้าง	1.4337	105.5452419
			ขอบ	1.4337	105.5452419
		กลาง	กลาง	1.4094	109.7233462
			ข้าง	1.3851	114.0146769
			ขอบ	1.3608	118.49998
		ล่าง	กลาง	1.458	101.7661376
			ข้าง	1.4823	98.07295627
			ขอบ	1.4823	98.07295627
765	อุณหภูมิห้อง (30)	บน	กลาง	1.458	101.7661376
			ข้าง	1.4823	98.07295627
			ขอบ	1.4337	105.5452419
		กลาง	กลาง	1.4094	109.7233462
			ข้าง	1.4337	105.5452419
			ขอบ	1.5309	91.13643489
		ล่าง	กลาง	1.4337	105.5452419
			ข้าง	1.4337	105.5452419
			ขอบ	1.3365	123.3004346

ตารางที่ ก.2 ค่าความแข็งที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)	ชิ้น	จุด	d (mm)	HB
665	200	บน	กลาง	1.42155	107.6585582
			ข้าง	1.44585	103.6816576
			ขอบ	1.37295	116.19341
		กลาง	กลาง	1.39725	111.83957
			ข้าง	1.4094	109.7233462
			ขอบ	1.3608	118.49998
		ล่าง	กลาง	1.458	101.7661376
			ข้าง	1.4337	105.5452419
			ขอบ	1.3851	114.0146769
715	200	บน	กลาง	1.458	101.7661376
			ข้าง	1.44585	103.6816576
			ขอบ	1.4094	109.7233462
		กลาง	กลาง	1.42155	107.6585582
			ข้าง	1.42155	107.6585582
			ขอบ	1.93725	111.8414209
		ล่าง	กลาง	1.44585	103.6816576
			ข้าง	1.458	101.7661376
			ขอบ	1.42155	107.6585582
765	200	บน	กลาง	1.6038	82.00562714
			ข้าง	1.458	101.7661376
			ขอบ	1.701	71.48772349
		กลาง	กลาง	1.4337	105.5452419
			ข้าง	1.458	101.7661376
			ขอบ	1.5066	94.55365886
		ล่าง	กลาง	1.47015	99.89708214
			ข้าง	1.458	101.7661376
			ขอบ	1.4823	98.07295627

ภาคผนวก ข

ข้อมูลตารางค่าพื้น และค่าความกลมของเฟสอัลฟ่าอะลูมิเนียมปฐมภูมิ

ตารางที่ ข.1 ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10803	1154	1884	2258	7068	142	7838	2541	2019
20898	202	606	22086	5473	55	8885	2262	995
229	2676	1338	11377	799	1278	3855	4431	5396
2191	14571	1122	2766	1748	1747	5647	2242	21724
1551	4231	9652	18603	2822	333	1576	2021	9200
11778	5599	99	7312	14397	2201	4144	10003	9635
1157	6110	119	3176	1303	927	27706	15573	18513
1673	643	510	14383	1981	1492	8814	23179	309
2017	2984	6070	334	1411	589	7285	1041	16536
655	564	726	29456	3010	899	6696	1354	19873
131	7063	4167	3692	5418	862	3537	1857	2065
175	1100	3326	1019	5253	930	5459	13820	26369
3110	342	4576	1437	1563	668	8184	7066	1414
312	8053	1138	52675	10065	636	20419	4735	6771
8052	2684	267	5855	393	1438	38161	4083	12761
10201	2498	492	1624	2236	693	3129	8408	23767
339	1258	1029	15328	10266	1571	37416	11657	19123
2561	3816	614	331	5311	1592	710	11639	2213
4382	1043	1636	3087	18495	1819	16660	7122	1276
7184	2301	4775	1865	2605	1553	2947	1302	3656
10575	4223	1294	4440	2854	339	8386	4325	4360
10856	3586	2702	3346	935	2652	22943	2886	23639
3638	305	3484	4599	750	1201	3667	7322	1085
9869	931	806	1536	7098	5822	2488	2073	30471
6621	1383	471	956	1221	1993	7995	11079	2455
477	6993	2212	1806	1873	1660	5529	5496	8960
1525	1420	4133	8153	1334	1861	9378	9705	1493
22089	1768	6627	2916	2475	892	2435	38457	1423
12232	3021	27328	1491	1717	2523	9084	8313	3196
5388	7239	1082	12692	569	840	10701	1776	1902
12343	24447	613	1546	4944	3736	3408	6799	7270
1154	3584	1497	333	1741	6912	3651	3929	19783
11435	1210	1180	9889	7753	2625	6285	4020	4825
753	2538	104	2515	4792	1900	2161	2786	2865
539	670	3189	2115	279	1340	1773	8457	18813
1156	528	3571	4254	2245	3062	4907	3804	1530
894	406	8303	5743	6521	2840	14908	4224	7229
711	2544	9811	2496	3941	480	4383	3439	14345

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1667	991	860	826	1211	2774	931	4145	1834
3976	2378	512	1765	8121	2580		1940	1721
12626	2587	356	400	1694	2431		6918	
7695	2651	746	1315	1410	5766		3490	
330	3819	587	3341	28192	1071		12493	
2465	2438	2100	2611	4822	1144		7092	
10573	16157	3680	892	2039	2177		6646	
3358	653	243	576	7614	189		15604	
7076	1595	2615	6620	2615	1264		3118	
14849	7722	202	3624	1702	1696		13500	
905	1977	501	1927	2810	1046		5555	
36401	3450	2073	2957	1472	5864		9838	
1724	1955	326		12260	992		3574	
2893	21	300		3155	989		2127	
5470	831	1180		2109	2781		7073	
1116	4575	577		3154	1024		2994	
1299	9486	665		3500	2296		3397	
249	3411	247		2289	881			
1364	12723	826		4183	860			
5080	2513	635		2277	229			
1775	1145	1130		7597	937			
6321	3051	2530		3918	1386			
3529	1999	603		4418	2111			
280	1648	302		6917	3416			
6473	1152	490		607	1178			
617	6864	4123		1595	864			
1448	2227	696		5385	4111			
903	3904	766		4108	584			
2627	10539	653		4678	1372			
2097	1334	332		1142	523			
1227	2013	15168		319	494			
806	522	576		38	3220			
1081	3554	5379			5008			
398	1266	294			1069			
	515	480			1740			
	8823	7732			522			
	9512	15869			1424			
	645	4302			1396			

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	2825	838			200			
	3411	535			1320			
	4532	1574			536			
	882	7954			844			
	3324	793			2837			
		5365			2339			
		1342			3707			
		1289			1644			
		47			4184			
		1501			8575			
		1092			2737			
		2726			7613			
		720			1359			
		1229			1392			
		503			490			
		1284			2930			
		737			581			
		2845			939			
		2450			1226			
		1023			837			
		698			192			
		281			608			
		505			2433			
		2442			934			
		359						
		3005						
		1846						
		465						
		377						
		263						
		1996						
		3210						
		1045						
		180						
		1528						
		554						
		682						
		525						

ตารางที่ ข.2 ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5312	4547	691	165	20152	2083	4090	5419	1656
7019	13510	4081	2891	5043	1427	10761	12446	3937
293	9503	2043	11182	37004	380	4238	2399	6420
10705	4179	4108	237	4970	213	8726	5560	4764
6946	3080	1678	4192	15909	909	48939	16704	2551
9917	5674	407	6098	733	5466	35195	23911	10512
7521	1432	1244	30466	6279	80365	2060	20258	6526
1723	27369	586	1060	12398	4147	41973	1087	10311
14649	1774	846	3928	8615	8867	2160	12280	5272
11575	6504	1800	3261	2645	744	2426	3708	34672
4437	3727	3240	106	10988	5626	2144	1340	5779
3029	12991	2007	6365	1444	2462	6529	18965	20379
9610	44729	2378	1773	4100	3123	34442	19297	786
8568	669	2306	2834	20129	16604	21156	39929	6117
7762	2765	773	18980	32840	7541	11041	8210	5931
7379	2054	589	1221	566	1530	659	5935	2609
6043	8091	6175	1617	7565	4185	47382	792	4656
11486	18663	1279	5216	1879	777	1875	2782	49470
4622	2635	2651	11033	7277	7530	2356	2649	17845
4161	4285	17023	11581	78158	2091	4877	6535	12083
8465	10233	1968	4683	4788	99	22627	15034	1339
5162	27798	7236	1747	17767	571	2878	33084	6724
8708	6301	1062	775	11988	7041	4143	1727	4186
6705	3004	3408	3059	2693	12624	23172	6431	2647
5108	1301	5101	6520	3437	5020	470	7205	16839
1555	1110	1762	4302	18701	2084	7167	5632	35115
1805	6661	4098	2754	1014	2462	1572	4499	3095
4240	4411	1034	4521	15914	2701	1276	3284	4640
3287	14536	940	2580	12971	18775	4291	12900	8323
5139	2516	592	12428	36401	562	363	2328	8355
17032	3673	8229	5267	2088	1286	4066	17627	17071
3342	1232	2763	1465	5932	1512	6865	5404	9183
2426	2061	1571	1128	9587	25750	976	16553	1187
7779	984	3268	3536	2487	13069	1505	4786	746
7987	2228	4382	8255	7327	2122	1423	8107	
3789	1554	2318	4038	4462	1272		2304	
1035	820	1869	5610	2372	865		5392	
1193	6542	1611	10241	1417	3184		1799	

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3931	21748	1069	11694		8499			
1864	915	771	184		9183			
1708	3420	4966	3538		2018			
6083	12375	1195	2027		726			
9349	3607	11256	3575		7436			
6672	4055	688	8527		7320			
8604	2646	997	8893		7350			
1154	3168	440	4001		3204			
8277	1738	1174	2115		2278			
10259	6606	556			5731			
6083	2375	1114			3889			
4590	1518	1667			578			
1340	1070	2318			3839			
4412	1700	894			9821			
6914	450	3013			1144			
4081		323			5021			
2388		1241			2294			
		1031			5021			
		1854			4297			
		4523			2334			
		1196			661			
		504			657			
		972			340			
		261						
		11497						
		1888						
		4883						
		1275						
		3427						
		11162						
		404						
		5385						
		884						
		817						
		2127						
		734						
		8013						

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
		4991						
		2274						
		2217						
		1933						
		6400						
		4175						
		1039						
		1422						
		6569						
		2099						
		963						
		344						
		3371						
		1568						
		1134						
		4240						
		1534						
		1834						
		5181						
		1220						
		402						
		1178						
		186						
		5728						
		205						
		1014						
		1146						
		947						
		1090						
		696						
		925						
		463						
		439						

ตารางที่ ข.3 ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1211	12196	2483	18763	796	20719	23381	1158	10902
15480	8159	923	24825	25681	18876	18158	11907	10679
3175	2581	24141	5103	1901	14795	4817	3270	10116
6083	25822	727	8882	2640	1922	4884	1049	662
1908	3844	6607	6488	48812	1991	16743	2843	5167
1893	3556	2302	1725	1751	3143	3325	1458	9268
10960	2246	15609	5761	4786	4465	12301	1864	24161
933	26485	4759	9187	1541	6195	15343	7987	15695
1192	4025	3453	7335	5333	808	2671	2339	21722
7771	5013	870	1743	2758	20488	15537	2785	1027
2928	9036	2092	13004	1813	17200	1232	1063	7879
3144	3349	151	7536	4469	4182	2308	1591	30227
4263	3826	2703	1095	9628	3143	1735	17437	4861
1764	4388	10618	3439	8619	3952	3884	3860	29974
21736	3627	2446	796	8013	36723	16314	664	11076
1243	18528	997	18250	832	1677	14901	3593	576
1908	5693	3548	18155	1597	3763	15104	1722	1353
43253	966	4897	11624	15914	10670	1914	14834	1887
8970	2665	6075	58124	10250	5362	23544	811	866
2893	2009	1034	1950	5655	1879	11295	27055	2892
7740	5443	4907	1199	9571	1006	195	4129	61960
2103	2391	18285	2489	955	912	534	3773	1247
397	6527	3998	317	26112	1992	9538	47240	5350
18762	7845	2484	2113	7933	5215	1869	1534	1490
1862	2486	4642	13207	11857	5784	8522	1073	20359
1570	3113	1671	9475	1408	10132	2122	4378	4545
9555	26053	3758	12488	5620	3705	9097	2384	21147
2384	4722	5728	2355	24621	7392	2501	7721	15766
7902	4719	5358	13329	3667	684	6056	1049	7767
20710	1698	1100	23523	1190	1999	5115	3551	1447
20264	2136	2538	74012	23008	1086	14068	2633	2204
7099	5152	1200	2949	11294	18257	36741	239	686
805	3775	3972	9307	4985	25444	8212	5461	5981
9231	5663	11655	2835	3748	11938	3117	5981	1113
2505	4083	1775	3823	10126	14823	940	2961	5761
3583	2259	5305	30859	4168	3298	36698	2240	1081
6514	10714	6440	2277	10187	12108	423	5917	12078
7159	24294	1298	3410	11337	2019	755	3554	8679

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1121	2365	1436	3056	3511	3924	869	2103	3415
10094	2159	7883		1666	1871	2198	5975	
8651	4950	3575		1216	1170	2356	1414	
4787	13500	11991		211		913	20110	
16396	4253	264				1584	1945	
2989	4863	8118				964	14573	
7459	3563	1997				2211	5072	
7239	8686	479				978	19226	
2242	2280	2293					2275	
21902	2682	1851					1488	
1860	886	29882					759	
2005	8157	3275					16321	
8104	862	6533					5370	
222	5195	887					6293	
14526	3720	3104					7495	
11767	3790	566					23790	
8506	4009	3553					45161	
3923	5704	8018					1214	
1763	15673	1090					6547	
10838	4404	1745					1700	
10746	6717	6748					2153	
5419	3607	4640					5568	
4928	8462	576					1762	
1978	1564	3122					3205	
7416	673	384					821	
8674	2693	1522					8748	
4084	12686	9440					7947	
3724	2741	5388					18531	
2772	5663	10298					4568	
1105	2650	14406					3392	
1101	3158	852						
1163	2374	1353						
360	4577	1885						
	3904	2776						
	1012	1040						
	1171	10522						
		6300						
		5908						

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
		1262						
		1787						
		3583						
		2047						
		1299						
		3866						
		2989						
		2732						
		2458						
		4528						
		2831						
		4990						
		1764						
		132						

ตารางที่ ข.4 ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
22645	7499	1515	1334	13103	1217	1291	748	6532
7836	4740	2776	23710	15724	2967	3358	11655	4502
3778	4391	3261	5699	10355	103518	1091	23464	8090
3930	6439	2323	113	18022	2296	9673	20692	2693
11712	7841	21068	56363	491	370	1045	633	2841
2611	1510	2619	6050	71086	574	9465	23983	705
416	12282	3717	1042	4809	46745	9374	2427	14010
5114	2324	4571	410	1888	6301	3739	1994	1595
1468	7472	2227	1560	7949	1167	604	5479	363
1980	6372	2559	30014	261	14084	1397	4244	856
16021	15836	9009	11270	1105	34787	1191	2514	19695
3851	13431	14281	5772	7344	9273	431	31709	23271
1503	3238	4251	3898	263	5654	2465	13902	80108
27135	5972	1665	2153	6701	5825	249	643	36351
1507	3831	216	3966	23574	606	1220	2496	480
1406	2929	1794	2164	14578	8581	546	801	6244
1829	9012	5007	1380	2072	5515	1166	3641	2963
2445	5821	3884	2840	887	4757	3938	5061	3244
745	12918	10774	4068	64246	6495	7252	8234	23094
1117	3157	4464	1406	6177	55552	4087	13547	9263
2539	13921	8522	2391	3186	2289	1311	10928	13958
866	626	7415	2542	68531	1861	1938	2864	4469
8180	2547	10633	2356	5216	28058	1459	5404	8765
10999	1182	3418	9863	818	1375	688	2721	163
4453	621	8373	23308	15838	8065	15590	19448	5458
9795	5624	3243	3274	544	3590	6044	526	596
1406	4708	10995	13667	623	2075	6374	286	8284
10047	5850	7892	7921	3518	6449	256	4422	5263
6835	73	8530	774	729	1418	838	8926	21947
2377	4453	3903	5478	2347	6217	1869	6000	9623
1253	10767	3219	562	40168	8063	898	1395	240
3309	2245	4823	19543	3543	3415	2237	16443	41047
4697	3525	4509	8519	11454	3019	5809	51444	3264
4961	6099	22250	71481	29460	2220	1479	2440	678
2678	1035	2091	6331	3702	1379	5446	6013	6300
9961	29517	2924	5545	5701	1352	183	5694	1738
6037	10870	1324	1647	8105	714	1479	2353	5480
1855	1054	1719	32790	2203		3385	5395	19807

ตารางที่ ข.4 (ต่อ) ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2327	5966	6603	3498	1564		762	3817	3750
8969	8538	4225	2490	89		10472	13490	
7948	2191	2036	942			1875	2554	
12629	4760	4174	1234			3692	12578	
3938	4843	5992	3024			2543	12317	
2828	2566	4924	4355			467	165	
13610	1081	14404	2124			3051	3236	
5134	15882	2253	12714			5292	1457	
5839	4729	3978	6077			4546	2354	
3211	6489	8655	4206			3316	1176	
3140	3829	2712	2727			4766	3309	
3649	4002	3666				834	439	
5499	1346	17182				2501	2298	
12973	6953	5959				5272	504	
10593	1933	1369				5942		
2903	1933	2102				1454		
7183	8697	4262				4398		
1796	5806	6692				12536		
2421	1198	5874				38404		
1110	3262	2104				11258		
778	1350	2566				15636		
3014	6145	3014				629		
2310	2045	2330				6881		
1159	1919	1329				7213		
2820	2864	726				4529		
731	2029					8941		
	4967					1041		
	3964					3674		
	2176					3080		
	4773					4709		
	3984					2296		
						3786		
						3407		
						6433		
						6153		
						1830		
						3129		
						2357		

ตารางที่ ข.5 ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2306	15091	5801	13900	22069	935	5756	1602	8206
494	3212	11832	93112	29751	3550	3790	2918	5570
4470	2306	11671	562	848	55991	14023	8418	9116
3894	759	2431	2506	3147	16138	2810	22354	3015
45386	12134	1921	35935	10186	9173	2330	5290	123
14212	3162	4354	4350	10753	283	2239	13846	990
3041	33855	22728	5913	1288	4666	19441	2854	1010
4722	5797	9552	5375	2797	81492	4516	3394	1848
19496	4558	3995	21517	21596	6612	10205	18	8422
6202	3636	1443	2092	961	5000	7753	11465	17467
2633	840	2812	7311	3154	3964	12746	49187	3428
4835	4504	5316	7466	4774	2020	2711	5027	14069
8947	3027	4981	20173	4308	2036	1951	20424	9492
7907	644	14622	3732	2432	11377	662	7856	7956
6901	7482	3759	4219	15345	5318	7483	6807	2190
62719	2272	2038	20713	1401	1904	10902	16498	4143
4922	2615	8940	925	11673	17374	1811	61100	30475
8545	33735	3164	32613	3515	29585	1754	2818	16726
15165	10671	327	39673	26983	1142	8862	4177	14541
10313	4376	1737	7033	5931	3659	4133	3546	5970
3368	1900	1362	8756	5367	5715	65935	6007	22407
12510	3873	31569	1747	6260	10556	3407	21460	11010
16167	15033	19789	2853	17853	4566	5715	2203	10631
8294	1507	6658	2617	3770	21398	23155	8141	4580
14979	3324	1958	887	32366	4598	20840	8976	7163
24174	12190	27806	637	15219	21840	9071	3505	5380
9588	6098	7273	9341	5434	648	10050	18873	680
9872	2493	2728	1093	6020	2768	39018	22207	14898
6643	2524	4403	1100	12743	10460	3871	1683	7520
21235	3441	8870	3652	3861	10936	8047	14422	5146
4161	3699	898	4920	4604	25254	847	10659	761
3482	3226	5189	2207	17397	1955	7036	780	796
2111	1674	4782	17046	24369	6029	2216	5348	13405
11056	2151	7208	635	5277	1886	4518	1967	16242
2863	3634	4644	2963	2306	624	10481	9977	790
6013	6479	19693	1337	5456	8383	6597	2565	13902
1578	5238	19415	6744	5661	15178	2146	4621	3358
7587	3955	1029	1545	3844	2073	12754		2807

ตารางที่ ข.5 (ต่อ) ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1130	22844	8845			7709	1499		8749
2836	10658	13509			5508	1571		
	873	14924			2624			
	7909	13198						
	4571	7483						
	8339	3573						
	6020	2458						
	3521	6985						
	1086	1142						
	8435	1001						
	3034							
	4405							
	6685							
	13362							
	4096							
	12462							
	3687							
	6532							
	6738							
	10258							
	1962							
	3616							

ตารางที่ ข.6 ค่าพื้นที่ของอะลูมิเนียม อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
531	1244	7168	10026	1797	4028	7851	33126	1244
9028	10587	45129	56987	6544	4434	13995	83797	634
29182	28701	88817	516	6370	7061	53119	95299	1742
9871	1665	370	17032	2115	1023	2392	410	1808
840	48402	888	5909	4117	752	28017	7704	10236
25512	18070	8520	16332	4139	854	7351	6399	11880
7252	6743	3610	21196	14038	241	7555	9791	1150
9674	9638	3806	7055	3479	3598	5835	2197	4522
28671	1459	5190	2846	54179	1341	2064	11440	11895
3289	21511	3359	8098	11288	2321	1386	5620	37259
1140	5204	1016	15052	2992	2393	11567	10932	5750
1234	29788	3684	19720	25932	1303	31721	2060	5267
22960	21237	1106	1083	3823	5470	9787	9057	15890
11870	2817	1316	27121	7579	1647	807	271	1017
2944	2262	840	25627	415	1358	7788	11622	24586
2462	5985	558	3650	17108	2713	4006	9269	38085
3643	12151	11145	10674	757	703	42100	9741	40459
3896	1658	3558	32552	822	1328	1382	894	7731
9936	1357	630	8655	17882	13633	76045	5021	62442
97442	52254	3581	1070	3838	1729	2153	6376	14759
7775	9144	205	1651	1672	520	3913	19874	39818
24163	3910	684	15402	2241	1554	3642	26238	15293
1456	6705	608	46530	660	4172	11475	50058	709
3868	72	3153	1123	3504	733	185	3764	8714
4477	6899	800	1229	12799	24763	7317	45008	5104
15925	2883	1430	7899	2649	3377	13541	5302	5123
11828	53509	21585	26	3489	3455	2690	7155	2088
6112	17783	4740	3877	1461	28016	2670	1998	58124
15957	4333	12089	19199	26242	5534	1853	4576	30858
36885	9802	539	2473	5322	1338	11125	14684	16719
10397	14769	1538	21781	1966	410	381	2205	13963
1585	7235	8516	2186	3587	2275	3918	4372	1174
11900	4751	4601	12767	12142	8800	24809	792	4540
11354	8324	6945	5876	1423	2113	8718		2183
3085	23863	5970	1277	11622	1247	956		956
12710	21803	17466	5751	1182	3594	23560		1950
14903	4869	3039	680	8135	3015	9427		
8842	1969	2362	1438	703	697	1186		

ตารางที่ ข.6 (ต่อ) ค่าพื้นที่ของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	953	15014		1747	2203	4081		
	837	2548		2444	5838	4731		
	734	5269		1692	728	3253		
	447	11388		1978	14757	2179		
	900	3219		828	3270	1208		
		21697		2857	804			
		11712		3551	1295			
		2538		1209	5490			
		7830		1540	2293			
		1251		1307	5916			
		5805			3567			
		2862			673			
		1022			2021			
		5291			664			
		2273			1029			
		6948			312			
		942			6839			
		3858			1500			
					3708			
					5067			
					1310			
					9045			
					718			
					7245			
					5200			
					1049			
					20912			
					1195			
					1062			
					1533			
					893			
					4990			
					1804			
					988			

ตารางที่ ข.7 ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.690775	0.581345	0.211475	0.170086	0.684442	0.440881	0.556694	0.139706	0.273321
0.239707	0.358092	0.057641	0.063004	0.451105	0.28018	0.154539	0.054969	0.33814
0.193888	0.200738	0.048096	0.420465	0.669625	0.203365	0.078159	0.050311	0.427958
0.321106	0.338682	0.508761	0.315259	0.554392	0.250338	0.35111	0.379822	0.281875
0.430606	0.09872	0.586102	0.339392	0.422801	0.339608	0.125702	0.27392	0.284262
0.18338	0.227342	0.505561	0.183179	0.675525	0.592626	0.332712	0.230364	0.27868
0.38307	0.617173	0.220338	0.254919	0.322112	0.65415	0.25114	0.54208	0.352529
0.309923	0.350764	0.305692	0.543049	0.549169	0.308036	0.199365	0.283131	0.338833
0.179841	0.386713	0.241992	0.551327	0.065466	0.554892	0.536259	0.337908	0.139032
0.187176	0.197725	0.322813	0.341061	0.253336	0.489063	0.66897	0.267194	0.112459
0.538556	0.504691	0.509709	0.197851	0.518908	0.488673	0.265269	0.237548	0.426619
0.404143	0.123076	0.281934	0.232821	0.117965	0.742828	0.151371	0.164348	0.274494
0.199741	0.237195	0.358659	0.643765	0.257216	0.511925	0.450218	0.414868	0.426248
0.373616	0.34247	0.600261	0.103457	0.501498	0.229212	0.447914	0.36734	0.36931
0.597479	0.235499	0.250495	0.202356	0.727459	0.399994	0.341942	0.278887	0.284592
0.479676	0.428563	0.666524	0.256888	0.265758	0.582108	0.436854	0.540979	0.11893
0.468678	0.32858	0.167395	0.360006	0.614442	0.679966	0.097077	0.379611	0.213617
0.417764	0.531861	0.316683	0.120265	0.704895	0.277709	0.278037	0.189284	0.494584
0.26085	0.640608	0.498802	0.300759	0.31496	0.292948	0.062093	0.420627	0.068752
0.092113	0.090776	0.498698	0.652609	0.563362	0.46794	0.412162	0.528393	0.265847
0.18426	0.32327	0.554117	0.428793	0.703223	0.63129	0.682835	0.184673	0.142998
0.191059	0.501092	0.538618	0.259382	0.648104	0.616868	0.640648	0.266329	0.425514
0.409491	0.688975	0.585583	0.134114	0.74037	0.423491	0.355482	0.119998	0.340581
0.398927	0.490005	0.23405	0.519908	0.211281	0.660598	0.232284	0.239729	0.593875
0.293271	0.496884	0.556815	0.596904	0.29245	0.072464	0.509491	0.124111	0.610801
0.30135	0.447624	0.415659	0.490551	0.777668	0.290523	0.406102	0.305183	0.254607
0.265396	0.066375	0.086216	0.351563	0.637703	0.388845	0.716959	0.3757	0.134262
0.300012	0.216458	0.196622	0.532301	0.724429	0.096191	0.713495	0.320139	0.092912
0.207009	0.507778	0.161726	0.349054	0.243977	0.253825	0.676543	0.560332	0.182241
0.172424	0.510126	0.46253	0.526127	0.435023	0.603947	0.320803	0.233722	0.238727
0.422095	0.236628	0.360877	0.279651	0.641083	0.221051	0.262266	0.527095	0.321022
0.413096	0.23554	0.348356	0.521182	0.535578	0.65667	0.657414	0.615556	0.749837
0.333145	0.505384	0.323501	0.471788	0.333978	0.236829	0.183894	0.469219	0.484707
0.435969	0.599109	0.184899	0.457171	0.478388	0.697316	0.392351		0.612449
0.383388	0.119873	0.458565	0.593976	0.26783	0.75186	0.407589		0.413899
0.319767	0.191785	0.298988	0.59521	0.630071	0.320715	0.184672		0.612716
0.202035	0.337331	0.532807	0.611791	0.193878	0.461874	0.200624		
0.537194	0.34573	0.383649	0.541304	0.65558	0.320955	0.542277		

ตารางที่ ข.7 (ต่อ) ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0.631937	0.653925		0.698933	0.378294	0.603886		
	0.723483	0.543809		0.450964	0.276415	0.269363		
	0.387971	0.283759		0.645931	0.104642	0.586988		
	0.715327	0.736176		0.689865	0.396302	0.287401		
		0.14031		0.439593	0.766474			
		0.168448		0.489841	0.611781			
		0.339517		0.66195	0.190357			
		0.218047		0.487227	0.559714			
		0.510518		0.326968	0.17173			
		0.415076			0.375805			
		0.629435			0.641588			
		0.416786			0.477378			
		0.364216			0.771712			
		0.378541			0.439955			
		0.516279			0.308855			
		0.567502			0.320925			
		0.464709			0.590866			
					0.325538			
					0.155968			
					0.594763			
					0.352716			
					0.742627			
					0.444494			
					0.259269			
					0.618208			
					0.123691			
					0.549605			
					0.757744			
					0.558498			
					0.793619			
					0.325915			
					0.772216			
					0.596044			

ตารางที่ ข.8 ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.210455	0.241883	0.318239	0.301863	0.225157	0.519155	0.58097	0.334743	0.521981
0.29008	0.672101	0.262186	0.132486	0.610933	0.505662	0.42459	0.627399	0.537159
0.547075	0.394103	0.437568	0.16292	0.721815	0.144339	0.309731	0.307481	0.484647
0.252599	0.097959	0.511772	0.676019	0.618409	0.486122	0.480618	0.689614	0.183568
0.520336	0.174498	0.174388	0.240121	0.77947	0.322894	0.456331	0.671265	0.336123
0.171318	0.247796	0.302384	0.347365	0.262785	0.209136	0.6507	0.331036	0.400002
0.376894	0.169528	0.695034	0.597416	0.72555	0.321783	0.273893	0.273873	0.354094
0.543083	0.593621	0.548609	0.172613	0.778221	0.494537	0.364199	0.198083	0.416746
0.539703	0.480072	0.222931	0.688399	0.771102	0.430949	0.35337	0.631015	0.356513
0.343698	0.588963	0.73707	0.160691	0.365571	0.184093	0.38596	0.612212	0.204035
0.706106	0.166425	0.324043	0.521363	0.557502	0.5858	0.305839	0.349308	0.38673
0.694183	0.563589	0.416574	0.352445	0.642091	0.372208	0.651096	0.294128	0.145275
0.562171	0.75887	0.197472	0.47374	0.742803	0.366513	0.213171	0.479206	0.278014
0.43747	0.415134	0.27261	0.165207	0.264436	0.397019	0.316043	0.708663	0.681204
0.158476	0.573583	0.604081	0.507878	0.214605	0.366441	0.166558	0.332241	0.407871
0.390064	0.398014	0.514328	0.603941	0.6608	0.673156	0.151591	0.202916	0.223464
0.515431	0.483326	0.701362	0.197049	0.289915	0.549868	0.173391	0.277477	0.251478
0.270131	0.47934	0.658749	0.173647	0.66281	0.479937	0.731131	0.68671	0.68671
0.402693	0.59541	0.32346	0.236667	0.249719	0.5192	0.253795	0.374492	0.563346
0.502663	0.496449	0.120056	0.373632	0.732641	0.396105	0.550273	0.501807	0.432433
0.24605	0.241508	0.228036	0.228341	0.65904	0.540607	0.321911	0.652566	0.661178
0.246627	0.391748	0.261363	0.28272	0.746022	0.453182	0.286583	0.536458	0.164558
0.367048	0.548426	0.325986	0.389572	0.497791	0.583305	0.773318	0.336953	0.762283
0.470016	0.503935	0.463141	0.564616	0.55453	0.43619	0.644997	0.496953	0.173109
0.277188	0.524533	0.66381	0.536506	0.742195	0.270914	0.350504	0.434566	0.779071
0.65589	0.288998	0.280537	0.447914	0.788678	0.497089	0.683297	0.292075	0.425088
0.554382	0.625866	0.371526	0.365464	0.580573	0.229352	0.72264	0.198314	0.532633
0.169899	0.393808	0.257816	0.325067	0.581955	0.589601	0.553435	0.141294	0.578718
0.202009	0.475237	0.256412	0.438066	0.333252	0.363384	0.565467	0.540353	0.324311
0.515729	0.172966	0.508386	0.481609	0.373244	0.485587	0.253225	0.772023	0.470288
0.296039	0.118281	0.49258	0.653896	0.352287	0.185631	0.350524	0.541378	0.419843
0.313854	0.409928	0.324332	0.641444	0.291914	0.301045	0.743011	0.363329	0.249315
0.409327	0.679964	0.595632	0.208273	0.474381	0.6243	0.600118	0.456563	0.680519
0.58081	0.450869	0.358417	0.531433	0.531254	0.354888	0.50512	0.65784	0.655779
0.336665	0.685674	0.467965	0.364673	0.539323	0.427572	0.709596	0.359733	0.231076
0.445126	0.480603	0.244332	0.528665	0.478411	0.283245	0.433443	0.400774	0.743094
0.712836	0.497627	0.204425	0.383953	0.38803	0.498821	0.63737	0.526819	0.322228
0.462745	0.463264	0.133248	0.78395	0.764303	0.310864	0.750322	0.735792	0.459688

ตารางที่ ข.8 (ต่อ) ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.397791	0.708602	0.180704	0.570781	0.677413	0.355868	0.644134	0.63912	0.717716
0.558957	0.508364	0.367212	0.473849	0.222576	0.496172		0.70341	0.578819
0.264128	0.356191	0.373809	0.682157	0.392188	0.297599		0.357181	
0.37591	0.17868	0.744331	0.68823	0.735645	0.227645		0.363173	
0.593379	0.29229	0.495737	0.330918	0.185146	0.435564		0.355235	
0.279887	0.387392	0.380011	0.660417	0.387099	0.421169		0.382333	
0.221066	0.099032	0.192817	0.720721	0.33037	0.256731		0.548715	
0.381378	0.468633	0.679999	0.770691	0.265352	0.655712		0.237464	
0.273397	0.585931	0.226424	0.487295	0.686715	0.331503		0.466979	
0.384623	0.172289	0.589903	0.523888	0.742851	0.495088		0.29608	
0.251826	0.569328	0.750371	0.690598	0.260276	0.513298		0.557521	
0.068867	0.477047	0.656246	0.309838	0.671893	0.219745		0.399894	
0.459068	0.560609	0.535102		0.296924	0.616265		0.445985	
0.52665	0.273349	0.442266		0.433292	0.370893		0.65805	
0.512323	0.659431	0.494092		0.350609	0.360903		0.429372	
0.642144	0.239375	0.574254		0.60887	0.637946		0.687217	
0.27263	0.196358	0.518494		0.718703	0.284435		0.270057	
0.367412	0.243052	0.556706		0.367511	0.301635			
0.652116	0.247585	0.771619		0.258266	0.316411			
0.298414	0.382911	0.62322		0.527995	0.543433			
0.309513	0.418876	0.300226		0.448539	0.520764			
0.178888	0.389547	0.337691		0.529344	0.52011			
0.55152	0.428199	0.615988		0.528707	0.35458			
0.721359	0.498985	0.253445		0.44348	0.313239			
0.58276	0.705004	0.798023		0.43496	0.480177			
0.715704	0.424063	0.337016		0.646144	0.779986			
0.454602	0.401512	0.510019		0.393037	0.212932			
0.638646	0.446258	0.221103		0.469293	0.278716			
0.597496	0.173038	0.714667		0.5908	0.521751			
0.569789	0.353311	0.712393		0.641751	0.417963			
0.633726	0.716291	0.124419		0.379552	0.506856			
0.637133	0.693518	0.568759		0.513822	0.353874			
0.352797	0.514615	0.262312			0.348479			
0.659068	0.27096	0.781205			0.381778			
	0.324156	0.616532			0.167352			
	0.233332	0.15815			0.504896			
	0.150373	0.123114			0.289328			
	0.386514	0.388019			0.244308			

ตารางที่ ข.8 (ต่อ) ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0.404883	0.159114			0.550012			
	0.276393	0.727337			0.257382			
	0.638157	0.681053			0.423701			
	0.414925	0.583167			0.520762			
	0.28464	0.109958			0.378069			
		0.425397			0.300256			
		0.130089			0.363369			
		0.298415			0.684866			
		0.425568			0.560596			
		0.377464			0.700566			
		0.488453			0.553047			
		0.617311			0.198623			
		0.3288			0.254511			
		0.607644			0.713196			
		0.376372			0.594869			
		0.433797			0.239796			
		0.284936			0.591996			
		0.545275			0.568064			
		0.583729			0.546627			
		0.270966			0.760026			
		0.235331			0.569088			
		0.530635			0.503749			
		0.590114			0.314151			
		0.711728			0.548169			
		0.196379						
		0.658511						
		0.464786						
		0.375196						
		0.743222						
		0.711529						
		0.606143						
		0.27704						
		0.592821						
		0.664978						
		0.507371						
		0.544536						
		0.367479						
		0.66413						

ตารางที่ ข.9 ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.670286	0.405488	0.402549	0.372165	0.529113	0.667548	0.58847	0.660288	0.489114
0.548073	0.667171	0.373378	0.045296	0.271147	0.737627	0.572972	0.704612	0.637242
0.691177	0.434978	0.470639	0.492569	0.673997	0.136753	0.247368	0.375286	0.296354
0.841135	0.570897	0.682026	0.393893	0.469747	0.408194	0.480832	0.194561	0.622561
0.14166	0.403222	0.666118	0.209708	0.513555	0.408998	0.448884	0.526706	0.623267
0.244524	0.647717	0.508365	0.479957	0.485564	0.301941	0.626722	0.478769	0.505662
0.813078	0.217476	0.480036	0.801958	0.768626	0.530064	0.226899	0.502034	0.617236
0.349664	0.365771	0.583786	0.554165	0.287972	0.12665	0.718306	0.572954	0.470921
0.307966	0.668397	0.249827	0.47632	0.238293	0.595485	0.432316	0.509459	0.534926
0.495804	0.474383	0.770206	0.67273	0.566347	0.623602	0.400062	0.659642	0.145685
0.706224	0.825883	0.360743	0.717851	0.787028	0.740983	0.415626	0.147093	0.692905
0.731465	0.745358	0.37435	0.722183	0.436856	0.621691	0.197153	0.574278	0.227852
0.151448	0.62823	0.390671	0.207677	0.525728	0.691392	0.398145	0.208835	0.383622
0.313447	0.759058	0.354211	0.592756	0.532254	0.55512	0.531954	0.260203	0.29908
0.281841	0.549989	0.344989	0.655247	0.466066	0.814438	0.604111	0.508034	0.502748
0.155275	0.654281	0.635467	0.38869	0.763192	0.74192	0.256401	0.32466	0.349258
0.686748	0.592825	0.455809	0.74668	0.37575	0.704792	0.668483	0.114438	0.111399
0.315507	0.309425	0.622176	0.235625	0.328197	0.280669	0.80491	0.212114	0.150912
0.640683	0.378283	0.578448	0.094171	0.107215	0.770574	0.645928	0.630236	0.266009
0.589996	0.725452	0.783104	0.446265	0.46949	0.582582	0.478891	0.717095	0.543692
0.344924	0.856591	0.671242	0.690095	0.602132	0.780373	0.144765	0.488947	0.235906
0.479711	0.568728	0.260455	0.580257	0.471469	0.567563	0.503288	0.359451	0.342417
0.210779	0.617046	0.14353	0.398289	0.303646	0.364278	0.724805	0.381333	0.167453
0.428966	0.50843	0.488272	0.671886	0.67537	0.156417	0.510231	0.349297	0.252719
0.321021	0.586839	0.615592	0.568833	0.139492	0.536582	0.240411	0.540652	0.370648
0.424117	0.600955	0.22713	0.493209	0.21462	0.201628	0.585803	0.260359	0.713572
0.516123	0.442611	0.493666	0.553252	0.510302	0.634384	0.232837	0.440354	0.554627
0.4386	0.602517	0.487133	0.684637	0.429454	0.768471	0.190307	0.318691	0.271202
0.396647	0.47647	0.373245	0.729652	0.308729	0.389931	0.576618	0.79745	0.71058
0.412934	0.768025	0.462346	0.366112	0.698585	0.507615	0.525139	0.659249	0.580351
0.539151	0.526539	0.74524	0.686929	0.459506	0.171489	0.514435	0.519179	0.648902
0.65753	0.585739	0.693885	0.336383	0.221804	0.597375	0.652778	0.628201	0.722796
0.686958	0.853934	0.392742	0.39337	0.28183	0.683734	0.388808	0.676457	0.551438
0.330548	0.546937	0.606431	0.637472	0.269576	0.77861	0.72591	0.259563	0.240444
0.785857	0.61058	0.369519	0.48324	0.359472	0.655215	0.162209	0.224777	0.737989
0.322384	0.573955	0.186275	0.393043	0.496993	0.611658	0.723607	0.539848	0.301719
0.681251	0.669889	0.270321	0.525928	0.223659	0.275871	0.824497	0.312961	0.592026
0.755159	0.708604	0.546784	0.657168	0.6042	0.689248	0.276554		0.656923

ตารางที่ ข.9 (ต่อ) ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส)

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.503221	0.316501	0.613492			0.323646	0.658791		0.308853
0.312538	0.297141	0.415116			0.512037	0.61508		
	0.763864	0.309375			0.54219			
	0.640403	0.22261						
	0.710418	0.428507						
	0.331527	0.306056						
	0.594114	0.782721						
	0.718197	0.190058						
	0.520118	0.606037						
	0.432492	0.697147						
	0.772446							
	0.54792							
	0.215666							
	0.316324							
	0.60726							
	0.539923							
	0.619752							
	0.41538							
	0.630535							
	0.402802							
	0.77583							
	0.265472							

ตารางที่ ข.10 ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.73244	0.393869	0.66738	0.2799	0.616318	0.159746	0.519959	0.238302	0.546606
0.517435	0.52159	0.531392	0.253892	0.184791	0.139505	0.445974	0.237127	0.332149
0.663631	0.634874	0.205221	0.358157	0.379803	0.141514	0.541021	0.604368	0.448283
0.332775	0.157786	0.599406	0.608592	0.245768	0.670586	0.550941	0.569931	0.539434
0.649563	0.722836	0.514258	0.667987	0.071887	0.504428	0.463051	0.461718	0.342764
0.705068	0.611955	0.444539	0.586394	0.294507	0.500932	0.50437	0.461556	0.741219
0.262255	0.717263	0.201254	0.466337	0.225023	0.321517	0.224554	0.624046	0.34383
0.740372	0.470964	0.385736	0.529542	0.661831	0.247356	0.313764	0.530325	0.414081
0.424529	0.584341	0.542743	0.676664	0.737621	0.78962	0.565715	0.630089	0.667144
0.481829	0.650561	0.758166	0.758947	0.302592	0.133941	0.627386	0.536789	0.779025
0.433497	0.365488	0.718386	0.545296	0.823134	0.182495	0.646815	0.596554	0.421348
0.563227	0.732943	0.504745	0.457395	0.775885	0.458553	0.688544	0.229499	0.28681
0.446467	0.497426	0.667501	0.638419	0.497758	0.615883	0.774497	0.194866	0.842422
0.493102	0.67544	0.419169	0.470342	0.74354	0.625539	0.740729	0.592152	0.396596
0.147749	0.615756	0.385833	0.594257	0.3494	0.063728	0.505097	0.570744	0.725213
0.68991	0.305675	0.472405	0.417257	0.841014	0.430551	0.356219	0.505595	0.675729
0.581522	0.527146	0.479116	0.338276	0.666377	0.283187	0.470944	0.583038	0.472355
0.140466	0.651816	0.527908	0.303834	0.380691	0.144957	0.500864	0.373328	0.817939
0.649553	0.704526	0.449014	0.18066	0.392417	0.52732	0.489488	0.726664	0.732566
0.453487	0.780213	0.547711	0.804647	0.623637	0.57543	0.8168	0.224505	0.71854
0.3593	0.523214	0.587377	0.670701	0.45159	0.337994	0.494053	0.407951	0.192333
0.159843	0.839394	0.133389	0.564061	0.698737	0.467515	0.622324	0.492577	0.817292
0.81405	0.741553	0.679035	0.337591	0.177816	0.67305	0.500247	0.09515	0.492629
0.331839	0.395659	0.664407	0.620564	0.418382	0.443987	0.395065	0.656189	0.412494
0.698733	0.546204	0.342626	0.67325	0.359313	0.294829	0.69695	0.405167	0.318864
0.698819	0.694227	0.717314	0.268763	0.448549	0.197186	0.692246	0.491348	0.681286
0.267175	0.179211	0.479868	0.254737	0.570936	0.40625	0.614193	0.496976	0.384477
0.551853	0.70909	0.40913	0.639644	0.181815	0.386068	0.671701	0.22762	0.434002
0.430061	0.607498	0.66133	0.334382	0.822813	0.584211	0.67821	0.639801	0.520917
0.214317	0.609838	0.588218	0.299524	0.387412	0.737878	0.54302	0.792461	0.704391
0.24922	0.499455	0.49205	0.082328	0.211567	0.251046	0.488967	0.826149	0.762306
0.639261	0.486666	0.398915	0.544866	0.402051	0.128304	0.444403	0.321667	0.483412
0.649813	0.714528	0.422621	0.387551	0.670223	0.078766	0.718889	0.494748	0.456853
0.461776	0.546308	0.346077	0.771458	0.658798	0.245115	0.71617	0.525602	0.606305
0.64965	0.534719	0.516439	0.517756	0.619208	0.449955	0.215236	0.63501	0.668512
0.437026	0.741358	0.626544	0.22509	0.642027	0.434399	0.415147	0.513161	0.279116
0.30522	0.37264	0.403417	0.695766	0.287583	0.155794	0.387563	0.51876	0.729897
0.228641	0.204843	0.717723	0.441557	0.20656	0.318439	0.670977	0.326719	0.658934

ตารางที่ ข.10 (ต่อ) ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.135554	0.809725	0.780796	0.74464	0.785415	0.173561	0.440233	0.45932	0.462805
0.355317	0.643463	0.32978		0.655517	0.787299	0.46849	0.540028	
0.410202	0.591852	0.472675		0.645656	0.516548	0.557195	0.634109	
0.453497	0.297763	0.24398		0.509465		0.401729	0.162041	
0.254152	0.337624	0.412329				0.680298	0.520721	
0.596021	0.448029	0.362621				0.725092	0.313778	
0.495306	0.449627	0.395466				0.418902	0.42906	
0.544665	0.318371	0.671629				0.719786	0.236301	
0.604288	0.708501	0.528317					0.743234	
0.26457	0.691974	0.596695					0.488123	
0.652979	0.637217	0.104495					0.671788	
0.610231	0.396867	0.541347					0.205094	
0.529545	0.631661	0.334777					0.316834	
0.55544	0.406758	0.730832					0.553193	
0.357462	0.488579	0.773166					0.281474	
0.366616	0.611061	0.652237					0.364619	
0.482699	0.653915	0.628688					0.143733	
0.55526	0.666467	0.255748					0.663078	
0.664373	0.310333	0.696599					0.279882	
0.330216	0.377635	0.485185					0.623825	
0.316336	0.630011	0.480047					0.465292	
0.483785	0.396641	0.445674					0.57288	
0.298312	0.320314	0.653354					0.330861	
0.676514	0.814936	0.528688					0.469667	
0.372335	0.81609	0.553685					0.790729	
0.333228	0.750066	0.485849					0.262133	
0.501921	0.224602	0.218834					0.474766	
0.617287	0.711123	0.436274					0.292634	
0.70383	0.361465	0.328367					0.500949	
0.596544	0.578992	0.309219					0.365881	
0.834393	0.628713	0.772326						
0.425653	0.500401	0.597758						
0.351446	0.397963	0.636234						
	0.396663	0.484273						
	0.671686	0.497215						
	0.408309	0.225501						
		0.422528						
		0.546807						

ตารางที่ ข.10 (ต่อ) ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 665 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
		0.77124						
		0.698998						
		0.421349						
		0.711311						
		0.729977						
		0.388631						
		0.576563						
		0.462303						
		0.500966						
		0.602792						
		0.76292						
		0.387348						
		0.664019						
		0.528156						

ตารางที่ ข.11 ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.5799	0.644991	0.784418	0.26194	0.285592	0.70514	0.338568	0.677679	0.72642
0.642026	0.57476	0.310735	0.761872	0.504414	0.816644	0.185086	0.208951	0.788363
0.323847	0.415173	0.668409	0.336492	0.194964	0.407252	0.662243	0.539132	0.425051
0.327067	0.35549	0.458174	0.201559	0.598126	0.791785	0.339554	0.413344	0.634868
0.47674	0.720813	0.411718	0.752682	0.366342	0.753138	0.12875	0.283644	0.671035
0.400052	0.579754	0.578314	0.264067	0.76884	0.256098	0.26147	0.342421	0.46418
0.481458	0.704334	0.598322	0.13734	0.748162	0.047812	0.49681	0.202471	0.232702
0.74597	0.252477	0.390316	0.827013	0.528395	0.598269	0.084839	0.511625	0.489916
0.474068	0.436595	0.475038	0.834985	0.606207	0.31015	0.718918	0.4031	0.54519
0.181288	0.75232	0.443879	0.739535	0.63329	0.576056	0.557801	0.471544	0.198271
0.570827	0.499692	0.378201	0.750037	0.437493	0.524558	0.760127	0.786452	0.350883
0.502514	0.380648	0.37151	0.425619	0.77462	0.693355	0.622095	0.321957	0.30024
0.446238	0.176707	0.640348	0.727904	0.6804	0.457337	0.192206	0.41512	0.806455
0.546394	0.595554	0.508363	0.705651	0.279524	0.125551	0.184332	0.132204	0.452156
0.606049	0.820192	0.657593	0.25383	0.198045	0.239701	0.18043	0.560422	0.639
0.606032	0.589564	0.733887	0.656569	0.376766	0.444548	0.787806	0.655067	0.810736
0.354521	0.513862	0.466594	0.743691	0.149179	0.775024	0.158464	0.592569	0.396725
0.529476	0.317892	0.674479	0.456231	0.489535	0.727105	0.363344	0.284257	0.227042
0.49195	0.420517	0.445147	0.821493	0.497763	0.347705	0.364919	0.369008	0.311218
0.706719	0.516707	0.34336	0.496677	0.110864	0.415017	0.625255	0.338462	0.54197
0.515239	0.412912	0.478087	0.400926	0.372412	0.499635	0.340467	0.262106	0.736055
0.457875	0.117247	0.480628	0.522628	0.402453	0.729832	0.840469	0.189368	0.631589
0.757216	0.442188	0.695032	0.642548	0.539516	0.441461	0.310309	0.700748	0.3948
0.539537	0.671291	0.615763	0.474141	0.456714	0.18851	0.253025	0.748655	0.345574
0.24699	0.713268	0.199374	0.672149	0.854582	0.299346	0.605427	0.403001	0.255317
0.301809	0.708365	0.441026	0.423889	0.565903	0.801567	0.530135	0.744847	0.196528
0.743957	0.400331	0.543327	0.825024	0.520471	0.774049	0.559968	0.83344	0.563349
0.530157	0.609522	0.668688	0.795867	0.275051	0.783272	0.767208	0.406425	0.64932
0.705509	0.368967	0.540443	0.622219	0.395009	0.173681	0.490075	0.362779	0.459753
0.678761	0.453962	0.525229	0.318194	0.221818	0.730483	0.76034	0.746342	0.497778
0.250467	0.319729	0.301766	0.691387	0.548825	0.759357	0.605664	0.311542	0.244954
0.480937	0.755021	0.328848	0.584063	0.791771	0.743295	0.336172	0.803397	0.275595
0.525348	0.549524	0.521576	0.813225	0.499719	0.138825	0.701504	0.105763	0.473452
0.320847	0.792499	0.289065	0.691566	0.694276	0.165356	0.547949	0.604665	0.51244
0.640067	0.635333	0.252779	0.511422	0.572253	0.792454	0.624955	0.253552	
0.644211	0.672802	0.639407	0.477149	0.700925	0.787521		0.670242	
0.63377	0.796519	0.327823	0.55896	0.645968	0.641956		0.524508	
0.678818	0.315801	0.411271	0.489277	0.397922	0.606755		0.632793	

ตารางที่ ข.11 (ต่อ) ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.728781	0.21982	0.425024	0.3928		0.30423			
0.278316	0.628142	0.696029	0.138273		0.275217			
0.816579	0.458657	0.366584	0.504045		0.66929			
0.549074	0.436404	0.722936	0.734162		0.713799			
0.360382	0.381757	0.379458	0.618632		0.277881			
0.496397	0.52734	0.77472	0.624604		0.262315			
0.584508	0.58979	0.826049	0.373799		0.210349			
0.66748	0.656735	0.765068	0.708403		0.451589			
0.491356	0.544554	0.706862	0.712814		0.805201			
0.547965	0.173764	0.807616			0.457686			
0.619534	0.62868	0.640122			0.404226			
0.563814	0.584136	0.508573			0.727192			
0.504644	0.666995	0.342517			0.477768			
0.416344	0.695535	0.75325			0.237738			
0.689276	0.699046	0.372222			0.623534			
0.530095		0.631305			0.377673			
0.43207		0.743665			0.526358			
		0.544699			0.456031			
		0.392541			0.514678			
		0.338135			0.522638			
		0.454111			0.577398			
		0.829968			0.617838			
		0.590013			0.389551			
		0.746499						
		0.270667						
		0.68308						
		0.280051						
		0.561289						
		0.438678						
		0.362605						
		0.796422						
		0.554744						
		0.654034						
		0.384819						
		0.440573						
		0.463592						
		0.361951						
		0.187846						

ตารางที่ ข.11 (ต่อ) ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 715 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
		0.298247						
		0.449244						
		0.494758						
		0.388889						
		0.414978						
		0.491143						
		0.516104						
		0.801697						
		0.251756						
		0.660862						
		0.542191						
		0.773248						
		0.594056						
		0.510995						
		0.701093						
		0.409315						
		0.383471						
		0.75889						
		0.436496						
		0.746618						
		0.797318						
		0.300412						
		0.661201						
		0.317543						
		0.780361						
		0.478442						
		0.385431						
		0.605211						
		0.739651						
		0.755459						
		0.648897						
		0.684671						
		0.593311						

ตารางที่ ข.12 ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.278826	0.550547	0.733058	0.510586	0.443702	0.748798	0.785655	0.425275	0.502
0.382015	0.618186	0.561303	0.263882	0.690249	0.710386	0.271625	0.67747	0.556606
0.33311	0.699338	0.468401	0.622148	0.710798	0.067631	0.524734	0.243216	0.722014
0.666212	0.616954	0.694943	0.50608	0.285876	0.626685	0.220316	0.264455	0.463785
0.271997	0.53313	0.157784	0.121842	0.535358	0.758687	0.276981	0.437303	0.767461
0.828086	0.618924	0.781193	0.454719	0.079204	0.363268	0.206451	0.185593	0.388486
0.57543	0.29338	0.385902	0.704565	0.745298	0.087999	0.263849	0.57885	0.435753
0.328303	0.646932	0.363603	0.434687	0.229218	0.66533	0.608112	0.643719	0.646449
0.52998	0.250682	0.769785	0.634435	0.739028	0.46728	0.681966	0.565213	0.26028
0.557833	0.512526	0.493618	0.273583	0.59437	0.250013	0.607273	0.526367	0.52239
0.368638	0.27567	0.143289	0.311032	0.660333	0.098748	0.450511	0.726356	0.280294
0.522095	0.338195	0.217932	0.683906	0.540588	0.512409	0.759855	0.252658	0.250478
0.451143	0.800331	0.656851	0.632599	0.261007	0.501673	0.818242	0.369138	0.109618
0.148663	0.296494	0.634166	0.420552	0.643215	0.36751	0.425639	0.75433	0.149495
0.510997	0.872522	0.386533	0.71713	0.516335	0.573277	0.637683	0.810242	0.442376
0.707906	0.523586	0.466962	0.675711	0.63598	0.380379	0.718219	0.597064	0.376964
0.321148	0.506269	0.61684	0.829739	0.699049	0.269308	0.765315	0.6162	0.539322
0.824388	0.461015	0.45691	0.78162	0.320917	0.586627	0.484156	0.628887	0.309136
0.574639	0.290359	0.281534	0.738854	0.143463	0.2393	0.226417	0.446588	0.375674
0.55316	0.46837	0.515539	0.58804	0.655698	0.065497	0.721318	0.307374	0.355128
0.345361	0.345554	0.256799	0.476172	0.416659	0.805295	0.852524	0.432895	0.395954
0.822697	0.70223	0.549302	0.799201	0.133046	0.279461	0.365681	0.658274	0.479838
0.523407	0.825111	0.369874	0.554856	0.668716	0.146817	0.84668	0.645735	0.495825
0.28765	0.748055	0.683433	0.76814	0.548047	0.507545	0.780395	0.5084	0.574739
0.693955	0.770033	0.323148	0.214799	0.218987	0.60771	0.237303	0.305955	0.625723
0.339013	0.494121	0.378975	0.652329	0.74048	0.769639	0.327649	0.444221	0.725581
0.802634	0.477354	0.351294	0.270755	0.468602	0.640155	0.426221	0.309276	0.673395
0.287026	0.549671	0.251032	0.579303	0.823614	0.407246	0.807637	0.819176	0.733056
0.408185	0.470789	0.582878	0.759641	0.252362	0.606985	0.711711	0.608038	0.255602
0.563143	0.714652	0.475635	0.670434	0.7882	0.529408	0.759593	0.501169	0.320686
0.708324	0.253017	0.413597	0.705055	0.242769	0.329418	0.699512	0.553386	0.590671
0.506973	0.515374	0.331871	0.312703	0.602385	0.781671	0.776853	0.380386	0.141614
0.683494	0.337374	0.54894	0.508753	0.695683	0.793839	0.465623	0.147767	0.426354
0.816072	0.579199	0.1341	0.096028	0.227812	0.623176	0.60819	0.555242	0.707471
0.588183	0.716714	0.737529	0.724744	0.729609	0.632372	0.266193	0.617219	0.531554
0.23243	0.145769	0.478407	0.726463	0.615757	0.649458	0.452931	0.645514	0.555033
0.441177	0.263101	0.711181	0.730107	0.437611	0.568778	0.405743	0.626799	0.549133
0.78459	0.706593	0.523918	0.227878	0.563123		0.539502	0.763179	0.31578

ตารางที่ ข.12 (ต่อ) ค่าความกลมของเกรน อุณหภูมิเทที่อุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

จุดชิ้นงาน								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.230202	0.378248	0.341311	0.706248	0.526016		0.678344	0.747116	0.217545
0.348364	0.476264	0.472589	0.779389	0.723622		0.195344	0.426683	
0.437918	0.715488	0.631416	0.440438			0.671963	0.638452	
0.369333	0.485577	0.599205	0.562576			0.353554	0.236477	
0.718211	0.538137	0.263465	0.614622			0.44164	0.274101	
0.433279	0.808708	0.425678	0.84526			0.787489	0.320883	
0.24779	0.8218	0.28586	0.803797			0.375535	0.752205	
0.421092	0.343707	0.504249	0.535472			0.581584	0.500329	
0.483641	0.738011	0.549841	0.457422			0.439141	0.700209	
0.490036	0.665249	0.434252	0.73387			0.743162	0.796345	
0.766745	0.769822	0.535774	0.55247			0.472816	0.59215	
0.771054	0.791252	0.519936				0.412797	0.787479	
0.341136	0.788441	0.356889				0.52822	0.654667	
0.394873	0.497499	0.389919				0.471672	0.681159	
0.224929	0.620968	0.426793				0.423568		
0.480497	0.819491	0.633944				0.475504		
0.360661	0.307932	0.532093				0.374741		
0.769165	0.773432	0.598716				0.297885		
0.591175	0.629782	0.371004				0.082652		
0.616914	0.414716	0.548864				0.335435		
0.810333	0.484853	0.818969				0.148901		
0.840597	0.599096	0.376343				0.342006		
0.658086	0.750087	0.47884				0.41568		
0.774238	0.609592	0.838692				0.288313		
0.470409	0.488834	0.682725				0.617778		
0.634467	0.691479					0.30823		
	0.311063					0.399326		
	0.569992					0.82003		
	0.555926					0.471363		
	0.492167					0.796016		
	0.374269					0.417783		
						0.62098		
						0.676885		
						0.42253		
						0.62138		
						0.78189		
						0.519798		
						0.318705		