



การผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง  
**Fabrication of Aluminum Matrix Composites by a Semi-Solid Infiltration Process**

บัวแสง กาญจนดิษฐ์  
**Buasang Kanjanadit**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

**2554**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง  
ผู้เขียน นางสาวบัวแสง กาญจนดิษฐ์  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

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

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ปลุกผล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

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

.....  
(ดร.กมลจิรา สุจิโรจน์)

.....กรรมการ  
(ดร.กมลจิรา สุจิโรจน์)

.....กรรมการ  
(ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร. อมรรัตน์ พงศ์คารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง  
ผู้เขียน นางสาวบัวแสง กาญจนดิษฐ์  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ  
ปีการศึกษา 2553

## บทคัดย่อ

โดยทั่วไปกระบวนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ส่วนใหญ่จะทำการขึ้นรูปในสถานะของเหลว ซึ่งมีข้อดีคือราคาถูกและกระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อนเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปในสถานะของแข็งและแก๊ส แต่เนื่องจากการขึ้นรูปในสถานะของเหลวมักมีข้อจำกัดที่ว่าสามารถใช้ขึ้นรูปได้กับอะลูมิเนียมในกลุ่มของอะลูมิเนียมกลุ่มหล่อเท่านั้น ไม่สามารถใช้กับอะลูมิเนียมในกลุ่มรีดได้ เนื่องจากการไหลไม่ดี เกิดการแตกร่อนและการแยกตัว ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้ได้มีการพัฒนาและปรับปรุงการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกลุ่มรีดโดยการประยุกต์ใช้กระบวนการหล่ออัดร่วมกับกระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งที่สัดส่วนของแข็ง 1 - 10% เพื่อลดปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับอะลูมิเนียมกลุ่มรีดทำให้สามารถขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้อหลักที่มาจากอะลูมิเนียมที่ผ่านการรีดหรือกลุ่มรีดได้ ซึ่งจะทำได้วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีสมบัติทางกลสูง โดยจะเรียกกระบวนการทั้งหมดนี้ว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปโดยวิธีการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Infiltration) หลักการของกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง คือ การเตรียมน้ำโลหะให้อยู่ในสถานะกึ่งของแข็งโดยการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะแข็งตัวซึ่งเรียกว่า Gas Induced Semi-Solid technique หรือ GISS และเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งจึงจำเป็นต้องศึกษาการผลิตวัสดุผสมด้วยส่วนเสริมแรงแบบต่าง ๆ เช่น วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและศึกษาสมบัติเชิงกล ซึ่งผลจากการทดลองพบว่ากระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกลุ่มรีดได้ โครงสร้างจุลภาคมีความสม่ำเสมอ จึงส่งผลให้วัสดุผสมมีสมบัติเชิงกลค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเนื้อหลัก ตัวอย่างเช่น การทดสอบความแข็งแรงต่อการดัดโค้งของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก 2 ชั้นหลังผ่านการปรับปรุงทางความร้อนเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม 7075 มีค่าเท่ากับ  $732 \pm 9.8$  และ  $618.4 \pm 20.3$  MPa ตามลำดับ และการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วก่อนการปรับปรุงทางความร้อนที่โหลด 3N เปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม 7075 มีอัตราการสึกหรอเท่ากับ  $2.302 \times 10^{-6}$

และ  $5.365 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$  ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่ากระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งสามารถ  
ประยุกต์ใช้ผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 1 - 10% ได้



**Thesis Title** Fabrication of Aluminum Matrix Composites by a Semi-Solid Infiltration Process  
**Author** Miss Buasang Kanjanadist  
**Major program** Materials Engineering  
**Academic Year** 2010

### **Abstract**

Generally, Aluminum Metal Matrix Composites (Al MMC) are mainly formed in the liquid because of the advantages of low cost and simple process when compared with forming in the solid state or gas states. However, forming of Al MMC in the liquid state often has restrictions that cannot be used with wrought aluminum alloys; because wrought aluminum alloys have poor fluidity, tendency for hot tearing, and segregation. Therefore, this thesis has developed a new process for forming wrought Al MMC by applying a squeeze casting process with the semi solid casting at 1 - 10% solid fraction. The new process allows production of wrought Al MMC which has high mechanical properties. The new process is called Semi-Solid Infiltration. In this process, a molten metal is converted into semi-solid slurry by the injection of fine gas bubbles. The Semi-Solid rheocasting technique is called Gas Induced Semi-Solid technique (GISS). This thesis investigated the feasibility of applying the semi-solid infiltration process in the production of composites with different types of reinforcements: Al MMC reinforced with carbon fiber and Al MMC reinforced the fiberfrax. The study of microstructure and mechanical properties of the composites was also conducted. The results show that Semi-Solid Infiltration can be applied to produce wrought Al MMC. The microstructure of the composite is uniform. As a result, the composite mechanical properties are quite high when compared with the matrix. For example, results from the flexural strength testing of Al MMC reinforced with 2 layers of carbon fiber after heat treatment compared with Al 7075 are  $732 \pm 9.8$  and  $618.4 \pm 20.3$  MPa, respectively. Results from wear testing of Al MMC reinforced with fiberfrax before heat treatment at the load of 3N compared with Al 7075 show that the wear rates are  $2.302 \times 10^{-6}$  and  $5.365 \times 10^{-3}$  mm<sup>3</sup>/m, respectively. In conclusion, the Semi-Solid Infiltration process can be used to produce Al MMC with improved properties at the solid fraction of 1 - 10%.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณ ทุนวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (MT-B-52-MET-18-202-G) ทุนศิษย์ก้นกุฎิของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ เกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย และการไปเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้มอบโอกาสในการทำงานวิจัยและให้คำแนะนำข้าพเจ้าในทุก ๆ เรื่องเกี่ยวกับงานวิจัย ทำให้ข้าพเจ้าได้เพิ่มพูนความรู้และมีประโยชน์มากในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ ดร.กมลจิรา สุจิโรจน์ ที่ให้คำแนะนำและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าในการทำวิจัยด้วยดีตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธวัชชัย ปลุกผล และดร.บุญรัตน์ โล่วงศ์วิวัฒน์ ที่เสียสละเวลาเพื่อมาฟังการนำเสนองานวิจัยและให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อมูลต่าง ๆ

ขอขอบคุณ คุณธนศ รัตโนชัยกุล คุณสมใจ จันทร์อุดม คุณเชียรศักดิ์ ชูชีพ คุณสงบ ธนะบำรุงกุล คุณตฤณเมษ สังคพันธ์ คุณสุคันธการ และคุณกรรณิการ์ ที่เสียสละเวลามาช่วยในงานขึ้นรูปเพื่อผลิตชิ้นงานในการทดสอบและให้คำแนะนำในด้านวิชาการ การดำเนินชีวิตด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และบุคลากรทุกท่านที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ งบประมาณและคำแนะนำต่าง ๆ จากบุคลากรทุกท่านซึ่งทำให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่น

นอกจากนี้วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะไม่สำเร็จไปไม่ได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากทีมงาน Innovative Metal Technology (IMT) ทุกคน รวมถึงพี่ ๆ น้อง ๆ นักศึกษาปริญญาตรี-โท-เอก ทุกคน ซึ่งให้ความช่วยเหลืออย่างเต็มที่ในงานวิจัยครั้งนี้

และสุดท้าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่และครอบครัวกาญจนดิษฐ์ทุกคนที่คอยดูแลเอาใจใส่ตั้งแต่เล็กจนโตและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

บัวแสง กาญจนดิษฐ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(6)
สารบัญ	(7)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(18)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 ทฤษฎี สมมุติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	2
1.2.1 วัสดุผสม	2
1.2.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม	6
1.2.3 หลักการเกิดการแทรกซึม	8
1.2.4 กระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง	10
1.2.5 กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นพองแก่สภาวะแข็งตัว	12
1.2.6 การใช้งานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรง	13
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	20
1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย	20
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	20
1.7 สถานที่ทำวิจัย	21
2. วิธีการวิจัย	22
2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	22
2.1.1 วัสดุเนื้อหลัก	22
2.1.2 ส่วนเสริมแรง	23
2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1 เตาหลอมไฟฟ้า	23
2.2.2 เป้ากราไฟต์	24
2.2.3 เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยฟองแก๊สขณะแข็งตัว	24
2.2.4 เครื่องอัดไฮโดรลิกแวนอนขนาด 20 ตันระดับห้องปฏิบัติการ พร้อมแม่พิมพ์ขนาด 10 x 10 เซนติเมตร	25
2.3 ขั้นตอนการวิจัย	25
2.3.1 การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นเนื้อหลัก	25
2.3.2 การวิเคราะห์ทางความร้อนของโลหะที่ใช้ในงานวิจัย	27
2.3.3 การเตรียมโลหะกึ่งของแข็ง	28
2.3.4 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งของโลหะกึ่งของแข็ง ที่เตรียมได้จากกระบวนการ GISS	28
2.3.5 การออกแบบแม่พิมพ์และสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิ	29
2.3.6 การผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยกระบวนการแทรกซึม แบบกึ่งของแข็ง	30
2.3.7 ขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน	33
2.3.8 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	34
2.3.9 การวิเคราะห์ธาตุประกอบของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้วโดยใช้กล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	36
2.3.10 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้ว	36
3. ผลและการอภิปรายผล	39
3.1 การเลือกวัสดุเนื้อหลัก	39
3.2 การวิเคราะห์ทางความร้อนของโลหะที่ใช้ในงานวิจัย	41
3.3 การคำนวณค่าความดันเริ่มต้นของน้ำโลหะ	42
3.4 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งของที่เตรียมได้จากกระบวนการ GISS	44

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของกระบวนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบบถักโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	46
3.5.1 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก	46
3.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก	48
3.6 การศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งด้วยเครื่องไฮดรอลิก	54
3.6.1 การออกแบบแม่พิมพ์ ระบบฮีตเตอร์ควบคุมความร้อนของแม่พิมพ์ และระบบปลดชิ้นงาน	54
3.6.2 การแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	54
3.6.3 การวิเคราะห์ผลจากการแทรกซึมของน้ำโลหะในสถานะกึ่งของแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075	56
3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	59
3.7.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรง	60
3.7.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก	60
3.7.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว	62
3.7.5 โครงสร้างจุลภาคหลังปรับปรุงความร้อน	63
3.8 ผลการวิเคราะห์เฟสของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	64

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8.1 ผลการวิเคราะห์เฟสของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก	65
3.8.2 ผลการวิเคราะห์เฟสของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว	66
3.9 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม	68
3.9.1 วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก	69
3.9.2 วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว	72
4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	79
4.1 บทสรุป	79
4.1.1 การผลิตวัสดุผสมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	79
4.1.2 การผลิตวัสดุผสมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	80
4.1.3 การผลิตวัสดุผสมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	80
4.1.4 สรุปกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	80
4.2 ข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม	81
ภาคผนวก	84
ประวัติผู้เขียน	99

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณ ทุนวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (MT-B-52-MET-18-202-G) ทุนศิษย์กักกันกฏของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ เกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย และการไปเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้มอบโอกาสในการทำงานวิจัยและให้คำแนะนำข้าพเจ้าในทุก ๆ เรื่องเกี่ยวกับงานวิจัย ทำให้ข้าพเจ้าได้เพิ่มพูนความรู้และมีประโยชน์มากในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ ดร.กมลจิรา สุจิโรจน์ ที่ให้คำแนะนำและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าในการทำวิจัยด้วยดีตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธวัชชัย ปลุกผล และดร.บุญรัตน์ โล่วงศ์วิวัฒน์ ที่เสียสละเวลาเพื่อมาฟังการนำเสนองานวิจัยและให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อมูลต่าง ๆ

ขอขอบคุณ คุณธนศ รัตโนชัยกุล คุณสมใจ จันทร์อุดม คุณเชียรศักดิ์ ชูชีพ คุณสงบ ธนะบำรุงกุล คุณตฤณเมษ สังคพันธ์ คุณสุคันธการ และคุณกรรณิการ์ ที่เสียสละเวลามาช่วยในงานขึ้นรูปเพื่อผลิตชิ้นงานในการทดสอบและให้คำแนะนำในด้านวิชาการ การดำเนินชีวิตด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และบุคลากรทุกท่านที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ งบประมาณและคำแนะนำต่าง ๆ จากบุคลากรทุกท่านซึ่งทำให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่น

นอกจากนี้วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะไม่สำเร็จไปไม่ได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากทีมงาน Innovative Metal Technology (IMT) ทุกคน รวมถึงพี่ ๆ น้อง ๆ นักศึกษาปริญญาตรี-โท-เอก ทุกคน ซึ่งให้ความช่วยเหลืออย่างเต็มที่ในงานวิจัยครั้งนี้

และสุดท้าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่และครอบครัวกาญจนดิษฐ์ทุกคนที่คอยดูแลเอาใจใส่ตั้งแต่เล็กจนโตและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

บัวแสง กาญจนดิษฐ์

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเส้นใยคาร์บอนกับเหล็กกล้า	4
1.2	ส่วนประกอบทางเคมีของฉนวนใยแก้ว	5
1.3	สมบัติต่าง ๆ ของฉนวนใยแก้ว	5
1.4	แสดงมุมสัมผัสที่ส่งผลต่อสมบัติการเปียก	10
1.5	การใช้งานในด้านต่าง ๆ ของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม	13
1.6	สมบัติทางกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม 6061 เสริมแรงด้วยซลิกอนคาร์ไบด์ 30% เปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม 6061 ไม่เสริมแรง	15
1.7	อุณหภูมิอ่อนของการเตรียมพรีฟอร์มและแม่พิมพ์	15
1.8	ผลของสมบัติทางกลของการเติมธาตุเจือในเนื้อโลหะเสริมแรงด้วยอนุภาคของซลิกอนคาร์ไบด์	17
1.9	ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ผลิตวัสดุผสมที่ทำการศึกษางานวิจัยเบื้องต้น	20
2.1	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในงานวิจัย	22
2.2	รายละเอียดของกระบวนการทางความร้อน	27
2.3	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก	31
2.4	ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้ว	33
3.1	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอะลูมิเนียมผสมกลุ่มรีดเกรด 2024 5052 6061 และ 7075 ตามลำดับ	41
3.2	ค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	43
3.3	สรุปตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งเบื้องต้น	47
3.4	ผลจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และค่าความแข็งแรงต่อการคดโค้งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก	50
3.5	สรุปตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักเบื้องต้น	53



## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
3.6	55
สรูปตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว	
3.7	59
สรูปผลจากการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว	
3.8	70
ผลการทดสอบความแข็งและความแข็งแรงต่อการดัดโค้งของวัสดุผสมที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งที่เงื่อนไขต่างกันก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	
3.9	73
ผลการทดสอบความแข็งของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรงก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	
3.10	74
สภาวะเงื่อนไขในการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ	
3.11	75
ผลการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุผสมเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 7075 ก่อนและหลังการปรับปรุงทางความร้อนที่โหลด 3 5 และ 7N ตามลำดับ	

## รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	(ก) ดิสก์เบรก (Disc Brake) (ข) ก้ามปูเบรก (Brake Caliper) และ (ค) ก้านสูบ (Connecting Rods) ที่ผลิตด้วยวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมแทนเหล็กหล่อ	1
1.2	เส้นใยคาร์บอนแบบถัก	4
1.3	ฉนวนใยแก้ว	6
1.4	กระบวนการแทรกซึมด้วยตัวเอง	7
1.5	กระบวนการแทรกซึมโดยใช้แก๊ส	7
1.6	กระบวนการหล่ออัด	8
1.7	แสดงสมบัติการเปื่อยที่มุมต่างกันระหว่างของแข็งและของเหลว	10
1.8	แสดงพลังงานพื้นผิวและมุมสัมผัสของวัสดุทั้ง 3 สถานะ	10
1.9	แผนภาพสมดุลแสดงช่วงโลหะที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว	11
1.10	ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างและการไหลระหว่างการหล่อด้วยน้ำโลหะกับโลหะกึ่งของแข็ง	11
1.11	การทำงานของกระบวนการ GISS	12
1.12	โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ผลิตได้จากกระบวนการ GISS	12
1.13	เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการหล่ออัด (S.M. Seyed Reihani et al., 2005)	14
1.14	ความแข็งแรงดัดและการยืดหยุ่นของวัสดุผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอะลูมินา (ก) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ข) ค่าอีลาสติคโมดูลัส (Shuangjie Chu et al., 1999)	16
1.15	ผลของอนุภาคนาโนของซิลิกอนคาร์ไบด์ ต่อความแข็งแรงดึงของวัสดุผสม (X.N. Zhang et al., 2006)	16
1.16	โครงสร้างแสดง (ก) ไม่มีการเกิดเฟสของอินเตอร์เมทัลลิกและเซกรีเกรชันในระบบ (ข) บริเวณอินเตอร์เฟสของ $AlCu_3$ ที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment, T6) (ค) บริเวณอินเตอร์เฟสของ $AlCu_3$ ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Olivier Beffort et al., 2007)	18
1.17	ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่ออัด (Squeeze) (T. Shalu et al., 2009)	18
1.18	การทดสอบสมบัติทางกล (T. Shalu et al., 2009)	19
2.1	อินกอทอะลูมิเนียม 7075 ที่ใช้ในงานวิจัย	22

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.2	ส่วนเสริมแรงที่ใช้ในงานวิจัย (ก) ฉนวนใยแก้ว และ (ข) เส้นใยคาร์บอนแบบถัก	23
2.3	เตาหลอมไฟฟ้าชนิดลวดความต้านทานที่ใช้ในการทดลอง	23
2.4	ตัวอย่างเบ้ากราไฟต์ ที่ใช้ในการทดลอง	24
2.5	เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว	24
2.6	เครื่องผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	25
2.7	อินกอตอะลูมิเนียมเกรด 2024 5052 6061 และ 7075 ที่ใช้ในงานวิจัย	26
2.8	กระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็ง	26
2.9	ชิ้นงานหลังขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็ง	27
2.10	กระบวนการ Gas Induced Semi-Solid หรือ GISS	28
2.11	แม่พิมพ์ทองแดง	29
2.12	ขั้นตอนการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็ง (ก) การสร้าง Threshold ด้วยโปรแกรม Photoshop (ข) การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Image Tools	29
2.13	กระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง หรือ Semi-Solid Infiltration Process	30
2.14	ตัวอย่างขั้นตอนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งเบื้องต้น	32
2.15	ตัวอย่างขั้นตอนในการผลิตวัสดุผสมโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	33
2.16	บริเวณที่ตัดชิ้นงานมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	34
2.17	ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแบบร้อน	35
2.18	เครื่องขัดละเอียดและขัดหยาบที่ใช้ในงานวิจัย	35
2.19	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและระบบคอมพิวเตอร์	36
2.20	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 5800	36
2.21	ลักษณะชิ้นงานทดสอบ (ก) ชิ้นงานทดสอบการตัด (ข) ชิ้นงานทดสอบความแข็ง	37
2.22	เครื่องมือทดสอบ (ก) เครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell Scale B (ข) เครื่องทดสอบการตัดแบบ 3 จุด	37
2.23	ลักษณะชิ้นงานทดสอบ (ก) ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ (ข) เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอไทรบอมิเตอร์	38

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.1	ลักษณะแบบชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM B557M	40
3.2	กราฟแสดงผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของ อะลูมิเนียมผสมกลุ่มรีด ได้แก่ 2024 5052 6061 และ 7075	40
3.3	กราฟแสดงเส้นการเย็นตัว (Cooling curve) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 เมื่อไม่ผ่านกระบวนการ GISS ที่นำมาใช้ในกระบวนการวิจัย	42
3.4	โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการทำ Threshold ด้วยโปรแกรม Photoshop และวิเคราะห์หา ค่า $V_p$ ด้วยโปรแกรม Image Tools	43
3.5	ชิ้นงานจากแม่พิมพ์ทองแดงและบริเวณตรงกลางเพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	44
3.6	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ได้ก่อนและหลังทำ Threshold ด้วย โปรแกรม Photoshop และวิเคราะห์หาปริมาณสัดส่วนของแข็งด้วยโปรแกรม Image Tool	45
3.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปล่อยฟองแก๊สและปริมาณสัดส่วนของแข็ง ที่เกิดขึ้นของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในงานวิจัย	46
3.8	กระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งเบื้องต้น	47
3.9	ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	48
3.10	แสดงบริเวณที่นำมาตัดดู โครงสร้างจุลภาค	48
3.11	แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมที่ปริมาณส่วนเสริมแรงแตกต่างกันเท่ากับ 2 4 8 12 และ 16 แผ่น ตามลำดับ	49
3.12	ลักษณะการแยกชั้นของวัสดุผสมหลังผ่านการทดสอบสมบัติเชิงกล	51
3.13	ผลจากการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และความแข็งแรงต่อการตัด โค้งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เบื้องต้น	52
3.14	ชุดอุปกรณ์สำหรับใช้ผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม	54
3.15	ตัวอย่างขั้นตอนในการผลิตวัสดุผสมด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	56
3.16	ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	56
3.17	ภาพตัดขวางของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก ที่ปริมาณส่วนเสริมแรงต่างกัน	57

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 ภาพตัดขวางของวัสดุผสมระดับมหภาค (ก) AI 7075/ CF 2P (ข) AI 7075/ CF 4P และ (ค) AI 7075/ CF 6P	57
3.19 ภาพผิวหน้าของวัสดุผสมระดับมหภาค (ก) AI 7075/ CF 2P (ข) AI 7075/ CF 4P และ (ค) AI 7075/ CF 6P	58
3.20 ภาพตัดขวางของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว	58
3.21 แสดงบริเวณที่ตัดชิ้นงานมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	60
3.22 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 (ก) ลักษณะของเฟสแอลฟาอะลูมิเนียม (ข) ลักษณะของโครงสร้างยูเทคติกบริเวณขอบเกรน (Xigang Fan, 2005)	60
3.23 ลักษณะของโครงสร้างวัสดุเนื้อหลักและเส้นใยคาร์บอนแบบถักในวัสดุผสม	61
3.24 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนที่ปริมาณส่วนเสริมแรงต่างกัน	62
3.25 ลักษณะของโครงสร้างเนื้อหลักและฉนวนใยแก้วในวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม	63
3.26 ลักษณะของเฟสยูเทคติก (ก) ก่อนและ (ข) หลังผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	64
3.27 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาค (ก) อะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและ (ข) อะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยใยแก้วหลังผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	64
3.28 ภาพถ่าย SEM แสดงโครงสร้างจุลภาค (ก) อะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและ(ข) อะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยใยแก้วหลังผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	64
3.29 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก	65
3.30 การทำ line scan ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก	66
3.31 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว	67

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.32	การทำ line scan ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว	67
3.33	ลักษณะชิ้นงานทดสอบ (ก) ทดสอบความแข็ง (ข) ทดสอบการกัด	69
3.34	เครื่องมือทดสอบ (ก) ความแข็ง Rockwell สเกล B และ (ข) คัดแบบ 3 จุด	69
3.35	กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการกัดของชิ้นงานวัสดุผสมโดยการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	71
3.36	ออกไซด์ฟิล์มภายในเนื้อชิ้นงาน	72
3.37	กราฟแสดงผลการทดสอบความแข็งของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรง	74
3.38	ชิ้นงานและเครื่องมือทดสอบการสึกหรอ (ก) ชิ้นงานทดสอบ (ข) เครื่องไตรบอมิเตอร์	74
3.39	กราฟเปรียบเทียบผลน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานวัสดุผสมเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 7075 จากการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน	76
3.40	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะของชิ้นงานภายหลังการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ	77

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

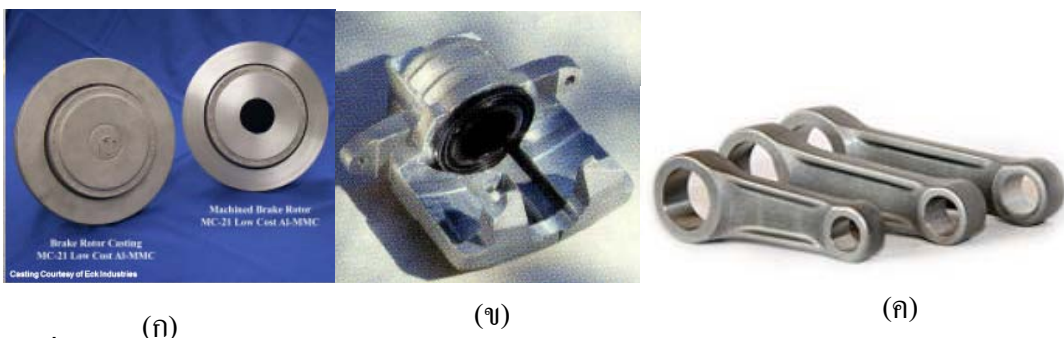
Al MMC	วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (Aluminium Metal Matrix Composites)
PMCs	วัสดุผสมเนื้อโพลิเมอร์ (Polymer Matrix Composites)
CMCs	วัสดุผสมเนื้อเซรามิก (Ceramic Matrix Composites)
MMCs	วัสดุผสมเนื้อโลหะ (Metal Matrix Composites)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	อะลูมินา (Alumina)
SiO <sub>2</sub>	ซิลิกอนออกไซด์
K <sub>2</sub> ZrF <sub>6</sub>	โปตัสเซียมเซอโคเนียมฟลูออไรด์
$P_{th}$	ค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกเข้าไประหว่างช่องว่างของแต่ละอนุภาคเซรามิกส์
$\lambda$	ค่าปัจจัยที่ถูกต้องสำหรับสภาพผิวหน้าและความคลาดเคลื่อนของทรงกลม
$V_p$	ค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูป
D <sub>p</sub>	ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเซรามิก
$\theta$	มุมระหว่างขอบของของเหลวกับของแข็ง
L	ความยาวการแทรกซึม
$P_0$	ความดันที่ใช้ในการหลอมของพรีฟอร์ม
$P_a$	ความดันบรรยากาศของการแทรกซึม
$\Delta P_f$	ความดันที่เกิดจากการแทรกซึมโลหะเข้าไปในพรีฟอร์ม
t	เวลา
GISS	Gas Induced Semi-Solid
SiC	ซิลิกอนคาร์ไบด์
AlCu <sub>3</sub>	อะลูมิเนียมทองแดง
Cu	ทองแดง
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
OES	Optical Emission Spectrometer
T6	การปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมมีความต้องการวัสดุผสมเนื้อโลหะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก อะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายอย่างเช่น น้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อน นำไฟฟ้าได้ดี และง่ายต่อการขึ้นรูป สามารถควบคุมการขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้ ด้านทานต่อการคืบ และด้านทานต่อการล้าหรือดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะทั่วไป จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานได้หลายประเภทในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เช่น ยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์และเครื่องจักรกลเพื่อการเกษตร การแพทย์ และที่เกี่ยวข้องกับงานด้านการป้องกันประเทศ เป็นต้น ตัวอย่างของชิ้นงานในอุตสาหกรรมยานยนต์มีการทำดิสก์เบรก ก้ามปูเบรก และก้านสูบแสดงดังรูปที่ 1.1 เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมแทนเหล็กหล่อซึ่งช่วยลดน้ำหนักของชิ้นงานและยืดอายุการใช้งานได้นานขึ้น



รูปที่ 1.1 (ก) ดิสก์เบรก (Disc Brake) (ข) ก้ามปูเบรก (Brake Caliper) และ (ค) ก้านสูบ (Connecting Rods) ที่ผลิตด้วยวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมแทนเหล็กหล่อ [1]

การขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้อโลหะทำได้หลายวิธีด้วยกันได้แก่การผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (Aluminum Metal Matrix Composite) แบ่งตามสถานะของตัววัสดุที่เป็นเนื้อหลักในการขึ้นรูปได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ (1) สถานะของแข็ง (2) สถานะของเหลว และ (3) สถานะแก๊ส กรรมวิธีที่ได้รับความนิยมใช้กันมากที่สุดและมีราคาถูกที่สุดในปัจจุบันก็คือวิธีการขึ้นรูปใน



สถานะของเหลว [2] แต่เนื่องจากการขึ้นรูปในสถานะของเหลวโดยทั่วไปนั้น มีข้อจำกัดที่สามารถใช้ขึ้นรูปได้กับอะลูมิเนียมในประเภทกลุ่มของอะลูมิเนียมหล่อเท่านั้นไม่สามารถใช้กับอะลูมิเนียมประเภทกลุ่มรีดได้ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการคิดค้นกระบวนการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ โดย ผศ.ดร.เจษฎา วรณสินธุ์ และคณะ มีชื่อเรียกว่า กระบวนการ GISS (Gas Induced Semi Solid) กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (Al MMC) ในสถานะของเหลวที่ใช้ในอุตสาหกรรมประกอบด้วย กระบวนการแทรกซึม (Infiltration) การหล่อกวน (Stir Casting) การพ่นพอกผิว (Spray Co-Deposition) และการขึ้นรูปแบบดั้งเดิม (In-Situ Fabrication) [3] แม้ว่ากระบวนการต่างๆจะมีการนำมาผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเพื่อให้ใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพและมีสมบัติเชิงกลที่ดีแต่ก็ยังมีข้อจำกัด เช่น ต้นทุนการผลิตสูง เครื่องจักรมีราคาแพง และบางกระบวนการไม่สามารถขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผ่านการรีดได้เนื่องจากการไหลไม่ดี เกิดการแตกร้อนและการแยกเฟส ส่งผลให้ต้องสั่งซื้อวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีราคาแพง จึงต้องมีการปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้ได้ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีคุณภาพ ซึ่งในงานวิจัยได้มีการพัฒนาและปรับปรุงการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมโดยการประยุกต์ใช้กระบวนการหล่ออัด (Squeeze casting) ร่วมกับกระบวนการโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting) ในการแก้ปัญหาเพื่อลดปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับอะลูมิเนียมกลุ่มรีดทำให้ได้วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีสมบัติทางกลสูงหรือเรียกกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Infiltration) ซึ่งเป็นการพัฒนาการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมขึ้นมาใหม่เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตและสามารถผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมให้มีสมบัติตามการใช้งานในอุตสาหกรรมเบื้องต้นได้

## 1.2 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การที่จะผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยกระบวนการหล่อโลหะแบบแทรกซึมในสถานะกึ่งของแข็ง ในงานวิจัยจึงต้องมีการศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎีและหลักการที่อาจจะมีผลต่อการทดลองวิจัยผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 1.2.1 วัสดุผสม (Composite)

วัสดุผสมหรือ Composite materials เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยการรวมวัสดุมากกว่า 2 ประเภทเข้าด้วยกัน จะมีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (matrix) และวัสดุเสริมแรง (reinforcement materials) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อหลักจะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักให้สูงขึ้นซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็น เส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (base

materials) ตัวอย่างเช่น โลหะ เซรามิก หรือโพลิเมอร์ ผลของการรวมวัสดุต่างกัน 2 ประเภทเข้าด้วยกัน ปัจจุบันวัสดุผสมแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. วัสดุผสมเนื้อโพลิเมอร์ (Polymer Matrix Composites, PMCs) วัสดุผสมเนื้อโพลิเมอร์ มีโพลิเมอร์ซึ่งอาจจะเป็นพลาสติก หรือยางเป็นเนื้อหลักและใช้วัสดุเสริมแรงได้หลายชนิด เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นลวดโลหะ เป็นต้น

2. วัสดุเนื้อเซรามิก (Ceramic Matrix Composites, CMCs) วัสดุผสมเนื้อเซรามิก มีเนื้อหลักเป็นเซรามิกและใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย วัสดุผสมกลุ่มนี้มักนำมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น กังหันใบพัดของเครื่องยนต์ไอพ่น คอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปูน ทราย เหล็กเส้น) เป็นต้น

3. วัสดุผสมเนื้อโลหะ (Metal Matrix Composites, MMCs) วัสดุผสมเนื้อโลหะมีโลหะเป็นเนื้อหลักได้แก่อะลูมิเนียมและวัสดุเสริมแรงจะเป็นวัสดุเซรามิก เช่น กลุ่มคาร์ไบด์ กลุ่มไนไตรต์ ชิ้นส่วนที่ผลิตขึ้นจะอยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ [4]

### 1.2.1.1 วัสดุเนื้อหลัก (Matrix)

อะลูมิเนียม (Aluminum, Al) เป็นโลหะสำคัญที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะเบา (Light Metals) เพราะอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นน้อย ( $2.7 \text{ g/cm}^3$ ) มีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมได้ดี เนื่องจากที่ผิวของอะลูมิเนียมมักจะเกิดเป็นฟิล์มของออกไซด์ชั้นจิงนิมใช้ทำเครื่องใช้และชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวดและขีปนาวุธ สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ได้ง่ายเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ จึงสามารถหลอมได้ง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง แต่เนื่องจากน้ำหนักเบาจึงนิยมใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีดัชนีการสะท้อนกลับของแสงสูงมาก ทนทานต่อการเกิดสนิม และการกัดกร่อนในบรรยากาศใช้งานทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนการกัดกร่อนต่อกรดและด่าง หาซื้อได้ง่ายและราคาไม่แพงมากนัก การแยกประเภทของอะลูมิเนียมผสม (Aluminum alloy) แบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่

1. อะลูมิเนียมประเภทรีด (Wrought Aluminum) ได้แก่ อะลูมิเนียมประเภทรีดขึ้นรูปต่างๆ เช่น sheet, plate, extrusion, rod และ wire ซึ่งอะลูมิเนียมกลุ่มนี้ข้อดี คือ สมบัติเชิงกลที่สูงกว่าอะลูมิเนียมประเภทหล่อ แต่ข้อเสีย คือ ราคาแพง
2. อะลูมิเนียมประเภทหล่อขึ้นรูป (Cast alloys) อะลูมิเนียมผสมที่ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์งานหล่อหลอม อยู่ในรูปของอินกอต (ingot) หรือแท่งเกรดต่าง ๆ ซึ่งอะลูมิเนียมกลุ่มนี้มีข้อดีคือราคาถูก แต่ข้อเสีย คือ สมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าอะลูมิเนียมประเภทหล่อ

### 1.2.1.2 วัสดุเสริมแรง (Reinforcement materials)

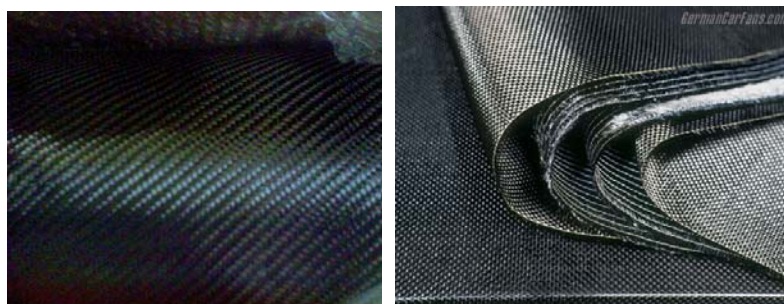
วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่ม หรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลัก ให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (Base materials) อย่างโลหะ เซรามิก หรือโพลีเมอร์ ได้แก่ พงซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) และฉนวนใยแก้ว (fiber glass Insulator)

#### 1. เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber)

เส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุ ที่มีสมบัติเด่นหลายอย่าง คือ การเป็นวัสดุมีน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงสูงมาก เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีต่างๆ และมีสมบัตินำไฟฟ้าได้ เป็นต้น เส้นใยคาร์บอนมีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนเหมือนกับถ่านและแกรไฟต์ โดยทั่วไปเนื้อของวัสดุชนิดนี้จะประกอบด้วยคาร์บอนอย่างน้อยร้อยละ 90 เส้นใยคาร์บอนเกิดจากเส้นใยคาร์บอนขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.005 - 0.10 มิลลิเมตรจำนวนมากพันเป็นเส้นด้ายเมื่อนำเส้นใยคาร์บอนมาเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าพบว่า มีสมบัติเชิงกลดังแสดงในตารางที่ 1.1 เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเหล็กกล้าได้แก่ ความหนาแน่นต่ำทำให้มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานแรงดึง ค่าโมดูลัสแรงดึงและความแข็งแรงจึงมีการประยุกต์ใช้เส้นใยคาร์บอนแบบถักในงานด้านต่าง ๆ ตัวอย่างลักษณะเส้นใยคาร์บอนแบบถักแสดงดังรูปที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเส้นใยคาร์บอนกับเหล็กกล้า

วัสดุ	ความหนาแน่น (กรัม/ซ.ม.)	ความต้านทานแรงดึง (GPa)	ค่าโมดูลัสแรงดึง (GPa)	ความแข็งแรงเฉพาะ (GPa)
เส้นใยคาร์บอน	1.75	3.5	230.0	2.00
เหล็กกล้า	7.87	1.3	210.0	0.17



รูปที่ 1.2 เส้นใยคาร์บอนแบบถัก [6]

## 2. ฉนวนใยแก้ว (Fiberfrax)

ฉนวนใยแก้วหรือไฟเบอร์กลาสนับได้ว่าเป็นวัสดุในกลุ่มน้ำหนักเบาที่มีการนำมาใช้ในหลายรูปแบบมีสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อน คุณสมบัติทางกายภาพของใยแก้ว คือทนความร้อน ทนการกัดกร่อนทางเคมีและไฟฟ้า มีคุณสมบัติสามารถนำไปปรับใช้งานได้หลายด้าน และวัตถุดิบพื้นฐานทั้งหมดเป็นเส้นใยจากสารอนินทรีย์นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติที่ยอดเยื่อมของไฟเบอร์กลาสหรือใยแก้วได้แก่ ไม่ติดไฟและเป็นฉนวนไฟฟ้าชั้นยอดเยี่ยมทนความร้อนได้ดีมาก คงรูปเดิมได้ดี ไม่มีการยืดหยุ่นไม่เนาเปื่อยหรือผุกร่อนไม่เป็นสนิม ทนต่อการกัดกร่อนและไม่เกิดการแข็งตัวจากอากาศหนาวจัด ส่วนประกอบทางเคมีและสมบัติต่าง ๆ ของฉนวนใยแก้วแสดงดังตารางที่ 1.2 และ 1.3 ตัวอย่างฉนวนใยแก้วแสดงดังรูปที่ 1.3

ตารางที่ 1.2 ส่วนประกอบทางเคมีของฉนวนใยแก้ว

ฉนวนใยแก้ว (Dura blanket S)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alkali	Leachable chlorides	Other Inorganic
ส่วนประกอบทางเคมี (Wt %)	43-47	53-57	≤ 0.5	0.05	≤ 10 ppm	0.85

ตารางที่ 1.3 สมบัติต่าง ๆ ของฉนวนใยแก้ว

ชนิด	Durablanket S
สี	ขาว
ระดับอุณหภูมิที่แนะนำ	1260°C
อุณหภูมิในการทำงาน	2150°C
จุดหลอมเหลว	1760°C
เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย	2.5 - 3.5 microns
ความจุความร้อนที่ 1093°C	1130 J/K°C
ความหนาแน่น	2.73 g/cm <sup>3</sup>
ความแข็งแรงดึงเฉลี่ย	4 lb/in <sup>2</sup> min at 4 PCF, 6 lb/in <sup>2</sup> min at 6 PCF 7 lb/in <sup>2</sup> min at 8 PCF



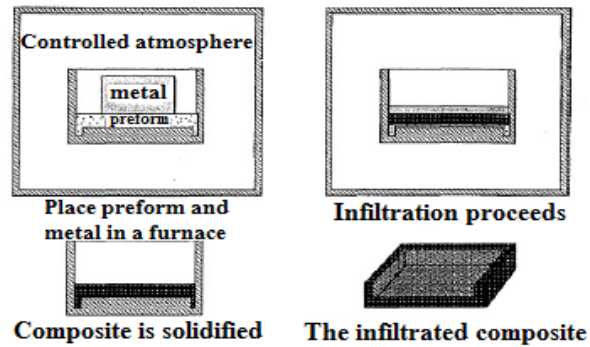
รูปที่ 1.3 ฉนวนใยแก้ว [7]

### 1.2.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (Al MMC)

การขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทำได้หลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ การขึ้นรูปในสถานะของเหลวและการขึ้นรูปในสถานะของแข็ง แต่ชิ้นส่วนที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ผลิตโดยการขึ้นรูปในสถานะของเหลวเนื่องจากต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่า การขึ้นรูปในสถานะของแข็ง สามารถผลิตชิ้นส่วนที่ประกอบด้วยผงเซรามิก เสริมแรงในสัดส่วนที่สูง คือกระบวนการแทรกซึม (Infiltration) มี 3 กระบวนการ ดังนี้

#### (1) กระบวนการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ (Spontaneous Infiltration)

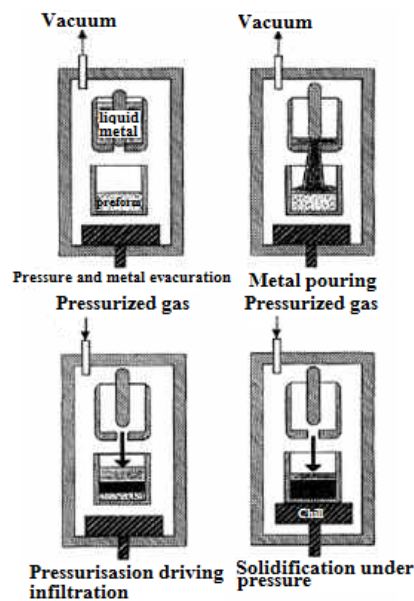
กระบวนการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติคือ การแทรกซึมโดยไม่ใช้แรงดันจากภายนอก การแทรกซึมเกิดขึ้นเองจากปฏิกิริยาที่น้ำโลหะเปียกกับผงเซรามิกทำให้เกิดแรงตึงผิว ซึ่งทำได้โดยการปรับผิวของผงเซรามิกโดยการเคลือบผิว หรือ การเติมสารในน้ำโลหะเพื่อปรับสมบัติทางเคมี ตัวอย่างเช่น การเติมลิเทียมในอะลูมิเนียมเพื่อแทรกซึมในพรีฟอร์ม (Preform) ที่เป็นออกไซด์ [8] หรือการเคลือบผงเซรามิกโดยนิกเกิลและโปแตสเซียมเซอร์โคเนียมฟลูออไรด์ ( $K_2ZrF_6$ ) ในการใช้กับอะลูมิเนียมผสมเกรดต่าง ๆ [9] หรือ การแทรกซึมผงคาร์ไบด์และไนไตรต์โดยอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิสูงในสถานะบรรยากาศไนโตรเจน [10] เป็นต้น กระบวนการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน สามารถผลิตชิ้นงานได้หลายรูปแบบโดยไม่ต้องทำแม่พิมพ์ในการแทรกซึม ทำให้ประหยัดค่าแม่พิมพ์ได้มาก แต่ก็มีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น ข้อจำกัดของระบบโลหะและเซรามิกที่สามารถเลือกใช้ได้ และเวลาในการผลิตที่นานเนื่องจากอัตราการแทรกซึมที่ช้า นอกจากนี้ยังมีปัญหาเรื่องรูพรุนจากการแทรกซึมที่ไม่สมบูรณ์ ลักษณะตัวอย่างกระบวนการแทรกซึมด้วยตัวเองแสดงดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 กระบวนการแทรกซึมด้วยตัวเอง

(2) กระบวนการแทรกซึมโดยใช้แก๊ส (Gas Pressure Infiltration)

กระบวนการแทรกซึมโดยใช้แก๊สคือ การใช้แรงดันจากแก๊สในการดันน้ำโลหะเข้าไปแทรกซึมในเซรามิกพรีฟอร์ม (Ceramic Preform) ลักษณะตัวอย่างของกระบวนการแทรกซึมโดยใช้แก๊สแสดงดังรูปที่ 1.5



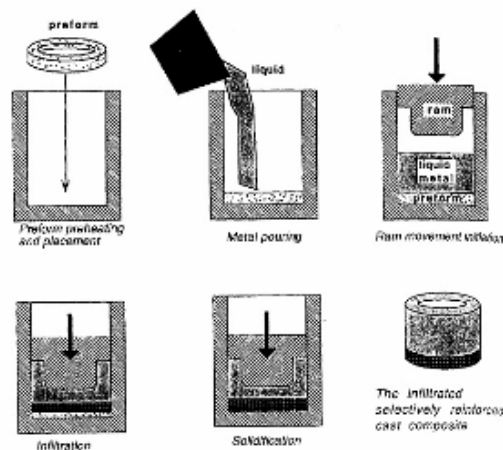
รูปที่ 1.5 กระบวนการแทรกซึมโดยใช้แก๊ส

กระบวนการแทรกซึมโดยใช้แก๊สใช้แรงดันไม่สูงมาก อยู่ในช่วงน้อยกว่า 1 MPa ถึงประมาณ 50 MPa [11-12] เนื่องจากมีการอุ่นพรีฟอร์มให้มีอุณหภูมิสูงและก่อนการแทรกซึมมีการทำให้เกิดสุญญากาศภายในพรีฟอร์มจึงช่วยลดแรงดันที่จำเป็นต้องใช้ลงอย่างมาก ข้อดีของ

กระบวนการแทรกซึมโดยใช้แก๊สได้แก่ ความสามารถในการใช้โลหะที่มีอุณหภูมิสูงได้ เช่น เหล็กกล้าหรือซูเปอร์อัลลอยด์ (Superalloy) นอกจากนี้สามารถผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีรูปร่างซับซ้อนได้ดี ส่วนข้อจำกัดของกระบวนการได้แก่ อัตราการผลิตที่ไม่สูง การออกแบบเครื่องจักรต้องระวังเรื่องความปลอดภัยอย่างยิ่งเนื่องจากอาจเกิดการระเบิดของเครื่องได้ และอัตราการเย็นตัวของโลหะที่ช้าทำให้มีข้อจำกัดด้านสมบัติเชิงกลที่ได้

### (3) กระบวนการหล่ออัด (Squeeze Casting)

กระบวนการหล่ออัดคือกระบวนการที่มีอัตราการผลิตที่สูง ได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์ เนื่องจากแรงดันที่ใช้มีค่าสูง ประมาณ 50 - 100 MPa [13] สามารถผลิตวัสดุผสมที่มีผงเซรามิกส์ที่ละเอียดมากได้ และลดการเกิดปฏิกิริยาที่อินเทอร์เฟซ (Interface) ระหว่างโลหะกับเซรามิก เนื่องจากเวลาในการผลิตที่สั้น อย่างไรก็ตามกระบวนการหล่ออัดก็มีข้อจำกัดที่สำคัญได้แก่ ต้นทุนเครื่องจักรที่สูงและราคาแม่พิมพ์ที่สูงลักษณะตัวอย่างกระบวนการหล่ออัดแสดงดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 กระบวนการหล่ออัด

## 1.2.3 หลักการเกิดการแทรกซึม (Infiltration)

### 1.2.3.1 ค่าความดันน้อยที่สุด (Threshold pressure)

ในกระบวนการแทรกซึมค่าความดันเริ่มต้น คือ ความดันน้อยที่สุดที่น้ำโลหะจะใช้สำหรับการแทรกซึมเข้าในระหว่างช่องว่างของอนุภาคเซรามิกของแผ่นพรีฟอร์มที่มีแรงต้านทานภายในระหว่างอนุภาคเซรามิก (Wannasin and Flemings, 2005) ดังสมการที่ 1.1

$$P_{th} = -6\lambda\gamma_{lv}\cos\theta \frac{V_p}{D_p(1-V_p)} \quad 1.1$$

โดยที่ค่า  $P_u$  คือค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกเข้าไประหว่างช่องว่างของแต่ละอนุภาคเซรามิก  $\lambda$  คือ ค่าปัจจัยที่ถูกต้องสำหรับสภาพผิวหน้าและความคลาดเคลื่อนของทรงกลม  $H_w$  คือ ความตึงผิวหน้าของน้ำโลหะ  $V_p$  คือ ค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูป  $D_p$  คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเซรามิก และ  $\theta$  คือ มุมระหว่างขอบของของเหลวกับของแข็งต่อมาเป็นการคำนวณความยาวการแทรกซึม (Infiltration length) ของน้ำโลหะหลอมเหลวเข้าไปช่องว่างของเซรามิกพรีฟอร์ม

$$L^2 = \frac{2}{(1-f)} \left(\frac{R}{\mu}\right) (P_0 - P_a - \Delta P_V) t \quad 1.2$$

เมื่อ L คือ ความยาวการแทรกซึม

(1-f) คือ สัดส่วนของช่องว่าง

$\left(\frac{R}{\mu}\right)$  คือ ค่าคงที่

$P_0$  คือ ความดันที่ใช้ในการหลอมของพรีฟอร์ม

$P_a$  คือ ความดันบรรยากาศของการแทรกซึม

$\Delta P_V$  คือ ความดันที่เกิดจากการแทรกซึมโลหะเข้าไปในพรีฟอร์ม

t คือ เวลา

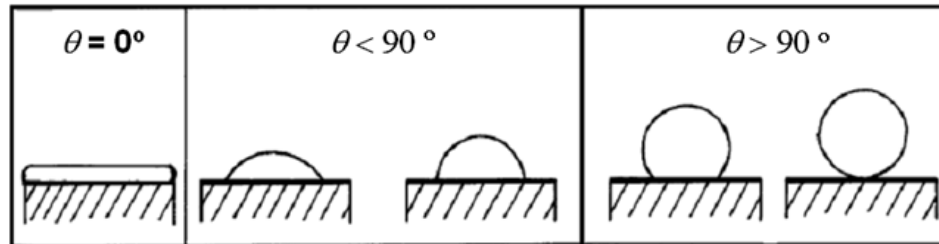
### 1.2.3.2 สมบัติการเปียก (Wetting)

ในการเตรียมวัสดุผสมแบบอัดขึ้นรูป มีปัจจัยหลายอย่างในการพิจารณาถึงการขึ้นรูป เพื่อให้วัสดุผสมมีการยึดประสานและมีสมบัติเชิงกลเหมาะสมในการนำไปใช้งาน ได้แก่ เวลา อุณหภูมิ สมบัติการเปียก มุมสัมผัส และพลังงานที่ผิวซึ่งอุณหภูมิจะเป็นตัวกำหนดการเตรียมวัสดุผสม ในส่วนนี้จะเน้นสมบัติการเปียกและมุมสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง พบว่าของเหลวจะแสดงสมบัติการเปียกบนผิวของแข็งทำมุมได้หลายลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1.7 ตารางที่ 1.4 จะเห็นว่าที่มุม  $\theta < 90^\circ$  จะมีสมบัติการเปียกที่ดี ที่  $\theta > 90^\circ$  มีสมบัติการเปียกที่ไม่ดี สำหรับมุม  $\theta = 0^\circ$  มีสมบัติการเปียกที่ดีมากทำให้วัสดุทั้ง 2 ชนิดยึดประสานกันแน่น และสุดท้ายพลังงานที่ผิวและมุมสัมผัสของวัสดุ ซึ่งมุมสัมผัสจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานที่ผิวของของแข็งของเหลว และแก๊สที่สมดุลดังแสดงในรูปที่ 1.8 โดยพลังงานที่ผิวของทั้ง 3 สถานะของวัสดุจะสมดุลกันสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad 1.3$$



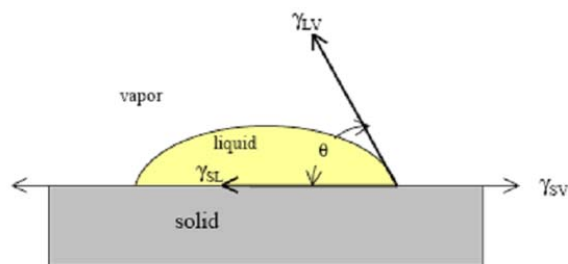
โดย  $\gamma_{sv}$  คือ พลังงานที่ผิวระหว่างของแข็งและแก๊ส ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )  
 $\gamma_{sl}$  คือ พลังงานที่ผิวระหว่างของแข็งและของเหลว ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )  
 $\gamma_{lv}$  คือ พลังงานที่ผิวระหว่างของเหลวและแก๊ส ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )  
 $\theta$  คือ มุมสัมผัส ( $^\circ$ )



รูปที่ 1.7 แสดงสมบัติการเปียกที่มุมต่างกันระหว่างของแข็งและของเหลว

ตารางที่ 1.4 แสดงมุมสัมผัสที่ส่งผลต่อสมบัติการเปียก

มุมสัมผัส	สมบัติการเปียก
$\theta < 90^\circ$	การเปียกที่ดี
$\theta > 90^\circ$	การเปียกที่ไม่ดี
$\theta = 0^\circ$	การเปียกที่ดีมาก

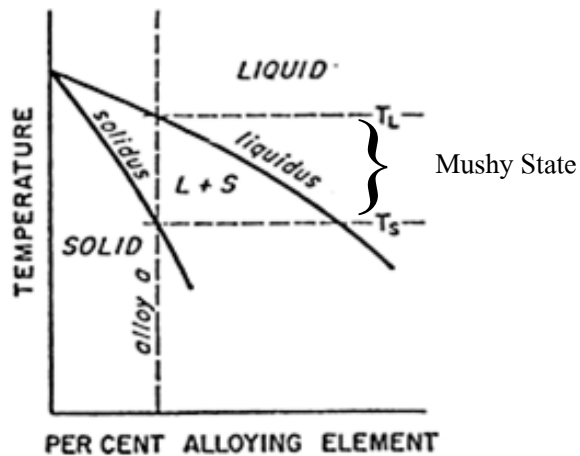


รูปที่ 1.8 แสดงพลังงานพื้นผิวและมุมสัมผัสของวัสดุทั้ง 3 สถานะ

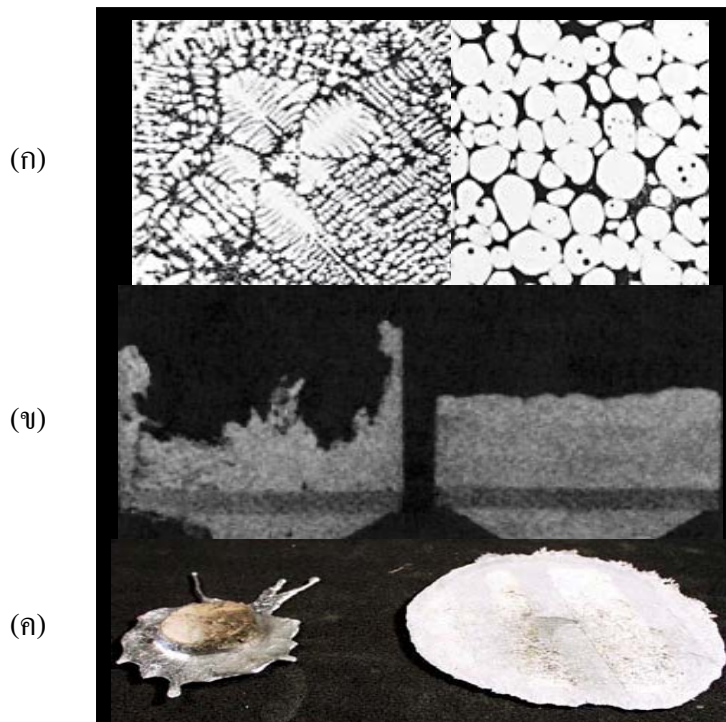
#### 1.2.4 กระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting Process)

การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งถูกค้นพบและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา มากกว่า 40 ปี โดยการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งเป็นการขึ้นรูปโลหะด้วยการหล่อในขณะที่โลหะ อยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Mushy state) แสดงดังรูปที่ 1.9 ซึ่งโลหะจะมีการแข็งตัวบางส่วน โดย โลหะส่วนที่แข็งตัวแล้วจะมีโครงสร้างเกรนไม่เป็นแบบเดนไดรต์ (Non-Dendritic Grain) หรือเกรน แบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular Grain) แสดงดังรูปที่ 1.10(ก) เกรนก้อนกลมที่ลอยอยู่ใน

น้ำโลหะทำให้โลหะกึ่งของแข็ง มีความหนืดมากกว่าน้ำโลหะทั่วไป การไหลไม่เป็นแบบปั่นป่วน และรูปที่ 1.10(ข) แสดงการไหลเทียบเคียงระหว่างน้ำโลหะทั่วไป (ซ้าย) และโลหะกึ่งของแข็ง (ขวา) สุดท้ายรูปที่ 1.10(ค) การไหลตัวของน้ำโลหะทั่วไปที่มีโครงสร้างเกรนแบบเดนไดร์ (ซ้าย) กับโลหะในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (ขวา) จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่าโลหะกึ่งของแข็งมีการไหลที่ราบเรียบมากกว่าโลหะทั่วไป



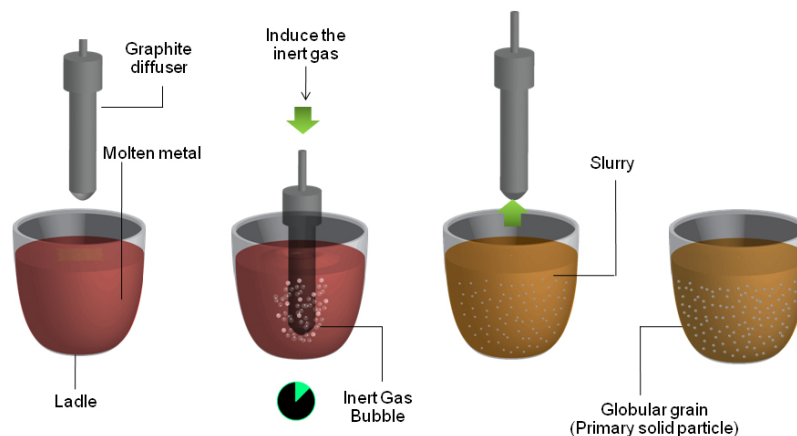
รูปที่ 1.9 แผนภาพสมดุลแสดงช่วงโลหะที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว



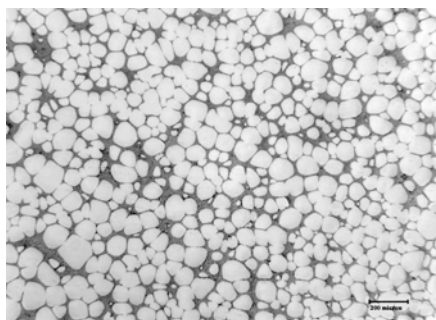
รูปที่ 1.10 ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างและการไหลระหว่างการหล่อด้วยน้ำโลหะกับโลหะกึ่งของแข็ง

### 1.2.5 กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการฟุ้งฟองแก๊สของแข็งตัว (Gas Induced Semi-Solid, GISS Process)

ปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ขึ้น นำโดย ผศ.ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์ อาจารย์และนักวิจัยภาควิชาเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งได้จดสิทธิบัตรในประเทศไทยและต่างประเทศแล้ว โดยกระบวนการนี้จะใช้การปล่อยฟองแก๊ส ได้แก่ แก๊สไนโตรเจนหรืออาร์กอน ผ่านแท่งแกรไฟต์พรม ในปริมาณที่น้อยมากเพื่อผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยใช้หลักการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะในขณะที่โลหะแข็งตัวทำให้เกิดเฟสของแข็งเริ่มต้นขึ้น เรียกกรรมวิธีแบบใหม่นี้ว่า กระบวนการ Gas Induced Semi-Solid หรือเรียกสั้น ๆ ว่ากระบวนการ GISS แสดงดังรูปที่ 1.11 ซึ่งพบว่าเทคนิคนี้สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมได้และโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ผลิตได้ แสดงดังรูปที่ 1.12 นอกจากนี้กระบวนการ GISS กำลังถูกพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมต่าง ๆ



รูปที่ 1.11 การทำงานของกระบวนการ GISS [14]






รูปที่ 1.12 โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ผลิตได้จากกระบวนการ GISS

### 1.2.6 การใช้งานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรง

ปัจจุบันได้มีการใช้งานของวัสดุผสมเนื้อโลหะเสริมแรงในด้านอื่น ๆ เพิ่มขึ้นแต่การผลิตและการใช้วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีอยู่น้อยมากส่วนใหญ่จะนำเข้ามาจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงฉะนั้นหากสามารถพัฒนากระบวนการผลิตและการขึ้นรูปวัสดุผสมนี้ได้ จะทำให้ประเทศไทยมีการใช้วัสดุผสมประเภทนี้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพิ่มขึ้นซึ่งการใช้งานของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมแสดงดังตารางที่ 1.5

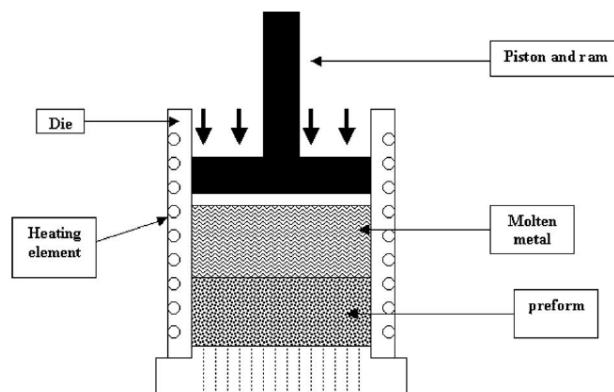
ตารางที่ 1.5 การใช้งานในด้านต่าง ๆ ของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

การใช้งานในด้านต่าง ๆ ของ วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม	ชิ้นส่วนที่สามารถผลิตได้ในอนาคต	รูปชิ้นงานต่าง ๆ ที่ผลิตได้ในอนาคต
อุตสาหกรรมด้านยานยนต์	ดิสก์เบรก ก้ามปูเบรก และก้านสูบ	   <p>ดิสก์เบรก      ก้ามปูเบรก      ก้านสูบ</p>
อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	แผ่นระบายความร้อนสำหรับวงจรรวมขนาดใหญ่และในอุปกรณ์กึ่งตัวนำ	  <p>แผ่นระบายความร้อนสำหรับวงจรรวมขนาดใหญ่      อุปกรณ์กึ่งตัวนำ</p>
อุตสาหกรรมการแพทย์	ชิ้นส่วนขาเทียมได้เข้า	 <p>ชิ้นส่วนขาเทียมได้เข้า</p>
อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์และเครื่องจักรกล	ชิ้นส่วนชุดผานพรวน 7 จาน ชิ้นส่วนของลูกรอกที่ติดกับเพลลา	   <p>รถไถคูโบต้า      ชิ้นส่วนชุดผานพรวน 7 จาน      ชิ้นส่วนของลูกรอกที่ติดกับเพลลา</p>

<p>อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานด้านการป้องกันประเทศ</p>	<p>เกราะกันกระสุนสำหรับบุคคล และยานยนต์หุ้มเกราะหรือแผ่นเกราะสำหรับกำแพงของฐานที่ตั้งทหารทางภาคพื้นดิน</p>	 <p>เกราะกันกระสุนสำหรับบุคคล</p>	 <p>แผ่นเกราะสำหรับกำแพง</p>	 <p>ยานยนต์หุ้มเกราะ</p>
--	--	--	--	---

### 1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S.M. Seyed Reihani และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตของกรรหล่อโดยวิธีการหล่ออัดของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 6061 เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ ในงานวิจัยนี้จะใช้อะลูมิเนียมเกรด 6061 เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ ในการทดลองจะใช้แม่พิมพ์ที่มีความสูง 20 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ทำการเตรียมซิลิกอนคาร์ไบด์ และแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ทำการเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสลงในแม่พิมพ์ โดยใช้แรงดัน 100 MPa เพื่อให้เกิดการผสมแทรกซึมเป็นเนื้อเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการหล่ออัด

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุเพื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุทั่วไปกับวัสดุที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์และยังเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ 16 และ 22  $\mu\text{m}$  ดังแสดงในตารางที่ 1.6 พบว่าวัสดุที่เสริมแรงจะให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าและ

ขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ที่มีขนาดอนุภาค 16  $\mu\text{m}$  จะให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าขนาดอนุภาค 22  $\mu\text{m}$

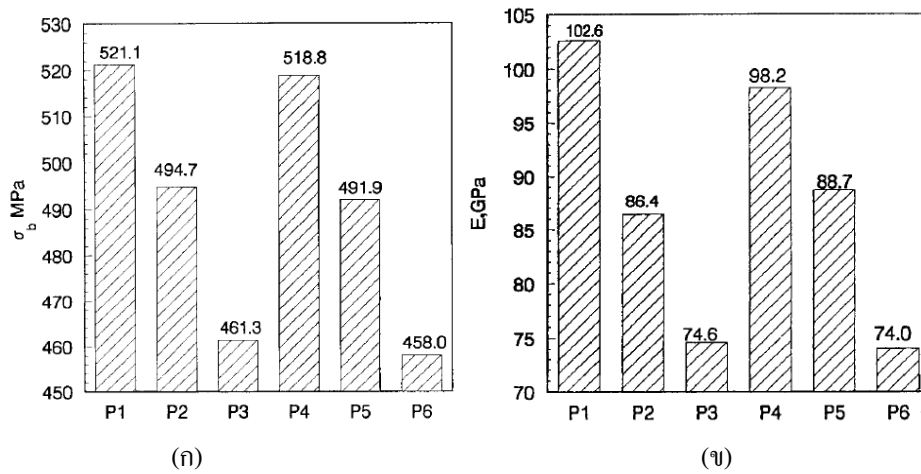
ตารางที่ 1.6 สมบัติทางกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม 6061 เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ 30% เปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม 6061 ไม่เสริมแรง

วัสดุ	Reinforcement (SiC)	Elastic modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
วัสดุผสม	-	70	110	144	8.9
	22 $\mu\text{m}$	83	172	194	1
	16 $\mu\text{m}$	94	180	200	1.9

Shuangjie Chu และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างและสมบัติการกัดของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด A356 เสริมแรงด้วยอะลูมินาโดยการขึ้นรูปแบบการหล่ออัด (Squeeze casting) ในงานวิจัยจะใช้ขนาดอนุภาคของอะลูมินาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10  $\mu\text{m}$  โดยใช้สัดส่วน 0.4% ของน้ำหนัก หลอมอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่อุณหภูมิประมาณ 800°C ใช้แรงดันอัด 100 MPa และทำการศึกษาอุณหภูมิของการเตรียมพรีฟอร์มและแม่พิมพ์ดังแสดงในตารางที่ 1.7 และจากผลการทดลองพบว่าสมบัติทางกลที่ทำการเตรียมที่อุณหภูมิ 300°C จะให้สมบัติของความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าอีลาสติกโมดูลัสที่ดีกว่าการเตรียมที่อุณหภูมิ 400°C แสดงดังรูปที่ 1.14

ตารางที่ 1.7 อุณหภูมิอุ่นของการเตรียมพรีฟอร์มและแม่พิมพ์

ชนิดของชิ้นงาน	P1	P2	P3	P4	P5	P6
อุณหภูมิอุ่นแม่พิมพ์ (°C)	300	300	300	400	400	400
อุณหภูมิอุ่นพรีฟอร์ม (°C)	600	700	800	600	700	800

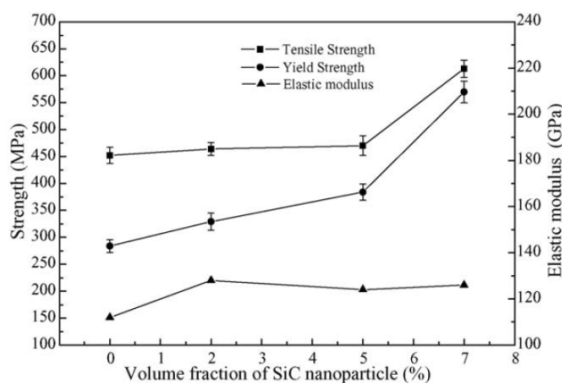


รูปที่ 1.14 ความแข็งแรงดึงและการยืดหยุ่นของวัสดุผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอะลูมินา  
 (ก) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) (ข) ค่าอีลาสติกโมดูลัส

X.N. Zhang และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยของซิลิกอนคาร์ไบด์และอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ในระดับนาโนโดยวิธีการหล่ออัด (Squeeze cast) ในการทดลองจะใช้อะลูมิเนียมเกรด 2024 เป็นเนื้อและทำการเสริมแรงด้วย

1. ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC whiskers) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3-0.6 μm และมีความยาว 10 - 28 μm ในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์
2. อนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ในระดับนาโนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 nm ใช้ในปริมาณ 0.25 และ 7 เปอร์เซ็นต์

เมื่อนำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปไปทำการทดสอบสมบัติทางกลพบว่าได้ผลแสดงดังรูปที่ 1.15 โดยสมบัติทางกลที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนของซิลิกอนคาร์ไบด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นนอกจากนี้ยังทำให้ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 1.15 ผลของอนุภาคนาโนของซิลิกอนคาร์ไบด์ ต่อความแข็งแรงดึงของวัสดุผสม

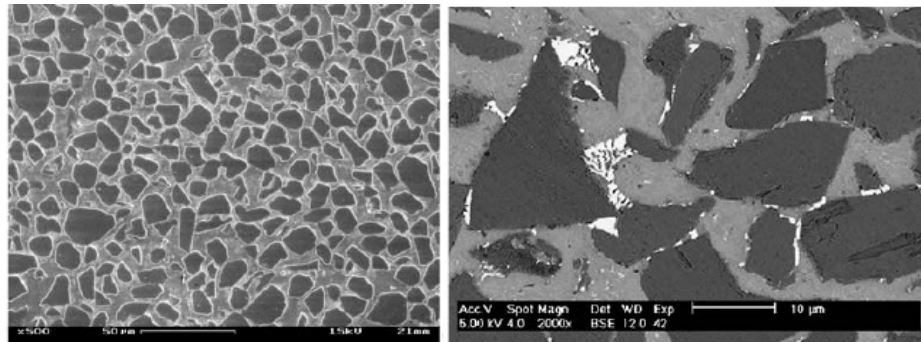
Olivier Beffort และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาผลของการเติมธาตุเจือบนโครงสร้างและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมเนื้อโลหะเสริมแรงด้วยอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์โดยวิธีการหล่ออัดแทรกซึม (Squeeze cast infiltration) ผลการศึกษาการเติมธาตุเจือลงไปใในเนื้ออะลูมิเนียมผสมเนื้อโลหะเสริมแรงด้วยอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ในปริมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 1.8

ตารางที่ 1.8 ผลของสมบัติทางกลของการเติมธาตุเจือในเนื้อโลหะเสริมแรงด้วยอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์

วัสดุ	อุณหภูมิ	$\sigma_{4-pl.r}^*$ (MPa)	$E_{IET}$ (GPa)	$E_{4-pi}$ (GPa)	ความแข็ง (HB30)
Al99.99	F	477.2±16.5	209.1	199.7	163
AlMg <sub>4</sub>	F	502.8±27.4	199.4	202.1	243
AlZn <sub>6</sub>	F	473.7±20.1	204.8	199.1	175
AlCu <sub>3</sub>	F	493.9±63.1	207.4	207.2	223
AlCu <sub>3</sub>	T6	563.7±56.3	205.3	205.4	247
AlZn <sub>6</sub> Mg <sub>1</sub>	F	532.8±25.5	207.7	206.0	226
AlZn <sub>6</sub> Mg <sub>1</sub>	T6	562.0±19.8	211.7	211.7	285

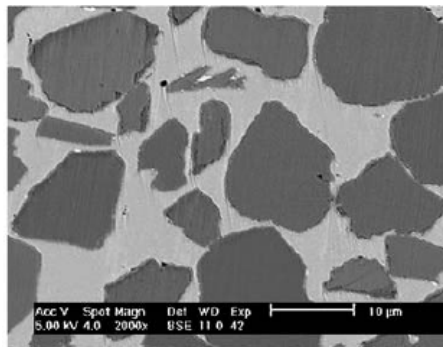
จากผลการทดลองพบว่าอะลูมิเนียมที่ผ่านการเติมธาตุต่าง ๆ ลงไปจะให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์เพียงอย่างเดียวและจากการทดลองพบว่า ธาตุเติมที่ดีที่สุดคือการเติมทองแดง (Cu) ลงไปทำให้ได้ความแข็งเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าและนอกจากนี้ถ้านำชิ้นงานที่เติมธาตุเจือไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment, T6) จะให้ความแข็งเพิ่มขึ้นอีกด้วย ในส่วนของโครงสร้างจะนำเสนอเฉพาะของ AlCu<sub>3</sub> และ AlCu<sub>3</sub>-T6 แสดงดังรูปที่ 1.16 โดยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)





(ก)

(ข)



(ค)

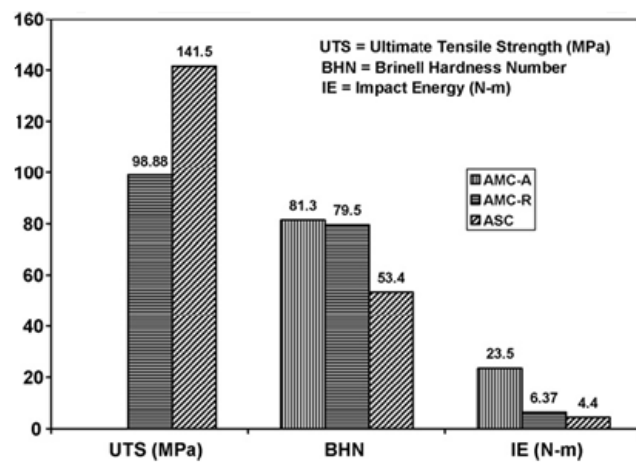
รูปที่ 1.16 โครงสร้างแสดง (ก) ไม่มีการเกิดเฟสของอินเตอร์เมทัลลิกและเซกรีเกรชั่นในระบบ (ข) บริเวณอินเตอร์เฟสของ  $\text{AlCu}_3$  ที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment, T6) (ค) บริเวณอินเตอร์เฟสของ  $\text{AlCu}_3$  ที่ผ่านผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

T. Shalu และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาและลักษณะของเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงในวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมพบว่าจะใช้วัสดุอะลูมิเนียมเกรด A356 เป็นเนื้อหลักและเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 1.17 พบว่ามีการแทรกซึมอย่างสมบูรณ์ในชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม



รูปที่ 1.17 ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่ออัด

จากการนำวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนไปวิเคราะห์สมบัติทางกล ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ความแข็ง (hardness) และพลังงานกระแทก (Impact energy) โดยพบว่าวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนจะให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุอะลูมิเนียมไม่เสริมแรงแสดงดังรูปที่ 1.18 โดยที่ AMC-A คือวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงเส้นใยในแนวแกน AMC-R คือวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงเส้นใยในแนวรัศมีและ ASC คือวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมไม่เสริมแรง



รูปที่ 1.18 การทดสอบสมบัติทางกล

จากรูปพบว่าวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ทดสอบสมบัติทางกลตามแนวแกนจะให้สมบัติที่ดีว่าการทดสอบในแนวรัศมีและ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนกับวัสดุที่ไม่เสริมแรงพบว่าสมบัติทางกลที่ได้มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน จากงานวิจัยชิ้นนี้ทำให้เห็นว่าวัสดุที่เสริมแรงจะให้สมบัติที่ดีกว่าวัสดุไม่เสริมแรง

งานวิจัยทั้งหมดที่ได้ศึกษาแสดงให้เห็นว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบหล่ออัดสามารถสรุปตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้ดังตารางที่ 1.9 เพื่อนำมาใช้ในผลิตชิ้นงานที่เป็นวัสดุเนื้อผสมเนื้ออะลูมิเนียมได้ ดังนั้นในโครงการงานวิจัยชิ้นนี้จะประยุกต์ใช้กระบวนการหล่ออัดเพื่อขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมร่วมกับกระบวนการ GISS เพื่อเตรียมน้ำโลหะให้อยู่ในสถานะกึ่งของแข็ง หรือเรียกว่า กระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งเพื่อนำมาใช้ผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมในกลุ่มอะลูมิเนียมประเภทหล่อขึ้นรูปและอะลูมิเนียมประเภทรีดเสริมแรงด้วยเซรามิกในกลุ่มคาร์ไบด์และกลุ่มไนไตรต์ เพื่อให้มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม มีความสม่ำเสมอของโครงสร้างทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมประเภทรีดด้วย

กระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งมีข้อดีคือ ขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำช่วยลดการรั่วของน้ำโลหะ ลดการแตกร้อนและยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์

ตารางที่ 1.9 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้ใช้ผลิตวัสดุผสมที่ทำการศึกษางานวิจัยเบื้องต้น

ตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูป	#
วัสดุเนื้อหลัก	อะลูมิเนียมกลุ่มรีดและกลุ่มหล่อ
วัสดุเสริมแรง	เส้นใยคาร์บอน พงอะลูมินาและผงซิลิกอนคาร์ไบด์
กระบวนการที่ใช้	หล่ออัดขึ้นรูป (Squeeze casting)
ความดันอัด	70 - 100 MPa
อุณหภูมิอุ่นแม่พิมพ์	300 - 500 °C
อุณหภูมิอุ่นพรีฟอร์ม	200 - 500 °C

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมแบบใหม่โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งได้
2. เพื่อศึกษากระบวนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้วโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งได้

#### 1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เน้นการพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้วโดยกรรมวิธีการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง ซึ่งมีขอบเขตรวมถึงการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและฉนวนใยแก้วทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปด้วยวิธีการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้ เพื่อประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้คิดค้นกระบวนการใหม่ในการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม
2. ได้ข้อมูลพื้นฐานของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

3. เพื่อผลิตชิ้นงานวัสดุผสมที่มีน้ำหนักเบาและแข็งแรง เหมาะกับการใช้งานในแต่  
ละอุตสาหกรรม

#### 1.7 สถานที่ทำการวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
วิทยาเขตหาดใหญ่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

## บทที่ 2

### วิธีการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ระเบียบขั้นตอนการวิจัย ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อการวิเคราะห์ โครงสร้างทางจุลภาค ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกลต่าง ๆ

#### 2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

##### 2.1.1 วัสดุเนื้อหลัก

โลหะผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คืออะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ซึ่งเป็นชนิด Secondary Alloys ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงในตารางที่ 2.1 วิเคราะห์ด้วย Optical Emission Spectrometer (OES) และลักษณะของอินกอท (ingot) เริ่มต้นที่ใช้ แสดงดังรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในงานวิจัย

ธาตุ (Element)	Zn	Mg	Cr	Cu	Si	Fe	Mn	Al
ส่วนผสมทางเคมี (Wt%)	5.52	2.52	0.19	1.77	0.19	0.37	0.04	Bal



รูปที่ 2.1 อินกอทอะลูมิเนียม 7075 ที่ใช้ในงานวิจัย

### 2.1.2 ส่วนเสริมแรง

ส่วนเสริมแรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ฉนวนใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนแบบถัก ลักษณะของส่วนเสริมแรงที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 2.2



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 ส่วนเสริมแรงที่ใช้ในงานวิจัย (ก) ฉนวนใยแก้ว และ (ข) เส้นใยคาร์บอนแบบถัก

## 2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

### 2.2.1 เตาหลอมไฟฟ้า

เตาหลอมที่ใช้ในงานวิจัย คือ เตาหลอมไฟฟ้าชนิดใช้ลวดความต้านทาน (Electric Resistance Furnace) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งอุณหภูมิในการหลอมสามารถควบคุมด้วยตู้ควบคุม (Controller) โดยสามารถหลอมโลหะที่มีอุณหภูมิสูงไม่เกิน  $1000^{\circ}\text{C}$  และหลอมโลหะได้สูงสุดไม่เกิน 20 กิโลกรัมต่อครั้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะควบคุมอุณหภูมิเตาสำหรับการหลอมน้ำโลหะ อะลูมิเนียมผสมให้อยู่ที่อุณหภูมิ  $750^{\circ}\text{C}$  ทุกครั้ง



รูปที่ 2.3 เตาหลอมไฟฟ้าชนิดลวดความต้านทานที่ใช้ในการทดลอง

## 2.2.2 เบบ้ากราไฟต์

เบ้าหลอมที่ใช้ในงานวิจัย คือ เบ้าที่ทำจากกราไฟต์ (Graphite-Clay Base) แทนเบ้าที่ทำจากเหล็ก เนื่องจากการใช้เบ้ากราไฟต์ช่วยลดการปนเปื้อนของเหล็กลงไปในน้ำโลหะและสามารถทำความสะอาดได้ง่ายภายหลังการใช้งาน ตัวอย่างของเบ้ากราไฟต์แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างเบ้ากราไฟต์ ที่ใช้ในการทดลอง

## 2.2.3 เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยฟองแก๊สขณะแข็งตัว

เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่ใช้ในงานวิจัย มีส่วนประกอบสำคัญได้แก่ 1.แท่งกราไฟต์ 2.ชุดวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะและอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ (Thermocouples) 3.ระบบควบคุมอัตราการไหลของลมและแก๊ส 4.ระบบทำความเย็นให้แก่แท่งกราไฟต์ (Cooling System) 5. ชุดควบคุมระบบ (Central Control Unit) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว

## 2.2.4 เครื่องอัดไฮโดรลิกแนวนอนขนาด 20 ตันระดับห้องปฏิบัติการพร้อมแม่พิมพ์ขนาด 10 x 10 เซนติเมตร

ในการวิจัยใช้เครื่องอัดไฮโดรลิกแนวนอนขนาด 20 ตัน ซึ่งประกอบด้วยกระบอกอัดในแนวตั้งขนาด 80 ตันพร้อมแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมในงานวิจัยตลอดโครงการวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย ชุดควบคุมอุณหภูมิ และแม่พิมพ์สี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด ความกว้าง x ความยาวเท่ากับ 10 x 10 เซนติเมตร ซึ่งเครื่องไฮโดรลิกมีแรงดันอัดประมาณ 80 MPa เพื่ออัดน้ำโลหะเหลวให้แทรกซึมในช่องว่างระหว่างอนุภาคของพรีฟอร์มลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

## 2.3 ขั้นตอนการวิจัย

### 2.3.1 การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นเนื้อหลัก

การเลือกวัสดุเนื้อหลักในกระบวนการแทรกซึมในสภาวะกึ่งของแข็งจำเป็นต้องหาวัสดุที่เหมาะสมเพื่อนำมาผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีคุณภาพ ซึ่งอะลูมิเนียมที่นำมาทดลองเลือกมี 4 เกรดด้วยกันคือ 2024 5052 6061 และ 7075 ซึ่งลักษณะของอินกอทที่ใช้ในกระบวนการวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2.7 จะทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สต่างกันคือ 10 20 และ 30 วินาทีตามลำดับ ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 2.8 และลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว แสดงดังรูปที่ 2.9 จากนั้นนำไปชิ้นงานไปปรับปรุงสมบัติทางความร้อนดังตารางที่ 2.2 นำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติการดึง (Tensile testing) ตามมาตรฐาน ASTM B557M เพื่อหาวัสดุเนื้อหลักที่มีความต้านทานแรงดึงที่มีค่าสูงสุดเพื่อใช้เป็นวัสดุเนื้อหลักในการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้อ



อะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงได้แก่ เส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้ว ดังนั้นหลักเกณฑ์ในการเลือกอะลูมิเนียมเพื่อใช้เป็นวัสดุเนื้อหลักคือเลือกอะลูมิเนียมที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดจากอะลูมิเนียมทั้ง 4 เกรด



รูปที่ 2.7 อินกอตอะลูมิเนียมเกรด 2024 5052 6061 และ 7075 ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 2.8 กระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็ง

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของกระบวนการทางความร้อน

Alloy	Heat treatment	Detail
2024	T6	:Solution heat treatment 495 °C, 16 hr. :aging heat treatment: 165 °C, 17hr
5052	O	:อบที่ 343°C, 45 min
6061	T6	: Solution heat treatment: 527 °C, 1hr. : aging heat treatment:177 °C , 6 hr
7075	T6	: Solution heat treatment: 480°C, 12hr. : aging heat treatment : 120 °C, 18 hr



รูปที่ 2.9 ชิ้นงานหลังขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็ง

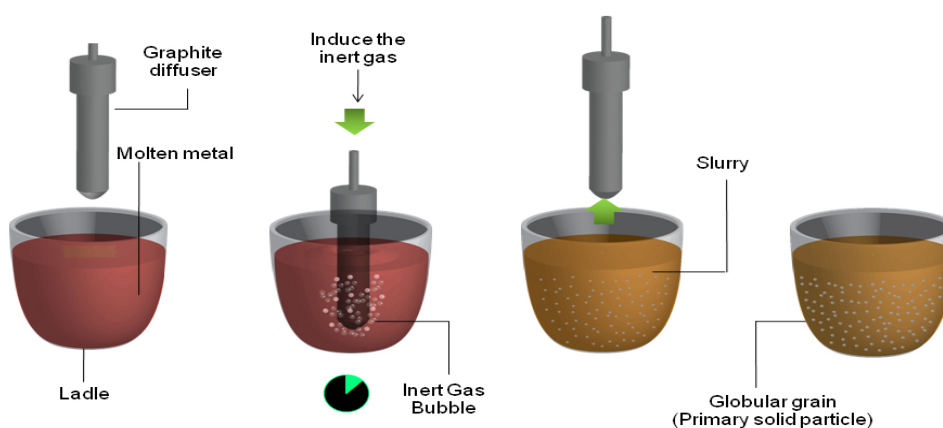
### 2.3.2 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะที่ใช้ในงานวิจัย

การวิเคราะห์ทางความร้อนของโลหะที่ทำการวิจัย เริ่มจากการนำอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ชนิด Secondary ที่ตัดมาจากแท่งอินคอตไปใส่ลงในเตาไฟฟ้าและนำเตาไฟฟ้าไปวางในเตาหลอมชนิดขดลวดความต้านทาน ทำการหลอมโลหะที่อุณหภูมิ 750°C เมื่อโลหะหลอมละลายจึงเติมฟลักซ์ (Flux) เพื่อทำความสะอาดน้ำโลหะและทำการตัดครอส (Dross) ออกจากน้ำโลหะ จากนั้นตักน้ำโลหะประมาณ 300 กรัม จากเตาหลอมด้วยเบ้าสแตนเลสเคลือบผิวด้วยเซรามิกทนไฟ แล้วนำไปจุ่มเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เพื่อวัดและอ่านค่าอุณหภูมิของน้ำโลหะ ทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของน้ำโลหะโดยการปล่อยให้ น้ำโลหะเย็นตัวอย่างช้า ๆ เพื่อทำการสร้างกราฟแสดงอัตราการเย็นตัว (Cooling Curve) กราฟที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลว

(Liquidus Temperature) และอุณหภูมิที่จุดยูเทกติก (Eutectic Temperature) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 7075 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

### 2.2.3 การเตรียมโลหะกึ่งของแข็ง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำกระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งเรียกว่ากระบวนการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะแข็งตัวหรือมีชื่อทางภาษาอังกฤษว่า Gas Induced Semi Solid (GISS) ดังรูปที่ 2.10 เป็นกระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งสำหรับการอัดแทรกซึมในขั้นตอนต่อไป โดยในกระบวนการจะทำการปล่อยฟองแก๊สได้แก่ แก๊สไนโตรเจนเข้าไปในน้ำโลหะเป็นระยะเวลา 3 5 10 20 และ 30 วินาทีตามลำดับ เพื่อให้ได้สัดส่วนของแข็งตามต้องการในการแทรกซึมเข้าไประหว่างอนุภาคพริฟอร์ม



รูปที่ 2.10 กระบวนการ Gas Induced Semi Solid หรือ GISS

### 2.3.4 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งของโลหะกึ่งของแข็งที่เตรียมได้จากกระบวนการ GISS

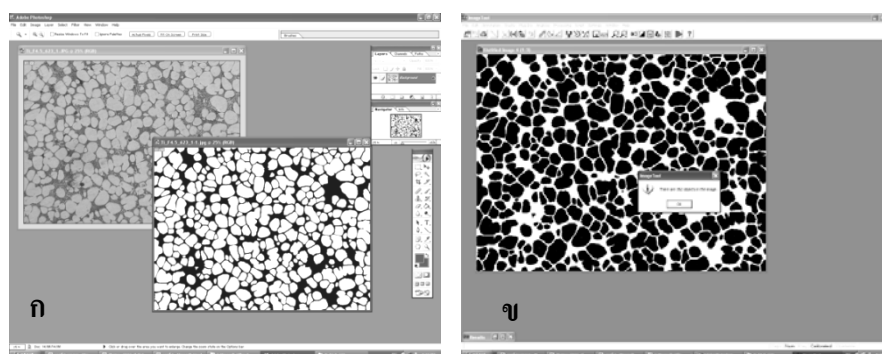
น้ำโลหะที่เตรียมได้จากกระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งหรือกระบวนการ GISS ถูกนำมาวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งที่เกิดจากการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะที่ระยะเวลาการปล่อยฟองแก๊สต่างกัน โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งมีดังนี้

1. ทำการหลอมอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม 7075 ในเบ้ากราไฟต์ในเตาหลอมชนิดลดด้านทาน
2. ตักน้ำโลหะจากเบ้ากราไฟต์ประมาณ 300 กรัมด้วยกระบวยตัก (Ladle) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบผิวด้วยโบรอนไนไตรท์
3. ทำการสร้างโลหะกึ่งของแข็งโดยการปล่อยฟองแก๊สที่เวลาแตกต่างกันคือ 3 5 10 20 และ 30 วินาที ตามลำดับ

4. ใช้แม่พิมพ์ทองแดง (Copper Quenching Mold) เพื่อเก็บตัวอย่างของน้ำโลหะอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่สร้างได้จากข้อ 3 ที่เวลาในการปล่อยฟองแก๊สต่าง ๆ กัน ซึ่งลักษณะของแม่พิมพ์ทองแดง แสดงดังรูปที่ 2.11
5. นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 4 มาตัดและเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
6. ทำการถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy) ในแต่ละบริเวณ โดยจะถ่าย 3 รูปต่อ 1 ชิ้นงาน
7. นำรูปโครงสร้างจุลภาคมาคำนวณหาปริมาณสัดส่วนของแข็ง โดยใช้โปรแกรม Photoshop และ Image Tools ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 แม่พิมพ์ทองแดง



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็ง (ก) การสร้าง Threshold ด้วยโปรแกรม Photoshop  
(ข) การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Image Tools

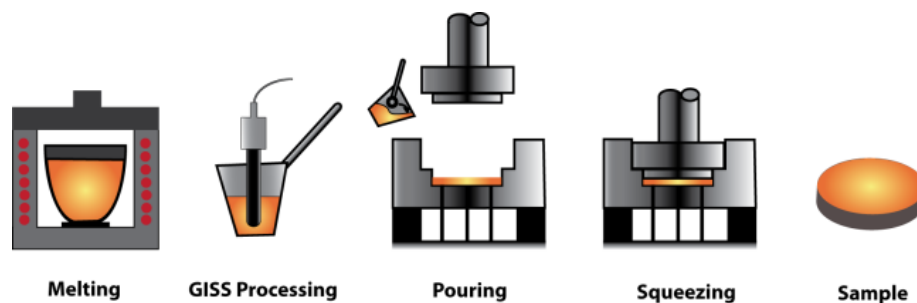
### 2.3.5 การออกแบบแม่พิมพ์และสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิ

ในการออกแบบแม่พิมพ์และสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิได้มีการศึกษาข้อมูลจากบทความหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ ระบบควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งมีหลักในการออกแบบคือ ต้องออกแบบแม่พิมพ์เพื่อให้ น้ำโลหะมีการแทรกซึมเข้าไปในช่องว่าง

ของพรีฟอร์มได้ดี และระบบความร้อนรอบ ๆ แม่พิมพ์ต้องมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการอุ่นพรีฟอร์มให้มีความร้อนทั่วทั้งชิ้นงาน

### 2.3.6 การผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ทำการทดลองศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบใหม่ ในการทดลองเบื้องต้นจะทำการศึกษาดัชนีแปรที่ใช้ในกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง ซึ่งลักษณะของกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งหรือเรียกภาษาอังกฤษว่า Semi-Solid Infiltration Process แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งหรือ Semi-Solid Infiltration Process

ขั้นตอนในการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง จำแนกเป็นข้อย่อได้ดังนี้

1. หลอมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ชนิด Secondary ในเตาไฟฟ้าชนิดขดลวดต้านทาน โดยปรับตั้งค่าอุณหภูมิเตาที่  $750^{\circ}\text{C}$
2. ใช้กระบวยตัก (Ladle) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบผิวด้วยเซรามิกทนความร้อน ตักน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวในปริมาณ 300 กรัม จากนั้นทำการปิดหน้าตักผิวออกไซด์ของอะลูมิเนียมบริเวณด้านบนหรือผิวหน้าของน้ำโลหะออก ในขณะเดียวกันทำการเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยคาร์บอนเพื่อให้ น้ำโลหะไหลได้เต็มแบบ
3. ทำการจุ่มแท่งกราไฟต์เพื่อปล่อยฟองแก๊สเป็นระยะเวลาต่าง ๆ กันเพื่อให้ได้สัดส่วนของแข็งในช่วง 5 10 20 และ 30% ตามลำดับ โดยปรับตั้งค่าอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ก่อนทำการจุ่มที่  $50^{\circ}\text{C}$  อัตราการปล่อยฟองแก๊สที่ 5 ลิตรต่อนาที ในระหว่างนี้จะนำพรีฟอร์มไปวางไว้ในแม่พิมพ์
4. หลังจากสร้างอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งให้มีสัดส่วนของแข็งตามต้องการแล้ว นำจึงนำน้ำโลหะอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งไปเทลงในแม่พิมพ์

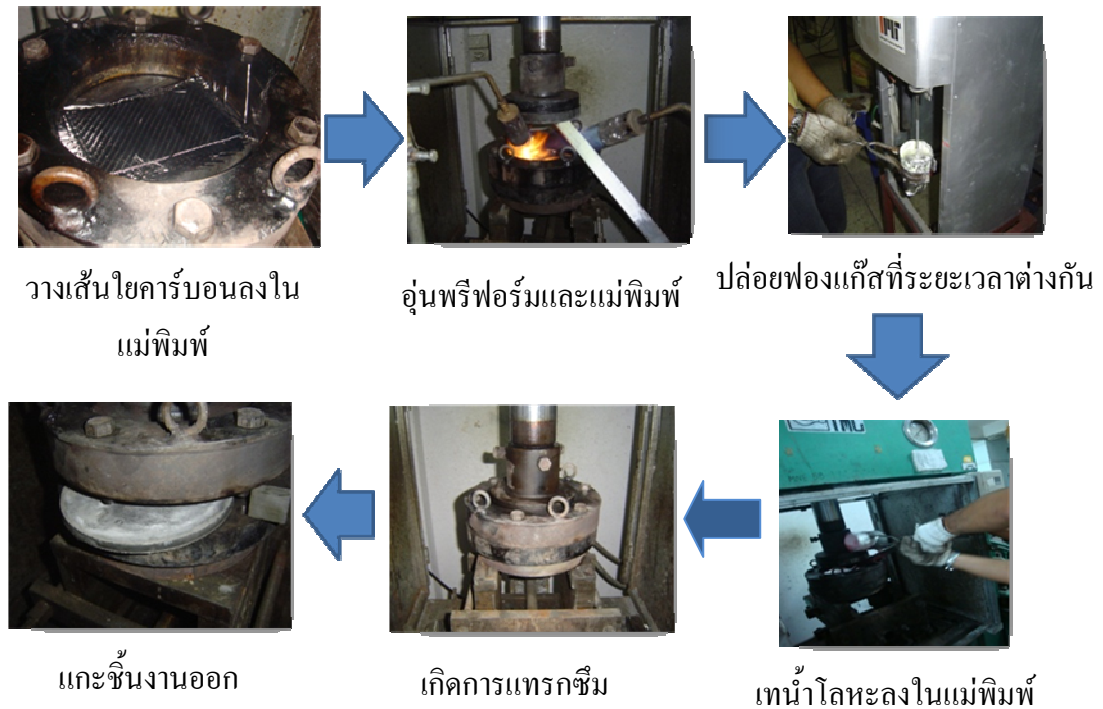
5. ทำการอัดพื้นซ์เพื่อดันน้ำโลหะให้เกิดการแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของพรีฟอร์ม ทิ้งไว้ประมาณ 10 - 20 วินาที เพื่อให้เกิดการแทรกซึมที่สมบูรณ์
6. ทำการแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์
 

**\*\*หมายเหตุ** ในขั้นตอนการศึกษากระบวนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเบื้องต้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการจะใช้อะลูมิเนียมเกรด 356 เป็นวัสดุเนื้อหลักแทนอะลูมิเนียมเกรด 7075 เนื่องจากอะลูมิเนียมเกรด 356 มีการไหลที่ดี ราคาค่อนข้างถูก และมีการใช้งานอย่างแพร่หลายดังนั้น จึงใช้อะลูมิเนียมเกรด 356 เพื่อหาตัวแปรต่าง ๆ ในการขึ้นรูปวัสดุผสมโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งในขั้นต้น

**2.3.6.1 การศึกษาตัวแปรเบื้องต้นของกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งด้วยอะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก** ในขั้นตอนนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมในกลุ่มงานหล่อคือ อะลูมิเนียมเกรด 356 ซึ่งในการทดลองเบื้องต้นได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตวัสดุผสมแบบใหม่ คือการประยุกต์ใช้กระบวนการหล่ออัด (Squeeze casting) ร่วมกับการเตรียมน้ำโลหะให้อยู่ในสถานะกึ่งของแข็งโดยใช้กระบวนการ GISS ขั้นตอนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก จำศึกษาตัวแปรได้แก่ 1.สัดส่วนของแข็งที่ต่างกันคือ 5 10 20 และ 30% ตามลำดับ และ 2.ปริมาณส่วนเสริมแรงที่ต่างกันคือ 2 4 8 12 และ 16 แผ่นตามลำดับ ตัวแปรทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 2.3 และตัวอย่างรูปขั้นตอนการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 2.14 ในกระบวนการขั้นต้นจะพิจารณาความสามารถในการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งคือ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

ตารางที่ 2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 356	
ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรผกผัน
1. อุณหภูมิแท่งกราฟไฟต์	1. สัดส่วนของแข็งเริ่มต้น
2. อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำโลหะหลอมเหลว	2. ปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถัก
3. แม่พิมพ์ขนาด 8 นิ้ว	3. อุณหภูมิพรีฟอร์ม
4. ความดันอัดในการขึ้นรูปคือ ~14 MPa	4. อุณหภูมิแม่พิมพ์



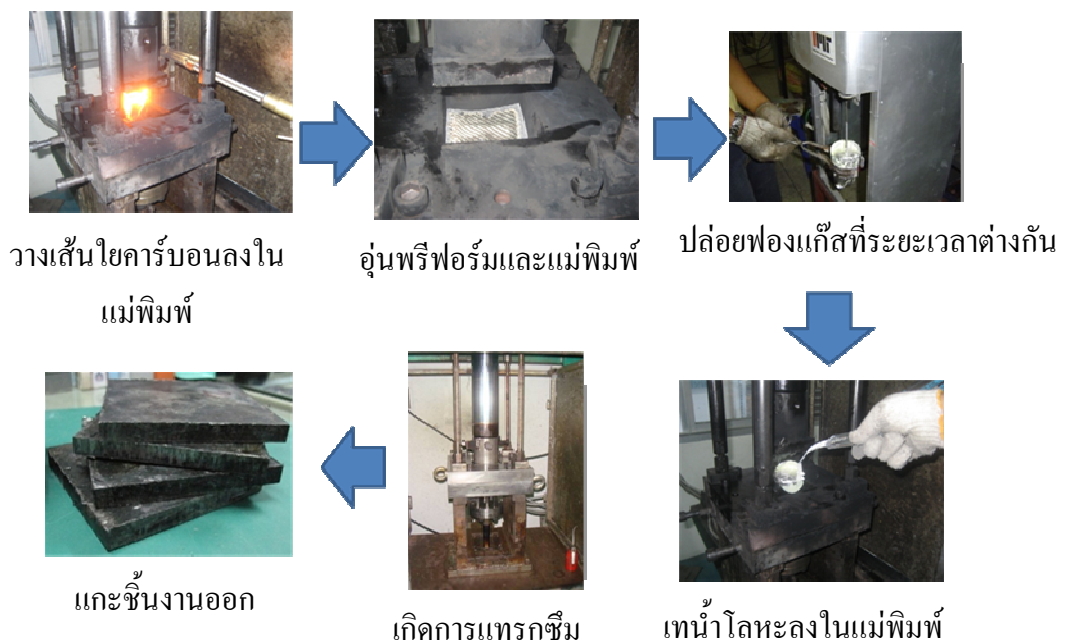
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างขั้นตอนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งเบื้องต้น

**2.3.6.2 การศึกษากระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงต่างกันคือ เส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้ว** เพื่อให้สามารถผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมแบบต่าง ๆ โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งได้อย่างแม่นยำมากขึ้นจึงทำการศึกษาการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมในกลุ่มรีดซึ่งขั้นตอนของการศึกษาจะทำการออกแบบแม่พิมพ์ ระบบฮีตเตอร์ควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์และระบบปลดชิ้นงานขึ้นเพื่อควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ และฟรiformให้มีความสม่ำเสมอ ในขั้นนี้จะทำการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม 2 แบบ คือ การผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว โดยตัวแปรต่าง ๆ กำหนดให้คงที่ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ตัวอย่างกระบวนการที่ประยุกต์ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 2.15



ตารางที่ 2.4 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้ว

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075	
ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรผกผัน
1. อุณหภูมิแท่งกราไฟต์	1. ชนิดของส่วนเสริมแรง
2. อุณหภูมิแม่พิมพ์	2. ปริมาณของเส้นใยคาร์บอนแบบถัก
3. อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว	
4. แม่พิมพ์ขนาด 10 x 10 cm	
5. สัดส่วนของแข็งเริ่มต้น	
6. ปริมาณน้ำโลหะ	



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างขั้นตอนในการผลิตวัสดุผสมโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

### 2.3.7 ขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน

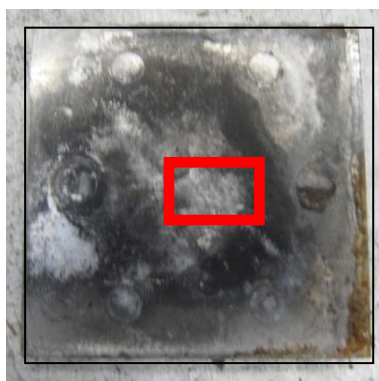
กระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ที่นำมาใช้ปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ในงานวิจัยนี้คือกระบวนการ T6 โดยทำการอบละลาย (Solution Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 480 °C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง เพื่อให้ธาตุผสมละลายเข้าไปเป็นเนื้อเดียวกันกับธาตุหลักมากยิ่งขึ้น จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทำการชุบเย็นในน้ำ (Water Quenching) เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ธาตุผสมถูกกักอยู่ภายในเนื้อของธาตุหลัก



ก่อนนำชิ้นงานไปป้อม (Artificially Aged) ที่อุณหภูมิ  $170^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ช่วยเร่งให้เกิดการพอร์มของเฟสใหม่เร็วขึ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและช่วยปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปให้ดีขึ้น

### 2.3.8 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

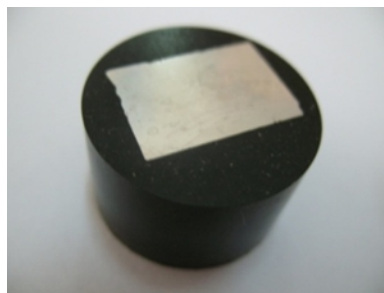
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก และฉนวนใยแก้ว ที่ได้จากการทดลอง ในขั้นตอนนี้จะนำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งมาตัดชิ้นงานจากบริเวณตรงกลางชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 บริเวณที่ตัดชิ้นงานมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

จากนั้นชิ้นงานดังกล่าวจะถูกเตรียมเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) ขึ้นรูปชิ้นงานแบบร้อน (Hot Mounting) โดยใช้ผงเบกาไลต์ (Bakelite) ใส่ลงไปแบบอัดแล้ว จากนั้นใช้ความร้อนและความดันเพื่อให้ผงเบกาไลต์เกิดการแข็งตัวติดกับชิ้นงานตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปและเครื่องที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานแบบร้อนมีลักษณะดังรูปที่ 2.17
- 2) นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 1 มาทำการขัดหยาบ (Grinding) ด้วยกระดาษทราย (SiC Paper) เบอร์ P320 P600 P800 P1000 P1200 และ P2500 ตามลำดับ
- 3) จากนั้นทำการขัดละเอียด (Polishing) ชิ้นงาน โดยทำการเริ่มต้นการขัดละเอียดด้วยผ้าหยาบ (Cloth Pad) ร่วมกับผงขัดอะลูมินาขนาด  $5\ \mu\text{m}$  เมื่อรอยขัดจากกระดาษทรายหมดไปแล้วจึงทำการขัดโดยใช้ผงขัดอะลูมินาขนาด  $1\ 0.3$  และ  $0.05\ \mu\text{m}$  ตามลำดับ โดยเครื่องขัดที่ใช้ในกระบวนการขัดละเอียดและขัดหยาบแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแบบร้อน



รูปที่ 2.18 เครื่องซัดซัดละเอียดและซัดหยาบที่ใช้ในงานวิจัย

- 4) ทำการซัดชิ้นรอยผิวหน้าของชิ้นงาน โดยใช้น้ำยาคัดซึ่งมีชื่อเรียกว่า Paulton Reagent โดยประกอบไปด้วย กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ความเข้มข้น 48% ปริมาณ 2 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) 3 มิลลิลิตร กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) 20 มิลลิลิตร ผสมใน น้ำกลั่น 175 มิลลิลิตร โดยนำชิ้นงานมาจุ่มลงในสารละลาย Paulton Reagent เป็นเวลา ประมาณ 8 - 10 วินาที นำชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำสะอาด เป่าให้ผิวหน้าชิ้นงานให้แห้ง ด้วยเครื่องเป่าลม
- 5) นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) เพื่อถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและระบบคอมพิวเตอร์

### 2.3.9 การวิเคราะห์ธาตุประกอบของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้วโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

กระบวนการวิเคราะห์จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อวิเคราะห์ธาตุประกอบของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้ว เพื่อศึกษาธาตุประกอบระหว่างวัสดุเนื้อหลักกับวัสดุผสมเสริมแรงซึ่งลักษณะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 2.20

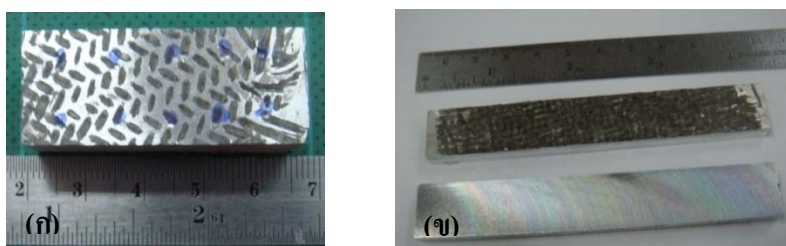


รูปที่ 2.20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 5800

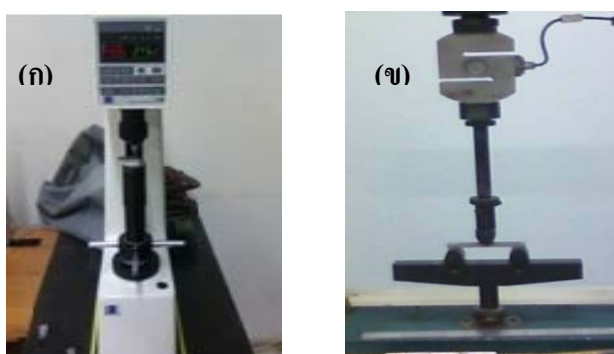
2.3.10 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้ว การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมในงานวิจัยนี้จะผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรง 2 ชนิดคือ

1. วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก
2. วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว

การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 2 แบบ ชิ้นงานจะถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ ชิ้นงานวัสดุผสมที่ได้จากกระบวนการแทรกซึมโดยตรงและชิ้นงานวัสดุผสมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน ชิ้นงานทั้งคู่จะนำไปตัดเพื่อทดสอบความแข็ง (Hardness test) และการดัด (Bending test) ให้มีขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาคือ 15x50x10 และ 15x100x6 มิลลิเมตร ตามลำดับ ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแสดงดังรูป 3.21 ซึ่งรูปที่ 3.21(ก) ชิ้นงานทดสอบความแข็งและรูปที่ 3.21(ข) ชิ้นงานทดสอบการดัด จากนั้นชิ้นงานจะถูกนำไปวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกล B และการดัดแบบ 3 จุด (3 Point Bending) เพื่อวัดค่าแรง ความแข็งแรงต่อการดัดโค้งผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ลักษณะของเครื่องมือทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.22 ซึ่งรูปที่ 3.22(ก) เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell สเกล B และรูปที่ 3.22(ข) เครื่องทดสอบการดัดโค้งแบบ 3 จุด



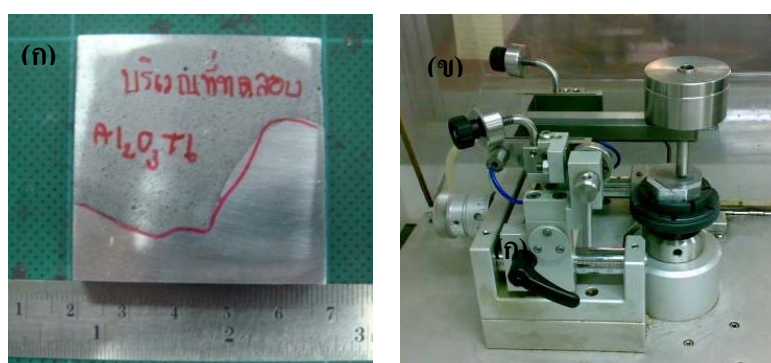
รูปที่ 3.21 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ (ก) ทดสอบความแข็ง (ข) ทดสอบการดัด



รูปที่ 3.22 เครื่องมือทดสอบ (ก) ความแข็ง Rockwell สเกล B และ (ข) เครื่องทดสอบการดัดแบบ 3 จุด

นอกจากนี้จะนำชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วไปทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ (Wear test) เพื่อศึกษาศึกษาค่าอัตราการสึกหรอและความแข็งของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรงก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน ซึ่งลักษณะชิ้นงานทดสอบ

แสดงดังรูปที่ 2.23 และลักษณะเครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอด้วยเครื่องไทรบอมิเตอร์ (Pin on disc tribometer) และความแข็งแสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งในการทดสอบโดยเครื่องที่ใช้เป็นของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทดสอบโดยไม่เติมสารหล่อลื่นและให้แรงในการทดสอบคือ 3 5 และ 7 นิวตัน เป็นระยะทาง 300 เมตร แล้วทำการคำนวณปริมาตรการสึกหรอจากรอยสึกหรอและคำนวณหาค่าอัตราการสึกหรอ (K) จากสมการของ Archard เพื่อเปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานแต่ละสถานะ



รูปที่ 2.23 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ (ก) ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ (ข) เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอไทรบอมิเตอร์

## บทที่ 3

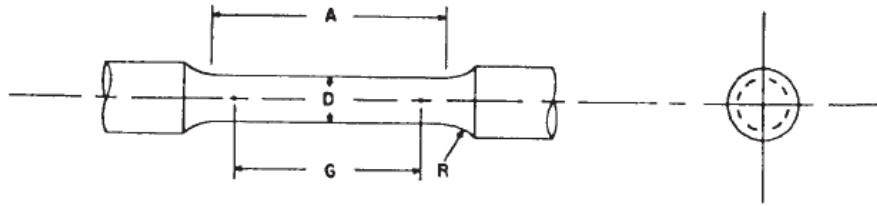
### ผลและการอภิปรายผล

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการผลการทดลองและการอภิปรายผล ซึ่งประกอบไปด้วยเนื้อหาในส่วนของการเลือกวัสดุเนื้อหลัก การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) การวิเคราะห์ปริมาณสัดส่วนของแข็ง ผลของการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง ผลของการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและจนวนใยแก้วโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง อิทธิพลของปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถักที่เพิ่มขึ้นต่อสมบัติทางกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรงก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน ความต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยจนวนใยแก้วเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน ผลของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน ผลการวิเคราะห์เฟสของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

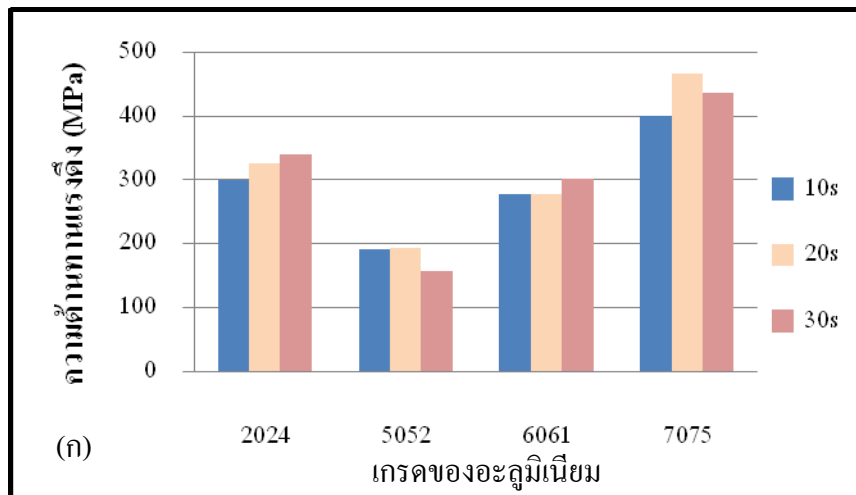
#### 3.1 การเลือกวัสดุเนื้อหลัก

การทดสอบสมบัติทางกลในส่วนนี้ได้รับความร่วมมือจากศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติเพื่อทดสอบสมบัติการดึง (Tensile test) จากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมกลุ่มรีดด้วยกระบวนการหล่ออัดขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งโดยปล่อยฟองแก๊สที่เวลาต่างกันคือ 10 20 และ 30 วินาทีตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานไปปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (ดังแสดงในบทที่ 2 ตารางที่ 2.2) และกลึงชิ้นงานให้มีขนาดความยาว Gauge length เส้นผ่านศูนย์กลางและรัศมีความโค้งเท่ากับ 62.5 12.5 และ 9 mm ตามลำดับ ซึ่งตรงตามมาตรฐาน ASTM B557M ตัวอย่างแบบชิ้นงานทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.1 จากนั้นชิ้นงานจะถูกส่งไปทดสอบการดึง (Tensile test) ที่ศูนย์

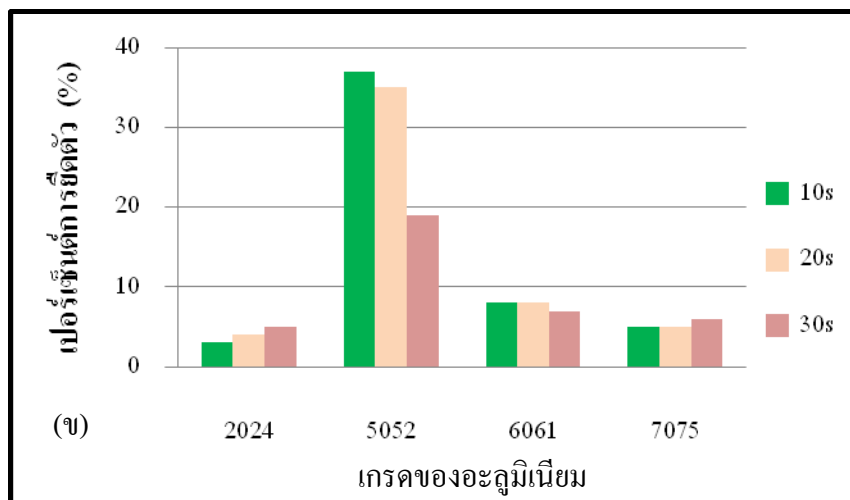
เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ เพื่อวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ของอะลูมิเนียมกลุ่มรีดเกรด 2024 5052 6061 และ 7075 ตามลำดับ พบว่าผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวแสดงดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ลักษณะแบบชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM B557M



(ก) ความต้านทานแรงดึง



(ข) เปอร์เซนต์การยืดตัว

รูปที่ 3.2 กราฟแสดงผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอะลูมิเนียมผสมกลุ่มรีด ได้แก่ 2024 5052 6061 และ 7075

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอะลูมิเนียมผสม  
กลุ่มรีดเกรด 2024 5052 6061 และ 7075 ตามลำดับ

อะลูมิเนียม เกรด	ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) (MPa)			เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)		
	10s	20s	30s	10s	20s	30s
2024	299	326	340	3	4	5
5052	191	193	158	37	35	19
6061	277	278	301	8	8	7
7075	400	467	436	5	5	6

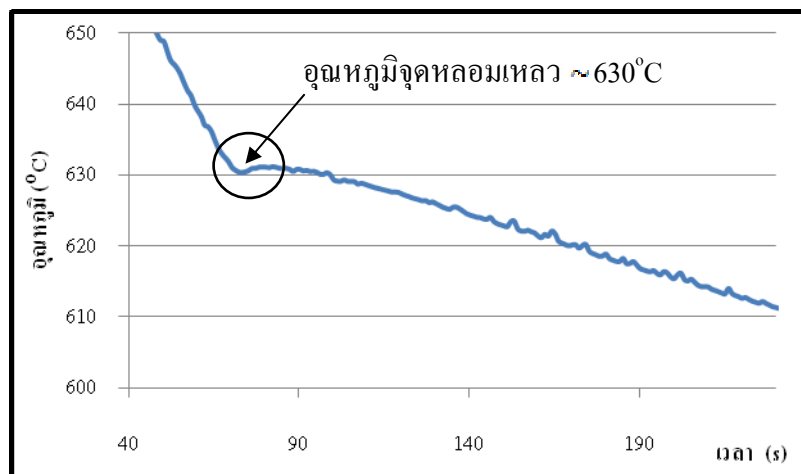
ผลการทดสอบการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของอะลูมิเนียมเกรด 2024 5052 6061 และ 7075 ตามลำดับ ที่เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 10 20 และ 30 วินาทีตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 พบว่าอะลูมิเนียมกลุ่มรีดที่มีค่าความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าสูงสุดคือ อะลูมิเนียมกลุ่มรีดเกรด 7075 ที่เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 20 วินาทีเท่ากับ 467 MPa และ 5% ตามลำดับ ในกระบวนการเลือกอะลูมิเนียมกลุ่มรีดเพื่อใช้เป็นวัสดุเนื้อหลักในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมจำเป็นต้องเลือกอะลูมิเนียมกลุ่มรีดที่มีค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุดเพื่อใช้ผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีคุณภาพ ดังนั้นในขั้นตอนี้จึงเลือกอะลูมิเนียมกลุ่มรีดเกรด 7075 เป็นวัสดุเนื้อหลักในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงชนิดต่าง ๆ คือ เส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้ว เพื่อผลิตชิ้นงานวัสดุผสมที่มีคุณภาพสูง

### 3.2 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะที่ใช้ในงานวิจัย

จากการเลือกวัสดุเนื้อหลักเพื่อใช้ผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมในหัวข้อ 3.1 พบว่าวัสดุเนื้อหลัก (Matrix) ที่ใช้ในงานวิจัยคืออะลูมิเนียมผสมกลุ่มรีดเกรด 7075 จากผลการวิเคราะห์ทางความร้อนเส้นการเย็นตัวของ (Cooling curve) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเกรด 7075 ภายในเข้า สदनเลสโดยไม่ผ่านกระบวนการ GISS พบว่าอุณหภูมิการเย็นตัวและเวลาที่เปลี่ยนไประหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะแสดงดังเส้นกราฟของการเย็นตัวดังรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวจะเริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิของเหลว (Liquidus Temperature,  $T_L$ ) มีค่าประมาณ  $630^{\circ}\text{C}$



จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองทำให้สามารถประมาณช่วงเวลาในการปล่อยฟองแก๊สเพื่อเตรียมอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งโดยการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะ โดยในงานวิจัยจะเริ่มทำการปล่อยฟองแก๊สเหนือเส้นอุณหภูมิของเหลวประมาณ 8 - 10°C จากกราฟเราสามารถเลือกอุณหภูมิประมาณ 638 - 640°C เป็นจุดเริ่มต้นของการปล่อยฟองแก๊สเพื่อเตรียมโลหะกึ่งของแข็งหรือสร้างเฟสของแข็งเริ่มต้น (Primary Solid Particle)

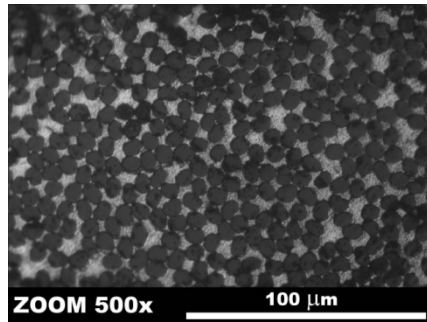


รูปที่ 3.3 กราฟแสดงเส้นการเย็นตัว (Cooling curve) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 เมื่อไม่ผ่านกระบวนการ GISS ที่นำมาใช้ในกระบวนการวิจัย

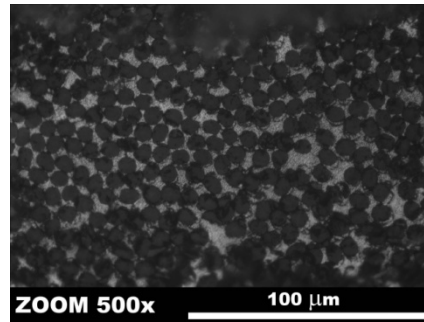
### 3.3 การคำนวณค่าความดันเริ่มต้นของน้ำโลหะ (Threshold pressure)

ค่าความดันเริ่มต้น คือ ค่าความดันน้อยที่สุดที่น้ำโลหะเหลวใช้ในการแทรกซึมเข้าไประหว่างช่องว่างของเซรามิกพอร์ซเลน ถ้าความดันเริ่มต้นมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงต้านทานภายในระหว่างช่องว่างของเซรามิกพอร์ซเลนอาจทำให้การไหลของน้ำโลหะหยุดชะงักและน้ำโลหะจะเกิดการแข็งตัวก่อนเข้าแทรกระหว่างช่องว่างของเซรามิกพอร์ซเลนได้เพียงพอ ซึ่งสามารถคำนวณค่าจากสมการ 1.1 ของบทที่ 1 ตัวอย่างผลการคำนวณหาค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกซึมเข้าไประหว่างช่องว่างของเซรามิกพอร์ซเลนซึ่ง  $\lambda$  คือ ค่าปัจจัยที่ถูกต้องสำหรับสภาพผิวหน้าและความคลาดเคลื่อนของทรงกลม  $\gamma_{lv}$  คือ ความตึงผิวหน้าของน้ำโลหะ  $V_p$  คือ ค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูป  $D_p$  คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเซรามิก และ  $\theta$  คือ มุมระหว่างขอบของของเหลวกับของแข็ง โดยที่  $\lambda = 3.00$ ,  $\gamma_{lv} = 0.86$  N/m,  $\theta = 180^\circ$ C,  $D_p = 5$  และ  $15$   $\mu$ m,  $V_p = 0.81$  0.82 0.93 และ 0.58 ซึ่งค่าความ

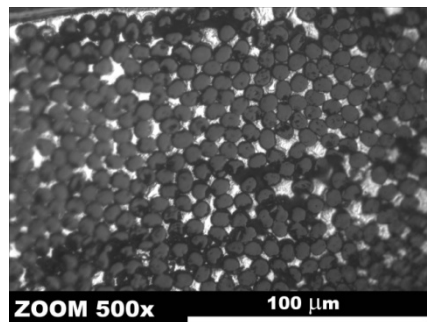
ต้นเริ่มต้นที่ได้ แสดงดังตารางที่ 3.2 ซึ่งค่า  $V_p$  หาจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image Tool ดังแสดงในรูปที่ 3.4



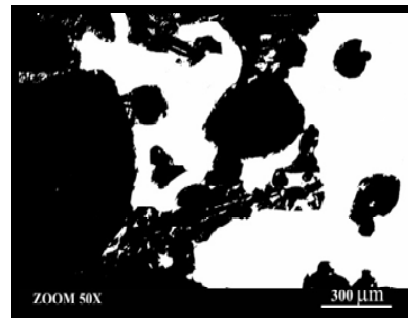
(ก) เส้นใยคาร์บอน 2 แผ่น



(ข) เส้นใยคาร์บอน 4 แผ่น



(ค) เส้นใยคาร์บอน 6 แผ่น



(ง) ฉนวนใยแก้ว

รูปที่ 3.4 โครงสร้างจุลภาค ที่ได้จากการทำ Threshold ด้วยโปรแกรม Photoshop และวิเคราะห์หาค่า  $V_p$  ด้วยโปรแกรม Image Tool

ตารางที่ 3.2 ค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

ส่วนเสริมแรง	$D_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$V_p$	Threshold pressure (MPa)
เส้นใยคาร์บอน	5	0.81	13.198
	5	0.82	14.104
	5	0.93	41.133
ฉนวนใยแก้ว	15	0.58	1.425

จากผลการคำนวณหาค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกเข้าไประหว่างช่องว่างของเซรามิกพรีฟอร์มดังแสดงในตารางที่ 3.2 พบว่าหากค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าน้อยและค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกมีค่ามากยิ่งทำให้ค่าความดัน

เริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกซึมเข้าไประหว่างช่องว่างของเซรามิกพรีฟอร์มมีค่ามากขึ้น เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมจะใช้ความดันในการขึ้นรูปประมาณ 80 MPa นั่นคือน้ำโลหะอะลูมิเนียมเหลวมีค่าความดันเพียงพอที่จะเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างของเซรามิกพรีฟอร์มได้ ในส่วนนี้เฉพาะค่าความดันเริ่มต้นเท่านั้น ซึ่งในการแทรกซึมยังมีค่าความยาวการแทรกซึม (L) ในสมการที่ 1.2 หน้า 9 ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและค่า K ด้วยเพื่อให้เกิดการแทรกซึมที่สมบูรณ์ทั้งชิ้นงาน

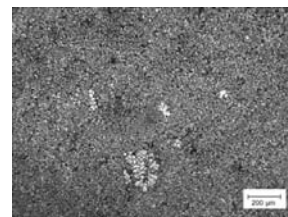
### 3.4 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งที่เตรียมได้จากกระบวนการ GISS

จากผลการทดลองหาปริมาณสัดส่วนแข็งเริ่มต้นของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อใช้เป็นวัสดุเนื้อหลักในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม จะทำการปล่อยฟองแก๊สลงไปใต้น้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่ตักจากเบ้าแกรไฟต์ปริมาณ 300 กรัมในกระบวยตัก (Ladle) ที่ทำจากสแตนเลส จากนั้นใช้แม่พิมพ์ทองแดงและปั๊มสุญญากาศเพื่อเก็บตัวอย่างของน้ำโลหะที่ปล่อยฟองแก๊สที่ระยะเวลาต่างกันคือ 3 5 10 20 และ 30 วินาที ตามลำดับ เมื่อได้ชิ้นงานตัวอย่างแล้วจึงนำไปตัดบริเวณตรงกลางดังรูปที่ 3.5 และถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณเฟสของแข็งด้วยโปรแกรม Photoshop และ Image Tool ตามลำดับ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.6 พบว่าที่ระยะเวลาการปล่อยฟองแก๊ส 3 5 10 20 และ 30 วินาทีตามลำดับ ให้สัดส่วนของแข็งเท่ากับ 1 5 18 22 และ 22 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

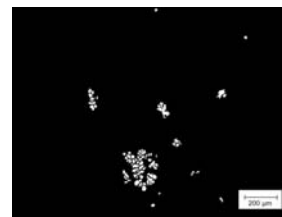
จากผลการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งที่ได้จากการทดลองสรุปได้ว่าเมื่อเวลาในการปล่อยฟองแก๊สนานขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณเฟสของแข็งเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้นและจะมีค่าคงที่เท่ากับ 22% ที่เวลาในการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 30 วินาที ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการปล่อยฟองแก๊สและสัดส่วนของแข็งที่เพิ่มขึ้นซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีที่ว่า เมื่อเวลาในการปล่อยฟองแก๊สเพิ่มขึ้นปริมาณเฟสของแข็งเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าสัดส่วนของแข็งที่มากกว่า 22% น้ำโลหะจะมีเฟสของแข็งเริ่มต้นสูงเมื่อนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งทำให้แทรกซึมได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงควรเลือกการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 1 - 22%



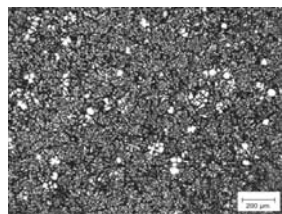
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานจากแม่พิมพ์ทองแดงและบริเวณตรงกลางเพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



3s = 1%



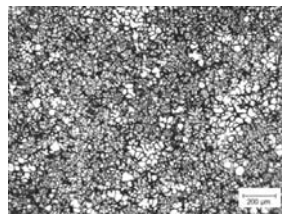
3s = 1%



5s = 5%



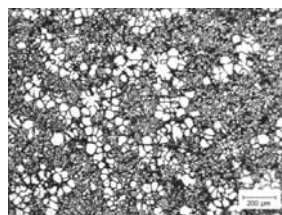
5s = 5%



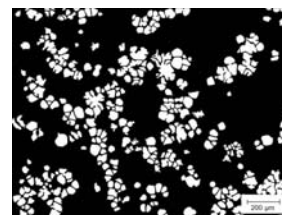
10s = 18%



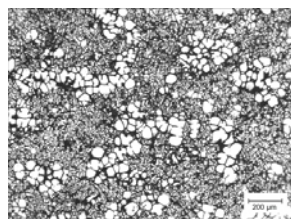
10s = 18%



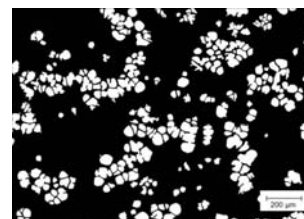
20s = 22%



20s = 22%

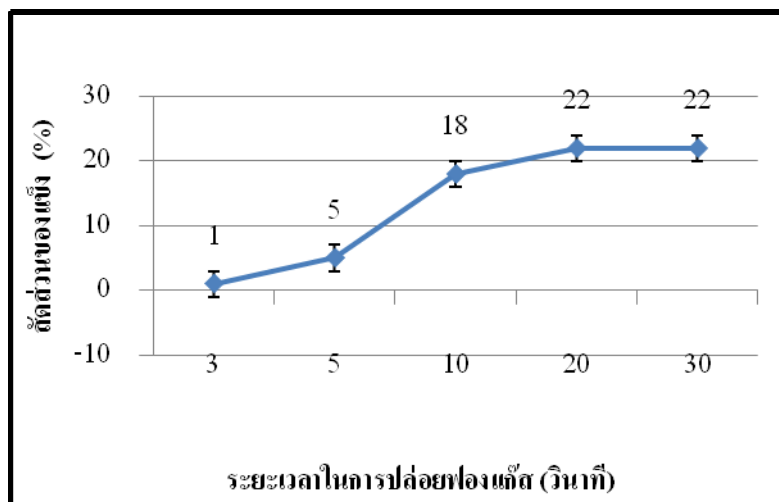


30s = 22%



30s = 22%

รูปที่ 3.6 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ได้ก่อนและหลังทำ Threshold ด้วยโปรแกรม Photoshop และวิเคราะห์หาปริมาณสัดส่วนของแข็งด้วยโปรแกรม



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปล่อยแก๊สและปริมาณสัดส่วนของแก๊สที่เกิดขึ้นของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.5 การศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของกระบวนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด

#### 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

ขั้นตอนการทดลองผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเบื้องต้น ในงานวิจัยจะใช้ อะลูมิเนียมเกรด 356 เป็นวัสดุเนื้อหลักและใช้เส้นใยคาร์บอนแบบถักเป็นวัสดุเสริมแรง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมในการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เหมาะสม โดยชุดทดสอบจะประกอบไปด้วย รางเทน้ำโลหะ แม่พิมพ์กลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว และเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 20 ตันสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก ในขั้นตอนการศึกษากระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งเบื้องต้น ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ 1.ปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นต่างกันคือ 5 10 20 และ 30% ตามลำดับ และ 2.ปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถักที่ต่างกันคือ 2 4 8 12 และ 16 แผ่นตามลำดับ ซึ่งกระบวนการทดลองเบื้องต้นได้แก่ กระบวนการขึ้นรูป การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และการทดสอบสมบัติเชิงกล ซึ่งมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 3.5.1 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก

สำหรับการทดลองศึกษาการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเบื้องต้นโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งเพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ขั้นต้นจะทำการควบคุมตัวแปรในการเตรียมโลหะแบบกึ่งของแข็งและตัวแปรคงที่

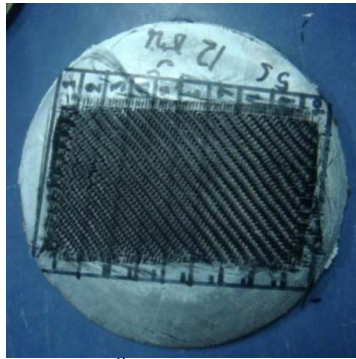
สำหรับขึ้นรูป เช่น ปริมาณน้ำโลหะ ระยะเวลาในการปล่อยฟองแก๊ส อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิพรีฟอร์มและปริมาณส่วนเสริมแรงที่ใช้ในการทดลอง ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.3 กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมแสดงดังรูปที่ 3.8 และลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 กระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งเบื้องต้น

ตารางที่ 3.3 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งเบื้องต้น

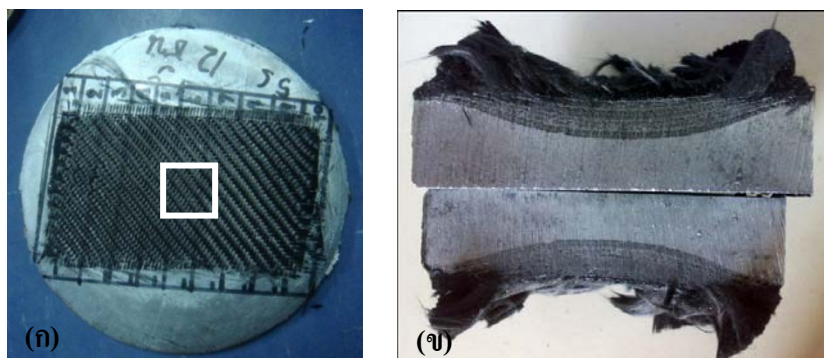
ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	รายละเอียด
1. ปริมาณน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว	ประมาณ 300 กรัม
2. อุณหภูมิแท่งกราไฟต์	50°C
3. อุณหภูมิเริ่มปล่อยฟองแก๊ส	620°C (Al-356)
4. สัดส่วนของแข็งที่เตรียมได้	5 10 20 และ 30%
5. อุณหภูมิแม่พิมพ์	270 - 300°C
6. อุณหภูมิพรีฟอร์ม	220 - 300°C
7. ความดันที่ใช้ในการอัด	14 MPa
8. ระยะเวลาในการแทรกซึม	20 วินาที
9. จำนวนชั้นเสริมแรง	2 4 8 12 และ 16 แผ่น



รูปที่ 3.9 ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

### 3.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก

ในการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน เบื้องต้นได้ทำการศึกษาตัวแปรเพื่อดูพฤติกรรมการแทรกซึมเบื้องต้น โดยในที่นี้จะนำเสนอโครงสร้างจุลภาคในกรณีที่มีปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถักแตกต่างกันคือ 2 4 8 12 และ 16 แผ่นตามลำดับ หลังจากได้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งเบื้องต้น แสดงดังรูปที่ 3.9 (ก) จะตัดบริเวณตรงกลางของชิ้นงานมาทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันเมื่อปริมาณชั้นเส้นใยคาร์บอนแบบถักเพิ่มขึ้นที่สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 5% ซึ่งลักษณะชิ้นงานที่ไม่เกิดการแทรกซึมมีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยของ T.Shalu (2009) ดังรูปที่ 3.10(ข)

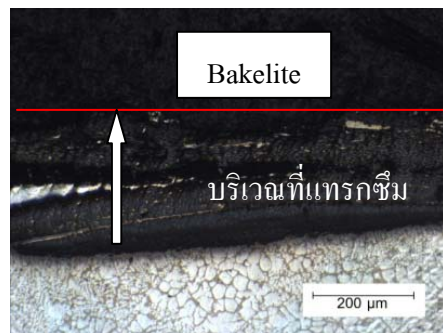


รูปที่ 3.10 แสดงบริเวณที่นำมาตัดดูโครงสร้างจุลภาค

ผลจากการทดลองวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเบื้องต้น พบว่าที่ปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถักเพิ่มขึ้นการแทรกซึมของน้ำโลหะไม่สามารถแทรกผ่านช่องว่างของเส้นใย



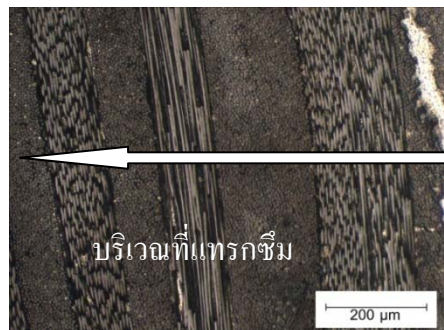
คาร์บอนแบบถักได้หมด ส่งผลให้เส้นใยคาร์บอนบางส่วนไม่เกิดการแทรกซึม ซึ่งลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักแสดงดังรูปที่ 3.11 จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเบื้องต้น พบว่าที่ปริมาณเส้นใยคาร์บอน 2 และ 4 แผ่น จะให้การแทรกซึมที่ค่อนข้างสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ปริมาณเส้นใยคาร์บอน 8 12 และ 16 แผ่น จะให้การแทรกซึมที่ค่อนข้างไม่สมบูรณ์นัก เนื่องจากเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนมีปริมาณเพิ่มขึ้น การแทรกซึมของน้ำโลหะจะทำได้ยากขึ้นทำให้มีบางบริเวณไม่เกิดการแทรกซึม



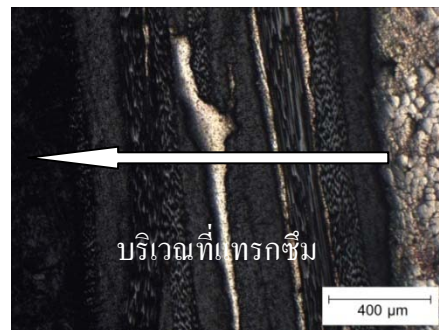
(ก) อะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน 2 แผ่น



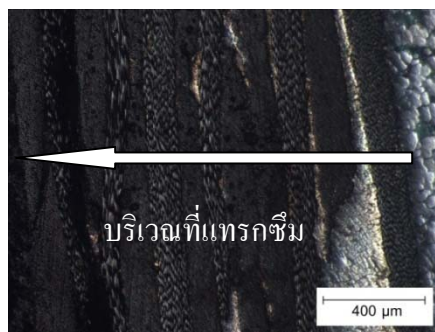
(ข) อะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน 4 แผ่น



(ค) อะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน 8 แผ่น



(ง) อะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน 12 แผ่น



(จ) อะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน 16 แผ่น

รูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมที่ปริมาณส่วนเสริมแรงแตกต่างกันเท่ากับ 2 4 8 12 และ 16 แผ่น ตามลำดับ



นอกจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเบื้องต้นของชิ้นงานวัสดุผสมที่ปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถักต่างกันแล้ว ชิ้นงานบางส่วนจะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติเชิงกลเบื้องต้นด้วย ในที่นี้จะนำมาทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์การยืดตัวและความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงาน โดยผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักแสดงดังตารางที่ 3.4 พบว่าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงมากกว่า 4 ชั้นและที่สัดส่วนของแข็งมากกว่า 10% การแทรกซึมที่ได้ไม่สมบูรณ์อาจเนื่องมาจากปัจจัยหลายอย่างคือความยาวการแทรกซึม อุณหภูมิ และค่า K ทำให้ชิ้นงานที่ได้แทรกซึมได้บางส่วนหรือไม่เกิดการแทรกซึม

ตารางที่ 3.4 ผลจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก

ชิ้นงาน	เงื่อนไขในการขึ้นรูป		ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)	ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง (MPa)	การแทรกซึม
	สัดส่วนของแข็ง	จำนวนชั้นเสริมแรง				
Al 356-0	5%	0	187.4 ± 6.7	24.5 ± 0.3	277.9 ± 5.1	-
Al 356-2P	5%	2	166.1 ± 7.7	24.7 ± 0.5	371.8 ± 5.7	Complete
Al 356-4P	5%	4	197.8 ± 5.4	19.6 ± 0.4	254.6 ± 6.5	Complete
Al 356-4P	10%	4	174.0 ± 6.4	3.6 ± 0.2	249.1 ± 6.8	Complete
Al 356-4P	20%	4	147.8 ± 5.2	3.7 ± 0.5	241.7 ± 4.2	Incomplete
Al 356-4P	30%	4	138.3 ± 6.3	2.5 ± 0.4	204.9 ± 7.3	Incomplete
Al 356-8P	5%	8	140.4 ± 7.3	7.4 ± 0.8	246.6 ± 8.1	Incomplete
Al 356-12P	5%	12	138.3 ± 5.7	8.5 ± 0.6	221.3 ± 7.6	Incomplete
Al 356-16P	5%	16	121.1 ± 8.4	8.4 ± 0.7	208.6 ± 6.4	Incomplete

เมื่อพิจารณาวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักที่ปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถักต่างกันคือ 2 4 8 12 และ 16 แผ่นตามลำดับ พบว่าวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 ที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) มีค่าสูงสุดคือวัสดุผสมเนื้อ

อะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน 4 แผ่นและสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 5% มีค่าเท่ากับ  $197.8 \pm 5.4$  MPa วัสดุผสมที่มีค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งและค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวสูงสุดคือวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน 2 แผ่นและสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 5% มีค่าเท่ากับ  $371.8 \pm 5.7$  MPa และ  $24.7 \pm 0.5$  % ตามลำดับ จากการทดลองจะเห็นว่าเมื่อปริมาณส่วนเสริมแรงเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์การยึดตัวและค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณเส้นใยคาร์บอนมีมากเกินไปทำให้เส้นใยคาร์บอนบางส่วนไม่เกิดการแทรกซึม เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกลทำให้เกิดการแยกชั้น (delaminate) ระหว่างเนื้อหลักและส่วนที่เป็นวัสดุผสม แสดงดังรูปที่ 3.12 ต่อมาเมื่อพิจารณาวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน 4 แผ่นที่ปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นแตกต่างกันคือ 5 10 20 และ 30% ตามลำดับ พบว่าวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 ที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์การยึดตัวและค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งสูงสุดคือ วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน 4 แผ่นที่สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 5% มีค่าเท่ากับ  $197.8 \pm 5.4$  MPa  $19.6 \pm 0.4$ % และ  $254.6 \pm 6.5$  MPa ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าที่ปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุได้แก่ ความแข็งแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์การยึดตัวและค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากน้ำโลหะมีความหนืดสูงเมื่อนำไปขึ้นรูปทำให้ น้ำโลหะเกิดการแทรกซึมได้ไม่ดีเท่าที่ควร หรือเส้นใยคาร์บอนบางส่วนไม่เกิดการแทรกซึม ดังนั้นจากการทดลองผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน เพื่อศึกษาปริมาณส่วนเสริมแรงและสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นพบว่าเมื่อปริมาณเสริมแรงและสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมมีแนวโน้มลดลงดังแสดงในรูปที่ 3.13

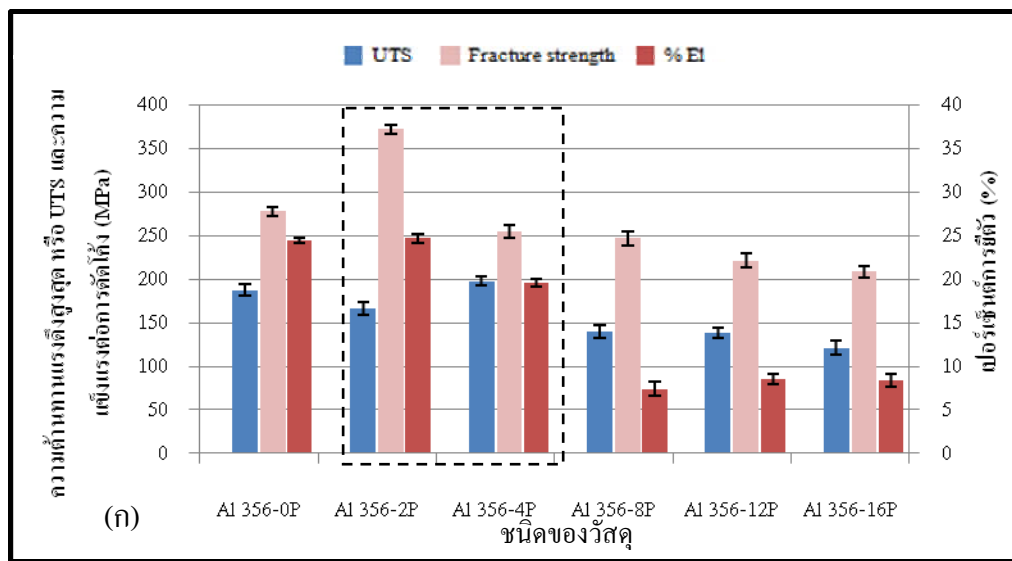


(ก) การแยกชั้นหลังการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยึดตัว

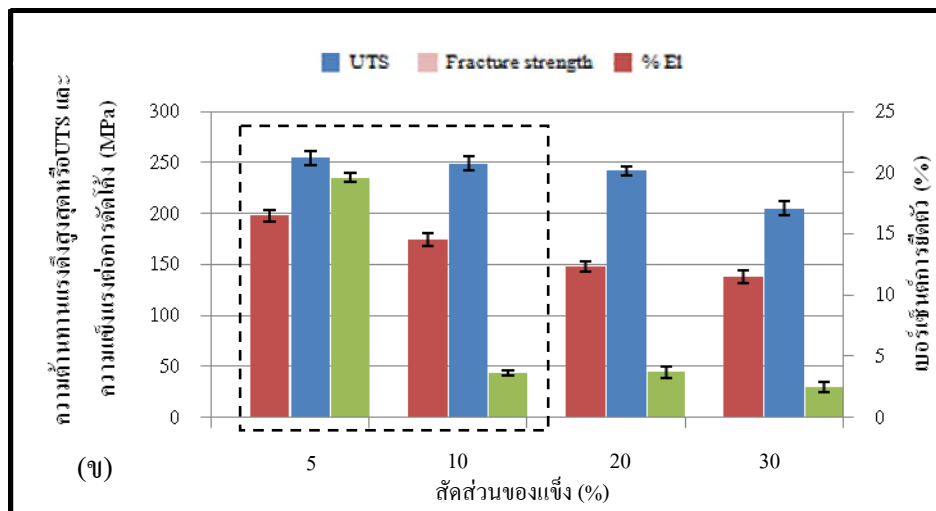


(ข) การแยกชั้นหลังการทดสอบสมบัติความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง  
รูปที่ 3.12 ลักษณะการแยกชั้นของวัสดุผสมหลังผ่านการทดสอบสมบัติ

จากรูปที่ 3.13(ก) พิจารณากรณีของปริมาณส่วนเสริมแรงที่แตกต่างกันคือ 2 4 8 12 และ 16 แผ่นตามลำดับ พบว่าวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ปริมาณส่วนเสริมแรงมากกว่า 4 แผ่น สมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์การยืดตัวและค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งมีแนวโน้มลดลง ส่วนรูปที่ 3.13(ข) กรณีของสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นที่แตกต่างกันคือ 5 10 20 และ 30% ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นมีค่ามากกว่า 10% สมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์การยืดตัวและค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งมีแนวโน้มลดลง



(ก) ปริมาณส่วนเสริมแรงแตกต่างกันคือ 2 4 8 12 และ 16 แผ่น



(ข) สัดส่วนของแข็งต่างกันคือ 5 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 3.13 ผลจากการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เบื้องต้น

อย่างไรก็ตามการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งเบื้องต้นเป็นเพียงกระบวนการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการเท่านั้น ดังนั้นชิ้นงานที่ได้จัดว่ายังไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร เนื่องจากชิ้นงานยังมีการแทรกซึมไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายในชิ้นงานและส่วนเสริมแรงบางส่วนไม่เกิดการแทรกซึมทำให้ผิวไม่สวยงามต้องมีการขัดผิวออกบางส่วนอีกทั้งยังเกิดข้อบกพร่องที่มาจากกระบวนการต่าง ๆ เช่น การอุ่นพรีฟอร์ม และการอุ่นแม่พิมพ์ซึ่งไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอได้ทุกจุด อีกทั้งแม่พิมพ์มีขนาดใหญ่แรงดันอัดให้ชิ้นงานเกิดการแทรกซึมมีค่าน้อยทำให้ชิ้นงานเกิดการแทรกซึมไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าหากต้องการให้น้ำโลหะแทรกซึมในพรีฟอร์มได้ดีควรเลือก 1.สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 5% และ 10% และ 2.ปริมาณส่วนเสริมแรงไม่ควรเกิน 8 แผ่น นอกจากนี้ยังสามารถสรุปตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกลุ่มหล่อดังตารางที่ 3.5 สุดท้ายนี้เนื่องด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้นมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ จึงต้องมีการปรับปรุงกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งต่อไปเช่น แม่พิมพ์ การอุ่นพรีฟอร์มและการอุ่นแม่พิมพ์

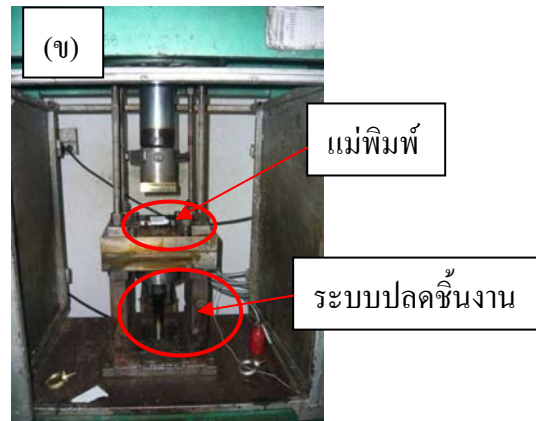
ตารางที่ 3.5 สรุปตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักเบื้องต้น

ตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูป	รายละเอียด
1.วัสดุเนื้อหลัก	อะลูมิเนียมเกรด 356
2.วัสดุเสริมแรง	เส้นใยคาร์บอนแบบถัก
3.ปริมาณน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลว	ประมาณ 400 กรัม
4.อุณหภูมิเริ่มปล่อยฟองแก๊ส	620°C
5.อุณหภูมิแท่งกราไฟต์	50°C
6.ปริมาณส่วนเสริมแรงที่เหมาะสม	2 และ 4 แผ่น
7.ปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เหมาะสม	5 และ 10%
8.กระบวนการที่ใช้	กระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง
9.ความดันอัด	14 MPa
10.อุณหภูมิอุ่นแม่พิมพ์	250 - 300°C
11.อุณหภูมิอุ่นพรีฟอร์ม	240 - 270°C
12.เวลาที่ใช้ในการแทรกซึม	20 วินาที

### 3.6 การศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม 7075 โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งด้วยเครื่องไฮดรอลิก

#### 3.6.1 การออกแบบแม่พิมพ์ ระบบฮีตเตอร์ควบคุมความร้อนของแม่พิมพ์และระบบปลดชิ้นงาน

จากการทดลองผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยแม่พิมพ์แบบกลมขนาด 8 นิ้ว และไม่มีระบบควบคุมความร้อนทำให้พบปัญหาจากการออกแบบแม่พิมพ์ ดังนั้นเพื่อให้ได้ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีการแทรกซึมอย่างสมบูรณ์จำเป็นต้องมีการออกแบบแม่พิมพ์ ระบบฮีตเตอร์ควบคุมความร้อนของแม่พิมพ์และระบบปลดชิ้นงานซึ่งในการออกแบบพบว่าแม่พิมพ์ที่มีขนาดเล็กจะช่วยเพิ่มแรงดันกดอัด (Pressure) ให้กับชิ้นงานได้ ระบบฮีตเตอร์ช่วยควบคุมความร้อนของแม่พิมพ์ให้มีความสม่ำเสมอและระบบปลดชิ้นงานช่วยให้ปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย ใช้เวลาน้อย สามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่องซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.14(ก) ส่วนแม่พิมพ์และระบบปลดชิ้นงานแสดงดังรูป 3.14(ข)



(ก) ระบบฮีตเตอร์ควบคุมความร้อน (ข) แม่พิมพ์และระบบปลดชิ้นงาน

รูปที่ 3.14 ชุดอุปกรณ์สำหรับใช้ผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

#### 3.6.2 การแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

ในขั้นตอนของการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองโดยอาศัยผลการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก ซึ่งพบว่าแม่พิมพ์มีผลต่อความดันอัดเริ่มต้นที่จะทำให้น้ำโลหะแทรกซึมในช่องว่างของฟริฟอร์ม และความร้อนของฟริฟอร์มมีผลต่อการแข็งตัวของน้ำโลหะก่อนการแทรกซึม จากการศึกษาเบื้องต้นของการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด

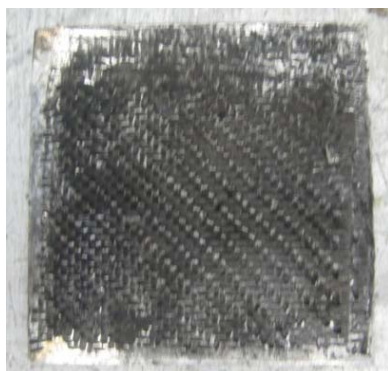
356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักทำให้สามารถสรุปตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งได้ดังตารางที่ 3.5 จึงมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรบางตัวคือ 1.ปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถักเลือกใช้ที่ 2 4 และ 6 แผ่น และ 2.ปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เลือกใช้คือน้อยกว่า 10%

ต่อมาเป็นขั้นตอนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 แสดงดังรูปที่ 3.15 และจากการศึกษากระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 สามารถสรุปตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองขึ้นรูปดังแสดงในตารางที่ 3.6 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อประยุกต์ใช้แม่พิมพ์ที่มีขนาด 10x10 เซนติเมตร ระบบฮีตเตอร์ควบคุมความร้อนของแม่พิมพ์และระบบปลดชิ้นงานสามารถควบคุมความร้อนของพรีฟอร์มให้มีความสม่ำเสมอ ความดันที่ใช้ในการอัดมีค่าเพิ่มขึ้นและสามารถปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น ช่วยลดระยะเวลาการทำงานและผลิตชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 3.16

ตารางที่ 3.6 สรุปตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075

เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว

ตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูป	รายละเอียด
1. วัสดุเนื้อหลัก	อะลูมิเนียมเกรด 7075
2. วัสดุเสริมแรง	เส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้ว
3. ปริมาณน้ำอะลูมิเนียมหล่อเหลว	ประมาณ 300 กรัม
4. อุณหภูมิเริ่มปล่อยฟองแก๊ส	640°C
5. อุณหภูมิแห้งกราไฟต์	50°C
6. ปริมาณส่วนเสริมแรงที่เหมาะสม	2 4 และ 6 แผ่น
7. ปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เหมาะสม	1 - 10%
8. กระบวนการที่ใช้	กระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง
9. ความดันอัด	80 MPa
10. อุณหภูมิอุ่นแม่พิมพ์	300°C
11. อุณหภูมิอุ่นพรีฟอร์ม	260 - 290°C



(ก) อะลูมิเนียมเกรด 7075/เส้นใยคาร์บอนแบบถัก (ข) อะลูมิเนียมเกรด 7075/คานวนใยแก้ว

รูปที่ 3.16 ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

### 3.6.3 การวิเคราะห์ผลจากการแทรกซึมของน้ำโหละในสถานะกึ่งของแข็งของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075

จากการทดลองผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 ด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง ในกระบวนการขึ้นรูปน้ำจะต้องอยู่ในสถานะกึ่งของแข็งที่มีปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 1 - 10% ซึ่งในกระบวนการแทรกซึมที่เกิดขึ้นของน้ำโหละที่แทรกซึมเข้าไประหว่างช่องว่างของพรีฟอร์มคือเฟสของเหลวและเฟสของแข็งเริ่มต้นที่มีขนาดเล็กสามารถทะลุผ่านช่องว่างไปได้และเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์

1. การแทรกซึมของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก



เมื่อพิจารณาชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักที่จำนวนชั้นต่างกันแสดงดังรูปที่ 3.17 เมื่อขยายเข้าไปใกล้ชิ้นงานจะเห็นว่าจำนวนชั้นเสริมแรงเพิ่มขึ้นการแทรกซึมจะไม่ครอบคลุมผิวของเส้นใยคาร์บอน เนื่องจากแรงดันไม่เพียงพอที่จะเกิดการแทรกซึมในช่องว่างของเส้นใยคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 3.18 อีกทั้งบริเวณด้านบนที่สัมผัสกับแรงกดจะมีการเติมเต็มของน้ำโลหะที่ดีกว่าบริเวณที่อยู่ด้านล่าง แสดงว่าน้ำโลหะจะเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะไหลถึงด้านล่างของเส้นใยคาร์บอนนอกจากนี้เมื่อพิจารณาด้านผิวหน้าของชิ้นงานจะเห็นว่าลักษณะการแทรกซึมบริเวณเส้นใยคาร์บอนแบบถักมีความแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 3.19 จากการสังเกตด้วยตาพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถักเพิ่มขึ้นการแทรกซึมของน้ำโลหะไม่ค่อยสมบูรณ์หรือมีบางส่วนไม่เกิดการแทรกซึม



(ก) อะลูมิเนียมเกรด 7075/เส้นใยคาร์บอน 2 แผ่น

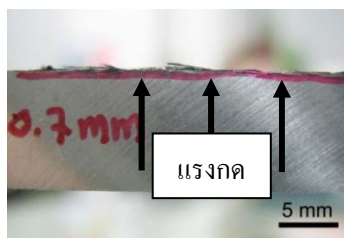


(ข) อะลูมิเนียมเกรด 7075/เส้นใยคาร์บอน 4 แผ่น

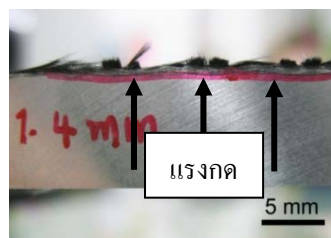


(ค) อะลูมิเนียมเกรด 7075/เส้นใยคาร์บอน 6 แผ่น

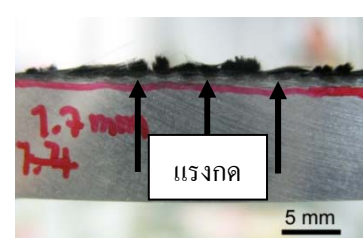
รูปที่ 3.17 ภาพตัดขวางของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักที่ปริมาณส่วนเสริมแรงแตกต่างกัน



(ก) Al 7075/CF 2P



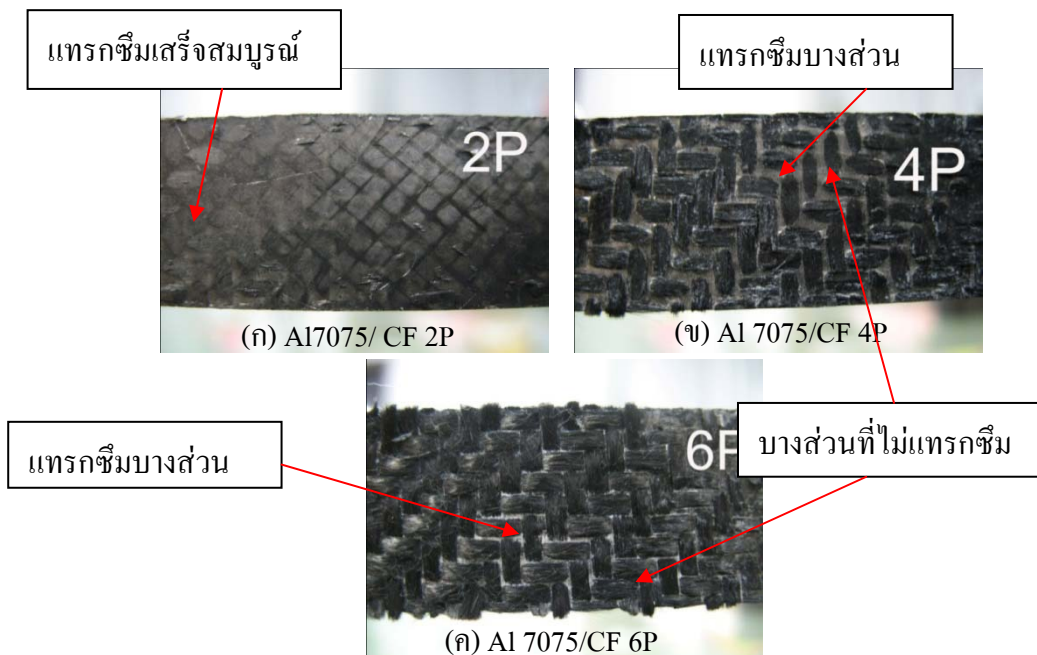
(ข) Al 7075/ CF 4P



(ค) Al 7075/ CF 6P

รูปที่ 3.18 ภาพตัดขวางของวัสดุผสมระดับมหภาค (ก) Al 7075/ CF 2P (ข) Al 7075/ CF 4P และ (ค) Al 7075/ CF 6P

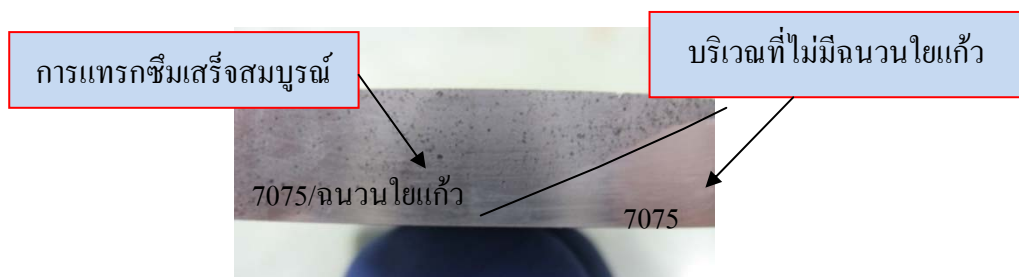




รูปที่ 3.19 ภาพผิวหน้าของวัสดุผสมระดับมหภาค (ก) Al 7075/ CF 2P (ข) Al 7075/ CF 4P และ (ค) Al 7075/ CF 6P

## 2. การแทรกซึมของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว

เมื่อพิจารณาวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว แสดงดังรูปที่ 3.20 จากภาพตัดขวางจะแสดงให้เห็นบริเวณที่เกิดการแทรกซึมของเนื้อหลัก เนื่องจากฉนวนใยแก้วมีลักษณะคล้ายฟองน้ำหรือวัสดุพรุนเมื่อนำมาเป็นส่วนเสริมแรงจะทำให้น้ำโลหะแทรกซึมเข้าไปตามช่องว่างของฟริฟอร์ม ได้ดีกว่าเส้นใยคาร์บอนแบบถักทำให้การแทรกซึมที่เกิดขึ้นมีการแทรกซึมทั่วทั้งฟริฟอร์ม พิจารณารูปที่ 3.19 จะเห็นว่าบริเวณด้านบนคือวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (อะลูมิเนียมเกรด 7075/ฉนวนใยแก้ว) และบริเวณด้านมุมขวา (ล่าง) คือบริเวณวัสดุเนื้อหลัก (อะลูมิเนียม 7075)



รูปที่ 3.20 ภาพตัดขวางของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว

จากการวิเคราะห์การแทรกซึมของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 ทั้ง 2 แบบ พบว่าสาเหตุสำคัญของการแทรกซึมที่ไม่สมบูรณ์ คือ มุมเปียกระหว่างน้ำโลหะและแผ่นพีรีฟอร์มที่ค่ามากกว่า  $90^\circ$  ทำให้มีสมบัติการเปียกที่ไม่ดีนัก ดังนั้นการแทรกซึมของน้ำโลหะจึงทำได้ยาก จากผลการทดลองสามารถสรุปผลของกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งได้แสดงดังตารางที่ 3.8 เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของการแทรกซึมระหว่างวัสดุเนื้อหลักและวัสดุเสริมแรงได้อย่างชัดเจนและสามารถนำชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงแตกต่างกันมาประยุกต์ใช้ในงานที่แตกต่างกัน จึงได้นำชิ้นงานมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ได้จากการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งทั้ง 2 ชนิดในหัวข้อถัดไป

สาเหตุหลักของการที่น้ำโลหะเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะเข้าไปแทรกซึมในช่องว่างระหว่างพีรีฟอร์ม คือ มุมเปียกระหว่างน้ำโลหะและแผ่นพีรีฟอร์มที่ค่ามากกว่า  $90^\circ$  และความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งเมื่อน้ำโลหะที่มีอุณหภูมิประมาณ  $640^\circ\text{C}$  สัมผัสกับแผ่นพีรีฟอร์มที่มีอุณหภูมิประมาณ  $280^\circ\text{C}$  จะเริ่มเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ดังนั้นน้ำโลหะจึงไม่สามารถแทรกซึมผ่านช่องว่างของพีรีฟอร์มได้หมดทำให้พีรีฟอร์มบางส่วนเกิดการแทรกซึมไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 3.8 สรุปผลจากการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว

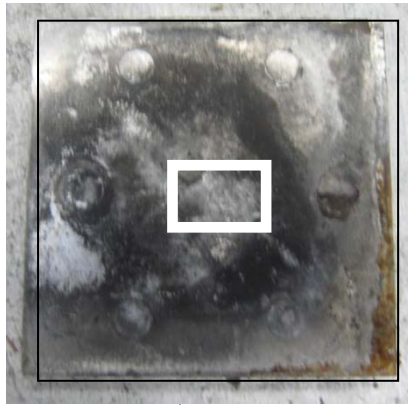
วัสดุผสม		การแทรกซึม
อะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก	2 ชั้น	✓
	4 ชั้น	✗
	6 ชั้น	✗
อะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว		✓

\*หมายเหตุ ✓ คือกรณีที่ชิ้นงานเกิดการแทรกซึมอย่างสมบูรณ์ ✗ คือกรณีที่ชิ้นงานเกิดการแทรกซึมไม่สมบูรณ์

### 3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแทรกซึมโลหะกึ่งของแข็งจะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ

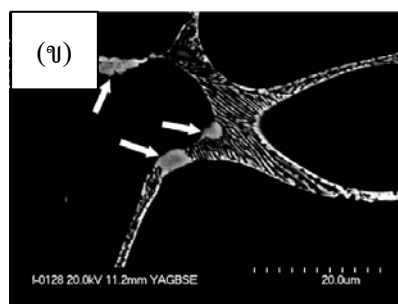
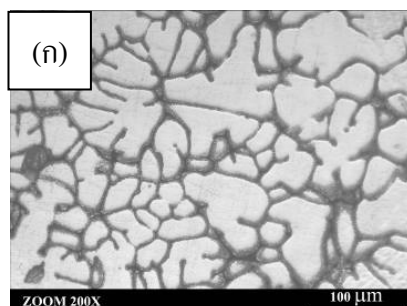
JEOL รุ่น JSM 5800 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและฉนวนใยแก้ว ซึ่งบริเวณที่ตัดชิ้นงานมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 3.21 คือบริเวณตรงกลางของชิ้นงาน



รูปที่ 3.21 แสดงบริเวณที่ตัดชิ้นงานมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

### 3.7.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรง

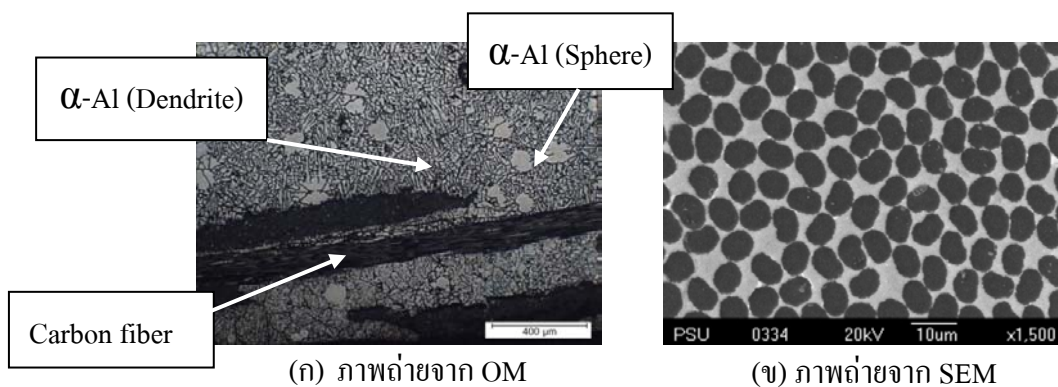
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง พบว่าโครงสร้างจุลภาคหลัก ๆ ประกอบด้วย เฟสแอลฟาอะลูมิเนียม ( $\alpha$ -Aluminum) มีลักษณะเป็นก้อนกลม (Sphere) เกิดจากการฟอร์มตัวจากการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวขณะแข็งตัวและเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ และเฟสของยูเทคติก (Eutectic) บริเวณขอบเกรน ลักษณะของโครงสร้างก้อนกลมแสดงดังรูปที่ 3.22(ก) ลักษณะของโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic) ดังแสดงในรูปที่ 3.22(ข) ซึ่งจะเกิดการฟอร์มตัวบริเวณขอบเกรน ซึ่งมีจำนวนน้อยมากคือประมาณ 5.6% จากโครงสร้างทั้งหมด (อ้างอิงจากงานวิจัยของ Xigang Fan, 2005) ดังนั้นจากโครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยเฟสของเฟสแอลฟาอะลูมิเนียมและเฟสของยูเทคติก



รูปที่ 3.22 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 (ก) ลักษณะของเฟสแอลฟาอะลูมิเนียม (ข) ลักษณะของเฟสยูเทคติกบริเวณขอบเกรน (Xigang Fan, 2005)

### 3.7.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก

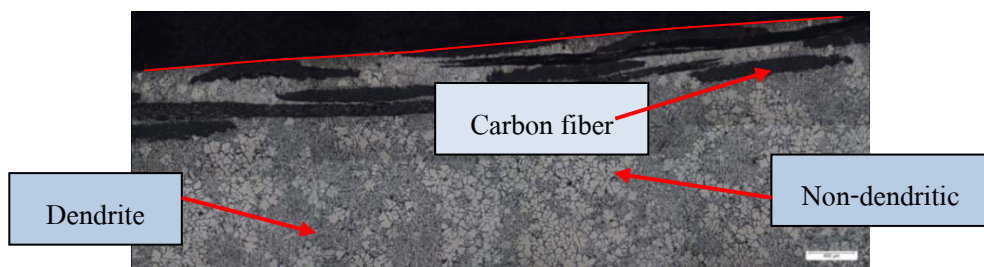
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของชิ้นงานวัสดุผสมที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง ลักษณะโครงสร้างของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมประกอบด้วยส่วนที่เป็นเนื้อหลักและเส้นใยคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 3.23(ก) พบว่าโครงสร้างเนื้อหลัก (Matrix) จะประกอบด้วยเฟสยูเทคติกและเฟสแอลฟาอะลูมิเนียม ( $\alpha$ -Aluminum) ซึ่งเฟสแอลฟาอะลูมิเนียมมีลักษณะเกรน 2 แบบคือ เกรนแบบกิ่งไม้ (Dendrite) และเกรนแบบก้อนกลม (Sphere) แทรกอยู่ในโครงสร้างจุลภาค (บริเวณสีขาว) ของวัสดุเนื้อหลักส่วนบริเวณเส้นใยคาร์บอนจะกระจายอยู่เล็กน้อย (บริเวณสีดำ) เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคพบว่าขณะที่เกิดการแทรกซึมส่วนที่ทำการแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของส่วนเส้นใยคาร์บอนคือส่วนที่เป็นน้ำโลหะหลอมเหลวและส่วนที่เป็นเฟสของแข็งเริ่มต้นบางส่วนก่อนที่จะเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ เมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ขยายภาพบริเวณเส้นใยคาร์บอนพบว่าลักษณะของเส้นใยคาร์บอนในชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.23(ข) จะเห็นว่ามีการกระจายตัวของเส้นใยคาร์บอน (สีดำ) อย่างหนาแน่นในวัสดุเนื้อหลัก (สีขาว)



รูปที่ 3.23 ลักษณะของโครงสร้างวัสดุเนื้อหลักและเส้นใยคาร์บอนในวัสดุผสม

เมื่อพิจารณาลักษณะของเส้นใยคาร์บอนในมุมมองข้างขึ้นโดยการนำรูปภาพจำนวน 8 รูป มาต่อเรียงกันเพื่อให้เห็นโครงสร้างจุลภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.24 พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันแต่แตกต่างกันที่ปริมาณของเส้นใยคาร์บอนแบบถักพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถักเพิ่มขึ้นเส้นใยคาร์บอนมีจะอยู่กันแบบชิดติดกันมากขึ้น อีกทั้งโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีการกระจายตัวของอนุภาคของแข็ง

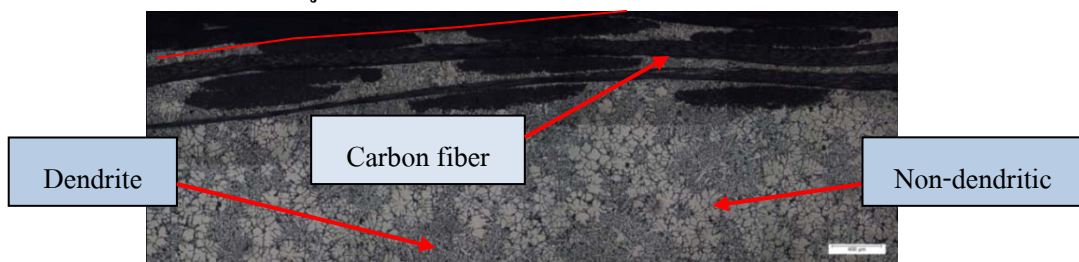
เริ่มต้นที่มีความสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน ดังนั้นจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก พบว่าบริเวณสีขาวคือวัสดุเนื้อหลัก และบริเวณสีดำคือเส้นใยคาร์บอน และเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถักเพิ่มขึ้นเส้นใยคาร์บอนมีจะอยู่กันแบบชิดติดกันมากขึ้นทำให้โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมมีการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งเริ่มต้นที่มีความสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน



(ก)

อ

อะลูมิเนียม 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน 2 ชั้น



(ข) อะลูมิเนียม 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน 4 ชั้น



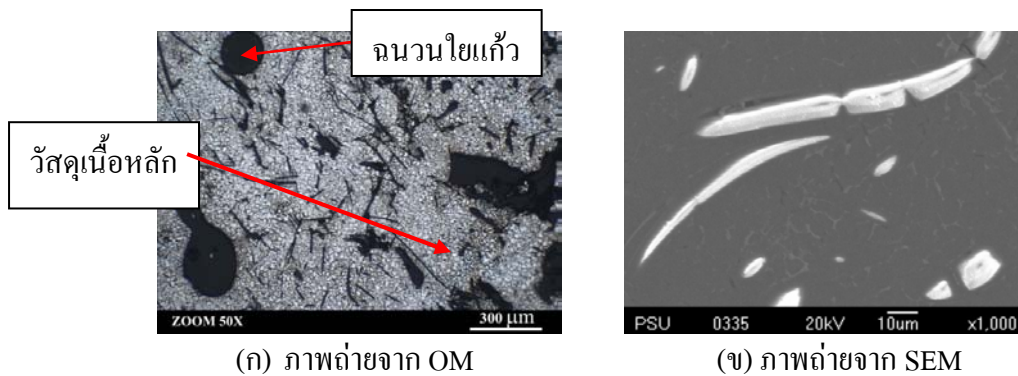
(ค) อะลูมิเนียม 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน 6 ชั้น

รูปที่ 3.24 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนที่ปริมาณส่วนเสริมแรงต่างกัน



### 3.7.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว

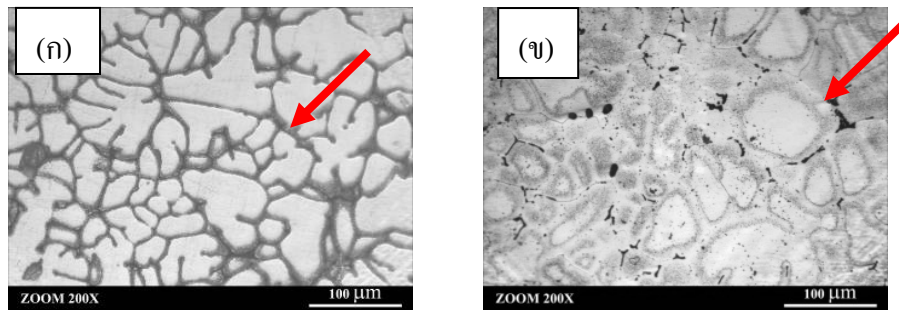
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 3.25(ก) พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเกรนเป็นก้อนกลมและมีฉนวนใยแก้วแทรกซึมอยู่ภายในเนื้อหลัก ซึ่งโครงสร้างหลักคือเนื้อหลัก (บริเวณสีขาว) ประกอบด้วยเฟสแอลฟาอะลูมิเนียมและเฟสยูเทคติกส่วนวัสดุเสริมแรง (บริเวณสีดำ) ประกอบด้วยเฟสอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) และซิลิกา ( $SiO_2$ ) เมื่อนำชิ้นงานไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 3.26(ข) พบว่ามีการแทรกซึมของน้ำโลหะในวัสดุเสริมแรงอย่างสมบูรณ์



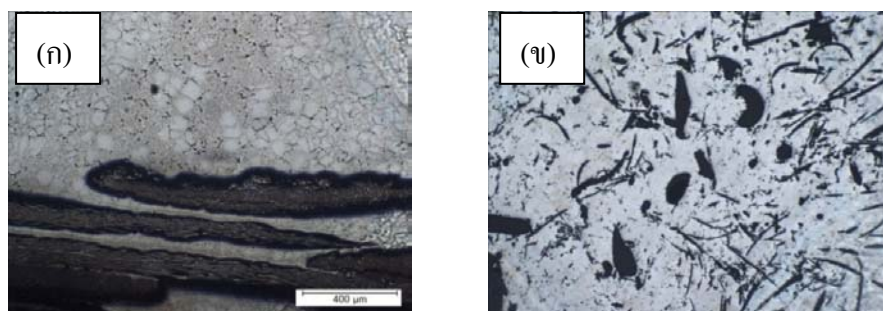
รูปที่ 3.25 ลักษณะของโครงสร้างเนื้อหลักและฉนวนใยแก้วในวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

### 3.7.5 โครงสร้างจุลภาคหลังปรับปรุงความร้อน

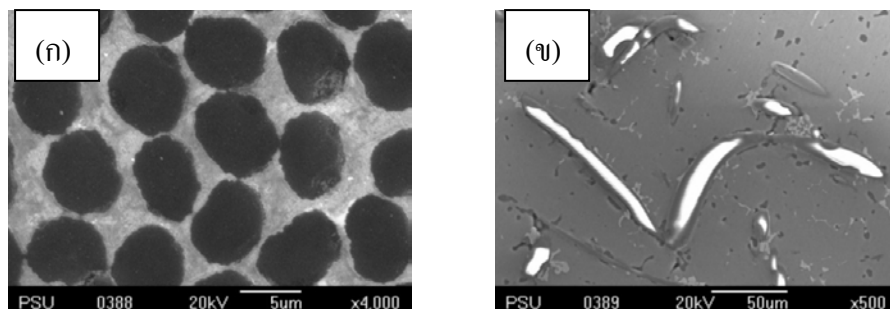
จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการปรับปรุงทางความร้อนภายใต้เงื่อนไข T6 พบว่าเมื่อนำชิ้นงานไปทำการอบละลายที่อุณหภูมิ  $480^{\circ}C$  เวลา 15 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำและนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ  $170^{\circ}C$  เวลา 24 ชั่วโมง ทำให้โครงสร้างของเฟสยูเทคติกบริเวณขอบเกรนมีการเปลี่ยนแปลง คือ มีการแพร่เข้าไปในเฟสแอลฟาขึ้นทำให้บริเวณขอบเกรนมีสีจางลงและความเข้มข้นบริเวณนี้จะลดลงดังแสดงในรูปที่ 3.26(ข) ส่วนลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้วแสดงดังรูปที่ 3.27 จากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 3.28 ดังนั้นจากการนำชิ้นงานไปปรับปรุงสมบัติทางความร้อนเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของชิ้นงานให้มีค่าสูงขึ้นและช่วยให้เกิดการกระจายตัวของธาตุในเนื้อชิ้นงาน



รูปที่ 3.26 ลักษณะของเพชยูเทคติก (ก) ก่อนและ (ข) หลังผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน



รูปที่ 3.27 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของ (ก) อะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก และ (ข) อะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยใยแก้ว หลังผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน



รูปที่ 3.28 ภาพถ่าย SEM แสดงโครงสร้างจุลภาค (ก) อะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและ (ข) อะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยใยแก้วหลังผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

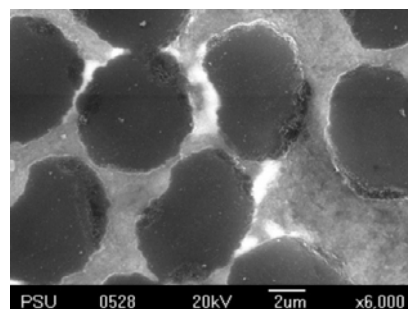
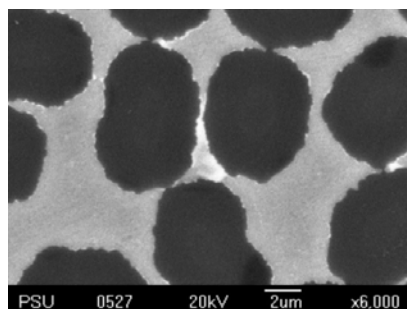
### 3.8 ผลการวิเคราะห์เฟสของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้วด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

เพื่อวิเคราะห์หาธาตุประกอบของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน โดยการทำให้ Line scan เพื่อหาเฟสต่าง ๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.8.1 ผลการวิเคราะห์เฟสของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายและการทำ Line scans แสดงดังรูปที่ 3.29 และ 3.30 แสดงให้เห็นว่าบริเวณขอบของเส้นใยคาร์บอนมีเฟสสีขาวเกิดขึ้นทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน พบว่าเฟสที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.29 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากการนำชิ้นงานไปทำ Line scan แสดงดังรูปที่ 3.30 จะเห็นว่าบริเวณสีขาวที่เกิดขึ้นรอบๆ เส้นใยคาร์บอนจะประกอบด้วยธาตุ Al, Cu และ Fe ซึ่งคาดว่าเป็นธาตุประกอบของอินเตอร์เมทัลลิก ได้แก่  $Al_7Cu_2Fe$ ,  $FeAl_2$ , และ  $Al_2Cu$  ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

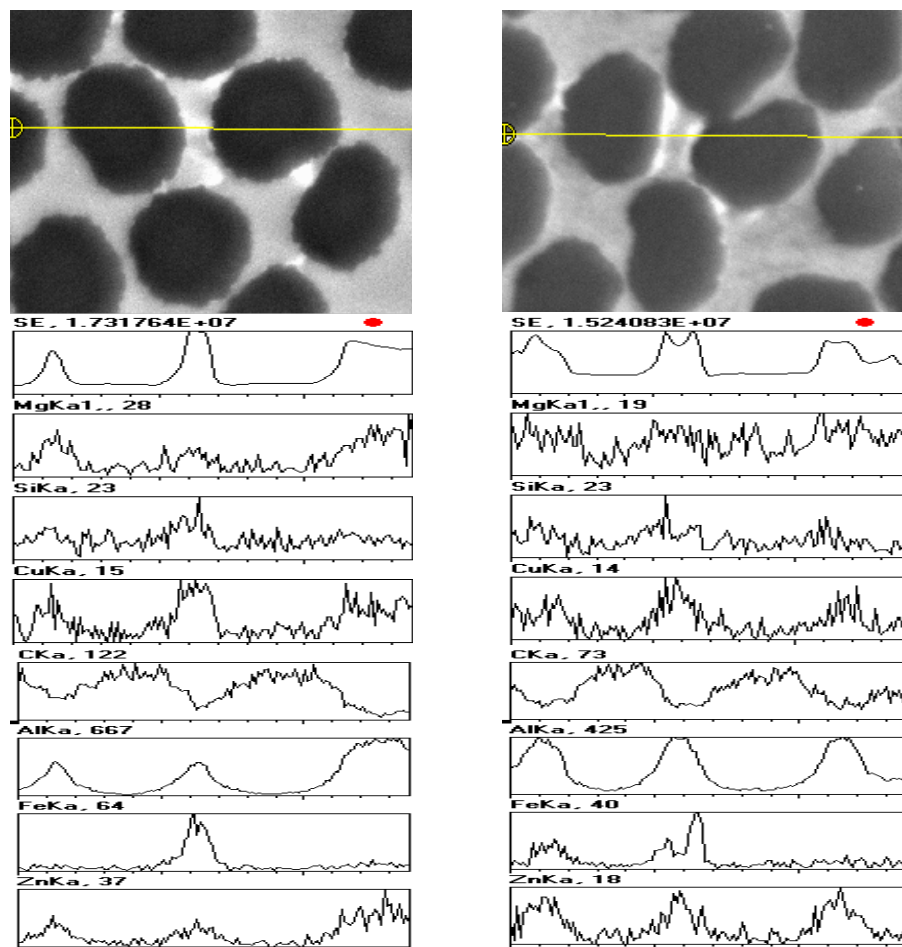


(ก) ก่อนปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (ข) หลังปรับปรุงสมบัติทางความร้อน  
รูปที่ 3.29 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก

จากการสังเกตจากกราฟ พบว่าภายหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนทำให้มีความเข้มข้นของธาตุ Mg และ Zn เพิ่มขึ้นเพราะในขั้นตอนการอบละลาย เฟสยูเทคติก ( $Al-\alpha-Mg_2Zn$ ) มีการละลายทำให้ธาตุ Mg และ Zn อยู่ในรูปสารละลายของแข็งในเนื้อหลัก [FAN Xigang, 2006] และหลังการบ่มแข็งจะมีการพรีซิพิตของ  $Mg_2Zn$  กระจายสม่ำเสมอในเนื้อหลัก [A.K. MUKHOPADHYAY, 1997] นอกจากนี้ธาตุ Cu และ Fe อาจอยู่ในรูปสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก  $Al_7Cu_2Fe$  หรือ  $(Cu,Fe)Al_6$  ที่เกิดขึ้นหลังจากการหล่ออะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่มี



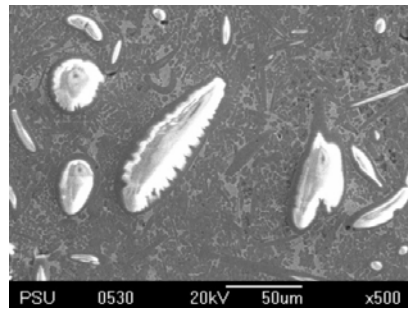
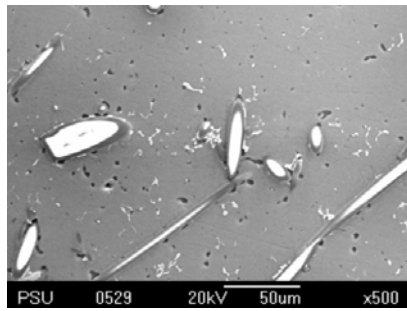
ปริมาณเหล็กสูงกว่า 0.15%wt [N.M. Doroshenko, 2005] ซึ่งสารประกอบดังกล่าวไม่ละลายในขั้นตอนการอบละลาย [LI Zhi-hui, 2007] ทำให้ความเข้มข้นของธาตุ Cu และ Fe ยังคงที่หลังผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน ดังนั้นจากการวิเคราะห์ด้วย Line scan ยังไม่สามารถระบุธาตุประกอบได้อย่างชัดเจนแต่สามารถช่วยให้คาดคะเนได้ว่าบริเวณขอบของเส้นใยคาร์บอนเกิดธาตุประกอบของอินเทอร์เมทัลลิกและฟิสิกิเทคกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อชิ้นงาน



(ก) ก่อนปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (ข) หลังปรับปรุงสมบัติทางความร้อน  
รูปที่ 3.30 การทำ line scan ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก

### 3.8.2 ผลการวิเคราะห์เฟสของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว

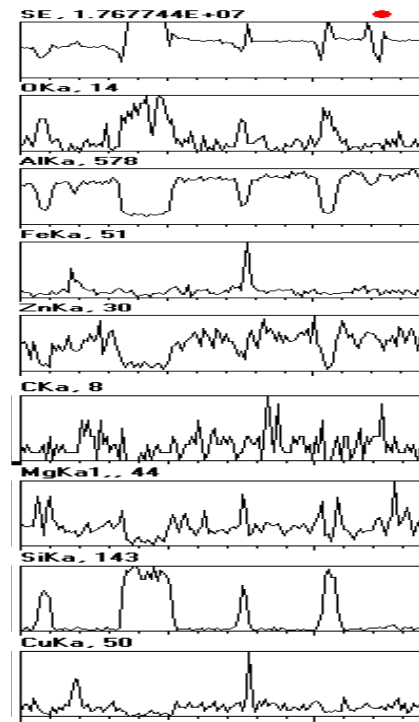
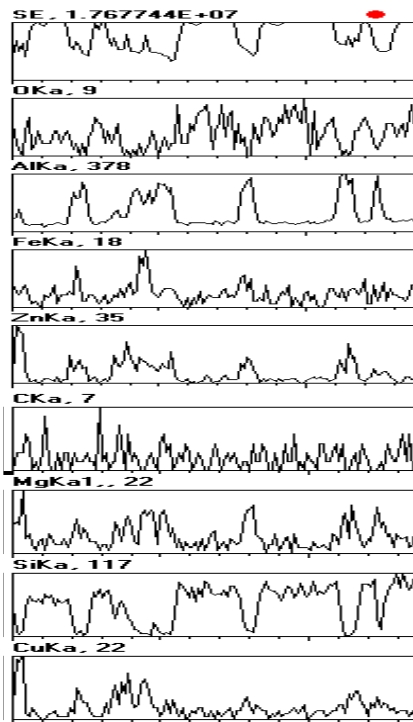
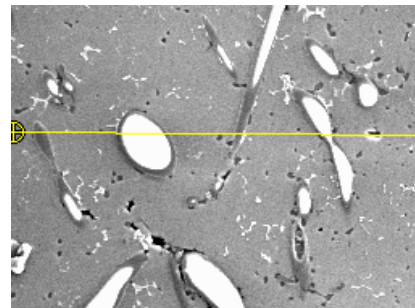
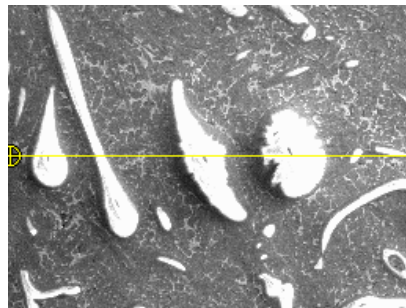
จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความ



(ก) ก่อนปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

(ข) หลังปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

รูปที่ 3.31 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว



(ก) ก่อนปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

(ข) หลังปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

รูปที่ 3.32 การทำ line scan ของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว

ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายและการทำ Line scans แสดงดังรูปที่ 3.31 และ 3.32 แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ด้วย Line scans พบว่าเฟสของฉนวนใยแก้ว (สีขาว) ประกอบด้วยเฟสของ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ส่วนบริเวณเนื้อหลักเฟสที่ได้ประกอบด้วยธาตุ Al, Cu, Mg, และ Zn อะตอมของธาตุ Zn, Mg และ Cu เป็นธาตุประกอบของยูเทคติกเฟสหรือสารละลายที่เป็นของแข็งในวัสดุเนื้อหลัก (Matrix Al) [FAN Xi-gang, 2006] และหลังการบ่มแข็งจะมีการพรีซิพิตของ  $\text{Mg}_2\text{Zn}$  กระจายสม่ำเสมอในเนื้อหลัก [A.K. MUKHOPADHYAY, 1997] นอกจากนี้ธาตุ Cu และ Fe อาจจะอยู่ในรูปสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก  $\text{Al}_7\text{CuFe}$  หรือ  $(\text{Cu,Fe})\text{Al}_6$  ที่เกิดขึ้นหลังจากการหล่ออะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่มีปริมาณเหล็กสูงกว่า 0.15%wt [N.M. Doroshenko, 2005] ซึ่งสารประกอบดังกล่าวไม่ละลายในขั้นตอนการอบละลาย [LI Zhi-hui, 2007] ทำให้ความเข้มข้นของธาตุ Cu, และ Fe ยังคงที่หลังผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน ดังนั้นจากการวิเคราะห์ด้วย Line scan ยังไม่สามารถระบุธาตุประกอบได้อย่างชัดเจนแต่สามารถช่วยให้คาดคะเนได้ว่าบริเวณเนื้อหลักเกิดธาตุประกอบของอินเทอร์เมทัลลิกและพรีซิพิตกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อชิ้นงาน

### 3.9 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

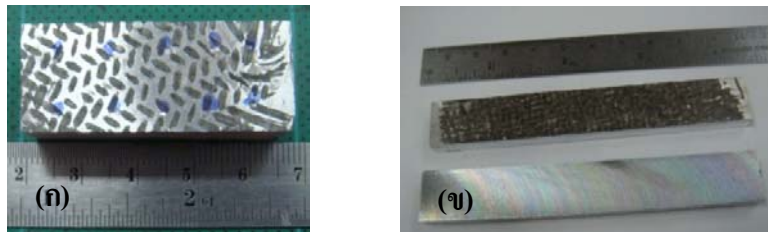
ในงานวิจัยได้ทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรง 2 ชนิด คือ เส้นใยคาร์บอนแบบถักและฉนวนใยแก้วที่สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 1 - 10%

1. วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก นำชิ้นงานไปทดสอบความแข็ง (Hardness Test) และทดสอบการดัดเพื่อหาค่าความแข็งแรงต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) เปรียบเทียบอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรง

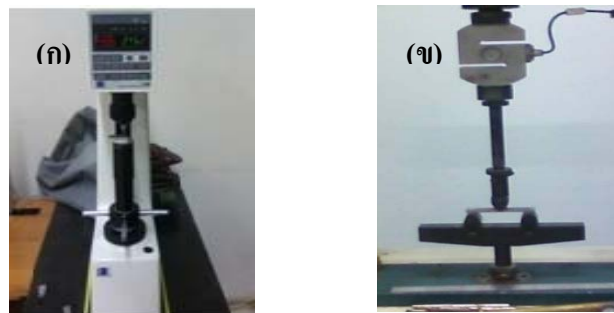
2. วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว นำชิ้นงานไปทดสอบความแข็ง ความแข็งแรงต่อการดัดโค้งและความต้านทานต่อการสึกหรอเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรง

การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 2 แบบ ชิ้นงานจะถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ ชิ้นงานวัสดุผสมที่ได้จากกระบวนการแทรกซึมโดยตรงและชิ้นงานวัสดุผสมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน ชิ้นงานทั้งคู่จะนำไปตัดเพื่อทดสอบความแข็ง (Hardness test) และการดัดแบบ 3 จุด (3 point bending test) ให้มีขนาดความกว้าง ความยาว และความหนา คือ  $15 \times 50 \times 10$  และ  $15 \times 100 \times 6$  มิลลิเมตร ตามลำดับ ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแสดงดังรูป 3.33 ซึ่งรูปที่ 3.33(ก) ชิ้นงานทดสอบความแข็งและรูปที่ 3.33 (ข) ชิ้นงานทดสอบการดัด จากนั้น

ชิ้นงานจะถูกนำไปวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกล B และการตัดแบบ 3 จุด (3 Point Bending) เพื่อวัดค่าแรงความแข็งแรงต่อการตัดโค้งผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ลักษณะของเครื่องมือทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.33 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ (ก) ทดสอบความแข็ง (ข) ทดสอบการตัด



รูปที่ 3.34 เครื่องมือทดสอบ (ก) ความแข็ง Rockwell สเกล B และ (ข) ตัดแบบ 3 จุด

### 3.9.1 วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก

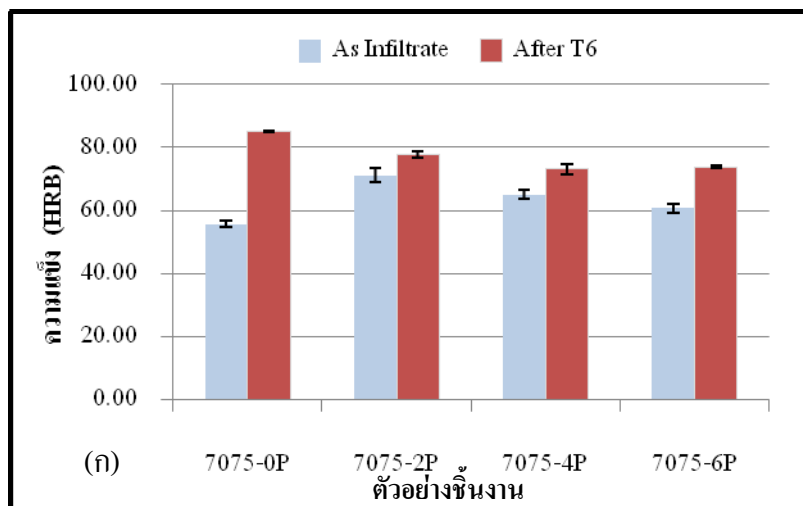
จากผลจากการวิเคราะห์ความแข็งและความแข็งแรงต่อการตัดโค้งแสดงดังตารางที่ 3.8 พบว่าชิ้นงานที่มีค่าความแข็งสูงสุด คือ ชิ้นงานวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก 2 ชั้น (กรณี As Infiltrate) และชิ้นงานวัสดุผสมไม่เสริมแรงมีค่าความแข็งเท่ากับ  $71.1 \pm 2.2$  และ  $85.0 \pm 0.3$  HRB ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความแข็งแรงต่อการตัดโค้งที่สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 1 - 10% พบว่าชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งสูงสุดคือชิ้นงานวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก 2 ชั้นมีค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนเท่ากับ  $420.3 \pm 5.1$  และ  $732.5 \pm 9.8$  MPa ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากกราฟดังรูปที่ 3.35 ในกรณีของสมบัติความแข็งที่สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 1 - 10% ดังรูปที่ 3.35(ก) ซึ่งจากแนวโน้มพบว่าเมื่อปริมาณส่วนเสริมแรงเพิ่มขึ้นทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งลดลง เนื่องจากการวัดความแข็งพบว่าบริเวณที่วัดความแข็งมีเฟสที่แตกต่างกันคือเฟสของเนื้อหลักและเฟสของเส้นใยคาร์บอนแบบถัก ซึ่งในการวัดแต่ละครั้งอาจเกิดความผิดพลาดจากการวัดได้ นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากอิทธิพลของส่วนเสริมแรงและ

พฤติกรรมของการเกิดการนิวเคลียชันและการเติบโตบริเวณ GP Zone เพราะวัสดุเสริมแรงจะเป็นตัวเร่งทางจลศาสตร์ของการบ่มและช่วยให้เกิดการนิวเคลียชันที่ไม่ใช่เนื้อเดียวกันทำให้ค่าความแข็งหลังการปรับปรุงทางความร้อนเพิ่มขึ้น[R. Ehsani, 2004] ซึ่งจากงานวิจัยที่ได้มีทิศทางตรงกันข้ามกับงานวิจัยที่ได้ศึกษาเพราะค่าความแข็งที่ได้มีค่าลดลงหลังจากการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนซึ่งอาจมีปัญหากจาก 1.เนื้อประสานของวัสดุเนื้อหลักและวัสดุเสริมแรงไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อาจเกิดช่องว่างขึ้นหรือเกิดข้อบกพร่อง (defect) อื่น ๆ ทำให้ค่าความแข็งหลังผ่านการปรับปรุงทางความร้อนมีค่าลดลง 2.เวลาในการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนไม่เหมาะสมกับสภาพของวัสดุผสมและ 3. เลือกสภาวะการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนไม่เหมาะสมกับวัสดุผสม กรณีความแข็งแรงต่อการตัดโค้งที่สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 1 - 10% ดังรูปที่ 3.35(ข) ซึ่งจากแนวโน้มพบว่าเมื่อปริมาณส่วนเสริมแรงเพิ่มขึ้นทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณส่วนเสริมแรงเพิ่มขึ้นทำให้น้ำอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของพรีฟอร์มได้หมดจึงทำให้เกิดการแทรกซึมไม่สมบูรณ์ในเนื้อชิ้นงานและชิ้นงานที่ได้ยังมีเนื้อที่ไม่ถูกเติมเต็มบางส่วนอีกด้วย อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ที่ชิ้นงานที่ผ่านการตัดโค้งแบบ 3 จุด พบว่าบริเวณรอยแตกยังมีออกไซด์ฟิล์มเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.36 ส่งผลให้ชิ้นงานไม่มีความแข็งแรงต่อการตัดโค้งสูงเท่าที่ควร แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อนำวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนที่ปริมาณส่วนเสริมแรง 2 4 และ 6 แผ่นตามลำดับ เปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม 7075 ไม่เสริมแรงพบว่าชิ้นงานวัสดุผสมที่ปริมาณส่วนเสริมแรงมีค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งสูงกว่าอะลูมิเนียม 7075 ไม่เสริมแรงทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบความแข็งและความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งที่เงื่อนไขต่างกันก่อนและหลังทำการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

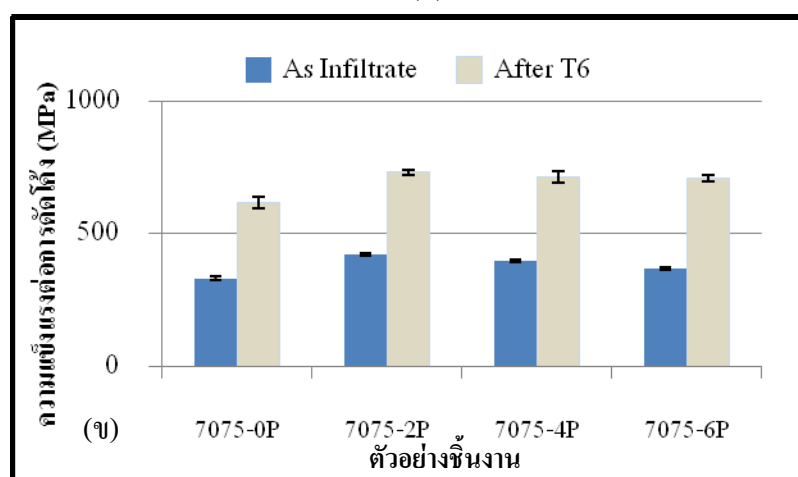
ชิ้นงาน	เงื่อนไขการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง		ความแข็ง (HRB)		ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง (MPa)	
	สัดส่วนของแข็ง	จำนวนชั้นเสริมแรง	As infiltration	T6	As infiltration	T6
7075-0P	1 - 10%	0 ชั้น	55.7 ± 1.1	85.0 ± 0.3	331.4 ± 7.7	618.4 ± 20.3
7075-2P	1 - 10%	2 ชั้น	71.1 ± 2.2	77.7 ± 1.1	420.3 ± 5.1	732.5 ± 9.8
7075-4P	1 - 10%	4 ชั้น	65.0 ± 1.5	73.7 ± 1.5	398.5 ± 5.8	715.8 ± 21.5
7075-6P	1 - 10%	6 ชั้น	60.7 ± 1.2	73.1 ± 0.4	368.9 ± 6.2	708.5 ± 12.7

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักสามารถสรุปได้ดังนี้คือ 1.วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักมีสมบัติเชิงกลได้แก่ ความแข็งและความแข็งแรงต่อการตัดโค้งสูงกว่าอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรงและ 2.เมื่อปริมาณส่วนเสริมแรงเพิ่มขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลงซึ่ง ดังนั้นจึงควรเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก 2 แผ่น จะช่วยเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงต่อการตัดโค้งให้กับวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 อีกทั้งการเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนเพียงเล็กน้อยจะช่วยให้ประหยัดเส้นใยคาร์บอนอีกด้วย



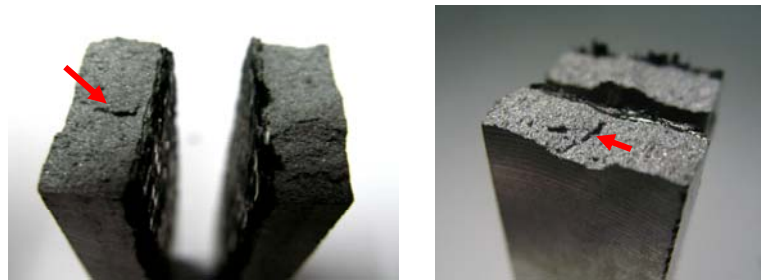
(ก) ผลการทดสอบความแข็งแรง

(ข)



(ข) ผลการทดสอบการตัดแบบ 3 จุด

รูปที่ 3.35 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบการตัดของชิ้นงานวัสดุผสมโดยการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน



รูปที่ 3.36 ออกไซด์ฟิล์มภายในเนื้อชิ้นงาน

### 3.9.2 วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว

จากผลจากการวิเคราะห์ความแข็งและความแข็งแรงต่อการดัดโค้งแสดงดังตารางที่ 3.9 พบว่าชิ้นงานที่มีค่าความแข็งสูงสุดคือชิ้นงานวัสดุผสมเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Composite) มีค่าเท่ากับ  $74.7 \pm 4.2$  HRB และชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดัดโค้งสูงสุดคืออะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนมีค่าเท่ากับ  $618.4 \pm 20.3$  MPa นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลจากกราฟดังรูปที่ 3.37 ในกรณีของสมบัติความแข็งที่สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 1 - 10% ดังรูปที่ 3.37(ก) ในกรณีของความแข็งซึ่งจากแนวโน้มพบว่ากรณีของชิ้นงานก่อนการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (As cast) วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วมีค่าความแข็งมากกว่าอะลูมิเนียมเกรด 7075 คือ  $74.7 \pm 4.2$  HRB ในทางตรงกันข้ามเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (T6) พบว่าชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 7075 มีค่าความแข็งมากกว่าวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วคือ  $71.8 \pm 10.2$  HRB และในกรณีของการทดสอบการดัดแบบ 3 จุดดังรูปที่ 3.37(ข) พบว่าค่าความแข็งแรงต่อการดัดโค้งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 มีค่าสูงสุดทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนคือ  $331.4 \pm 7.7$  และ  $618.4 \pm 20.3$  MPa ตามลำดับ จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่ ความแข็งและความแข็งแรงต่อการดัดโค้ง จะเห็นว่าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วจะให้สมบัติของความแข็งแรงต่อการดัดโค้งต่ำกว่าวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ดังนั้นถ้าจะใช้งานในสถานะที่มีการดัดโค้งควรเลือกใช้วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนดีกว่าวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงฉนวนใยแก้ว ส่วนในกรณีของความแข็งเมื่อนำชิ้นงานวัสดุผสมไปปรับปรุงสมบัติทางความร้อนทำให้ค่าความแข็งลด เนื่องจากอิทธิพลของส่วนเสริมแรงและพฤติกรรมของการเกิดการนิวคลีเอชันและการเติบโตบริเวณ GP Zone เพราะวัสดุเสริมแรงจะเป็นตัวเร่งทางจลศาสตร์ของการบ่มและช่วยให้เกิดการนิวคลีเอชันที่ไม่ใช่เนื้อเดียวกัน ทำให้ค่าความแข็งหลังการปรับปรุงทางความร้อนเพิ่มขึ้น [R. Ehsani, 2004] ซึ่งจากงานวิจัยผลที่

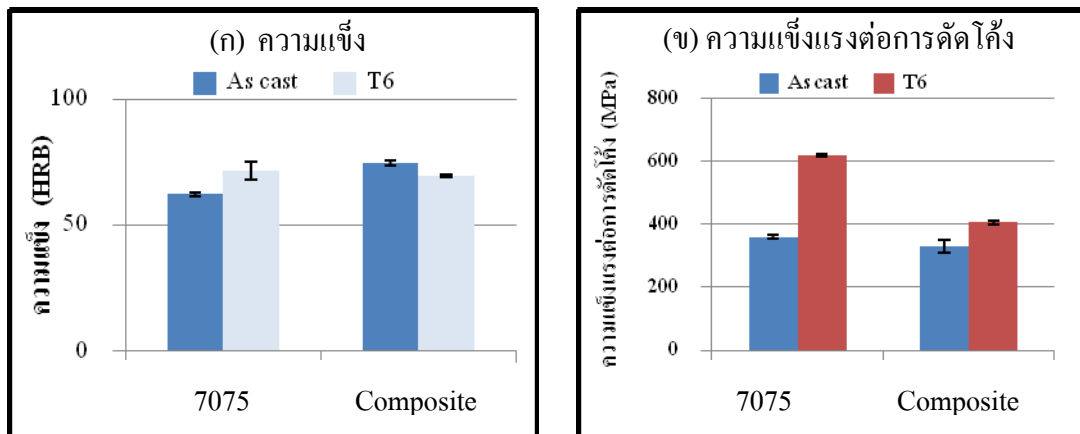
ได้มีทิศทางตรงกันข้ามกับงานวิจัยเพราะค่าความแข็งที่ได้มีค่าลดลงหลังจากการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน ซึ่งอาจมีปัญหามาจาก 1.เนื้อประสานของวัสดุเนื้อหลักและวัสดุเสริมแรงไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อาจเกิดช่องว่างขึ้นหรือเกิดข้อบกพร่อง (defect) อื่น ๆ ทำให้ค่าความแข็งหลังผ่านการปรับปรุงทางความร้อนมีค่าลดลง 2.เวลาในการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนไม่เหมาะสมกับสภาพของวัสดุผสมและ 3. เลือกสภาวะการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนไม่เหมาะสมกับวัสดุผสม

เนื่องจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วไม่เหมาะกับการทดสอบการตัดเพราะไม่สามารถต้านทานต่อการตัดโค้งได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก จึงนำชิ้นงานไปทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอซึ่งเงื่อนไขในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.10 ซึ่งในการทดสอบจะไม่ใช้สารหล่อลื่น โดยใช้โหลดแตกต่างกันคือ 3 5 และ 7N ระยะทางที่ทดสอบประมาณ 300 เมตร เพื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สภาวะสมดุลและอัตราการสึกหรอ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สภาวะสมดุลคืออัตราส่วนระหว่างแรงเสียดทานที่ผิวทั้งสองกับแรงกดผิวทั้งสอง (แรงตั้งฉากกับผิว) มี 2 ค่า คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์หรือ  $F = \mu N$  โดยที่ N คือแรงในแนวตั้งฉาก ดังนั้น 1.ถ้าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สภาวะสมดุลมีค่าน้อยมีผลทำให้ผิวสัมผัสเลื่อน ทำให้ผิวสัมผัสของวัสดุไม่ยึดติดกัน สามารถเคลื่อนที่ได้ เหมาะสำหรับงานจำพวกงานชุบโลหะและการเติมน้ำมัน 2. ถ้าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สภาวะสมดุลมีค่ามาก ทำให้ผิวสัมผัสของวัสดุยึดเกาะกันได้ดี เหมาะกับงานจำพวก ผ้าเบรก พื้นรองเท้าและยางล้อรถยนต์

ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบความแข็งของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรงก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

ชิ้นงาน	ความแข็ง (HRB)	ความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง (MPa)
7075	62.3 ± 4.6	331.4 ± 7.7
7075-T6	71.8 ± 10.2	618.4 ± 20.3
Composite	74.7 ± 4.2	360.2 ± 5.5
Composite-T6	69.7 ± 3.8	405.6 ± 6.8

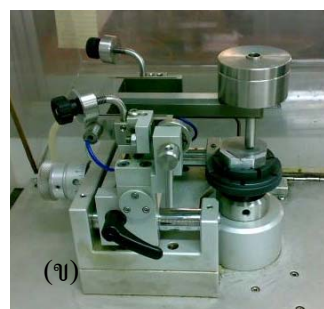
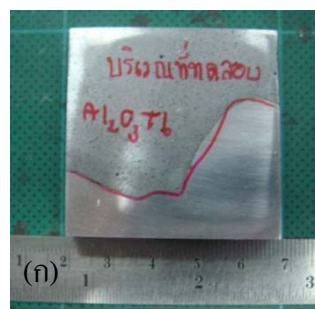




รูปที่ 3.37 กราฟแสดงผลการทดสอบความแข็งและความแข็งแรงต่อการตัดโค้งของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรง

ตารางที่ 3.10 สภาวะเงื่อนไขในการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ

ตัวแปร	สภาวะเงื่อนไข
โหลด (N)	3.5 และ 7
ความเร็ว (cm/s)	10
ระยะทาง (m)	300
รัศมีการสึกหรอ (mm)	5



รูปที่ 3.38 ชิ้นงานและเครื่องมือทดสอบการสึกหรอ (ก) ชิ้นงานทดสอบ (ข) เครื่องไตรบอมิเตอร์

ในการทดสอบจะนำชิ้นงานกลึงให้มีขนาดเท่ากับ 45x45x8 มิลลิเมตร การทดสอบจะใช้หัวบอล AISI52100 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแสดงดังรูป 3.38(ก) และเครื่องไตรบอมิเตอร์เพื่อทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอแสดงดังรูปที่ 3.38(ข) ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.11

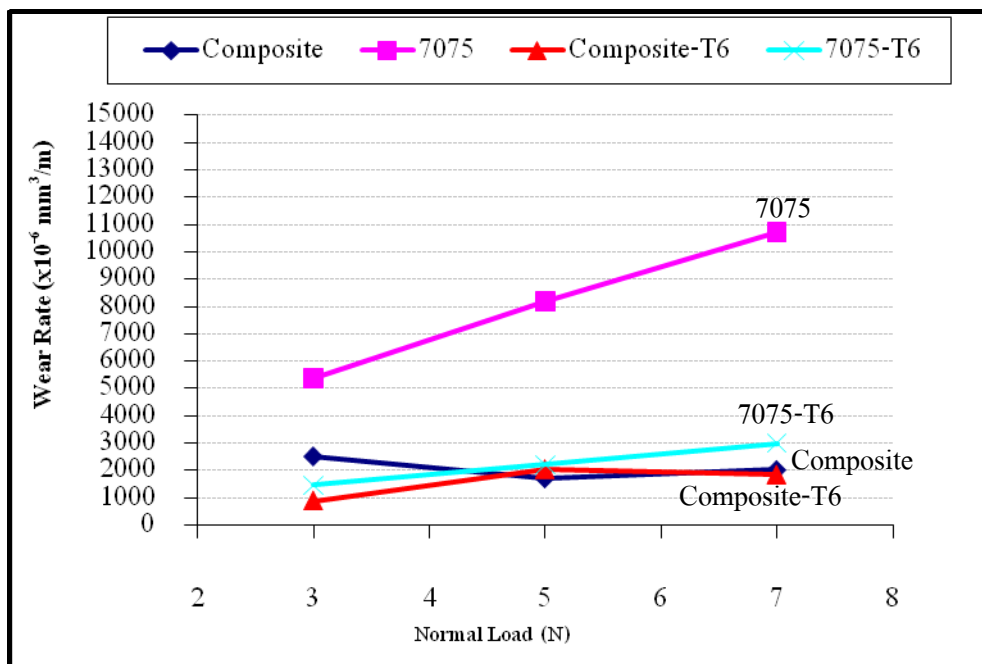
จากตารางที่ 3.11 พบว่าชิ้นงานที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สภาวะสมดุล และอัตราการสึกหรอสูงสุดคือ ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วก่อนการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.372 และ  $883 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$  ตามลำดับ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สภาวะสมดุล มีค่าไม่แตกต่างกันมาก นั่นคือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สภาวะสมดุลแสดงถึงการวัดค่าผิวสัมผัสของวัสดุ 2 ชนิด พบว่าถ้าใช้วัสดุเสริมแรง คือ ฉนวนใยแก้วทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สภาวะสมดุลของชิ้นงานมีค่าลดลง แสดงว่าผิวสัมผัสสั่นทำให้เกิดการสึกหรอน้อย แต่อย่างไรก็ตามค่าที่แสดงไม่ได้มีนัยสำคัญมากนัก

ตารางที่ 3.11 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุผสมเปรียบเทียบกับ อะลูมิเนียม 7075 ก่อนและหลังการปรับปรุงทางความร้อนที่โหลด 3.5 และ 7N ตามลำดับ

ชิ้นงาน	โหลด (N)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สภาวะสมดุล ( $\mu$ )	อัตราการสึกหรอ ( $\times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$ )
7075-As Infiltrate	3	1.221	0.46	5365
	5	1.404	0.474	8190
	7	1.535	0.470	10728
7075-T6	3	0.793	0.455	1459
	5	0.911	0.410	2211
	7	1.007	0.418	2994
7075-ฉนวนใยแก้ว-As Infiltrate	3	0.671	0.399	883
	5	0.885	0.387	2032
	7	0.856	0.372	1833
7075-ฉนวนใยแก้ว-T6	3	0.950	0.417	2509
	5	0.836	0.400	1710
	7	0.883	0.419	2017

โดยค่าการต้านทานต่อการสึกหรอจะมีความสัมพันธ์กับค่าน้ำหนักที่หายไปคือ หากชิ้นงานใดมีน้ำหนักหายไปมาก นั่นหมายความว่าชิ้นงานนั้นมีสมบัติค่าความต้านทานต่อการสึกหรอที่ต่ำมากหรือทนต่อการขัดสีได้น้อย ดังนั้นวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรง

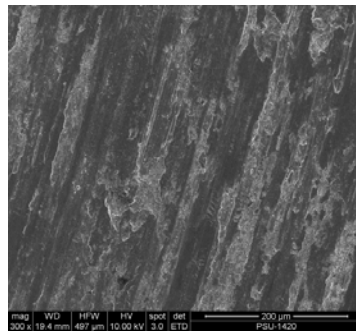
ด้วยฉนวนใยแก้วสามารถทนต่อการขีดสีได้ดีเนื่องจากการใช้ฉนวนใยแก้วเสริมแรงมีส่วนช่วยให้สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอดีขึ้นกว่าอะลูมิเนียมเกรด 7075 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.39 พบว่าอัตราการสึกหรอของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโหลดเพิ่มขึ้นและอัตราการสึกหรอของวัสดุมีการเกาะกลุ่มกันในช่วงการสึกหรอ 0 -  $3000 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$  และนอกจากนี้จะเห็นว่าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 มีแนวโน้มการสึกหรอน้อยกว่าอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรง



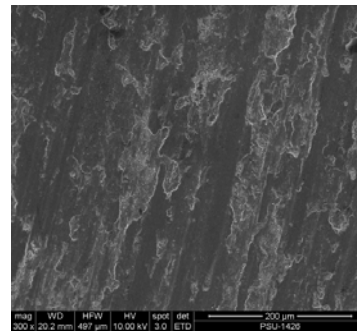
รูปที่ 3.39 กราฟเปรียบเทียบผลน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานวัสดุผสมเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 7075 จากการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบการต้านทานต่อการสึกหรอแสดงดังรูปที่ 3.40 ที่น้ำหนักโหลด 3N พบว่ารอยการสึกหรอของชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรงทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนมีรอยของการสึกหรอ ดังรูปที่ 3.40(ก) และ 3.40(ข) จะเห็นว่ารอยการสึกหรอของชิ้นงานหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนมีการสึกหรอที่น้อยกว่า สังเกตจากรอยขีดที่โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานค่อนข้างลึก ต่อมาเมื่อพิจารณารอยการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนแสดงดังรูปที่ 3.40(ค) และ 3.40(ง) พบว่าเมื่อเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วรอยขีดค่อนข้างตื้นเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่

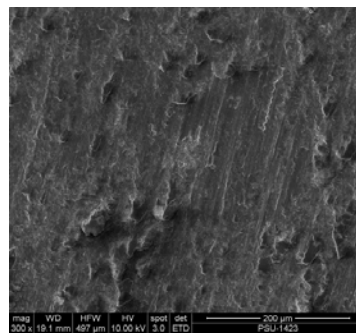
เสริมแรง นอกจากนี้ยังพบว่ารอยขีดของชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 7075 ก่อนการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนรอยขีดน้อยกว่าชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน จากภาพถ่าย SEM โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้นจะเห็นว่ารอยขีดของชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วก่อนการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนมีรอยขีดที่ไม่ลึกมากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานอื่น ๆ เนื่องจากชิ้นงานมีค่าความแข็งมากที่สุดทำให้อัตราการสึกหรอที่ได้น้อยลงตามไปด้วย ส่วนกรณีของ 5 และ 7N มีลักษณะเดียวกันกับ 3N ด้วยเช่นกัน เนื่องจากการเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วซึ่งเป็นสารประกอบจำพวกออกไซด์จะช่วยให้วัสดุมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นส่งผลให้วัสดุมีการสึกหรอที่ลดลง



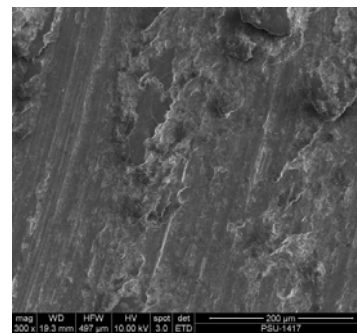
(ก) 7075-Al Infiltrate



(ข) 7075-T6



(ค) 7075-ฉนวนใยแก้ว-Al Infiltrate



(ง) 7075-ฉนวนใยแก้ว-T6

รูปที่ 3.40 ภาพถ่าย SEM แสดงโครงสร้างของชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์การสึกหรอเบื้องต้นสรุปได้ว่า 1. วัสดุที่มีค่าความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดีที่สุด คือ วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว ก่อนการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (As cast) และ 2. การนำชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วไปปรับปรุงสมบัติทางความร้อนไม่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้แก่

ความแข็ง ความแข็งแรงตัด และความต้านทานต่อการสึกหรอให้ดีขึ้นจึงไม่จำเป็นต้องนำชิ้นงานไปผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนก็สามารถได้ชิ้นงานที่มีสมบัติเชิงกลสูงได้

จากศึกษาการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักและวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว พบว่า

- 1.การเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักช่วยเพิ่มสมบัติความแข็งและความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง
- 2.การเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถักมีจำนวนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งและความแข็งแรงต่อการตัดโค้งมีแนวโน้มลดลง
- 3.การเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วช่วยเพิ่มสมบัติของความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอแต่ไม่ช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก

## บทที่ 4

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 4.1 บทสรุป

ผลจากการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมของกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง โดยใช้วิธีการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะแข็งตัว เพื่อสร้างเฟสของแข็งเริ่มต้น พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งที่มีสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นต่ำมาก ๆ คือ 1 - 10% ได้ ทั้งนี้ในการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่มีสัดส่วนของแข็งประมาณ 1 - 10% นั้นต้องมีการควบคุมตัวแปรให้เหมาะสม เนื่องจากมีเฟสของเหลวอยู่จำนวนมาก เฟสของแข็งทำให้แรงอัดที่ส่งผ่านน้ำโลหะอาจเกิดการรั่วจากแม่พิมพ์ในขณะที่พังก์ (Punch) กดอัดได้ ผลจากการศึกษาการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมในกลุ่มงานหล่อและงานรีดได้แก่ อะลูมิเนียมเกรด 356 และ 7075 เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อใช้ผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม ซึ่งรายละเอียดของงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1.1 การผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

จากผลการทดลองผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก โดยทำการศึกษาตัวแปร ได้แก่ 1.ปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถัก ได้แก่ 2 4 8 12 และ 16 ตามลำดับ และ 2.ปริมาณสัดส่วนของแข็ง ได้แก่ 5 10 20 และ 30% ตามลำดับ พบว่าปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถัก ที่เหมาะสมในการใช้เป็นส่วนเสริมแรงไม่ควรเกิน 8 แผ่น และปริมาณสัดส่วนของแข็งเริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 5 และ 10% จะช่วยให้เพิ่มสมบัติเชิงกลได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด เบอร์เซนต์การยืดตัว และความแรงต่อการตัดโค้งให้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักจะช่วยเพิ่มสมบัติของความต้านทานแรงดึงสูงสุด เบอร์เซนต์การยืดตัว และความแรงต่อการตัดโค้งให้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 356 ไม่เสริมแรง

#### 4.1.2 การผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

จากการทดลองผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักที่ปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถักต่างกันคือ 24 และ 6 แผ่น ตามลำดับที่สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 1 - 10% พบว่าเมื่อปริมาณส่วนเสริมแรงมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งมีค่าลดลงทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน และเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักกับอะลูมิเนียม 7075 ไม่เสริมแรงพบว่าค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งมีค่ามากกว่าอะลูมิเนียม 7075 ไม่เสริมแรงทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน ดังนั้นการเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก 2 แผ่น จะช่วยเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงต่อการตัดโค้งให้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมเกรด 7075 ไม่เสริมแรง ซึ่งจากงานวิจัยนี้สามารถนำชิ้นงานไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการต้านทานต่อการตัดโค้ง

#### 4.1.3 การผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

จากการทดลองผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วที่สัดส่วนของแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 1 - 10% พบว่าชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้ว จะช่วยเพิ่มความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม 7075 ไม่เสริมแรง แต่จะไม่ช่วยปรับปรุงสมบัติของความแข็งแรงตัดโค้งเมื่อเทียบกับวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน และสามารถนำชิ้นงานไปประยุกต์ใช้งานจำพวก ฝาเบรก ก้ามปูเบรก ก้านสูบ เกียร์ ได้

#### 4.1.4 สรุปกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

จากการทดลองผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งพบว่ากระบวนการที่ทำการคิดค้น สามารถนำมาผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมกลุ่มหล่อและกลุ่มรีดได้ ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียของกระบวนการดังนี้

ข้อดีของกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

1. ช่วยลดการรั่วของน้ำโลหะในขณะขึ้นรูป เพราะสามารถขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำกว่าการขึ้นรูปในสถานะของเหลว

2. ลดการแตกรื้อนของชิ้นงาน เพราะการขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งช่วยลดความเค้นแรงดึงที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัว
3. ช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ เนื่องจากการเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิต่ำทำให้แม่พิมพ์เกิดการสึกหรอช้า
4. ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้แก่ชิ้นงานเพราะชิ้นงานไม่เกิดการแตกรื้อนและไม่เกิดการหดตัว ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ได้มีค่าสูงขึ้น
5. ใช้เวลาในการผลิตชิ้นสามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่อง

ข้อเสียของกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

1. กระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งยังไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากเป็นกระบวนการใหม่ที่ยังมีงานวิจัยสนับสนุนน้อย
2. ต้องใช้ความรู้ในการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ในการขึ้นรูปเช่น อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิพรีฟอร์ม แรงในการอัด การออกแบบแม่พิมพ์ และการควบคุมกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาอุณหภูมิในการอุ่นพรีฟอร์มที่แตกต่างกันเพื่อดูความสามารถในการแทรกซึมของน้ำโลหะ
2. ควรทำการศึกษาบริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างอะลูมิเนียมและเส้นใยคาร์บอนเพิ่มเติม
3. ควรทำการทดลองผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมโดยกระบวนการแทรกซึมในสถานะของเหลวนำมาเปรียบเทียบกับกระบวนการแทรกซึมในสถานะกึ่งของแข็ง เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และข้อดีข้อเสียของกระบวนการทั้ง 2 แบบ
4. ควรศึกษาความสามารถในการเป็ยระหว่างเนื้ออะลูมิเนียมกับเซรามิกซ์พรีฟอร์ม
5. ควรทำการขึ้นรูปวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนโดยการนำเส้นใยคาร์บอนไปทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลเปรียบเทียบกับเส้นใยคาร์บอนแบบไม่เคลือบด้วยนิกเกิล เพื่อศึกษาสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคที่ได้และความสามารถในการเป็ยของวัสดุ



6. ควรศึกษากระบวนการทางความร้อนที่เหมาะสมกับชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและฉนวนใยแก้วเพื่อปรับปรุงชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมหลังผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนให้มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น
7. ควรศึกษาอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูป และการแทรกซึมของน้ำโลหะกึ่งของแข็ง
8. ควรทำการศึกษาและผลิตชิ้นงานต้นแบบเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับวัสดุผสมได้แก่ ผ้าเกรก คานรับแรงกด ก้ามปู เฟืองเกียร์ และ ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการงานด้านวัสดุผสม

### บรรณานุกรม

- Asthana S. Solidification Processing in Reinforced Metals. Trans Tech Publications Ltd., 1998.
- เจษฎา วรรณสินธุ์ และคณะ (2006) เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมไดแคสดีงแบบกึ่งของแข็ง ภาควิชา วิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์การประชุมวิชาการงานหล่อไทย ครั้งที่ 3
- Flemings M.C. (1974). Solidification processing. McGraw-Hill, Inc.,146-154
- Flemings M.C., and Johnson W.L. (2002) “High viscosity liquid and semi-solid metal casting:Processes and products ”Plenary lecture world foundry conference 2002, KyongJu. Korea, October 20-24.
- Mortensen A., “Melt Infiltration of Metal Matrix Composites, “Comprehensive Composite Materials,Vol. 3 : Metal Matrix Composites, T.W. Clyne (ed.), Elsevier, 2000, p.521-554.
- Hunt W., “Metal Matrix Composites,” Comprehensive Composite Materials, Vol. 6: Design and Applications, M.G. Bader (ed.), Elsevier, 2000, p.57-66.
- M. Amirizad et al., (2005) “Evaluation of microstructure and mechanical properties in friction stir welded A356+15%SiCp cast composite”
- Martinez R.A. (2004). Ph.D.Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Ma, USA
- Vogel, A., Doherty, R.D., and Carton, B. (1979). Solidification and casting metal, The metal Society, London, England.

- W.B. Lee et al., (2003) "The improvement of mechanical properties of friction-stir-welded A356 Al alloy" *Material Science and Engineering A356* (2003) pp. 154-159
- Yan-hua, et al., (2005) "The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy "
- Y.G. Kim. et al., (2005) "Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy" *Material Science and Engineering A 415* (2006) 250-254
- Y.G. Kim. et al., (2006) "Effect of Welding parameter on Microstructure in stir zone of FSW joints of Aluminum die casting alloy" *Material Science and Engineering A 415* (2006) 250-254
- Z.Y. Ma, et al., (2006) "Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum"
- Champion A.R., *et al*, International Conference on Composite Materials, ICCM-2, Toronto, ON, The Metallurgical Society, Warrendale, PA, 1978, p. 833-904.
- Chung W.S. and Lin S.J. (1996). "Ni-Coated SiCp reinforced aluminum composites processed by vacuum infiltration." *Materials Research Bulletin*. 31(12): 1437-1447.
- Du W.F. and Watanabe T. (1997). "High-toughness B<sub>4</sub>C-AlB<sub>12</sub> composites prepared by Al infiltration." *Journal of the European Ceramic Society*. 17(7): 897-884.
- Xigang Fan, Daming Jiang, Qingchang Meng and Li Zhong (2006). "The microstructural evolution of an Al-Zn-Mg-Cu alloy during homogenization" *Materials Letters* 60 (2006) 1475-1479

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก.**

**ลักษณะเฉพาะของอะลูมิเนียมเกรดผสม 7075 แผนภาพสมดุลเฟส ภาพโครงสร้างทางจุลภาค  
และกระบวนการทางความร้อน**

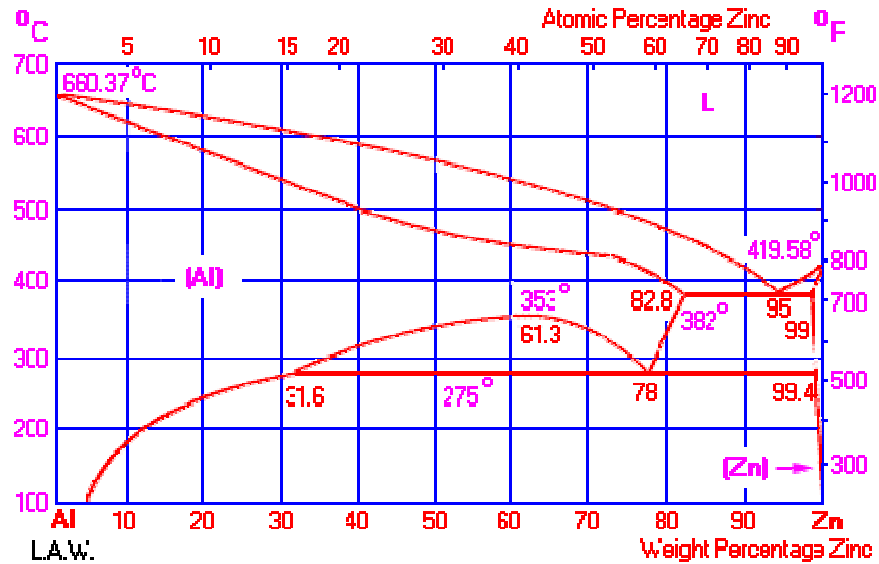
### ก.1 คุณสมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการ T6

ตารางที่ ก-1 ตารางแสดงคุณสมบัติต่างๆของอะลูมิเนียมเกรด 7075-T6

ส่วนผสมทางเคมี	ซิลิกอน (Si)	เหล็ก (Fe)	ไททาเนียม (Ti)	ทองแดง (Cu)	แมกนีเซียม (Mg)	แมงกานีส (Mn)	สังกะสี (Zn)	โครเมียม (Cr)	อื่น ๆ
ปริมาณ (กรัม)	0.40	0.50	0.20	1.20-2.00	2.10-2.90	0.30	5.10-6.10	0.18-0.28	0.05
ความหนาแน่น (Density)								2.81 g/c	
ความแข็งบริเนล (Hardness, Brinell)								150	
ความแข็งนूप (Hardness, Knoop)								191	
ความแข็งร็อกเวล (Hardness, Rockwell)								53.5	
ความแข็งวิกเกอร์ (Hardness, Vickers)								87	
ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength, Ultimate)								175	
การยืด ณ จุดขาด (Tensile Strength, Yield)								572 MPa	
เปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนการขาด (Elongation at Break)								11.0 %	
โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)								71.7 GPa	
สัดส่วนปัวซอง (Poissons Ratio)								0.330	
ความแข็งแรงต้านทานการล้า (Fatigue Strength)								159 MPa	
โมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus)								26.9 GPa	
ความแข็งแรงเฉือน (Shear Strength 331 MPa)								331 MPa	
ความจุความร้อน (Specific Heat Capacity)								0.960 J/g-°C	
จุดหลอมเหลว (Melting Point)								477 - 635.0 °C	
อุณหภูมิเริ่มเกิดการแข็งตัว (solidus)								477 °C	
อุณหภูมิเริ่มเกิดการหลอม (liquidus)								635.0 °C	
อุณหภูมิอบอ่อน (Annealing Temperature)								413 °C	
อุณหภูมิอบละลาย (Solution Temperature )								466 - 482 °C	

## ก.2 แผนภาพสมดุลเฟสของอะลูมิเนียมสังกะสี

แผนภาพสมดุล (Phase Diagram)



แผนภาพสมดุลอะลูมิเนียมผสมสังกะสี  
(Aluminum – Zinc Phase Diagram)

## ก.3 ลำดับการเจริญของ Al-Zn สามารถจัดรูปแบบดังนี้

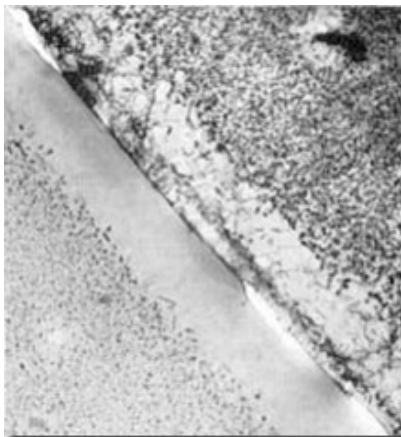
Supersaturated Solid Solution ► GP Zone ►  $\eta'$ (MgAl<sub>2</sub>) ►  $\eta$ (MgAl<sub>2</sub>)

**GP Zone** เป็นโครงสร้างการยึดเกาะกับโครงสร้างพื้น และมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมพลังงาน **Interfacial** สำหรับ **GP Zone** ในระบบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีและผสมแมกนีเซียมต่ำ ดังนั้น ความหนาแน่นยิ่งสูง ถ้าขอบเขตขนาดเล็กลง ๆ (ประมาณ 30°A) สามารถเกิดที่อุณหภูมิต่ำ (20-120°C) การเกาะตัวกันครั้ง ๆ กลาง ๆ แบบกึ่งเสถียรของสภาพความเป็นโลหะของ  $\eta'$ (MgAl<sub>2</sub>) สามารถอธิบายรูปร่างหน่วยเซลล์มีลักษณะแบบ **Monoclinic** ขณะที่ไม่เกาะตัวกันแบบสมดุล MgZn<sub>2</sub>  $\eta$  หน่วยเซลล์มีลักษณะแบบ **Hexagonal**

#### ก.4 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมสังสีและแมกนีเซียม



รูปที่ ก.1 แสดง โครงสร้างอะลูมิเนียมผสมสังสีและแมกนีเซียม โดยทำการเอจจิงที่ 398°C เวลา 24 ชั่วโมง โครงสร้างมี  $\theta'$  ที่ละเอียดอยู่ในเกรน และมีมุม GP Zone ที่ขอบเกรนแคบ



รูปที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาค อะลูมิเนียมผสมสังสี และ แมกนีเซียม โดยทำการเอจจิงที่ 498°C เวลา 1 ชั่วโมง โครงสร้างมี  $\theta'$  และ  $\theta$  ที่หยาบอยู่ในเกรน และมีมุม GP Zone ที่ขอบเกรนกว้าง

#### ก.4 กระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment)

การทำกรรมวิธีการให้ความร้อน (Heat Treatment) ในการทำให้เนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นสามารถทำได้โดยการให้ความร้อน ดังนั้นอะลูมิเนียมกลุ่มนี้ มีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเป็นพวกที่ทำกรรมวิธีทางความร้อนได้ (Heat Treatment Alloys) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว อะลูมิเนียมเกรด 7075 จะนิยมนำไปทำ T6

สัญลักษณ์ T เป็นการปฏิบัติการทางความร้อน เพื่อให้โลหะคงรูปไว้กับโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งอาจทำร่วมกับกรรมวิธีทางกลด้วยหรือไม่ก็ได้ซึ่งทำให้ชิ้นงานเสถียรภาพการอบละลายใช้อักษรตัว T ตามด้วยเลข 2 ถึง 10 เป็นข้อกำหนดของการทำงาน เพื่อเปลี่ยนสภาพของชิ้นงานแตกต่างกันออกไปโดยการเติมตัวเลขตัวเดียวหรือหลายตัวก็ได้ดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ตารางแสดงสัญลักษณ์การ Temper

<b>T1</b>	ปล่อยให้งานเย็นตัว ลงตามปกติ ในบรรยากาศปกติ และ ชุบแข็งด้วยตนเอง (Naturally Aged) โดยธรรมชาติ และ สภาพงาน ไม่เปลี่ยนแปลง
<b>T2</b>	ปล่อยให้งานเย็นตัว ลงในบรรยากาศปกติ ความแข็งจะเกิดขึ้น จากการใช้งาน ที่อุณหภูมิปกติ (Cold Worked) โดยธรรมชาติ
<b>T3</b>	นำงานไปทำ Solution Heat Treated แล้วปล่อยให้ งานเย็นตัวลง แล้วทำ Naturally Aged โดยทิ้งชิ้นงาน ไว้ในบรรยากาศ จะเกิดความแข็งแรง
<b>T4</b>	ทำ Solution Heat Treated และ Naturally Aged เพื่อให้ความแข็งแรงตัว
<b>T42</b>	ทำ Solution Heat Treated จาก "O" และ "F" Temper เพื่อปรับสภาพของ งานหล่อก่อนทำ Naturally Aged เพื่อให้ ความแข็งแรงตัว
<b>T5</b>	ปล่อยให้งานค่อยๆ เย็นตัวลง ในสภาพเดิม แล้วนำไปทำ Artificially Aged (โดยนำงานที่ทำ Quenching แล้วกลับมา อบอีกครั้ง ในช่วงอุณหภูมิ ไม่เกิน 200°C เพื่อให้เกิด เฟสใหม่ที่ให้ความแข็งแรง ได้ถึงจุดสูงสุด ภายในเวลาไม่เกิน 10ชม. เรียกว่า การทำ Agingเทียม หรือ Artificial Aging) * Artificially Aging ที่ 450°F - 8 hrs
<b>T51</b>	เป็นการทำ Stress Relieved โดยการนำไปตัดตรง หลังจากการทำ Solution Heat Treatment หรือ หลังจาก การปล่อยให้เย็นตัว ลงตามปกติ
<b>T52</b>	เป็นการทำ Stress Relieved โดยการนำไปกดอัดงาน ภายหลังจากการทำ Solution หรือ หลังจาก การปล่อยให้เย็นตัว ลงจากสภาพเดิม
<b>T54</b>	เป็นการทำ Stress Relieved โดยการใช้แรงดึง และ อัดงาน ภายหลังจาก การรีด หรือ ขึ้นรูป



<b>T6</b>	เป็นการทำ Solution Heat Treatment , Quenching แล้วทำ Artificially Aged
<b>T61</b>	เป็นการทำ Solution Heat Treatment แล้วทำ Quenching ก่อนทำ Artificially Aged เพื่อให้ได้ความแข็ง และ ความแข็งแรงสูงสุด
<b>T62</b>	เป็นการทำ Solution Heat Treatment จาก "O" และ "F" Temper จากนั้นนำไป Quenching ก่อนแล้วทำ Artificially Aged
<b>T7</b>	เป็นการทำ Solution Heat Treatment และ Stabilized (การทำ Overage เพื่อปรับปรุง ขนาดให้คงที่ แน่นนอน แต่ไม่สูญเสีย คุณสมบัติทาง Mechanical Properties) * หรือทำ Solution ที่ 980°F , Overage ที่ 440°F - 3-5 hrs.
<b>T71</b>	เป็นการทำ Solution Heat Treatment และ Stabilized (คือ การยี่ระยะเวลา และ อุณหภูมิ ทำ Overage เพื่อลดความเครียด และ ปรับปรุงให้มี ขนาดคงที่แน่นนอน แต่คุณสมบัติทาง Mechanical Properties จะลดลง
<b>T8</b>	คือ การทำ Solution Heat Treatment , Cold Worked และ นำมาทำ Artificially Age
<b>T9</b>	Solution Heat Treatment , Artificially Age และนำมาทำ Cold Worked
<b>T10</b>	คือ การให้งานเย็นตัว ตามปกติ แล้วนำไป ขึ้นรูป Cold Worked แล้วนำมาทำ Artificially Age

ภาคผนวก ข.

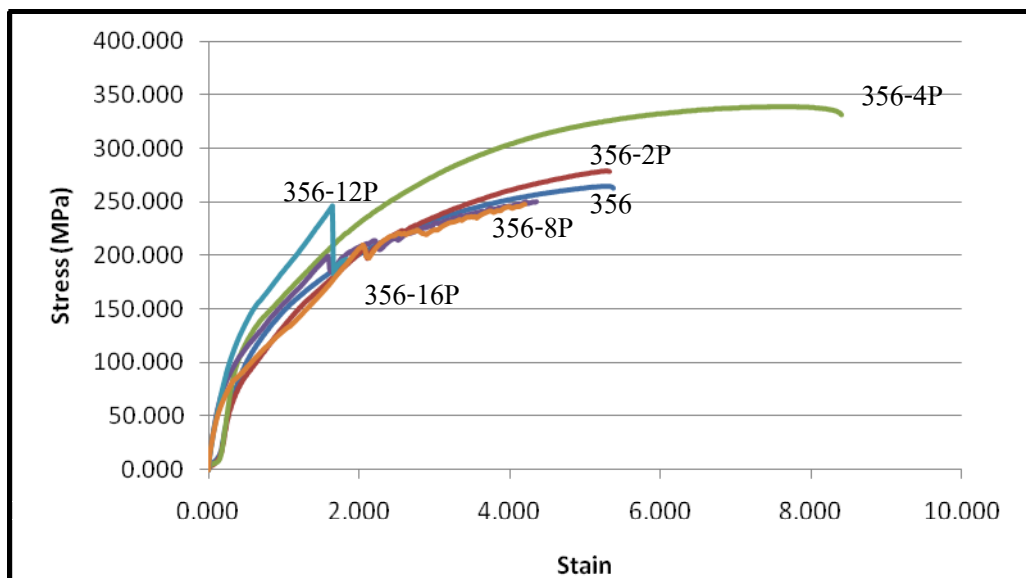
กราฟ Stress – Strain ที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

## กราฟความเค้นและความเครียดของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม

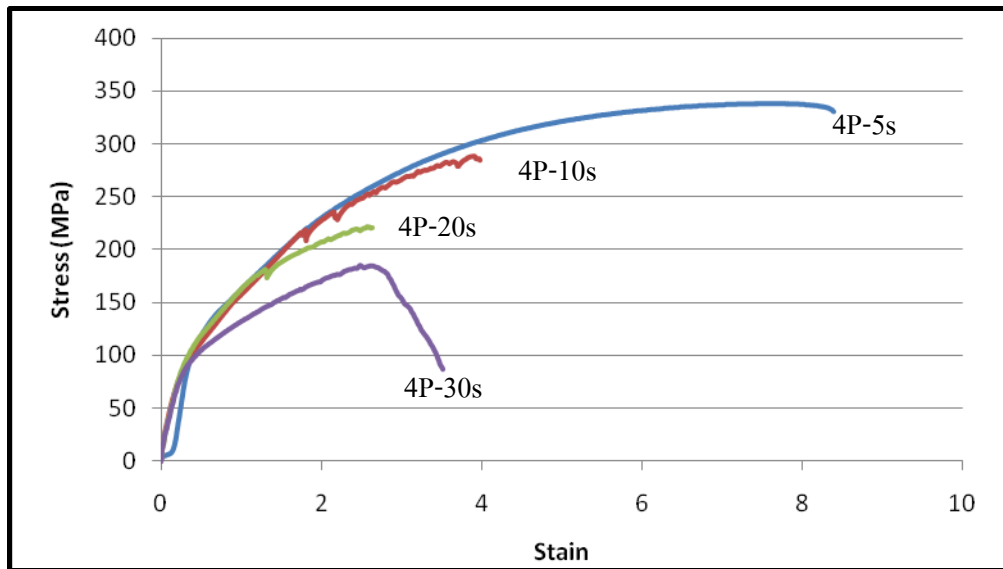
จากงานวิจัยที่ได้ศึกษากระบวนการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 และ 7075 พบว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและฉนวนใยแก้วช่วยให้สมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้นดังนี้คือ

1. การเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักช่วยเพิ่มสมบัติความแข็งและความแข็งแรงต่อการตัดโค้ง
2. การเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถักเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนแบบถักมีจำนวนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งและความแข็งแรงต่อการตัดโค้งมีแนวโน้มลดลง
3. การเสริมแรงด้วยฉนวนใยแก้วช่วยเพิ่มสมบัติของความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอแต่ไม่ช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงต่อการตัดโค้งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบถัก

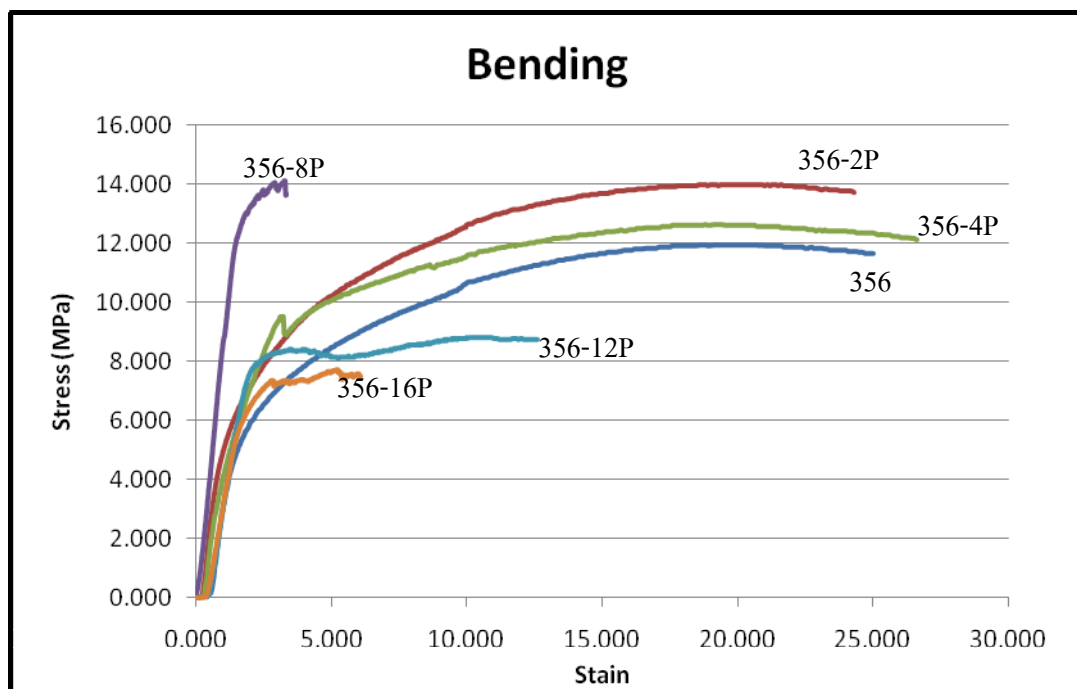
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนในรูปกราฟแสดงดังรูปที่ ข.1 – ข.7 พบว่าวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมมีค่าความเค้นและความเครียดสูงกว่าอะลูมิเนียมไม่เสริมแรง นั่นแสดงว่าเมื่อทำการเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและฉนวนใยแก้วจะช่วยให้ค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นต่อมาเมื่อพิจารณารอยแตกของชิ้นงานหลังผ่านการทดลองแสดงดังรูปที่ ข.8 และ ข.9



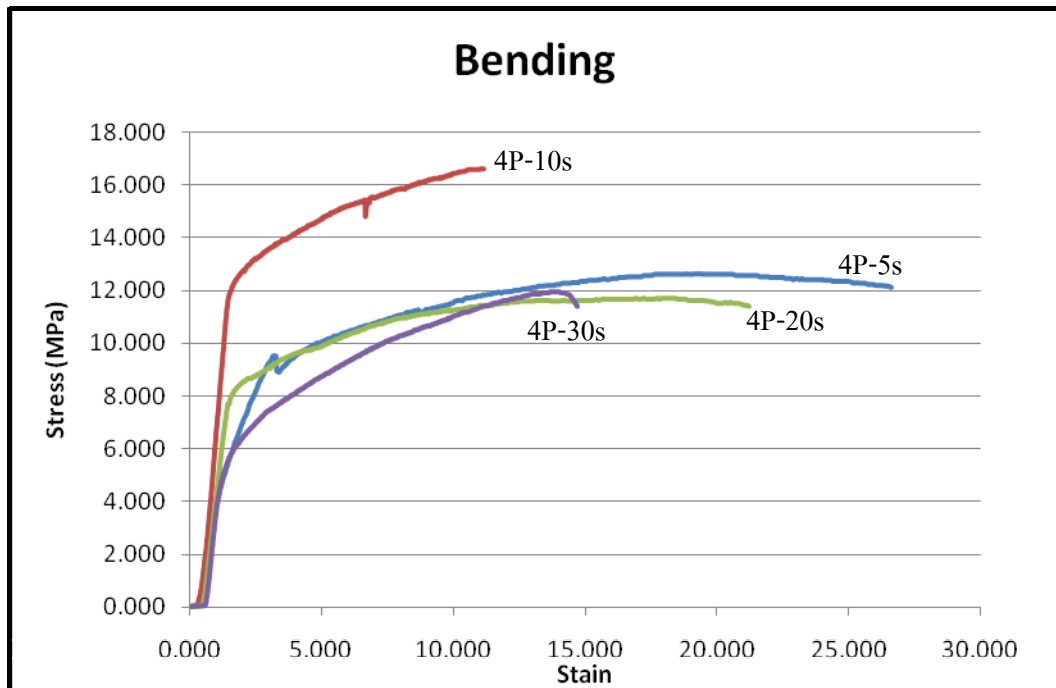
ข.1 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 กรณีจำนวนชั้นเสริมแรงต่างกัน (tensile)



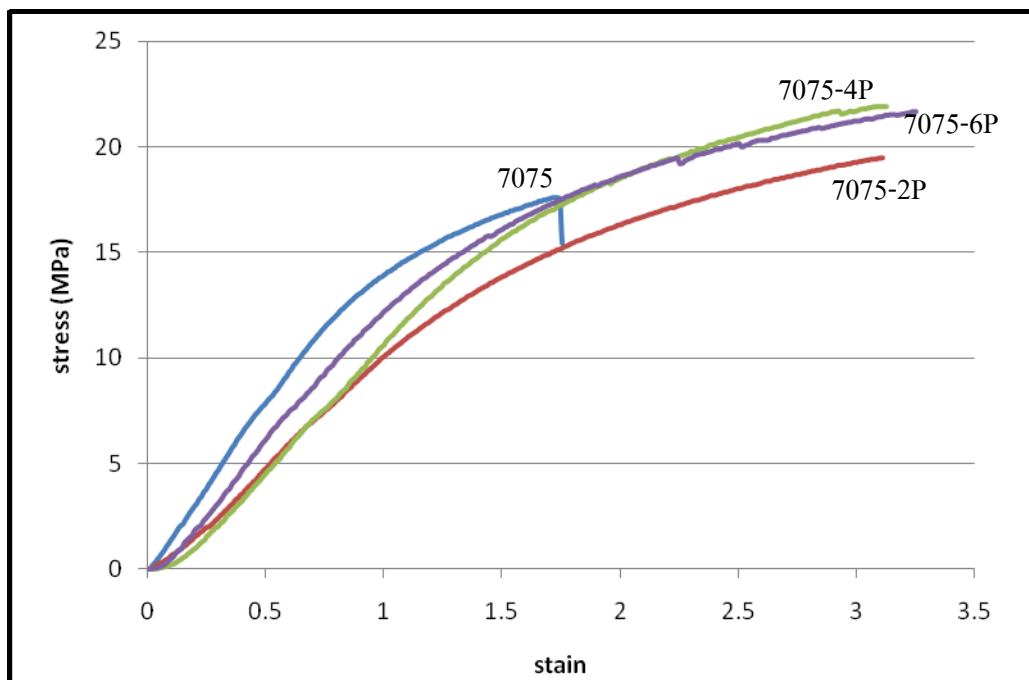
ข.2 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 กรณีสัดส่วนของแข็งต่างกัน (tensile)



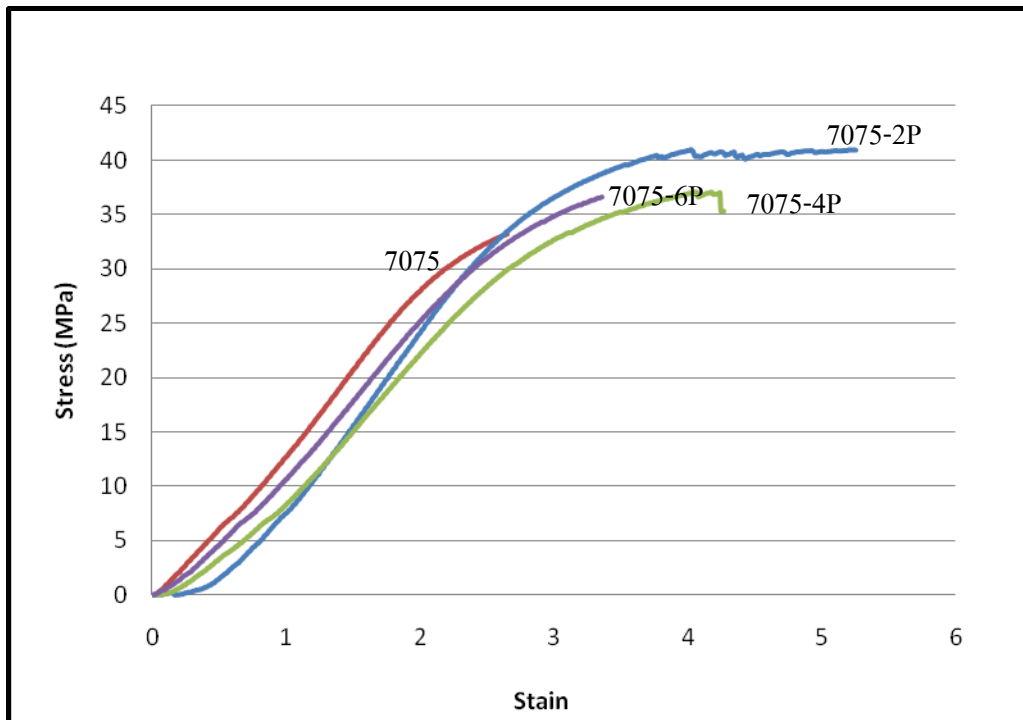
ข.3 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 กรณีจำนวนชั้นเสริมแรงต่างกัน



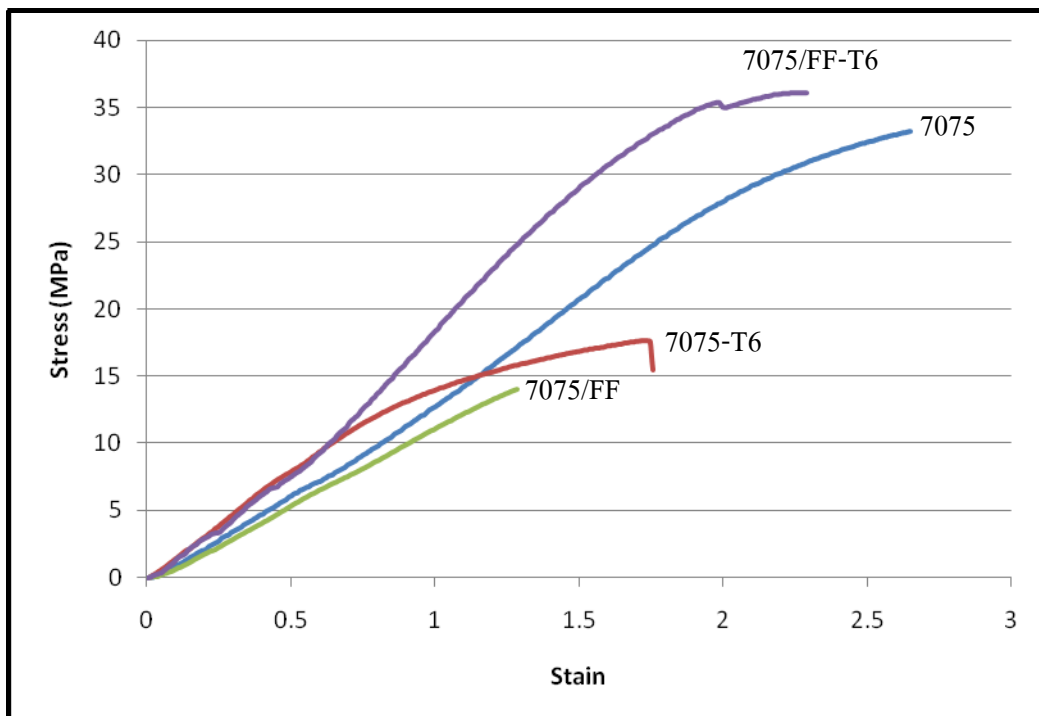
ข.4 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 กรณีสัดส่วนของแข็งต่างกัน



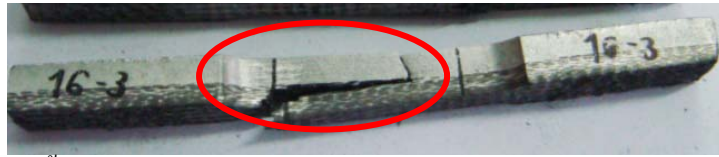
ข.5 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 กรณี as cast



ข.6 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 กรณี T6



ข.7 กราฟความเค้นความเครียดของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075

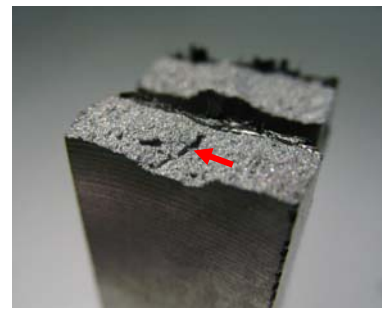
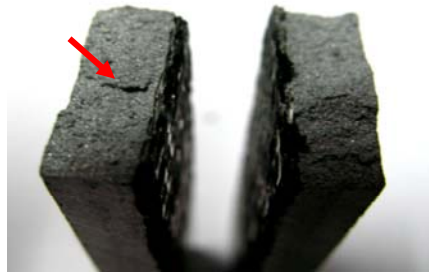


(ก) การแยกชั้นหลังการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว



(ข) การแยกชั้นหลังการทดสอบสมบัติความแข็งแรงต่อการดัดโค้ง

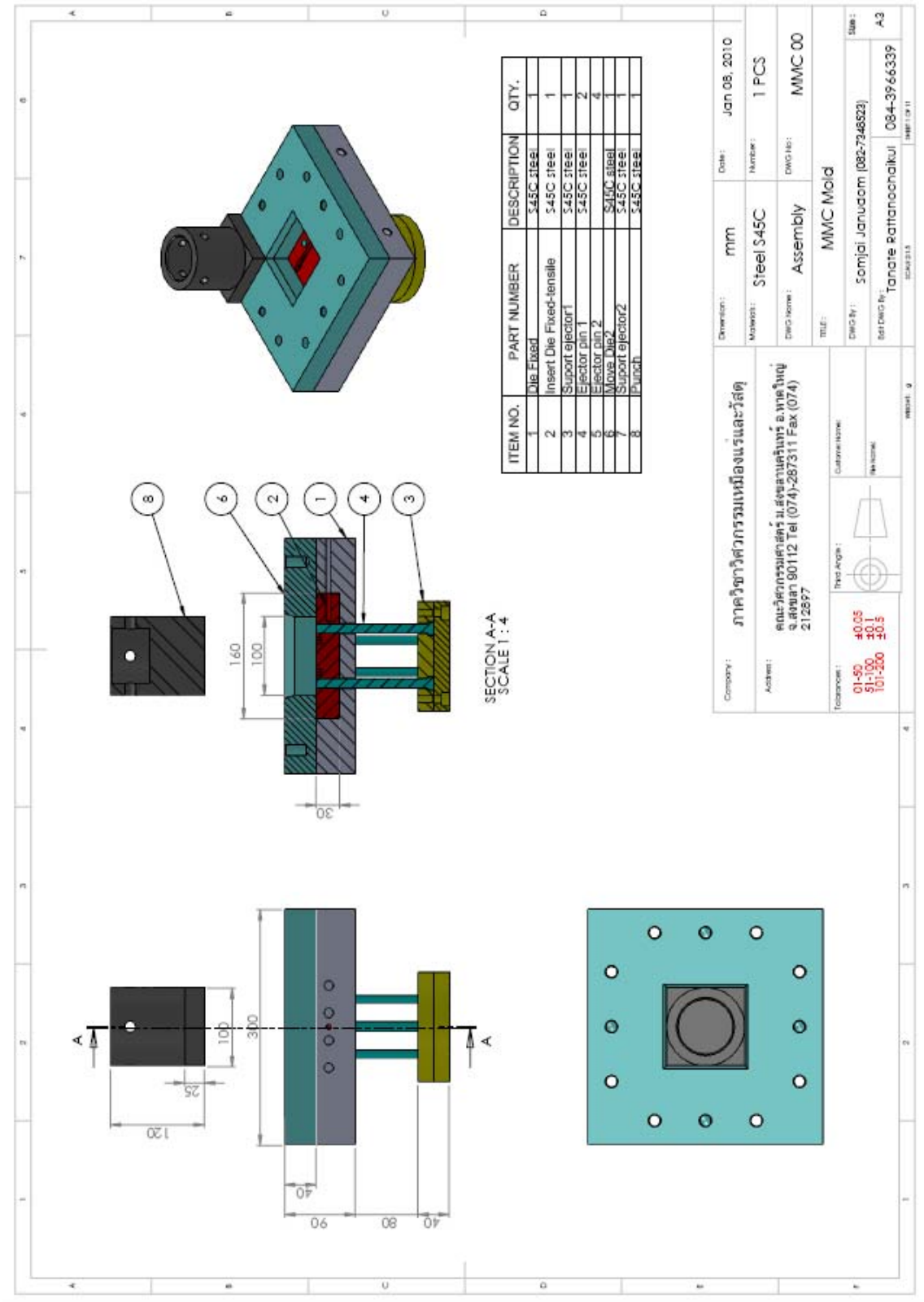
ข.8 ลักษณะการแยกชั้นของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 356 หลังผ่านการทดสอบสมบัติเชิงกล



ข.9 ลักษณะการแตกของวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังผ่านการทดสอบสมบัติเชิงกล

ภาคผนวก ก.  
แบบ Drawing แม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย





แบบ Drawing แม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย

