



การพัฒนากระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง
Development of an Aluminum Semi-Solid Extrusion Process

ธเนศ รัตโนชัยกุล

Tanate Rattanochaikul

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Materials Engineering
Prince of Songkla University**

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การพัฒนากระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง
Development of an Aluminum Semi-Solid Extrusion Process

ธเนศ รัตโนชัยกุล

Tanate Rattanochaikul

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Materials Engineering
Prince of Songkla University**

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนากระบวนการอัครีคอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง
ผู้เขียน นายธเนศ รัตโนชัยกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย ปลุกผล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)

.....กรรมการ
(ดร. เรืองเดช ชงศรี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
สำหรับการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง
ผู้เขียน	นายธเนศ รัตโนชัยกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม (Aluminum extrusion process) ถูกใช้เพื่อผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะยาวและหน้าตัดคงที่เช่น ท่อตัน ท่อกลวง ราง และขอบประตูหน้าต่าง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียที่เด่นชัดของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปคือการอัดรีดโลหะในสถานะของแข็งส่งผลให้ต้องใช้แรงดันอัดที่สูงมากดังนั้นเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่ใช้สำหรับการอัดรีดขึ้นรูปมีราคาสูงเช่นกันจึงทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งที่สัดส่วนของแข็งต่ำ ๆ (น้อยกว่า 30%) เนื่องจากการอัดรีดโลหะในสถานะกึ่งของแข็งนั้นจะช่วยลดการใช้แรงดันอัดที่สูงได้ โดยในการทดลองนี้จะทำการอัดรีดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแท่งกลมตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm และได้ใช้กรรมวิธีการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งที่เรียกว่า Gas Induced Semi-Solid หรือ GISS โดยหลักการคือทำการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะแข็งตัว และเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งจึงจำเป็นต้องศึกษาและออกแบบแม่พิมพ์เบื้องต้นสำหรับใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป และศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น ความเร็วในการอัดรีดขึ้นรูป สัดส่วนของแข็งเริ่มต้น ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงานอันได้แก่ ความยาวของชิ้นงาน ความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกล ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อัดรีดได้มีความสม่ำเสมอตลอดความยาวจึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างสูงเช่น ในกรณีการอัดรีดขึ้นรูปที่สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 10% และ ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 cm/s พบว่าสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (T6) เท่ากับ 276.5 ± 11.3 MPa และ $12.4 \pm 0.9\%$ ตามลำดับ และสุดท้ายสามารถสรุปได้ว่า ตัวแปรสำคัญในการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งที่สัดส่วนของแข็งต่ำ ๆ คือการควบคุมสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นให้เหมาะสมกับความเร็วในการอัดรีดขึ้นรูป

Thesis Title Development of an Aluminum Semi-Solid Extrusion Process
Author Mr.Tanate Rattanochaikul
Major Program Materials Engineering
Academic Year 2009

Abstract

An aluminum extrusion process is mainly used to fabricate long tubes, beams and rods for various applications. However, this process has a high production cost due to the high investment cost of high-pressure machinery. The objective of this work is to develop a new semi-solid extrusion process using semi-solid slurry at low solid fractions. In this work, a laboratory extrusion system was used to fabricate aluminum 356 alloys rods with the diameter of 12 mm. The semi-solid metal process used in this work is the Gas Induced Semi-Solid (GISS) technique. To study the feasibility of the GISS extrusion process, the important parameter that needs to study first is the designation of extrusion die for this GISS extrusion and then the effects of extrusion parameters such as plunger speed and solid fraction on the extrudability, microstructure, and mechanical properties of extruded samples were investigated. In the results, the microstructures of the samples are quite uniform all the length of the samples so it lead to show pretty high mechanical properties, for examples, in the case of higher solid fraction and higher plunger speed (10% solid fraction and 6 cm/s plunger speed) presents the Ultimate Tensile Strength (UTS) and percent of elongation (%El) after T6 heat treatment are 276.5 ± 11.3 MPa and $12.4 \pm 0.9\%$, respectively. It can be concluded that the plunger speed and solid fraction of the semi-solid metal need to be carefully controlled to produce complete extruded parts.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณ ทูงบประมาณแผ่นดิน (เลขที่สัญญา AGR530031M) ทูบผู้วิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายต่างๆ อันเกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัย รวมถึงการเผยแพร่ผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาสในการทำวิจัยและมอบความไว้วางใจให้ข้าพเจ้าเป็นผู้ช่วยวิจัยในหลายๆ โครงการ ทำให้ข้าพเจ้าได้รับประสบการณ์และความรู้อันมีประโยชน์ในการทำวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำและกำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล ที่ให้คำแนะนำและกำลังใจต่อข้าพเจ้าในการทำงานวิจัยอย่างดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชัชชัย ปลุกผล และ ดร.เรืองเดช ชงศรี ที่ได้สละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้ข้อเสนอแนะที่ดีในครั้งนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และบุคลากรทุกท่านที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ งบประมาณ และคำแนะนำต่างๆ ซึ่งทำให้การดำเนินงานเป็นไปได้อย่างราบรื่น

นอกจากนี้วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสำเร็จไปไม่ได้เลย หากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากทีมงาน Innovative Metal Technology (IMT) ทุกคน รวมถึงเพื่อนนักศึกษาปริญญาโท-เอก ทุกคนซึ่งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างเต็มที่ในการทดลองครั้งนี้

และสุดท้าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่คอยดูแลเอาใจใส่ตั้งแต่เล็กจนโตและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

ธนศ รัตโนชัยกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(10)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(15)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 ทฤษฎี สมมุติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	2
1.2.1 กระบวนการอัตรัดขึ้นรูป	2
1.2.2 ลักษณะการไหลในกระบวนการอัตรัดอะลูมิเนียม	3
1.2.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการอัตรัดอะลูมิเนียม	4
1.2.4 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง	8
1.2.5 เทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง	10
1.2.6 กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพันฟองแก๊สขณะแข็งตัว	11
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	20
1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย	20
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	20
1.7 สถานที่ทำวิจัย	21
2. วิธีการวิจัย	22
2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	22
2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	22
2.2.1 เตาหลอมไฟฟ้า	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2 เบ้ากราไฟต์	23
2.2.3 เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยฟองแก๊สของแข็งตัวเวอร์ชัน 1	24
2.2.4 เครื่องอัดไฮดรอลิกแนวอนขนาด 20 ตันระดับห้องปฏิบัติการ	24
2.2.5 เครื่องหล่อฉีดโลหะ	25
2.3 ขั้นตอนการวิจัย	25
2.3.1 การวิเคราะห์ทางความร้อนของโลหะที่ใช้ในการทำวิจัย	25
2.3.2 การเตรียมโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS	26
2.3.3 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งของโลหะกึ่งของแข็งที่เตรียมได้จากกระบวนการ GISS	26
2.3.4 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง	27
2.3.5 การอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง	28
2.3.6 ขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน	31
2.3.7 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	31
2.3.8 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกลของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 356	33
3. ผลและการอภิปรายผล	35
3.1 การวิเคราะห์ทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	35
3.2 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งที่ระยะเวลาในการปล่อยฟองแก๊สต่างกัน	36
3.3 การศึกษาความเป็นได้ของกระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 20 ตันระดับห้องปฏิบัติการ	38
3.3.1 การออกแบบแม่พิมพ์และชนิดของรางรองรับชิ้นงาน	38
3.3.2 การอัดรีดขึ้นรูป	39
3.3.3 การวิเคราะห์ผลจากการอัดรีดเบื้องต้น	41
3.4 การอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งโดยประยุกต์ใช้เครื่องฉีดโลหะ	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1 การออกแบบแม่พิมพ์	45
3.4.2 การอัดรีดขึ้นรูป	46
3.4.3 การวิเคราะห์ผลจากการอัดรีดโดยประยุกต์ใช้เครื่องฉีดโลหะ	47
3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอัดรีด	52
3.5.1 ผลของการวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาคทั่วไปของชิ้นงานอัดรีด	52
3.5.2 อิทธิพลของความเร็วในการอัดรีดต่อความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาค	55
3.5.3 อิทธิพลของสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นต่อความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาค	57
3.5.4 โครงสร้างสร้างจุลภาคหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	59
3.6 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของชิ้นงานอัดรีด	60
3.6.1 ความแข็งแรงดึงสูงสุด	60
3.6.2 เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดแตกหัก	62
3.7 การเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลระหว่างชิ้นงานที่อัดรีดขึ้นรูปได้และสมบัติมาตรฐานของชิ้นงานอัดรีดทั่วไป	64
4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	65
4.1 บทสรุป	65
4.1.1 ผลของการออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดเบื้องต้น	65
4.1.2 ผลของสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นต่อความสมบูรณ์ของชิ้นงานอัดรีด	66
4.1.3 ผลของความเร็วในการอัดรีดต่อความสมบูรณ์ของชิ้นงานอัดรีด	66
4.2 ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก	72
ประวัติผู้วิจัย	83

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทำการศึกษาถึงกระบวนการอัดรีดเหล็กผสมแบบกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Thixoextrusion	15
2.1	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่ใช้ในงานวิจัย	22
2.2	ตัวแปรที่ใช้ในการเตรียมโลหะกึ่งของแข็ง	26
2.3	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของกระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง	29
2.4	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาตัวแปรในการอัดรีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดโลหะ	30
3.1	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการทดลองอัดรีดเบื้องต้น	39
3.2	ผลจากการทดสอบความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงาน	44
3.3	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการอัดรีดร่วมกับเครื่องฉีดโลหะ	46
3.4	สรุปผลจากการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง	52
3.5	สรุประยะของเฟสของเหลวบริเวณขอบชิ้นงาน	59
3.6	ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานอัดรีดที่เงื่อนไขต่างกันก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	61
3.7	ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานอัดรีดที่เงื่อนไขต่างกันก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	63

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	แสดง(ก) แนวโน้มปริมาณการใช้อะลูมิเนียมและ (ข) แนวโน้มการขึ้นรูปอะลูมิเนียมแบบอัดและรีดขึ้นรูป	1
1.2	ชนิดของการอัดรีดขึ้นรูป (ก) Direct Extrusion (ข) Indirect Extrusion	3
1.3	ลักษณะการไหลในการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม	3
1.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและระยะการเคลื่อนที่ของแรม	4
1.5	ลักษณะการไหลในช่วงสุดท้ายของการอัดรีดขึ้นรูป	5
1.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการรีดกับระยะเคลื่อนที่แรม	5
1.7	การเปลี่ยนแปลงของความเร็วในการอัดรีดต่อความดันที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป	6
1.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการอัดรีดและการเพิ่มของอุณหภูมิ	7
1.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการอัดรีดและความดันที่ใช้ในการอัดรีด	8
1.10	แผนภาพสมดุลภาคแสดงช่วงอุณหภูมิของโลหะที่อยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว	9
1.11	เปรียบเทียบโครงสร้างและการไหลระหว่างการหล่อด้วยน้ำโลหะกับโลหะกึ่งของแข็ง (Wannasin, 2006)	9
1.12	เปรียบเทียบกระบวนการ (ก) Rheocasting และ (ข) Thixocasting	11
1.13	กรรมวิธีผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ด้วยกระบวนการ Gas Induced Semi-Solid (GISS process)	12
1.14	โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ผลิตได้จากกระบวนการ GISS (Wannasin et al., 2006)	12
1.15	เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตหรืออัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al-4.5%Cu) ในช่วงกึ่งของแข็ง (B.S. Lee et al., 2005)	13
1.16	รูปชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al-4.5%Cu) ในช่วงกึ่งของแข็งที่อัดรีดขึ้นรูปได้ (B.S. Lee et al., 2005)	14
1.17	สมบัติของกลของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al-4.5%Cu) หลังการอัดรีดด้วยเงื่อนไขต่างๆ (B.S. Lee et al., 2005)	14
1.18	แสดงลักษณะของแม่พิมพ์อัดรีดเหล็กผสมเกรด X210CrW12 ด้วยกรรมวิธี Thixoextrusion (F. Knauf et al., 2008)	15

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
1.19	แสดงชิ้นงานเหล็กผสมเกรด X210CrW12 ที่ผ่านกรรมวิธี Thixoextrusion (F. Knauf et al., 2008)	16
1.20	แสดงผลจากการใช้โปรแกรมจำลองการไหลของเหล็กผสมเกรด X210CrW12 (F.Knauf et al., 2008)	16
1.21	แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กผสมเกรด X210CrW12 ที่ผ่านกรรมวิธี Thixoextrusion ที่เงื่อนไขต่างๆ (F. Knauf et al., 2008)	17
1.22	แสดงลักษณะของเศษอะลูมิเนียมที่ผ่านการบดและอัดแล้ว (Sumio Sugiyama et al., 2008)	17
1.23	ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A2011 จากการอัดรีดขึ้นรูป (Sumio Sugiyama et al., 2008)	18
1.24	แรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมเกรด A2011 (ดัดแปลงจาก Sumio Sugiyama et al., 2008)	18
1.25	สมบัติเชิงกลของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A2011 (ดัดแปลงจาก Sumio Sugiyama et al., 2008)	19
2.1	อินกอทอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่ใช้ในงานวิจัย	22
2.2	เตาหลอมไฟฟ้าชนิดลวดความต้านทานที่ใช้ในการทดลอง	23
2.3	ตัวอย่างเบ้าหลอมกราไฟต์ ที่ใช้ในการทดลอง	23
2.4	เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพันฟองแก๊สขณะแข็งตัวเวอร์ชัน 1	24
2.5	เครื่องอัดไฮดรอลิกแนวตั้งและแนวนอนที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้น	24
2.6	เครื่องหล่อฉีดโลหะที่ใช้ในงานวิจัย	25
2.7	อุปกรณ์และขั้นตอนการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็ง (ก) แม่พิมพ์ทองแดงที่ใช้ (ข) การสร้าง Threshold ด้วยโปรแกรม Photoshop และ (ค) การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Image Tools	27
2.8	ขั้นตอนการอัดรีดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งในงานวิจัยนี้	28
2.9	ตัวอย่างขั้นตอนในการอัดรีดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเบื้องต้น	30
2.10	ตัวอย่างขั้นตอนในการอัดรีดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งด้วยเครื่องฉีดโลหะ	31

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.11	บริเวณที่ตัดชิ้นงานเพื่อนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	32
2.12	ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแบบร้อน	32
2.13	เครื่องขัดชิ้นงานแบบขัดหยาบและขัดละเอียด	33
2.14	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	33
2.15	ภาพ Drawing ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM B557M	34
3.1	แสดงเส้นกราฟของการเย็นตัว (Cooling Curves) ของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้	36
3.2	ชิ้นงานที่ได้จากการเก็บตัวอย่างด้วยแม่พิมพ์ทองแดงและบริเวณตรงกลางจะถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	36
3.3	โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการทำ Threshold ด้วยโปรแกรม Photoshop และใช้ในการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งด้วยโปรแกรม Image tools	37
3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปล่อยฟองแก๊สและปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้น	37
3.5	ชุดอุปกรณ์สำหรับใช้อัดรีดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเบื้องต้น	38
3.6	แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น โดย (ก) ใช้รางเหล็กสำหรับรองรับชิ้นงาน และ (ข) ใช้รางกราไฟต์สำหรับรองรับชิ้นงาน	39
3.7	ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง โดยใช้รางรองรับชิ้นงานที่ทำจากเหล็กที่ (ก) ความเร็วประมาณ 4 cm/s และ (ข) ความเร็วประมาณ 2 cm/s	40
3.8	ชิ้นงานที่ไหลผ่านกราไฟต์ออกมาบนรางเลื่อน	41
3.9	ชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดที่ความเร็วแตกต่างกัน โดย (ก) 2 cm/s (ข) 4 cm/s (ค) 6 cm/s และ (ง) 8 cm/s	42
3.10	บริเวณที่ตัดชิ้นงานสำหรับนำมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดย (ก) แทนส่วนกลาง และ (ป) แทนส่วนปลายของชิ้นงาน	42

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11	43
<p>โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อัดรีดโดยใช้ความเร็วในการอัดรีดและสัดส่วนของแข็งเท่ากับ (ก) 4 cm/s 10% (ข) 6 cm/s 10% และ (ค) 8 cm/s 10%</p>	
3.12	44
<p>โพรงหดตัวระดับมหภาคและรูแก้วที่เกิดขึ้นภายในเนื้อของชิ้นงานหลังจากทำการขัดหายไปด้วยกระดาษทรายน้ำ</p>	
3.13	45
<p>ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของชิ้นงานที่อัดรีดได้</p>	
3.14	46
<p>แม่พิมพ์ที่ออกแบบและสร้างเพื่อใช้ร่วมกับเครื่องฉีดโลหะ</p>	
3.15	47
<p>แม่พิมพ์ที่ออกแบบและสร้างเพื่อใช้ร่วมกับเครื่องฉีดโลหะ</p>	
3.16	48
<p>ส่วนประกอบของชิ้นงานที่อัดรีดได้</p>	
3.17	48
<p>ผิวของชิ้นงานที่ได้ที่ผ่านและไม่ผ่านการยอมรับ (ก) ลักษณะผิวที่เรียบ (ข) ลักษณะผิวที่ขรุขระ</p>	
3.18	49
<p>ชิ้นงานที่อัดรีดได้ที่ความเร็วในการอัดรีดและสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ (ก) 2 cm/s 5% (ข) 4 cm/s 5% (ค) 4 cm/s 10% (ง) 6 cm/s 5% (จ) 6 cm/s 10% และ (ฉ) 6 cm/s 15%</p>	
3.19	51
<p>การเปรียบเทียบชิ้นงานชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดที่เงื่อนไขการอัดรีดต่าง ๆ โดย (ก) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 2 สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5% (ข) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 4 สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5% (ค) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 4 สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 10% (ง) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5% (จ) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 10% และ (ฉ) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 15%</p>	
3.20	52
<p>ลักษณะของเฟสแอลฟาอะลูมิเนียมและยูเทคติก</p>	
3.21	53
<p>โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอัดรีดบริเวณ โคน กลาง และปลายที่ (ก) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 4 cm/s และสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5% (ข) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 cm/s และสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5%</p>	
3.22	55
<p>โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอัดรีดบริเวณกลางและปลายที่กำลังขยาย 500X โดยใช้ความเร็วในการอัดรีดและสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ (ก) 4 cm/s 5% (ข) 6 cm/s 5% และ (ค) 6 cm/s 15%</p>	

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.23	ตำแหน่งของชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาคในแนวรัศมี	57
3.24	โครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบระหว่างบริเวณ (ก) กลาง และ (ข) ขอบของชิ้นงาน	57
3.25	โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบของชิ้นงานที่มีสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นแตกต่างกัน โดย (ก) ใช้สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 5% ที่ความเร็ว 6 cm/s และ (ข) ใช้สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 10% ที่ความเร็ว 6 cm/s	58
3.26	ลักษณะของเฟสซิลิกอน (ก) ก่อน และ (ข) หลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	59
3.27	ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึงสูงสุด	60
3.28	ลักษณะของชิ้นงานที่ถูกดึง โดยเครื่อง UTM	60
3.29	กราฟเปรียบเทียบผลจากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานจากการอัดรีดขึ้นรูปก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	61
3.30	ออกไซด์ฟิล์มภายในเนื้อชิ้นงาน	62
3.31	กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานจากการอัดรีดขึ้นรูปก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	63
3.32	การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานจากการอัดรีดขึ้นรูปก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	64

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

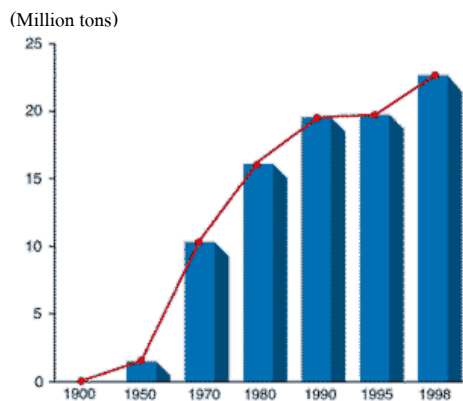
A	พื้นที่ของอนุภาคก่อนกลม (Area)
Al	อะลูมิเนียม (Aluminium)
ASTM	American Society for Testing and Materials
Cu	ทองแดง (Copper)
d	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคก่อนกลม (Particle Equivalent Diameter)
El	Elongation
ER	Extrusion Ratio
F	ค่าความกลมของอนุภาค (Shape Factor)
f_s	สัดส่วนของแข็ง (Solid Fraction)
GISS	Gas Induced Semi-Solid
HE	Hot Extrusion
LSPSE	Low Superheat Pouring with Shearing Field
P	เส้นรอบวงของอนุภาคก่อนกลม (Perimeter)
OES	Optical Emission Spectroscopy
RE	Rheo-Extrusion
SSM	Semi-Solid Metal
SSR	Semi-Solid Rheocasting
T_E	อุณหภูมิที่จุดยูเทกติก (Eutectic Temperature)
T_L	อุณหภูมิที่เส้นของเหลว (Liquidus Temperature)
UTM	Universal Testing Machine
UTS	Ultimate Tensile Strength
YS	Yield Strength

บทที่ 1

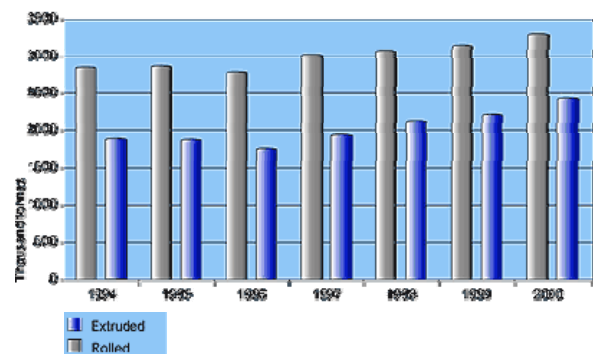
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันปริมาณการใช้อะลูมิเนียมทั่วโลกมีมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 1.1 (ก) เนื่องจากอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายอย่างเช่น น้ำหนักเบา (น้อยกว่าเหล็กประมาณสามเท่า) ทนต่อการกัดกร่อน นำไฟฟ้าได้ดี และง่ายต่อการขึ้นรูป จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานได้หลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ขอบประตู หน้าต่าง งานด้านการตกแต่งภายใน เป็นต้น (Kaiser Aluminum, 1997)



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.1 แสดง (ก) แนวโน้มปริมาณการใช้อะลูมิเนียม (ที่มา www.azom.com) และ (ข) แนวโน้มการขึ้นรูปอะลูมิเนียมแบบอัดและรีดขึ้นรูป (ที่มา www.alunet.net)

การขึ้นรูปอะลูมิเนียมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การหล่อขึ้นรูป (Casting) การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) การรีดขึ้นรูป (Rolling) และการทุบขึ้นรูป (Forging) แตกต่างกันที่การนำไปใช้งาน ปริมาณการนำอะลูมิเนียมมาทำการอัดรีดขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.1 (ข) ซึ่งข้อดีของการขึ้นรูปแบบนี้คือ ได้ชิ้นงานที่มีความยาวต่อเนื่องและพื้นที่หน้าตัดคงที่ อีกทั้งชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปแบบอัดรีดยังมีลักษณะใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ (Near Net Shape) ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการนำไปตกแต่งด้วยเครื่องจักรอีกครั้ง และเมื่อเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างการอัดรีดขึ้นรูป

และการรีดขึ้นรูปพบว่าการอัดรีดขึ้นรูปสามารถประยุกต์ใช้กับงานได้หลายประเภทมากกว่า แต่ปัญหาของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปคือ เครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่เพื่ออัดโลหะในสถานะของแข็งซึ่งมีราคาแพง ใช้แรงอัดค่อนข้างสูง อีกทั้งโครงสร้างแบบเดนไดรต์ (Dendrite Structure) ในน้ำโลหะที่เป็นอุปสรรคต่อการไหล คำหน้าที่เกิดจากโพรงหดตัว และอื่น ๆ ปัญหาเหล่านี้ต่างเป็นสิ่งที่พบในงานอัดรีดขึ้นรูป (Pearson, 1960) เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีนักวิจัยหลายท่านพยายามศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมให้ดีขึ้นเช่น ลดโครงสร้างเดนไดรต์ในน้ำโลหะ เพิ่มความแข็งแรงให้แก่ชิ้นงานอะลูมิเนียม ลดปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งทิมวิจัยของ เจษฎา วรณสินธุ์ มีเทคโนโลยีการขึ้นรูปอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งที่เรียกว่า Gas Induced Semi-Solid หรือ GISS ซึ่งสามารถสร้างเกรนก่อนกลบขึ้นภายในน้ำโลหะเพื่อแก้ปัญหาโครงสร้างแบบเดนไดรต์และได้มีการศึกษาต่อเนื่องถึงผลกระทบต่าง ๆ ซึ่งการขึ้นรูปในสถานะแบบกึ่งของแข็งนี้ อะลูมิเนียมจะมีพฤติกรรมคล้ายไอศกรีมทำให้สามารถอัดรีดขึ้นรูปโดยไม่ต้องใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ และมีราคาแพง อีกทั้งได้สมบัติเชิงกลที่สูง ดังนั้นโครงการวิจัยชิ้นนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ของการอัดรีดขึ้นรูปชิ้นงานอะลูมิเนียมโดยอาศัยกรรมวิธี GISS เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานกับอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 ทฤษฎี สมมุติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

1.2.1 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion Process)

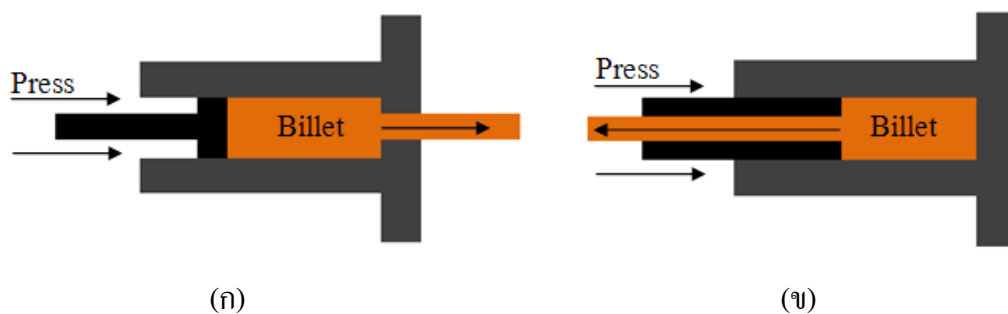
การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) การอัดรีดขึ้นรูปหมายถึงการอัดโลหะแข็งผ่านแม่พิมพ์ (Die) ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะยาว และมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอรูปทรงตามต้องการ ซึ่งการอัดรีดขึ้นรูปแบ่งเป็นสองประเภทใหญ่ ๆ คือ การอัดรีดขึ้นรูปร้อน (Hot Extrusion) และการอัดรีดขึ้นรูปเย็น (Cold Extrusion)

สมบัติเด่นของงานอัดรีดขึ้นรูปคือ (สุเทพ และคณะ)

- สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะยาว (Long Length Part)
- มีลักษณะของชิ้นงานใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ (Near Net Shape)
- มีจำนวนเนื้ออะลูมิเนียมที่เสียไปจากการอัดขึ้นรูปน้อยมาก
- สามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่อง
- ผิวของชิ้นงานมีคุณภาพดี

การอัดรีดขึ้นรูปสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการอัดดังต่อไปนี้

1. Direct Extrusion (or Forward Extrusion) เป็นการอัดโลหะผ่านแม่พิมพ์ซึ่งชิ้นงานที่ได้จะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของแรงอัด
 2. Indirect Extrusion (or Reverse Extrusion) เป็นการอัดโลหะผ่านแม่พิมพ์ซึ่งชิ้นงานที่ได้จะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของแรงอัด
- ลักษณะของการอัดรีดขึ้นรูปโลหะของทั้งสองชนิดแสดงดังรูปที่ 1.2

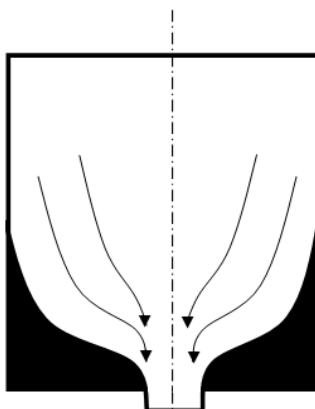


รูปที่ 1.2 ชนิดของการอัดรีดขึ้นรูป

(ก) Direct Extrusion (ข) Indirect Extrusion

1.2.2 ลักษณะการไหลในกระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียม

การไหลในการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมจะมีความเสียดทานเกิดขึ้นทั้งที่ คอนเทนเนอร์และแม่พิมพ์ บริเวณโดยรอบที่ผิวสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมกับคอนเทนเนอร์จะไหลช้าลง บริเวณที่เกิดการเสียดทานจะขยายออกไปด้านหลัง Dead Metal Zone จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเริ่มต้น บริเวณที่เกิดการเสียดทานจะอยู่รอบนอกแต่จะค่อย ๆ ขยายเข้าสู่ศูนย์กลางทำให้โลหะบริเวณผิวซึ่งอาจมีออกไซด์หรือวัสดุหล่อลื่น (หากมีการหล่อลื่น) มีโอกาสที่จะถูกอัดรีดออกไปด้วย ซึ่งจะทำให้คุณภาพผิวที่ได้ต่ำลง ซึ่งการไหลของอะลูมิเนียมในการอัดรีดขึ้นรูปโดยมากเป็นการไหลในลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1.3

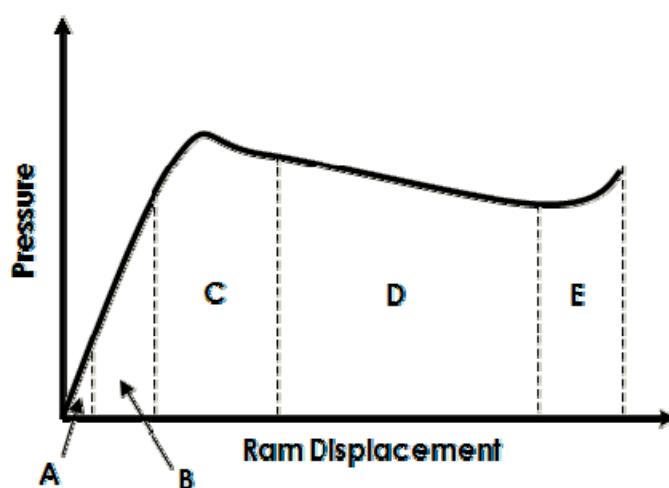


รูปที่ 1.3 ลักษณะการไหลในการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม (สุเทพ และคณะ)

1.2.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการอัดรีดอะลูมิเนียม

1.2.3.1 การเปลี่ยนแปลงความดันขณะอัดรีด

ในขณะอัดรีดนั้นความดันที่เกิดขึ้นไม่คงที่จะเปลี่ยนแปลงตามระยะการเคลื่อนที่ของแรมหรือเวลาในการอัดรีด แสดงในรูปที่ 1.4 เสนอ โดย Sheppard



รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและระยะการเคลื่อนที่ของแรม (ดัดแปลงจาก Sheppard, 1999)

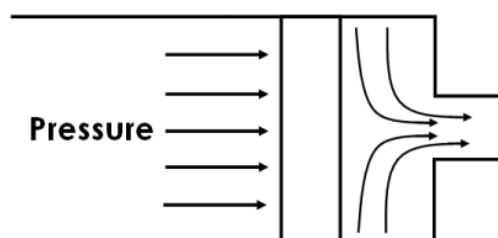
ช่วง A อะลูมิเนียมถูกกดคั่นจนเต็มคอนเทนเนอร์ ขณะที่อาจเกิดการเปลี่ยนรูปร่างบางส่วนที่บริเวณผนังคอนเทนเนอร์และบริเวณก่อนเข้าสู่แม่พิมพ์ เริ่มเกิดผนังดิสโลเคชัน (Dislocation Walls) ที่บริเวณต่าง ๆ

ช่วง B อะลูมิเนียมถูกอัดต่อเนื่อง ผนังดิสโลเคชันเริ่มปรากฏมากขึ้น เกรนย่อย (Subgrain) เริ่มเกิดขึ้น โครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอนี้ จะทำให้เกิดดิสโลเคชันและเกรนย่อยหนาแน่นมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณแม่พิมพ์ในช่วงท้ายอะลูมิเนียมจะเริ่มถูกอัดรีดออกมา โดยมีโครงสร้างที่มีความหนาแน่นของดิสโลเคชันต่ำคล้ายกับโครงสร้างจากงานหล่อ

ช่วง C เป็นช่วงที่มีความดันสูงที่สุดขอบเขตของช่วงนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะเจือ ในช่วงเริ่มต้นของช่วงนี้ Dead Metal Zone ยังไม่ปรากฏ Dead Metal Zone จะปรากฏขึ้นชัดเจนในช่วงที่ถึงจุดที่เกิดความดันสูงสุด

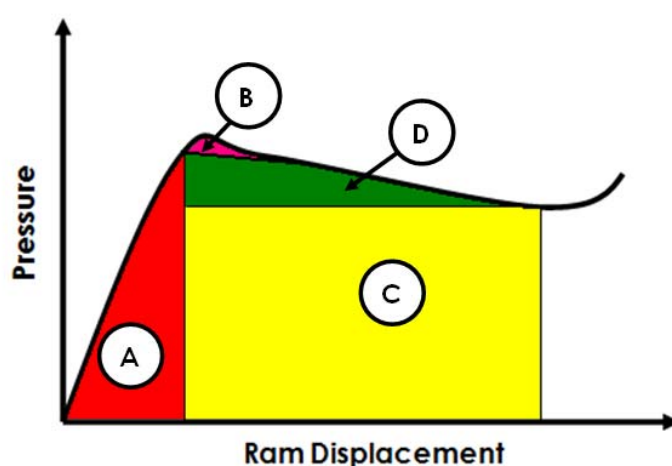
ช่วง D เป็นช่วงที่อาจเรียกว่าเป็นสภาวะคงตัว ในช่วงนี้อุณหภูมิจะสูงขึ้นและความเสียดทานระหว่างอะลูมิเนียมกับคอนเทนเนอร์จะลดต่ำลงเนื่องจากการลดลงของแท่งอะลูมิเนียม ทำให้ความดันลดลงอย่างต่อเนื่อง

ช่วง E เป็นช่วงที่ความดันจะเริ่มสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณอะลูมิเนียมที่น้อยลง ทำให้การไหลของอะลูมิเนียมไหลได้ยากในแนวรัศมี ความดันจึงสูงขึ้นเนื่องจากการกดอัดอะลูมิเนียม ในทางปฏิบัตินั้นการอัดรีดขึ้นรูปควรสิ้นสุดลงก่อนการเกิดช่วง E ลักษณะการไหลแสดงดังรูปที่ 1.5 (Kaiser Aluminum & Chemical Sale, 1997)



รูปที่ 1.5 ลักษณะการไหลในช่วงสุดท้ายของการอัดรีดขึ้นรูป (ดัดแปลงจาก Sheppard, 1999)

ลักษณะของแรงในการอัดรีดขึ้นรูปมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะเช่นเดียวกับความดันในการอัดรีดขึ้นรูป โดยจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการอัดรีดกับระยะเคลื่อนที่ของแรม สามารถแสดงถึงงานส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในการรีดดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการรีดกับระยะเคลื่อนที่ของแรม (ดัดแปลงจาก Kaiser Aluminum & Chemical Sale, 1997)

บริเวณ A เป็นงานที่ใช้ในการอัดรีดอะลูมิเนียม (Upsetting Work) เมื่อเริ่มต้น

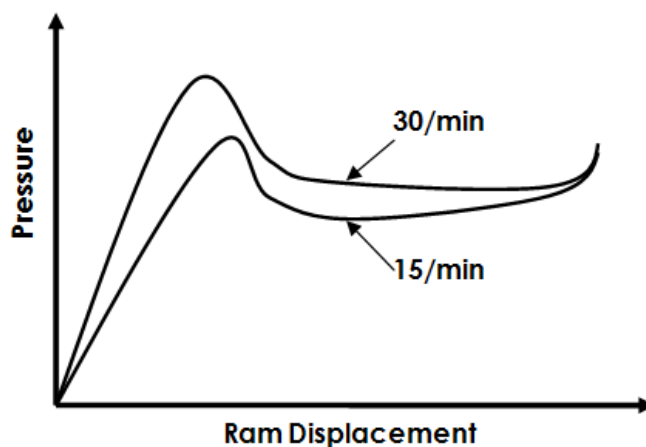
บริเวณ B เป็นงานที่ใช้เมื่ออะลูมิเนียมเริ่มเปลี่ยนรูป (Initiate Deformation Work)

บริเวณ C เป็นงานที่ใช้ในการเปลี่ยนรูป (Deformation Work)

บริเวณ D เป็นงานในการเอาชนะความเสียดทานและการเฉือน (Overcome Friction and Shearing Work)

1.2.3.2 อิทธิพลของความเร็วอัดรีดต่อความดัน

การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการอัดรีดขึ้นรูปผลส่งต่อความดัน โดยหากใช้ความเร็วในการอัดรีดที่สูงขึ้นจะมีผลทำให้ต้องใช้ความดันสูงขึ้นด้วยแสดงดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วในการอัดรีดต่อความดันที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป (ดัดแปลงจาก Kaiser Aluminum & Chemical Sale, 1997)

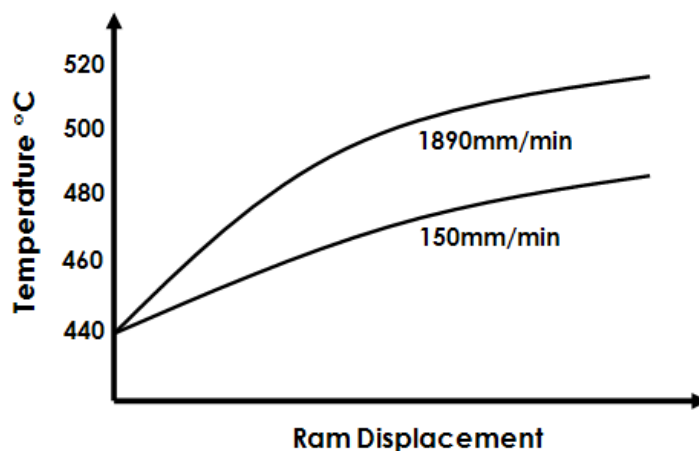
1.2.3.3 อิทธิพลของความเร็วอัดรีดต่ออุณหภูมิ

ความเร็วในการอัดรีดมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยหากอัดรีดด้วยความเร็วสูงมีผลทำให้อุณหภูมิในการอัดรีดเพิ่มขึ้นมากกว่าการอัดรีดที่ความเร็วต่ำกว่า จากรูปที่ 1.8 เห็นได้ว่าเมื่ออัดรีดด้วยความเร็วที่สูง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมากกว่าอัดรีดด้วยความเร็วที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ในการอัดรีดด้วยความเร็วที่เท่ากันนั้นอุณหภูมิที่ผิวจะเพิ่มขึ้น เรื่อย ๆ ตามระยะเคลื่อนที่ของแรมที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดังกล่าวมีผลจากความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุดังนี้

1. ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนรูปในสภาพพลาสติก

2. ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดทานระหว่างอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนรูปกับเครื่องมือ
3. ความร้อนที่ถ่ายเทภายในบิลเลท
4. ความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างบิลเลทกับเครื่องมือ
5. ความร้อนที่ส่งผ่านออกไปกับอะลูมิเนียมที่อัดรีดแล้ว

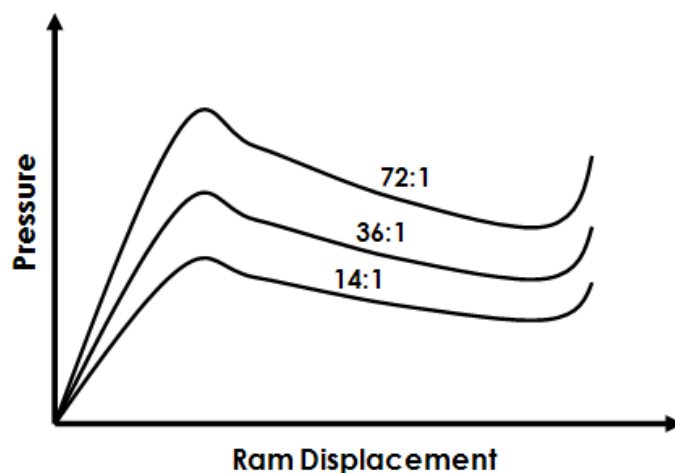
การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผิวจะสูงกว่าภายใน ซึ่งการเพิ่มของอุณหภูมิที่ผิวนี้ มีผลต่อคุณภาพของอะลูมิเนียม โดยอุณหภูมิที่ผิวนี้จะต้องไม่เกินกว่าอุณหภูมิวิกฤติที่ทำให้อะลูมิเนียมจากการอัดรีดเกิดการรื้อกขาดที่ผิว (Hot Shortness) โดยเฉพาะในช่วงท้ายการอัดรีด จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้มีความพยายามในการพัฒนาการอัดรีดที่เรียกว่า การอัดรีดที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal Extrusion) โดยการอัดรีดแบบนี้จะอาศัยวิธีควบคุมความเร็วในการอัดรีดให้เปลี่ยนแปลงตามระยะการเคลื่อนที่ของแรม หรือปรับการให้ความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิเริ่มต้นของบิลเลทให้ไม่เท่ากัน (Taper Heating) โดยให้ด้านที่อุณหภูมิสูงถูกอัดรีดก่อนด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า



รูปที่ 1.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการอัดรีดและการเพิ่มของอุณหภูมิ
(ดัดแปลงจาก Kaiser Aluminum & Chemical Sale, 1997)

1.2.3.4 อิทธิพลของอัตราส่วนอัดรีดต่อความดัน

อัตราส่วนการอัดรีด (Extrusion Ratio :ER) คืออัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของบิลเลทต่อพื้นที่หน้าตัดรวมของช่องแม่พิมพ์ โดยเมื่ออัตราส่วนการอัดรีดสูงย่อมต้องใช้ความดันในการอัดรีดที่สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 1.9 ในบางกรณีการลดค่าอัตราส่วนการอัดรีดอาจทำได้โดยการใช้การอัดรีดพร้อมกันหลายเส้น



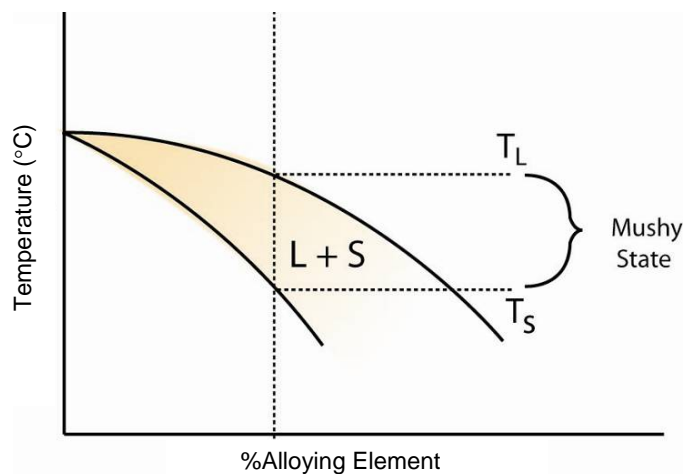
รูปที่ 1.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการอัดรีดและความดันที่ใช้ในการอัดรีด
(ดัดแปลงจาก Kaiser Aluminum & Chemical Sale, 1997)

ชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดขึ้นรูปได้แก่ ท่อ รางม่านที่เป็นอะลูมิเนียม เป็นต้น ข้อจำกัดของการอัดรีดขึ้นรูปคือ จะต้องใช้เครื่องจักรที่มีกำลังสูงทำให้มีต้นทุนการผลิตที่สูงและส่วนมากจะผลิตอะลูมิเนียมเกรด 6061 หรือ 6063 เนื่องจากมีสมบัติการไหลที่ดี แต่สมบัติเชิงกลที่ได้จะไม่สูงมาก

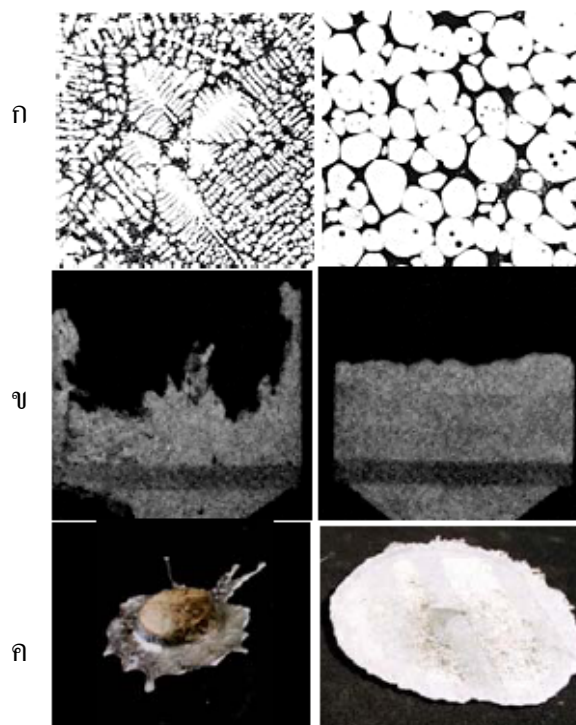
1.2.4 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting)

การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting) ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในช่วงต้นปี 1970 โดย Spencer และ Flemings ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology, MIT) (Spencer, 1971) จนถึงปัจจุบันก็นับเป็นเวลาเกือบ 40 ปีแล้วที่ได้มีการวิจัยและพัฒนากันมาตลอดอย่างต่อเนื่อง โดยการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งนี้เป็นการขึ้นรูปโลหะด้วยการหล่อในขณะที่โลหะอยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Mushy State) ดังแสดงในรูปที่ 1.10 ซึ่งโลหะจะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วน โดยโลหะส่วนที่แข็งตัวแล้วจะมีโครงสร้างเกรนไม่เป็นแบบเดนไดรต์ (Non-Dendritic Grain) หรือเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular Grain) ดังรูปที่ 1.11(ก รูปขวา) ซึ่งเกรนก้อนกลมที่ลอยอยู่ในน้ำโลหะนี้จะทำให้โลหะกึ่งของแข็ง มีความหนืดมากกว่าน้ำโลหะทั่วไปหลายเท่า ทำให้การไหลเข้าแม่พิมพ์ไม่เป็นแบบปั่นป่วน (Non-Turbulent หรือ Laminar Flow) รูปที่ 1.11 (ข) แสดงการไหลเปรียบเทียบระหว่างน้ำโลหะทั่วไป (รูปซ้าย) และโลหะกึ่งของแข็ง (รูปขวา) และรูปที่ 1.11 (ค) เปรียบเทียบการ

ไหลของน้ำโลหะทั่วไปที่มีโครงสร้างเกรนแบบเดนไดรต์ (รูปซ้าย) กับโลหะในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (รูปขวา) ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าโลหะกึ่งของแข็งมีการไหลที่ราบเรียบกว่ามาก (Wannasin, 2006)



รูปที่ 1.10 แผนภาพสมดุลภาคแสดงช่วงอุณหภูมิของโลหะที่อยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว



รูปที่ 1.11 เปรียบเทียบโครงสร้างและการไหลระหว่างการหล่อด้วยน้ำโลหะกับโลหะกึ่งของแข็ง (Wannasin, 2006)

1.2.5 เทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Processing Technology)

วิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่สามารถใช้ได้ ในอุตสาหกรรมมีอยู่สองวิธี ได้แก่ กรรมวิธี Thixocasting และกรรมวิธี Rheocasting โดยในช่วงแรกของการประยุกต์ใช้โลหะกึ่งของแข็งในอุตสาหกรรมไดคาสติง จะทำโดยกรรมวิธี Thixocasting ซึ่งเริ่มจากการผลิตแท่งอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างเกรนแบบ Equiaxed ที่ละเอียดมากโดยการหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting) ที่มีการกวนน้ำโลหะขณะแข็งตัวด้วย จากนั้นโรงงานผลิตชิ้นงานไดคาส จะซื้อแท่งอะลูมิเนียม (Billet) นี้ และตัดเป็นท่อนๆ แล้วนำมาให้ความร้อนโดยใช้ Induction Heating เพื่อให้อุณหภูมิแท่ง Billet อยู่ในช่วงกึ่งแข็งกึ่งเหลวอย่างรวดเร็ว โดยโครงสร้างเกรนแบบ Equiaxed ที่ละเอียดมากนี้จะเติบโตและ Coarsen เป็นเกรนแบบก้อนกลมในเวลาอันสั้น จากนั้นแท่งอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งหรือที่เรียกว่า Slug นี้ก็จะถูกอัดเข้าไปในแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 1.12 (จ) ชิ้นส่วนที่ผลิตด้วยกรรมวิธี Thixocasting สามารถนำไปอบชุบเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล ทำให้ชิ้นงานอะลูมิเนียมเหล่านี้สามารถนำไปใช้แทนเหล็กหล่อในรถยนต์ได้ (Wannasin, 2006)

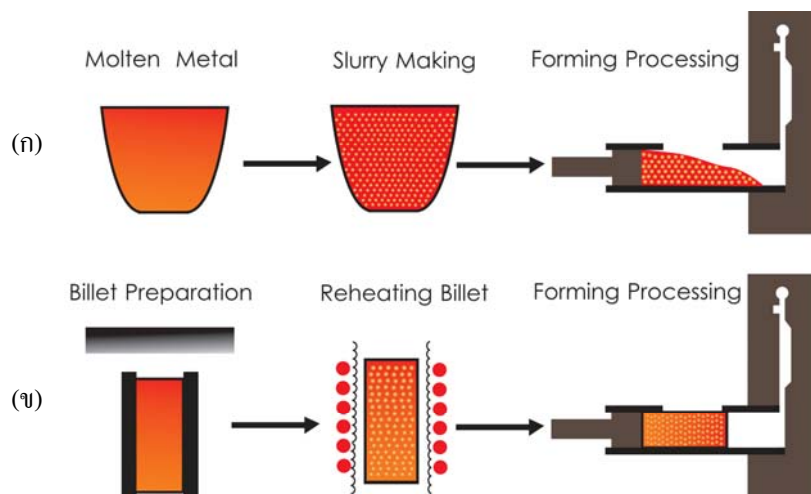
ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งจะมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่การประยุกต์ใช้กระบวนการ Thixocasting ในอุตสาหกรรมก็ยังมีอยู่จำกัดมาก โดยมีการผลิตแค่ประมาณ 20,000 – 25,000 ตันของชิ้นส่วนอะลูมิเนียม ในปี 2001 (de Figueredo, 2001) สาเหตุสำคัญที่ทำให้ Thixocasting ไม่ได้มีการใช้อย่างแพร่หลายมีดังนี้

1. ต้องการการลงทุนสูงในการซื้ออุปกรณ์ต่างๆ เช่น อุปกรณ์ตัดแท่งอะลูมิเนียม ชุดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (Induction Heating Cell) อุปกรณ์ที่ใช้ย้ายแท่ง Slug และต้องลงทุนในการแก้ไขเครื่อง Die Casting หรือต้องซื้อเครื่องใหม่เพื่อให้ใช้กับแท่ง Slug ได้

2. ราคาของแท่งอะลูมิเนียม (Billet) ที่มีราคาแพงกว่าอะลูมิเนียมอินกอต (Ingot) ที่ใช้ในการหล่อทั่วไป ประมาณ 35 – 40% (DasGupta, 2004) ทำให้ราคาของชิ้นส่วนที่ผลิตด้วย Thixocasting มีราคาสูงและไม่คุ้มค่ากับการผลิตชิ้นส่วนหลายชนิด นอกจากราคาของแท่ง Billet ที่สูงแล้ว การที่ชิ้นส่วนที่เป็น Runner และ Overflow หรือ Reject ต่างๆ ไม่สามารถนำมาหลอมใช้ใหม่ในโรงงานได้ ทำให้ราคาต้นทุนของวัตถุดิบสูงขึ้นด้วย

ด้วยข้อจำกัดของกรรมวิธี Thixocasting เป็นที่เห็นได้ชัดในอุตสาหกรรมและในกลุ่มนักวิจัย โดยในช่วงประมาณ 10 ปีที่ผ่านมา การวิจัยและพัฒนาเปลี่ยนไปเป็นการมุ่งใช้กรรมวิธี Rheocasting แทน ซึ่งกรรมวิธี Rheocasting เป็นการผลิตโลหะกึ่งของแข็งในโรงงานหล่อโดยตรง (รูปที่ 1.12 ก) โดยสามารถผลิตจากแท่งอินกอตของโลหะที่ใช้กันทั่วไปและสามารถนำชิ้นส่วนที่เป็น Runner และ Overflow หรือ Reject ต่างๆ มาหลอมและผลิตเป็นโลหะกึ่งของแข็งเพื่อใช้ใหม่

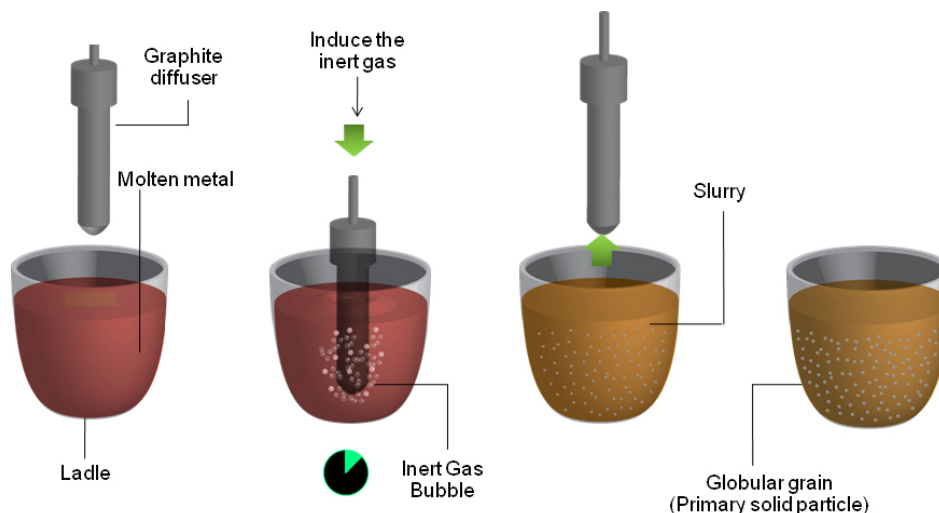
ได้อีก ซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำลงอย่างมาก ทำให้กรรมวิธี Rheocasting มีศักยภาพที่จะใช้ผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ได้อย่างไม่จำกัด (Wannasin, 2006)



รูปที่ 1.12 เปรียบเทียบกระบวนการ (ก) Rheocasting และ (ข) Thixocasting

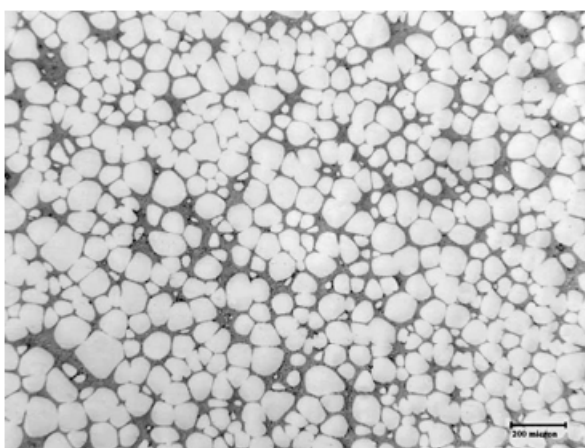
1.2.6 กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการฟุ้งฟองแก๊สขณะแข็งตัว (Gas Induced Semi - Solid, GISS Process)

ปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ขึ้นในประเทศไทย นำโดย ผศ.ดร. เจษฎา วรณสินธุ์ อาจารย์และนักวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยมีที่ปรึกษาจากสหรัฐอเมริกาหลายคน รวมทั้ง Prof. Merton Flemings จาก MIT กำลังวิจัยและพัฒนากรรมวิธี Rheocasting แบบใหม่ ภายใต้การสนับสนุนของโครงการสมองไหลกลับ สวทช. ซึ่งได้ยื่นจดสิทธิบัตรในประเทศไทยและในต่างประเทศแล้ว โดยกระบวนการนี้จะใช้การฟุ้งฟองแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจนผ่านแท่งกราฟไฟต์พูนในปริมาณที่น้อยมากให้ไหลลงไปในน้ำโลหะเพื่อผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยใช้หลักการการเคลื่อนย้ายของน้ำโลหะและการดูดความร้อนเฉพาะจุด ซึ่งวิธีการนี้ฟองแก๊สจะเป็นตัวกลางในการกวนและแท่งกราฟไฟต์พูนจะเป็นตัวดูดระบายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1.13 และเรียกกรรมวิธีแบบใหม่นี้ว่ากระบวนการ Gas Induced Semi-Solid หรือที่เรียกสั้นๆ ว่า กระบวนการ GISS ซึ่งผลจากการวิจัยและพัฒนากระบวนการที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมได้



รูปที่ 1.13 กรรมวิธีผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ด้วยกระบวนการ Gas Induced Semi-Solid (GISS process)

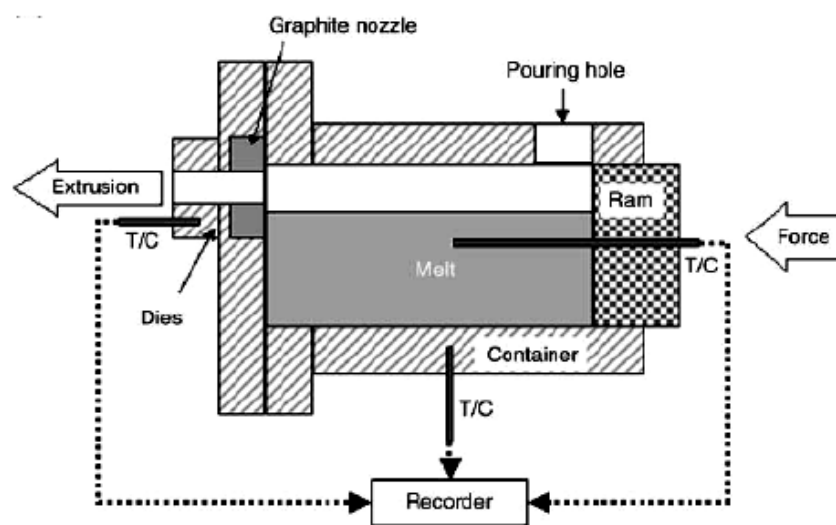
ด้วยวิธีการนี้เนื่องจากแท่งกราฟไฟต์ไม่ต้องการหมุนจึงก่อให้เกิดประโยชน์หลายด้าน เช่น ทำให้เราสามารถต่อระบบหล่อเย็น (Cooling) และระบบเซนเซอร์เข้าไปกับระบบทั้งหมดของกระบวนการได้อย่างง่ายไม่ซับซ้อน และเนื่องจากจะไม่เกิดกระแสวนในน้ำโลหะ ดังนั้นจะไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น (Wannasin et al., 2006)



รูปที่ 1.14 โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ผลิตได้จากกระบวนการ GISS (Wannasin et al., 2006)

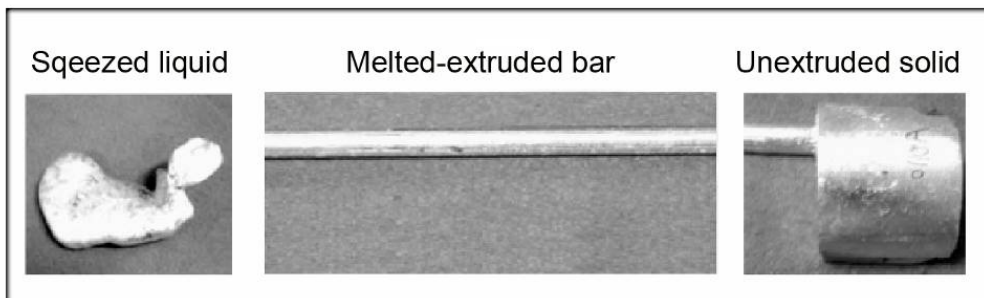
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

B.S. Lee และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al-4.5%Cu) ในช่วงกึ่งของแข็ง (Semi-solid State) โดยได้ทำการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก (Cylindrical Rod) ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก อัดน้ำโลหะผ่านแม่พิมพ์ (Extrusion Die) แสดงดังรูปที่ 1.15



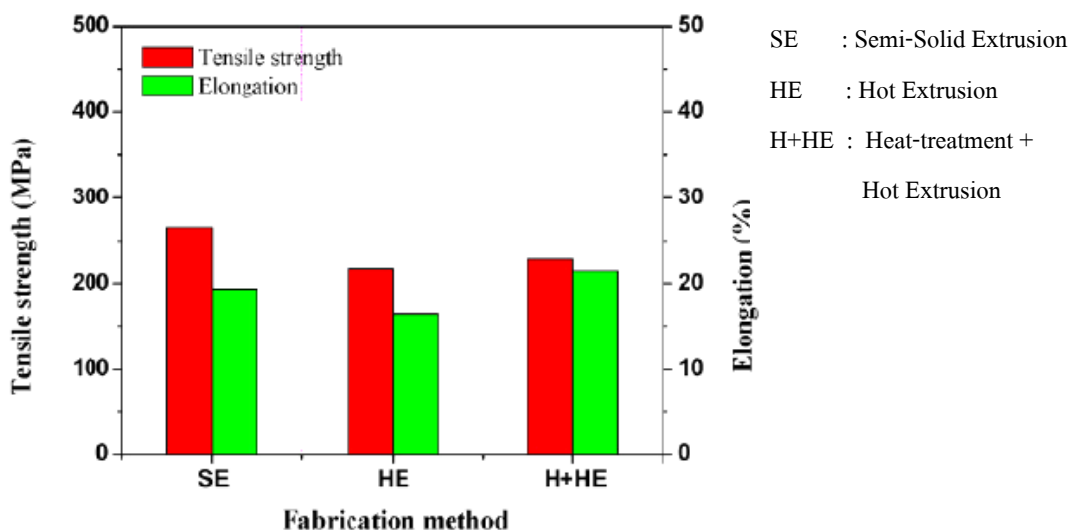
รูปที่ 1.15 เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตหรืออัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al-4.5%Cu) ในช่วงกึ่งของแข็ง (B.S. Lee et al., 2005)

โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาตัวแปรเบื้องต้นดังนี้ อุณหภูมิในการอัดรีด (Extrusion Temperature) ความเร็วเริ่มต้นของแท่นอัด (Initial Ram Velocity) และผลของการทำเกรนรีไฟนิ่ง (Grain Refining) ในการทดลองกำหนดให้เทน้ำโลหะลงคอนเทนเนอร์ ที่อุณหภูมิ 660°C และ อัดน้ำโลหะที่ 630°C 610°C และ 590°C อุณหภูมิของแม่พิมพ์คือ 500-520°C และความเร็วที่ใช้ในการอัดน้ำโลหะอยู่ระหว่าง 2-11 mm/s ผลจากการศึกษาพบว่าจากชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดแบ่งเป็นสามส่วนคือ Squeezed Liquid Melt-extruded bar และ Unextruded solid แสดงดังรูปที่ 1.16 และสามารถลดปริมาณของ Squeezed liquid ด้วยการลดอุณหภูมิและความเร็วเริ่มต้นในการอัดรีด อีกทั้งหากใส่ Grain refiner ลงไปก็จะช่วยปรับโครงสร้างให้ดีขึ้นทำให้มีปริมาณของ Squeezed liquid น้อยลงอีกด้วย



รูปที่ 1.16 รูปชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al-4.5%Cu) ในช่วงกึ่งของแข็งที่อัดรีดขึ้นรูปได้ (B.S. Lee et al., 2005)

ต่อมา **B.S. Lee และคณะ** ได้ทำการศึกษาต่อในเรื่องของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูป พบว่าที่เงื่อนไขเดียวกันค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) และ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ของชิ้นงานที่ทำการอัดรีดขึ้นรูปในช่วงกึ่งของแข็ง จะมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่อัดแบบปกติในสถานะหลังการอัดรีด โดยการอัดรีดแบบทั่วไปมีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 230 MPa แต่การอัดรีดแบบกึ่งของแข็ง มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 270 MPa ดังแสดงในรูปที่ 1.17

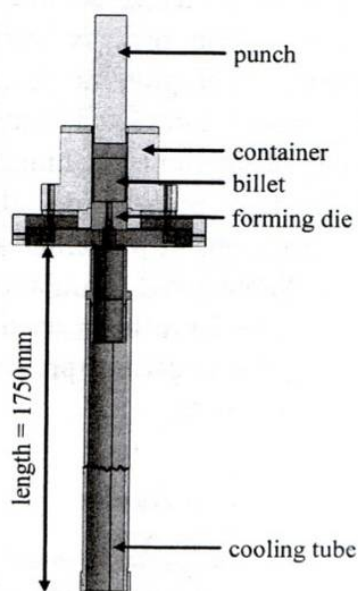


รูปที่ 1.17 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al-4.5%Cu) หลังการอัดรีดด้วยเงื่อนไขต่างๆ (B.S. Lee et al., 2005)

F. Knauf และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาถึงกระบวนการอัดรีดเหล็กผสมแบบกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Thixoextrusion โดยได้ทำการอัดรีดขึ้นรูปเหล็กผสมเกรด X210CrW12 ผ่านแม่พิมพ์อัดรีดในช่วงกึ่งของแข็งในลักษณะแบบตามแรงโน้มถ่วง (Vertical Extrusion) ดังแสดงในรูปที่ 1.18 โดยกำหนดตัวแปรในการทดลองอัดรีดดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทำการศึกษาถึงกระบวนการอัดรีดเหล็กผสมแบบกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Thixoextrusion

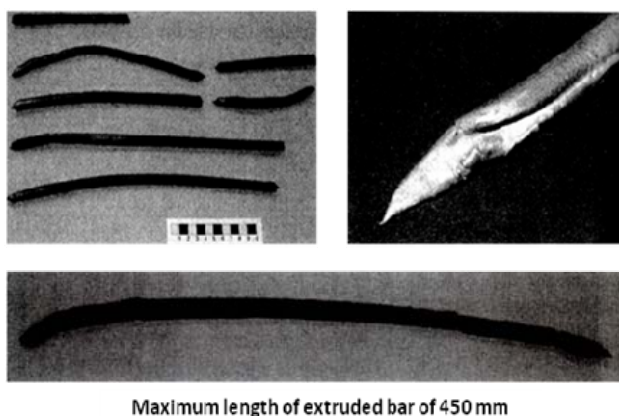
Parameter	Range
Press velocity	10,15,20 mm/s
Extrusion channel length	50,65,100 mm
Extrusion channel diameter	15 mm
Extrusion channel geometry	Straight, converging



รูปที่ 1.18 แสดงลักษณะของแม่พิมพ์อัดรีดเหล็กผสมเกรด X210CrW12 ด้วยกรรมวิธี

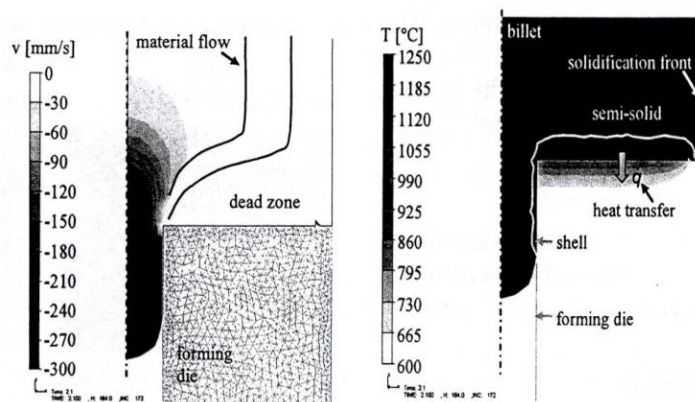
Thixoextrusion (F. Knauf et al., 2008)

ผลจากการอัดรีดขึ้นรูปของ F. Knauf และคณะ ชิ้นงานที่ได้ยังคงมีลักษณะโค้งงออยู่ ทั้งนี้ทางคณะได้ให้เหตุผลว่าชิ้นงานที่อัดรีดผ่านแม่พิมพ์ยังไม่แข็งตัวอย่างสมบูรณ์จึงเกิดการตกตามแรงโน้มถ่วง อีกทั้งที่ปลายของชิ้นงาน ยังเกิดการหดตัวบริเวณด้านข้างรอบชิ้นงาน ๆ อีกด้วย ซึ่งขณะนี้ทางคณะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความยาวมากถึง 450 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 1.19

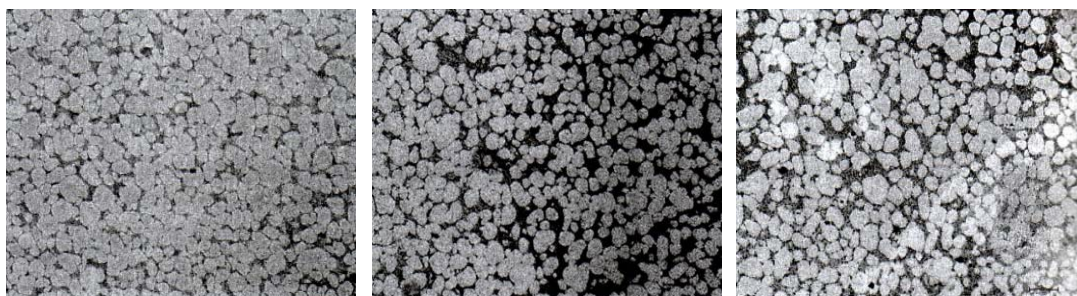


รูปที่ 1.19 แสดงชิ้นงานเหล็กผสมเกรด X210CrW12 ที่ผ่านกรรมวิธี Thixoextrusion (F. Knauf et al., 2008)

F. Knauf และคณะ ได้ใช้โปรแกรมเพื่อจำลองการไหลของน้ำโลหะที่ถูกอัดรีด พบว่ามีลักษณะแสดงดังรูปที่ 1.20 เห็นได้ว่าความเร็วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อน้ำโลหะถูกอัดเข้าไปในแม่พิมพ์ ดังนั้นการควบคุมให้ความเร็วในการอัดไม่มากเกินไป จึงเป็นตัวแปรสำคัญมากสำหรับการอัดขึ้นรูปเมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างจุลภาค พบว่าในทุกเงื่อนไขของการอัดรีดขึ้นรูป ต่างให้โครงสร้างที่สม่ำเสมอและมีปริมาณรูพรุนน้อยมากดังแสดงในรูปที่ 1.21 และทางคณะจะทำการศึกษาถึงสมบัติเชิงกลต่อไป



รูปที่ 1.20 แสดงผลจากการใช้โปรแกรมจำลองการไหลของเหล็กผสมเกรด X210CrW12 (F. Knauf et al., 2008)



(ก)

(ข)

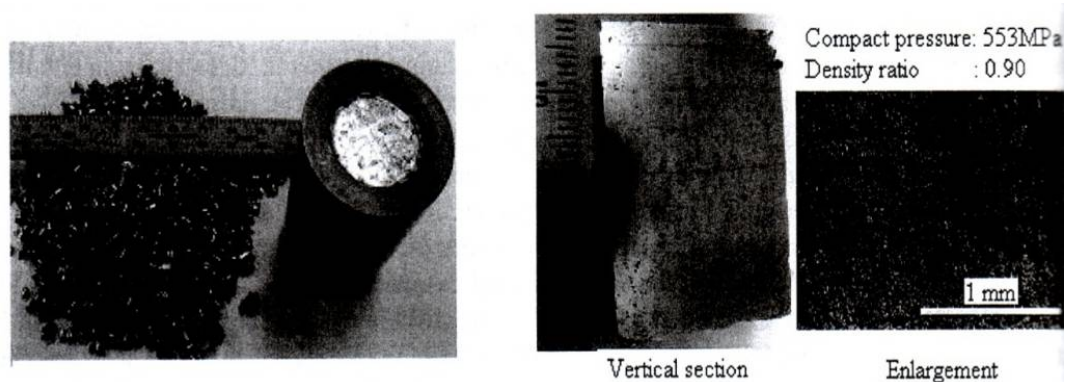
(ค)

รูปที่ 1.21 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กผสมเกรด X210CrW12 ที่ผ่านกรรมวิธี Thixoextrusion ที่เงื่อนไขต่างๆ (F. Knauf et al., 2008)

(ก) $\varnothing=15\text{mm}$, $L=50\text{mm}$, $V=10\text{mm}$ (ข) $\varnothing=15\text{mm}$, $L=65\text{mm}$, $V=20\text{mm}$

(ค) $\varnothing=15\text{mm}$, $L=100\text{mm}$, $V=10\text{mm}$

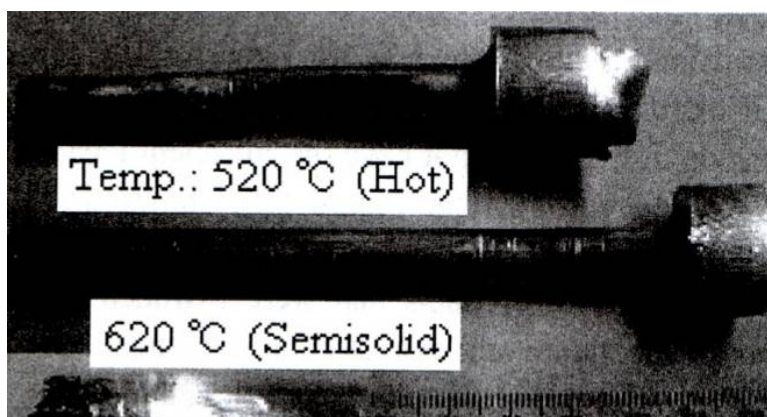
Sumio Sugiyama และ Jun Yanagimoto (2008) ได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเอาเศษอะลูมิเนียม (Recycling Aluminum Alloy Scrap) เกรด A2011 มาบดแล้วขึ้นรูปในช่วงกึ่งของแข็ง โดยจะเริ่มจากการนำเอาเศษอะลูมิเนียมมาบดให้ได้ขนาด หนาประมาณ 0.15-0.25 มิลลิเมตร และกว้างประมาณ 2 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 1.22 จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการอัด (Compacting Process) เพื่อให้ได้แท่งบิลเล็ต (Billet) เพื่อใส่ในคอนเทนเนอร์ และอัดรีดขึ้นรูปตามลำดับ โดยในการทดลองได้มีการกำหนดตัวแปรดังนี้ อุณหภูมิในการอัดรีด (Extrusion Temperature) และอัตราส่วนอัดรีด (Extrusion Ratio)



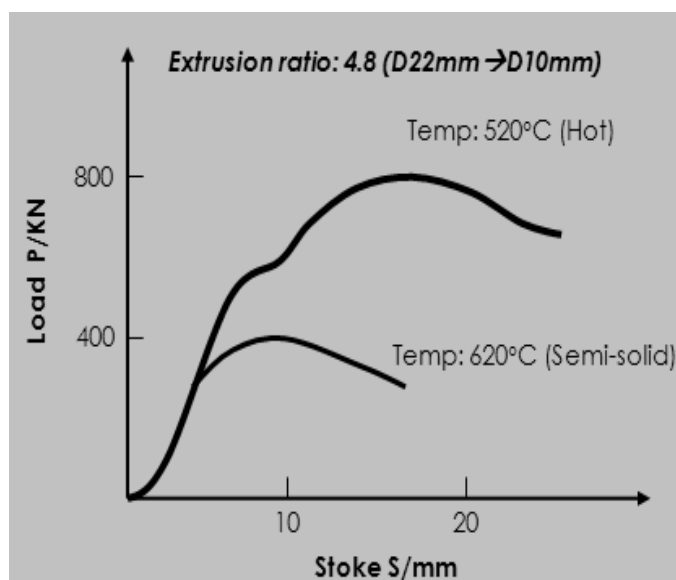
รูปที่ 1.22 แสดงลักษณะของเศษอะลูมิเนียมที่ผ่านการบดและอัดแล้ว

(Sumio Sugiyama et al., 2008)

จากผลการทดลองอัดรีดขึ้นรูปพบว่า สามารถอัดรีดอะลูมิเนียมผสมแมกเนต A2011 ในช่วงกึ่งของแข็งได้ ซึ่งให้ผิวที่มีลักษณะดีเทียบเท่ากับกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปทั่วไป (Hot Extrusion) แสดงดังรูปที่ 1.23 เมื่อเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปของทั้งสองกระบวนการพบว่าแรงที่ใช้ในการอัดรีดของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง ใช้แรงที่น้อยกว่า ได้ค่าประมาณ 380 kN ในขณะที่การอัดรีดขึ้นรูปแบบทั่วไปได้ประมาณ 650 kN ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 1.24

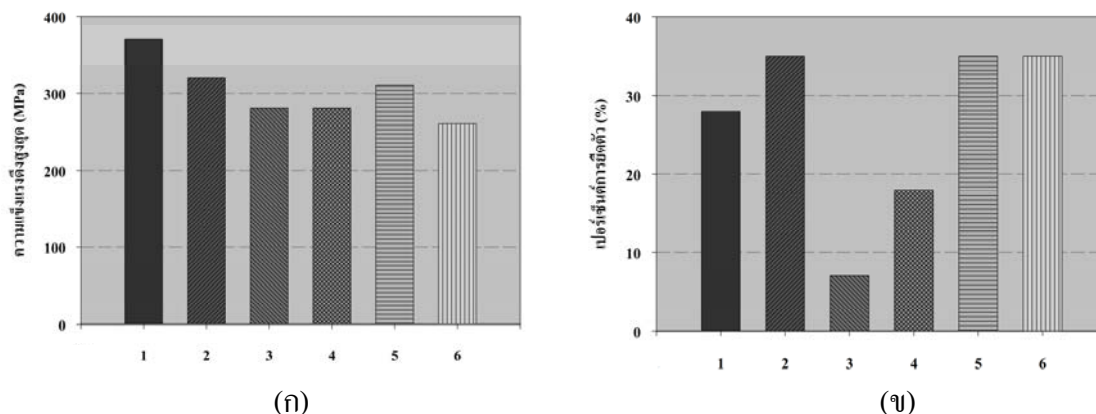


รูปที่ 1.23 ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมแมกเนต A2011 จากการอัดรีดขึ้นรูป (Sumio Sugiyama et al., 2008)



รูปที่ 1.24 แรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมแมกเนต A2011 (ดัดแปลงจาก Sumio Sugiyama et al., 2008)

เมื่อนำชิ้นงานไปทำการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (UTS) ของแต่ละเงื่อนไขการขึ้นรูปมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 1.25 (ก) และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การยืดตัวพบว่าในเงื่อนไขการอัดรีดขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งโดยมีอัตราส่วนอัดรีดมากกว่า 10 จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมากกว่า อัตราส่วนอัดรีดที่น้อยกว่าดังแสดงในรูปที่ 1.25 (ข)



1. Base Materials (A2011 –T3)
2. Base Materials +SHT, 515^oC-3H)
3. Hot Extr: 520^o C, R4.8+SHT
4. SS Extr: 620^o C, R4.8+SHT
5. SS Extr: 620^o C, R10.2+SHT
6. SS Extr: 620^o C, R10.2+SHT

รูปที่ 1.25 สมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดย (ก) ความแข็งแรงดึง และ(ข) เปอร์เซนต์การยืดตัวของ ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมแมกเนต A2011 (ดัดแปลงจาก Sumio Sugiyama et al., 2008)

งานวิจัยทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป โลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Extrusion) จากกรรมวิธี Thixoforming และ Rheoforming เนื่องจากผลการวิจัยของนักวิจัยหลายท่านยืนยันว่าสามารถอัดรีดขึ้นรูปและให้ชิ้นงานที่มีความยาวต่อเนื่องได้ และเมื่อเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลพบว่าค่าของความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จัดอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามในการขึ้นรูปที่เสนอนั้นหลายกระบวนการยังคงมีข้อจำกัดในการขึ้นรูปอยู่เช่นในกระบวนการที่ใช้กรรมวิธี Thixoforming ยังคงต้องการบิลเลทเริ่มต้นที่มีคุณภาพสูงดังนั้นจึงไม่สามารถใช้งานกับทุกวัสดุได้และในกรรมวิธีของ Rheoforming ก็ต้องทำการอัดรีดที่สัดส่วนของแข็งของน้ำโลหะสูงก่อนทำการอัดรีด (อย่างน้อยประมาณ 30%)

เช่นกันดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงศึกษาถึงความเป็นไปได้ของกระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งเกรด 356 โดยใช้สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นที่ต่ำ (ต่ำกว่า 30%) และศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่สัมพันธ์กันเช่นความเร็วในการอัดรีดที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมและสมบัติเชิงกลโดยเลือกใช้กรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะแข็งตัวเพื่อสร้างโลหะกึ่งของแข็งก่อนทำการอัดรีดขึ้นรูป

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนากระบวนการอัดรีดขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็งสำหรับผลิตชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเช่น
 - สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป
 - ความเร็วที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป
 ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการอัดรีดขึ้นรูปสำหรับอะลูมิเนียมผสมด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็ง ซึ่งมีขอบเขตรวมถึง การออกแบบแม่พิมพ์อย่างง่ายที่ใช้ในการขึ้นรูป การกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมในการอัดรีดขึ้นรูป และวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากการอัดรีดขึ้นรูป ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ชิ้นส่วนโลหะจากการอัดรีดขึ้นรูปโดยใช้เทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็งแบบ GISS
- 1.4.2 ได้กระบวนการขึ้นรูปอะลูมิเนียมที่มีน้ำหนักเบาและแข็งแรงสูง ซึ่งสามารถนำไปผลิตชิ้นส่วนโลหะต่างๆ ในทางการแพทย์ เช่น แกนขาเทียมได้เข้า รถเข็น ไม้เท้า แขนเทียม มือเทียม เป็นต้น หรือนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ จักรยาน หรือ ชิ้นส่วนทางการทหาร เป็นต้น
- 1.4.3 ได้ข้อมูลพื้นฐานของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับอะลูมิเนียมผสมด้วยกระบวนการโลหะกึ่งของแข็ง เพื่อให้ได้สมบัติความแข็งแรงและความเหนียวตามที่ต้องการ และเหมาะสมกับสภาพงานที่นำไปใช้

1.7 สถานที่ทำวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย-
สงขลานครินทร์ วิทยาเขต หาดใหญ่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีการวิจัยซึ่งประกอบด้วยวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย แม่พิมพ์ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ระเบียบขั้นตอนการวิจัย รวมถึงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

โลหะผสมที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้คืออะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ซึ่งเป็นชนิด Secondary Alloys ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียม 356 ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงในตารางที่ 2.1 (วิเคราะห์ด้วย Optical Emission Spectrometer, OES) และลักษณะของอินกอท (Ingot) เริ่มต้นที่ใช้แสดงดังรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่ใช้ในงานวิจัย

อะลูมิเนียมผสมเกรด 356	Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Mn	Zn	Ni	Al
ส่วนผสมทางเคมี (Wt %)	6.90	0.42	0.41	0.10	0.05	0.04	0.01	0.01	Bal.



รูปที่ 2.1 อินกอทอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่ใช้ในงานวิจัย

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.2.1 เตาหลอมไฟฟ้า

เตาหลอมที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้คือเตาหลอมไฟฟ้าชนิดใช้ลวดความต้านทาน (Electric Resistance Furnace) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งอุณหภูมิในการหลอมสามารถควบคุมได้ด้วยตัวควบคุม (Controller) โดยสามารถหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูงสุดได้ไม่เกิน 1,000°C และปริมาณสูงสุดเท่ากับ 10 กิโลกรัมต่อครั้งซึ่งในงานวิจัยนี้จะควบคุมอุณหภูมิเตาสำหรับการหลอมน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมให้อยู่ที่อุณหภูมิ 700°C ทุกครั้ง



รูปที่ 2.2 เตาหลอมไฟฟ้าชนิดลวดความต้านทานที่ใช้ในการทดลอง

2.2.2 เบ้ากราไฟต์

เบ้าหลอมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเบ้าที่ทำจากกราไฟต์ (Graphite-Clay Base) ซึ่งทำให้ไม่เกิดการปนเปื้อนของเหล็กลงไปในน้ำโลหะดังเช่นในการหลอมโดยใช้เบ้าเหล็กหล่อทั่วไป อีกทั้งยังทำความสะอาดได้ง่ายหลังจากใช้การทำงาน ตัวอย่างของเบ้ากราไฟต์ที่ใช้แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างเบ้าหลอมกราไฟต์ ที่ใช้ในการทดลอง

2.2.3 เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยฟองแก๊สของแข็งตัวเวอร์ชัน 1

เครื่องที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งในงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบต่างๆ ที่สำคัญ ดังนี้ 1. แท่งกราไฟต์ (Graphite Diffuser) 2. ชุดวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะและอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ (Thermocouples) 3. ระบบควบคุมอัตราการไหลของลมและแก๊ส 4. ระบบทำความเย็นให้แก่แท่งกราไฟต์ (Cooling System) 5. ชุดควบคุมระบบ (Central Control Unit) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัวเวอร์ชัน 1

2.2.4 เครื่องอัดไฮดรอลิกแวนอนขนาด 20 ตันระดับห้องปฏิบัติการ

ในการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกแวนอนขนาด 20 ตันซึ่งประกอบด้วยกระบอกอัดแนวตั้งขนาด 80 ตันดังแสดงในรูปที่ 2.5 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นสำหรับการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมแบบกึ่งของแข็งเนื่องด้วยข้อจำกัดทางด้านการปรับแต่งเครื่องและความสามารถของเครื่องในการอัดแวนอนที่ต่ำกว่าแนวตั้งจึงทำให้ศึกษาเพียงเบื้องต้นเท่านั้นแต่จะทำการศึกษาแบบสมบูรณ์โดยการประยุกต์ใช้เครื่องฉีดโลหะที่มีอยู่ที่ห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2.5 เครื่องอัดไฮดรอลิกแนวตั้งและแวนอนที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้น

2.2.5 เครื่องหล่อฉีดโลหะ

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ประยุกต์ใช้เครื่องหล่อฉีดโลหะที่มีแรงดันในการอัดประมาณ 1500 psi เพื่ออัดรีดอะลูมิเนียมผสมผ่านแม่พิมพ์ที่ออกแบบไว้เฉพาะ โดยในการอัดรีดจะประยุกต์เปิดแม่พิมพ์ฝั่งเคลื่อนที่ (Moving Die) ถอยออกไปจนสุดเพื่อให้มีพื้นที่สำหรับการทำการอัดรีด ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องหล่อฉีดโลหะที่ใช้ในงานวิจัย

2.3 ขั้นตอนการวิจัย

2.3.1 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะที่ใช้ในการทำวิจัย

การวิเคราะห์ทางความร้อนของโลหะที่ใช้ในการทำวิจัยนี้ เริ่มต้นจากการนำอะลูมิเนียมผสม 356 ชนิด Secondary ที่ตัดมาจากแท่งอินกอตใส่ลงในเบ้าหลอม จากนั้นจึงทำการหลอมโดยใช้เตาหลอมไฟฟ้าชนิดขดลวดความต้านทาน ทำการหลอมที่อุณหภูมิ 700°C เมื่อโลหะหลอมละลายจึงเติมฟลักซ์ (Flux) เพื่อทำความสะอาดน้ำโลหะและตัดครอส (Dross) ออกจากน้ำโลหะ จากนั้นตักน้ำโลหะประมาณ 250 กรัม จากเตาหลอมด้วยเบ้าสแตนเลสซึ่งเคลือบด้วยเซรามิกทนไฟ แล้วนำไปจุ่มเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะ และทำการบันทึกอุณหภูมิโดยปล่อยให้ น้ำโลหะเย็นตัวลงอย่างช้าๆ เพื่อทำการสร้างกราฟแสดงอัตราการเย็นตัว (Cooling Curves) กราฟที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลว (Liquidus

Temperature) และอุณหภูมิที่จุดยูเทกติก (Eutectic Temperature) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 356 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

2.3.2 การเตรียมโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-solid Slurry) ด้วยกระบวนการ GISS

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำกระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งที่เรียกว่ากระบวนการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะแข็งตัว หรือ Gas Induced Semi Solid (GISS) เพื่อเป็นกระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งสำหรับทำการอัดรีดในขั้นตอนต่อไป โดยในกระบวนการจะทำการปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในน้ำโลหะเป็นระยะเวลาต่างๆ กันเช่น 5 10 และ 15 วินาทีเป็นต้นเพื่อให้สัดส่วนของแข็งตามที่ต้องการทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนืดของโลหะกึ่งของแข็งที่จะสามารถเทเข้าไปในกระบอกอัดรีดได้ตัวแปรที่สำคัญในการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวแปรที่ใช้ในการเตรียมโลหะกึ่งของแข็ง

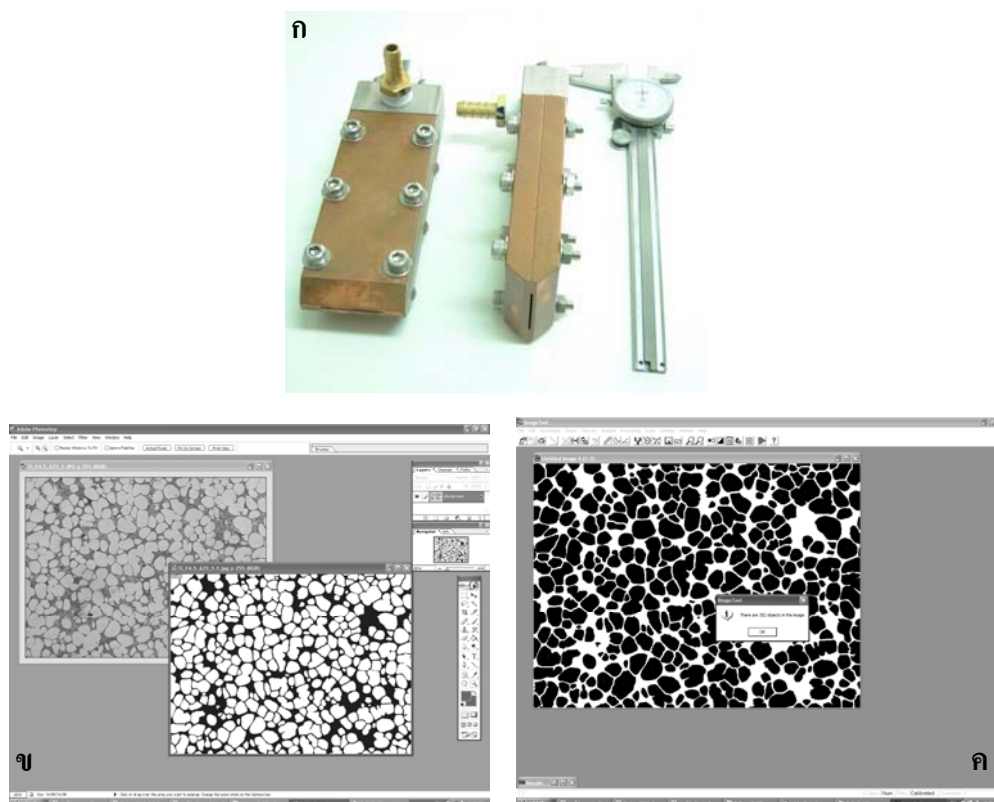
Sample Code	Rheocasting Temp (°C)	Rheocasting time (Seconds)
SSMX-05	620	5
SSMX-10	620	10
SSMX-15	620	15

2.3.3 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งของโลหะกึ่งของแข็งที่เตรียมได้ จากกระบวนการ GISS

เมื่อผ่านกระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS จากนั้นโลหะกึ่งของแข็งที่เตรียมได้จะถูกนำมาวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นจากการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะที่ระยะเวลาการปล่อยต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ขั้นตอนการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งมีดังนี้

1. ทำการหลอมอะลูมิเนียมผสมในเบ้ากราไฟต์ภายในเตาชนิดขดลวดต้านทาน
2. ตักน้ำโลหะจากเบ้ากราไฟต์มาปริมาณประมาณ 200 กรัม ด้วย Ladle ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยโบรอนไนไตรด์
3. ทำการสร้างโลหะกึ่งของแข็งที่เงื่อนไขต่างๆ กันดังแสดงในตารางที่ 2.2
4. ใช้แม่พิมพ์ทองแดง (Copper Quenching Mold) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ก) เพื่อเก็บตัวอย่างอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่สร้างได้ที่เงื่อนไขการสร้างโลหะกึ่งของแข็งต่างๆ กัน

5. นำชิ้นงานที่ได้มาตัดและเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
6. ถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคในแต่ละบริเวณมาอย่างละสามรูป
7. นำรูปโครงสร้างมาคำนวณหาสัดส่วนของแข็งโดยใช้โปรแกรม Photoshop และ Image Tools ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข และค)



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์และขั้นตอนการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็ง (ก) แม่พิมพ์ทองแดงที่ใช้ (ข) การสร้าง Threshold ด้วยโปรแกรม Photoshop และ (ค) การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Image Tools

2.3.4 ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง

ทำการรวบรวมข้อมูลต่างๆ จากวรรณกรรมหรือบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งในหลายกรณีเพื่อศึกษาถึงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำการอัดรีดเบื้องต้นเช่น ลักษณะของแม่พิมพ์ กระบอกอัด และ ชนิดวางรองรับชิ้นงานเป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้เหมาะกับเครื่องที่มีอยู่แล้วที่ห้องปฏิบัติการจึงอาจมีการปรับเปลี่ยนขนาดให้เหมาะสม นอกจากนี้ในงานวิจัยจะแบ่งการวิจัยเป็น 2 ส่วนดังต่อไปนี้

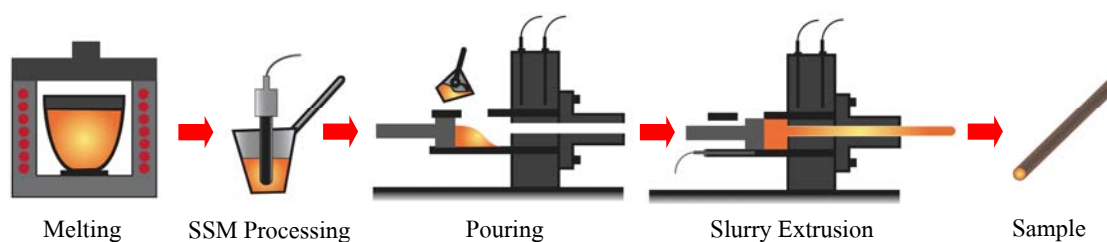
ส่วนที่ 1 ทำการวิจัยเบื้องต้นเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ของกระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งโดยใช้แม่พิมพ์ที่มีลักษณะไม่ซับซ้อนร่วมกับเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด

20 ตัน ซึ่งลักษณะของชุดแม่พิมพ์อย่างง่ายไปด้วยสามชิ้นส่วนหลัก ๆ คือ ครอบอัด (Shot Sleeve) แม่พิมพ์ (Extrusion Die) และรางรองรับชิ้นงาน (Supporter) โดยรางรองรับชิ้นงานจะเริ่มต้นออกแบบโดยใช้เหล็กเหนียวทั่วไปก่อนและจึงปรับเปลี่ยนไปใช้วัสดุอื่นๆ ที่เหมาะสมต่อไป

ส่วนที่ 2 คือการทดลองซ้ำเพื่อควบคุมตัวแปรต่างๆ เช่น ความเร็วในการอัดรีดให้คงที่และทำซ้ำในแต่ละกรณีได้โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องฉีดโลหะซึ่งแม่พิมพ์ในส่วนนี้จะมี ความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากต้องปรับเปลี่ยนรูปแบบการจับยึดกับฐานของเครื่องฉีดโลหะรวมทั้งเพิ่มเติมระบบการให้ความร้อน โดยติดตั้ง Cartridge heater เข้าไปบนตัวและแม่พิมพ์ด้วยเพื่อ ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ อีกทั้งยังเพิ่มในส่วนที่เป็น Cutting ring เพื่อให้ง่ายต่อการแกะนำชิ้นงานออก จากแม่พิมพ์และรางรองรับชิ้นงาน ได้ง่ายขึ้น

2.3.5 การอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทดลองอัดรีด โดยแบ่งเป็นการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของกระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกแวนอนขนาด 20 ตัน และ การทดลองอัดรีดเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ โดยใช้ประยุกต์ใช้เครื่องฉีดโลหะในการทดลองซึ่งขั้นตอนภาพรวมของทั้งสองการศึกษามีลักษณะใกล้เคียงกันต่างกันตรงตัวแปรที่ใช้ ระหว่างการทำการอัดรีดขึ้นรูปซึ่งขั้นตอนของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการอัดรีดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งในงานวิจัยนี้

ขั้นตอนในการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งสามารถอธิบายจำแนกเป็นข้อๆได้ดังนี้

1. หลอมอินกอตอะลูมิเนียมเกรด 356 ชนิด Secondary ในเตาไฟฟ้าชนิดขดลวด ด้านทาน โดยตั้งค่าอุณหภูมิของเตาไว้ที่ 700°C
2. นำ Ladle ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมมาตักน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวปริมาณคิดเป็น น้ำหนักได้ 250 กรัมเพื่อและทำการปาดหน้าตักผิวออกไซด์ของอะลูมิเนียมบริเวณ ด้านบนหรือผิวหน้าของ Ladle ออก

3. จุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อปล่อยฟองแก๊สเป็นระยะเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ได้สัดส่วนของแข็ง 5 10 และ 20% ตามลำดับโดยตั้งค่าอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนทำการจุ่มที่ 50°C และอัตราการปล่อยแก๊สที่ 4 ลิตรต่อนาที
4. หลังจากสร้างอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งให้มีสัดส่วนของแข็งตามที่ต้องการแล้วนำอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งนั้นไปเทลงในกระบอกอัดหรือ Shot sleeve ที่ทำการอุ่นให้ความร้อนไว้ก่อนหน้าแล้ว
5. ทำการอัดพันซ์เพื่อดันอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเข้าสู่แม่พิมพ์โดยมีการกำหนดความเร็วในการอัดรีดต่างๆ กันในแต่ละครั้ง
6. ทำการแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และวางรองรับชิ้นงาน

2.3.5.1) การศึกษาพฤติกรรมเบื้องต้นด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกแวนอนขนาด 20 ตันระดับห้องปฏิบัติการ ในการทดลองเบื้องต้นนี้ได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาถึงความสามารถในการประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมกึ่งของแข็งมาทำการอัดรีดแวนอนโดยจะศึกษาถึงอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับการอัดรีด อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ชนิดของวางรองรับชิ้นงาน และความเร็วที่ใช้ในการอัดรีดโดยกำหนดให้สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นคงที่เท่ากับ 5% ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองนี้สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และตัวอย่างรูปขั้นตอนในการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 2.9 การพิจารณาความสามารถในการอัดรีดหรือ Extrudability ในขั้นต้นคือลักษณะของผิว ความยาว ความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาคและ สมบัติเชิงกลเบื้องต้นของชิ้นงาน

ตารางที่ 2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของกระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง

ตัวแปรที่ใช้ในทดลอง	
ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรที่แปรผัน
• อุณหภูมิชุดแม่พิมพ์ กระบอกอัด	• ชนิดของแม่พิมพ์
• อุณหภูมิแท่งกราไฟต์	• ชนิดของวางรองรับชิ้นงาน
• อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำอะลูมิเนียม	• สัดส่วนของแข็งเริ่มต้น
• หลอมเหลว	• ความเร็วในการอัดรีด



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างขั้นตอนในการอัดรีดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเบื้องต้น

2.3.5.2) การศึกษาของตัวแปรต่างๆ ในการอัดรีดโดยประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องฉีดโลหะ เพื่อให้สามารถควบคุมความเร็วในการอัดรีดได้แม่นยำมากขึ้น อีกทั้งสามารถตั้งค่าอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้คงที่ได้ด้วยชุด Cartridge heater และมีระบบหล่อเย็นในส่วนหน้าของรางรองรับชิ้นงาน จึงได้ประยุกต์ใช้เครื่องฉีดโลหะในการทำการอัดรีดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งโดยตัวแปรที่ทำการทดลองในขั้นนี้คือ ผลของสัดส่วนของแข็ง และความเร็วในการอัดรีด และตัวแปรอื่น ๆ ถูกกำหนดให้คงที่ดังแสดงในตารางที่ 2.4 แม่พิมพ์และเครื่องฉีดโลหะที่ประยุกต์ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 2.10

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาตัวแปรในการอัดรีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดโลหะ

ตัวแปรที่ใช้ในทดลอง	
ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรที่แปรผัน
<ul style="list-style-type: none"> • อุณหภูมิชุดแม่พิมพ์ ระบายอัด • อุณหภูมิแท่งกราฟไฟต์ • อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว • ชนิดแม่พิมพ์และรางรองรับชิ้นงาน 	<ul style="list-style-type: none"> • สัดส่วนของแข็งเริ่มต้น • ความเร็วในการอัดรีด



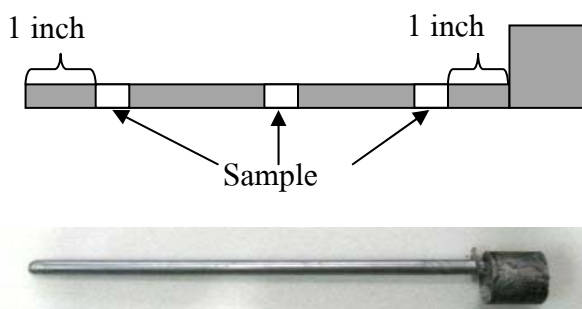
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างขั้นตอนในการอัดรีดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งด้วยเครื่องฉีดโลหะ

2.3.6 ขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน

กระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ที่ใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ในการทดลองนี้คือ T6 โดยทำการอบละลาย (Solution Heat Treated) ที่อุณหภูมิ 540°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อช่วยให้ธาตุผสมละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับธาตุหลักมากยิ่งขึ้น จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทำการชุบเย็นในน้ำ (Water Quenching) เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ธาตุผสมถูกกักอยู่ในเนื้อของธาตุหลัก ก่อนนำชิ้นงานไปบ่ม (Artificially Aged) ที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ช่วยเร่งให้เกิดการฟอร์มของเฟสใหม่เร็วขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปให้ดีขึ้น

2.3.7 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่ได้จากการทดลอง ทำโดยนำชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งกลม (Rod) จะทำการตัดชิ้นงานตามขวาง (Cross-section) จาก 3 บริเวณคือ บริเวณ โคน กลาง และปลายของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 บริเวณที่ตัดชิ้นงานเพื่อนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

จากนั้นชิ้นงานดังกล่าวจะถูกนำไปเตรียมเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) ชิ้นรูปชิ้นงานแบบร้อน (Hot Mounting) โดยใช้ผงเบกาไลต์ (Bakelite) ใส่ลงในแบบอัดแล้วใช้ความร้อนและความดันเพื่อให้ผงเบกาไลต์เกิดการแข็งตัวติดกับชิ้นงาน ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมีลักษณะดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแบบร้อน (Hot Mounting)

- 2) ทำการขัดหยาบ (Grinding) ด้วยกระดาษทราย (SiC Paper) เบอร์ P320 P600 P800 P1000 และ P1200 ตามลำดับ
- 3) ต่อจากนั้นทำการขัดละเอียด (Polishing) ชิ้นงาน โดยเริ่มต้นการขัดละเอียดด้วยผ้าหยาบ (Cloth Pad) ร่วมกับผงขัดอะลูมินาขนาด 5 μm . เมื่อรอยขัดจากกระดาษทรายหมดไปแล้ว จึงทำการขัดโดยใช้ผงขัดอะลูมินาขนาด 1 0.3 และ 0.05 μm . ตามลำดับ โดยทั้งการขัดหยาบและขัดละเอียดจะใช้เครื่องขัดดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เครื่องขัดชิ้นงานแบบขัดหยาบและขัดละเอียด

- 4) ทำการกัดผิวหน้าของชิ้นงานโดยใช้น้ำยากัดผิวซึ่งมีชื่อเรียกว่า Keller's Reagent โดยประกอบไปด้วย กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ความเข้มข้น 48% ในปริมาณ 1 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) 1.5 มิลลิลิตร กรดไนตริก (HNO₃) 2.5 มิลลิลิตร ผสมในน้ำกลั่น 95 มิลลิลิตร โดยนำชิ้นงานมาจุ่มลงในสารละลาย Keller เป็นเวลาประมาณ 8 วินาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วเป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลม (Blower)
- 5) นำชิ้นตัวอย่างที่ได้มาส่องดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงดังแสดงในรูปที่ 2.14 จากนั้นถ่ายรูปเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

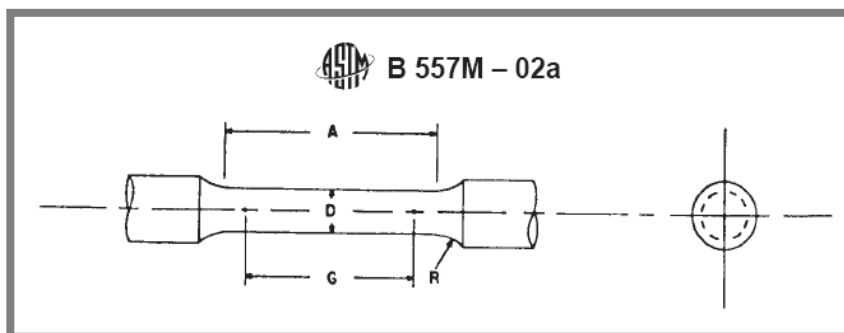


รูปที่ 2.14 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

2.3.8 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ของโลหะอะลูมิเนียมผสม 356

การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานในงานวิจัยชิ้นนี้คือ สมบัติทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, UTS) และ การยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงาน (Elongation) ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถวัดได้ด้วยการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมไว้ตามมาตรฐาน ASTM B557M ดังแสดง

ในรูปที่ 2.15 และทำการดึงชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ด้วยเครื่องทดสอบที่เรียกว่า “Universal Testing Machine” ค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะเป็นค่าแรงดึงที่แปรผันตามระยะของการยืดของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ



โดยที่ G หรือ Gauge Length = 30.00 ± 0.06

D หรือ Diameter = 6.00 ± 0.10

รูปที่ 2.15 ภาพ Drawing ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM B557M

บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผล

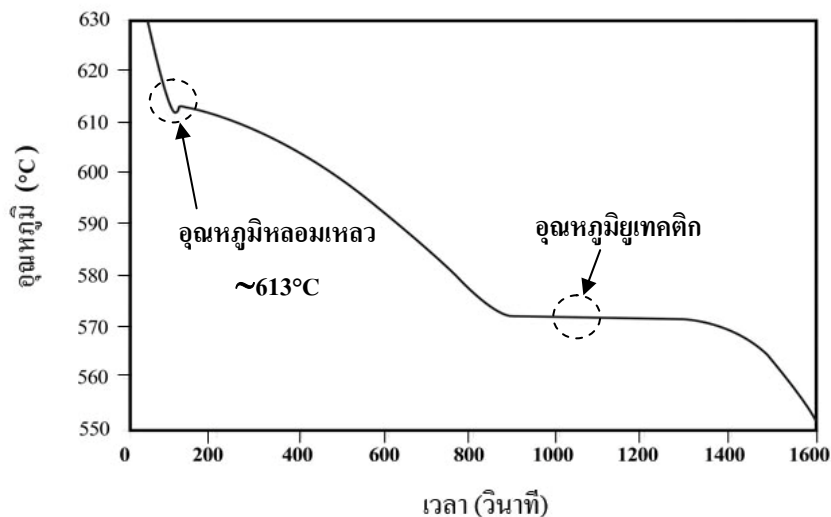
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปรายผล ซึ่งจะประกอบไปด้วยผลของการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ผลของการศึกษาสัดส่วนของแข็งของอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่เวลาในการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อปล่อยฟองแก๊ส (Rheocasting Time) ต่างๆกัน ผลของการการศึกษาความเป็นไปได้ในการทำการอัดรีดโลหะกึ่งของแข็งเบื้องต้นโดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกแวนอนขนาด 20 ตันร่วมกับแม่พิมพ์อย่างง่ายที่ออกแบบขึ้น ผลของชนิดของรางรองรับชิ้นงานที่อัดรีดได้ ผลของการอัดรีดโดยประยุกต์ใช้เครื่องฉีดโลหะร่วมกับแม่พิมพ์ที่ออกแบบขึ้น โดยอาศัยหลักการจากผลการทดลองเบื้องต้นที่ได้จากการทดลองอัดรีดกับเครื่องอัดไฮดรอลิกแวนอน ผลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อชิ้นงานที่อัดรีดได้ เช่น ความเร็วในการอัดรีดและสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นของอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเป็นต้น ผลของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน และผลของสมบัติเชิงกลก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนของชิ้นงานที่อัดรีดได้โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การวิเคราะห์ทางความร้อนทางวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

จากการทดลองวิเคราะห์อัตราการเย็นตัวของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 โดยให้เย็นตัวในเบ้ากราไฟต์ที่มีฉนวนความร้อนหุ้มภายนอกตัวเบ้าเพื่อให้เกิดการเย็นตัวช้าๆ พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนไปในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะแสดงได้ดังเส้นกราฟของการเย็นตัวในรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว (Aluminum Melted) จะเริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิของเหลว (Liquidus Temperature, T_L) มีค่าเท่ากับ 613°C และอุณหภูมิที่จุดยูเทกติก (Eutectic Temperature, T_E) จากกราฟเท่ากับ 573°C

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองทำให้เราสามารถประมาณช่วงในการเริ่มปล่อยฟองแก๊สหรือเริ่มเตรียมผลิตอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งโดยการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาของทางทีมวิจัยจะเริ่มทำการปล่อยฟองแก๊สที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิของเหลว

ประมาณ 7-10 °C ซึ่งถ้าพิจารณาจากกราฟที่ได้จึงเลือกใช้อุณหภูมิ 620°C เป็นจุดเริ่มต้นในการปล่อยฟองแก๊สเพื่อสร้างเฟสของแข็งเริ่มต้น (Primary Solid Particle)



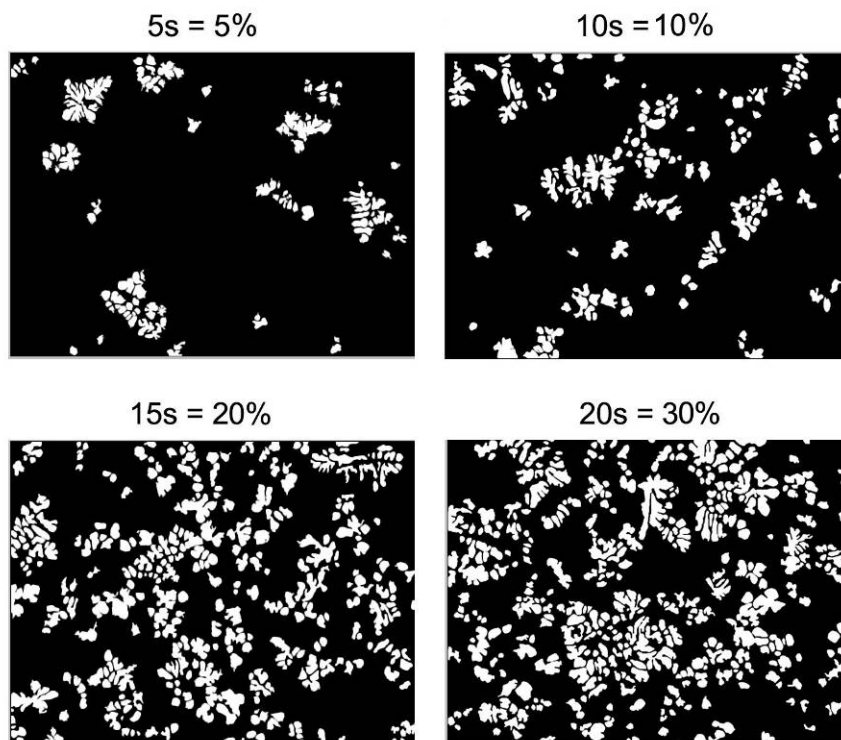
รูปที่ 3.1 แสดงเส้นกราฟของการเย็นตัว (Cooling Curves) ของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

3.2 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งที่ระยะเวลาในการปล่อยฟองแก๊สต่างกัน

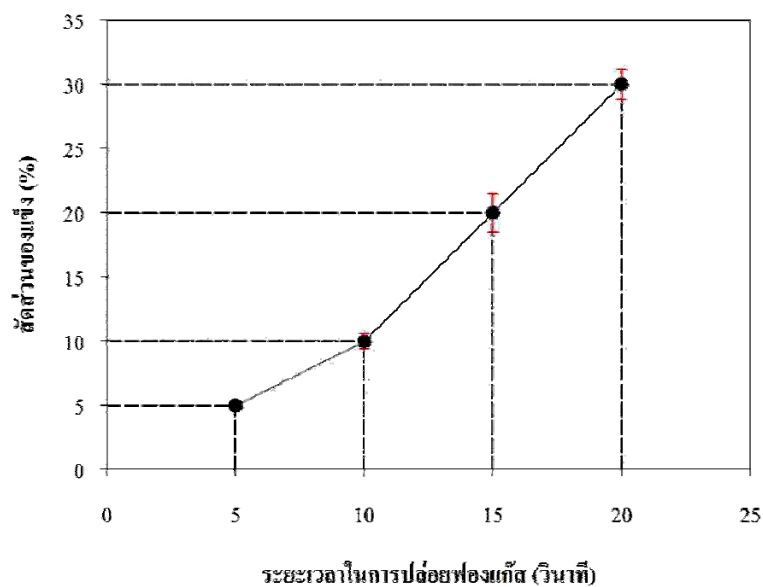
เพื่อทราบถึงปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นที่ได้จากการปล่อยฟองแก๊สลงในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวซึ่งตักมาจากเบ้ากร้าไฟต์ปริมาณประมาณ 200 กรัมใน Ladle ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมจึงได้ทำการทดลองโดยใช้แม่พิมพ์ทองแดงและปั๊มสุญญากาศเพื่อเก็บตัวอย่างหลังจากทำการปล่อยฟองแก๊สที่ระยะเวลา 5 10 15 และ 20 วินาที จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปตัดบริเวณตรงกลางดังรูปที่ 3.2 และถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณของเฟสของแข็งด้วยโปรแกรม Photoshop และ Image Tools ตามลำดับ ผลจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.3 พบว่าที่ระยะเวลาการปล่อยฟองแก๊ส 5 10 15 และ 20 วินาที ให้สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5 10 20 และ 30% ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานจากแม่พิมพ์ทองแดงและบริเวณตรงกลางสำหรับนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.3 โครงสร้างจุดภาคที่ได้จากการทำ Threshold ด้วยโปรแกรม Photoshop และใช้ในการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งด้วยโปรแกรม Image tools



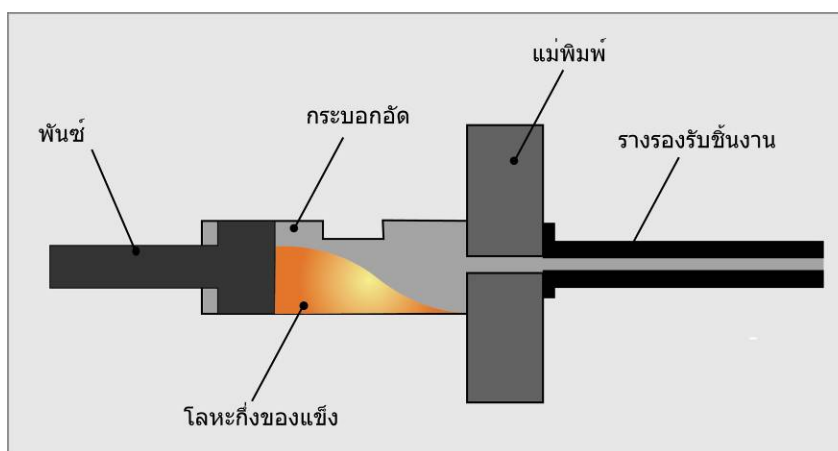
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปล่อยฟองแก๊สและปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้น

เมื่อวิเคราะห์ผลจากสัดส่วนของแข็งที่ได้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อปล่อยแก๊สนานขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณของเฟสของแข็งเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปรได้แก่ เวลาในการปล่อยฟองแก๊สและสัดส่วนของแข็งที่เพิ่มขึ้นแต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 30% นั้นอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งจะมีความหนืดมากซึ่งทำให้ไม่สามารถเทลงในกระบอกรีดได้จึงได้ตัดตัวแปรนี้ออกไป

3.3 การศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกแรงดันขนาด 20 ตัน ระดับห้องปฏิบัติการ

3.3.1 การออกแบบแม่พิมพ์และชนิดของรางรองรับชิ้นงาน

ในการทดลองส่วนนี้ได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์อย่างง่ายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งโดยชุดอัดรีดจะประกอบด้วยกระบอกรีด (Shot Sleeve) แม่พิมพ์ที่มีลักษณะเป็นรูปกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตรสำหรับขึ้นรูปแท่งกลมตัน และรางรองรับชิ้นงานส่วนหน้าสำหรับระคองให้ชิ้นงานที่ผ่านแม่พิมพ์เกิดการแข็งตัวและไหลออกมาได้ในลักษณะตรงดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยในงานวิจัยส่วนนี้ได้ศึกษารวมถึงชนิดของรางรองรับชิ้นงานได้แก่รางรองรับที่ทำจากโลหะเหล็กและกราไฟต์เพื่อเปรียบเทียบขึ้นลักษณะของชิ้นงานที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.6 (ก และข) นอกจากนี้เพื่อให้ชิ้นงานออกมาได้ยาวและไม่หักตามแรงโน้มถ่วงในส่วนปลายที่ยังไม่แข็งตัวจึงได้มีการออกแบบรางเลื่อนขนาดเล็ก (Mini Conveyer) สำหรับช่วยให้ชิ้นงานไหลได้ง่ายขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ข)



รูปที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์สำหรับใช้อัดรีดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเบื้องต้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองเบืองตัน โดย (ก) ใช้รางเหล็กสำหรับรองรับชิ้นงาน และ (ข) ใช้รางกราฟไฟต์สำหรับรองรับชิ้นงาน

3.3.2 การอัดรีดขึ้นรูป

สำหรับการทดลองอัดรีดในขั้นต้นจะทำการควบคุมตัวแปรในการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งให้คงที่และตัวแปรที่ใช้สำหรับขึ้นรูปเช่นความเร็วในการอัดรีดจะถูกปรับเปลี่ยนจนกระทั่งสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีคุณภาพผิวและความยาวของชิ้นงานที่ดีได้โดยตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการทดลองอัดรีดเบืองตัน

ตัวแปร	ชนิดของรางรองรับชิ้นงาน	
	เหล็ก	กราฟไฟต์
1. ปริมาณน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว	~200 กรัม	~200 กรัม
2. อุณหภูมิแท่งกราฟไฟต์	50°C	50°C
3. อุณหภูมิเริ่มปล่อยฟองแก๊ส	620°C	620°C
4. ระยะเวลาในการปล่อยฟองแก๊ส	10 วินาที	10 วินาที
5. อุณหภูมิแม่พิมพ์	~250°C	~250°C
6. อุณหภูมิกระบอกรีด	~300°C	~300°C
7. อุณหภูมิรางรองรับชิ้นงาน	~120°C	~60°C
8. ความเร็วที่ใช้ในการอัดรีด	2-12 cm/s	2-12 cm/s
9. ระบบหล่อเย็น	-	-

ผลจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าในกรณีที่ใช้รางเหล็กเป็นรางสำหรับรองรับชิ้นงานที่ผ่านการอัดรีดออกมาจะทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างรางและเนื้อของชิ้นงานอะลูมิเนียมซึ่งทำให้ชิ้นงานไม่สามารถไหลได้อย่างราบเรียบจึงเกิดการซ้อนทับกันดังรูปที่ 3.7 (ก) และเมื่อทำการลดความเร็วในการอัดรีดลงเพื่อให้เกิดการไหลที่ราบเรียบมากขึ้นพบว่าเครื่องไฮดรอลิกไม่สามารถที่จะอัดชิ้นงานออกมาได้เนื่องจากแรงดันที่ใช้ในการอัดน้อยจนเกิดไปประกออบกับความร้อนจากการอุ่นกระบอบสูบที่สูงถึง 300°C ทำให้เกิดการขยายตัวของกระบอบสูบและหัวอัดหรือพันธ์ไม่เท่ากันจึงเกิดการรััดติดกันระหว่างกระบอบสูบและหัวอัดทำให้ไม่สามารถอัดชิ้นงานออกมาได้ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ข) ซึ่งพบว่ามีเพียงก้อนอะลูมิเนียมที่แข็งตัวอยู่ภายในกระบอบอัดเท่านั้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งโดยใช้รางรองรับชิ้นงานที่ทำจากเหล็กที่ (ก) ความเร็วประมาณ 4 cm/s และ (ข) ความเร็วประมาณ 2 cm/s

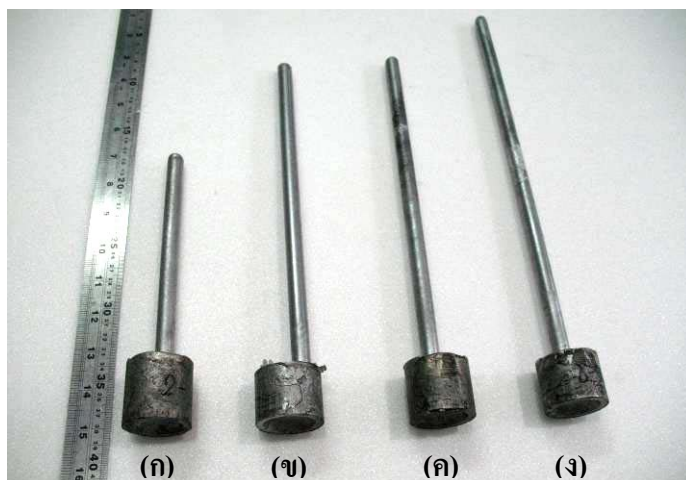
เมื่อเปลี่ยนรางรองรับชิ้นงานมาใช้กราไฟต์แทนที่เหล็กพบว่าชิ้นงานที่ได้มีแนวโน้มที่ดีขึ้นคือเมื่ออัดรีดที่ความเร็วต่ำประมาณ 4 cm/s ชิ้นงานสามารถที่จะไหลผ่านกราไฟต์ออกมายังรางเลื่อนได้ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะกราไฟต์มีสมบัติเสมือนเป็นตัวหล่อลื่นหรือ Lubricant ซึ่งช่วยให้ไม่เกิดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานและผนังรางดังที่เกิดในกรณีของรางรองรับชิ้นงานที่ทำจากเหล็กประกอบกับอุณหภูมิของรางกราไฟต์ที่ต่ำกว่ารางที่ทำจากเหล็กดังนั้นทำให้ชิ้นงานเกิดการแข็งตัวแล้วบางส่วนจึงสามารถไหลออกมาเป็นแท่งได้



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานที่ไหลผ่านกราไฟต์ออกมาบนรางเลื่อน

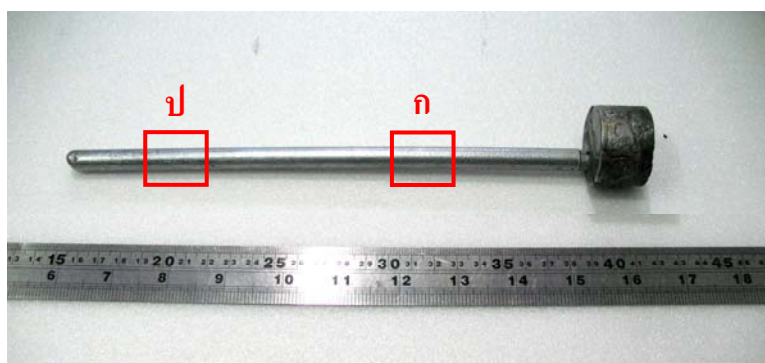
3.3.3 การวิเคราะห์ผลจากการอัดรีดเบื้องต้น

หลังจากสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ในขั้นตอนที่ 1 จากนั้นได้ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรความเร็วในการอัดรีดเพื่อดูพฤติกรรมเบื้องต้น โดยในที่นี้ได้ใช้ความเร็ว 2 4 6 และ 8 cm/s ในการอัดรีด ผลจากการทดลองพบว่าที่ความเร็วในการอัดรีดสูงชิ้นงานจะมีขนาดยาวขึ้นแต่ลักษณะของเนื้อชิ้นงานจะไม่แน่นเท่าที่ควรเนื่องจากชิ้นงานที่ออกมาในส่วนแรกจะเป็นเฟสของเหลวแยกออกมาก่อนเรียกว่า Squeezed Liquid ซึ่งเมื่ออัดรีดออกมาเรื่อยๆ เสมือนกับการรีดเฟสของของเหลวมาจนหมดจนเหลือเพียงบริเวณโคนของชิ้นงานที่มีลักษณะของเฟสแข็งอยู่ ในทางตรงกันข้ามชิ้นงานที่อัดรีดด้วยความเร็วที่ช้ากว่าจะมีปริมาณของ Squeezed Liquid อยู่่น้อยกว่าดังนั้นเนื้อของชิ้นงานจะมีลักษณะแน่นกว่าดังแสดงในรูปที่ 3.9

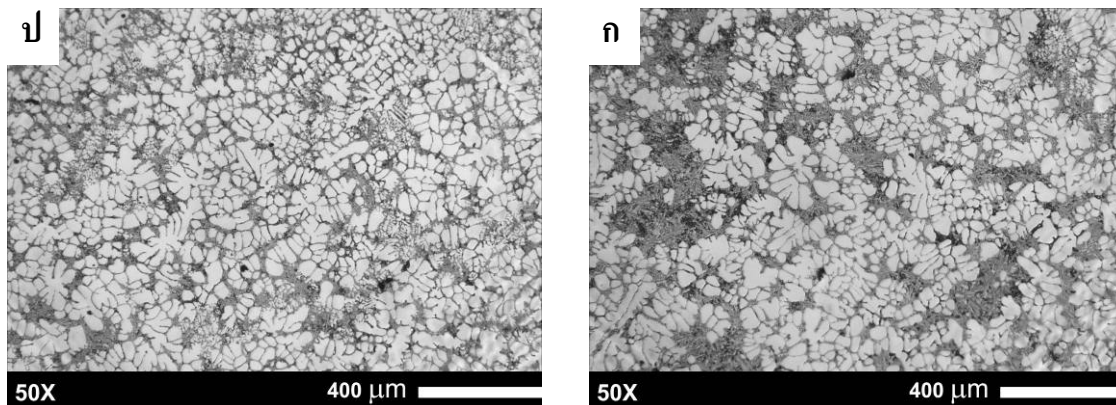


รูปที่ 3.9 ชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดที่ความเร็วแตกต่างกัน โดย (ก) 2 cm/s (ข) 4 cm/s (ค) 6 cm/s และ (ง) 8 cm/s ที่สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 10%

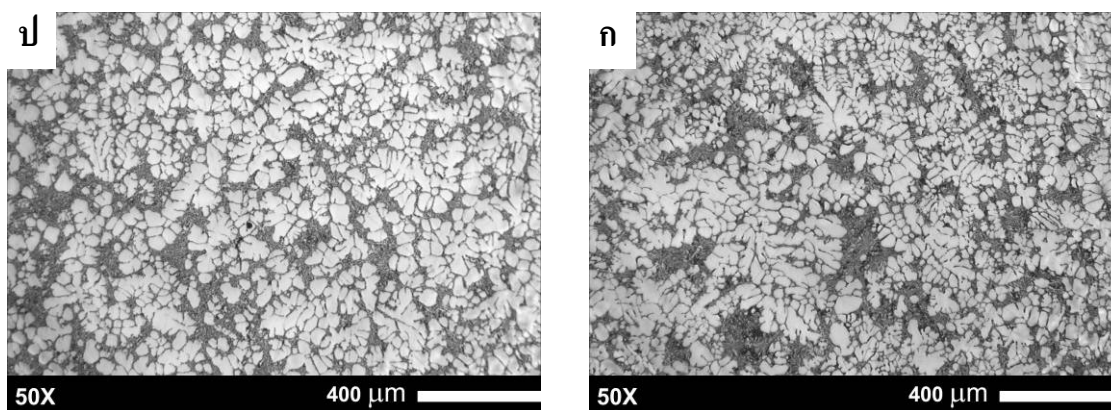
หลังจากได้ชิ้นงานที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปเบื้องต้นดังแสดงในรูปที่ 3.9 จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ผันแปรตามความเร็วที่ใช้ในการอัดรีด และบริเวณที่ตัดนำตัวอย่างมาวิเคราะห์โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเฉพาะชิ้นงานที่มีความยาวชิ้นส่วนที่เป็นรารองรับชิ้นงานออกมาได้นั้นคือในกรณีทำการอัดรีดโดยใช้ความเร็ว 4 cm/s 6 cm/s และ 8 cm/s และสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 10% โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากบริเวณปลายและกลางของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.11



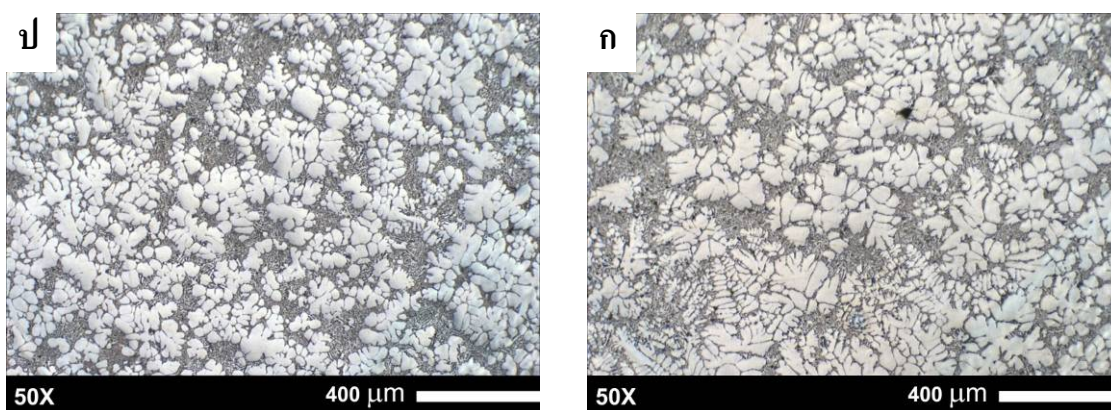
รูปที่ 3.10 บริเวณที่ตัดชิ้นงานสำหรับนำมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดย (ก) แทนส่วนกลาง และ (ป) แทนส่วนปลายของชิ้นงาน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อัดรีดขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วในการอัดรีด และสัดส่วนของแข็งเท่ากับ (ก) 4 cm/s 10% (ข) 6 cm/s 10% และ (ค) 8 cm/s 10%

นอกเหนือจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นแล้ว ชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูปอีกกลุ่มจะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติเชิงกลเบื้องต้นด้วย โดยในที่นี้หมายถึงสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงาน โดยผลจากการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.2

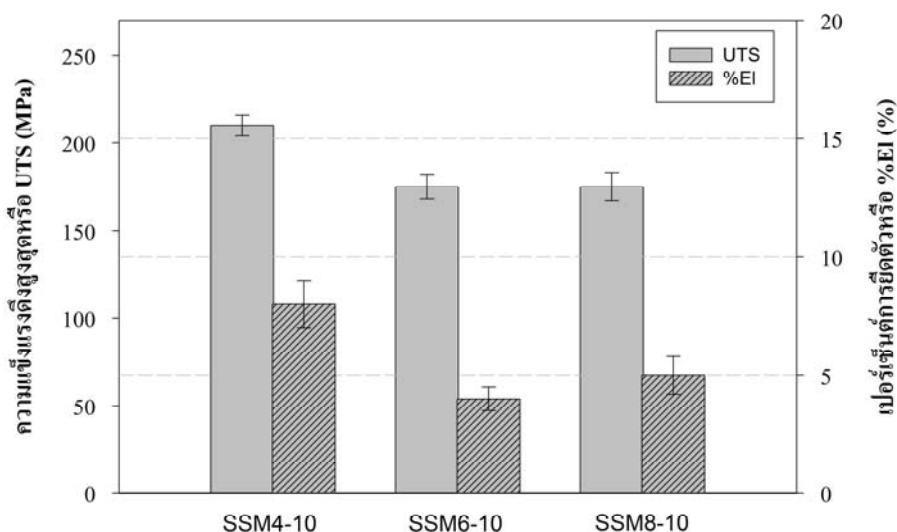
ตารางที่ 3.2 ผลจากการทดสอบความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงาน

ชิ้นงาน	เงื่อนไขในการอัดรีด		ความแข็งแรงดึงสูงสุด (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)
	สัดส่วนของแข็ง	ความเร็วอัดรีด		
SSM4-10	10%	4 cm/s	210.2 ± 6.1	8.3 ± 0.1
SSM6-10	10%	6 cm/s	174.1 ± 7.4	4.5 ± 0.5
SSM8-10	10%	8 cm/s	175.7 ± 8.1	5.0 ± 0.8

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นว่าชิ้นงานที่มีความแข็งแรงดึงสูงที่สุดคือชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดด้วยความเร็วต่ำสุดหรือเท่ากับ 4 cm/s และสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 10% มีค่าเท่ากับ 210.2 ± 6.1 MPa ในทางเดียวกันยังเป็นชิ้นงานที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงที่สุดเท่ากับ 8.3 ± 0.1% อีกด้วย ซึ่งในทางกลับกันชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุดคือชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดด้วยความเร็วสูงเท่ากับ 8 cm/s ทั้งนี้เนื่องจากในขณะที่ทำการอัดรีดนั้นชิ้นงานอาจจะยังไม่สามารถแข็งตัวได้ทันเนื่องจากมีความเร็วสูงเกินไปเศษของเหลวที่ไหลวนอยู่รอบนอกจะเย็นตัวเป็นลักษณะคล้ายเปลือกหุ้มซึ่งจะทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นการหดตัวของน้ำโลหะภายในได้แต่เมื่อนำชิ้นงานมาตัดตามขวาง (Cross Section) และทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายน้ำจะพบลักษณะของโพรงหดตัวระดับมหภาค (Macro Shrinkage) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่ผ่านการอัดรีดด้วยความเร็วสูงจึงมีแนวโน้มของสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 โพรงหดตัวระดับมหภาคและรูเก็สที่เกิดขึ้นภายในเนื้อของชิ้นงานหลังจากทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายน้ำ



รูปที่ 3.13 ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของชิ้นงานที่อัดรีดได้

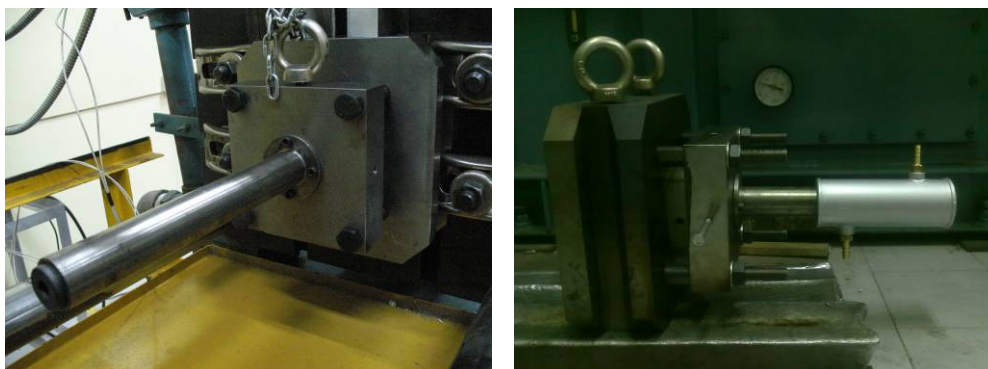
อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดเบื้องต้นนี้เป็นเพียงกระบวนการที่ทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการเท่านั้นดังนั้นชิ้นงานที่ได้จัดได้ว่ายังไม่สมบูรณ์เท่าที่ควรเนื่องจากชิ้นงานยังคงมีลักษณะโค้งตามแนวแรงโน้มถ่วงและผิวที่ได้ยังมีความขรุขระอยู่บ้างบางบริเวณ ประกอบกับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานจากการอัดรีดที่มีความเร็วไม่สม่ำเสมออันเนื่องจากการอัดของเครื่องอัดไฮดรอลิกไม่สามารถทำได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และไม่สามารถที่จะควบคุมความเร็วให้สม่ำเสมอได้เนื่องด้วยปัญหาของแรงดันที่ใช้ไม่เพียงพอประกอบกระบอกอัดที่ขยายตัวไม่เท่ากันที่ความร้อนในการอุ่นพิมพ์สูง อีกทั้งหากต้องการใช้ความเร็วที่สูงขึ้นจำเป็นต้องมีการเพิ่มสัดส่วนของแข็งที่มากขึ้นด้วยแต่เนื่องด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองเบื้องต้นนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการเช่นความสามารถของเครื่องอัดไฮดรอลิกเป็นต้นจึงจะมีการประยุกต์ใช้เครื่องอัดฉีดในการอัดรีดชิ้นรูปต่อไป

3.4 การอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งโดยประยุกต์ใช้เครื่องฉีดโลหะ

3.4.1 การออกแบบแม่พิมพ์

จากการทดลองเบื้องต้นกับเครื่องไฮดรอลิกแวนอนทำให้เกิดปัญหาจากการออกแบบแม่พิมพ์ อาทิเช่นปัญหาจากการแกะชิ้นงานที่ทำได้ยากและในการอัดรีดยังต้องการระบบหล่อเย็น (Cooling System) เพื่อทำให้ชิ้นงานที่ได้เกิดการเย็นตัวบริเวณส่วนปลายแล้วจึงดันอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งออกมาในลักษณะของแท่งกลมตันผ่านรางกราฟไฟต์ออกมา ซึ่งในส่วนนี้ได้มี

การปรับขนาดของรางรองรับชิ้นงานให้ยาวขึ้นและเพิ่มระบบหล่อเย็นความยาวประมาณ 50% ของรางรองรับชิ้นงาน อีกทั้งเพิ่มขึ้นส่วนที่เรียกว่า Cutting ring สำหรับแกะชิ้นงานได้ง่ายขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แม่พิมพ์ที่ออกแบบและสร้างเพื่อใช้ร่วมกับเครื่องกัดโลหะ

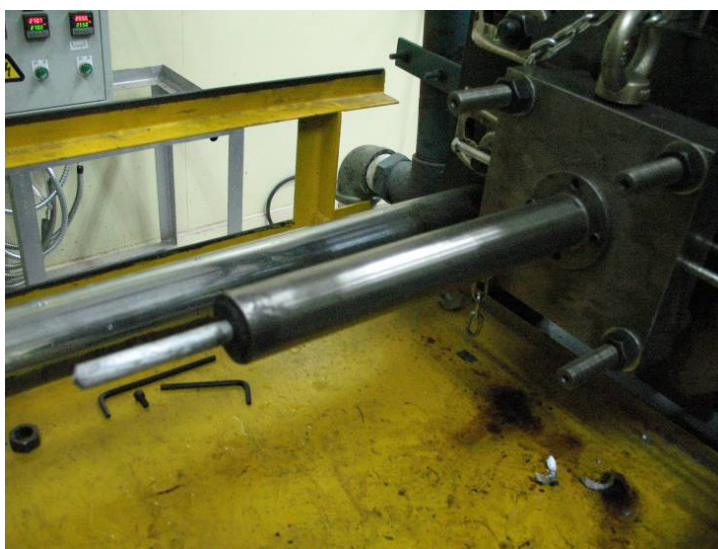
3.4.2 การอัดรีดขึ้นรูป

ในขั้นตอนของการอัดรีดขึ้นรูปนี้ได้ปรับเปลี่ยนตัวแปรโดยอาศัยผลจากการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งจะทำให้การศึกษาเพิ่มในตัวแปรของสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นของอะลูมิเนียมผสมที่สัมพันธ์กับความเร็วในการอัดรีด โดยในการศึกษานี้จะทำการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งที่สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5% 10% และ 20% ที่ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 2 cm/s 4 cm/s และ 6 cm/s ตามลำดับ ตัวแปรที่ใช้ในการอัดรีดสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการอัดรีดร่วมกับเครื่องกัดโลหะ

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	รายละเอียด
1. ปริมาณน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว	~200 กรัม
2. อุณหภูมิแท่งกราไฟต์	50°C
3. อุณหภูมิเริ่มปล่อยฟองแก๊ส	620°C
4. สัดส่วนของแข็งที่เตรียมได้	5% 10% และ 20%
5. อุณหภูมิแม่พิมพ์	270°C
6. อุณหภูมิกระบอกอัด	250°C
7. อุณหภูมิรางรองรับชิ้นงาน	30-40°C
8. ความเร็วที่ใช้ในการอัดรีด	2 cm/s 4 cm/s และ 6 cm/s
9. ระบบหล่อเย็น	ระบบน้ำไหลวน

ผลจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าเมื่อประยุกต์ใช้เครื่องฉีดโลหะมาทำการอัดรีดอะลูมิเนียมนั้นสามารถควบคุมความเร็วในการอัดได้คงที่มากขึ้นและอุณหภูมิของแม่พิมพ์รวมถึงกระบอกอัดสามารถควบคุมได้ด้วยการติดตั้ง Cartridge Heater ลงไปในตำแหน่งนั้น ๆ ซึ่งทำให้มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิมากขึ้นและในส่วนของหัวฉีดอัดรีดได้เพิ่มระบบหล่อเย็นซึ่งทำให้ชิ้นงานที่ได้เกิดการแข็งตัวเป็นแท่งก่อนแล้วจึงไหลผ่านรางกราฟไฟต์ออกไปในลักษณะแท่งกลมตันได้ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แม่พิมพ์ที่ออกแบบและสร้างเพื่อใช้ร่วมกับเครื่องฉีดโลหะ

3.4.3 การวิเคราะห์ผลจากการอัดรีดโดยประยุกต์ใช้เครื่องฉีดโลหะ

อย่างไรก็ตามพบว่ากรณีที่จะส่งผลให้ชิ้นงานยื่นผ่านรางรองรับออกมาในสถานะของแข็งที่แข็งตัวแล้ว 100% นั้นจะต้องมีการควบคุมสัดส่วนของแข็งของอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเริ่มต้นให้เหมาะสมกับความเร็วที่ใช้ในการอัดรีด เนื่องจากการความเร็วในการอัดรีดที่สูงเกินไปจะทำให้ชิ้นงานอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งไม่สามารถเย็นตัวได้ทันจะเกิดการแยกเฟสของของเหลวและไหลออกมาก่อนเช่นเดียวกันกับในกรณีของการอัดรีดที่ใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกแวนอนเมื่อพิจารณาถึงลักษณะของชิ้นงานที่อัดรีดได้มีความใกล้เคียงกับลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการทดลองศึกษาความเป็นไปได้ร่วมกับเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 20 ตันก็จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นชิ้นงาน (Extruded Sample) Squeezed liquid และ ส่วนที่อยู่ภายในกระบอกอัดหรือ Unextruded sample ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ส่วนประกอบของชิ้นงานที่อัดรีดได้

ความแตกต่างของชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดโดยใช้เครื่องฉีดโลหะเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ได้เครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 20 ตัน คือชิ้นงานมีลักษณะตรงมากกว่าและเนื้อของชิ้นงานจะแน่นกว่า ซึ่งจะไม่พบลักษณะของข้อบกพร่องระดับมหภาคโดยรวมทั้งผิวที่ดูดีกว่าอีกด้วย ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเครื่องฉีดโลหะสามารถควบคุมตัวแปร อาทิเช่น แรงดันอัด ความเร็วในการอัดรีด และอุณหภูมิของกระบอกอัดให้หนึ่งกว่าได้

สำหรับคุณภาพผิวของชิ้นงานที่อัดรีดได้พบว่าในทุกกรณีของการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งโดยใช้เครื่องฉีดโลหะนั้นจะทำให้ผิวของชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเรียบดังแสดงในรูปที่ 3.17 (ก) ทั้งนี้เป็นผลมาจากพฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ประกอบกับการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบที่นิ่งกว่าในกรณีของการอัดรีดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่จะเกิดการดัดขัดระหว่างการอัดรีดทำให้การไหลไม่สม่ำเสมอส่งผลให้เกิดการแยกกันของชั้นผิวและเกิดการยื่นตัวอย่างไม่สม่ำเสมอจึงทำให้ผิวที่ได้ขรุขระและไม่ต่อเนื่องกว่าการไหลแบบราบเรียบดังแสดงในรูปที่ 3.17 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.17 ผิวของชิ้นงานที่ได้ที่ผ่านและไม่ผ่านการยอมรับ (ก) ลักษณะผิวที่เรียบ
(ข) ลักษณะผิวที่ขรุขระ

สำหรับความยาวของชิ้นงานนั้นพบว่าในการทดลองอัดรีดที่ความเร็วและสัดส่วนของแข็งต่างๆ กันพบว่าที่สัดส่วนของแข็งต่ำสุดเท่ากับ 5 % และความเร็วในการอัดรีดต่ำสุดเท่ากับ 2 cm/s ไม่สามารถทำให้ชิ้นงานไหลผ่านรางรองรับออกมาได้ดังนั้นในกรณีนี้จึงตัดทิ้งไป ในทาง

ตรงกันข้ามในกรณีที่มีความเร็วสูงขึ้นที่ 4 cm/s และ 6 cm/s ชิ้นงานสามารถไหลผ่านรางรองรับ ออกมาได้แต่เนื่องจากความเร็วสูงทำให้อะลูมิเนียมกึ่งของแข็งยังเย็นตัวได้ไม่มากนักจึงเกิดการหักงอของส่วนปลายของชิ้นงานซึ่งเหลือส่วนที่สามารถพยุ่งได้วัดจากส่วนปลายความยาวประมาณ 1-2 cm ดังนั้นจึงเพิ่มสัดส่วนของแข็งมากขึ้นเป็น 10% พบว่าที่ความเร็วในการอัดรีด 4 cm/s ชิ้นงานไม่สามารถยื่นผ่านรางรองรับออกมาได้เนื่องจากอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเกิดการเย็นตัวและแข็งตัวภายในรางและกระบอกสูบแล้วพันซ์จึงไม่สามารถดันออกมาได้ แต่ในกรณี 6 cm/s จะให้ชิ้นงานที่มีความยาวยื่นผ่านรางรองรับออกมาได้วัดจากปลายรางได้ความยาวที่ยื่นออกมาประมาณ 3-4 cm แต่จะเกิด Squeezed liquid ไหลออกมาก่อนในส่วนแรก ดังนั้นจึงได้ลองเพิ่มสัดส่วนของแข็งให้มากขึ้นอีกเป็น 20% ทั้งนี้เป้าหมายเพื่อลดปริมาณของ Squeezed liquid พบว่าที่ความเร็ว 6 cm/s ไม่สามารถอัดรีดชิ้นงานให้ไหลผ่านรางออกมาได้เนื่องจากเกิดการแข็งตัวภายในรางรองรับแล้วเช่นกัน ลักษณะของชิ้นงานทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.18 (ก-จ)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.18 ชิ้นงานที่อัดรีดได้ที่ความเร็วในการอัดรีดและสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ (ก) 2 cm/s 5% และ (ข) 4 cm/s 5% ตามลำดับ



(ก)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 3.18 (ต่อ) ชิ้นงานที่อัดรีดได้ที่ความเร็วในการอัดรีดและสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ
 (ก) 4 cm/s 10% (ง) 6 cm/s 5% (จ) 6 cm/s 10% และ (ฉ) 6 cm/s 15% ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์เบื้องต้นในด้านความยาวสามารถสรุปได้ว่ามีชิ้นงานที่อัดรีดขึ้นรูปโดยมีความยาวยื่นผ่านรางรองรับชิ้นงานได้เพียง 3 กรณีเท่านั้นคือกรณีที่ใช้ความเร็วในการอัดรีด 4 และ 6 cm/s ที่สัดส่วนของแข็ง 5% และ 10% ตามลำดับแต่กรณีที่ให้ความยาวมากที่สุดคือกรณีของความเร็วในการอัดรีด 6 cm/s ที่สัดส่วนของแข็ง 10% ดังรูปที่ 3.19 (ข ง และจ) และสรุปผลทั้งหมดในตารางที่ 3.4 ดังนั้นเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของสมบัติที่ชัดเจนเพื่อการประยุกต์ใช้งานจึงได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดใน 3 กรณีดังกล่าวในหัวข้อถัดไป

สาเหตุสำคัญที่ไม่สามารถอัดชิ้นงานให้มีความยาวมากได้เนื่องจากกระบอกอัดด้านหลังสามารถควบคุมอุณหภูมิได้เพียง 250°C เท่านั้นจึงทำให้เมื่อเทอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งลงไป ในกระบอกอัดจะเกิดการถ่ายเทความร้อนออกไปอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการแข็งตัว เมื่ออะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเกิดการแข็งตัว 100% กำลังของเครื่องฉีดโลหะไม่สามารถดันอะลูมิเนียมนั้นต่อไปได้จึงหยุดทำงาน และในกรณีที่เพิ่มสัดส่วนของแข็งมากขึ้นยิ่งทำให้อะลูมิเนียมแข็งตัวได้เร็วขึ้นดังนั้นจึงเป็นการยากมากที่จะทำให้ชิ้นงานออกมาได้ยาวมาก



รูปที่ 3.19 การเปรียบเทียบชิ้นงานชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดที่เงื่อนไขการอัดรีดต่าง ๆ โดย (ก) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 2 สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5% (ข) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 4 สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5% (ค) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 4 สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 10% (ง) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5% (จ) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 10% และ (ฉ) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 15%

ตารางที่ 3.4 สรุปผลจากการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง

สัดส่วนของแข็ง เริ่มต้น	ความเร็วในการอัดรีดขึ้นรูป		
	2 cm/s	4 cm/s	6 cm/s
5%	X	✓	✓
10%	X	X	✓
20%	X	X	X

*หมายเหตุ

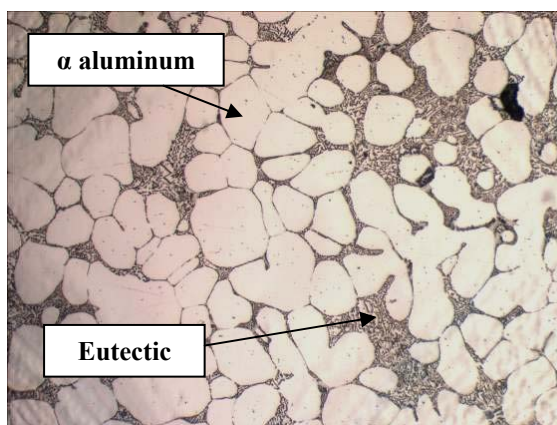
✓ คือกรณีที่ชิ้นงานขึ้นผ่านรางรองรับได้ และ X คือกรณีที่ชิ้นงานแข็งภายในรางรองรับ

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอัดรีด

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอัดรีดจะเน้นพิจารณาถึงความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Uniformity) รายละเอียดของการศึกษามีดังต่อไปนี้

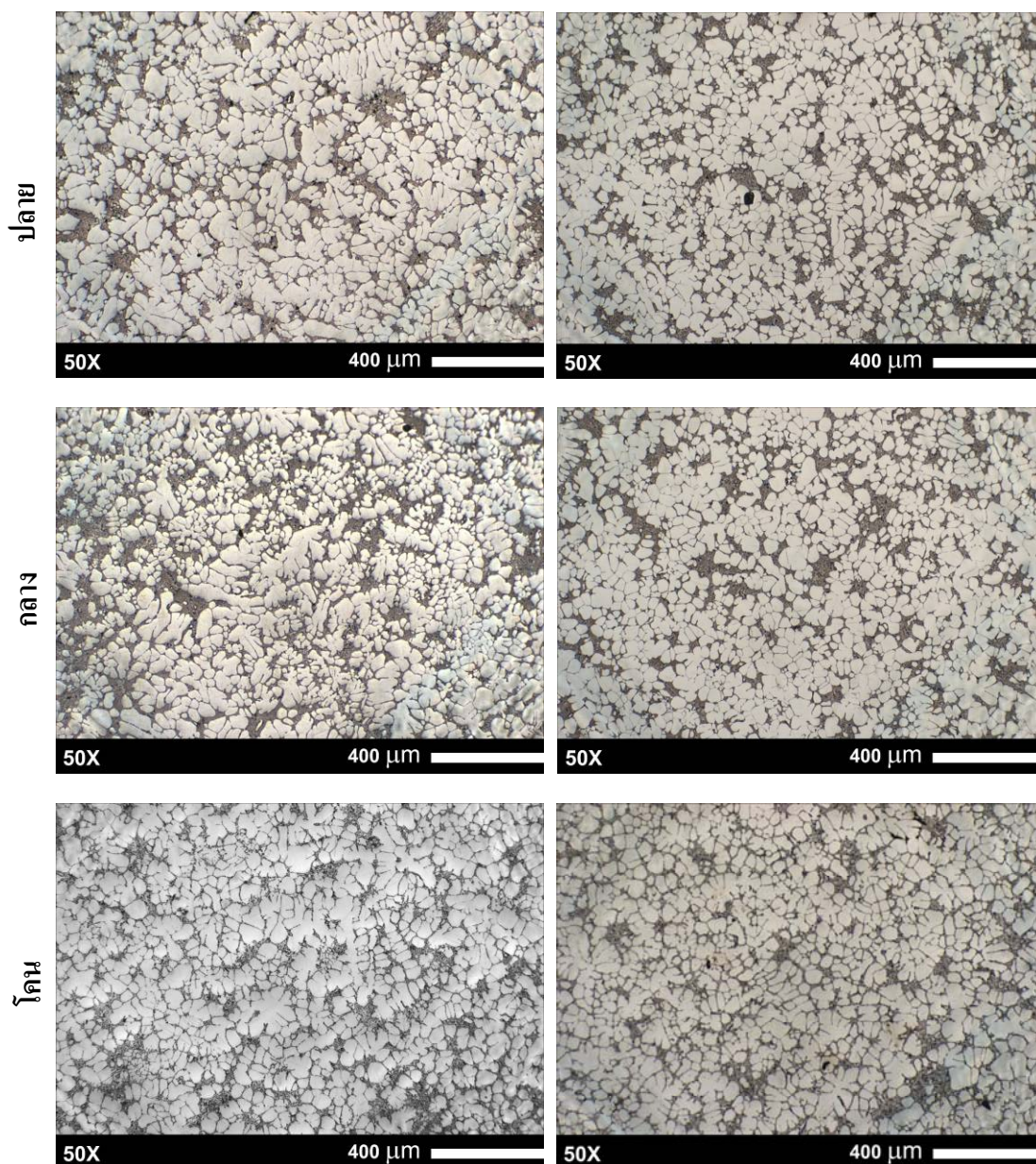
3.5.1 ผลของการวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาคทั่วไปของชิ้นงานอัดรีด

ผลจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของชิ้นงานอัดรีดที่เงื่อนไขการอัดรีดต่าง ๆ กันพบว่าโครงสร้างของชิ้นงานทั้งหมดประกอบด้วยสองเฟสหลัก ๆ คือ เฟสแอลฟาอะลูมิเนียม (α -Aluminum) ที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมเกิดจากการฟอร์มตัวจากปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวขณะแข็งตัวและเติบโตขึ้นเรื่อยๆ และอีกเฟสคือ ยูเทคติก ซึ่งเป็นบริเวณที่เหลือจะเกิดการแข็งตัวเมื่อน้ำอะลูมิเนียมเกิดการแข็งตัวที่อุณหภูมิยูเทคติก ลักษณะของโครงสร้างก้อนกลมและยูเทคติกแสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ลักษณะของเฟสแอลฟาอะลูมิเนียมและยูเทคติก

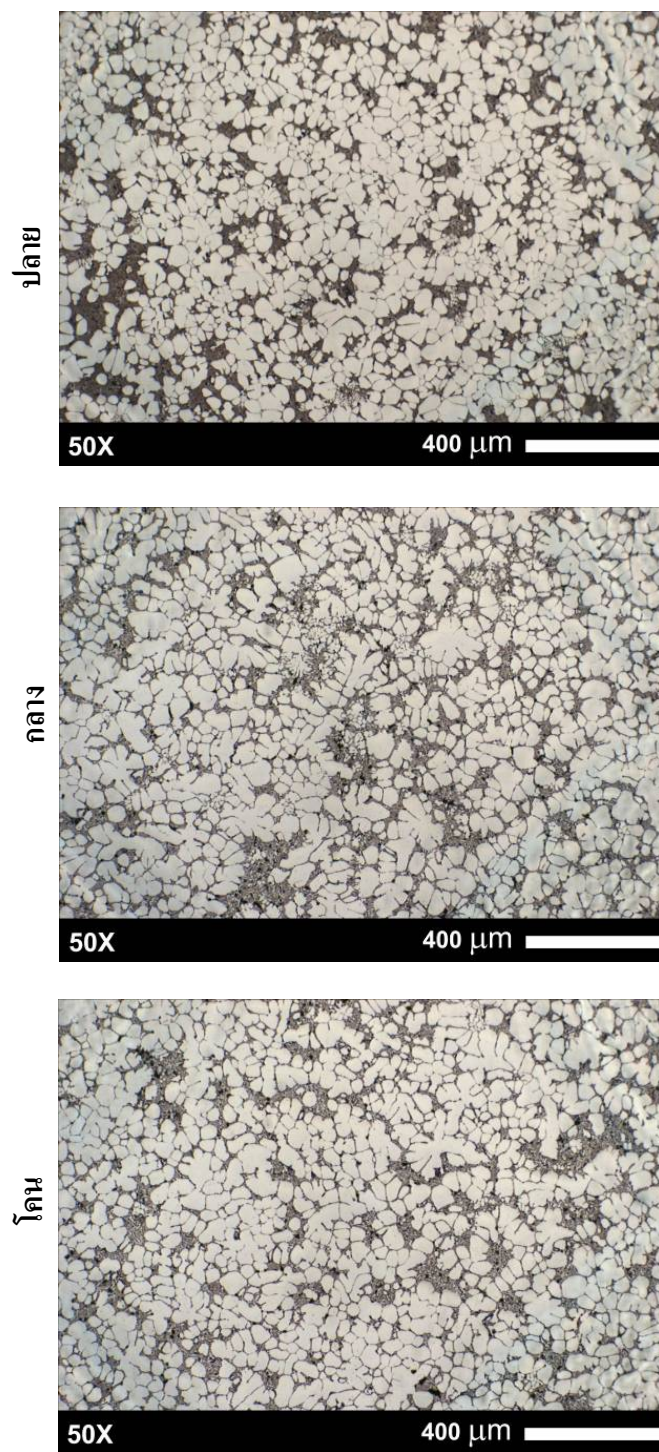
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอัดรีดจากแต่ละเงื่อนไขการอัดรีดแสดงดังรูปที่ 3.21 ภาพโดยรวมสามารถสรุปได้ว่าการกระจายตัวของเฟสแอลฟาอะลูมิเนียม และยูเทคติกมีความสม่ำเสมอและใกล้เคียงกันในทุกเงื่อนไขการอัดรีด



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.21 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอัดรีดบริเวณ โคน กลาง และปลายที่ (ก) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 4 cm/s และสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5% (ข) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 cm/s และสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5%

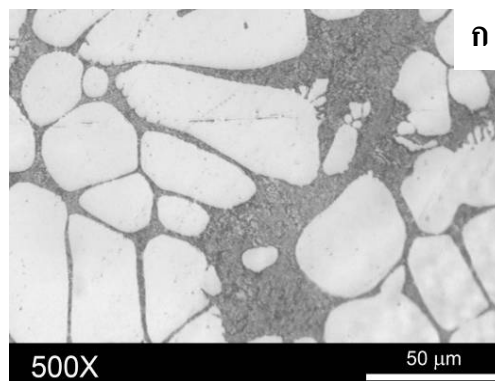
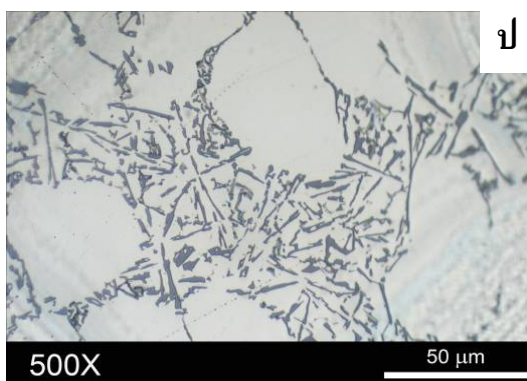
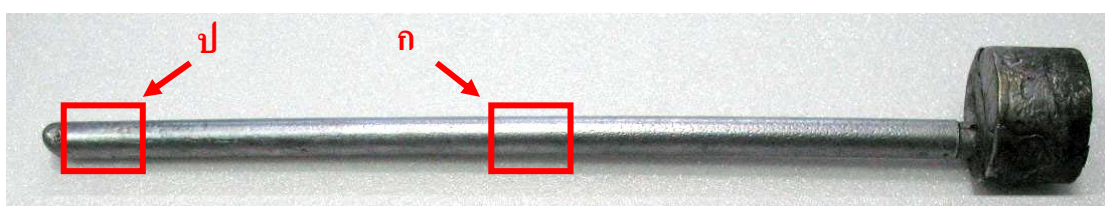


(ค)

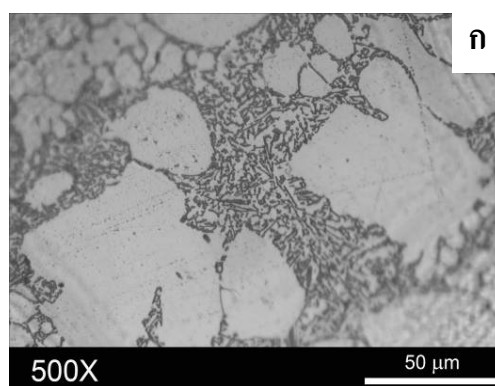
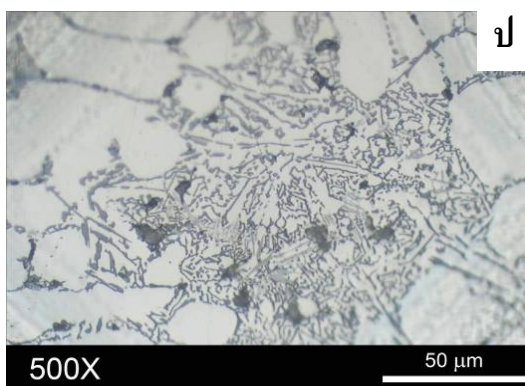
รูปที่ 3.21 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอัดรีดบริเวณ โคน กลาง และปลายที่ (ค) ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 cm/s และสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 10%

3.5.2 อิทธิพลของความเร็วในการอัดรีดต่อความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาค

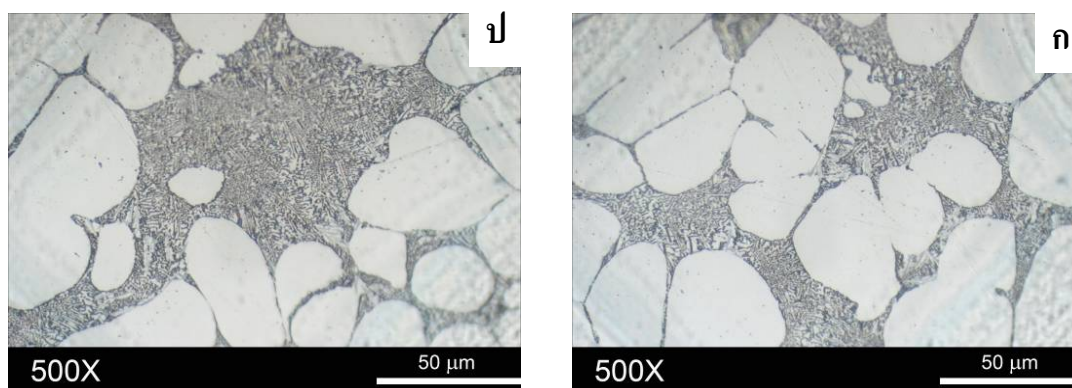
จากการวิเคราะห์โครงสร้างภาพรวมสรุปได้ว่าสัดส่วนของเฟสแอลฟาอะลูมิเนียมที่อยู่ติดกันจากแต่ละบริเวณตลอดความยาวของชิ้นงานมีความใกล้เคียงกันในทุกเงื่อนไขการอัดรีด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้กำลังขยายที่เพิ่มสูงขึ้นจาก 50X เป็น 200X-500X จะสังเกตเห็นความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคบริเวณปลายของชิ้นงานที่มีลักษณะใหญ่และหยาบแตกต่างจากบริเวณกลางและโคนของชิ้นงานที่มีลักษณะละเอียดกว่า ตำแหน่งของชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์และโครงสร้างจุลภาคของแต่ละบริเวณแสดงดังรูปที่ 3.22



(ก)



(ข)



(ค)

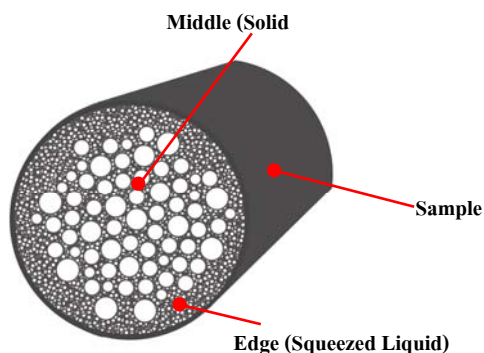
รูปที่ 3.22 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอัดรีดบริเวณกลางและปลายที่กำลังขยาย 500X โดย (ก) ใช้ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 4 cm/s และ สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 5% (ข) 6 cm/s และ 5% และ (ค) 6 cm/s และ 10% ตามลำดับ

จากรูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่กำลังขยาย 500X จากสองบริเวณดังกล่าวจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ใช้ความเร็วในการอัดรีดขึ้นรูปต่ำกว่าคือ 4 cm/s โครงสร้างยูเทคติกจะมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนคือ บริเวณกลางและโคนของชิ้นงานจะมีลักษณะเป็น โครงสร้างยูเทคติกละเอียดแต่บริเวณปลายโครงสร้างยูเทคติกจะมีลักษณะหยาบรูปทรงคล้ายเข็มความยาวเฉลี่ยประมาณ 10 μm และเมื่อเพิ่มความเร็วในการอัดรีดขึ้นพบว่าโครงสร้างยูเทคติกจะมีขนาดเล็กกลางแสดงดังรูปที่ 3.22 (ข และค) และเมื่อสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้นจาก 5% เป็น 10% พบว่าโครงสร้างยูเทคติกที่เกิดขึ้นบริเวณปลายของชิ้นงานมีความใกล้เคียงกับบริเวณกลางของชิ้นงานอย่างมาก

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการอัดรีดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่มีสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นต่ำๆ ที่ใช้ความเร็วในการอัดรีดสูงนั้นเฟสของเหลวจะไหลแยกตัวออกมาในช่วงแรกซึ่งจะส่งผลให้มีเวลาในการแข็งตัวมากกว่าหรืออัตราการเย็นตัวต่ำกว่า ดังนั้นจะทำให้เกิดลักษณะของโครงสร้างยูเทคติกที่หยาบกว่าซึ่งการเพิ่มความเร็วมากขึ้นส่งผลให้การผลักอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งออกจากกระบอกอัดทำได้ดีกว่าดังนั้นการแยกเฟสจึงเกิดน้อยกว่าอีกทั้งทำให้การเย็นตัวของสองบริเวณมีระยะเวลาที่ใกล้เคียงกันดังนั้นโครงสร้างจึงไม่แตกต่างกันมากนัก ยิ่งขึ้นไปกว่านั้นในกรณีที่เพิ่มสัดส่วนของแข็งสูงขึ้นนั้นจะมีส่วนช่วยทำให้อัตราการเย็นตัวของเฟสยูเทคติกสูงขึ้นจึงทำให้พบ โครงสร้างยูเทคติกที่ละเอียดมากและไม่แตกต่างกันกับบริเวณตรงกลางและที่โคนของชิ้นงาน จากข้อในส่วนนี้บ่งบอกว่าการควบคุมโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานให้มีลักษณะสม่ำเสมอตลอดความยาวนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงสัดส่วนของแข็งและความเร็วที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปอย่างมากเนื่องจากความสม่ำเสมอของโครงสร้างนี้จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้อีกด้วย

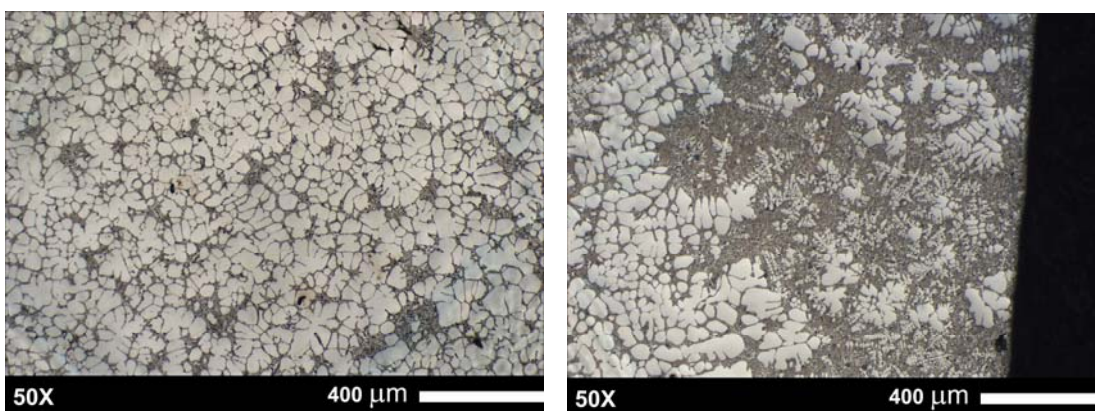
3.5.3 อิทธิพลของสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นต่อความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาค

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้นำเสนอการวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวความยาวของชิ้นงานซึ่งในการทดลองส่วนนี้ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างในแนวรัศมีซึ่งบริเวณของชิ้นงานตัวอย่างที่ถูกตัดนำมาวิเคราะห์มาจากสองบริเวณคือบริเวณขอบของชิ้นงานและบริเวณกลางชิ้นงานดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ตำแหน่งของชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาคในแนวรัศมี

ซึ่งเมื่อนำชิ้นงานจากสองบริเวณดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคพบว่าโครงสร้างจุลภาคจากทั้งสองบริเวณมีความแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 3.24 ผลจากการวิเคราะห์พบว่าบริเวณขอบของชิ้นงานทดสอบจะประกอบไปด้วยโครงสร้างเดนไดรต์หรือโครงสร้างกิ่งไม้ที่มีขนาดเล็กเกิดจากการที่เฟสของเหลวหรือ Liquid phase เกิดการไหลวนรอบนอกขณะไหลผ่านแม่พิมพ์ออกรูปร่างรองรับชิ้นงานและบริเวณกลางของชิ้นงานทดสอบจะปรากฏเฟสของแอลฟาอะลูมิเนียมที่มีลักษณะกลมอยู่

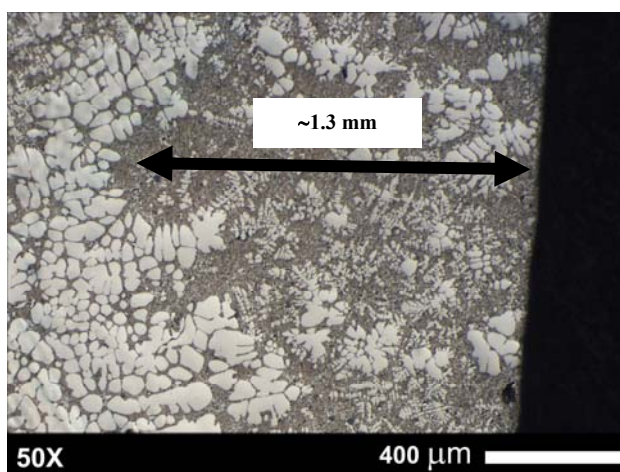


(ก)

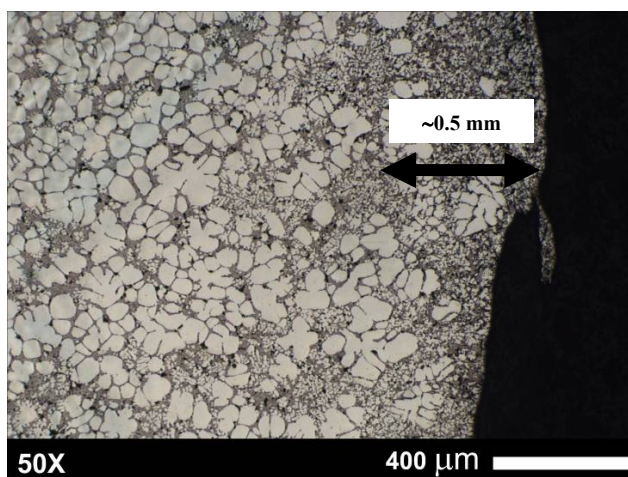
(ข)

รูปที่ 3.24 โครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบระหว่างบริเวณ (ก) กลาง และ (ข) ขอบของชิ้นงาน

จากนั้น ได้ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานในทุกเงื่อนไขการอัดรีดพบว่าชิ้นงานอัดรีดที่มีสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เฟสของเหลวที่อยู่บริเวณขอบนอกของชิ้นงานจะลดน้อยลงดังรูปที่ 3.25 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อสัดส่วนของแข็งเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ปริมาณของเฟสของเหลวน้อยลงและจะเกิดการแยกเฟสของของเหลวน้อยลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามหากสัดส่วนของของแข็งน้อยจนเกินไปจะทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผนังแม่พิมพ์และเนื้ออะลูมิเนียมซึ่งอาจจะต้องใช้แรงดันในการอัดรีดเพิ่มสูงขึ้นด้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.25 โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบของชิ้นงานที่มีสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นแตกต่างกัน โดย (ก) ใช้สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 5% ที่ความเร็ว 6 cm/s และ (ข) ใช้สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 10% ที่ความเร็ว 6 cm/s

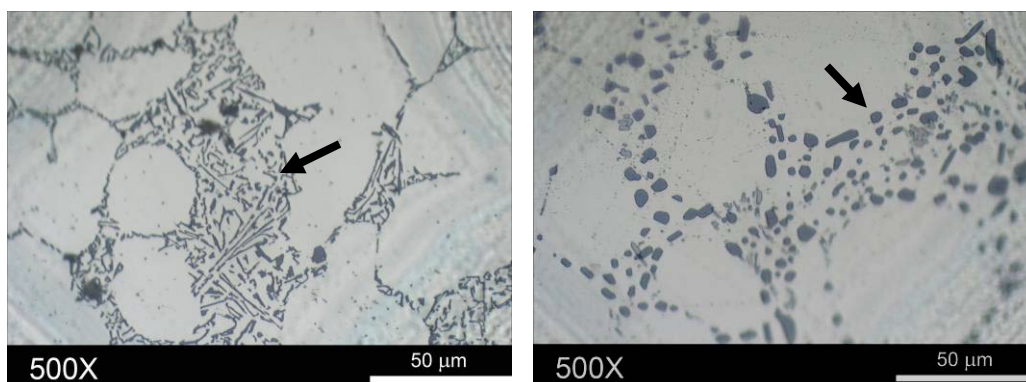
ผลจากการวัดระยะของบริเวณที่เป็นโครงสร้างเดนไดรต์ละเอียดในชิ้นงานแต่ละชิ้นแสดงดังตารางที่ 3.5 ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันในชิ้นงานทุกบริเวณดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าในระหว่างการไหลของอะลูมิเนียมที่แข็งออกจากแม่พิมพ์นั้นเฟสของของเหลวจะไหลวนอยู่รอบนอกเสมอและเฟสของแอลฟาอะลูมิเนียมที่เกิดจากการปล่อยฟองแก๊สและเดบ โตะจะไหลอยู่บริเวณกลางของชิ้นงาน

ตารางที่ 3.5 สรุประยะของเฟสของเหลวบริเวณขอบชิ้นงาน

ชิ้นงาน	ระยะเฟสของเหลวบริเวณขอบ (mm)			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	โคน	กลาง	ปลาย		
S= 4 cm/s และ $f_s = 5\%$	1.4	1.6	1.0	1.3	0.3
S= 6 cm/s และ $f_s = 5\%$	1.2	1.4	1.0	1.2	0.2
S= 6 cm/s และ $f_s = 10\%$	0.4	0.6	0.4	0.5	0.1

3.5.4 โครงสร้างจุลภาคหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคหลังนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเงื่อนไข T6 พบว่าเมื่อทำการอบละลายชิ้นงานที่อุณหภูมิ 540°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงนั้นทำให้โครงสร้างของยูเทคติกมีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมที่ลักษณะของเฟสของซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นแจกคล้ายเข็มจะเปลี่ยนรูปกลายเป็นซิลิกอนที่มีลักษณะกลมดังแสดงในรูปที่ 3.26



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.26 ลักษณะของเฟสซิลิกอน (ก) ก่อน และ (ข) หลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

3.6 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของชิ้นงานอัดรีด

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่อัดรีดได้โดยประกอบด้วยสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดแตกหักของชิ้นงาน (% Elongation)

3.6.1 ความแข็งแรงดึงสูงสุด

ในการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดในขั้นตอนนี้ชิ้นงานจะถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ ชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดโดยตรงและชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน ชิ้นงานทั้งคู่จะถูกนำไปกลึงจนมีขนาด ความยาว Gauge length เส้นผ่านศูนย์กลาง และรัศมีความโค้งตรงตามมาตรฐาน ASTM B557M ตัวอย่างชิ้นงานที่กลึงได้แสดงดังรูปที่ 3.27 จากนั้นชิ้นงานจะถูกดึงโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) เพื่อวัดค่าแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ผ่านทางคอมพิวเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.28



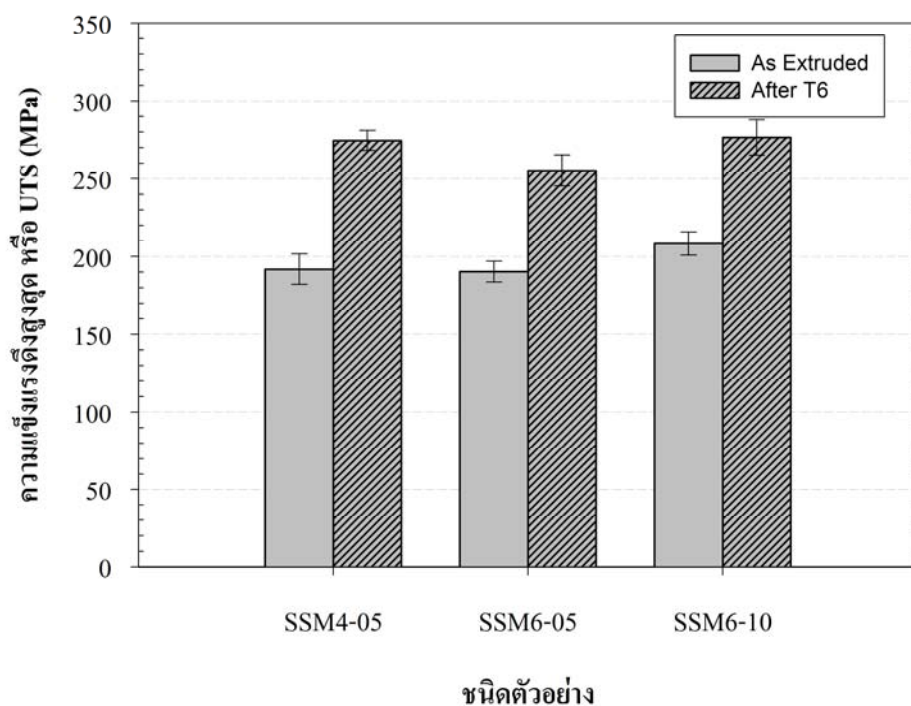
รูปที่ 3.27 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึงสูงสุด



รูปที่ 3.28 ลักษณะของชิ้นงานที่ถูกดึงโดยเครื่อง UTM

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานอัดรีดที่เงื่อนไขต่างกันก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

ชิ้นงาน	เงื่อนไขในการอัดรีด		ความแข็งแรงดึงสูงสุด (MPa)	
	สัดส่วนของแข็ง	ความเร็วอัดรีด	As extruded	T6
SSM4-5	5%	4 cm/s	191.9 ± 9.7	274.6 ± 6.7
SSM6-5	5%	6 cm/s	190.3 ± 6.8	255.2 ± 10.0
SSM6-10	10%	6 cm/s	208.4 ± 7.5	276.5 ± 11.3



รูปที่ 3.29 กราฟเปรียบเทียบผลจากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานจากการอัดรีดขึ้นรูปก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

ผลจากการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดแสดงดังตารางที่ 3.6 และรูปที่ 3.29 พบว่าชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดคือชิ้นงานที่อัดรีดโดยใช้ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 cm/s และสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 10% มีค่าความแข็งแรงดึงก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนเท่ากับ 208.4 ± 7.5 MPa และ 276.5 ± 11.3 MPa ตามลำดับ ซึ่งจากแนวโน้มพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นสูงขึ้นทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

เนื่องจากเมื่อสัดส่วนของแข็งเพิ่มขึ้นจะทำให้อะลูมิเนียมกึ่งของแข็งสามารถไหลได้อย่างราบเรียบมากขึ้นจึงทำให้ไม่เกิดข้อบกพร่องภายในเนื้อชิ้นงานและชิ้นงานที่ได้ยังมีเนื้อที่แน่นอีกด้วย และในทางตรงกันข้ามหากใช้ความเร็วที่สูงขึ้นร่วมกับสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นที่ต่ำกว่าดังในกรณีของการอัดรีดโดยใช้ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 cm/s และ สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 5% พบว่ามีแนวโน้มของสมบัติความแข็งแรงดึงที่ต่ำลงเท่ากับ 190.3 ± 6.8 MPa สำหรับชิ้นงานก่อนทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน และ 255.2 ± 10.0 MPa สำหรับชิ้นงานหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านการดึงพบว่าบริเวณรอยแตกยังมีออกไซด์ฟิล์มเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.30 ซึ่งจะส่งผลให้ชิ้นงานไม่มีความแข็งแรงดึงสูงเท่าที่ควร



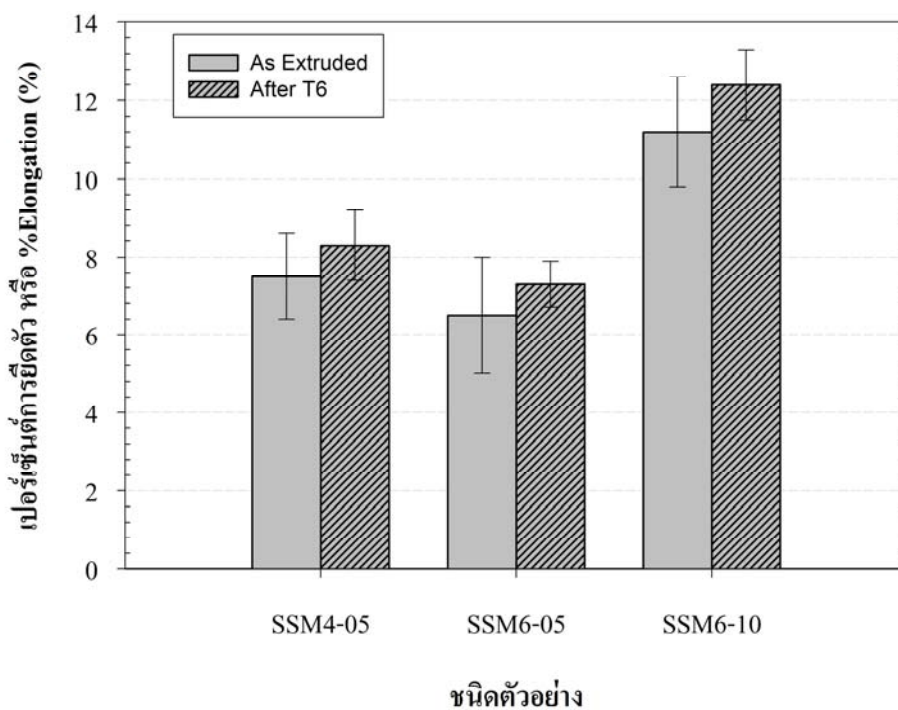
รูปที่ 3.30 ออกไซด์ฟิล์มภายในเนื้อชิ้นงาน

3.6.2 เปอร์เซนต์การยึดตัว ณ จุดแตกหัก

ผลจากการวิเคราะห์เปอร์เซนต์การยึดตัว ณ จุดแตกหักแสดงดังตารางที่ 3.7 และรูปที่ 3.31 พบว่าชิ้นงานที่มีค่าเปอร์เซนต์การยึดตัวสูงที่สุดคือชิ้นงานที่อัดรีดโดยใช้ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 cm/s และสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 10% มีค่าความแข็งแรงดึงก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนเท่ากับ $11.2 \pm 1.4\%$ และ $12.4 \pm 0.9\%$ ตามลำดับ ซึ่งจากแนวโน้มพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นสูงขึ้นทำให้ชิ้นงานมีเปอร์เซนต์การยึดตัวเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกันในทางตรงกันข้ามหากใช้ความเร็วที่สูงขึ้นร่วมกับสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นที่ต่ำกว่าดังในกรณีของการอัดรีดโดยใช้ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 cm/s และ สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 5% พบว่ามีแนวโน้มของสมบัติความแข็งแรงดึงที่ต่ำลงเท่ากับ $6.5 \pm 1.5\%$ สำหรับชิ้นงานก่อนทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน และ $7.3 \pm 0.6\%$ สำหรับชิ้นงานหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานอัดรีดที่เงื่อนไขต่างกันก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

ชิ้นงาน	เงื่อนไขในการอัดรีด		เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)	
	สัดส่วนของแข็ง	ความเร็วอัดรีด	As extruded	T6
SSM4-5	5%	4 cm/s	7.5 ± 1.1	8.3 ± 0.9
SSM6-5	5%	6 cm/s	6.5 ± 1.5	7.3 ± 0.6
SSM6-10	10%	6 cm/s	11.2 ± 1.4	12.4 ± 0.9

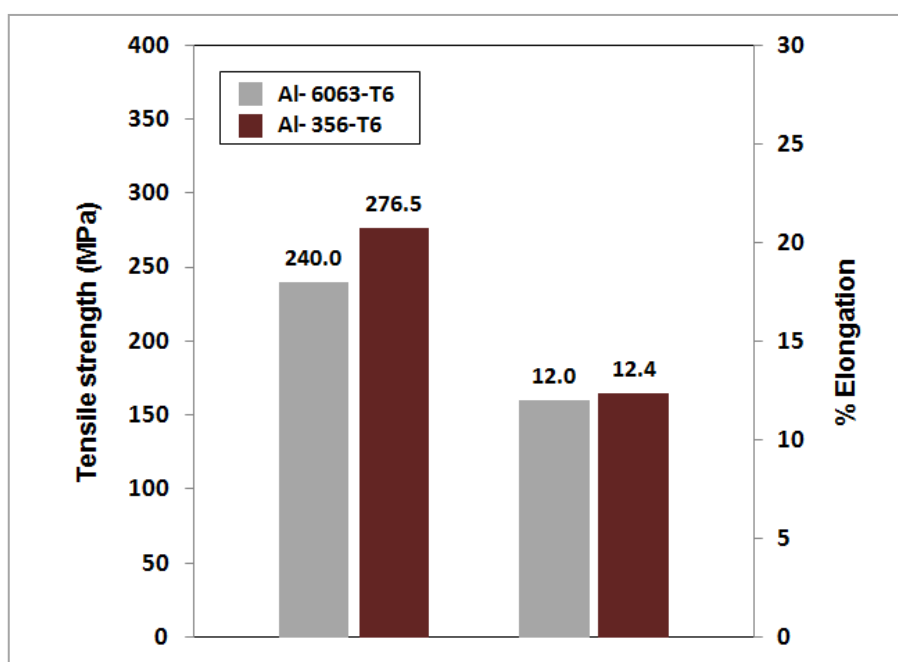


รูปที่ 3.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานจากการอัดรีดขึ้นรูปก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

จากรูปที่ 3.31 ยังเห็นได้ว่าสมบัติของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนและหลังการทำการปรับปรุงไม่ได้แตกต่างกันมากนักทั้งนี้น่าจะเป็นเพราะอิทธิพลจากการแยกตัวของเฟสของเหลวบริเวณขอบรอบนอกของชิ้นงานที่เกิดขึ้นดังแสดงรูปที่ 3.25

3.7 การเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลระหว่างชิ้นงานที่อัดรีดขึ้นรูปได้และสมบัติมาตรฐานของชิ้นงานอัดรีดทั่วไป

ในขั้นตอนนี้ได้วิเคราะห์ผลของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่อัดรีดได้จากกระบวนการอัดรีดแบบกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 และ ค่ามาตรฐานของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานอัดรีดอะลูมิเนียมที่ใช้กันทั่วไปนั่นคืออะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ซึ่งเป็นอะลูมิเนียมที่จัดอยู่ในชนิด Wrought อะลูมิเนียม ผลจากการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานจากการอัดรีดขึ้นรูปก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าชิ้นงานที่อัดรีดขึ้นรูปได้จากกระบวนการอัดรีดแบบกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 356 ซึ่งเป็นอะลูมิเนียมชนิดหล่อ หรือ Cast aluminum ยังมีค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงกว่าอะลูมิเนียมเกรด 6063 ที่ใช้อยู่อย่างแพร่หลายอ้างอิงจากมาตรฐาน ASM handbook มีค่าเท่ากับ 240.0 MPa 276.5 MPa และ 12.0% 12.4% ตามลำดับ ดังนั้นบ่งบอกถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมเกรด 356 มาทำการอัดรีดขึ้นรูปได้ในอนาคต

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

ผลจากการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของกระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งโดยใช้วิธีการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะแข็งตัวพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะทำการอัดรีดอะลูมิเนียมผสมแบบกึ่งของแข็งที่มีสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นต่ำ ๆ (หรือน้อยกว่า 30%) ได้ ทั้งนี้ในการอัดรีดโลหะผสมหรืออะลูมิเนียมผสมที่มีสัดส่วนของแข็งต่ำ ๆ นั้นจำเป็นต้องมีการควบคุมตัวแปรในการอัดรีดให้เหมาะสมกับสัดส่วนของแข็งที่ผลิตได้อย่างมากเนื่องจากการมีเฟสของเหลวอยู่มากกว่าเฟสของแข็งนั้นจะทำให้การไหลของน้ำโลหะควบคุมได้ยากขึ้นรวมทั้งการเย็นตัวของน้ำโลหะยังควบคุมยากกว่าการอัดรีดขึ้นรูปที่มีเฟสของแข็งอยู่เยอะเช่นในการอัดรีดแบบ Hot extrusion ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ผลจากการศึกษาดังกล่าวที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมผสมแบบกึ่งของแข็งในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลของการออกแบบชุดแม่พิมพ์

จากการทดลองพบว่าแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการอัดรีดแบบกึ่งของแข็งโดยเริ่มต้นจากการเทน้ำโลหะหลอมเหลวนั้นควรมีความยืดหยุ่นต่อการถอดชิ้นงาน โดยมีส่วนที่เป็น Cutting ring แทรกไว้ระหว่างแม่พิมพ์ส่วนหน้าและกระบอกอัดเพื่อเป็นชิ้นส่วนที่ถอดออกก่อนแล้วจึงแกะชิ้นงานออกแต่อย่างไรก็ตามควรออกแบบให้ Cutting ring มีรูปร่างเหมาะสมเพื่อให้ง่ายต่อการแกะชิ้นงานออกมากขึ้น และการแกะชิ้นงานควรแกะออกทางด้านหน้าของแม่พิมพ์อัดรีด ในส่วนปลายของแม่พิมพ์ควรมีการติดตั้งชุดหล่อเย็นไว้เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีการแข็งตัวบริเวณปลายก่อนแล้วจึงดันออกมาเพื่อให้มีรูปร่างที่คงตัวเป็นแท่งอยู่ได้ สำหรับกระบอกอัดจะต้องสามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ ซึ่งในการทดลองสามารถรักษาอุณหภูมิได้เพียง 250°C เท่านั้นซึ่งภายหลังพบว่า เป็นข้อจำกัดของการขึ้นรูปเนื่องจากจะทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วภายในกระบอกอัดก่อนทำการอัดรีด ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหานี้ควรเพิ่มความสามารถในการรักษาอุณหภูมิของกระบอกอัดให้เพิ่มสูงขึ้นในอนาคต

4.1.2 ผลของสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นต่อความสมบูรณ์ของชิ้นงานอัดรีด

จากการทดลองใช้สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นต่างกัน ได้แก่ 5 10 20 และ 30% ตามลำดับพบว่าในกรณีของสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 30% นั้นพบว่าอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่เตรียมได้จากกระบวนการฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะแข็งตัวมีความหนืดตัวค่อนข้างสูง (Higher Viscosity) จึงไม่สามารถที่จะเทน้ำโลหะลงในกระบอกรีดได้ สำหรับสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นที่ต่ำมากเท่ากับ 5% นั้นจะยังคงมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่มีเฟสของเหลว 100% นั่นคือยังมีสมบัติการไหลที่ดีมากแต่ทั้งนี้หากทำการอัดรีดด้วยสัดส่วนของแข็งต่ำจะทำให้ไม่สามารถใช้ความเร็วในการอัดรีดสูงได้เนื่องจากจะเกิดการแยกเฟสของของเหลวออกมา ก่อน (Liquid Segregation) และจะอาจเกิดการเย็นตัวไม่ทันซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องภายในเนื้อของชิ้นงานเช่น โพรงหดตัวระดับมหภาคและจุลภาคเป็นต้น และจะส่งผลโดยตรงกับสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่อัดรีดได้ ดังนั้นการเพิ่มสัดส่วนของแข็งให้สูงขึ้นจึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดข้อจำกัดดังกล่าวแต่ในการทดลองพบว่าหากเพิ่มสัดส่วนของแข็งมากเกินไปเช่นในกรณีของสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 20% จะส่งผลให้ไม่สามารถอัดชิ้นงานให้มีลักษณะยาวขึ้นผ่านรางรองรับชิ้นงานออกมาได้ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงสามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่าชิ้นงานที่อัดรีดโดยใช้สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 10% จะมีลักษณะผิวและความยาวสมบูรณ์ที่สุด

สำหรับอิทธิพลของสัดส่วนของแข็งต่อความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาคสามารถสรุปได้ดังนี้การใช้สัดส่วนของแข็งที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการแยกเฟสของเหลวน้อยลง ดังนั้นเมื่อทำการอัดรีดเฟสของเหลวที่เหลือที่จะไหลวนรอบนอกของชิ้นงานนั้นจะมีปริมาณน้อยกว่าทำให้ชิ้นงานมีความสม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวรัศมีมากขึ้นแต่อย่างไรก็ตามความสำคัญของเฟสของเหลวที่ไหลวนบริเวณรอบนอกดังกล่าวจะเป็นตัวช่วยในการหล่อลื่นชิ้นงานระหว่างผิวของแม่พิมพ์หรือรางรองรับและอะลูมิเนียมเองทำให้สามารถอัดรีดโดยใช้ความเร็วเพิ่มขึ้นได้ แต่หากสัดส่วนของแข็งมากเกินไปจะส่งผลทำให้เฟสของเหลวที่ไหลวนรอบนอกมีปริมาณน้อยมากก่อให้เกิดแรงเสียดทานบริเวณผิววนนอกซึ่งทำให้ต้องใช้แรงดันสูงขึ้นในการอัดรีดชิ้นงานและหากแรงดันไม่พอพันทันจะหยุดการอัดทำให้ได้ชิ้นงานที่ไม่สมบูรณ์

4.1.2 ผลของความเร็วในการอัดรีดต่อความสมบูรณ์ของชิ้นงานอัดรีด

จากการทดลองใช้ความเร็วที่แตกต่างกัน ได้แก่ 2 4 6 และ 8 cm/s พบว่าในกรณีที่ทำการอัดรีดโดยใช้ความเร็วอัดรีดต่ำเท่ากับ 2 cm/s นั้นไม่สามารถอัดรีดให้ชิ้นงานยาวพ้นส่วนที่เป็นรางรองรับชิ้นงานออกมาได้ทั้งนี้เป็นเพราะอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเกิดการเย็นตัวและแข็งก่อนที่จะอัดรีดชิ้นงานออกมาได้ในทุกเงื่อนไขของสัดส่วนของแข็ง ในทางตรงกันข้ามหากเพิ่มความเร็ว

อัตราเร็วสูงมากเท่ากับ 8 cm/s ซึ่งงานที่ได้จะมีลักษณะไม่เต็มหน้าตัดสาเหตุเนื่องจากชิ้นงานที่ถูกอัดผ่านแม่พิมพ์และไหลออกมาจากรางรองรับชิ้นงานยังคงมีเฟสของเหลวอยู่เยอะจึงไม่สามารถฟอร์มตัวเป็นรูปร่างตามแม่พิมพ์ได้ ซึ่งในกรณีที่ความเร็วสูงนี้หากเพิ่มสัดส่วนของแข็งให้สูงขึ้นเพื่อช่วยในการแข็งตัวนั้นสามารถทำได้แต่จะเกิดแรงเสียดทานสูงมากดังนั้นจะเป็นการเพิ่มข้อจำกัดในการขึ้นรูปและยังถือเป็นข้อด้อยเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราเร็วอื่น ๆ อีกด้วย ดังนั้นในการวิจัยจึงมุ่งเน้นพัฒนาการอัดรีดที่ใช้ความเร็วพอเหมาะต่อสัดส่วนของแข็งเพื่อยังคงรักษาข้อดีในการลดแรงดันอัดรีดลงได้ และผลจากการอัดรีดที่ให้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์มากที่สุดคือกรณีที่ใช้ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 6 cm/s และสัดส่วนของแข็งเท่ากับ 10% ซึ่งต้องยอมรับว่าตัวแปรความเร็วในการอัดรีดที่เหมาะสมกับสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเหล่านี้จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนไปตามลักษณะของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ด้วยเนื่องจากระยะในการอัดรีด อุณหภูมิของแม่พิมพ์และกระบอกอัดที่สามารถควบคุมได้ก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเช่นกัน

สำหรับอิทธิพลของความเร็วในการอัดรีดต่อความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาคสามารถสรุปได้ดังนี้ สำหรับการกระจายตัวของเฟสแอลฟาอะลูมิเนียมต่อเฟสยูเทคติกนั้นจัดได้ว่ามีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากตลอดแนวความยาวของชิ้นงาน แต่เมื่อพิจารณาถึงรูปร่างและรูปทรงของโครงสร้างซิลิกอนที่ปรากฏอยู่ในเฟสยูเทคติกของชิ้นงานที่อัดรีดโดยใช้ความเร็วในการอัดรีดต่ำกว่าพบว่าบริเวณส่วนปลายของชิ้นงานจะมีลักษณะของยูเทคติกซิลิกอนที่หายบดคล้ายรูปเข็มต่างจากบริเวณ โคนของชิ้นงานที่มีลักษณะละเอียดกว่าทั้งนี้เป็นผลจากการแยกเฟสของของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างการบีบอัดอะลูมิเนียมออกจากกระบอกอัดนั่นเองซึ่งเฟสของเหลวเหล่านั้นจะมีอัตราการเย็นตัวต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ จึงทำให้โครงสร้างซิลิกอนเกิดการเติบโตขึ้น แต่ในกรณีชิ้นงานที่อัดรีดด้วยความเร็วที่สูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานบริเวณ โคนและปลายมีโครงสร้างใกล้เคียงกันทั้งเฟสแอลฟาอะลูมิเนียมและยูเทคติกซิลิกอนเนื่องจากการใช้ความเร็วสูงจะทำให้อะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่อยู่ภายในกระบอกอัดเกิดการผสมกันของ Primary solid particle และเฟสของเหลวแล้วจึงดันออกมาอย่างรวดเร็วไม่มีเวลาสำหรับการตกตะกอนหรือแยกชั้นกันระหว่างเฟสของเหลวและของแข็ง ดังนั้นทั้งสองบริเวณจึงมีอัตราการเย็นตัวที่ใกล้เคียงกันส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคใกล้เคียงกันเช่นกัน

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อให้สามารถอัดรีดชิ้นงานให้ยาวขึ้นได้ควรมีการเพิ่มกระบอกอัดที่สามารถอุ่นให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนสามารถรักษาสภาพกึ่งของแข็งของวัสดุที่นำมาขึ้นรูปให้อยู่ที่ประมาณ 50% ได้

2. สำหรับวัสดุอื่น ๆ ที่นำมาทำการอัดรีดเช่น ดิบุกผสม และ แมกนีเซียมผสมอาจมีการปรับปรุงรองรับชิ้นงาน โดยทำจากวัสดุชนิดอื่นอื่นนอกเหนือจากกราไฟต์เช่น ทองเหลืองหรือเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อหลีกเลี่ยงพฤติกรรมแทรกซึมหรือการเกาะตัวของวัสดุและเนื้อกราไฟต์
3. ในขณะที่ทำการทดลองอัดรีดขึ้นรูปควรสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันน้ำโลหะและความร้อนทุกครั้งปฏิบัติงาน ได้แก่ การสวมใส่ถุงมือกันความร้อน หน้ากากป้องกันน้ำโลหะและความร้อน เป็นต้น
4. สิ่งสำคัญในการควบคุมการทดลองให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำคือควรตรวจสอบเครื่องมือทุกชิ้นก่อนทำการทดลองว่ามีสภาพปกติและพร้อมใช้งานหรือไม่อย่างไร
5. การหลอมอะลูมิเนียมผสมควรหลีกเลี่ยงการหลอมที่ระดับอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวมากจนเกินไป และไม่ควมน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวภายในเบ้าหลอม พร้อมทั้งหลีกเลี่ยงการปล่อยแช่น้ำโลหะที่ระดับอุณหภูมิดังกล่าวเป็นระยะเวลายาวนานเกินความจำเป็น
6. เมื่อสิ้นสุดการทดลองในแต่ละครั้งควรตรวจสอบความเรียบร้อยของอุปกรณ์ทุกชิ้นให้อยู่ในสภาวะปิด (Off) ทั้งหมดและทำความสะอาดเศษวัสดุต่างๆ ที่หลงเหลือภายในเบ้าหลอมรวมถึงเก็บกวาดเศษวัสดุบริเวณที่มีการทดลอง

บรรณานุกรม

- Bayoumi, M.A., Negm MI., and EL-GOHRy, A.M. 2009. Microstructure and mechanical properties of extruded Al-Si alloy (A356) in the semi-solid state. *Journal of Materials and Design*: 4469-4477.
- Fan, Z., Fang, X., and Ji, S. 2005. Microstructure and mechanical properties of rheo-diecast (RDC) aluminium alloys. *Materials Science and Engineering A* 412: 298-306.
- Flemings, M.C., and Johnson, W.L. 2002. High Viscosity Liquid and Semi-Solid Metal Casting: Processes and Products, plenary lecture, *World Foundry Conference*, KynogJu, Korea, Oct. 20-24.
- Hatch J.E. 1984. Aluminum Properties and Physical Metallurgy, *American Society for Metals(ASM)*, Metal Park, Ohio, pp. 363.
- Hong, CP., and Kim, JM. 2006. *Solid State Phenomena* Vols. 116-117: 44.
- Ivanchev, L., Wilkins, D., and Govender, G. 2004. Method and Apparatus for Rheo-Processing of Semi-Solid Metal Alloys. *Proceeding of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Limassol, Cyprus, September 21-23.
- Jang D.I., Yoon, Yo., Kim S.K. 2008. Thixoextrusion for 7075 Al Wrought Alloy Tube [c]/HIRT G, RASSILI A. BÜrig-Polaczek. *Proc of the 10th Int Conf on Semi-solid Processing of Alloys and Composites*. Belguim, Germany, pp. 267-270
- Ji, S., Fan, Z., and Bevis, M.J. 2001. Semi-solid processing of engineering alloys by a twin-screw rheomoulding process. *Materials Science and Engineering A*: 210-217.
- Jian, X., Xu, X., Meek, TT., and Han Q. 2005. *Materials Letters* 59: 190.
- Jorstad, J., Thieman, M., and Kamm, R. 2004. Fundamental Requirements for Slurry Generation in the Sub Liquidus Casting Process and the Economics of SLCTM Processing. *Proceeding of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Limassol, Cyprus, September 21-23.
- Kaiser Aluminum & Chemical Sale. 1997. Inc. Aluminum Extrusion Process. 2th ed.
- Kalpakjian, S., and Schmid, S.R. 2008. Manufacturing Processes for Engineering Materials,

Prentise Hall, pp. 307-319

- Kaneuchi, T., Shibata, R., and Ozawa, M. 2002. *Proceedings of the 7th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Tsukuba, Japan, September 2002.
- Knauf, F., Baadjou, R., and Hirt, G. 2008. *Solid State Phenomena* Vols. 141-143, pp 61-66.
- Laue, K., and Strenger, 1981. H., *Extrusion : Processes, Machinery, Tooling*. Translated by Castle, A.F. and Lang, Gernot. Metals Park, Ohio : *American Society for Metals*.
- Lee, B.S., Joo D.H., Kim M.H. 2005. Extrusion Behavior of Al-Cu alloys in the semi-solid state, *Journal of Materials Science and Engineering*. A402: 170-176
- Li, D.N., Luo, J.R., Wu, S.S., Xiao, Z.H., Mao, Y.W., Song, X.J., and Wu, G.Z. 2002. Study on the semi-solid rheocasting of magnesium alloy by mechanical stirring. *Journal of Materials Processing Technology* Vols. 129: 431-434.
- Martinez, R.A. 2004. Formation and Processing of Rheocast Microstructure. Ph.D. Thesis, Professor M.C. Flemings advisor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- Martinez, R.A., Karma, A., and Flemings, M.C. 2006. Spheroidal Particle Stability in Semi-Solid Processing. *Metallurgical and Materials Transactions A* Vol. 37A (September): 2807-2815.
- Mehrabian, R., and Flemings, M.C. 1972. *Transaction of AFS*, 80: 173.
- Moradi, M., NILI-AHMADABADI M., Heiradian, Ashouri, S. 2008. Investigation of Thin Wall Casting Made of Semi-Solid A356 Using Back Extrusion and Die Cas[J], *Solid State Phenomena*, Vols. 141-143: 67-72
- Pearson, C., and Parkins, R. 1960. *The extrusion of metal*, Chapman & Hall LTD, London, pp. 223-270
- Sheppard, T. 1999. *Extrusion of Aluminium Alloys*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.
- Spencer, D.B. 1971. Rheology of Liquid-Solid Mixtures of Lead Tin. Ph.D. Thesis, Professor M.C. Flemings advisor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, (June).
- Sumio, S., and Jun, Y. 2008. *Solid State Phenomena* Vols. 141-143 pp 79-83
- Wang K., Zhang P., Du Y., Zeng P., Li, H. 2008. Basic Study on Thixo-co-extrusion of Multi-

- layer Tube with Al/Mg Alloys, *Solid State Phenomena* Vols. 141-143: 73-78.
- Wannasin, J., Martinez, R.A., and Flemings, M.C. 2006. A Novel Technique to Produce Metal Slurries for Semi-Solid Metal Processing. *Solid State Phenomena* Vols. 116-117: 366-369.
- Wannasin, J. 2006. Semi-Solid Die Casting Technology. *Proceeding of the Third Thai Foundry Conference*, Bitec Bangna, Bangkok, Thailand, November 23.
- Wannasin, J., Schwam, D., and Wallace, J.F. 2007. Evaluation of methods for metal cleanliness assessment in die casting. *Journal of Materials Processing Technology* Vols. 191: 242-246.
- Wannasin, J., Janudom, S., Rattanochaikul T., Flemings M.C. 2008. Development of the Gas Induced Semi-Solid Metal Process for Aluminum Die Casting Application, *Solid State Phenomena*, Vols. 141-143: 97-102
- Xu, J., Zhang, S., Yang, B., Shi, S., and Fan, Z. 2008 Microstructure and Mechanical Properties of Rhe-Extruded AZ31Mg-Alloy, *Solid State Phenomena* Vols. 141-143: 713-718
- สุเทพ บุตรดี และคณะ, รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการ “การวิเคราะห์การอัดรีดอลูมิเนียม ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์”, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ตัวอย่างชิ้นงานจากการอัดรีดขึ้นรูป (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <http://www.alunet.net> (2008, September 30)
- กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <http://www.accufabsolutions.com.au> (2008, September 30)
- ภาพประกอบกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <http://www.azom.com> (2008, September 30)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

**ลักษณะเฉพาะของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ในงานหล่อแบบพิมพ์ถาวร (Permanent
Mold Casting)**

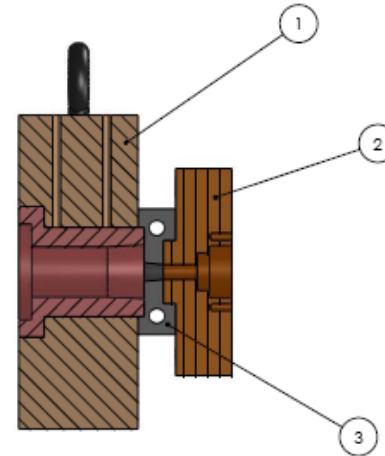
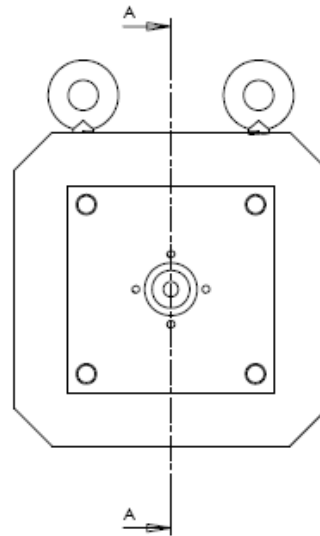
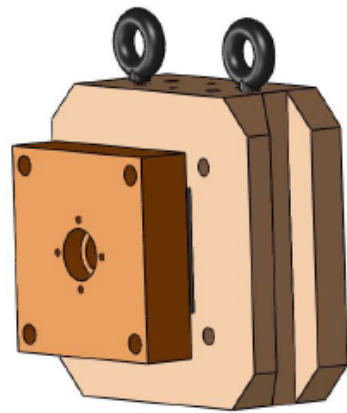
ตารางที่ ก.1 แสดงสมบัติต่าง ๆ ของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356-T6 ในงานหล่อแบบพิมพ์ถาวร

Description	Unit	Value
Physical Properties		
Density	g/cm ³	2.68
Mechanical Properties		
Hardness (500g load; 10 mm ball)	Brinell	65.0 - 95.0
Ultimate Tensile Strength	MPa	≥ 228
Tensile Yield Strength	MPa	≥ 152
Elongation at Break	%	≥ 3.00
Modulus of Elasticity	GPa	72.4
Compressive Yield Strength	MPa	185
Poisson Ratio	-	0.33
Fatigue Strength	MPa	90.0 (of Cycles 5.00e+8)
Thermal Properties		
Heat of Fusion	J/g	389
Specific Heat Capacity	J/g-°C	0.963
Thermal Conductivity	W/m-K	151
Melting Point Temperature	°C	557.2 – 612.8
Solidus Temperature	°C	557.2
Liquidus Temperature	°C	612.8
Processing Properties		
Melting Temperature	°C	667 – 816
Solution Temperature	°C	535 – 540.6
Aging Temperature	°C	152 – 157
Casting Temperature	°C	677 – 788

Description	Unit	Value
Components Properties		
Aluminum, Al	%	90.1 – 93.3
Copper, Cu	%	≤ 0.25
Iron, Fe	%	≤ 0.60
Magnesium, Mg	%	0.2 – 0.45
Manganese, Mn	%	≤ 0.35
Silicon, Si	%	6.5 – 7.5
Titanium, Ti	%	≤ 0.25
Zinc, Zn	%	≤ 0.35
Other, each	%	≤ 0.05
Other, total	%	≤ 0.15

(ที่มา: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatID=9934>)

ภาคผนวก ข.
แบบ Drawing แม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



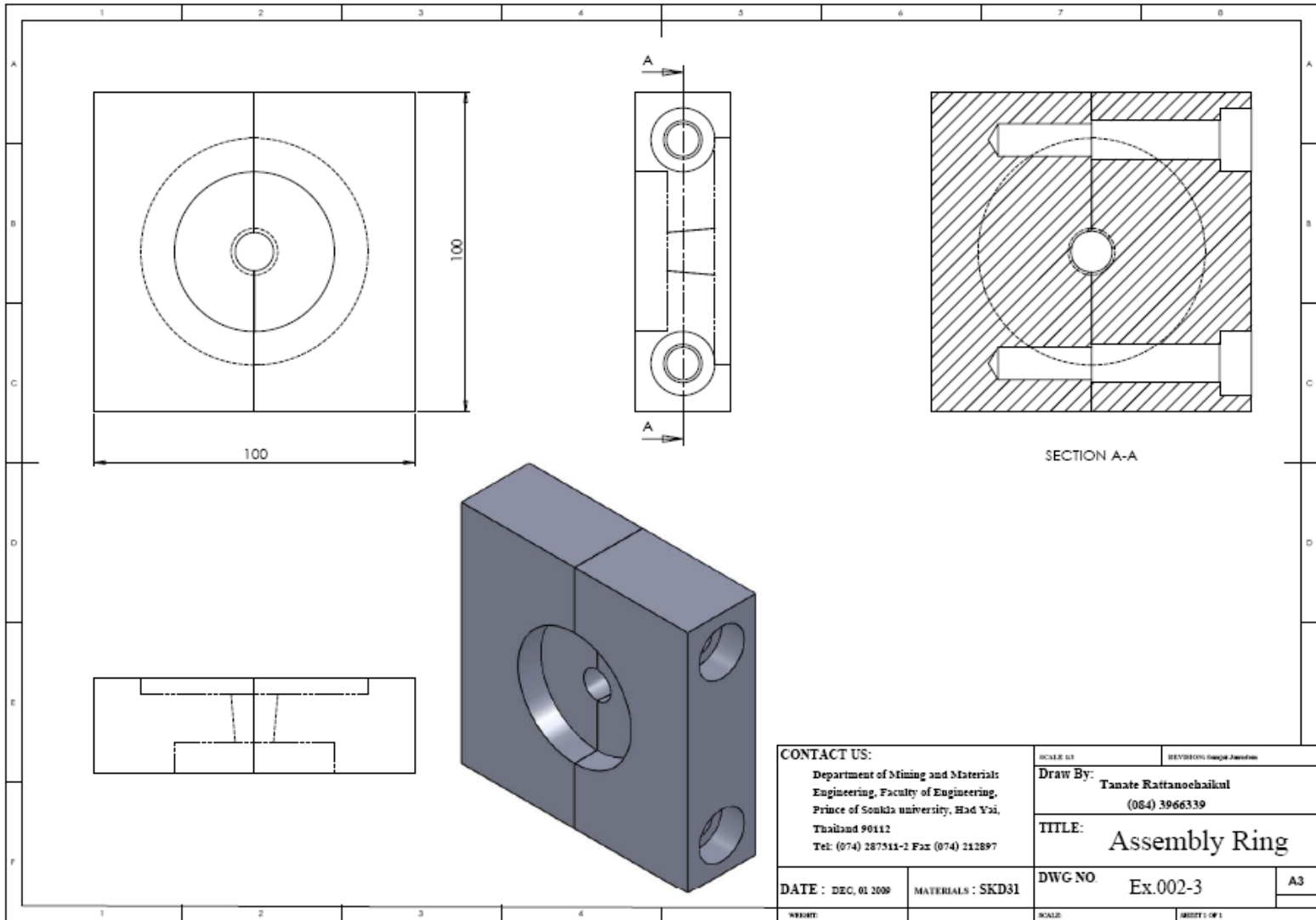
SECTION A-A
SCALE 1 : 3

No.	Name
1	Base
2	Die
3	Ring

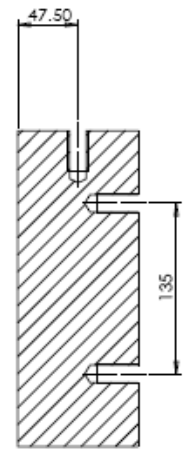
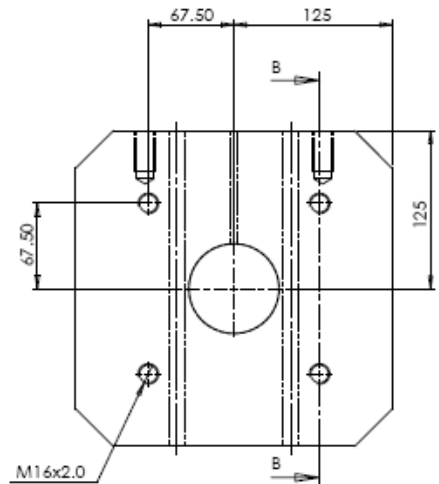
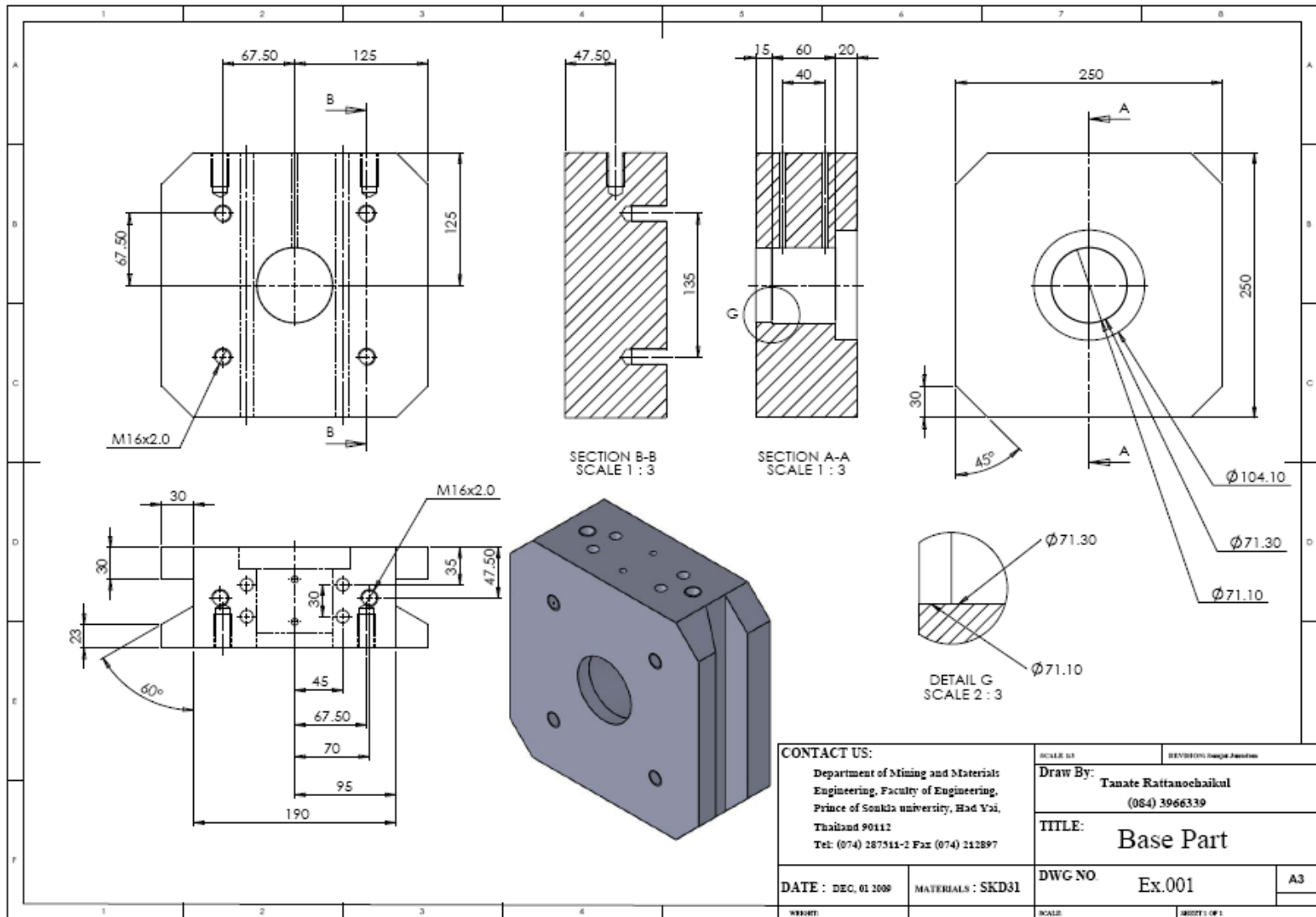
CONTACT US: Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Sutha university, Had Yai, Thailand 90112 Tel: (074) 287511-2 Fax (074) 212897		SCALE: 1:1	REVISIONS: Change Approved
DATE : DEC, 01 2009		MATERIALS : SKD31	DWG-NO Ex.001-4
			A3
NUMBER:		SCALE:	SHEET 1 OF 1

Draw By: **Tanate Rattanochaikul**
(084) 3966339

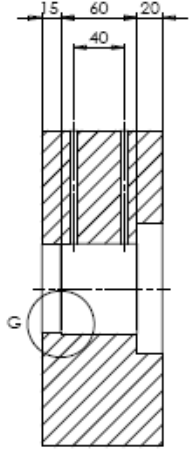
TITLE: **Assem All**



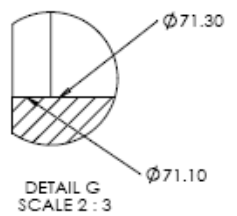
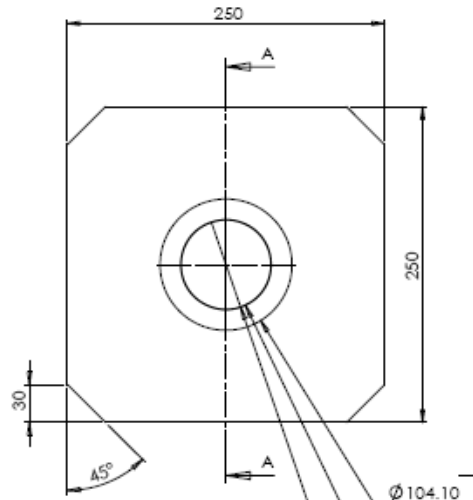
CONTACT US: Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla university, Had Yai, Thailand 90112 Tel: (074) 287511-2 Fax (074) 212897		SCALE: 1:1	REVISIONS: 01/01/2009
DATE: DEC. 01 2009		Draw By: Tanate Rattanochaikul (064) 3966339	TITLE: Assembly Ring
MATERIALS: SKD31	DWG NO: Ex.002-3	A3	
WORTH:	SCALE:	SHOTS: 1/1	



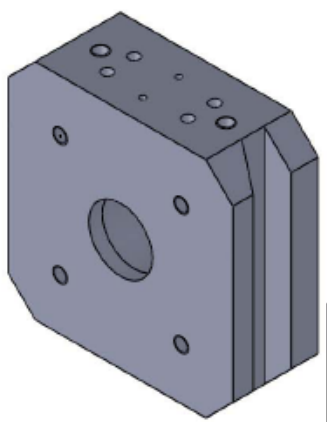
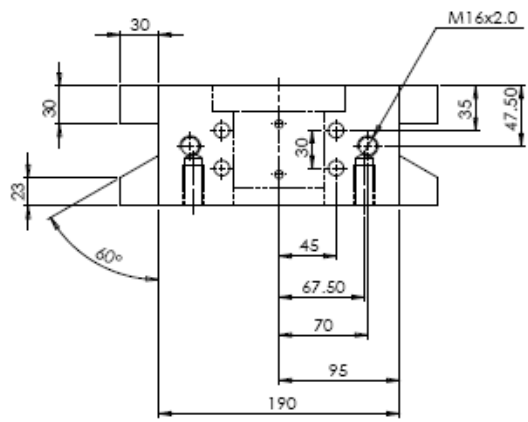
SECTION B-B
SCALE 1 : 3



SECTION A-A
SCALE 1 : 3



DETAIL G
SCALE 2 : 3

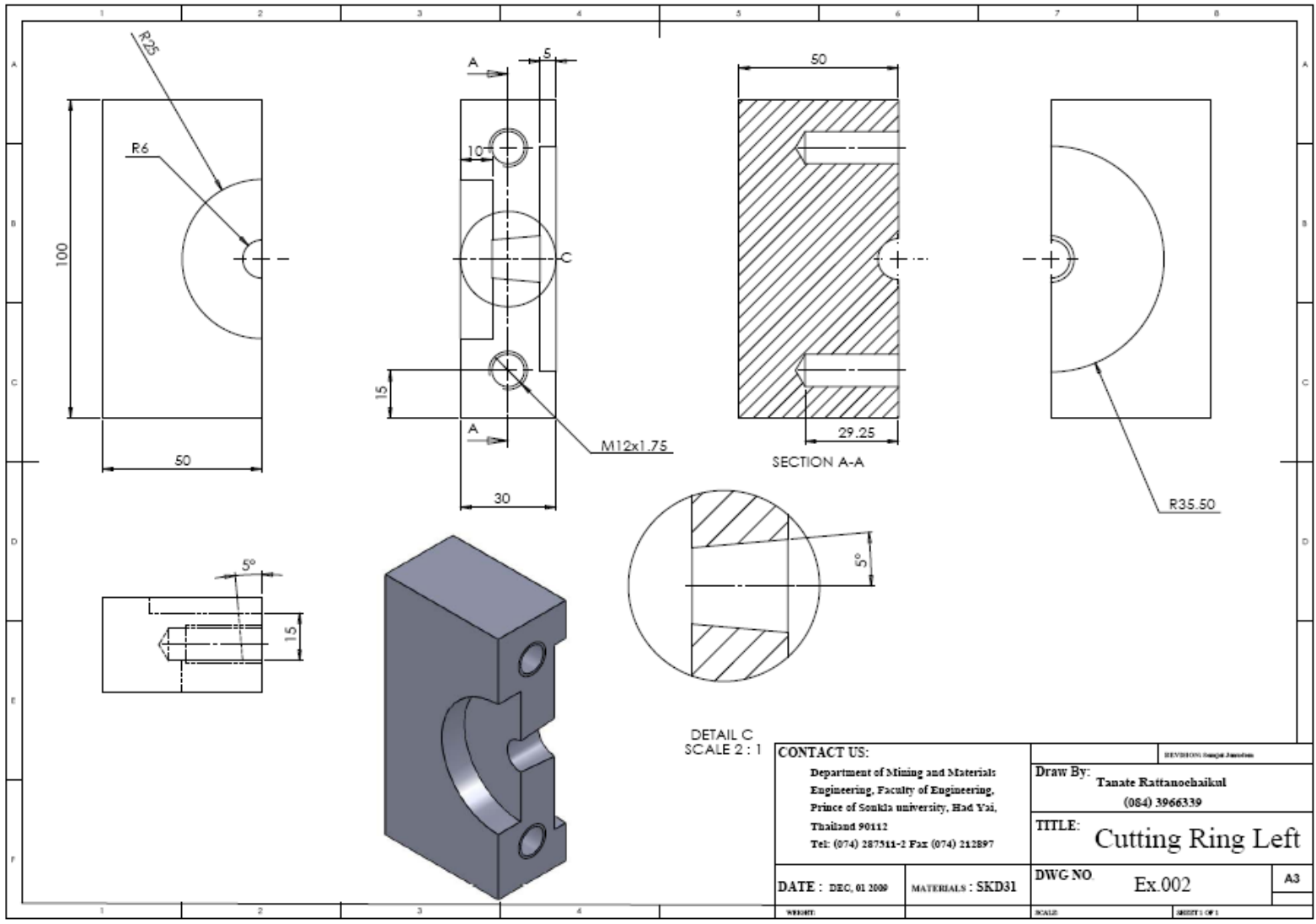


CONTACT US:
 Department of Mining and Materials
 Engineering, Faculty of Engineering,
 Prince of Songkla University, Had Yai,
 Thailand 90112
 Tel: (074) 287511-2 Fax (074) 212897

DATE : DEC. 01 2009 MATERIALS : SKD31

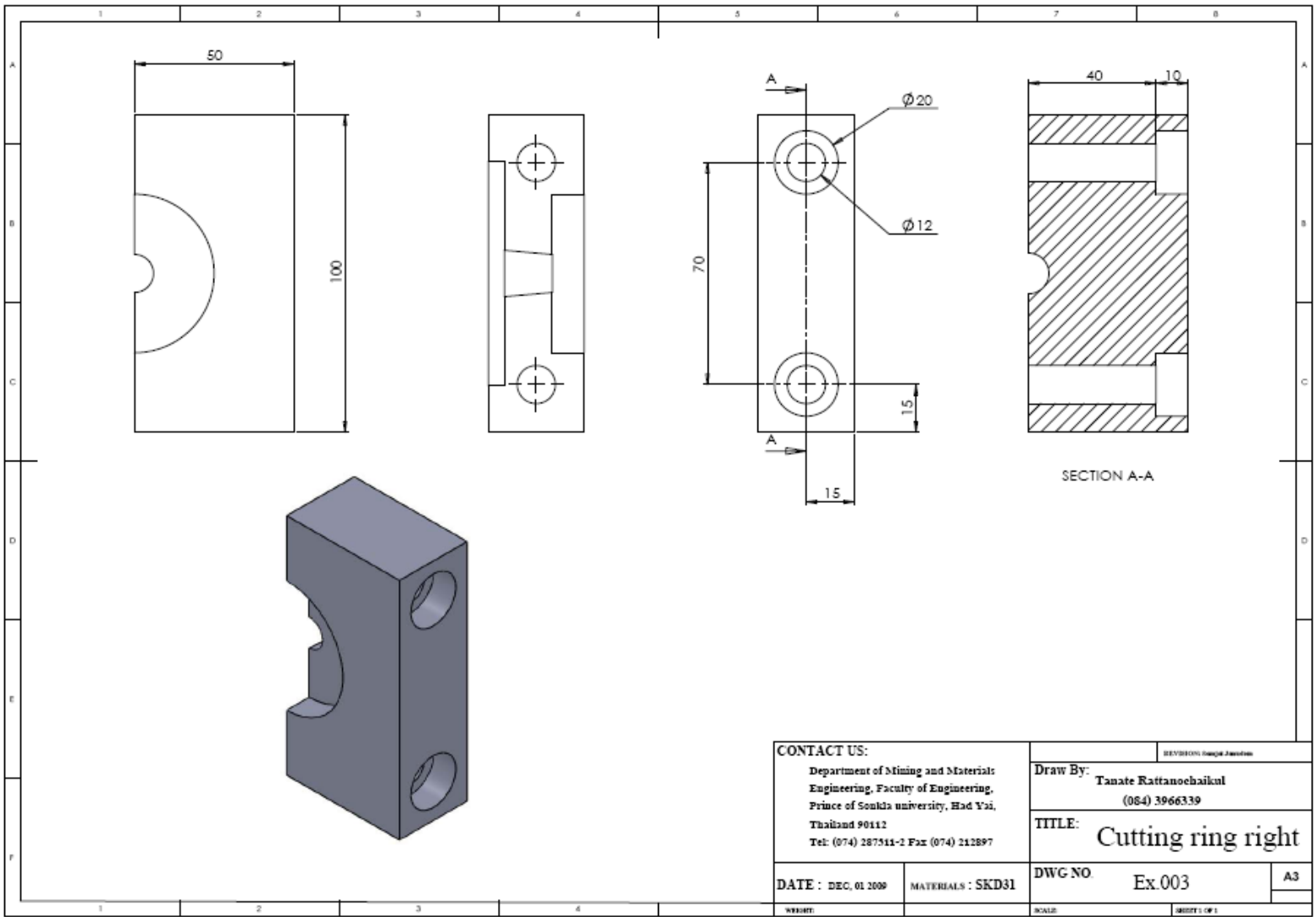
SCALE 1:1	REVISIONS
Draw By:	Tanate Rattanochaikul (084) 3966339
TITLE:	Base Part
DWG NO	Ex.001
SCALE	SHEET 1 OF 1

A3

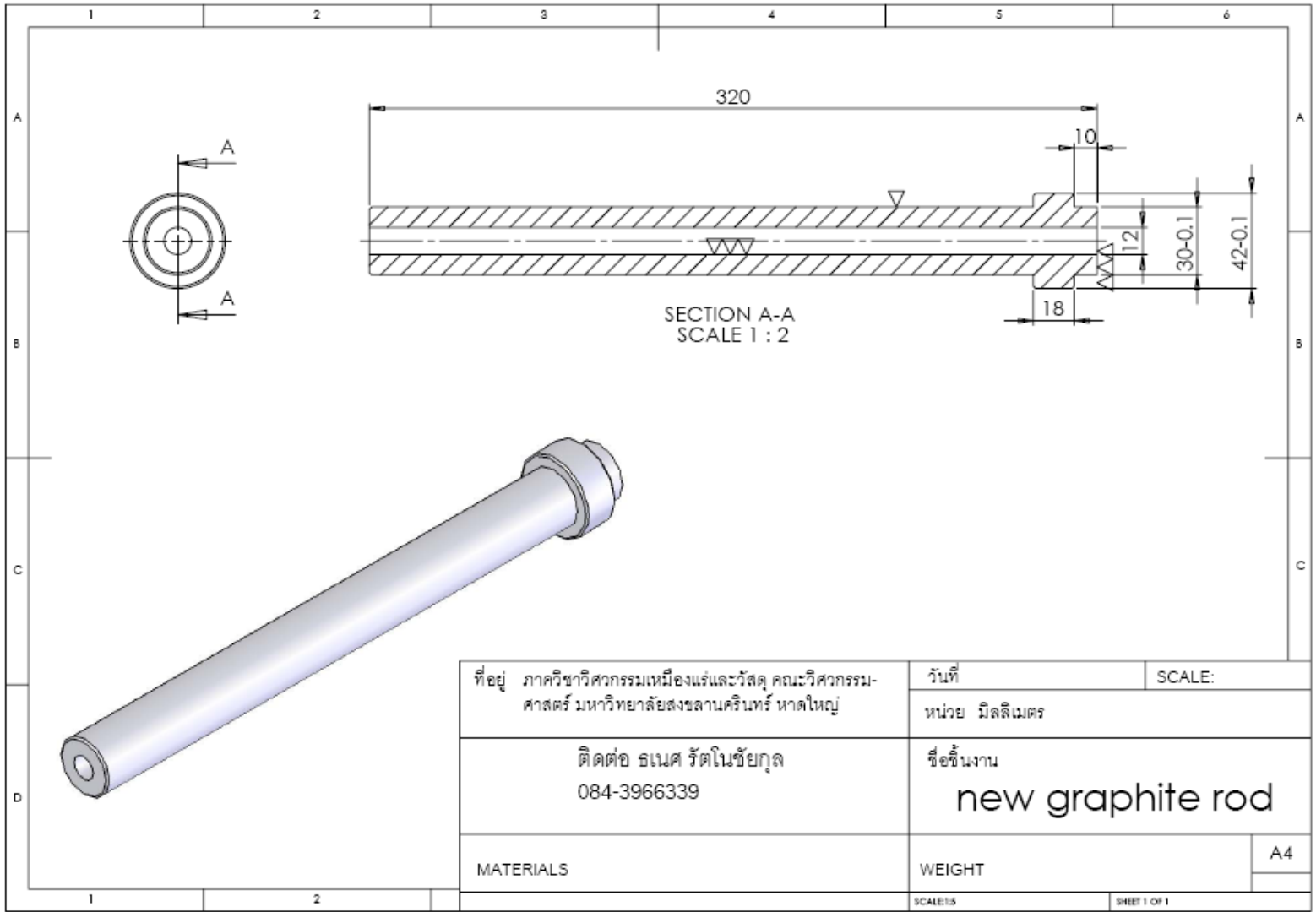


DETAIL C
SCALE 2 : 1

CONTACT US: Department of Mining and Material Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla university, Had Yai, Thailand 90112 Tel: (074) 287511-2 Fax (074) 212897		REVISED BY: <i>Ungchai Panthas</i>	
DATE : DEC, 01 2009		Draw By: Tanate Rattanochaikul (084) 3966339	
MATERIALS : SKD31		TITLE: Cutting Ring Left	
SCALE:	DWG NO: Ex.002	A3	
WHEET:	SCALE:	SHEET 1 OF 1	



CONTACT US:		<small>REVISIONS</small>	
Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla university, Had Yoi, Thailand 90112 Tel: (074) 287511-2 Fax (074) 212897		Draw By: Tanate Rattanochaikul (084) 3966339	
		TITLE: Cutting ring right	
DATE : DEC, 01 2008	MATERIALS : SKD31	DWG NO Ex.003	A3
<small>WEIGHT</small>		<small>SCALE</small>	<small>SHEET 1 OF 1</small>



ที่อยู่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องแม่และวัสดุ คณะวิศวกรรม-
ศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

ติดต่อ อเนศ รัตโนชัยกุล
084-3966339

MATERIALS

วันที่ SCALE:

หน่วย มิลลิเมตร

ชื่อชิ้นงาน
new graphite rod

WEIGHT A4

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายธนศ รัตโนชัยกุล		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5110120016		
วุฒิการศึกษา			
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา	
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับสอง (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551	

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนผู้ช่วยวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

T. Rattanochaikul, S. Junudom, N. Memongkol and J. Wannasin, J. 2009. Development of a semi-solid aluminum extrusion process. The 3rd Thailand Metallurgy Conference, Bangkok, Thailand, October 26-27.