



การพัฒนาและผลิตเกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม
Development and Production of Armor from Aluminum Matrix Composite

ตฤณเมษ สังขพันธ์
Trinnamet Sungkapun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
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**

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาและผลิตกระดาษกันกระสุนจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม
ผู้เขียน นายตฤณเมษ สังขพันธ์
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรวรรณ เหล่าศิริพจน์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์)

..... กรรมการ
(ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพล ศรีชนะ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอแสดงความขอบคุณ
บุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. เจษฎา วรรณสินธุ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายตฤณเมษ สังข์พันธ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายตฤณเมษ สังขพันธ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาและผลิตเกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม
ผู้เขียน นายตฤณเมษ สังขพันธ์
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อ

เกราะกันกระสุน สำหรับยานยนต์ เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยป้องกันอันตรายจากกระสุนหรืออาวุธแหลมคม มีการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ไซ้ เป็นชิ้นส่วนในรถหุ้มเกราะ เรือ หรืออากาศยาน ปัจจุบันเกราะกันกระสุนสำหรับยานยนต์ผลิตมาจากเหล็กกล้าทำให้เกิดปัญหาในด้านของน้ำหนักที่ค่อนข้างมาก จากปัญหาดังกล่าว วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์เซรามิกส์ มีโอกาสนำมาใช้ทดแทนเกราะกันกระสุนแบบเดิม เนื่องจากการมีสมบัติที่เด่น ในด้านน้ำหนัก มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้มุ่งศึกษาและพัฒนาการผลิตเกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์เซรามิกส์ โดยกระบวนการหล่ออัดขึ้นรูปในสถานะกึ่งของเหลว งานวิจัยนี้รายงานผลของการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การศึกษาสมบัติทางกล ซึ่งประกอบด้วย ความสามารถในการต้านทานแรงดึงและความสามารถในการต้านทานการทำลายของกระสุนตามมาตรฐานการทดสอบของ National Institute of Justice ระดับ 3 ไซ้กระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร มีความเร็ว 847 ± 9.1 เมตร/วินาที แผ่นเกราะที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ตามสูตร PCS 7% ผ่านตามเกณฑ์การทดสอบและแผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตได้จากงานวิจัย มีการนำไปประกอบเป็นเรือลาดตระเวนของทัพเรือไทย เพื่อทดสอบและใช้งานจริงในภาคสนาม

Thesis Title Development and Production of Armor from Aluminum Matrix Composite
Author Mr.Trinnamet Sungkapun
Major Program Materials Engineering
Academic Year 2012

Abstract

Armor is the equipment for protection damage from bullet or sharp weapon which is used for various applications such as part of armored vehicles, ship or even aircraft. Currently, the armored cars bulletproof have been produced from steel cause a relatively heavy weight. Of such problems, the Aluminum Matrix Composite with Silicon Carbide reinforcement is used to replace traditional bulletproof armor. The features of Aluminum Matrix Composite with Silicon Carbide reinforcement armor are lighter weight and good corrosion resistant. In this research was to study and development the production of Armor from Aluminum Matrix Composite by using Semi-Solid Squeeze cast. This research reports the results of microstructure analysis, mechanical properties which include tensile strength and ability to resist the destruction of ammunition (ballistic tested) follow National Institute of Justice standard used a bullet size 7.62x51 millimeter and velocity of bullet tested was 847 ± 9.1 meter/second the armor reinforcement with Silicon Carbide 7% PCS can protection follow NIJ standard. The armor that produced from this trail is deployed for testing using in real situations with the Thailand Royal Navy.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอ ขอบคุณ โครงการทุนศึกษย์กักนุญ
ระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนเงิน
ค่าลงทะเบียนเรียน และค่าใช้จ่ายในการศึกษาระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย
ขอขอบคุณ โครงการวิจัยการพัฒนาและผลิตกระดาษ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
ที่ได้มอบโอกาส และทุนสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาสใน
การทำวิจัย และมอบความไว้วางใจให้ข้าพเจ้าเป็นผู้ช่วยวิจัยใน โครงการ วิจัย การพัฒนาและผลิต
กระดาษ ทำให้ข้าพเจ้าได้รับประสบการณ์ และความรู้อันมีประโยชน์อย่างมากมายในการทำวิจัย
ตลอดจนให้คำแนะนำ และกำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ประกาศ เมืองจันทร์บุรี ผศ .ดร.วีรวรรณ เหล่าศิริพงษ์
และ ดร.บุญรัตน์ โล่วงศ์วัฒน์ ที่ได้เสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้
ข้อเสนอแนะที่ดีในครั้งนี ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และบุคลากรทุก
ท่านที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ งบประมาณ และคำแนะนำต่างๆ ซึ่งทำให้การดำเนินงาน
เป็นไปได้อย่างราบรื่น

นอกจากนี้วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสำเร็จไปไม่ได้เลย หากไม่ได้รับความช่วยเหลือจาก ทีมงาน
Innovative Metal Technology (IMT) ทุกคน ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างเต็มที่ในการทดลองครั้ง
นี้

และสุดท้าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณพ่อ-คุณแม่ ที่คอยดูแลเอาใจใส่ตั้งแต่เล็กจนโต และ
เป็นกำลังใจให้ตลอดมา และที่ขาดไม่ได้อาจารย์ปิยธิดา บุญสนอง ผู้อยู่เคียงข้างกันตลอดมา และ
เพื่อนอาจารย์มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่คอยเป็นกำลังใจเสมอมา ขอขอบคุณเพื่อนเหมืองแร่และ
วัสดุ Neer'37 ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์

ศฤงเกษม สังข์พันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(13)
รายการรูป	(15)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(25)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	3
1.5.1 เกราะกันกระสุน (Armor)	3
1.5.2 เกราะยานยนต์ในประเทศไทย	5
1.5.3 มาตรฐาน National Institute of Justice: NIJ	6
1.5.4 วัสดุผสม (Composite)	7
1.5.5 กรรมวิธีการหล่ออัด (Squeeze Casting)	9
1.5.6 โลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminum alloys)	12
1.5.7 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting)	17
1.5.8 กรรมวิธี การผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็ง (Gas Induced Semi - Solid, GISS Process)	18
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
1.7 สถานที่ทำการวิจัย	23
2 วิธีการวิจัย	24
2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.1 เตาหลอม (Melting Furnace)	24
2.1.2 เบ้าหลอม โลหะ (Crucible)	24
2.1.3 เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว	25
2.1.4 เครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic) แนวตั้งขนาด 80 ตัน	25
2.1.5 แม่พิมพ์	26
2.1.6 เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine)	27
2.2 ขั้นตอนการวิจัยศึกษาการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสม ในกลุ่มรีด(Wrought Aluminum Alloy)	27
2.2.1 การออกแบบวิธีดำเนินงานวิจัยศึกษาการแปรรูปโลหะกึ่ง ของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)	27
2.2.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยศึกษาการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของ อะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)	28
2.2.3 การเตรียมโลหะกึ่งของแข็ง	29
2.2.4 การแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรี (Wrought Aluminum Alloy)	30
2.2.5 การปรับปรุงสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum) ด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment)	32
2.2.6 การทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)	33
2.2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด	35
2.2.8 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งของโลหะกึ่งของแข็งที่เตรียมได้จาก กระบวนการ GISS	37
2.2.9 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะที่ เลือกใช้ผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนในงานวิจัย	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ขั้นตอนการวิจัยการพัฒนาและการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	39
2.3.1 การออกแบบการวิจัยการพัฒนาและการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	39
2.3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยการพัฒนาและการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	40
2.3.2.1 วัสดุเนื้อหลัก	40
2.3.2.2 ส่วนเสริมแรง	40
2.3.2.2.1 การออกแบบวิธีดำเนินงานวิจัยเพื่อวิจัยและพัฒนาการผลิตวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน	41
2.3.2.2.2 การวิเคราะห์ทดสอบแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน	43
2.3.2.2.2 การวิเคราะห์ทดสอบแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน	45
2.3.3 การผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีดเกรด 7075 เป็นเนื้อหลัก และเสริมแรงด้วยวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง	47
2.3.4 การปรับปรุงแม่พิมพ์สำหรับผลิตแผ่นเกราะกันกระสุน	47
2.3.5 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแผ่นเกราะกันกระสุน ด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment)	48
2.3.5.1 การอบละลาย (Solution Treatment)	48
2.3.5.2 การบ่มเทียม (Artificial Aging)	48
2.3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 เป็นเนื้อหลัก และเสริมแรงด้วยแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.7 การทดสอบสมบัติทางกลของแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 เป็นเนื้อหลักและเสริมแรงด้วยแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อ	49
2.3.7.1 การทดสอบการดัดงอ (Bending test)	49
2.3.8 การเตรียมผิวแผ่นเกราะและการกำจัดอะลูมิเนียมส่วนเกิน	50
2.3.9 การทดสอบความสามารถในการต้านทานการทำลายของกระสุน	51
2.3.10 การติดตั้งแผ่นเกราะกันกระสุนบนเรือจู่โจมลำน้ำเรือต้น	52
3 ผลและการอภิปรายผล	54
3.1 ผลการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)	54
3.1.1 ผลการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024	54
3.1.2 ผลการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมเกรด 5052	57
3.1.3 ผลการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061	60
3.1.4 ผลการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075	63
3.2 ผลการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมในกลุ่มรีดที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน	66
3.3 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะที่เลือกใช้เป็นวัสดุเนื้อหลักในงานวิจัย	70
3.4 ผลจากการศึกษาสัดส่วนของแข็งจากการหล่ออัดขึ้นรูปของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีดเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 ในสถานะกึ่งของแข็ง	71
3.5 ผลของโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการแปรรูปโลหะผสมอะลูมิเนียมในกลุ่มรีดเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 ที่นำมาทำการหล่ออัดขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็ง และผ่านปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน	74
3.5.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง เกรด 2024	74

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เกรด 5052	76
3.5.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม -แมกนีเซียม-ซิลิกอน เกรด 6061	78
3.5.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี เกรด 7075	80
3.6 การปรับปรุงแม่พิมพ์สำหรับการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุน	83
3.7 ผลการผลิตแผ่นวัสดุเสริมแรงชนิดซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน	84
3.8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแผ่นเกราะกันกระสุนเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน	88
3.9 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน	90
3.10 ผลการทดสอบการต้านทานการทำลายของกระสุน (การทดสอบยิงทางปืนวิธี: Ballistic Test) ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม	91
3.10.1 การทดสอบยิงเกราะกันกระสุนครั้งที่ 1	91
3.10.2 การทดสอบยิงเกราะกันกระสุนครั้งที่ 2	94
3.10.3 การทดสอบยิงเกราะกันกระสุนครั้งที่ 3	96
3.11 ผลการนำแผ่นเกราะกันกระสุนไปประกอบเป็นเสื้อกันกระสุนแบบจู่โจม	98
4 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	99
4.1 บทสรุป	99
4.1.1 บทสรุปการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)	99
4.1.2 บทสรุปการพัฒนาและผลิตเกราะกันกระสุนสำหรับเสื้อกันกระสุนแบบจู่โจม	100
4.2 ข้อเสนอแนะ	101
บรรณานุกรม	102
ภาคผนวก	104
ก.	105
ประวัติผู้เขียน	108

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

Al MMC	วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม (Aluminium Metal Matrix Composites)
PMCs	วัสดุผสมเนื้อโพลิเมอร์ (Polymer Matrix Composites)
CMCs	วัสดุผสมเนื้อเซรามิก (Ceramic Matrix Composites)
MMCs	วัสดุผสมเนื้อโลหะ (Metal Matrix Composites)
Al_2O_3	อะลูมินา (Alumina)
SiO_2	ซิลิกอนออกไซด์
K_2ZrF_6	โปตัสเซียมเซอโคเนียมฟลูออไรด์
P_{th}	ค่าความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการแทรกเข้าไประหว่างช่องว่างของแต่ละอนุภาคเซรามิกส์
λ	ค่าปัจจัยที่ถูกต้องสำหรับสภาพผิวหน้าและความคลาดเคลื่อนของทรงกลม
V_p	ค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างอนุภาคและชิ้นงานเซรามิกอัดขึ้นรูป
D_p	ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเซรามิก
θ	มุมระหว่างขอบของของเหลวกับของแข็ง
L	ความยาวการแทรกซึม
P_0	ความดันที่ใช้ในการหลอมของพรีฟอร์ม
P_a	ความดันบรรยากาศของการแทรกซึม
ΔP_y	ความดันที่เกิดจากการแทรกซึมโลหะเข้าไปในพรีฟอร์ม
t	เวลา
GISS	Gas Induced Semi-Solid
SiC	ซิลิกอนคาร์ไบด์
AlCu ₃	อะลูมิเนียมทองแดง
Cu	ทองแดง
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
OES	Optical Emission Spectrometer
T6	การปรับปรุงสมบัติทางความร้อน

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แสดง ระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะตามมาตรฐาน NIJ [3]	6
1.2	แสดงสมบัติของอะลูมิเนียม [16]	12
1.3	แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูป [18]	14
1.4	แสดงสัญลักษณ์การทำ Temper	16
2.1	แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ที่ใช้ในการวิจัย	28
2.2	แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 5052 ที่ใช้ในการวิจัย	28
2.3	แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 ที่ใช้ในการวิจัย	28
2.4	แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในการวิจัย	28
2.5	แสดงอุณหภูมิของน้ำโลหะที่เริ่มต้นปล่อยฟองแก๊สของอะลูมิเนียมผสมเกรดต่าง ๆ	31
2.6	แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน	32
2.7	แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ชนิด Secondary Alloys ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้	40
2.8	แสดงส่วนผสมของผงซิลิกอนสำหรับการเผาเชื่อมแบบ Oxidation Bonding และ Reaction Bonding	42
3.1	แสดงผลของการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Tensile Test) รวมทั้งตัวแปรที่ใช้ในการหล่ออัดขึ้นรูปและการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075	66

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3.2	แสดงสัดส่วนของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีดเกรด 2024 5052 6061 และ 7075 ที่เวลาการปล่อยฟองแก๊สต่างกัน	72
3.3	แสดงค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density), ค่าความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density), ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวหลังเผา และค่าเปอร์เซ็นต์รูพรุนของชิ้นงานหลังเผาของแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์พรุน	84
3.4	แสดงผลการทดสอบยิงทางชีพินวิถี : Ballistic Test ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม ครั้งที่1	92
3.5	แสดงผลการทดสอบยิงทางชีพินวิถี : Ballistic Test ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม ครั้งที่ 2	94
3.6	แสดงผลการทดสอบยิงทางชีพินวิถี : Ballistic Test ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม ครั้งที่3	96

รายการภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงภาพจำลองการกระจายพลังงานของสื่อเกราะกันกระสุนแบบอ่อน[2]	4
1.2	แสดงภาพจำลองการยุบตัวของสื่อเกราะกันกระสุน [4]	4
1.3	แสดงภาพจำลองเมื่อลูกกระสุนปืนชนเกราะแข็ง [4]	5
1.4	แสดงขนาดกระสุนตามมาตรฐาน NIJ [5]	7
1.5	แสดงกระบวนการ Infiltration	9
1.6	แสดงกระบวนการแทรกซึม (Infiltration) แบบต่าง ๆ: (a) Spontaneous Infiltration, (b) Squeeze Casting, (c) Gas Pressure Infiltration และ(d) Centrifugal Infiltration	11
1.7	แผนภาพสมมูลแสดงช่วงของอุณหภูมิของโลหะที่อยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว	17
1.8	เปรียบเทียบโครงสร้างและการไหลระหว่างการหล่อด้วยน้ำโลหะกับโลหะกึ่งของแข็ง[7]	18
1.9	กรรมวิธีผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ด้วยกระบวนการ Gas Induced Semi-Solid (GISS process) และ โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ผลิตได้ [7]	19
1.10	แสดงโครงสร้างจุลภาคของ Al6061-30vol%SiC ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการ Squeeze Casting [6]	20
1.11	แผ่นโลหะ (ซ้าย) แผ่นเซรามิก (ขวา)	20
1.12	อะลูมิเนียมเกรด 5083+30%SiC (ซ้าย) อะลูมิเนียมเกรด 6063+15%Si (ขวา)	21
1.13	แผ่นที่มีซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นเสริม 30% (ซ้าย) แผ่นที่มีซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นส่วนเสริมแรง 15% (กลาง) แผ่นที่มีอะลูมินาเป็นส่วนเสริมแรง (ขวา) [13]	22
2.1	แสดงเตาหลอมไฟฟ้าแบบลวดความต้านทานที่ใช้ในการทดลอง	23
2.2	แสดงเบ้าหลอมโลหะชนิด Graphite-clay base ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	24

รายการภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.3	แสดงเครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว ที่มีชื่อว่า GISS	25
2.4	แสดงเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน (ซ้าย) ชุดคั่นปลดชิ้นงาน (กลาง) ชุด ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ (ขวา)	25
2.5	แสดงแม่พิมพ์สำหรับงานหล่ออัด (Squeeze Casting) ที่มีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ที่ติดตั้งบนเครื่องอัดไฮดรอลิก (ซ้าย) แสดงแบบ ของแม่พิมพ์ (ขวา)	26
2.6	แสดงแม่พิมพ์รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 10x10 เซนติเมตร พร้อมชุดคั่นปลด ชิ้นงานและชุดให้ความร้อนที่ติดตั้งบนเครื่องอัดไฮดรอลิก (ซ้าย) แสดง แบบของแม่พิมพ์ (ขวา)	26
2.7	แสดงเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine)	27
2.8	แสดงวิธีดำเนินงานวิจัย ศึกษาการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียม ผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)	27
2.3	แสดงเครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว ที่มีชื่อว่า GISS	25
2.4	แสดงเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน (ซ้าย) ชุดคั่นปลดชิ้นงาน (กลาง) ชุดให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ (ขวา)	25
2.5	แสดงแม่พิมพ์สำหรับงานหล่ออัด (Squeeze Casting) ที่มีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ที่ติดตั้งบนเครื่องอัดไฮดรอลิก (ซ้าย) แสดงแบบของแม่พิมพ์ (ขวา)	26
2.6	แสดงแม่พิมพ์รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 10x10 เซนติเมตร พร้อมชุดคั่นปลด ชิ้นงานและชุดให้ความร้อนที่ติดตั้งบนเครื่องอัดไฮดรอลิก (ซ้าย) แสดงแบบของแม่พิมพ์ (ขวา)	26
2.7	แสดงเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine)	27

รายการภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.28	แสดงขั้นตอนการเผาเชื่อมแบบ Reaction Bonding (ภายใต้บรรยากาศแบบอาร์กอน)	42
2.29	แสดงภาพแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนที่ใช้เป็นตัวเสริมแรง สูตร 5%PCS	44
2.30	แสดงภาพแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนที่ใช้เป็นตัวเสริมแรง สูตร 7%PCS	45
2.31	แสดงกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งหรือ Semi-Solid Infiltration Process	45
2.32	แสดงกระบวนการ Semi-Solid Infiltration Process เพื่อการผลิตแผ่นเกราะ	46
2.33	แสดงแม่พิมพ์ส่วนล่าง (Bottom Punch) ที่ได้ปรับปรุงโดยการกัดร่อง (Milling) เพื่อเพิ่มปริมาตรของเนื้ออะลูมิเนียมส่วนล่างที่อยู่ระหว่างแผ่นเสริมแรง	47
2.34	แสดงขั้นตอนในการทำการ ปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการ ทางความร้อนแบบ T6 ที่เลือกให้กับอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีดเกรด 7075	47
2.35	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการขัดแผ่นเกราะเพื่อ โครงสร้างจุลภาค	48
2.36	แสดงการทดสอบแบบ Three-Point loading (ซ้าย) และ แบบ Four-Point loading (ขวา) [15]	49
2.37	แสดงเครื่อง Instron Universal Model 4502 ที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงและการตัดต่อชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน	50
2.38	แสดงกรรมวิธีการกัดผิวหน้าแผ่นเกราะกันกระสุน (Milling Surface) ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้เครื่องเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine)	50
2.39	แสดงแผ่นเกราะกันกระสุนที่เตรียมสำหรับทดสอบความสามารถในการต้านทานการทำลายของกระสุนขนาด 7.26 มิลลิเมตร (ซ้าย) แผ่นเกราะกันกระสุนที่หุ้มเคฟลาร์ (Kevlar) และประกอบเข้ากันกับกระเบดินตามมาตรฐาน NIJ สำหรับการยิงทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุน (ขวา)	51
2.40	แสดงอาวุธปืนที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการต้านทานการทำลายของกระสุน	51

รายการภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.41	แสดงการติดตั้งแผ่นเกราะกันกระสุนสำหรับการศึกษาถึงพฤติกรรมการพังทลายของเกราะกันกระสุนเมื่อได้รับแรงประทะจากกระสุนปืน (ซ้าย) กล้องความเร็วสูงที่จับภาพพฤติกรรมการพังทลายของแผ่นเกราะกันกระสุนในงานวิจัยนี้ (ขวา)	52
2.42	แสดงแบบเกราะกันกระสุนสำหรับเรือต้นแบบจู่โจมลำน้ำ (ซ้าย) แสดงแบบเรือต้นแบบจู่โจมลำน้ำ (ขวา)	53
3.1	แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง เกรด 2024 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบ	54
3.2	แสดงการเปรียบเทียบค่า % Elongation ของโลหะผสมอะลูมิเนียม - ทองแดง เกรด 2024 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในเวลากการปล่อยฟองแก๊ส 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6	55
3.3	แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่าเกรนของชิ้นงานทดสอบมีลักษณะเป็นก้อนกลม	56
3.4	แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่าบางบริเวณของชิ้นงานทดสอบเกิดโพรงอากาศ	56
3.5	แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่ามี Inclusion ที่ผิวหน้ารอยแตก	56

รายการภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.6	<p>แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม -แมกนีเซียม เกรด 5052 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในเวลากการปล่อยฟองแก๊ส 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ O</p>	57
3.7	<p>แสดงการเปรียบเทียบค่า % Elongation ของโลหะผสมอะลูมิเนียม -แมกนีเซียม เกรด 5052 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในเวลากการปล่อยฟองแก๊ส 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วย กระบวนการทางความร้อนแบบ O</p>	58
3.8	<p>แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของ อะลูมิเนียมผสมเกรด5052 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่าเกรนของชิ้นงานมีลักษณะเป็นก้อนกลมละบางบริเวณมีโพรงอากาศเกิดขึ้น</p>	59
3.9	<p>แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของ อะลูมิเนียมผสมเกรด 5052 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่ามีสิ่งปนเปื้อน (Inclusion) ที่ผิวหน้ารอยแตก</p>	59
3.10	<p>แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของ อะลูมิเนียมผสมเกรด 5052 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่าเกิดการแตกแบบผ่าเกรน</p>	59
3.11	<p>แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม -แมกนีเซียม -ซิลิกอน เกรด 6061 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในเวลากการปล่อยฟองแก๊ส 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6</p>	60

รายการภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.12	แสดงการเปรียบเทียบค่า % Elongation ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอนเกรด 6061 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในเวลากการปล่อยฟองแก๊ส 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6	61
3.13	แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด6061 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่าเกรนของชิ้นงานมีลักษณะเป็นก้อนกลม	62
3.14	แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด6061 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่ามีสิ่งปนเปื้อน (Inclusion) กระจายตัวที่ผิวหน้ารอยแตก	62
3.15	แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด6061 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่ามีสิ่งปนเปื้อน (Inclusion) ที่ผิวหน้ารอยแตก	62
3.16	แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม -สังกะสี เกรด 7075 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในเวลากการปล่อยฟองแก๊ส 5, 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6	63
3.17	แสดงการเปรียบเทียบค่า % Elongation ของโลหะผสมอะลูมิเนียม -สังกะสี เกรด 7075 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในเวลากการปล่อยฟองแก๊ส 5, 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6	64
3.18	แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด7075 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่าเกรนของชิ้นงานมีลักษณะเป็นก้อนกลม	65

รายการภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.19	แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของ อะลูมิเนียมผสมเกรด6061 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่ามีโพรงอากาศที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้ารอยแตก	65
3.20	แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของ อะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่ามี โพรงอากาศที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้ารอยแตก	65
3.21	แสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) ของ โลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 และเวลาในการ ปลดปล่อยฟองแก๊สต่างกัน ที่ผ่านการหล่ออัดขึ้นรูปและปรับปรุงสมบัติด้วย กระบวนการทางความร้อน	67
3.22	แสดงการเปรียบเทียบค่าความยืดตัว (% Elongation) ของโลหะผสม อะลูมิเนียม เกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 และเวลาในการปลดปล่อย ฟองแก๊สต่างกัน ที่ผ่านการหล่ออัดขึ้นรูปและปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการ ทางความร้อน	68
3.23	แสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของโลหะ ผสมอะลูมิเนียม เกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 และผ่านกระบวนการ ทางความร้อนที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง	69
3.24	แสดงค่าความยืดตัว (% Elongation) ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 และผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ได้จากการ ทดลองเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง	69
3.25	แสดงเส้นกราฟการเย็นตัว (Cooling curve) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสม เกรด 7075	71
3.26	เมื่อไม่ผ่านกระบวนการ GISS ที่นำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการวิจัย แสดงผลงานจากแม่พิมพ์ทองแดง และบริเวณตรงกลางที่นำไปวิเคราะห์หา สัดส่วนของแข็ง	72

รายการภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.27	แสดงกราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของแข็ง ของโลหะผสมอะลูมิเนียมในกลุ่มรีด	72
3.28	แสดงตัวอย่างการหาสัดส่วนของของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075	73
3.29	แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม -ทองแดงเกรด 2024 ที่ได้รับการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 10, 20, และ 30 วินาที เพื่อแปรรูปเป็นโลหะกึ่งของแข็ง โดยที่ชิ้นงานไม่ได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน	74
3.30	แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม -ทองแดงเกรด 2024 ที่ได้รับการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 10, 20 และ 30 วินาที เพื่อแปรรูปเป็นโลหะกึ่งของแข็ง โดยที่ชิ้นงานได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน	75
3.31	แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม -แมกนีเซียม เกรด 5052 ที่ได้รับการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 10, 20 และ 30 วินาที เพื่อแปรรูปเป็นโลหะกึ่งของแข็ง โดยที่ชิ้นงานไม่ได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน	76
3.32	แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม -แมกนีเซียม เกรด 5052 ที่ได้รับการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 10 , 20 และ 30 วินาที เพื่อแปรรูปเป็นโลหะกึ่งของแข็ง โดยที่ชิ้นงานได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน	77
3.33	แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม-ซิลิกอน เกรด6061 ที่ได้รับการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 10, 20 และ 30 วินาที โดยที่ชิ้นงานไม่ได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน	78

รายการภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.34	แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน เกรด 6061 ที่ได้รับการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 10, 20 และ 30 วินาที โดยที่ชิ้นงานได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน	80
3.35	แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม-สังกะสี เกรด 7075 ที่ได้รับการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 5, 10, 20 และ 30 วินาที โดยที่ชิ้นงานไม่ได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน	81
3.36	แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม-สังกะสี เกรด 7075 ที่ได้รับการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 5, 10, 20 และ 30 วินาที โดยที่ชิ้นงานได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน	82
3.37	แสดงรูปชิ้นงานเกราะกันกระสุนที่เกิดรอยแตกร้าวหลังจากการขึ้นรูป	83
3.38	แสดงรูปชิ้นงานเกราะกันกระสุนหลังจากได้รับการปรับปรุงแม่พิมพ์	84
3.39	แสดงลักษณะของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนหลังการเผาไหม้ ชนิด Oxidation bonding (ซ้าย) และ ชนิด Reaction bonding (ขวา)	84
3.40	แสดงแผ่นเกราะกันกระสุนหลังจากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Infiltration)	85
3.41	แสดงผลการตรวจสอบลักษณะภายในด้วยเทคนิค X-ray ของกลุ่มชิ้นงาน Oxidation Bonding	86
3.42	แสดงผลการตรวจสอบลักษณะภายในด้วยเทคนิค X-ray ของกลุ่มชิ้นงาน Reaction Bonding	87
3.43	แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเกราะในกลุ่ม Oxidation Bonding และ Reaction Bonding ที่กำลังขยาย 100X, 200X, 500X และ 1000X ตามลำดับ	89
3.44	แสดงผลการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานในกลุ่ม Reaction Bonding ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบที่ T6	90

รายการภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.45	แสดงผลการทดสอบสมบัติทางกลชิ้นงานในกลุ่ม Reaction Bonding ที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบที่ T6	91
3.46	แสดงชิ้นงานเกราะ PCS 7% ที่มีความหนา 10 และ 11 มิลลิเมตร ซึ่งผ่านการทดสอบยิงทางซิปนวิธี (Ballistic Test) ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม	93
3.47	แสดงชิ้นงานเกราะ PCS 7% ที่มีความหนา 11 มิลลิเมตรซึ่งไม่ผ่านการทดสอบยิงทางซิปนวิธี (Ballistic Test) ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม	95
3.48	แสดงชิ้นงานเกราะ PCS 7% ที่มีความหนา 10 มิลลิเมตรซึ่งไม่ผ่านการทดสอบยิงทางซิปนวิธี (Ballistic Test) ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสามในการทดสอบยิงเกราะกันกระสุนครั้งี่	97
3.49	แสดงการทดสอบในน้ำของเรือจู่โจมลำน้ำ กองเรือลำน้ำ หลังจากประกอบแผ่นเกราะเข้ากับตัวเรือต้นแบบ	98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

สืบเนื่องจากสถานการณ์ความรุนแรงในปัจจุบันประเทศไทยกำลังประสบกับปัญหาความไม่สงบในเขต 3 จังหวัดชายแดนใต้ และปัญหาความขัดแย้งกับประเทศเพื่อนบ้านตามแนวตะเข็บชายแดน จากปัญหาความรุนแรงดังกล่าวทำให้เกิดการชุมนุม โจมตีทำร้ายกันส่งผลให้เจ้าหน้าที่ทหาร ตำรวจ และผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่ได้รับบาดเจ็บ และสูญเสียชีวิต อันเป็นผลมาจากการไม่มีอุปกรณ์ป้องกันตัวที่สมบูรณ์แบบ เพื่อลดความเสี่ยงในการสูญเสียดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้เกราะกันกระสุนทั้งแบบประเภทเสื้อเกราะส่วนบุคคล และเกราะสำหรับยานยนต์ เพราะการจู่โจมของผู้ก่อการร้ายในปัจจุบันมีหลายรูปแบบแต่เนื่องจากเกราะกันกระสุนที่ใช้ในเมืองไทยส่วนใหญ่ ต้องนำเข้าจากต่างประเทศเกือบ 100% ส่งผลให้ประเทศเสียดุลการค้าเป็นจำนวนมาก เนื่องจากราคาที่สูงของเกราะกันกระสุน และองค์ความรู้ในกระบวนการผลิตเกราะกันกระสุนของประเทศไทยยังอยู่ในวงจำกัดจึงยากที่จะพัฒนาเพื่อต่อยอด

เกราะกันกระสุน สำหรับยานยนต์เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยป้องกันอันตรายจากกระสุนหรืออาวุธแหลมคม มีการใช้งานที่หลากหลายเช่น ใช้เป็นชิ้นส่วนเพื่อหุ้มเกราะสำหรับยานยนต์ และ เรือ หรืออากาศยานซึ่งปัจจุบันเกราะกันกระสุนสำหรับยานยนต์ส่วนใหญ่จะผลิตมาจากเหล็กกล้า ทำให้เกิดปัญหาในด้านน้ำหนักที่มีมาก จากปัญหาดังกล่าวทำให้วัสดุผสมที่มีอะลูมิเนียมเป็นเนื้อหลัก และเสริมแรงด้วยซัลฟอนคาร์ไบด์เซรามิกส์ มีโอกาสนำมาใช้ทดแทนเกราะกันกระสุนสำหรับยานยนต์แบบเดิมได้ เนื่องจากปัจจัยสนับสนุนในด้านที่มีสมบัติที่เด่นทางน้ำหนักที่เบากว่าโลหะโดยทั่วไป และมีความสามารถในการต้านทาน การกัดกร่อนที่ดี จึงเหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริงได้กับทุกสภาวะ ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้มุ่งเน้นศึกษาความถึงเป็นไปได้ และการพัฒนาการผลิตเกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมที่มีอะลูมิเนียมเป็นเนื้อหลัก และเสริมแรงด้วยซัลฟอนคาร์ไบด์เซรามิกส์ ผลของการวิจัยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปเกราะกันกระสุนที่ทำมาจากวัสดุผสมที่มีอะลูมิเนียมเป็นเนื้อหลัก และเสริมแรงด้วยซัลฟอนคาร์ไบด์เซรามิกส์โดยกระบวนการหล่ออัดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็ง ในงานวิจัยนี้ได้รายงานผลของการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และ

การศึกษาสมบัติทางกลซึ่งประกอบด้วย ความสามารถในการต้านทานแรงดึง และความสามารถในการต้านทานการทำลายของกระสุนรวมทั้งการนำแผ่นเกราะไปประกอบใช้จริงในภาคสนาม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษา และพัฒนาวิธีการขึ้นรูป แผ่นเกราะกันกระสุนเนื้ออะลูมิเนียม โดยกระบวนการแทรกซึมแบบใหม่ (Semi-Solid Infiltration)

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของแผ่นเกราะกันกระสุน ได้แก่

-เกรดของอะลูมิเนียมเหนียว เกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075

-เวลาในการปล่อยฟองก๊าซ และอุณหภูมิในการผลิตน้ำโลหะในสภาวะกึ่งของแข็งเพื่อใช้ขึ้นรูปแผ่นเกราะกันกระสุน

-การเพิ่มความแข็งแรงด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment)

1.2.3 สามารถผลิตชิ้นงานเพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานกระสุน (Ballistic Test)

ตามมาตรฐานสากล (National Institute of Justice: NIJ) ระดับสาม ด้วยกระสุนขนาด 7.62 x 51 มิลลิเมตร NATO M80 Ball ที่ความเร็ว 847 ± 9.1 เมตร/วินาที

1.2.4 ผลิตชิ้นงานต้นแบบ และนำไปใช้จริงในภาคสนาม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ต้องการศึกษาและพัฒนาวิธีการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีเนื้อหลักเป็นอะลูมิเนียม และมีตัวเสริมแรงเป็นเซรามิกสัฟรอนชนิดซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) โดยวิธีการแทรกซึมแบบใหม่ (Semi-solid Infiltration) และนำแผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตได้ไปใช้จริง รวมทั้งมีการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนขนาด 10×10 เซนติเมตร การทดสอบสมบัติทางกลของแผ่นเกราะกันกระสุนโดยนำแผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตได้ไปทดสอบทางชิปนวิธี (Ballistic Test) ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 มีความเข้าใจในการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนเนื้ออะลูมิเนียม (Metal Matrix Composite: AMC) เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ในด้านการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนชนิดเกราะแข็ง (Hard Armor)

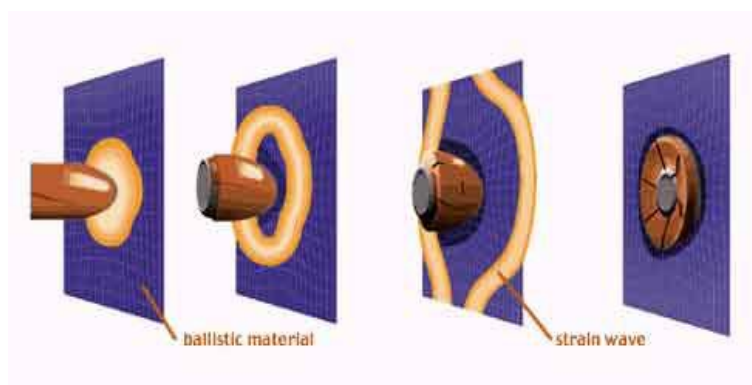
1.4.2 สามารถผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนต้นแบบที่ทดสอบผ่านตามมาตรฐานสากล (NIJ)

1.4.3 ผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนที่สามารถนำไปใช้งานจริงในภาคสนาม

1.5 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย

1.5.1 เกราะกันกระสุน (Armor)

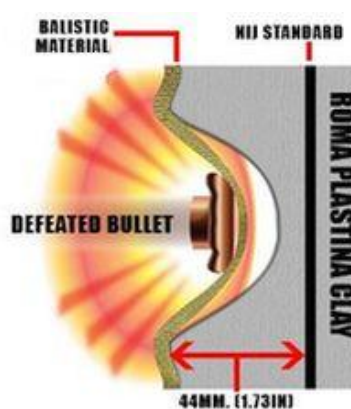
ในอดีตมนุษย์ได้นำวัสดุหลากหลายมาทำเป็นเสื้อเกราะ เพื่อใช้ในการป้องกันตัวเองจากอันตราย เมื่ออยู่ในภาวะสงคราม หรือสถานการณ์ที่เสี่ยงต่ออันตราย โดยแรกเริ่มนั้นชุดเกราะและโล่ถูกทำขึ้นจากหนังสัตว์จากนั้นพัฒนาเป็นเกราะไม้และเกราะโลหะ โดยโลหะมักใช้กับร่างกาย ดังที่เราคุ้นเคยกันดีกับภาพบรรดาอัศวินทั้งหลายในยุคกลางสวมใส่ขณะออกรบ เมื่อเวลาผ่านไปเสื้อเกราะดังกล่าวก็ใช้ไม่ได้ผลกับอาวุธสมัยใหม่จำพวกกระสุนปืนต่างๆ ซึ่งในเวลานั้นสิ่งที่ป้องกันกระสุนปืนได้ดีที่สุดคือ ที่กำบังที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น กำแพงหินหรืออิฐ หรือที่กำบังธรรมชาติ มีหลักฐานบันทึกไว้ว่าเสื้อเกราะอ่อนได้ถูกใช้เป็นครั้งแรกโดยชาวญี่ปุ่นในยุคกลาง เป็นเสื้อเกราะที่ทำจากผ้าไหมแต่ผลจากการศึกษาพบว่า เสื้อเกราะผ้าไหมนั้นสามารถ ป้องกันได้แค่กระสุนที่มีความเร็วต่ำ (400 ฟุต/วินาทีหรือน้อยกว่า) โดยที่ไม่สามารถกันกระสุนปืนสมัยใหม่ที่มีความเร็วเกินกว่า 600 ฟุต/วินาทีได้ ดังนั้นเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการผลิตแล้ว เสื้อเกราะผ้าไหมมีราคาสูงถึงตัวละ 800 ดอลลาร์สหรัฐ (เทียบกับค่าของเงินใน ค.ศ. 1998 เท่ากับ 1,400 ดอลลาร์สหรัฐ) ทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับเสื้อเกราะกันกระสุน รุ่นต่อมาเกิดขึ้นสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ถูกเรียกว่า “แฟลค แจ็กเกต” ผลิตขึ้นจากไนลอน สามารถกันสะเก็ดระเบิด และใช้ได้ผลอย่างดีกับการคุกคามของปืนพก และปืนไรเฟิล แต่เสื้อเกราะชนิดนี้มีข้อจำกัด คือ มีขนาดใหญ่เทอะทะ และใช้ได้แต่ในวงการทหารเท่านั้น จนกระทั่งปลายยุค 1960 ค้นพบเส้นใยสังเคราะห์ชนิดใหม่ เรียกว่า เกลฟลาร์ (Kevlar) ของบริษัทดูปอง ที่สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นับจากนั้นเสื้อเกราะถูกผลิตขึ้นจากวัสดุต่าง ๆ จากหลายบริษัท [1]



รูปที่ 1.1 แสดงภาพจำลองการกระจายพลังงานของเสื้อเกราะกันกระสุนแบบอ่อน [2]

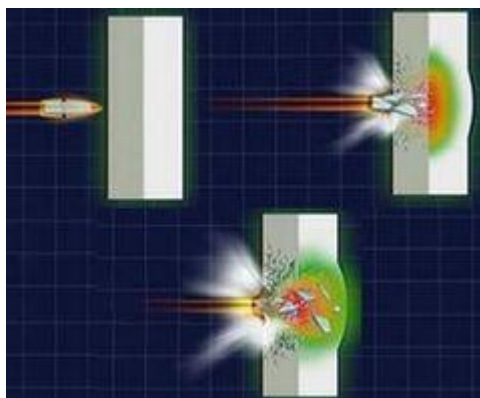
วัสดุที่นิยมนำมาผลิตเสื้อเกราะกันกระสุนคือ เคฟลาร์ (Kevlar) ซึ่งเป็นชื่อทางการค้าของ โพลีพาราฟีนิลีนเทอเรฟทาเลอไมด์ (poly-paraphenylene terephthalamide) แต่นอกเหนือจาก เคฟลาร์แล้ว ยังมีการนำวัสดุอื่นมาผลิตเป็นเสื้อเกราะกันกระสุนเช่นกัน อย่าง สเปคตร้า (Spectra) ซึ่งเป็นชื่อทางการค้าของโพลิเมอร์โพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (Ultra High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) [3]

เสื้อเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุสังเคราะห์เหล่านี้จัดเป็นเสื้อเกราะกันกระสุนแบบอ่อน (soft ballistic vest) เพราะใช้วัสดุที่มีสมบัติทนแรงดึงสูงมากมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยเพื่อทอเป็นผืน อย่างแน่นหนา และนำมาเรียงซ้อนกันหลายชั้น โดยแผ่นวัสดุสังเคราะห์แต่ละผืนจะวางสลับแนวกันให้เส้นใยทำมุม 90 องศา เพื่อให้เสื้อเกราะมีทั้งความแข็งแรง และความยืดหยุ่น (flexible) เมื่อกระสุนปืนพุ่งชนเสื้อเกราะ พลังงานหรือแรงกระแทกของกระสุนปืนจะถูกดูดซับ และกระจายออกไปตามแนวเส้นใยรวมถึงแผ่นวัสดุสังเคราะห์ชั้นต่าง ๆ เป็นผลให้หัวกระสุนสูญเสียรูปทรง และพลังงานไปจนกระสุนถูกหยุดในที่สุด



รูปที่ 1.2 แสดงภาพจำลองการยุบตัวของเสื้อเกราะกันกระสุน [4]

แม้เสื้อเกราะกันกระสุนจะป้องกันอันตรายจากการทะลุทะลวงของกระสุนปืน (บางชนิด) ได้ แต่การเข้าชนอย่างรุนแรงของกระสุนปืนก็ยังสามารถทำให้ผู้สวมเสื้อเกราะได้ เพราะเสื้อเกราะมีความยืดหยุ่นจึงเกิดการยุบตัวชั่วขณะ ทำให้ผู้สวมใส่เกิดการซ้ำที่เรียกว่า บลันด์ทรอม่า (Blunt Trauma) ขึ้น ซึ่งหากตำแหน่งที่เกิดการกระแทกเป็นบริเวณที่โครงก็อาจทำให้กระดูกซี่โครงหักแทงอวัยวะภายในจนเกิดอันตรายถึงชีวิตได้ ซึ่งเป็นจุดด้อยอย่างหนึ่งของเสื้อเกราะกันกระสุนแบบอ่อน และทำให้การยุบตัวของเสื้อเกราะจากการกระแทกของกระสุน กลายเป็นมาตรฐานข้อหนึ่งที่ต้องมีการทดสอบ ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบของ National Institute of Justice กำหนดว่า เสื้อเกราะกันกระสุนที่จะผ่านเกณฑ์การทดสอบเรื่องนี้ได้ต้องไม่ทำให้หุ่นทดสอบเกิดรอยยุบตัวด้านใน (Backface Signature) ลึกเกิน 44 มิลลิเมตร หลังถูกยิงด้วยกระสุนทดสอบตามระดับการป้องกัน



รูปที่ 1.3 แสดงภาพจำลองเมื่อถูกกระสุนปืนชนเกราะแข็ง [4]

1.5.2 เกราะยานยนต์ในประเทศไทย

ในปัจจุบัน ได้มีโครงการ “ต้นแบบยานยนต์หุ้มเกราะอเนกประสงค์ ” ที่ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (สนช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อสร้างต้นแบบยานยนต์หุ้มเกราะอเนกประสงค์ขนาดเบาทางยุทธวิธี “อัสวิน” ซึ่งเป็นการต่อยอดงานวิจัย และพัฒนาด้านเทคโนโลยีการผลิตวัสดุหุ้มเกราะแข็ง (เกราะเซรามิกส์) กันกระสุนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และชุดป้อมปืนอัตโนมัติของสำนักงานวิจัย และพัฒนาการทหารกลาโหม กระทรวงกลาโหม (สวพ.กท.) มาพัฒนาเป็นต้นแบบรถยนต์หุ้มเกราะอเนกประสงค์ขนาดเบาทางยุทธวิธีที่มีคุณลักษณะเหมาะกับการใช้งานในภารกิจลาดตระเวน และลำเลียงพลของกองทัพบก ซึ่งในการผลิตเกราะ แข็งกันกระสุน นี้เป็นการใช้เซรามิก ส์ที่มีส่วนผสมจากใยสังเคราะห์

และอะลูมิเนียมออกไซด์ มาผลิตแผ่นเกราะแข็งกันกระสุน จึงทำให้มีน้ำหนักเบาสามารถยืดหยุ่น และป้องกันแรงกระแทกจากกระสุนได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาติดประกอบกับตัวถัง และ โครงสร้างยานยนต์ขนาดเบาตามมาตรฐานนาโต้ (NATO) และกระทรวงกลาโหมไทย เพื่อนำไปใช้ในภารกิจทางทหารได้ โดย ผู้อำนวยการสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ยืนยันว่า รถยนต์ หุ้มเกราะอัศวินได้มาตรฐานเทียบเท่ายานยนต์หุ้มเกราะของต่างประเทศ ตามมาตรฐาน NIJ ไม่ต่ำกว่าระดับที่สาม โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับรถอัมวีของสหรัฐอเมริกา [14]

1.5.3 มาตรฐาน National Institute of Justice: NIJ

เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเรื่องวิธีทดสอบเกณฑ์การทดสอบความสามารถ หรือ ประสิทธิภาพการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะ ที่กำหนดโดยสถาบันความเที่ยงธรรมแห่งชาติ (National Institute of Justice: NIJ) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งประเทศไทย และอีกหลายประเทศ ทั่วโลกใช้มาตรฐานสำหรับการทดสอบเสื้อเกราะป้องกันกระสุนด้วยเช่นกัน โดยมาตรฐาน NIJ แบ่งระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะไว้ 6 ระดับ ดังนี้

ตารางที่ 1.1 แสดงระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะตามมาตรฐาน NIJ [3]

การปกป้อง	ประสิทธิภาพ
ระดับ I (.22 LR; .380 ACP)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน . 22 Long Rifle น้ำหนัก 2.6 กรัม มีความเร็ว 329 ± 9.1 เมตร/วินาที (1080 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุน .380 ACP น้ำหนัก 6.2 กรัม มีความเร็ว 322 ± 9.1 เมตร/วินาที (1055 ± 30 ฟุต/วินาที) แต่ปัจจุบัน NIJ ได้ยกเลิกการใช้มาตรฐานการป้องกันระดับ I เนื่องจากไม่เพียงพอที่จะป้องกันกระสุนปืน
ระดับ IIA (9 mm; .40 S&W)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน 9 มิลลิเมตร น้ำหนัก 8 กรัม มีความเร็ว 373 ± 9.1 เมตร/วินาที (1225 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุน .40 S&W น้ำหนัก 11.7 กรัม มีความเร็ว 352 ± 9.1 เมตร/วินาที (1155 ± 30 ฟุต/วินาที) เสื้อเกราะที่มีมาตรฐานระดับนี้สามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I ได้
ระดับ II (9 mm; .357 Magnum)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน 9 มิลลิเมตร น้ำหนัก 8 กรัม มีความเร็ว 398 ± 9.1 เมตร/วินาที (1305 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุน .357 Magnum น้ำหนัก 10.2 กรัม มีความเร็ว 436 ± 9.1 เมตร/วินาที (1430 ± 30 ฟุต/วินาที) เสื้อเกราะที่มีมาตรฐานระดับนี้สามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I และ IIA ได้ด้วย
ระดับ IIIA (.357 Sig; .44 Magnum)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด . 357 SIG น้ำหนัก 8.1 กรัม มีความเร็ว 448 ± 9.1 เมตร/วินาที (1470 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุนขนาด .44 Magnum น้ำหนัก 15.6 กรัม มีความเร็ว 436 ± 9.1 เมตร/วินาที (1430 ± 30 ฟุต/วินาที) เสื้อเกราะตามมาตรฐานนี้สามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I IIA และ II ได้ด้วย
ระดับ III (Rifles)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด 7.62x51 มิลลิเมตร NATO M80 ball น้ำหนัก 9.6 กรัม มีความเร็ว 847 ± 9.1 เมตร/วินาที (2780 ± 30 ฟุต/วินาที) ซึ่งเสื้อเกราะตามมาตรฐานนี้สามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I IIA II และ IIIA ได้ด้วย
ระดับ IV (Armor Piercing Rifle)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนเจาะเกราะ . 30-06 Springfield M2 น้ำหนัก 10.8 กรัม มีความเร็ว 878 ± 9.1 เมตร/วินาที (2880 ± 30 ฟุต/วินาที) ซึ่งเสื้อเกราะระดับนี้สามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I IIA II IIIA และ III ได้ด้วย

level	Caliber	NIJ Standard 0101.04 Velocities
Level IIA	9mm 124 gr. FMJ RN .40 Caliber 180 gr. FMJ	1120 ft/s 1055 ft/s
Level II	9mm 124 gr. FMJ RN 357 Magnum 158 gr. JSP	1205 ft/s 1430 ft/s
Level IIIA	9mm 124 gr. FMJ RN .44 Magnum 240 gr. JHP	1430 ft/s 1430 ft/s
Level III	7.62mm NATO 148 gr. (.308 Caliber) FMJ	2760 ft/s
Level IV	30.06 166 gr. (.30 Caliber) M2AP Armor Piercing	2690 ft/s

รูปที่ 1.4 แสดงขนาดกระสุนตามมาตรฐาน NIJ [5]

1.5.4 วัสดุผสม (Composite)

วัสดุผสม หรือ Composite materials เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยการรวมวัสดุมากกว่า สองประเภทเข้าด้วยกัน จะมีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (matrix) และวัสดุเสริมแรง (reinforcement materials) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อหลักจะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่ม หรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็น เส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (Base materials) ตัวอย่างเช่น โลหะ เซรามิก ส์ หรือโพลิเมอร์ ปัจจุบันวัสดุผสมแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

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

2. วัสดุผสมเนื้อเซรามิก (Ceramic Matrix Composites, CMCs) วัสดุผสมเนื้อเซรามิก มีเนื้อหลักเป็นเซรามิก และใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย วัสดุผสมกลุ่มนี้มักนำมาใช้งานใน สภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น กังหันใบพัดของเครื่องยนต์ไอพ่น คอนกรีต และคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปูน ทราย เหล็กเส้น) เป็นต้น

3. วัสดุผสมเนื้อโลหะ (Metal Matrix Composites, MMCs) วัสดุผสมเนื้อโลหะ มีโลหะเป็นเนื้อหลักได้แก่ อะลูมิเนียม และมีวัสดุเสริมแรงเป็นวัสดุเซรามิก เช่น กลุ่มคาร์ไบด์ กลุ่มไนไตรต์ ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ [27]

1.5.4.1 วัสดุเนื้อหลัก (Matrix)

อะลูมิเนียม (Aluminum, Al) เป็นโลหะสำคัญที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะเบา (Light Metals) เพราะอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นน้อย (2.7 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) มีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมได้ดี เนื่องจากที่ผิวของอะลูมิเนียมมักจะเกิดเป็นฟิล์มของออกไซด์ชั้น จึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้ และชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด และจรวดขีปนาวุธ สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ จึงสามารถหลอมได้ง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง แต่เนื่องจากน้ำหนักเบาจึงนิยมใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีดัชนีการสะท้อนกลับของแสงสูงมาก ทนทานต่อการเกิดสนิม และการกัดกร่อนในบรรยากาศใช้งานทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนการกัดกร่อนต่อกรด และด่าง หาซื้อได้ง่ายราคาไม่แพงมากนัก การแยกประเภทของอะลูมิเนียมผสม (Aluminum alloy) แบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่

1. อะลูมิเนียมประเภทรีด (Wrought Aluminum) ได้แก่ อะลูมิเนียมประเภทรีดขึ้นรูปต่างๆ เช่น sheet, plate, extrusion, rod และ wire ซึ่งอะลูมิเนียมกลุ่มนี้ข้อดี คือ สมบัติเชิงกลที่สูงกว่าอะลูมิเนียมประเภทกลุ่มหล่อ แต่ข้อเสีย คือ ราคาแพง
2. อะลูมิเนียมประเภทหล่อขึ้นรูป (Cast Alloys) อะลูมิเนียมผสมที่ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์งานหล่อหลอม อยู่ในรูปของอินกอต (Ingot) หรือแท่งเกรดต่าง ๆ ซึ่งอะลูมิเนียมกลุ่มนี้มีข้อดี คือ ราคาถูก แต่ข้อเสีย คือ สมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าอะลูมิเนียมประเภทกลุ่มหล่อ

1.5.4.2 วัสดุเสริมแรง (Reinforcement materials)

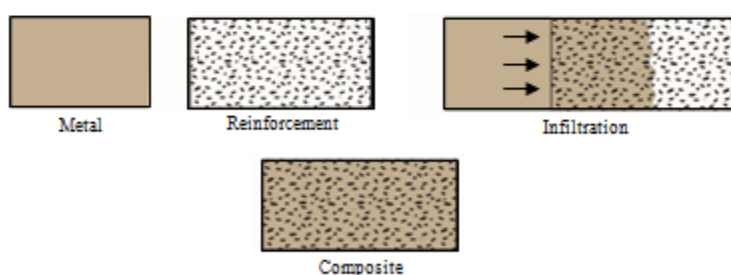
วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่ม หรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลัก ให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (Base Materials) อย่างโลหะ เซรามิก ีส์ หรือโพลีเมอร์ ได้แก่ ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide) เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) และฉนวนใยแก้ว (Fiber Glass Insulator)

1.5.5 กรรมวิธีการหล่ออัด (Squeeze Casting)

การขึ้นรูปวัสดุผสม Al MMC ทำได้หลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ การขึ้นรูปในสถานะของเหลว และการขึ้นรูปในสถานะของแข็ง แต่ชิ้นส่วนที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ผลิตโดยการขึ้นรูปในสถานะของเหลว เนื่องจากต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่าการขึ้นรูปในสถานะ

ของแข็ง เช่น กระบวนการโลหะผง ซึ่งมีต้นทุนของผงโลหะที่แพงกว่า อีกทั้งต้นทุนทางด้านพลังงานก็สูงกว่าด้วย

กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสม Al MMC ในสถานะของเหลวที่ใช้ในอุตสาหกรรม ประกอบด้วย กระบวนการ Infiltration, Spray Co-Deposition และ In-Situ Fabrication [19] แต่กระบวนการที่มีต้นทุนต่ำที่สุด และสามารถผลิตชิ้นส่วนที่ประกอบด้วยผงเซรามิกส์เสริมแรงในสัดส่วนที่สูง คือ กระบวนการแทรกซึม (Infiltration)



รูปที่ 1.5 แสดงกระบวนการแทรกซึม (Infiltration) [28]

กระบวนการ Infiltration ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันประกอบด้วย 3 กระบวนการ ดังนี้

1. Spontaneous Infiltration

Spontaneous Infiltration คือ การแทรกซึมโดยไม่ใช้แรงดันภายนอก การแทรกซึมเกิดขึ้นเองจากปฏิกิริยาที่น้ำโลหะเปียกกับผงเซรามิกส์ ทำให้เกิดแรงดึงผิว หรือ Capillary Force ซึ่งทำได้โดยการปรับผิวของผิวเซรามิกส์โดยการเคลือบผิว หรือการเติมสารในน้ำโลหะเพื่อปรับสมบัติทางเคมี ตัวอย่างเช่น การเติมลิเทียมในอะลูมิเนียมเพื่อแทรกซึมใน perform ที่เป็น oxide [20,21,22] หรือการเคลือบผงเซรามิกส์โดยนิกเกิลและ K_2ZrF_6 ในการใช้กับอะลูมิเนียมผสมเกรดต่างๆ [23,24] หรือการแทรกซึมผง Carbide และ Nitride โดยอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิสูงในสภาวะบรรยากาศไนโตรเจน [25,26] เป็นต้น กระบวนการ Spontaneous Infiltration เป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน สามารถผลิตชิ้นงานได้หลายรูปแบบโดยไม่ต้องทำแม่พิมพ์ในการแทรกซึม ทำให้ประหยัดค่าแม่พิมพ์ได้มาก แต่ก็มีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น ข้อจำกัดของระบบโลหะ และเซรามิกส์ที่สามารถเลือกใช้ได้ และเวลาในการผลิตที่นานเนื่องจากอัตราการแทรกซึมที่ช้า นอกจากนี้ยังมีปัญหาเรื่องรูพรุนจากการแทรกซึมที่ไม่สมบูรณ์ ตัวอย่างกระบวนการแสดงในรูปที่ 1.6 (a)

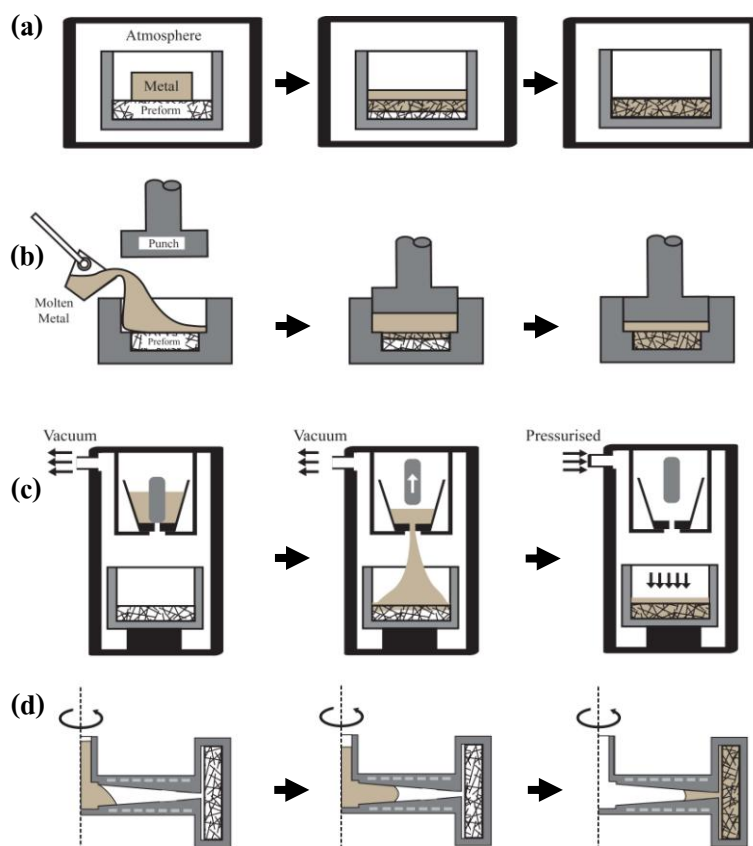
2. Gas Pressure Infiltration

โดยส่วนใหญ่แล้วน้ำโลหะจะไม่สามารถผสมเข้ากันได้กับผงเซรามิกส์ ทำให้ไม่เกิดการแทรกซึมโดยธรรมชาติ จึงต้องมีแรงกระทำภายนอกเพื่อช่วยให้เกิดการแทรกซึม กระบวนการ Gas pressure infiltration คือ การใช้แรงดันแก๊สในการดันน้ำโลหะเข้าไปแทรกซึมใน Ceramic Preform ตัวอย่างของกระบวนการแสดงในรูปที่ 1.6 (c) กระบวนการนี้ใช้แรงดันไม่สูงมาก อยู่ในช่วงน้อยกว่า 1 MPa ถึงประมาณ 50 MPa [19] เนื่องจากมีการเผา Preform ให้มีอุณหภูมิสูง และก่อนการแทรกซึมมีการทำให้เกิดสุญญากาศภายใน Preform จึงช่วยลดแรงดันที่จำเป็นต้องใช้ลงอย่างมาก ข้อดีของกระบวนการ Gas pressure infiltration ได้แก่ ความสามารถในการใช้โลหะที่มีอุณหภูมิสูงได้ เช่น เหล็กกล้า หรือ Super alloy นอกจากนี้สามารถผลิตวัสดุผสม Al MMC ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี ส่วนข้อจำกัดของกระบวนการ ได้แก่ อัตราการผลิตที่ไม่สูง การออกแบบเครื่องจักรต้องระวังเรื่องความปลอดภัยอย่างยิ่ง เนื่องจากอาจเกิดการระเบิดของเครื่องได้ และอัตราการเย็นตัวของโลหะที่ช้าทำให้มีข้อจำกัดด้านสมบัติเชิงกลที่ได้

3. Squeeze Casting

นอกจากแรงดันภายนอกจากแรงดันจากแก๊ส แรงดันจากการหล่ออัดด้วยเครื่องจักรก็สามารถใช้ได้ดี กระบวนการ Squeeze casting คือการใช้แรงอัดจากเครื่องจักร ตัวอย่างของกระบวนการแสดงในรูปที่ 1.6 (b) กระบวนการ Squeeze casting เป็นกระบวนการที่มีอัตราการผลิตที่สูง ได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์ เนื่องจากแรงดันที่ใช้มีค่าสูง ประมาณ 50-100 MPa [27] สามารถผลิตวัสดุผสมที่มีผงเซรามิกส์ที่ละเอียดมากได้ และลดการเกิดปฏิกิริยาที่ interface ระหว่างโลหะกับเซรามิกส์ เนื่องจากเวลาในการผลิตที่สั้น อย่างไรก็ตาม กระบวนการ squeeze casting ก็มีข้อจำกัดที่สำคัญได้แก่ ต้นทุนเครื่องจักรที่สูง และราคาแม่พิมพ์ที่สูง

จากการค้นคว้าผลงานที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการที่สามารถผลิตชิ้นส่วน Al MMC ที่มีสมบัติเชิงกลที่สูง และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด คือกระบวนการ Squeeze Casting เนื่องจากมีการใช้แรงดันสูง อัตราการเย็นตัวสูง และมีอัตราการการผลิตที่สูงสุด แต่มีข้อจำกัดด้านเครื่องจักร และแม่พิมพ์ที่มีราคาสูง ซึ่งเป็นปัญหาในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไทย ที่ผ่านมายังไม่มีรายงานการวิจัยที่ใดที่สามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดจุดนี้ได้ โครงการวิจัยนี้จึงเลือกใช้กระบวนการ Squeeze Casting และใช้กระบวนการโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal) ในการแก้ปัญหาข้อจำกัดดังกล่าว



รูปที่ 1.6 แสดงกระบวนการแทรกซึม (Infiltration) แบบต่าง ๆ: (a) spontaneous infiltration, (b) Squeeze casting, (c) Gas Pressure Infiltration และ (d) Centrifugal Infiltration [28]

1.5.6 โลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminum alloys)

อะลูมิเนียมเป็นโลหะสำคัญที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา (Light Metals) โดยอะลูมิเนียมจะหนักเพียง หนึ่งในสามเท่าของเหล็กเท่านั้น ทั้งยังราคาถูก หาซื้อได้ง่าย มีความต้านทานต่อการเป็นสนิม เนื่องจากเมื่อถูกทิ้งไว้ในบรรยากาศจะเกิดฟิล์มบาง ๆ ของอะลูมินา (Al_2O_3) ที่ผิว ฟิล์มดังกล่าวนี้จะทำหน้าที่ป้องกันเนื้อโลหะที่อยู่ลึกลงไปใต้ผิวไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) อีกต่อไป มีค่ากำลังวัสดุต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (Strength to weight ratio) สูง เหมาะสำหรับการทำชิ้นส่วนที่ใช้ในเครื่องบิน ซึ่งต้องการน้ำหนักเบา และต้องการความแข็งแรงในเวลาเดียวกัน มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง แต่มีความเหนียวสูงสามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง อะลูมิเนียมมีสมบัติด้านการหล่อลอมที่ดี โดยมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ สามารถรวมตัวกับโลหะอื่น ๆ เป็นโลหะผสมได้ง่าย มีความสามารถในการไหลอยู่ในเกณฑ์สูง แต่มีข้อเสีย คือ มีขอบเขตการยืดหยุ่น (Elastic Limit) ต่ำ

ตารางที่ 1.2 แสดงสมบัติของอะลูมิเนียม [16]

หมายเลขอะตอม (Atomic Number)	13
น้ำหนักอะตอม (Atomic Weight)	26.97
โครงสร้างของผลึก	fcc
ขนาดของแลตทิซ (Lattice Dimension) a_0 (Å)	4.041
จุดหลอมเหลว °C	658
จุดเดือดกลายเป็นไอ °C	1800
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (20°C)	70%
การหดขณะแข็งตัว (Solidification Shrinkage)	6.6%
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (cal/g)	93
ความร้อนแฝงของการเป็นไอ (cal/g)	2260
ความร้อนจำเพาะที่ 100°C (cal/g-°C)	0.2259
สภาพตัวนำความร้อน (20°C) (Cal.cm/cm ² . °C.sec)	0.52
ความแข็งแรง (Tensile Strength) kg/mm ²	8-10
พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit) kg/mm ²	3
อัตราการยืดตัว (Percent Elongation)	40-45%
ความแข็ง (Hardness) H _B	16-20
โมดูลัสการยืดหยุ่น (Modulus of Elastic) kg/mm ²	7800

การจำแนกประเภทของอะลูมิเนียม

โดยทั่วไปแล้วเราสามารถจำแนกโลหะอะลูมิเนียมผสมออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. อะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูป (Wrought Aluminum Alloys) เป็นโลหะผสมที่ต้องผ่านการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก เช่น การรีดหรือการอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นหรือแท่ง
2. อะลูมิเนียมผสมประเภทหล่อ (Cast Aluminum Alloys) มีสมบัติในการไหลดี ธาตุผสมที่สำคัญได้แก่ ซิลิกอน เนื่องจากซิลิกอนเพิ่มความสามารถในการไหล และต้านทานการแตกร้อนในงานหล่อได้ดี ในแต่ละประเภทของอะลูมิเนียมผสมข้างต้น เราสามารถแบ่งย่อยแต่ละประเภทออกเป็นเกรดที่สามารถชุบแข็งด้วยความร้อนได้ (Heat Treatable) และเกรดที่ไม่สามารถชุบแข็งได้ (Non-Heat Treatable)

อะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูป Wrought aluminum alloys

การตั้งชื่อโลหะผสมตามระบบ ASTM สามารถจำแนกกลุ่มอะลูมิเนียม ตามมาตรฐาน ASTM (American Society of Metals) ซึ่งเป็นการจำแนกตามระบบตัวเลข 4 หลัก

เลขหลักที่หนึ่ง : เป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุดในการแสดงกลุ่มของโลหะผสม แสดงดังตารางที่ 2.2 เช่น 1XXX แทนโลหะที่มีอะลูมิเนียมไม่น้อยกว่า 99.0 % โดยน้ำหนัก เป็นต้น

เลขหลักที่สอง : ใช้สำหรับกำกับเมื่อมีการดัดแปลงส่วนผสมของโลหะให้ผิดไปจากโลหะผสมดั้งเดิม ตัวเลข 0 แสดงว่าเป็นโลหะผสมดั้งเดิม ตัวเลข 1-9 แสดงว่าเป็นส่วนที่ได้จากการดัดแปลงให้ผิดไปจากเดิม เช่น 2024 (4.5 Cu, 1.5Mg, 0.5Si, 0.1 Cr) เทียบกับ 2218 (4.0 Cu, 2.0 Ni, 1.5 Mg, 0.2 Si) ซึ่งสังเกตได้ว่าโลหะ 2218 มีนิกเกิลผสมเพิ่มเติมเข้าไป

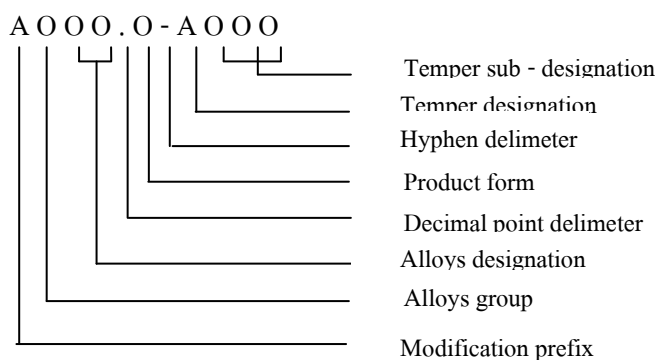
เลขหลักที่สามและหลักที่สี่ : ใช้แสดงชนิดย่อย ๆ ของโลหะผสมที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ความแตกต่างนี้มักจะเป็นส่วนผสมที่แตกต่างกัน เช่น 2014 (4.4Cu 0.8Si 0.8Mn 0.4Mg) และ 2017 (4.0Cu 0.8Si 0.5Mn 0.5Mg 0.1Cr) เป็นต้น ซึ่งสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงตัวเลขแต่ละหลักทั้งหมดนี้จะแสดงไว้ดังตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูป [18]

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1XXX	อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ ไม่น้อยกว่า 99.00%
2XXX	ทองแดง(Copper, Cu)
3XXX	แมงกานีส(Manganese, Mn)
4XXX	ซิลิกอน(Silicon, Si)
5XXX	แมกนีเซียม(Magnesium, Mg)
6XXX	แมกนีเซียม(Magnesium, Mg) และ ซิลิกอน(Silicon, Si)
7XXX	สังกะสี(Zinc, Zn)
8XXX	ดีบุก(Tin, Sn)
9XXX	ธาตุอื่น ๆ (Other Element)

เฉพาะอะลูมิเนียมในกลุ่ม 1XXX ตัวหลักที่สามและหลักที่สี่ จะแสดงปริมาณของอะลูมิเนียมที่เป็นจุดทศนิยม 2 ตำแหน่ง ที่ปรากฏภายหลัง 99 % เช่น 1060 และ 1080 หมายถึงอะลูมิเนียมขึ้นรูปที่มีอะลูมิเนียมอยู่ 99.60 % และ 99.80 % ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม American Aluminum Association Casting Alloys ได้กำหนดมาตรฐาน และแยกประเภทอะลูมิเนียมผสม โดยได้จัดทะเบียนไว้กับสำนักงานมาตรฐานแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (American National Standard Institute) หรือ ANSI Standard และยังคงแบ่งกลุ่มได้ 9 กลุ่ม เหมือนกับ ASM (American Society of Metals) ซึ่งการกำหนดอะลูมิเนียมหล่อผสมตาม ANSI Standard ได้ดังนี้ [17]



A: อักษรตัวแรก หมายถึง สมาชิกของ Alloys ที่เหมือนกันอยู่ในกลุ่มเดียวกัน (หมายถึง Aluminum alloy) แม้ว่าส่วนผสม จะแตกต่างกัน

O: Alloy group จะเป็นตัวเลขตัวเดียวจาก 1 ถึง 9 ใช้เป็นตัวกำหนด ธาตุหลักของ Alloys หรือ major alloying

OO: Alloys designation เป็นตัวเลข 2 หลัก กำหนดความแตกต่าง ของสมาชิกในกลุ่ม Alloys เดียวกัน ความหมายของตัวเลข ที่กำหนดเหมือนกับ Major alloy ในบางครั้งตัวเลข 2 หลัก คือ ปริมาณ % ไม่น้อยกว่าของ Al ที่มีผสมอยู่เช่น 190.X เท่ากับ Al ผสมอยู่ 99.90%

.O: ตัวเลขหลังจุดทศนิยม หมายถึง รูปแบบการผลิต หรือ Product form เป็นตัวเลขเดียวคือ

.0: เป็น Casting specification

.1: เป็น Ingot specification

.2: เป็น Ingot specification ที่ควบคุมส่วนผสมน้อยกว่า .1 Ingot specification

A: Temper designation เป็นตัวกำหนดแทนกรรมวิธี Temper ของกระบวนการทางความร้อน ที่ใช้กับ Heat treatable alloys ดังนี้

F: As cast condition หมายถึง งานจากสภาพหล่อ โดยไม่ต้องใช้ กรรมวิธีใดๆ ควบคุม ภายหลังการหล่อขึ้นรูป

H: Strain hardened หมายถึง สภาพของงานแข็งตัวเอง เนื่องจากความเครียด จากการทำ Cold working เช่น งานรีดขึ้นรูปต่าง ๆ

O: Anneal หมายถึง การอบอ่อน ใช้กับงานหล่อที่ต้องนำไปอบ เพื่อปรับปรุงขนาด รูปร่าง ให้คงที่ (Stability) ขณะใช้งานหรือ เพื่อให้เพิ่มความเหนียว (Ductility)

W: เป็นการอบเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นสารละลายของแข็งเฟสเดียวใช้กับ Alloys ที่สามารถชุบแข็ง ด้วยตัวเองได้ในบรรยากาศปกติ

T: เป็นการอบด้วยความร้อน โดยกำหนดกรรมวิธีอบคืนตัว (Temper) ที่แน่นอนดีกว่า F หรือ O การกำหนดกรรมวิธี “F” “O” และ “T” ทุกกระบวนการ สามารถหล่อด้วย แบบทราย และ แบบเหล็ก

OO: Temper sub-designation เป็นตัวเลขระบุกรรมวิธีอบคืนตัว (Temper) ที่ชัดเจนโดยระบุอุณหภูมิ

O: ช่วงเวลาปฏิบัติการที่แยกละเอียด ไปได้อีก 10 วิธีการ จาก T1 ถึง T10 และส่วนปลีกย่อยอีก

ตารางที่ 1.4 ตารางแสดงสัญลักษณ์การอบคืนตัว (Temper)

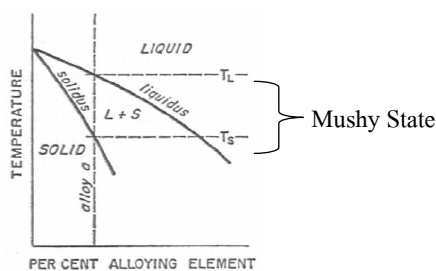
T1	ปล่อยให้งานเย็นตัวลงตามปกติ ในบรรยากาศปกติ และบ่มแข็งด้วยตนเอง (Naturally aged) โดยธรรมชาติ และสภาพงานไม่เปลี่ยนแปลง
T2	ปล่อยให้งานเย็นตัวลงในบรรยากาศปกติ ความแข็งเกิดขึ้นจากการใช้งานที่อุณหภูมิปกติ (Cold worked) โดยธรรมชาติ
T3	นำงานไปทำการอบละลาย (Solution heat treated) แล้วปล่อยให้งานเย็นตัวลง แล้วบ่มแข็งด้วยตนเอง โดยทิ้งชิ้นงานไว้ในบรรยากาศจะเกิดความแข็งเอง
T4	ทำการอบละลาย และบ่มแข็งด้วยตนเองเพื่อให้ความแข็งคงที่
T42	ทำการอบละลาย จาก “O” และ “F” Temper เพื่อปรับสภาพของงานหล่อก่อนทำการบ่มแข็งด้วยตนเอง เพื่อให้ความแข็งคงตัว
T5	ปล่อยให้งานค่อย ๆ เย็นตัวลง โดยสภาพเดิม แล้วนำไปทำการบ่มแข็งเทียม (Artificially aged) (โดยนำงานที่ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว แล้วกลับมาอบอีกครั้ง ในช่วงอุณหภูมิ ไม่เกิน 200°C เพื่อให้เกิดเฟสใหม่ที่ให้ความแข็งแรงได้ถึงจุดสูงสุด ภายในเวลาไม่เกิน 10 ชั่วโมง) *บ่มแข็งเทียม ที่ 450 F เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
T51	เป็นการคลายความเครียด (Stress relieved) โดยการนำไปตัดตรง หลังจากการทำอบละลาย หรือ หลังจากการปล่อยให้เย็นตัวลงตามปกติ
T52	เป็นการทำ Stress relieved โดยการนำไปกดอัดงาน ภายหลังจากการทำอบละลาย

	หรือหลังจากการปล่อยให้เย็นตัวลงจากสภาพเดิม
T54	เป็นการทำ Stress relieved โดยการใช้แรงดึง และอัดงานภายหลังจากการรีดหรือขึ้นรูป
T6	เป็นการทำการอบละลาย ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว แล้วทำบ่มแข็งเทียม
T61	เป็นการทำการอบละลาย แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ก่อนทำบ่มแข็งเทียม เพื่อให้ได้ความแข็งและความแข็งแรงสูงสุด
T62	เป็นการทำการอบละลาย จาก “O” และ “F” Temper จากนั้นนำไปทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ก่อนแล้วทำบ่มแข็งเทียม
T7	เป็นการทำการอบละลาย และ Stabilized (การทำ Overaged เพื่อปรับปรุงขนาดให้คงที่แน่นอน แต่ไม่สูญเสียคุณสมบัติทาง Mechanical properties) *หรือทำการอบละลาย ที่ 980 ฟาเรนไฮต์, Overaged ที่ 440 ฟาเรนไฮต์ เป็นเวลา 3-5 ชั่วโมง
T71	เป็นการทำการอบละลาย และ Stabilized (คือ การยี้ระยะเวลา และอุณหภูมิ ทำ Overage เพื่อลดความเครียด และปรับปรุงให้มี ขนาดคงที่แน่นอน แต่คุณสมบัติทาง Mechanical properties จะลดลง)
T8	เป็นการทำการอบละลาย ต่อด้วย Cold worked แล้วนำมาทำบ่มแข็งเทียม
T9	เป็นการทำการอบละลาย ต่อด้วยบ่มแข็งเทียม แล้วนำมาทำ Cold worked
T10	เป็นการให้งานเย็นตัวตามปกติ แล้วนำไปขึ้นรูป Cold worked แล้วนำมาทำบ่มแข็งเทียม

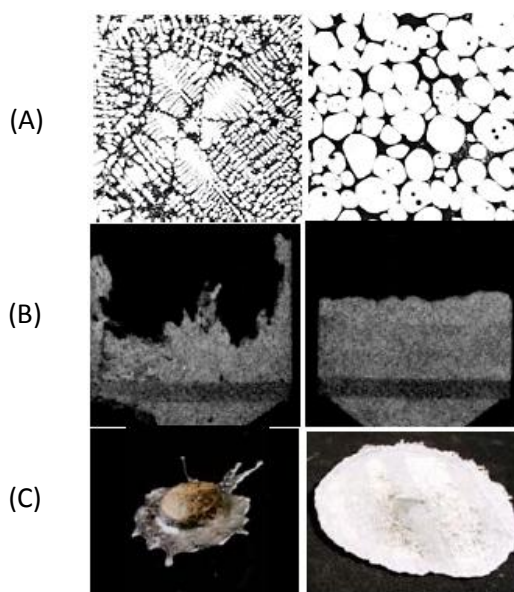
1.5.7 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting)

การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting) จากในอดีตที่มีการค้นพบเป็นครั้งแรกในช่วงต้นปี 1970 โดย Spencer และ Flemings ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology, MIT) (Spencer, 1971) จนถึงปัจจุบันก็นับเป็นเวลาเกือบ 40 ปีแล้วที่ได้มีการวิจัย และพัฒนากันมาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา โดย การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง นี้เป็น การขึ้นรูปโลหะด้วยการหล่อในขณะที่โลหะอยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Mushy State) ดังแสดงในรูปที่ 1.7 ซึ่งโลหะจะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วน โดยโลหะส่วนที่แข็งตัวแล้วจะมีโครงสร้างเกรนไม่เป็นแบบเดนไดรต์ (Non-Dendritic Grain) หรือเรียกว่า เกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular Grain) ดังรูปที่ 1.8(A) (รูปขวา) ซึ่งเกรนก้อนกลมที่ลอยอยู่ในน้ำ

โลหะนี้จะทำให้โลหะกึ่งของแข็ง มีความหนืดมากกว่าน้ำโลหะทั่วไปหลายเท่า ทำให้การไหลเข้าแม่พิมพ์ไม่เป็นแบบปั่นป่วน (Non-Turbulent หรือ Laminar Flow) รูปที่ 1.8(B) แสดงการไหลเปรียบเทียบระหว่างน้ำโลหะทั่วไป (รูปซ้าย) และโลหะกึ่งของแข็ง (รูปขวา) และรูปที่ 1.8(C) เปรียบเทียบการไหลของน้ำโลหะทั่วไปที่มีโครงสร้างเกรนแบบเดนไดรต์ (รูปซ้าย) กับโลหะในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (รูปขวา) ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าโลหะกึ่งของแข็งมีการไหลที่ราบเรียบกว่ามาก [7]



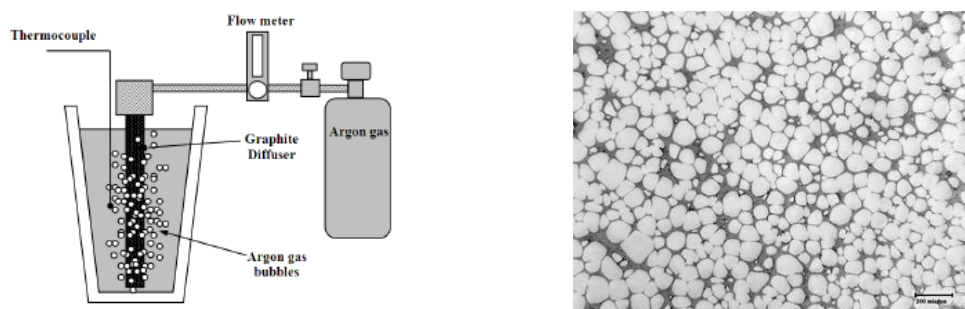
รูปที่ 1.7 แผนภาพสมดุลแสดงช่วงของอุณหภูมิของโลหะที่อยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว



รูปที่ 1.8 เปรียบเทียบโครงสร้างและการไหลระหว่างการหล่อด้วยน้ำโลหะกับโลหะกึ่งของแข็ง [7]

1.5.8 กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการฟุ้งฟองแก๊สของแข็งตัว (Gas Induced Semi - Solid, GISS Process)

ปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ขึ้นในประเทศไทย นำโดย รศ.ดร. เจษฎา วรรณสินธุ์ อาจารย์และนักวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยมีที่ปรึกษาจากสหรัฐอเมริกาหลายคน รวมทั้ง Prof. Merton Flemings จาก MIT กำลังวิจัย และพัฒนากรรมวิธี Rheocasting แบบใหม่ ภายใต้การสนับสนุนของโครงการสมองไหลกลับ สวทช. ซึ่งได้ยื่นจดสิทธิบัตรในประเทศไทยและในต่างประเทศแล้ว โดยกระบวนการนี้จะใช้การ ฟุ้งฟองแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอน หรือไนโตรเจน ผ่านแท่งกราฟไฟต์พอรุนในปริมาณที่น้อยมากให้ไหลลงไปใต้น้ำโลหะเพื่อผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยใช้หลักการการเคลื่อนย้ายของน้ำโลหะ และการดูดความร้อนเฉพาะจุด ซึ่งวิธีการนี้ฟองแก๊สจะเป็นตัวกลางในการกวน และแท่งกราฟไฟต์พอรุนจะเป็นตัวดูดระบายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1.9 และเรียกกรรมวิธีแบบใหม่นี้ว่า กระบวนการ Gas Induced Semi-Solid หรือที่เรียกสั้นๆ ว่า กระบวนการ GISS ซึ่งผลจากการวิจัยและพัฒนากระบวนการที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมได้

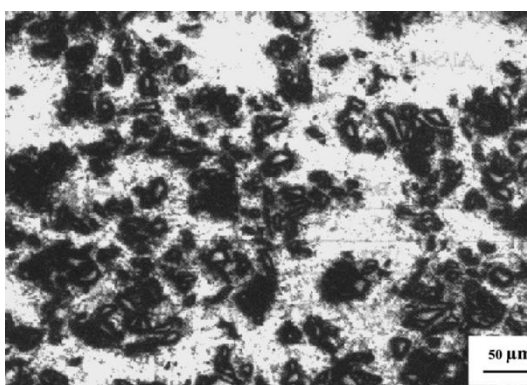


รูปที่ 1.9 กรรมวิธีผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ด้วยกระบวนการ Gas Induced Semi-Solid (GISS process) และ โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ผลิตได้ [7]

ด้วยวิธีการนี้ เนื่องจากแท่งกราฟไฟต์ไม่ต้องมีการหมุนจึงก่อให้เกิดประโยชน์หลายด้าน เช่น ทำให้เราสามารถต่อระบบหล่อเย็น (Cooling) และระบบเซนเซอร์เข้าไปกับระบบทั้งหมดของกระบวนการได้อย่างง่ายไม่ซับซ้อน และเนื่องจากจะไม่เกิดกระแสวนใต้น้ำโลหะ ดังนั้นจะไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาของ S.M. Seyed Reihani ในปี 2004 ได้ศึกษาถึงกระบวนการผลิต Al6061-30vol% SiC Composite ซึ่งได้ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นตัวเสริมแรง (Reinforcement) ที่มีขนาด 16 , 22 μm มาเตรียมเป็นแผ่น Preform โดยการนำผง SiC มาผสมกับ Colloidal Silica (Binder) ลงในแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างเป็นวงกลมรัศมี 100 มิลลิเมตร ให้ได้ความสูงของส่วนผสม 20 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบ (Baking) ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเผาไหม้ (Sintering) ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้แผ่น Preform ที่มีปริมาณ SiC 30% โดยปริมาตรและมีช่องว่าง 70% หลังจากนั้น นำแผ่น Preform วางในแม่พิมพ์ Squeeze Cast แล้วให้ความร้อนก่อนการเทแก่แผ่น Preform และแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 300°C จากนั้นเทน้ำอะลูมิเนียมที่หลอมไว้ที่อุณหภูมิ 800°C ลงในแม่พิมพ์แล้วทำการอัด โดยใช้แรงในการอัด 100 MPa. น้ำอะลูมิเนียมจะแทรกซึมเข้าไปยังช่องว่างของแผ่น Preform และจะแข็งตัว แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการ Homogenized ที่อุณหภูมิ 530°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบ่งชิ้นงานบางส่วนออกไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ทดสอบสมบัติเชิงกล และศึกษาการสึกหรอ ก่อนการทดสอบการสึกหรอนำชิ้นงานไปเพิ่มกรรมวิธีทางความร้อนโดยใช้เงื่อนไข T6 (Solution Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 557°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจุ่มลงในน้ำเพื่อให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 175°C ณ. เวลาต่าง ๆ กัน

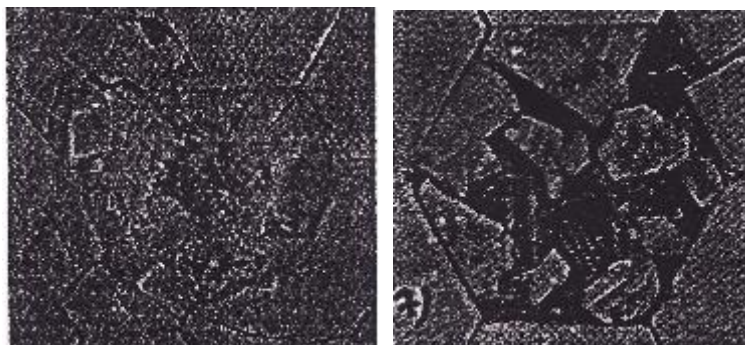


รูปที่ 1.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคของ Al6061-30vol%SiC ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการ Squeeze Casting [6]

จะพบว่าวัสดุผสมที่ขึ้นรูปโดยวิธี Squeeze casting จะมีการกระจายตัวของตัวเสริมแรงที่ค่อนข้างสม่ำเสมอในเนื้ออะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมสามารถแทรกซึมเข้าไปอยู่ในช่องว่างของตัว

เสริมแรงได้ จากผลการทดลองจะได้ว่า คุณสมบัติทางกล และความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของวัสดุผสมชนิดนี้จะสูงกว่าอะลูมิเนียมที่ไม่มีตัวเสริมแรง

K.Sujirote และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาถึงกลไกการต้านทานกระสุนปืนของวัสดุ 2 ชนิด คือ วัสดุโลหะและวัสดุเซรามิก โดยการอัดเม็ดอะลูมินา 95% ที่มีขนาด 150 – 200 μm ให้เป็นแผ่น 6 เหลี่ยม จากนั้นนำไป Sintering ที่อุณหภูมิ 1570 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมาต่อกัน โดยทำที่ความหนาต่าง ๆ คือ 2.5,3,5 และ 6 มิลลิเมตร โดยทำการทดสอบด้วยกระสุนปืนขนาด 9 มิลลิเมตร และ .44 Magnum และ 7.62 มิลลิเมตร ที่ระดับการคุกคาม 3A และ 3



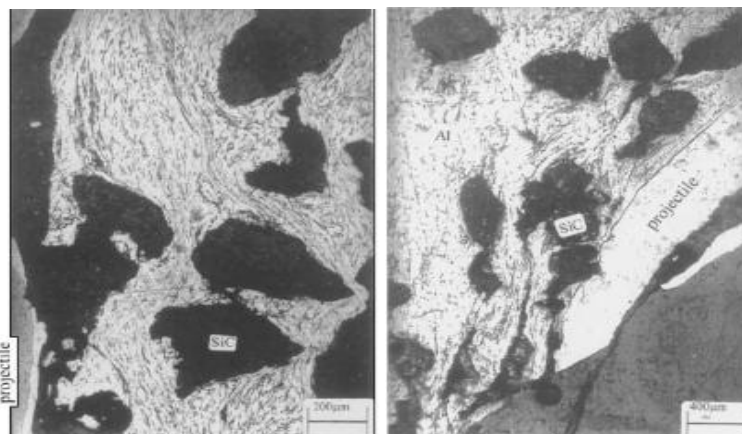
รูปที่ 1.11 แผ่นโลหะ (ซ้าย) แผ่นเซรามิก (ขวา)

พบว่าวัสดุโลหะ (ซ้าย) นั้นจะต้านทานการคุกคามของกระสุนปืนโดยการปลดพลังงานจลน์ด้วยกลไกการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ส่วนวัสดุเซรามิก (ขวา) นั้นจะต้านทานการคุกคามของกระสุนปืนโดยการไปดูดกลืนพลังงานจลน์ด้วยกลไกของการแตก

M.B. Karamis และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุผสมเนื้อโลหะ 2 ชนิด คือ AA5083 และ AA6063 ที่มีส่วนเสริมแรงเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาด 250 -500 ไมครอน โดยใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ 45,30 และ 15% ตามลำดับ แล้วทำการขึ้นรูปโดยการ Squeeze Casting โดยการใส่ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ลงในแม่พิมพ์จากนั้นเทน้ำโลหะอะลูมิเนียมลงในแม่พิมพ์แล้วทำการอัดเป็นแผ่นกลมให้มีความหนา 2 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 14 เซนติเมตร ซึ่งจะช่วยให้ผงซิลิกอนคาร์ไบด์กระจายตัวในเนื้อโลหะอะลูมิเนียม ทำการทดสอบด้วยกระสุนปืน 7.62 มิลลิเมตร แล้วทำการสังเกตกลไกการแตกและกลไกการเปลี่ยนรูปของวัสดุผสมเนื้อโลหะและกระสุนปืน

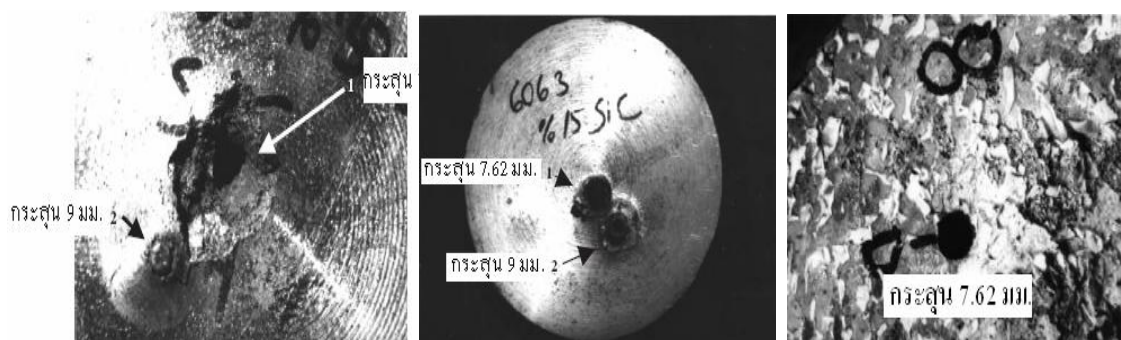
จากรูปทั้งสองจะแสดงให้เห็นถึงการไหลของวัสดุอะลูมิเนียมรอบๆ อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ เนื่องจากแรงเสียดทาน ซึ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้น และทำให้เกราะเกิดการเปลี่ยนรูป

พบว่าระบบของกลไกของพลังงานจะลดลงเนื่องจากแรงเสียดทาน ปัจจัยคือ การทะลุผ่านความลึกเมื่อถูกกระสุนปืนมาความเร็วสูง และเกราะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก และลักษณะของการเสียดสีจะขึ้นอยู่กับปริมาณของอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ ซึ่งจะทำให้พลังงานจลน์ลดลง



รูปที่ 1.12 อะลูมิเนียมเกรด 5083+30%SiC (ซ้าย) อะลูมิเนียมเกรด 6063+15%SiC (ขวา)

M.B. Karamis และคณะ ได้ทำการศึกษาริเวณที่เกิดความเสียหายจากแรงกระแทกของกระสุนปืนบนแผ่นวัสดุผสมเนื้อโลหะที่มีซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นส่วนเสริมแรงในอะลูมิเนียมเกรด AA 6063 และทำการอัดขึ้นรูปโดยมีความหนา 2 เซนติเมตร จากนั้นทำการทดสอบกระสุนปืน 2 ชนิด คือ กระสุนเจาะเกราะ 7.62 มิลลิเมตร และ 9 มิลลิเมตร ซึ่งจัดอยู่ในระดับ 3 และ 3A



รูปที่ 1.13 แผ่นที่มีซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นเสริม 30% (ซ้าย) แผ่นที่มีซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นส่วนเสริมแรง 15% (กลาง) แผ่นที่มีอะลูมินาเป็นส่วนเสริมแรง (ขวา) [13]

พบว่าเมื่อกระสุน 7.62 มิลลิเมตรในระดับสาม ที่มีความเร็วสูงมากกระทบแผ่นวัสดุโลหะผสมที่มีส่วนเสริมแรงเป็นซัลฟอนคาร์ไบด์ 30 % (รูปซ้าย) จะเกิดการแตกแบบเปราะเกิดขึ้นและทะลุผ่านไป แต่เมื่อกระสุน 9 มิลลิเมตร ในระดับ 3A ที่มีความเร็วต่ำกว่าจะไม่สามารถผ่านไปได้แต่ก็มีความเสียหายเกิดขึ้น และเมื่อนำไปทดสอบกับแผ่นวัสดุโลหะผสมที่มีส่วนเสริมแรงเป็นซัลฟอนคาร์ไบด์ 15 % (รูปกลาง) จะเกิดการแตกแบบเหนียวโดยสังเกตได้จากที่รอยทะลุผ่านของกระสุนปืนเข้าออกจะเกิดเป็นครีบกี้เกิดขึ้น และกระสุนทั้ง 2 ชนิดสามารถทะลุผ่านได้ และเมื่อทดสอบกับแผ่นวัสดุโลหะผสมที่มีส่วนเสริมแรงเป็นอะลูมินาด้วยกระสุน 7.62 มิลลิเมตร แผ่นวัสดุโลหะผสมที่มีส่วนเสริมแรงเป็นอะลูมินากระสุนจะทะลุผ่าน ดังนั้นแผ่นที่มีส่วนเสริมเป็นซัลฟอนคาร์ไบด์ 30% จะสามารถต้านทานกระสุน 9 มิลลิเมตร แต่ไม่สามารถต้านทานกระสุน 7.62 มิลลิเมตร ได้ ส่วนแผ่นที่มีส่วนเสริมแรงเป็นซัลฟอนคาร์ไบด์ 15 % จะไม่สามารถต้านทานกระสุน 9 มิลลิเมตร และ 7.62 มิลลิเมตรได้

1.7 สถานที่ทำการวิจัย

- ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย
ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย การออกแบบวิธีการดำเนินงานวิจัย วัสดุที่ใช้ในการวิจัย ระเบียบขั้นตอนการวิจัย ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบสมบัติทางกล ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน และการทดสอบสมบัติการต้านทานการทำลายของกระสุน ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 เตาหลอม (Melting Furnace)

เตาหลอมที่ใช้เป็นเตาไฟฟ้าแบบใช้ลวดความต้านทาน (Electric Resistance Furnace) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิในการหลอมได้ด้วยตัวควบคุม (Controller) ซึ่งสามารถหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 1,000°C เตาหลอมในรูปที่ 2.1(ซ้าย) สามารถหลอมอะลูมิเนียมได้สูงสุด 10 กิโลกรัมต่อครั้ง และใช้ศึกษาผลเบื้องต้น สำหรับการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มของ Wrought Aluminum Alloy เกรด 2024 5052 6061 และ 7075 นอกจากนี้ยังใช้ให้ความร้อนก่อนการขึ้นรูป แก่แผ่นวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนที่เป็นตัวเสริมแรง ส่วนเตาหลอมในรูปที่ 2.1(ขวา) สามารถหลอมอะลูมิเนียมได้สูงสุด 120 กิโลกรัมต่อครั้ง และเป็นเตาหลอมที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานแผ่นเกราะกันกระสุน



รูปที่ 2.1 แสดงเตาหลอมไฟฟ้าแบบลวดความต้านทานที่ใช้ในการทดลอง

2.1.2 เบ้าหลอมโลหะ (Crucible)

เบ้าหลอมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเบ้าหลอมชนิด Graphite-Clay Base ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เบ้าหลอมชนิดนี้จะไม่ทำให้เกิดการละลายของเหล็กปนเข้าสู่โลหะ ดังเช่นการใช้เบ้าเหล็กเหนียวหรือเบ้าเหล็กหล่อ และยังสามารถทำความสะอาดได้ง่ายหลังการใช้งาน นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ใช้เบ้าหลอมโลหะ (Crucible) ชนิด Graphite-Clay Base เป็นภาชนะสำหรับให้ความร้อนก่อนการขึ้นรูปแก่แผ่นวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนที่เป็นตัวเสริมแรง



รูปที่ 2.2 แสดงเบ้าหลอมโลหะชนิด Graphite-clay base ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2.1.3 เครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว (GISS)

เครื่องที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว ประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญดังนี้

1. แท่งกราไฟต์ (Graphite Diffuser)
2. ตัววัดอุณหภูมิของน้ำโลหะและอุณหภูมิของแท่งกราไฟต์ (Thermocouples)
3. ระบบควบคุมอัตราการไหลของลมและแก๊ส (Control System for Air Cooling and Inert Gas Flow Rate)
4. ระบบหล่อเย็นและทำความสะอาดของแท่งกราไฟต์ (Cooling and Cleaning System)
5. ชุดควบคุมระบบผลิตโลหะกึ่งของแข็ง (Central Control Unit) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงเครื่องผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัวที่มีชื่อว่า GISS

2.1.4 เครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic) แนวตั้งขนาด 80 ตันระดับห้องปฏิบัติการ

การวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก ซึ่งประกอบด้วยกระบอกอัดในแนวตั้งขนาด 80 ตัน พร้อมชุดดันปลดชิ้นงาน และ ชุดให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์พร้อมด้วยชุด ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งเครื่องไฮดรอลิก ดังกล่าวมีแรงดันอัดประมาณ 80 MPa เพื่ออัดน้ำโลหะเหลวให้แทรกซึม เข้าในช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนที่เป็นตัวเสริมแรง สำหรับผลิตเป็นชิ้นงานเกาะกันกระสุนในงานวิจัยนี้

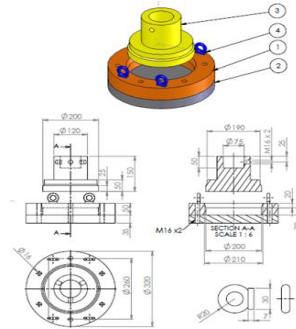


รูปที่ 2.4 แสดงเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน (ซ้าย) ชุดดันปลดชิ้นงาน (กลาง) ชุดให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ (ขวา)

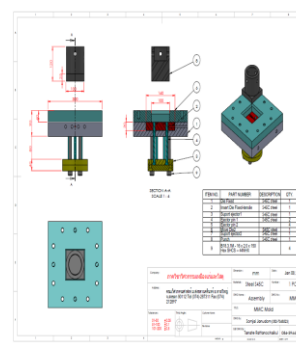
2.1.5 แม่พิมพ์

แม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีด้วยกันสองแบบ คือในช่วงต้นของงานวิจัยใช้แม่พิมพ์สำหรับงานหล่ออัด (Squeeze Casting) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร สำหรับการศึกษาลบเบื้องต้นในการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy) เกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 ดังแสดงในรูปที่ 2.5 งานวิจัยในช่วงท้ายได้ออกแบบและสั่งทำแม่พิมพ์รูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 10x10 เซนติเมตร พร้อมด้วยชุดดันปลดและชุดให้ความร้อนแก่

แม่พิมพ์เพื่อการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนในปริมาณมาก และคุณภาพที่สม่ำเสมอของชิ้นงานดัง
แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 แสดงแม่พิมพ์สำหรับงานหล่ออัด (Squeeze Casting) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
20 เซนติเมตร ที่ติดตั้งบนเครื่องอัดไฮดรอลิก (ซ้าย) แสดงแบบของแม่พิมพ์ (ขวา)



รูปที่ 2.6 แสดงแม่พิมพ์รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 10x10 เซนติเมตร พร้อมชุดต้นปลัดชิ้นงานและชุดให้
ความร้อนที่ติดตั้งบนเครื่องอัดไฮดรอลิก (ซ้าย) แสดงแบบของแม่พิมพ์ (ขวา)

2.1.6 เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine)

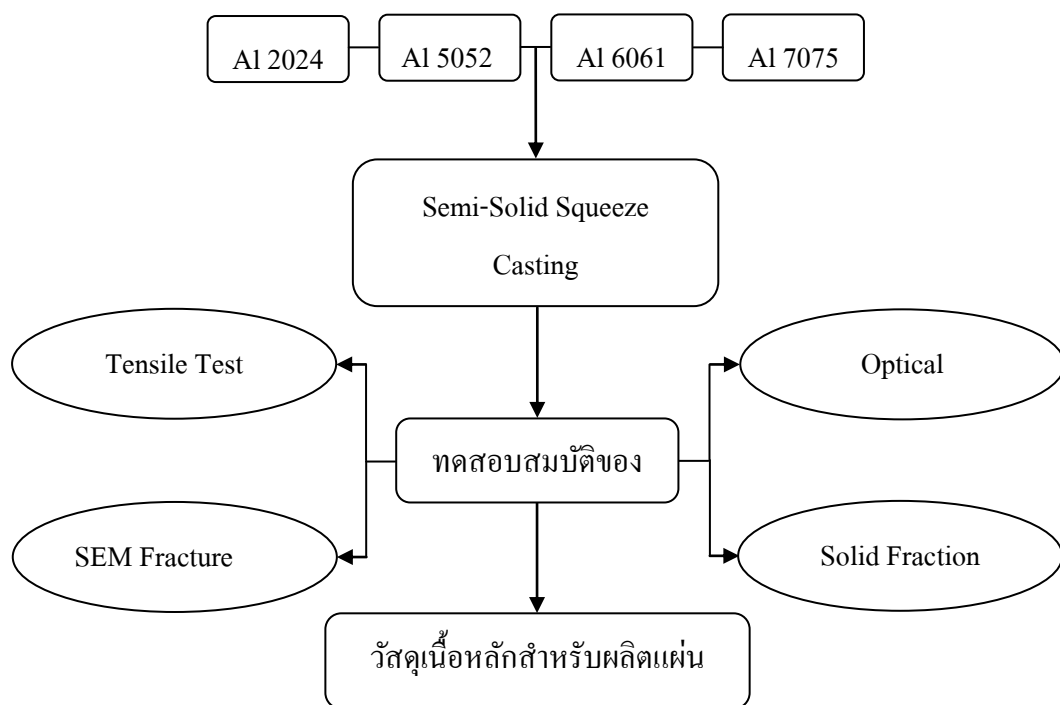
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine) เพื่อกำจัดเนื้ออะลูมิเนียม
ส่วนเกินที่เกิดจากกระบวนการหล่ออัดขึ้นรูป (Squeeze Casting) เพื่อให้ได้ผิวชิ้นงานเกราะที่เหมาะสม
กับการนำไปประกอบเป็นเกราะกันกระสุนสำหรับเรือจู่โจม



รูปที่ 2.7 แสดงเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine)

2.2 ขั้นตอนการวิจัยศึกษาการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)

2.2.1 การออกแบบวิธีดำเนินงานวิจัยศึกษาการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)



รูปที่ 2.8 แสดงวิธีดำเนินงานวิจัยศึกษาการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)

2.2.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยศึกษาการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)

โลหะที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ อะลูมิเนียมผสมในกลุ่ม รีด (Wrought Aluminum Alloy) เกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 โดยเบื้องต้นจะทำการศึกษาการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy) เกรดต่าง ๆ ดังกล่าวมาในข้างต้นที่เป็น primary alloys ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และมีส่วนผสมทางเคมีดังรายละเอียดตามตารางที่ 2.1-2.4 (วิเคราะห์ด้วย Optical Emission Spectrometer, OES) โดยกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัวเพื่อศึกษาสมบัติ ทางกลของอะลูมิเนียม เมื่อผ่านการแปรรูปเป็น โลหะกึ่งของแข็ง และผลการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment)

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ที่ใช้ในการวิจัย

ธาตุ Element	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cr	Pb	Ti	Ni	Sn	Al
Primary alloy	5.09	1.67	0.63	0.40	0.33	0.04	0.00 99	0.00 82	0.00 62	0.00 59	0.00 01	Bal

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 5052 ที่ใช้ในการวิจัย

ธาตุ (Element)	Mg	Cu	Mn	Si	Cr	Fe	Ti	Al
Primary alloy	2.48	0.02	0.03	0.05	0.23	0.3	0.02	Bal

ตารางที่ 2.3 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 ที่ใช้ในการวิจัย

ธาตุ (Element)	Mg	Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Mn	Cr	Other (Total)	Al
Primary alloy	0.8- 1.2	0.4- 0.8	Max 0.7	0.15- 0.4	Max 0.25	Max 0.15	Max 0.15	0.04- 0.35	0.15	Bal

ตารางที่ 2.4 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในการวิจัย

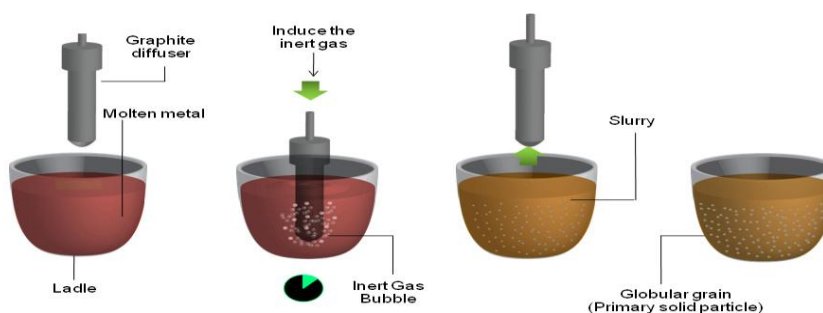
ธาตุ (Element)	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al
Primary alloy	6.08	2.5	1.93	0.46	0.4	0.03	0.19	0.02	Bal



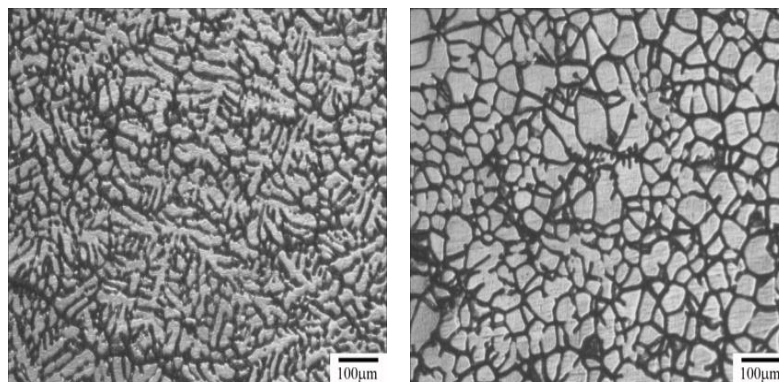
รูปที่ 2.9 แสดงแท่งอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy) ที่ใช้สำหรับศึกษาผลเบื้องต้นการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีดด้วยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัว

2.2.3 การเตรียมโลหะกึ่งของแข็ง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำกระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งเรียกว่า กระบวนการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะแข็งตัว (Gas Induced Semi Solid, GISS) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นกระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งสำหรับการทดลอง การหล่ออัด ขึ้นรูป (Semi-Solid Squeeze Casting) เพื่อศึกษาผลเบื้องต้นการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด และการขึ้นรูปแผ่นเกราะกันกระสุนเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์พูน โดยกรรมวิธีการแทรกซึมแบบใหม่ (Semi-Solid Infiltration) ในกระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็ง จะทำการปล่อยฟองแก๊สไนโตรเจนให้ไหลผ่านแท่งกราฟไฟต์แข็งพุนลงในน้ำโลหะเป็นระยะเวลาต่าง ๆ กัน เพื่อให้ได้โลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างเกรนแบบไร้กิ่งไม้ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 กระบวนการ Gas Induced Semi Solid หรือ GISS



รูปที่ 2.11 โครงสร้างโลหะที่มีเกรนเป็นแบบกิ่งไม้ (ซ้าย) และแบบไร้กิ่งไม้ (ขวา)

2.2.4 การแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)

การแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy) มีจุดประสงค์สำคัญ เพื่อ เลือกวัสดุเนื้อหลัก มาใช้ในกระบวนการแทรกซึมในสถานะกึ่งของแข็งที่เหมาะสม สำหรับ ผลิตภัณฑ์ งาน เกราะกันกระสุน ซึ่งอะลูมิเนียมที่นำมา ศึกษาผลเบื้องต้นนี้ ประกอบด้วยกันทั้งหมด 4 เกรด คือ อะลูมิเนียมผสมเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 โดยทำการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการขึ้นรูป แบบหล่อในสถานะโลหะ อัดแบบกึ่งของแข็งโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สที่แตกต่างกัน คือ 10, 20 และ 30 วินาที ตามลำดับ ด้วยแม่พิมพ์หล่ออัด (Squeeze Casting Mold) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร โดยมีขั้นตอนการขึ้นรูปดังนี้

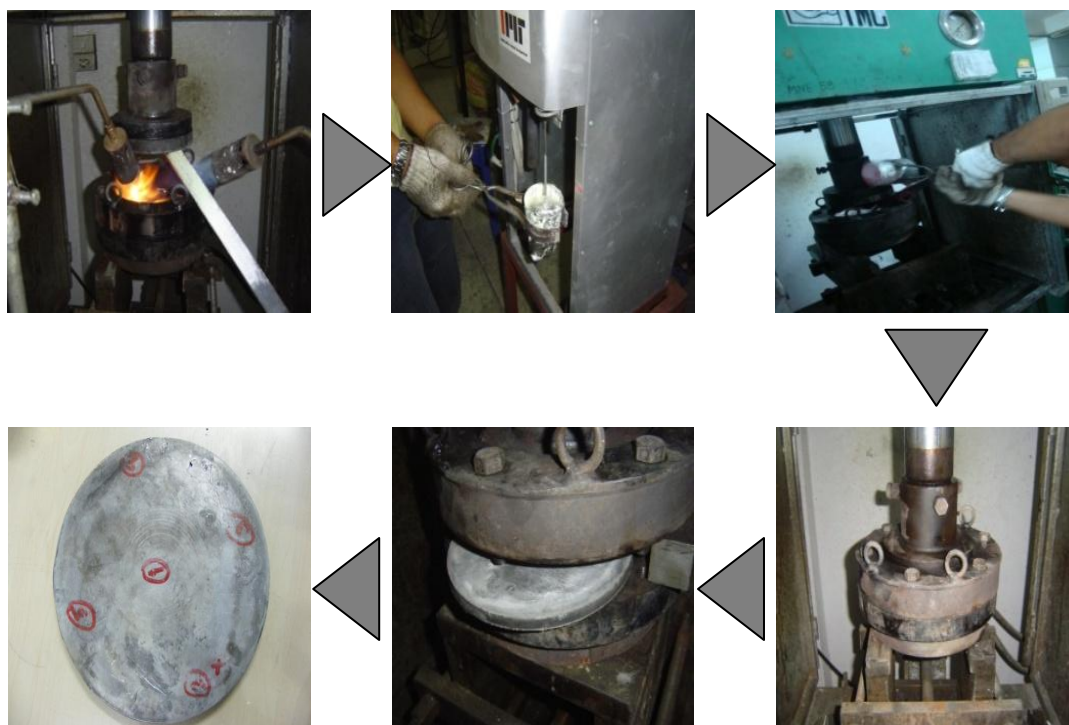
ขั้นที่ 1 ติดตั้งแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร บนเครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic) และให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ก่อนการขึ้นรูปที่อุณหภูมิประมาณ 250 - 300 °C

ขั้นที่ 2 ตักน้ำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่หลอมไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 700°C แล้วทำการปล่อยฟองแก๊สให้ไหลผ่านแท่งกราฟต์แข็งพุนลงไปในน้ำโลหะที่อุณหภูมิที่ต่างกันตามอุณหภูมิ Liquidus ของแต่ละเกรด ดังตารางที่ 2.5 เนื่องจากการปล่อยฟองแก๊สขณะที่โลหะเริ่มแข็งตัวจะทำให้ได้โลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างเกรนแบบไร้กิ่งไม้โดยทำการปล่อยฟองแก๊ส ที่เวลา 5, 10, 20 และ 30 วินาที

ขั้นที่ 3 เทน้ำโลหะที่มีสถานะกึ่งของแข็งลงในแม่พิมพ์แล้วทำการอัดขึ้นรูปโดยใช้แรงดันประมาณ 2,500 psi (170bar) รอให้แข็งตัวแล้วนำแผ่นโลหะผสมอะลูมิเนียมออกจากแม่พิมพ์ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปขึ้นงานแสดงดังรูปที่ 2.12

ตารางที่ 2.5 แสดงอุณหภูมิของน้ำโลหะที่เริ่มต้นปล่อยฟองแก๊สของอะลูมิเนียมผสมเกรดต่าง ๆ

เกรดของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด	อุณหภูมิที่เริ่มการปล่อยฟองแก๊ส (°C)
2024	645
5052	655
6061	658
7075	640



รูปที่ 2.12 แสดงกระบวนการขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมโดยกรรมวิธีการหล่ออัด (Squeeze Casting)

ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 2.13 จากนั้นนำไปขึ้นงาน มาปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ดังตารางที่ 2.6 แล้วนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง (Tensile testing) ตามมาตรฐาน ASTM B557M เพื่อหาวัสดุที่มีค่าความสามารถในการต้านทานแรงดึง สูงสุด มาเป็น วัสดุเนื้อหลักในการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรง



รูปที่ 2.13 แสดงแผ่นโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรดต่าง ๆ ที่ได้จากการหล่ออัดขึ้นรูป

2.2.5 การปรับปรุงสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum) ด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment)

ทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแผ่นโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการทางความร้อนที่เหมาะสมกับแต่ละเกรดซึ่งได้อ้างอิงมาจากวารสารนานาชาติตามตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน

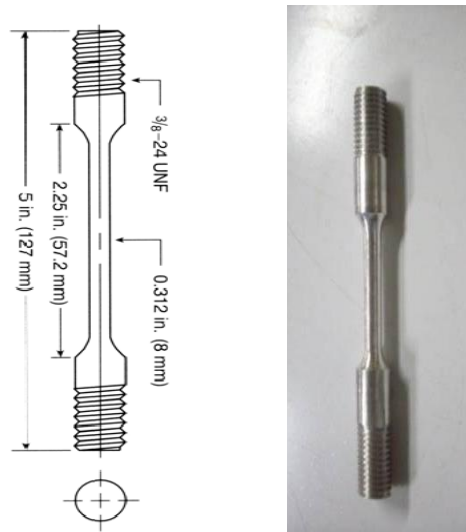
Alloy	Temper	Solution heat treatment		Aging		หมายเหตุ
		Temp. (°C)	Times (hr)	Temp. (°C)	Times (hr)	
2024	T6	495	16	165	17	-
5052	O	-	-	343	45 นาที	-
6061	T6 v.1	527	1	177	6	-
	T6 v.2	500	2	200	2	ทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ในน้ำ 4 ชั่วโมงหลังอบ ละลาย
7075	T6 v.1	480	17	120	34	-
	T6 v.2	480	12	120	18	-



รูปที่ 2.14 แสดงภาพเตาสำหรับการให้ความร้อนชิ้นงาน เตาสำหรับอบละลาย (Solution Heat Treatment) (ซ้าย) และ เตาสำหรับบ่มเทียม (Artificial aging) (ขวา)

2.2.6 การทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)

สมบัติทางกลของโลหะที่สำคัญได้แก่ การทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, UTS) การยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงาน (Elongation) ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถวัดได้ด้วยการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และทำการดึงชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ด้วยเครื่องทดสอบที่เรียกว่า “Universal Testing Machine” ค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะเป็นค่าแรงดึงที่แปรผันตามระยะของการยืดของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ นำแผ่นโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติ ทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนมาทำการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM-E8 และทำการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง



รูปที่ 2.15 แสดงแบบชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8 (ซ้าย) และแสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึง(ขวา)



รูปที่ 2.16 แสดงเครื่องทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง Universal Testing Machine

2.2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะกึ่งของแข็งที่ได้จากการทดลอง โดยตัดชิ้นงานตามรูปที่ 2.17 จากนั้นชิ้นงานดังกล่าวจะถูกนำไปเตรียมเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 ขึ้นรูปชิ้นงานแบบร้อน (Hot Mounting) โดยใช้ผงเบกาไลต์ (Bakelite) ใสลงไปแบบอัดแล้วใช้ความร้อนและความดันเพื่อให้ผงเบกาไลต์ มีการแข็งตัวติดกับชิ้นงานตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.18

ขั้นที่ 2 ทำการขัดหยาบ (Grinding) ด้วยกระดาษทราย (SiC Paper) เบอร์ P320, P600, P800, P1000 และ P1200 ตามลำดับ

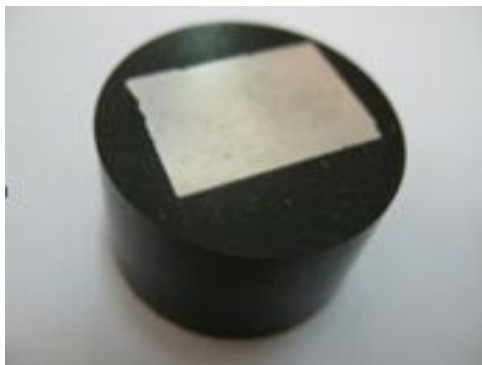
ขั้นที่ 3 ทำการขัดละเอียด (Polishing) ชิ้นงาน โดยเริ่มต้นการขัดละเอียดด้วยผ้าหยาบ (Cloth Pad) ร่วมกับผงขัดอะลูมินาขนาด 5 μm . เมื่อรอยขัดจากกระดาษทรายหมดไปแล้ว จึงทำการขัดโดยใช้ผงขัดอะลูมินาขนาด 1, 0.3 และ 0.05 μm . ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.19

ขั้นที่ 4 กัดผิวหน้าของชิ้นงานโดยใช้น้ำยากัดผิวซึ่งมีชื่อเรียกว่า Keller's reagent ซึ่งประกอบด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ความเข้มข้น 48 % ในปริมาณ 1 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) 1.5 มิลลิลิตร กรดไนตริก (HNO_3) 2.5 มิลลิลิตร ผสมในน้ำกลั่น 95 มิลลิลิตร โดยนำชิ้นงานมาจุ่มลงในสารละลาย Keller เป็นเวลาประมาณ 10 - 20 วินาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วเป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลม

ขั้นที่ 5 นำชิ้นตัวอย่างที่ได้มาส่องดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แล้วถ่ายรูปเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง และทำการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงปริมาณต่อไป ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.17 แสดงบริเวณที่ตัดชิ้นงานมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 2.18 แสดงชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบร้อน (Hot Mounting) โดยใช้ผงเบกาไลต์ (Bakelite)



รูปที่ 2.19 เครื่องขัดละเอียดและขัดหยาบที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 2.20 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM)

การวิเคราะห์รอยแตกหักของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด และแผ่นเกราะกันกระสุนสำหรับงานวิจัยนี้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 2.21 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 5800

2.2.8 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งของโลหะกึ่งของแข็งที่เตรียมได้จากกระบวนการ GISS

น้ำโลหะที่เตรียมได้จากกระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งหรือกระบวนการ GISS ถูกนำมาวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งที่เกิดจากการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะที่ระยะเวลาการปล่อยฟองแก๊สต่างกัน โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งมีดังนี้

ขั้นที่ 1 ทำการหลอมอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 ในเบ้ากราไฟต์ในเตาหลอมชนิดลดด้านทาน

ขั้นที่ 2 ตักน้ำโลหะจากเบ้ากราไฟต์ประมาณ 300 กรัม ด้วยกระบวยตัก (Ladle) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบผิวด้วยโบรอนไนไตรต์

ขั้นที่ 3 ทำการสร้างโลหะกึ่งของแข็งโดยการปล่อยฟองแก๊สที่เวลาแตกต่างกัน คือ 10, 20 และ 30 วินาที ตามลำดับ

ขั้นที่ 4 ใช้แม่พิมพ์ทองแดง (Copper Quenching Mold) เพื่อเก็บตัวอย่างของน้ำโลหะอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่สร้างได้จากข้อ 3 ที่เวลาในการปล่อยฟองแก๊สต่าง ๆ กัน ซึ่งลักษณะของแม่พิมพ์ทองแดงแสดงดังรูปที่ 2.22

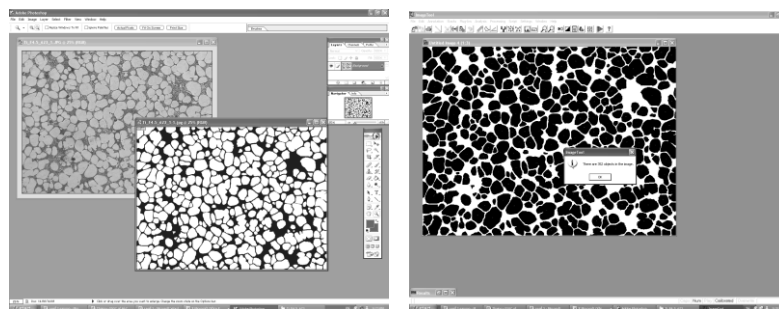
ขั้นที่ 5 นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 4 มาตัด และเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ขั้นที่ 6 ทำการถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy) ในแต่ละบริเวณ โดยจะถ่ายสามรูป ต่อ 1 ชิ้นงาน

ขั้นที่ 7 นำรูปโครงสร้างจุลภาคมาคำนวณหาปริมาณสัดส่วนของแข็ง โดยใช้โปรแกรม Photoshop และ Image Tools ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.22 แสดงแม่พิมพ์ทองแดง (Copper Quenching Mold) เพื่อเก็บตัวอย่างของน้ำโลหะอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง



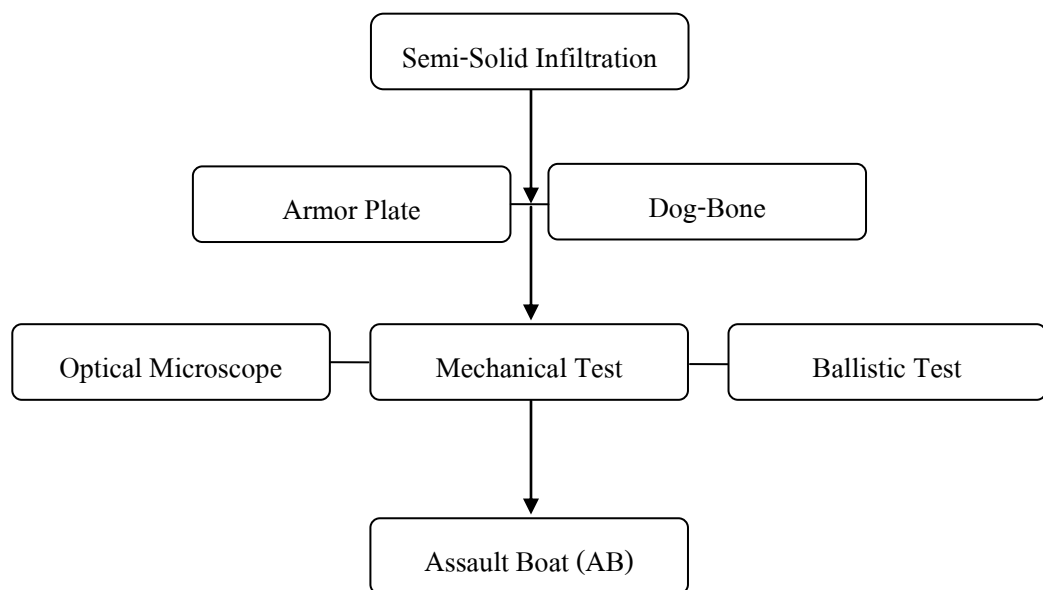
รูปที่ 2.23 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็ง (ซ้ำ) การสร้าง Threshold ด้วยโปรแกรม Photoshop (ขวา) การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Image Tools

2.2.9 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะที่เลือกใช้ผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนในงานวิจัย

การวิเคราะห์ทางความร้อนของโลหะที่ทำการวิจัย เริ่มจากการนำอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ชนิด Secondary ที่ตัดมาจากแท่งอินกอตใส่ลงไปในเบ้ากราไฟต์และนำเบ้ากราไฟต์ไปวางในเตาหลอมชนิดควบคุมความดัน ทำการหลอมโลหะที่อุณหภูมิ 750°C เมื่อโลหะหลอมละลายจึงเติมฟลักซ์ (Flux) เพื่อทำความสะอาดน้ำโลหะ และทำการตัดครอส (Dross) ออกจากน้ำโลหะ จากนั้นตักน้ำโลหะประมาณ 300 กรัม จากเตาหลอมด้วยเบ้าสเตนเลสเคลือบผิวด้วยเซรามิกทนไฟ แล้วนำไปจุ่มเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เพื่อวัดและอ่านค่าอุณหภูมิของน้ำโลหะ ทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของน้ำโลหะโดยการปล่อยให้ น้ำโลหะเย็นตัวอย่างช้า ๆ เพื่อทำการสร้างกราฟแสดงอัตราการเย็นตัว (Cooling Curve) กราฟที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลว (Liquidus Temperature) และอุณหภูมิที่จุดยูเทกติก (Eutectic Temperature) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

2.3 ขั้นตอนการวิจัย การพัฒนาและการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนจาก วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

2.3.1 การออกแบบการวิจัย การพัฒนาและการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนจาก วัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง



รูปที่ 2.24 แสดงการออกแบบการวิจัยการพัฒนาและการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

2.3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยการพัฒนาและการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

2.3.2.1 วัสดุเนื้อหลัก

สำหรับการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุน ได้เลือกใช้อะลูมิเนียมผสม ในกลุ่มรีดเกรด 7075 ที่ เป็น Secondary Alloys มาเป็นวัสดุเนื้อหลักดังแสดงในรูปที่ 2.26 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีแสดง ในตารางที่ 2.7 (วิเคราะห์ด้วย Optical Emission Spectrometer, OES)

ตารางที่ 2.7 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ชนิด Secondary Alloys ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ธาตุ (Element)	Zn	Mg	Cr	Cu	Si	Fe	Mn	Al
Secondary alloy	5.52	2.52	0.19	1.77	0.19	0.37	0.04	Bal

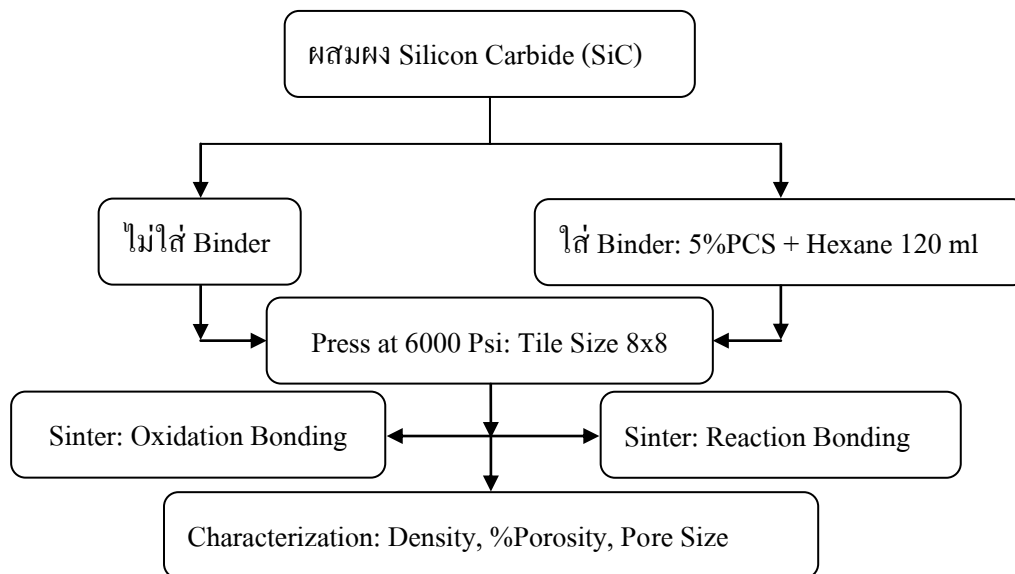


รูปที่ 2.25 แสดงแท่งอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ชนิด Secondary alloy ที่ใช้สำหรับการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนสำหรับเรือต้นแบบของกองเรือลำน้ำทัพเรือไทย

2.3.2.2 ส่วนเสริมแรง

วัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนที่เป็นตัวเสริมแรงในงานวิจัยนี้ ได้รับความร่วมมือจากห้องปฏิบัติการวิจัยชิ้นส่วนเซรามิกส์เพื่องานวิศวกรรม หน่วยปฏิบัติการวิจัยประสิทธิภาพการใช้งานวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ศูนย์โลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ในการคิดค้นและพัฒนาสูตร กระบวนการขึ้นรูป รวมทั้งการทดสอบสมบัติทางกายภาพเพื่อนำชิ้นงานที่ได้มาผลิตเป็นแผ่นเกราะกันกระสุน

2.3.2.2.1 การออกแบบวิธีดำเนินงานวิจัยเพื่อวิจัยและพัฒนาการผลิตวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน

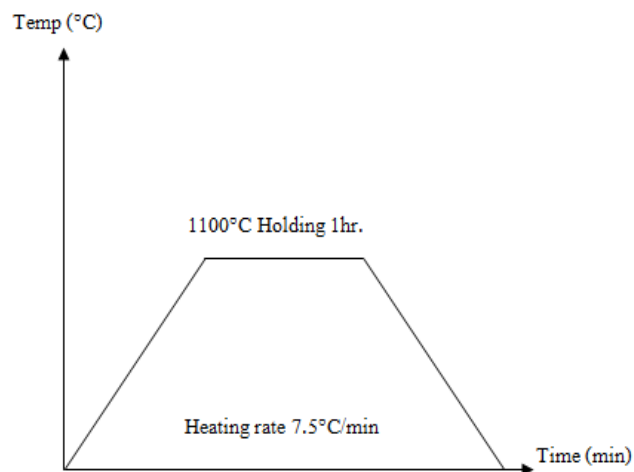


รูปที่ 2.26 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเพื่อวิจัยและพัฒนาการผลิตวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน

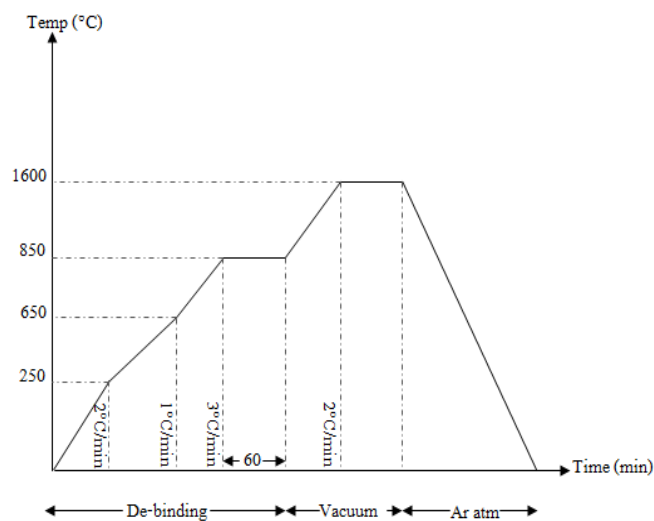
ได้รับความร่วมมือกับศูนย์โลหะและวัสดุแห่งชาติในการผลิตแผ่น ซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนถูกผสมตามสูตร Mix เพื่อให้ได้ค่า Packing ของอนุภาคผงที่สูง ทั้งนี้ยังแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การเติม Binder และไม่เติม Binder ซึ่งมีส่วนผสมแสดงในตารางที่ 2.8 และการเผาไหม้ที่ต่างกัน คือ การเผาไหม้เพื่อให้เกิด Oxidation Bonding และการเผาไหม้เพื่อให้เกิด Reaction Bonding การเตรียมสารสำหรับ Oxidation Bonding เตรียมได้โดยการผสมผงตามสูตร Mix แบบแห้งแล้ว Ball Mixing ด้วยลูกบดอะลูมินาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง และการเตรียมสารสำหรับ Reaction Bonding เตรียมได้โดยการผสมผงตามสูตร Mix แล้วใช้เครื่องกวน (Stir) ปั่นผสมผงให้เข้ากัน และค่อย ๆ เติม Binder ที่เป็น Polycabosilane (PCS) ซึ่งจะต้องละลายใน Hexane 120 มิลลิลิตร จนละลายเข้ากันดี ก่อนที่จะเทผสมลงในผงตามสูตร Mix และผสมส่วนประกอบทั้งหมดให้เข้ากัน โดยใช้ เครื่องกวน หลังจากนั้นจึงทำให้แห้งโดยวิธีทำให้ระเหยกลายเป็นไอ (Evaporate) จนสารแห้ง ซึ่งกระบวนการทั้งหมดทำใน Groove box ที่บรรยากาศของอาร์กอน จากนั้นนำผงมาอัดขึ้นรูปที่แรงดัน 600 psi (420 km/cm^2) ด้วยขนาด 8x8 ตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 2.8 แสดงส่วนผสมของ ผงซิลิกอน สำหรับการเผาไหม้แบบ Oxidation Bonding และ Reaction Bonding

สูตร	SiC (%wt)		
	F1000-W	2.5M	0.7M
Avg. Particle Size (μm)	4.4	2.2	0.7
Mix (Oxidation Bonding)	66	20	14
Mix + 5%PCS (Reaction Bonding)	66	20	14



รูปที่ 2.27 แสดงขั้นตอนการเผาไหม้แบบ Oxidation Bonding (ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน)



รูปที่ 2.28 แสดงขั้นตอนการเผาไหม้แบบ Reaction Bonding (ภายใต้บรรยากาศแบบอาร์กอน)

2.3.2.2.2 การวิเคราะห์ทดสอบแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน

1. ค่าความหนาแน่นก่อนการเผาอบพูนิก (Green density)

การหาค่าความหนาแน่นก่อนการเผาอบพูนิก มีวิธีการดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 นำชิ้นงานหลักจากการอัดขึ้นรูป ชั่งน้ำหนักของชิ้นงาน (M)

ขั้นที่ 2 คำนวณปริมาตรของชิ้นงาน (V)

ขั้นที่ 3 คำนวณค่าความหนาแน่น ดังสมการที่ 1

$$D = \frac{M}{V} \quad \text{สมการที่ 1} \quad 1$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นก่อนการเผาอบพูนิก (g/cm^3)

M คือ น้ำหนักของชิ้นงาน (g)

V คือ ปริมาตรของชิ้นงาน (cm^3)

2. ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผาอบพูนิก (sintered density)

ความหนาแน่นหลังการเผาอบพูนิก ใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes's method)

เพื่อหาค่าความหนาแน่น ตามมาตรฐาน ASTM C373-88 โดยวิธีการดังนี้ คือ

ขั้นที่ 1 นำชิ้นงานเข้าตู้อบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ขั้นที่ 2 ชั่งน้ำหนักแทนที่น้ำ (S) และชั่งน้ำหนักอิมตัวของชิ้นงาน (M)

ก่อนการชั่งน้ำหนักแขวนลอยของสารในน้ำและน้ำหนักหมาด ชิ้นงานจะถูกต้มในน้ำนาน 5 ชั่วโมง และแช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการชั่งน้ำหนัก

ค่าความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density)

$$\text{Apparent density } (\rho_A) = \frac{D}{D-S} \text{ g/cm}^3 \quad \text{สมการที่ 2}$$

ค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density)

$$\text{Bulk density } (\rho_B) = \frac{D}{M-S} \text{ g/cm}^3 \quad \text{สมการที่ 3} \quad 3$$

เปอร์เซ็นต์รูพรุน (% Porosity)

$$\% \text{ Porosity} = \frac{(M - D)}{(M - S)} \times 100$$

สมการที่ 4

เมื่อ D คือ น้ำหนักชิ้นงานที่อบแห้ง (g)

M คือ น้ำหนักชิ้นงานอิมเมอร์ที่ชั่งในอากาศ (g)

S คือ น้ำหนักชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (g)

3. ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว (% Shrinkage) ของชิ้นงาน

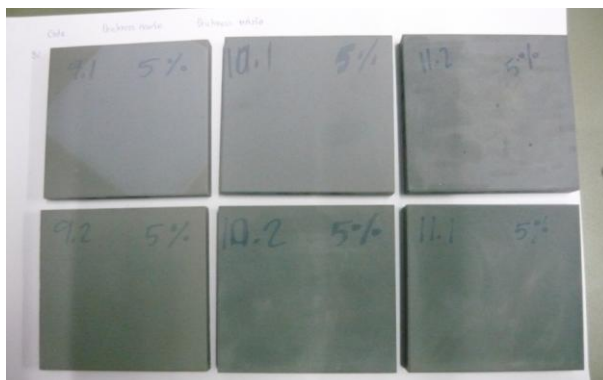
น้ำและตัวเชื่อมประสานจะระเหยออกในขณะที่เผา รวมทั้งเกิดการชินเทอร์ริงจะทำให้ชิ้นงานมีขนาดเล็กลง โดยทั่วไปการหดตัวในแนวขนานกับทิศของแรงอัดจะมากกว่าในแนวตั้งฉาก และนอกจากนี้บริเวณที่หนาจะหดตัวมากกว่าบริเวณบาง ค่าการหดตัวหลังการเผาจะนำไปคิดขนาดระยะต่าง ๆ ที่ปรากฏบนผิวของส่วนประกอบตัวอัดแบบ ค่าการหดตัวชิ้นงานแต่ละชนิดได้มาจากการเก็บข้อมูลก่อน และหลังเผาของชิ้นงาน

$$\% \text{ Shrinkage} = \left(\left| \frac{l - l_o}{l_o} \right| \right) \times 100$$

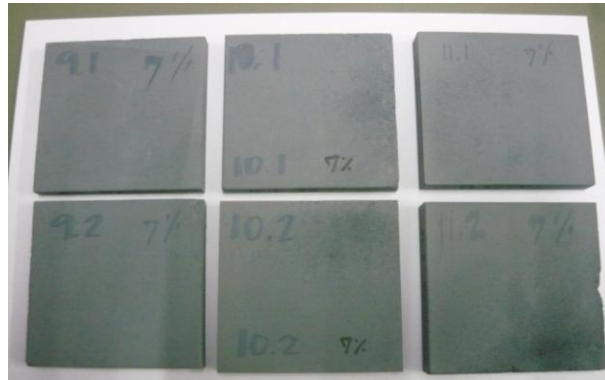
เมื่อ % Shrinkage = เปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานหลังเผา

l = ขนาดชิ้นงานหลังเผา

l_o = ขนาดชิ้นงานก่อนเผา



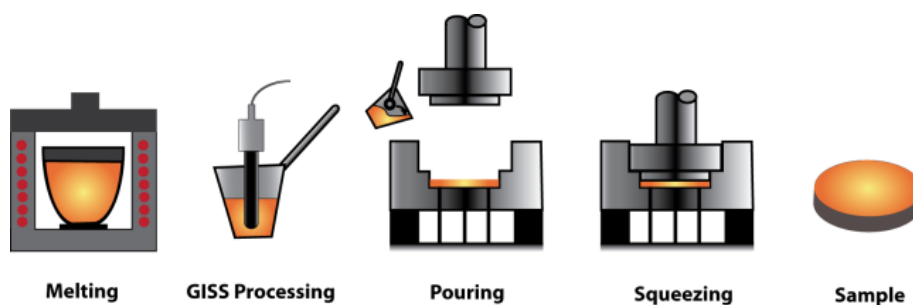
รูปที่ 2.29 แสดงภาพแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนที่ใช้เป็นตัวเสริมแรง สูตร 5%PCS



รูปที่ 2.30 แสดงภาพแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนที่ใช้เป็นตัวเสริมแรง สูตร 7%PCS

2.3.3 การผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีดเกรด 7075 เป็นเนื้อหลัก และเสริมแรงด้วยวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนโดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง

งานวิจัยชิ้นนี้ทำการทดลองศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมด้วยกระบวนการแทรกซึมแบบใหม่ ในการทดลองเบื้องต้นจะทำการศึกษาตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง ซึ่งลักษณะของกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง หรือเรียกภาษาอังกฤษว่า Semi-Solid Infiltration Process แสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.31 แสดงกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งหรือ Semi-Solid Infiltration Process

ขั้นตอนในการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม โดยกระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็งดังนี้

ขั้นที่ 1 หลอมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ชนิด Secondary ในเตาไฟฟ้าชนิดขดลวดต้านทานโดยปรับตั้งค่าอุณหภูมิเตาที่ 750°C

ขั้นที่ 2 ใช้กระบวยตัก (Ladle) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบผิวด้วยเซรามิกทนความร้อนต้มน้ำ โลหะอะลูมิเนียมเหลวในปริมาณ 300 กรัม จากนั้นทำการปาดหน้าตักผิวออกไซด์ของอะลูมิเนียม

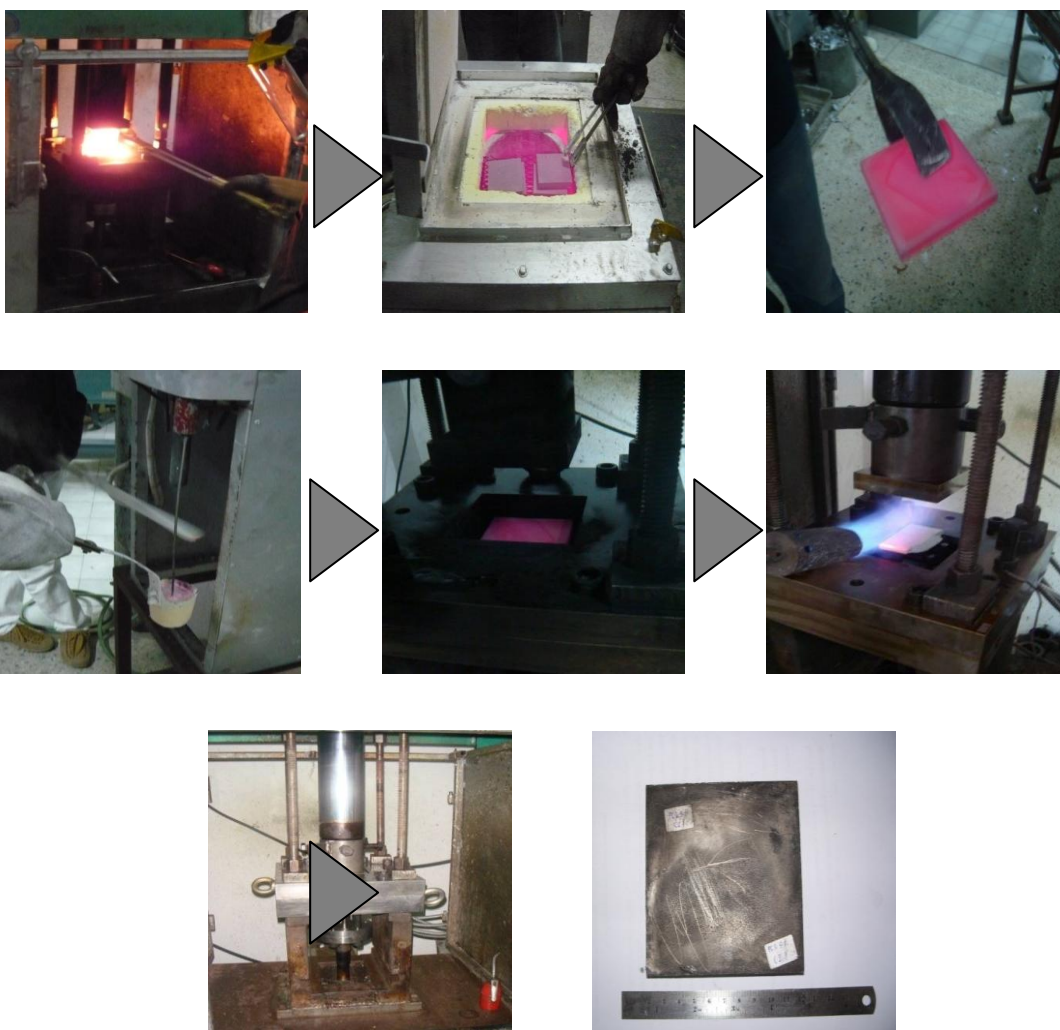
บริเวณด้านบนหรือผิวหน้าของน้ำโลหะออก ในขณะที่เดียวกันทำการเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยคาร์บอนจากเปลวไฟเพื่อให้หน้าโลหะไหลได้เต็มแบบ

ขั้นที่ 3 ทำการจุ่มแท่งกราฟไฟต์เพื่อปล่อยฟองแก๊สเป็นระยะเวลา 3-5 วินาที เพื่อให้ได้สัดส่วนของแข็งประมาณ 5% โดยปรับตั้งค่าอุณหภูมิของแท่งกราฟไฟต์ก่อนทำการจุ่มที่ 50°C อัตราการปล่อยฟองแก๊สที่ 5 ลิตรต่อนาที ในระหว่างนี้จะนำฟริฟอร์มไปวางไว้ในแม่พิมพ์

ขั้นที่ 4 หลังจากสร้างอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งให้มีสัดส่วนของแข็งตามต้องการแล้ว นำจึงนำน้ำโลหะอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งไปเทลงในแม่พิมพ์

ขั้นที่ 5 ทำการอัดขึ้นรูปเพื่อดันน้ำโลหะให้เกิดการแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของ วัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนและอัดทิ้งไว้ประมาณ 10 - 20 วินาที เพื่อให้เกิดการแทรกซึมที่สมบูรณ์

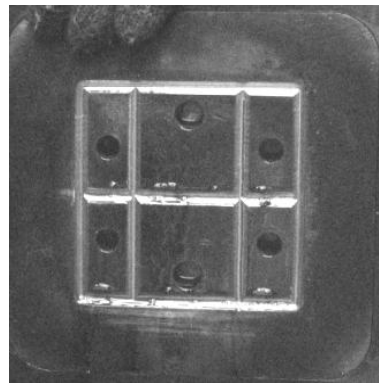
ขั้นที่ 6 ทำการดันปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 2.32 แสดงกระบวนการ Semi-Solid Infiltration Process เพื่อการผลิตแผ่นเกราะ

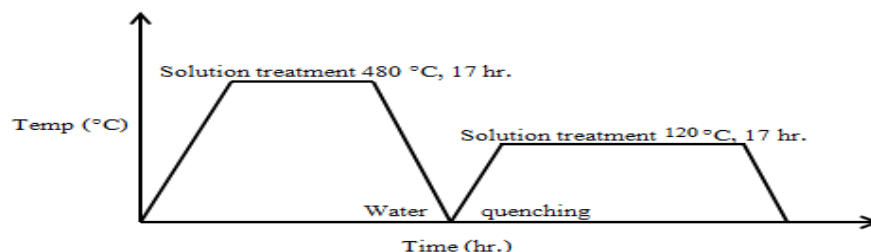
2.3.4 การปรับปรุงแม่พิมพ์สำหรับผลิตแผ่นเกราะกันกระสุน

สำหรับกระบวนการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนที่ใช้อะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีดเป็นเนื้อหลัก และมีแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนเป็นตัวเสริมเรงนั้นจำเป็นต้องมีการปรับปรุงแม่พิมพ์ เพื่อให้เกิดภาวะสมดุลในระหว่างการแข็งตัวของอะลูมิเนียมที่ค้างอยู่ส่วนบนแผ่นเสริมเรง และ ด้านล่างซึ่งหากปริมาตรของเนื้ออะลูมิเนียมมีความแตกต่างกันมากเกินไป อาจจะทำให้ชิ้นงานแผ่นเกราะเกิดการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวที่ไม่เท่ากันจากข้อสันนิษฐานดังกล่าว จึงได้มีการปรับปรุงแม่พิมพ์ส่วนล่าง (Bottom Punch) โดยการกัดร่อง (Milling) ให้ลึก 3 มิลลิเมตร กว้าง 8 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.33 เพื่อเพิ่มพื้นที่ให้น้ำอะลูมิเนียมสามารถแทรกซึมลงมาได้ล่างได้มากขึ้น



รูปที่ 2.33 แสดงแม่พิมพ์ส่วนล่าง (Bottom Punch) ที่ได้ปรับปรุงโดยการกัดร่อง (Milling) เพื่อเพิ่ม ปริมาตรของเนื้ออะลูมิเนียมส่วนล่างที่อยู่ระหว่างแผ่นเสริมเรง

2.3.5 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแผ่นเกราะกันกระสุน ด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment)



รูปที่ 2.34 แสดงขั้นตอนในการทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ที่เลือกให้กับอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีดเกรด 707

2.3.5.1 การอบละลาย (Solution treatment)

ในสภาวะของการอบละลายโครงสร้าง จะนำแผ่น เกราะกันกระสุน เข้าไปอบในเตาอบละลายที่อุณหภูมิการอบ 480 °C เป็นเวลา 17 ชั่วโมง แล้วทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการแช่ในน้ำ (Water quenching) ที่อุณหภูมิห้อง

2.3.5.2 การบ่มเทียม (Artificial aging)

ในสภาวะของการบ่มเทียม จะนำ แผ่นเกราะกันกระสุน เข้าไปอบในเตาบ่มเทียมที่อุณหภูมิการอบ 120 °C เป็นเวลา 34 ชั่วโมง แล้วทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการแช่ในน้ำ (Water Quenching) ที่อุณหภูมิห้อง

2.3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 เป็นเนื้อหลัก และเสริมแรงด้วยแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน

ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยการนำแผ่นเกราะมาทำการ ทำการขัดด้วยกระดาษทรายเรียงเบอร์ดังนี้ 180, 320, 600 และ 1200 แล้วจึงขัดด้วยแผ่นขัดเพชรขนาด 74 และ 45 μm จากนั้นทำการขัดละเอียดด้วย ผงเพชรขนาด 9 และ 1 μm แล้วจึงนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

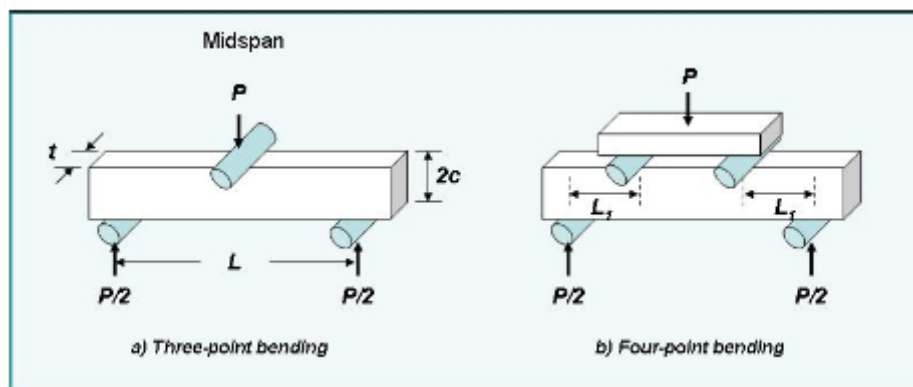


รูปที่ 2.35 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการขัดแผ่นเกราะเพื่อ โครงสร้างจุลภาค

2.3.7 การทดสอบสมบัติทางกลของแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 เป็นเนื้อหลักและเสริมแรงด้วยแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน

2.3.7.1 การทดสอบการดัดงอ (Bending test)

การทดสอบนี้มักถูกนำมาใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงดึงสำหรับวัสดุเปราะ ตัวอย่างทดสอบการดัดมักจะมีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม และทรงกลมและจะถูกกระทำโดยแรงกระทำเป็นจุด (Point loads) ในลักษณะให้แรงกระทำสามจุด (Three-point loading) หรือให้แรงกระทำสี่จุด (four-point loading) ดังแสดงในรูปที่ 2.36 (ซ้าย) และ 2.36 (ขวา) ตามลำดับ



รูปที่ 2.36 แสดงการทดสอบแบบ Three-Point loading (ซ้าย) และแบบ Four-Point loading (ขวา) [15]

เมื่อกานถูกกระทำโดยแรง P แล้ววัสดุที่อยู่ส่วนบนสุดของกานจะถูกทำให้หดตัวลงเนื่องจากถูกแรงกระทำโดยหน่วยแรงกดอัด (Compressive Stress) และวัสดุที่อยู่ส่วนล่างของหน้าตัดของกานจะถูกทำให้ยืดออกเนื่องจากถูกกระทำโดยหน่วยแรงดึง (Tensile Stress) จากรูปที่ 2.37 ค่าสูงสุดของหน่วยแรงตั้งฉาก (Normal Stress) บนหน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่งของกานจะเกิดขึ้นที่ระยะ c จากแกนสะเทินของกานและจะหาได้จากสมการ Flexural Formula

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

เมื่อ M คือ โมเมนต์ (moment) ลัพธ์ภายในที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดที่เรากำลังพิจารณารอบแกนสะเทิน
 I คือ Moment of Inertia ของหน้าตัดของกานที่เรากำลังพิจารณารอบแกนสะเทิน



รูปที่ 2.37 แสดงเครื่อง Instron Universal Model 4502 ที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงและการดัดงอ ชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่เสริมแรงด้วยซิติคอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน

2.3.8 การเตรียมผิวแผ่นเกราะและการกำจัดอะลูมิเนียมส่วนเกิน

เมื่อทำการขึ้นรูปแผ่นเกราะด้วย กระบวนการแทรกซึมแบบกึ่งของแข็ง เรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นจะมีการเตรียมพื้นผิว และปรับขนาดของแผ่นเกราะให้มีขนาดตามที่ต้องการเท่ากันทุกแผ่น โดยการกำจัดอะลูมิเนียมส่วนเกินด้วยกรรมวิธีการกัดผิวหน้าแผ่นเกราะ (Milling Surface) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine) แสดงดังรูปที่ 2.39



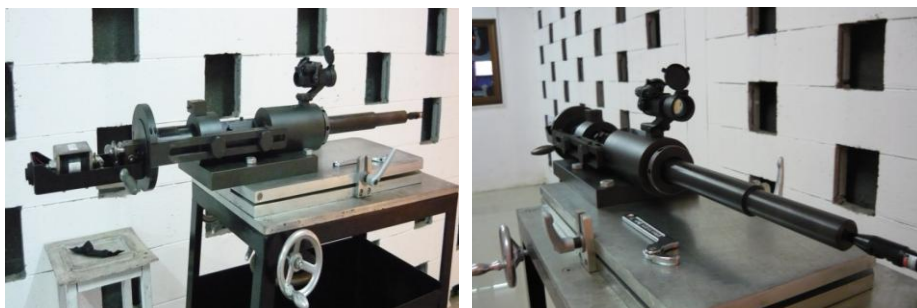
รูปที่ 2.38 แสดงกรรมวิธีการกัดผิวหน้าแผ่นเกราะกันกระสุน (Milling Surface) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine)

2.3.9 การทดสอบความสามารถในการต้านทานการทำลายของกระสุน

นำแผ่นเกราะกันกระสุนวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่ได้ ไปทดสอบความสามารถในการต้านทานการทำลายของกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม โดยการนำไปประกบติดกับวัสดุผสมเนื้อพอลิเมอร์ (PMC) ขนาด 20x30 เซนติเมตร ที่มี Areal Density 1.52 กรัม/ตารางเซนติเมตร แล้วหุ้มด้วยเคฟลาร์ (Kevlar) ด้านหน้า 4 ชั้น ด้านหลัง 2 ชั้น แล้วนำไปประกอบเข้ากับกระเบดินแสดงดังรูปที่ 2.39 (ขวา)



รูปที่ 2.39 แสดงแผ่นเกราะกันกระสุนที่เตรียมสำหรับทดสอบความสามารถในการต้านทานการทำลายของกระสุนขนาด 7.26 มิลลิเมตร (ซ้าย) แผ่นเกราะกันกระสุนที่หุ้มเคฟลาร์ (Kevlar) และประกอบเข้ากับกระเบดินตามมาตรฐาน NIJ สำหรับการยิงทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุน (ขวา)



รูปที่ 2.40 แสดงอาวุธปืนที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการต้านทานการทำลายของกระสุน



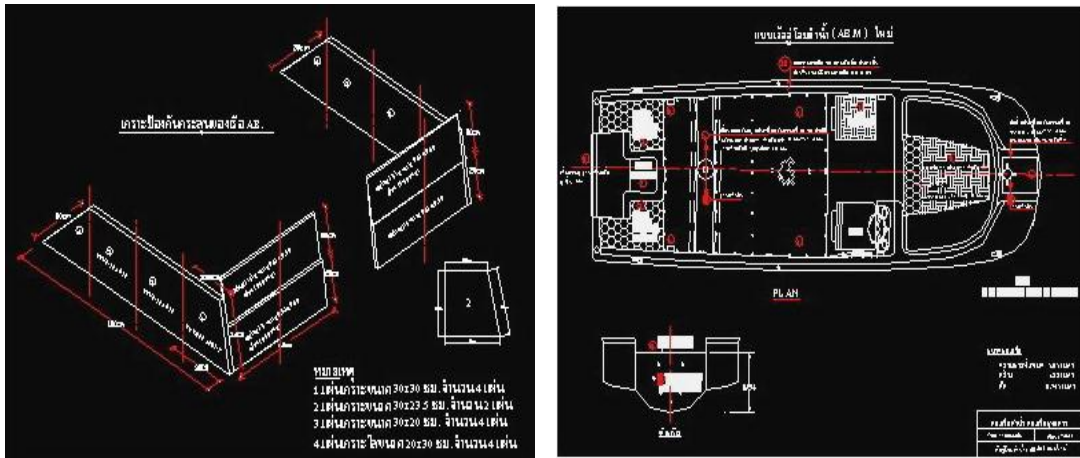
รูปที่ 2.41 แสดงการติดตั้งแผ่นเกราะกันกระสุนสำหรับการศึกษาถึงพฤติกรรมการพังทลายของเกราะกันกระสุนเมื่อได้รับแรงประทะจากกระสุนปืน (ซ้าย) กล้องความเร็วสูงที่ใช้จับภาพพฤติกรรมการพังทลายของแผ่นเกราะกันกระสุนในงานวิจัยนี้ (ขวา)

2.3.10 การติดตั้งแผ่นเกราะกันกระสุนบนเรือจู่โจมลำน้ำเรือต้น

หลังจากการทดลองผลิต และทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุนเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายของงานวิจัยชิ้นนี้ คือ การนำแผ่นเกราะกันกระสุนเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ฟรอนมาประกอบ และติดตั้งเข้ากับตัวเรือจู่โจมลำน้ำต้นแบบซึ่งขั้นตอนนี้เป็นความร่วมมือกันระหว่างทีมงานวิจัย กับกรมอุทกหารเรือของทัพเรือไทย

จำนวนแผ่นเกราะสำหรับติดตั้งบนเรือจู่โจมลำน้ำ	ประกอบด้วย
1. แผ่นเกราะขนาด 30x30 เซนติเมตรหนา 25 มิลลิเมตร จำนวน	8 แผ่น
1.1 ข้างกราบเรือทั้ง 2 กราบ จำนวน	4 แผ่น
1.2 ปืนหัวเรือ จำนวน	2 แผ่น
1.3 ปืนท้ายเรือ จำนวน	2 แผ่น
2. แผ่นเกราะขนาด 20x30 เซนติเมตรหนา 25 มิลลิเมตร จำนวน	6 แผ่น
2.1 ด้านหน้าผู้ควบคุมเรือและที่นั่งประจำเรือ จำนวน	4 แผ่น
2.2 ปืนท้ายเรือ จำนวน	2 แผ่น
3. แผ่นเกราะขนาด 30x30x23.5x34	จำนวน 2 แผ่น
4. แผ่นเกราะใสขนาด 20x60 เซนติเมตรหนา 10 มิลลิเมตร จำนวน	2 แผ่น

ทีมงานวิจัยได้นำแผ่นเกราะกันกระสุนทั้งหมดไปประกอบเข้ากับโครงเรือจู่โจมลำน้ำต้นแบบ ที่ทางกรมอุทกหารเรือจัดเตรียมไว้ และเมื่อประกอบเข้ากับตัวเรือต้นแบบเรียบร้อยแล้ว ทางกรมอุทกหารเรือจะมีการทดสอบสมมูล และการบังคับเรือเมื่อลอยลำอยู่ในน้ำเป็นลำดับต่อไป



รูปที่ 2.42 แสดงแบบกระดาษกันกระสุนสำหรับเรือต้นแบบโจมถ้ำน้ำ (ซ้าย) แสดงแบบเรือต้นแบบโจมถ้ำน้ำ (ขวา)



รูปที่ 2.43 แสดงโครงยึดกระดาษที่ทางกรมอุทกหารเรือจัดสร้างเพื่อประกอบกับแผ่นกระดาษกันกระสุน (ซ้าย) โครงยึดกระดาษเมื่อประกอบเข้ากับเรือโจมถ้ำน้ำต้นแบบ (ขวา)

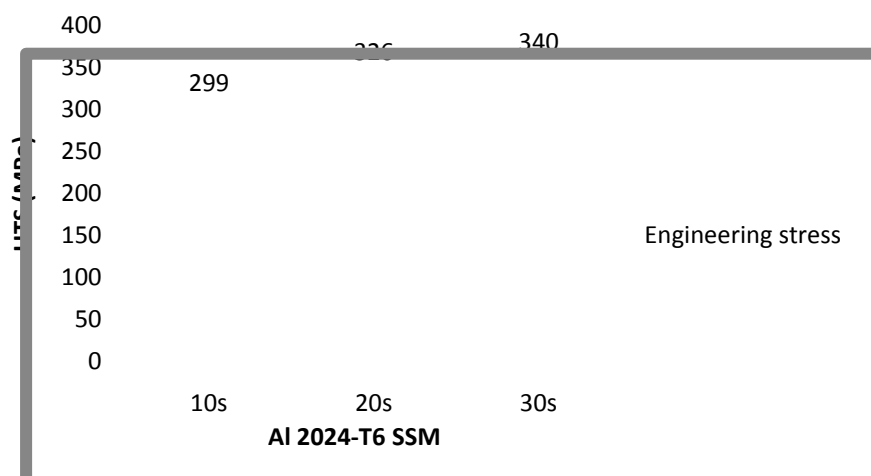
บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผล

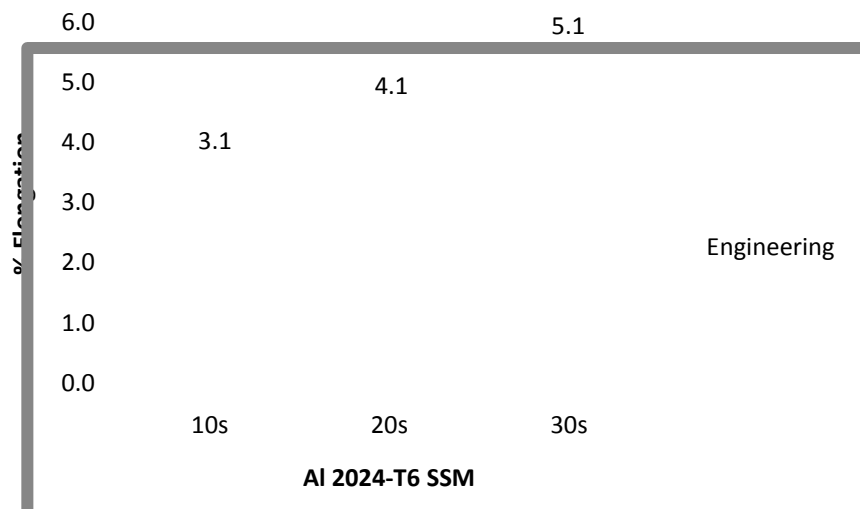
3.1 ผลการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)

3.1.1 ผลการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสม-ทองแดง เกรด 2024

จากการนำอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีดเกรด 2024 มาแปรรูปโดยทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็ง โดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สผ่านแท่งกราไฟต์แข็งพูนที่เวลาต่างกัน คือ 5, 10, 20 และ 30 วินาที และนำมาปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 495°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 165°C เป็นเวลา 17 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปกลึงขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8 แล้วนำชิ้นงานทดสอบที่ได้ไปทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Tensile Test) โดยผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงได้แสดงผลการทดสอบ ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



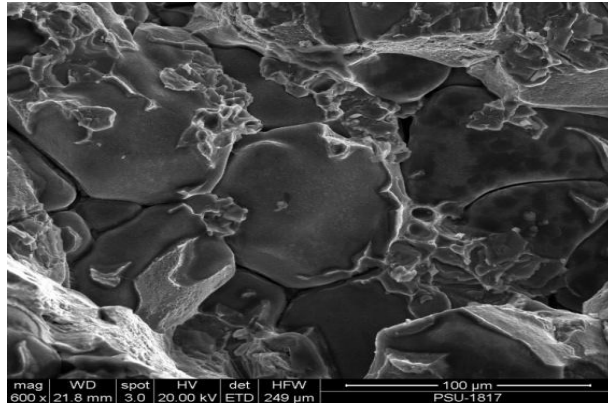
รูปที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของโลหะผสมอะลูมิเนียมทองแดง เกรด 2024 ที่แปรรูปโดยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ



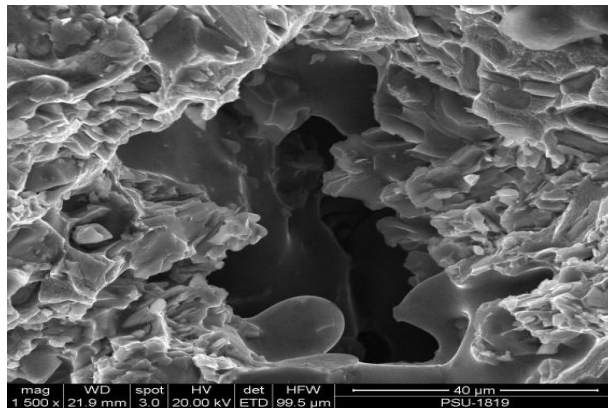
รูปที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า % Elongation ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง เกรด 2024 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6

จากการทดสอบสมบัติทางกลพบว่า โลหะผสมอะลูมิเนียม -ทองแดง เกรด 2024 ที่ทำการหล่ออัดขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สผ่านแท่งกราฟไฟต์แข็งพูนที่เวลา 30 วินาที และปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 จะมีสมบัติทางกลที่ดีที่สุด นั่นคือ มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ที่ 340 MPa และมีค่าความยืดตัว (% Elongation) ที่ 5.1%

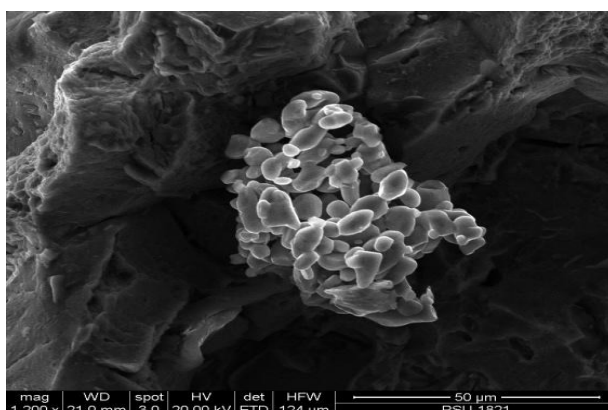
เมื่อนำชิ้นงานจากการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Tensile Test) ไปตรวจสอบวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเกรนมีลักษณะเป็นก้อนกลม บางบริเวณมีโพรงอากาศเกิดขึ้น และมีสิ่งปนเปื้อน (Inclusion) ที่ผิวหน้ารอยแตกซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3-3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่าเกรนของชิ้นงานทดสอบมีลักษณะเป็นก้อนกลม



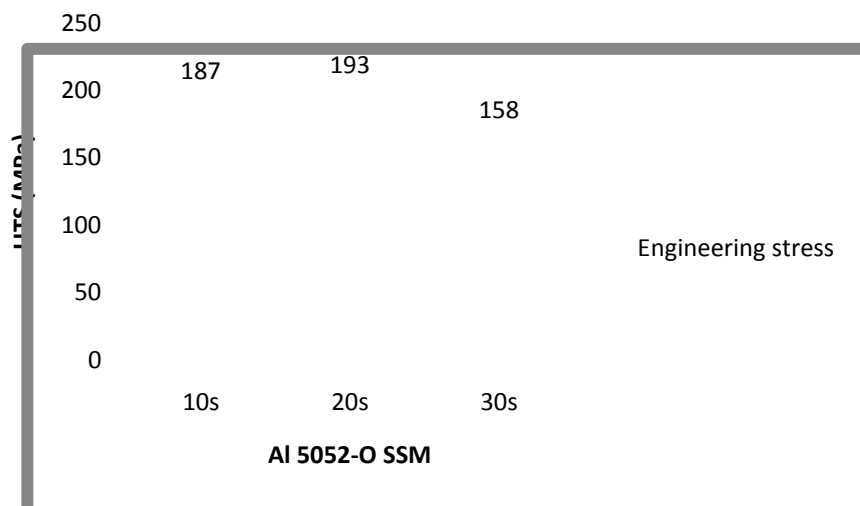
รูปที่ 3.4 แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่าบางบริเวณของชิ้นงานทดสอบเกิดโพรงอากาศ



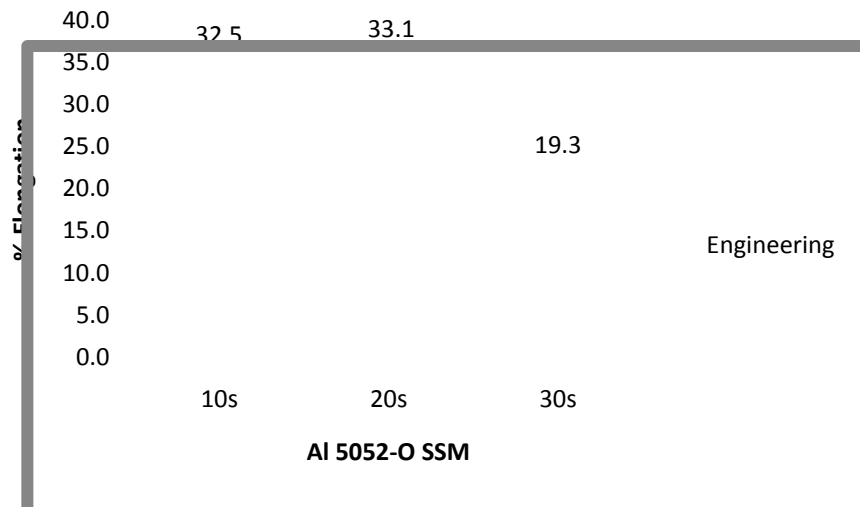
รูปที่ 3.5 แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่ามี Inclusion ที่ผิวหน้ารอยแตก

3.1.2 ผลการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสม-แมกนีเซียม เกรด 5052

จากการนำโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เกรด 5052 มาแปรรูปโดยทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็ง โดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สผ่านแท่งกราฟต์แข็งพูนที่เวลาต่างกันคือ 10 20 และ 30 วินาที มาปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ O โดยทำการบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 343°C เป็นเวลา 45 นาที แล้วจึงนำไปกลึงขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8 จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Tensile Test) โดยผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงได้แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 3.6 และ 3.7



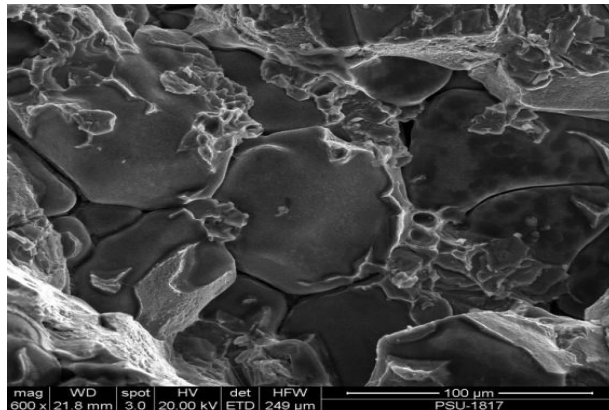
รูปที่ 3.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เกรด 5052 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในเวลากการปล่อยฟองแก๊ส 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ O



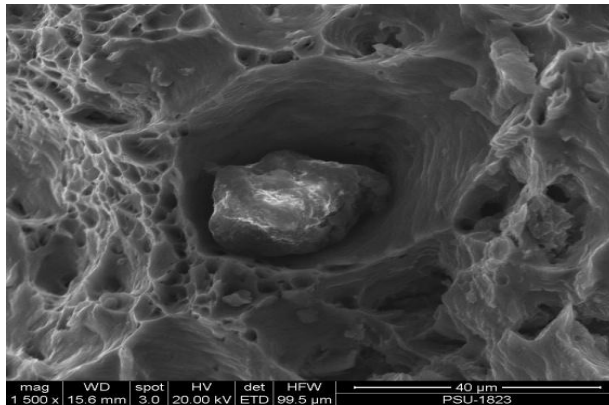
รูปที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบค่า % Elongation ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เกรด 5052 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในเวลากการปล่อยฟองแก๊ส 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ O

จากการทดสอบสมบัติ ทางกลพบว่า โลหะผสมอะลูมิเนียม -แมกนีเซียม เกรด 5052 ที่ทำการหล่ออัดขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สผ่านแท่งกราฟไฟต์แข็งพูนที่เวลา 20 วินาทีและปรับปรุงสมบัติ ทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ O จะมีสมบัติทางกลที่ดีที่สุด นั่นคือ มีค่าความต้านทานแรงดึง สูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ที่ 193 MPa และมีค่าความยืดตัว (% Elongation) ที่ 33.1%

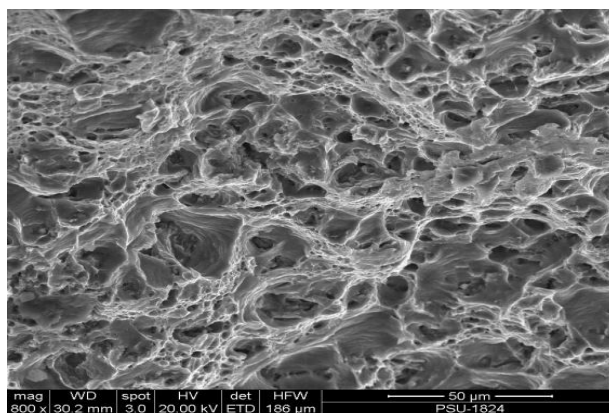
เมื่อนำชิ้นงานจากการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Tensile Test) ไปตรวจสอบวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเกรนมีลักษณะเป็นก้อนกลม และพบโพรงอากาศเกิดขึ้นในบางบริเวณ นอกจากนั้นยังพบสิ่งปนเปื้อน (Inclusion) ที่ผิวหน้ารอยแตกร่วมกับการแตกแบบผ่าเกรนซึ่งได้แสดงไว้ใน รูปที่ 3.7-3.9 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 5052 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่าเกรนของชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นบางฉีกเป็นรูพรongอากาศเกิดขึ้น



รูปที่ 3.9 แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 5052 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบมีสิ่งปนเปื้อน (inclusion) ที่ผิวหน้ารอยแตก



รูปที่ 3.10 แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 5052 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่าเกิดการแตกแบบผ่าเกรน

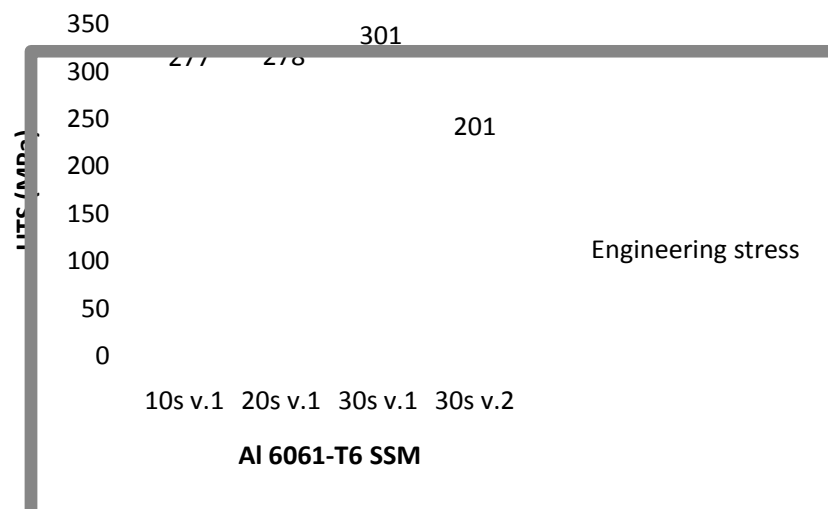
3.1.3 ผลการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสม-ซิลิกอน เกรด 6061

จากการนำโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน เกรด 6061 มาแปรรูปโดยทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สผ่านแท่งกราฟไฟต์แข็งพูนที่เวลาต่างกันคือ 10, 20 และ 30 วินาที มาปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ซึ่งมี 2 รูปแบบ คือ

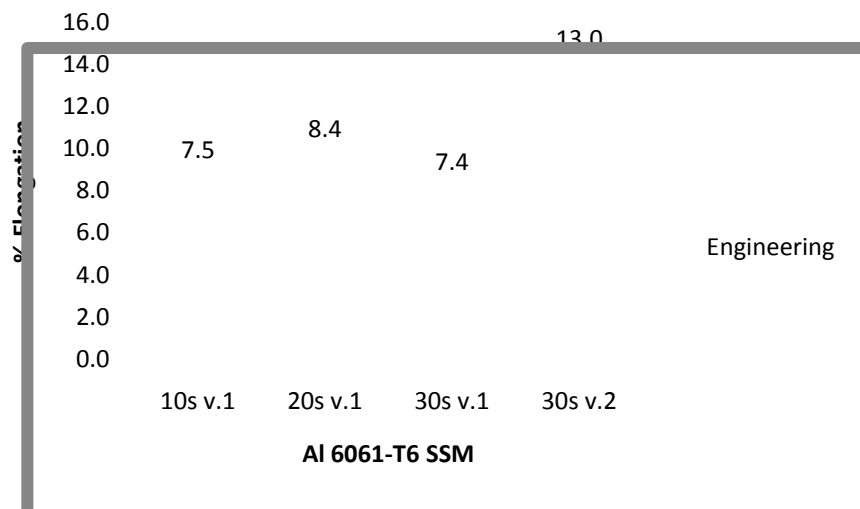
1) อบละลาย (Solution Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 527°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 177°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

2) อบละลาย (Solution Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quench) ในน้ำที่แข็งไว้ 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากนั้นจึงนำไปกลึงขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8 แล้วจึงนำชิ้นงานทดสอบที่ได้ไปทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Tensile Test) โดยผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงได้แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 3.11 และ 3.12



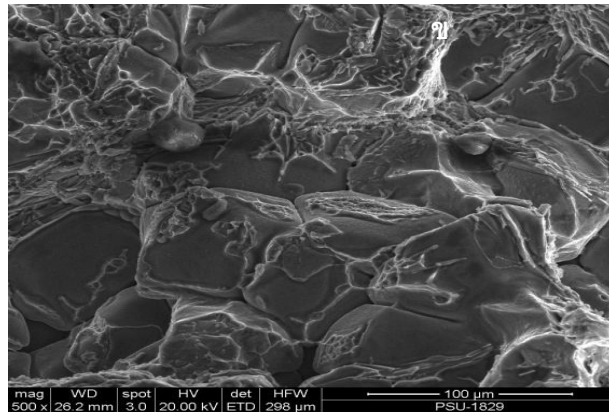
รูปที่ 3.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน เกรด 6061 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6



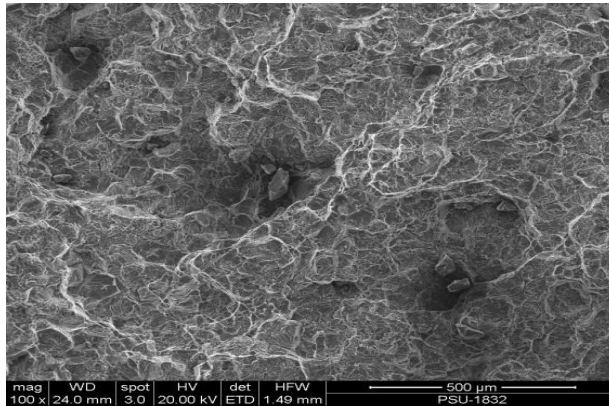
รูปที่ 3.12 แสดงการเปรียบเทียบค่า % Elongation ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน เกรด 6061 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในเวลากการปล่อยฟองแก๊ส 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6

จากการทดสอบสมบัติทางกลพบว่า โลหะผสมอะลูมิเนียม -แมกนีเซียม -ซิลิกอน เกรด 6061 ที่ทำการหล่ออัดขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สผ่านแท่งกราฟไฟต์แข็งพูนที่เวลา 30 วินาที และปรับปรุงสมบัติ ทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 รูปแบบที่ 1 จะมีสมบัติทางกลที่ดีที่สุด นั่นคือ มีค่าความต้านทานแรงดึง สูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ที่ 301 MPa และมีค่าความยืดตัว (% Elongation) ที่ 7.4%

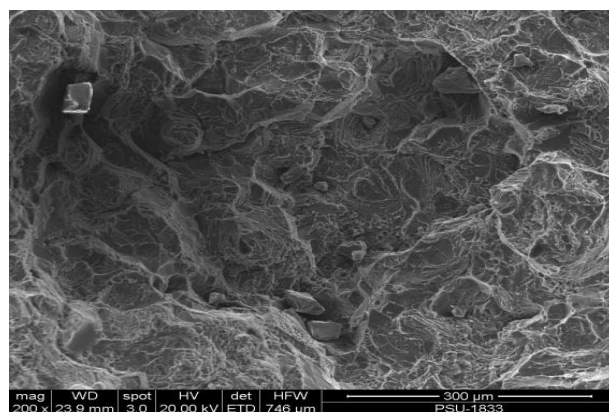
เมื่อนำชิ้นงานจากการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Tensile Test) ไปตรวจสอบวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเกรนมีลักษณะเป็นก้อนกลมและมี สิ่งปนเปื้อน (Inclusion) กระจายตัวที่ผิวหน้ารอยแตกซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.13-3.15 ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่าเกรนของชิ้นงานมีลักษณะเป็นก้อนกลม



รูปที่ 3.14 แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบมีสิ่งปนเปื้อน (Inclusion) กระจายตัวที่ผิวหน้ารอยแตก



รูปที่ 3.15 แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบมีสิ่งปนเปื้อน (Inclusion) ที่ผิวหน้ารอยแตก

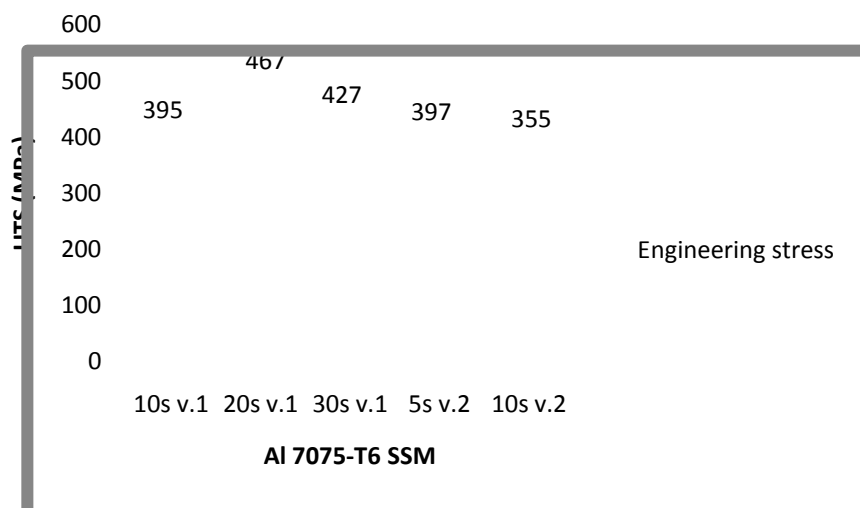
3.1.4 ผลการแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสม-สังกะสี เกรด 7075

จากการนำโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี เกรด 7075 มาแปรรูปโดยทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สผ่านแท่งกราฟต์แข็งพูนที่เวลาต่างกันคือ 5, 10, 20 และ 30 วินาที มาปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ซึ่งมี 2 รูปแบบ คือ

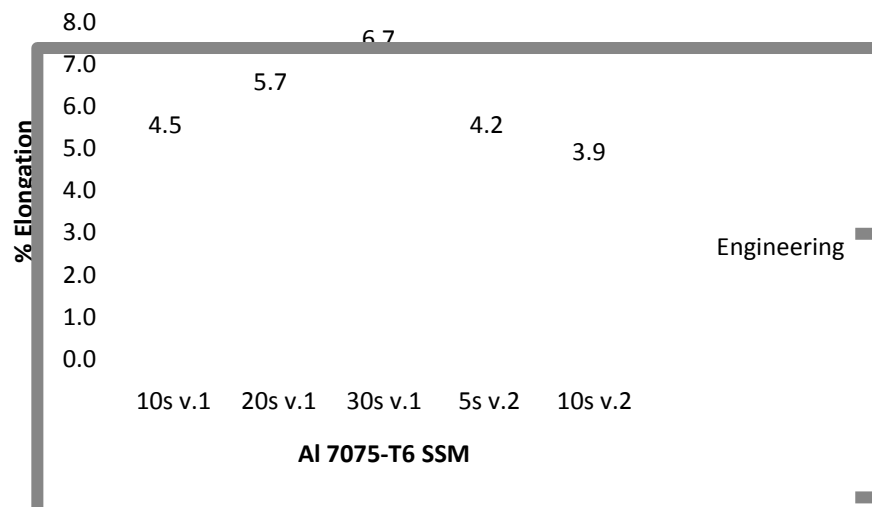
1) อบละลาย (Solution Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 480°C เป็นเวลา 17 ชั่วโมง และบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 34 ชั่วโมง

2) อบละลาย (Solution Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 480°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

จากนั้นจึงนำไปกลึงขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8 แล้วจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Tensile Test) โดยผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงได้แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 3.16 และ 3.17



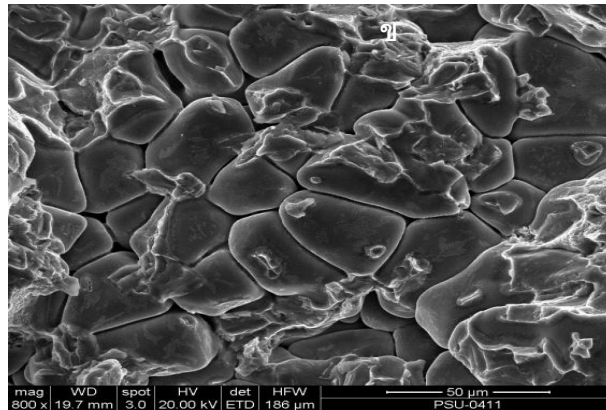
รูปที่ 3.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี เกรด 7075 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในเวลากการปล่อยฟองแก๊ส 5, 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6



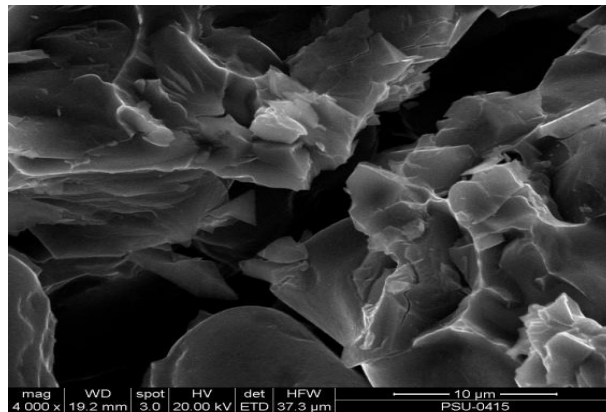
รูปที่ 3.17 แสดงการเปรียบเทียบค่า % Elongation ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี เกรด 7075 ที่แปรรูปโดยด้วยกระบวนการขึ้นรูปหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 5, 10, 20 และ 30 วินาที หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6

จากการทดสอบสมบัติ ทางกลพบว่า โลหะผสมอะลูมิเนียม -สังกะสี เกรด 7075 ที่ทำการหล่ออัดขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สผ่านแท่งกราไฟต์แข็งพูนที่เวลา 20 วินาที และปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 รูปแบบที่ 1 จะมีสมบัติทางกลที่ดีที่สุด นั่นคือ มีค่าความต้านทานแรงดึง สูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ที่ 467 MPa และมีค่าความยืดตัว (% Elongation) ที่ 5.7%

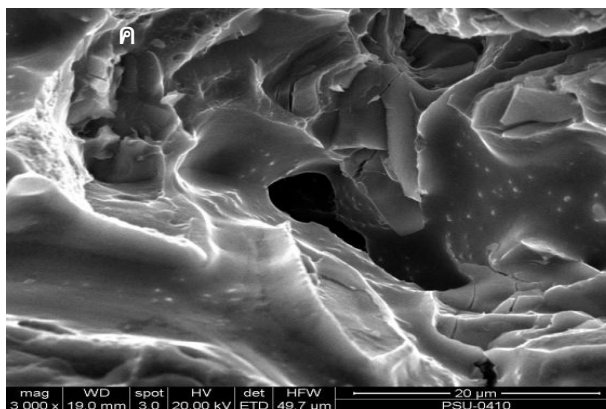
เมื่อนำชิ้นงานจากการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Tensile Test) ไปตรวจสอบวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเกรนมีลักษณะเป็นก้อนกลมและ มีโพรงอากาศเกิดขึ้น ที่ผิวหน้ารอยแตกซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.18-3.20 ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบว่าเกรนของชิ้นงานมีลักษณะเป็นก้อนกลม



รูปที่ 3.19 แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบมีโพรงอากาศที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้ารอยแตก



รูปที่ 3.20 แสดงผลการวิเคราะห์ผิวหน้ารอยแตกหักจากชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งพบมีโพรงอากาศที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้ารอยแตก

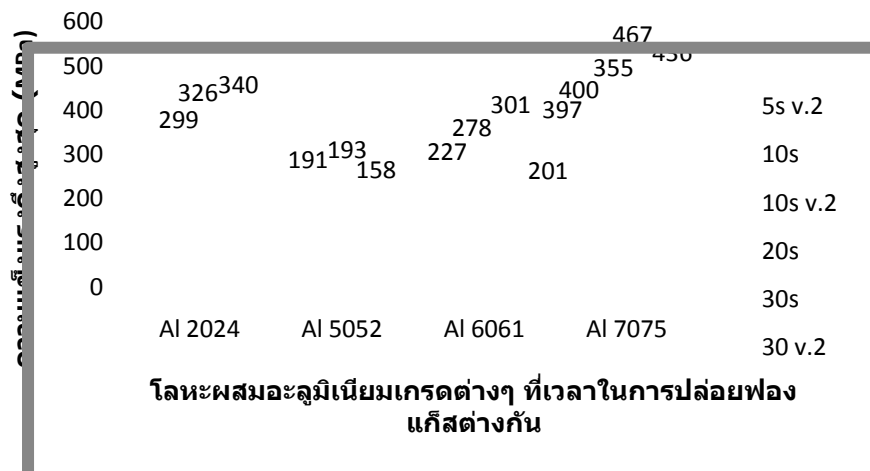
3.2 ผลการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม ในกลุ่มรีด ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน

ตารางที่ 3.1 แสดงผลของการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Tensile Test) รวมทั้งตัวแปรที่ใช้ในการหล่ออัดขึ้นรูปและ การปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075

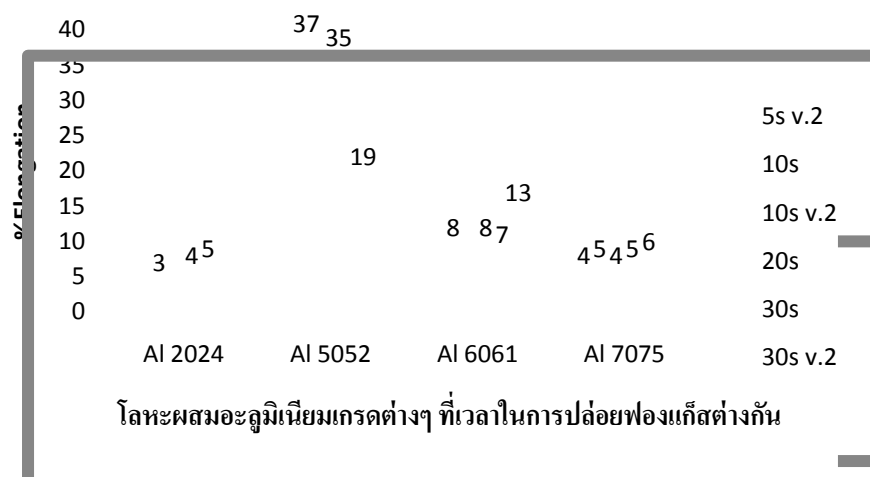
Alloy	GISS time (s)	Temper	UTS (MPa)	EI (%)
2024	10	T6 ¹	299	3
2024	20	T6 ¹	326	4
2024	30	T6 ¹	340	5
5052	10	O ²	191	37
5052	20	O ²	193	35
5052	30	O ²	158	19
6061	10	T6 ³	227	8
6061	20	T6 ³	278	8
6061	30	T6 ³	301	7
6061	30	T6 v.2 ⁴	201	13
7075	5	T6 v.2 ⁵	397	4
7075	10	T6 ⁶	400	5
7075	10	T6 v.2 ⁵	355	4
7075	20	T6 ⁶	467	5
7075	30	T6 ⁶	436	6

- T6¹ หมายถึง Solution Heat Treatment ที่ 495°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง และ Aging ที่ 165°C เป็นเวลา 17 ชั่วโมง
- O² หมายถึง Heat Treatment ที่ 343°C เป็นเวลา 45 นาที
- T6³ หมายถึง Solution Heat Treatment ที่ 527°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ Aging ที่ 177°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

- T6 v.2⁴ หมายถึง Solution Heat Treatment ที่ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง Quenching ในน้ำ 4 ชั่วโมง และ aging ที่ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- T6 v.2⁷ หมายถึง Solution Heat Treatment ที่ 480°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และ Aging ที่ 120°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
- T6⁶ หมายถึง Solution Heat Treatment ที่ 480°C เป็นเวลา 17 ชั่วโมง และ Aging ที่ 120°C เป็นเวลา 34 ชั่วโมง



รูปที่ 3.21 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 และเวลาในการปล่อยฟองแก๊สต่างกัน ที่ผ่านการหล่ออัดขึ้นรูปและปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน



รูปที่ 3.22 แสดงการเปรียบเทียบค่าความยืดตัว (% Elongation) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 และเวลาในการปล่อยฟองแก๊สต่างกัน ที่ผ่านการหล่ออัดขึ้นรูป และปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน

พบว่าโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี เกรด 7075 ที่ใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 20 วินาที จะมีค่าความต้านทานแรงดึง(Ultimate Tensile Strength) สูงที่สุด เมื่อเทียบกับโลหะผสมอะลูมิเนียมในเกรดเดียวกันและเกรดต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.21 และโลหะผสมอะลูมิเนียม - แมกนีเซียม เกรด 5052 ที่ใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 10 วินาที จะมีค่าความยืดตัว (% Elongation) สูงสุดเมื่อเทียบกับโลหะผสมอะลูมิเนียมในเกรดเดียวกันและเกรดต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.22 เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) สูงสุดที่ได้จากการหล่ออัดขึ้นรูปโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 และปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลอ้างอิงของแต่ละเกรดอ้างอิงจากงานวิจัยของ

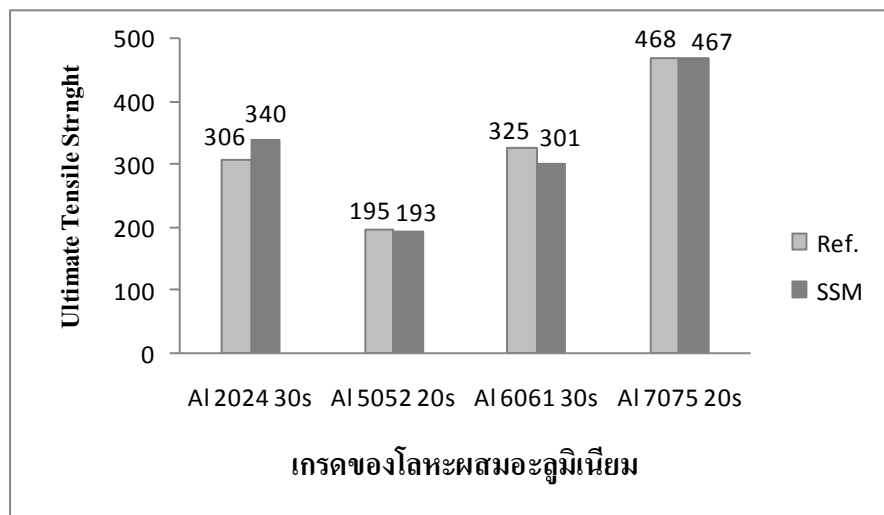
2024: GUO Hong-Min. *Solid state phenomena vols 141-143 (2008) pp 271-276*

5052: T.L. Tsai, P.L. Sun, P.W. Kao. *Materials Science and Engineering A342 (2003), 144-151*

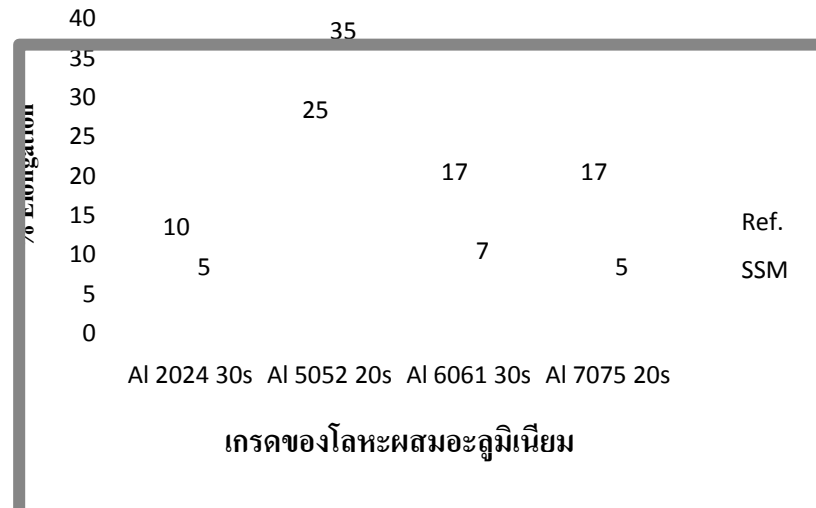
6061: F.Ozturk, A. Sisman, S.Toros, *Materials and design 31(2010) 972-975*

7075: J.Dong, J.Z.Cui.Q.C. Le, G.M.Lu. *Materials Science and Engineering A345 (2003), 234-242*

จากผลการทดสอบพบว่าโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง เกรด 2024 มีความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) มากกว่าข้อมูลอ้างอิง และโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรดที่เหลือ มีความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ต่ำกว่าข้อมูลอ้างอิงเล็กน้อยดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 และผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง



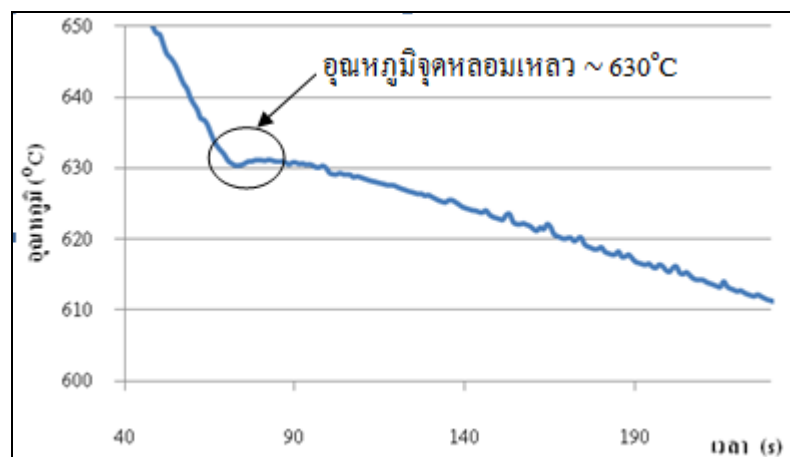
รูปที่ 3.24 แสดงค่าความยืดตัว (% Elongation) ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง

ผลการทดสอบจากการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) ของอะลูมิเนียมเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 ตามลำดับ ที่เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 5, 10, 20 และ 30 วินาทีตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.23 และรูปที่ 3.24 พบว่าอะลูมิเนียมกลุ่มรีดที่มีค่าความต้านทานแรงดึงที่มีค่าสูงสุดคือ อะลูมิเนียมกลุ่มรีดเกรด 7075 ที่เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 20 วินาทีเท่ากับ 467 MPa และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ 5% จากผลดังกล่าวทำให้กระบวนการเลือกอะลูมิเนียมกลุ่มรีดเพื่อใช้เป็นวัสดุเนื้อหลักในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมจึงเลือกอะลูมิเนียมกลุ่มรีดที่มีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงสุดเพื่อใช้ผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีคุณภาพสูงสุด ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงเลือกอะลูมิเนียมกลุ่มรีดเกรด 7075 เป็นวัสดุเนื้อหลักในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซัลฟิดคอนคาร์ไบด์เนื้อพูนเพื่อผลิตเป็นเกราะกันกระสุนในขั้นตอนต่อไป

3.3 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะที่เลือกใช้เป็นวัสดุเนื้อหลัก ในงานวิจัย

จากการทดสอบในขั้นตอนที่ผ่านมาทำให้สามารถเลือกวัสดุเนื้อหลักเพื่อใช้ในผลิตเกราะกันกระสุนเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์พูน โดยวัสดุเนื้อหลัก (Matrix) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คืออะลูมิเนียมผสมกลุ่มรีดเกรด 7075 จากผลการวิเคราะห์ทางความร้อนเส้นกราฟเย็นตัวของ (Cooling curve) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเกรด 7075 ภายในเบ้าสแตนเลสโดยที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ GISS พบว่าอุณหภูมิการเย็นตัวและเวลาที่เปลี่ยนไประหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะแสดงดังรูปที่ 3.25 พบว่าน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวจะเริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิของเหลว (Liquidus Temperature, T_L) โดยมีค่าประมาณ 630°C

จากข้อมูลที่ได้อจากการทดลอง ดังกล่าวทำให้สามารถประมาณช่วงเวลาในการปล่อยฟองแก๊สเพื่อเตรียมอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งโดยการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะ ในงานวิจัย ชั้นนี้จะเริ่มทำการปล่อยฟองแก๊สเหนือเส้นอุณหภูมิของเหลวประมาณ $8 - 10^{\circ}\text{C}$ จากกราฟเราสามารถเลือกอุณหภูมิ ในการเริ่มต้นเตรียมอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่ ประมาณ $638 - 640^{\circ}\text{C}$ เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นของการปล่อยฟองแก๊สหรือเริ่มสร้างเฟสของแข็งเริ่มต้น (Primary Solid Particle)



รูปที่ 3.25 แสดงเส้นกราฟการเย็นตัว (Cooling curve) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 เมื่อไม่ผ่านกระบวนการ GISS ที่นำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการวิจัย

3.4 ผลจากการศึกษาสัดส่วนของแข็งจากการหล่ออัดขึ้นรูปของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีดเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 ในสถานะกึ่งของแข็ง

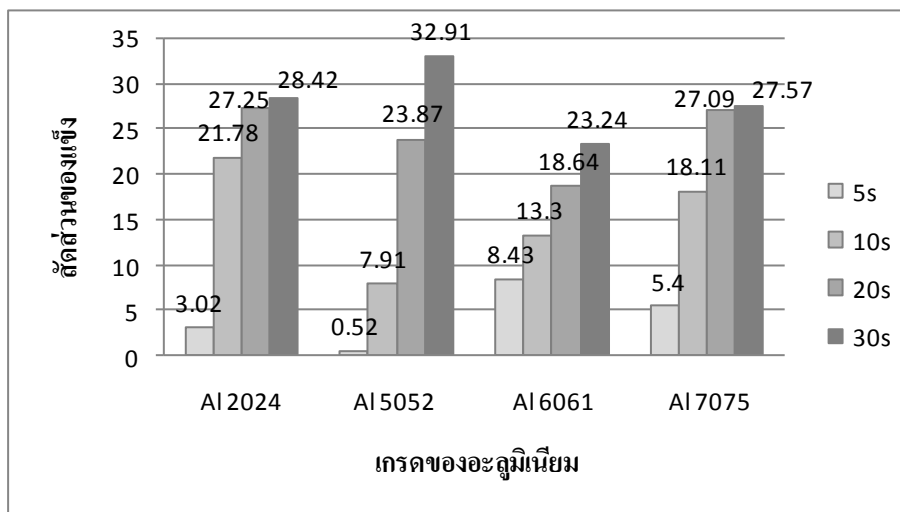
จากผลการทดลองหาปริมาณสัดส่วนแข็งเริ่มต้นของอะลูมิเนียมเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 ที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อใช้เป็นวัสดุเนื้อหลักในการผลิตวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม จะทำการปล่อยฟองแก๊สลงไปในน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่ตักจากเบ้าแกรไฟต์ปริมาณ 300 กรัม ในกระบวยตัก (Ladle) ที่ทำจากสแตนเลส จากนั้นใช้แม่พิมพ์ทองแดง (Copper Quenching Mold) ที่มีทางเข้าน้ำโลหะขนาด 1 มิลลิเมตร สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 และ 6061 และใช้แม่พิมพ์ทองแดง (Copper Quenching Mold) ที่มีทางเข้าน้ำโลหะขนาด 3 มิลลิเมตร สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 5052 และ 7075 และปั๊มสุญญากาศ เพื่อเก็บตัวอย่างของน้ำโลหะที่ปล่อยฟองแก๊สที่ระยะเวลาต่างกันคือ 5, 10, 20 และ 30 วินาที ตามลำดับ เมื่อได้ชิ้นงานตัวอย่างแล้วจึงนำไปตัดบริเวณตรงกลางดังรูปที่ 3.26 และถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณเฟสของแข็ง โดยจะส่องถ่ายภาพด้วยกล้อง Optical Microscope กำลังขยาย 50 เท่า จากนั้นทำการแต่งรูปด้วยโปรแกรม Photoshop เพื่อแต่งภาพให้เป็นสีขาว-ดำ โดยบริเวณสีขาวคืออนุภาคของแข็งและบริเวณสีดำ คือ ส่วนของของเหลว และนำรูปที่แต่งแล้วไปวิเคราะห์หาสัดส่วนของแข็งด้วยโปรแกรม Image Tool ตามลำดับ



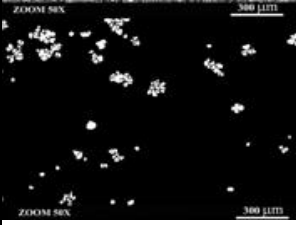
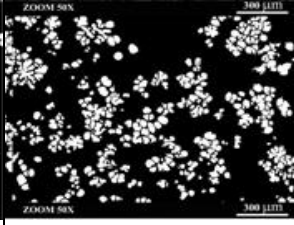
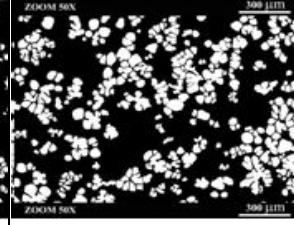
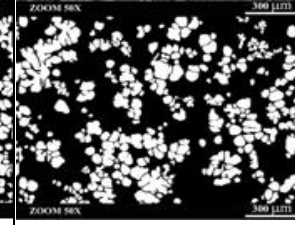
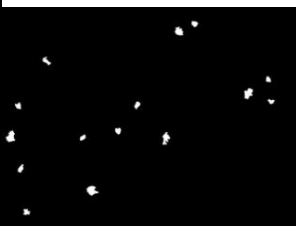

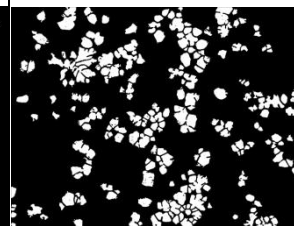
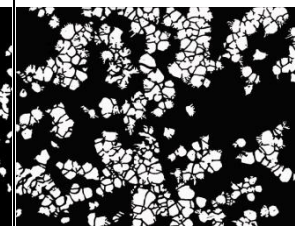
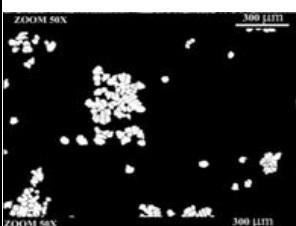
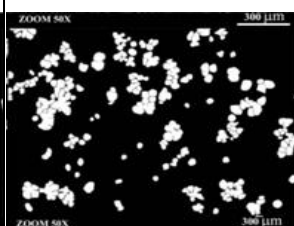
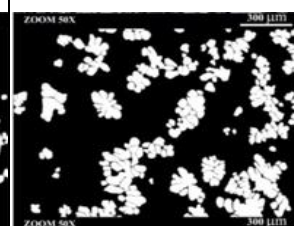
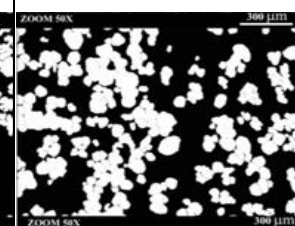

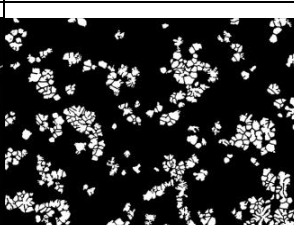
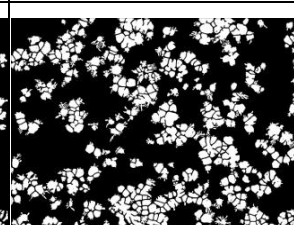
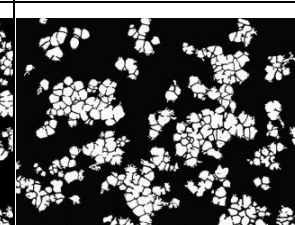
รูปที่ 3.26 แสดงชิ้นงานจากแม่พิมพ์ทองแดง และบริเวณตรงกลางที่นำไปวิเคราะห์หาสัดส่วนของของแข็ง

ตารางที่ 3.2 แสดงสัดส่วนของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีดเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 ที่เวลาการปล่อยฟองแก๊สต่างกัน

Alloy	Liquidus Temp. (°C)	GISS Times (s)			
		5	10	20	30
2024	638	3.02	21.78	27.25	28.42
5052	649	0.52	7.91	23.87	32.91
6061	652	8.43	13.3	18.64	23.24
7075	635	5.4	18.11	27.09	27.57



รูปที่ 3.2 แสดงกราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของ ของแข็ง ของโลหะผสมอะลูมิเนียมในกลุ่มรีด

Alloy	เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส (วินาที)			
	5	10	20	30
2024				
5052				
6061				
7075				

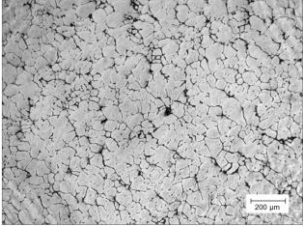
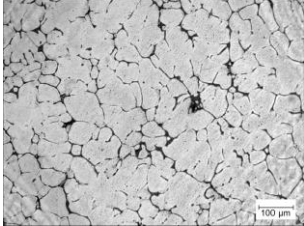
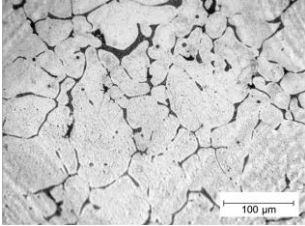
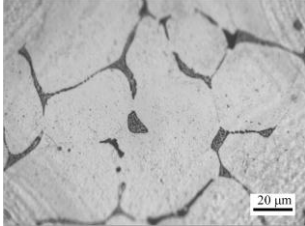
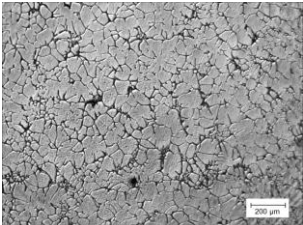
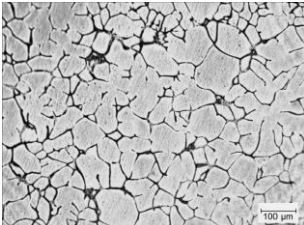
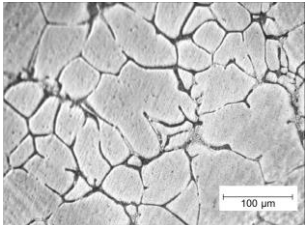
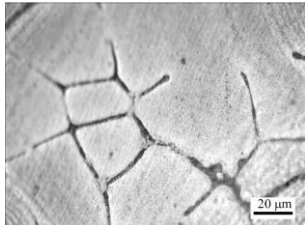
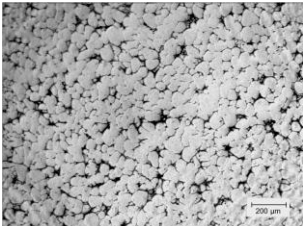
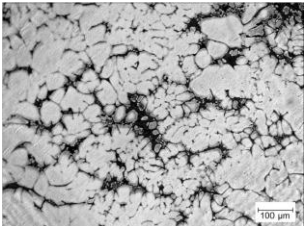
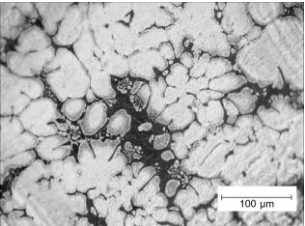
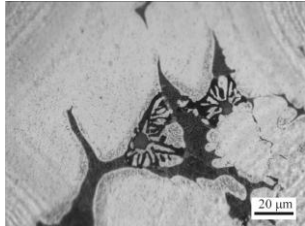
รูปที่ 3.28 แสดงตัวอย่างการหาสัดส่วนของของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075

จากผลการหาสัดส่วนของของแข็ง พบว่าสัดส่วนของของแข็ง จะแปรผันตรงกับเวลาในการปล่อยฟองแก๊ส นั่นคือ เมื่อเวลาในการปล่อยฟองแก๊สนานขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณเฟส ของแข็งเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีเวลาในการแข็งตัวเพิ่มขึ้นทำให้เดนไดรต์เกิดการฟอร์มตัว เป็นอนุภาคก้อนกลมและกระจายตัวในเนื้อชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง

3.5 ผลของโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการ แปรรูปโลหะผสมอะลูมิเนียม ในกลุ่มรีดเกรด 2024, 5052, 6061 และ 7075 ที่นำมาทำการหล่ออัดขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็ง และผ่านปรับปรุงสมบัติ ด้วยกระบวนการทางความร้อน

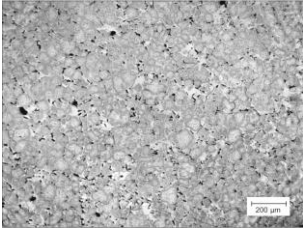
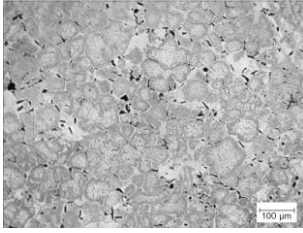
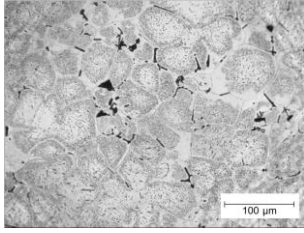
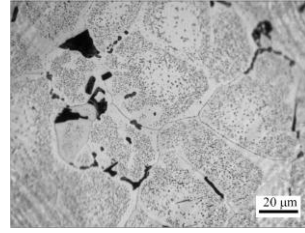
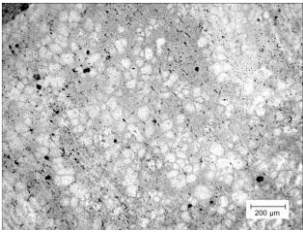
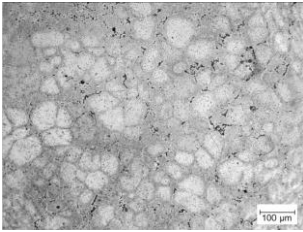
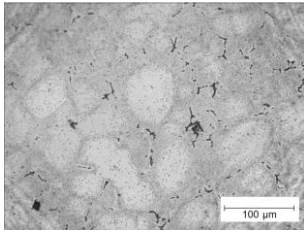
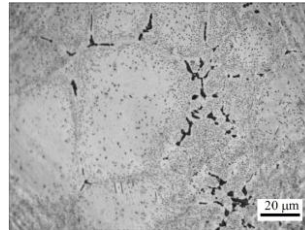
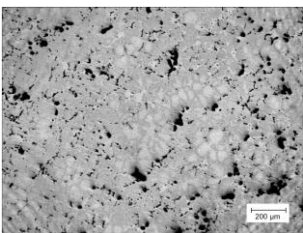
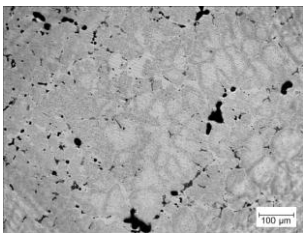
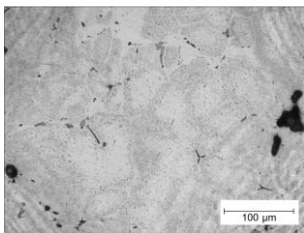
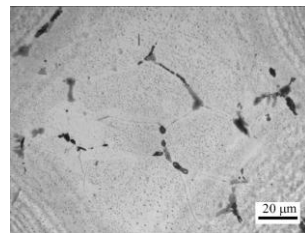
3.5.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง เกรด 2024

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมทองแดง เกรด 2024 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็ง ที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน

Al-2024 กำลังขยาย 50x	Al-2024 กำลังขยาย 100x	Al-2024 กำลังขยาย 200x	Al-2024 กำลังขยาย 500x
			
GISS: 10s	GISS: 10s	GISS: 10s	GISS: 10s
			
GISS: 20s	GISS: 20s	GISS: 20s	GISS: 20s
			
GISS: 30s	GISS: 30s	GISS: 30s	GISS: 30s

รูปที่ 3.29 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม-ทองแดงเกรด 2024 ที่ได้รับการปล่อยพอง แก๊สเป็นเวลา 10, 20 และ 30 วินาที เพื่อแปรรูปเป็นโลหะกึ่งของแข็ง โดยที่ชิ้นงาน ไม่ได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม - ทองแดงเกรด 2024 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็ง และได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยการอบละลาย (Solution heat treatment) ที่อุณหภูมิ 495°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง และบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 165°C เป็นเวลา 17 ชั่วโมง

Al-2024 กำลังขยาย 50x	Al-2024 กำลังขยาย 100x	Al-2024 กำลังขยาย 200x	Al-2024 กำลังขยาย 500x
 GISS: 10s	 GISS: 10s	 GISS: 10s	 GISS: 10s
 GISS: 20s	 GISS: 20s	 GISS: 20s	 GISS: 20s
 GISS: 30s	 GISS: 30s	 GISS: 30s	 GISS: 30s

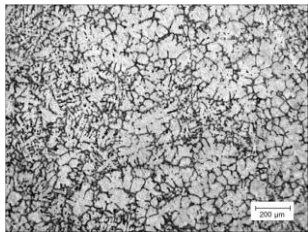
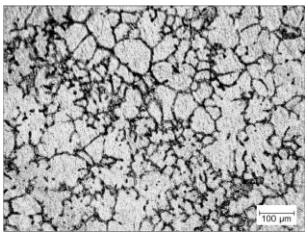
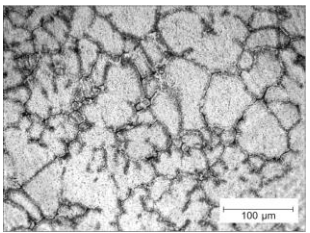
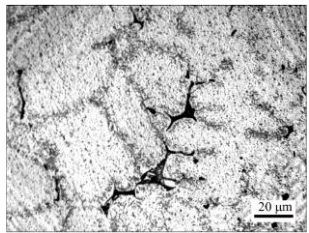
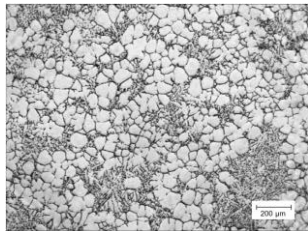
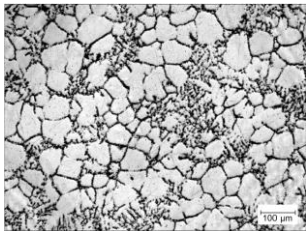
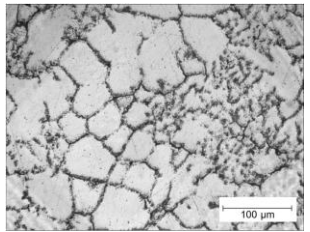
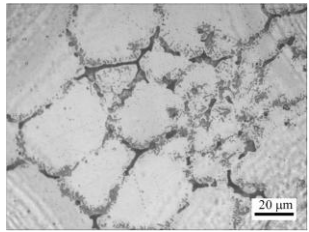
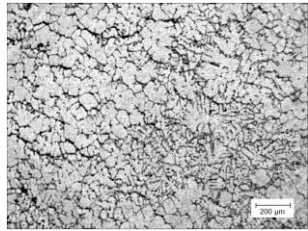
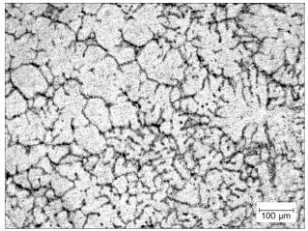
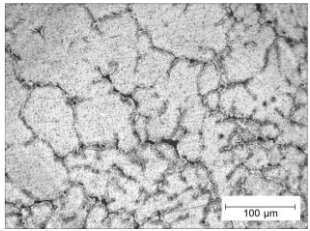
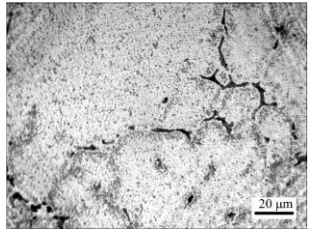
รูปที่ 3.30 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม-ทองแดงเกรด 2024 ที่ได้รับการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 10, 20 และ 30 วินาที เพื่อแปรรูปเป็นโลหะกึ่งของแข็ง โดยที่ชิ้นงานได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน

จากรูปที่ 3.30 โครงสร้างจุลภาคจะประกอบไปด้วยเฟส α คือ อะลูมิเนียม (พื้นที่สีขาว) และเฟส β คือ ยูเทคติก (พื้นที่สีเทา) หลังการทำ Heat Treatment เกรนมีลักษณะความกลมเพิ่มขึ้นแต่

ยังมีเดนไดรกระจายอยู่บ้างเล็กน้อย เกิด Precipitate ขึ้นที่บริเวณขอบเกรน และที่เวลาในการปล่อย ฟองแก๊ส 30 วินาที หลังการทำ Heat Treatment มีโพรงอากาศเกิดขึ้นมาก

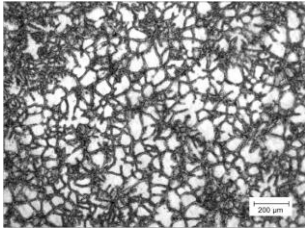
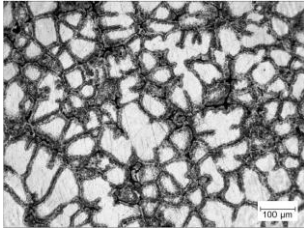
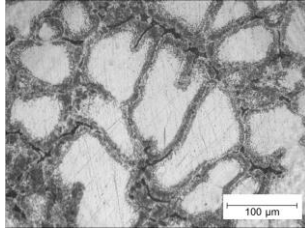
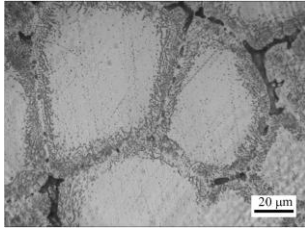
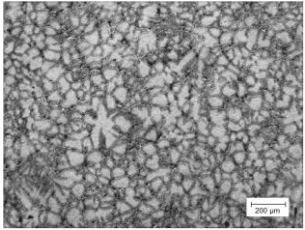
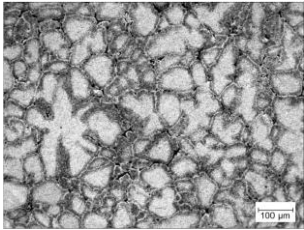
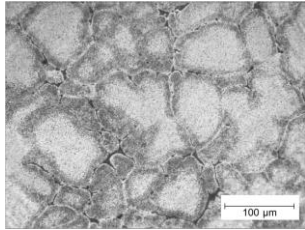
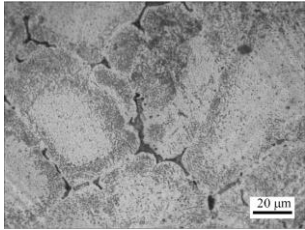
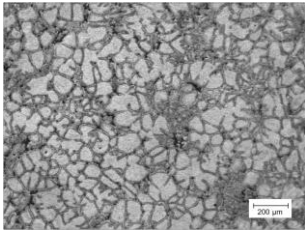
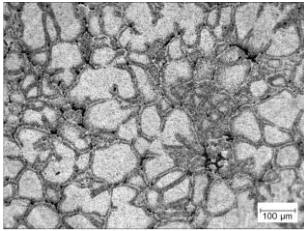
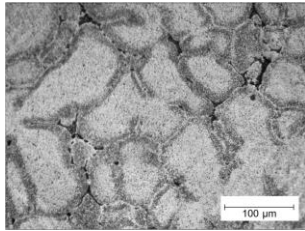
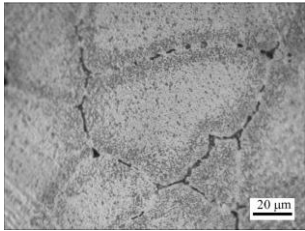
3.5.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เกรด 5052

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม -แมกนีเซียม เกรด 5052 ที่ขึ้นรูปด้วย กระบวนการหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็ง ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทาง ความร้อน ดังรูปที่ 3.30

AI-5052 กำลังขยาย 50x	AI-5052 กำลังขยาย 100x	AI-5052 กำลังขยาย 200x	AI-5052กำลังขยาย 500x
 GISS: 10s	 GISS: 10s	 GISS: 10s	 GISS: 10s
 GISS: 20s	 GISS: 20s	 GISS: 20s	 GISS: 20s
 GISS: 30s	 GISS: 30s	 GISS: 30s	 GISS: 30s

รูปที่ 3.31 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม-แมกนีเซียม เกรด 5052 ที่ได้รับการปล่อย ฟองแก๊สเป็นเวลา 10, 20 และ 30 วินาที เพื่อแปรรูปเป็นโลหะกึ่งของแข็ง โดยที่ชิ้นงาน ไม่ได้รับ การปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม -แมกนีเซียม เกรด 5052 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็ง และปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ O โดยการบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิ 343°C เป็นเวลา 45 นาที

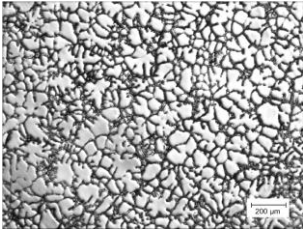
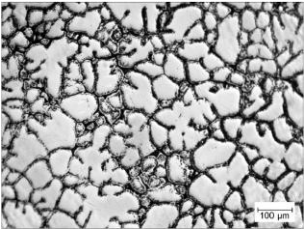
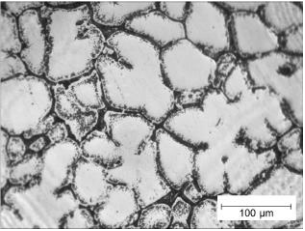
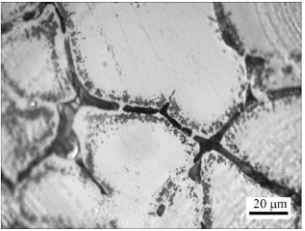
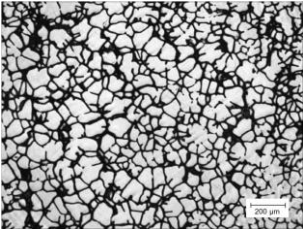
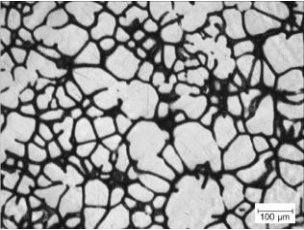
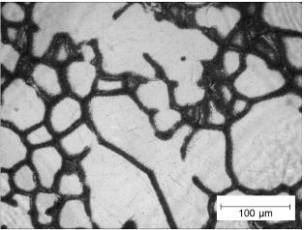
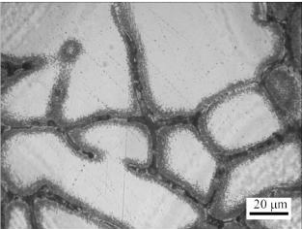
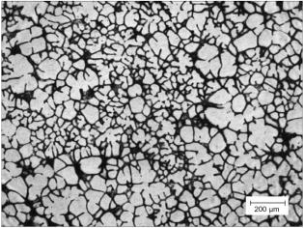
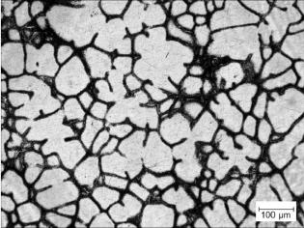
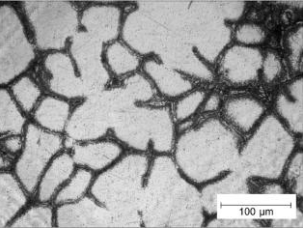
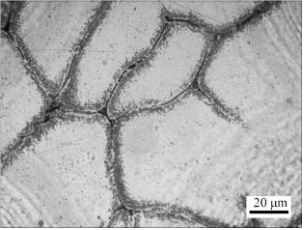
AI-5052 กำลังขยาย 50x	AI-5052 กำลังขยาย 100x	AI-5052 กำลังขยาย 200x	AI-5052 กำลังขยาย 500x
 GISS: 10s	 GISS: 10s	 GISS: 10s	 GISS: 10s
 GISS: 20s	 GISS: 20s	 GISS: 20s	 GISS: 20s
 GISS: 30s	 GISS: 30s	 GISS: 30s	 GISS: 30s

รูปที่ 3.32 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม-แมกนีเซียม เกรด 5052 ที่ได้รับการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 10, 20 และ 30 วินาที เพื่อแปรรูปเป็นโลหะกึ่งของแข็ง โดยที่ชิ้นงานได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน

จากรูปที่ 3.32 โครงสร้างจุลภาคจะประกอบไปด้วยเฟสของ α คือ อะลูมิเนียม (พื้นที่สีขาว) และเฟส β คือยูเทคติก (พื้นที่สีเทา) หลังการทำ Heat Treatment เกรนมีลักษณะความกลมเพิ่มขึ้นแต่ยังมีเดนไดรกระจายอยู่บ้างเล็กน้อย และเกิด Precipitate ขึ้นที่บริเวณขอบเกรน

3.5.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน เกรด 6061

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม -แมกนีเซียม -ซิลิกอน เกรด 6061 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็ง ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนดังรูปที่ 3.33

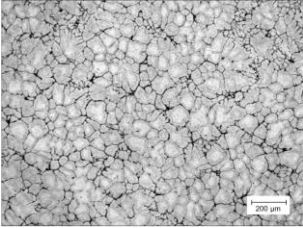
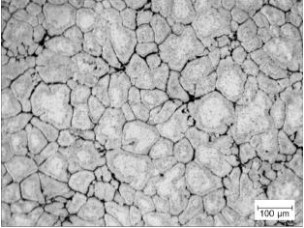
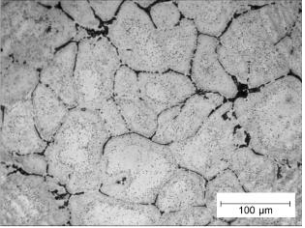
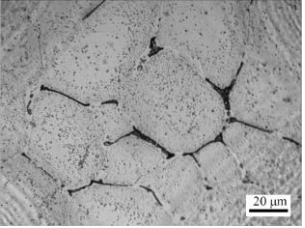
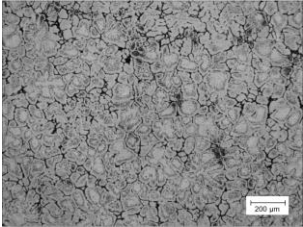
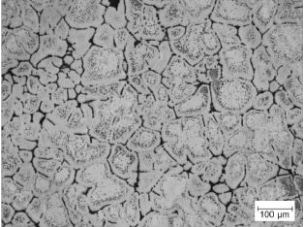
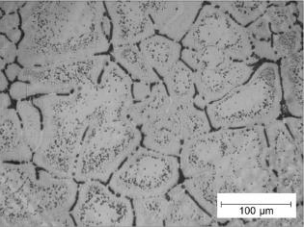
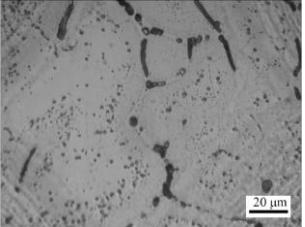
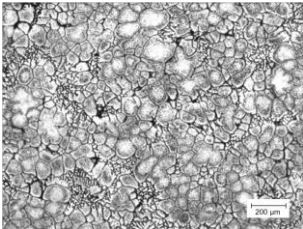
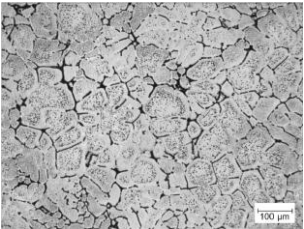
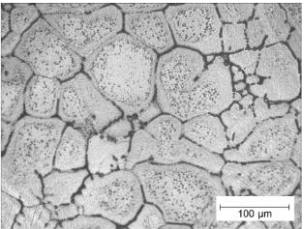
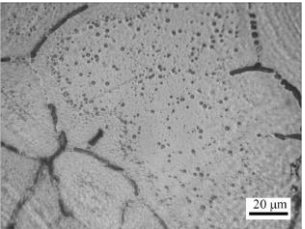
Al-6061 กำลังขยาย 50x	Al-6061 กำลังขยาย 100x	Al-6061 กำลังขยาย 200x	Al-6061 กำลังขยาย 500x
 GISS: 10s	 GISS: 10s	 GISS: 10s	 GISS: 10s
 GISS: 20s	 GISS: 20s	 GISS: 20s	 GISS: 20s
 GISS: 30s	 GISS: 30s	 GISS: 30s	 GISS: 30s

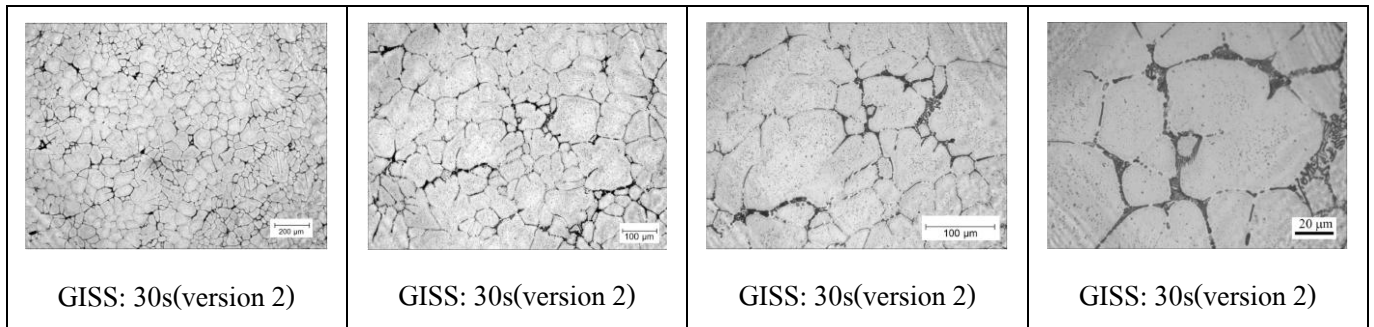
รูปที่ 3.33 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิกอน เกรด 6061 ที่ได้รับการปล่อย
 พองแก๊สเป็นเวลา 10, 20 และ 30 วินาที โดยที่ชิ้นงานไม่ได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วย
 กระบวนการทางความร้อน

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอนเกรด 6061 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็ง และปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ซึ่งมี 2 รูปแบบ คือ

1) อบละลาย (Solution Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 527°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 177°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

2) อบละลาย (Solution Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quench) ในน้ำที่ 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

Al-6061 กำลังขยาย 50x	Al-6061 กำลังขยาย 100x	Al-6061 กำลังขยาย 200x	Al-6061 กำลังขยาย 500x
 GISS: 10s	 GISS: 10s	 GISS: 10s	 GISS: 10s
 GISS: 20s	 GISS: 20s	 GISS: 20s	 GISS: 20s
 GISS: 30s(version 1)	 GISS: 30s(version 1)	 GISS: 30s(version 1)	 GISS: 30s(version 1)

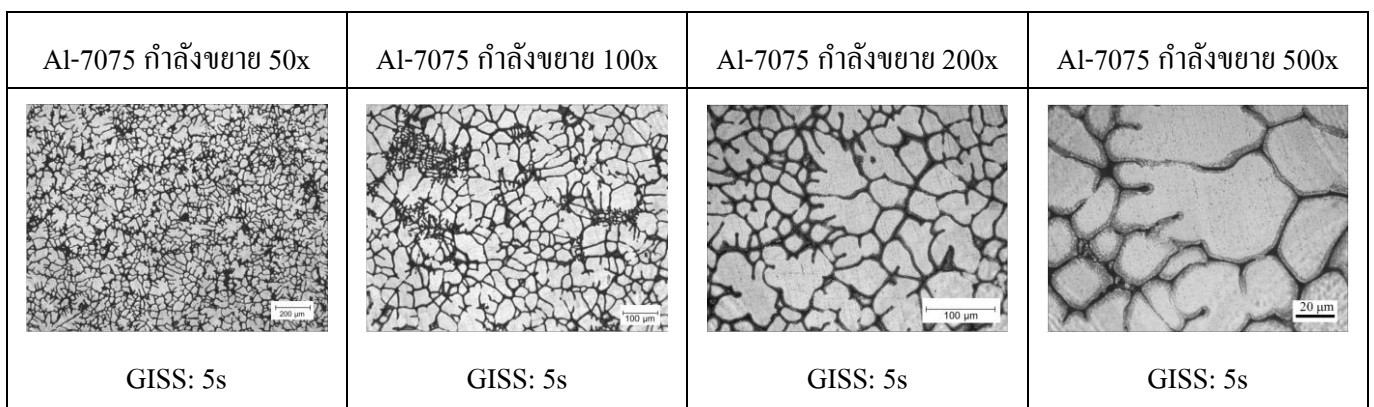


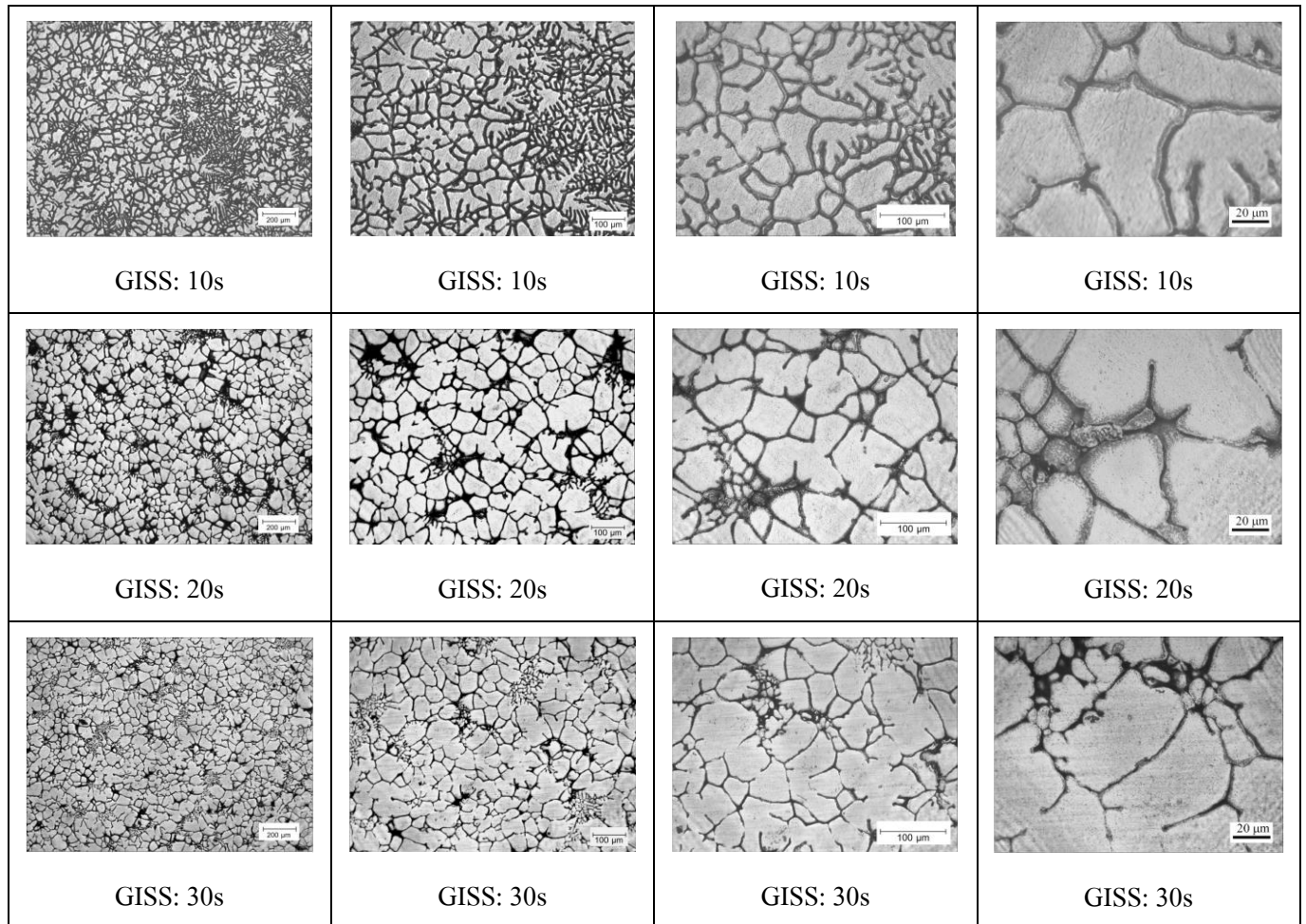
รูปที่ 3.34 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน เกรด 6061 ที่ได้รับการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 10, 20 และ 30 วินาที โดยที่ชิ้นงานได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน

จากรูปที่ 3.34 โครงสร้างจุลภาคจะประกอบไปด้วยเฟสของ α คือ อะลูมิเนียม (พื้นที่สีขาว) และเฟส β คือยูเทคติก (พื้นที่สีเทา) หลังการทำ Heat Treatment พบว่าเกิด Precipitate ขึ้นที่บริเวณขอบเกรน

3.5.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี เกรด 7075

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม -สังกะสี เกรด 7075 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็ง ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน ดังรูปที่ 3.35

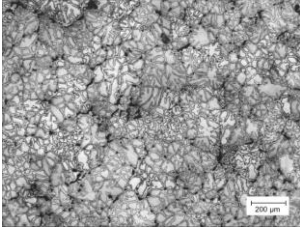
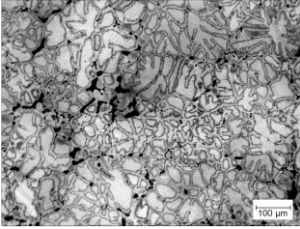
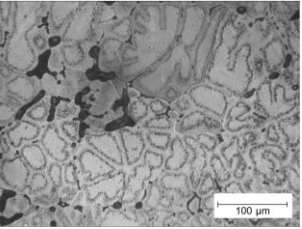
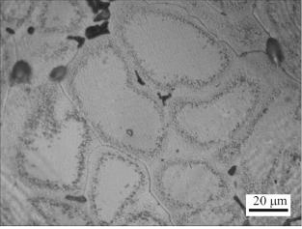
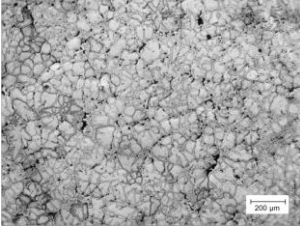
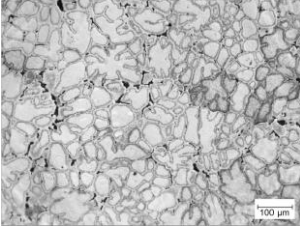
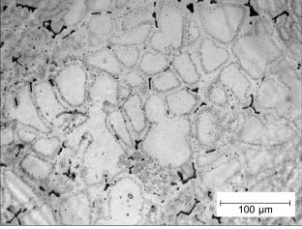
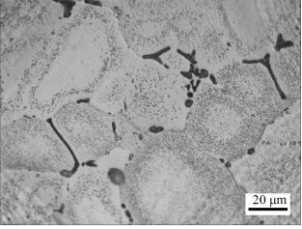
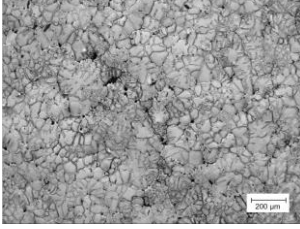
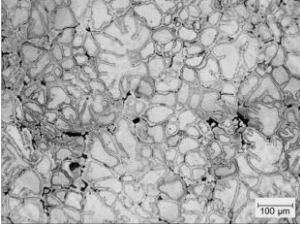
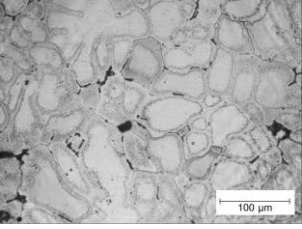
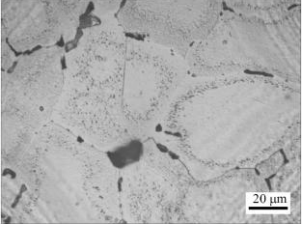
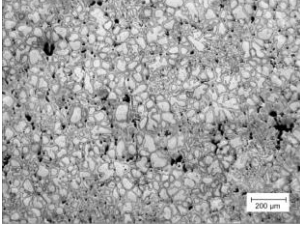
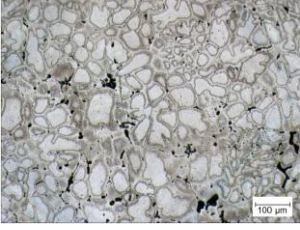
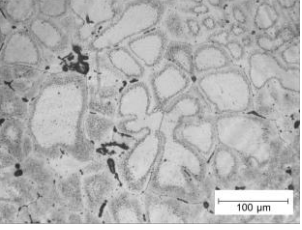
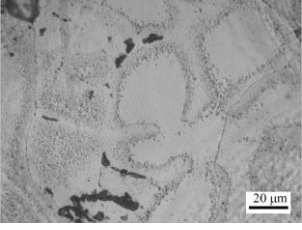
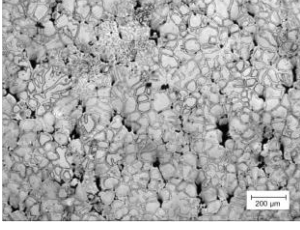
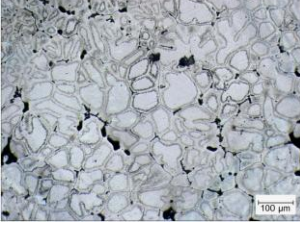
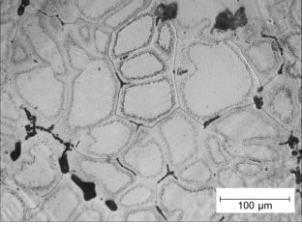
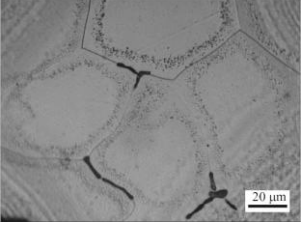




รูปที่ 3.35 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม-สังกะสี เกรด 7075 ที่ได้รับการปล่อยฟองแก๊สเป็นเวลา 5, 10, 20 และ 30 วินาที โดยที่ชิ้นงานไม่ได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม -สังกะสี เกรด 7075 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็ง และปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ซึ่งมี 2 รูปแบบ คือ

- 1) อบละลาย (Solution Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 480°C เป็นเวลา 17 ชั่วโมง และบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 34 ชั่วโมง
- 2) อบละลาย (Solution Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 480°C เป็นเวลา 17 ชั่วโมง และบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

Al-7075 กำลังขยาย 50x	Al-7075 กำลังขยาย 100x	Al-7075 กำลังขยาย 200x	Al-7075กำลังขยาย 500x
 <p data-bbox="293 663 394 696">GISS: 5s</p>	 <p data-bbox="636 663 737 696">GISS: 5s</p>	 <p data-bbox="979 663 1080 696">GISS: 5s</p>	 <p data-bbox="1323 663 1423 696">GISS: 5s</p>
 <p data-bbox="225 987 466 1021">GISS: 10s(version 1)</p>	 <p data-bbox="568 987 809 1021">GISS: 10s(version 1)</p>	 <p data-bbox="911 987 1152 1021">GISS: 10s(version 1)</p>	 <p data-bbox="1254 987 1495 1021">GISS: 10s(version 1)</p>
 <p data-bbox="225 1312 466 1346">GISS: 10s(version 2)</p>	 <p data-bbox="568 1312 809 1346">GISS: 10s(version 2)</p>	 <p data-bbox="911 1312 1152 1346">GISS: 10s(version 2)</p>	 <p data-bbox="1254 1312 1495 1346">GISS: 10s(version 2)</p>
 <p data-bbox="284 1637 405 1671">GISS: 20s</p>	 <p data-bbox="630 1637 751 1671">GISS: 20s</p>	 <p data-bbox="979 1637 1101 1671">GISS: 20s</p>	 <p data-bbox="1313 1637 1436 1671">GISS: 20s</p>
 <p data-bbox="284 1962 405 1995">GISS: 30s</p>	 <p data-bbox="630 1962 751 1995">GISS: 30s</p>	 <p data-bbox="979 1962 1101 1995">GISS: 30s</p>	 <p data-bbox="1313 1962 1436 1995">GISS: 30s</p>

รูปที่ 3.36 แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม-สังกะสี เกรด 7075 ที่ได้รับการปล่อยฟอง แก๊สเป็นเวลา 5, 10, 20 และ 30 วินาที โดยที่ชิ้นงานได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วย กระบวนการทางความร้อน

จากรูปที่ 3.36 โครงสร้างจุลภาคจะประกอบไปด้วยเฟสของ α คือ อะลูมิเนียม (พื้นที่ สีขาว) และเฟส β คือยูเทคติก (พื้นที่สีเทา) หลังการทำ Heat Treatment เกิด Precipitate ขึ้นที่ บริเวณขอบเกรน และมีโพรงอากาศกระจายอยู่ในโครงสร้าง

3.6 การปรับปรุงแม่พิมพ์สำหรับการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุน

งานวิจัยชิ้นนี้ในช่วงต้น ได้พบปัญหาเรื่องการแตกร้าวของชิ้นงานเนื่องจากการใช้แม่พิมพ์ ที่ออกแบบและสั่งทำ ไม่สามารถขึ้นรูปแผ่นเกราะกันกระสุนจากเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วย ซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องด้วยชิ้นงานเกราะกันกระสุนเกิดรอยแตกร้าว หลังการขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 3.37 ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างของปริมาณเนื้ออะลูมิเนียม ด้านบนและด้านล่างที่อยู่ระหว่างตัวเสริมแรง ทำให้เกิดแรงดึงที่แตกต่างกันมากในระหว่างการ เย็นตัวของชิ้นเกราะ ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ทำการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการปรับปรุงแม่พิมพ์ โดยการเพิ่มเนื้อที่ส่วนล่างของแม่พิมพ์ด้วยการก่อร่องแม่พิมพ์ส่งผลให้ปริมาณเนื้ออะลูมิเนียม ด้านล่างเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดความสมดุลของแรงดึงทั้งสองด้าน ชิ้นงานเกราะกันกระสุนที่ได้จึง สมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.37 แสดงรูปชิ้นงานเกราะกันกระสุนที่เกิดรอยแตกร้าวหลังจากการขึ้นรูป



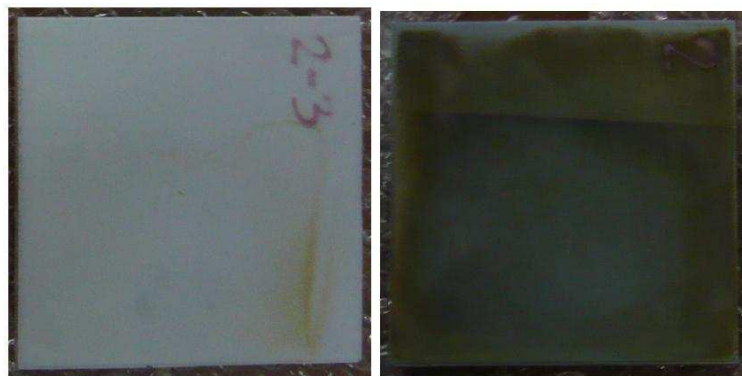
รูปที่ 3.38 แสดงรูปชิ้นงานเกราะกันกระสุนหลังจากได้รับการปรับปรุงแม่พิมพ์

3.7 ผลการผลิตแผ่นวัสดุเสริมแรงชนิดซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน

จากการขึ้นรูปแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนตามการออกแบบการทดลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ทำให้ได้ชิ้นงานที่ได้มีสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 3.3

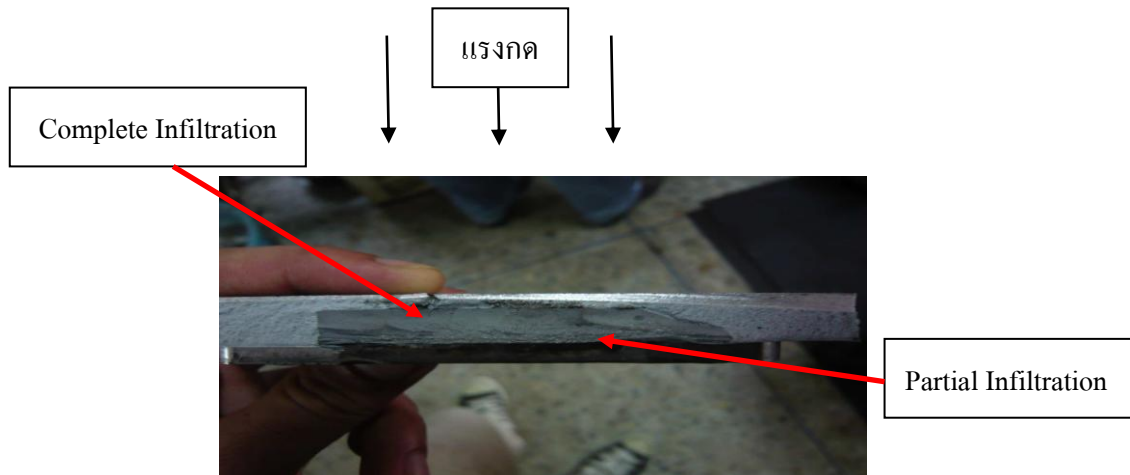
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density), ค่าความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density), ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวหลังเผา และค่าเปอร์เซ็นต์รูพรุนของชิ้นงานหลังเผาของแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์พรุน

Grade	%expansion	ρ_A (g/cc)	ρ_B (g/cc)	%porosity
Mix 2	2.51	2.99-3.05	1.70-1.83	39-44
Mix2+5%PCS	2.02	3.10-3.17	1.73-1.76	43-45



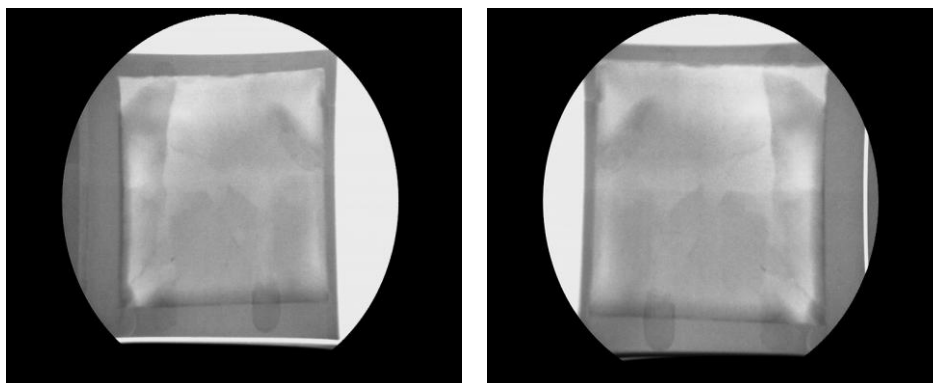
รูปที่ 3.39 แสดงลักษณะของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนหลังการเผาเชื่อม ชนิด Oxidation bonding (ซ้าย) และ ชนิด Reaction bonding (ขวา)

จากนั้นนำแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนมาทดลองผลิตเป็นเกราะกันกระสุนด้วยกรรมวิธีหล่ออัดขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งโดยใช้อะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 เป็นเนื้อหลัก จากรูปที่ 3.40 จะสังเกตเห็นการแทรกซึม (infiltrate) ของอะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน บริเวณด้านบนที่สัมผัสกับแรงกดจะมีการเติมเต็มของอะลูมิเนียมที่ดีกว่าบริเวณที่อยู่ด้านล่าง แสดงว่าอะลูมิเนียมหลอมเหลวนั้นเกิดการแข็งตัวก่อนที่ไหลถึงด้านล่าง จึงแก้ไขโดยการเผาแผ่นเสริมแรง (Perform) ก่อนการหล่ออัด ที่อุณหภูมิ 760°C นาน 10 นาที และมีการทำ Carbon Coat ที่ผิวแม่พิมพ์เพื่อช่วยในการป้องกันการติดกันที่ผิวชิ้นงาน และผิวของแม่พิมพ์ ส่งผลช่วยให้แกะชิ้นงานได้ง่ายขึ้น จากกรณีกฎดังกล่าว ทำให้หล่ออัด (Infiltration) ชิ้นงานเกราะได้ง่ายขึ้น แต่ก็เป็นเพียงชิ้นงาน Reaction Bonding ที่สามารถผลิตเป็นชิ้นงานเกราะได้ ส่วนชิ้นงานกลุ่ม Oxidation Bonding ไม่สามารถทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเกราะกันกระสุนโดยกรรมวิธีการหล่ออัด (Infiltration) ได้



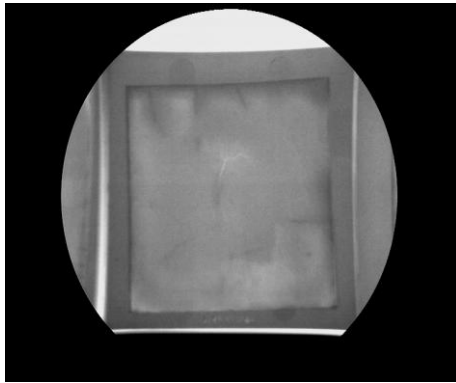
รูปที่ 3.40 แสดงแผ่นเกราะกันกระหลังจากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Infiltration)

ผลการตรวจสอบลักษณะภายในด้วยเทคนิค X-ray ของกลุ่มชิ้นงาน Oxidation Bonding

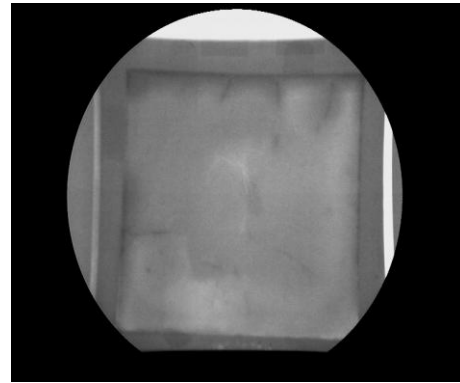


ชิ้นงาน 2-1 ด้านบน ชิ้นงาน

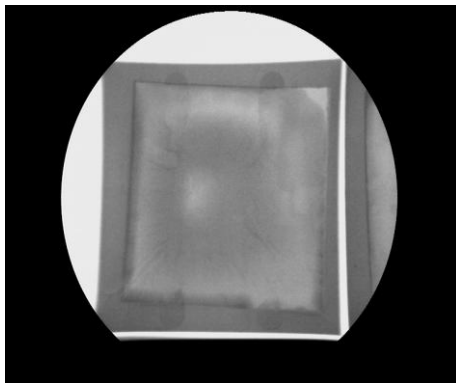
2-1 ด้านล่าง



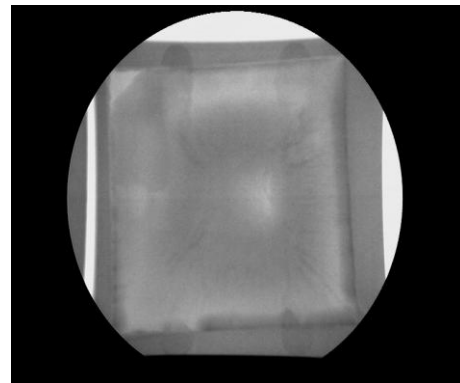
ชั้นงาน 2-2 ด้านบน ชั้นงาน



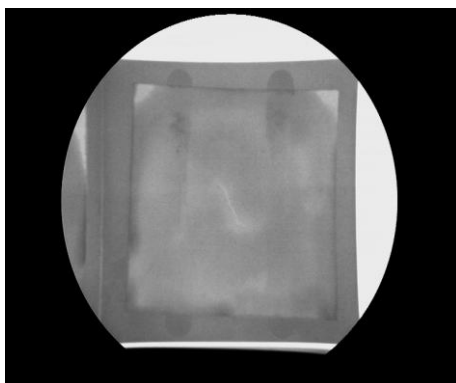
2-2 ด้านล่าง



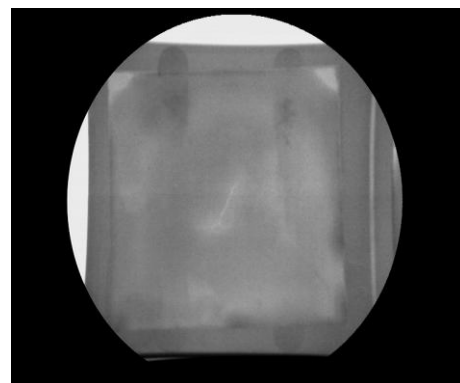
ชั้นงาน 2-3 ด้านบน ชั้นงาน



2-3 ด้านล่าง



ชั้นงาน 2-4 ด้านบน ชั้นงาน

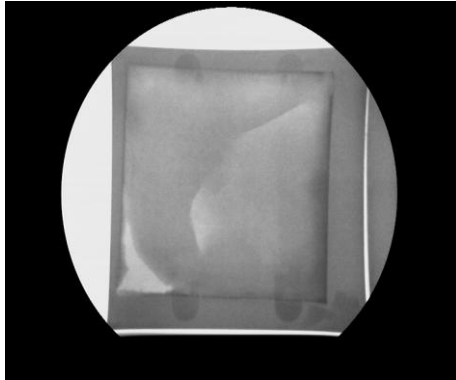


2-4 ด้านล่าง

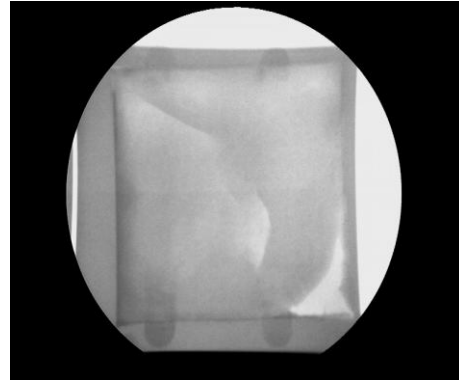
รูปที่ 3.41 แสดงผลการตรวจสอบลักษณะภายในด้วยเทคนิค X-ray ของกลุ่มชั้นงาน

Oxidation Bonding

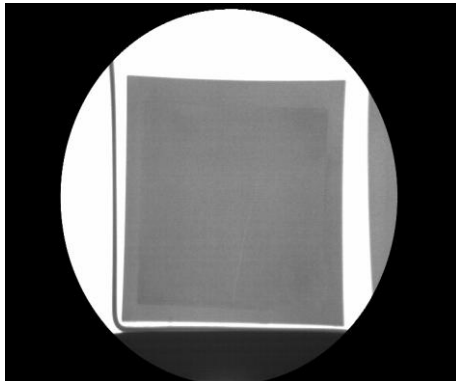
ผลการตรวจสอบลักษณะภายในด้วยเทคนิค X-ray ของกลุ่มชิ้นงาน Reaction Bonding



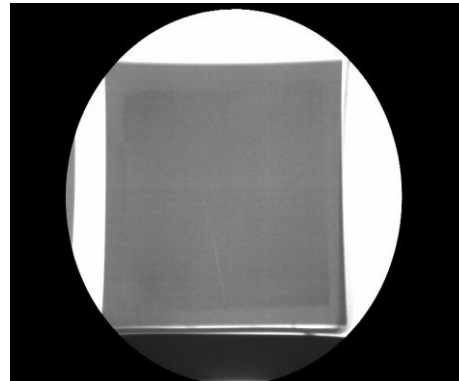
ชิ้นงาน PCS-1 ด้านบน ชิ้นงาน



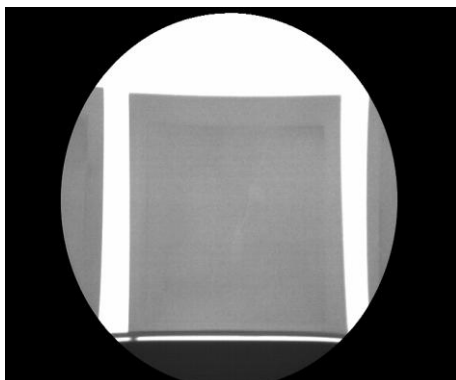
PCS-1 ด้านล่าง



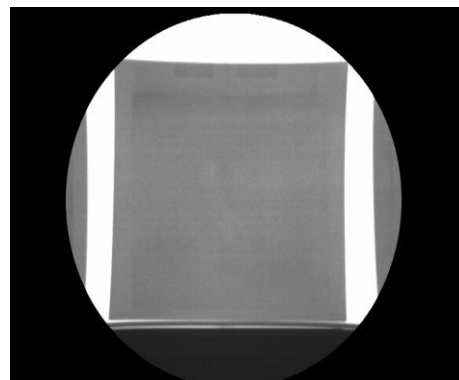
ชิ้นงาน PCS-2 ด้านบน ชิ้นงาน



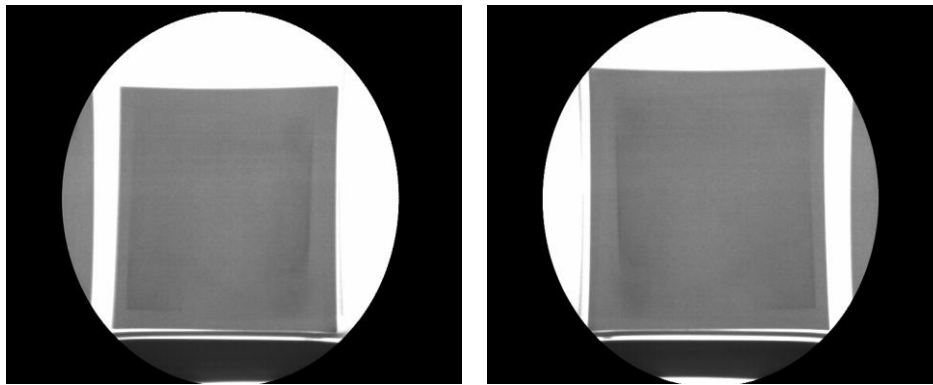
PCS-2 ด้านล่าง



ชิ้นงาน PCS-3 ด้านบน ชิ้นงาน



PCS-3 ด้านล่าง



ชั้นงาน PCS-4 ด้านบน ชั้นงาน

PCS-4 ด้านล่าง

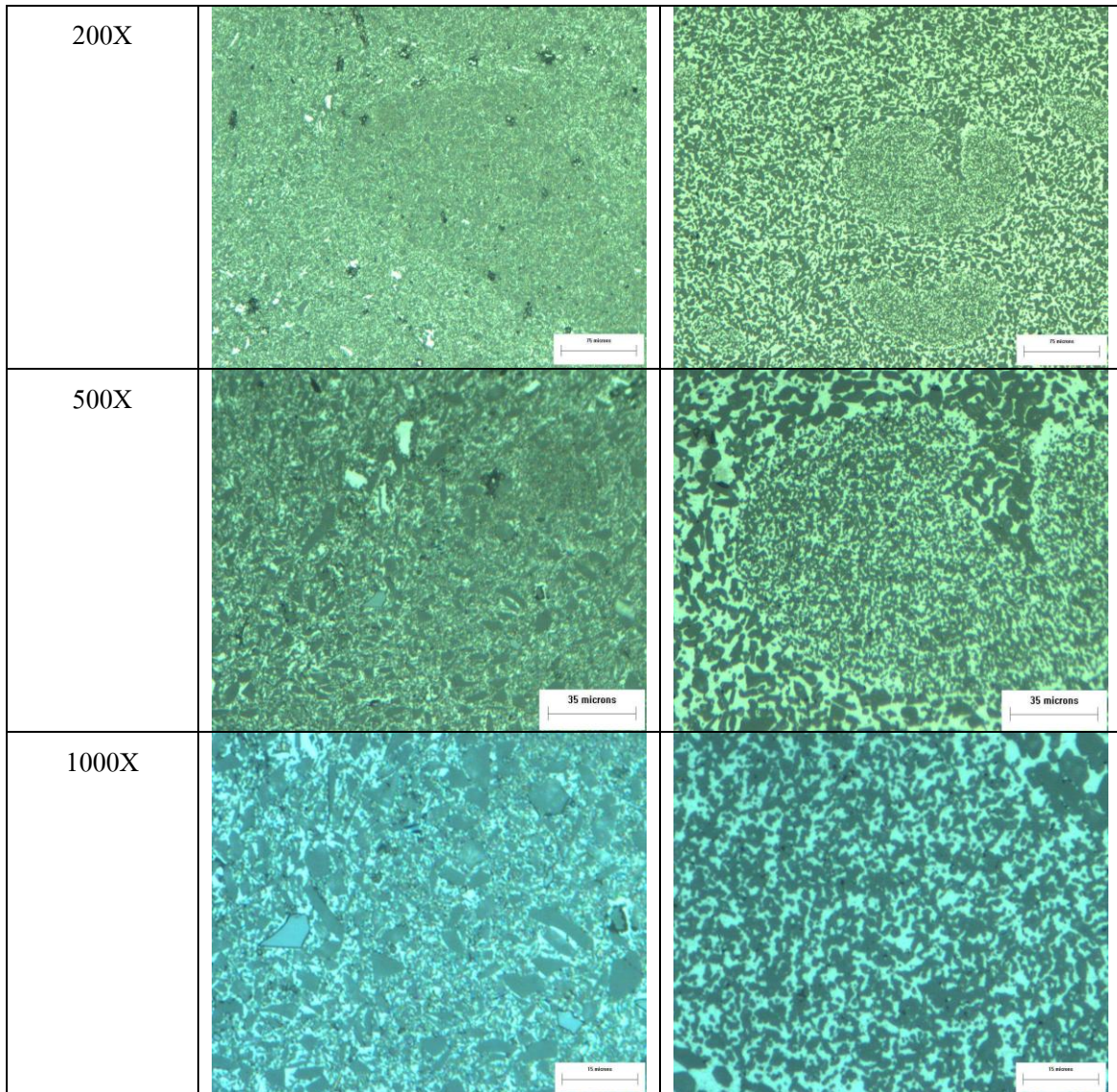
รูปที่ 3.42 แสดงผลการตรวจสอบลักษณะภายในด้วยเทคนิค X-ray ของกลุ่มชั้นงาน

Reaction Bonding

จากรูปที่ 3.41 และ 3.42 แสดงผลการ X-ray ชั้นงานเกราะกันกระสุนจะเห็นว่า มีลักษณะของสี 2 แบบ คือสีเทาดำ และขาว หากมีการ Infiltrate ที่ดี ชั้นงานจะมีสีเทาดำอย่างเห็นได้ชัด หากมีพื้นที่สีขาวมาก แสดงว่าการ infiltrate ได้ไม่ดี จากรูปจะเห็นว่าชั้นงานกลุ่ม Reaction Bonding มีการ Infiltrate ได้ดีกว่ากลุ่ม Oxidation Bonding แต่ชั้นงานกลุ่ม Reaction Bonding ก็ยังคงเห็นรอยแตกภายใน อันเนื่องมาจากการโค้งงอ ไม่เรียบ ประกอบกับแรงดันอัด จึงทำให้บางตำแหน่งเกิดการแตกหักภายใน

3.8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแผ่นเกราะกันกระสุนเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพูน

Magnification	Oxidation Bonding	Reaction Bonding
100X		

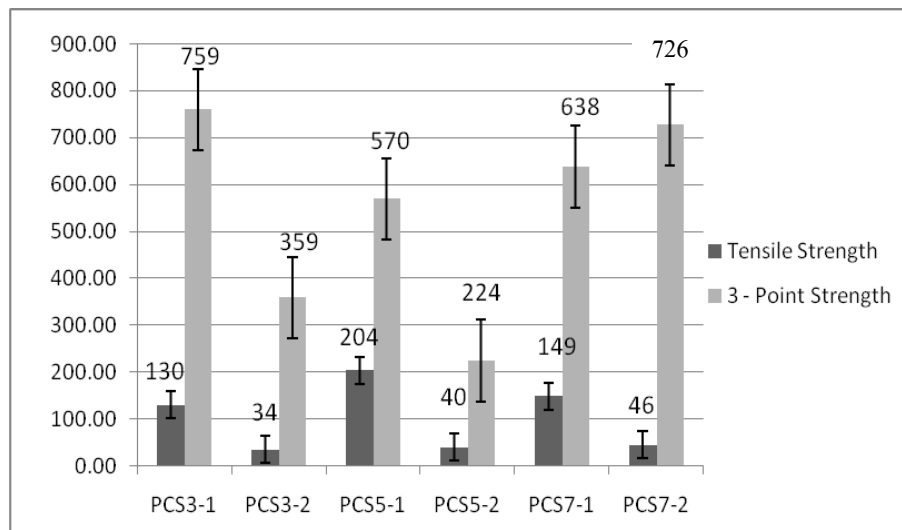


รูปที่ 3.43 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเกาะในกลุ่ม Oxidation Bonding และ Reaction Bonding ที่กำลังขยาย 100X, 200X, 500X และ 1000X ตามลำดับ

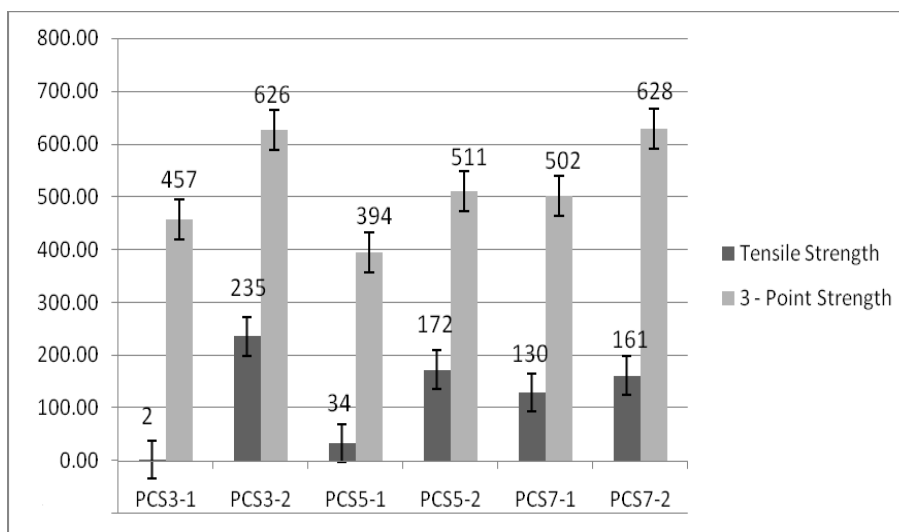
จากรูปโครงสร้างจุลภาคจะพบว่าชิ้นงานทั้งสองกลุ่มเกิดบริเวณที่รวมตัวกันแน่น (High Packing) เป็นกลุ่มๆ ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคผงขนาดเล็กที่เกิดจากการผสมที่ไม่ดีทำให้อนุภาคผงขนาดเล็กไม่กระจายตัวออกทั่วอย่างสม่ำเสมอทั้งชิ้นงานและจะสังเกตได้ว่าในกลุ่มชิ้นงาน Oxidation Bonding จะมีการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็กที่ดีกว่ากลุ่มชิ้นงาน Reaction Bonding เนื่องจากการผสมสารตั้งต้นด้วยกระบวนการ Ball Mixing

3.9 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน

การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่เสริมแรงด้วยแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนโดยการทดสอบครั้งนี้มีตัวแปรต้นคือชนิดของแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนในกลุ่ม Reaction Bonding โดยมีตัวแปรตามคือปริมาณตัวประสานชนิด Polycabosilane (PCS) ที่ 3, 5 และ 7% ตามลำดับ และการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบที่ T6 ซึ่งผลได้แสดงดังรูปที่ 3.44 เป็นกลุ่มชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบที่ T6 และรูปที่ 3.45 เป็นกลุ่มชิ้นงานทดสอบที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบที่ T6



รูปที่ 3.44 แสดงผลการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานในกลุ่ม Reaction Bonding ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบที่ T6



รูปที่ 3.45 แสดงผลการทดสอบสมบัติทางกลชิ้นงานในกลุ่ม Reaction Bonding ที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบที่ T6

จากผลทดสอบที่แสดงออกมา จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) มีค่าที่น้อยซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทดสอบเป็นวัสดุเปราะไม่เหมาะสมกับการทดสอบโดยการดึงทดสอบ ทางทีมนักวิจัยจึงเปลี่ยนการทดสอบมาเป็นการทดสอบแบบดัดงอ (Bending Test) ชนิด 3-Point Bending แทน ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ของชิ้นงานในกลุ่ม Reaction Bonding ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบที่ T6 ที่ปริมาณตัวประสาน PCS 7% ได้ค่าเฉลี่ยของ 3-Point Strength สูงสุดและผลการทดสอบของกลุ่มชิ้นงานที่ได้รับการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบที่ T6 ก็มีผลที่สอดคล้องกัน

3.10 ผลการทดสอบการต้านทานการทำลายของกระสุน (การทดสอบยิงทางปืนวิธี : Ballistic Test) ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม

3.10.1 การทดสอบยิงเกราะกันกระสุนครั้งที่ 1

วันที่ 28 สิงหาคม 2553 สถานที่ทดสอบยิง โรงงานวัดถูระเบิด จ.นครสวรรค์
ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง









1. ชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนที่มีขนาดความกว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 8 เซนติเมตร และหนา 0.9, 1.0 และ 1.1 เซนติเมตร
2. ปริมาณของสารตัวเชื่อมประสานชนิด Polycabosilane 5 และ 7% wt

3. แผ่นชิ้นงานเกราะกันกระสุนมีความหนารวม 12 มิลลิเมตร ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 (Heat Treatment)
4. แผ่น PMC ที่ค่า Areal Density เท่ากับ 1.64-1.69 g/cm²
5. การหุ้ม Kevlar จำนวนด้านหน้า 3 ชั้น และด้านหลัง 2 ชั้น
6. ขนาดของชิ้นงานทดสอบ 17.78×17.78 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.4 แสดงผลการทดสอบยิงทางปืนวิธี: Ballistic Test ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม ครั้ง
ที่ 1

ชิ้นงาน		ความเร็ว (m/s)	ผลยิง	รอยยุบตัว (mm)	ขนาดกว้างของรอย ยุบตัว (mm)
PCS	ความหนา (mm)				
5	9	n/a	n/a	N/A	N/A
		n/a	n/a	N/A	N/A
	10	n/a	n/a	N/A	N/A
		838.68	ทะลุชิ้นงาน	-	79.3
	11	848.84	ทะลุชิ้นงาน	-	36.6
		846.06	ทะลุชิ้นงาน	-	74.4
7	9	846.24	ทะลุชิ้นงาน	-	91.6
		856.48	ไม่ทะลุชิ้นงาน	9.80	60.7
	10	855.40	ไม่ทะลุชิ้นงาน	24.50	54.2
		848.50	ไม่ทะลุชิ้นงาน	30.30	N/A
	11	842.07	ไม่ทะลุชิ้นงาน	13.80	N/A
		857.80	ไม่ทะลุชิ้นงาน	30.60	N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึง ไม่มีการทดสอบ หรือทำการวัด

ชิ้นงาน	วัสดุ	ด้านหน้า	ด้านหลัง
1	PCS 7% หนา 11 มิลลิเมตร		
			
2	PCS 7% หนา 10 มิลลิเมตร		
			

รูปที่ 3.46 แสดงชิ้นงานเกราะ PCS 7% ที่มีความหนา 10 และ 11 มิลลิเมตร ซึ่งผ่านการทดสอบยิงทางปืนวิธี (Ballistic Test) ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม

จากผลการทดลอง ในครั้งนี้ได้มีการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของตัวเชื่อมประสาน Polycarbosilane (PCS) และความหนาของแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนที่สามารถป้องกันกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตร สำหรับนำไปติดตั้งเป็นเกราะป้องกันกระสุนบนเรือจู่โจมลำน้ำ กองเรือลำน้ำ ทหารเรือ โดยงานวิจัยได้ทำการทดสอบแผ่นเกราะแข็ง ชนิด MMC ที่มีส่วนผสมของตัวเชื่อมประสาน PCS ที่ 5 และ 7% โดยน้ำหนัก ชิ้นงานมีขนาดกว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 8 เซนติเมตร และขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ที่ความหนา ตั้งแต่ 9, 10 และ 11 มิลลิเมตร และหุ้ม Kevlar ด้านหน้าและหลัง เพื่อเก็บสะเก็ดของชิ้นส่วน MMC และประกอบกับแผ่นดูดซับแรง พอลิเมอร์คอมพอสิต (Polymer Matrix Composite, PMC) พบว่าชิ้นงานคอมพอสิต ที่มีความหนา 10 และ 11 มิลลิเมตร ที่ส่วนผสมของตัวเชื่อมประสาน PCS 7% สามารถทนต่อกระสุน 7.62 ที่ระดับสามตามมาตรฐาน NIJ (National Institute of Justice)

3.10.2 การทดสอบยิงเกราะกันกระสุนครั้งที่ 2









วันที่ 1 พฤศจิกายน 2553 สถานที่ทดสอบยิง กองพลาธิการ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

1. ชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุนที่มีขนาดความ กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และหนา 1.0 เซนติเมตร
2. ปริมาณของสารตัวเชื่อมประสานชนิด Polycabosilane 7% wt
3. แผ่นชิ้นงานเกราะกันกระสุนมีความหนารวม 11 มิลลิเมตรที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 (Heat Treatment)
4. แผ่น PMC ที่ค่า Areal Density เท่ากับ 1.64-1.69 g/cm²
5. การหุ้ม Kevlar จำนวนด้านหน้า 4 ชั้น และด้านหลัง 2 ชั้น
6. ขนาดของชิ้นงานทดสอบ 17.78×17.78 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการทดสอบยิงทางปืนวิธี Ballistic Test ตามมาตรฐานNIJ ระดับสาม ครั้งที่ 2

ชิ้นงาน		ความเร็ว (m/s)	ผลยิง	รอยยุบตัว (mm)	ขนาดกว้างของรอย ยุบตัว (mm)
PCS	แผ่น				
7	1	874.36	ทะลุ ชิ้นงาน	50.0	116.8
	2	863.26	ทะลุ ชิ้นงาน	47.5	94.3
	3	856.79	ทะลุ ชิ้นงาน	73.8	123.0
	4	855.91	ทะลุ ชิ้นงาน	-	111.5

ชิ้นงาน	ด้านหน้า	ด้านหลัง
1		
2		
3		
4		

รูปที่ 3.47 แสดงชิ้นงานเกราะ PCS 7% ที่มีความหนา 11 มิลลิเมตร ซึ่งไม่ผ่านการทดสอบยิงทางปืนวิธี (Ballistic Test) ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม

จากผลการทดสอบยิงพบว่าแผ่นเกราะแข็งคอม โพลีท MMC เมื่อนำมาประกอบกับแผ่น PMC แล้วมีความสามารถในการป้องกันกระสุนได้ แต่ด้วยเนื่องจากการทดสอบยิงครั้งที่ 1 เป็นการทดสอบยิงเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมในการพัฒนาแผ่นเซรามิกส์ซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน เพื่อใช้เป็นต้นแบบในการส่งมอบชิ้นงานเซรามิกส์เพื่อแทรกซึมเนื้ออะลูมิเนียมต่อไป และจากการ

ทดสอบยิงในครั้งที่ 1 ได้ผลการทดสอบคือแผ่นเกราะแข็งคอมโพลีทนี่มีความสามารถในการป้องกันกระสุนได้ โดยใช้การผสมผงตามสูตร Mix2 มีตัวเชื่อมประสานคือ PCS 7% และที่ความหนาของซิลิกอนคาร์ไบด์ คือ 10 และ 11 มิลลิเมตร สถานะนี้จึงเป็นสถานะที่เหมาะสมในการพัฒนาต้นแบบแผ่นเกราะแข็งต่อไปโดยมีการปรับความหนาเป็น 10 มิลลิเมตร จากการศึกษาที่ผ่านมา จึงได้ผลิตชิ้นงานแผ่นเกราะแข็ง MMC ขึ้น และมีการทดสอบยิงครั้งที่ 2 โดยผลการทดสอบครั้งนี้ชิ้นงานมีการยิงทะลุ เนื่องจากความเร็วของกระสุนอยู่ในระดับที่สูงเกินกว่ามาตรฐานระดับสาม



3.10.3 การทดสอบยิงเกราะกันกระสุนครั้งที่ 3

วันที่ 11 พฤศจิกายน 2553 สถานที่ทดสอบยิง กรมสรรพาวุธ ทหารอากาศ
ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

1. ชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพรุน กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และหนา 1.0 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น
2. แผ่น PMC ขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร
3. ปริมาณของสารตัวเชื่อมประสาน ชนิด Polycabosilane 7% wt แผ่นชิ้นงาน MMC มีความหนา 11 มิลลิเมตร และไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 (Heat Treatment)
4. แผ่น PMC ที่ค่า Areal Density เท่ากับ 1.52 g/cm^2
5. การหุ้ม Kevlar จำนวนด้านหน้า 4 ชั้น และด้านหลัง 2 ชั้น
6. ขนาดของชิ้นงานทดสอบ 30×20 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.6 แสดงผลการทดสอบยิงทางปืนวิธี Ballistic Test ตามมาตรฐานNIJ ระดับสาม ครั้งที่ 3

ชิ้นงาน		ความเร็ว (m/s)	ผลยิง	รอยยุบตัว (mm)
PCS	แผ่น			
7	1	847	ทะลุชิ้นงาน	> 44
	2	851	ทะลุชิ้นงาน	> 44
	3	868	ทะลุชิ้นงาน	> 44

	ชิ้นงาน
ด้านหน้า	
ด้านหลัง	

รูปที่ 3.48 แสดงชิ้นงานเกราะ PCS 7% ที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ซึ่งไม่ผ่านการทดสอบยิงทาง
 จีปนวิถี (Ballistic Test) ตามมาตรฐาน NIJ ระดับสาม ในการทดสอบยิงเกราะกันกระสุนครั้งที่ 3

จากผลการนำชิ้นงาน MMC ทั้งหมด 3 ชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติทางกล
 ด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 (Heat Treatment) มาเปรียบเทียบกับชิ้นงาน PMC ที่มี areal
 density 1.52 g/cm^2 ทดสอบยิงด้วยกระสุนที่ระดับสาม กระสุนขนาด 7.62 พบว่าชิ้นงานที่เตรียม
 ได้ทะลุทั้งหมด ไม่สามารถรับแรงกระแทกจากกระสุนได้ ทั้งนี้อาจเกิดจากข้อสันนิษฐานการ
 ทดลองดังนี้

1. ชิ้นงาน MMC ที่ทดสอบยิงครั้งนี้ไม่ได้ Heat Treatment จึงอาจมีผลให้ชิ้นงานทะลุ (เมื่อ
 เปรียบเทียบผลการทดลองก่อนหน้านี้ชิ้นงาน MMC ที่ Heat Treatment พบว่าชิ้นงานไม่
 ทะลุ)
2. ลักษณะริ้วรอยที่ตรวจพบในชิ้นงานเกราะตรวจสอบพบโดยการ X-Ray ซึ่งอาจเป็นตำหนิใน
 ชิ้นงาน ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกจากกระสุนน้อยลง

3.11 ผลการนำแผ่นเกราะกันกระสุนไปประกอบเป็นเรือต้นแบบจู่โจมลำน้ำและการทดสอบวิ่งในน้ำ



รูปที่ 3.49 แสดงการทดสอบในน้ำของเรือจู่โจมลำน้ำ กองเรือลำน้ำ หลังจากประกอบแผ่นเกราะเข้ากับตัวเรือต้นแบบ

จากผลการทดลองข้างต้นที่กล่าวมาทั้งหมดเมื่อนำแผ่นเกราะกันกระสุนเนื้ออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผลิตได้มาประกอบเข้ากับตัวเรือจู่โจมต้นแบบและทำการทดสอบวิ่งจริงในน้ำผลที่ได้เป็นที่พอใจของสมาชิกทีมวิจัย เรือจู่โจมลำน้ำสามารถวิ่งได้ด้วยความเร็วและการบังคับเลี้ยวไม่เกิดปัญหา เนื่องจากแผ่นเกราะที่ประกอบเข้ากับตัวเรือมีน้ำหนักน้อยเมื่อเทียบกับเกราะที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเกราะส่วนใหญ่มักจะทำจากเหล็กกล้าทำให้มีน้ำหนักมากส่งผลให้สมรรถนะของเรือต่ำลงและสิ้นเปลืองพลังงาน

บทที่ 4

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

ในงานวิจัยการพัฒนาและการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีดที่เสริมแรงด้วยแผ่นซิลิกอนคาร์ไบด์พูน โดยกระบวนการแทรกซึมในสถานะกึ่งของแข็งมีจุดประสงค์สำคัญในการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนให้มีความสามารถในด้านทานการทำลายของกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 เพื่อนำไปประกอบเป็นตัวเรือนแบบใช้งานจริงในภาคสนาม

โดยมีศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมในกลุ่มรีดเกรด 2024 5052 6061 และ 7075 ที่แปรรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งที่ใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สต่าง ๆ จากนั้นจึงศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบ และขนาดความหนาของแผ่นเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพูน โดยการทดสอบยิงทางปืนวิธีด้วยกระสุน 7.62 มิลลิเมตรที่มีความเร็วหัวกระสุนประมาณ 847 ± 9.1 เมตร/วินาที จากนั้นนำแผ่นเกราะที่ผลิตได้มาประกอบเข้าตัวเรือนแบบเพื่อทดสอบยิงในและนำไปใช้จริงในภาคสนาม

4.1.1 บทสรุป การแปรรูปโลหะกึ่งของแข็งของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มรีด (Wrought Aluminum Alloy)

1. สัดส่วนของของแข็งจะแปรผันตรงกับเวลาในการปล่อยฟองแก๊ส ถ้าเวลาในการปล่อยฟองแก๊สเพิ่มขึ้น ปริมาณของสัดส่วนของของแข็งที่ได้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีเวลาในการแข็งตัวเพิ่มขึ้นทำให้เดนไดรต์เกิดการฟอร์มตัวเป็นอนุภาคก่อนกลมกระจายในเนื้อชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป

2. จากการทดสอบสมบัติทางกล ด้านความสามารถในการต้านทานแรงดึง

2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง เกรด 2024 ที่ทำการอัดขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สผ่านแท่งกราฟไฟต์แข็งพูนที่เวลา 30 วินาที ซึ่งทำให้มีสัดส่วนของแข็งประมาณ 28.42% และปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เกรด 5052 ที่ทำการอัดขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สผ่านแท่งกราฟไฟต์แข็งพูนที่เวลา 20 วินาที วินาที ซึ่งทำให้มี

สัดส่วนของแข็งประมาณ 7.91% และปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ O จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

2.3 โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน เกรด 6061 ที่ทำการอัดขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สผ่านแท่งกราฟไฟต์แข็งพูนที่เวลา 30 วินาที ซึ่งทำให้มีสัดส่วนของแข็งประมาณ 23.24% และปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 รูปแบบที่ 1) จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

2.4 โลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี เกรด 7075 ที่ทำการอัดขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งโดยใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สผ่านแท่งกราฟไฟต์แข็งพูนที่เวลา 20 วินาที ซึ่งทำให้มีสัดส่วนของแข็งประมาณ 27.09% และปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 รูปแบบที่ 1) จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

4.1.2 บทสรุป การพัฒนาและผลิตเกราะกันกระสุนสำหรับเรือจู่โจมลำน้ำต้นแบบ

1. เลือกใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี เกรด 7075 ในการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนด้วยกรรมวิธีแทรกซึมในสถานะกึ่งของแข็ง เนื่องจากมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด เมื่อเทียบกับโลหะผสมอะลูมิเนียมในเกรดเดียวกันและเกรดต่างกัน

2. แผ่นเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพูนที่ทำการเผาภายใต้บรรยากาศของอาร์กอนเพื่อให้เกิดเป็น Reaction Bonding จะเป็นชั้นที่มีประสิทธิภาพในการ Infiltration ที่ดีกว่ากลุ่ม Oxidation

3. การทดสอบทางกลที่เหมาะสมกับแผ่นเกราะกันกระสุนซึ่งเป็นวัสดุคือ การทดสอบการดัดงอ

4. เมื่อนำแผ่นเกราะไปประกบติดกับแผ่นรองหลังซึ่งผลิตมาจากวัสดุผสมเนื้อพอลิเมอร์และหุ้มด้วยเคฟล่า แล้วนำไปทดสอบความสามารถในการต้านทานกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ 3 ด้วยกระสุนขนาด 7.62 มิลลิเมตรที่ทดสอบยิงด้วยความเร็วประมาณ 847 เมตร/วินาที ผลปรากฏว่าแผ่นเกราะที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพูนสูตร 7%PCS และผ่านการ Heat Treatment ที่มีความหนา 10 และ 11 มิลลิเมตร เป็นตัวเสริมแรงผ่านเกณฑ์การทดสอบ เนื่องจากในการทดสอบมีรอยยุบตัวบนกระเบาะดินลึกไม่เกิน 44 มิลลิเมตร

5. โครงสร้างของตัวเสริมแรงซิลิกอนคาร์ไบด์สูตร 7%PCS มีความไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน สันนิษฐานว่าน่าจะมาจากขั้นตอนการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพูนที่ยังมีการผสมส่วนผสมที่ยังไม่ดีพอ ทำให้อุณหภูมิของผงขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นกลุ่มๆ

6. เกราะกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียม เกรด 7075 เสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์เนื้อพูน โดยกระบวนการหล่ออัดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของเหลว สามารถนำมาใช้ทดแทน

เกราะกันกระสุนที่ผลิตจากเหล็กกล้าได้ เนื่องจากสามารถต้านทานการทำลายจากกระสุนได้ตามมาตรฐาน ทั้งยังมีน้ำหนักเบากว่าเกราะกันกระสุนแบบเดิมอีกด้วย

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. การผลิตซิริโคนคาร์ไบด์เนื้อพรุนที่ยังมีการผสมส่วนผสมที่ยังไม่ดีพอ ทำให้อนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกันจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มๆ ดังนั้นจึงต้องแก้ไขโดยการผสมให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด เพื่อลดผลกระทบเหล่านี้

2. ในขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นเกราะกันกระสุน ขนาด 10×10 เซนติเมตร ด้วยกระบวนการแทรกซึมในสถานะกึ่งของแข็ง (semi-solid infiltration) ควรทำการอุ่น perform ซึ่งเป็นตัวเสริมแรงที่ผลิตจากซิริโคนคาร์ไบด์เนื้อพรุนให้มีอุณหภูมิมากกว่า 500°C เพื่อให้น้ำโลหะสามารถแทรกซึมได้อย่างทั่วถึง

3. แม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตแผ่นเกราะควรออกแบบให้มีการไหลของโลหะที่สะดวกเพื่อให้มีสมดุลของอะลูมิเนียมทั้งสองด้านที่เท่ากันเพื่อแรงจากการหดตัว อันเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ชิ้นงานแตกร้าวหลังการขึ้นรูป

4. แม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตแผ่นเกราะควรมีระบบดันปลดชิ้นงานและระบบความร้อนสำหรับอุ่นแม่พิมพ์เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตเกราะกันกระสุน

5. ควรสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคลทุกครั้งเมื่อปฏิบัติงาน

6. ตัวเสริมแรงจากเซรามิกส์พรุนมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาวิจัยเพื่อพัฒนาต่อยอดจากเซรามิกส์พรุนชนิดซิริโคนคาร์ไบด์

บรรณานุกรม

- [1] เกราะกันกระสุน (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.gungold.com>
- [2] ภาพประกอบจำลองการกระจายพลังงานของเสื้อเกราะกันกระสุนแบบอ่อน (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.galls.com>
- [3] เสื้อเกราะป้องกันกระสุนได้อย่างไร สืบค้นจาก: MTEC.
http://www.mtec.or.th/th/search_sys/search_proj/detail.asp?proj_id=MT-B-48-CER-07-188-I&lang=1
- [4] ภาพประกอบจำลองการยุบตัวของเสื้อเกราะกันกระสุน (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
http://www.centermassinc.com/Body_Armor_101.html
- [5] ภาพประกอบแสดงขนาดกระสุนตามมาตรฐาน NIJ (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
http://en.wikipedia.org/wiki/7.62_X51mm_NATO
- [6] S.M.Seyed Reihani: *Materials and Design* 27(2006) 216-222
- [7] J. Wannasin. "Semi-Solid Die Casting Technology," *Proceeding of the Third Thai Foundry Conference*, Bitec Bangna, Bangkok, Thailand, November 23, 2006
- [8] US Provisional Patent. "Method to Prepare Metal Structure Suitable for Semi-Solid Metal Processing." by Wannasin J, Martinez RA, and Flemings MC. Filed in 2006.
- [9] Thai Patent Application. "Method to Prepare Metal Structure Suitable for Semi-Solid Metal Processing." by Wannasin J, Martinez RA, and Flemings MC. Filed in 2006.
- [10] J. Wannasin, R.A. Martinez and M.C. Flemings. A Novel Technique to Produce Metal Slurries for Semi-Solid Metal Processing, *Solid State Phenomena*, Vols. 116-117 (2006) pp. 366-369.
- [11] Sujirote K. and Dateraksa K. , "Ballistic Fracture of Alumina Ceramics" ,National Metal and Materials Technology Center.
- [12] Karamis, M.B. , Tasdemirci, A. and Nair, F. , "Failure and tribological behaviour of the AA5083 and AA6063 composites reinforced by SiC particles under ballistic impact" , Erciyes University , Kayseri , Turkey, 2003.
- [13] Karamis, M.B. , "An Evaluation of the Macro Damage on Metal Matrix Composites after High Velocity Impact" , Erciyes University, Kayseri, Turkey, 2005.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [14] เกราะอัศวิน (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
<http://www.manager.co.th/Daily/ViewNews.aspx?NewsID=9490000087381>
- [15] เกราะกันกระสุน <http://www.testresource.com>
- [16] เชิดเชลง ชิตชวนกิจ, วิศวกรรมกรเชื่อม, 1st. ed., กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, 2524.
- [17] (2000). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี: อลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นและอลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม [Online]. Available:
http://aluminiumlearning.com/html/index_w7xxx.html
- [18] ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และสาโรช ลูติเกียรติพงศ์, วัสดุในงานวิศวกรรม, กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยุคเข็้น, 2541.
- [19] A. Mortensen in T.W. Clyne, ed., *Comprehensive Composite Materials, Vol.3: Metal Matrix Composites*, Elsevier, 2000, pp. 521-554
- [20] K. Dhingra, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. **294A**, 559 (1980).
- [21] R. Champion, W. H. Krueger, H. S. Hartmann, A. K. Dhingra in B. R. Noton, A. Signorelli, K. N. Street, and L. N. Phillips, eds., *International Conference on Composite Materials*, TMS, Warrendale, PA, 1978, pp. 883-904
- [22] W. H. Hunt, A. K. Dhingra and S. G. Fishman, eds., *Interfaces in Metal Matrix Composites*, TMS, Warrendale, PA, 1986, pp. 3-25.
- [23] W. S. Chung and S. J. Lin, Mater. Res. Bull. **31**, 1437-1447 (1996).
- [24] J. P. Rocher, J. M. Quenisset, and R. Naslain, J. Mater. Sci. Lett. **4**, 1527-1529 (1985).
- [25] U.S. Pat. 4,828,008 (1989), D. R. White, A. W. Urquhart, M. K. Aghajanian and D. K. Creber (to Lanxide Technology Company).
- [26] S. Asthana, *Solidification Processing in Reinforced Metals*, Trans Tech Publications Ltd., 1998.
- [27] Hunt W., "Metal Matrix Composites," *Comprehensive Composite Materials*, Vol. 6: Design and Applications, M.G. Bader (ed.), Elsevier, 2000, p.57-66.
- [28] Metal Matrix Composite : Infiltration, J. Wannasin and M.C. Flemings

ภาคผนวก

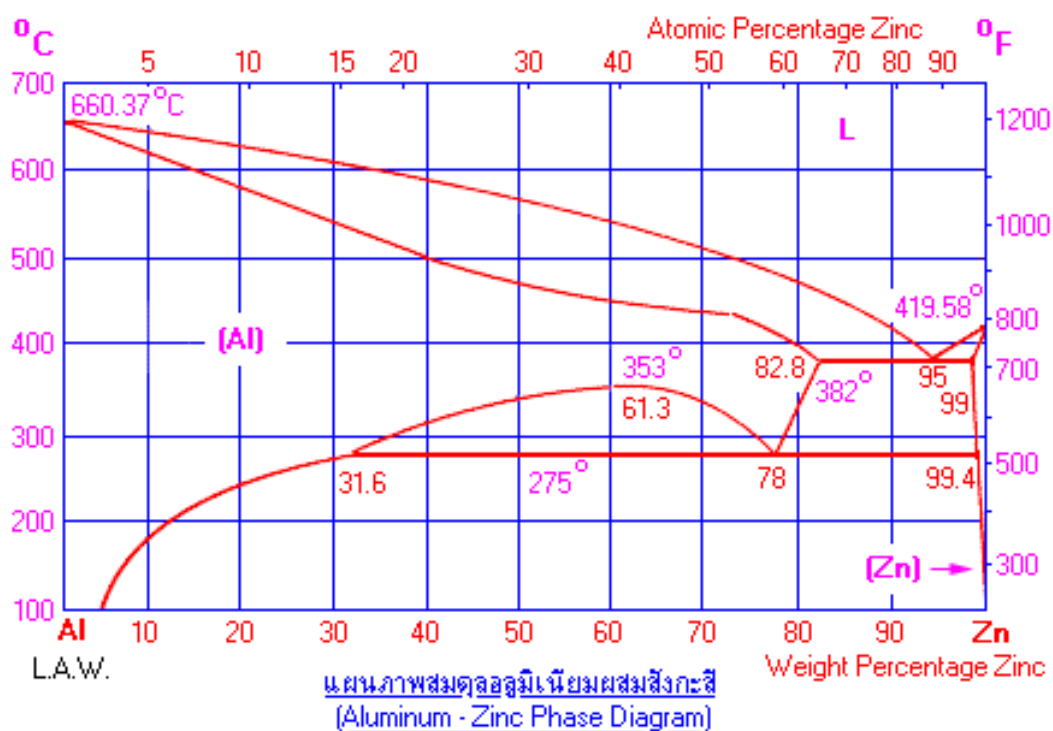
ก.1 คุณสมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการ T6

ตารางที่ ก-1 ตารางแสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของอะลูมิเนียมเกรด 7075-T6

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)



ก.3 ลำดับการเกิดขึ้นของ Al-Zn สามารถจัดรูปแบบดังนี้

Supersaturated Solid Solution ▶ GP Zone ▶ η' (MgAl₂) ▶ η (MgAl₂)

GP Zone เป็นโครงสร้างการยึดเกาะกับโครงสร้างพื้น และมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมพลังงาน **Interfacial** สำหรับ **GP Zone** ในระบบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีและผสมแมกนีเซียมต่ำ ดังนั้น ความหนาแน่นยิ่งสูง ถ้าขอบเขตขนาดเล็กมาก ๆ (ประมาณ 30°A) สามารถเกิดที่อุณหภูมิต่ำ (20-120°C) การเกาะตัวกันครั้ง ๆ กลาง ๆ แบบกิ่งเสถียรของสภาพความเป็นโลหะของ η' (MgAl₂) สามารถอธิบายรูปร่างหน่วยเซลล์มีลักษณะแบบ **Monoclinic** ขณะสภาพไม่เกาะตัวกันแบบสมดุล MgZn₂ η หน่วยเซลล์มีลักษณะแบบ **Hexagonal**

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายตฤณเมษ สังขพันธ์		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5210120072		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษยก้นกฏิจิ ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ตฤณเมษ สังขพันธ์ บั้วแสง กาญจนดิษฐ์ กุลจิรา สุจิโรจน์ กรรณิกา เดชรักษา สุคันธกานต์ เงินบำรุง
Ryan C. McCuiston ชัยวุฒิ กมลพิลาสและเจษฎา วรรณสินธุ์. 2553. การพัฒนาและผลิต
เกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมที่มีเซรามิกส์เป็นส่วนเสริมแรงโดยกรรมวิธี
การใหม่. การประชุมวิชาการทางโลหวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 เขาใหญ่ อำเภอปาก
ช่อง จังหวัดนครราชสีมา. วันที่ 17-19 พฤศจิกายน. สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชา
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.