ผลของอุณหภูมิเทต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็ก ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบทรายชื้น และแบบหล่อถาวร

THE EFFECTS OF POURING TEMPERATURE ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF WHEEL ALUMINIUM ALLOYS BY GREEN SAND CASTING AND PERMANENT MOLD CASTING

นายอภิณัฐ ศรีสุวรรณ รหัส 51362527

นางสาววัชรมน ฉัตรคำแปง รหัส 51365177

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ลง 10 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน 1590521
เลขเรียกหนังสือ ว.ร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ว253 ว 2554

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2554

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน	ผลของอุณหภูมิเทต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็ก ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบทรายชื้น และแบบหล่อถาวร
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายอภิณัฐ ศรีสุวรรณ รหัส 51362527
	นางสาววัชรมน ฉัตรคำแปง รหัส 51365177
ที่ปรึกษาโครงงาน	อาจารย์มานะ วีรวิกรม
ที่ปรึกษาโครงงานร่วม	อาจารย์ทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์
	อาจารย์ชุลีย์พร ป่าไร่
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2554

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงงาน
(อาจารย์มานะ วีรวิกรม)

.....ที่ปรึกษาโครงงานร่วม
(อาจารย์ทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ธณิกานต์ ธงชัย)

.....กรรมการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	ผลของอุณหภูมิเทต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็ก ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบทรายชื้น และแบบหล่อถาวร		
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายอภิณัฐ	ศรีสุวรรณ	รหัส 51362527
	นางสาววัชรมน	ฉัตรคำแปง	รหัส 51365177
ที่ปรึกษาโครงงาน	อาจารย์มานะ	วีรวิกรม	
ที่ปรึกษาโครงงานร่วม	อาจารย์ทศพล	ตรีรุจิราภาพงศ์	
	อาจารย์ชุลีย์พร	ป่าไร่	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2554		

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงงานนี้เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิเทต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็ก ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบทรายชื้น และแบบหล่อถาวร โดยใช้อุณหภูมิเทน้ำโลหะ 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างของงานหล่อทั้งสองกระบวนการประกอบด้วยเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีลักษณะเป็นเดนไดร์ท และเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีสีดำสลับขาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ โดยการหล่อในแบบหล่อทรายชื้นเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีขนาดใหญ่กว่าการหล่อในแบบหล่อถาวร นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อยังมีความสัมพันธ์กับสมบัติเชิงกลด้านความแข็งของชิ้นงานหล่อ โดยชิ้นงานที่มีโครงสร้างเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ขนาดใหญ่จะมีความแข็งต่ำ และชิ้นงานที่มีโครงสร้างเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ขนาดเล็ก จะมีความแข็งสูง ผลการศึกษาสรุปได้ว่าการถ่ายเทความร้อนออกจากแบบหล่อ และการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลว ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานหล่อ

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์มานะ วีรวิกรม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน อาจารย์ทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์ และอาจารย์ชุลีย์พร ป่าไร่ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานร่วมที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในขั้นตอนการดำเนินโครงงาน การวิเคราะห์ผล และการเขียนปริญญานิพนธ์ ทำให้ผู้จัดทำสามารถทำโครงงานจนสำเร็จลุล่วงได้ในที่สุด ตลอดจนสละเวลาให้คำแนะนำทั้งทางด้านภาคทฤษฎี ภาคปฏิบัติ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบคุณอาจารย์ศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ และอาจารย์ธณิกานต์ ธงชัย ที่กรุณาสละเวลาเป็นอาจารย์สอบโครงงานพร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงงานนี้

ขอขอบคุณครูช่างธวัชชัย ชุลบุตร ครูช่างรณกฤต แสงผ่อง ครูช่างประเทือง โมรารายและนักวิทยาศาสตร์อิสรีย์ วัตถุภาพ ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้วิชาความรู้ ให้ประสบการณ์ และอบรมสั่งสอนให้เป็นคนดีของสังคม

ขอขอบคุณคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จที่กรุณาให้ความช่วยเหลือสนับสนุน และให้กำลังใจตลอดมา

หากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ ขอมอบความดีให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้ดำเนินโครงงานวิศวกรรม
นายอภิณัฐ ศรีสุวรรณ
นางสาววัชรมน ฉัตรคำแปง

เมษายน 2555

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญานิพนธ์	ก
บทคัดย่อ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)	1
1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงงาน	2
1.6 สถานที่ในดำเนินโครงงาน	2
1.7 ระยะเวลาในดำเนินโครงงาน	2
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงงาน	2
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียม	4
2.2 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ (Solidification)	9
2.3 กระบวนการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อทรายชื้น (Green Sand Casting)	13
2.4 กระบวนการหล่อโลหะแบบหล่อถาวร (Permanent Mold Casting)	20
2.5 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ	22
2.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness)	25
2.7 การตรวจวัดปริมาณธาตุด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer (OES)	29
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงงาน	33
3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการดำเนินโครงงาน	33
3.2 วัสดุ และอุปกรณ์	34
3.3 ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์	40
4.1 รูพรุน	40
4.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค	43
4.3 ความแข็ง	52
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ	56
5.1 สรุปผลการทดลอง	56
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา	56
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไข	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก ก	61
ภาคผนวก ข	80
ภาคผนวก ค	83
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	86

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงงาน	2
2.1 ขนาดรูล้นสำหรับชิ้นงานหล่อโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non Ferrous)	14
2.2 ขนาดของรูเทสำหรับชิ้นงานหล่อโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non Ferrous)	15
2.3 อุณหภูมิเทสำหรับการหล่อโลหะชนิดต่างๆ	18
2.4 ตัวคูณ (S_n) สำหรับคำนวณหาหมายเลขความละเอียดของเม็ดทราย	19
2.5 รายละเอียดกรดกัดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	23
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมที่อยู่ในรูปของล้อแม็ก	34
ก.1 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 1	62
ก.2 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 2	63
ก.3 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 3	64
ก.4 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 1	65
ก.5 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 2	66
ก.6 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 3	67
ก.7 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 1	68
ก.8 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 2	69
ก.9 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 3	70
ก.10 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 1	71
ก.11 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 2	72
ก.12 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 3	73
ก.13 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 1	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ก.14 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 2 75

ก.15 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 3 76

ก.16 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 1 77

ก.17 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 2 78

ก.18 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ชิ้นที่ 3 79

ข.1 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบทรายชื้น อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส 81

ข.2 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบถาวร อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส 82

ค.1 ปริมาณยูเทกติคอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ในเฟสเนื้อพื้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้น อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส 84

ค.2 ปริมาณยูเทกติคอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ในเฟสเนื้อพื้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อถาวร อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส 85

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การแบ่งกลุ่มของโลหะผสมอะลูมิเนียม	5
2.2 แผนภูมสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน	6
2.3 โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ยูเทคติก	6
2.4 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปรยูเทคติก	7
2.5 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทคติก	7
2.6 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์	10
2.7 การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์	10
2.8 การโตแบบระนาบ	11
2.9 การโตแบบกิ่งก้าน (Dendrite Growth)	11
2.10 โครงสร้างของชิ้นงานหล่อ	12
2.11 ส่วนประกอบของแบบหล่อ และชิ้นงานหล่อ	13
2.12 การขัดผิวของชิ้นงานที่ตรวจสอบสลับเป็นตาราง	23
2.13 กล้องจุลทรรศน์แสง	24
2.14 ลักษณะภาพที่ได้จากการส่องของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	24
2.15 วิธีการวัดความแข็งแบบร็อคเวล	25
2.16 วิธีการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์	26
2.17 วิธีการวัดความแข็งแบบบริเนล	27
2.18 การแปรรูปแบบถาวรของเนื้อวัสดุบริเวณใต้หัวกดแบบบริเนล	28
2.19 หลักการทำงานของเครื่อง Optical Emission Spectrometer	30
2.20 เครื่อง Optical Emission Spectrometer	30
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	33
3.2 หีบหล่อ	35
3.3 องค์ประกอบของแบบหล่อทรายชื้น	36
3.4 แม่พิมพ์ถาวร	36
3.5 การหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น	37
3.6 การหล่อด้วยแบบหล่อถาวร	37
3.7 ขนาดของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	38
3.8 แสดงจุดที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง	39
4.1 รูพรุนของชิ้นงานหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส	41
4.2 รูพรุนของชิ้นงานหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส	41
4.3 รูพรุนของชิ้นงานหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส	41
4.4 รูพรุนของชิ้นงานหล่อในแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส	42
4.5 รูพรุนของชิ้นงานหล่อในแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส	42
4.6 รูพรุนของชิ้นงานหล่อในแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.7	โครงสร้างจุลภาคในแบบหล่อทรายชื้น	45
4.8	พื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส	46
4.9	โครงสร้างจุลภาคในแบบหล่อถาวร	48
4.10	พื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ในแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส	49
4.11	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส	50
4.12	พื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียสในแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร	51
4.13	ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส	53
4.14	ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อด้วยแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส	54
4.15	ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส	55

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่สำคัญได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูงและทนต่อการกัดกร่อนได้ดี จึงเป็นที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ มากมายโดยเฉพาะอุตสาหกรรมยานยนต์ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นผู้ประกอบการจึงให้ความสำคัญกับการพัฒนากระบวนการผลิตโดยมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิต คุณภาพ และสามารถลดต้นทุนการผลิต เพื่อให้สอดคล้องกับแข่งขันทางการตลาด และสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างครบถ้วน (Kaiser Aluminum, 1997)

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ และล้อแม็ก นิยมใช้อะลูมิเนียม-อัลลอยด์ในการผลิต โดยส่วนมากมักเป็นเกรดที่มีส่วนประกอบของซิลิคอน โดยเรียกว่า อะลูมิเนียม-ซิลิคอนอัลลอยด์ (Al-Si Alloy) เช่น A356, A319 เป็นต้น

สำหรับโครงงานนี้ได้เลือกล้อแม็กเก่ามาใช้ในการทดลองแทนอินกอตอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ซึ่งใช้กระบวนการหล่อแบบทรายชื้น (Sand Casting) และกระบวนการหล่อแบบถาวร (Permanent Mold Casting) โดยใช้อุณหภูมิเทในช่วง 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลด้านความแข็ง จากการศึกษานี้จะเป็นความรู้พื้นฐานที่เป็นประโยชน์สำหรับการนำล้อแม็กเก่ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ในภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ และเป็นความรู้พื้นฐานของการนำอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็กมาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อโดยใช้แบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร

1.2.2 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อเมื่อใช้อุณหภูมิเทต่างกัน

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

1.3.1 โครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร

1.3.2 โครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อเมื่ออุณหภูมิเทต่างกัน

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

1.4.1 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร

1.4.2 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อเมื่ออุณหภูมิเทต่างกัน

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงงาน

1.5.1 วิธีการหล่อที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือการหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น และการหล่อด้วยแบบหล่อถาวร

1.5.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือล้อแม็กรถยนต์

1.5.3 วิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในล้อแม็กรถยนต์ โดยการตรวจวัดปริมาณธาตุด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer (OES)

1.5.4 ใช้แม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold) ทำจากเหล็กกล้า โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน 25.4 มิลลิเมตร และมีความยาวของชิ้นงาน 150 มิลลิเมตร

1.5.5 แบบหล่อทรายชื้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน 25.4 มิลลิเมตร และมีความยาวของชิ้นงาน 150 มิลลิเมตร

1.5.6 ขนาดของเม็ดทรายที่ใช้ในแบบหล่อทราย คือ 80-100 AFS

1.5.7 ตัวประสานเบนโทไนท์ (Bentonite) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และความชื้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก

1.5.8 อุณหภูมิที่ใช้เทโลหะหลอมเหลว คืออุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

1.5.9 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)

1.5.10 วัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Tests)

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงงาน

อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงงาน

กรกฎาคม 2554 – เมษายน 2555

1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงงาน

การดำเนินงาน	ช่วงเวลา									
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1.8.1 วางแผน และกำหนดขอบเขตโครงงาน	↔									
1.8.2 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการหล่อแบบทรายชื้น และแบบหล่อถาวร			↔	↔						
1.8.3 ศึกษารวบรวมเนื้อหาเพื่อนำข้อมูลมาใช้วิเคราะห์และออกแบบการทดลอง	↔	↔	↔							

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงงาน

การดำเนินงาน	ช่วงเวลา									
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1.8.4 จัดทำรายงานบทที่ 1-3		←	→							
1.8.5 ทำการหล่อชิ้นงานโดยใช้อุณหภูมิเทที่ 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส				←	→					
1.8.6 ตรวจสอบรายละเอียดการทดลองเปรียบเทียบโครง-สร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงาน					←	→	→			
1.8.7 สรุป และวิเคราะห์ผลการทดลอง							←	→	→	
1.8.8 จัดทำรูปเล่มโครงงาน							←	→	→	→

บทที่ 2
หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียม

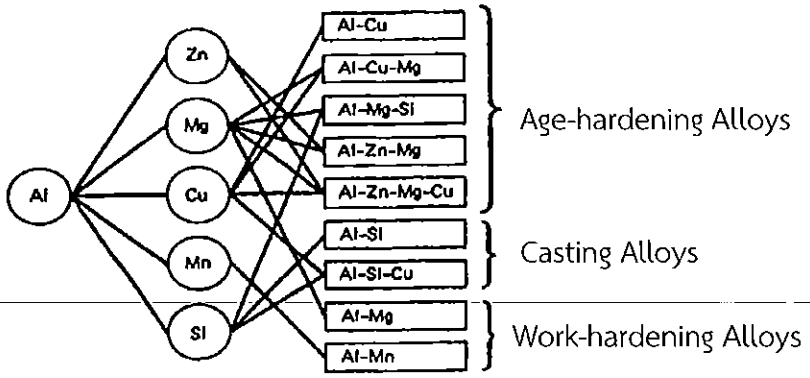
อะลูมิเนียม คือธาตุเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์ Al มีเลขอะตอมเท่ากับ 13 โดยอะลูมิเนียมเป็นโลหะหลักทรานซิชันที่มีความมันวาว อ่อน และดัดง่าย ในธรรมชาติอะลูมิเนียมจะพบอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์เป็นหลัก ซึ่งอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการคือ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง และมีความต้านทานการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นอะลูมิเนียมจึงถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภทเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่น ชิ้นส่วนโครงสร้างในอุตสาหกรรมอากาศยาน การขนส่ง ทำบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม และผลิตชิ้นส่วนตกแต่งอาคารเป็นต้น (Zalensas, 1993)

2.1.1 อะลูมิเนียมผสมสำหรับงานหล่อ

โลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อมีบทบาทสำคัญมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และเครื่องจักรกลต่างๆ เนื่องจากมีการใช้งานทดแทนเหล็กหล่อ หรือเหล็กกล้าหล่อ เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงต่อหน่วยน้ำหนักสูง จุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้มีความสามารถการหล่อหลอมที่ดี การใช้งานของโลหะผสมอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมยานยนต์ได้มีการพัฒนาอย่างกว้างขวาง ดังนั้นโลหะอะลูมิเนียมจึงเป็นโลหะที่สำคัญและได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะเบา (Light Metals)

โลหะผสมอะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีสมบัติด้านการหล่อหลอมที่ดีชนิดหนึ่ง เพราะมีจุดหลอมเหลวต่ำ มีความสามารถในการไหลเข้าแบบหล่อได้ดี ทำให้สามารถหล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนได้ง่าย และสามารถใช้เทคนิคการหล่อหลอมได้หลายวิธี เช่น วิธีหล่อด้วยแบบหล่อทราย (Sand Mold) และหล่อด้วยแบบหล่อถาวร (Permanent Mold)

โลหะผสมอะลูมิเนียมสำหรับงานหล่อมีการพัฒนามาจากระบบยูเทคติกของธาตุ 2 ธาตุ เช่น อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Aluminium-Silicon) อะลูมิเนียม-ทองแดง (Aluminium-Copper) อะลูมิเนียม-แมกนีเซียม (Aluminium-Magnesium) เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.1 อย่างไรก็ตามโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อที่นิยมใช้งานส่วนใหญ่พัฒนามาจากระบบอะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยอาจมีการเติมธาตุต่างๆ ลงไป เพื่อทำให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน เช่น ทำให้มีความสามารถในการปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ทำให้เพิ่มความแข็งด้วยการทำให้เกิดสารละลายแข็ง (Solid Solution Hardening) และทำให้เพิ่มความแข็งแรงในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (Hot Strength)

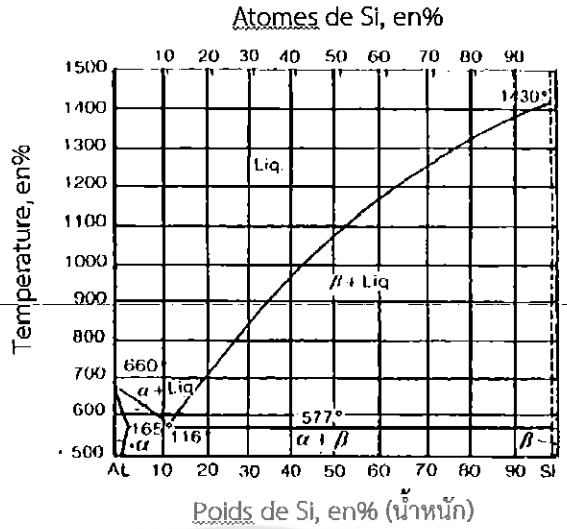


รูปที่ 2.1 การแบ่งกลุ่มของโลหะผสมอะลูมิเนียม
ที่มา : David, J.R. (1993)

2.1.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

เนื่องจากซิลิคอนมีคุณลักษณะหลายประการที่แตกต่างกับอะลูมิเนียม โดยเฉพาะโครงสร้างระบบผลึก และจุดหลอมเหลว ดังนั้นการรวมตัวระหว่างอะลูมิเนียมซิลิคอนจึงมีขอบเขตจำกัดมาก โดยซิลิคอนจะละลายให้สารละลายของแข็งกับอะลูมิเนียมได้สูงสุดร้อยละ 1.65 ที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส ให้เฟสK (เฟส K คือ สารละลายของอะลูมิเนียมกับซิลิคอน) และปริมาณของซิลิคอนจะละลายในเฟส K ได้น้อยเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 544 องศาเซลเซียส จะเหลือปริมาณของซิลิคอนในเฟส K เพียงร้อยละ 0.1 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

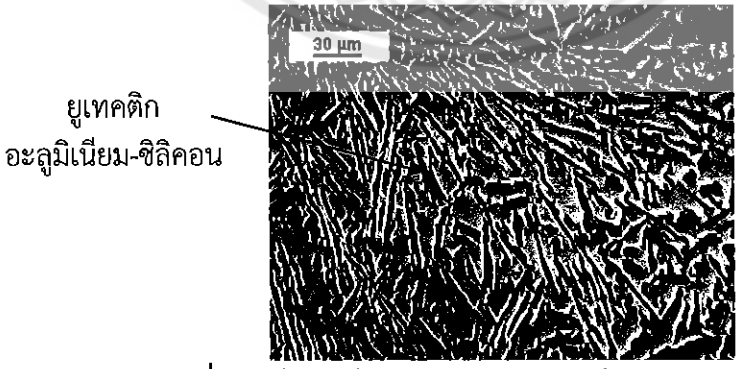
จากแผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน จะมีลักษณะที่เด่นชัดที่ซิลิคอนแยกตัวไม่ละลายในอะลูมิเนียม โดยให้ปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส และมีส่วนผสมของซิลิคอนร้อยละ 11.6 การแยกตัวให้ปฏิกิริยายูเทคติกจากโลหะผสมหลอมเหลวร้อยละ 11.6 ซิลิคอนจะให้เฟส K และเฟส α ร้อยละ1.65 ซิลิคอน และเฟส β ซึ่งเป็นเฟสที่ไม่อาจจะบอกได้ว่าเป็นสารละลายของแข็งซิลิคอนกับอะลูมิเนียม หรือเป็นซิลิคอนบริสุทธิ์ เพราะจากเอกสารหลายเล่มจะเขียนเส้นแสดงขอบเขตของสารละลายอะลูมิเนียมในซิลิคอนไว้เป็นเส้นไข่ปลาซึ่งแสดงความไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามเฟส β มีคุณสมบัติที่แข็งและเปราะ ถ้าในโครงสร้างมีการตกผลึกของเฟส β ขนาดใหญ่จะเกิดลักษณะต่อเนื่องมีผลทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงต่ำ และจะขาดคุณสมบัติด้านความเหนียว เนื่องจากเป็นโลหะผสมที่ให้ส่วนผสมยูเทคติกที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (577 องศาเซลเซียส) ทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีคุณสมบัติทางด้านการหล่อที่ดีมีอัตราการหดตัวต่ำ และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนในเกณฑ์ที่ดีพอสมควรแต่ด้านความแข็งแรง และความเหนียวจะไม่สูงเทียบเท่าโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง (มนัส, 2543) แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน
ที่มา : มนัส (2543)

2.1.2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ยูเทคติก

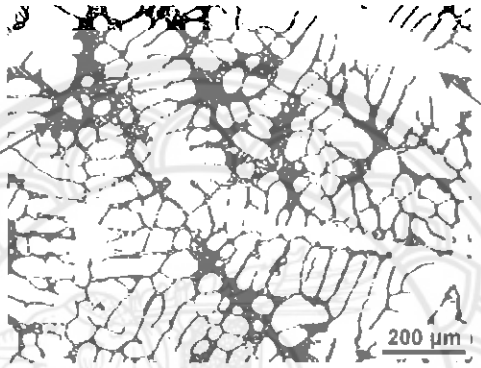
โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีองค์ประกอบแบบยูเทคติก มีส่วนผสมของซิลิคอนร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก โลหะผสมนี้ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงจากการตกตะกอนได้จึงต้องมีการเติมโลหะเจือปนอื่นๆ ลงไป เช่น การเติมธาตุแมกนีเซียม หรือทองแดง เพื่อให้สามารถปรับปรุงสมบัติได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน และเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน โลหะผสมชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างของยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Aluminium-Silicon) ที่ค่อนข้างหยาบ แสดงดังรูปที่ 2.3 แต่สามารถปรับให้โครงสร้างละเอียดได้โดยการเติมธาตุโซเดียม หรือสตรอนเชียมในน้ำโลหะเพียงร้อยละ 0.01-0.015 โดยน้ำหนัก ส่งผลทำให้จุดยูเทคติกเลื่อนจากร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนักไปเป็นซิลิคอนร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดซิลิคอนปฐมภูมิ และทำให้ซิลิคอนละเอียดขึ้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ยูเทคติก
ที่มา : Hong-Min Guo (2009)

2.1.2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทคติก

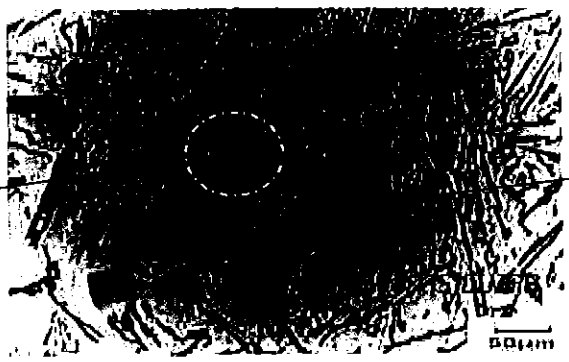
โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีองค์ประกอบแบบไฮโปยูเทคติก ซึ่งส่วนผสมของซิลิคอนต่ำกว่าร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary-α Aluminium) และโครงสร้างของยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีลักษณะเป็นแผ่นแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 2.4 เนื่องจากโลหะผสมกลุ่มนี้มีช่วงการแข็งตัวกว้าง จึงสามารถพบโพรงที่เกิดจากการหดตัวของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิกระจายอยู่ทั่วไปในชิ้นงานจึงทำให้สมบัติทางกลลดลง-โลหะผสมไฮโปยูเทคติกที่มีธาตุผสมอื่นมากกว่า-2-ธาตุเป็นองค์ประกอบ แต่โดยมากแล้วจะผสมทองแดง หรือแมกนีเซียมเข้าไปเพื่อเพิ่มสมบัติด้านความแข็งให้ดีขึ้นด้วยการตกตะกอนได้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทคติก
ที่มา : Hong-Min Guo (2009)

2.1.2.3 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทคติก

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีองค์ประกอบแบบไฮเปอร์ยูเทคติก มีส่วนผสมของซิลิคอนอยู่มากกว่าร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก จะมีสมบัติทนต่อการเสียดสีได้ดี และมีค่าการขยายตัวที่ดี ดังนั้นจึงนำไปใช้งานประเภทลูกสูบที่มีการสันดาปภายใน และเสื้อสูบเครื่องรถยนต์ที่ผลิตด้วยการหล่อในแม่พิมพ์ถาวร โดยโลหะผสมประเภทนี้ให้โครงสร้างจุลภาคในลักษณะของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่หยาบ ส่งผลให้ชิ้นงานมีความเปราะ แตกหักได้ง่าย แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทคติก
ที่มา : อรจิรา (2543)

2.1.3 อะลูมิเนียมผสมเกรด A356

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A356 เป็นอะลูมิเนียมผสมประเภทไฮโปยูเทคติก แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งประกอบด้วย

2.1.3.1 ซิลิคอน (Si) ร้อยละ 6.5–7.5 โดยน้ำหนัก

ซิลิคอนที่ผสมอยู่ใน A356 ส่งผลให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวมีการไหลตัวที่ดี ทำให้สามารถหล่องานในแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนได้ดี และยังคงความแข็งแรงไว้ ทั้งยังช่วยเพิ่มความทนทานการสึกกร่อนลดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

ก. ถ้ามีปริมาณน้อยเกินไปส่งผลให้การหล่อ และการการฉีดขึ้นรูปทำได้ยาก

ข. ถ้ามีปริมาณมากเกินไปส่งผลให้ชิ้นงานมีความเปราะ เมื่อได้รับแรงอัดหรือแรงดึง

2.1.3.2 แมกนีเซียม (Mg) ร้อยละ 0.25-0.40 โดยน้ำหนัก

มีผลอย่างมากต่อชิ้นงานหล่อเมื่อไปรวมตัวกับซิลิคอน (Si) แล้วจะเกิดสารประกอบใหม่ คือแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si)

ก. ถ้ามีปริมาณน้อยเกินไป ส่งผลให้อะลูมิเนียมเกรด A356 หลอมได้ยากขึ้นในเตาหลอมอะลูมิเนียม

ข. ถ้ามีปริมาณมากเกินไป ส่งผลให้เกิดแมกนีเซียมซิลิไซด์ในปริมาณมากเกินไปทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งที่มากเกินไป และทำให้ชิ้นงานเปราะแตกหักได้ง่าย

2.1.3.3 เหล็ก (Fe) ร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก

เหล็กร้อยละ 0.8-2 โดยน้ำหนัก จัดเป็นสารมลทินทั้งสิ้น เพราะโลหะหลอมเหลวสามารถละลายเอาเหล็กจากเตาหลอมจากเหล็กกวนน้ำอะลูมิเนียม หรืออื่นๆ เหล็กจะรวมอยู่ในรูปของเหล็ก-อะลูมิเนียม (Fe-Al) และเหล็ก-อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Fe-Al-Si) เป็นสภาพเฟสฝังตัวอยู่ในโครงสร้างทำให้อะลูมิเนียมเปราะ และไม่ต้านทานการผุกร่อน

ก. ถ้ามีปริมาณน้อยเกินไปส่งผลให้การถอดแบบของชิ้นงานนั้นยาก และทำให้ผิวของชิ้นงานนั้นไม่เรียบ

ข. ถ้ามีปริมาณมากเกินไปส่งผลให้กระบวนการหล่อแข็งตัวช้า และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อต่ำ

2.1.3.4 ไทเทเนียม (Ti) ร้อยละ0.1-0.15 โดยน้ำหนัก

ไทเทเนียมเป็นสารปรับสภาพให้เกรนมีความละเอียด ซึ่งส่งผลต่อความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด A356 และเมื่อนำชิ้นงานไปอบ ไทเทเนียมสามารถละลายเข้าไปยังเนื้อของอะลูมิเนียมทำให้ชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้น

ก. ถ้ามีปริมาณน้อยเกินไปจะทำให้ชิ้นงานมีความแข็ง และความแข็งแรงต่ำลง เพราะเกรนของอะลูมิเนียมจะโตจนเกินไป

ข. ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งสูงจนเกินไป เพราะเมื่อชิ้นงานผ่านการอบไทเทเนียมสามารถละลายเข้าไปในเนื้อของอะลูมิเนียม ทำให้ความแข็งของชิ้นงานยิ่งสูงขึ้นไปอีก ทำให้ชิ้นงานจะเปราะ และแตกหักได้ง่าย

2.1.3.5 สตรอนเซียม (Sr) 50-120 มิลลิกรัมต่อลิตร (PPM)

สตรอนเซียมเติมเพื่อปรับโครงสร้างเกรนของชิ้นงานหล่อ คือสตรอนเซียมจะส่งผลให้เกรนของอะลูมิเนียมนั้นมีความละเอียดขึ้น

2.1.3.6 ธาตุอื่นๆ

ทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn), แมงกานีส (Mn), นิกเกิล (Ni), ดีบุก (Sn), โครเมียม (Cr), ตะกั่ว (Pb) มากกว่าร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ธาตุมลทินในอะลูมิเนียมผสมที่ปนเข้าไปส่งผลให้การยืดตัว ความเหนียว และการต้านทานการผุกร่อนลดต่ำลง

ก. ถ้ามีปริมาณน้อยเกินไปยิ่งส่งผลดีต่อต่อชิ้นงาน เพราะจะทำให้ชิ้นงานมีความบริสุทธิ์ และแสดงถึงการควบคุมการหล่อที่ดี

ข. ถ้ามีปริมาณมากเกินไปส่งผลเสียต่อชิ้นงาน เพราะธาตุเหล่านี้จะไม่เข้าไปแทรกตัว และไม่สามารถละลายเข้าไปในเนื้อของอะลูมิเนียมทำให้สมบัติด้านต่างๆ เสียไป เช่น แข็งจนเกินไปทำให้ชิ้นงานเปราะ ทนต่อการผุกร่อนได้ต่ำ หรือการยืดตัว (Ductility) และความเหนียว (Toughness) แย่ลง

2.2 กระบวนการแข็งตัวของโลหะ (Solidification)

การเปลี่ยนสภาวะจากโลหะหลอมเหลวไปเป็นของแข็ง เกิดขึ้นโดยการเกิดนิวเคลียสที่เป็นของแข็งขึ้นมาก่อนจากกลุ่มอะตอมของโลหะที่ถ่ายเทพลังงานจำนวนหนึ่งออกไป และเมื่อกลุ่มอะตอมอื่นๆ ที่ถ่ายเทพลังงานออกไปแล้วได้จับตัวกับนิวเคลียสทำให้มีขนาดโตขึ้นเป็นลำดับ จนกลายเป็นผลึก (Crystal) และเป็นเกรน (Grain) เมื่อสิ้นสุดการแข็งตัว

2.2.1 การกำเนิดนิวเคลียส (Nucleation)

เมื่อโลหะหลอมเหลวแข็งตัวลงต่ำกว่าจุดหลอมเหลวตามสมดุล พบว่าโลหะหลอมเหลวจะกลายเป็นของแข็งทั้งหมดพร้อมๆ กัน (แต่ในทางปฏิบัติแล้วพบว่าจะมีการแข็งตัวที่เร็วกว่าสมดุลมาก) ทันทีที่อุณหภูมิโลหะหลอมเหลวแข็งตัวลงมาจนถึงจุดหลอมเหลว จะเกิดการสร้างผลึกของของแข็งที่มีขนาดระดับนาโนเมตรในเนื้อของเหลวซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของการสร้างเฟสใหม่จากเฟสเดิม เรียกว่า การเกิดนิวคลีเอชันโดยนิวเคลียสแต่ละอันเรียกว่า นิวคลีไอ (Nuclei) แสดงดังรูปที่ 2.6 ก)

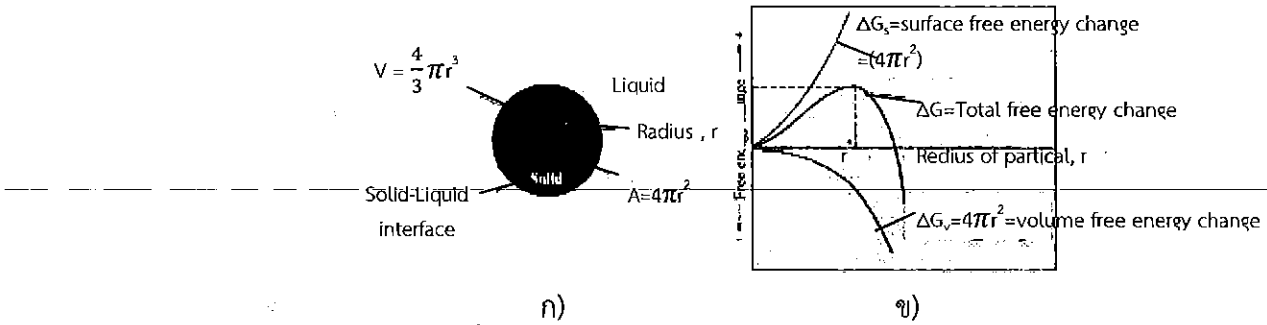
ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวพลังงานอิสระของของแข็งต่ำกว่าของเหลว วัสดุพยายามปรับสถานะให้มีพลังงานต่ำกว่า ความแตกต่างระหว่างพลังงานอิสระนี้เองจะเป็นแรงขับดันให้เกิดการเปลี่ยนเฟส การเกิดนิวเคลียสใหม่นี้เป็นการสร้างพื้นผิวใหม่ขึ้นระหว่างของแข็งกับของเหลว ทำให้พลังงานของระบบเพิ่มขึ้น พลังงานในส่วนที่เพิ่มนี้เรียกว่าพลังงานพื้นผิว (γ) ยิ่งมีของแข็งเพิ่มขึ้นมากๆ พื้นที่ผิวสัมผัสยิ่งมากพลังงานพื้นผิวก็มากขึ้นตาม อย่างไรก็ตามไม่ใช่นิวเคลียสทุกตัวจะโตต่อจนสามารถเป็นเกรนได้ จะมีเพียงบางนิวเคลียสเท่านั้นที่สามารถขยายตัว หรือโตต่อไป ส่วนที่โตต่อไม่ได้ก็จะสลายตัวเองคืนกลับไปยังโลหะหลอมเหลว แสดงดังรูปที่ 2.6 ข)

พลังงานที่อะตอมต้องปล่อยออกมาเพื่อรวมกลุ่มกัน หรือรวมตัวกันกลายเป็นนิวเคลียสจะขึ้นกับปริมาตรของกลุ่มอะตอม ซึ่งแปรผันตรงกับรัศมีของนิวเคลียสยกกำลังสามโดยจะมีค่าพลังงานเป็นลบ และพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ไปในการสร้างพื้นผิวใหม่ระหว่างของแข็งกับของเหลวซึ่งขึ้นกับขนาดของพื้นที่ผิว หรือรัศมีของนิวเคลียสยกกำลังสองโดยจะมีค่าพลังงานเป็นบวก

เมื่อโลหะหลอมเหลวเย็นตัวต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature, T_m) ของเหลวจะเกิดการแข็งตัวเนื่องจากมีแรงผลักดันได้แก่การเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิเริ่มการแข็งตัวเทียบกับอุณหภูมิจุดเริ่มต้นของการเกิดนิวเคลียส (Under Cooling, ΔT) โดยกระบวนการเกิดนิวคลีเอชัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.2.1.1 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation)

นิวเคลียสของของแข็งฟอร์มจากของเหลวเหมือนๆ กันทุกจุดภายในของเหลว



ก) ข)

รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์

ก) รูปทรงของนิวเคลียส

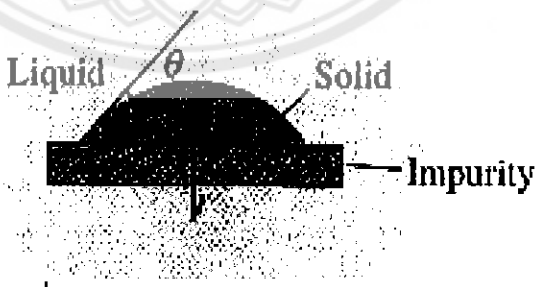
ข) พลังงานของนิวเคลียส

ที่มา : พรวสา (2551)

จากรูป 2.6 ข) พบว่าค่า r* หรือรัศมีวิกฤติของนิวเคลียสที่สามารถขยายตัวออกไปได้โดยทำให้พลังงานลดลง หมายความว่าที่อุณหภูมิที่สนใจนิวเคลียสใดมีค่ารัศมีมากกว่า r* นิวเคลียสนั้นจะโตต่อไป ส่วนนิวเคลียสที่มีรัศมีเล็กกว่าค่านี้จะละลายกลับคืนสู่ของเหลว

2.2.1.2 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Nucleation)

เกิดการฟอร์มของแข็งในบางบริเวณก่อน เช่น ที่บริเวณผนังแม่พิมพ์ หรือบนสิ่งแปลกปลอม (Impurity Particle) ซึ่งจะเกิดได้ง่ายกว่าการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ เนื่องจากต้องการพลังงานพื้นผิวในการสร้างนิวเคลียสน้อยกว่า ทำให้ค่าพลังงานต้านการเกิดนิวคลีเอชันจะน้อยกว่าการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์มาก กระบวนการนี้จะขึ้นกับมุมสัมผัสระหว่างของแข็งกับผิวของสิ่งเจือปน (θ) ในการเปลี่ยนเฟสในกรณีที่เป็นของแข็งก็คล้ายกัน แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์

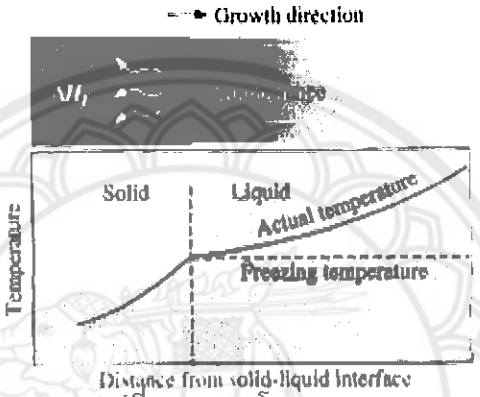
ที่มา : พรวสา (2551)

2.2.2 การโต (Growth)

ถ้านิวเคลียสสามารถโตต่อไปได้จนสิ้นสุดกระบวนการแข็งตัวกลายเป็นเกรน การโตจะอาศัยกลไกดังต่อไปนี้

2.2.2.1 การโตแบบระนาบ (Planar Growth)

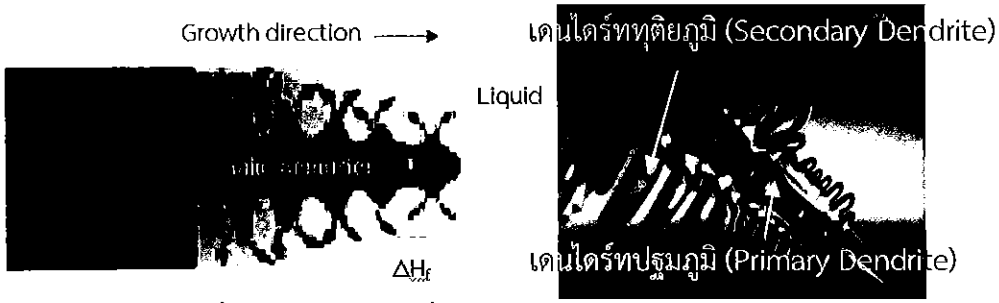
เป็นการแข็งตัวแบบวิวิธพันธ์ซึ่งการเกิดนิวคลีไอสามารถเกิดได้จากสิ่งแปลกปลอม โดยอุณหภูมิของของเหลวจะมากกว่าอุณหภูมิตรงหน้าผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง และของเหลว ทำให้อุณหภูมิที่ผิวรอยต่อระหว่างของแข็งกับของเหลวสูงกว่า หรือเท่ากับจุดหลอมเหลว ดังนั้นการโตแบบนี้ทุกๆ จุดบนผิวหน้าของของแข็งจะโตออกไปพร้อมๆ กันเป็นระนาบ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การโตแบบระนาบ
ที่มา : พรวสา (2551)

2.2.2.2 การโตแบบกิ่งก้าน (Dendrite Growth)

การโตแบบนี้มีการเกิดนิวคลีไอได้ยากกว่าจึงต้องการ Undercooling มาช่วย โดยอุณหภูมิของเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว ทำให้ของแข็งที่ยื่นออกมาจากผิวหน้าของรอยต่อระหว่างของแข็งกับของเหลว สามารถโตออกไปได้โดยมีลักษณะเป็นกิ่งก้านที่เรียกว่า เดนไดร์ท (เป็นภาษากรีกแปลว่าต้นไม้) เมื่อเดนไดร์ทโตขึ้นจะคายความร้อน (ΔH_f) ออกมาเรื่อยๆ ทำให้อุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การโตแบบกิ่งก้าน (Dendrite Growth)
ที่มา : พรวสา (2551)

2.2.3 โครงสร้างงานหล่อ

เมื่อโลหะหลอมเหลวแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ในแบบหล่อ โดยจะเริ่มเกิดนิวเคลียสขึ้นมาก่อน แสดงดังรูปที่ 2.10 ก) โครงสร้างที่ได้จากการหล่อนั้นประกอบด้วย 3 บริเวณตามการเย็นตัว คือ

2.2.3.1 ChillZone

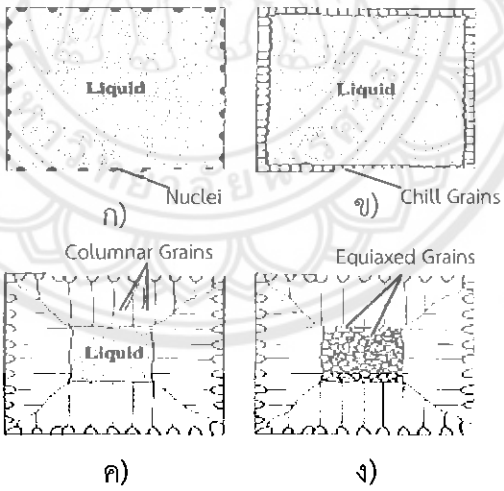
เป็นบริเวณที่ติดกับผนังแม่พิมพ์โดยจะเป็นการแข็งตัวแบบวิวิธพันธ์ นิวคลีเอชันจะเกิดขึ้นได้มากที่ผิวแม่พิมพ์ การโตมีทิศสวนทางกับทิศการถ่ายเทความร้อนเกรน โดยการโตจะตั้งฉากกับผนังแม่พิมพ์ โครงสร้างจะมีขนาดเล็กละเอียด แสดงดังรูปที่ 2.10 ข)

2.2.3.2 Columnar Zone

เกรนจะมีการเรียงตัวกันเป็นแนวยาวในทิศทางการเย็นตัว มีอิทธิพลจากการเติบโต (Growth) มากกว่าการเกิดนิวคลีเอชัน ถ้าของเหลวถูก Undercooling จะเกิดโครงสร้างที่มีกิ่งก้าน หรือเดนไดร์ทมาก แต่ถ้าไม่มีการทำ Undercooling จะเกิดการโตแบบระนาบ แสดงดังรูปที่ 2.10 ค)

2.2.3.3 Equiaxed Zone

เกิดบริเวณแกนกลางของงานหล่อ เกรนมีการเรียงตัวแบบสุ่ม และมีขนาดเล็กค่อนข้างกลม เกิดเนื่องจากอุณหภูมิเทต่ำ การเติมธาตุผสม หรือการทำ Inoculants หรือบางครั้งเดนไดร์ทเล็กๆ ตรงบริเวณ Chill Zone อาจแตกหักเนื่องจากการไหลวนของน้ำโลหะไหลวนมาตรงกลางแล้วทำให้เกิดนิวคลีเอชันแบบวิวิธพันธ์ ซึ่งเป็นการยับยั้งการโตของ Columnar Zone แสดงดังรูปที่ 2.10 ง)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของชิ้นงานหล่อ
ก) เริ่มเกิดนิวเคลียส
ข) Chill Zone
ค) Columnar Zone
ง) Equiaxed Zone
ที่มา : พรวสา (2551)

2.3 กระบวนการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อทรายชื้น (Greensand Casting)

2.3.1 ส่วนประกอบของแบบหล่อ และชิ้นงานหล่อ

ส่วนประกอบ และชื่อเรียกต่างๆ ของแบบหล่อทราย แสดงดังรูปที่ 2.11 รวมถึงส่วนประกอบของชิ้นงานหล่อภายหลังการหล่อเสร็จ และรื้อออกจากแบบหล่อเรียบร้อยแล้ว โดยส่วนประกอบต่างๆ มีหน้าที่ดังนี้

2.3.1.1 หีบหล่อ (Flask) ทำหน้าที่ในการบรรจุ และจับยึดวัสดุที่ทำแบบหล่อให้มีความแข็งแรง หีบหล่ออาจทำจากโลหะ หรือไม้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงที่ต้องการ อายุการใช้งาน ตลอดจนราคา หีบหล่อส่วนบนจะเรียกว่า โค้ป (Cope) หีบหล่อส่วนล่างจะเรียกว่า แดรก (Drag) เส้นแบ่งระหว่างหีบบน และหีบล่างเรียกว่า แนวต่อระหว่างแบบ หรือพาร์ติ้งไลน์ (Parting Line)

2.3.1.2 โพรงแบบ (Mold Cavity) ช่องว่างที่มีรูปร่างเหมือนชิ้นงานที่เราต้องการเกิดขึ้นจากการใช้แบบหล่อในการขึ้นรูประหว่างกระบวนการปั้นแบบ

2.3.1.3 รูเท (Sprue) หมายถึง ส่วนที่ทำหน้าที่ให้โลหะหลอมเหลวผ่านมาสู่ทางเดิน

2.3.1.4 ทางวิ่ง (Runner) หมายถึง ส่วนที่ทำหน้าที่นำพาโลหะหลอมเหลวไหลสู่ทางเดินโลหะหลอมเหลว

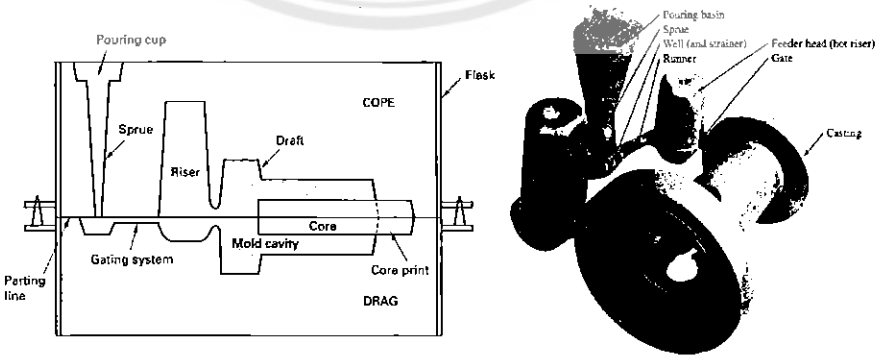
2.3.1.5 แอ่งรูเท (Pouring Cup, Basin) หมายถึง ส่วนที่ทำหน้าที่รอรับโลหะหลอมเหลวจากเบ้าเท (Ladle)

2.3.1.6 บ่าไส้แบบ (Core Print) หมายถึง บริเวณที่ใช้ในการจับยึดไส้แบบ

2.3.1.7 รูล้น (Riser) หมายถึง ส่วนเพิ่มเติมในแบบหล่อที่ทำหน้าที่เก็บโลหะหลอมเหลวไว้ป้อนเติมให้กับชิ้นงานหล่อขณะเกิดการหดตัว (Shrinkage) เมื่อโลหะเปลี่ยนสภาวะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง

2.3.1.8 ทางเข้า (Gate) หมายถึง ส่วนที่ทำหน้าที่ป้อนเติม และควบคุมการไหลของโลหะหลอมเหลวเข้าสู่โพรงแบบหล่อ

2.3.1.9 ระบบป้อนเติม (Gating System) หมายถึง ส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ในการรับโลหะหลอมเหลวจากการเท และนำพาโลหะหลอมเหลวเข้าสู่โพรงแบบหล่อ ส่วนประกอบของระบบป้อนเติมประกอบด้วย แอ่งรูเท รูเท ทางวิ่ง และทางเข้าโลหะหลอมเหลว



ก) ข)

รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของแบบหล่อ และชิ้นงานหล่อ
ก) ส่วนประกอบของแบบหล่อ
ข) ส่วนประกอบของชิ้นงานหล่อ
ที่มา : ณรงค์ศักดิ์ (2551)

2.3.2 การออกแบบรูล้น รูเท

2.3.2.1 รูล้น (Riser)

รูล้นทำหน้าที่ป้อนเติมโลหะหลอมเหลวเข้าไปแทนส่วนที่หดตัวในขณะโลหะหลอมเหลวเริ่มแข็งตัว ดังนั้นโลหะหลอมเหลวในรูล้นจะต้องแข็งตัวหลังโลหะหลอมเหลวในชิ้นงาน ถ้ารูล้นมีขนาดใหญ่เกินไปจะเป็นการสิ้นเปลือง และถ้ารูล้นขนาดเล็กเกินไปจะทำให้เกิดโพรง เนื่องจากการหดตัวโดยการออกแบบรูล้นที่เหมาะสมมีสูตรการคำนวณ แสดงดังตารางที่ 2.1

รูล้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ รูล้นข้าง (Side Riser) และรูล้นบน (Top Riser) รูล้นข้างอยู่ทางด้านข้างของชิ้นงานหล่อต่อกับรูเท และรูวิ่งโดยตรง ในลักษณะนี้ใช้ได้ผลดีกับชิ้นงานขนาดเล็ก หรือขนาดกลาง รูล้นบนอยู่ข้างบนของชิ้นงานซึ่งมักมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกเหมาะกับชิ้นงานขนาดใหญ่

รูล้นที่เปิดให้โลหะหลอมเหลวสัมผัสกับบรรยากาศเรียกว่า รูล้นเปิด (Open Riser) ส่วนรูล้นที่ไม่สัมผัสกับบรรยากาศเรียกว่า รูล้นปิด (Blind Riser) รูล้นปิดไม่สามารถป้อนเติมโลหะหลอมเหลวเมื่อโลหะหลอมเหลวบริเวณตรงผิวด้านในของรูล้นเริ่มแข็งตัว เพราะมีความดันเหนือโลหะหลอมเหลวในรูล้นน้อยมาก (เทพนารินทร์, 2545)

ตารางที่ 2.1 ขนาดรูล้นสำหรับชิ้นงานหล่อโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non Ferrous)

ชนิดของวัสดุ	รูล้นข้าง	รูล้นบน
บรอนซ์	$\emptyset = t \times (2.3 \times 3)$	$\emptyset = t \times 3$
แมงกานีสบรอนซ์	$\emptyset = t \times 3.5$	$\emptyset = t \times 4$
ฟอสฟอรัสบรอนซ์	$\emptyset = t \times 3$	$\emptyset = t \times (3 - 3.5)$
อะลูมิเนียมผสม	$\emptyset = t \times 3.5$	$\emptyset = t \times 3.5$

หมายเหตุ : $\emptyset$ = เส้นผ่านศูนย์กลาง, t = ความหนาของชิ้นงาน

ที่มา : เทพนารินทร์ (2545)

2.3.2.2 รูเท (Sprue)

รูเทโลหะหลอมเหลวจะเป็นรูตรงไม่โค้งงอ และอยู่ในแนวตั้งฉากกับแบบหล่อ โดยมีหน้าตัดเป็นวงกลม ซึ่งบางครั้งหน้าตัดจะเท่ากันตลอดจากบนถึงล่าง แต่ส่วนมากแล้วข้างบนจะใหญ่ และค่อยๆ เล็กลง รูเทที่มีหน้าตัดเท่ากันนิยมใช้เมื่อต้องการให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าแบบหล่อได้เร็ว ส่วนรูเทหน้าที่มีตัดเล็กลงจะใช้ในกรณีที่ต้องการไม่ให้เกิดสิ่งเจือปนเข้าไปในโลหะหลอมเหลว คือต้องการปล่อยให้เข้าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความเร็วให้กับโลหะหลอมเหลวที่ไหลเข้าสู่แบบหล่อ และช่วยให้โลหะหลอมเหลวมีการไหลแบบราบเรียบ (เทพนารินทร์, 2545)

ก. ความดันของโลหะหลอมเหลวที่เกิด ณ บริเวณฐานรูเท (Metal Head Pressure at Sprue Base) ความดันของโลหะหลอมเหลวคือ แรงของโลหะหลอมเหลวที่กระทำต่อพื้นที่ที่โลหะหลอมเหลวสัมผัส โดยคำนวณหาพื้นที่ของรูเทได้จากสมการที่ 2.1

$$H_p = h - \frac{0.5H_1^2}{H_2} \qquad (2.1)$$

H_p = ความดันของโลหะหลอมเหลวบริเวณฐานรูเท
H = ความสูงของรูเท (มิลลิเมตร)
H_1 = ความสูงของหีบบน (มิลลิเมตร)
H_2 = ความสูงชิ้นงานหล่อ (มิลลิเมตร)

ข. พื้นที่ของรูเท (Choke Area) รูเทมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลม และรูปทรงจะมีลักษณะที่ด้านบนใหญ่กว่าด้านล่าง ทำหน้าที่รับโลหะหลอมเหลวจากอ่างเทเข้าสู่ทางเดินโลหะหลอมเหลว เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์จึงต้องคำนวณหาพื้นที่รูเทที่ใช้ในงานหล่อทรายชื้น เพื่อนำไปหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเทต่อไป ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.2

$$A = \frac{W}{ptC\sqrt{2gH_p}} \qquad (2.2)$$

A = พื้นที่ของรูเท (ตารางเมตร)
W = น้ำหนักของโลหะที่ใช้ในการหล่อ (กิโลกรัม)
p = ความหนาแน่นของโลหะหลอมเหลว (2368 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
T = เวลาในการเท (วินาที)
G = 9.81 เมตรต่อวินาที^{2}
H_p = ความดันของโลหะหลอมเหลวบริเวณฐานรูเท
C = ค่าคงที่ (0.8)

การใช้ตารางในการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเท เป็นการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเท โดยใช้ตารางที่มีน้ำหนักที่ใช้ในการเทเป็นตัวกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเท ซึ่งจะมีน้ำหนักตั้งแต่ 10 กิโลกรัม–2000 กิโลกรัม แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขนาดของรูเทสำหรับชิ้นงานหล่อโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non Ferrous)

น้ำหนักเท (kg)	ทางเดินโลหะหลอมเหลว (mm)	น้ำหนักเท (kg)	เส้นผ่านศูนย์กลางรูเท (mm)
≤ 10	13	300-350	39

ที่มา : เทพนารินทร์ (2545)

2.3.2.3 ระบบทางเดินของโลหะหลอมเหลว (Gating System)

ก. แบบไม่มีความดันอากาศ (Unpressurized)

เป็นแบบที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางของรูเทน้อยกว่าพื้นที่ของทางเดินโลหะหลอมเหลว และระบบทางเดินของโลหะหลอมเหลวส่วนมากจะเป็นอัตราส่วน 1:3:3 อัตราการไหลของโลหะหลอมเหลวควบคุมได้โดยอาศัยพื้นที่ของรูเท เพราะความเร็วของการไหลในทางเดินโลหะหลอมเหลว และระบบทางเดินของโลหะหลอมเหลวจะช้ากว่าในรูเท ซึ่งทำให้ช่วยลดการเกิดความปั่นป่วนของโลหะหลอมเหลว การเซาะ และอาจช่วยการแยกตัวของ Slag กับโลหะหลอมเหลว แต่มี

ข้อเสียตรงที่ว่าโลหะหลอมเหลวอาจจะไม่ไหลเข้าทางเข้าอย่างสม่ำเสมอ จึงต้องออกแบบให้ดีที่สุด เพื่อให้โลหะหลอมเหลวสามารถไหลผ่านเข้าทางเข้าในอัตราสม่ำเสมอทุกตัว

ข. แบบความดันอากาศ (Unpressurized)

เป็นแบบที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางของรูเทจะมีขนาดโตกว่าพื้นที่ของทางเดิน และทางเดินโลหะหลอมเหลวทั้งหมดจะเป็นอัตราส่วน 1:0.75:0.5

2.3.3 ขั้นตอนการหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น (Greensand Casting)

2.3.3.1 นำหีบข้างหนึ่งมาวางคว่ำลงบนแผ่นกระดาน และนำกระสวนครึ่งซีกวางคว่ำลงจากนั้นนำทรายละเอียดแห้งมาโปรยลงหลังกระสวนเพื่อป้องกันไม่ให้ทรายติดกระสวน

2.3.3.2 นำตระแกรงมาร่อนทรายที่ผสมเตรียมไว้เพื่อสร้างทรายผิวหน้าปกคลุมทั้งผิวหนาประมาณ2-3 เซนติเมตร แล้วใช้มือกดให้ทรายแนบชิดผิวกระสวนมากที่สุด ขั้นตอนนี้มีผลต่อความเรียบของผิวงานหล่อ

2.3.3.3 ตักทรายถมใส่ลงไปหลังหีบให้เต็มซึ่งเรียกว่าทรายหลังหีบ และใช้นิ้วมือกดให้ทรายไหลลงไปในซอกมุมต่างๆรอบกระสวนและตามแนวขอบของหีบอย่างทั่วถึง ขั้นตอนนี้ต้องระวังกระสวนจะเคลื่อนตัวทำให้แบบทรายบริเวณผิวเคลื่อนตัวไปด้วย

2.3.3.4 ถมทรายเพิ่มเข้าไปจนเต็มหลังหีบกระทุ้งทรายด้วยสากโดยใช้ปลายด้านเรียวโดยวิธีการกระทุ้งวนจากด้านนอกตามแนวขอบหีบวนเข้าสู่ด้านใน ขั้นตอนนี้ระวังปลายสากจะกระทุ้งโดนกระสวนแรงจนเกินไปอาจทำกระสวนชำรุดได้ ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้ได้งานหล่อที่มีจุดเสียได้

2.3.3.5 เมื่ออัดทรายเต็มหลังหีบโดยจะเผื่อให้สูงเกินมาเล็กน้อยแล้วปาดทรายที่เกินด้วยไม้ปาดให้เรียบเสมอขอบหีบก่อนที่จะแทงรูไอเพื่อระบายแก๊สโดยกะระยะความลึกพอดีอย่าให้ปลายเหล็กแทงกระแทกโดนผิวของกระสวนซึ่งอาจทำให้ผิวของกระสวนเสียหายได้ โดยระยะห่างระหว่างรูประมาณ 2-3 เซนติเมตร

2.3.3.6 พลิกหีบหงายขึ้นโดยการนำกระดานอีกแผ่นมาปะกบหลังหีบเพื่อใช้เป็นที่รองรับหีบรอการทำงานในขั้นตอนต่อไป จากนั้นนำกระสวนอีกซีกหนึ่งซึ่งจะมีเดือยสลักและรูจะช่วยให้กระสวนประกอบเข้าด้วยกันโดยไม่เอียง

2.3.3.7 ขั้นตอนนี้จะต้องสร้างรูเทและรูล้น ดังนั้นจึงต้องประกอบสลัก หรือกระสวนที่เป็นรูเท และรูล้นเข้าไปในตำแหน่งที่กำหนดไว้เสียก่อนที่จะถมทรายลงไป และเริ่มทำเหมือนขั้นตอนที่ 2.3.3.1 ถึง 2.3.3.6

2.3.3.8 การถอดกระสวนออกจากแบบก่อนยกหีบบน และล่างออกจากกันต้องสร้างแอ่งเทก่อน ซึ่งตำแหน่งจะอยู่ส่วนปลายสุดของรูเท วิธีการทำอย่างง่ายๆ โดยการตัดแต่งทรายโดยรอบของปลายสลักรูเทให้เป็นรูปทรงกรวย

2.3.3.9 การทำไส้แบบโดยการนำทรายผสมตัวประสานที่ให้ความแข็งแรงสูงมาอัดเข้าในกล่องไส้แบบให้เต็ม และจะต้องเสริมความแข็งแรงด้วยลวดก่อนที่จะแกะออกจากกล่อง จากนั้นจึงนำไปตากแดด หรือทำให้แห้ง ถ้าเป็นทรายผสมตัวประสานจากสารเคมีต้องรอให้เกิดปฏิกิริยากันสมบูรณ์เสียก่อน

2.3.3.10 แบบหล่อที่เสร็จแล้วรอการนำไปเทหล่อ ต้องนำมาประกอบหีบบน และหีบล่างเข้าด้วยกัน ถ้ามีไส้แบบต้องประกอบไส้แบบให้เสร็จเรียบร้อยเสียก่อน

2.3.4 ทรายหล่อชนิดต่างๆ

ทรายหล่อที่ใช้กันมากที่สุด คือทรายภูเขา ทรายทะเล ทรายแม่น้ำ และทรายซิลิกา ซึ่งทรายทั้งหมดนี้เกิดขึ้นตามธรรมชาติ การทำแบบหล่อจะใช้ทรายบางชนิดในสภาพที่เกิดตามธรรมชาติ และบางชนิดจะบดให้เม็ดได้ขนาดก่อน หากมีดินเหนียวผสมอยู่ก็จะใช้ได้เลย แต่ถ้าเกาะติดกันไม่ดีพอจะต้องเติมดินเหนียวลงไป บางครั้งก็จะเติมทั้งตัวประสาน และดินเหนียวลงไปด้วย

2.3.4.1 ทรายธรรมชาติ (Natural Molding Sand) ทรายประเภทนี้ได้จากบริเวณริม-แม่น้ำเจ้าพระยาแถวจังหวัดอยุธยา-อ่างทอง-สิงห์บุรี-โดยทรายประเภทนี้มีดิน-(Clay)-ผสมอยู่ประมาณร้อยละ 15–20 โดยน้ำหนัก เวลานำมาใช้ต้องผสมน้ำก่อน และทรายประเภทนี้ทนความร้อนไม่ดี ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้ประมาณ 1400–1500 องศาเซลเซียส จึงเหมาะกับงานหล่อโลหะนอกกลุ่ม-เหล็ก เช่น อะลูมิเนียม ทองเหลือง และบรอนซ์ ทรายพวกนี้มีความแข็งแรงน้อยสามารถทนต่อแรงอัดได้ประมาณ 0.6–1.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2.3.4.2 ทรายสังเคราะห์ หรือทรายวิทยาศาสตร์ (Synthetic Green Molding Sand) ทรายประเภทนี้เป็นทรายหล่อที่เรานำเอาทรายแก้ว (ทรายขาว; SiO_2) ซึ่งมีซิลิกา (SiO_2) มากถึงร้อยละ 95 โดยน้ำหนักขึ้นไป มาผสมกับตัวประสานคือ เบนโทไนท์ในอัตราส่วนที่พอเหมาะประมาณร้อยละ 3–5 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งตัวเติมช่วยเพิ่มคุณภาพอีกเล็กน้อยไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความชื้นร้อยละ 2–5 โดยน้ำหนัก จะได้ความแข็งแรงสูงทนแรงอัดได้ 7–10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 0.7–1.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าอัตราลมผ่านในช่วง 60–150 เหมาะกับงานหล่อเหล็ก เหล็กกล้า และโลหะนอกกลุ่มเหล็กทั่วไป

2.3.4.3 การตรวจสอบ และควบคุมคุณภาพของทรายชื้น โดยมีจุดมุ่งหมายดังนี้

ก. ลดความสูญเสียที่งานที่ผลิต

ข. เพิ่มคุณภาพของงานหล่อ

ค. เพิ่มความพอใจให้ลูกค้า

ง. เพื่อแข่งขันตลาดทั้งภายใน และภายนอกประเทศ (เทพนารินทร์, 2545)

2.3.5 การฉาบผิวแบบหล่อ

หลังจากที่แกะกระสวนออกแล้วให้ใช้ผงแกรไฟท์ หรือผงไมคา (Mica) ผสมน้ำหรือพ่น-ผิวแบบหล่อเพื่อให้ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โลหะหลอมเหลวแทรกซึมเข้าในทราย เพื่อให้ผิวของงานหล่อเรียบป้องกันการเกิดครีบเอาไส้แบบ และทรายออกได้ง่ายเมื่อแกะชิ้นงาน

2.3.5.1 การฉาบผิวแบบหล่อสำหรับแบบหล่อทรายชื้น

สำหรับแบบหล่อทรายชื้นใช้ผงแกรไฟท์ ผงไมคา หรือแป้งหินล้วนๆ โดยนำวัสดุดังกล่าวโปรย หรือทาผิวแบบหล่อโดยใช้แปรง มีกระบวนการดังนี้

ก. ถ้าเป็นวิธีโปรยจะใช้ถุงผง หรือแป้งทำด้วยผ้าฝ้ายโปรยที่ผิวแบบหล่อในแนวตั้งก่อน

ข. ถ้าเป็นวิธีทาจะใช้แปรงซึ่งมีผง หรือแป้งติดอยู่ที่ปลายทาผิวแบบหล่อในแนวตั้งโดยเริ่มจากข้างล่างขึ้นสู่ข้างบน

ค. ภายหลังกระบวนการมักจะมีผง หรือแป้งกองอยู่ที่ก้นของโพรงในแบบจะต้องกวาด หรือเป่าออก

2.3.6 สมบัติของทรายหล่อ

2.3.6.1 ขึ้นรูปได้ง่าย (Formability) และทำแบบหล่อได้สะดวก โดยที่มีความแข็งแรง-พอที่จะยกไปได้ และเทโลหะหลอมเหลวลงไปได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ดังนั้นจะต้องมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง และแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง (Hot Strength)

2.3.6.2 จะต้องให้แก๊สซึมออกได้ (Permeability) สะดวกพอถ้าอากาศ หรือแก๊สที่เกิดขึ้นไม่สามารถซึมผ่านเม็ดทรายออกไปจากแบบหล่อเร็วพอในขณะเทโลหะหลอมเหลว อาจเกิดตำหนิประเภทรูโหว่ที่เกิดจากการหดตัว และรูพรุนที่ผิว

2.3.6.3 ขนาดของเม็ดทราย และปริมาณของเม็ดทรายแต่ละขนาดต้องเหมาะสม ถ้าใช้ทรายละเอียดทำแบบหล่อผิวของชิ้นงานจะละเอียดดี แต่ถ้าเม็ดทรายละเอียดเกินไปแก๊สจะออกไม่ได้จะเกิดรูพรุน (Blow Holes) ดังนั้นจะต้องเลือกขนาดของเม็ดทราย และปริมาณของเม็ดทรายแต่ละขนาดอย่างเหมาะสม

2.3.6.4 มีความทนไฟ (Refractoriness) สูงพอ ไม่ละลายที่อุณหภูมิเท ซึ่งเม็ดทรายและตัวประสานจะต้องมีความทนไฟพอ ต้องทนได้เมื่อเทโลหะหลอมเหลวลงไปในแบบหล่อโดยอุณหภูมิในการเทโลหะหลอมเหลวที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 2.3

2.3.6.5 มีส่วนผสมที่เหมาะสม เมื่อเม็ดทรายสัมผัสกับโลหะหลอมเหลวอุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพ และทางเคมี ดังนั้นไม่ควรมีส่วนผสมใดๆ ที่จะทำให้เกิดแก๊ส หรือที่จะละลายไปกับโลหะหลอมเหลว

2.3.6.6 นำมาใช้ได้อีกโดยทรายที่ดีต้องใช้ได้หลายครั้งเพื่อความประหยัด

2.3.6.7 ทรายที่ใช้ต้องมีราคาถูก

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิเทสำหรับการหล่อโลหะต่างๆ

ชนิดของโลหะที่หล่อ	อุณหภูมิเท (°C)
โลหะผสมเบา	650-750
บรอนซ์	1100-1250
ทองเหลือง	950-1100
เหล็กหล่อ	1250-1450
เหล็กเหนียวหล่อ	1500-1550

ที่มา : หริส (2533)

2.3.7 การทดสอบทรายทำแบบหล่อ

มีวิธีทดสอบหลายวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติของทรายทำแบบหล่อ

2.3.7.1 การวัดความชื้น

ชั่งน้ำหนักทรายให้ได้ 50 กรัม และนำไปอบให้แห้งด้วยเตาอบโดยใช้อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง ปล่อยให้ทรายเย็นถึงอุณหภูมิห้องในเครื่องทำให้แห้ง (Desiccator) แล้วชั่งทรายอีกครั้งหนึ่งเพื่อหาว่าน้ำหนักลดลงเท่าใด แล้วคิดน้ำหนักที่ลดลงไปเป็นร้อยละของน้ำหนักเดิม ร้อยละที่ได้หมายถึงปริมาณความชื้นอิสระ (Free Moisture) วิธีนี้ใช้เวลานานแต่ได้ผลเที่ยงตรง ถ้าต้องการผลเร็วก็มีวิธีที่ทำให้ทรายแห้งโดยการเป่าด้วยลมร้อนใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที ก็จะหาปริมาณความชื้นได้

2.3.7.2 การวัดความแข็งแรง

มีการวัดดังนี้ เตรียมชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (50 มิลลิเมตร x 50 มิลลิเมตร) โดยการกระทุ้งทราย 3 ครั้ง ในหลอดทำชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องกระทุ้งมาตรฐานแล้วดันชิ้นงานทดสอบออกเพื่อวัดความแข็งแรงให้แรงภาระกระทำกับชิ้นงานทดสอบจนแตกโดยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของทราย คำนวณความแข็งแรงอัดซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$\text{ความแข็งแรงอัด(กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)} = \frac{\text{แรงภาระขณะชิ้นงานทดสอบแตก}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ}} \qquad (2.3)$$

กำหนดให้อัตราการเพิ่มแรงภาระ = 30กรัม/ตารางเซนติเมตร/วินาที สำหรับชิ้นงานทดสอบทรายชื้น และเท่ากับ 150กรัม/ตารางเซนติเมตร/วินาที สำหรับชิ้นงานทดสอบทรายแห้ง ความแข็งแรงของแบบหล่อขึ้นกับชนิด ปริมาณของตัวประสาน และความชื้น ถ้าความแข็งแรงไม่เพียงพอจะทำให้แบบหล่อแตกง่าย แต่ถ้าความแข็งแรงมากเกินไปชิ้นงานจะหดตัวนอกจากนั้นยังทำให้แกะแบบออกยาก

2.3.7.3 การหาความละเอียดของเม็ดทราย (Grain Fineness Number)

คำนวณหมายเลขความละเอียดของเม็ดทรายซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$F.N. = \sum(W_n \times S_n)/\sum W_n \qquad (2.4)$$

F.N. = หมายเลขความละเอียดของเม็ดทราย

W_n = น้ำหนักของทรายในตะแกรง (กรัม)

S_n = ตัวคูณขึ้นกับขนาดของรู แสดงดังตารางที่ 2.4

ตาราง 2.4 ตัวคูณ (S_n) สำหรับคำนวณหาหมายเลขความละเอียดของเม็ดทราย

ขนาดอนุภาค (Micron)	3360	2380	1680	1190	840	590	420	297	210	149	105	74	53	tan
S_n	5	8	11	16	22	32	45	63	89	126	178	253	357	620

ที่มา : หริส (2533)

หมายเลขความละเอียดของเม็ดทรายจะบอกพื้นที่ผิวของเม็ดทราย หมายเลขสูงๆ จะบอกถึงเม็ดทรายขนาดเล็ก

2.3.8 ข้อดี-ข้อเสีย ของกระบวนการหล่อโลหะแบบหล่อทรายชื้น

2.3.8.1 ไม่ต้องทำกรรมวิธีทางความร้อน(Heat Treatment) หลังจากผ่านการหล่อ เพราะแบบหล่อทรายมีอัตราการสูญเสียความร้อนต่ำ

2.3.8.2 ใช้รอบการผลิตสั้น

2.3.8.3 เป็นกระบวนการหล่อต่อเนื่อง

2.3.8.4 ใช้ทรายหล่อซึ่งเป็นวัตถุดิบต้นทุนต่ำ

2.3.8.5 ราคาต่ำ

2.3.8.6 หล่อชิ้นงานที่ความซับซ้อนสูงๆ ไม่ได้

2.3.8.7 ผิวชิ้นงานสุดท้ายไม่สวยงาม

2.3.8.8 ค่าความแม่นยำต่ำ

2.4 กระบวนการหล่อโลหะแบบหล่อถาวร (Permanent Mold Casting)

โลหะผสมอะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะผสมที่มีสมบัติทางด้านการหล่อหลอมที่ดีชนิดหนึ่ง เพราะมีจุดหลอมเหลวต่ำ และมีความสามารถในการไหลเข้าแบบหล่อได้ดี ทำให้สามารถหล่อรูปร่างต่างๆ ได้สะดวกแม้มีรูปร่างที่ซับซ้อน หรือชิ้นงานหล่อที่มีความบางมากก็ตาม การหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถใช้เทคนิคการหล่อหลอมได้หลายวิธี เช่น การใช้วิธีการหล่อด้วยแบบทราย หล่อด้วยแบบหล่อปูนปลาสเตอร์ (Plaster Molding) หล่อด้วยแบบหล่อขี้ผึ้ง (Investment Casting) ซึ่งล้วนเป็นกระบวนการหล่อเพียงครั้งเดียวไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก ส่วนกระบวนการหล่อด้วยแบบหล่อ-ถาวรเป็นกระบวนการหล่อที่ใช้แบบหล่อเพียงแบบแม่พิมพ์เดียวแต่สามารถผลิตชิ้นงานหล่อได้หลาย-ชิ้น

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมในแบบหล่อถาวร โดยมีเทคนิคในการเทโลหะหลอมเหลวโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง การออกแบบระบบหล่อที่ประกอบด้วย รูเท ทางวิ่ง ทางเข้า รูล้น ช่องว่างที่เป็นตัวแบบ และแบบหล่อที่มี 2 ส่วน นำมาประกบกันยึดติดด้วยอุปกรณ์ช่วยยึดแน่นซึ่งอาจจะติดตั้งบนที่ตั้งให้แน่นอน นอกจากนั้นควรมีระบบแกะชิ้นงานออกจากแบบหล่อภายหลังการเทน้ำโลหะหลอมเหลวลงในแบบหล่อเพื่อสะดวกในการทำงานให้เกิดความรวดเร็ว

2.4.1 อุณหภูมิแบบหล่อ

อุณหภูมิของแบบหล่อถาวรมีผลกระทบต่อการเกิดจุดบกพร่องต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นกับชิ้นงานหล่อได้ และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแบบหล่อมีดังนี้

2.4.1.1 อุณหภูมิแบบหล่อสูง (High Mold Temperature) มีผลเสียในเรื่องความถี่ของรอบการปฏิบัติงานนานขึ้น (Longer Cycle Time in Production) และสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน แต่มีข้อดีในเรื่องความแตกต่างของอุณหภูมิแบบหล่อกับน้ำโลหะที่มีความแตกต่างทางความร้อน (Thermal Gradient) น้อย

2.4.1.2 อุณหภูมิแบบหล่อต่ำ (Low Mold Temperature) มีผลเสียเกิดขึ้นกับการหล่อชิ้นงาน เช่น ทำให้น้ำโลหะแข็งปิดทางเดินโลหะหลอมเหลว (Cold Shuts) ก่อนที่โลหะหลอมเหลวจะเติมเต็มแบบหล่อ ทำให้กระบวนการผลิตเกิดข้อผิดพลาด เกิดการหดตัว การแตกร้าวขณะร้อน ผิวชิ้นงานหยาบไม่เรียบ

2.4.2 สารเคลือบผิวแบบหล่อ และชนิดของสารเคลือบผิวแบบหล่อ

ทำให้การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นต่างกัน และยังทำให้ความหนาของแบบหล่อเปลี่ยนไปด้วย เช่น ในกรณีการเคลือบผิวของแบบหล่อส่งผลต่อความหนาของแบบหล่อที่เปลี่ยนไปทำให้อุณหภูมิของแบบหล่อต่ำลง ผิวของชิ้นงาน และความหนาของชิ้นงานที่ได้เปลี่ยนไปด้วย

2.4.3 อุณหภูมิการหลอม และอุณหภูมิเทน้ำโลหะ (Pouring Temperature ; T_p)

อุณหภูมิในการหลอมโลหะผสมจะปรับเปลี่ยนไปตามชนิดของเตาที่ใช้-ธาตุผสมของ-โลหะ น้ำหนักของชิ้นงานหล่อ การเคลือบผิวแบบหล่อ ระบบทางเดินของโลหะหลอมเหลวภายใน-แบบหล่อ และอุณหภูมิที่ใช้ในการเทโลหะหลอมเหลว ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องหาจุดที่เหมาะสมใน-การหาอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวสามารถอธิบายได้ 2 กรณี ดังนี้

2.4.3.1 อุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวต่ำ (Low Pouring Temperature) อาจทำให้ได้ชิ้นงานหล่อที่ไม่เต็มแบบหล่อ เพราะระบบทางเข้า หรือรูล้นเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะมีการแข็งตัวของชิ้นงาน และความหนาของรอยต่อระหว่างหนากับบางของแบบหล่อ เกิดการแข็งตัวเร็ว และขัดขวางการแข็งตัวของส่วนอื่นๆ ที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดจุดตำหนิต่างๆ เช่น รูพรุน ชิ้นงานที่ได้ไม่มีคุณภาพ และเกิดรอยต่อระหว่างโลหะหลอมเหลวแข็งปิดทางเดินโลหะหลอมเหลว

2.4.3.2 อุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวสูง (High Pouring Temperature) ทำให้เกิดการหดตัวสูง เนื่องจากการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง ขนาดของชิ้นงานที่ได้มีขนาดไม่แน่นอน และทำให้ธาตุที่ผสมในอะลูมิเนียมสูญเพลิง (Heat Loss) ได้มาก และยังส่งผลต่อเวลาของกระบวนการ-แข็งตัวที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังลดอัตราการผลิต และอายุการใช้งานของแบบหล่อ

2.4.4 ข้อดี-ข้อเสีย ของกระบวนการหล่อโลหะแบบหล่อถาวร

2.4.4.1 อัตราการผลิตสูง
2.4.4.2 ผิวสุดท้ายมีความแม่นยำสูง
2.4.4.3 เหลือเศษโลหะน้อย
2.4.4.4 เหมาะกับการผลิตจำนวนมากๆ
2.4.4.5 อุปกรณ์ที่ใช้ราคาสูง
2.4.4.6 ใช้กับโลหะนอกกลุ่มเหล็ก
2.4.4.7 จำกัดเรื่องขนาด และรูปร่าง
2.4.4.8 มีค่าความเผื่อสูงกว่ากระบวนการหล่อโลหะแบบหล่อทรายขึ้น

2.5 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ

การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะสามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macroscope) และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope) โดยการตรวจสอบโครงสร้างทั้ง 2 วิธีนี้ ทำให้ทราบถึงโครงสร้างของโลหะผสมนั้นๆ หรือทราบถึงตำหนิที่มีอยู่ในโลหะผสมนั้นๆ โดยโครงสร้าง และตำหนิจะเกี่ยวเนื่องถึงสมบัติทางกลของวัสดุด้วย ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างสามารถนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมซึ่งการตรวจสอบแต่ละแบบจะมีวิธีการและจุดประสงค์แตกต่างกันโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค เป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยการมองด้วยตาเปล่า หรือถ้าใช้กล้องขยายก็ใช้กำลังการขยายไม่เกิน 50 เท่า การเตรียมชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนั้นไม่ยุ่งยาก เพราะว่าเป็นการตรวจสอบรูพรุนภายในของโลหะ การแยกชั้นของผลึก รอยร้าว รอยแตก หน้าตัดที่ถูกดึงจนขาด และปริมาณธาตุผสมในโลหะเป็นต้น

2.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

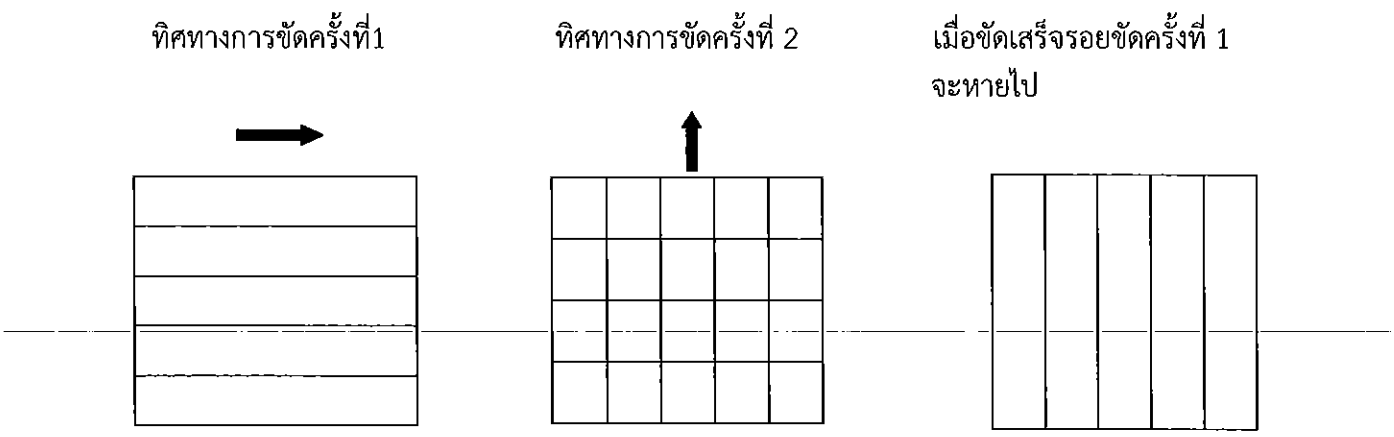
โครงสร้างจุลภาค คือโครงสร้างของโลหะที่ใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายมากกว่า 100 เท่า การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเป็นการศึกษาถึงรูปร่าง ขนาดการจัดเรียงตัวของผลึก และลักษณะเกรน การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะนั้น เพื่อนำไปใช้ในการเลือกวัสดุมาใช้งานให้เหมาะสมกับความต้องการ เพราะวัสดุแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน

เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุทึบการศึกษารูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัวของผลึก และลักษณะของเกรนนั้น ต้องนำไปขัด กัดกรด โดยกรดจะกัดตามขอบเกรนรุนแรงกว่าส่วนอื่นของผลึก เพราะขอบเกรนเป็นส่วนที่มีข้อบกพร่องมากที่สุด หลังจากการกัดกรดแล้วขอบเกรนจะถูกกัดเป็นร่อง เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ การสะท้อนหันเหออกนอกทิศทางเดิมแล้วเราสามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้

2.5.2.1 การเตรียมชิ้นตรวจสอบ

ก. การขัดผิวของชิ้นงาน

ขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนพื้นหนาเรียบแล้วขัดผิวของชิ้นงานที่จะตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะขัดนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรกออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดผิวของชิ้นงานไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย แสดงดังรูปที่ 2.12 เป็นการขัดผิวของชิ้นงานที่ตรวจสอบสลับเป็นตาราง



รูปที่ 2.12 การขัดผิวของชิ้นงานที่ตรวจสอบสลับเป็นตาราง
ที่มา : ชวลิต (2542)

ข. การขัดละเอียดด้วยผงขัด

โดยขัดผิวมันของชิ้นงานด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide) โดยผงขัดจะมีขนาดตั้งแต่ 0.05-0.3 ไมครอน จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อด้วยผ้าสักหลาด โดยนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนผ้าสักหลาด แล้วขัดผิวจนเป็นมัน

ค. การกัดกรด

ชิ้นงานตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้ว จะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปกัดด้วยกรด ซึ่งจะเป็นกรดอะไรนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบส่วนผสมของกรดกัดผิวที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 รายละเอียดกรดกัดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

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

ที่มา : มนัส (2543)

2.5.2.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แสงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ โดยใช้ช่วงคลื่นแสงที่มองเห็นได้มีกำลังขยายตั้งแต่ 20-1,000 เท่า การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงมีขั้นตอนดังนี้

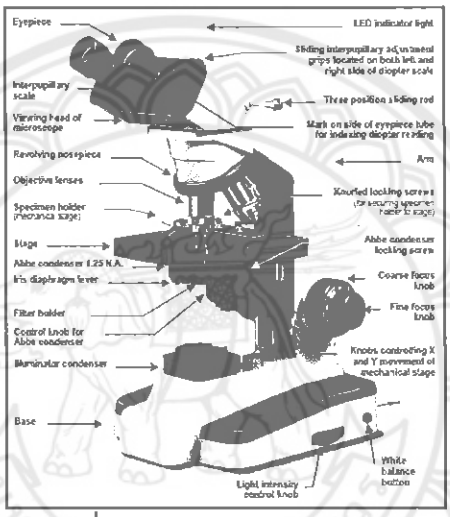
ก. วางชิ้นตรวจสอบบนที่วางของกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้น–ลง และเคลื่อนที่ไปทางซ้าย–ขวาได้ ทั้งนี้เพื่อการปรับชิ้นตรวจสอบให้ตรงกับเลนส์วัตถุ และยังเป็นการปรับระยะชัดเจนของภาพอีกด้วย

ข. เปิดสวิตช์ และปรับความเข้มของแสงตามต้องการ

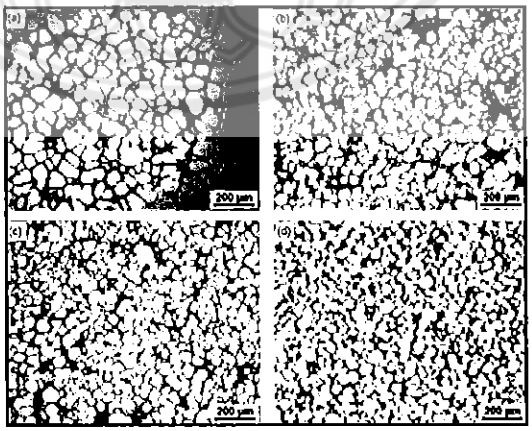
ค. ปรับระยะชัดเจนของภาพ (Focus) สามารถปรับได้ 2 ระบบ คือการปรับหยาบ (Coarse Focus Control) จะสามารถปรับระยะชัดของภาพได้รวดเร็ว แต่จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ และการปรับละเอียด (Fine Focus Control) จะได้ภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้นภายหลังการปรับหยาบ และจะไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นเลย

ง. เมื่อได้ภาพชัดเจนแล้วอาจจะมีการถ่ายภาพไว้ในกรณีที่กล้องจุลทรรศน์นั้นสามารถติดตั้งกล้องถ่ายภาพได้ แสดงดังรูปที่ 2.13

จ. เมื่อหยุดการทำงานให้ปิดสวิตช์และนำชิ้นตรวจสอบออกจากที่วาง ควรระวังไม่ให้ชิ้นตรวจสอบกระทบกับเลนส์วัตถุ เพราะอาจจะทำให้เลนส์นั้นมีรอยเกิดขึ้น ส่งผลให้การมองภาพไม่ชัดเจน ลักษณะภาพที่ได้จากการส่องของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 กล้องจุลทรรศน์แสง
ที่มา : ชวลิต (2542)



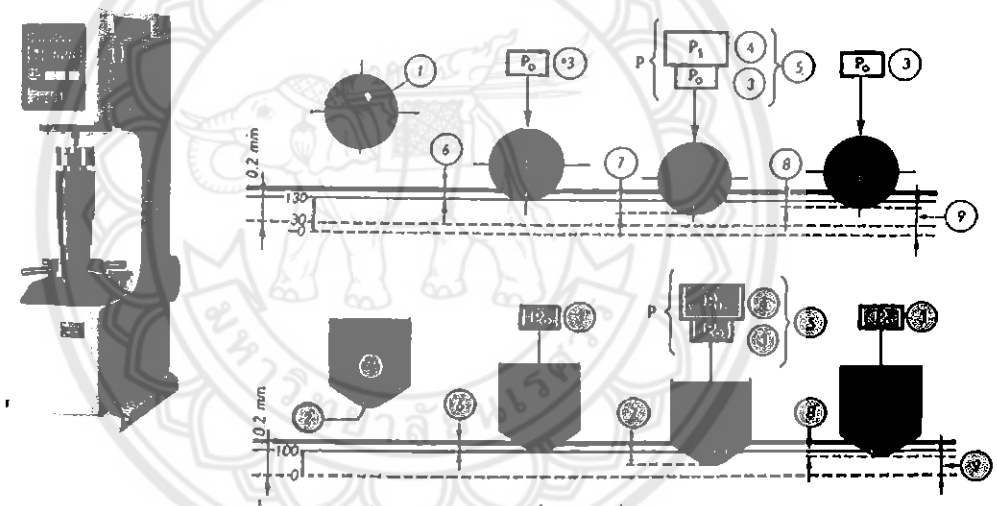
รูปที่ 2.14 ลักษณะภาพที่ได้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง
ที่มา : Hong-Min Gua (2009)

2.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

ความแข็ง คือสมบัติที่วัสดุสามารถต้านทานรอยกด ซึ่งความแข็งแรงอาจรวมถึงความต้านทานต่อการกด การขีด การขัด และการตัด ความแข็งของวัสดุเกี่ยวข้องกับการจับตัวอะตอมและโมเลกุลภายในเนื้อวัสดุ เช่นเดียวกับความแข็งแรง ดังนั้นความแข็งมักจะเพิ่มเมื่อวัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โลหะ และเซรามิกค์จะแข็งกว่าพวกพอลิเมอร์

2.6.1 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Tests)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด โดยจะวัดความแข็งจากความลึกระยะกดที่ถูกหัวกดกดด้วยแรงคงที่ โดยแตกต่างจากแบบบริเนลและแบบวิกเกอร์ที่วัดจากแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นวิธีนี้จึงมีการวัดหลายสเกลเพื่อให้สามารถเลือกใช้วัดความแข็งได้เหมาะสมที่สุด โดยคำนวณหาพื้นที่รอยกดจากค่าความแข็งคำนวณจากผลหารของภาระที่ใช้ต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมของรอยกดมี 2 ส่วน คือภาระรอง (Minor Load) และภาระหลัก (Major Load) เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล แสดงดังรูปที่ 2.15 แรงที่ใช้กดมี 2 ส่วน คือภาระรอง และภาระหลัก



รูปที่ 2.15 วิธีการวัดความแข็งแบบร็อคเวล
ที่มา : ฐาปนีย์ (2551)

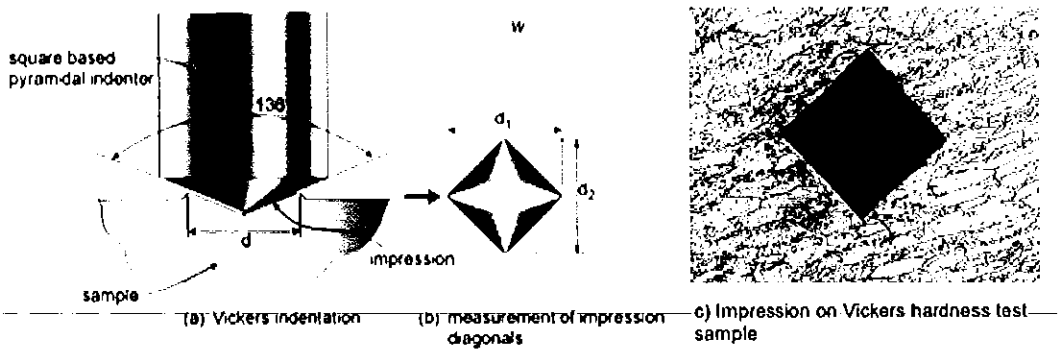
ภาระรอง เป็นแรงที่ยึดหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง หรือหัวกดเพชรไว้บนผิวโลหะที่จะวัดความแข็ง

ภาระหลัก เป็นแรงที่มากกว่าภาระรอง และกดลงภายหลังจากให้ภาระรองกับชิ้นงาน

2.6.2 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ประกอบด้วยการกดวัสดุทดสอบด้วยหัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมมุม 136 องศาระหว่างผิวหน้าตรงข้าม วิธีการทดสอบใช้ภาระ 1-100 กิโลกรัมแรง กดลงบนวัสดุทดสอบเป็นระยะเวลา 10-15 วินาที เส้นทแยงที่ปรากฏบนผิวหน้าของวัสดุภายหลังจากการนำหัวกดออกจะถูกวัดโดยกล้องจุลทรรศน์วิธีวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ แสดงดังรูปที่ 2.16

i590532l
2/5.
ว253ว
2554



รูปที่ 2.16 วิธีการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์
ที่มา : ฐาปนีย์ (2551)

2.6.3 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

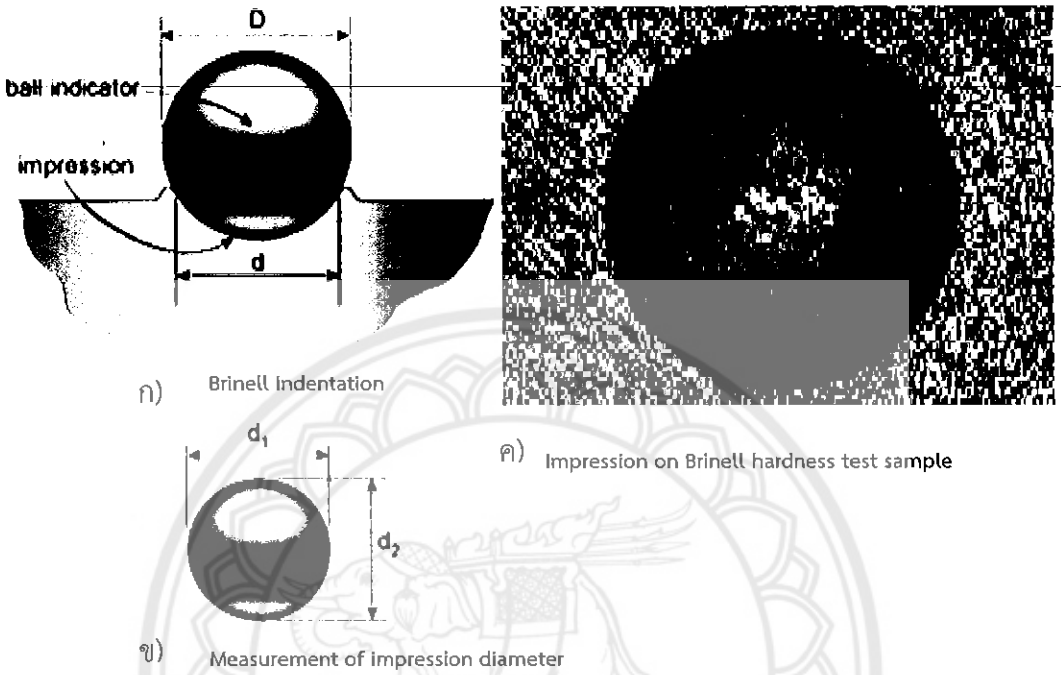
การทดสอบความแข็งแบบบริเนลจะใช้หัวกดเป็นลักษณะหัวบอล (Ball Indenter) ทำจากเหล็กกล้า และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ได้ถูกเสนอขึ้นโดย J.A. Brinell ในปี ค.ศ. 1990 โดยมีการทดสอบ คือการใช้หัวกด Ball กดลงบนชิ้นงานจนทำให้เกิดรอยกด (Impression) เป็นลักษณะคล้ายครึ่งทรงกลม แสดงดังรูปที่ 2.17 เนื่องจากการทดสอบนี้จะทำการแปรผลค่าความแข็งจากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด ดังนั้นรอยกดที่เกิดขึ้นไม่ควรแสดงลักษณะที่บิดเบี้ยวหรือลึกเกินไปจนอาจมีผลทำให้ค่าความแข็งผิดพลาดได้แสดงดังรูปที่ 2.18

ค่าความแข็งแบบบริเนลปกติอยู่ในช่วง 90 ถึง 630 BHN ถ้ามีค่าสูงขึ้นหมายความว่ามีค่าความแข็งมากขึ้น ซึ่งรอยกดที่ลึกจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดมากแต่มีค่าความแข็งน้อย ในกรณีที่ใช้หัวกดลูกบอลขนาด 10 มิลลิเมตร ถ้ารอยกดที่ได้มีขนาดใหญ่กว่า 6 มิลลิเมตร ควรปรับลดน้ำหนักกดลง ในขณะที่หัวกดเคลื่อนสู่พื้นผิวของวัสดุ เนื้อวัสดุรอบหัวกดจะแข็งขึ้นและเนื้อวัสดุส่วนนี้จะทำให้การอ่านค่าเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดผิดพลาด ถ้าค่าความแข็งที่วัดได้ในช่วงปลายของมาตรวัด เช่น ความแข็งเกิน 650 BHN ไม่ควรเชื่อถือมากนัก เนื่องด้วยสองเหตุผลประการแรกเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดน้อยเกินไปทำให้การอ่านค่าไม่แม่นยำ ประการที่สองถ้าวัสดุแข็งมากหัวกดบอลจะยุบตัวทำให้แบนเรียบ และให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดที่ใหญ่ขึ้น ทำให้ค่าความแข็งที่คำนวณได้เชื่อถือไม่ได้ ซึ่งปกติมีวัสดุไม่มากนักที่มีค่าความแข็งเกิน 650 BHN

โดยทั่วไปวัสดุที่มีความแข็งประมาณ 150 BHN หรือมากกว่านั้นจะใช้น้ำหนักกด 3000 กิโลกรัมแรง ส่วนน้ำหนักกด 1500 กิโลกรัมแรง จะใช้กับวัสดุที่มีความแข็ง 75 ถึง 300 BHN และ 500 กิโลกรัมแรง ใช้กับวัสดุที่มีความแข็งต่ำกว่า 100 BHN ในบริเวณที่คาบเกี่ยวกันให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม และชิ้นทดสอบควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 10 เท่าของความลึกรอยกด ถ้าทำการทดสอบกับชิ้นงานที่บางกว่านี้ความแข็งของแท่นวางอาจส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งของวัสดุได้

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลมีข้อดี และข้อเสีย คือเป็นการทดสอบแบบทำลายซึ่งจะมีรอยกดปรากฏอยู่บนพื้นผิววัสดุหลังการทดสอบ ดังนั้นวัสดุที่ผ่านการทดสอบจะไม่สามารถนำกลับไปใช้ได้อีก นอกจากนั้นเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลมีน้ำหนักมากประมาณ 200 ปอนด์ จึงไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งานภาคสนาม รวมทั้งราคาค่อนข้างแพงเมื่อเทียบกับเครื่องทดสอบความแข็งแบบอื่น นอกจากนี้ผลการทดสอบยังขึ้นอยู่กับการฝึกสอน ประสบการณ์ และทัศนคติของผู้ทดสอบในการวัดรอยกด ซึ่งอาจทำให้การอ่านค่ารอยกดได้แตกต่างกัน แต่ปกติแล้วความคลาดเคลื่อนเหล่านี้จะมีน้อย คือคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10

ข้อดีของการทดสอบความแข็งแบบบริเนล คือเป็นวิธีการทดสอบที่เก่าแก่จนเป็นที่ยอมรับ และเป็นที่คุ้นเคยของคนส่วนใหญ่ ตลอดจนผลการทดสอบความแข็งที่ได้รับยังเป็นที่ยอมรับในวงการอุตสาหกรรม รวมทั้งการทดสอบสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว คือประมาณ 2 นาที ในการดำเนินการทดสอบ



รูปที่ 2.17 วิธีการวัดความแข็งแบบบริเนล
ก) รอยกด Impression จากหัว Ball
ข) การวัดค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด
ค) รอยกดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบความแข็งแบบบริเนล
ที่มา : ฐาปนีย์ (2551)

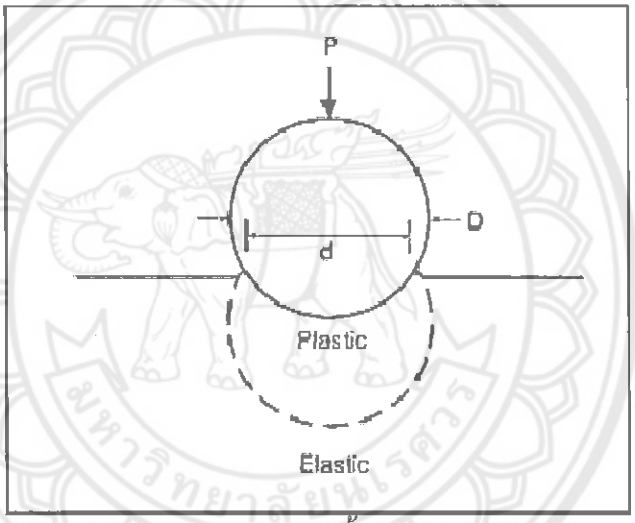
ในการวัดความแข็งหัวบอลจะถูกกดลงบนผิวชิ้นงานเป็นเวลาประมาณ 30 วินาที หลังจากนำน้ำหนักกดออกแล้วจะทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดจำนวน 2 ค่า โดยใช้กล้องที่มีกำลังขยายต่ำ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จะถูกนำมาคำนวณค่าความแข็ง จากค่าน้ำหนักกดหารด้วยพื้นที่ผิวของรอยกดที่เกิดขึ้นจากสมการ

$$BHN = \frac{P}{(\pi D/2)\,(D - \sqrt{D^2-d^2})} = \frac{P}{\pi\, Dt} \qquad (2.5)$$

โดยที่ BHN คือ ค่าความแข็งบริเนล ($Kgf.mm^{-2}$)
P คือ น้ำหนักกด (Applied load), kgf
D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดบอล (mm)
d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (mm)
T คือ ความลึกของรอยกด (mm)

หมายเหตุ ค่า BHN ที่วัดได้นี้มีหน่วยเป็น $kgf.mm^{-2}$ (กิโลกรัมแรง/ตารางมิลลิเมตร) (1 $kgf.mm^{-2}$ = 9.8 MPa) ซึ่งไม่สามารถเปรียบเทียบได้โดยตรงกับค่าความดันเฉลี่ย (Mean Pressure) ต่อพื้นที่ของรอยกด

โดยทั่วไปแล้วควรมีการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบความแข็งโดยการปรับสภาพผิวของชิ้นงานให้ราบเรียบ และปราศจากเศษโลหะ หรือสิ่งสกปรกตกค้าง เพราะปัจจัยเหล่านี้อาจทำให้ได้ค่าความแข็งที่วัดได้ที่ถูกต้อง



รูปที่ 2.18 การแปรรูปแบบถาวรของเนื้อวัสดุบริเวณใต้หัวกดแบบบริเนล
ที่มา : ฐาปนีย์ (2551)

เมื่อเราพิจารณาเนื้อโลหะ หรือวัสดุบริเวณใต้หัวกดจะพบว่ามีการแปรรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) และบริเวณดังกล่าวนี้จะถูกล้อมรอบด้วยบริเวณของเนื้อโลหะที่มีการแปรรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) ซึ่งจะทำหน้าที่ขัดขวางการไหล หรือเคลื่อนตัวแบบถาวร (Plastic Flow) ของเนื้อโลหะด้านบน ในสภาพดังกล่าวนี้ถือว่าเป็นการแปรรูปของโลหะนั้นถูกจำกัด (Plane Strain Compressive) ซึ่งหากเนื้อโลหะด้านล่างไม่มีความยืดหยุ่น หรือแข็งมาก (Rigid) อาจจะทำให้เนื้อโลหะที่แปรรูปแบบถาวรเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนล้อมรอบหัวกด แสดงดังรูปที่ 2.17 ก) แต่อย่างไรก็ดีเราจะไม่ค่อยพบสภาวะเช่นนี้ เนื่องจากเนื้อโลหะที่ถูกแทนที่ด้วยหัวกดนั้นจะถูกพิจารณาว่าเกิดมาจากปริมาตรที่ลดลงของเนื้อวัสดุที่แปรรูปแบบยืดหยุ่นโดยรอบ

2.6.4 ข้อดีของการทดสอบแบบบริเนล

2.6.4.1 ใช้หัวกดที่มีขนาดใหญ่จะทำให้สามารถวัดความแข็งของชิ้นงานที่มีความแตกต่างของโครงสร้างมากๆ หรือไม่สม่ำเสมอได้

2.6.4.2 ผิวชิ้นงานมีรอยขีดข่วน หรือผิวหยาบเพียงเล็กน้อยจะไม่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่ได้ผิดพลาด

2.6.5 ข้อเสียของการทดสอบแบบบริเนล

2.6.5.1 เกิดความผิดพลาดในการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด

2.6.5.2 วัดความแข็งของชิ้นงานที่มีขนาดเล็กเกินไปไม่ได้

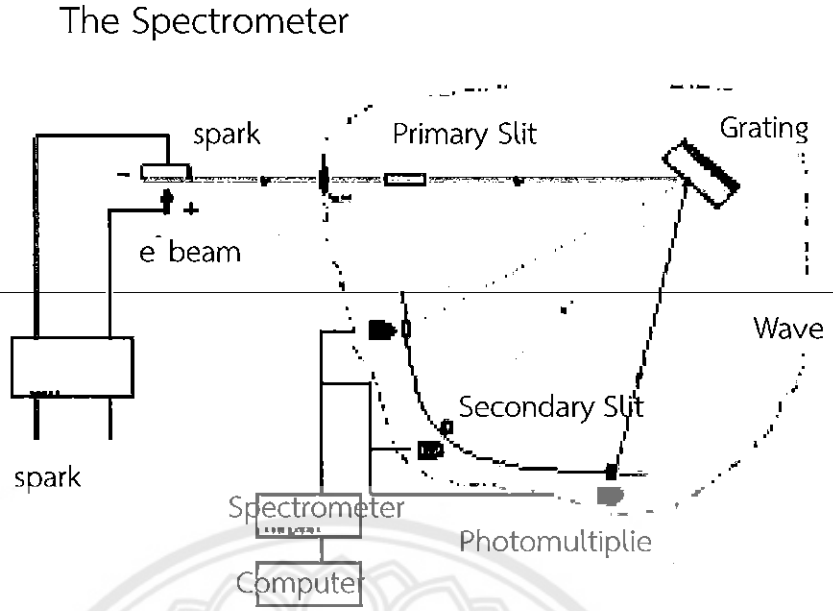
2.6.5.3 การทดสอบชิ้นงานเป็นการทดสอบแบบทำลายชิ้นงานจึงไม่สามารถนำชิ้นงานกลับมาใช้ใหม่ได้

2.7 การตรวจวัดปริมาณธาตุด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer (OES)

เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ทดสอบเชิงปริมาณ และใช้ในการวิเคราะห์เพื่อควบคุมคุณภาพของธาตุต่างๆ สามารถวิเคราะห์ได้ที่ละหลายธาตุ หลักการทำงานของเครื่อง Optical Emission Spectrometer แสดงดังรูปที่ 2.19

วิธีการวิเคราะห์อาศัยหลักการทำให้สารเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (Ground State) ไปยังสถานะกระตุ้น (Excite State) เพื่อให้สารที่จะวิเคราะห์นั้นเปล่งแสง หรือสเปกตรัมออกมา ซึ่งจะอยู่ในช่วงของยูวี-วิสิเบิล (UV-Visibal) จากนั้นวัดความเข้มของแสงซึ่งทำให้ทราบชนิด และปริมาณธาตุที่ผสมอยู่ในชิ้นงาน ข้อดีของการวิเคราะห์ในวิธีนี้มีความเที่ยงตรงสูง ใช้เวลาน้อยในการวิเคราะห์เพื่อควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต เช่น โรงหล่อเหล็ก โรงหล่ออะลูมิเนียม แสดงเครื่อง Optical Emission Spectrometer แสดงดังรูปที่ 2.20

หลักการทำงานของเครื่อง Optical Emission Spectrometer คือ เมื่อทำการสปาร์ก (Spark) (ชิ้นงานเป็นขั้วลบ อิเล็กโทรดเป็นขั้วบวก) ธาตุทุกธาตุจะถูกกระตุ้นให้ปล่อยพลังงานคลื่นแสงออกมา ผ่านเข้าเลนส์รวมแสงผ่าน Primary Slit เพื่อให้เกิดความคมของแสงผ่าน Grating เพื่อทำการแยกคลื่นแสง คลื่นแสงของธาตุต่างๆ จะเรียงกันตามความยาวคลื่นแสง จากนั้นผ่าน Secondary Slit เมื่อแสงผ่าน Secondary Slit แล้วจะเข้าสู่ Photo multiplier Tube (PMT) หลอด PMT มีหน้าที่เปลี่ยนความเข้มของคลื่นแสงเป็นกระแสไฟฟ้า ดังนั้นหลอด PMT จะปล่อยกระแสไฟฟ้าออกมามากน้อยขึ้นกับความเข้มของแสง เมื่อชิ้นงานถูกอาร์คจะมีคลื่นความถี่ที่ไม่ต่อเนื่องใช้สเปกโตรสโคปหรือสเปกโตรมิเตอร์แยกแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันออก คลื่นความถี่ที่แยกออกมาเรียกว่าเส้นสเปกตรัม อะตอมต่างกันสเปกตรัมก็ต่างกันด้วย เมื่อตรวจวัดรังสีที่เปล่งออกมาแล้วจึงทำการประมวลสัญญาณ



รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของเครื่อง Optical Emission Spectrometer
ที่มา : อุทัย (2551)

รูปที่ 2.20 เครื่อง Optical Emission Spectrometer
ที่มา : อุทัย (2551)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

I.E.ODOM (1975) ได้ทดสอบสมบัติ และหน้าที่ของโซเดียมเบนโทไนท์ กับแคลเซียมเบนโท-ไนท์ในระบบแบบหล่อทรายชื้นซึ่งใช้ทรายขนาด 62 เมช เวลาผสม 8 นาที แล้วทดสอบ Green Strength, Dry Strength, Hot Compressive Strength, Wet Tensile Strength และทดสอบหา Exchangeable Ion ของแบบหล่อทรายชื้นพบว่าสมบัติด้านการประสาน และสมบัติทางความร้อน ของโซเดียมเบนโทไนท์ และแคลเซียมเบนโทไนท์ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของดินมอนโมริโอไนท์ และชนิดของไอออนที่ติดในผิวดิน ซึ่งแคลเซียมเบนโทไนท์จะให้ค่าทดสอบ Green Strength ที่สูง-กว่าโซเดียมเบนโทไนท์ เพราะแคลเซียมไอออนจะเรียงตัวในชั้นของ Water layer ได้แข็งแรงกว่า

โซเดียมเบนโทไนท์แต่โซเดียมเบนโทไนท์จะให้ค่า Dry Strength ที่สูงกว่าแคลเซียมเบนโทไนท์ เพราะโซเดียมไอออนจะยอมให้เกล็ดเล็กๆ ของมอนโมริโอไนท์กระจายอยู่ทั่วผิวทราย ส่วน Hot Strength ของโซเดียมเบนโทไนท์จะได้ค่าสูงกว่าโซเดียมเบนโทไนท์ เนื่องจากมีปริมาณอะลูมิเนียมที่สูงกว่า และความสามารถในการกระจายของโซเดียมที่ผิวทรายดีกว่า

P. BASTIEN, F. CHIESA, J.I. GOMEZ, J. PACHECO, T.ZEGARRA (1989) ได้ศึกษาถึงการคำนวณปริมาณการเติมเบนโทไนท์ลงไปในทรายเก่า พบว่าปริมาณของเบนโทไนท์ที่ต้องการเติมลงไปในทรายเก่าขึ้นกับขนาด และรูปร่างของชิ้นงาน เนื่องจากขนาดและรูปร่างของชิ้นงานมีผลต่อปริมาณของดินที่หมดสภาพ (Dead Clay) และชิ้นงานแผ่นบาง (หนาน้อยกว่า 2.5 เซนติเมตร) ต้องเติมเบนโทไนท์ในทรายที่ใช้แล้วมากกว่าชิ้นงานที่มีน้ำหนักเท่ากันแต่หนากว่า ในกรณีที่ใช้แคลเซียมเบนโทไนท์ พบว่าต้องเติมแคลเซียมเบนโทไนท์ในปริมาณที่มากกว่าโซเดียมเบนโทไนท์ เนื่องจากว่าแคลเซียมเบนโทไนท์ทนความร้อนได้น้อยกว่าโซเดียมเบนโทไนท์

L. BEUTHIN และ F.M. THOMAS (1986) ได้ศึกษาถึงการผสมทรายใหม่ลงไปในระบบแบบหล่อทรายขึ้นเพื่อลดต้นทุนการใช้ทราย พบว่าการใช้ทรายสองเบอร์ (100 และ 400 เมช) ผสมกับทรายเก่าแทนการใช้ทรายเก่าผสมทรายใหม่ตามปกติคือเบอร์ (50, 70, 100 และ 140 เมช) ซึ่งการทำเช่นนี้ช่วยลดต้นทุนได้อย่างมาก เนื่องจากทรายสองเบอร์เพียงแค่ร้อยละ5ผสมกับทรายเก่าทำให้ทรายมีการกระจายตัวใกล้เคียงกับการใช้ทรายสี่เบอร์ถึงร้อยละ 40 ผสมกับทรายเก่าซึ่งทำให้ลดปริมาณการใช้ทรายใหม่ลงมากกว่าร้อยละ 50

Limmaneevichitr และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาบทบาทของการปรับและไม่ปรับสภาพเกรนที่มีผลต่อการลดแนวโน้มของการแตกร้าวในขณะร้อนในโรงงานอุตสาหกรรม และใช้แบบหล่อถาวรที่มีการออกแบบให้มีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวสูง ผลการทดลองชี้ให้เห็นบริเวณที่มีการแตกร้าวขณะร้อนซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของแบบหล่อ แม้ว่าในอะลูมิเนียมเกรดที่มีความต้านทานต่อการแตกร้าวสูงๆ ก็ยังมีโอกาสเกิดการแตกร้าวขึ้นได้ ผลที่ได้จากการปรับสภาพเกรนให้ละเอียดพบว่าลดแนวโน้มของการแตกร้าวขณะร้อนได้ วัสดุที่ใช้ทดลองเป็นอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 355 และ 319 มีการให้อุณหภูมิแบบหล่อที่ 220 และ 250 องศาเซลเซียสใช้อุณหภูมิเทน้ำโลหะ 720 และ 780องศาเซลเซียส

Oya และคณะ (2546) ได้ทำการศึกษากระบวนการแข็งตัวของโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 4.5 โดยน้ำหนัก และโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ร้อยละ 4.5 ซิลิคอนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักพบว่าเมื่อเติมไทเทเนียมแมกนีเซียม และซิลิกอนลงไปในโลหะหลอมเหลว มีสมบัติต้านทานต่อการแตกร้าวขณะร้อน และเติมธาตุสตรอนเซียม, สังกะสี, ซิลิเนียม (Se) และนิกเกิล (Ni) ลงในโลหะหลอมเหลวพบว่ามีสมบัติต้านทานต่อการแตกร้าวต่ำ โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิของการแข็งตัว (Solidification Temperature Range) และช่วงอุณหภูมิแตกเปราะ (Brittle Temperature Range) พบว่าเกรนละเอียดขึ้น และ DAS (Dendrite Arm Spacing) ไม่มีขนาดที่ยาวจนเกินไปทำให้ไม่เกิดการแตกร้าวขณะร้อนจึงช่วยในการป้อนเติมน้ำโลหะได้อีกทางหนึ่ง

อนิรุทธ์ ลีสกุล, อำนาจ พยัคฆ์ และรัฐพงศ์ เจริญเนตร (2553) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม-เหล็ก ในกระบวนการรีไซเคิล พบว่าในการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ซึ่งมีเหล็กผสม หรือปนเปื้อนในปริมาณมากจะมีผลทำให้สมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อลดต่ำลง โดยทั่วไปเหล็กจะฟอร์มตัวเป็นสารประกอบเชิงโลหะ α-Al_8Fe_2Si และ β-

Al_5FeSi ซึ่งมีรูปร่างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กที่ผสม และอัตราการแข็งตัว อิทธิพลของธาตุสตรอนเชียมในการนำโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่ผ่านการเติมสตรอนเชียมนำมาหลอมใหม่ โดยใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน และโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีเหล็กผสม 0.66% โดยน้ำหนัก ในการทดลองใช้อินกอตน้ำหนักประมาณ 1 กิโลกรัม หลอมโดยใช้เตาขดลวดต้านทานไฟฟ้าเทลงแบบหล่อทองเหลือง โดยใช้อุณหภูมิเทเท่ากับ 720°C ผลจากการทดลองพบว่าปริมาณของธาตุเหล็กที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณ และความยาวของเฟส β-Al_5FeSi เพิ่มขึ้น การเติมสตรอนเชียมมีผลทำให้ยูเทคติกซิลิคอนมีขนาดเล็กลง และกระจายตัวที่ดีขึ้น นอกจากนี้สตรอนเชียมนั้นทำให้เฟส β-Al_5FeSi มีความยาวที่สั้นลงแต่ไม่สามารถทำให้หมดไปได้ เมื่อนำชิ้นงานมารีไซเคิลโดยการหลอมใหม่ 5 รอบ พบว่าประสิทธิภาพของสตรอนเชียมในการปรับสภาพโครงสร้างจะลดลงในการหลอมซ้ำครั้งที่ 3 สังเกตได้จากขนาด และความยาวของเฟส β-Al_5FeSi เริ่มยาวขึ้น

สุทธาวัลย์ อิ่มอุไร และคณะ (2550) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ A356 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ A356 ที่มีองค์ประกอบ Al-7%Si-0.3%Mg ที่สภาวะหลังหล่อพบเฟส α -อะลูมิเนียม มีลักษณะเป็นเดนไดร์ทขนาดใหญ่ พบโครงสร้างยูเทคติกที่มีลักษณะเป็นแผ่นยาวของซิลิคอน แทรกอยู่ระหว่างเดนไดร์ทปฐมภูมิ และพบเฟสระหว่างโลหะของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-เหล็ก กระจายทั่วชิ้นงาน เมื่อปรับสภาพชิ้นงานด้วยความร้อนให้เป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง โครงสร้างยูเทคติกมีความเป็นทรงกลมมากขึ้น เนื่องจากซิลิคอนบางส่วนจากโครงสร้างยูเทคติกเกิดการละลายกลับไปในเมทริกซ์มากเกินพอจนเกิดเป็นสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยวดยิ่ง และในขณะเดียวกันองค์ประกอบภายในเมทริกซ์จะเกิด-การแพร่กระจายกันอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS

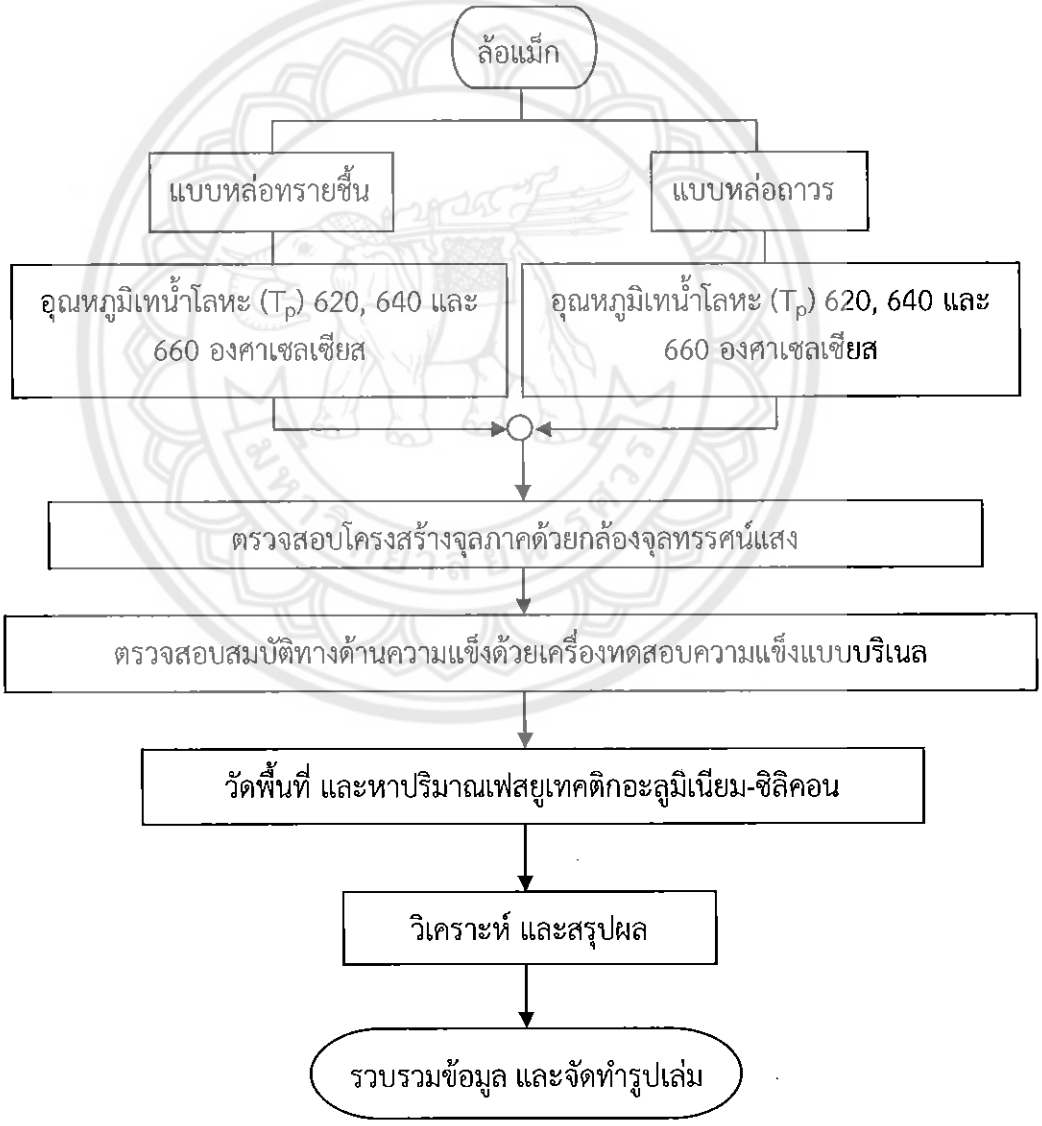
เพชรลัดดา เรืองแก้ว และคณะ (2553) ได้ศึกษาการหล่อโลหะกึ่งแข็งแบบรางเทหล่อเย็นแบบเอียงสำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด AA7075 พบว่ากระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งแบบรางเทหล่อเย็นแบบเอียงเป็นกระบวนการผลิตที่มีต้นทุนการผลิตต่ำเป็นการผลิตที่ทำได้ง่าย และได้วัสดุที่มีโครงสร้างลักษณะกลมขนาดเล็ก ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงสูง ในงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่นำกระบวนการผลิตนี้มาใช้กับอะลูมิเนียมผสมในเกรดงานหล่อ เช่น A356 สำหรับชิ้นส่วนยานยนต์ที่ต้องการความแข็งแรงสูงนั้นอะลูมิเนียมผสมเกรด AA7075 นับว่าเป็นโลหะผสมที่นิยมนำมาผลิตเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นโลหะผสมที่มีความแข็งแรงสูง อีกทั้งมีน้ำหนักเบา แต่อะลูมิเนียมผสมเกรดนี้เป็นกลุ่มงานรีด ไม่นิยมนำมาผลิตด้วยกระบวนการหล่อ ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองนำกระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งแบบรางเทหล่อเย็นแบบเอียงมาใช้กับอะลูมิเนียมผสมเกรด AA7075 โดยศึกษาถึงผลของอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมเกรด AA7075 ซึ่งได้ทำการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 640 และ 660 องศาเซลเซียส จากผลการทดสอบพบว่าที่การเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส มีสมบัติทางกลที่สูงกว่าการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส และได้โครงสร้างจุลภาคที่ลักษณะกลมละเอียด ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับในกลุ่มของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่มงานหล่อที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งแบบรางเทหล่อเย็นแบบเอียง

บทที่ 3
วิธีดำเนินโครงงาน

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินโครงงานที่จะบอกถึงขั้นตอนการดำเนินโครงงาน วัสดุ อุปกรณ์ และขั้นตอนการดำเนินโครงงาน

3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการดำเนินโครงงาน

การศึกษาผลของอุณหภูมิเทต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็ก ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบทรายชื้น และแบบหล่อถาวร โดยมีขั้นตอนการดำเนินโครงงาน แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน

3.2 วัสดุ และอุปกรณ์

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินโครงงาน

คือ ล้อแม็กที่ใช้ทำการทดลองจัดอยู่ในอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ประเภทไฮโปยูเทกติกโดยล้อแม็กได้ผ่านการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer (Model Baird-PV6S Serial No.3329A) จากคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ผลจากการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของล้อแม็ก

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ซิลิคอน	6.78
แมกนีเซียม	0.29
เหล็ก	0.171
แมงกานีส	0.0005
สังกะสี	0.009
ทองแดง	0.004
ไทเทเนียม	0.041
อะลูมิเนียม	Balance

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินโครงงาน

3.2.2.1 อุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน

ก. เตาหลอมโลหะ
ข. ขนาดของเม็ดทรายที่ใช้ในแบบหล่อทราย 80-100 AFS
ค. อุปกรณ์ที่ใช้ทำแบบหล่อทรายชื้น
ง. แม่พิมพ์ถาวร
จ. เทอร์โมคอปเปิล Type K
ฉ. เบ้าหลอม
ช. เครื่องตัดชิ้นงาน
ซ. เครื่องขัดผิวโลหะ
ฌ. กระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200
ญ. ผงขัดอะลูมินาความละเอียด 1 ไมครอน

3.2.2.2 สารเคมี

ก. กรดไฮโดรฟลูออริค ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร
ข. น้ำกลั่น

3.2.2.3 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการดำเนินโครงงาน

ก. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)
ข. เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล
ค. กล้องถ่ายรูป

3.3 ขั้นตอนการดำเนินโครงงานงาน

3.3.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในการดำเนินโครงงาน

ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 และศึกษาขั้นตอนการหล่อโลหะด้วยกระบวนการหล่อแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ-อุปกรณ์

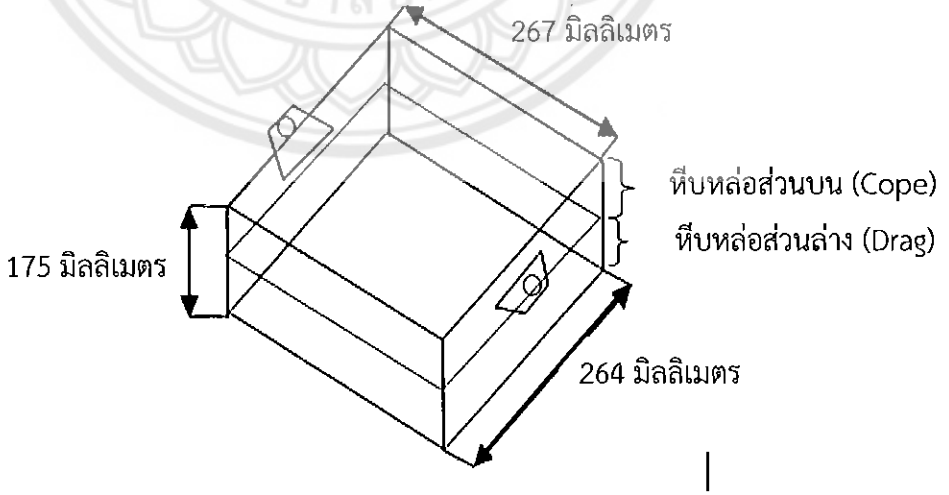
3.3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการดำเนินโครงงาน

นำล้อแม็กน้ำหนัก 7 กิโลกรัม มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ โดยแบ่งออกเป็น 6 ส่วน จากนั้นทำการหล่อชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค และความแข็ง

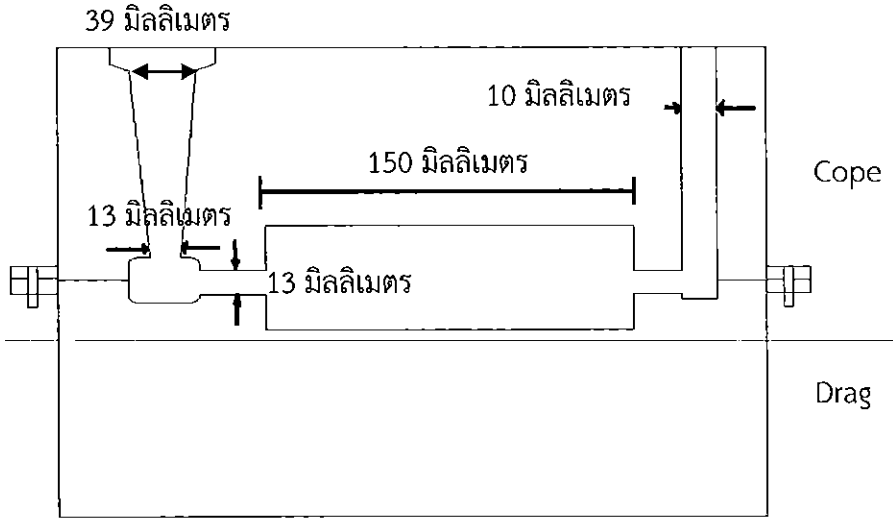
3.3.2.2 การเตรียมแบบหล่อทรายชื้น

หีบหล่อ (Flask) ทำจากโลหะโดยหีบหล่อส่วนบนจะเรียกว่า โค้ป (Cope) หีบหล่อส่วนล่างจะเรียกว่า แดรก (Drag) ซึ่งหีบหล่อมีความกว้าง 267 มิลลิเมตร ยาว 264 มิลลิเมตร และสูง 175 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2

โดยกระบวนการหล่อแบบหล่อทรายชื้นนั้นมีองค์ประกอบของแบบหล่อแสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร จากการคำนวณหาพื้นที่ของรูเท (พัชรา และวงษ์ศักดิ์, 2553) พบว่าพื้นที่ของรูเทมีขนาดเล็กไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในการหล่อ เมื่อคำนวณหาขนาดรูเทจะทำให้ขนาดรูเท-นั้นมีขนาดเล็กไปด้วย ดังนั้นจึงไม่หาขนาดรูเทจากการคำนวณ จึงใช้ทฤษฎีในตารางที่ 2.2 ในการออกแบบขนาดรูเท คือขนาดรูเทสำหรับชิ้นงานหล่อโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีน้ำหนักในการเทน้อยกว่า 10 กิโลกรัม จะใช้ทางเดินโลหะหลอมเหลว 13 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางรูเท 39 มิลลิเมตร (เทพนารินทร์, 2545)



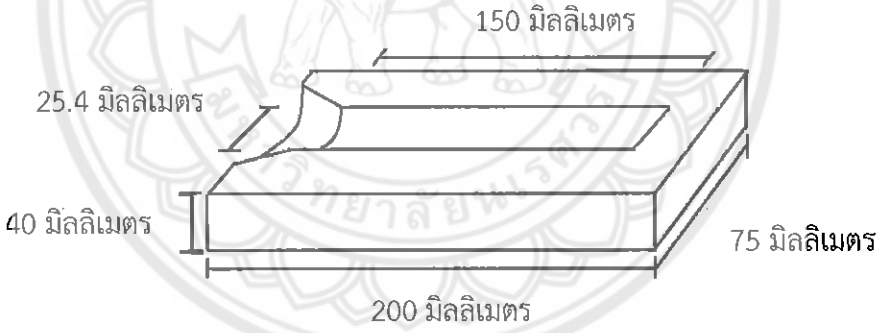
รูปที่ 3.2 หีบหล่อ



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของแบบหล่อทรายชื้น

3.3.2.3 การเตรียมแม่พิมพ์ (Mold)

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองคือ แม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold) ซึ่งทำจากเหล็กกล้า รูปร่าง และขนาดของแม่พิมพ์มีลักษณะเหมือนกัน 2 ชิ้นมาประกบเข้าด้วยกัน โดยกำหนดให้ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการหล่อ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์ถาวร

3.3.3 ขั้นตอนการหล่ออะลูมิเนียมผสม เกรด A356

3.3.3.1 การหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น

ก. นำล้อแม็กมาหลอมจนอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว

ข. เทโลหะหลอมเหลวลงสู่แบบหล่อทรายชื้นที่เตรียมไว้แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยจะทำการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้

ข.1 อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส

ข.2 อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส

ข.3 อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3.5 การหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น

ค. รอให้โลหะหลอมเหลวแข็งตัว และเย็นตัวในแบบหล่อ

ง. แกะชิ้นงานออกจากแบบหล่อ

3.3.3.2 การหล่อด้วยแบบหล่อถาวร

ก. นำล้อแม็กที่ตัดเตรียมไว้มาหลอมจนอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว

ข. เทโลหะหลอมเหลวลงสู่แบบหล่อถาวรที่เตรียมไว้ แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยทำการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้

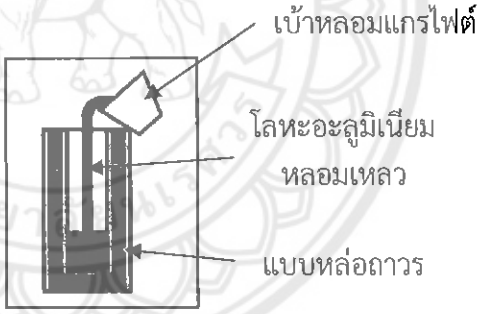
ข.1 อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส

ข.2 อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส

ข.3 อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ค. รอให้โลหะหลอมเหลวแข็งตัว และเย็นตัวในแบบหล่อ

ง. แกะชิ้นงานออกจากแบบหล่อ



รูปที่ 3.6 การหล่อด้วยแบบหล่อถาวร

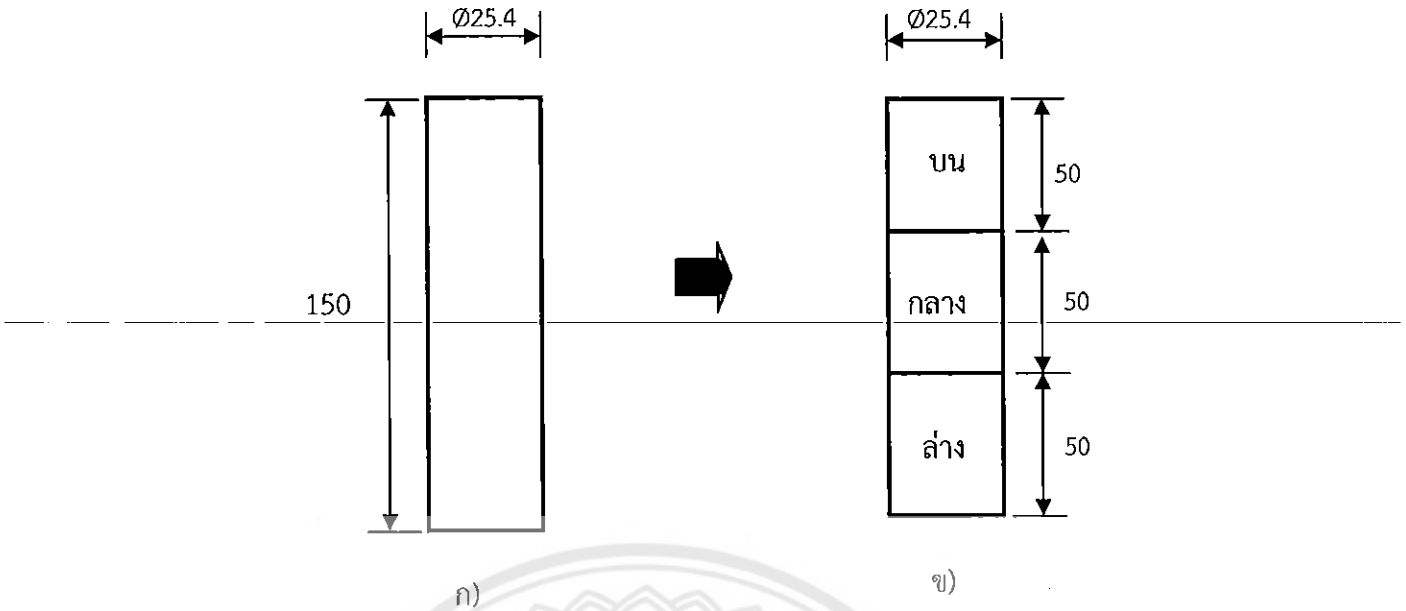
3.3.4 ขั้นตอนการตรวจสอบชิ้นงาน

ก. นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทั้ง 2 กระบวนการมาตัด โดยชิ้นงานก่อนตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร นำมาตัดแบ่งออกเป็น 3 ชิ้นเท่าๆ กันให้ได้ชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.7

ข. นำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ และขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา

ค. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

ง. วัดค่าความแข็ง



รูปที่ 3.7 ขนาดของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)
ก) จากการหล่อ
ข) ภายหลังการตัด

3.3.4.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

ก. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทั้ง 6 เงื่อนไข มาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยรวมของชิ้นงาน

ขั้นตอนการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

ก.1 นำชิ้นงานที่ได้มาขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

ก.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายมาขัดละเอียดโดยใช้ผงอะลูมินา ขนาด 1.0 ไมครอน

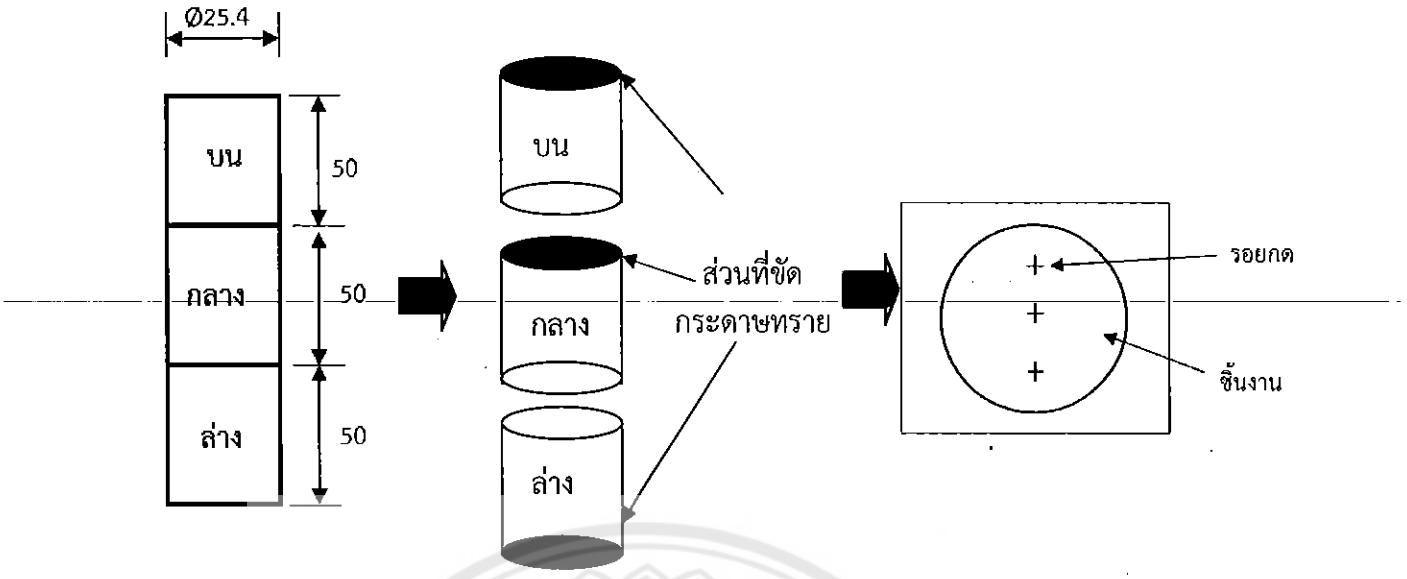
ก.3 นำชิ้นงานที่ขัดละเอียดมากัดกรดไฮโดรฟลูออริค ความเข้มข้นร้อยละ0.5 โดยปริมาตร ในน้ำกลั่น 100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยจุ่มชิ้นงานลงในกรดล้างด้วยน้ำสะอาด เช็ด และเป่าให้แห้ง

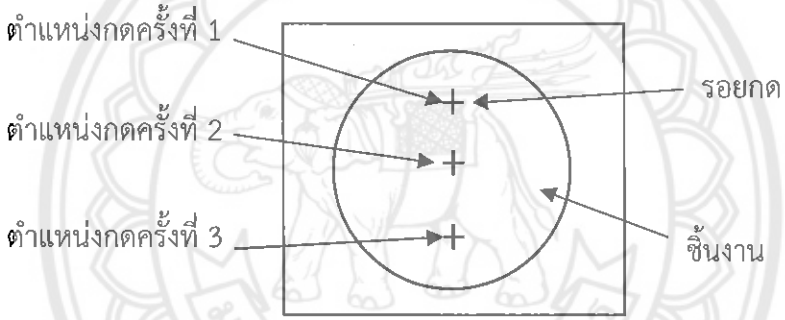
ก.4 นำชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดแล้วมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

3.3.4.2 การวัดค่าความแข็ง

ก. นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทั้ง 6 เงื่อนไข มาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600 และ 800 ตามลำดับ

ข. นำชิ้นงานผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายมาแล้วไปทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล โดยใช้หัวกดบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร น้ำหนักทดสอบ 187.5 กิโลกรัมแรง ใช้เวลากด 15 นาที โดยชิ้นงาน 1 ชิ้น ทำการทดสอบความแข็ง 3 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 3.8





รูปที่ 3.8 แสดงจุดที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง

3.3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

3.3.5.1 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค และความแข็งตามเงื่อนไขที่กำหนดในบทที่ 1

3.3.5.2 นำผลการวิเคราะห์มาศึกษาหาข้อสรุปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดในบทที่1

3.3.5.3 สรุปผลการทดลอง

3.3.5.4 จัดทำรูปเล่มโครงงาน

บทที่ 4
ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

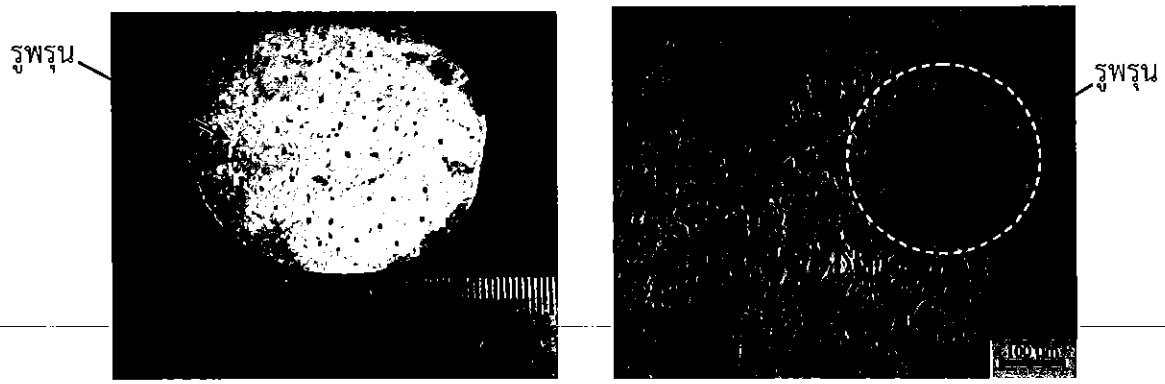
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็กที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร ซึ่งประกอบไปด้วยการเปรียบเทียบรูพรุน โครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อต่างกัน และใช้อุณหภูมิเทต่างกัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 รูพรุน

รูพรุนเป็นจุดเสียที่พบบ่อยเป็นลำดับต้นๆ ในงานหล่ออะลูมิเนียม ซึ่งโดยส่วนมากแล้วรูพรุนมักส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของชิ้นงาน เมื่อนำชิ้นงานที่เกิดรูพรุนไปใช้งานก็จะเกิดปัญหาตามมา เช่น สมบัติทางกลที่ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทนต่อการล้า (Fatigue resistance) ตลอดจนความสามารถในการทนต่อแรงดันสูงเป็นต้น ดังนั้นโครงงานนี้จึงทำการเปรียบเทียบรูพรุนที่พบในชิ้นงานหล่อที่ผ่านกระบวนการหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

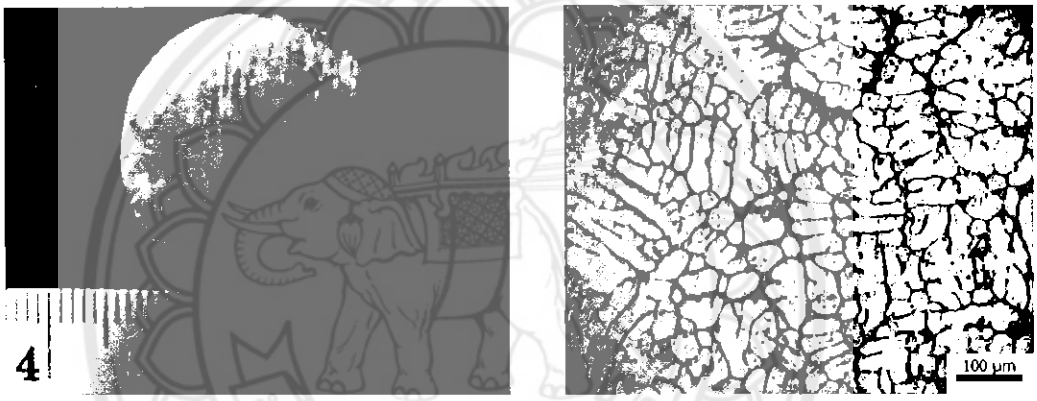
4.1.1 รูพรุนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่ใช้อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

จากการนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่ใช้อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส มาตรวจสอบรูพรุน พบว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส มีรูพรุนเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากการเทอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส มีช่วงเวลาในการแข็งตัวของอะลูมิเนียมหลอมเหลวในแบบหล่อที่แคบกว่าอุณหภูมิเท 640 และ 660 องศาเซลเซียส ส่งผลให้แก๊สที่เกิดขึ้นในอะลูมิเนียมหลอมเหลวบางส่วนไม่สามารถแยกตัวออกจากโลหะอะลูมิเนียมได้หมด จึงเกิดฟองแก๊สตกค้างอยู่ภายในชิ้นงานในลักษณะของรูพรุน สำหรับชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิเท 640 และ 660 องศาเซลเซียส ไม่พบรูพรุนเกิดขึ้นในชิ้นงาน เนื่องจากอุณหภูมิเท 640 และ 660 องศาเซลเซียส มีช่วงเวลาในการแข็งตัวของอะลูมิเนียมหลอมเหลวในแบบหล่อที่กว้าง ส่งผลให้แก๊สที่เกิดขึ้นในอะลูมิเนียมหลอมเหลวสามารถแยกตัวออกจากโลหะอะลูมิเนียมได้จนหมด จึงไม่พบรูพรุนเกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



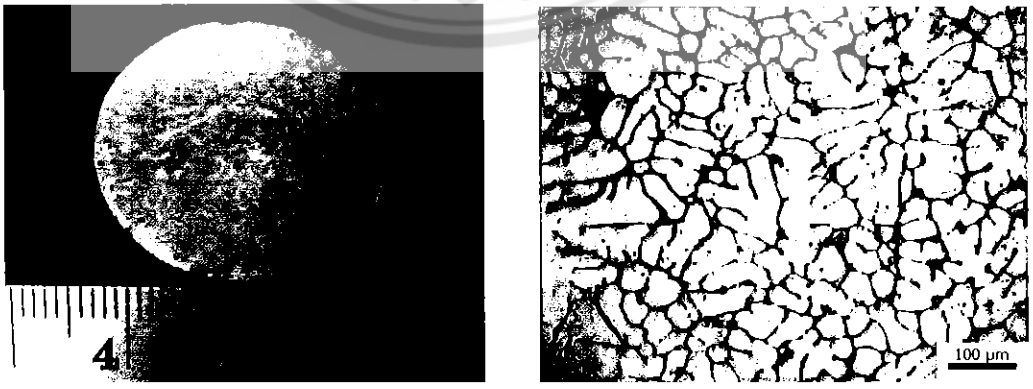
ก) ข)

รูปที่ 4.1 รูพรุนของชิ้นงานหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส
ก) รูปถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการหล่อ
ข) โครงสร้างจุลภาค



ก) ข)

รูปที่ 4.2 รูพรุนของชิ้นงานหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส
ก) รูปถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการหล่อ
ข) โครงสร้างจุลภาค

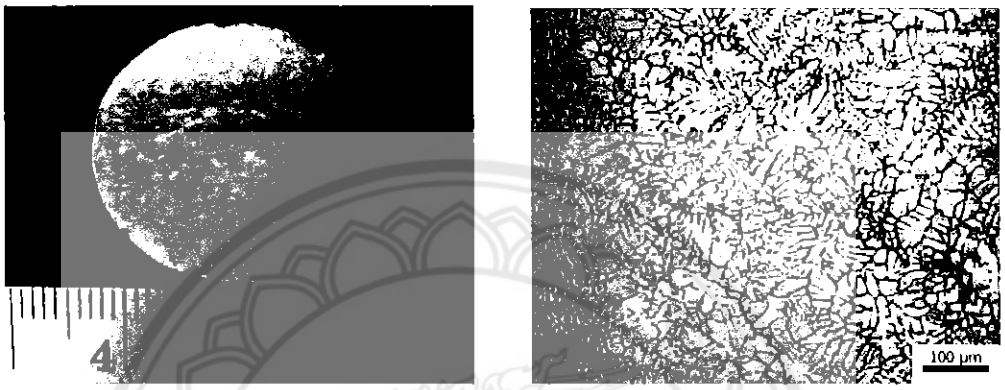


ก) ข)

รูปที่ 4.3 รูพรุนของชิ้นงานหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส
ก) รูปถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการหล่อ
ข) โครงสร้างจุลภาค

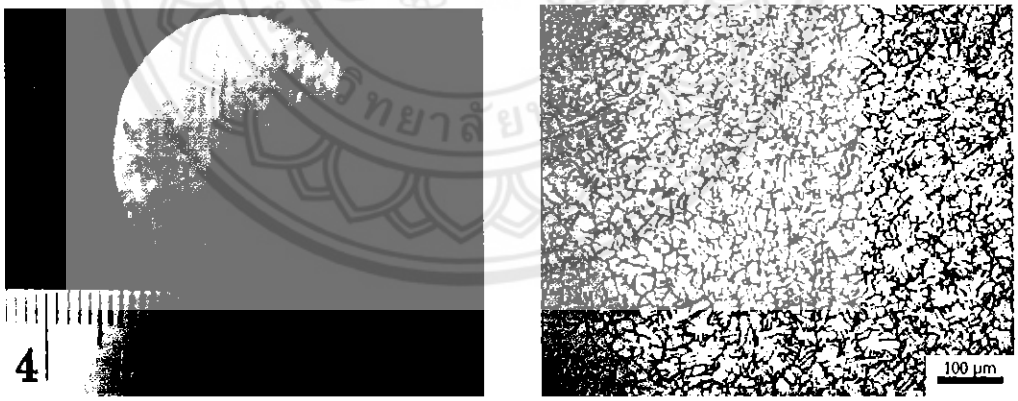
4.1.2 รูพรุนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อถาวรที่ใช้อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

จากการนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อถาวรที่ใช้อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส มาตรวจสอบรูพรุน ซึ่งผลการตรวจสอบไม่พบรูพรุนเกิดขึ้นในชิ้นงานเลย แสดงดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ เนื่องจากแบบหล่อถาวรมีความชื้นในแบบหล่อน้อย ส่งผลให้แก๊สจากอะลูมิเนียมหลอมเหลวไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับความชื้นในแบบหล่อ จึงไม่พบรูพรุนเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน



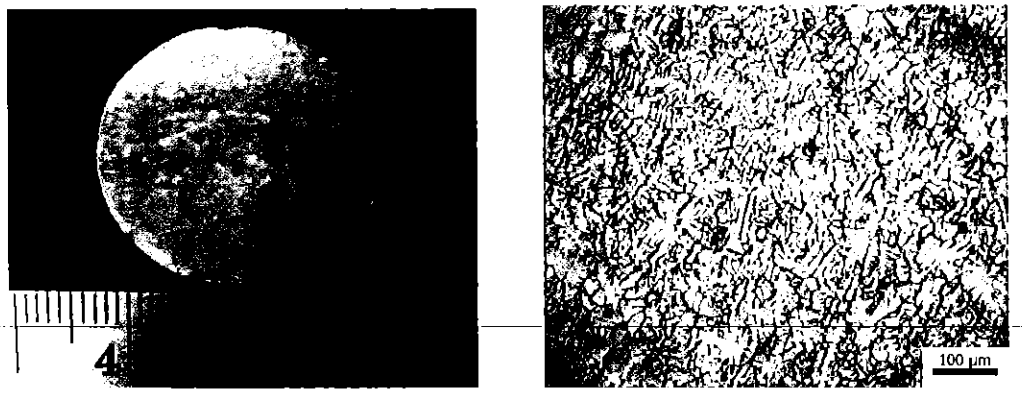
ก) ข)

รูปที่ 4.4 รูพรุนของชิ้นงานหล่อในแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส
ก) รูปถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการหล่อ
ข) โครงสร้างจุลภาค



ก) ข)

รูปที่ 4.5 รูพรุนของชิ้นงานหล่อในแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส
ก) รูปถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการหล่อ
ข) โครงสร้างจุลภาค



ก) ข)

รูปที่ 4.6 รูพรุนของชิ้นงานหล่อในแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส
ก) รูปถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการหล่อ
ข) โครงสร้างจุลภาค

4.1.3 รูพรุนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร

จากการนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร มาตรวจสอบรูพรุน พบว่าชิ้นงานหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส พบรูพรุนเกิดขึ้นในชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากแบบหล่อทรายชื้นมีน้ำเป็นส่วนผสม (เพื่อช่วยในเรื่องความแข็งแรงของแบบหล่อ) เมื่อเทอะลูมิเนียมหลอมเหลวเข้าสู่แบบหล่อ ความร้อนของอะลูมิเนียมหลอมเหลวจะถ่ายเทสู่แบบหล่อทำให้เกิดแก๊สขึ้นมา โดยแก๊สที่เกิดขึ้นนี้จะละลายอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลว เมื่ออะลูมิเนียมหลอมเหลวเย็นตัวลงปริมาณของแก๊สที่ละลายได้จะน้อยลงตามลำดับ ทำให้อะตอมของแก๊สที่ถูกขับออกมารวมตัวกันเป็นโมเลกุล และกลายเป็นฟองแก๊สเล็กๆ แยกตัวลอยขึ้นไปที่ผิวของชิ้นงาน เนื่องจากที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส มีช่วงเวลาในการแข็งตัวที่แคบ ส่งผลให้ฟองแก๊สแยกตัวออกจากโลหะอะลูมิเนียมไม่ทัน ฟองแก๊สจึงตกค้างอยู่ภายในชิ้นงานในลักษณะของรูพรุน โดยในส่วนของแบบหล่อถาวรนั้นไม่พบรูพรุนเกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.4 เนื่องจากแบบหล่อถาวรทำจากเหล็กกล้า (ซึ่งมีความชื้นในแบบหล่อน้อยมาก) ดังนั้นอะลูมิเนียมหลอมเหลวจึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับความชื้นในแบบหล่อจึงไม่พบรูพรุนเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน (มนัส, 2543)

4.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

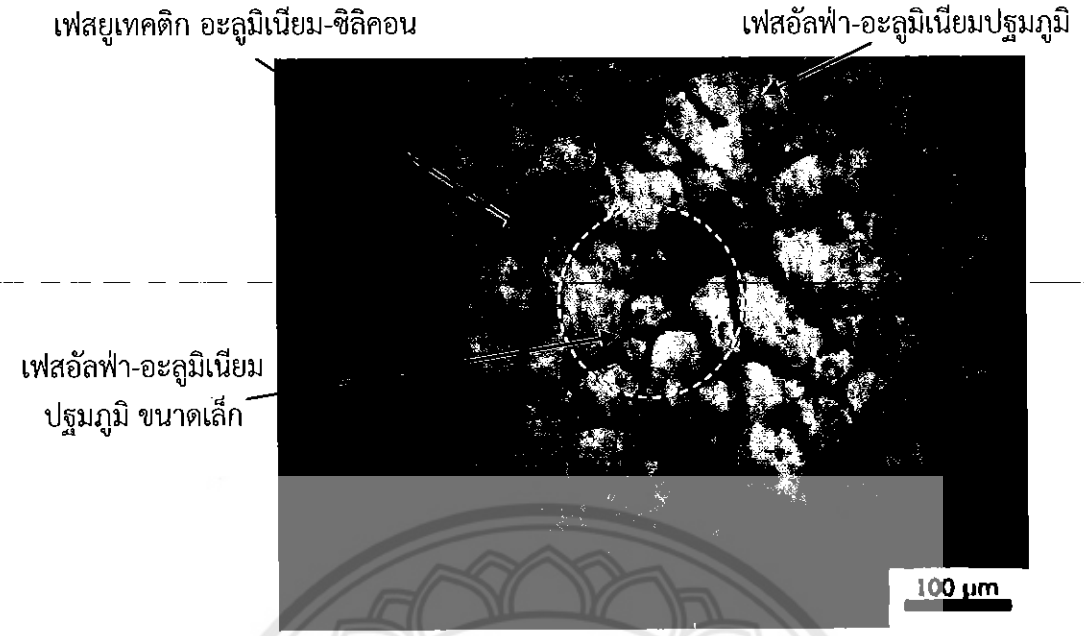
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อนั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งของชิ้นงานที่ได้ โดยถ้าหากมีเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α-Al) ที่มีลักษณะเป็นเดนไดร์ทขนาดเล็ก ความแข็งของชิ้นงานจะสูงขึ้น แต่ถ้าหากมีเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีลักษณะเป็นเดนไดร์ทขนาดใหญ่ ความแข็งของชิ้นงานจะลดลง ดังนั้นโครงงานนี้จึงทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็กที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

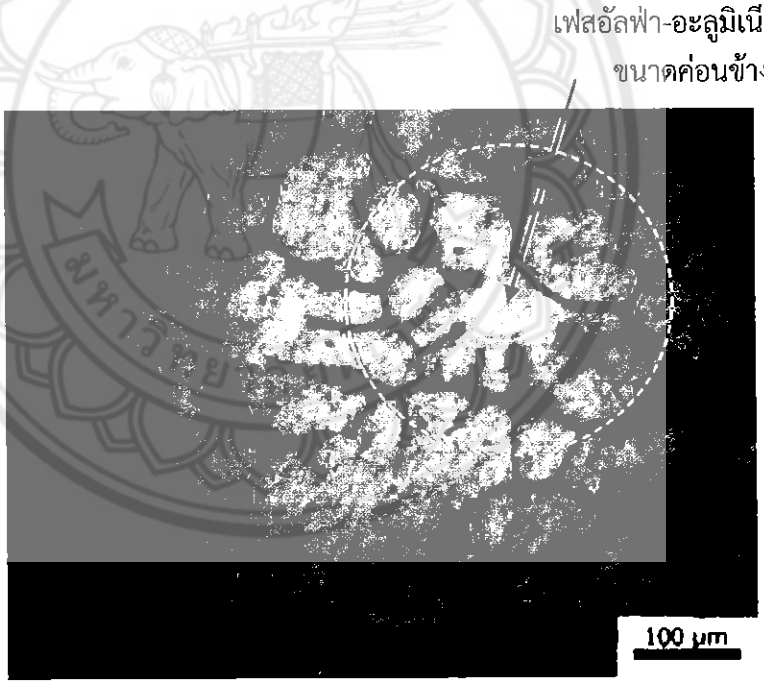
จากการนำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นประกอบด้วยเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีลักษณะเป็นเดนไดร์ท และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีสีดำสลับขาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยพื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ เท่ากับ 5,316-6,978 และ 8,082 ตารางไมครอน ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.8

ที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีลักษณะเป็นเดนไดร์ท ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดในกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้น แสดงดังรูปที่ 4.7 ก) ขณะที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ เริ่มเติบโตเป็นเดนไดร์ทซึ่งมีขนาดค่อนข้างใหญ่ แสดงดังรูปที่ 4.7 ข) ส่วนที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส โครงสร้างของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีลักษณะเป็นเดนไดร์ทขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่เกิดในชิ้นงานหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620 และ 640 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.7 ค) โดยโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้นเมื่อทำการวัดพื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ พบว่าพื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิเทเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.8

เนื่องจากการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิเทต่ำ (620 องศาเซลเซียส) มีช่วงเวลาในการแข็งตัวของอะลูมิเนียมหลอมเหลวในแบบหล่อแคบส่งผลให้เฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ เป็นเดนไดร์ทขนาดเล็ก แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเทอะลูมิเนียมหลอมเหลว อะลูมิเนียมหลอมเหลวจะมีช่วงเวลาในการแข็งตัวที่ยาวนานมากขึ้น ส่งผลให้เฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ สามารถเติบโตเป็นเดนไดร์ทขนาดใหญ่ จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นนี้สัมพันธ์กับช่วงเวลาในการแข็งตัวของอะลูมิเนียมหลอมเหลว

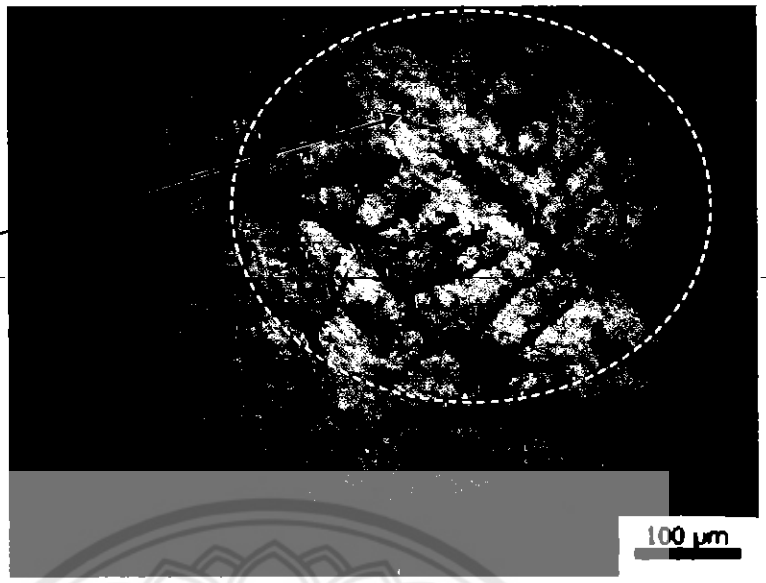


ก)



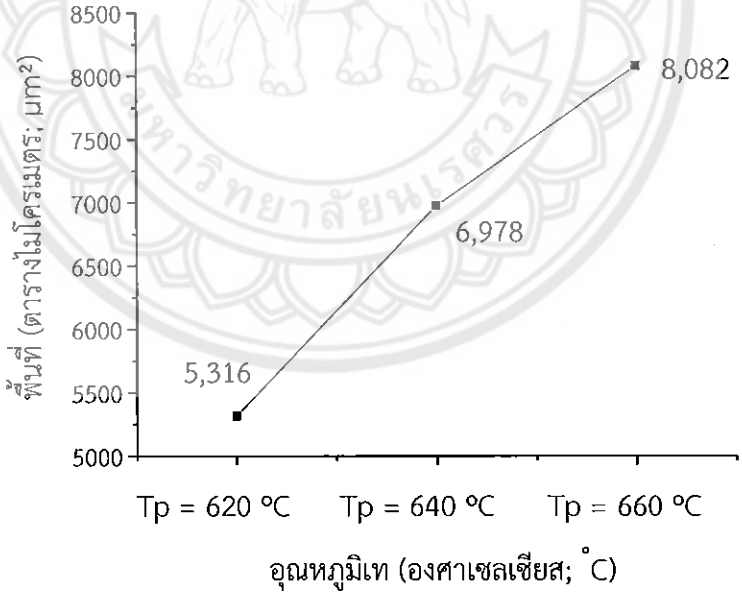
ข)

รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคในแบบหล่อทรายชื้น
ก) อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส
ข) อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส



ค)

รูปที่ 4.7 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคในแบบหล่อทรายชื้น
ค) อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส



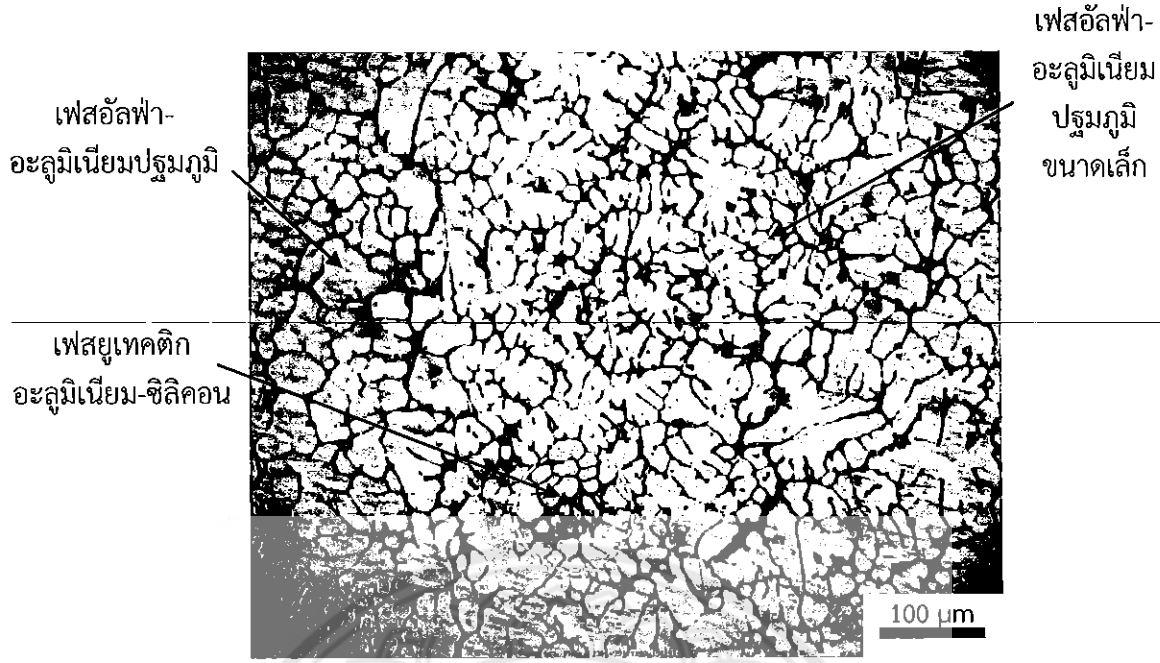
รูปที่ 4.8 พื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ในแบบหล่อทรายชื้น
ที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็กที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

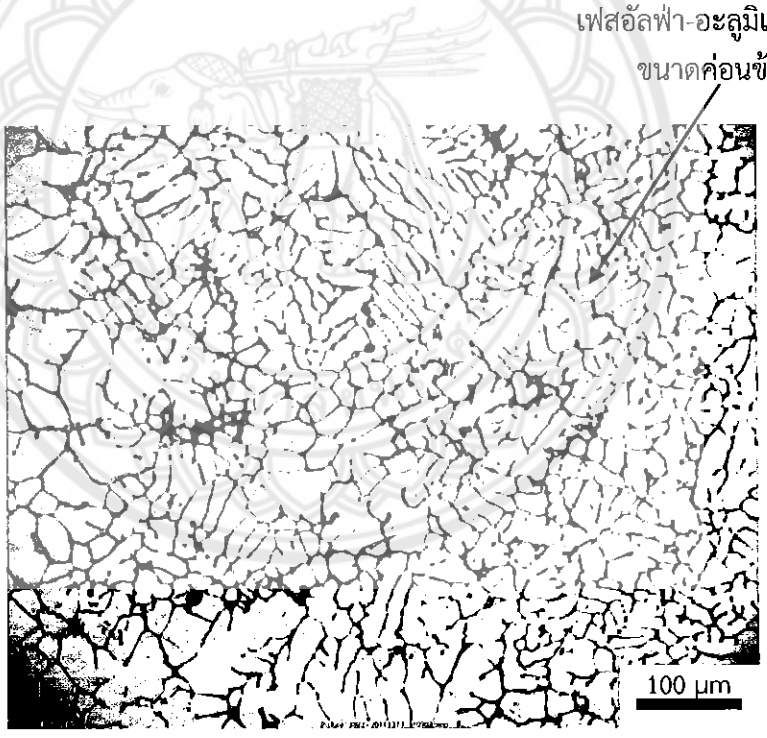
จากการนำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นประกอบด้วยเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีลักษณะเป็นเดนไดร์ท และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีสีดำสลับขาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.9 โดยพื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ เท่ากับ 852-957 และ 1,321 ตารางไมครอน ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.10

ที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีลักษณะเป็นเดนไดร์ท ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดในกระบวนการหล่อในแบบหล่อถาวร แสดงดังรูปที่ 4.9 ก) ในขณะที่อุณหภูมิเท 640 และ 660 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ เติบโตเป็นเดนไดร์ทซึ่งมีขนาดค่อนข้างใหญ่ขึ้นตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส เดนไดร์ทจะมีขนาดใหญ่ที่สุดในกระบวนการหล่อในแบบหล่อถาวร แสดงดังรูปที่ 4.9 ข) และ ค) ตามลำดับ ผลที่ได้จากการวัดพื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส พื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีขนาดพื้นที่เล็กที่สุด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็น 640 และ 660 องศาเซลเซียส พื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนั้นพื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีแนวโน้มขนาดใหญ่ขึ้น เมื่ออุณหภูมิเทเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.10

เนื่องจากการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิเทต่ำ (620 องศาเซลเซียส) มีช่วงเวลาในการแข็งตัวของอะลูมิเนียมหลอมเหลวในแบบหล่อแคบส่งผลให้เฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ เป็นเดนไดร์ทขนาดเล็ก แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิเทอะลูมิเนียมหลอมเหลว อะลูมิเนียมหลอมเหลวจะมีช่วงเวลาในการแข็งตัวที่ยาวนานมากขึ้น ส่งผลให้เฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ สามารถเติบโตเป็นเดนไดร์ทขนาดใหญ่ จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นนี้สัมพันธ์กับช่วงเวลาในการแข็งตัวของอะลูมิเนียมหลอมเหลว

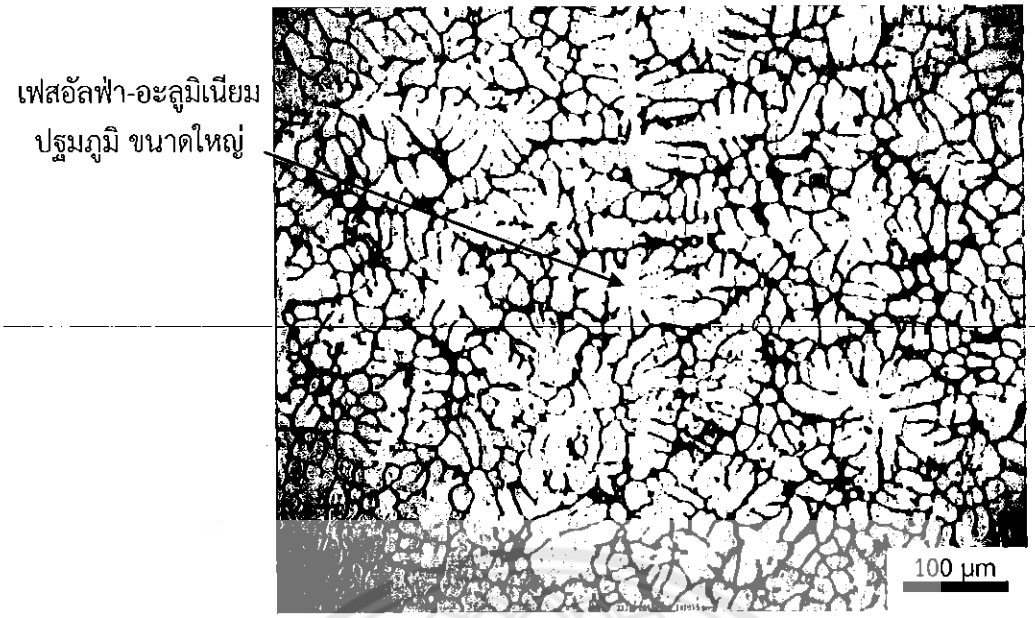


ก)



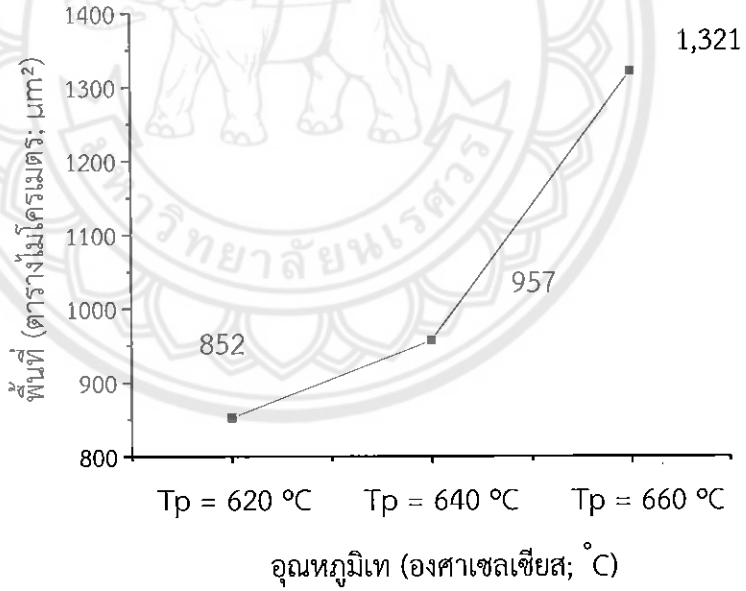
ข)

รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคในแบบหล่อถาวร
ก) อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส
ข) อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส



ค)

รูปที่ 4.9 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคในแบบหล่อถาวร
ค) อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

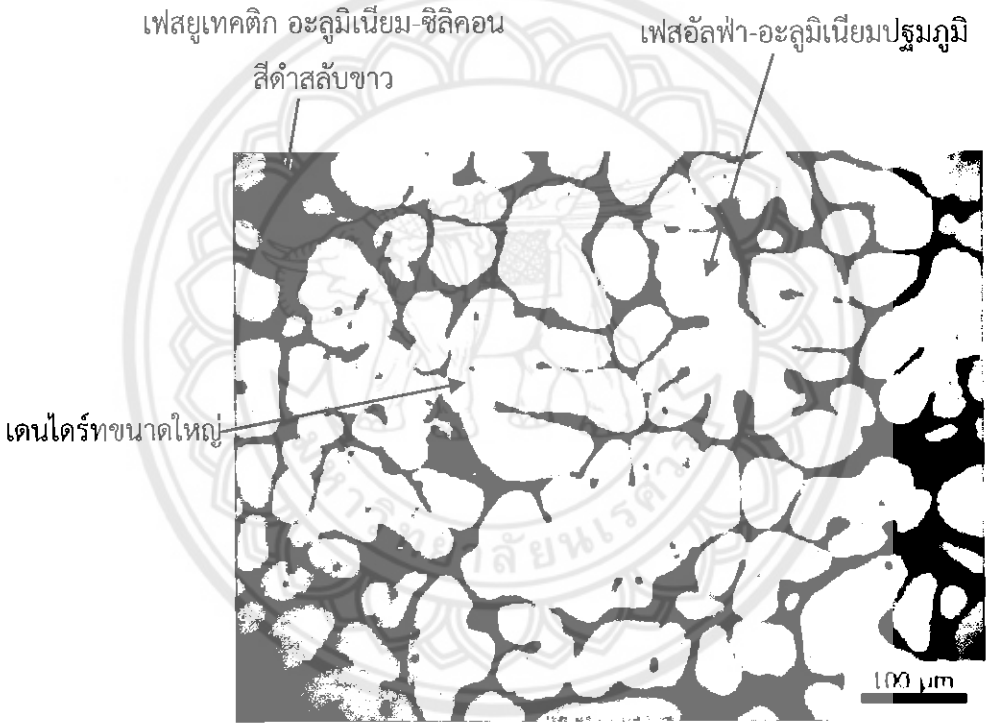


รูปที่ 4.10 พื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ในแบบหล่อถาวร
ที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็กที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร

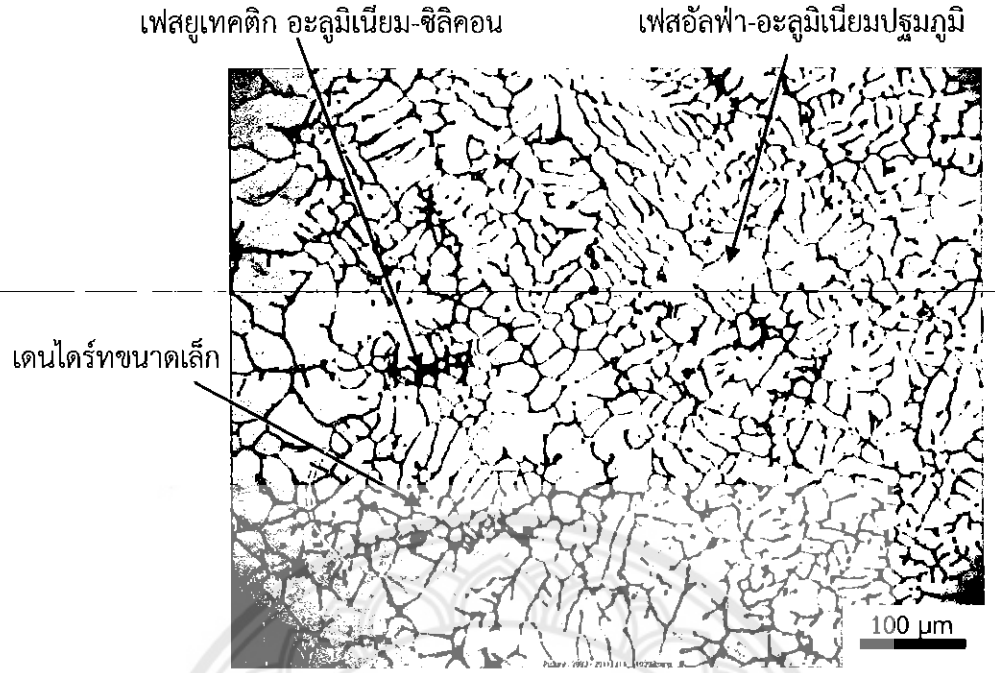
จากการนำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็กที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวรโดยใช้อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างจุลภาคของการหล่อโลหะทั้งสองกระบวนการ ประกอบด้วยเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีลักษณะเป็นเดนไดร์ท และเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีสีดำสลับขาว แทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ

การหล่อโดยใช้กระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้น พบเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีลักษณะเป็นเดนไดร์ทขนาดใหญ่ และหยาบ แสดงดังรูปที่ 4.11 ก) ส่วนการหล่อในแบบหล่อถาวรจะพบเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีลักษณะเป็นเดนไดร์ทขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 4.11 ข)



ก)

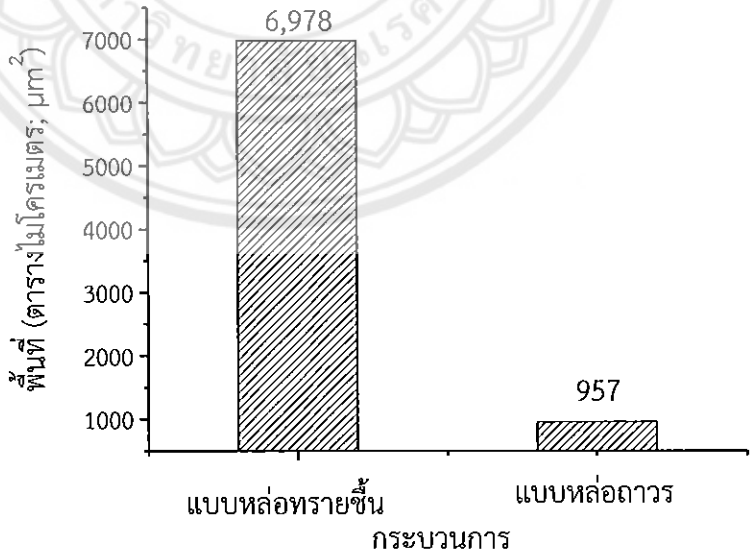
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส
ก) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในแบบหล่อทรายชื้น



ข)

รูปที่ 4.11 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส
ข) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในแบบหล่อถาวร

จากการวัดศึกษาค่าเฉลี่ยพื้นที่ (Area, μm^2) ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ พบว่า พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ในแบบหล่อทรายชื้นมีพื้นที่เท่ากับ 6,978 ตารางไมครอน และในแบบหล่อถาวรมีพื้นที่เท่ากับ 957 ตารางไมครอน แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 พื้นที่เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ในแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร

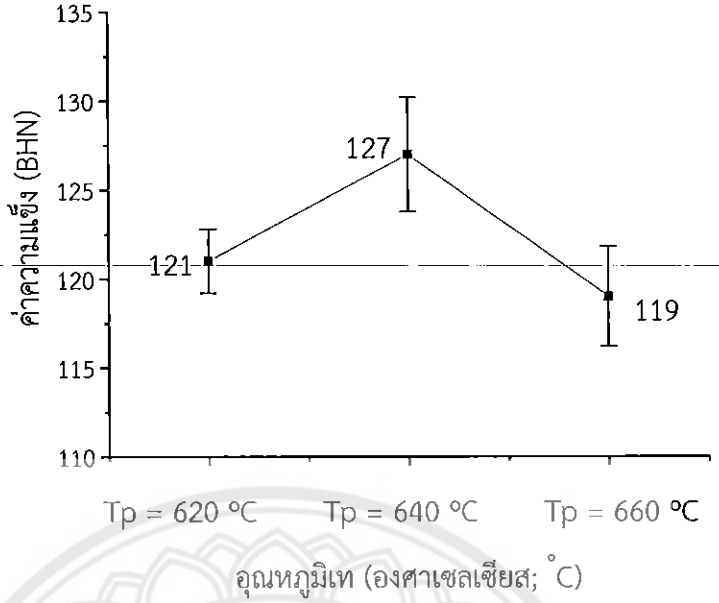
ดังนั้นชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้นมีเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิขนาดใหญ่ และหยาบกว่าในแบบหล่อถาวร แสดงดังรูปที่ 4.11 เนื่องจากแบบหล่อทรายชื้นมีอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวภายในแบบหล่อช้า นิวเคลียสจึงเกิดขึ้นน้อย ส่งผลให้มีพื้นที่ในการเติบโตของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมาก ดังนั้นเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่ ในขณะที่แบบหล่อถาวรมีอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวภายในแบบหล่อเร็ว นิวเคลียสจึงเกิดขึ้นมาก ส่งผลให้มีพื้นที่ในการเติบโตของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิน้อย ดังนั้นเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดเล็ก (พิมพลักษณ์, 2533)

4.3 ความแข็ง

4.3.1 เปรียบเทียบความแข็งของอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็กที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

จากการนำชิ้นงานมาทดสอบความแข็งโดยการทดสอบความแข็งแบบบริเนล พบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส มีความแข็งเฉลี่ยคือ 121 BHN, 127 BHN และ 119 BHN ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.13 เนื่องจากค่าความแข็งมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ โดยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส แสดงดังภาคผนวก ข จากผลการวัดพื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิเทสูงจะมีโครงสร้างเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ขนาดใหญ่ ส่งผลให้ชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิเทสูงมีค่าความแข็งต่ำกว่าชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิเทต่ำ ดังนั้นชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส จึงมีค่าความแข็งต่ำที่สุด

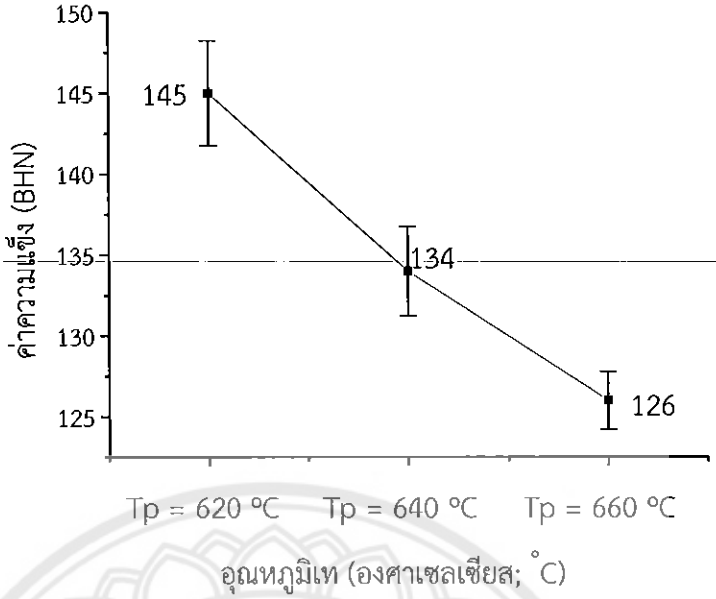
เนื่องจากที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส มีขนาดของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิเล็กสุดในแบบหล่อทรายชื้น แสดงดังรูปที่ 4.8 แต่ค่าความแข็งที่ได้กลับมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลมาจากการพบรูพรุนเกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส โดยรูพรุนที่พบในชิ้นงานส่งผลต่อความแข็งของชิ้นงาน เมื่อรูพรุนที่พบมีมากความแข็งของชิ้นงานจะลดต่ำลง หากรูพรุนที่พบมีน้อยความแข็งของชิ้นงานก็จะอยู่ในระดับสูงขึ้น



รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น ที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

4.3.2 เปรียบเทียบความแข็งของอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็กที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

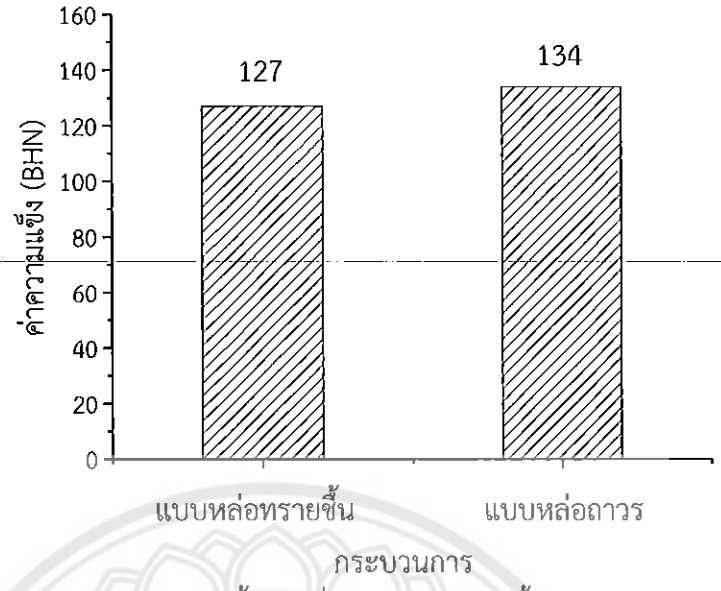
จากการนำชิ้นงานมาทดสอบความแข็งโดยการทดสอบความแข็งแบบบริเนล พบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส มีความแข็งเฉลี่ยคือ 145 BHN, 134 BHN และ 126 BHN ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.14 เนื่องจากค่าความแข็งมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ โดยชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส แสดงดังภาคผนวก ข จากผลการวัดพื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิเทสูงจะมีโครงสร้างเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ขนาดใหญ่ ส่งผลให้ชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิเทสูงมีค่าความแข็งต่ำกว่าชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิเทต่ำ ดังนั้นชิ้นงานหล่อที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส จึงมีค่าความแข็งต่ำที่สุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งสูงที่สุด



รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อด้วย**แบบหล่อถาวร** ที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

4.3.3 เปรียบเทียบความแข็งของอะลูมิเนียมผสมจากล้อแม็กที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายขึ้น และแบบหล่อถาวร

จากการนำชิ้นงานมาทดสอบความแข็งโดยการทดสอบความแข็ง**แบบบริเนล พบว่าชิ้นงานที่**ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายขึ้นมีความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 127 BHN และ**ชิ้นงานที่**ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อถาวร มีความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 134 BHN **แสดงดังรูปที่** 4.15 **จะสังเกตได้ว่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายขึ้นมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานหล่อในแบบหล่อถาวร** เนื่องจากค่าความแข็งมีความสัมพันธ์กับโครง**สร้างจุลภาคของเฟสอัลฟ่า**-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จากผลการวัดพื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ **พบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบ**วนการหล่อในแบบหล่อทรายขึ้น มีพื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ **ขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานหล่อ**ในแบบหล่อถาวร โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อ**ในแบบหล่อทรายขึ้น และแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท** 640 องศาเซลเซียส แสดงดังภาคผนวก ก **ดังนั้นชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายขึ้นจึงมีค่าความแข็งต่ำกว่าชิ้นงานหล่อในแบบหล่อถาวร**



รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยแบบ**หล่อทรายชื้น** และแบบหล่อถาวร ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส

บทที่ 5
บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปผลโครงงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขปัญหา ของโครงงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 บทสรุป

5.1.1 ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อในแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร เมื่อทำการตรวจสอบรูพรุน พบว่าชิ้นงานหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส พบรูพรุนเกิดขึ้นในชิ้นงาน เนื่องจากแบบหล่อทรายชื้นมีน้ำเป็นส่วนผสม และที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส มีช่วงเวลาในการแข็งตัวที่แคบ ส่งผลให้การหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งต่ำลง

5.1.2 ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเทต่างกัน โครงสร้างจุลภาคของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างขนาดเล็กที่สุด แต่เนื่องจากพบรูพรุนเกิดขึ้นในชิ้นงาน จึงส่งผลให้ความแข็งมีค่าต่ำลง เมื่อเทียบกับการหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ซึ่งความแข็งมีค่ามากที่สุดในแบบหล่อทรายชื้น

5.1.3 ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อในแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเทต่างกัน โครงสร้างจุลภาคของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างขนาดเล็กที่สุด ส่งผลให้ความแข็งมีค่ามากที่สุดในแบบหล่อถาวร

5.1.4 ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อในแบบหล่อทรายชื้น และการหล่อในแบบหล่อถาวร โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยชิ้นงานที่ผ่านการหล่อในแบบหล่อทรายชื้นเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีโครงสร้างขนาดใหญ่จึงส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานมีค่าต่ำ แต่การหล่อในแบบหล่อถาวรเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีโครงสร้างขนาดเล็กจึงส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 ศึกษาเทคนิคในการหล่อโลหะในแบบหล่อทรายชื้น เพื่อลด และกำจัดรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานในกระบวนการหล่ออะลูมิเนียมผสมซิลิคอน เกรด A356 ที่อุณหภูมิเทต่ำต่อไปได้

5.2.2 การหล่อโลหะในแบบหล่อถาวร สามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการหล่อแบบอื่นๆ เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล โดยการหล่อโดยใช้แรงดัน และหล่อแบบกึ่งแข็งก่อน เป็นต้น

5.2.3 การทดลองที่วิเคราะห์ผลของอุณหภูมิเทเป็นสำคัญ ควรใช้เทอร์โมคอบเปิลที่มีความเที่ยงตรงในการวัดอุณหภูมิน้ำโลหะ

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 ขณะดึงกระสวนในแบบหล่อทรายออก พบว่ามีทรายติดอยู่บนกระสวน ซึ่งส่งผลให้ผิวในแบบหล่อทรายไม่เรียบ ดังนั้นควรทากระสวนด้วยผงแกรไฟต์ เพื่อช่วยลดการติดของทรายบนกระสวน

5.3.2 ควรทาแบบหล่อถาวรด้วยผงแกรไฟต์ก่อนทำการประกอบแบบหล่อ เพื่อช่วยให้ผิวของชิ้นงานหล่อเรียบ

5.3.3 เนื่องจากในการปฏิบัติงานมีโอกาสเกิดอันตรายจากอุณหภูมิสูง จึงควรสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันความร้อน เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายขณะปฏิบัติงาน

5.2.4 การตัดชิ้นงานทดสอบควรใช้เครื่องมือตัดที่ทำให้เกิดความร้อนต่ำๆ เพื่อไม่ให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสอบเปลี่ยนแปลงไป

5.3.5 เนื่องจากการวัดความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบร็อคเวล สเกลบี พบว่าค่าความแข็งที่ได้มีค่าไม่สอดคล้องกับค่ามาตรฐาน จึงเปลี่ยนมาใช้การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล

5.3.6 การวัดความแข็งแบบบริเนลควรตรวจสอบหัวกด และการวางชิ้นงานทดสอบ เพื่อให้ค่าความแข็งมีความถูกต้อง และแม่นยำ

เอกสารอ้างอิง

ชวลิต เชียงกูล. (2542). **โลหะวิทยา.** กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร. (2551). **ความแตกต่างระหว่างรูพรุนที่เกิดจากก๊าซและจากการหดตัวในงานหล่ออะลูมิเนียม.** สืบค้นเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2554, จาก http://www.cemct.net/web/images/stories//alsi006.pdf

เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร. (2551). **โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ.** สืบค้นเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2554, จาก http://www.cemct.net/web/images/stories//alsi001.pdf

เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร. (2551). **หลักการเพื่อความปลอดภัยในการหลอมโลหะอะลูมิเนียม.** สืบค้นเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2554, จาก http://www.cemct.net/web/images/stories//alsi002.pdf

จงกล รัตสุข. (2525). **โลหะวิทยาเบื้องต้น และวัสดุวิศวกรรม.** กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ฐาปนีย์ อุดมผล. (2551). **การทดสอบความแข็ง (Hardness Test).** สืบค้นเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ.2554, จาก http://www.rmutphysics.com/charud/PDF- learning/2learning/2//.../1Material_Properties.pdf

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2553). **กรรมวิธีการผลิตโลหะ.** สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กันยายน พ.ศ.2554, จาก http://www.mme.rmuti.ac.th/index.php?option=com...view...3&id...

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2553). **วัสดุวิศวกรรม.** กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น.

เทพนารินทร์ ประพันธ์พัฒน์. (2545). **พื้นฐานงานหล่อ.** สืบค้นเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ.2554, จาก http://www.lib.tl.ac.th/ulib/dublin.php?ID=13399107860

บรรเจิด แสงจันทร์. (2541). **การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของทรายทำแบบหล่อจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย.** วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.

พรวสา วงศ์ปัญญา. (2551). **การแข็งตัวของโลหะ.** กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พัชรา น้อยนคร และวงษ์ศักดิ์ ศรีสวัสดิ์. (2553). **การปรับปรุงกระบวนการหล่อแบบทรายขึ้นในขึ้นงานอะลูมิเนียมบริสุทธิ์.** ปริญญานิพนธ์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

เพชรลัดดา เรืองแก้ว และคณะ. (2553). **การหล่อโลหะกึ่งแข็งแบบรางเทหล่อเย็นแบบเอียงสำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด AA7075,** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร.

แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. (2552). **วัสดุวิศวกรรม.** กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล.

มนัส สถิรจินดา. (2543). **โลหะนอกกลุ่มเหล็ก.** กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิหาร ดีปัญญา. (2548). **วิศวกรรมการหล่อโลหะ.** กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

สุทธาวัลย์ อิ่มอุไร และคณะ. (2550). **โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ A356.** มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

สุชาดา จูอนุวัฒนกุล. (2543). **Instruments for Optical Spectroscopy.** สืบค้นเมื่อวันที่ 18 สิงหาคม พ.ศ.2554, จาก http://nvl.nist.gov/pub/nistpubs/jres/100/4/j14rob.pdf

หริส สูตะบุตร และเคนยิ จิยิอิวา. (2533). **หล่อโลหะ.** กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ดวงกมล.

อนิรุทธิ์ สายเสียง. (2545). **การศึกษาแนวโน้มของการแตกร้าวขณะร้อนของงานหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A356 ในแบบหล่อถาวร.** วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.

อนิรุทธ์ ลีสกุล, อำนาจ พยัคฆ์ และรัฐพงศ์ เจริญเนตร. (2553). **โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม-เหล็ก ในกระบวนการรีไซเคิล.** ปริญญานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร.

อรจิรา เดี่ยววณิชย์. (2543). **ผลของคอปเปอร์ฟอสไฟด์ที่มีต่อการแข็งตัวและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ขนิดไฮโปรยูเทคติก.** สืบค้นเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ.2554, จาก http://www.researchgate.net › Publications

อรอุมา กอสนาน. **การทดสอบความแข็ง (Hardness Test).** สืบค้นเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ.2554, จาก http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/ELTC2103/chaptor/.../hardness.do...

อุทัย ไทยเจริญ. (2551). **หลักการทำงานของเครื่อง Optical Emission Spectrometer.** สืบค้นเมื่อวันที่ 23 สิงหาคม พ.ศ.2554, จาก http://share.psu.ac.th/blog/utai1/9842

A. Kearney. 2006. **Aluminum Foundry Products.** Avery Kearney & Company Elwin L. Rooy, Aluminum Company, America

Bastien, P., Chiesa, F., Gomas, J.I., Pacheco, J. and Zegarra, T. 1993. **Evaluation of Bentonite Consumption in a Recirculating System Sand.** AFS Transaction, Vol. 101

Beuthin, L. and Thomas, F.M., 1994. **Cost-effective use of Two-screen Silica Sands to Maintain Green Sand Molding Systems.** AFS Transaction, Vol. 102

Davis, J.R., et al. 1993. **Aluminum and Aluminum Alloy.** ASM International, Materials Park Ohio.

Hong Min Guo, et al. 2009. **Materials Science Forum.** Search 23 August 2011, From. www.scientific.net/MSF.628-629.477

Kaiser Centern. 1997. **Aluminum Process.** 2th ed., Kaiser Aluminum&Chemical Sales Inc.

Limmaneevichitr, C., Saising, A. and Chanpum, S. 2002. **The role of grain refinement on hot crack susceptibility of aluminium alloy permanent mold casting.** In The 65th World Foundry Congress

Minkoft, I., 1986. **Solidification and Cast Structure.** John Wiley & Sons Inc., Britain

Odom, I.E. and Anderson, T.M., 1988. **Function Properties of Na and Ca Bentonite In Green Sand System.** AFS Transaction, Vol.96

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

OYA, S., Fujii, T.,Ohtaki, M. and Baba,S., 1984. **Solidification Structure and Hot - Tearing Tendency of Al-4.4%Cu and Al-4.5%Cu-5%Si Alloys Containing Various Additives.** Journal of Japan Institute Light Metal, Vol.34

R. Cornell. And Bhadeshia. 1999. **Aluminium-Silicon Casting Alloy.** Science and Engineering of materials.

S. Nafisia, R. Ghomashchib, H. Valia. 1998. **Eutectic nucleation in hypoeutectic Al-Si alloys.** University St. Montreal, QC, Canada

Stefanesc, D.M., 2002. **Science and Engineering of Casting Solidification.** University of Alabama, U.S.A.

Tsai, H.L., Chiang, K.C. and Chen, T.S., 1988. **Movement of Moisture Front and Alloy Solidification in Green Sand Casting.** AFS Transaction, Vol.96

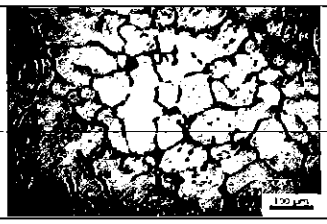
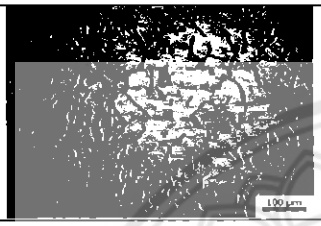
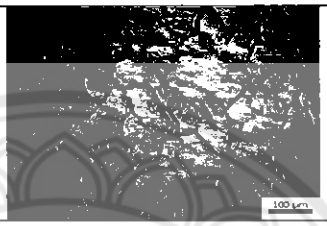
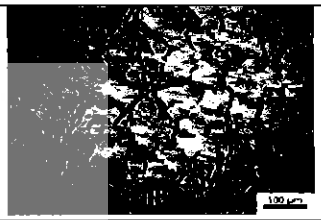
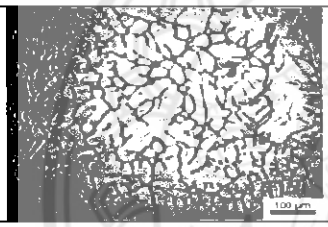
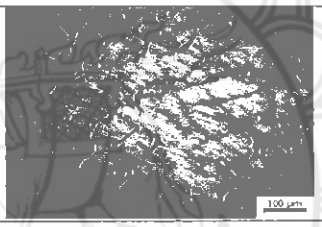
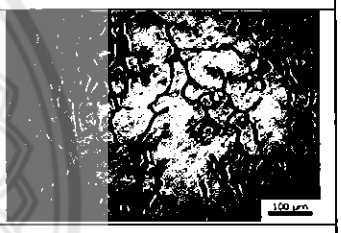
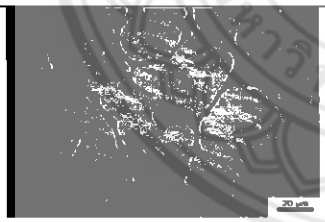
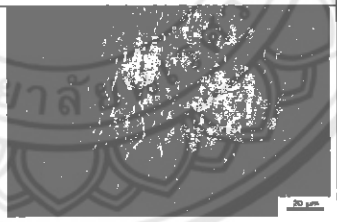
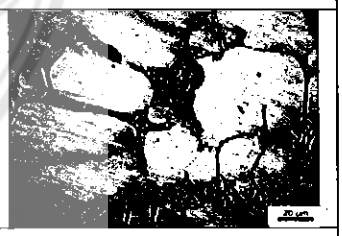
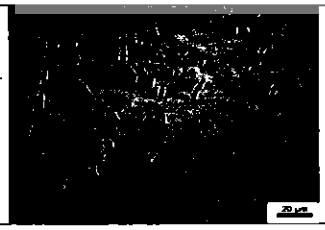
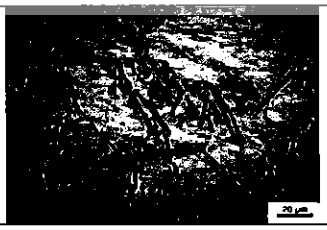
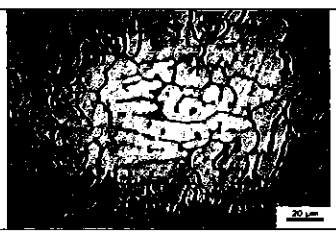
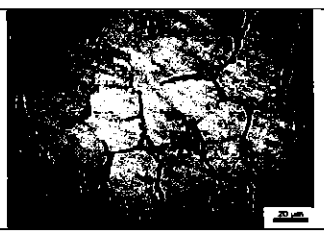
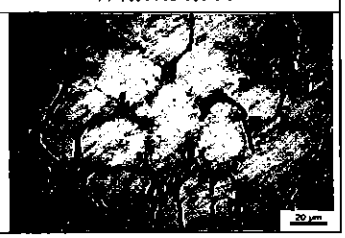
Verhoven, J.D., 1975. **Fundamentals of Physical Metallurgy.** John Wiley & Sons Inc., Canada.

Zalensas, D.L., 1993. **Aluminum Casting Technology.** 2th ed., Aluminum Foundry men's Society Inc., America

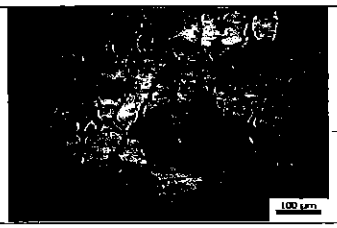
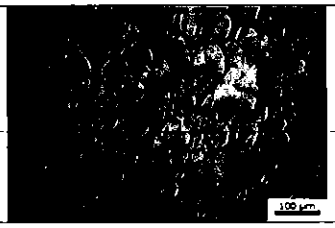
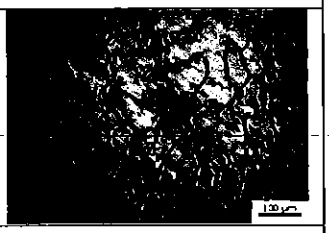
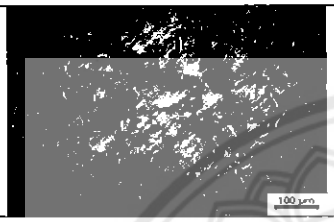
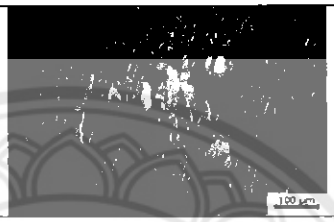
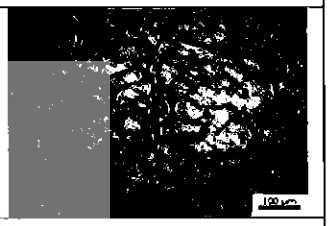
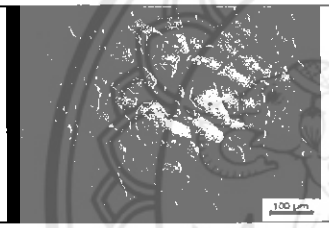
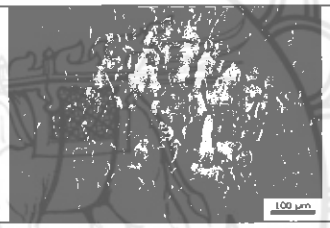
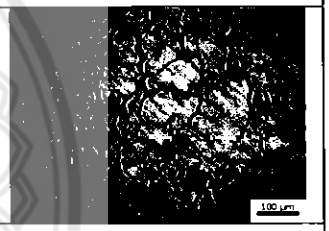
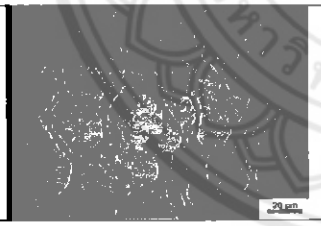
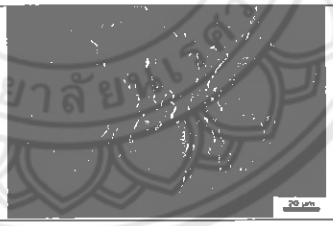
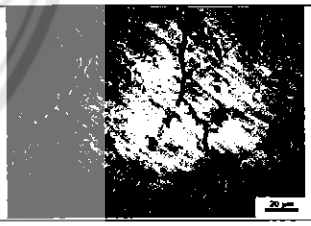
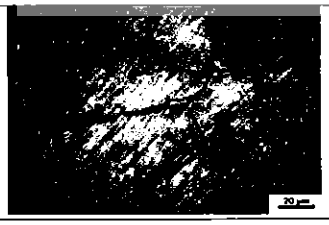
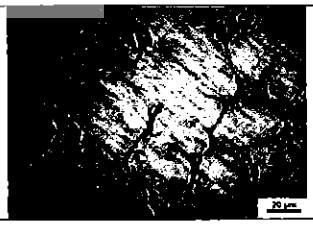
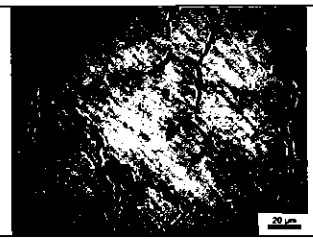
ภาคผนวก ก

โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น และแบบหล่อถาวร

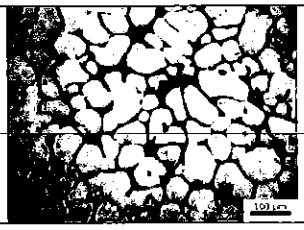
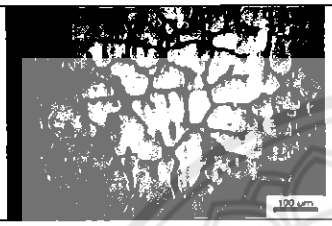
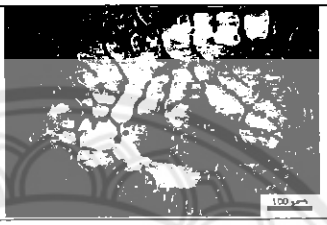
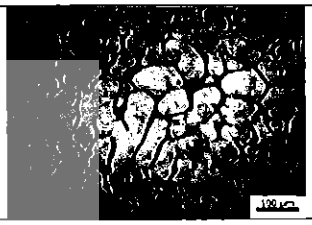
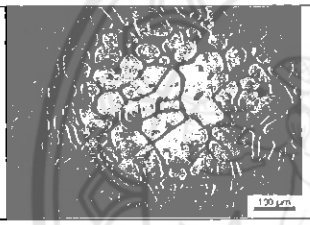
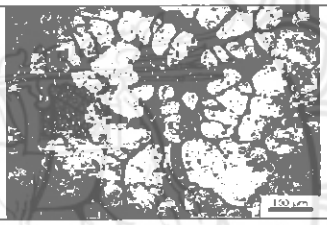
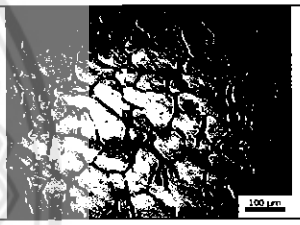
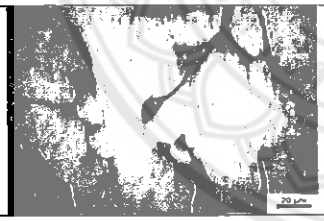
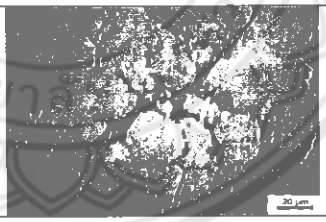
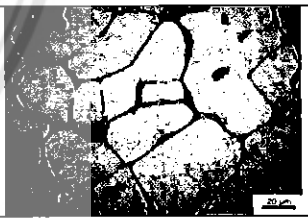
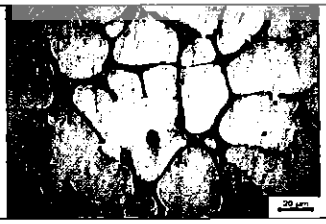
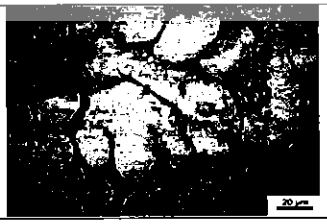
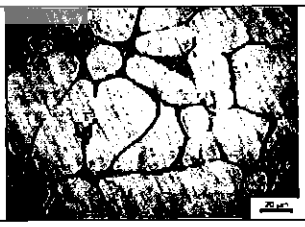
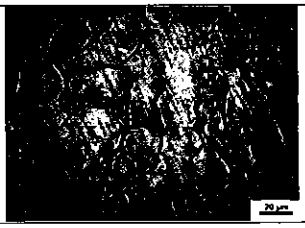
ตารางที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น ที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 1	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

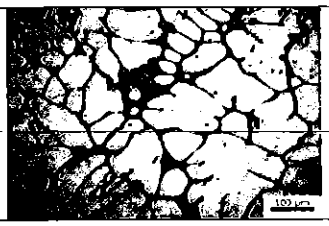
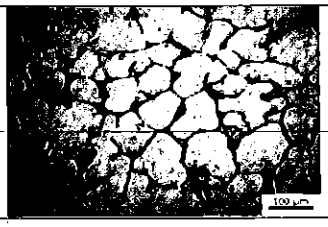
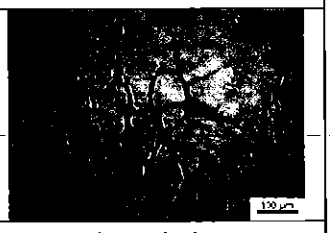
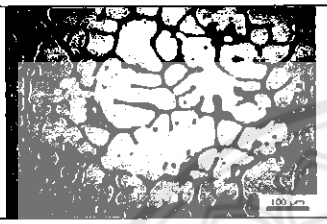
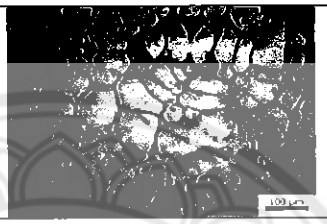
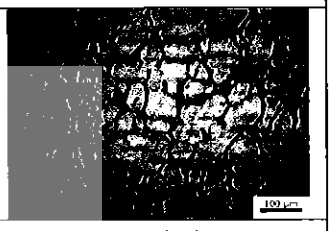
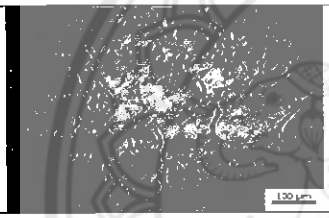
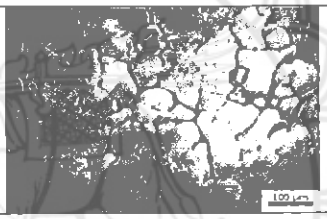
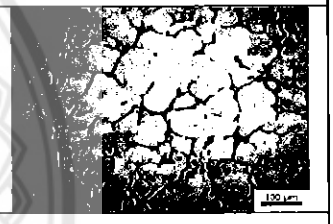
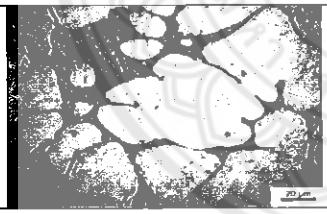
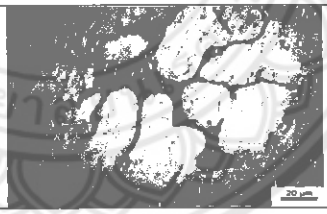
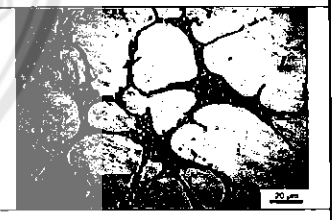
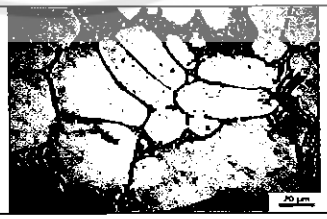
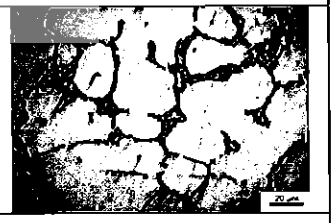
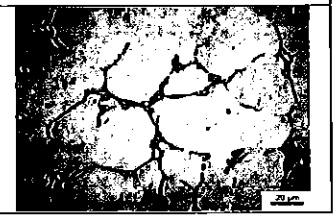
ตารางที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น ที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 2	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

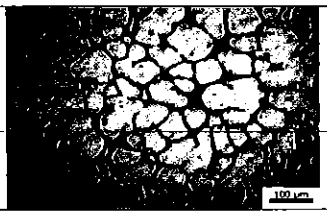
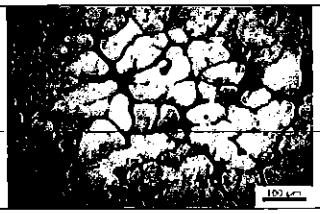
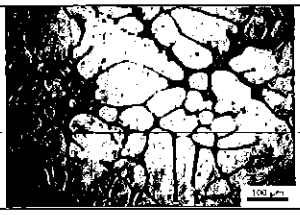
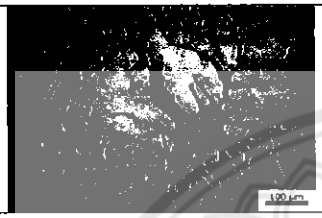
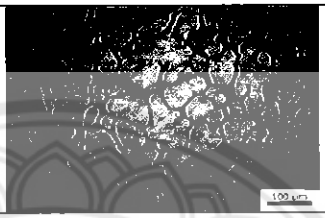
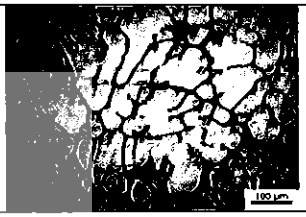
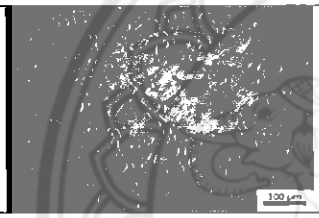
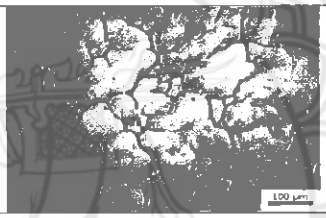
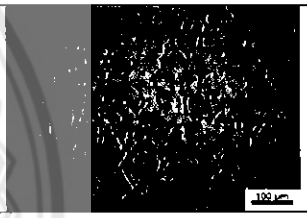
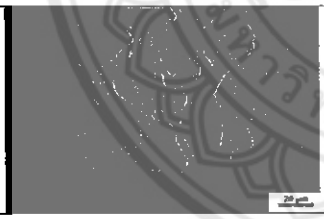
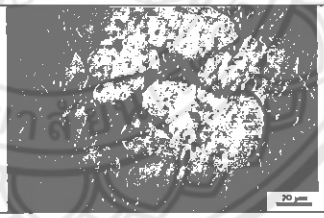
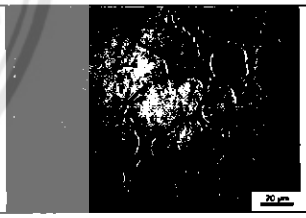
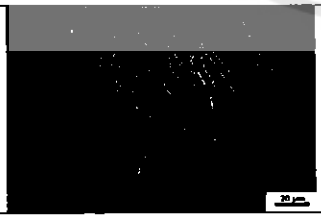
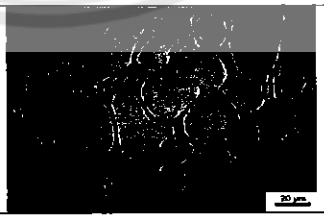
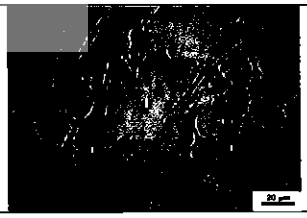
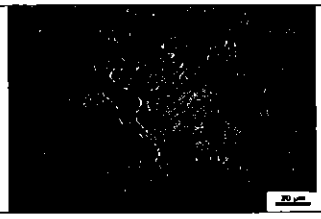
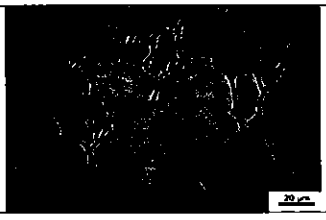
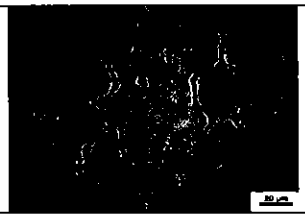
ตารางที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น ที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 3	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

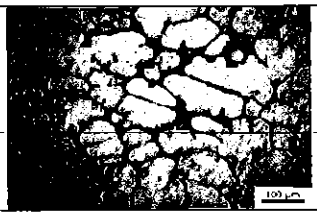
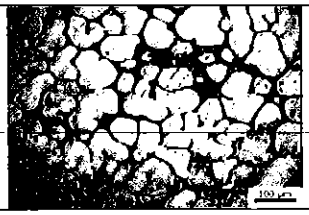
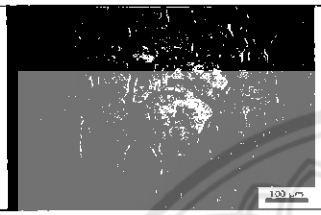
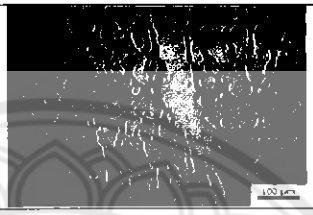
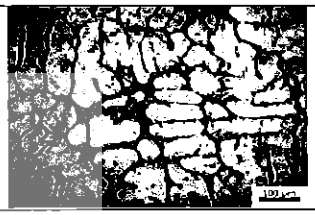
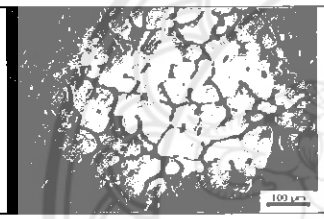
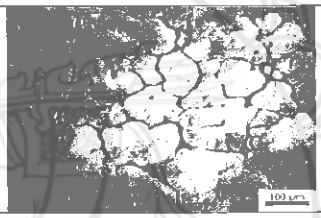
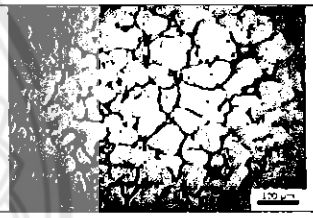
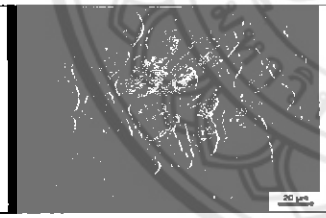
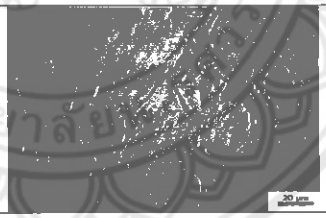
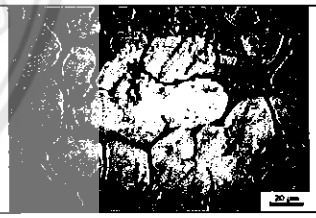
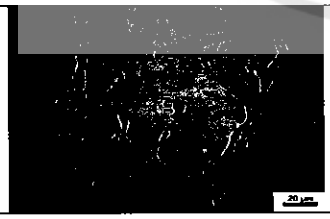
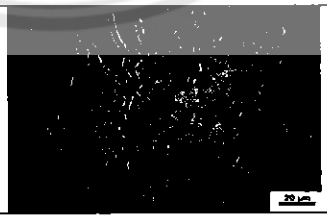
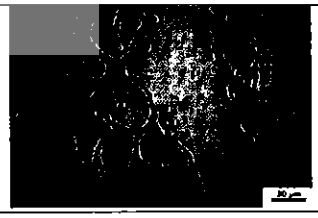
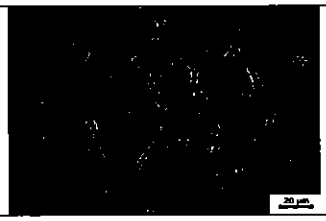
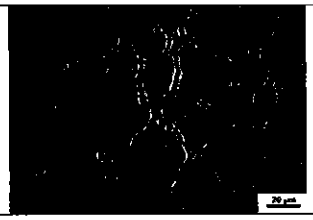
ตารางที่ ก.4 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 1	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

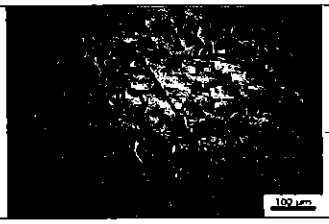
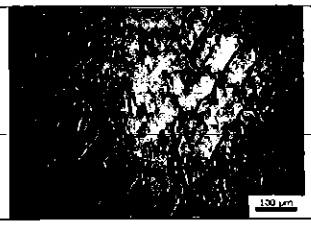
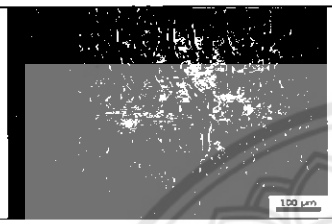
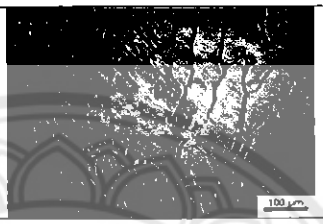
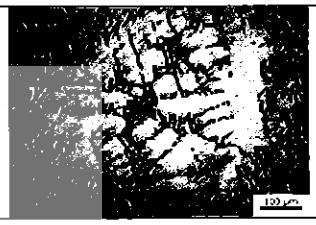
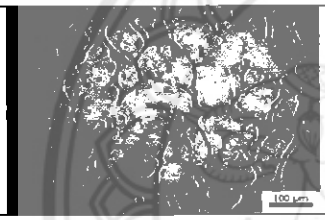
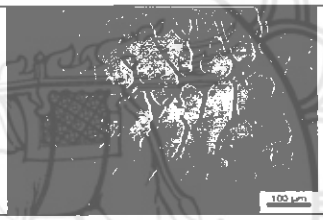
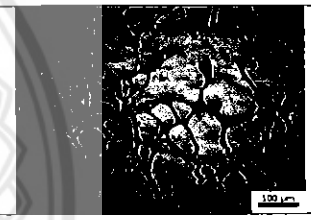
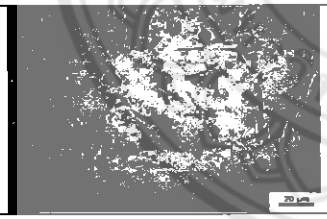
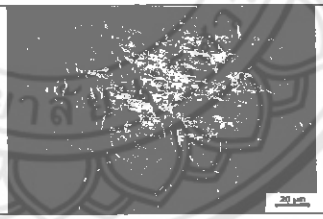
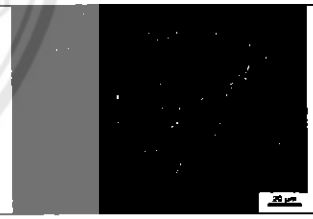
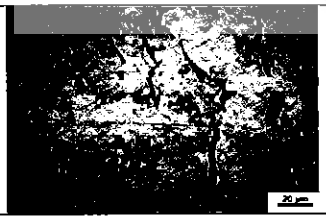
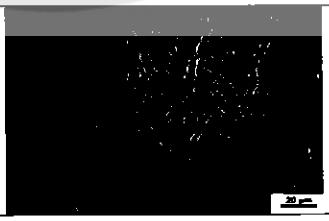
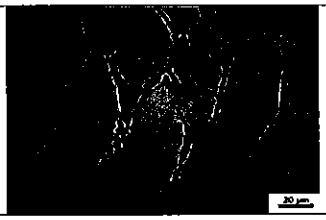
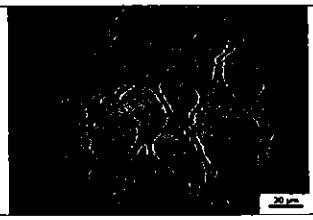
ตารางที่ ก.5 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 2	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

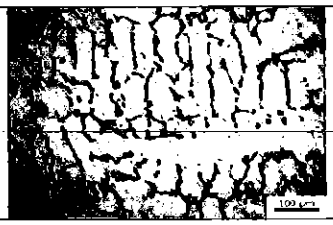
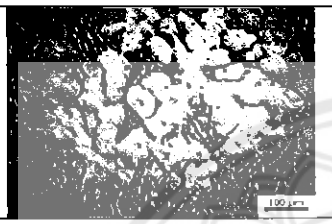
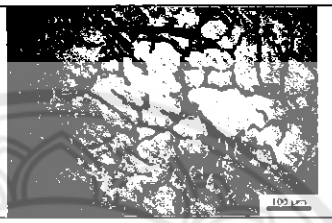
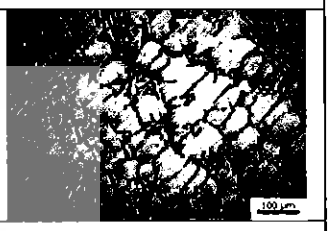
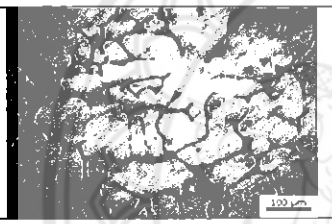
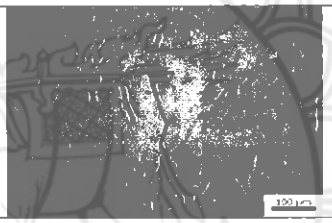
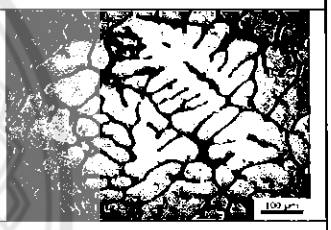
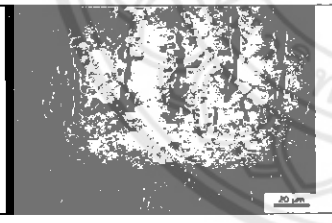
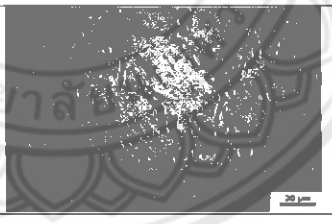
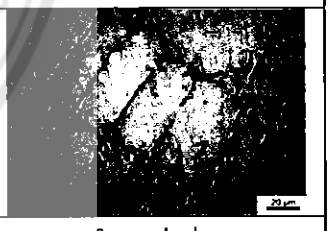
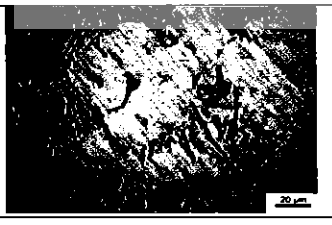
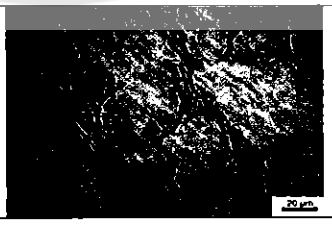
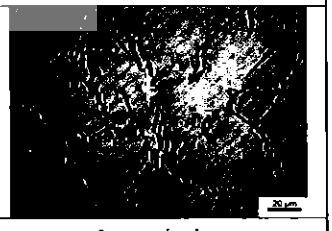
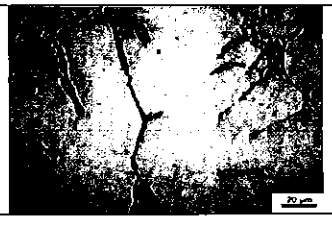
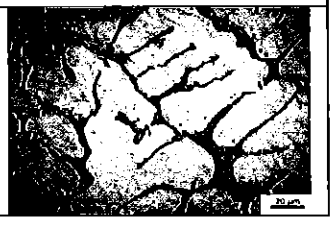
ตารางที่ ก.6 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 3	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

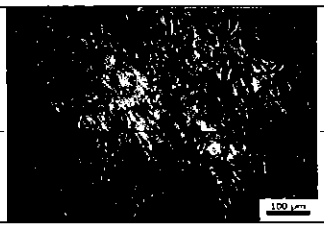
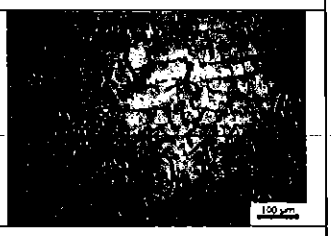
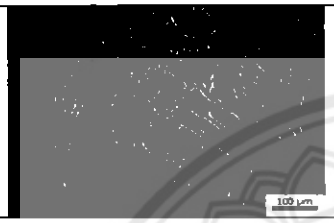
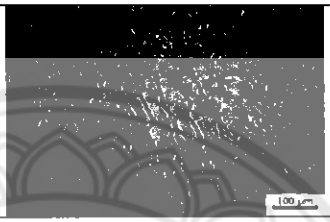
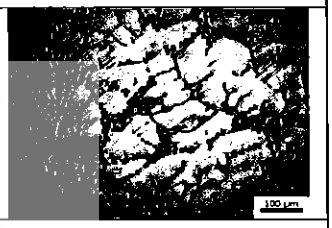
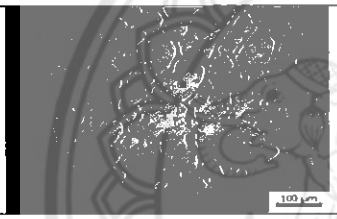
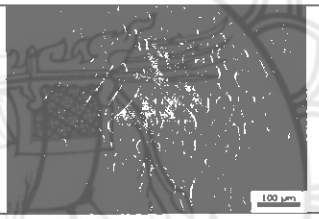
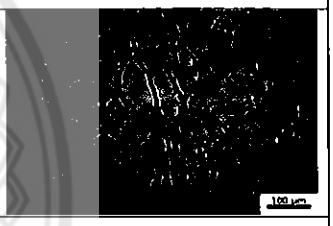
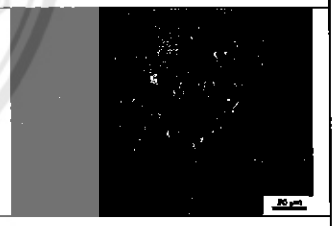
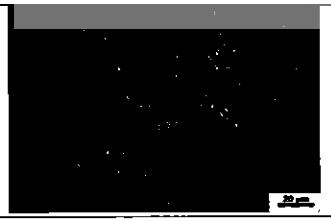
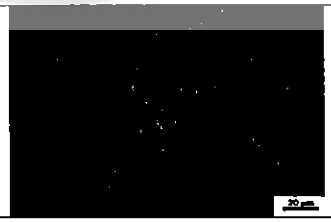
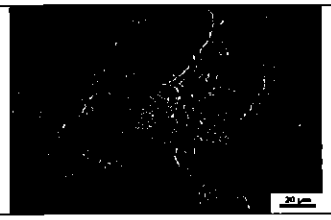
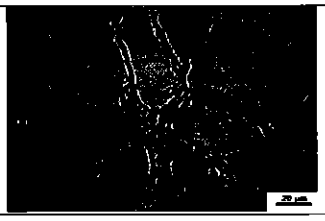
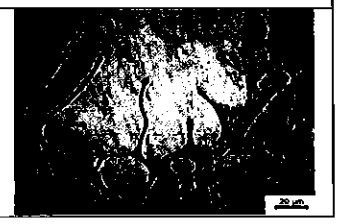
ตารางที่ ก.7 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
ชิ้นที่ 1			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

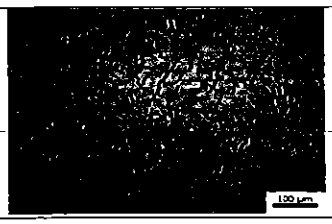
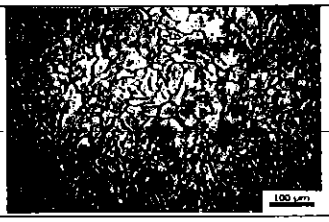
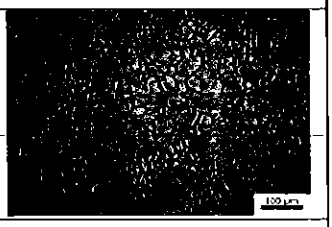
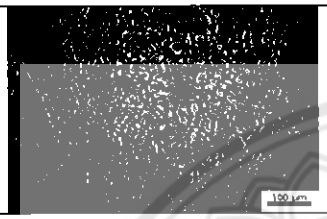
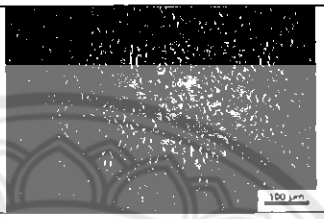
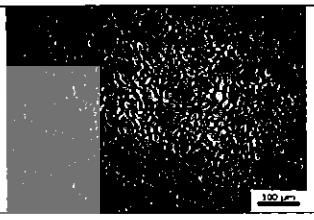
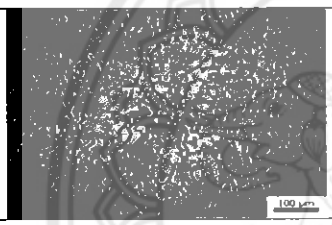
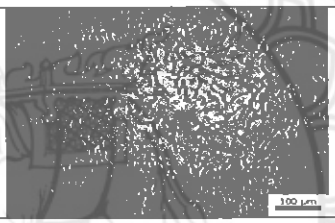
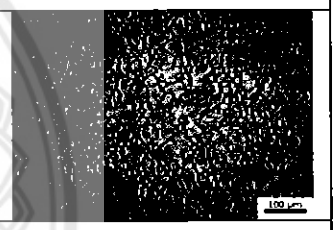
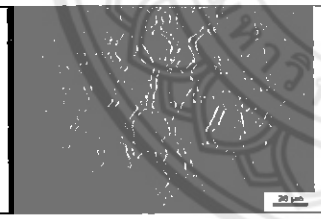
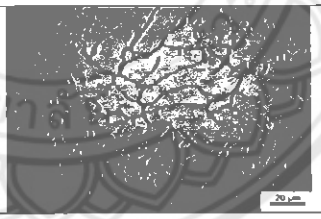
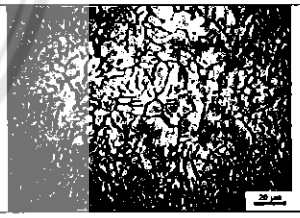
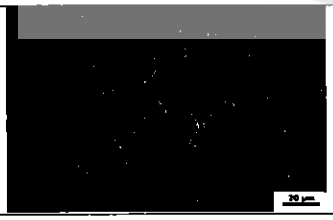
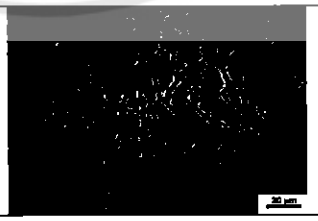
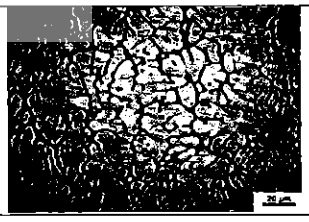
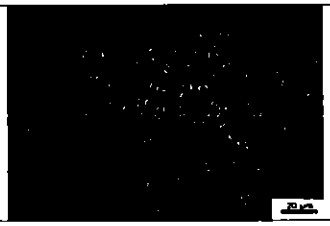
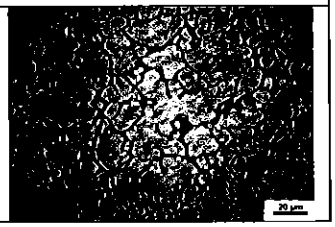
ตารางที่ ก.8 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 2	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

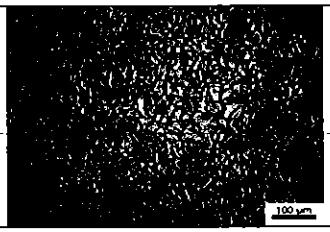
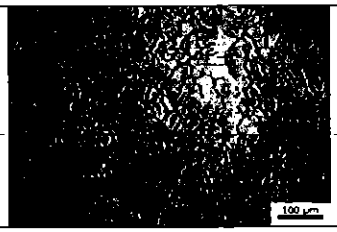
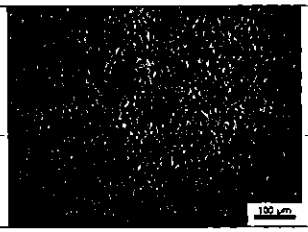
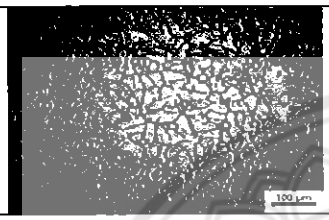
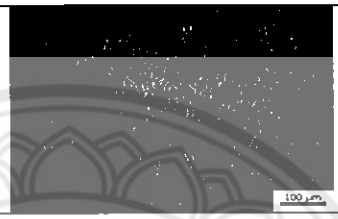
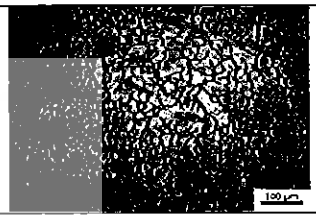
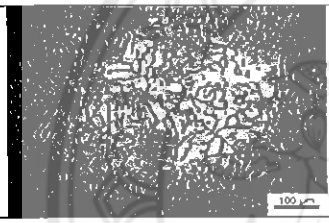
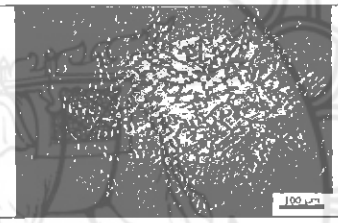
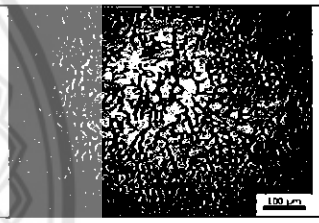
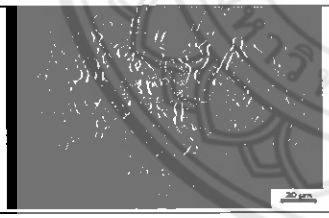
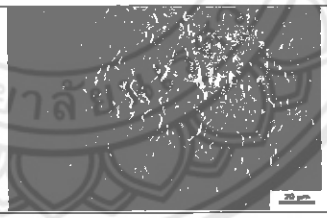
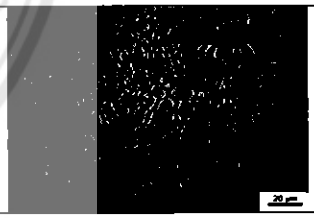
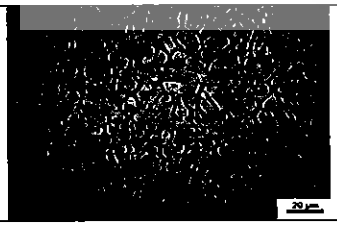
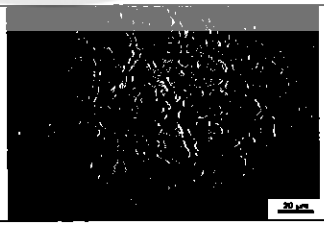
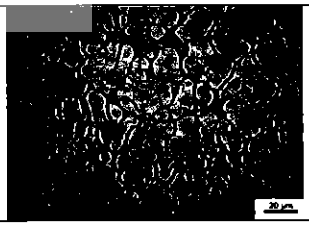
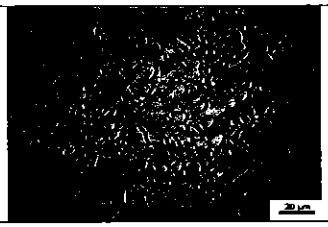
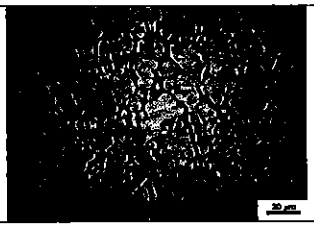
ตารางที่ ก.9 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 3	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

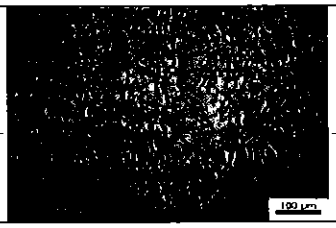
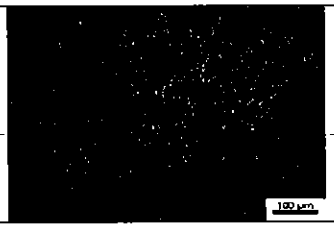
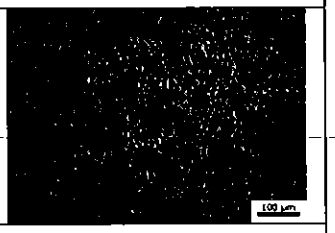
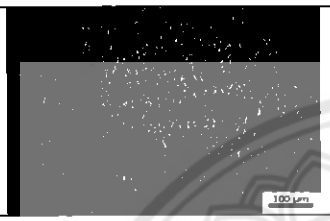
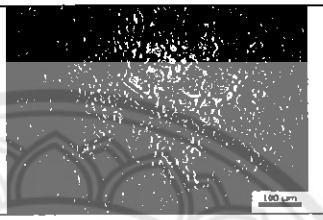
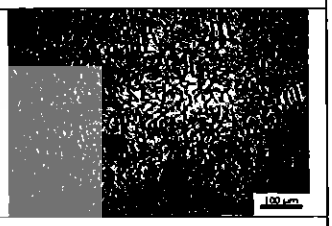
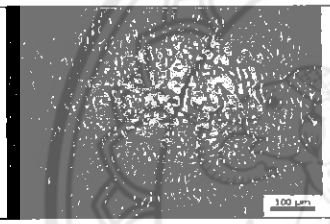
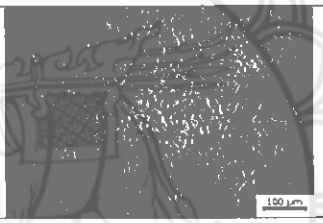
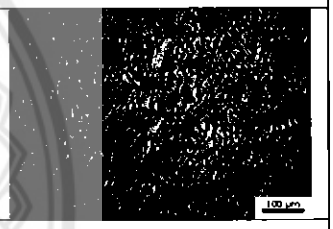
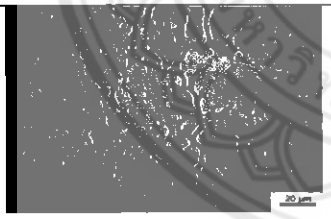
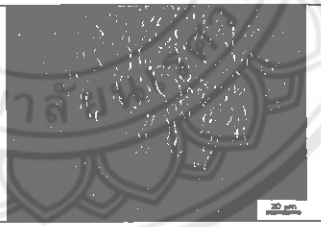
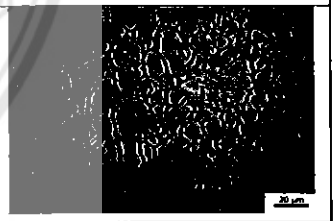
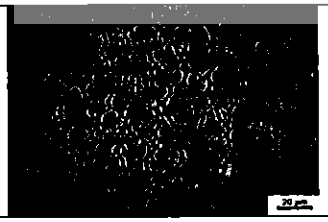
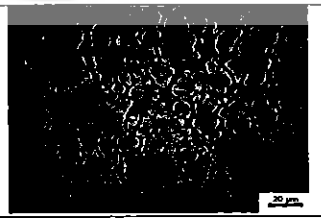
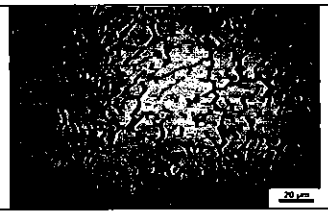
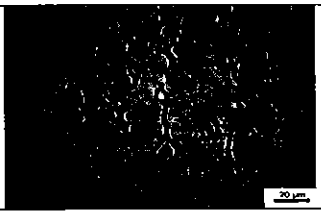
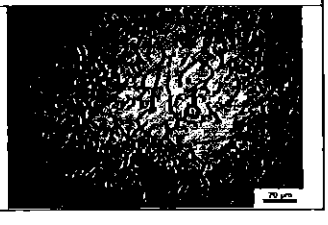
ตารางที่ ก.10 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวร ที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 1	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

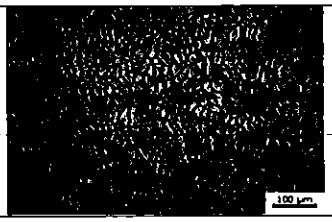
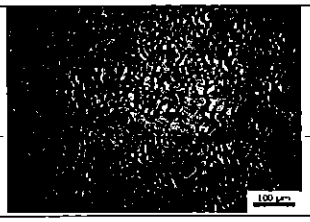
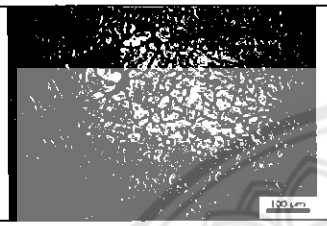
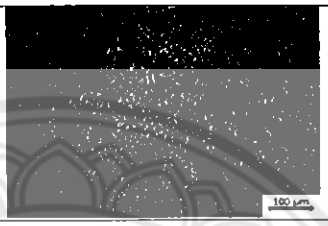
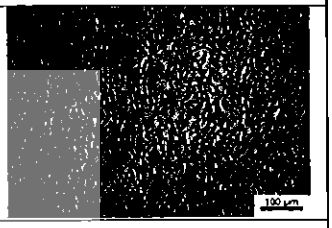
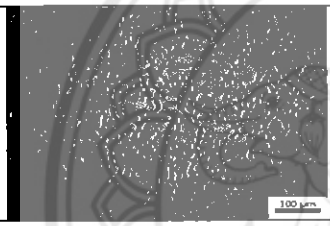
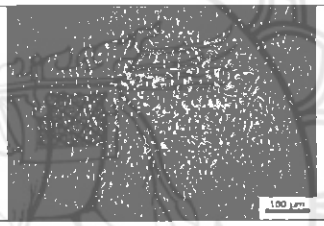
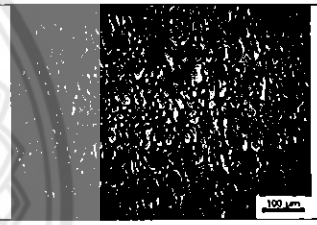
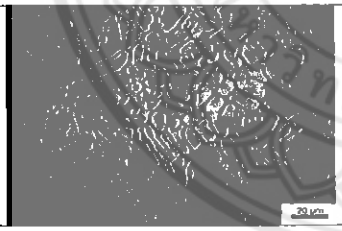
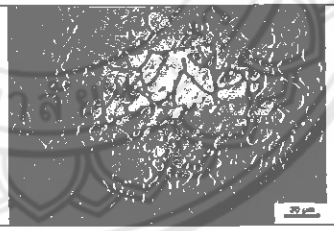
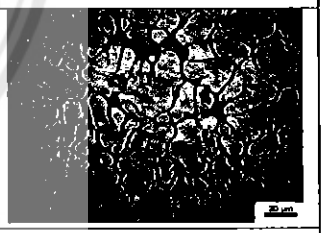
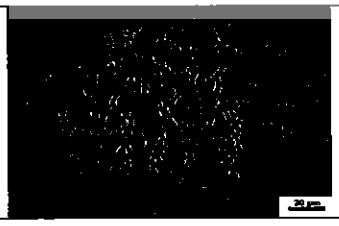
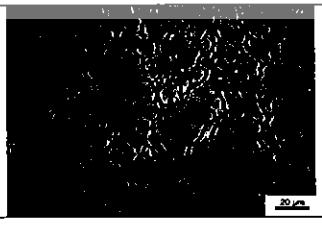
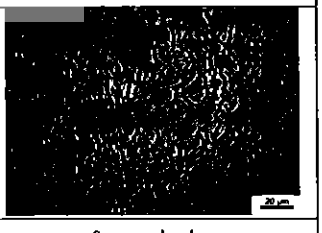
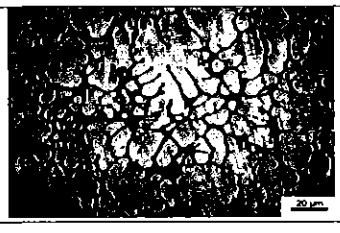
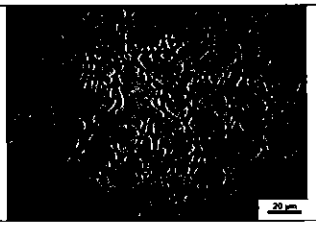
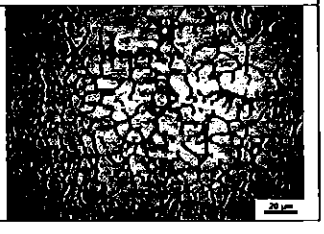
ตารางที่ ก.11 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวร ที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส

	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
ชิ้นที่ 2	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

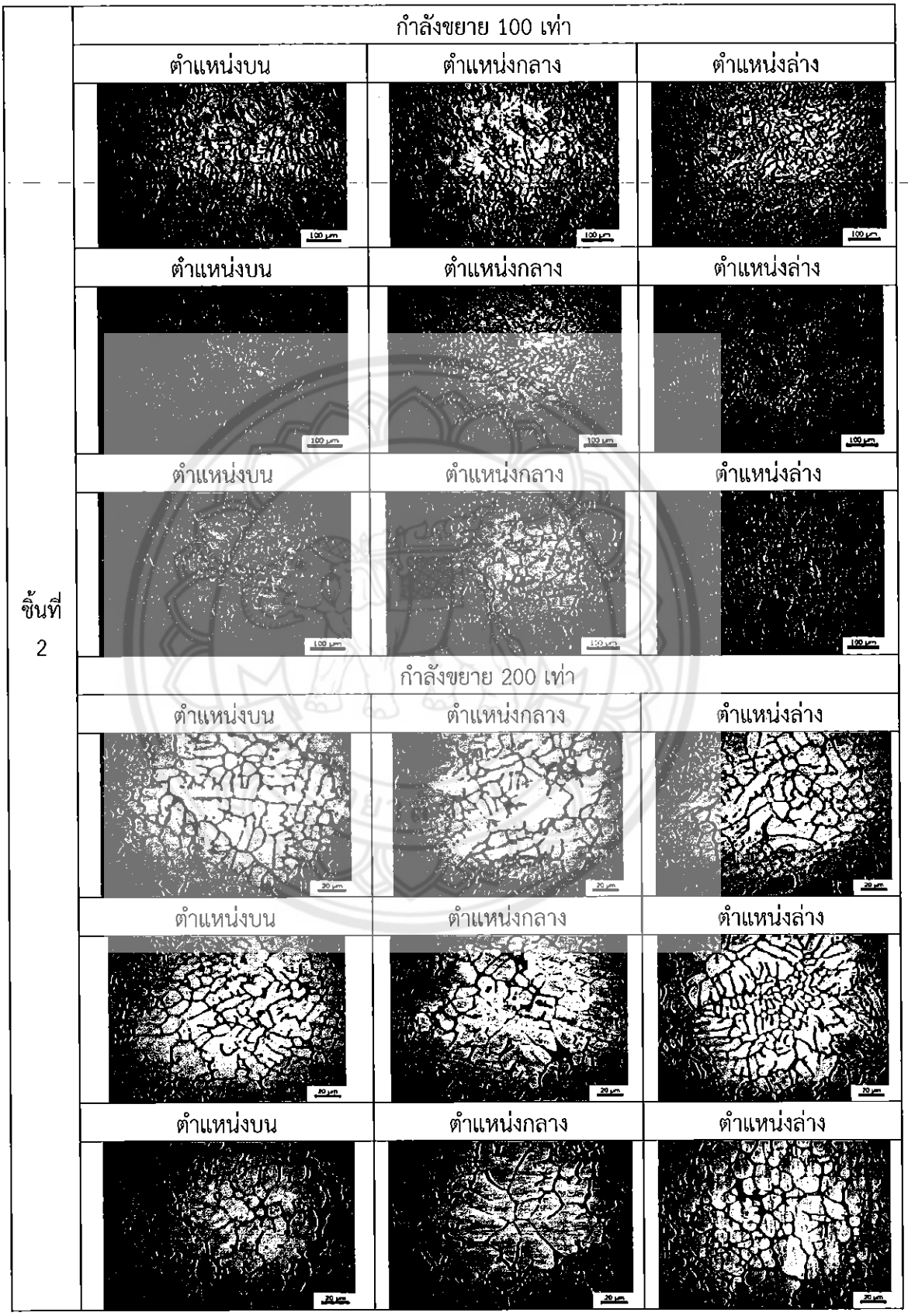
ตารางที่ ก.12 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวร ที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 3	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

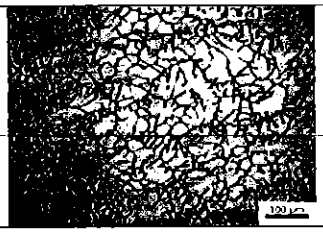
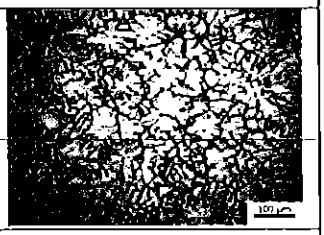
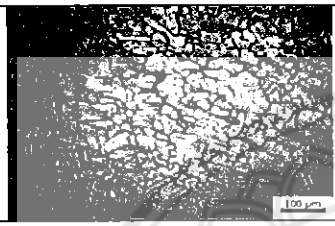
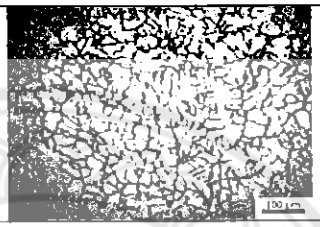
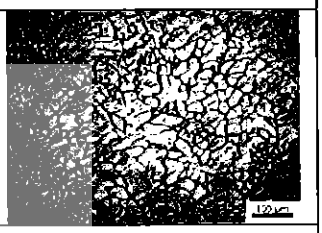
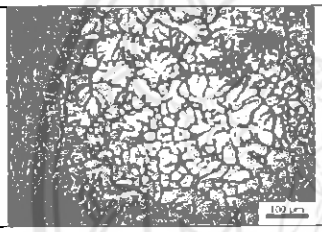
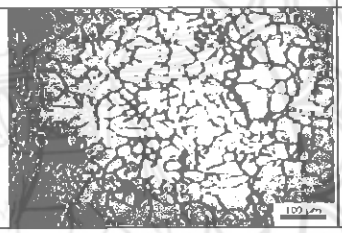
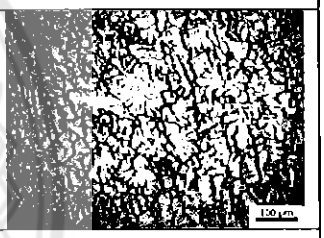
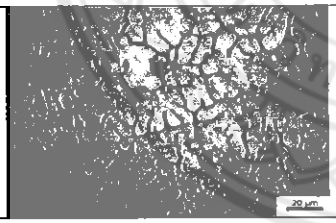
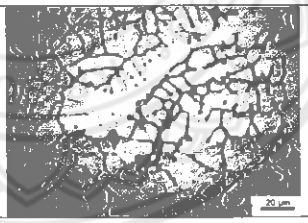
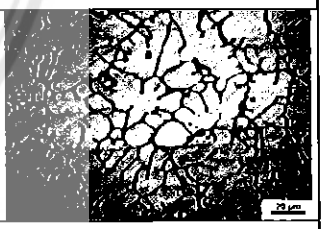
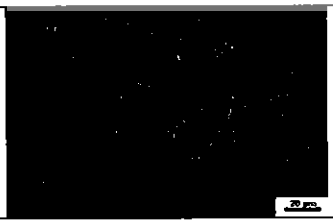
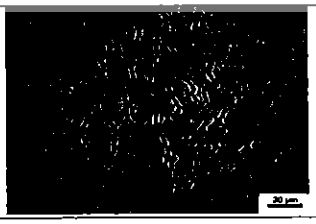
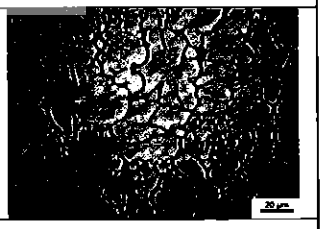
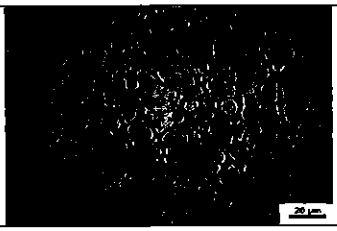
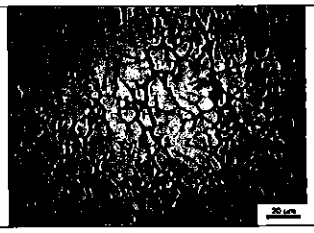
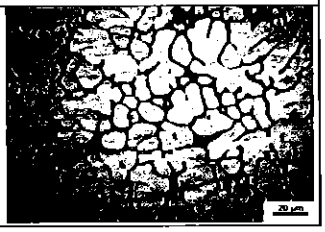
ตารางที่ ก.13 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวร ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 1	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

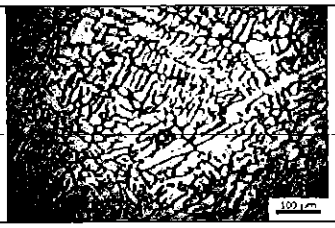
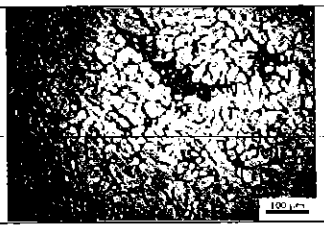
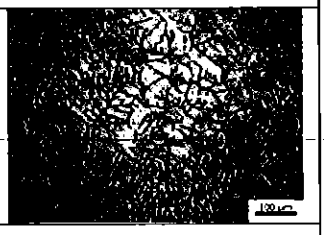
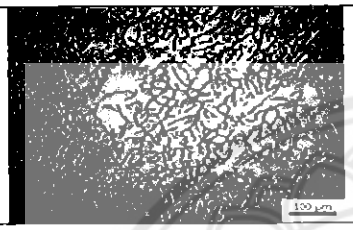
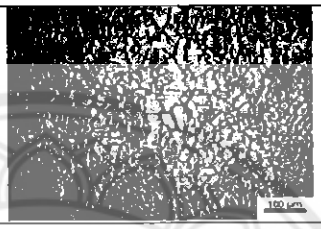
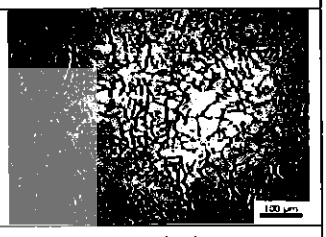
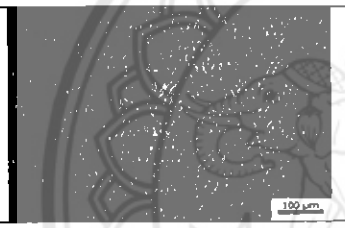
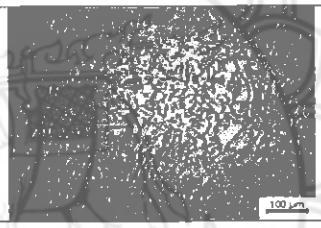
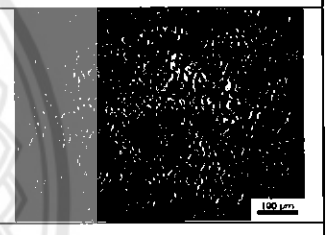
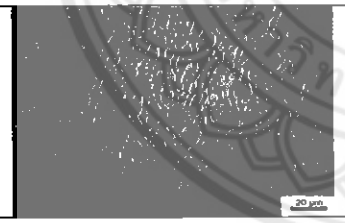
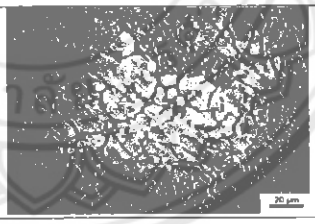
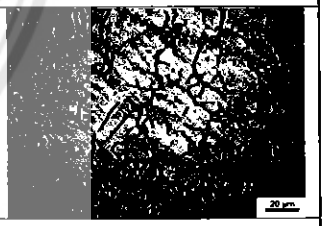
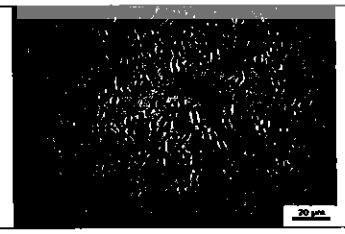
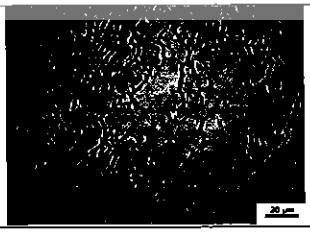
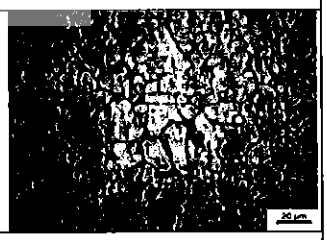
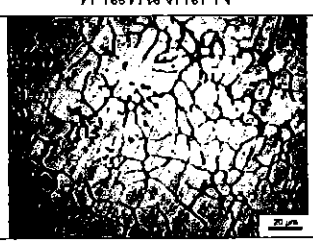
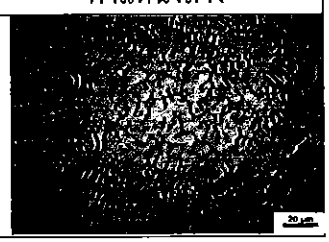
ตารางที่ ก.14 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวร ที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส



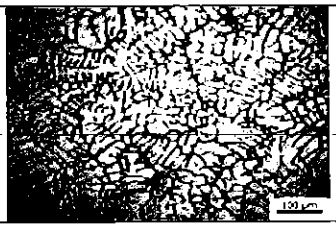
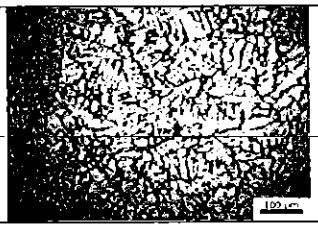
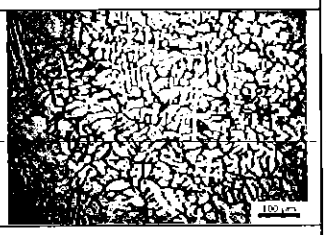
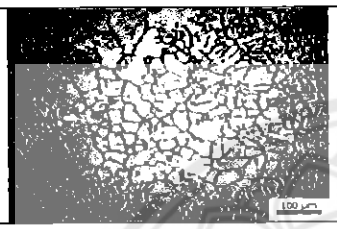
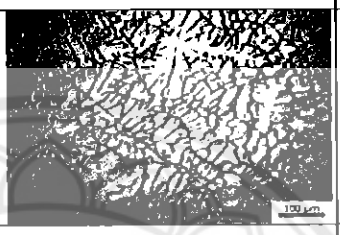
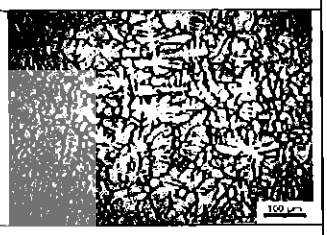
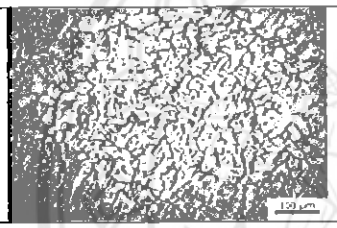
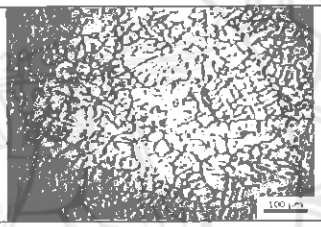
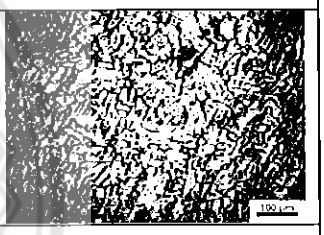
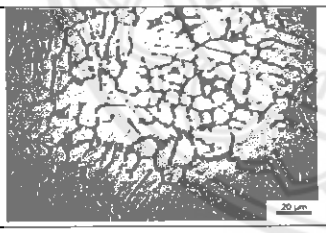
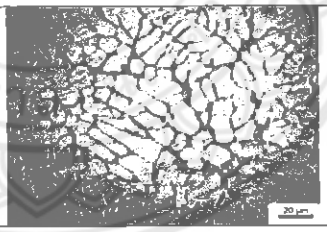
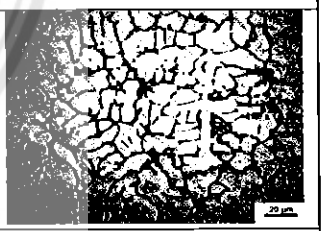
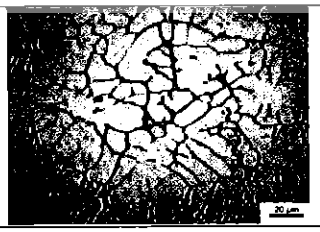
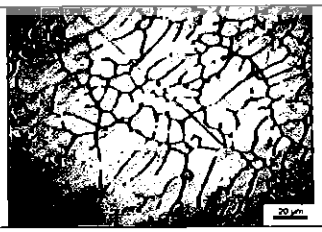
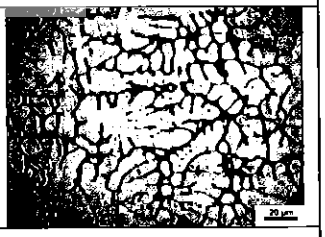
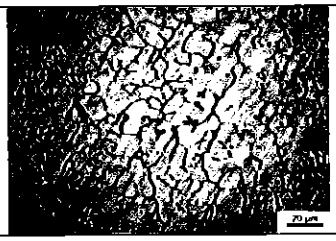
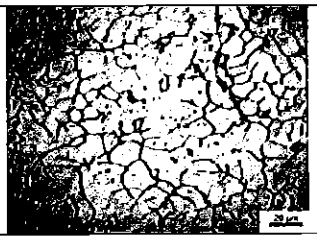
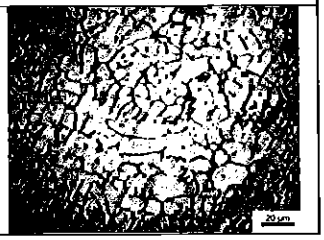
ตารางที่ ก.15 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวร ที่อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส

	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
ชิ้นที่ 3	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

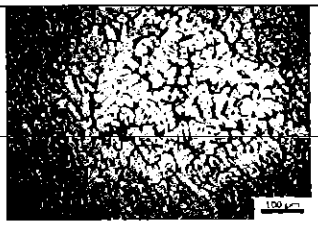
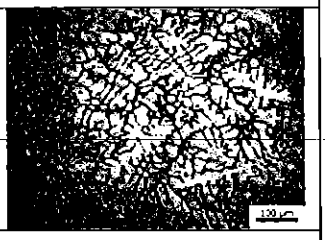
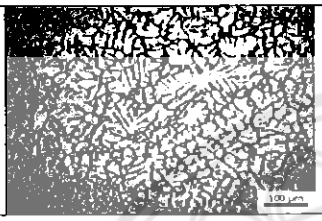
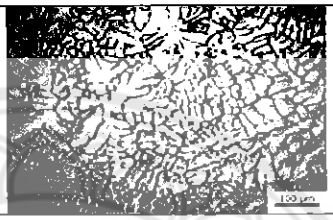
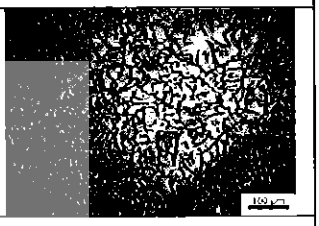
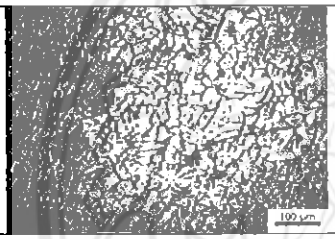
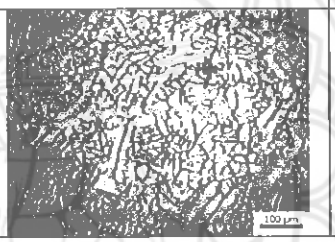
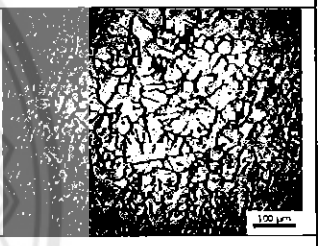
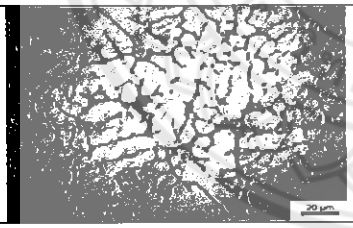
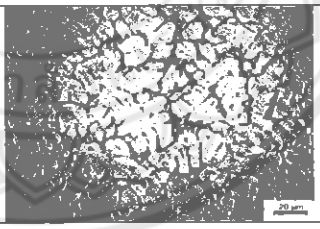
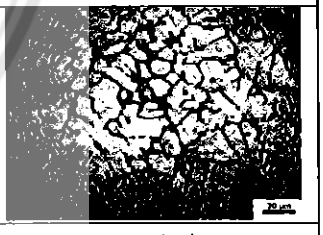
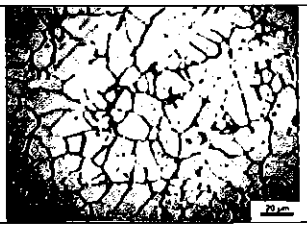
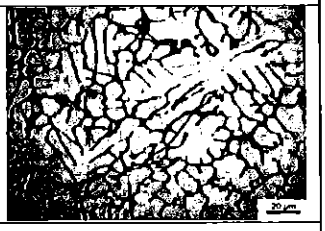
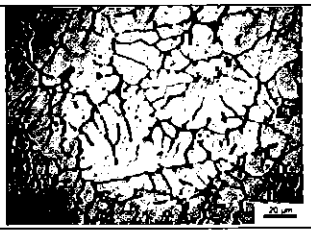
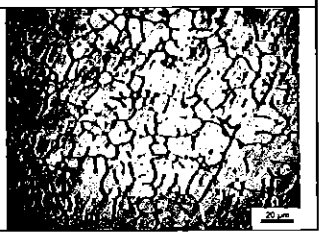
ตารางที่ ก.16 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 1	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

ตารางที่ ก.17 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 2	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

ตารางที่ ก.18 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อด้วยแบบหล่อถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ชิ้นที่ 3	กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	กำลังขยาย 200 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
			

ภาคผนวก ข
ค่าความแข็งของชิ้นงาน

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบทรายชื้น อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง	ตำแหน่งกดชิ้นงาน 1	ตำแหน่งกดชิ้นงาน 2	ตำแหน่งกดชิ้นงาน 3	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HB)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	ค่าความแข็งทั้งชิ้นงาน (HB)
620	หัว	123.25	123.25	123.25	115.69	1.65	121.33
	กลาง	116.20	113.97	103.64			
	ท้าย	109.68	111.80	116.20			
	หัว	120.84	120.84	118.49	127.22	15.10	
	กลาง	145.16	130.90	148.27			
	ท้าย	113.97	125.73	120.84			
	หัว	125.73	116.20	120.84	121.06	3.91	
	กลาง	128.28	128.28	125.73			
	ท้าย	120.84	113.97	109.68			
640	หัว	123.25	109.68	123.25	126.77	0.68	126.85
	กลาง	111.80	105.60	109.68			
	ท้าย	154.76	151.47	151.47			
	หัว	125.73	103.64	118.49	122.00	7.42	
	กลาง	123.2	130.90	116.20			
	ท้าย	128.28	128.28	123.25			
	หัว	109.68	111.80	109.68	118.77	14.98	
	กลาง	118.49	116.20	123.25			
	ท้าย	125.73	123.25	130.90			
660	หัว	103.64	116.20	109.68	113.19	10.82	118.61
	กลาง	107.62	103.64	109.68			
	ท้าย	118.49	116.20	133.59			
	หัว	123.25	133.59	136.36	117.83	9.12	
	กลาง	109.68	105.60	109.68			
	ท้าย	120.84	111.80	109.68			
	หัว	123.25	120.84	128.28	124.81	6.53	
	กลาง	130.90	118.49	120.84			
	ท้าย	133.59	130.90	116.20			

ตารางที่ ข.2 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบหล่อถาวร อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง	ตำแหน่งกดชิ้นงาน 1	ตำแหน่งกดชิ้นงาน 2	ตำแหน่งกดชิ้นงาน 3	ค่าความแข็งเฉลี่ย (HB)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	ค่าความแข็งทั้งชิ้นงาน (HB)
	หัว	151.47	203.56	176.81			
620	กลาง	133.59	136.36	139.21	164.92	15.89	147.35
	ท้าย	180.91	172.84	189.52			
	หัว	116.20	118.49	116.20			
	กลาง	125.73	136.36	130.90	133.98	4.97	
	ท้าย	161.66	158.16	142.14			
	หัว	136.36	128.28	151.47			
	กลาง	151.47	139.21	151.47	143.16	1.03	
	ท้าย	151.47	133.59	145.16			
640	หัว	130.90	158.16	198.72			
	กลาง	136.36	128.28	136.36	141.89	6.45	
	ท้าย	123.25	125.73	139.21			
	หัว	136.36	123.25	145.16			
	กลาง	158.16	125.73	133.59	143.93	6.75	139.23
	ท้าย	172.84	142.14	158.16			
	หัว	123.25	111.80	123.25			
	กลาง	169.00	145.16	154.76	131.89	1.28	
	ท้าย	123.25	105.60	130.90			
660	หัว	158.16	128.28	133.59			
	กลาง	109.68	123.25	116.20	132.65	10.48	
	ท้าย	154.76	118.49	151.47			
	หัว	128.28	130.90	148.27			
	กลาง	111.80	130.90	123.25	130.16	11.86	125.40
	ท้าย	133.59	130.90	133.59			
	หัว	111.80	109.68	109.68			
	กลาง	103.64	109.68	109.68	113.39	10.48	
	ท้าย	128.28	101.73	136.36			

ภาคผนวก ค

พื้นที่เฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

ตารางที่ ค.1 พื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อทรายชื้นที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชิ้นงาน	พื้นที่เฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Pixel)	พื้นที่เฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ($\mu.m^2$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
620	1	20728	5316	73
	2	17955		
	3	17987		
	4	17169		
	5	15932		
	6	15873		
640	1	28443	6978	93
	2	22225		
	3	26029		
	4	18575		
	5	22671		
	6	20738		
660	1	33896	8082	118
	2	29676		
	3	33771		
	4	27760		
	5	16041		
	6	19475		

ตารางที่ ค.2 พื้นที่ของเฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อในแบบหล่อถาวรที่อุณหภูมิเท 620, 640 และ 660 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชิ้นงาน	พื้นที่เฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Pixel)	พื้นที่เฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ($\mu.m^2$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
620	1	2707	852	43
	2	2442		
	3	3183		
	4	3085		
	5	3151		
	6	2366		
640	1	3358	957	39
	2	3681		
	3	2939		
	4	2517		
	5	3512		
	6	3007		
660	1	5881	1326	51
	2	6482		
	3	3419		
	4	2331		
	5	3790		
	6	4459		

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน

ชื่อ นายอภิณัฐ ศรีสุวรรณ
ภูมิลำเนา 7 หมู่ 3 ต.บ้านกร่าง อ.เมือง จ.พิษณุโลก
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิษณุโลก-พิทยาคม จ.พิษณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: apinut.srisuwan@gmail.com

ชื่อ นางสาววัชรมน ฉัตรคำแปง
ภูมิลำเนา 165 หมู่ 6 ต.ห้างฉัตร อ.ห้างฉัตร จ.ลำปาง
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนลำปางกัลยาณี จ.ลำปาง
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: lambo.kung2@gmail.com