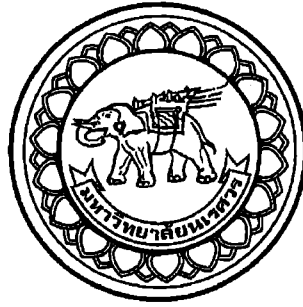


# อภิธาน์นทาการ



สำนักหอสมุด



ปัจจัยของอุณหภูมิเท และความเร็วฉีดที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค  
และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการ  
หล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น

THE EFFECTS OF POURING TEMPERATURE AND INJECTION  
VELOCITY ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS PROPERTIES  
OF A319 ALUMINUM ALLOYS BY HIGH PRESSURE DIE CASTING  
WITH COOLING PLATE TECHNIQUE

นางสาวพันธ์ทิพย์ สิงห์ล่อ รหัส 51362411

นางสาวเอมิกา อินทนิล รหัส 51362534

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

วันลงทะเบียน..... 28 ส.ย. 2555

เลขทะเบียน..... 1.588A809

เลขเรียกหนังสือ..... 21 TN

๒๕  
๐A๔  
พ๒๕๕๕  
๒๕๕๕

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ปีการศึกษา 2554



## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

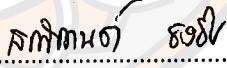
ชื่อหัวข้อโครงการ ปัจจัยของอุณหภูมิและความเร็วฉืดที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉืดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวพันธ์ทิพย์ สิงห์ล่อ รหัส 51362411  
นางสาวเอมิกา อินทนิล รหัส 51362534


ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ  
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม  
ปีการศึกษา 2554


คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

  
.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ธณิกานต์ ธงชัย)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ทศพล ตีร์จุริราพงศ์)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์มานะ วีร์วิกรม)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	ปัจจัยของอุณหภูมิเท และความเร็วฉีดที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีด ด้วยแรงดันสูงร่วมกับบราจเทหล่อเย็น		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นางสาวพันธ์ทิพย์	สิงห์ล่อ	รหัส 51362411
	นางสาวเอมิกา	อินทนิล	รหัส 51362534
ที่ปรึกษาโครงการงาน	อาจารย์กฤษณา	พูลสวัสดิ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2554		

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิเท และความเร็วฉีดที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับบราจเทหล่อเย็น โดยวางเทมีความชัน 45 องศา ยาว 30 เซนติเมตร ในการทดลองจะปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเท 630 640 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary  $\alpha$ -Al) และเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si) โดยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีลักษณะกลม และเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosette-Like Structure) ซึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้น ตามการเพิ่มของอุณหภูมิเท อีกทั้งเมื่อปรับเปลี่ยนความเร็วฉีด พบว่าที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีลักษณะกลม และเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ โดยพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมีขนาดใหญ่ และมีปริมาณไม่สม่ำเสมอ และที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที พบเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีลักษณะกลม และเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมีขนาดเล็ก และปริมาณสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน จากนั้นทดสอบความแข็งแรงพบว่า ค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิเทเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเช่นนี้ในทุกๆ ความเร็วฉีด โดยความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มของความเร็วฉีด

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงขอแสดงความขอบพระคุณบุคคลผู้มีพระคุณ โดยเฉพาะอาจารย์ภุชญา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนดูแลติดตามโครงการมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณอาจารย์อาสาฬห์ อุตตลกาลกาญจนา ที่ได้ให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆ ตลอดการทำโครงการนี้

ขอขอบพระคุณดร.ทศพล ตรีรัฐจิราภาพงศ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ คอยช่วยเหลือทางด้านการใช้โปรแกรมต่างๆ ตลอดการทำโครงการนี้ และกรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอบโครงการนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ศิริกาญจน์ ชันส์สัมฤทธิ์ อาจารย์ธณิกานต์ ธงชัย และอาจารย์มานะ วีรวิกรม ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และขอเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างรณกฤต แสงม่วง ครูช่างธวัชชัย ชุลบุตร และนักวิทยาศาสตร์อิสริย์ วัตฤภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และคำแนะนำในการใช้งานเครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยสนับสนุนค่าใช้จ่ายจนสามารถทำโครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้คำปรึกษา และคอยเป็นกำลังใจ  
สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้การดูแลตลอดการทำโครงการจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม  
นางสาวพันธ์ทิพย์ สิงห์ล่อ  
นางสาวเอมิกา อินทนิล

เมษายน 2555

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
<hr/>	
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในดำเนินโครงการ.....	2
1.7 ระยะเวลาในดำเนินโครงการ.....	2
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน.....	4
2.2 การหล่อโลหะ (Casting).....	5
2.3 กลไกการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว.....	9
2.4 กระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processing).....	12
2.5 กลไกการเกิดโครงสร้างลักษณะกลมบนรางเทหล่อเย็น.....	15
2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure).....	16
2.7 ขนาดเกรน.....	17
2.8 ปัจจัยรูปร่าง.....	17
2.9 ความแข็ง (Hardness).....	18
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	23
3.1 วัสดุ และอุปกรณ์.....	24
3.2 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ .....	29
4.1 ลักษณะของชิ้นงาน .....	29
4.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค .....	30
4.3 ความแข็ง .....	40
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ .....	42
5.1 บทสรุปของโครงการ .....	42
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา .....	42
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา .....	43
เอกสารอ้างอิง .....	44
ภาคผนวก ก .....	46
ภาคผนวก ข .....	71
ภาคผนวก ค .....	75





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภูมิสมมูลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน .....	4
2.2 กระบวนการหล่อแบบอ่างร้อน (Hot Chamber Equipment Scheme).....	8
2.3 กระบวนการหล่อแบบอ่างเย็น (Cold Chamber Equipment Scheme).....	8
2.4 การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว .....	9
2.5 ภาพจำลองการไหลที่เกิดจากความต่างของอุณหภูมิ และการเคลื่อนที่ของเดนไดรท์จากผนังแบบหล่อเข้าสู่ใจกลางแบบหล่อ .....	11
2.6 ภาพจำลองการแตกหักของเดนไดรท์ เมื่อมีการไหลของโลหะหลอมเหลว .....	12
2.7 การพัฒนาโครงสร้างที่เกิดขึ้นระหว่างการแข็งตัว ในสภาวะกึ่งของแข็งภายใต้การปั่นป่วนอย่างรุนแรง .....	13
2.8 แผนภาพวิธีของกระบวนการ .....	14
2.9 กระบวนการหล่อรีโอไดคาสต์ร่วมกับรางเทหล่อเย็น .....	15
2.10 การเกิดโครงสร้างลักษณะกลมบนรางเทหล่อเย็น .....	16
2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสง .....	17
2.12 การแปรรูปถาวรของเนื้อวัสดุบริเวณใต้หัวกดแบบปริเนล .....	19
2.13 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล .....	20
3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ .....	23
3.2 เครื่องหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูง .....	24
3.3 แม่พิมพ์เหล็ก (หน่วยมิลลิเมตร).....	24
3.4 รางเทหล่อเย็น .....	25
3.5 การติดตั้งรางเทหล่อเย็นเข้ากับเครื่องหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูง .....	26
3.6 แผนภาพแสดงอุณหภูมิเทของกระบวนการรีโอไดคาสต์ .....	26
3.7 ตำแหน่งชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทดสอบความแข็ง .....	27
3.8 ตำแหน่งชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค .....	27
3.9 ตำแหน่งชิ้นงานที่ใช้ทดสอบความแข็ง .....	28
4.1 ลักษณะของชิ้นงานที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที .....	29
4.2 ลักษณะชิ้นงานอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส .....	30
4.3 โครงสร้างจุลภาคในงานหล่อ .....	31
4.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน .....	31
4.5 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส .....	33
4.6 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส .....	34

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่อุณหภูมิเท 650 องศาเซลเซียส .....	35
4.8 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่ความเร็วฉีต 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส .....	36
4.9 ค่าปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่ความเร็วฉีต 0.1 และ 1.0 เมตรต่อ วินาที อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส .....	37
4.10 ปริมาณของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ความเร็ว- ฉีต 0.1 เมตรต่อวินาที .....	38
4.11 ปริมาณของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ความเร็ว- ฉีต 1.0 เมตรต่อวินาที .....	39
4.12 ค่าความแข็งของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความ- เร็วฉีต 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที .....	41
4.13 ค่าความแข็งของชิ้นงาน ที่ความเร็วฉีต 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส .....	41

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

ในเชิงอุตสาหกรรมได้มีการใช้อะลูมิเนียมผสมกันอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมไปถึงเครื่องมือทางอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากอะลูมิเนียมมีข้อดีทางด้านความแข็งแรง (Strength) น้ำหนักเบา และสามารถขึ้นรูปขึ้นงานที่ซับซ้อนได้ จึงทำให้อะลูมิเนียมเข้ามามีบทบาท และความสำคัญต่องานอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก

ในปัจจุบันอะลูมิเนียมผสมได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการหล่อหลายกระบวนการ ในกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูง (High Pressure Die Casting) ก็เช่นกัน เนื่องด้วยสมบัติของอะลูมิเนียมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (Low Melting Point) ซึ่งกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงเป็นกระบวนการขึ้นรูป โดยโลหะหลอมเหลวจะถูกดันเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยแรงดันสูง การหล่อด้วยวิธีนี้สามารถขึ้นรูปขึ้นงานที่รูปร่างซับซ้อน มีความบาง และผิวสำเร็จของชิ้นงานมีความเรียบ โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปของกระบวนการหล่อมักมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) แต่เนื่องจากกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงนี้มีการใช้ความดัน (Pressure) และความเร็ว (Velocity) ในการผลิต ส่งผลให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าแม่พิมพ์แบบปั่นป่วน (Turbulence) และโลหะหลอมเหลวที่ปั่นป่วนจับกับอากาศภายในแม่พิมพ์ ชิ้นงานที่ได้จึงมีพร่องอากาศ (Porosity) ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานไม่ดีนัก และไม่สามารถเพิ่มสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการหล่อโดยมีการใช้รางเทหล่อเย็น (Cooling Plate) เข้ามาช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลให้ดีขึ้น ซึ่งเทคนิคดังกล่าวนี้คือกระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processing) โดยใช้รางเทหล่อเย็น ทำให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ในลักษณะการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งลดการจับกับอากาศของโลหะหลอมเหลว ลดการเกิดพร่องอากาศ และจุดบกพร่องภายในชิ้นงาน อีกทั้งโครงสร้างจากกระบวนการดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่เป็นเดนไดรต์กลายเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลม (Globular) กระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งนี้ จะใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำ และโครงสร้างที่มีลักษณะกลมนี่จะช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงานอีกด้วย

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ในงานหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ได้จากการเทในอุณหภูมิเท (Pouring Temperature) และความเร็วฉีด (Injection Velocity) ที่แตกต่างกัน โดยจะทำการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ที่ส่งผลต่อความแข็งแรง

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลว ของกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็นที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319

1.2.2 ศึกษาความเร็วฉีด ของกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็นที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319

### 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

1.3.1 โครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส

1.3.2 โครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ที่ความเร็วฉัด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที

### 1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

1.4.1 วิเคราะห์ และเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส

1.4.2 วิเคราะห์ และเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 ที่ความเร็วฉัด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที

### 1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.5.1 วัสดุใช้ในการดำเนินงาน คือโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319

1.5.2 กระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงใช้ร่วมกับรางเทหล่อเย็น โดยรางเททำจาก เหล็กกล้า มีความชัน 45 องศา ความยาว 30 เซนติเมตร หล่อเย็นด้วยน้ำ

1.5.3 อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส

1.5.4 ความเร็วฉัด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที

1.5.5 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscopes)

1.5.6 ตรวจสอบลักษณะชิ้นงาน (โพรงอากาศ) ด้วยกล้องถ่ายภาพ

1.5.7 วัดพื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ

1.5.8 ทดสอบความแข็งด้วยการทดสอบแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

### 1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรัตนนคร

### 1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

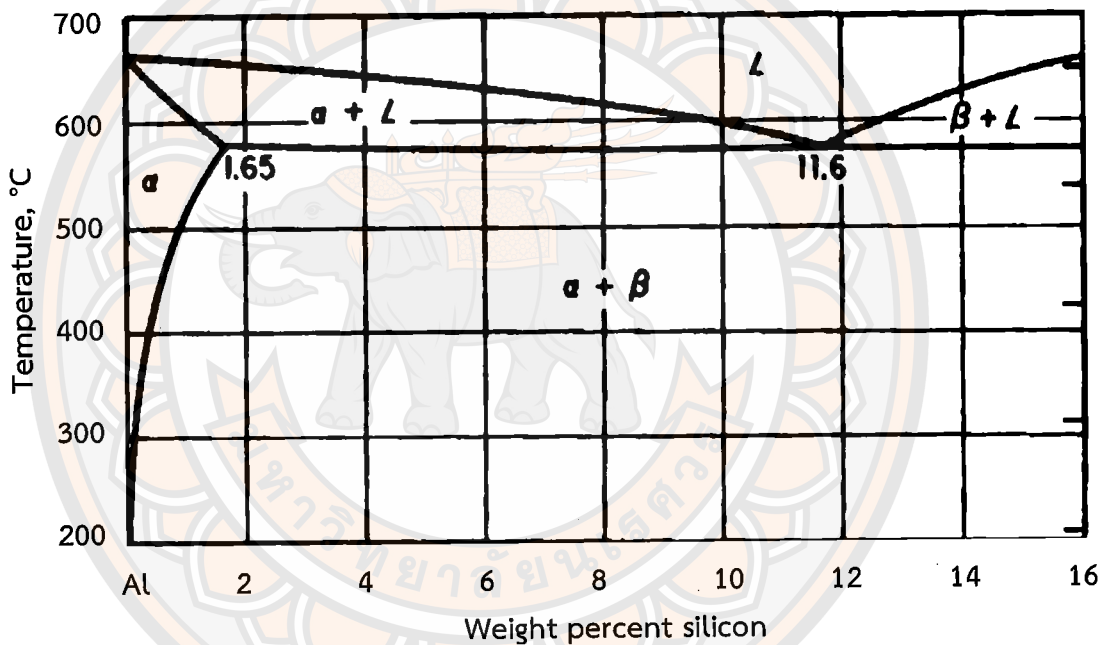
1 กรกฎาคม พ.ศ. 2554 - 30 เมษายน พ.ศ. 2555



## บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

### 2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนได้รับความนิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะ ทั้งนี้เพราะมีสมบัติการหล่อ (Castability) ที่ดี สามารถนำไปถึง ตัด หรือเชื่อมได้ นอกจากนั้นยังทนต่อการเกิดการกัดกร่อน และหากนำไปผสมกับโลหะอื่น เช่น แมกนีเซียม และทองแดง ทำให้สามารถนำไปปรับปรุงสมบัติทางกลโดยกระบวนการทางความร้อนได้อีกด้วย ปัจจุบันมีการใช้งานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเป็นหลักมากถึงร้อยละ 85 ถึง 90 ของโลหะอะลูมิเนียมที่ใช้ในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ เพื่อให้การผลิต และการนำเอาอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไปใช้งานเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน  
ที่มา: รศ. ชาวลิต (2551)

เมื่อพิจารณาจากเฟสไดอะแกรมของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.1 พบว่าที่ส่วนผสมของซิลิคอนประมาณร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิประมาณ 577 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมผสมจะมีจุดหลอมเหลวต่ำสุด ที่จุดปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic Reaction) โดยเรียกอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีส่วนผสมทางเคมี ที่จุดปฏิกิริยายูเทคติก นี้ว่าเป็นอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดยูเทคติก แต่หากอะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีปริมาณของซิลิคอนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก จะเรียกว่าเป็นอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) และในกรณีที่ซิลิคอนอยู่มากกว่าร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก จะเรียกว่าเป็นอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic) ทั้งนี้ อะลูมิเนียม-ซิลิคอนแต่ละเกรดมีความต้องการเทคนิคสำหรับปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่แตกต่างกัน และยังมีธาตุอื่นๆ ที่ผสมลงไปประกอบ เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ให้ดีขึ้น เช่น มีการเติมแมกนีเซียม ทองแดง และนิกเกิล โดยเมื่อเติมในปริมาณเพียงเล็กน้อย จะช่วยทำให้สามารถ

ปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ นอกจากนั้นแล้วการมีทองแดงผสมอยู่ในกรณีอะลูมิเนียม-ซิลิคอนเกรดไฮโปยูเทคติกจะช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความสามารถในการกลึง ตัด และการนำความร้อน แต่โลหะผสมจะสูญเสียความเหนียว และการต้านทานการกัดกร่อน (รศ. เชาวลิต, 2551)

มาตรฐานที่นิยมใช้สำหรับการแบ่งชนิดของอะลูมิเนียมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะในประเทศไทย คือมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (AA) ได้สรุปอะลูมิเนียมเกรดที่นิยมใช้งาน และส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะ (ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยประมาณ)

มาตรฐาน	ซิลิคอน	ทองแดง	แมกนีเซียม	เหล็ก	แมงกานีส	ไทเทเนียม	สังกะสี
AA	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Ti	Zn
A319.0	5.5-6.5	3.0-4.0	0.1	1.0	0.5	0.25	3.0
A319.1	5.5-6.5	3.0-4.0	0.1	0.8	0.5	0.25	3.0
A332.2	10.5-13.5	0.8-1.5	0.9-1.5	0.6	0.35	-	0.35
A356.0	6.5-7.5	0.2	0.25-0.45	0.2	0.1	0.2	0.1
A360.2	9.0-11.0	0.03	0.25-0.45	0.4	0.45	-	0.1
A390.0	16.0-18.0	4.0-5.0	0.45-0.65	0.5	0.1	0.2	0.1

ที่มา: รศ. เชาวลิต (2551)

ตัวอย่างโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 เป็นมาตรฐานที่เรียกตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา AA (Aluminum Association) มีส่วนผสมดังนี้ ซิลิคอนร้อยละ 5.5-6.5 ทองแดงร้อยละ 3.0-4.0 แมกนีเซียมสูงสุดร้อยละ 0.1 เหล็กสูงสุดร้อยละ 1.0 แมงกานีสสูงสุดร้อยละ 0.5 ไทเทเนียมสูงสุดร้อยละ 0.25 และสังกะสีสูงสุดร้อยละ 3.0 โดยน้ำหนัก

โดยโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 มีข้อดีหลายประการ เช่น มีสมบัติทางด้านความสามารถในการหล่อ ความสามารถในการเชื่อม (Good Weldability) ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน และความสามารถในการกลึง เจาะ ตบแต่ง ด้วยเครื่องจักรได้ดี ในด้านการนำไปใช้งานของโลหะผสมประเภทนี้ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ครอบก้านสูบของเครื่องยนต์ เพลาค้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ รวมไปถึงอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ ทางอุตสาหกรรม

## 2.2 การหล่อโลหะ (Casting)

กรรมวิธีการหล่อ (Casting Process) หมายถึงการเทโลหะหลอมเหลวเข้าไปในแบบหล่อแล้วปล่อยให้แข็งตัวมีรูปร่างตามที่ต้องการ หรือหากจะให้ความหมายที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้นจะหมายถึงการเริ่มต้นจากการให้ความร้อนเพื่อหลอมโลหะให้มีสภาพเป็นของเหลว (Melting) จากนั้นทำการปรับปรุงโลหะหลอมเหลวให้มีส่วนผสมทางเคมีตามที่ต้องการ ทำการเทโลหะหลอมเหลว (Pouring) ลงในแบบหล่อ (Mold Cavity) จากนั้นปล่อยให้โลหะเย็นตัวลง และเกิดการแข็งตัว (Solidification) จะได้รูปร่างชิ้นงานตามต้องการ (ณรงค์ศักดิ์, 2553)

### 2.2.1 การหล่อด้วยแบบหล่อทราย (Sand Casting)

การหล่อด้วยแบบหล่อทราย เป็นกระบวนการที่มีใช้มานานอย่างแพร่หลาย สามารถผลิตชิ้นงานหล่อตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ต้นทุนในการผลิตต่ำ ข้อเสียของกระบวนการนี้ คือผิวของชิ้นงานไม่เรียบ มีความแม่นยำต่ำ อัตราการผลิตต่ำ และต้องมีการควบคุมกระบวนการผลิต ชิ้นงานหล่อที่ผลิตโดยแบบหล่อทราย เช่น เครื่องยนต์ ใบพัดเทอร์โบต์ ตลอดจนอุปกรณ์ทางการเกษตร อีกหลายชนิด แบบหล่อทรายสามารถใช้หล่อกับโลหะได้หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นเหล็กหล่อ เหล็กกล้า อะลูมิเนียมผสม ทองแดงผสม ตลอดจนนิกเกิล หรือไทเทเนียม เป็นต้น

### 2.2.2 การหล่อด้วยแบบหล่อเปลือกบาง (Shell Mold)

การหล่อด้วยแบบหล่อเปลือกบาง เป็นวิธีทำแบบที่ได้รับความนิยม ทั้งนี้เพราะชิ้นงานที่หล่อด้วยวิธีนี้ จะมีผิวที่เรียบ ขนาดชิ้นงานสุดท้ายใกล้เคียงกับชิ้นงานจริง และราคาประหยัด ชิ้นงานหล่อที่ผลิตจากกรรมวิธีนี้ได้แก่ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลขนาดเล็กที่ต้องการความเที่ยงตรงของขนาดสูงๆ เช่น ฝาครอบชุดเฟืองเกียร์ ข้อต่อชิ้นส่วนต่างๆ และยังมีนิยมใช้ทำใส่แบบอีกด้วย

### 2.2.3 การหล่ออินเวสเมนต์ (Investment Casting)

การหล่ออินเวสเมนต์ หรือเรียกอีกอย่างว่ากระบวนการหล่อขี้ผึ้งหาย (Lost-Wax Process) เป็นกระบวนการที่ใช้หล่อชิ้นงานที่มีขนาดเล็กตั้งแต่ 1 กรัมไปจนถึง 5 กิโลกรัม ขนาดชิ้นงานมีความเที่ยงตรงสูง และผิวของชิ้นงานหลังหล่อเสร็จมีความเรียบสูง แต่ข้อเสียของกระบวนการ คือราคาของกระบวนการสูง และมีอัตราการผลิตต่ำ ชิ้นงานหล่อที่ผลิตโดยการหล่ออินเวสเมนต์ เช่น เครื่องประดับที่เป็น แหวน ต่างหู จี้ และชิ้นงานที่ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น เฟือง วาล์ว ใบพัดเทอร์โบต์ ของเครื่องยนต์เจต ลูกเบี้ยว

### 2.2.4 การหล่อแม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold)

การหล่อขึ้นรูปแม่พิมพ์ถาวร เป็นกระบวนการที่มีการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติ ดังนั้นการหล่อด้วยแม่พิมพ์ถาวรจึงเหมาะกับการผลิตชิ้นงานหล่อที่มีปริมาณการผลิตสูง ชิ้นงานมีความแม่นยำสูง และมีความแข็งแรงสูง

#### 2.2.4.1 การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร (Gravity Die Casting)

การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร เป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีอัตราการผลิตสูง ผลิตชิ้นงานปริมาณที่มาก ผิวของชิ้นงานมีความแม่นยำสูง แต่จะมีข้อจำกัดด้านขนาด รูปร่าง และข้อจำกัดทางวัสดุ ซึ่งการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวรจะเหมาะกับโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เนื่องจากโลหะหลอมเหลวมีการไหลตัวที่ดี โดยส่วนมากแม่พิมพ์ทำจากเหล็กหล่อเทา เหล็กกล้า บรอนซ์ แกรไฟต์ หรือวัสดุชนิดอื่น ชิ้นส่วนที่ผลิตมาจากแม่พิมพ์ถาวร เช่น ลูกสูบเครื่องยนต์ หัวกระบอกสูบ ตลอดจนชิ้นส่วนของเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น

#### 2.2.4.2 การหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง (High Pressure Die Casting)

กระบวนการฉีดด้วยแรงดันสูง เป็นวิธีที่โลหะหลอมเหลวถูกอัดเข้าสู่แม่พิมพ์โดยใช้แรงดัน และอุณหภูมิสูง การหล่อด้วยวิธีนี้ใช้กับชิ้นงานที่มีความบาง รูปร่างซับซ้อน ขนาดชิ้นงานที่ได้มีความแม่นยำ และต้องการผิวสำเร็จชิ้นงานที่เรียบ สามารถผลิตได้ปริมาณมากในเวลาสั้นๆ การฉีดด้วยแรงดันสูง โดยส่วนมากนำมาใช้กับโลหะที่จุดหลอมเหลวต่ำ เช่น อะลูมิเนียมผสม

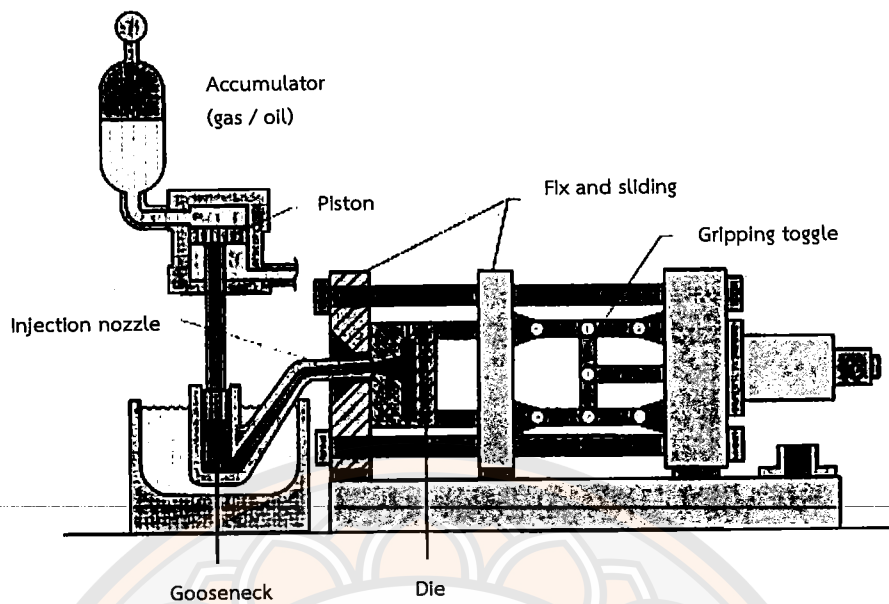
สังกะสีผสม เป็นต้น แรงดันที่ใช้ปกติประมาณ 34.45 เมกะปาสคาล หรือมากกว่า อัตราการผลิตขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน ลักษณะของการออกแบบที่มีความซับซ้อน ความหนา และสมบัติของโลหะหล่อ เป็นต้น โลหะหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์มีอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็ว แม่พิมพ์ที่ใช้เป็นโลหะที่มีความต้านทานความร้อนสูง ดังนั้นมีการถ่ายเทความร้อนของโลหะหลอมเหลวออกสู่สภาวะภายนอก โดยผ่านแม่พิมพ์เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โลหะหลอมเหลวจึงเย็นตัวเร็ว จึงทำให้ได้โครงสร้างที่มีขนาดเล็ก

ข้อจำกัดของกระบวนการนี้ คือต้นทุนในการผลิตสูง เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่ทำให้แม่พิมพ์สูง แต่ถ้าผลิตในจำนวนมากๆ ต้นทุนในการผลิตจะต่ำ และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการนี้ยาวนาน เนื่องจากเสียเวลาในการทำแม่พิมพ์ แต่ถ้าทำแม่พิมพ์สำเร็จแล้ว เวลาที่ใช้ในการผลิตจะสั้นมาก อัตราการผลิตจึงสูง ส่วนมากนิยมใช้ขึ้นรูปโลหะนอกกลุ่มเหล็ก หรือโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ชิ้นงานที่ได้มีความหนาไม่มาก และมักพบโพรงอากาศภายในชิ้นงาน เนื่องจากกระบวนการนี้มีการใช้ความดัน และความเร็วในการผลิต ส่งผลให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าแม่พิมพ์แบบปั่นป่วน โลหะหลอมเหลวจึงติดจับกับอากาศในแม่พิมพ์ได้มาก ชิ้นงานที่ได้จึงมีโพรงอากาศ ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานไม่ดีนัก และไม่สามารถเพิ่มสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ เนื่องจากมีอากาศภายในชิ้นงาน ถ้าให้ความร้อน อากาศที่อยู่ภายในจะดันให้ชิ้นงานบวม หรือแตกหักได้ นอกจากนี้พบว่าสมบัติทางกลที่ได้มีความไม่สม่ำเสมอขึ้น เนื่องจากกระบวนการหล่อแบบนี้ได้โครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ และมีการแยกเฟสของของเหลว (Liquid Segregation) และของแข็งเกิดขึ้น (กนกกาญจน์, 2553)

โดยทั่วไปกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง แบ่งออกเป็นสองประเภท คือ การหล่อแบบอ่างร้อน (Hot-Chamber Die Casting) และการหล่อแบบอ่างเย็น (Cold-Chamber Die Casting)

#### ก. การหล่อแบบอ่างร้อน

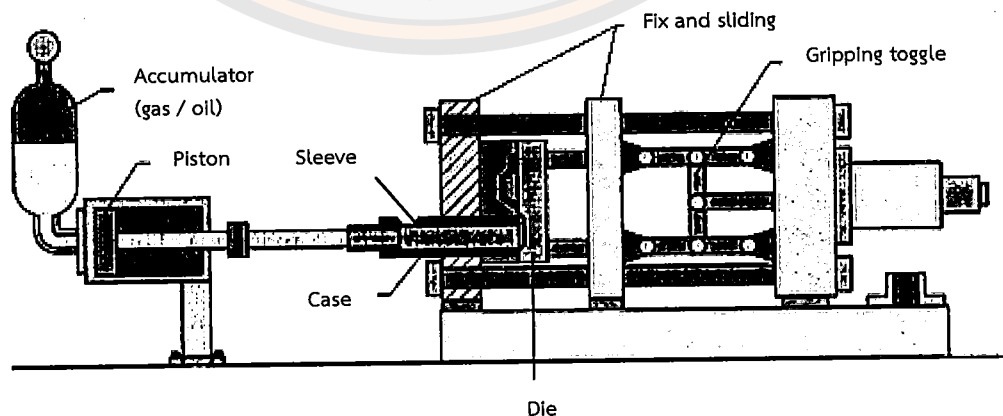
วิธีการนี้จะมีอ่างหลอมโลหะที่อยู่ติดกับตัวเครื่องจักร และมีลูกสูบ (Plunger) เป็นตัวดันโลหะหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยเมื่อแม่พิมพ์ปิดสนิท ลูกสูบจะถูกดึงขึ้นเพื่อปล่อยให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าสู่อ่าง จากนั้นลูกสูบเคลื่อนที่ลงเพื่อดันโลหะหลอมเหลวเข้าแม่พิมพ์ เมื่อโลหะหลอมเหลวเกิดการแข็งตัว ลูกสูบจะเคลื่อนที่ขึ้น แม่พิมพ์ถูกเปิดออก และจะดันชิ้นงานออกมา แสดงดังรูปที่ 2.2 วิธีการนี้เหมาะสำหรับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำประเภท สังกะสี ดีบุก ตะกั่ว เป็นต้น เนื่องจากอ่างหลอมโลหะอยู่ติดกับตัวเครื่องจักร ส่งผลให้อุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวสูญเสียน้อย นอกจากนี้โลหะที่ใช้ในการขึ้นรูปต้องไม่ทำปฏิกิริยากับลูกสูบ หรืออุปกรณ์ที่ทำการฉีด (วิหาร, 2548)



รูปที่ 2.2 กระบวนการหล่อแบบอ่างร้อน (Hot Chamber Equipment Scheme)  
ที่มา: Eurit, S.R.L. (1998)

#### ข. การหล่อแบบอ่างเย็น

วิธีการนี้จะมีอ่างหล่อโลหะแยกออกจากตัวเครื่องจักร โดยโลหะหลอมเหลวถูกเทลงสู่ช่อง Sleeve จากนั้นลูกสูบเคลื่อนที่เข้าเพื่อดันโลหะหลอมเหลวเข้าแม่พิมพ์ แล้วอัดด้วยแรงดันระหว่าง 20-70 เมกะปาสคาล บางครั้งอาจสูงถึง 150 เมกะปาสคาล ลักษณะการทำงานของเครื่องอัดฉีดอาจมีแบบที่ทำการอัดในแนวนอน และแนวตั้ง เมื่อโลหะหลอมเหลวแข็งตัวแล้ว ลูกสูบจะถอยกลับตำแหน่งเดิม แม่พิมพ์เปิดออก จากนั้นจะดันชิ้นงานออกมา แสดงดังรูปที่ 2.3 วิธีการนี้เหมาะสำหรับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงประเภท อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ทองเหลือง และทองแดงผสม เนื่องจากต้องเสียเวลาดักโลหะมาเทลงช่อง Sleeve ส่งผลให้อุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวสูญเสียมาก วิธีการนี้จึงทำงานช้ากว่าการหล่อแบบอ่างร้อน (วิหาร, 2548)



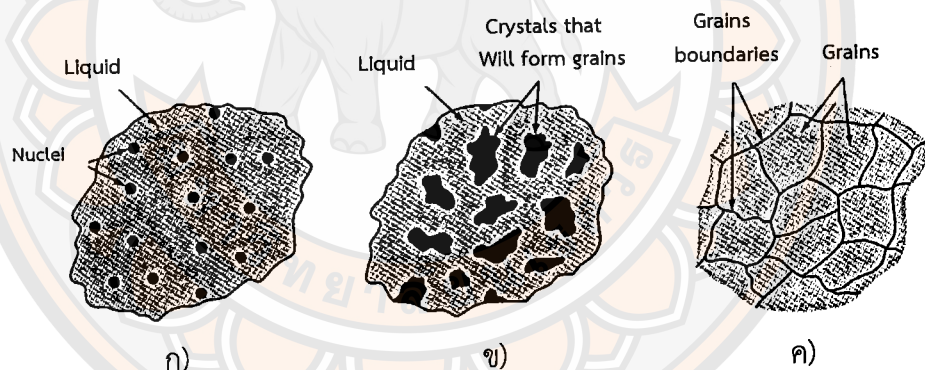
รูปที่ 2.3 กระบวนการหล่อแบบอ่างเย็น (Cold Chamber Equipment Scheme)  
ที่มา: Eurit, S.R.L. (1998)

### 2.2.4.3 การหล่อฉีดด้วยแรงดันต่ำ (Low Pressure Die Casting)

กระบวนการฉีดด้วยแรงดันต่ำ เป็นวิธีที่โลหะหลอมเหลวถูกอัดเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยใช้แรงดันต่ำ แรงดันที่ใช้ปกติประมาณ 34.5-103.5 กิโลปาสคาล การฉีดด้วยแรงดันต่ำ โดยมากใช้แม่พิมพ์เหล็กสำหรับอะลูมิเนียม และแม่พิมพ์แกรไฟต์สำหรับเหล็ก การหล่อด้วยวิธีนี้ใช้กับชิ้นงานที่มีความบาง รูปร่างซับซ้อน ขนาดชิ้นงานที่ได้มีความแม่นยำ และต้องการผิวสำเร็จชิ้นงานที่เรียบ

## 2.3 กลไกการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว

เมื่ออุณหภูมิโลหะหลอมเหลวลดต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว ระบบจะมีแรงขับ (Driving Force) ที่มากพอจะทำให้เกิดการแข็งตัวขึ้น จนโลหะหลอมเหลวแข็งตัวทั้งปริมาตร โดยอะตอมจะเกิดการสั่นสะเทือนน้อยลง ระยะห่างระหว่างอะตอมลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ จนกระทั่งอะตอมดังกล่าวเกิดการจับรวมตัวกันพร้อมเป็นจุดเริ่มต้นของการแข็งตัวที่เรียกว่า นิวเคลียส (Nuclei) แสดงดังรูปที่ 2.4 ก) จากนั้นอะตอมจะจับรวมตัวกันมากขึ้นกลายเป็นนิวเคลียส (Nucleus) และเมื่ออุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ จะเกิดการขยายตัวของนิวเคลียสกลายเป็นผลึก (Crystal) แสดงดังรูปที่ 2.4 ข) โดยที่ผลึกจะขยายตัวโตขึ้นในทิศทางอิสระของแต่ละผลึก เมื่อเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบที่แตกต่างกันโตมาบรรจบกัน เป็นผลให้อะตอมบริเวณดังกล่าว มีการจัดเรียงตัวที่ต่างกันด้วย เกิดเป็นแนวรอยต่อที่เรียกว่า ขอบเกรน (Grain Boundary) แสดงดังรูปที่ 2.4 ค) และเรียกพื้นที่ที่ถูกปิดล้อมรอบด้วยเส้นขอบเกรนนี้ว่า เกรน



รูปที่ 2.4 การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว

ก) การเกิดนิวเคลียส

ข) การโตของนิวเคลียสเป็นผลึก

ค) การเชื่อมต่อกันของผลึกเกิดเป็นเกรน และมีเส้นแบ่งขอบเกรน

ที่มา: รศ. แม้น (2547)

กระบวนการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลว ถ้าอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวมาก กล่าวคือโลหะหลอมเหลวเย็นตัวเร็ว ปริมาณของนิวเคลียสเริ่มต้นมีจำนวนมาก จำนวนเกรนที่เกิดขึ้นก็มากตามไปด้วย ส่งผลให้เกรนที่ได้มีขนาดเล็ก ได้โครงสร้างละเอียด แต่หากอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวต่ำ หรือโลหะหลอมเหลวเย็นตัวช้า ปริมาณนิวเคลียสเริ่มต้นมีจำนวนน้อย จำนวนเกรนที่เกิดขึ้นน้อย ส่งผลให้เกรน

มีขนาดใหญ่ ได้รับโครงสร้างที่หยาบ ในกระบวนการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวจากสถานะของเหลว ไปเป็นสถานะของแข็ง จะเกิดการแข็งตัวก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของโลหะลดลงต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เพื่อเป็นการลดพลังงานอิสระของระบบ ขณะที่ความแตกต่างของระดับพลังงานมีการเปลี่ยนแปลง ปริมาตรของโลหะหลอมเหลวแล้ว การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง (สุวรรณ, 2553)

กลไกการเกิดนิวคลีโอในโลหะหลอมเหลว ซึ่งเป็นอนุภาคขนาดเล็กๆ ที่อยู่ในโลหะหลอมเหลว มี 3 กลไก ดังนี้

### 2.3.1 กลไกการเกิดนิวคลีโอแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation)

กลไกการเกิดนิวคลีโอแบบเอกพันธ์ เป็นกลไกที่ง่ายที่สุดมักถูกนำมาพิจารณาก่อนเสมอ กล่าวคือ กลไกนี้เกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัวของโลหะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของจุดเยือกแข็ง สมดุล (Equilibrium Freezing Temperature) ของโลหะนั้นมากๆ นิวคลีโอที่เกิดขึ้นโดยกลไกนี้ จะเกิดการเคลื่อนตัวของอะตอมโลหะอย่างช้าๆ และเกิดพันธะระหว่างกันเรียกว่า เอ็มบริโอ (Embryo) และถ้าเกิดพันธะระหว่างกันจนกระทั่งมีขนาดที่มีความเสถียรภาพเรียกว่า ขนาดวิกฤต (Critical Size) ถ้าขนาดของเอ็มบริโอ มีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤต จะถูกละลายกลับเป็นโลหะหลอมเหลว แต่ถ้าเอ็มบริโอมีขนาดใหญ่มากกว่าขนาดวิกฤตเรียกว่า นิวคลีโอ ซึ่งจะอยู่ตัว และเติบโตเป็นผลึกต่อไป

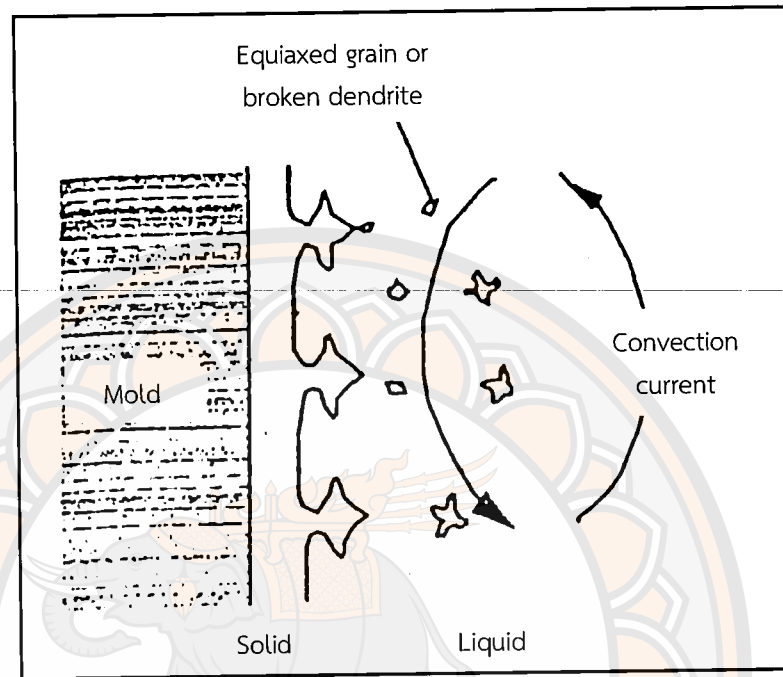
### 2.3.2 กลไกการเกิดนิวคลีโอแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Nucleation)

กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ เป็นกระบวนการเกิดนิวคลีโอจากสิ่งเจือปนในโลหะหลอมเหลว หรือพื้นผิวของแบบหล่อเป็นตัวช่วย การเกิดนิวคลีโอแบบนี้มักจะเกิดขึ้นบ่อยครั้ง กับงานหล่อโลหะมากกว่าการเกิดแบบเอกพันธ์ โดยสิ่งเจือปนจะเข้าไปทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอเทียม ซึ่งนิวคลีโอเทียมเหล่านี้มาจากผนังของแบบหล่อ วัสดุทนไฟที่ใช้ภายในเตา หรือเข้ารองรับโลหะหลอมเหลวที่กระแทกหลุดร่วง อนุภาคเหล่านี้มักอยู่ในลักษณะของสารแขวนลอย มีขนาดโตกว่ารัศมีวิกฤต และเป็นผลให้อะตอมของโลหะหลอมเหลวแพร่เข้ามารวมตัว และโตเป็นผลึกต่อไป (พรวสา, 2551)

### 2.3.3 กลไกการเกิดนิวคลีโอแบบสภาวะพลศาสตร์ (Dynamic Nucleation)

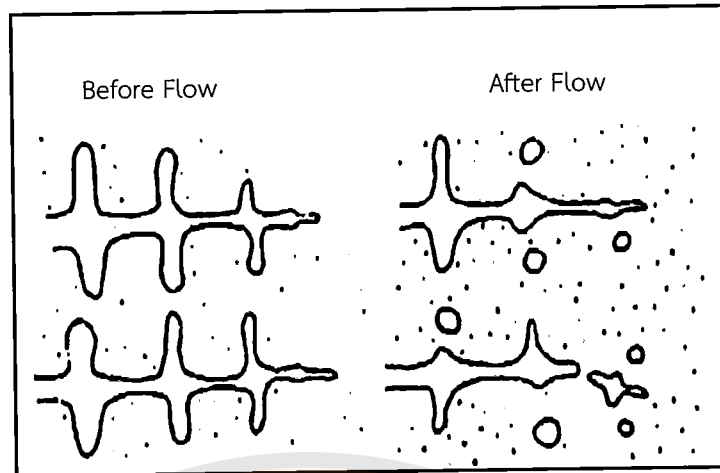
นอกจากกลไกการเกิดนิวคลีโอแบบเอกพันธ์ และวิวิธพันธ์แล้ว ยังพบว่าในสภาวะพลศาสตร์ หรือสภาวะที่เกิดการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการแข็งตัว ก็สามารถเกิดนิวคลีโอได้เช่นกัน โดยในระหว่างการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวโครงสร้างเดนไดรท์จะเกิดการแตกหัก (Crystal Fragmentation) และได้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นอิกซ์แอก (Equiaxed) เมื่อโลหะหลอมเหลวถูกเทลงแบบหล่อ จะเกิดการไหลวน เนื่องจากการเทรวมกับการไหลที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Solutal Convection) ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของโลหะหลอมเหลวบริเวณต่างๆ กล่าวคือโลหะหลอมเหลวในบริเวณที่ติดอยู่กับผนังแบบหล่อเป็นส่วนที่เย็นตัวเร็วกว่า จะมีความหนาแน่นมากกว่าโลหะหลอมเหลวที่อยู่ตรงกลางของแบบหล่อ ทำให้เกิดการไหลในทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วง ในขณะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง และของเหลว จะเกิดการไหลบริเวณผิวสัมผัส เนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดความแตกต่างของปริมาณตัวถูกละลาย (Solute) โดยทิศทางการไหลจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความหนาแน่น

ระหว่างตัวถูกละลาย และตัวทำละลาย (Solvent) เมื่อนำเอาผลมารวมกัน จะเกิดการเคลื่อนที่ของ โลหะหลอมเหลวบนผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง และของเหลว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการหลอมเหลวเฉพาะ จุด (Local Remelting) ของเดนไดรต์แบบแท่ง (Columnar Dendritic) และทำให้เกิดการแตกหัก ของเดนไดรต์ (Dendrite Fragmentation) แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ภาพจำลองการไหลที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และการเคลื่อนที่ของ เดนไดรต์จากผนังแบบหล่อเข้าสู่ใจกลางแบบหล่อ  
ที่มา: Stefanescu (2002)

โดยการเกิดแบบนี้ จะเกิดมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงของการเกิดการไหลเวียนโลหะหลอมเหลว (Convection) เช่น การทำให้สั้นสะเทือนด้วยคลื่นอัลตราโซนิก หรือการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็ก เป็นต้น กลไกการเกิดนิวคลีโอเมื่ออยู่ในสภาวะพลศาสตร์ เกิดขึ้นเมื่อนิวคลีโอของเดนไดรต์ขนาดเล็ก (Pre-Dendritic Nuclei) และเกิดขึ้นขณะเทโลหะหลอมเหลว โดยเดนไดรต์ขนาดเล็กดังกล่าว เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วบริเวณผนังแบบหล่อ และถูกพัดเข้าสู่โลหะหลอมเหลวบริเวณกลางแบบหล่อ จากการไหลที่รุนแรงในช่วงแรกของการเทโลหะหลอมเหลว เมื่อถูกพาเข้าสู่โลหะหลอมเหลว เดนไดรต์ขนาดเล็กบางส่วนจะถูกละลายกลับไปเป็นโลหะหลอมเหลว และเมื่อโลหะหลอมเหลวบริเวณกลางแบบหล่ออยู่ในสภาวะต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว เดนไดรต์ขนาดเล็กที่ยังเหลือ จะทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอ และเติบโตเป็นอิกวิแอค สามารถอยู่ได้โดยไม่ถูกละลายกลับ (Remelt) (Stefanescu, 2002) แสดงดังรูปที่ 2.6

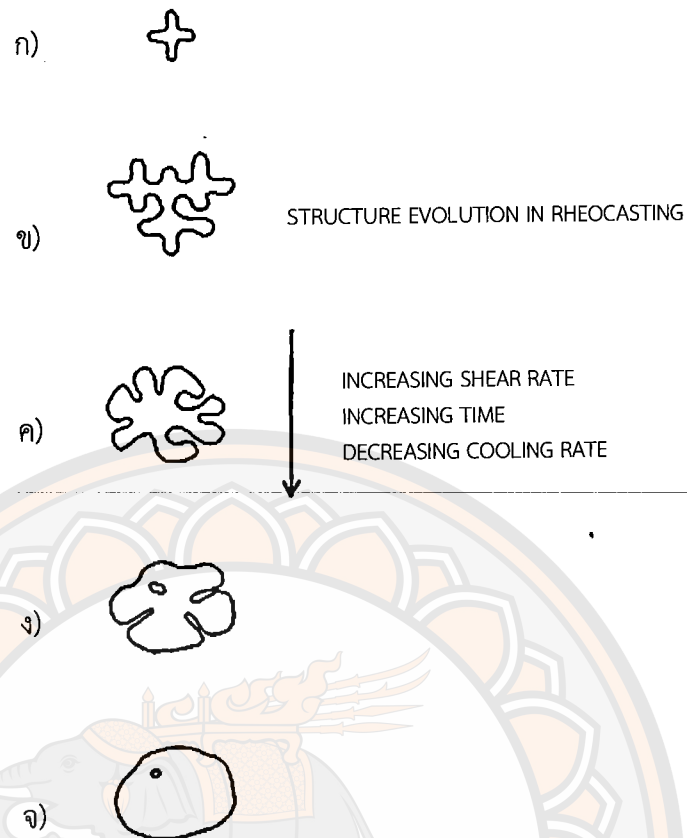


รูปที่ 2.6 ภาพจำลองการแตกหักของเดนไดรต์ เมื่อมีการไหลของโลหะหลอมเหลว  
ที่มา: Steube (1992)

## 2.4 กระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processing)

กระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งมีความแตกต่างจากเทคโนโลยีการขึ้นรูปโดยทั่วไป โดยการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งนี้จะมีสภาวะที่เป็นทั้งของเหลว และของแข็งอยู่ด้วยกัน กล่าวคือจะมีอนุภาคของของแข็งที่มีลักษณะไม่เป็นเดนไดรต์กระจายอยู่ในของเหลวโดย มีขั้นตอนในการปรับเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อจากเดิมที่เป็นเดนไดรต์ให้มีลักษณะกลมขึ้น ก่อนนำไปขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งโครงสร้างที่มีลักษณะกลมละเอียด และมีความเป็นเนื้อเดียวกันนั้น จะส่งผลให้สมบัติทางกลดีขึ้น และยังช่วยประหยัดพลังงาน เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งนี้ จะใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำ ทำให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ในลักษณะการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งลดการจับกับอากาศของโลหะหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ ทำให้ลดการเกิดโพรงอากาศ และจุดบกพร่องภายในชิ้นงาน ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานอีกด้วย (อาภาสัท, 2553)

ระหว่างการแข็งตัวในช่วงอุณหภูมิกึ่งแข็ง ภายใต้การปั่นป่วนอย่างรุนแรงกับระบบ เมื่อเพิ่มแรงเฉือน เพิ่มระยะเวลาในการกวนระบบ และลดอัตราการเย็นตัวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากลักษณะที่เป็นเดนไดรต์ ไปสู่โครงสร้างที่มีลักษณะกลมมากขึ้น เริ่มจากการเกิดนิวเคลียสขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 2.7 ก) จำนวนมาก จากนั้นนิวเคลียสโตขึ้นเป็นโครงสร้างที่เรียกว่าเดนไดรต์ แสดงดังรูปที่ 2.7 ข) เมื่อมีการปรับปรุงโครงสร้างในช่วงที่โลหะหลอมเหลวอยู่ในสถานะกึ่งแข็ง โดยเพิ่มแรงเฉือน เพิ่มระยะเวลาในการกวนระบบ และลดอัตราการเย็นตัวจะเกิดการแตกหักของเดนไดรต์ จากนั้นเดนไดรต์ที่แตกหักออกมาจะโตขึ้นเรื่อยๆ เมื่อได้รับแรงเฉือนอย่างต่อเนื่องระหว่างการแข็งตัว ส่งผลให้เดนไดรต์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างลักษณะเป็นแหกคล้ายกุหลาบ (Rosette-Like Structure) แสดงดังรูปที่ 2.7 ค) นอกจากนี้การโตอย่างต่อเนื่องของโครงสร้างลักษณะคล้ายแหกคล้ายกุหลาบ แสดงดังรูปที่ 2.7 ง) ระหว่างการเย็นตัวนี้ ถ้ามีแรงเฉือน และการเย็นตัวที่ช้าเพียงพอ ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายที่ได้มีลักษณะกลม แสดงดังรูปที่ 2.7 จ) (สุวรรณนา, 2553)

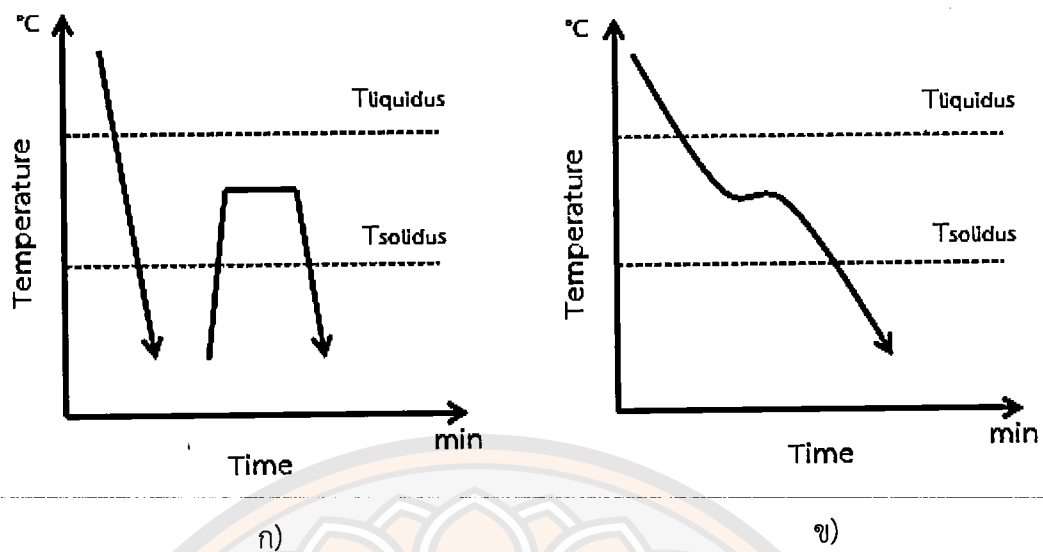


รูปที่ 2.7 การพัฒนาโครงสร้างที่เกิดขึ้นระหว่างการแข็งตัว ในสภาวะกึ่งแข็งภายใต้การปั่นป่วนอย่างรุนแรง

- ก) เกิดนิวเคลียสในช่วงแรก
- ข) นิวเคลียสโตเป็นโครงสร้างเดนไดรท์
- ค) โครงสร้างเดนไดรท์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างแฉกคล้ายกุหลาบ
- ง) โครงสร้างแฉกคล้ายกุหลาบโตขึ้น
- จ) โครงสร้างลักษณะกลม

ที่มา: กนกกาญจน์ (2553)

โดยทั่วไปกระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง สามารถแบ่งได้สองประเภท คือ ทิกโซคาสติง (Thixocasting) และรีโอคาสติง (Rheocasting) แผนภาพวิธีการทั้งสองกระบวนการ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพวิธีของกระบวนการ

ก) Thixocasting

ข) Rheocasting

ที่มา: อาภาสท์ (2553)

#### 2.4.1 กระบวนการทิกโซคาสติง

เป็นกระบวนการหล่อโลหะหลอมเหลวให้อยู่ในรูปของ Feedstock โดยมีการควบคุมระบบให้โลหะหลอมเหลวอยู่ในสภาวะกึ่งแข็งก่อนที่จะขึ้นรูปให้เป็น Feedstock ต่อจากนั้นมีการให้ความร้อนแก่ Feedstock ให้อยู่ในช่วงกึ่งแข็ง แล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต่อไป แสดงดังรูปที่ 2.8 ก) ในปัจจุบันกระบวนการทิกโซคาสติงถูกนำมาใช้งานทางการค้าน้อยเมื่อเทียบกับกระบวนการรีโอคาสติง เนื่องจากมีต้นทุนในการเตรียม Feedstock ในขั้นต้น และพลังงานในการให้ความร้อนแก่ Feedstock ในช่วงกึ่งแข็งก่อนนำไปขึ้นรูปสูง (อาภาสท์, 2553)

#### 2.4.2 กระบวนการรีโอคาสติง

เป็นการเตรียมโลหะในสภาวะกึ่งแข็งจากของเหลวโดยตรง เริ่มจากการหลอมโลหะจากนั้นทำให้เย็นตัวอยู่ในช่วงกึ่งแข็ง โดยมีการควบคุมระบบของโลหะหลอมเหลวระหว่างการเย็นตัว หรือมีการทำให้แกนของเดนไดรต์เกิดการแตกตัว จะได้โลหะหลอมเหลวที่มีอนุภาคของแข็งผสมอยู่ แล้วจึงนำไปขึ้นรูปชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.8 ข) และโครงสร้างของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการนี้มีลักษณะไม่เป็นเดนไดรต์แต่ได้โครงสร้างที่มีลักษณะกลมแทน

การเตรียมโลหะในสภาวะกึ่งแข็งในกระบวนการหล่อแบบรีโอคาสติง มีวิธีการเตรียมได้หลายวิธี เช่น

##### 2.4.2.1 การกวนโลหะหลอมเหลวโดยใช้แรงทางกล

วิธีการนี้เป็นการใช้แท่งกวนที่มีความเย็นในการกวนโลหะหลอมเหลว หรือการใช้ใบพัดกวนโลหะหลอมเหลว ในขณะที่โลหะหลอมเหลวอยู่ในสภาวะกึ่งแข็ง สิ่งที่ต้องการระวัง คือแท่งกวน หรือใบพัดกวนอาจเกิดการสึกหรอ และหลุดเข้าไปรวมอยู่กับโลหะหลอมเหลว ส่งผลให้เกิดสิ่งปนเปื้อน หรือเกิดออกไซด์ในโลหะหลอมเหลวได้

#### 2.4.2.2 การกวนโลหะหลอมเหลวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Stirring)

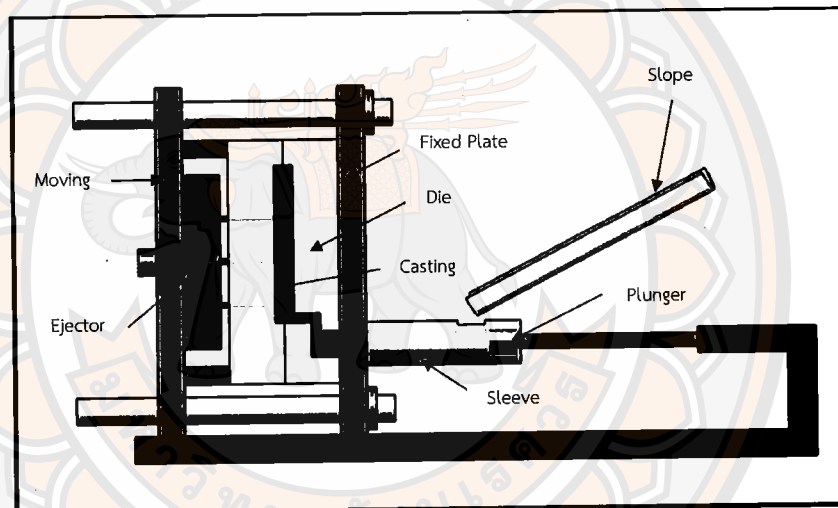
วิธีการนี้มีหลักการคล้ายกับการกวนโลหะหลอมเหลวด้วยแรงทางกล แต่วิธีนี้เป็นการใช้การเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทน โครงสร้างที่ได้มีลักษณะไม่เป็นเดนไดรต์ แต่มีลักษณะเป็นแฉกคล้ายกุหลาบแทน ซึ่งโครงสร้างที่ได้นี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก

#### 2.4.2.3 การเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ (Low Pouring Temperature)

วิธีการนี้เป็นการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่าเส้นลิกวิดัส (Liquidus Line) เล็กน้อย โครงสร้างที่ได้มีลักษณะเป็นอควิแอก และมีขนาดเกรนละเอียด

#### 2.4.2.4 การเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Plate Technique)

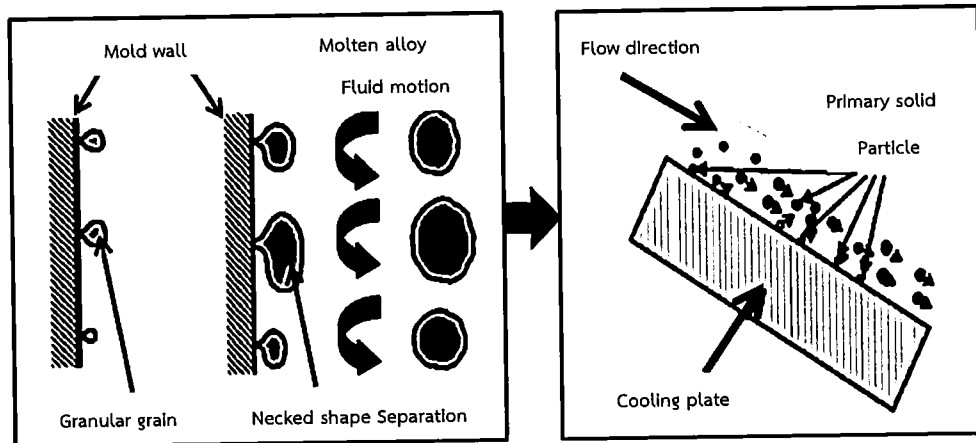
วิธีการนี้เป็นการเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น โดยทำให้โลหะหลอมเหลวเกิดการแข็งตัวบางส่วน หรืออยู่ในสภาวะกึ่งแข็งบนรางเทหล่อเย็นก่อนไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวระหว่างกระบวนการแข็งตัว และเกิดกลไกการแตกหักของแขนเดนไดรต์ (กนกกาญจน์, 2553) แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กระบวนการหล่อรีโอดีคาสต์ร่วมกับรางเทหล่อเย็น  
ที่มา: อาสาพร (2553)

### 2.5 กลไกการเกิดโครงสร้างลักษณะกลมบนรางเทหล่อเย็น

กลไกการเกิดโครงสร้างลักษณะกลมบนรางเทหล่อเย็นจะเกิดขึ้น เมื่อเทโลหะหลอมเหลวไหลผ่านรางเทหล่อเย็นเกิดการสูญเสียความร้อนไปตามผนังรางเทหล่อเย็น ส่งผลให้เกิดนิวเคลียสที่บริเวณผิวสัมผัสของผิวหน้าระหว่างโลหะหลอมเหลวกับรางเทหล่อเย็น เนื่องจากผลของโลหะหลอมเหลวที่ไหลผ่านลงมาตามรางเทหล่อเย็นจะดึงผลึกนิวเคลียสที่เกิดขึ้นดังกล่าว กลับเข้าไปนอนอยู่ในโลหะหลอมเหลวอีก กล่าวคือผลึกแยกตัวออกมา และกลับเข้าไปรวมกับโลหะหลอมเหลวอีกครั้ง แสดงดังรูปที่ 2.10 นอกจากนี้อุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวที่บริเวณปลายรางก่อนไหลเข้าสู่แม่พิมพ์มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิลิกวิดัสของโลหะผสม เป็นผลให้ปริมาณสัดส่วนของแข็ง (Volume Fraction of Solid) ที่เกิดขึ้นก่อนการขึ้นรูปสูง เกรนที่ได้จึงมีขนาดเล็กกว่ากระบวนการหล่อที่ไม่ผ่านรางเทหล่อเย็น (สุวรรณ, 2553)



รูปที่ 2.10 การเกิดโครงสร้างลักษณะกลมบนรางเทหล่อเย็น

ที่มา: กนกกาญจน์ (2553)

## 2.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

โครงสร้างจุลภาค คือโครงสร้างของโลหะที่มีกำลังขยาย 100 เท่า การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเป็นการศึกษาถึงขนาด รูปร่าง การจัดเรียงตัวของผลึก และลักษณะเกรน ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะนั้นจะนำไปใช้ในการเลือกวัสดุมาใช้งานให้เหมาะสมกับความต้องการ เพราะวัสดุแต่ละชนิดมีสมบัติที่ต่างกัน

เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุทึบ การศึกษาพื้นที่ ปัจจัยรูปร่าง การจัดเรียงตัวของผลึก และลักษณะเกรนนั้นจึงต้องตัดชิ้นงานตามแนวที่ต้องการ แล้วนำไปขัดผิวของชิ้นงานที่จะตรวจสอบด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220, 320, 400 และขัดไปจนถึงเบอร์ 1200 ตามลำดับนำไปกัดกรด โดยกรดจะกัดตามขอบเกรนรุนแรงกว่าบริเวณอื่นๆ ของผลึก เพราะขอบเกรนเป็นส่วนที่มีข้อบกพร่องมากที่สุด หลังจากการกัดกรดแล้วขอบเกรนจะถูกกัดเป็นร่อง เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ การสะท้อนของลำแสงที่ตกกระทบเกรน และขอบเกรนหักเหออกนอกทิศทางเดิม

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะมีลักษณะของกล้อง แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งสามารถช่วยให้มนุษย์มองเห็นรายละเอียดได้สูงสุดในระดับของช่วงแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ คือ 400-700 นาโนเมตรเพียงเท่านั้น (หรือที่ตีที่สุดก็อยู่ในช่วงระดับความละเอียด 200-400 นาโนเมตร) (วิรุจน์, 2553) โดยผู้ที่ตรวจสอบจำเป็นต้องศึกษาการทำงานของกล้องจุลทรรศน์จากคู่มือการใช้เครื่องให้เข้าใจ และเกิดทักษะเสียก่อน จึงค่อยเริ่มลงมือทดสอบ โดยมีขั้นตอนดังนี้

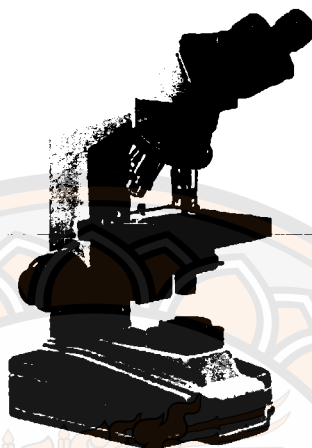
2.6.1 วางชิ้นงานบนที่วางของกล้องจุลทรรศน์ ที่วางชิ้นงานนี้สามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลง และเคลื่อนที่ไปทางซ้าย-ขวาได้ ทั้งนี้เพื่อการปรับขึ้นตรวจสอบให้ตรงกับเลนส์วัตถุ และยังเป็นการปรับระยะชัดเจนของภาพอีกด้วย

2.6.2 เปิดสวิตช์ และปรับความเข้มของแสงตามต้องการ

2.6.3 ปรับระยะชัดเจนของภาพ (Focus) สามารถทำการปรับได้ 2 ระบบคือ การปรับหยาบ (Coarse Focus Control) จะสามารถปรับระยะชัดของภาพได้รวดเร็ว แต่จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ แต่สำหรับการปรับละเอียด (Fine Focus Control) นั้นจะได้ภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้นภายหลังการปรับหยาบ และจะไม่มีผิดพลาดเกิดขึ้นเลย

2.6.4 เมื่อได้ภาพที่ชัดเจนแล้ว จึงถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคนั้นไว้ เพื่อใช้ในการศึกษาต่อไป โดยลักษณะของภาพที่ได้ จะเห็นในลักษณะของภาพ 2 มิติ

2.6.5 เมื่อต้องการหยุดการทำงาน ให้ปิดสวิตช์ และนำชิ้นงานออกจากที่วาง ควรระวังไม่ให้ชิ้นงานกระทบกับเลนส์วัตถุ เพราะอาจจะทำให้เลนส์นั้นมีรอยเกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การมองภาพไม่ชัดเจน



รูปที่ 2.11 กล้องจุลทรรศน์อเล็กตรอนแบบแสง  
ที่มา: มานพ (2535)

## 2.7 ขนาดเกรน

ขนาดเกรนจะขึ้นอยู่กับจำนวนของนิวเคลียส และพื้นที่ในการโตของเกรน ถ้าจำนวนนิวเคลียสมาก รวมทั้งพื้นที่ในการโตของเกรนน้อย ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็ก ลักษณะละเอียด แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าจำนวนนิวเคลียสน้อย พื้นที่ในการโตของเกรนมีมาก ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น สุดท้ายเกรนจึงหยาบมากขึ้น อัตราการเย็นตัวก็มีผลต่อการเกิดนิวเคลียส ถ้าอัตราการเย็นตัวเร็ว นิวเคลียสก็จะเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็ก ลักษณะละเอียด แต่ถ้าอัตราการเย็นตัวช้า นิวเคลียสก็จะเกิดได้น้อย ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ ลักษณะหยาบ

นอกจากนี้เกรนที่มีขนาดเล็ก หรือใหญ่อาจเกิดจากปัจจัยอีกหลายประการ เช่น การมีธาตุผสมบางธาตุที่เป็นตัวเริ่มการเกิดนิวเคลียส ตัวอย่างในการผลิตเหล็กกล้า ถ้าใส่ธาตุแมกนีเซียมลงไปก่อนการแข็งตัว ธาตุแมกนีเซียมจะทำให้นิวเคลียสเกิดเป็นจำนวนมากในโลหะหลอมเหลวก่อนการแข็งตัว ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็ก ละเอียด

## 2.8 ปัจจัยรูปร่าง

ปัจจัยรูปร่างเป็นจำนวนมิติที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปร่างจากกล้องจุลทรรศน์ที่อธิบายรูปร่างของอนุภาคที่ไม่สมมาตร ปัจจัยรูปร่างจะคำนวณจากการวัดขนาดเกรนได้แก่ การวัดอนุภาคแบบ 2 มิติ ที่มาจากรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ ปัจจัยที่มีรูปร่างปกติในช่วงค่าจาก 0-1 ถ้าเท่ากับหนึ่งมักจะเป็นจะสมมาตร เช่น วงกลม ทรงกลม สี่เหลี่ยม หรือก้อน

ปัจจัยรูปร่างส่วนใหญ่เป็นเป็นอัตราส่วนของฟังก์ชันของเกรนขนาดใหญ่ และเกรนขนาดเล็ก แสดงดังสมการที่ 2.1

$$A_r = \frac{d_{min}}{d_{max}} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $d_{min}$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุด  
 $d_{max}$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด

การหาค่าปัจจัยรูปร่างเป็นอัตราส่วนของฟังก์ชันเส้นรอบรูป  $p$  และพื้นที่  $A_r$  แสดงดังสมการที่

2.2

$$F_{cric} = \frac{4\pi A_r}{p^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $F_{cric}$  คือปัจจัยรูปร่าง  
 $p$  คือเส้นรอบรูป

ผลจากการคำนวณการหารูปร่างความกลมค่าที่คำนวณได้เท่ากับ 1 แสดงว่าขนาดของรูปร่างมีความกลม และถ้าผลจากการคำนวณได้ค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่ามีความกลมที่ต่ำลง

## 2.9 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิว ในการทดสอบความแข็งไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำการทดสอบได้กับทุกวัสดุ การทดสอบความแข็งส่วนใหญ่เป็นการวัดแรงที่กระทำเทียบกับรอยกดที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำนั้นด้วยกระบวนการเคลื่อนหัวกดลงบนวัสดุ ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบรอยกด

หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการเกิดเป็นรอยกด ซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่างๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอล แบบกรวยปลายมน หรือแบบปิรามิด ซึ่งปกติหัวกดทำจากเหล็กกล้าชุบแข็ง หรือเพชร และใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักคงที่ โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดรอยกดตามที่กำหนด หรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น

### 2.9.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

การทดสอบแบบบริเนล เป็นการทดสอบความแข็งที่ถูกนำมาใช้มาอย่างยาวนานที่สุด ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบน้ำหนักคงที่ ในการกดหัวกดเหล็กกล้าชุบแข็งกดลงบนพื้นผิวชิ้นทดสอบ โดยปกติจะใช้หัวกดลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง หรือทั้งสแตนคาร์ไบด์ขนาด 10 มิลลิเมตร กดลงบนผิวชิ้นทดสอบด้วยน้ำหนักกด 3000 กิโลกรัมแรงสำหรับโลหะแข็ง 1500 กิโลกรัมแรงสำหรับโลหะที่มีความแข็งปานกลาง และ 500 กิโลกรัมแรง หรือต่ำกว่าสำหรับวัสดุที่อ่อนนุ่ม เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดนั้นมีระดับความแข็งที่แตกต่างกัน และเพื่อป้องกันรอยกดที่ลึกจนเกินไป

ในการวัดค่าความแข็งแรงการกดหัวบอลลงบนผิวชิ้นงานจะเกิดการแปรรูปถาวรของเนื้อวัสดุ บริเวณใต้หัวกดแสดงดังรูปที่ 2.12 โดยทำการกดหัวบอลลงบนผิวชิ้นงานเป็นเวลาประมาณ 30 วินาที หลังจากนั้นปล่อยน้ำหนัก และหัวกดออก แล้วทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด จำนวน 2 ค่า โดยใช้กล้องที่มีกำลังขยายต่ำ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จะถูกนำมาคำนวณค่าความแข็งแรง จากค่าน้ำหนักกดหารด้วยพื้นที่ผิวของรอยกดที่เกิดขึ้นจากสมการที่ 2.3

$$HB = \frac{P}{\left(\frac{\pi D}{2}\right)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{P}{\pi D t} \quad (2.3)$$

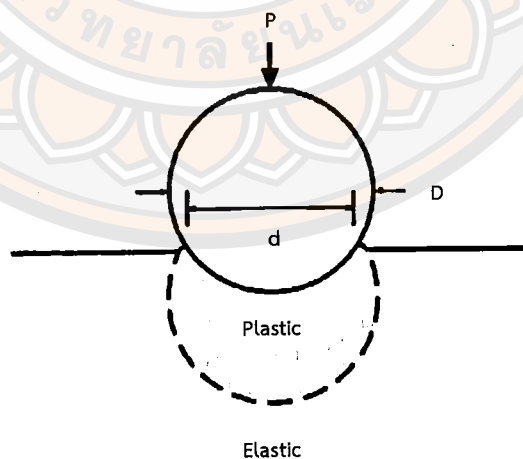
เมื่อ P คือน้ำหนักกด (กิโลกรัมแรง)

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวบอล (มิลลิเมตร)

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (มิลลิเมตร)

t คือความลึกของรอยกด (มิลลิเมตร)

โดยทั่วไปแล้ว ควรมีการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบความแข็งแรงโดยการปรับสภาพผิวของชิ้นงานให้ราบเรียบ และปราศจากเศษโลหะ หรือสิ่งสกปรกตกค้าง เพราะปัจจัยเหล่านี้ อาจทำให้ได้ค่าความแข็งแรงที่วัดได้ไม่ถูกต้อง ส่วนข้อดีของการวัดความแข็งแรงแบบบริเนล คือการใช้ขนาดของหัวกดที่มีขนาดใหญ่จะทำให้สามารถวัดความแข็งแรงของชิ้นงานมีความแตกต่างทางโครงสร้างมากๆ หรือมีโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอ (Microstructural Heterogeneity) ได้ และหากพื้นผิวของชิ้นงานมีรอยขีดข่วน (Scratch) หรือผิวหยาบ (Roughness) เพียงเล็กน้อยก็จะเป็นผลทำให้ค่าความแข็งแรงที่ได้ผิดพลาด แต่การวัดความแข็งแรงแบบบริเนลนี้อาจมีความผิดพลาดจากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่เกิดขึ้นได้จากตัวผู้วัดเอง และยังมีข้อจำกัดในการวัดชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 2.12 การแปรรูปถาวรของเนื้อวัสดุบริเวณใต้หัวกดแบบบริเนล  
ที่มา: ฐานนิยม (2554)

### 2.9.2 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดที่ทำจากเพชร (Diamond) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกรวยปลายมน ทำมุมด้านในเท่ากับ 120 องศา และใช้หัวกดบอล โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดต่างกัน อยู่ในช่วง 1.6-12.7 มิลลิเมตร เนื่องจากการทดสอบแบบร็อคเวลนี้มีหัวกดหลายขนาด และการใช้แรงกดที่ต่างกัน จึงสามารถเลือกใช้หัวกด และแรงกดที่เหมาะสม จากการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลสามารถอ่านค่าความแข็งได้ทันทีจากหน้าปัดเครื่องตามมาตรฐานที่ ASTM E 18 แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล  
ที่มา: วีระชัย (2550)

### 2.9.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิด ฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีมุมของปลายแหลม 136 องศา และน้ำหนักกดที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 5-120 กิโลกรัมแรง การทดสอบนี้มีหลักการเดียวกันกับการทดสอบความแข็งแบบบริเนล คือค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของ รอยกด แสดงดังสมการที่ 2.4 และสมการที่ 2.5

$$HV = \frac{2P \sin(\theta/2)}{d^2} \quad (2.4)$$

ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ

$$HV = \frac{1.854P}{d^2} \quad (2.5)$$

เมื่อ P คือน้ำหนักกด (กิโลกรัมแรง)

d คือความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ย (มิลลิเมตร)

$\theta$  คือมุมระหว่างหน้าตรงข้าม เท่ากับ 136 องศา

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Taghavi และ Ghassemi (2009) ได้ทำการศึกษามุมของรางเทหล่อเย็นต่อโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 พบว่าเมื่อเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็นที่มุม 30 องศากับระนาบพื้น พบโครงสร้างเดนไดรท์ มีลักษณะละเอียด เมื่อเพิ่มมุมของรางเทหล่อเย็นเป็น 40 และ 50 องศา พบว่าโครงสร้างเดนไดรท์สามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้างลักษณะกลมได้ เนื่องจากการเพิ่มมุมของรางเทหล่อเย็นทำให้แรงเฉือน และอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนเฟสของแข็งที่เกิดขึ้นบนรางเทหล่อเย็นมีมาก จึงทำให้โครงสร้างมีลักษณะกลม แต่เมื่อเพิ่มมุมของรางเทหล่อเย็นเป็น 60 องศา พบว่าโครงสร้างมีลักษณะกลมแต่ขนาดของเฟสปฐมภูมิหยาบกว่าที่มุม 40 และ 50 องศา เนื่องจากแรงเฉือน และอัตราการการถ่ายเทความร้อนลดลง ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าบนรางเทหล่อเย็น ส่งผลให้นิวคลีโอเกิดขึ้นน้อย มีพื้นที่ในการโตน้อย จึงทำให้โครงสร้างมีลักษณะกลมแต่ขนาดของเฟสปฐมภูมิหยาบกว่า

Kang และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ พบว่า การใช้ความเร็วฉีดที่ 0.15-0.53 เมตรต่อวินาที มีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีลักษณะค่อนข้างกลมเช่นเดียวกันทุกความเร็วฉีด นอกจากนี้ยังพบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณใกล้ทางเข้าโลหะหลอมเหลวมีปริมาณสัดส่วนของของแข็งมากกว่าบริเวณปลายของชิ้นงาน และพบการแยกตัวของของเหลวเกิดขึ้นที่บริเวณด้านปลายของชิ้นงาน เพราะว่าเฟสของแข็ง และเฟสของเหลวที่ไหลเข้าช่องว่างของแม่พิมพ์มีความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน โดยเฟสของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าเฟสของแข็ง จึงทำให้เกิดการแยกตัวของเฟสทั้งสองเกิดขึ้นขณะโลหะในสภาวะกึ่งแข็งไหลเข้าแม่พิมพ์ นอกจากนี้ยังพบว่าการแยกตัวของเฟสของเหลวเกิดขึ้นกับชิ้นงานทุกๆ ความเร็วฉีด โดยการใช้ความเร็วฉีดต่ำมีผลทำให้เกิดการแยกตัวของของเหลวเกิดขึ้นกับชิ้นงานมากกว่าการใช้ความเร็วฉีดสูง ดังนั้นจึงส่งผลให้ความแข็ง ความแข็งแรง และการยึดตัวของชิ้นงาน ในแต่ละตำแหน่งไม่สม่ำเสมอ เนื่องมาจากโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอในแต่ละบริเวณของชิ้นงาน

Guan และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษามุมของรางเทหล่อเย็น พบว่ามุมของรางเทหล่อเย็นมีผลต่อการกระจายตัวของโลหะหลอมเหลว โดยเมื่อมุมของรางเทเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิที่ปลายรางเทหล่อเย็นเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อมุมเพิ่มขึ้นทำให้โลหะหลอมเหลวไหลบนรางเทหล่อเย็นได้เร็วขึ้น ส่งผลให้นิวคลีโอที่เกิดขึ้นบนรางเทหล่อเย็นมีน้อย จึงทำให้ได้โครงสร้างเป็นเดนไดรท์

Ghomashchi และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาโดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวที่ 615, 630, 645, 675 และ 695 องศาเซลเซียสพบว่า เมื่อเทโลหะหลอมเหลวด้วยอุณหภูมิสูง (695 องศาเซลเซียส) ลงสู่แม่พิมพ์ โครงสร้างเป็นเดนไดรท์มากขึ้น เมื่อลดอุณหภูมิเทเหลือ 645 องศาเซลเซียส โครงสร้างเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ และมีลักษณะหยาบ แต่เมื่อลดอุณหภูมิเทเหลือ 615 องศาเซลเซียส โครงสร้างเดนไดรท์สามารถเปลี่ยนให้มีลักษณะกลมได้ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยเมื่อเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ความหนาแน่นของเกรนที่เกิดขึ้นสูงสามารถปรับปรุงรูปร่างลักษณะ และลดขนาดเกรนได้ เนื่องจากมีนิวคลีโอเพิ่มขึ้น เกรนจึงมีขนาดเล็กและมีความกลม

Guo และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิเท และความเร็วหมุนของท่อทรงกระบอก พบว่า เมื่อเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง (680 องศาเซลเซียส) ผ่านท่อทรงกระบอกที่ทำมุม 20 องศากับระนาบพื้น และท่อทรงกระบอกหมุนด้วยความเร็ว 90 รอบต่อนาที ได้โครงสร้างเดนไดรท์ขนาดละเอียด เมื่อลดอุณหภูมิเทเหลือ 670 องศาเซลเซียส ได้โครงสร้างลักษณะแฉกคล้ายกุหลาบ

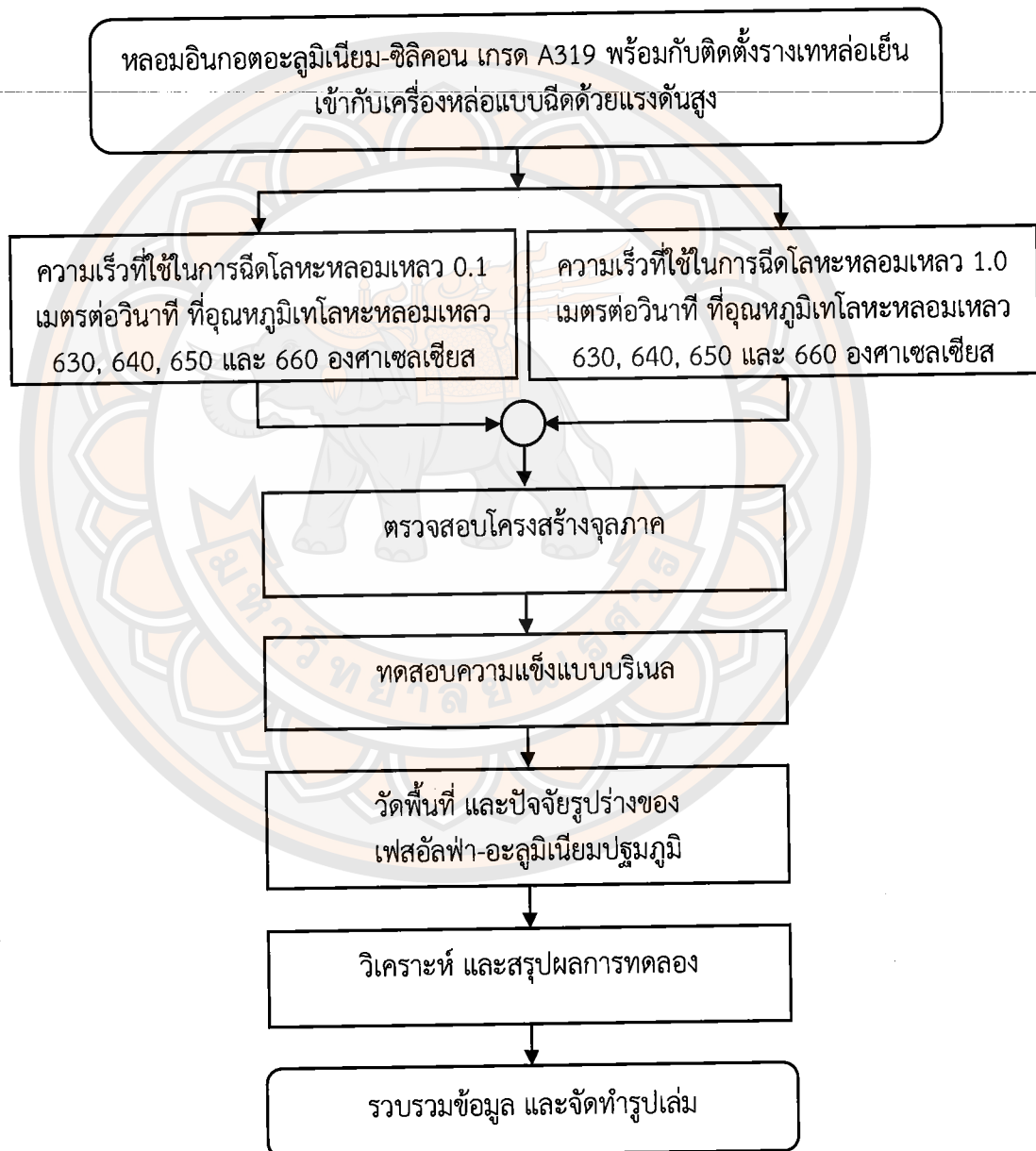
และเมื่อใช้อุณหภูมิโลหะหลอมเหลว 660-645 องศาเซลเซียส ได้โครงสร้างที่มีลักษณะกลม และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากเมื่อโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ มีผลทำให้นิวคลีโอสามารถโตต่อไปได้ ความหนาแน่นของนิวคลีโอจึงมีมาก เกรนจึงมีขนาดเล็ก และมีความกลมมากขึ้น

สุทธิพงษ์ และศศิธร (2549) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของกระบวนการหล่อโลหะอะลูมิเนียม โดยการจำลองการเท โดยมีอุณหภูมิเทของโลหะหลอมเหลวที่ 620, 660, 700 และ 740 องศาเซลเซียส ในการจำลองเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิแตกต่างกันพบว่า อุณหภูมิเทของโลหะหลอมเหลวในแม่พิมพ์มีผลต่อการไหล และการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว เมื่อใช้อุณหภูมิเท 620 องศาเซลเซียส โลหะหลอมเหลวที่ไหลตัวในแม่พิมพ์จะมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว ส่งผลให้น้ำโลหะแข็งตัวก่อนเต็มแม่พิมพ์ เมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นโลหะหลอมเหลวที่ไหลตัวในแม่พิมพ์จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว ส่งผลให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้ดี และเต็มแม่พิมพ์ แต่อะลูมิเนียมมีอุณหภูมิหลอมสูงจะมีปริมาณไฮโดรเจนมากขึ้นงานจึงมีผิวหยาบ และมีความแข็งแรงลดลง

Ghomashchi (1993) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลการไหลของโลหะหลอมเหลวต่อโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานของอะลูมิเนียมผสม LM24 ที่ผ่านกระบวนการฉีดด้วยแรงดันสูง โดยได้มีการปรับเปลี่ยนความเร็วของทางเข้าโลหะหลอมเหลวพบว่า เมื่อความเร็วของทางเข้าโลหะหลอมเหลวเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณของโครงสร้างเดนไดรต์ขนาดใหญ่ลดลง และพบเดนไดรต์ที่มีขนาดเล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วของทางเข้าโลหะหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้เวลาการเติมเต็มโลหะหลอมเหลวเข้าแม่พิมพ์สั้นลง จึงทำให้เดนไดรต์ไม่มีเวลาการรวมตัวกันเป็นเดนไดรต์ขนาดใหญ่ ปริมาณเดนไดรต์ขนาดใหญ่จึงลดลง ส่งผลให้สมบัติทางกลดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ลักษณะ และปริมาณของเฟสยูเทคติก ไม่ขึ้นกับความเร็วของทางเข้าโลหะหลอมเหลวคือ เมื่อความเร็วของทางเข้าโลหะหลอมเหลวเพิ่มขึ้นพบว่า ซิลิคอนจะมีลักษณะเป็นเส้นๆ (Fibrous) เหมือนกันทุกๆ ความเร็วที่เปลี่ยนแปลง โดยเฟสของยูเทคติกจะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวในระหว่างการแข็งตัวของโลหะผสม

### บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ

สำหรับวิธีการดำเนินโครงการจะกล่าวถึง ขั้นตอนการดำเนินโครงการ วัสดุ และอุปกรณ์ โดยขั้นตอนการดำเนินงานในการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิและความเร็วฉีดที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับร่างเทหล่อเย็น แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

### 3.1 วัสดุ และอุปกรณ์

#### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินโครงการ

วัสดุที่ใช้ในการดำเนินโครงการ คือโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A319 ซึ่งมี ส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A319 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

เกรด	อะลูมิเนียม	ซิลิกอน	ทองแดง	แมกนีเซียม	เหล็ก	แมงกานีส	ไทเทเนียม
A319	89.0273	6.0	3.8	0.36	0.5	0.30	0.0127

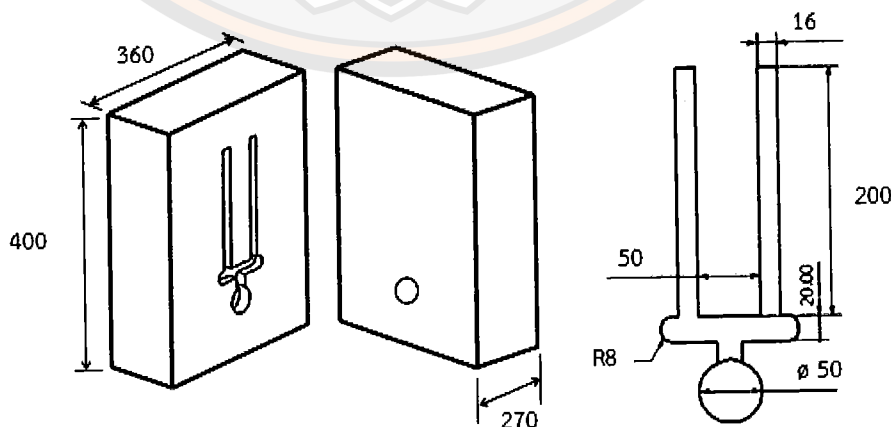
#### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินโครงการ

##### 3.1.2.1 เครื่องหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูง ขนาด 100 ตัน แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูง

##### 3.1.2.2 แม่พิมพ์เหล็กกว้าง 360 มิลลิเมตร ยาว 400 มิลลิเมตรหนา 270 มิลลิเมตร และมีขนาดของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์เหล็ก (หน่วยมิลลิเมตร)



28

3.1.2.3 รางเทหล่อเย็นทำจากเหล็กกล้ามีความชัน 45 องศากับระนาบพื้น และมีความยาว 30 เซนติเมตร หล่อเย็นด้วยน้ำ แสดงดังรูปที่ 3.4

15884809

สำนักหอสมุด

28 ส.ย. 2555



รูปที่ 3.4 รางเทหล่อเย็น

3.1.2.4 เครื่องตัดชิ้นงาน

3.1.2.5 เครื่องขัดโลหะ

3.1.2.6 กระดาษทราย เบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200

3.1.2.7 ผงขัดอะลูมินา (Alumina) ความละเอียดขนาด 1 ไมครอน

3.1.3 สารเคมี

3.1.3.1 กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid) ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดย

ปริมาตร

3.1.3.2 น้ำกลั่น

3.1.4 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการดำเนินโครงการงาน

3.1.4.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.1.4.2 กล้องถ่ายรูป

3.1.4.3 เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล

3.1.4.4 โปรแกรมวัดพื้นที่เกรน

## 3.2 ขั้นตอนการดำเนินโครงการงาน

3.2.1 ศึกษาทฤษฎี และรวบรวมข้อมูล

ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 กระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น กระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง และปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และการทดสอบความแข็ง

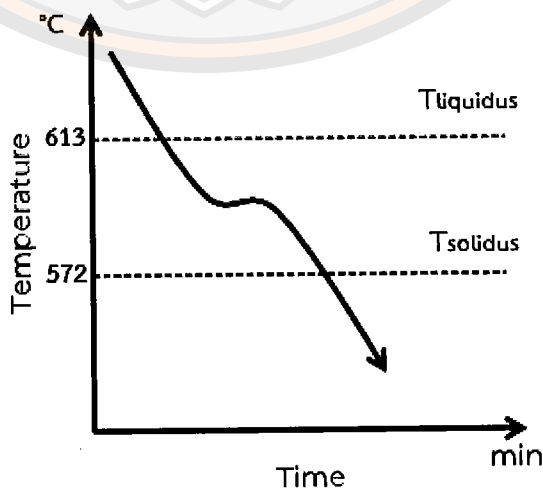
3.2.2 ขั้นตอนการหล่อขึ้นงาน

ขั้นตอนการหล่อขึ้นงานนั้นจะทำโดยติดตั้งรางเทหล่อเย็นเข้ากับเครื่องหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูง โดยรางเทหล่อเย็นทำมุม 45 องศา กับระนาบพื้น และให้ปลายรางเทติดกับช่องใส่โลหะหลอมเหลวของเครื่อง แสดงดังรูปที่ 3.5 และปรับความเร็วฉีดของเครื่องตามการทดลอง คือ 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการหลอมเริ่มจากนำอินกอตอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 มาหลอมในเตาหลอม ที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิช่วงกึ่งแข็งของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A319 แสดงดังรูปที่ 3.6 เมื่ออุณหภูมิโลหะหลอมเหลวได้ตามต้องการ จึงตักโลหะหลอมเหลวออกจากเตาหลอม เมื่ออุณหภูมิโลหะหลอมเหลวลดลงตามที่กำหนดไว้ในกาการทดลองคือ 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส จึงเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็นเข้าช่องใส่โลหะหลอมเหลวของเครื่องหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูง จากนั้นฉีดขึ้นรูปชิ้นงานที่ 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที โดยจะหล่อขึ้นงาน อุณหภูมิละ 3 ชั้น และปล่อยให้เย็นตัวเมื่อได้ชิ้นงานที่เย็นตัวแล้ว นำชิ้นงานมาตัดเพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค



รางเทหล่อเย็น

รูปที่ 3.5 การติดตั้งรางเทหล่อเย็นเข้ากับเครื่องหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูง



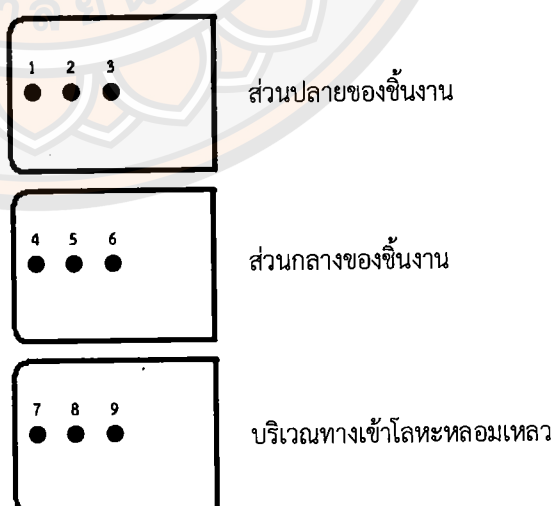
รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงอุณหภูมิของกระบวนการรีโอบาคาล์ง

### 3.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยนำชิ้นงานที่ตัดมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค 3 ตำแหน่ง คือส่วนปลายของชิ้นงาน ส่วนกลางของชิ้นงาน และบริเวณทางเข้าโลหะหลอมเหลว โดยส่วนปลายของชิ้นงานห่างจากด้านบนประมาณ 25 มิลลิเมตร ส่วนกลางของชิ้นงานห่างจากด้านบนสุดประมาณ 85 มิลลิเมตร และบริเวณทางเข้าโลหะหลอมเหลวห่างจากด้านล่างสุดประมาณ 25 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.7 มาขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ แล้วขัดมันด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอะลูมินา ขนาด 1 ไมครอน จากนั้นนำมากัดกรดไฮโดรฟลูออริก ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร เป็นเวลา 10 วินาที นำชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำสะอาด และเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทั้งหมด 9 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 3.8 จากนั้นทำการวัดพื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฏุมภูมิ ด้วยโปรแกรมวัดพื้นที่เกรน บันทึกผล



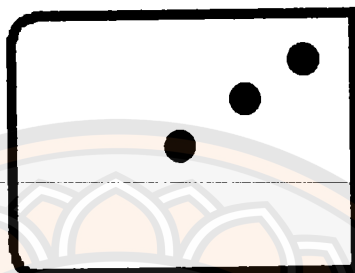
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทดสอบความแข็ง



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

### 3.2.4 ทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็ง จะนำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในข้างต้น มาทำการขีดให้เป็นระนาบเดียวกัน จากนั้นทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล ซึ่งจะคำนวณค่าความแข็งได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด โดยใช้หัวกดบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร น้ำหนักทดสอบ 187.5 กิโลกรัมแรง กดลงบนชิ้นงาน 3 จุด จุดละประมาณ 15 วินาที แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งชิ้นงานที่ใช้ทดสอบความแข็ง

### 3.2.5 วิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลการดำเนินโครงการ

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และความแข็ง ที่อุณหภูมิเท และความเร็วฉีดต่างกัน ของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น

### 3.2.6 สรุปผล และจัดทำรูปเล่ม

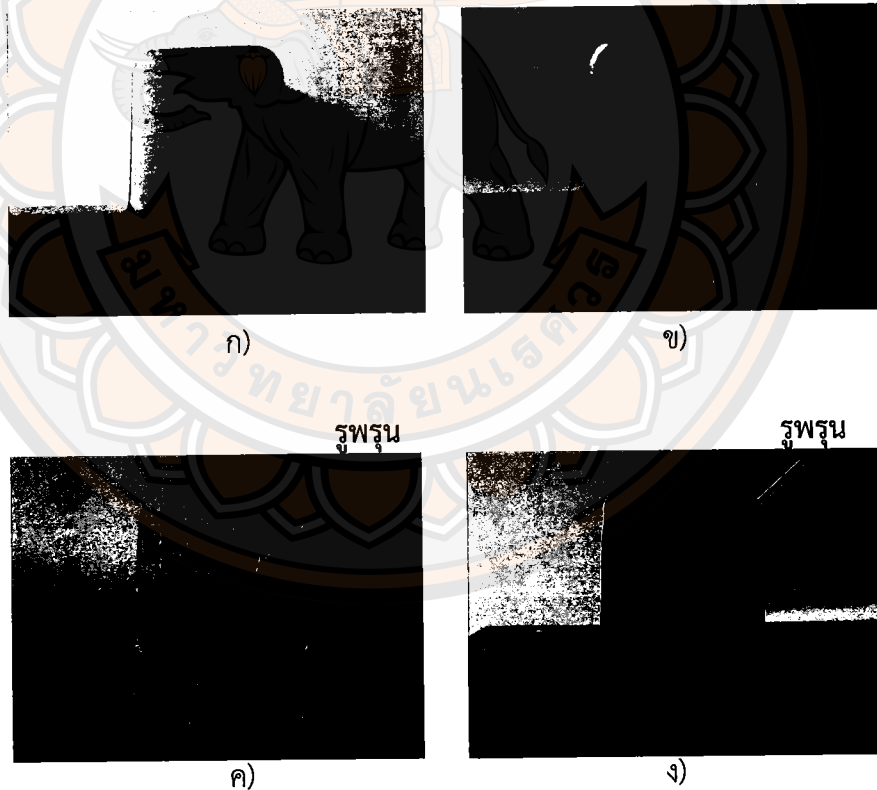
สรุปผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และความแข็ง จัดทำรูปเล่ม เพื่อรายงานผลการทดลอง

## บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองของการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิและความเร็วฉีดของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็นโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 4.1 ลักษณะของชิ้นงาน

จากการนำชิ้นงานแต่ละส่วนมาตรวจสอบลักษณะของชิ้นงาน เพื่อศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ พบว่าการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดรูพรุน โดยที่อุณหภูมิ 630 และ 640 องศาเซลเซียส ไม่พบรูพรุนที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าภายในชิ้นงาน แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 650 และ 660 องศาเซลเซียส พบว่ามีรูพรุนเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง โลหะหลอมเหลวไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับอากาศ จึงทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ขึ้น ขณะที่โลหะหลอมเหลวฟิล์มออกไซด์จะเกิดการม้วนตัวก่อนเข้าสู่แม่พิมพ์ จึงทำให้มีรูพรุนเกิดขึ้นในชิ้นงาน



รูปที่ 4.1 ลักษณะของชิ้นงานที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที

- ก) อุณหภูมิ 630 องศาเซลเซียส
- ข) อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส
- ค) อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส
- ง) อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส

เมื่อศึกษาปัจจัยของความเร็วฉีด พบว่าการปรับเปลี่ยนความเร็วฉีดมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ โดยที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที จะไม่พบโพรงอากาศที่สามารถมองด้วยตาเปล่าภายในชิ้นงาน แต่เมื่อเพิ่มความเร็วฉีดเป็น 1.0 เมตรต่อวินาที พบว่ามีโพรงอากาศเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.2 เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วฉีดขึ้นเป็น 1.0 เมตรต่อวินาที ส่งผลให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าแม่พิมพ์ในลักษณะปั่นป่วนมากกว่าที่ความเร็วฉีดต่ำ ทำให้โลหะหลอมเหลวตกจับกับอากาศในแม่พิมพ์ได้มาก ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดโพรงอากาศได้มากกว่า



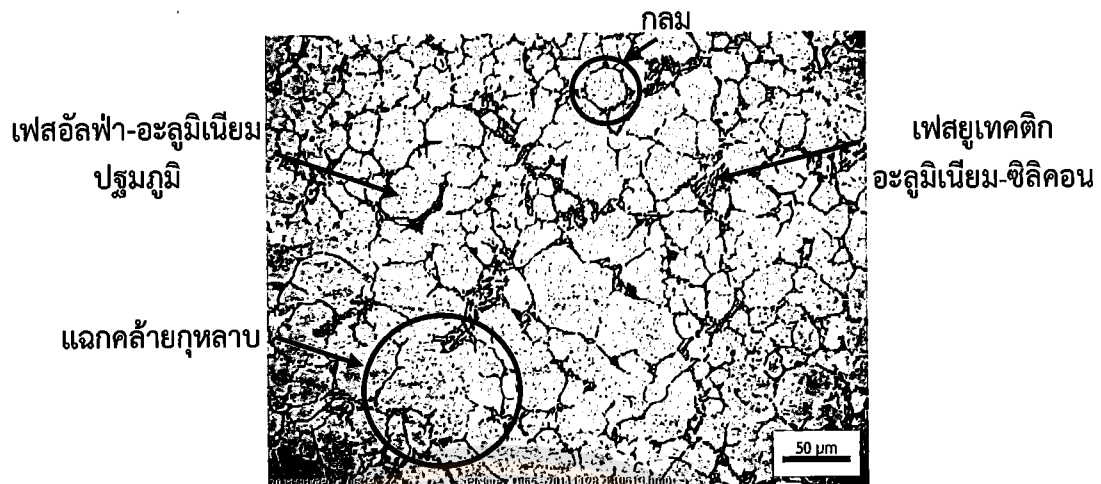
รูปที่ 4.2 ลักษณะชิ้นงานอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ก) ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที

ข) ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที

#### 4.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

จากการนำชิ้นงานแต่ละส่วนมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาค โดยทำการทดลองเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็นด้วยกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูง ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary  $\alpha$ -Al) ในส่วนที่เป็นสีขาว มีลักษณะกลม (Globular) และเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosette-Like Structure) และพบเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si) ในส่วนสีดำสลับขาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.3



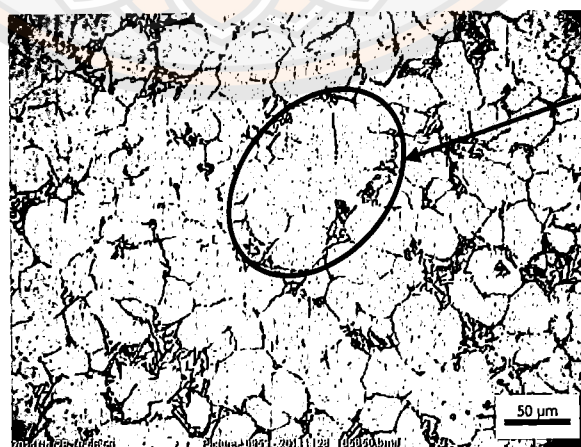
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคในงานหล่อ

#### 4.2.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส

จากการนำชิ้นงานแต่ละส่วนมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค เพื่อศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิเท พบว่าการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทมีผลต่อพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ซึ่งจากการศึกษาพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิเท 660 และ 650 องศาเซลเซียส พบว่าพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 4.4 ก) และรูปที่ 4.4 ข) ซึ่งมีค่าของพื้นที่เฉลี่ยอยู่ในช่วง 1191.265-1208.293 ตารางไมครอน

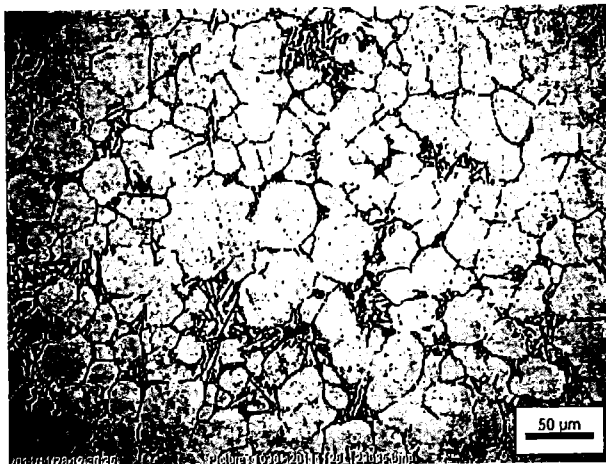
ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส พบพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีขนาดเล็กลงเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 4.4 ค) ซึ่งมีค่าของพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 1187.452 ตารางไมครอน

ที่อุณหภูมิเท 630 องศาเซลเซียส พบพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีขนาดเล็กลง แสดงดังรูปที่ 4.4 ง) ซึ่งมีค่าของพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 1118.039 ตารางไมครอน โดยพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเทเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.5



ก)

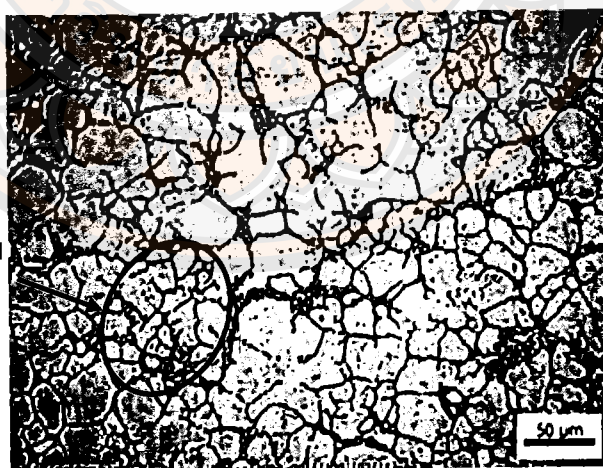
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิเทต่างกัน  
ก) อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส



ข)



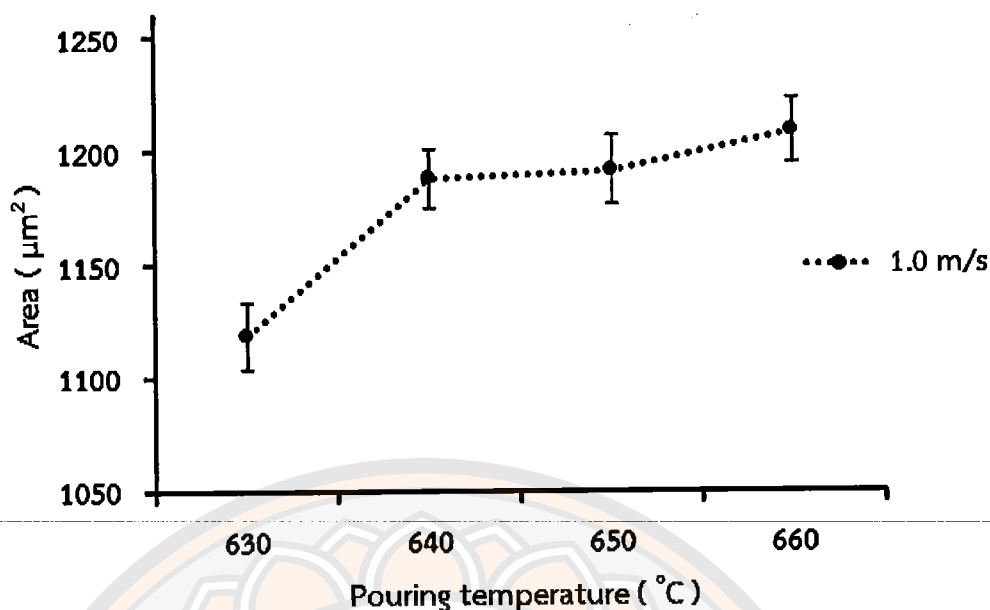
ค)



ง)

เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม  
ปฐุมภูมิ ขนาดเล็ก

รูปที่ 4.4 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ความเร็วฉีดยิ่ง 1.0 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน  
 ข) อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส  
 ค) อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส  
 ง) อุณหภูมิ 630 องศาเซลเซียส

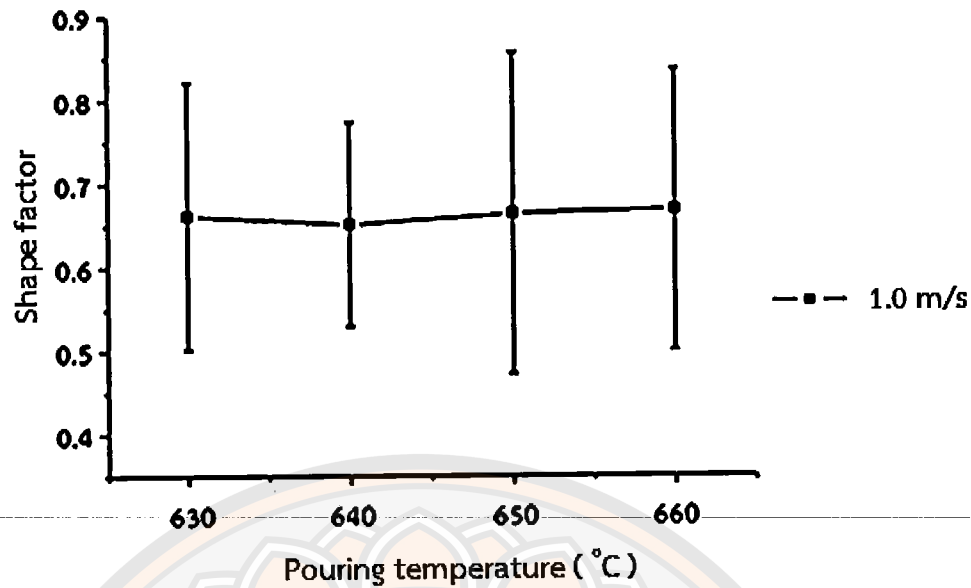


รูปที่ 4.5 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส

ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิเทต่ำผ่านรางเทหล่อเย็น มีผลทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างโลหะหลอมเหลว กับผิวของรางเทหล่อเย็น โดยที่ผิวของรางเทหล่อเย็น มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของโลหะหลอมเหลว จึงเกิดนิวคลีไอขึ้นบนผิวของรางเทหล่อเย็น และเมื่อได้รับแรงเฉือนจากโลหะหลอมเหลวที่ไหลผ่านรางเทหล่อเย็น นิวคลีไอเหล่านี้จะหลุดออกจากผิวของรางเทหล่อเย็นมาปะปนอยู่กับโลหะหลอมเหลว ส่งผลให้จำนวนของนิวคลีไอที่เกิดขึ้นมีมาก สัดส่วนของแข็งเกิดมาก จึงทำให้เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีโครงสร้างลักษณะกลม ขนาดเล็ก และเป็นແກคລ້າຍກຸຫລາບ

แต่เมื่อเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงผ่านรางเทหล่อเย็น นิวคลีไอที่หลุดออกจากผิวของรางเทหล่อเย็นมีโอกาสที่จะหลอมกลับเข้าไปในโลหะหลอมเหลวได้ เนื่องจากโลหะหลอมเหลวยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ ส่งผลให้จำนวนของนิวคลีไอที่เกิดขึ้นมีน้อย สัดส่วนของแข็งเกิดได้น้อย ทำให้โครงสร้างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีลักษณะกลม ขนาดใหญ่ และเป็นແກคລ້າຍກຸຫລາບ

จากการศึกษาปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส พบว่าการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทไม่มีผลต่อปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ โดยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ส่วนใหญ่มีลักษณะใกล้เคียงกัน คือมีลักษณะกลม และเป็นແກคລ້າຍກຸຫລາບปะปนอยู่ด้วยบางส่วน โดยค่าปัจจัยรูปร่างเฉลี่ยที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส จะอยู่ในช่วง 0.676-0.632 เนื่องจากเป็นการใช้กรรมวิธีการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงแบบเดียวกัน โดยลักษณะการหล่อมีการใช้รางเทหล่อเย็นเดียวกัน จึงส่งผลให้ค่าปัจจัยรูปร่างที่ได้ออกมาใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.6



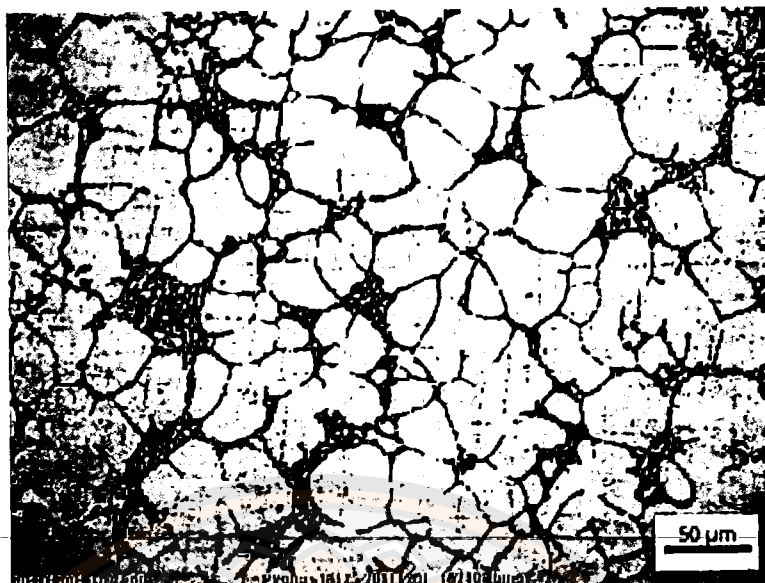
รูปที่ 4.6 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบลักษณะของเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน พบว่าอุณหภูมิเท ไม่มีผลต่อลักษณะของเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีลักษณะเป็นเส้นสั้น ละเอียด เหมือนกันในทุกๆ อุณหภูมิเท แสดงดังภาคผนวก ก.

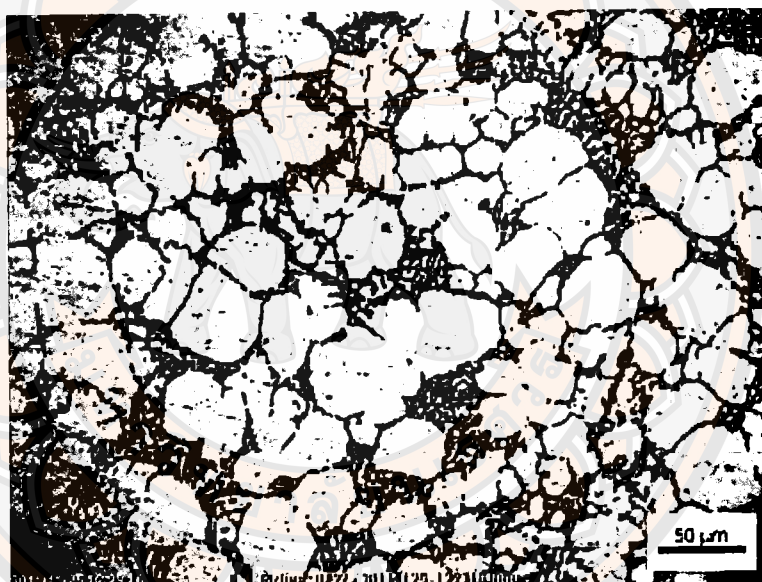
#### 4.2.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที

จากการนำชิ้นงานแต่ละส่วนมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค เพื่อศึกษาปัจจัยของความเร็วจิต พบว่าการปรับเปลี่ยนความเร็วจิตมีผลต่อพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ซึ่งจากการศึกษาพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่ความเร็วจิตต่างกัน โดยที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ความเร็วจิต 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที พบว่าพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมีขนาดใหญ่ ซึ่งมีค่าของพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 1218.154 และ 1208.293 ตารางไมครอน ตามลำดับ

อุณหภูมิเท 650 องศาเซลเซียส พบว่าที่ความเร็วจิต 0.1 เมตรต่อวินาที เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีขนาดใหญ่กว่าที่ความเร็วจิต 1.0 เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งมีค่าของพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 1234.236 และ 1191.265 ตารางไมครอน ตามลำดับ



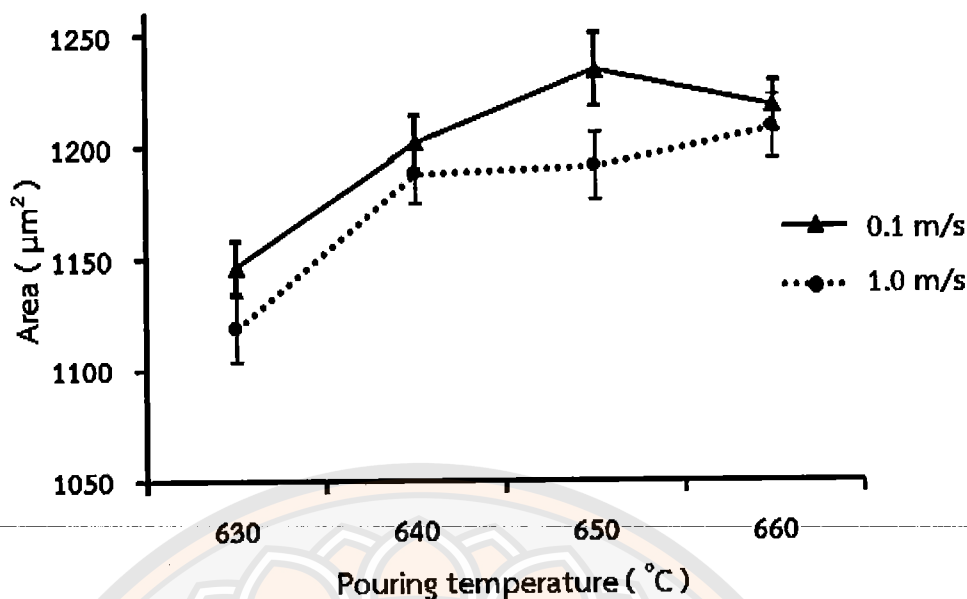
ก)



ข)

รูปที่ 4.7 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐุมภูมิ ที่อุณหภูมิเท 650 องศาเซลเซียส  
 ก) ความเร็วฉืด 0.1 เมตรต่อวินาที  
 ข) ความเร็วฉืด 1.0 เมตรต่อวินาที

อุณหภูมิเท 640 และ 630 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วฉืด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที พบพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐุมภูมิ มีขนาดเล็ก และมีค่าของพื้นที่เฉลี่ยใกล้เคียงกันของแต่ละความเร็วฉืด โดยที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส มีค่าของพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 1201.865 และ 1187.452 ตารางไมครอน ตามลำดับ และที่อุณหภูมิเท 630 องศาเซลเซียส มีค่าของพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 1146.166 และ 1118.039 ตารางไมครอน ตามลำดับ ซึ่งค่าพื้นที่เฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเร็วฉืดเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.8

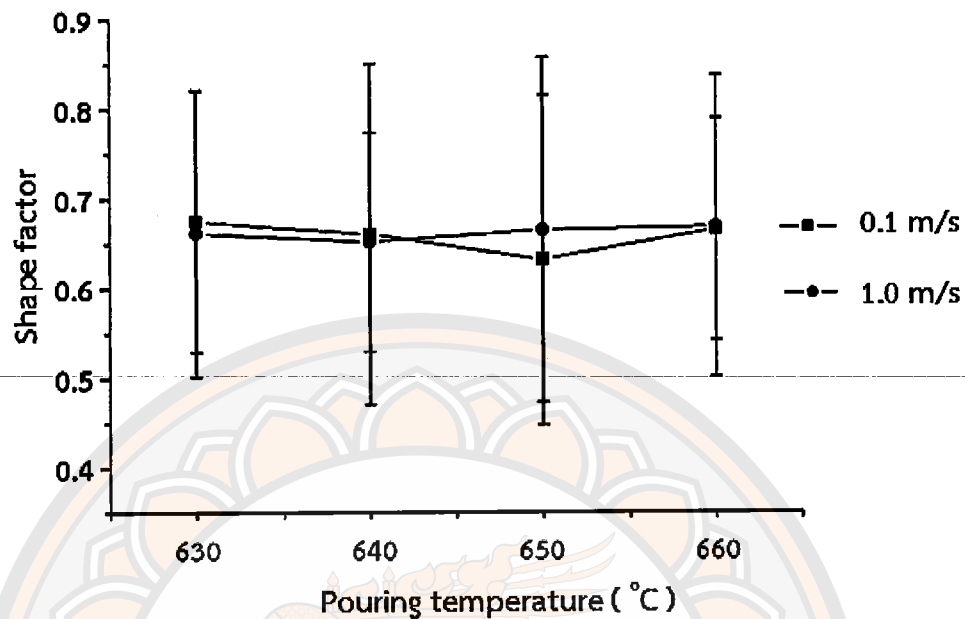


รูปที่ 4.8 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่ความเร็วฉีด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส

ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากขณะที่โลหะหลอมเหลวไหลจากรางเทหล่อเย็นลงสู่ช่องรับน้ำโลหะ จะเกิดการสูญเสียความร้อนเพราะช่องรับน้ำโลหะมีอุณหภูมิต่ำกว่าโลหะหลอมเหลว ส่งผลให้โลหะหลอมเหลวที่ติดกับผนังของช่องรับน้ำโลหะเย็นตัวเร็วกว่าจึงเกิดนิวคลีไอที่ผนังของช่องรับน้ำโลหะ เมื่อมีการฉีดโลหะหลอมเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์ด้วยกระบอกสูบของตัวเครื่อง ทำให้มีแรงเฉือนเกิดขึ้น นิวคลีไอที่ผนังของช่องรับน้ำโลหะจึงถูกพัดเข้ามาพร้อมกับโลหะหลอมเหลวในสภาวะกึ่งแข็งก่อนการฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ เมื่อโลหะหลอมเหลวถูกเทลงแม่พิมพ์ จะเกิดการไหลวนของโลหะหลอมเหลวแล้วไหลสู่บริเวณกลางแม่พิมพ์ ในช่วงแรกของการเทโลหะหลอมเหลว นิวคลีไอบางส่วนจะถูกละลายกลับไปเป็นโลหะหลอมเหลว และเมื่อโลหะหลอมเหลวบริเวณกลางแม่พิมพ์อยู่ในสภาวะต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว จะมีนิวคลีไอที่ยังเหลืออยู่เติบโตต่อไปโดยไม่ละลายกลับ ซึ่งที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที แรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีน้อย นิวคลีไอจากผนังของช่องรับน้ำโลหะจะหลุดจากผนังของช่องรับน้ำโลหะไปพร้อมกับโลหะหลอมเหลวในสภาวะกึ่งแข็งได้น้อย ส่งผลให้โครงสร้างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีพื้นที่ขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที ซึ่งความเร็วฉีดที่เพิ่มขึ้น แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจึงมีมาก นิวคลีไอที่ผนังของช่องรับน้ำโลหะถูกพัดเข้ามาพร้อมกับโลหะหลอมเหลวในสภาวะกึ่งแข็งได้มาก ส่งผลให้โครงสร้างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีพื้นที่ขนาดเล็ก

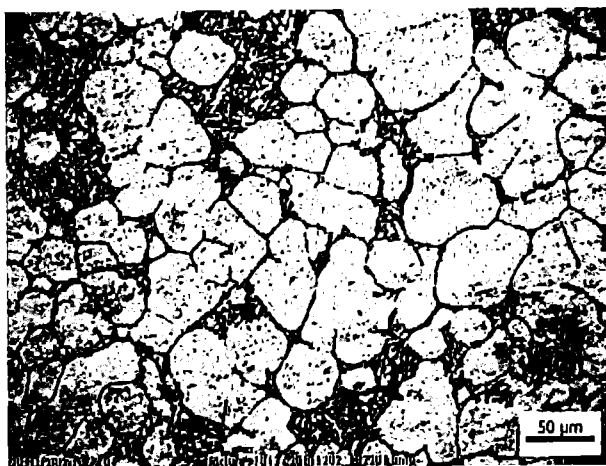
การศึกษาปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่ความเร็วฉีด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที พบว่าความเร็วฉีดมีผลน้อยต่อปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ซึ่งลักษณะรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของแต่ละความเร็วฉีด ส่วนใหญ่มีลักษณะกลม และเป็นเอกลักษณ์หลายบางส่วน แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งค่าปัจจัยรูปร่างเฉลี่ยของความเร็วฉีด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกันจะอยู่ในช่วง 0.676-0.632 เนื่องจากการใช้กรรมวิธีการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงแบบเดียวกัน และการ

หลอมมีการใช้รางเทหล่อเย็นชนิดเดียวกัน จึงส่งผลให้ค่าปัจจัยรูปร่างที่ได้ออกมาใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.9

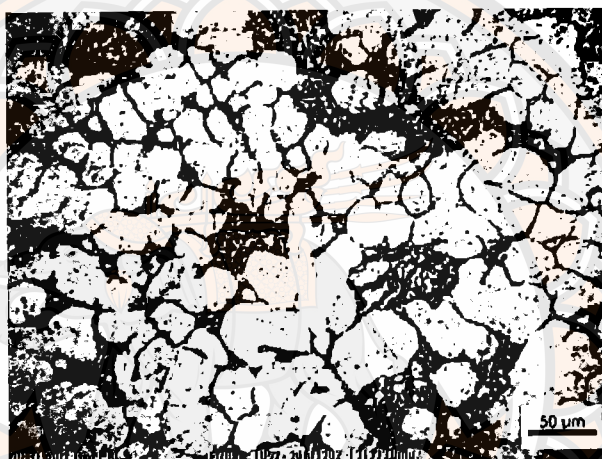


รูปที่ 4.9 ค่าปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่ความเร็วฉีด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส

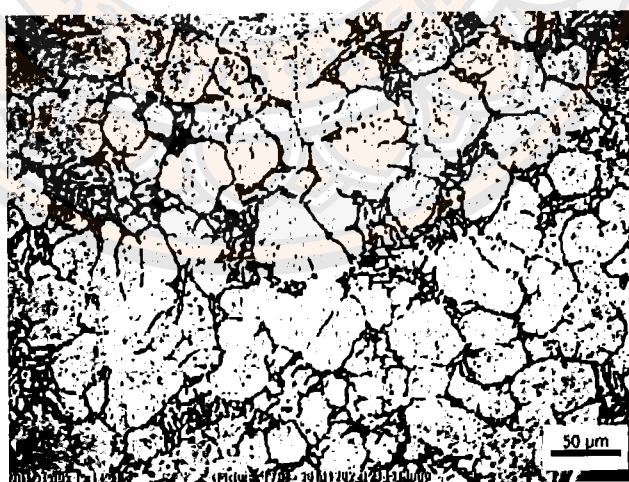
จากการเปรียบเทียบปริมาณของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่ความเร็วฉีดต่างกัน พบว่าความเร็วฉีดมีผลต่อปริมาณของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ในแต่ละส่วนของชิ้นงาน โดยที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที บริเวณส่วนปลายของชิ้นงาน มีปริมาณของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิน้อยกว่าส่วนกลางของชิ้นงาน และบริเวณทางเข้าโลหะหลอมเหลว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเฟสของแข็ง (เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ) และเฟสของเหลว (โลหะหลอมเหลว) ที่ไหลเข้าช่องว่างของแม่พิมพ์มีความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน โดยเฟสของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าเฟสของแข็ง จึงทำให้เกิดการแยกตัวของเฟสทั้งสองเกิดขึ้นขณะโลหะในสภาวะกึ่งแข็งไหลเข้าแม่พิมพ์ และที่ความเร็วฉีดต่ำ แรงดันในการดันเฟสของแข็ง เข้าสู่บริเวณส่วนปลายของชิ้นงานมีน้อย ส่งผลให้ส่วนปลายของชิ้นงานมีปริมาณเฟสของแข็งน้อยกว่าส่วนกลางของชิ้นงาน และบริเวณทางเข้าโลหะหลอมเหลว แสดงดังรูปที่ 4.10 แต่เมื่อเพิ่มความเร็วฉีดเป็น 1.0 เมตรต่อวินาที พบว่าทั้งสามส่วนของชิ้นงาน มีปริมาณของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิใกล้เคียงกัน เนื่องจากที่ความเร็วฉีดสูง แรงดันในการดันเฟสของแข็งเข้าสู่บริเวณส่วนปลายของชิ้นงานมีมาก ส่งผลให้ส่วนปลายของชิ้นงาน ส่วนกลางของชิ้นงาน และบริเวณทางเข้าโลหะหลอมเหลว มีปริมาณของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิใกล้เคียงกัน ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kang (2006) ที่กล่าวว่า การใช้ความเร็วฉีดต่ำโครงสร้างจุลภาคบริเวณใกล้ทางเข้าโลหะหลอมเหลวมีปริมาณเฟสของแข็งมากกว่าบริเวณปลายชิ้นงาน มีผลทำให้เกิดการแยกตัวของเฟสของแข็ง และของเหลว เกิดขึ้นมากกว่าที่ความเร็วฉีดสูง แต่ที่ความเร็วฉีดสูง แรงดันในการดันเฟสของแข็งเข้าสู่ชิ้นงานมีมาก ส่งผลให้มีปริมาณของเฟสของแข็ง ทั้งสามส่วน มีปริมาณใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.11



ก)



ข)



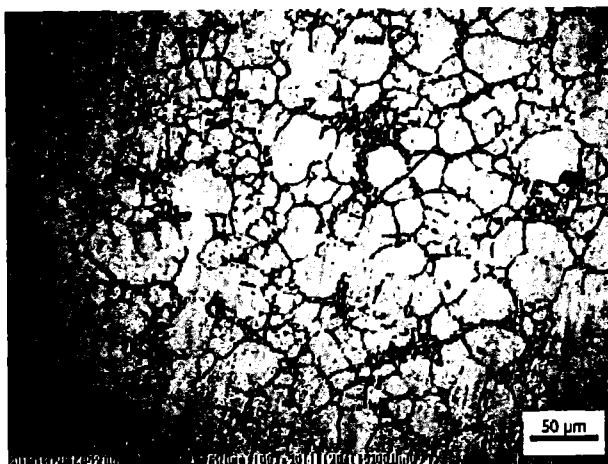
ค)

รูปที่ 4.10 ปริมาณของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที

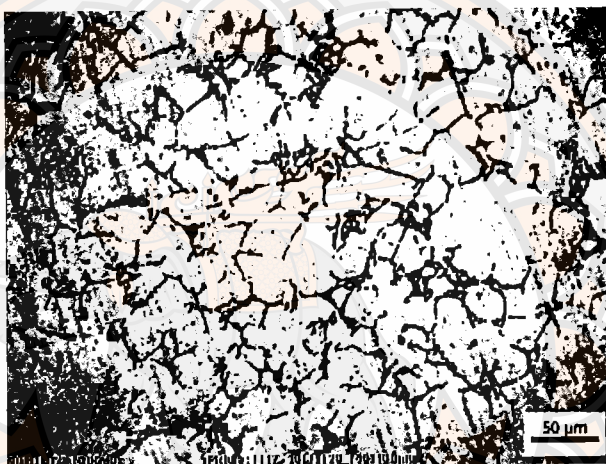
ก) ส่วนปลายของชิ้นงาน

ข) ส่วนกลางของชิ้นงาน

ค) บริเวณทางเข้าโลหะหลอมเหลว



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.11 ปริมาณของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีดยิ่ง 1.0 เมตรต่อวินาที

ก) ส่วนปลายของชิ้นงาน

ข) ส่วนกลางของชิ้นงาน

ค) บริเวณทางเข้าโลหะหลอมเหลว

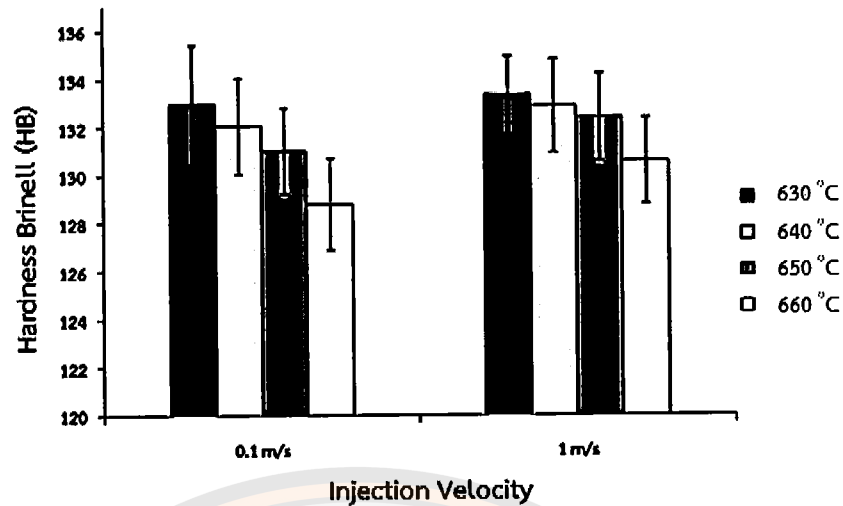
จากการเปรียบเทียบลักษณะของเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน พบว่าความเร็วฉีกไม่มีผลต่อลักษณะของเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน มีลักษณะเป็นเส้นสั้น ละเอียด เหมือนกันในทุกๆ ความเร็วฉีก แสดงดังภาคผนวก ก. ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ghomashchi (1993) ที่กล่าวว่าลักษณะ และปริมาณของเฟสยูเทคติกไม่ขึ้นกับความเร็ทางเข้าโลหะหลอมเหลว

### 4.3 ความแข็ง

จากการนำชิ้นงานแต่ละส่วนมาทดสอบความแข็ง โดยทดลองเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็นด้วยกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูง ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีก 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ด้วยการทดสอบความแข็งแบบบริเนล พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง ตามการเพิ่มของอุณหภูมิเท และค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเร็วฉีกลดลง

#### 4.3.1 ผลการทดสอบความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส

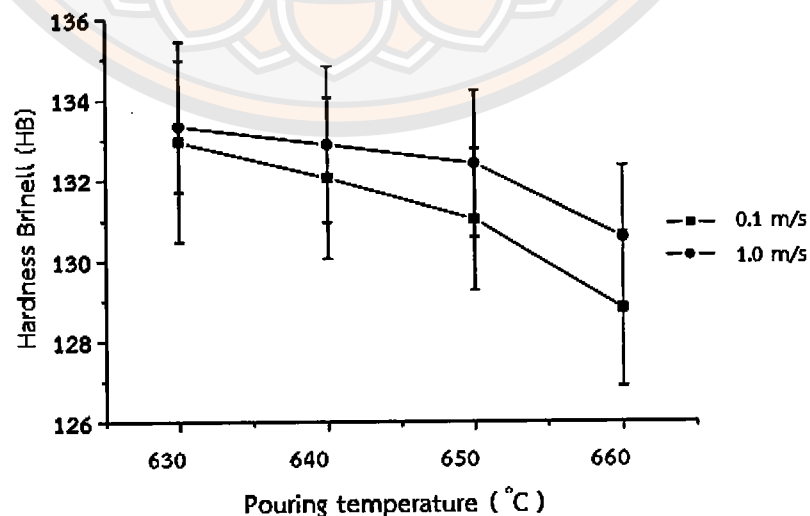
จากการนำชิ้นงานแต่ละส่วนมาทดสอบความแข็ง เพื่อศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิเท พบว่าการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทมีผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งจะมีค่าเท่ากับ 133.334, 132.887, 132.404 และ 130.581 HB ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง ตามการเพิ่มของอุณหภูมิเท แสดงดังรูปที่ 4.12 เนื่องจากค่าความแข็งขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาคของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ซึ่งจากการศึกษาพื้นที่ของโครงสร้างจุลภาคของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิเทสูง พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีขนาดใหญ่กว่าที่อุณหภูมิเทต่ำ ประกอบกับที่อุณหภูมิเทสูงจะพบเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีลักษณะโครงสร้างเป็นเดนไดรท์เกิดขึ้นบางส่วนของชิ้นงาน แสดงดังภาคผนวก ก ดังนั้นจึงทำให้ชิ้นงานที่อุณหภูมิเทสูงมีค่าความแข็งต่ำกว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิเทต่ำ เนื่องจากกระบวนการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลว ถ้าอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวสูง กล่าวคือโลหะหลอมเหลวมีการเย็นตัวเร็ว ปริมาณของนิวเคลียสเริ่มต้นมีจำนวนมาก จำนวนเกรนที่เกิดขึ้นก็มากตามไปด้วย ส่งผลให้พื้นที่มีขนาดเล็ก ได้โครงสร้างละเอียด แต่หากอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวต่ำ กล่าวคือโลหะหลอมเหลวเย็นตัวช้า ปริมาณนิวเคลียสเริ่มต้นมีจำนวนน้อย จำนวนเกรนที่เกิดขึ้นน้อย ส่งผลให้พื้นที่มีขนาดใหญ่ ได้โครงสร้างที่หยาบ ส่งผลให้ชิ้นงานที่อุณหภูมิเทสูงมีค่าความแข็งต่ำกว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิเทต่ำ



รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที

#### 4.3.2 ผลการทดสอบความแข็งของอะลูมิเนียมผสมเกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที

จากการนำชิ้นงานแต่ละส่วนมาทดสอบความแข็ง เพื่อศึกษาปัจจัยของความเร็วจัด พบว่าการปรับเปลี่ยนความเร็วฉีดมีผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วฉีดเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.13 เนื่องจากความเร็วฉีดส่งผลต่อพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้น ที่ความเร็วฉีดต่ำ พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมีขนาดใหญ่กว่าที่ความเร็วฉีดสูง ประกอบกับที่ความเร็วฉีดต่ำ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีน้อย นิวคลีโอที่ที่เกิดขึ้นจึงมีน้อย และโลหะหลอมเหลวมีเวลาในการไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ช้า ทำให้โครงสร้างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีพื้นที่ขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที ส่งผลให้ค่าความแข็งที่ความเร็วฉีดต่ำมีค่าน้อยกว่าที่ความเร็วฉีดสูง



รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งของชิ้นงาน ที่ความเร็วฉีด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส

## บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ

### 5.1 บทสรุปของโครงการ

5.1.1 อะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ในงานหล่อ ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีด 0.1 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางวัลเย็น โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ในส่วนที่เป็นสีขาว และเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ในส่วนสีดำสลับขาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ

5.1.2 ผลของอุณหภูมิเทต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทเป็น 650 องศาเซลเซียส การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดรูพรุน และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทเป็น 660 องศาเซลเซียส การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส โครงสร้างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีลักษณะกลม และเป็นແກค้ำยทุกหลาบ โดยพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง แต่เมื่อลดอุณหภูมิเทเป็น 630 องศาเซลเซียส โครงสร้างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมีลักษณะกลม และเป็นແກค้ำยทุกหลาบ โดยพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมีขนาดเล็ก จึงส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้น โดยค่าปัจจัยรูปร่างของโครงสร้างจุลภาคของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิส่วนใหญ่ มีลักษณะใกล้เคียงกัน

5.1.3 ผลของความเร็วฉีดต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 การปรับเปลี่ยนความเร็วฉีดมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ โดยที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที ไม่พบโพรงอากาศ ที่สามารถมองด้วยตาเปล่า แต่เมื่อเพิ่มความเร็วฉีดเป็น 1.0 เมตรต่อวินาที มีโพรงอากาศเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน โดยที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที โครงสร้างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีลักษณะกลม และเป็นແກค้ำยทุกหลาบ พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมีขนาดใหญ่ และมีปริมาณไม่สม่ำเสมอ จึงส่งผลให้ค่าความแข็งต่ำ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วฉีดเป็น 1.0 เมตรต่อวินาที โครงสร้างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีลักษณะกลม และเป็นແກค้ำยทุกหลาบ พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีขนาดเล็ก และปริมาณสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน จึงส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้น

### 5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 ในการศึกษาโครงการนี้ เพื่อให้ได้ผลดีกว่าอาจจะใช้ทองแดงแทนเหล็กในการทำรางวัลเย็น เนื่องจากทองแดงมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าเหล็ก

5.2.2 ในการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูง ควรคำนึงความเร็วฉีด ซึ่งจะทำให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าแม่พิมพ์ในลักษณะปั่นป่วนมาก โดยโลหะหลอมเหลวที่ปั่นป่วนจับกับอากาศภายในแม่พิมพ์ ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดโพรงอากาศ

5.2.3 กระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งโดยใช้รางวัลเย็น สามารถนำไปใช้ร่วมกับกระบวนการหล่อแบบอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลได้

5.2.4 การปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และความแข็ง สามารถเลือกชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบอื่นๆ มาทำการศึกษา และเปรียบเทียบผลการทดลองได้

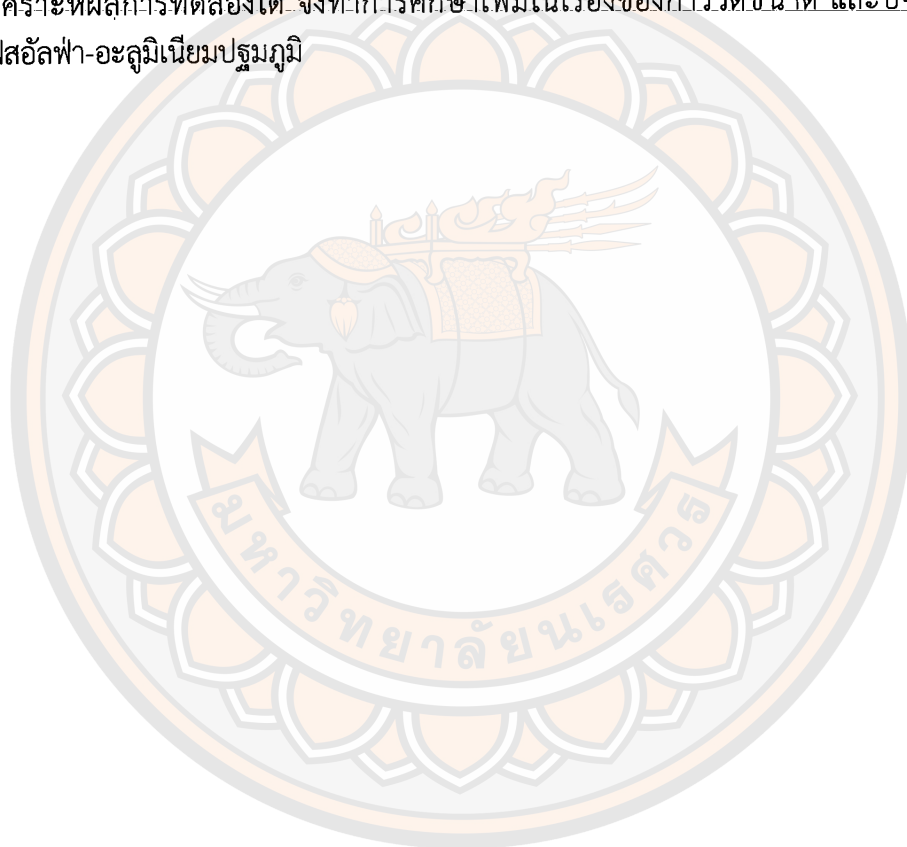
### 5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 กรดที่ใช้ในการกัดชิ้นงานเป็นกรดที่อันตราย ควรเตรียมกรด และใช้อย่างระมัดระวัง

5.3.2 การทดสอบความแข็งบางครั้งได้ค่าผิดพลาด เนื่องจากการวาง และการขัดชิ้นงานไม่ได้ ระบายจึงควรระมัดระวังในการวาง และการขัดชิ้นงานให้ได้ระนาบก่อนทดสอบความแข็งทุกครั้ง

5.3.3 ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานควรขัดให้รอยขัดหมดไป เนื่องจากจะทำให้เห็นโครงสร้างจุลภาคไม่ชัดเจน

5.3.4 จากผลการทดลอง พบว่าโครงสร้างจุลภาคจะมีลักษณะรูปร่างที่คล้ายกัน ไม่สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ จึงทำการศึกษาเพิ่มในเรื่องของการวัดขนาด และปัจจัยรูปร่างของ เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐุมภูมิ



## เอกสารอ้างอิง

- กนกกาญจน์ ศรีม่วง. (2553). การพัฒนากระบวนการผลิตรีโอดีคลาสติงแบบรางเทหล่อเย็น สำหรับอะลูมิเนียมผสม. วศ.ม., มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- รูปนีย์ อุดมผล. (2554). การทดสอบความแข็ง. สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2554 จาก, [http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/MechmetLab/1\\_2552/Mech%20met%20lab%20PDF/Mech%20met%20handout-Th/Lab\\_2Hardness\\_th.pdf](http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/MechmetLab/1_2552/Mech%20met%20lab%20PDF/Mech%20met%20handout-Th/Lab_2Hardness_th.pdf)
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2553). กรรมวิธีการผลิตโลหะ. สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2554, จาก [www.mme.rmuti.ac.th/index.php?option=com...view...3&id...](http://www.mme.rmuti.ac.th/index.php?option=com...view...3&id...)
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2553). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยุคชั่น
- พรสวรรค์ปัญญา. (2551). การแข็งตัวของโลหะ. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- มานพ ตันตระกูล. (2535). งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- รองศาสตราจารย์ เขาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร. (2551). โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2554, จาก [www.cemct.net/web/images/stories//alsi001.pdf](http://www.cemct.net/web/images/stories//alsi001.pdf)
- รองศาสตราจารย์ แม้น อมรสิทธิ์. (2547). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล
- อินเตอร์เนชั่นแนล เอ็นเตอร์ไพรส์
- วิหาร ดีปัญญา. (2548). วิศวกรรมการหล่อโลหะ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนส์โตร์.
- วิรุจน์ บัวงาม. (2553). เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope). มหาวิทยาลัยราชภัฏ
- อุบลราชธานี. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2554, <http://learners.in.th/blog/wirut/325228>
- วีระชัย ลามอ. (2550). ความแข็ง (Hardness). สืบค้นเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม พ.ศ. 2554, จาก [www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep\\_5\\_2550\\_hardness.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_5_2550_hardness.pdf)
- สุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์ และศศิธร พิทักษ์ธำปนพงษ์. (2548). การศึกษาผลของมุมการเทน้ำโลหะที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการหล่อโลหะอะลูมิเนียม เว็บไซต์ [http://www.tsme.org/ME\\_NETT/ME\\_NETT19/paper/AMM/AMM073.pdf](http://www.tsme.org/ME_NETT/ME_NETT19/paper/AMM/AMM073.pdf). วศ.บ., สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร.
- สุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์ และศศิธร พิทักษ์ธำปนพงษ์. (2549). อิทธิพลของอุณหภูมิเทน้ำโลหะในกระบวนการหล่อโลหะอะลูมิเนียมเว็บไซต์ [http://www.tsme.org/ME\\_NETT/ME\\_NETT20/article/pdf/amm/AMM013.pdf](http://www.tsme.org/ME_NETT/ME_NETT20/article/pdf/amm/AMM013.pdf). วศ.บ., สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร.
- สุวรรณยา ยุพา. (2553). การผลิตอะลูมิเนียมผสมในสภาวะกึ่งของแข็งโดยการหล่อแบบรีโอดีร่วมกับ การหล่อแบบกดอัด. วศ.ม., มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร. [www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep\\_5\\_2550\\_hardness.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_5_2550_hardness.pdf)
- อาสาฬห์ อุตตลภาภูจนานา. (2553). การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมใน กระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็ง. วศ.ม., มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- Eurit, S.R.L. (1998). Aluminium, Magnesium and Zince Die Casting. สืบค้นเมื่อวันที่ 12 กันยายน พ.ศ. 2554, จาก <http://www.euritsrl.com/preso-eng.htm>

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Ghomashchi, M.R. (1993). **High-Pressure Die Casting:Effect of Fluid Flow on the Microstructure of LM24 Die-Casting Alloy**, Vol 52 (No. 2-4) 193-206
- Ghomashchi, Omid Lashkari and Shahrooz Nafisi. (2006). **Microstructural Characterization of Rheo-Cast Billets Prepared by Variant Pouring Temperatures**, 49-59
- Guan, R., Zhang, L., Wang, C., Wen, J. and Cui, J. (2007). **Three-Dimensional Analysis of the Modified Slope Cooling/Shearing Process**, Vol 14 (No. 2) 146-150
- GUO Hongmin, YANG Xiangjie, HU Bin and ZHU Guanglei. (2006). **Rheo-diecasting Process for Semi-solid Aluminum Alloys**, Vol 22 (No. 4)
- Kang, CG., Lee, S.M. and Kim, B.M. (2008). **A Study of Die Design of Semi-Solid Die Casting According to Gate Shape and Solid Fraction**, Vol 204 (No. 1-3) 8-21
- Stefanescu, D.M. (2002). **Science and Engineering of Casting Solidification**, University of Alabama, U.S.A.
- Steube, R.S. and Hellawell. (1992). **Micro/macro Scale Phenomena in Solidification**, Am. Soc. Mech, New York.
- Taghavi, F. and Ghassemi, A. (2009). **Study on the Effect of the Length and Angle of Inclined Plate on the Thixotropic Microstructure of A356 Aluminum Alloy**, Vol 30 (No. 5) 1762-1767

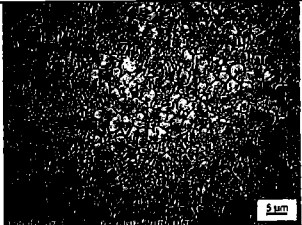
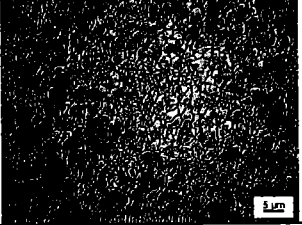
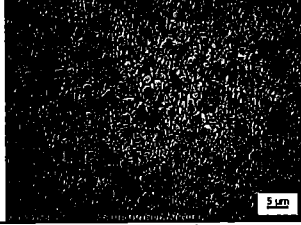
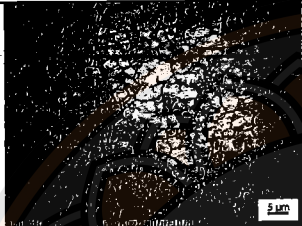
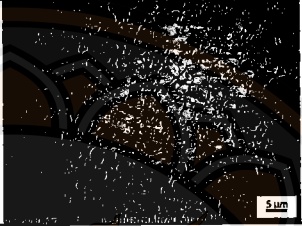
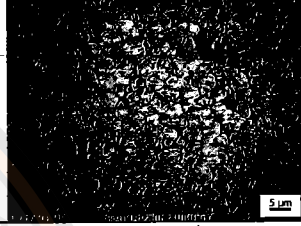
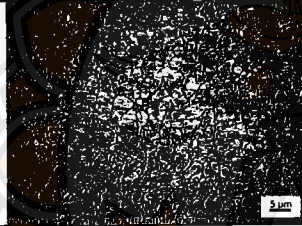
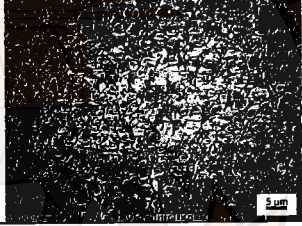
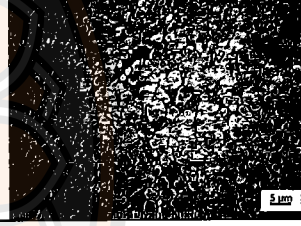


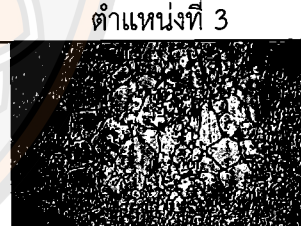
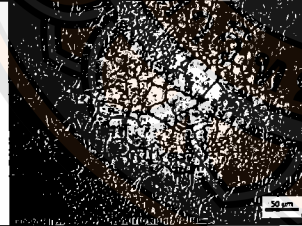
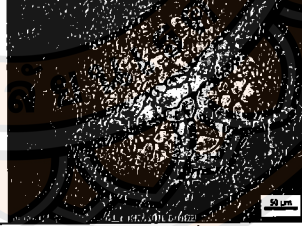
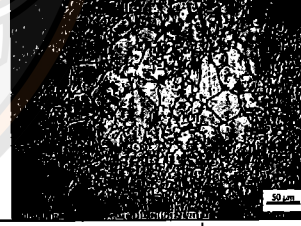




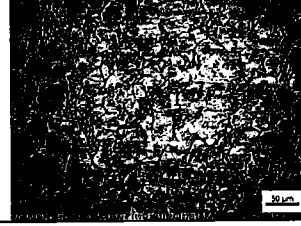
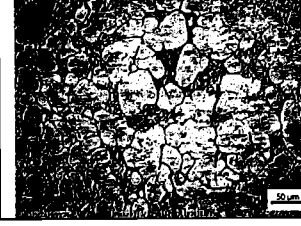



5



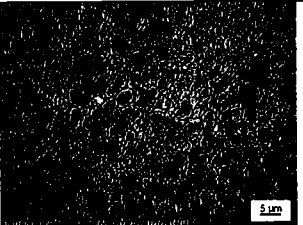
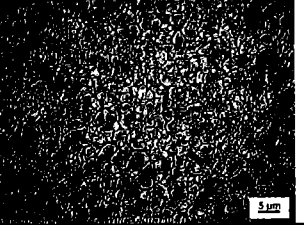
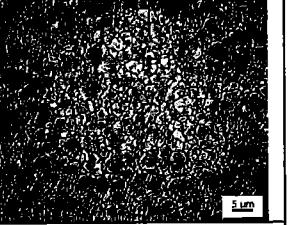
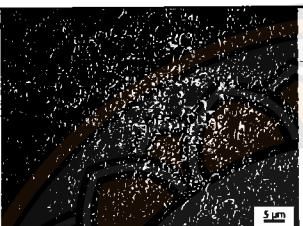

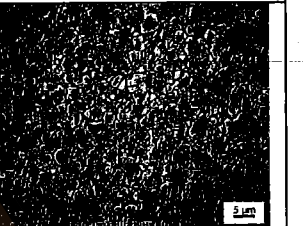
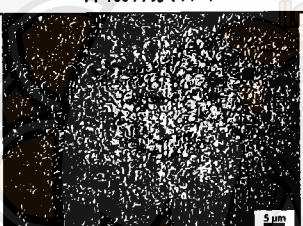
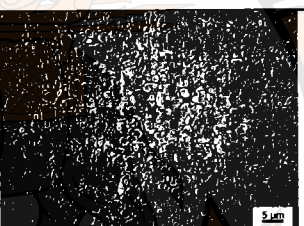


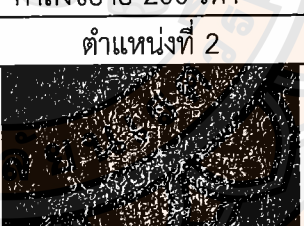
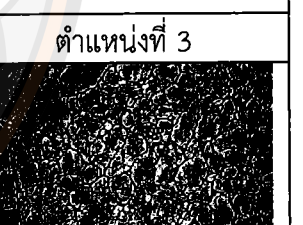
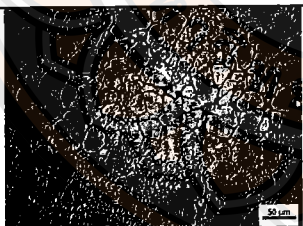
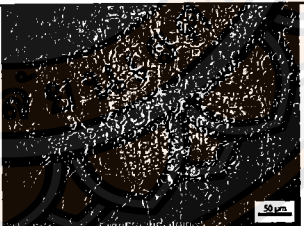
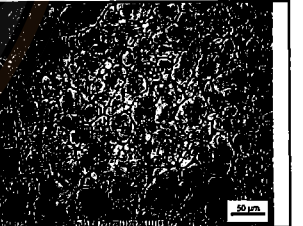
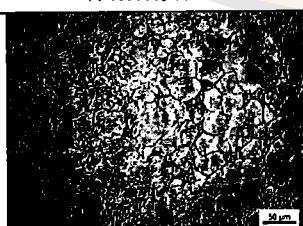

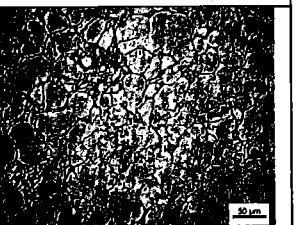
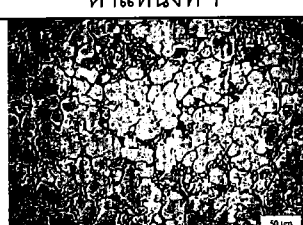
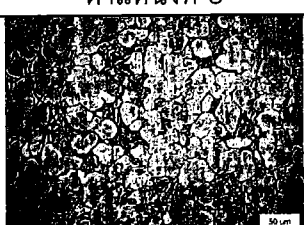
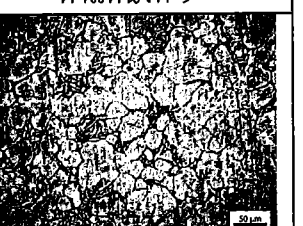
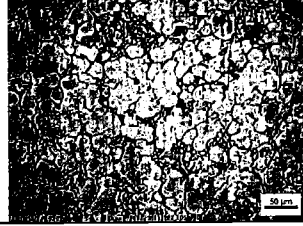


**ภาคผนวก ก**

**โครงสร้างจุดภาคของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319**

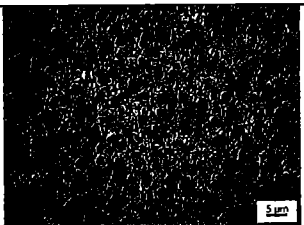
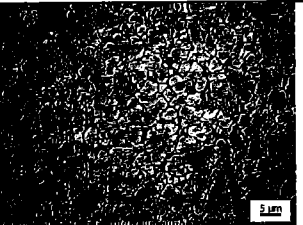
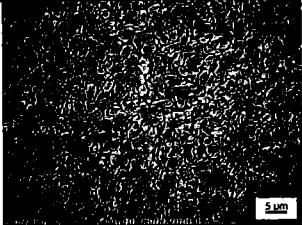
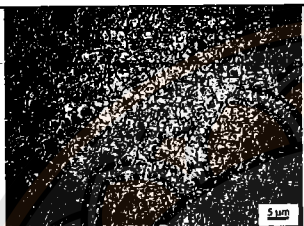
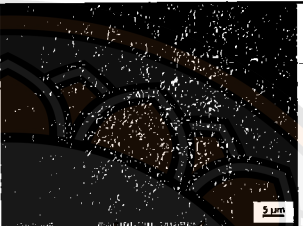
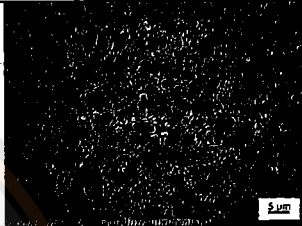
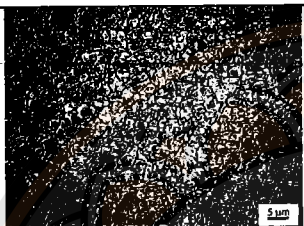
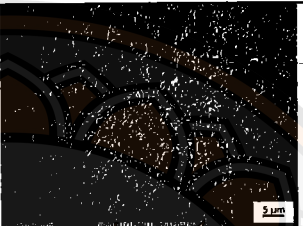
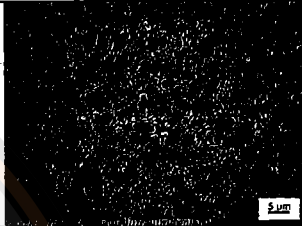
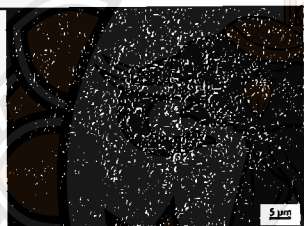
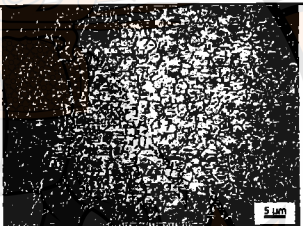
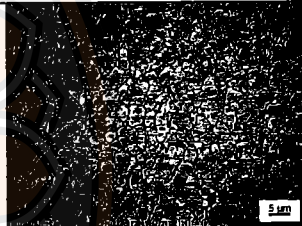
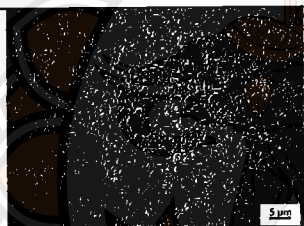
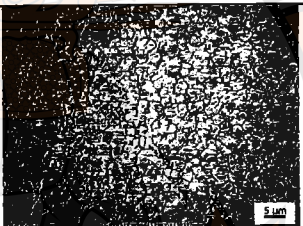
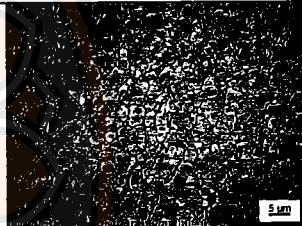

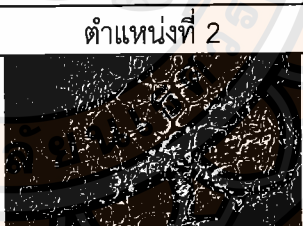

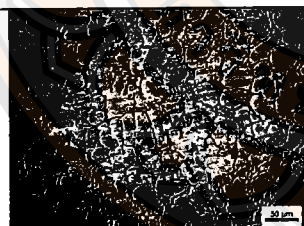
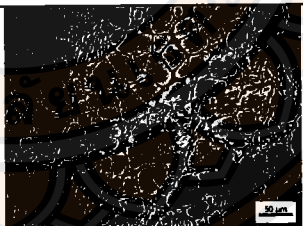
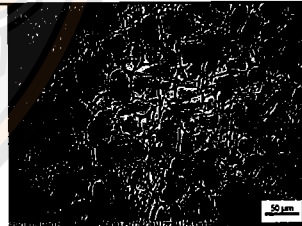
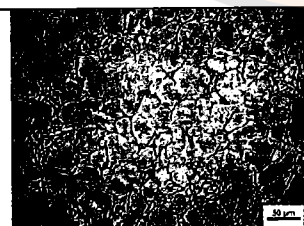
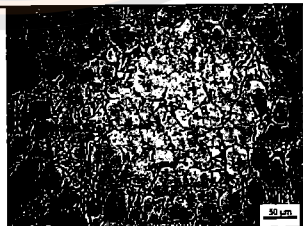

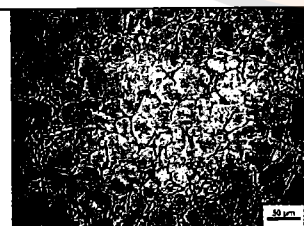
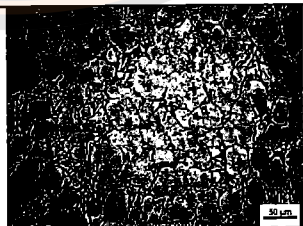


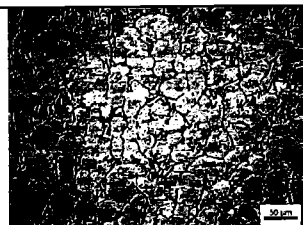
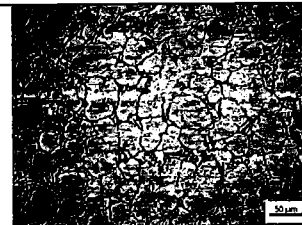

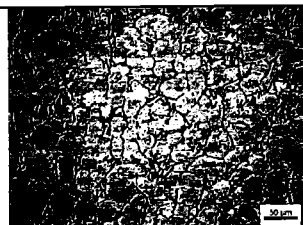
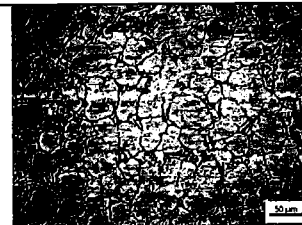

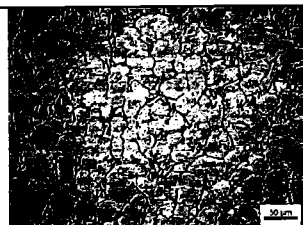
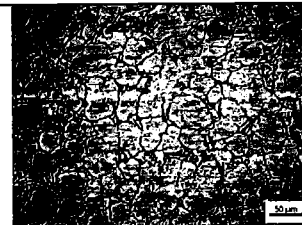
ตารางที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 1

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
				
ล่าง				

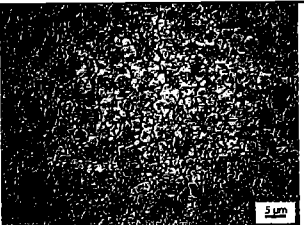
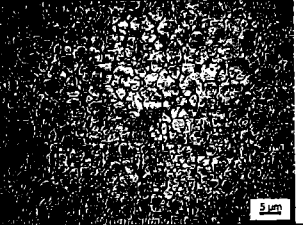
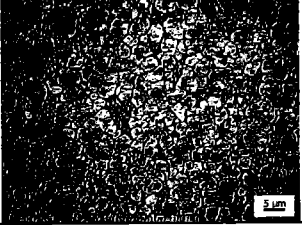
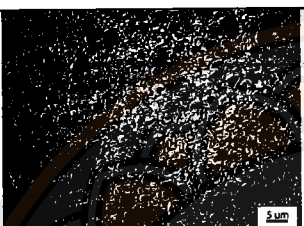

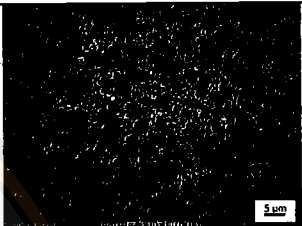

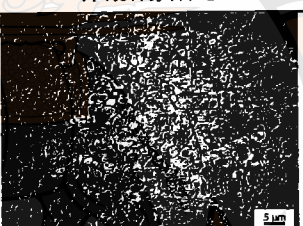
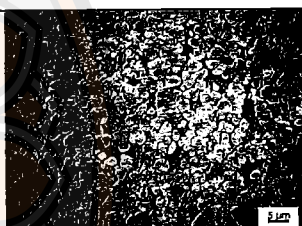
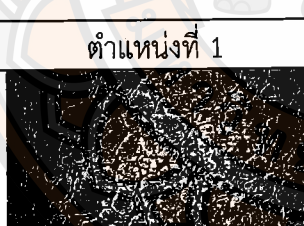
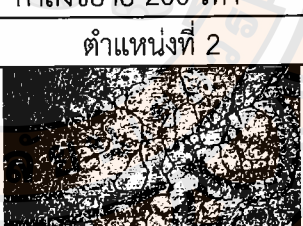
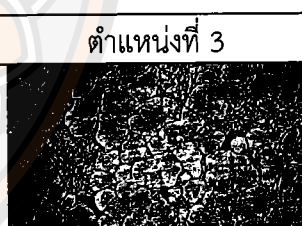


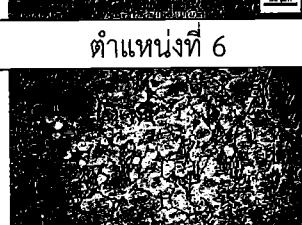
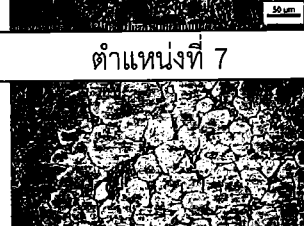




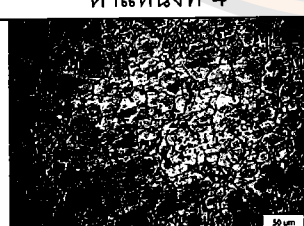

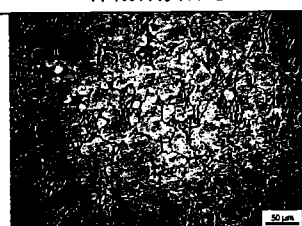
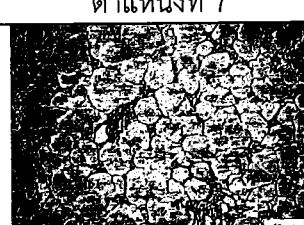
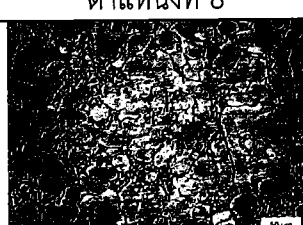
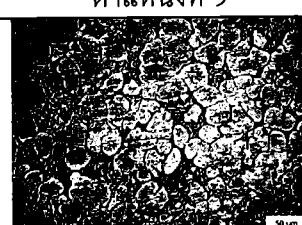



ตารางที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 2

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
ล่าง				

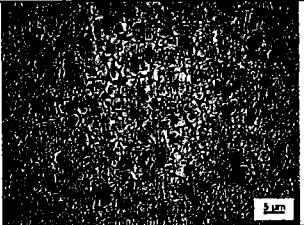
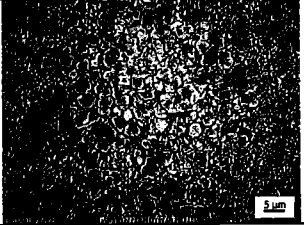
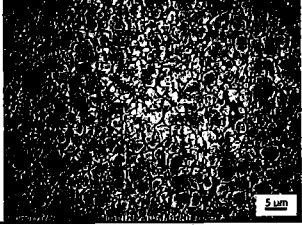
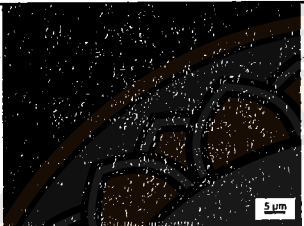
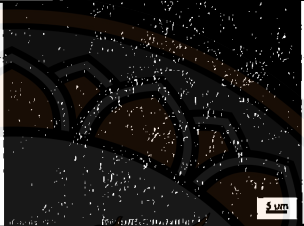
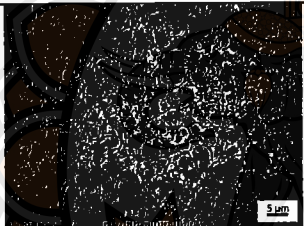
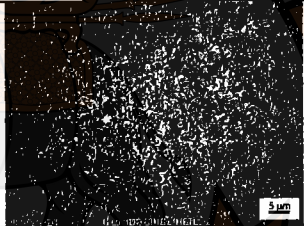
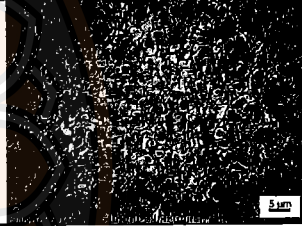

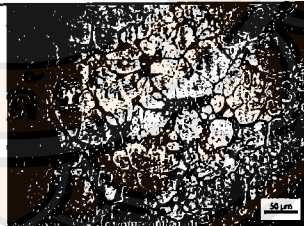


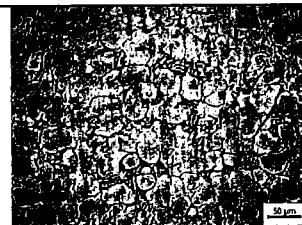
ตารางที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับแรงเหวี่ยง ที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 3

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
				
ล่าง				
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
				
ล่าง				
				

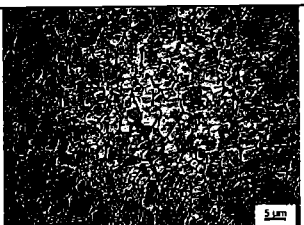
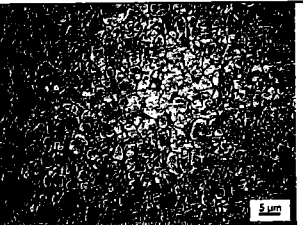
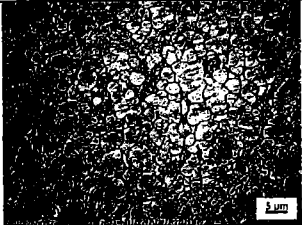
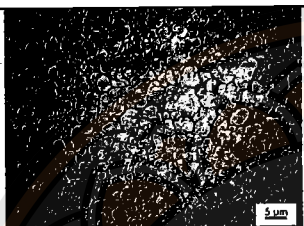
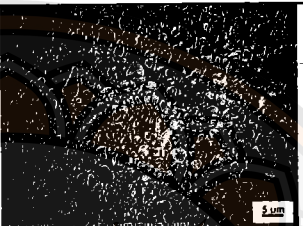


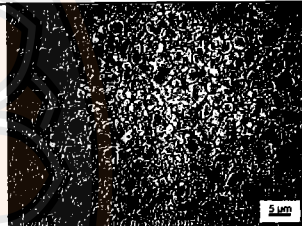
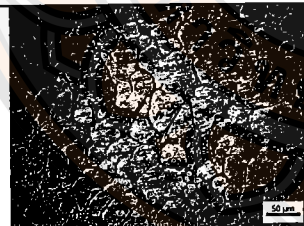
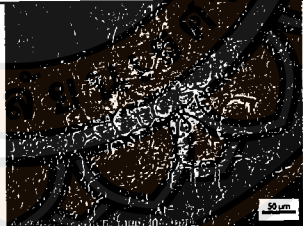
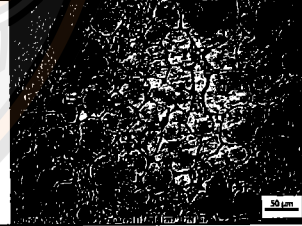
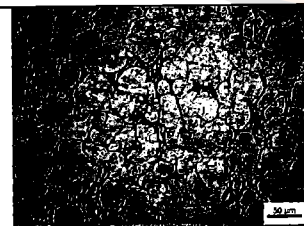
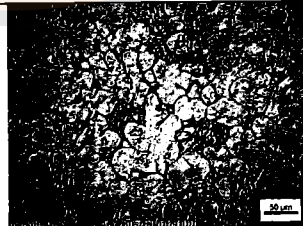
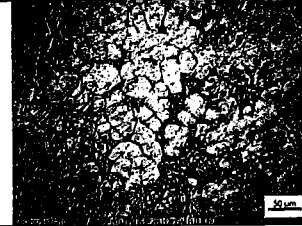


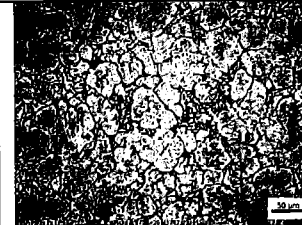
ตารางที่ ก.4 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 1

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
				
ล่าง				
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
				
ล่าง				

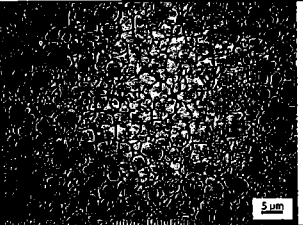
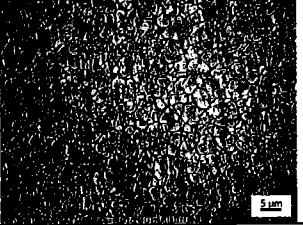
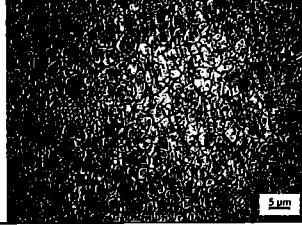
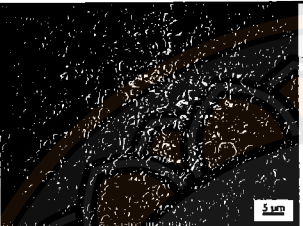
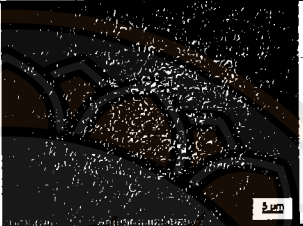
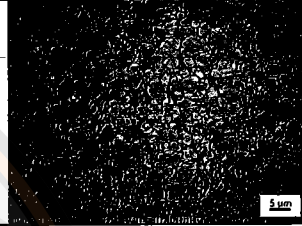
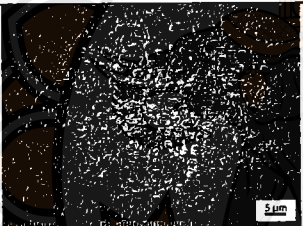
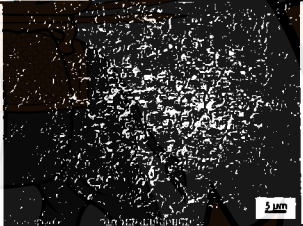
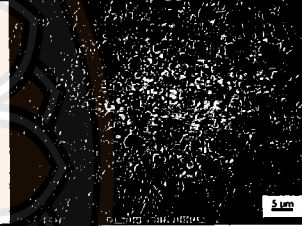
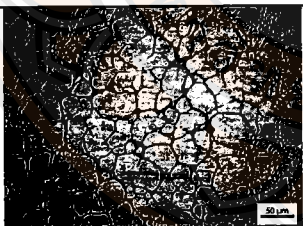
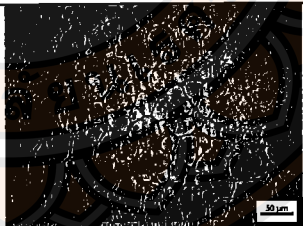
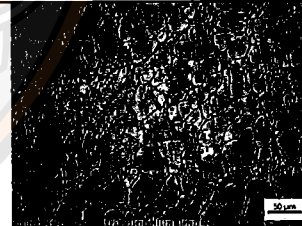
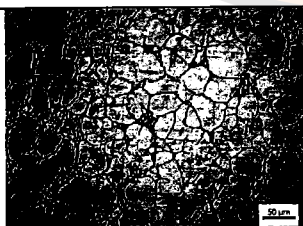
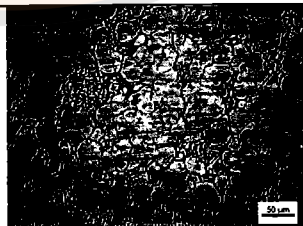
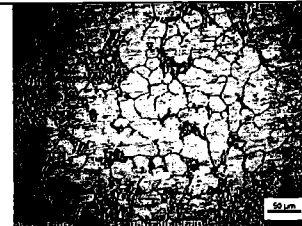

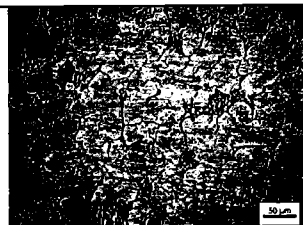
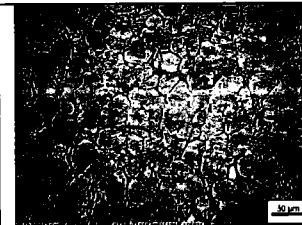
ตารางที่ ก.5 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 2

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
บน		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

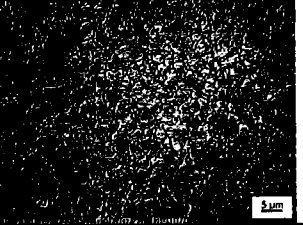
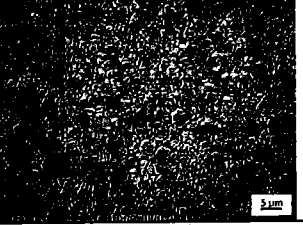


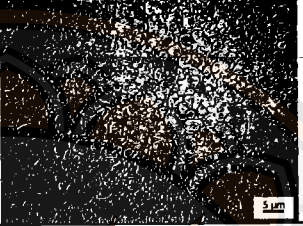
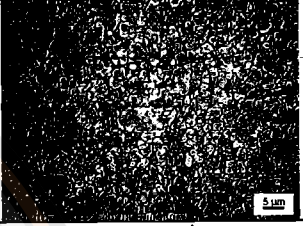
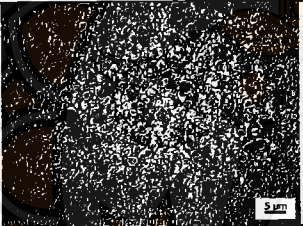
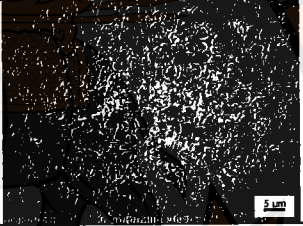
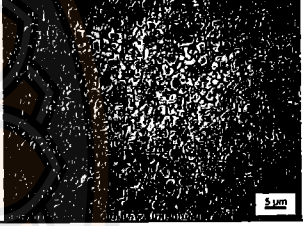
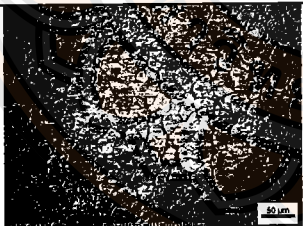
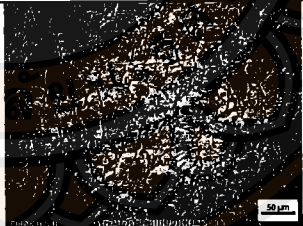
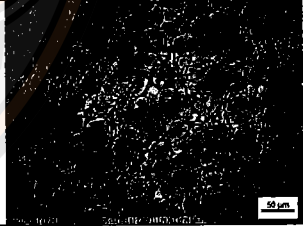
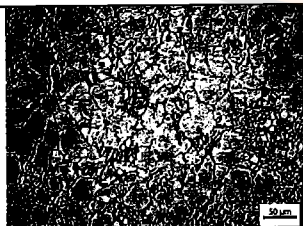
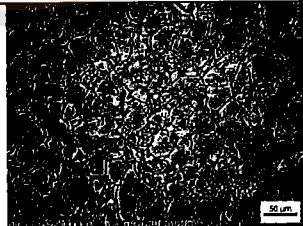


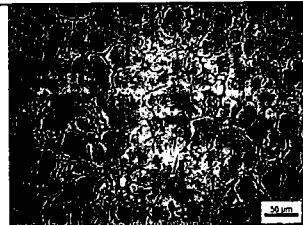
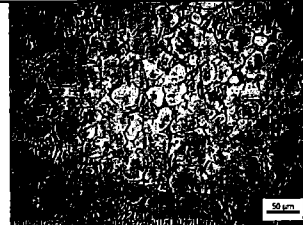
ตารางที่ ก.6 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 3

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
บน		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

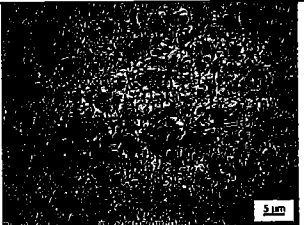
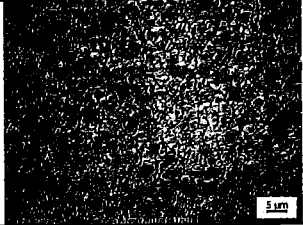
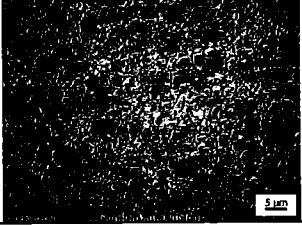
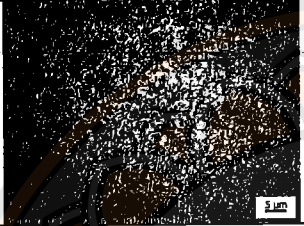
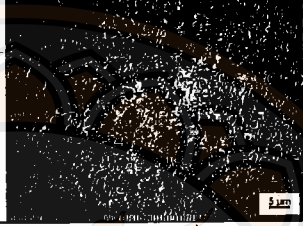
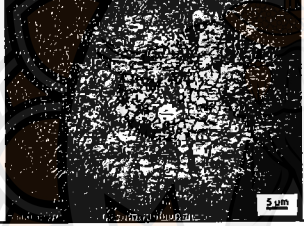
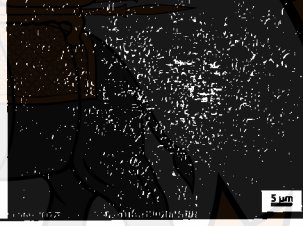
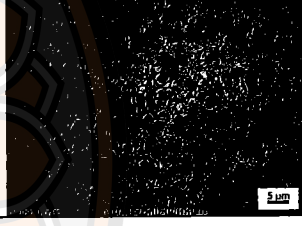
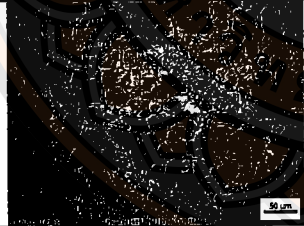
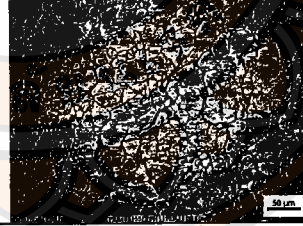
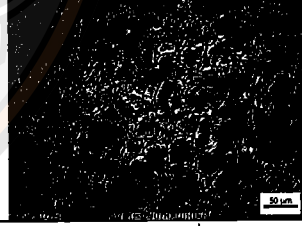
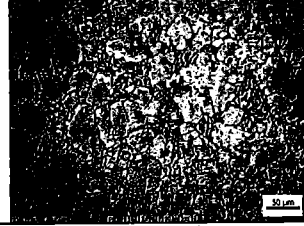
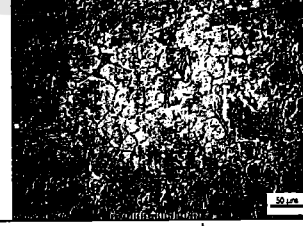




ตารางที่ ก.7 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 650 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 1

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
กลาง		ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
บน		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				
กลาง		ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

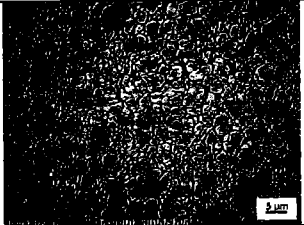
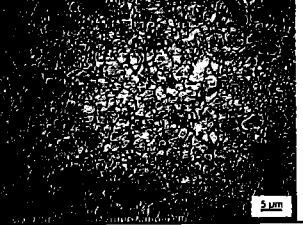
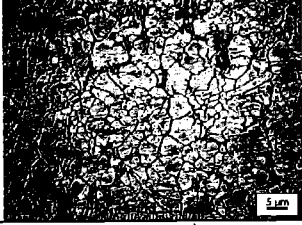
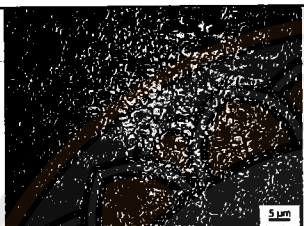



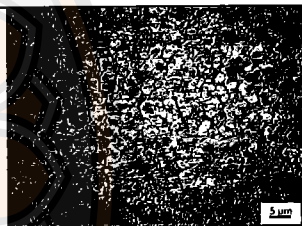
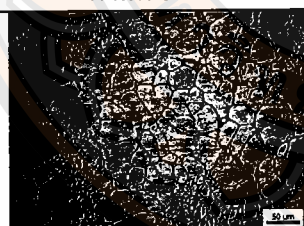
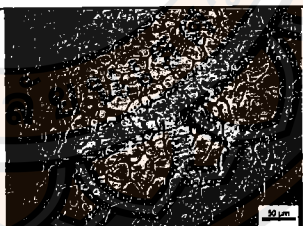
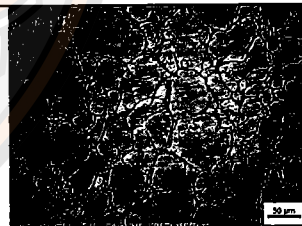
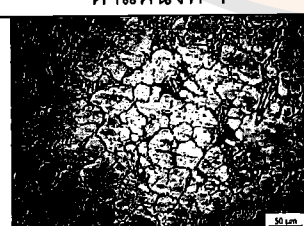


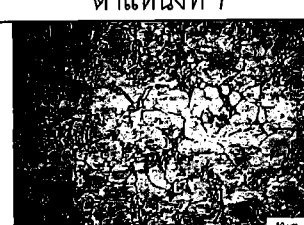
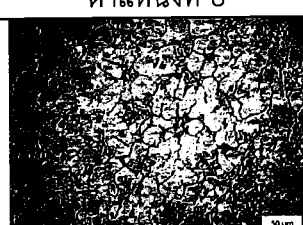

ตารางที่ ก.8 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 650 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 2

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
บน		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

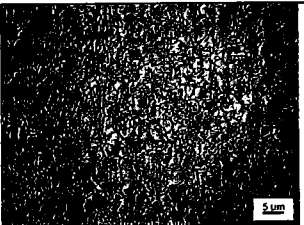
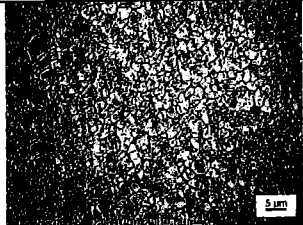
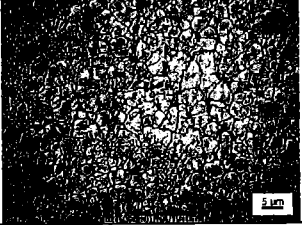
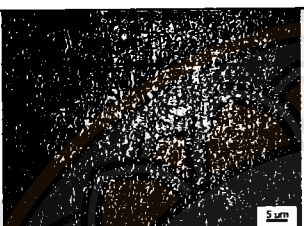
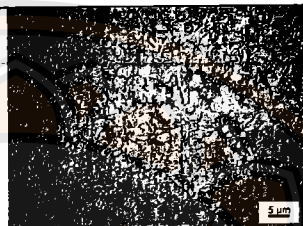

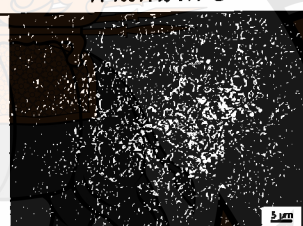
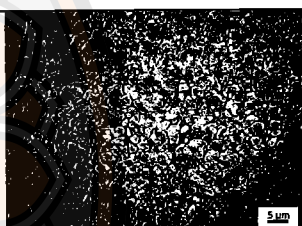


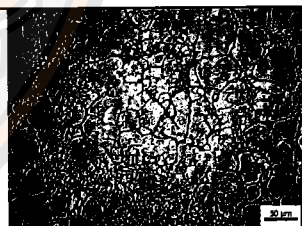
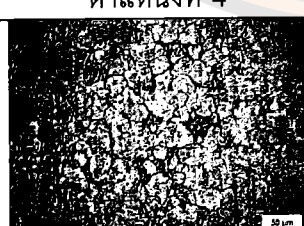
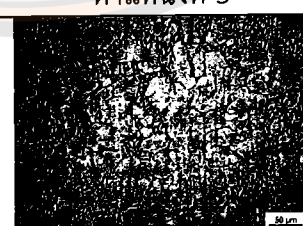
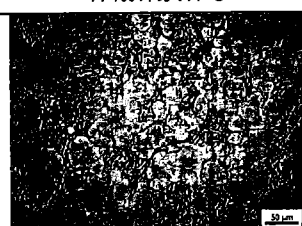

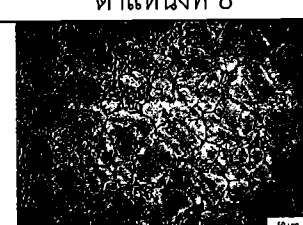
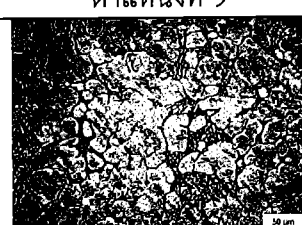
ตารางที่ ก.9 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 650 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 3

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
บน		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

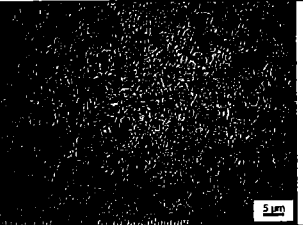
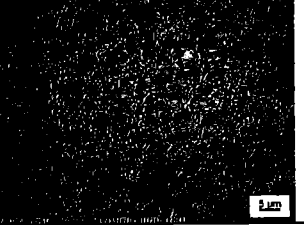
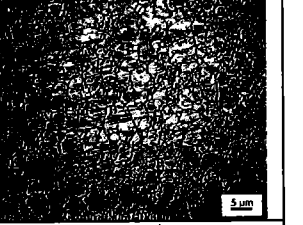
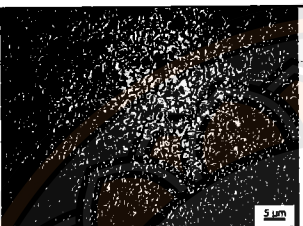
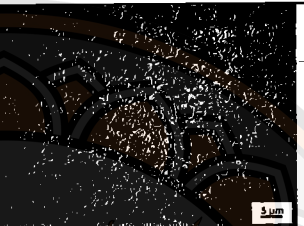
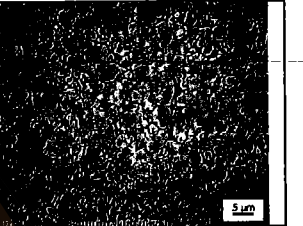
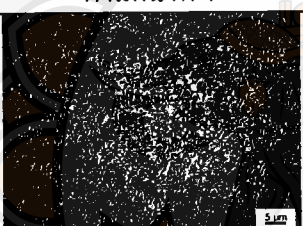
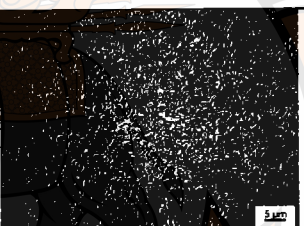
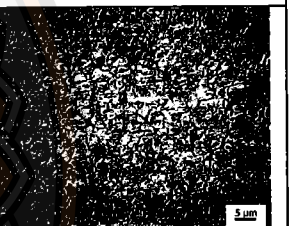



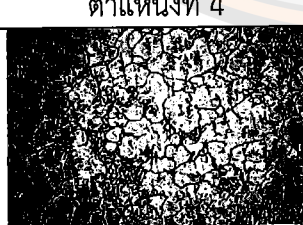
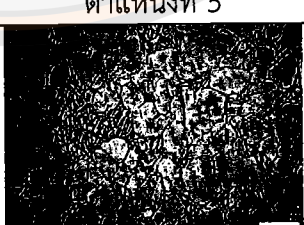
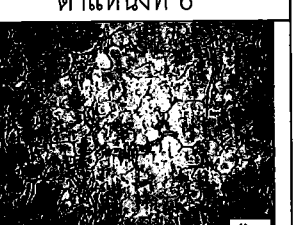
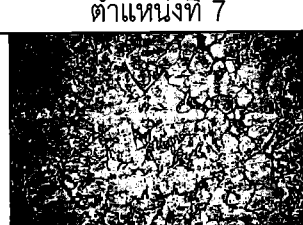


ตารางที่ ก.10 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับแรงเหวี่ยง ที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 1

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
บน		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				



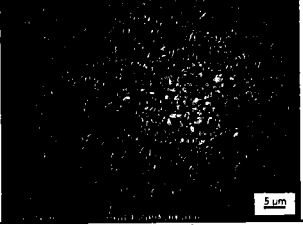
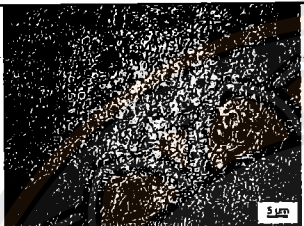
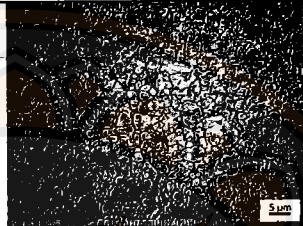
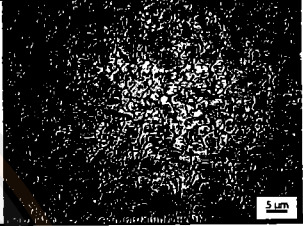
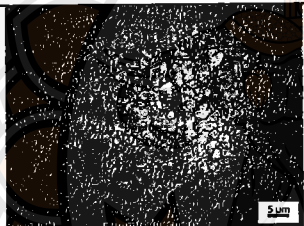
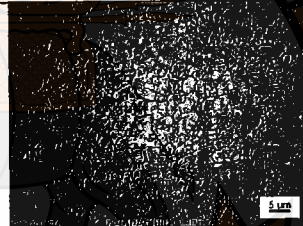
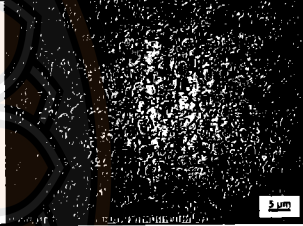


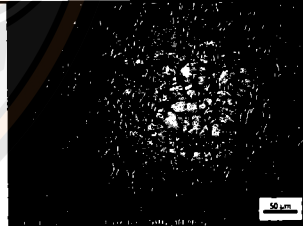
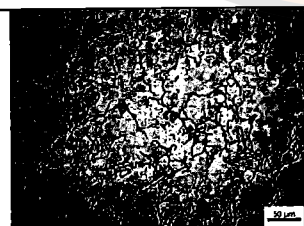
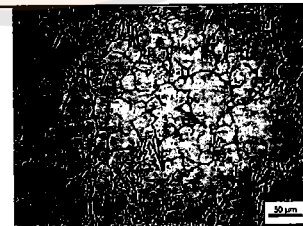


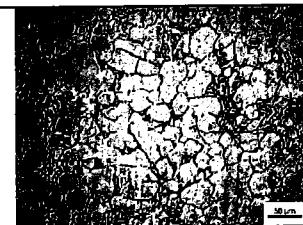

ตารางที่ ก.11 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 2

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
บน		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

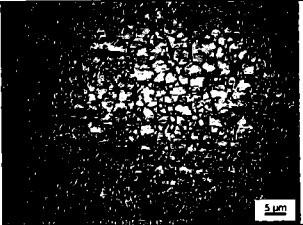
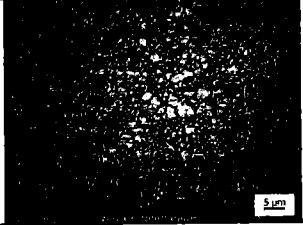
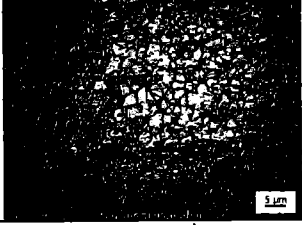
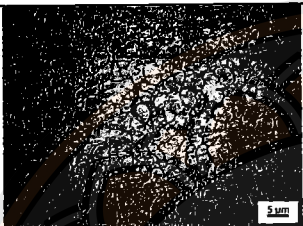


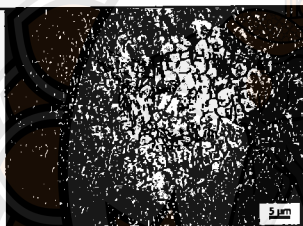
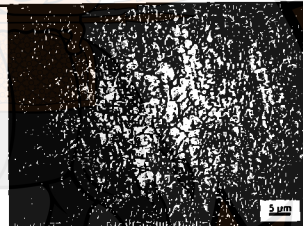
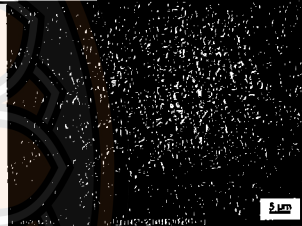


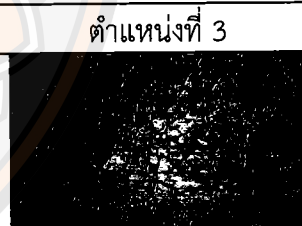
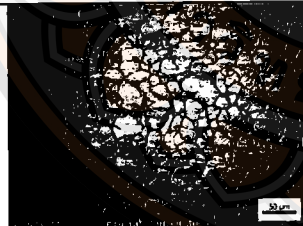

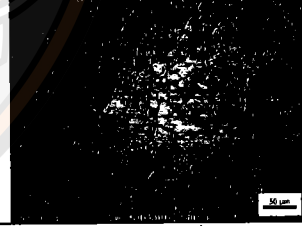
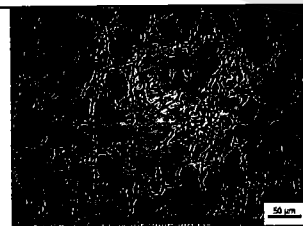
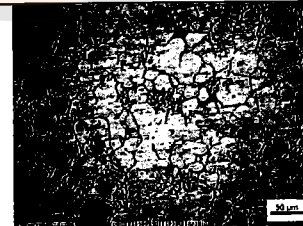
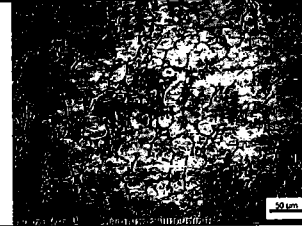
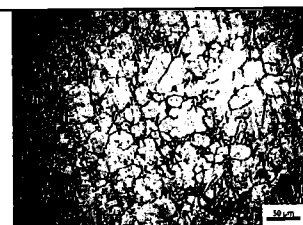
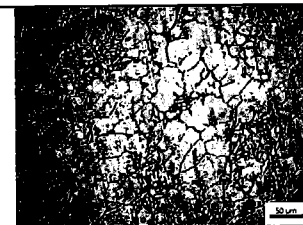
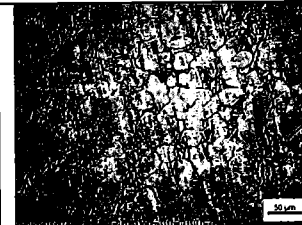
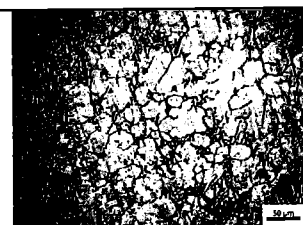
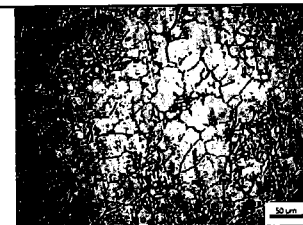
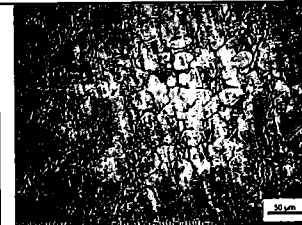
ตารางที่ ก.12 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 3

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
บน		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

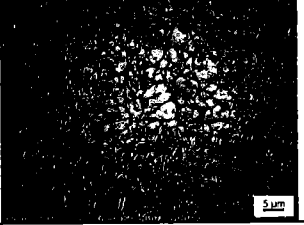

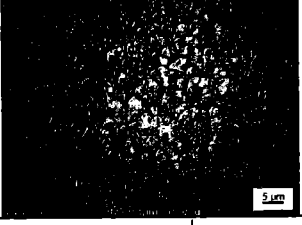
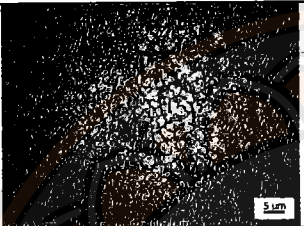
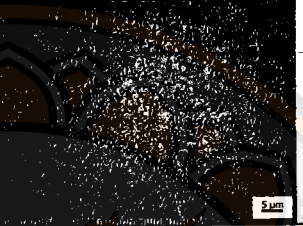
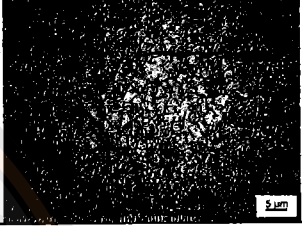
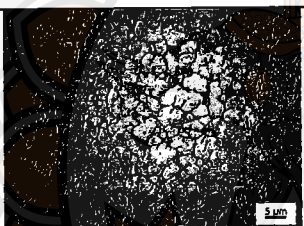
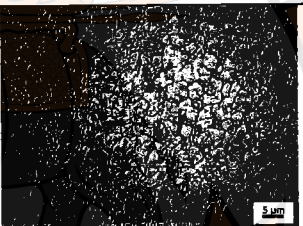
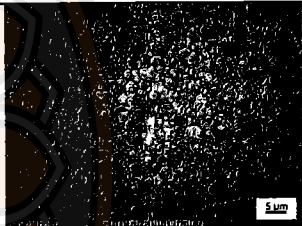

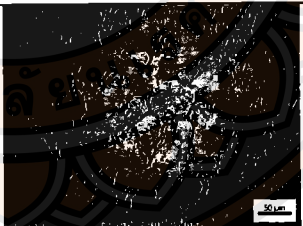
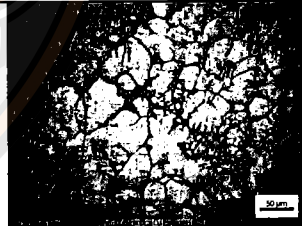
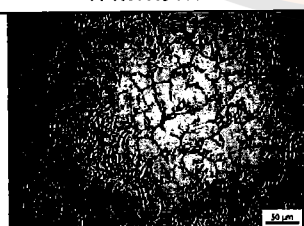
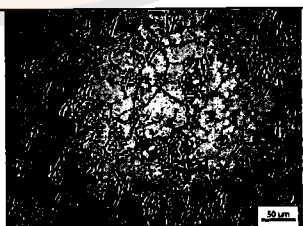
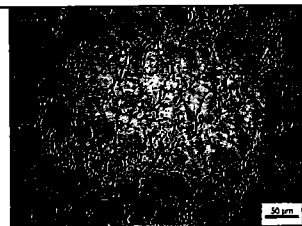

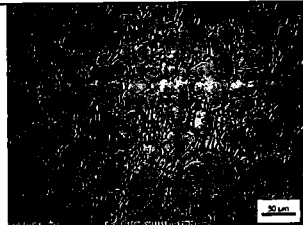
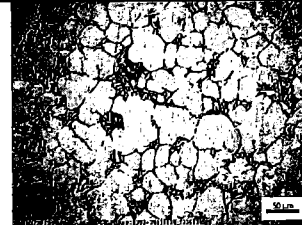
ตารางที่ ก.13 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 1

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง	ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9	
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง	ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9	
				

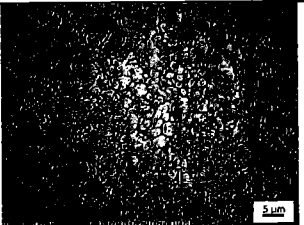
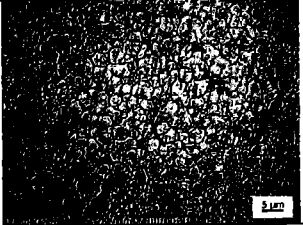
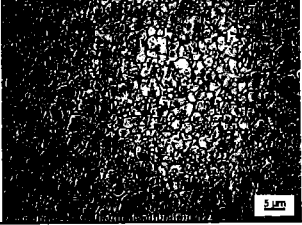

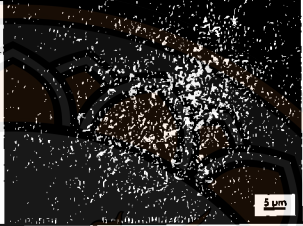
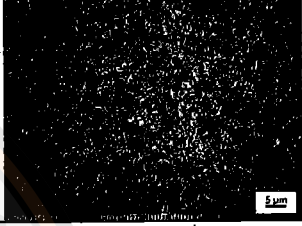
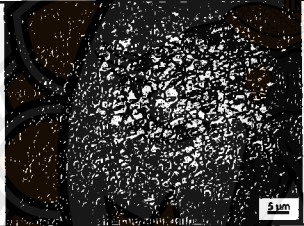
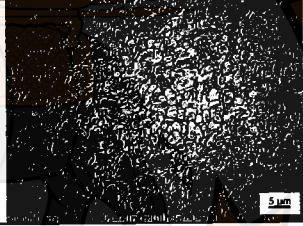
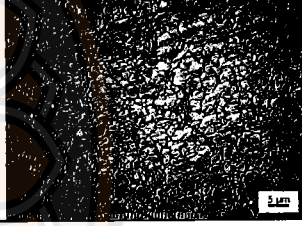
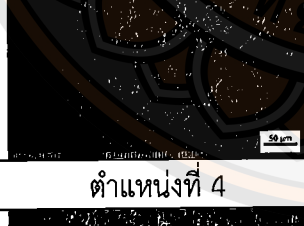







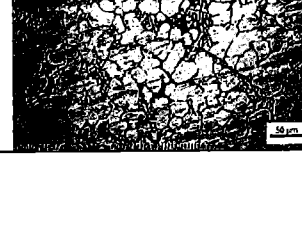
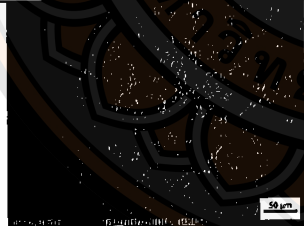
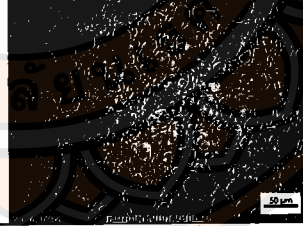
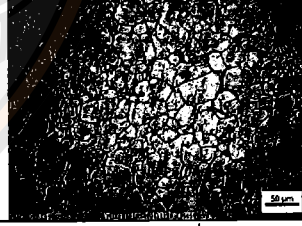
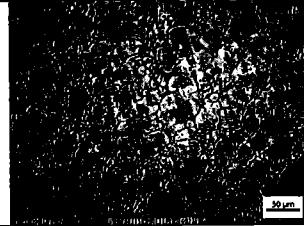
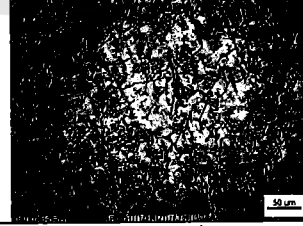
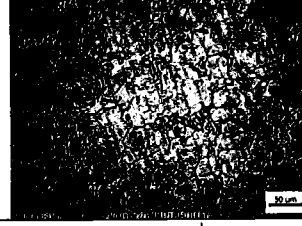


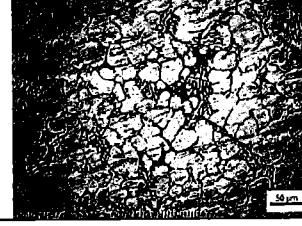



ตารางที่ ก.14 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 2

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
ล่าง				

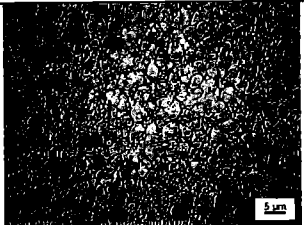
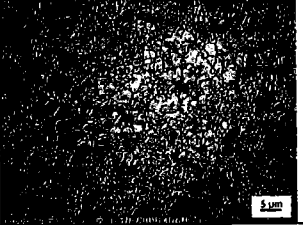
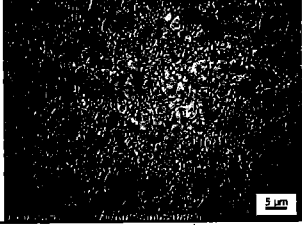
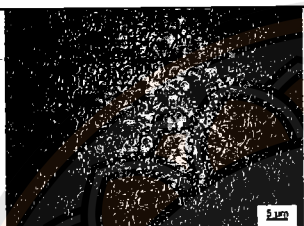
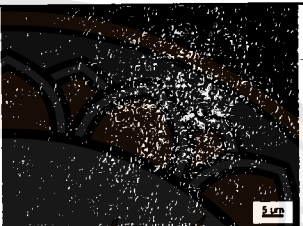
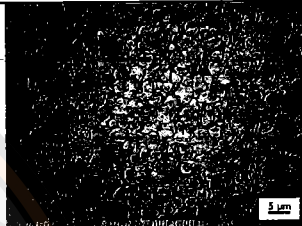

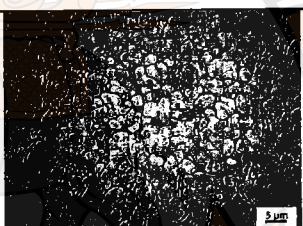
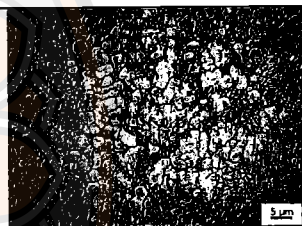

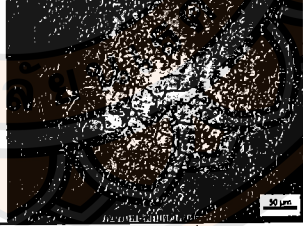
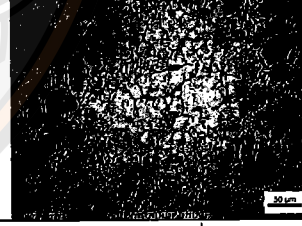
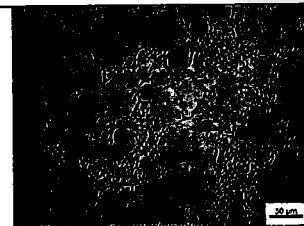

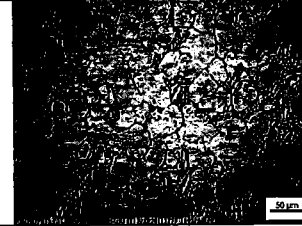


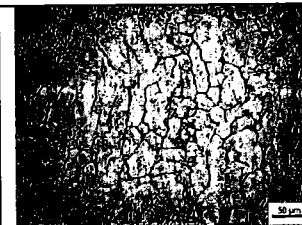
ตารางที่ ก.15 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับแรงเหวี่ยง ที่ความเร็ว-ฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 630 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 3

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
บน		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

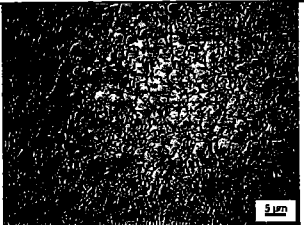
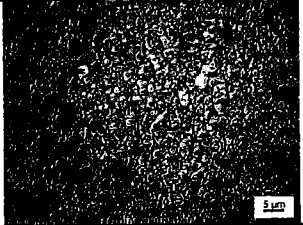
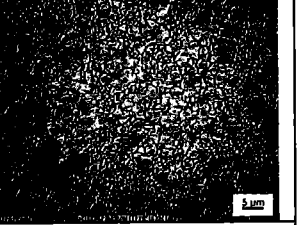
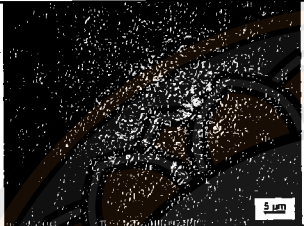
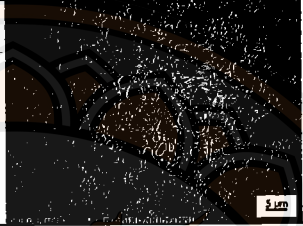

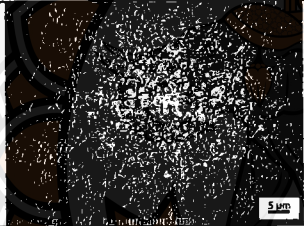
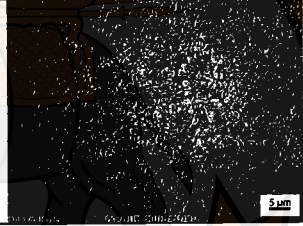

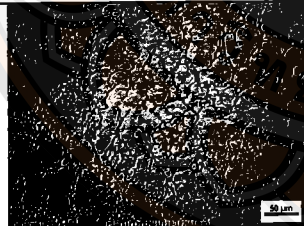
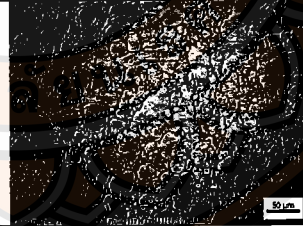

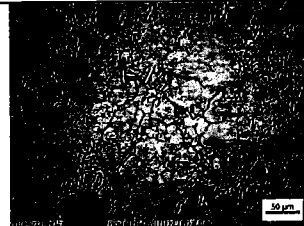
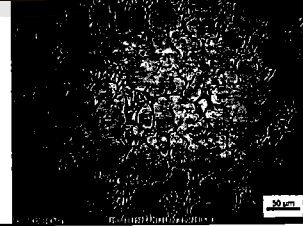
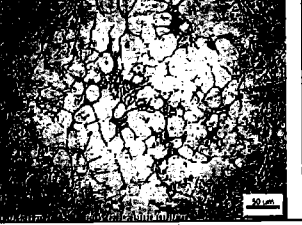

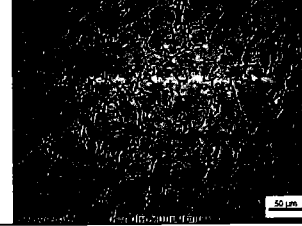
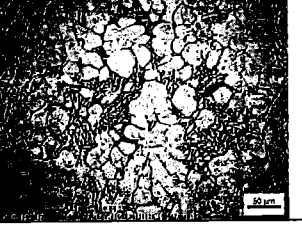
ตารางที่ ก.16 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับแรงเหวี่ยง ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 1

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
				
ล่าง				
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
				

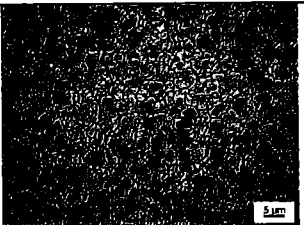
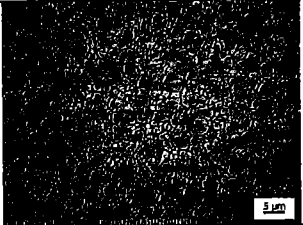
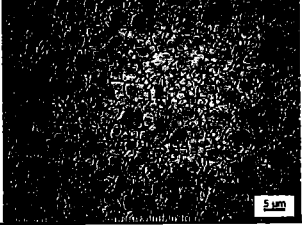
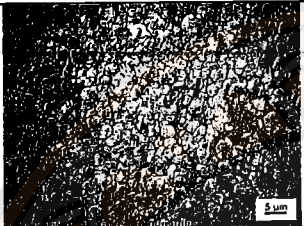
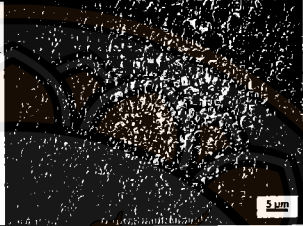
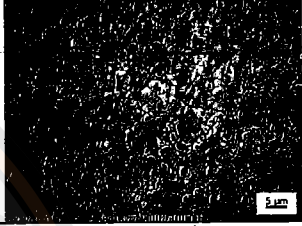
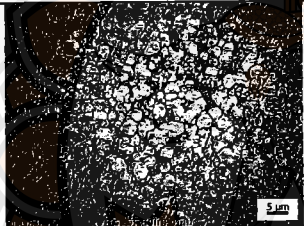
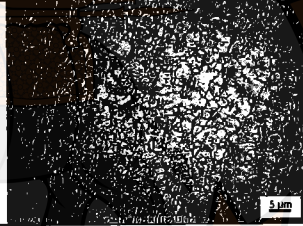
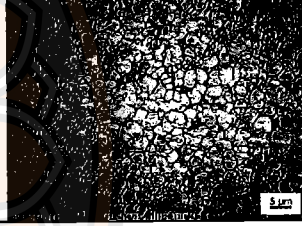
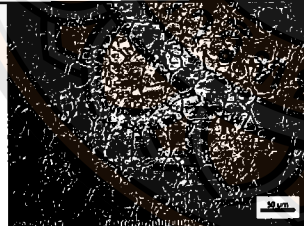
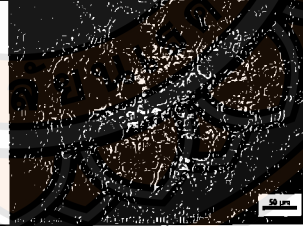
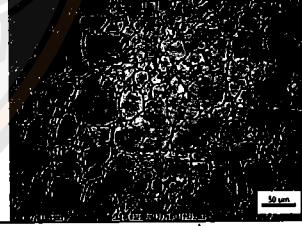
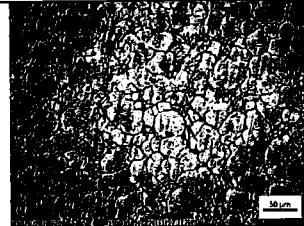
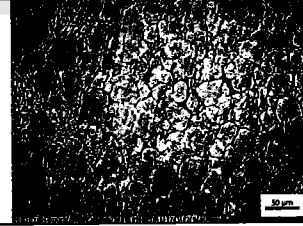

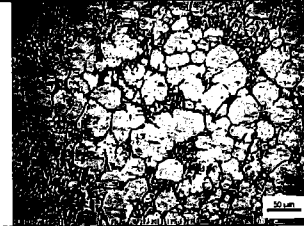
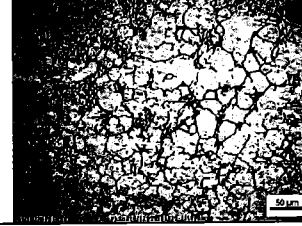

ตารางที่ ก.17 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 2

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

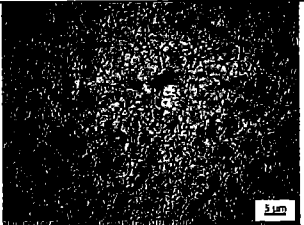
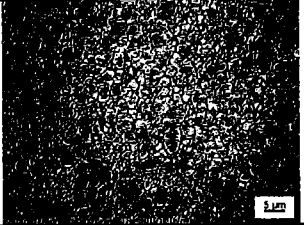
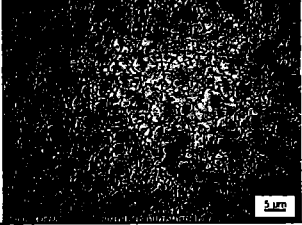
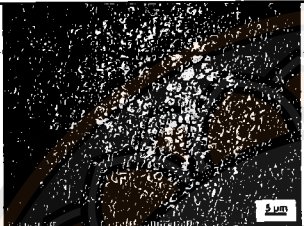

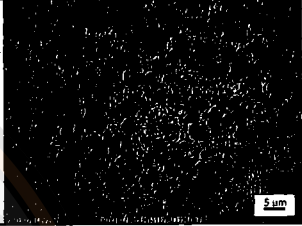
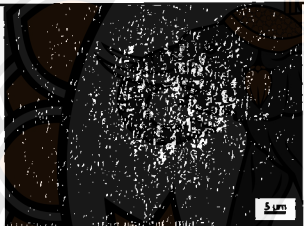
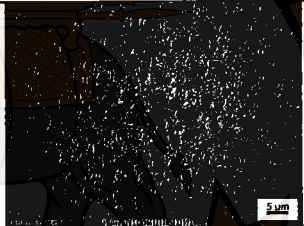
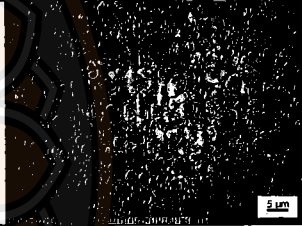
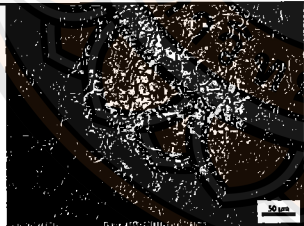
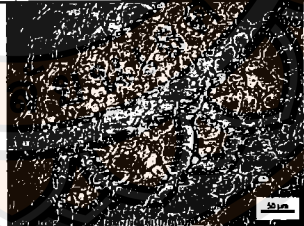
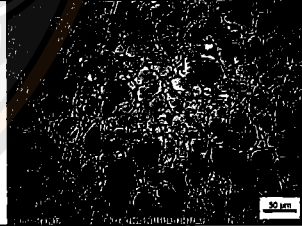
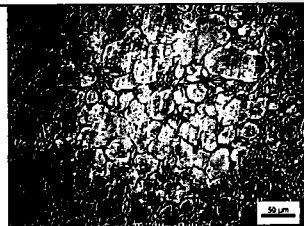

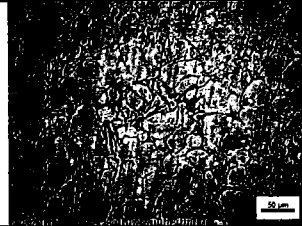
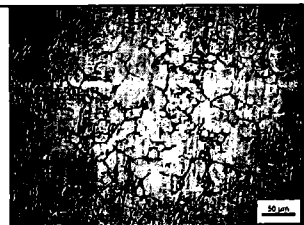
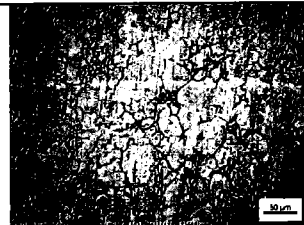
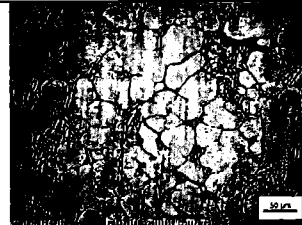
ตารางที่ ก.18 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับแรงเหวี่ยง ที่ความเร็ว-ฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 3

กำลังขยาย 100 เท่า			
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน			
	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
กลาง			
	ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
ล่าง			
กำลังขยาย 200 เท่า			
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน			
	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
กลาง			
	ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
ล่าง			

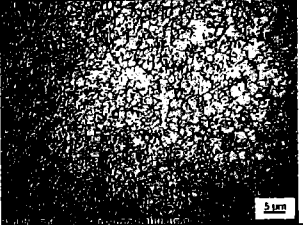
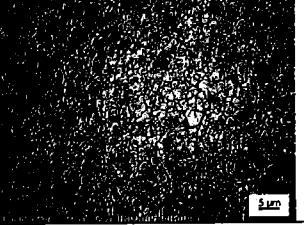
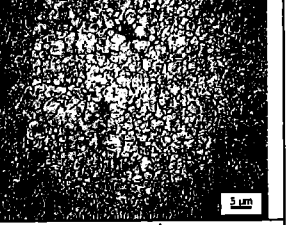
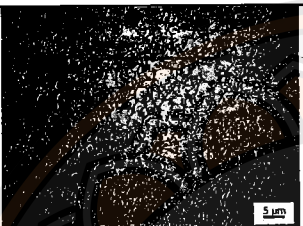
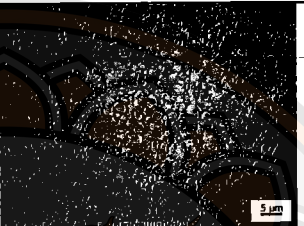
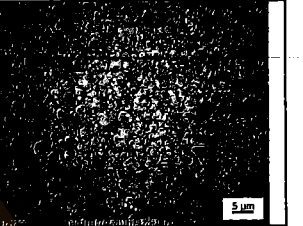
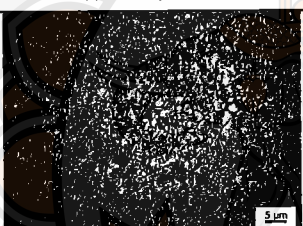
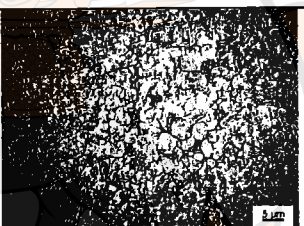
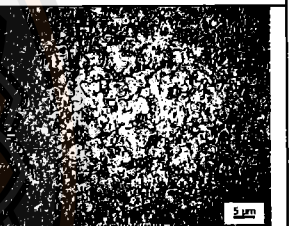
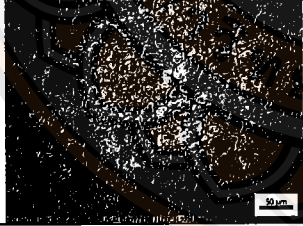
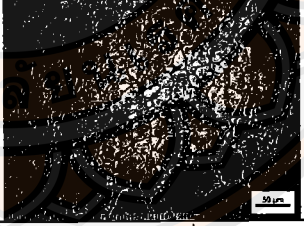
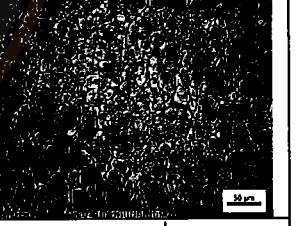
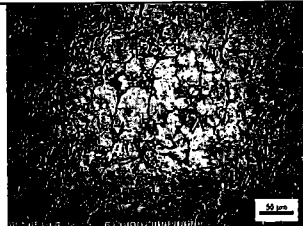
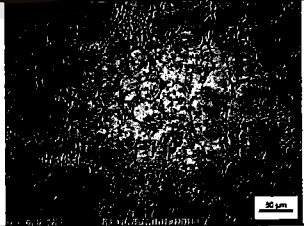
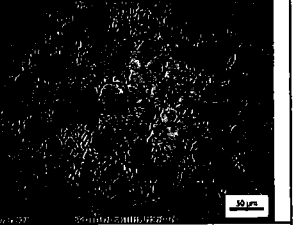

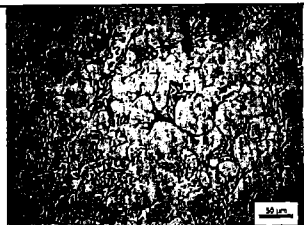
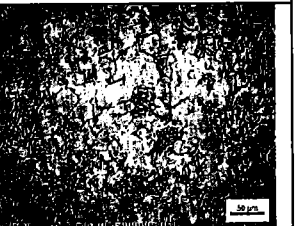
ตารางที่ ก.19 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับแรงเหวี่ยง ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 650 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 1

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

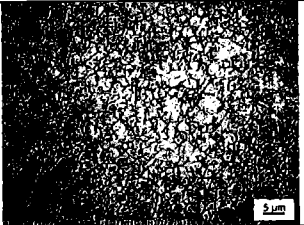
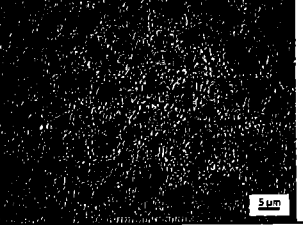
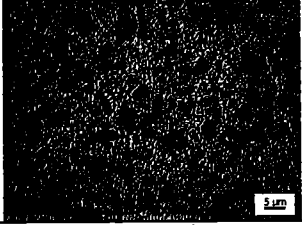
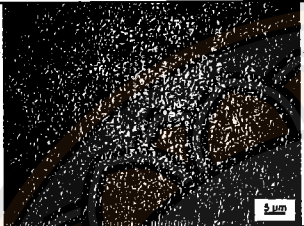

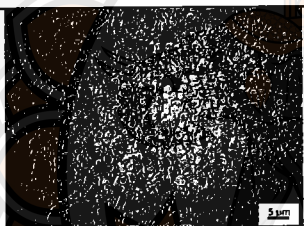
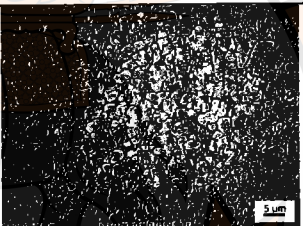
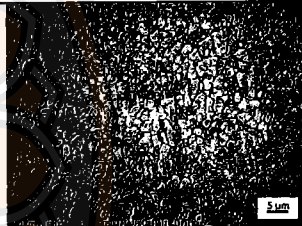
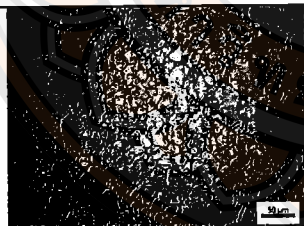
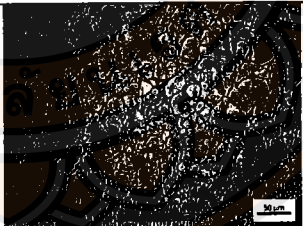

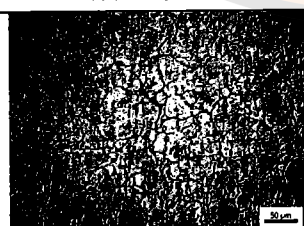
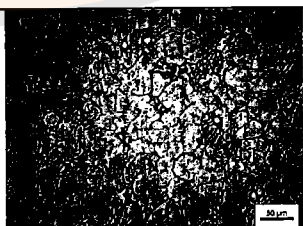
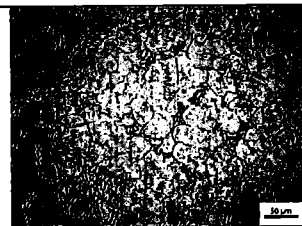
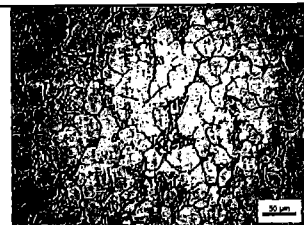
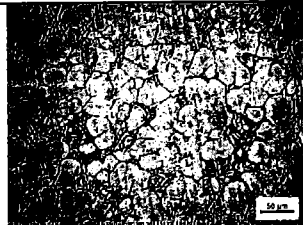

ตารางที่ ก.20 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 650 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 2

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
บน		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

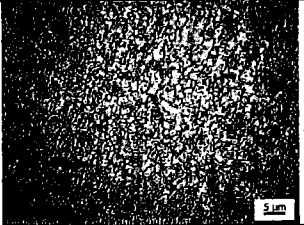
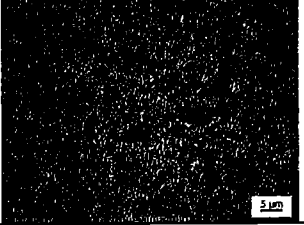
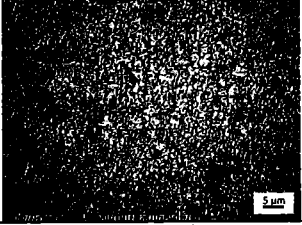
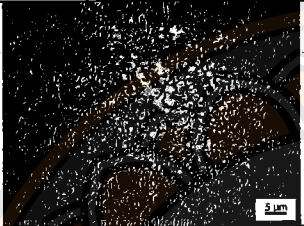

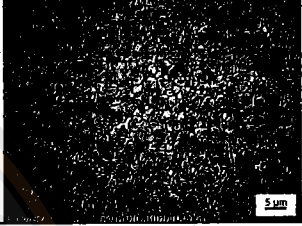
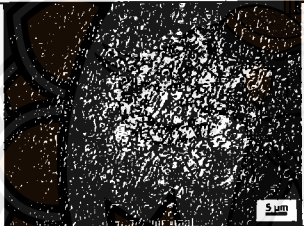
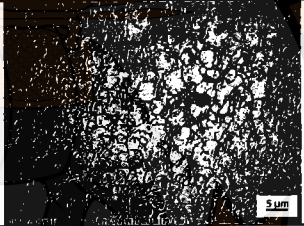
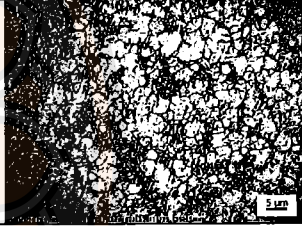
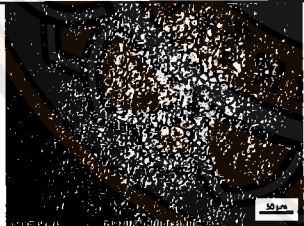
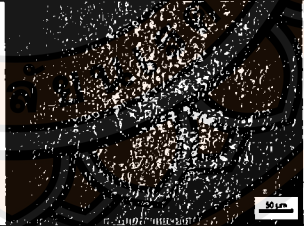
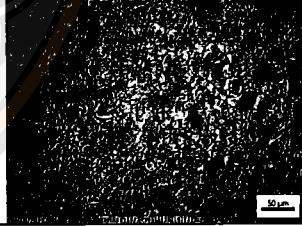
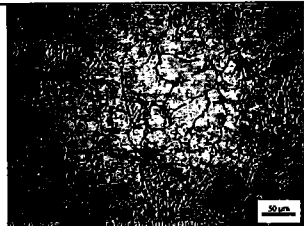
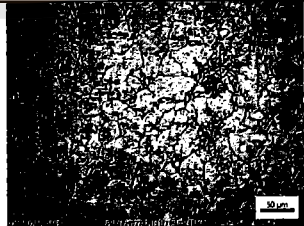
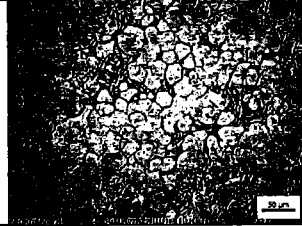
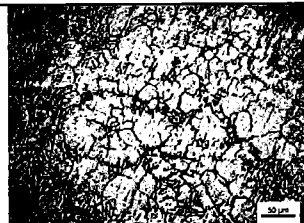
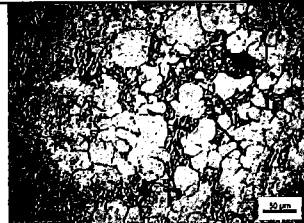
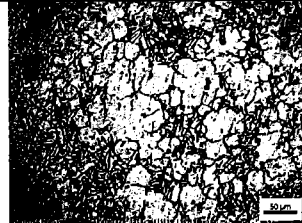
ตารางที่ ก.21 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับแรงเหวี่ยง ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 650 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 3

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
บน		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

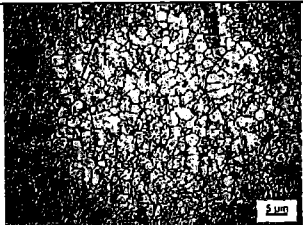
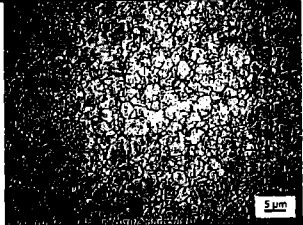
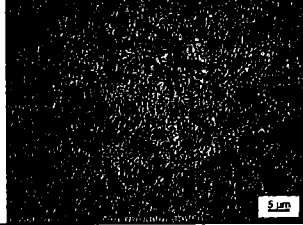
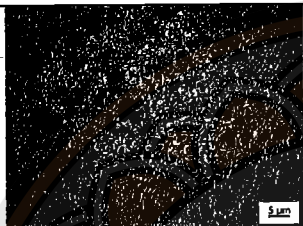
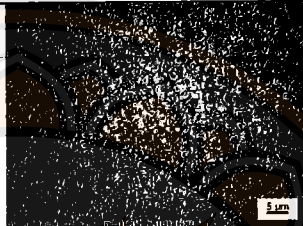
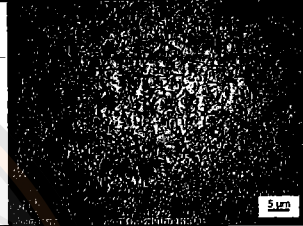
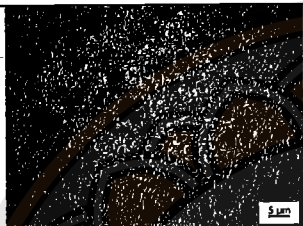
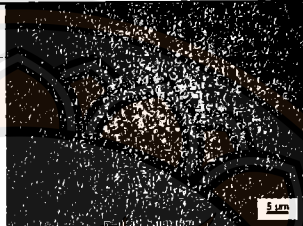
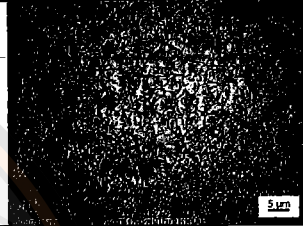
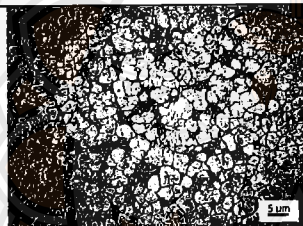
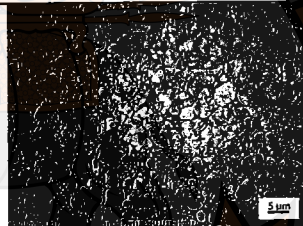
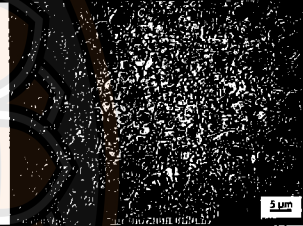
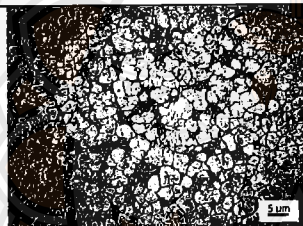
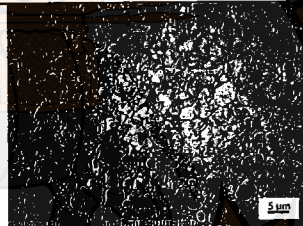
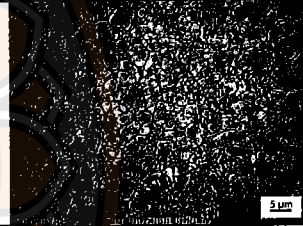
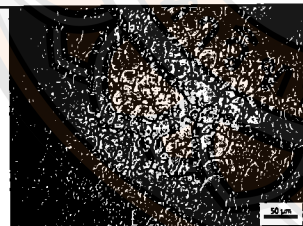
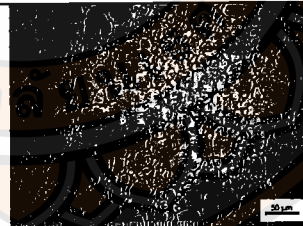
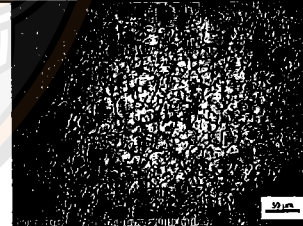
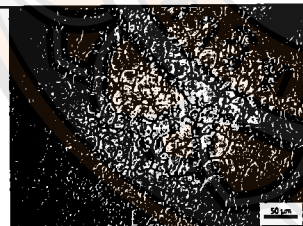
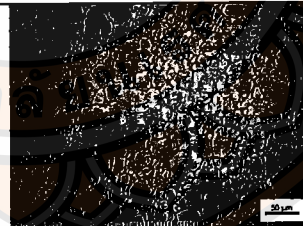
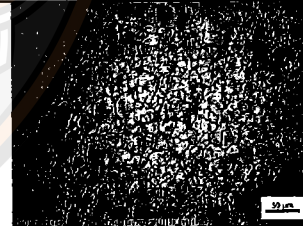
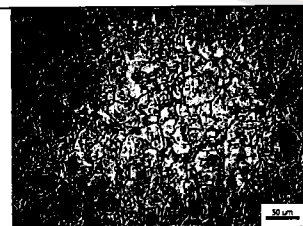
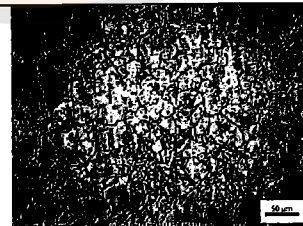
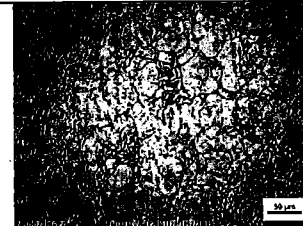
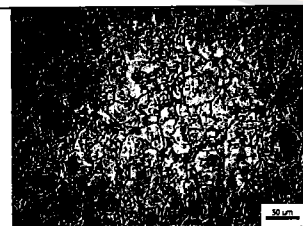
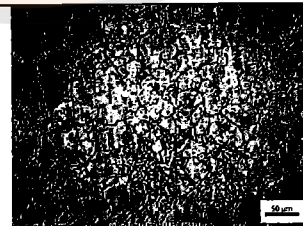
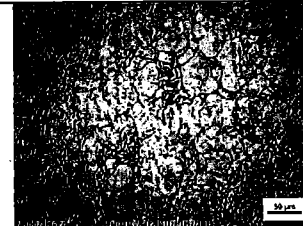
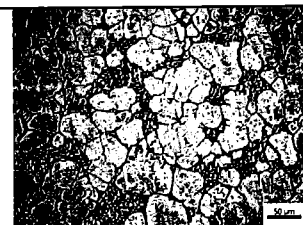
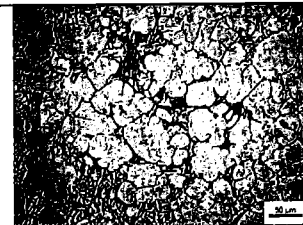
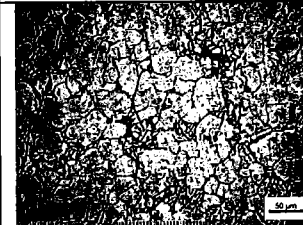
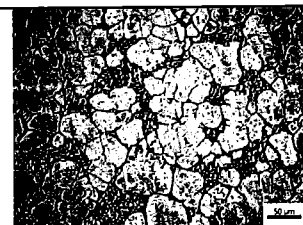
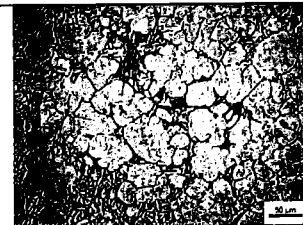
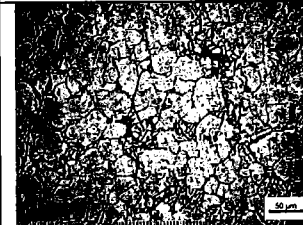
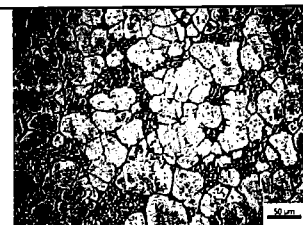
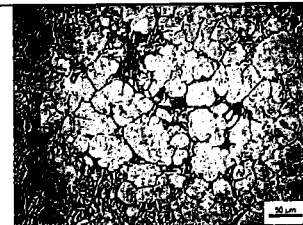
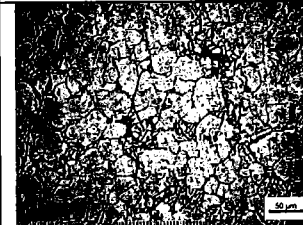
ตารางที่ ก.22 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 1

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
บน		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

ตารางที่ ก.23 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 2

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
	กลาง	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
				
ล่าง		ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
				

ตารางที่ ก.24 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ชั้นที่ 3

		กำลังขยาย 100 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
				
ล่าง				
				
		กำลังขยาย 200 เท่า		
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
บน				
				
กลาง				
				
ล่าง				
				



**ภาคผนวก ข**

**พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐุมภูมิ**

ตารางที่ ข.1 พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ เท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย	
		พื้นที่ ( $\mu\text{m}^2$ )	ปัจจัยรูปร่าง
630	1	1166.438	0.665
	2	1155.945	0.673
	3	1358.035	0.653
	4	1015.052	0.673
	5	1191.873	0.715
	6	892.0995	0.681
	7	1293.193	0.665
	8	1138.795	0.653
	9	1104.066	0.703
	ค่าเฉลี่ยรวม	1146.166	0.676
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	138.143	0.021
640	1	1098.818	0.716
	2	1116.852	0.660
	3	1099.612	0.669
	4	1361.214	0.631
	5	1025.746	0.644
	6	1453.901	0.592
	7	1106.686	0.695
	8	1283.479	0.678
	9	1270.476	0.667
	ค่าเฉลี่ยรวม	1201.865	0.661
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	145.198	0.036
650	1	1085.045	0.613
	2	1215.183	0.658
	3	1122.753	0.637
	4	1077.233	0.663
	5	1199.129	0.610
	6	1240.357	0.665
	7	998.691	0.566
	8	1933.301	0.616
	9	1236.425	0.661
	ค่าเฉลี่ยรวม	1234.236	0.632
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	275.034	0.034

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของอะลูมิเนียมผสมเกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย	
		พื้นที่ ( $\mu\text{m}^2$ )	ปัจจัยรูปร่าง
	1	1044.163	0.675
	2	1016.216	0.667
	3	1238.780	0.680
	4	1373.655	0.668
	5	1186.110	0.653
660	6	1163.780	0.634
	7	1257.185	0.666
	8	1276.143	0.667
	9	1407.348	0.687
	ค่าเฉลี่ยรวม	1218.154	0.666
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	132.439	0.015

ตารางที่ ข.2 พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของอะลูมิเนียมผสมเกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย	
		พื้นที่ ( $\mu\text{m}^2$ )	ปัจจัยรูปร่าง
630	1	937.432	0.662
	2	841.060	0.693
	3	1114.854	0.664
	4	1073.838	0.655
	5	861.884	0.711
	6	1247.554	0.642
	7	1507.332	0.628
	8	1268.656	0.643
	9	1209.744	0.668
	ค่าเฉลี่ยรวม	1118.039	0.663
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	216.891	0.026

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของอะลูมิเนียมผสมเกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับบางเทหล่อเย็นที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ย	
		พื้นที่ ( $\mu\text{m}^2$ )	ปัจจัยรูปร่าง
	1	1385.733	0.634
	2	1443.322	0.658
	3	1109.624	0.675
	4	1087.831	0.636
	5	1243.532	0.642
640	6	1268.907	0.642
	7	1220.486	0.664
	8	989.082	0.654
	9	938.548	0.668
	ค่าเฉลี่ยรวม	1187.452	0.653
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	170.639	0.015
	650	1	1440.586
2		1329.716	0.633
3		941.406	0.704
4		1093.290	0.634
5		1348.880	0.663
6		1300.632	0.691
7		798.804	0.711
8		1043.619	0.687
9		1424.450	0.662
ค่าเฉลี่ยรวม		1191.265	0.665
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		229.227	0.037
660		1	1126.906
	2	1179.632	0.656
	3	1041.501	0.654
	4	1284.226	0.664
	5	1490.424	0.656
	6	1560.283	0.653
	7	1164.357	0.694
	8	1034.621	0.723
	9	992.685	0.690
	ค่าเฉลี่ยรวม	1208.293	0.669
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	200.968	0.028



ภาคผนวก ค

ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319

มหาวิทยาลัยรัตนนคร

ตารางที่ ค.1 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าความแข็ง เฉลี่ย (HB)	ค่าความแข็ง ทั้งชิ้นงาน (HB)
630	1	113.968	111.796	109.679	128.725	132.956
	2	133.590	136.360	130.897		
	3	143.638	143.638	134.965		
	4	126.995	123.250	140.664	135.237	
	5	140.664	125.730	139.209		
	6	137.774	139.209	143.638	134.906	
	7	126.995	140.664	111.796		
	8	140.664	137.774	132.234		
	9	139.209	149.853	134.965		
640	1	130.898	112.876	139.209	131.938	132.054
	2	133.591	130.898	136.360		
	3	130.898	136.360	136.360		
	4	123.251	126.996	115.076	130.495	
	5	129.579	137.775	128.279		
	6	137.775	142.141	133.591	133.728	
	7	132.235	126.996	130.898		
	8	132.235	132.235	130.898		
	9	132.235	140.665	145.159		
650	1	116.198	123.251	118.487	128.272	131.027
	2	128.279	133.591	128.279		
	3	136.360	137.775	132.235		
	4	125.731	125.731	132.235	132.198	
	5	128.279	132.235	132.235		
	6	137.775	136.360	139.209	132.609	
	7	129.579	128.279	129.579		
	8	122.036	133.591	128.279		
	9	137.775	145.159	139.209		

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีด ด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าความแข็ง เฉลี่ย (HB)	ค่าความแข็ง ทั้งชิ้นงาน (HB)
660	1	126.996	103.640	111.796	127.917	128.806
	2	134.966	129.579	130.898		
	3	134.966	139.209	139.209		
	4	125.731	122.036	113.969	127.788	
	5	132.235	130.898	125.731		
	6	136.360	132.235	130.898	130.713	
	7	126.996	120.837	123.251		
	8	133.591	129.579	125.731		
	9	143.639	133.591	139.209		

ตารางที่ ค.2 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีดด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าความแข็ง เฉลี่ย (HB)	ค่าความแข็ง ทั้งชิ้นงาน (HB)
630	1	124.482	105.603	107.615	134.909	133.334
	2	129.579	145.159	139.209		
	3	142.141	158.160	145.159		
	4	120.837	123.251	117.335	127.998	
	5	129.579	136.360	139.209		
	6	142.141	142.141	136.360	133.210	
	7	130.898	129.579	133.591		
	8	128.279	134.966	139.209		
	9	136.360	142.141	140.665		

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบฉีด ด้วยแรงดันสูงร่วมกับรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 630, 640, 650 และ 660 องศาเซลเซียส ความเร็วฉีด 1.0 เมตรต่อวินาที

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ตำแหน่ง	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าความแข็ง เฉลี่ย (HB)	ค่าความแข็ง ทั้งชิ้นงาน (HB)
640	1	137.775	109.679	133.591	135.305	131.751
	2	132.235	139.209	137.775		
	3	137.775	139.209	136.360		
	4	124.482	107.615	118.487	127.730	
	5	137.775	130.898	133.591		
	6	145.159	136.360	145.159		
	7	117.335	133.591	140.665	132.217	
	8	136.360	130.898	128.279		
	9	142.141	137.775	137.775		
650	1	133.591	111.796	134.966	132.863	130.964
	2	133.591	136.360	133.591		
	3	142.141	137.775	139.209		
	4	112.876	130.898	118.487	126.941	
	5	132.235	129.579	133.591		
	6	134.966	139.209	139.209		
	7	125.731	129.579	129.579	133.088	
	8	130.898	130.898	133.591		
	9	139.209	139.209	142.141		
660	1	107.615	120.837	122.036	133.215	132.542
	2	136.360	133.591	136.360		
	3	139.209	140.665	139.209		
	4	112.876	92.818	120.837	131.761	
	5	136.360	134.966	134.966		
	6	139.209	145.159	140.665		
	7	133.591	126.996	130.898	132.651	
	8	132.235	129.579	130.898		
	9	139.209	133.591	134.966		