



การพัฒนากระบวนการผลิตชิ้นส่วนขาเทียมโลหะโดยการทอโลหะกึ่งของแข็ง

Development of the Production Process of Prostheses Metal

Parts by a Semi-Solid Forging

มานวิกา คงพ่วง

Manwika Kongpuang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Materials Engineering

Prince of Songkla University

2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนากระบวนการผลิตชิ้นส่วนขาเทียมโลหะ โดยการทาบโลหะกิ่งของแข็ง
 ผู้เขียน นางสาวมาณวิกา คงพ่วง
 สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา วรรณสินธุ์) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชชัย ปลุกผล)

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

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริกุล วิสุทธิ์เมธางกูร) (รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริกุล วิสุทธิ์เมธางกูร)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
 วัสดุ

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วน
เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. เจษฎา วรรณสินธุ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาว มานวิกา คงพ่วง)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อนและ
ไม่ได้ใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาว มาณวิกา คงพ่วง)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนากระบวนการผลิตชิ้นส่วนขาเทียมโลหะโดยการทอบโลหะกึ่งของแข็ง
ผู้เขียน นางสาวมาณวิกา คงพ่วง
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อ

เป้าหมายหลักของโครงการวิจัยนี้คือเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตชิ้นส่วนขาเทียมที่มีคุณภาพสูงและต้นทุนต่ำโดยเทคโนโลยีการทอบขึ้นรูปกึ่งของแข็งเพื่อให้ผู้พิการมีโอกาสเข้าถึงขาเทียมที่มีคุณภาพสูงได้อย่างทั่วถึงและเพื่อพัฒนากระบวนการขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมที่มีความแข็งแรงสูงด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็งซึ่งจะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ในการผลิตชิ้นส่วนทางการแพทย์ที่เบาและแข็งแรงอื่นๆ ได้ต่อไป ชิ้นส่วนที่ได้จากงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย แท่งกระบอกคันทันยาว (Rod) และแผ่นสี่เหลี่ยมหนา (Billet) โดยจะถูกนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติที่สำคัญอื่นๆ เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด ผลการวิจัยในเบื้องต้นเป็นการศึกษาการทอบขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 7075 ในสภาวะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Forging) ของชิ้นส่วนท่อขาเทียมรวมถึงการทอบขึ้นรูปก้อนสี่เหลี่ยมหนาเพื่อนำไปพัฒนาเป็นการทอบขึ้นรูปในส่วนข้อข้อเท้า ตัวจับยึดและประมิดในภายหลัง พบว่ากระบวนการมีความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปแต่ปัญหาที่พบคือการเกิดการแยกเฟส (Segregation) อันเนื่องมาจากการขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็งแบบรีโอฟอร์มมิ่ง (Rheo-forming) ไม่สามารถทำที่สัดส่วนของแข็งสูงๆ ได้ อีกทั้งเกิดการแข็งก่อนทอบในชิ้นงานที่มีสัดส่วนของแข็งสูงๆ และค่าใช้จ่ายในการตัดกลึง (Machining) ยังสูงมาก จึงได้พัฒนาการฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 356 ในสภาวะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Die Casting) ซึ่งพบว่าสามารถผลิตชิ้นส่วนข้างต้นได้ยกเว้นท่อขาเทียมที่มีความยาวและบาง เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการจัดทำชุดขาเทียมต้นแบบ ทางทีมวิจัยจึงเลือกใช้ท่ออะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่สั่งซื้อจากภายนอกมาแทนที่ ชิ้นส่วนขาเทียมทุกชิ้นได้นำมาประกอบเข้าด้วยการสวมอัดและส่งทดสอบแบบวัฏจักรที่ศูนย์สิรินธรเพื่อการฟื้นฟูสมรรถนะคนพิการจำนวน 2 ล้ารอบ พบว่าผ่านตามมาตรฐานการทดสอบ

Thesis Title Development of the Production Process of Prostheses Metal Parts
 by a Semi- Solid Forging

Author Miss Manwika Kongpuang

Major program Materials Engineering

Academic Year 2012

Abstract

The main objective of the research is the development of the production process of prosthetic metal parts by a semi- solid forging technology with high-quality and low cost for disabled can receive the high quality prosthetic and to develop the high strength aluminum alloy forming process with the semi-solid technology that can be apply to other lightweight medical component. The parts from this research consists of the length of cylindrical rod and thick rectangular plate. All parts were examined the microstructure, mechanical properties and other important properties both as-cast and heat treated parts to obtain the proper conditions of forging .In a preliminary study found that the semi-solid forging of Al 7075 could possibility of Rheo-forming both cylindrical rod and thick plate which will be machine to make Tube, Foot adaptor, Tube clamp and Pyramid later. The problems that found in this research are Segregation, some of areas transform to the solid state before forge and the cost of machining after forming is also very expensive. The other researcher has developed a semi-solid die casting of A356 process instead. It found that the process could produce the parts of aluminum below knee prostheses except the tube prosthesis which is long and thin .Therefore, in this research we use the Al6061 T651 from outsource extruded instead. Each piece will be assembled with interference fit and sent to cyclic testing at Sirindhorn National Medical Rehabilitation Centre (SNMRC) to check whether can pass of up 2 millions cycle. In preliminary result of the first product passed the test of 2 millions cycles without deformation.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณ ทนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2553 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในการดำเนินการวิจัย รวมถึงค่าใช้จ่ายในการไปเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.เจษฎา วรณสินธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งมอบความรู้ทั้งด้านการศึกษา การใช้ชีวิต การเป็นแบบอย่างที่ดีในเรื่องของการแบ่งเวลาและความรับผิดชอบในงานที่ทำ ผู้วิจัยรู้สึกโชคดีมากที่ได้มาเป็นส่วนหนึ่งของทีมวิจัย และได้มีอาจารย์เป็นแรงบันดาลใจในการดำเนินชีวิต

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ศิริกุล วิสุทธิเมธางกูร สำหรับข้อเสนอแนะที่ดีในการวิจัยทุกครั้งที่ยายงานความก้าวหน้า ผศ.ดร. ธวัชชัย ปลุกผล ที่มอบความรู้และคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาและการใช้ชีวิต รศ.ดร. เขาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร ที่เสียสละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ คุณสมใจ จันทร์อุดม คุณชนนศ รัตโนชัยกุล คุณเชียรศักดิ์ ชูชีพ คุณรังสิตินี แคนยุกต์ คุณสงบ ชนะบำรุงกุล คุณตฤณเมษ สังคพันธ์ และคุณบัวแสง กาญจนดิษฐ์ ที่เสียสละเวลามาช่วยในงานขึ้นรูปเพื่อผลิตชิ้นงานและการวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงให้คำแนะนำในด้านวิชาการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณมลฤดี โมรา คุณธีระศักดิ์ คันทิกและ คุณอัจจิมา สุขสืบ นักศึกษาปริญญาตรีที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยและตั้งใจทำงานที่ได้รับมอบหมายอย่างดีมาตลอด

ขอขอบคุณ ศูนย์สิรินธรเพื่อการฟื้นฟูที่ให้ความอนุเคราะห์ดำเนินการใช้เครื่องทดสอบขาเทียมแบบวัฏจักร โดยไม่มีค่าใช้จ่าย คุณธวัชชัย จันทร์สะอาด ผู้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับกายอุปกรณ์เทียมรวมถึงช่วยเหลือให้การทดสอบเป็นไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และรวมถึงพี่ ๆ น้อง ๆ นักศึกษาปริญญาตรี-โท-เอก ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างเต็มที่ในงานวิจัย

และสุดท้าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยดูแลเอาใจใส่และเป็นกำลังใจในการทำงานตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(20)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 ทฤษฎี สมมุติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	3
1.2.1 ขาเทียม	3
1.2.1.1 ประเภทขาเทียม	3
1.2.2 ขาเทียมใต้เข่า (Below knee prosthesis)	4
1.2.3 ขาเทียมจากต่างประเทศ	5
1.2.4 ขาเทียมที่พัฒนาและผลิตในประเทศ	6
1.2.5 การทดสอบขาเทียมตามมาตรฐานกายอุปกรณ์เทียม ISO 10328 12	8
1.2.5.1 การทดสอบทางวิศวกรรม	8
1.2.5.2 การทดสอบทางการแพทย์	8
1.2.6 การทูนขึ้นรูป (Forging)	9
1.2.6.1 แม่พิมพ์ทูนขึ้นรูปแบบปิด (Closed - die Forging)	10
1.2.6.2 การคำนวณแรงที่ใช้ในการทูนขึ้นรูป	10
1.2.6.3 การทูนขึ้นรูปสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Semi-Solid Forging)	11
1.2.6.4 การเปรียบเทียบระหว่างการทูนขึ้นรูปแบบปกติ (Conventional forging) กับการทูนขึ้นรูปใน สถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Semi-Solid forging)	11
1.2.7 วัสดุทำแม่พิมพ์และการออกแบบแม่พิมพ์ปิด	12
1.2.8 การวิเคราะห์ความเสียหายของแม่พิมพ์ (Die failures)	13
1.2.9 การขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็ง	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.2.10 กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส	14
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	19
1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย	19
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	19
1.7 สถานที่ทำวิจัย	20
2. วิธีการวิจัย	21
2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	21
2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	22
2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการทดลอง	22
2.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน, ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานและทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ	23
2.3 ขั้นตอนการวิจัย	23
2.3.1 การเลือกวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	23
2.3.2 การวิเคราะห์ทางความร้อนของโลหะที่ใช้ในงานวิจัย	24
2.3.3 การเตรียมโลหะกึ่งของแข็ง	24
2.3.4 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งของโลหะกึ่งของแข็งที่เตรียมได้จากกระบวนการ GISS	25
2.3.5 การผลิตชิ้นงานทุบขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง	26
2.3.5.1 การทดลองทุบขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาว (rod)	27
2.3.5.2 การทดลองทุบขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนา (billet)	31
2.3.6 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	34
2.3.6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นแท่งกระบอกตันยาว	34
2.3.6.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยมหนา	35
2.3.7 การวิเคราะห์ธาตุประกอบของวัสดุเกรด 7075 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.8 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน	38
2.3.8.1 การทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Scale B	38
2.3.8.2 การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile testing)	39
2.3.8.3 การทดสอบการดัดงอ (Bending test)	41
3. ผลและการอภิปรายผล	43
3.1 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะที่ใช้ในงานวิจัย	43
3.2 กรณีศึกษาการชุบขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาว (rod) ด้วยกรรมวิธีการชุบขึ้นรูปอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง	44
3.2.1 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งที่เตรียมได้จากกระบวนการ GISS	44
3.2.2 ผลการทดลองชุบขึ้นรูปและโครงสร้างจุลภาค	46
3.2.2.1 ผลของเวลาในการปล่อยฟองแก๊ส (GISS time)	46
3.2.2.2 ผลของเวลาในการปล่อยทิ้งไว้ (Holding time)	49
3.2.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน (Mechanical properties)	51
3.2.3.1 ค่าความแข็ง (Hardness Rockwell Scale B testing)	55
3.2.3.2 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength testing)	57
3.2.4 ผลการวิเคราะห์รอยแตกผิว (Fracture surface analysis)	59
3.3 กรณีศึกษาการชุบขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนา (billet) ด้วยกรรมวิธีการชุบขึ้นรูปอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง	61
3.3.1 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งที่เตรียมได้จากกระบวนการ GISS	61
3.3.2 ผลการทดลองชุบขึ้นรูปและโครงสร้างจุลภาค	65
3.3.2.1 ผลของเวลาในการปล่อยฟองแก๊ส (GISS time)	65
3.3.2.2 ผลของเวลาในการปล่อยทิ้งไว้ (Holding time) เทียบกับการขึ้นรูปสถานะของเหลวและสภาวะสัดส่วนกึ่งของแข็งต่ำ	69
3.3.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน (Mechanical properties)	72
3.3.3.1 ค่าความแข็ง (Hardness Rockwell Scale B testing)	73
3.3.3.2 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength testing)	75
3.3.4 ผลการวิเคราะห์รอยแตกผิว (Fracture surface analysis)	77

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การทดสอบแรงดัดแบบ3จุดในชิ้นงานข้อเท้าเทียม	81
4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	84
4.1 บทสรุป	84
4.1.1 กรณีศึกษาการทอบขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาว (rod) ด้วยกรรมวิธี การทอบขึ้นรูปอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง	84
4.1.2 กรณีศึกษาการทอบขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนา (billet) ด้วยกรรมวิธี การทอบขึ้นรูปอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง	85
4.1.3 สรุปกระบวนการทอบแบบกึ่งของแข็ง	86
4.2 ข้อเสนอแนะ	86
บรรณานุกรม	88
ภาคผนวก	90
ประวัติผู้เขียน	110

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ราคาเปรียบเทียบกับสินค้านำเข้าจากต่างประเทศ	7
1.2	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C	12
1.3	แสดงสถานะที่ใช้การชุบขึ้นรูป A1 6061	17
2.1	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในงานวิจัยการขึ้นรูป แท่งต้นยาว	21
2.2	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในงานวิจัยการขึ้นรูป ชิ้นงานแผ่น	21
2.3	ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการชุบขึ้นรูปแท่งกระบอกตันใน สถานะกึ่งของแข็งกรณีไม่มีเวลาปล่อยทิ้งไว้	29
2.4	การทดลองชุบขึ้นรูปที่สถานะต่างๆกันตามพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.3	29
2.5	ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการชุบขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็ง กรณีมีเวลาปล่อยทิ้งไว้	30
2.6	การทดลองชุบขึ้นรูปที่สถานะต่างๆกันตามพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.5	30
2.7	ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการชุบขึ้นรูปแผ่นในสถานะกึ่ง ของแข็งกรณีศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการปล่อยฟองแก๊ส	32
2.8	การทดลองชุบขึ้นรูปที่สถานะต่างๆกันตามพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.7	32
2.9	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษากระบวนการชุบขึ้นรูปแผ่นในสถานะกึ่งของแข็งกรณี เปรียบเทียบกับ การขึ้นรูปในสถานะของเหลวและในสถานะสัดส่วนกึ่ง ของแข็งต่ำ	33
2.10	การทดลองชุบขึ้นรูปที่สถานะต่างๆกันตามพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.9	33
3.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงแบบวัฏจักร	44
3.2	ตัวแปรการทดลองหาปริมาณสัดส่วนแข็งเริ่มต้นของอะลูมิเนียมเกรด 7075	45
3.3	แสดงสัดส่วนของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ผลการทดลองชุบขึ้นรูปที่สถานะต่างๆกัน	47

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3.4	ผลการทดลองหุบขึ้นรูปที่สภาวะ GISS +Holding time ที่เวลาแตกต่างกัน	49
3.5	ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบ	55
3.6	แสดงค่าต่างๆในการวัดสัดส่วนของแข็งของแต่ละเงื่อนไข	62
3.7	แสดงสัดส่วนของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ ของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้	64
3.8	ผลการทดลองหุบขึ้นรูปที่สภาวะ GISS ที่เวลาแตกต่างกัน	65
3.9	ผลการทดลองหุบขึ้นรูปที่สภาวะ GISS +Holding time ที่เวลาแตกต่างกันค่า	69
3.10	ความแข็ง (HRB) เฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการทางความ ร้อน	73
3.11	ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆกัน	75
3.12	ค่าที่ได้จากการทดสอบการดัดโค้ง	82
ผ.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงแบบวัฏจักร	95
ผ.2	การอ่านค่าจากสีที่ปรากฏจากกราฟ	99

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	เปอร์เซ็นต์ชนิดของผู้พิการอวัยวะทั่วโลก	2
1.2	แสดงส่วนประกอบของขาเทียมได้เข้า	4
1.3	ชิ้นส่วนโลหะของขาเทียมได้เข้าที่นำเข้าจากต่างประเทศ (บริษัท Ossur)	5
1.4	ตัวอย่างชิ้นส่วนขาเทียมของบริษัทจากต่างประเทศ	6
1.5	ตัวอย่างขาเทียมที่ผลิตภายในประเทศโดยหน่วยงานต่างๆ	7
1.6	โครงสร้างบางส่วนที่นำไปทดสอบ	9
1.7	แสดงลักษณะของการทุบขึ้นรูป	9
1.8	แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปแบบปิด (Closed Die Forging)	10
1.9	การทุบขึ้นรูปสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Rheoforging)	11
1.10	ตัวอย่างการออกแบบแม่พิมพ์	12
1.11	แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปในงานวิจัย แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาว (a) และแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนา (b)	13
1.12	ความเสียหายของแม่พิมพ์ชนิดต่างๆกัน	13
1.13	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมที่มีโครงสร้างเกรนแบบเดนไดรต์ (ซ้าย) แบบโลหะกึ่งของแข็ง (กลาง) และสมบัติการไหลคล้ายไอศกรีมของโลหะกึ่งของแข็ง (ขวา)	14
1.14	แผนภาพสมดุลแสดงช่วงโลหะที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว	15
1.15	การทำงานของกระบวนการ GISS และโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ผลิตได้	15
1.16	Forging (A) and transverse impact extrusion (B) in one tool	18
2.1	ตัวอย่างอินกอทของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในงานวิจัยขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาว (A) งานวิจัยการขึ้นรูปขึ้นงานแผ่น (B)	21
2.2	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการทดลอง	22
2.3	กระบวนการ Gas Induced Semi Solid	24
2.4	โลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างเกรนแบบกึ่งไม้ (A) และแบบไร้กึ่งไม้ (B)	25

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.5	แม่พิมพ์ทองแดง	26
2.6	ขั้นตอนการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็ง (ก) การสร้าง Threshold ด้วยโปรแกรม Photoshop (ข) การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Image Tools	26
2.7	รูปทรงชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปและรูปทรงที่ผ่านการกลึง กัด เป็นชิ้นส่วนขาเทียม	27
2.8	กระบวนการปรับปรุงทางความร้อนแบบ T6 ในชิ้นงานแท่งกระบอกตันยาว	28
2.9	ตัวอย่างชิ้นงานที่ชุบขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาวในสถานะกึ่งของแข็ง	30
2.10	กระบวนการปรับปรุงทางความร้อนของชิ้นงานแผ่นหนาแบบ T6	32
2.11	ตัวอย่างชิ้นงานที่ชุบขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็ง	33
2.12	บริเวณที่ตัดชิ้นงานมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	34
2.13	ชิ้นงานที่ผ่านการตัด	34
2.14	เครื่องขัด 8 นิ้ว (จานคู่)	35
2.15	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและระบบคอมพิวเตอร์	35
2.16	แสดงภาพชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็ง	36
2.17	เส้นทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนผิวชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	37
2.18	เครื่อง Scanning Electron Microscope (a) และเครื่อง Energy Dispersive Spectrometer (b)	37
2.19	ลักษณะการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Test)	38
2.20	เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Scale B และตำแหน่งที่นำไปวิเคราะห์ความแข็งของชิ้นงาน	39
2.21	เครื่องทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง	40
2.22	ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กหล่อตามมาตรฐาน ASTM E8	40

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.23	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงดึง	41
2.24	การทดสอบแบบ three-point loading และแบบ four-point loading	41
2.25	การจัดวางชิ้นงานในการทดสอบการตัด	42
3.1	กราฟแสดงเส้นการเย็นตัว (Cooling curve) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 เมื่อไม่ผ่านกระบวนการ GISS ที่นำมาใช้ในกระบวนการวิจัย	43
3.2	ปริมาตรของรูปทรงแท่งกระบอกตันยาวที่ใช้ในการวิจัย	44
3.3	ชิ้นงานจากแม่พิมพ์ทองแดงและบริเวณตรงกลางเพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้าง	45
3.4	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานและเปอร์เซ็นต์ของแข็งในอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075	45
3.5	แสดงเปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนของแข็งในแต่ละเงื่อนไข	46
3.6	ชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูป	47
3.7	ตำแหน่งชิ้นงานที่นำไปตัดขวาง (A) ชิ้นงานตัดขวางที่นำไปดูโครงสร้างจุลภาค (B)	48
3.8	โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆกัน ของชิ้นงานบริเวณที่ 3 (ไม่มี Holding time)	48
3.9	โครงสร้างจุลภาคที่สถานะปล่อยฟองแก๊ส 10 วินาทีพร้อมทั้งปล่อยทิ้งไว้ 10 วินาที	49
3.10	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่สถานะปล่อยฟองแก๊ส 15 วินาทีพร้อมทั้งปล่อยทิ้งไว้ 5 วินาที	50
3.11	ตำแหน่งที่เกิดการแยกเฟสของของเหลว (a) การทดลองแรก (b) การทดลองที่สอง และเส้นประที่แสดงบริเวณที่นำไปทำเป็นท่อขาเทียม	51
3.12	กระบวนการปรับปรุงทางความร้อนแบบ T6 ของอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งเกรด 7075	51
3.13	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อน (A) และหลัง (B) ผ่านกระบวนการทางความร้อน โครงสร้างยูเทคติกก่อน (C) และหลัง (D) ผ่านกระบวนการทางความร้อน	52
3.14	ภาพถ่าย SEM ของ (a)-(b) อะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการหล่ออัดแบบ SSM (b) ผล EDS ของเฟสสีขาวในขอบเกรน (d) ผล EDS ของเฟสสีดำในขอบเกรน	53

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.15	แสดงผล XRD ของอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็งกึ่งของเหลวด้วยเทคนิค GISS(As-cast) และตัวอย่างที่ผ่านการอบละลายที่ 450°C 1 ชั่วโมง	53
3.16	(a), (c), (e) ภาพถ่าย SEM (b), (d), (f) ผล EDS ของเฟสขอบเกรนที่เหลืออยู่หลังจากอบละลายที่อุณหภูมิ 450 C 1 ชั่วโมง	54
3.17	กราฟแสดงค่าความแข็งก่อนและหลังปรับปรุงทางความร้อน	55
3.18	แอ่งยูเทคติก (a) โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งแอ่งยูเทคติกก่อนทำT6 (b) โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งแอ่งยูเทคติกหลังทำT6 (b)	56
3.19	บริเวณขอบล่าง (a) โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งขอบล่างก่อนทำT6 (b) โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งขอบล่างหลังทำT6 (b)	57
3.20	แสดงการแบ่งส่วนชิ้นงานทดสอบแรงดึง	57
3.21	ลักษณะรอยขาดจากแรงดึง (a) และผิวหน้ารอยขาด (b)	57
3.22	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานก่อนและหลังปรับปรุงทางความร้อน	58
3.23	A-E) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของพื้นผิวรอยแตกชิ้นงานสภาวะ 15s+5s ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง	60
3.24	ลักษณะกลไกการแตกหักตามขอบเกรนในช่วงของการสูญเสียความเหนียว ในขณะที่ร้อนของเหล็กกล้า a-c) เป็นการเกิดขึ้นภายในบริเวณ PFZ d-f) เป็นการเกิดขึ้นภายในบริเวณฟิล์มเฟอร์ไรต์ในช่วงของการเปลี่ยนเฟส	61
3.25	ปริมาณของรูปทรงแผ่นสี่เหลี่ยมหนาที่ใช้ในการวิจัย	62
3.26	ชิ้นงานจากแม่พิมพ์ทองแดงที่นำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	62
3.27	โครงสร้างจุลภาคเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณเฟสของแข็งด้วยโปรแกรม Photoshop และ Image Tool	63
3.28	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนของแข็งในแต่ละเงื่อนไข	64
3.29	แสดงการตัดแบ่งชิ้นงานเพื่อนำไปตรวจสอบและทิศทางการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	66
3.30	ชิ้นงานจริงจากมุมบน (A) และชิ้นงานจริงจากมุมด้านข้าง (B)	66

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.31	จุดบกพร่องระดับมหภาคที่พบในชิ้นงานทอบขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนา	67
3.32	สมมติฐานขนาดของของแข็ง (solid) ในแต่ละเงื่อนไข	68
3.33	แสดงตำแหน่งภาพที่ถ่ายด้วยกล้อง Optical Microscope ในชิ้นงาน	69
3.34	โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆกันของชิ้นงานหมายเลข 6	71
3.35	กระบวนการปรับปรุงทางความร้อนของชิ้นงานแผ่นหนาแบบ T 6	72
3.36	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อน (A) และหลัง (B) ผ่านกระบวนการทางความร้อน โครงสร้างยูเทคติกก่อน (C) และหลัง (D) ผ่านกระบวนการทางความร้อน	72
3.37	ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป (ก) ตำแหน่งที่กดวัดความแข็ง (ข)	73
3.38	เปรียบเทียบค่าความแข็งในแต่ละสภาวะการทดสอบของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน	74
3.39	แสดงการแบ่งส่วนชิ้นงานเพื่อนำไปกลึงทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน	75
3.40	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยม	76
3.41	ลักษณะการวิบัติแบบเปราะ (a) และการวิบัติแบบเหนียว (b)	76
3.42	ผิวรอยแตกชิ้นงานที่ผ่านการทอบขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็งที่สภาวะการปล่อยต่างๆกัน	77
3.43	ภาพถ่ายผิวรอยแตกชิ้นงานที่ผ่านการทอบขึ้นรูปในสภาวะของเหลว	78
3.44	ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึงโดยรวมระหว่างกรขึ้นรูปที่สภาวะของเหลว (a) สภาวะ 3s (b) สภาวะ 10s+20s(c) และสภาวะ 30s(d)	79
3.45	โครงสร้างจุลภาคของ 7075-T651 ก่อนการขึ้นรูปใดๆ	80
3.46	ผิวรอยแตกจากแรงดึง (a) และ dimples ใต้นๆที่กระจายในชิ้นงาน (b)	80
3.47	การนิโคขาดของชิ้นงานเป็นมุม 45° ตามการไหลของระนาบ (glide plane)	80
3.48	ค่าที่ใช้ในการคำนวณการรับแรงดัดในชิ้นงานข้อเท้าเทียม	81
3.49	กราฟแท่งแสดงค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นส่วนข้อเท้าเทียมที่การขึ้นรูปต่างๆกัน	82
3.50	ลักษณะการวิบัติของชิ้นงานภายหลังรับแรงดัด	83
4.1	ตำแหน่งการเกิดการแยกเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทั้ง 2 รูปทรง	84

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ผ.1	ชิ้นงานขาเทียมโลหะได้เข้าชนิดแกนในที่ส่งทดสอบ	93
ผ.2	ท่อขาเทียมที่ผ่านการชุบผิวสีต่างๆ	94
ผ.3	การจัดวางชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบ	94
ผ.4	รูปแบบต่างๆของ Fatigue load	95
ผ.5	แนวในการวางชิ้นงานบนเครื่องทดสอบ	96
ผ.6	ชิ้นงานขณะทดสอบและหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลการทดสอบขาเทียมได้เข้าชนิดแกนในแบบวัฏจักร	98
ผ.7	ตัวแปรวัฏจักรภาระในการทดสอบวัฏจักรแยกสำหรับเท้าเทียมแบบมีข้อและเท้าเทียม	99
ผ.8	กราฟจริงที่ปรากฏหน้าจอคอมพิวเตอร์ขณะทำการทดสอบ	99
ผ.9	ตัวอย่างรูปแบบฉลากแสดงมาตรฐานการใช้งาน	100

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

AK	Above Knee
BK	Below Knee
PVC	Polyvinyl chloride
t	เวลา
T	อุณหภูมิ
GISS	Gas Induced Semi-Solid
fs	Solid fraction
SSF	Semi-Solid Forging
SEM	Scanning Electron Microscope
OES	Optical Emission Spectrometer
T6	การปรับปรุงสมบัติทางความร้อน
OM	Optical Microscope
Zn	สังกะสี
ISO	International Standard
HRB	Hardness Rockwell Scale B
eV	Electron volt
ASTM	American Society for Testing and Materials
σ	ความเค้น
ϵ	ความเครียด
F	แรงกระทำ
A	พื้นที่หน้าตัด
l_i	ความยาวใหม่
l_0	ความยาวเดิม
σ_y	ความเค้นจุดคราก
σ_u	ความเค้นแรงดึงสูงสุด
M	Moment
I	Moment of inertia

บทที่ 1

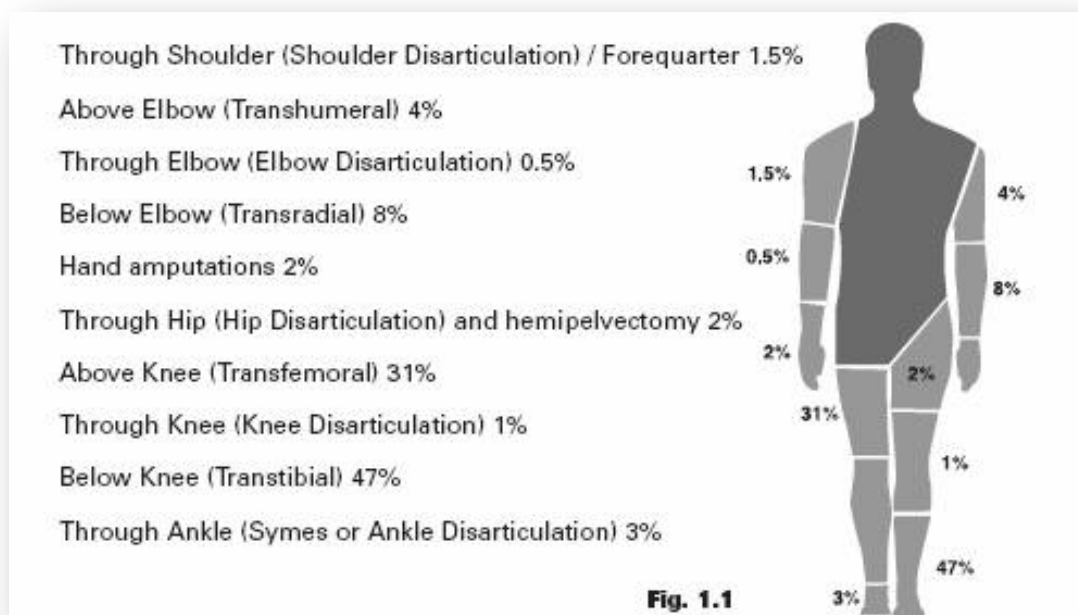
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันมีผู้พิการขาขาดเป็นจำนวนมาก จากสถิติที่มูลนิธิขาเทียมได้รวบรวมในรอบ 8 ปีที่ผ่านมาพบว่าสาเหตุเกิดจากอุบัติเหตุ 40 % เหยียบกับระเบิด 25 % แผลเรื้อรังจากเบาหวาน 15 % ความพิการผิดปกติแต่กำเนิด 10 % และอื่น ๆ (มะเร็ง, ฆูกัด ฯลฯ) 10 % เพราะฉะนั้นการฟื้นฟูสมรรถภาพผู้พิการจะช่วยให้ผู้พิการมีระดับความสามารถสูงขึ้น สามารถช่วยเหลือตนเองและดำรงชีวิตอยู่ในสังคมได้อย่างปกติสุขและมีความสุขตามที่สภาพร่างกายและสังคมจะเอื้ออำนวย ดังนั้นการผลิตขาเทียมที่มีคุณภาพจะสามารถช่วยเหลือในเรื่องที่กล่าวมาได้ แต่เนื่องจากในปัจจุบันการผลิตขาเทียมในประเทศไทยยังต้องมีการนำเข้าวัสดุส่วนประกอบจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง ในขณะที่ผู้พิการส่วนใหญ่เป็นผู้ที่มีรายได้น้อยและถึงแม้ว่าจะมีบางหน่วยงานหรือองค์กรที่ทำการผลิตขาเทียมเพื่อผู้ยากไร้แต่ขาเทียมที่ผลิตได้ส่วนใหญ่ยังมีคุณภาพน้อยกว่าที่นำเข้าจากต่างประเทศทั้งในเรื่องของอายุการใช้งาน ความสบายในการสวมใส่ จากข้อมูลเหล่านี้จึงเป็นที่มาของการวิจัยเพื่อที่จะพัฒนาชิ้นส่วนขาเทียมที่มีคุณภาพสูงเท่าเทียมกับขาเทียมจากต่างประเทศในราคาไม่แพงซึ่งผู้พิการทุกคนมีสิทธิ์ที่จะได้รับ

ขาเทียมมีหลายประเภท จากผลสำรวจพบว่าผู้พิการขาขาดได้เข้ามีจำนวนเกือบครึ่งของผู้พิการส่วนอื่น ๆ รวมกัน โครงการวิจัยนี้จึงเลือกพัฒนาขาเทียมได้เข้ามาก่อนเพื่อเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาขาเทียมประเภทอื่น ซึ่งขาเทียมได้เข้าจากต่างประเทศส่วนใหญ่ประกอบด้วยชิ้นส่วนสองประเภทคือเท้าเทียมอีกส่วนคือแกนขาและข้อต่อต่างๆที่ทำจากอะลูมิเนียมผสม เหตุผลหนึ่งที่ทำให้ชิ้นส่วนขาเทียมที่ทำจากโลหะมีราคาแพงมากคือ การขึ้นรูปชิ้นส่วน โลหะ จำเป็นต้องอาศัยเครื่องจักรใหญ่ในการขึ้นรูปแท่งโลหะในสถานะของแข็งให้มีรูปร่างได้ตามความต้องการ ซึ่งเครื่องจักรดังกล่าวมีราคาสูงมาก หากใช้กรรมวิธีการหล่อทั่วไปก็จะได้ชิ้นงานที่มีสมบัติต่ำกว่าการอัดหรือทุบขึ้นรูป ซึ่งข้อดีของการทุบขึ้นรูปคือตัวชิ้นงานจะมีความแข็งแรงทนทาน เนื่องจากโมเลกุลของส่วนผสมในวัสดุได้ถูกบีบอัดจนรวมตัวกันและในปัจจุบันการขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็งที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวางคือกลุ่มของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น อะลูมิเนียม และ แมกนีเซียม ซึ่งพัฒนากันมาอย่างต่อเนื่องจนได้โลหะผสมที่มีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา อันเป็นผลมาจากแรงผลักดันของอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ต้องการชิ้นส่วนรถยนต์ที่มีน้ำหนักเบา เพื่อให้การใช้

เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากการผลิตภายในประเทศก็มีความแข็งแรงไม่มากนักเมื่อเทียบกับชิ้นส่วนอะลูมิเนียมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ทีมวิจัยมีเทคโนโลยีการขึ้นรูปอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็งที่เรียกว่ากระบวนการ Gas Induced Semi-Solid หรือ GISS ซึ่งสามารถทำให้สามารถขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสมเกรดที่มีความแข็งแรงสูงที่ใช้ในเครื่องบิน โดยการอัดในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว ผลการวิจัยเบื้องต้นของทีมวิจัยพบว่าเทคโนโลยี GISS ทำให้สามารถผลิตชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมเกรด A7075-T6 ที่มีความแข็งแรงเท่ากับเหล็กหล่อ โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการได้ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็งมีศักยภาพในการนำมาผลิตชิ้นส่วนขาเทียมที่มีคุณภาพสูงและราคาถูกลงได้ โครงการวิจัยนี้จะศึกษาและพัฒนาการผลิตชิ้นส่วนขาเทียมได้เข้าที่เป็นโลหะโดยอาศัยการขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็งโดยกระบวนการ GISS เพื่อให้ได้ชิ้นส่วนขาเทียมที่มีคุณภาพเท่ากับขาเทียมที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ



รูปที่ 1.1 เปอร์เซนต์ชนิดของผู้พิการอวัยวะทั่วโลก
(ที่มา: <http://www.prosthesesfoundation.or.th:12/05/53>)

1.2 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การที่จะผลิตชิ้นส่วนขาเทียมโดยเทคโนโลยีการทาบขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็ง ในงานวิจัยจึงต้องมีการศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎีและหลักการที่อาจจะมีผลต่อการทดลองวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.2.1 ขาเทียม

1.2.1.1 ประเภทขาเทียม (วารสารเอ็มเทค, 2548)

1.ประเภทขาเทียมตามตำแหน่งการตัด

1. ขาเทียมแบบเหนือเข่า (Above Knee Prosthesis) เป็นขาเทียมที่ใช้สำหรับคนพิการตัดขา ระดับเหนือเข่า (Above Knee: AK)

2. ขาเทียมแบบใต้เข่า (Below Knee Prosthesis) เป็นขาเทียมที่ใช้สำหรับคนพิการตัดขา ระดับใต้เข่า (Below Knee: AK)

2. ประเภทของขาเทียมตามลักษณะแกนของขาเทียม

1. ขาเทียมแกนนอก (Exoskeleton Prosthesis) เป็นระบบขาเทียมใช้ไม้ หรือโฟมอัดแน่น เป็นแกนขา และหุ้มด้วยพลาสติกเรซิน เพื่อป้องกันการสึกกร่อนและมีความสวยงามคล้ายขาจริง

2. ขาเทียมแกนใน (Endoskeleton Prosthesis) เป็นขาเทียมใช้แกนขาเป็นโลหะ หรือพลาสติกเป็นแกน นอกจากนี้สามารถใช้งานแบบเปลือย หรือหุ้มด้วยโฟมเพื่อความสวยงามก็ได้

3. ความแตกต่างของขาเทียมแบบแกนนอก และขาเทียมแบบแกนใน

1. ขาเทียมแกนนอกจะมีน้ำหนักมากกว่าขาเทียมแกนใน โดยเฉพาะวัสดุแกนขาที่ทำจากไม้

2. ขาเทียมแกนนอกจะใช้ระยะเวลาในการผลิตนานกว่า โดยเฉพาะการแต่งไม้ให้มีรูปทรงที่เหมาะสมกับขา

3. ความคงทนแข็งแรง ขาเทียมแกนนอกจะมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าขาเทียมแกนใน

4. ขาเทียมแกนนอกหากเกิดการแตกหัก หรือเกิดความเสียหายขึ้นกับส่วนประกอบของขาเทียมส่วนใดส่วนหนึ่งจะต้องผลิต ใหม่ทั้งชิ้น เนื่องจากการผลิตเป็นชิ้นส่วนที่ติดต่อกันทุกส่วน ส่วนขาเทียมแกนในสามารถถอดเปลี่ยนได้ จึงเป็นการลดการสิ้นเปลืองทรัพยากร

1.2.2 ขาเทียมใต้เข่า (Below knee prosthesis)

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาขาเทียมใต้เข่า เนื่องจากมีชิ้นส่วนไม่มากนักและไม่ซับซ้อนซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นของการวิจัยและพัฒนาสู่ชิ้นส่วนขาเทียมอื่นๆ ต่อไปในอนาคต ขาเทียมใต้เข่าใช้สำหรับผู้ถูกตัดขาระดับใต้เข่า ที่ยังเหลือเข่าธรรมชาติอยู่ ซึ่งมักมีองค์ประกอบหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

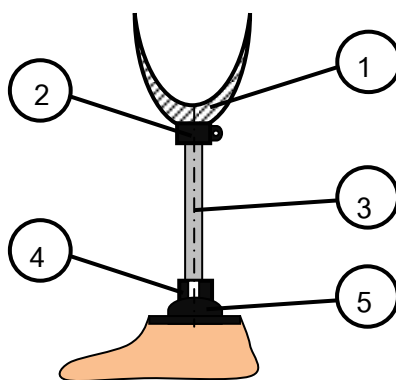
เบ้า : สัมผัสกับทุกส่วนของตอขา มีการรับน้ำหนักที่เอ็นสะบ้าและมีระบบระบายอากาศเพื่อความสบายและลดการติดเชื้อราของตอขา ขอบบนของเบ้าโอบหุ้มข้อเข่าทำให้ไม่ต้องใช้สายรัด

อุปกรณ์ปรับแนว : ช่วยให้ความสะดวกในการปรับแนวระดับระหว่างเบ้าและเท้าเทียม

แกนหน้าแข็ง : เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างเบ้าและเท้าเทียม

เท้าเทียม : รูปร่างเหมือนเท้าจริง สันเท้ายึดหยุ่นรับแรงกระแทกขณะลงส้นและมีแรงส่งขณะยกขาทำให้ประหยัดพลังงานทำให้ผู้พิการเดินได้ไกลขึ้นและเหนื่อยน้อยลง

การยึดติดกับตอขา : ไม่ต้องใช้เข็มขัดรัดแต่ใช้การแต่งขอบบนของเบ้าให้โอบหุ้มรอบเข่า ส่วนประกอบต่าง ๆ ของขาเทียมใต้เข่าที่ผลิตจากโลหะหลัก ๆ มีดังนี้ 1) Socket Adapter 2) Tube Clamp 3) Tube 4) Foot Clamp และ5) Foot Adapter (ดูรูปที่ 1.2 ประกอบ)



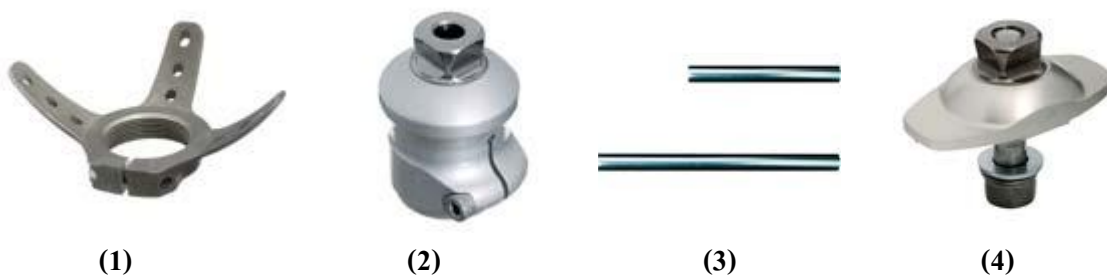
รูปที่ 1.2 แสดงส่วนประกอบของขาเทียมใต้เข่า

1.2.3 ขาเทียมจากต่างประเทศ

ขาเทียมได้เข้าที่นำเข้าจากต่างประเทศมีหลายประเภทด้วยกันขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต ซึ่งแต่ละแห่งก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไปเช่นวัสดุที่ใช้ในการผลิตขาเทียม เป็นต้น ในส่วนของราคาก็จะมีราคาแพงเมื่อเทียบกับขาเทียมที่ผลิตภายในประเทศ แต่คุณภาพที่สูงเป็นที่ยอมรับทำให้ยังมีโรงพยาบาลในประเทศไทยหลายแห่งนำเข้าขาเทียมมาใช้เช่น โรงพยาบาลทหารผ่านศึก และ โรงพยาบาลพระมงกุฎ เป็นต้น

ตัวอย่างส่วนประกอบต่าง ๆ ของขาเทียมได้เข้าที่นำเข้ามีดังนี้ (แสดงในรูปที่ 1.3)

1. Pyramid Tube Clamp ทำจากอะลูมิเนียมหรือสแตนเลส
2. Prong Socket Adapter ทำจากโลหะเช่นเหล็กหรือสแตนเลสเป็นต้น
3. Tube ทำจากอะลูมิเนียม
4. Tube Adapter ทำจากอะลูมิเนียมหรือสแตนเลส
5. Foot Adapter ทำจากอะลูมิเนียมหรือสแตนเลส



รูปที่ 1.3 ชิ้นส่วนโลหะของขาเทียมได้เข้าที่นำเข้าจากต่างประเทศ (บริษัท Ossur) ประกอบด้วย Pyramid (1) Tube Adapter (2) Tube (3) และ Foot Adapter (4)

รูปแบบของขาเทียมที่นำเข้ามีอีกมากมาย จากหลายบริษัท ซึ่งแต่ละรุ่นก็จะแตกต่างกันออกไปทั้งทางด้านราคา วัสดุ และความแข็งแรงทนทาน โดยส่วนใหญ่โลหะที่ใช้ผลิตจะเป็น อะลูมิเนียม ไทเทเนียม หรือ สแตนเลส รูปที่ 1.4 แสดงตัวอย่างของขาเทียมแกนในรูปแบบต่างๆ



บริษัท TiMed

บริษัท Otto Bock

บริษัท Strifeneder

รูปที่ 1.4 ตัวอย่างชิ้นส่วนขาเทียมของบริษัทจากต่างประเทศ

1.2.4 ขาเทียมที่พัฒนาและผลิตในประเทศ

เนื่องจากต้นทุนการนำเข้าขาเทียมได้เข้าที่สูงมากจึงทำให้มีการคิดค้นพัฒนาและประดิษฐ์ขาเทียมต้นทุนต่ำขึ้นมาใช้ในประเทศ ขณะนี้ก็มีมูลนิธิ ชมรม และโรงพยาบาลหลายแห่งได้ประดิษฐ์ขาเทียมต้นแบบและแจกจ่ายให้ผู้พิการในประเทศได้ใช้ เช่น มูลนิธิในสมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนี ชมรมนักพัฒนาอุตสาหกรรมไทย และโรงพยาบาลนราธิวาส เป็นต้น

จุดประสงค์หลักที่พยายามคิดค้นอย่างต่อเนื่องคือเพื่อที่จะเพิ่มความแข็งแรงทนทานให้กับขาเทียมแต่ต้นทุนต่ำ โดยอาจใช้วัสดุรีไซเคิลเช่นทางมูลนิธิได้มีการนำฝากระป๋องซึ่งเป็นอะลูมิเนียมมาหลอมใหม่เพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนต่างๆในขาเทียม เป็นต้น หรือบางชมรมได้ทำแกนขาเทียมโดยการใช้ท่อ PVC เพื่อให้มีราคาถูก รวมถึงผลงานจากทางโรงพยาบาลนราธิวาสที่นำถุงน่องใช้แล้วมาซ้อนกันแล้วเทเรซินก็เป็นอีกทางที่ช่วยลดต้นทุนเนื่องจากวัสดุลงได้

ตัวอย่างขาเทียมได้เข้าที่ผลิตภายในประเทศแสดงในรูปที่ 1.5 ซึ่งมีราคาเปรียบเทียบกับสินค้านำเข้าจากต่างประเทศแสดงตามตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ราคาเปรียบเทียบกับสินค้านำเข้าจากต่างประเทศ

อุปกรณ์ขาเทียม	ชมรมฯ		ทำในประเทศ		นำเข้าจากต่างประเทศ			
					รพ.พระมงกุฎ		รพ.ทหารผ่านศึก	
	ราคา	วัสดุที่ใช้	ราคา	วัสดุที่ใช้	ราคา	วัสดุที่ใช้	ราคา	วัสดุที่ใช้
1. เท้าเทียม	180	พอลิเมอร์	200	ยางพารา	2,000	พอลิเมอร์	1,680	พอลิเมอร์
2. ชุดข้อต่อได้เข้า (Modular)	650	โลหะ	600	พลาสติก	8,600	โลหะ	7,000	โลหะ
3. ขาเทียมชนิดได้เข้า	1,500	แกนโลหะ	1,000	แกนพลาสติก	24,900	แกนโลหะ	10,900	แกนโลหะ



รูปที่ 1.5 ตัวอย่างขาเทียมที่ผลิตภายในประเทศโดยหน่วยงานต่างๆ

1.2.5 การทดสอบขาเทียมตามมาตรฐานกายอุปกรณ์เทียม ISO 10328 (Prosthetics structural Testing of lower-limb prostheses)

การทดสอบมาตรฐานของกายอุปกรณ์เทียม เป็นการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวัสดุที่ผลิต คุณภาพการใช้งาน โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ทาง คือ

1.2.5.1 การทดสอบทางวิศวกรรม เป็นการทดสอบเพื่อควบคุมคุณภาพของชิ้นงานที่ทำการวิจัยว่ามีความปลอดภัย และแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งานจริงหรือไม่ ประกอบด้วย

- การทดสอบการรับแรงสถิต และทดสอบซ้ำๆ ถือเป็น การทดสอบโครงสร้างหลัก เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันความแข็งแรงของโครงสร้าง เมื่อเกิดการรับแรงสูงสุด และเมื่อใช้ไปเป็นระยะเวลานานๆ

- การทดสอบโครงสร้างย่อยแบบสถิตในส่วนของการรับแรงบิด เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันความแข็งแรงของชิ้นงานขณะรับแรงบิด

- การทดสอบความแข็งแรงสถิตสูงสุดย่อยในช่วงการงอเข้ามากที่สุดของข้อเท้าและชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันความแข็งแรงของข้อเท้าเทียมและชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องในกรณี การงอเข้าหรือทำการนั่งยอง

- การทดสอบย่อยบนชุดกลไกล็อกข้อเท้า เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันความแข็งแรงของข้อเท้าเทียม ในกรณีลงน้ำหนักของสันเท้าที่พยายามก่อให้เกิดการงอของข้อเท้าในขณะที่เข้ามีการล็อก เมื่อเกิดการยึดมากที่สุด

1.2.5.2 การทดสอบทางการแพทย์ แบ่งเป็น 2 ลักษณะการทดสอบดังนี้

- กิจกรรมพื้นฐานได้แก่ การนั่ง การลุกจากเก้าอี้ เดินภายในอาคาร เดินภายนอกอาคาร พื้นเรียบ เดินขึ้น-ลงบันได โดยเกาะราวบันได เดินขึ้น-ลงขอบทาง/พุดบาท

- กิจกรรมขั้นสูงได้แก่ เกือบของที่พื้นขณะยืน ลุกจากพื้น เดินภายนอกอาคารพื้นไม่เรียบ เดินขึ้น-ลงบันไดโดยไม่เกาะราวบันได

เมื่อพิจารณาขาเทียมได้เข้าเกณฑ์ในทิศทางกลุ่มวิจัยขึ้นรูปได้ พบว่าสามารถนำไปใช้ในการทดสอบมาตรฐาน ISO 10328 ได้ในหัวข้อ โครงสร้างแยกส่วนที่ประกอบไปด้วยข้อเท้าหรือเท้าเทียมแต่ไม่มีข้อเท้าเทียม โดยจะต้องผ่านการทดสอบโครงสร้างรวมและโครงสร้างแยกส่วนในส่วนของข้อเท้าเทียม การทดสอบทั้งหมดจะกำหนดตัวแปรการทดสอบภายใต้น้ำหนักของผู้ป่วยที่นำไปใช้โดยในงานวิจัยนี้กำหนดค่าน้ำหนักผู้ป่วยที่นำไปใช้คือไม่เกิน 100 กิโลกรัม

(ที่มา: International Standard Ref.No.ISO10328, 2006)



โครงสร้างบางส่วน



ข้อเท้าเทียม

รูปที่ 1.6 โครงสร้างบางส่วนที่นำไปทดสอบ

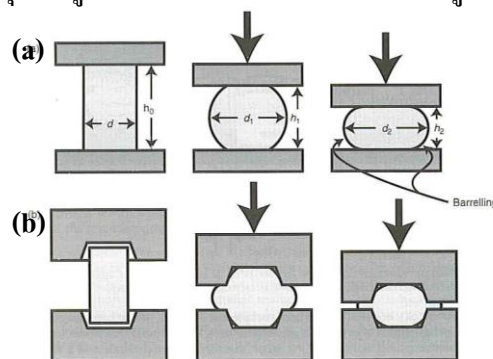
1.2.6 การทุบขึ้นรูป (Forging)

การทุบขึ้นรูป (Forging) คือการผลิตชิ้นงานจากโลหะในสถานะของแข็งโดยการทุบหรืออัดด้วยความเร็วสูงหรือแรงสูง โดยปกติกระบวนการทุบขึ้นรูปจะทำงานเป็นขั้นตอนโดยค่อยๆ ทุบจนเป็นรูปร่างตามต้องการ ชิ้นงานที่ผลิตโดยการทุบขึ้นรูปจะมีเนื้อแน่นและละเอียด มีคุณสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรง ความเหนียวดี ข้อดีของการทุบขึ้นรูป คือตัวชิ้นงานจะมีความแข็งแรงทนทาน เนื่องจากโมเลกุลของส่วนผสมในวัสดุได้ถูกบีบอัดจนรวมตัวกันแน่น แต่ทว่าการทุบขึ้นรูปก็มีข้อเสียเช่นกัน ซึ่งก็ยังมีต้นทุนในการผลิตที่สูงคือแม่พิมพ์ที่ใช้อัดขึ้นรูปมีราคาแพงและมีขีดจำกัดในการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างหลากหลาย

การทุบขึ้นรูปสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะแม่พิมพ์ดังนี้

1. แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปแบบเปิด
2. แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปแบบปิด

ลักษณะของการทุบขึ้นรูปโลหะของทั้งสองชนิดแสดงดังรูปที่ 1.7



(a) แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปแบบเปิด

(b) แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปแบบปิด

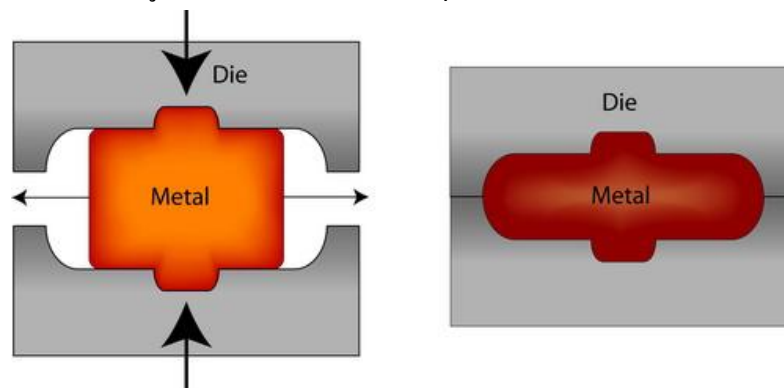
รูปที่ 1.7 แสดงลักษณะของการทุบขึ้นรูป

(Handbook of metal forming, 1919)

ในการวิจัยนี้จะศึกษาการขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบปิดเท่านั้น รายละเอียดทั่วไปมีดังนี้

1.2.6.1 แม่พิมพ์ทอบขึ้นรูปแบบปิด (Closed - die Forging)

การทำงานของแม่พิมพ์แบบปิด จะเป็นการนำวัสดุไปทอบขึ้นรูป ระหว่างแม่พิมพ์ที่มีโพรง (Cavity) อยู่ภายในระหว่าง Die ทั้งสองด้านแสดงดังรูปที่ 1.8 ในระหว่างการตีขึ้นรูปจะเป็นการเปลี่ยนรูปร่างไปตามรูปร่างที่บังคับวัสดุจะไหลออกไปตามพอร์มเป็นครีบ (Flash) ขึ้นออกมารอบชิ้นงาน ครีบเป็นสิ่งสำคัญในการไหลตัวของวัสดุ ในการตีขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์แบบปิดครีบที่บางจะเย็นตัวอย่างรวดเร็วและด้านทานให้เกิดความฝืดในการไหลตัวด้วย การบังคับวัสดุในช่องว่างของแม่พิมพ์ ต้องใช้แรงกดดันสูงเพื่อช่วยเสริมให้เนื้อวัสดุเต็มในช่องว่างของแม่พิมพ์



รูปที่ 1.8 แม่พิมพ์ทอบขึ้นรูปแบบปิด (Closed Die Forging)

(Lecture note, Sheffield University, 2003)

1.2.6.2 การคำนวณแรงที่ใช้ในการทอบขึ้นรูป (Calculation of forging loads)

พลังงานรวมที่ใช้ในการทอบขึ้นรูปแสดงด้วยสมการ

$$U_{\text{total}} = U_{\text{ideal}} + U_{\text{friction}} + U_{\text{redundant}}$$

ประสิทธิภาพหาได้จากสมการ

$$\eta = U_{\text{ideal}} / U_{\text{total}}$$

โดย $\eta = 0.3-0.6$ สำหรับงานอัดรีดขึ้นรูป

$= 0.75-0.95$ สำหรับงานรีดขึ้นรูป

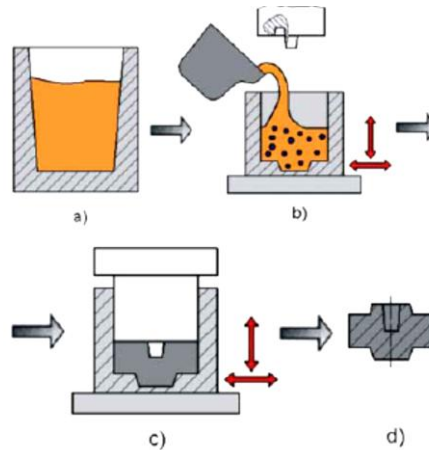
$= 0.10-0.20$ สำหรับงานทอบขึ้นรูปแบบปิด

การคำนวณแรงที่ใช้ในการทอบขึ้นรูปจะแบ่งออกได้เป็น 3กรณีขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานคือ

- In the absence of friction
- Low friction condition (lower bound analysis or sliding condition)
- High friction condition (sticky friction condition)

1.2.6.3 การทอขึ้นรูปสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Semi-Solid Forging)

การทอขึ้นรูปสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวคือ การเทโลหะลงในแม่พิมพ์ในขณะที่โลหะมีสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว แล้วใช้ Punch ทออัดด้วยแรง หรือความดันสูงแสดงดังรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 การทอขึ้นรูปสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Rheoforging)

(Vasile George Cioata, 1993)

1.2.6.4 การเปรียบเทียบระหว่างการทอขึ้นรูปแบบปกติ (Conventional forging) กับการทอขึ้นรูปในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Semi-Solid forging) [11]

การทอขึ้นรูปแบบปกติ (Conventional forging) เป็นการทอขึ้นรูปชิ้นงานในสถานะของแข็งเนื่องจากต้องใช้แรงในการขึ้นรูปสูงและแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทอขึ้นรูปมีราคาค่อนข้างแพงจึงไม่นิยมนำมาขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่และมีรูปร่างซับซ้อนการทอขึ้นรูปในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Semi-Solid forging) จึงมีข้อได้เปรียบในงานการผลิตบางชนิดที่การทอขึ้นรูปไม่สามารถทำได้ เช่น

- งานที่ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปต่ำกว่า
- งานที่ต้องขึ้นรูปชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็ก
- งานที่ต้องการขึ้นรูปร่างที่ซับซ้อน(มีการเจาะ, การเจาะรู, มีกึ่งก้าน สาขา, ขอบแหลม, มุมแหลม เป็นต้น)
- ใช้ได้กับช่วงโลหะผสมที่กว้างกว่าทั้งแบบโลหะเปราะไปจนถึงความแข็งแรงสูง
- งานที่ต้องการครีบกและของแข็งที่ฝังในชิ้นงานน้อยหรือแทบไม่มีเลย

จะเห็นได้ว่าการทอขึ้นรูปในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวมีเป้าหมายคือให้ได้ชิ้นงานที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีโครงสร้างเกรนกลมโดยปราศจากรอยตำหนิ หรือโพรงอากาศ

1.2.7 วัสดุแม่พิมพ์และการออกแบบแม่พิมพ์ปิด

(Die material and closed – die design)

วัสดุแม่พิมพ์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ทำมาจาก S45C เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง มีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1.2

S45C	C	Si	Mn	P	S
	0.42-0.48	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030max.	0.035max.

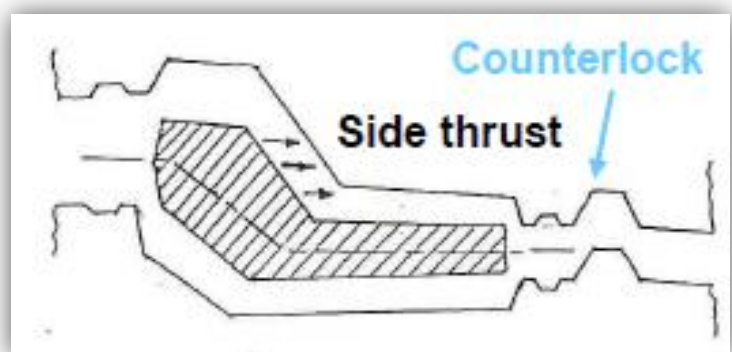
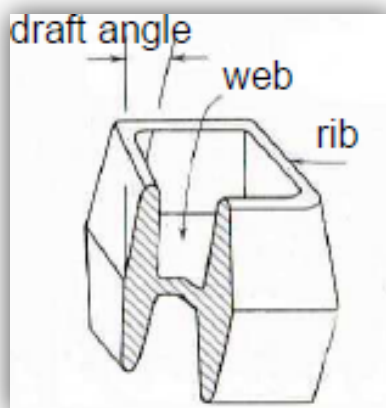
ตารางที่ 1.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C

(ที่มา: <http://chanasteel.com/spec/carbon.htm>)

คุณสมบัติและการใช้งาน ชุบแข็งง่าย ทนการเสียดสีดี แข็งแรงสูง เหมาะสำหรับทำชิ้นส่วนพื้นฐาน หรือ โครงสร้างแม่พิมพ์และงานทั่วไป

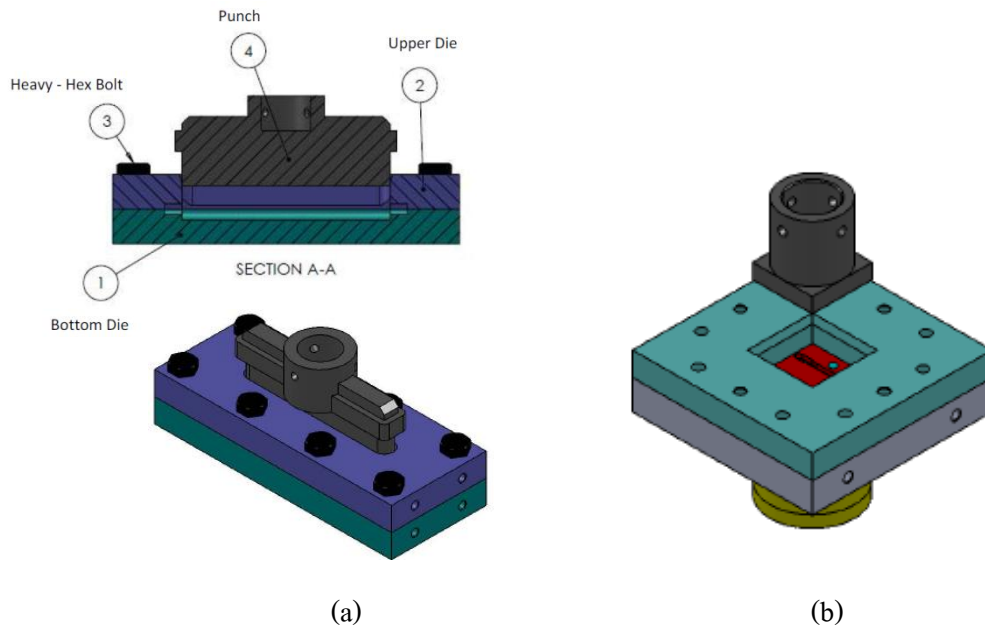
การออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับทาบขึ้นรูป มีหลักโดยทั่วไปดังนี้

- ควรออกแบบให้เนื้อโลหะไหลได้อย่างราบเรียบที่สุด (smooth flow)
- ควรออกแบบให้มีครีบน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ (minimum flash)
- Draft allowance ควรค่าประมาณ 3° - 5° สำหรับภายนอกและ 7° - 10° สำหรับภายใน
- แม่พิมพ์กับมุมที่เบี่ยงเบนควรมีตัวล็อกกัน (countlock) เพื่อการเลื่อน ไหลของแม่พิมพ์



รูปที่ 1.10 ตัวอย่างการออกแบบแม่พิมพ์

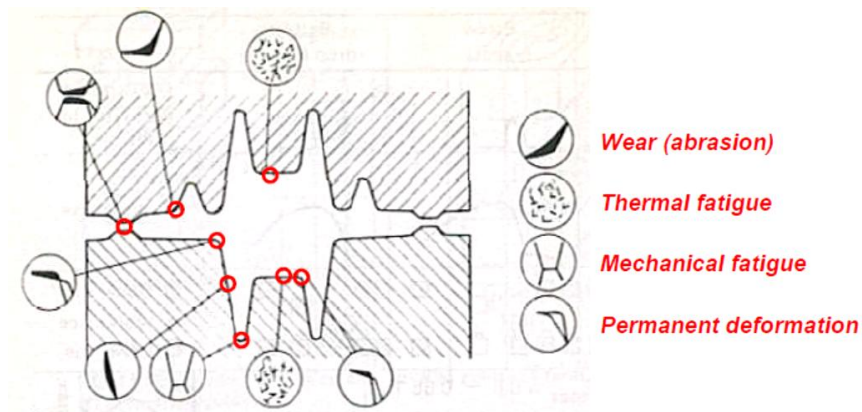
(Handbook of metal forming, 1919)



รูปที่ 1.11 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปในงานวิจัย แม่พิมพ์ทُبขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาว (a) และแม่พิมพ์ทُبขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนา (b)

1.2.8 การวิเคราะห์ความเสียหายของแม่พิมพ์ (Die failures)

การออกแบบแม่พิมพ์สำหรับใช้ในงานทُبขึ้นรูปโดยทั่วไป นอกจากภาระด้านแรงกระทำทั้งแรงดึง (Tension) แรงกด (Compressive) และแรงกระแทก (impact) ความเสียหายของแม่พิมพ์อาจเกิดได้จากอีกหลายกรณี เช่นการสูญเสียสภาพผิวแข็งจากการถูกกระทำด้วยความร้อนซ้ำ การเกิด decarburizing ในบริเวณที่ได้รับความร้อนสูงมากติดต่อกันเป็นเวลานาน การเกิดความล้า (fatigue) จนกระทั่งเกิดความเสียหายแบบคืบ

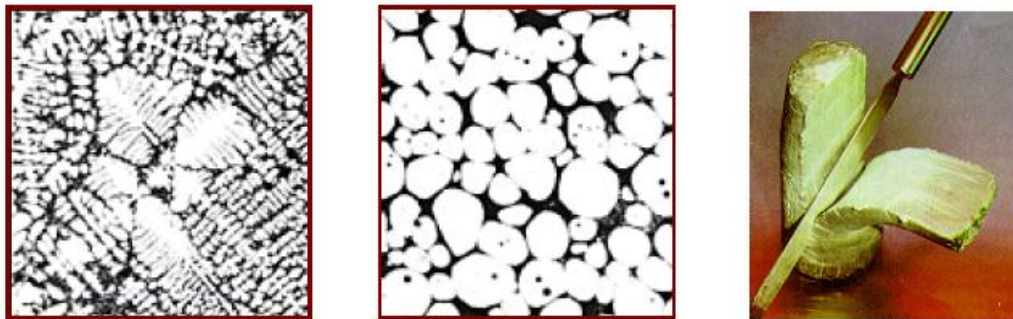


รูปที่ 1.12 ความเสียหายของแม่พิมพ์ชนิดต่างๆกัน

(Handbook of metal forming, 1919)

1.2.9 การขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Forming, SSM) [9]

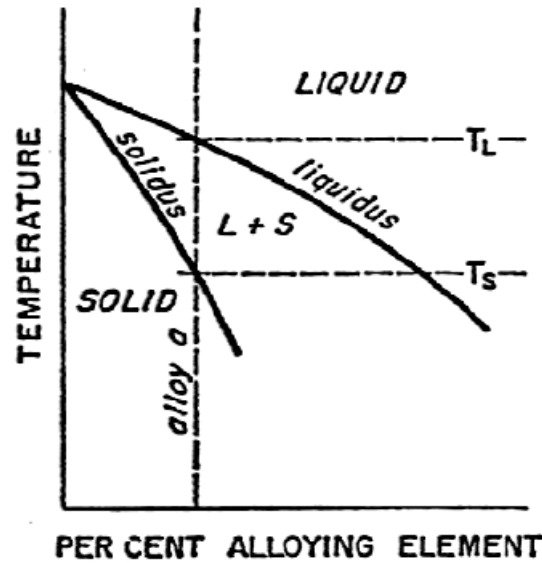
โลหะกึ่งของแข็งคือโลหะที่อยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวโดยที่โลหะส่วนที่แข็งตัวแล้ว มีโครงสร้างเกรนไม่เป็นแบบเดนไดรต์ (Non-dendritic grain) หรือเรียกว่าเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ globular grain) ดังแสดงในรูปที่ 1.13 (รูปกลาง) โดยที่เกรนก้อนกลมที่ลอยอยู่ในน้ำโลหะนี้ทำให้ SSM มีความหนืดมากกว่าน้ำโลหะหลายเท่า ซึ่งทำให้การไหลเข้าในแม่พิมพ์ราบเรียบกว่าการเทน้ำโลหะและการที่โลหะอยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายกว่าของแข็งหลายเท่า ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องจักรกำลังสูงในการผลิต สมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการอัดรีดจะสูงใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ทุบขึ้นรูป



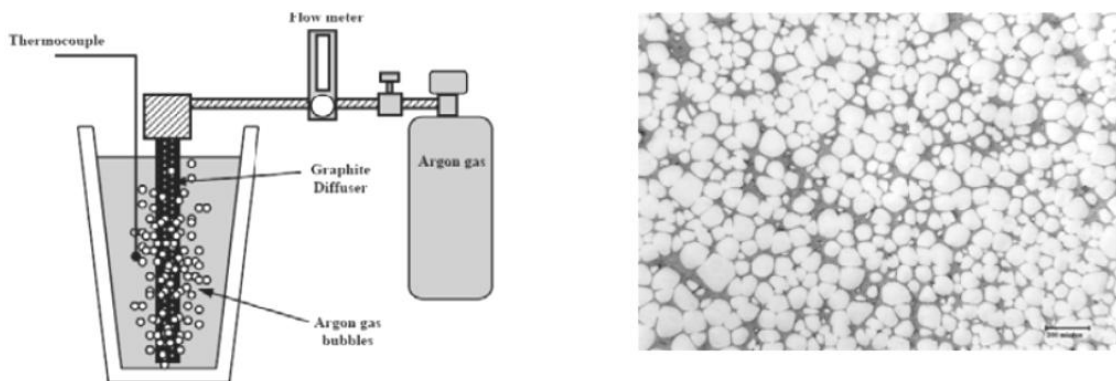
รูปที่ 1.13 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมที่มีโครงสร้างเกรนแบบเดนไดรต์ (ซ้าย) แบบโลหะกึ่งของแข็ง (กลาง) และสมบัติการไหลคล้ายไอศกรีมของโลหะกึ่งของแข็ง (ขวา) (เจษฎา วรรณสินธุ์, 2006)

1.2.10 กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส (Gas Induced Semi Solid, GISS)

กระบวนการ GISS ได้ถูกคิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นโดย เจษฎา วรรณสินธุ์ และคณะ ซึ่งอยู่ระหว่างการยื่นจดสิทธิบัตรในประเทศไทยและในต่างประเทศ กระบวนการ GISS ทำงานโดยใช้การปล่อยแก๊สเฉื่อยเช่น แก๊สไนโตรเจนผ่านแท่งแกร์ไฟต์พรมในปริมาณที่น้อยมาก เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะในขณะที่โลหะแข็งตัวทำให้เกิดโลหะกึ่งของแข็งขึ้น รูปที่ 1.14 แสดงการทำงานของกรรมวิธีนี้และโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ผลิตได้ กระบวนการ GISS กำลังถูกพัฒนานำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมต่างๆ



รูปที่ 1.14 แผนภาพสมดุลแสดงช่วงโลหะที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว



รูปที่ 1.15 การทำงานของกระบวนการ GISS และ โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ผลิตได้

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lee Sang Yong และคณะ (2001) ได้ทำการวิจัยในหัวข้อการแสดงลักษณะเฉพาะของอลูมิเนียมผสมเกรด 7075 หลังจากการผ่านกระบวนการทอบขึ้นรูปเย็น โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal) ในการทดลองนี้จะใช้วิธีการ SIMA (Strain Induced Melt Activated) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำให้เกรนเสียรูปและกลายเป็นเกรนกลม เพื่อจะศึกษาคุณลักษณะของ holding time, holding temperature และ cold working ratio ว่าค่าใดให้ผลดีที่สุดแล้วจึงนำเอาคุณลักษณะเฉพาะของ Semi-Solid Forging ที่ได้ไปเปรียบเทียบความแตกต่างกับ Hot Forging ธรรมดา % เมื่อได้ค่าตัวแปรที่ดีที่สุดในการทดลองนี้ครบ 3 ค่าที่ต้องการแล้ว (590 °C, 52%, 30s) จึงนำชิ้นงานไปขึ้นรูป Semi-Solid Forging แล้วนำผลไปวิเคราะห์ เปรียบเทียบระหว่างการขึ้นรูปแบบ Semi-Solid Forging กับ Hot Forging ธรรมดา พบว่า Semi-Solid Forging สามารถสร้างรูปร่าง

ซับซ้อนได้โดยที่ใช้แรงในการขึ้นรูปที่ต่ำกว่า แม้ว่าความแข็งหลังจากการทำ Semi-Solid Forging จะลดลงมากกว่า แต่หลังทำ T6 พบว่าค่ากลับมาก่อนข้างเท่ากัน

S.chayong และคณะ (2004) ได้ทำการวิจัยในหัวข้อการขึ้นรูป Al 7075 โดยกรรมวิธี Thixoforming ทำการศึกษาการขึ้นรูปโดยการกำหนดอุณหภูมิเพื่อต้องการที่ให้ ชี้นงานกึ่งของแข็งมี %ของเฟสของเหลวอยู่ในช่วง30-50% ค่าที่กำหนดจากตารางนำไปวิเคราะห์ในส่วนต่างๆกันคือ

(1) Single-step นำไปวิเคราะห์ดูโครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบกับThree-step ผลของการวิเคราะห์การใช้Single-step พบว่าเกิดปัญหาที่ทั้ง3 อุณหภูมิ ปัญหาส่วนใหญ่ได้แก่การเกิด turbulent flow, oxide layer, shrinkage porosity เป็นต้น ในขณะที่Three-step ให้ชิ้นงานที่มีลักษณะดีกว่ามาก

(2) Three-step แบบ (a) (b) และ (c) จะนำไปวิเคราะห์ในเรื่องของความเร็ว Ram ที่ใช้ว่าความเร็วเท่าใดให้ผลดีที่สุด จากผลการทดลองพบว่าความเร็วที่ดีที่สุดคือ750 mm/s ในขณะที่1000 mm/sจะมีผลให้ชิ้นงานเกิด defect

(3) Three-stepแบบ (d) จะใช้ศึกษาผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์และวัสดุแม่พิมพ์เทียบกับ graphite dies ซึ่งพบว่าให้ผลไม่ต่างกัน

W.Y.Kim และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนของเหลว และอุณหภูมิ ของการหลอมโลหะ โดยโลหะที่ใช้คืออะลูมิเนียมเกรด2024 6061 และ 7075 นำมาหลอมให้อยู่ในสภาวะกึ่งของแข็ง และนำไปทำการทอบขึ้นรูปในแม่พิมพ์แบบปิด (closed die forging) เพื่อศึกษารูปร่างของชิ้นงาน จากการศึกษารูปร่างของชิ้นงาน พบว่าอุณหภูมิในการหลอมโลหะมีผลต่อปริมาณสัดส่วนของเหลวและรูปร่างของชิ้นงาน เช่น ในปริมาณสัดส่วนของเหลวเท่ากับ 0.5 ของโลหะอะลูมิเนียมเกรด7075 ใช้อุณหภูมิในการหลอมที่ต่ำกว่า โลหะอะลูมิเนียมเกรด2024 6061 และในปริมาณสัดส่วนของเหลว ของโลหะอะลูมิเนียมเกรด 7075คือ 0.2 0.5 และ0.6 รูปร่างของชิ้นงานจะมีความสมบูรณ์ที่ปริมาณสัดส่วนของเหลวเท่ากับ0.5

C.G Kang และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษา การขึ้นรูปโลหะ โดยการทอบขึ้นรูป โลหะอะลูมิเนียมเกรด7075ในสภาวะต่างๆที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานโดยการ นำโลหะอะลูมิเนียมเกรด7075 มาผ่านกระบวนการ Electromagnetic stirring ที่อุณหภูมิ 625 °C (Solid fraction 35%) และอุณหภูมิ 615 °C (Solid fraction 50%) โดยแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปคือ 170,200,220และ 250 MPa พบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิ 625 °C (Solid fraction 35%) จะให้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูงสุด เท่ากับ 404 MPa ใช้แรงในการขึ้นรูป 220 MPa ส่วนที่สภาวะอุณหภูมิ 615 °C (Solid fraction 50%)ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูงสุดใช้แรงในการขึ้นรูป 200 MPa

S.M.Lee และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและแรงที่ใช้ในการทุบขึ้นรูปต่อรูปร่างและโครงสร้างของชิ้นงาน โลหะอะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่ผ่านการทุบขึ้นรูปในสถานะกึ่งแข็งโดยทำการทุบขึ้นรูปที่สภาวะต่าง ๆ กันดังที่แสดงในตารางที่ 1.3 ด้วยแม่พิมพ์แบบปิด จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาศึกษาโครงสร้างจุลภาค

ตารางที่ 1.3 แสดงสภาวะที่ใช้การทุบขึ้นรูป Al 6061

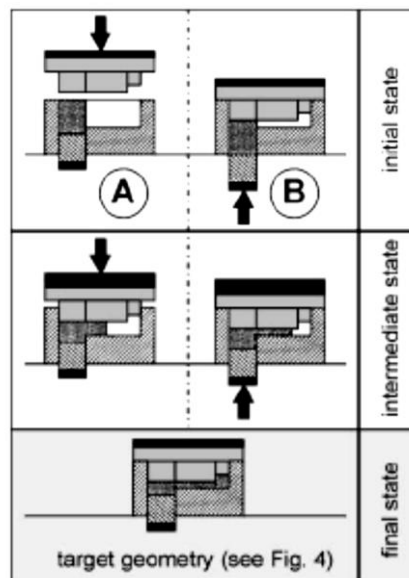
No.	Pouring temperature (°C)	Stirring current (A)	Forging pressure (MPa)	Holding time (s)
1	647	60	80	20
2	647	60	100	20
3	647	60	120	20
4	647	60	150	20
5	647	60	170	20
6	647	60	200	20
7	647	60	220	20
8	645	60	150	20
9	645	60	170	20
10	645	60	200	20
11	645	60	220	20
12	645	60	250	20
13	640	60	150	20
14	640	60	170	20
15	640	60	200	20
16	640	60	220	20
17	640	60	250	20
18	637	60	220	20
19	640	60	220	20
20	645	60	220	20
21	647	60	220	20
22	651	60	220	20

ผลจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานพบว่า รูปร่างของชิ้นงานจะมีความสมบูรณ์ที่สุดในสภาวะที่ 7 โดยโครงสร้างของชิ้นงานจะมีการอัดตัวแน่นที่สุด ดังนั้นแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปของชิ้นงานจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน นอกจากนี้ ทางทีมวิจัยของ S.M.Lee ได้เลือกใช้ stirring current = 60A จะให้โครงสร้างจุลภาคที่ค่อนข้างกลม และเมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานได้พักแม่พิมพ์ค้างไว้ 20 วินาทีเพื่อให้ชิ้นงานมีเวลาในการจับตัวเป็นรูปร่างตามแม่พิมพ์ก่อนที่จะยกแม่พิมพ์ขึ้น

G.Vaneetveld และคณะ (2008) ใช้การทดสอบการอัดรีด (ความเร็วคงที่) บนชิ้นงาน Al 7075 ที่ผ่านการขึ้นรูป Thixoforging โดยการใช้ตัวแปรที่ต่าง ๆ กัน 4 ชนิดคือ Semisolid material temperature (580°C, 600°C และ 610°C), Tool lubricant coating (Ceraspray และ Boron Nitride), Material flow speed (Low speed และ High speed), Tool temperature พบว่าอุณหภูมิของ Semisolid ดีที่สุดที่ 600°C ซึ่งให้การไหลแบบ laminar โดยปราศจากลักษณะการบิดแบบของเหลว Ceraspray จะช่วยลด thermal exchange ระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ ในขณะที่ Boron Nitride จะช่วยลดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป การใช้ Low speed จะพบรอยแตกน้อย ในขณะที่ High speed ช่วยลดแรง

ในการขึ้นรูป สุดท้ายคืออุณหภูมิของแม่พิมพ์พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมของแม่พิมพ์อยู่ที่ 100°C ซึ่งจะช่วยลดการเกิดคลื่นบนผิวของวัสดุ

R.kopp และคณะ (2001) ได้ทำการทดลองขึ้นรูป Sn-15% Pb alloy โดยกรรมวิธีที่คล้ายคลึงกัน 2 กรรมวิธีคือ Thixoforging และ Thixo transverse impact extrusion ดังแสดงในรูปที่ 1.14 ผลการทดลองพบว่า การขึ้นรูปแบบ Thixoforging จะใช้ความดันในการขึ้นรูปโดยเฉลี่ยสูงกว่าแต่ จะเกิด Segregation น้อยกว่า และให้คุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า (yield stress 313 MPa, 12.1% elongation)



รูปที่ 1.16 Forging (A) and transverse impact extrusion (B) in one tool

งานวิจัยทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า กระบวนการทุบขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Forging) ในอะลูมิเนียมสามารถทำได้ และให้คุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการขึ้นรูปปกติ แต่จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยที่ต้องควบคุมตัวแปรให้เหมาะสม เช่น เวลาในการจุ่มแท่งแม่พิมพ์ ปริมาณสัดส่วนของแข็ง อุณหภูมิของแม่พิมพ์ แรงที่ใช้ในการทุบขึ้นรูป และสารหล่อลื่นแม่พิมพ์ ดังนั้นในโครงการวิจัยชิ้นนี้ จะศึกษาถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม เพื่อพัฒนากระบวนการทุบขึ้นรูปโลหะผสมแบบกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะ และการทดสอบชิ้นงานที่ได้ตามมาตรฐานกายอุปกรณ์เทียมเพื่อตัดสินใจในการนำไปใช้ต่อไป

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาชิ้นส่วนโลหะต้นแบบในขาเทียมได้เข้าที่มีคุณภาพสูงและราคาไม่แพง ซึ่งจะช่วยลดมูลค่าการนำเข้าของประเทศ และจะช่วยให้ผู้พิการทุกคนเข้าถึงขาเทียมที่มีคุณภาพสูงได้
2. เพื่อพัฒนากระบวนการทาบขึ้นรูป ด้วยเทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็งในการผลิตชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมซึ่งจะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ในการผลิตชิ้นส่วนทางการแพทย์ที่เบาและแข็งแรงอื่นๆได้ต่อไป
3. เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆในการทาบขึ้นรูปเช่น เวลาในการจุ่มแท่งแกรไฟต์ สัดส่วนของแข็งของโลหะกึ่งของแข็ง, อุณหภูมิของแม่พิมพ์, ความเร็วในการขึ้นรูปสารหล่อลื่น,แม่พิมพ์ เป็นต้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
4. เพื่อศึกษาการนำชิ้นส่วนขาเทียมต้นแบบไปใช้งานจริงโดยอิงตามมาตรฐานการทดสอบกายอุปกรณ์เทียม ISO 10328

1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เน้นการพัฒนากระบวนการทาบขึ้นรูปสำหรับอะลูมิเนียมผสมด้วยเทคโนโลยี โลหะกึ่งของแข็ง ซึ่งมีขอบเขตรวมถึง การออกแบบแม่พิมพ์ การกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมในการทาบขึ้นรูปซึ่งได้แก่ เวลาในการจุ่มแท่งแกรไฟต์ ปริมาณสัดส่วนของแข็ง อุณหภูมิของแม่พิมพ์ แรงที่ใช้ในการทาบขึ้นรูป สารหล่อลื่นแม่พิมพ์ เป็นต้น วิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากการทาบขึ้นรูป ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้ การทดสอบชิ้นงานที่ได้ตามมาตรฐานกายอุปกรณ์เทียมและทำการวิเคราะห์ต้นทุนเพื่อตัดสินใจในการนำไปใช้ต่อไป

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชิ้นส่วนโลหะจากการทาบขึ้นรูปโดยใช้เทคโนโลยีโลหะกึ่งของแข็งแบบ GISS
2. ได้กระบวนการขึ้นรูปอะลูมิเนียมที่มีน้ำหนักเบาและแข็งแรงสูง ซึ่งสามารถนำไปผลิตชิ้นส่วนโลหะ ต่างๆในทางการแพทย์ เช่น ขาเทียมเหนือเข่า รถเข็น ไม้เท้า แขนเทียม มือเทียม เป็นต้น หรือนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ จักรยาน หรือ ชิ้นส่วนทางการแพทย์ เป็นต้น
3. ได้ข้อมูลพื้นฐานของกระบวนการทาบขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับอะลูมิเนียมผสมโลหะกึ่งของแข็งเกรด 7075 เพื่อให้ได้ความแข็งแรงและความเหนียวตามที่ต้องการ และเหมาะสมกับสภาวะงานที่นำไปใช้

4. องค์ความรู้ที่ได้สามารถนำไปถ่ายทอดให้กับอุตสาหกรรมที่มีความสนใจเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมด้านต่างๆที่เกี่ยวข้องได้ต่อไป

1.7 สถานที่ทำการวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
สงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

ศูนย์สิรินธรเพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพทางการแพทย์แห่งชาติ ช.บาราศนราดรุ
ณ.ติวานนท์ ต.ตลาดขวัญ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ระเบียบขั้นตอนการวิจัย ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อการวิเคราะห์ โครงสร้างทางจุลภาคและขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกลต่าง ๆ

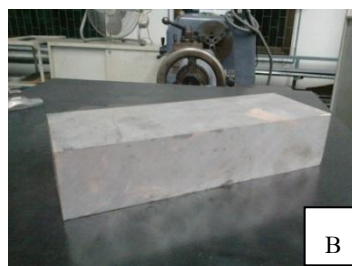
2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

โลหะผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คืออะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 เนื่องจากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงาน 2 รูปทรงในการวิจัยไม่ได้ทำในช่วงเวลาเดียวกัน โดยการวิจัยเริ่มที่ศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาว (rod) ก่อนแล้วจึงศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปชิ้นงานแผ่น (billet) ทำให้ต้องใช้อินกอตเริ่มต้นจากแหล่งที่มาต่างกัน ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 วิเคราะห์ด้วย Optical Emission Spectrometer (OES) และลักษณะของอินกอต (ingot) เริ่มต้นที่ใช้แสดงดังรูปที่ 2.1 ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในการวิจัยการขึ้นรูปแท่งตันยาว

ธาตุ (Element)	Zn	Mg	Cr	Cu	Si	Fe	Mn	Al
ส่วนผสมทางเคมี (Wt %)	5.18	1.82	0.21	1.42	0.36	0.37	0.03	Bal

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในการวิจัยการขึ้นรูปชิ้นงานแผ่น

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



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างอินกอตของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในการวิจัยขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาว (A) งานวิจัยการขึ้นรูปชิ้นงานแผ่น (B)

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.2

เครื่องอัดไฮดรอลิก	แม่พิมพ์ท่อบางนกระบอกตัน	แม่พิมพ์ท่อบางนแผ่น
		
เตาหลอมเบ้าและหลอมกราไฟท์	Ingot	เครื่อง GISS
		
เทอร์โมคัปเปิล	แก๊สไนโตรเจน	แก๊สหุงต้มและหัวทอร์ช
		
ฟลักซ์	ชุดปฏิบัติการ	ปืนเลเซอร์วัดอุณหภูมิ
		

รูปที่ 2.2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการทดลอง

2.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน, ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานและทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ

1. เครื่องตัดชิ้นงาน
2. ชุดขัด
 - เครื่องขัด 8 นิ้ว จานคู่
 - จานขัดเพชร 74 และ 45 ไมครอน
 - จานผ้าสักหลาด
 - กระดาษทรายเบอร์ 180P 320P 600P 800P 1000P 1200P และ 2500P
 - ฟองอะลูมิเนียมขนาด 5, 1, 0.3 และ 0.05 ไมครอน
3. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM)
4. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
5. เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Rockwell Scale B, HRB)
6. เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงดัด (Tensile testing and bend testing)
7. เครื่องมือทดสอบขาทึบตามมาตรฐาน ISO 10328 จากศูนย์สิรินธรเพื่อการฟื้นฟู

2.3 ขั้นตอนการวิจัย

2.3.1 การเลือกวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

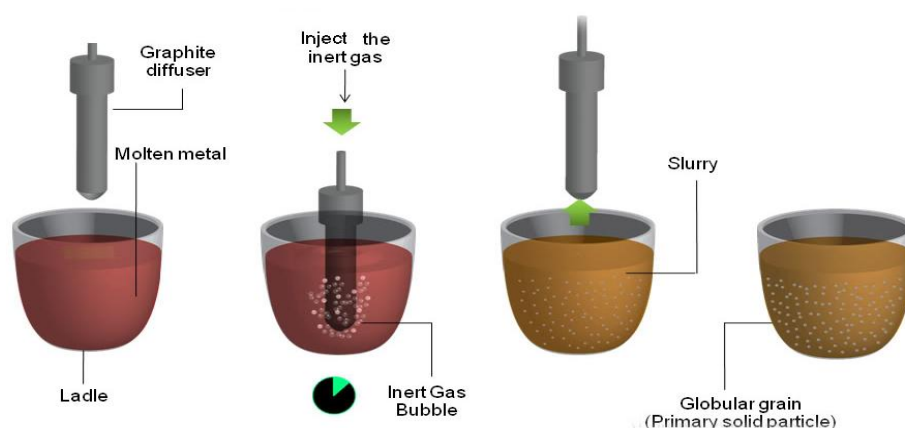
วัสดุที่งานวิจัยนี้เลือกใช้คือ อะลูมิเนียมเกรด 7075 ซึ่งเป็นอะลูมิเนียมเกรดที่มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ด้านทานการกัดกร่อนได้ดี และมีน้ำหนักเบา จึงสามารถตอบโจทย์ของการผลิตขาทึบได้เข้าโลหะชนิดแกนในได้ อะลูมิเนียมจะถูกนำไปหลอมเหลวที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว ในการทดลองนี้ทำการหลอมที่ 750°C เมื่ออะลูมิเนียมหลอมเหลวดีแล้วจึงทำความสะอาดด้วยการฟลักซ์ (flux) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออก ในกระบวนการทดลองนำอะลูมิเนียมที่หลอมเหลวและสะอาดดีแล้วจะถูกนำไปผ่านฟองแก๊สที่เวลาต่าง ๆ กัน เพื่อให้มีสถานะเป็นโลหะกึ่งของแข็ง จากนั้นจึงนำไปเทเข้าแม่พิมพ์ ที่ซึ่งแม่พิมพ์จะผ่านการเคลือบด้วยแก๊สอะเซติลีน เพื่อเป็นสารหล่อลื่นไม่ให้ชิ้นงานติดกับแม่พิมพ์และได้ผิวที่เรียกว่า ทำการทุบชิ้นงาน รอจนชิ้นงานแข็งตัวดีแล้วจึง เปิดแม่พิมพ์เอาชิ้นงานออก ชิ้นงานที่ได้จะถูกตัดเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทดสอบความแข็ง และความแข็งแรงดึง โดยเปรียบเทียบค่าก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการทางความร้อน เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการทดลองซ้ำ นำชิ้นงานที่ได้ไปกลึงเป็นชิ้นส่วนขาทึบ เพื่อส่งทดสอบตามมาตรฐานต่อไป

2.3.2 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะที่ใช้ในงานวิจัย

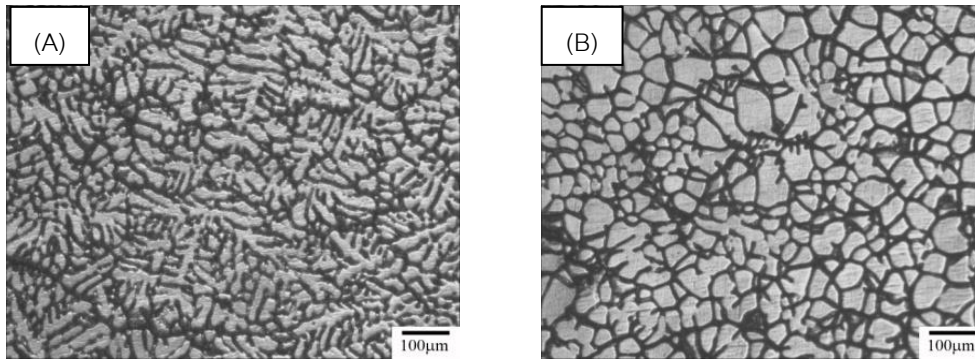
การวิเคราะห์ทางความร้อนของโลหะที่ทำการวิจัย เริ่มจากการนำอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ชนิด Secondary ที่ตัดมาจากแท่งอินคอร์ทใส่ลงไปนในเบ้ากราไฟต์และนำเบ้ากราไฟต์ไปวางในเตาหลอมชนิดควบคุมความดัน ทำการหลอมโลหะที่อุณหภูมิ 750°C เมื่อโลหะหลอมละลายจึงเติมฟลักซ์ (Flux) เพื่อทำความสะอาดน้ำโลหะและทำการตัดครอส (Dross) ออกจากน้ำโลหะ จากนั้นตักน้ำโลหะประมาณ 300 กรัมสำหรับชิ้นงานแท่งกระบอกคั่นยาวและ 400 กรัมสำหรับชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยมหนา จากเตาหลอมด้วยเบ้าสแตนเลสเคลือบผิวด้วยเซรามิกทนไฟ แล้วนำไปจุ่มเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เพื่อวัดและอ่านค่าอุณหภูมิของน้ำโลหะ ทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของน้ำโลหะโดยการปล่อยให้ น้ำโลหะเย็นตัวอย่างช้า ๆ เพื่อทำการสร้างกราฟแสดงอัตราการเย็นตัว (Cooling Curve) กราฟที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลว (Liquidus Temperature) และอุณหภูมิที่จุดยูเทกติก (Eutectic Temperature) ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

2.3.3 การเตรียมโลหะกึ่งของแข็ง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำกระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งเรียกว่ากระบวนการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะแข็งตัว (Gas Induced Semi Solid, GISS) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นกระบวนการเตรียมโลหะกึ่งของแข็งสำหรับการทดลองทุบขึ้นรูป (Semi-Solid forging) โดยในกระบวนการจะทำการปล่อยฟองแก๊สไนโตรเจนให้ไหลผ่านแท่งกราไฟต์แข็งพุนลงไปในน้ำโลหะเป็นระยะเวลาต่าง ๆ กัน เพื่อให้ได้โลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างเกรนแบบไร้กิ่งไม้ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 กระบวนการ Gas Induced Semi Solid



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโลหะที่มีเกรนเป็นแบบกิ่งไม้ (A) และแบบไร่กิ่งไม้ (B)

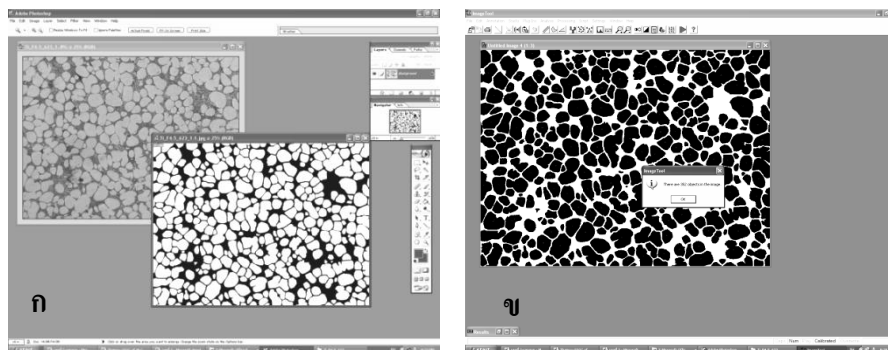
2.3.4 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งของโลหะกิ่งของแข็งจากกระบวนการ GISS

วิเคราะห์หาสัดส่วนของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ด้วยการนำน้ำโลหะที่เตรียมได้จากกระบวนการเตรียมโลหะกิ่งของแข็งหรือกระบวนการ GISS มาวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งที่เกิดจากการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะที่ระยะเวลาการปล่อยฟองแก๊สต่างกัน โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งมีดังนี้

1. ทำการหลอมอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ในเบ้ากราไฟต์ในเตาหลอมชนิดขดลวดต้านทาน
2. ตักน้ำโลหะจากเบ้ากราไฟต์ด้วยกระบวยตัก (Ladle) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบผิวด้วยโบรอนไนไตรท์ ปริมาณน้ำโลหะที่ตักสำหรับแท่งกระบอกตันคือ 300 กรัมและสำหรับแผ่นสี่เหลี่ยมหน้าคือ 400 กรัม ทำการสร้างโลหะกิ่งของแข็งโดยการปล่อยฟองแก๊สที่เวลาแตกต่างกัน
3. ใช้แม่พิมพ์ทองแดง (Copper Quenching Mold) เพื่อเก็บตัวอย่างของน้ำโลหะอะลูมิเนียมกิ่งของแข็งที่สร้างได้จากข้อ 3 ที่เวลาในการปล่อยฟองแก๊สต่าง ๆ กัน ซึ่งลักษณะของแม่พิมพ์ทองแดง แสดงดังรูปที่ 2.5
4. นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 4 มาตัดและเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
5. ทำการถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy)
6. นำรูปโครงสร้างจุลภาคมาคำนวณหาปริมาณสัดส่วนของแข็ง โดยใช้โปรแกรม Photoshop และ Image Tools ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 แม่พิมพ์ทองแดง

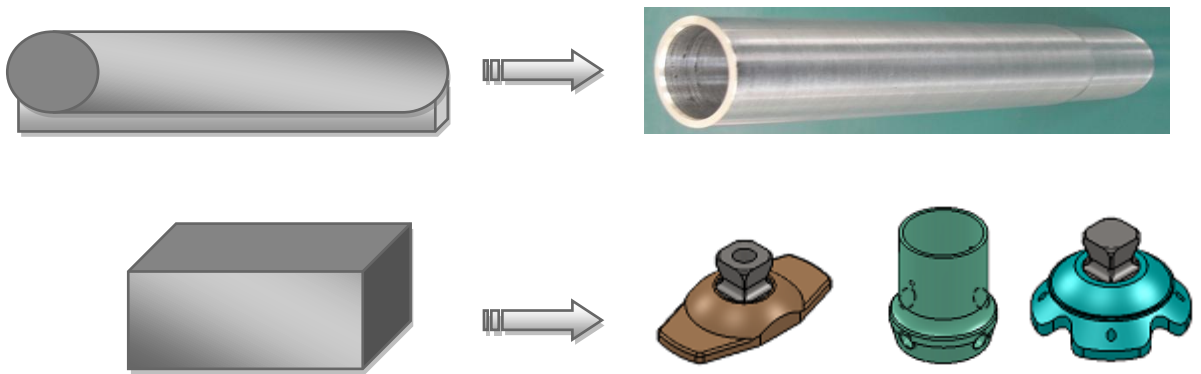


รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็ง (ก) การสร้าง Threshold ด้วยโปรแกรม Photoshop

(ข) การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Image Tools

2.3.5 การผลิตชิ้นงานทုบขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ทำการทดลองศึกษาความเป็นไปได้ในการทูบขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาวเพื่อนำไปกลึงเป็นท่อกลวงในภายหลังเพื่อใช้เป็นท่อขาเทียมได้เข้า (Tube) และการทูบขึ้นรูปแผ่นอะลูมิเนียมหนาเพื่อใช้พัฒนาเป็นชิ้นส่วนข้อเท้าเทียม (Foot adaptor) ตัวจับยึด (Tube adaptor) และพีรามิดฐานรองเข้า (Pyramid) การทดลองเบื้องต้นจะทำการศึกษาตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการทูบขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง รูปทรงชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปและรูปทรงที่ผ่านการกลึง กัด เป็นชิ้นส่วนขาเทียมแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปทรงชิ้นงานที่ได้จากการทอขึ้นรูปและรูปทรงที่ผ่านการกลึง กัด เป็นชิ้นส่วนขาเทียม

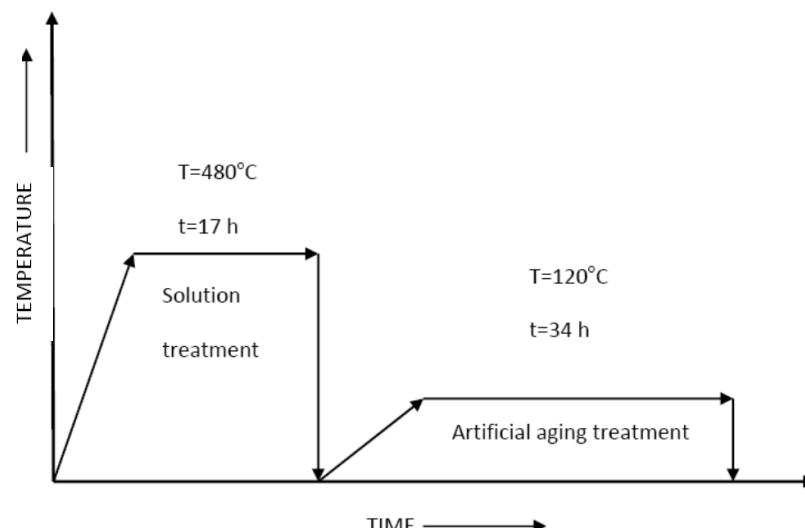
2.3.5.1 การทดลองทอขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาว (rod)

ขั้นตอนในการผลิตชิ้นงานทอขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาวอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 โดยกระบวนการทอขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งมีดังนี้

1. หลอมอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ในเบ้าหลอมซึ่งน้ำโลหะอะลูมิเนียมจะมีสถานะของเหลวที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว โดยปรับตั้งค่าอุณหภูมิเตาที่ 750°C
2. ทำการติดตั้งแม่พิมพ์ (Mold) และหัวทอ (Punch) เข้ากับเครื่องอัดไฮดรอลิก ทำการอุ่นแม่พิมพ์ให้ร้อน $200 - 300^{\circ}\text{C}$ และหัวทอ $100 - 135^{\circ}\text{C}$
3. ตักน้ำอะลูมิเนียมปริมาตรจากเบ้าปริมาณ 300 กรัม ทำการปล่อยฟองแก๊สเพื่อให้อะลูมิเนียมเปลี่ยนเป็นสถานะกึ่งของแข็ง ผ่านแท่งกราฟไฟต์พูนเพื่อให้เกิดอนุภาคของแข็งเล็กๆในน้ำโลหะอะลูมิเนียม ที่มีสถานะเหนืออุณหภูมิแข็งตัว 10°C เป็นเวลา 10-30 วินาที โดยปรับตั้งค่าอุณหภูมิของแท่งกราฟไฟต์ก่อนทำการจุ่มที่ 50°C อัตราการปล่อยฟองแก๊สที่ 5 ลิตรต่อนาที
4. เทน้ำอะลูมิเนียมสถานะกึ่งของแข็ง ลงในแม่พิมพ์ใช้ความดันในการทอขึ้นรูป ทอลงในแม่พิมพ์ รอจนมีสถานะเป็นของแข็งโดยสมบูรณ์ จึงทำการเปิดแม่พิมพ์เพื่อนำชิ้นงานออก โดยชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นแท่งกระบอกตัน
5. ชิ้นงานแท่งกระบอกตันที่ได้จากการทดลองที่มีสมบัติที่ดีจะถูกนำไปกลึง กัด คว้าน ให้เป็นรูกลวงด้วยวิธีต่างๆ รวมถึงการตกแต่งผิวภายหลังชิ้นงานสำเร็จด้วยก็ได้ เพื่อให้ได้ท่อขาเทียมตามมาตรฐานที่สามารถนำไปใช้งานได้ต่อไป

ชิ้นงานที่ได้ภายหลังการขึ้นรูปจะถูกนำไปปรับปรุงทางความร้อน (Heat -

treatment) เพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ดีขึ้น โดยชิ้นงานแท่งกระบอกตันยาวนี้จำเป็นต้องใช้เวลาในการปรับปรุงทางความร้อนก่อนข้างนานด้วยรูปทรงที่ยากต่อการกระจายความร้อน กระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ที่นำมาใช้ปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ในงานวิจัยนี้คือกระบวนการ T6 โดยทำการอบละลาย (Solution Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 480°C เป็นเวลา 17 ชั่วโมง เพื่อให้ธาตุผสมละลายเข้าไปเป็นเนื้อเดียวกันกับธาตุหลักมากยิ่งขึ้น จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทำการชุบเย็นในน้ำ (Water Quenching) เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ธาตุผสมถูกกักอยู่ภายในเนื้อของธาตุหลัก ก่อนนำชิ้นงานไปบ่ม (Artificially-Aging) ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 34 ชั่วโมง ช่วยเร่งให้เกิดการฟอร์มของเฟสใหม่เร็วขึ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและช่วยปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปให้ดีขึ้น กราฟจำลองกระบวนการปรับปรุงทางความร้อนแบบ T6 แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กระบวนการปรับปรุงทางความร้อนแบบ T6 ในชิ้นงานแท่งกระบอกตันยาว

ตารางที่ 2.3 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการทุบขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็ง
กรณีไม่มีเวลาปล่อยทิ้งไว้

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองทุบขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 7075	
ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรผัน
1. อุณหภูมิแท่งกราไฟต์ (50°C)	1. อุณหภูมิแม่พิมพ์และหัวทุบ
2. อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำโลหะ (631°C)	2. สัดส่วนของแข็งเริ่มต้น
3. แม่พิมพ์	3. เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส
4. ปริมาณน้ำโลหะ (300 ml.)	

ตารางที่ 2.4 การทดลองทุบขึ้นรูปที่สภาวะต่างๆกันตามพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.3

ลำดับ ชิ้นงาน	อุณหภูมิหัวทุบ (°C)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	เวลาในการปล่อย ฟองแก๊ส (s)	เวลารอใน แม่พิมพ์ (s)
1	110	230	20	15-20
2	110	240	13	15-20
3	110	240	10	15-20
4	110	240	15	15-20
5	130	245	15	15-20
6	135	245	15	15-20
7	135	245	15	15-20
8	135	245	15	15-20

หมายเหตุ : การทดลองในลำดับที่ 1-3 เป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาเวลาในการปล่อยฟองแก๊ส
ที่เหมาะสม และการทดลองในลำดับที่ 4-6 ทดลองเพื่อหาช่วงอุณหภูมิแม่พิมพ์และ
หัวทุบที่เหมาะสมในการขึ้นรูป

ตารางที่ 2.5 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการทุบขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็ง
กรณีมีเวลาปล่อยทิ้งไว้

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองทุบขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 7075	
ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรผัน
1. อุณหภูมิแท่งกราไฟต์ (50°C)	1. เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส
2. อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำโลหะ (631°C)	2. เวลาในการปล่อยทิ้งไว้
3. อุณหภูมิแม่พิมพ์และหัวทุบ	3. สัดส่วนของแข็งเริ่มต้น
4. ปริมาณน้ำโลหะ (300 ml.)	

ตารางที่ 2.6 การทดลองทุบขึ้นรูปที่สภาวะต่างๆกันตามพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.5

ลำดับ ชิ้นงาน	อุณหภูมิ หัวทุบ (°C)	อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาในการปล่อย ฟองแก๊ส (s)	เวลาในการปล่อย ทิ้งไว้ในแก้ว(s)	เวลารอใน แม่พิมพ์ (s)
1	110	240	10	10	ทุบทันที
2	110	240	10	10	15-20
3	110	240	15	5	15-20
4	110	240	15	5	15-20



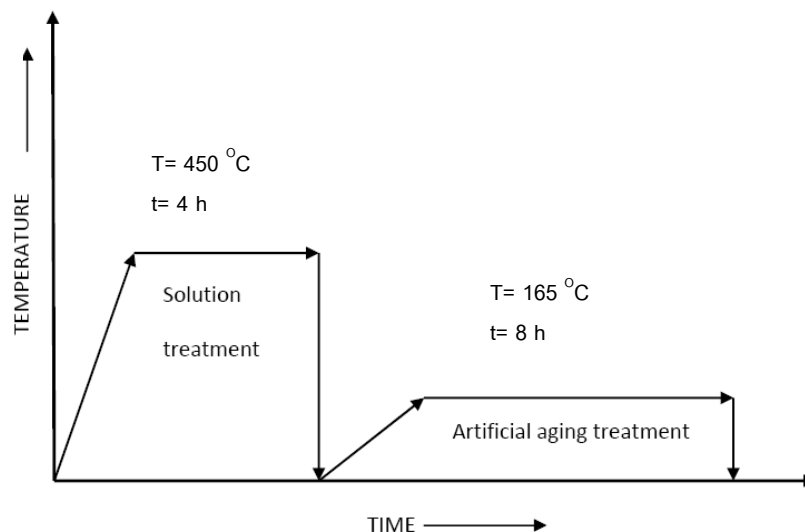
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาวในสถานะกึ่งของแข็ง

2.3.5.2 การทดลองทอบขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยม (Billet)

ขั้นตอนในการผลิตชิ้นงานทอบขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนาอะลูมิเนียมเกรด 7075 โดยกระบวนการทอบขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งมีดังนี้

1. หลอมอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ในเบ้าหลอมซึ่งน้ำโลหะอะลูมิเนียมจะมีสถานะของเหลวที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว โดยปรับตั้งค่าอุณหภูมิเตาที่ 750°C
2. ทำการติดตั้งแม่พิมพ์ (Mold) และหัวทอบ (Punch) เข้ากับเครื่องอัดไฮดรอลิก ทำการอุ่นแม่พิมพ์ให้ร้อน $250-300^{\circ}\text{C}$ และหัวทอบ $100-120^{\circ}\text{C}$
3. ตักน้ำอะลูมิเนียมปริมาตรจากเบ้าปริมาณ 400 กรัม ทำการปล่อยฟองแก๊สเพื่อให้อะลูมิเนียมเปลี่ยนเป็นสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว ผ่านแท่งกราฟไฟต์พูนเพื่อให้เกิดอนุภาคของแข็งเล็กๆ ในน้ำโลหะอะลูมิเนียม ที่มีสถานะเหนืออุณหภูมิแข็งตัว 10°C เป็นเวลา 10-40 วินาที โดยปรับตั้งค่าอุณหภูมิของแท่งกราฟไฟต์ก่อนทำการจุ่มที่ 50°C อัตราการปล่อยฟองแก๊สที่ 5 ลิตรต่อนาที
4. เทน้ำอะลูมิเนียมสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว ลงในแม่พิมพ์ใช้ความดันในการทอบขึ้นรูปทอบลงในแม่พิมพ์ รอนจนมีสถานะเป็นของแข็งโดยสมบูรณ์ จึงทำการเปิดแม่พิมพ์เพื่อนำชิ้นงานออกโดยชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม
5. ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองที่มีสมบัติที่ดีจะถูกนำไปกลึง กัด คว้านด้วยวิธีต่างๆ รวมถึงการตกแต่งผิวภายหลังชิ้นงานสำเร็จด้วยก็ได้ เพื่อให้ได้ชิ้นส่วนตามมาตรฐานที่สามารถนำไปใช้งานได้ต่อไป

ชิ้นงานที่ได้ภายหลังการขึ้นรูปจะถูกนำไปปรับปรุงทางความร้อน (Heat-treatment) เพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ดีขึ้น กระบวนการทางความร้อนที่นำมาใช้ปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ในงานวิจัยนี้คือกระบวนการ T6 เช่นเดียวกับแท่งกระบอกตัน แต่มีการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำอันเนื่องจากงานวิจัยนี้มีการทำควบคู่ไปกับงานวิจัยเรื่องการปรับปรุงทางความร้อนของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 โดยสภาวะการทดลองใหม่ที่เหมาะสมคือ การทำการอบละลาย (Solution Heat Treatment) ที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทำการชุบเย็นในน้ำ (Water Quenching) เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ก่อนนำชิ้นงานไปบ่ม (Artificially Aging) ที่อุณหภูมิ 165°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง กราฟจำลองกระบวนการปรับปรุงทางความร้อนแบบ T6 ของชิ้นงานแผ่นหนาแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระบวนการปรับปรุงทางความร้อนของชิ้นงานแผ่นหนาแบบ T6

ตารางที่ 2.7 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการชุบชิ้นรูปแผ่นในสถานะกึ่งของแข็ง
กรณีศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการปล่อยฟองแก๊ส

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองชุบชิ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 7075	
ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรผกผัน
1. อุณหภูมิแท่งกราฟไฟต์ (50°C)	1. สัดส่วนของแข็งเริ่มต้น
2. อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำโลหะ (633°C)	2. เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส
3. อุณหภูมิแม่พิมพ์และหัวชุบ	
4. ปริมาณน้ำโลหะ (400 ml.)	

ตารางที่ 2.8 การทดลองชุบชิ้นรูปที่สถานะต่าง ๆ กันตามพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.7

ลำดับชิ้นงาน	Condition	เวลาปล่อยฟองแก๊ส (วินาที)	เวลาปล่อยทิ้งไว้ (วินาที)
1	Liquid	-	-
2	10s (แผ่นบาง)	10	-
3	10s (แผ่นหนา)	10	-
4	20s	20	-
5	30s	30	-
6	40s	40	-

หมายเหตุ : แผ่นบาง=น้ำโลหะ 200 ml, แผ่นหนา=น้ำโลหะ 400 ml

ตารางที่ 2.9 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษากระบวนการชุบขึ้นรูปแผ่นในสถานะกึ่งของแข็งกรณี
เปรียบเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปในสถานะของเหลวและในสถานะสัดส่วนกึ่งของแข็งต่ำ

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองชุบขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 7075	
ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรพิกัด
1. อุณหภูมิแท่งกราไฟต์ (50°C)	1. สัดส่วนของแข็งเริ่มต้น
2. อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำโลหะ (633°C)	2. เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส
3. อุณหภูมิแม่พิมพ์และหัวชุบ	3. เวลาในการปล่อยทิ้งไว้
4. ปริมาณน้ำโลหะ (400 ml.)	

ตารางที่ 2.10 การทดลองชุบขึ้นรูปที่สถานะต่าง ๆ กันตามพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.9

ลำดับชิ้นงาน	Condition	เวลาปล่อยฟองแก๊ส (วินาที)	เวลาปล่อยทิ้งไว้ (วินาที)
1	Liquid	-	-
2	3s	3	-
3	10s+10s	10	10
4	20s	20	-
5	10s+20s	10	20
6	20s+10s	20	10
7	30s	30	-

หมายเหตุ : ลำดับชิ้นงานที่ 3,4,6,7 เป็นการทดลองเบื้องต้น (Preliminary) จึงไม่นำไปทดสอบความ
แข็งแรงดึง

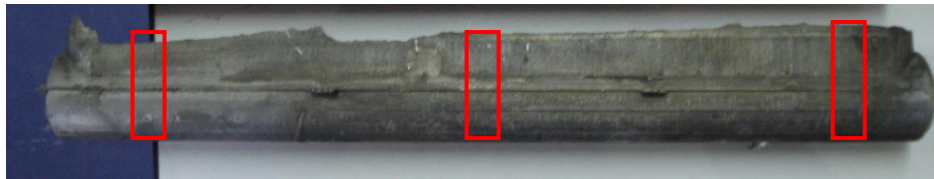


รูปที่ 2.11 ตัวอย่างชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยมหนาที่ผ่านการชุบขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็ง

2.3.6 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

2.3.6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นแท่งกระบอกตันยาว

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง ที่ได้จากการทดลอง ในขั้นตอนนี้จะนำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการทอบขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งมาตัดชิ้นงานจากบริเวณต่างๆกันชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 บริเวณที่ตัดชิ้นงานมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

จากนั้นชิ้นงานดังกล่าวจะถูกเตรียมเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) ตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัด ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการตัดมีลักษณะดังรูปที่ 2.13
- 2) นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 1 มาทำการขัดหยาบ (Grinding) ด้วยกระดาษทราย (SiC Paper) เบอร์ P320 P600 P800 P1000 P1200 และ P2500 ตามลำดับ
- 3) จากนั้นทำการขัดละเอียด (Polishing) ชิ้นงาน โดยทำการเริ่มต้นการขัดละเอียดด้วยผ้าหยาบ (Cloth Pad) ร่วมกับผงขัดอะลูมินาขนาด 5 μm เมื่อรอยขัดจากกระดาษทรายหมดไปแล้วจึงทำการขัดโดยใช้ผงขัดอะลูมินาขนาด 1 0.3 และ 0.05 μm ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 ชิ้นงานที่ผ่านการตัด

- 4) ทำการขัดขึ้นรอยผิวหน้าของชิ้นงานและกัดผิวหน้าด้วยกรด Keller เป็นเวลาประมาณ 8 - 10 นาทีชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำสะอาด เป่าให้ผิวหน้าชิ้นงานให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมรูปเครื่องขัดละเอียดและหยาบแสดงดังรูปที่ 2.14

- 5) นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) เพื่อถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.15



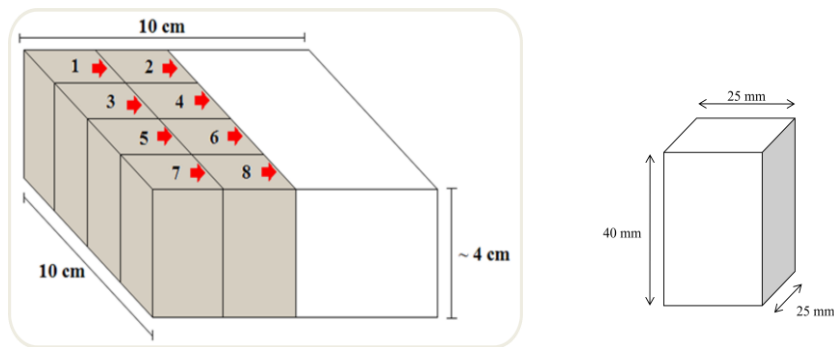
รูปที่ 2.14 เครื่องซัด 8 นิ้ว (จานคู่)



รูปที่ 2.15 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและระบบคอมพิวเตอร์

2.3.6.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยมหนา

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการชุบขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็ง โดยทำการตัดแบ่งชิ้นงานออกเป็น 8 ชิ้นดังแสดงในรูปที่ 2.16 เพื่อสะดวกต่อการขัดชิ้นงาน



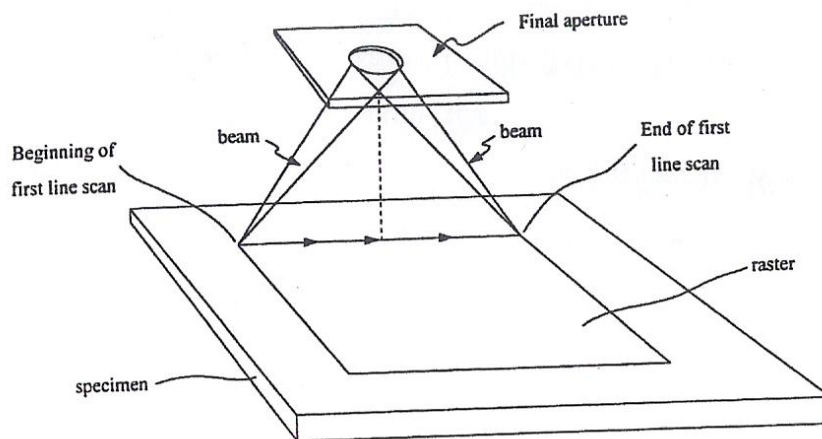
รูปที่ 2.16 ภาพสเก็ทชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทุบขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็ง

1. จากชิ้นงานขนาด $10 \times 10 \times 4$ เซนติเมตร ทำการตัดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยที่ส่วนหนึ่งนำมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและอีกส่วนหนึ่งจะถูกนำไปกลึงเพื่อทดสอบความแข็งแรงดังต่อไป
2. ส่วนที่นำมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจะทำการตัดแบ่งอีกครั้งให้เป็นชิ้นงานขนาด $25 \times 25 \times 40$ มิลลิเมตร ทั้งหมด 8 ชิ้น เพื่อสะดวกต่อการขัด
3. นำชิ้นงานทั้ง 8 ชิ้นมาขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 ถึง 2500 และขัดละเอียดอีกครั้งด้วยผ้าสักหลาดและผงอะลูมินาขนาด 5 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ
4. เมื่อชิ้นงานมีความใสแวจนสามารถสะท้อนภาพได้และไม่มียอขุ่นแล้ว จึงทำการกัดด้วยกรด Keller เพื่อให้เกิดมุมสะท้อนเมื่อทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำสะอาด เป่าให้ผิวหน้าชิ้นงานให้แห้งด้วยเครื่องเป่า
5. ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) ในตำแหน่งที่ต้องการเพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่ได้ต่อไป

2.3.7 การวิเคราะห์ธาตุประกอบของวัสดุเกรด 7075 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยทั่วไป อาศัยหลักการเร่งอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (ประมาณ 5-30 kV) ถ้าอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดของโปรบเล็กลงเมื่อตกกระทบชิ้นงานภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะปรากฏที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ บริเวณผิวของชิ้นงานที่ใช้ในการสร้างภาพคือ บริเวณ raster ลำอิเล็กตรอนจะวิ่งกวาดเป็นเส้นตรง เรียกว่า line scan ซึ่งมีความกว้างเท่ากับ raster (ดูรูปที่ 2.17) ขณะที่ลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่นั้น สัญญาณ

อิเล็กตรอนชุดที่สองจะถูกปล่อยออกมาจากพื้นผิวและถูกตรวจจับด้วย detector ความเข้มของสัญญาณที่ไม่เท่ากันจะเป็นตัวควบคุมความสว่างของภาพที่ปรากฏบนจอ ลักษณะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 เส้นทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนผิวชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



(a)



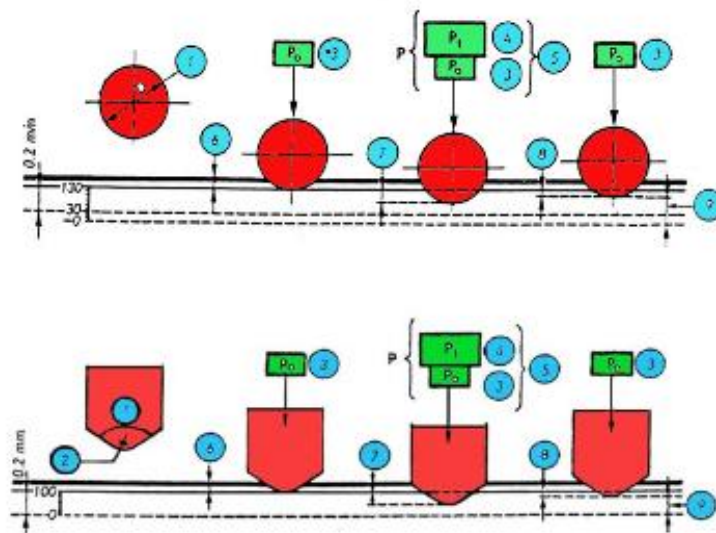
(b)

รูปที่ 2.18 เครื่อง Scanning Electron Microscope (a) และเครื่อง Energy Dispersive Spectrometer (b)

2.3.8 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน

2.3.8.1 การทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Scale B (Hardness Rockwell Scale B testing)

เป็นวิธีวัดความแข็งของโลหะที่นิยมใช้มากที่สุด โดยจะวัดความแข็งจากความลึก ระยะกดที่ถูกหัวกดกดด้วยแรงคงที่ ซึ่งจะแตกต่างจากแบบ Brinell และ Vicker ที่วัดจากแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นวิธีนี้จึงมีการวัดด้วยกันหลายสเกล เพื่อให้สามารถเลือกใช้วัดความแข็งได้เหมาะสมที่สุด โดยในการทดสอบนี้เลือกสเกลบีในการทดสอบ ทดสอบความแข็งด้วยลูกบอล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{16}$ - $\frac{1}{4}$ นิ้ว หรือรูปทรงกรวยเพชร มุม 120 องศา การทดสอบกระทำ 2 ขั้นตอน ขั้นแรกกด Pre-Test จากนั้นกด Actual - Test ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ลักษณะการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Test)

วิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อยคือ 10 กิโลกรัม จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำ ขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60 - 150 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับ ชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้จะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย

การทดสอบแบบร็อกเวลนี้ใช้อย่างกว้างขวาง เพราะสามารถใช้วัดความแข็งของ วัสดุชนิดต่างๆ ได้มากกว่า สามารถวัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลวัดไม่ได้ การใช้ งานสะดวก อ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่องมือ และเนื่องจากรอยบุ๋มมีขนาดเล็ก จึง ไม่ได้ทำลายผิวของชิ้นงาน

วิธีใช้เครื่อง Hardness Rockwell scale B

1. ทำการใส่หัวกดสเกล B และเปิดเครื่อง Hardness Rockwell ให้หน้าจอแสดงเลข 0.0
2. วางชิ้นงานบนฐาน หมุนแกนจับตามเข็มนาฬิกาจนขีดชิ้นงานและหมุนต่อจนไฟสีเขียวปรากฏอยู่ที่คำว่า SET โดยที่ค่าบนหน้าจอต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 290
3. หากหมุนเลยไปจนถึงคำว่า OVER ให้ทำการเปลี่ยนจุดที่จะทำการกดทันที
4. กดปุ่ม START และรอให้ไฟสีเขียวที่คำว่า START หายไป ก็จะได้ค่าความแข็งของชิ้นงาน
5. ทำการเลื่อนจุดที่กดประมาณ 5-10 จุด เพื่อหาค่าทางสถิติต่อไป



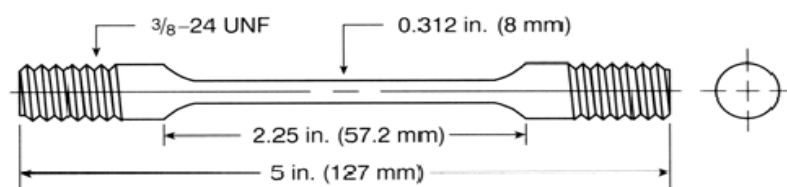
รูปที่ 2.20 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Scale B และตำแหน่งที่นำไปวิเคราะห์ความแข็งของชิ้นงาน

2.3.8.2 การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile testing)

การทดสอบแรงดึงเป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อวัดคุณสมบัติความต้านทานของวัสดุต่อแรงที่กระทำ โดยการนำอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนมาทำการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM-E8 เพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.21 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.22

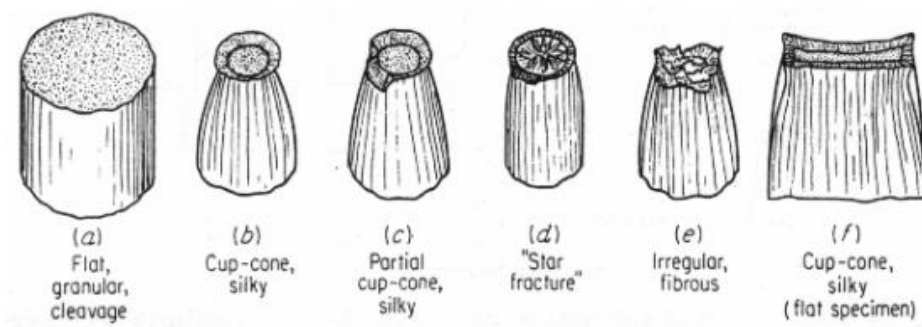


รูปที่ 2.21 เครื่องทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานของเหล็กหล่อตามมาตรฐาน ASTM E8

ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบดูได้จากรูปแบบ ลักษณะความหยาบละเอียด และสีของรอยแตกหัก โดยทั่วไปแล้วรูปแบบของรอยแตกหักจะถูกแบ่งออกเป็นรูปแบบที่สมมาตร คือ cup cone, flat และ irregular หรือรูปแบบที่ไม่สมมาตรคือ partial, flat และ irregular ลักษณะความหยาบละเอียดซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น silky, fine grain, coarse grain, fibrous, crystalline, glassy และ dull รูปที่ 2.23 แสดงตัวอย่างของรอยแตกหักที่มักพบเห็นในการทดสอบแรงดึงของโลหะจากการสังเกตรอยแตกหักดังกล่าวจะช่วยให้เราระบุได้ว่า วัสดุที่เราทดสอบเป็นวัสดุประเภทใดเช่นรูปที่ 2.23 a เป็นลักษณะการแตกหักสำหรับตัวอย่างทดสอบรูปทรงกลมของเหล็กหล่อ และรูปที่ 2.26 b จะเป็นลักษณะการแตกหักสำหรับตัวอย่างทดสอบรูปทรงกลมของเหล็กเหนียว เป็นต้น นอกจากนั้นแล้ว การตรวจสอบรอยแตกหักยังจะช่วยอธิบายสาเหตุที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความแข็งแรงและความเหนียวที่ค่อนข้างต่ำไปจากความเป็นจริงด้วย เช่น รอยแตกที่ไม่สมมาตรในเหล็กเหนียวอาจเกิดจากการที่แรงกระทำไม่อยู่ในแนวแกน หรืออาจจะเกิดจากการที่ตัวอย่างทดสอบมีความบกพร่องอยู่ภายในเนื้อวัสดุ เป็นต้น



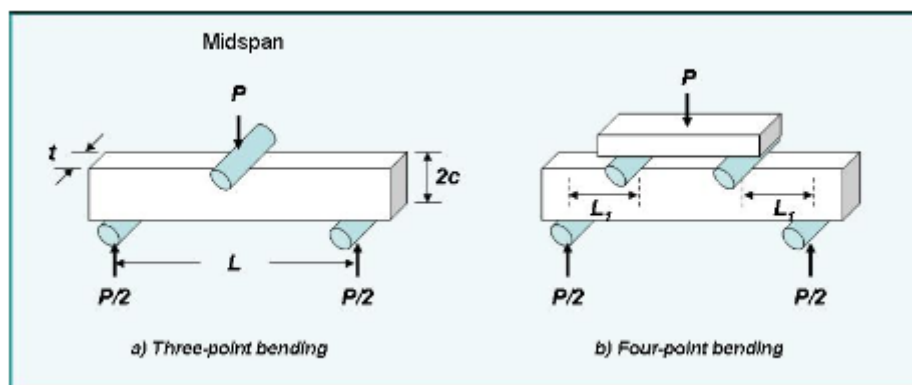
รูปที่ 2.23 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงดึง

(W.D.callister, 2001)

การแตกหักโดยทั่วไปมีสองรูปแบบคือ การแตกแบบเหนียวและการแตกแบบเปราะ ซึ่งทั้งสองประเภทนี้จะแบ่งตามปริมาณการแปรรูปก่อนการแตกหัก วัสดุเหนียวจะมีความสามารถในการแปรรูปได้ดีกว่าวัสดุเปราะ การแตกหักจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ การแตกหักแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนการเกิดรอยแตกเล็กๆและขั้นตอนการขยายตัวของรอยแตกนั้นๆ

2.3.8.3 การทดสอบการดัดงอ (Bending test)

การทดสอบนี้มักถูกนำมาใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงดึงสำหรับวัสดุเปราะ ตัวอย่างทดสอบการดัดมักจะมีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมและทรงกลม และจะถูกกระทำโดยแรงกระทำเป็นจุด (Point loads) ในลักษณะให้แรงกระทำสามจุด (Three-point loading) หรือให้แรงกระทำสี่จุด (four-point loading) ดังแสดงในรูปที่ 2.24 a และ 2.24 b ตามลำดับ



รูปที่ 2.24 การทดสอบแบบ three-point loading และแบบ four-point loading

(ที่มา: <http://www.testresource.com>)

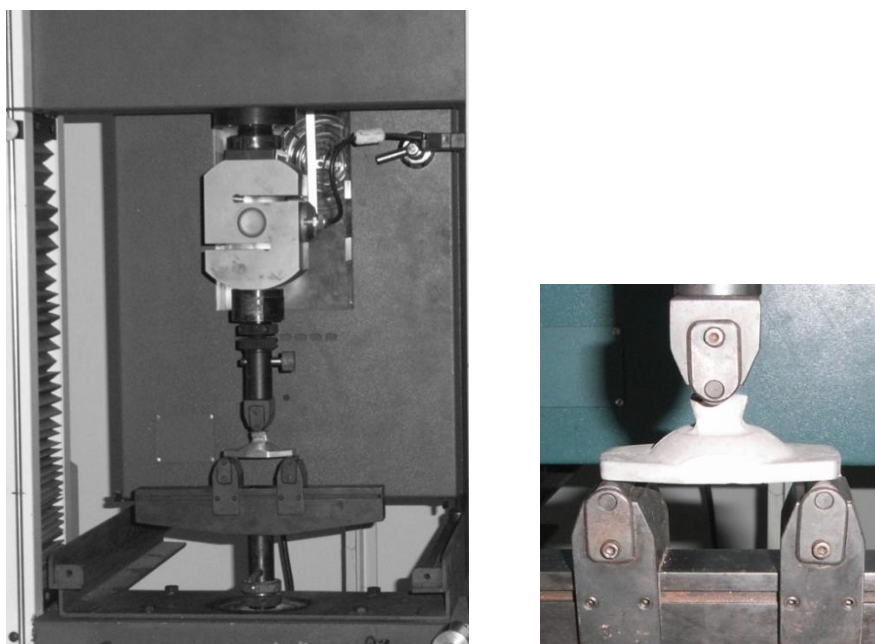
เมื่อกานถูกกระทำโดยแรง P แล้ว วัสดุที่อยู่ส่วนบนสุดของกานจะถูกทำให้หดตัวลงเนื่องจากถูกแรงกระทำโดยหน่วยแรงกดอัด (compressive stress) และวัสดุที่อยู่ส่วนล่างของหน้าตัดของกานจะถูกทำให้ยืดออกเนื่องจากถูกกระทำโดยหน่วยแรงดึง (tensile stress)

จากรูปที่ 2.24 ค่าสูงสุดของหน่วยแรงดึงฉาก (normal stress) บนหน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่งของคานจะเกิดขึ้นที่ระยะ c จากแกนสะเทินของคาน และจะหาได้จากสมการ flexural formula

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

เมื่อ M = โมเมนต์ (moment) ลัพธ์ภายในที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดที่เรากำลังพิจารณารอบแกนสะเทิน
 I = moment of inertia ของหน้าตัดของคานที่เรากำลังพิจารณารอบแกนสะเทิน

เนื่องจากชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือชิ้นงานข้อเท้าเทียม (Foot adaptor) ที่มีลักษณะ โครงสร้างที่ซับซ้อนการคำนวณจึงทำในลักษณะให้แรงกระทำสามจุด (three-point loading) และใช้ประมาณค่าจากพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นส่วนที่มีความบางที่สุดของชิ้นงาน การจัดวางชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การจัดวางชิ้นงานในการทดสอบการตัด

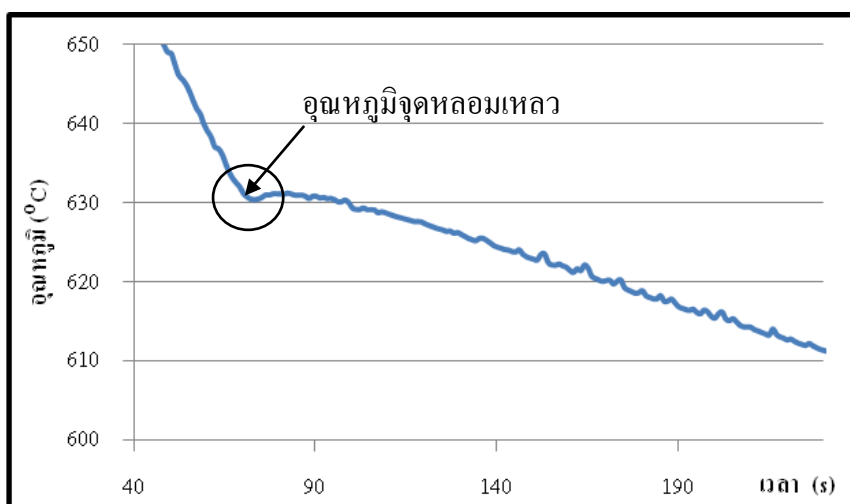
บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผล

3.1 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยคืออะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 จากผลการวิเคราะห์ทางความร้อนเส้นการเย็นตัว (Cooling curve) ของน้ำโลหะ ภายในเบ้าสแตนเลสโดยไม่ผ่านกระบวนการ GISS พบว่าอุณหภูมิการเย็นตัวและเวลาที่เปลี่ยนไประหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะอะลูมิเนียมเกรด 7075 แสดงดังเส้นกราฟของการเย็นตัวดังรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวจะเริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิของเหลว (Liquidus Temperature, T_L) มีค่าประมาณ 631°C สำหรับน้ำโลหะที่ใช้ขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาว และ 633°C สำหรับใช้ขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนา

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองทำให้สามารถประมาณช่วงเวลาในการปล่อยฟองแก๊สเพื่อเตรียมอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งโดยการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะ โดยในงานวิจัยจะเริ่มทำการปล่อยฟองแก๊สเหนือเส้นอุณหภูมิของเหลวประมาณ $8 - 10^{\circ}\text{C}$ จากกราฟเราสามารถเลือกอุณหภูมิประมาณ $639 - 643^{\circ}\text{C}$ เป็นจุดเริ่มต้นของการปล่อยฟองแก๊สเพื่อเตรียมโลหะกึ่งของแข็งหรือสร้างเฟสของแข็งเริ่มต้น (Primary Solid Particle)

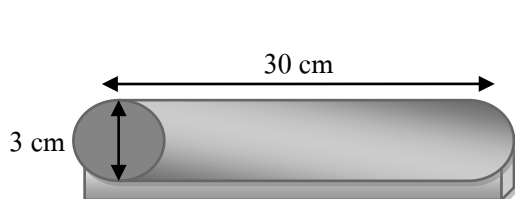


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างกราฟแสดงเส้นการเย็นตัว (Cooling curve) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 สำหรับน้ำโลหะที่ใช้ขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาว เมื่อไม่ผ่านกระบวนการ GISS

3.2 กรณีศึกษาการทบทวนรูปแท่งกระบอกตันยาว (rod) ด้วยกรรมวิธีการทบทวนรูปอะลูมิเนียม กึ่งของแข็ง

3.2.1 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งที่เตรียมได้จากกระบวนการ GISS

จากผลการทดลองหาปริมาณสัดส่วนแข็งเริ่มต้นของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ใช้ในงานวิจัย จะทำการปล่อยฟองแก๊สลงไปใต้น้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่ตักจากเบ้าแกรไฟต์ ปริมาณ 300 กรัม (การคำนวณปริมาณแสดงดังรูปที่ 3.2) ในกระบวยตัก (Ladle) ที่ทำจากสแตนเลส จากนั้นใช้แม่พิมพ์ทองแดงและปั๊มสุญญากาศเพื่อเก็บตัวอย่างของน้ำโลหะที่ปล่อยฟองแก๊สที่ระยะเวลาต่างกันคือ 10 15 และ 20 วินาที ตามลำดับ เมื่อได้ชิ้นงานตัวอย่างแล้วจึงนำไปตัดบริเวณตรงกลางดังรูปที่ 3.3 และถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณเฟสของแข็งด้วยโปรแกรม Photoshop และ Image Tool ตามลำดับ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.4 ตัวแปรในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1 และสัดส่วนของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆแสดงดังตารางที่ 3.2



$$\pi r^2 h = \frac{22}{7} \times (1.5^2) \times 30$$

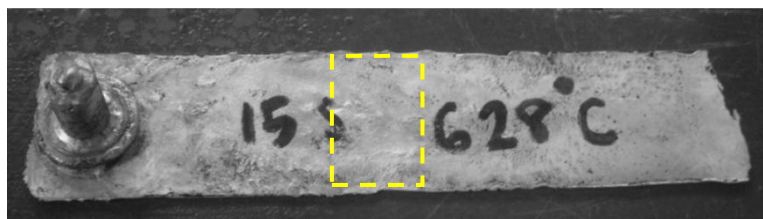
$$= 212 \text{ cm}^3$$

*บวกเพิ่มน้ำโลหะส่วนที่เกินจากชิ้นงานจริง
จึงประมาณน้ำโลหะในการตักที่ 300 cm³

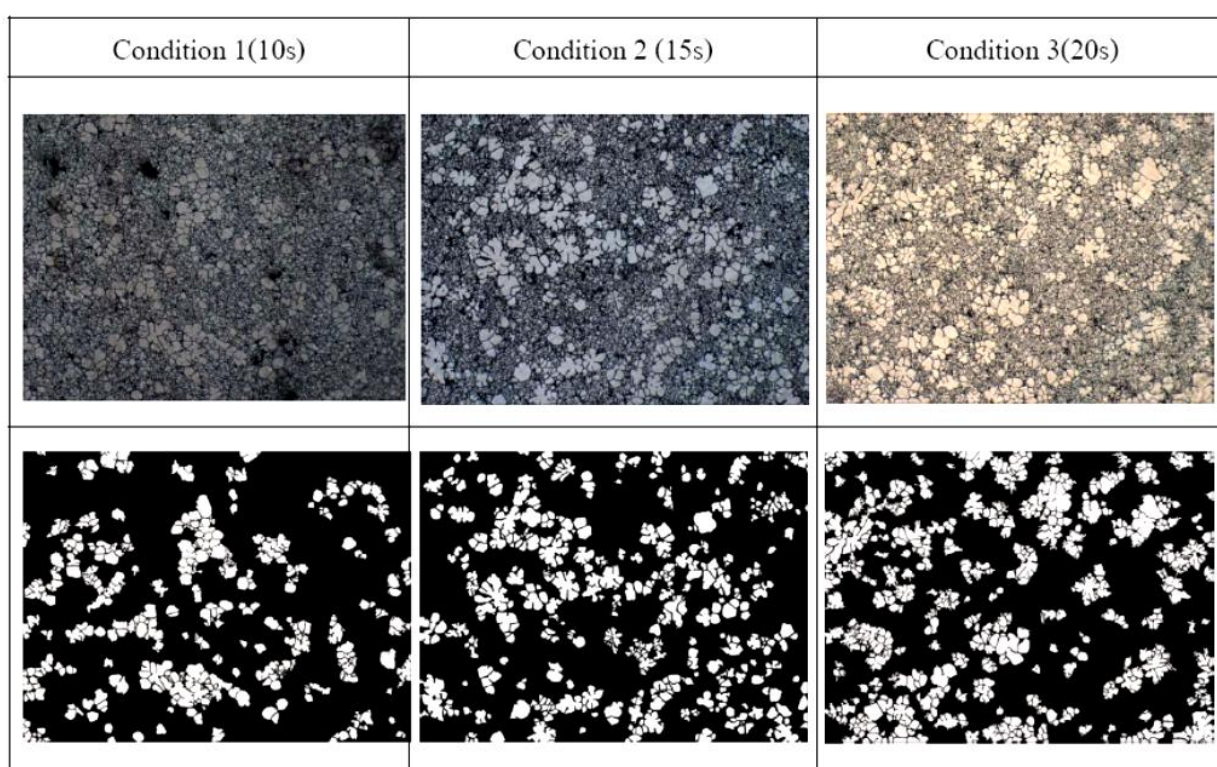
รูปที่ 3.2 ปริมาตรของรูปทรงแท่งกระบอกตันยาวที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรการทดลองหาปริมาณสัดส่วนแข็งเริ่มต้นของอะลูมิเนียมเกรด 7075

เงื่อนไข	อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	อุณหภูมิสุดท้าย (°C)	ปริมาณน้ำโลหะ (ml)	ผลการทดลอง
10s	640	630	300	เต็มแบบ
15s	640	628	300	เต็มแบบ
20s	640	626	300	ไม่เต็มแบบ
10s+10s	640	625	300	เต็มแบบ
15s+5s	640	623	300	เต็มแบบ

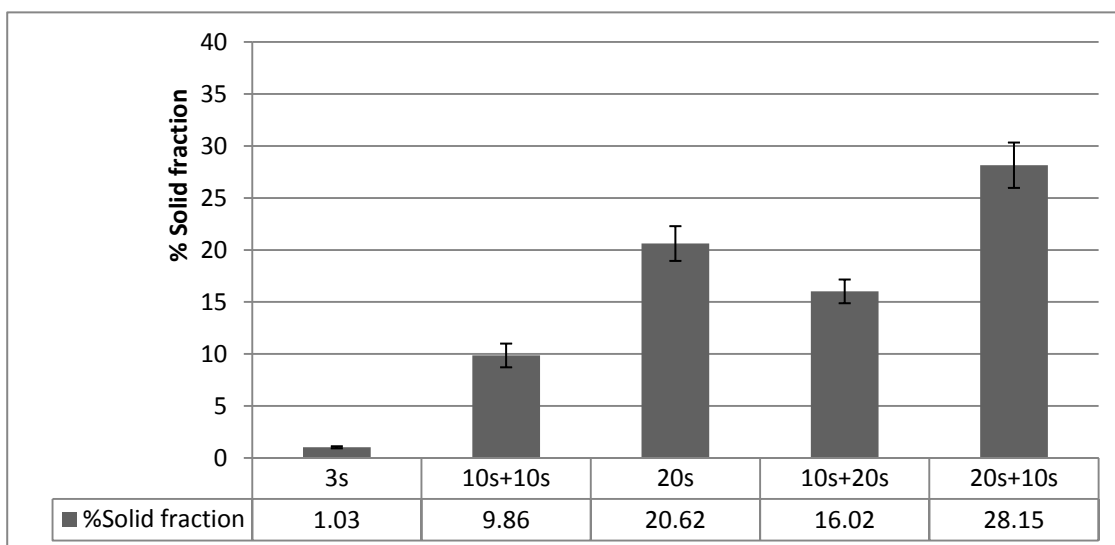


รูปที่ 3.3 ชิ้นงานจากแม่พิมพ์ทองแดงและตำแหน่งการตัดเพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค
ทำการถ่ายภาพที่กำลังขยาย 50x ชิ้นงานละ 5 รูปเพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์ของแข็ง
ตัวอย่างรูปที่ได้ ตารางแสดงสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของแข็งแสดงได้รูปที่ 3.4 และกราฟแสดงแนวโน้ม
สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของแข็งแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานและเปอร์เซ็นต์ของแข็งในอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075
ตารางที่ 3.2 แสดงสัดส่วนของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ ของโลหะผสมอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075

อุณหภูมิน้ำโลหะ(°C)	สัดส่วนของแข็ง
630	0.17 ± 1.20
628	0.19 ± 1.23
626	0.20 ± 1.45
625	0.19 ± 2.34
623	0.20 ± 2.22



รูปที่ 3.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนของแข็งในแต่ละเงื่อนไข

จากกราฟพบว่าที่เวลาปล่อยฟองแก๊สนานขึ้นยิ่งเกิดสัดส่วนของแข็งมากขึ้นตามทฤษฎี ยิ่งเวลาในการปล่อยฟองแก๊สนานเกินที่เป็นกึ่งไม้จะยิ่งถูกทำให้แตกตัวหลุดออกมาเป็นเกรนเดี่ยวและเมื่อเมื่อมีเวลาเพียงก็จะเกิดเป็นเกรนที่มีลักษณะกลม ขึ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการทดลองพบว่าน้ำโลหะเริ่มหนืดเกินไปที่เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 20 วินาทีโดยมีเปอร์เซ็นต์ของแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 20.25 ± 1.45 ทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่เต็มแบบ จึงเพิ่มการทดลองอีก 2 สภาวะการทดลองคือที่เวลาการปล่อยฟองแก๊ส 10 วินาทีพร้อมทั้งทิ้งไว้ในแก้ว 10 วินาทีและที่เวลาการปล่อยฟองแก๊ส 15 วินาทีพร้อมทั้งทิ้งไว้ในแก้ว 5 วินาที พบว่าให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งเฉลี่ย 18.89 ± 2.34 และ 19.88 ± 2.22 ตามลำดับ เหตุที่เลือกสภาวะการทดลองนี้เพราะต้องการจะดูผลของเวลาที่ทิ้งไว้ที่รวมกับเวลาในการปล่อยแก๊สแล้วเท่ากับ 20 วินาที ซึ่งผลการทดลองพบว่าน้ำโลหะสามารถไหลเข้าได้เต็มแบบทั้ง 2 กรณี อาจเป็ยเพราะการขยายขนาดของเกรนในช่วงเวลาสั้นๆมีผลให้เกรนกลมขึ้นการไหลจึงดีขึ้น ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์ของแข็งที่ได้มีค่าต่ำกว่าการปล่อยฟองแก๊สอย่างเดียว 20 วินาที

3.2.2 ผลการทดลองทาบขึ้นรูปและโครงสร้างจุลภาค

3.2.2.1 ผลของเวลาในการปล่อยฟองแก๊ส (GISS time)

เวลาในการปล่อยฟองแก๊สมีผลต่อการเกิดสัดส่วนของของแข็งในน้ำโลหะ โดยได้ทดลองปล่อยฟองแก๊สที่ 10 15 และ 20 วินาทีตามลำดับ ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 3.3 จากการทดลองพบว่าเวลาในการปล่อยฟองแก๊สที่ดีที่สุดอยู่ที่ 15 วินาที จะได้ชิ้นงานซึ่งมีความสมบูรณ์ในขณะที่การปล่อยฟองแก๊สเพียง 10 วินาที ไม่เพียงพอต่อการเกิดสัดส่วนของของแข็งเมื่อทำการ

ทุบจึงเกิดการร้าวทำให้ได้ชิ้นงานที่ไม่สมบูรณ์ และที่ 20 วินาทีเป็นเวลาที่นานเกินไปทำให้ อะลูมิเนียมส่วนหนึ่งแข็งตัวภายในเบ้า ไม่สามารถเทได้อย่างราบเรียบในแม่พิมพ์ ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองทุบขึ้นรูปที่สภาวะต่างๆกัน

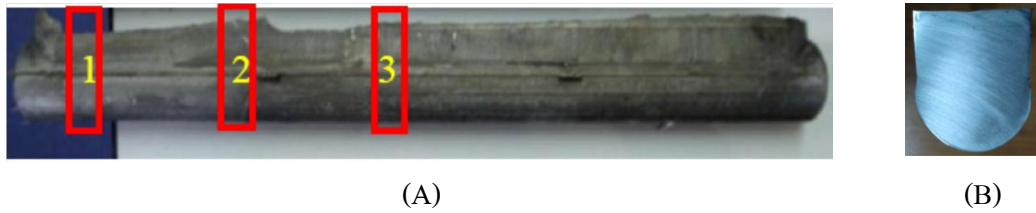
ลำดับ ชิ้นงาน	อุณหภูมิหัวทุบ (°C)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	เวลาในการปล่อย ฟองแก๊ส (s)	ปริมาณน้ำ โลหะ(มล.)	ผลการทดลอง
1	110	230	20	350	น้ำโลหะหนืดเกินไป
2	110	240	13	350	ชิ้นงานสมบูรณ์
3	130	240	10	350	น้ำโลหะเหลวเกินไป
4	130	240	15	350	ชิ้นงานสมบูรณ์
5	130	245	15	350	ชิ้นงานสมบูรณ์
6	135	245	15	350	ชิ้นงานสมบูรณ์
7	135	245	15	350	ชิ้นงานสมบูรณ์
8	135	245	15	350	ชิ้นงานสมบูรณ์

หมายเหตุ : การทดลองในลำดับที่ 1-3 เป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาเวลาในการปล่อยฟองแก๊ส ที่เหมาะสม และการทดลองในลำดับที่ 4-6 ทดลองเพื่อหาช่วงอุณหภูมิแม่พิมพ์และ หัวทุบที่เหมาะสมในการขึ้นรูป



รูปที่ 3.6 ชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูป

นำชิ้นงานที่ได้จากการปล่อยฟองแก๊ส 15 วินาทีไปตัดขวาง เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (อีกครั้งชิ้นใช้สำหรับกลึงทำชิ้นงานตัวอย่างทดสอบความแข็งแรงดึง) พบว่าชิ้นงานบริเวณที่ 1 และ 2 มีความเป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างดีไม่พบการแยกเฟสของของเหลว แต่จะพบการแยกเฟสที่บริเวณที่ 3 โดยโครงสร้างจุลภาคของแต่ละบริเวณของตำแหน่งที่ 3 แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งชิ้นงานที่นำไปตัดขวาง (A) ชิ้นงานตัดขวางที่นำไปดูโครงสร้างจุลภาค (B)

บริเวณที่ทำการวิเคราะห์	โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆกัน	

รูปที่ 3.8 โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆกัน ของชิ้นงานบริเวณที่ 3 (ไม่มี Holding time)

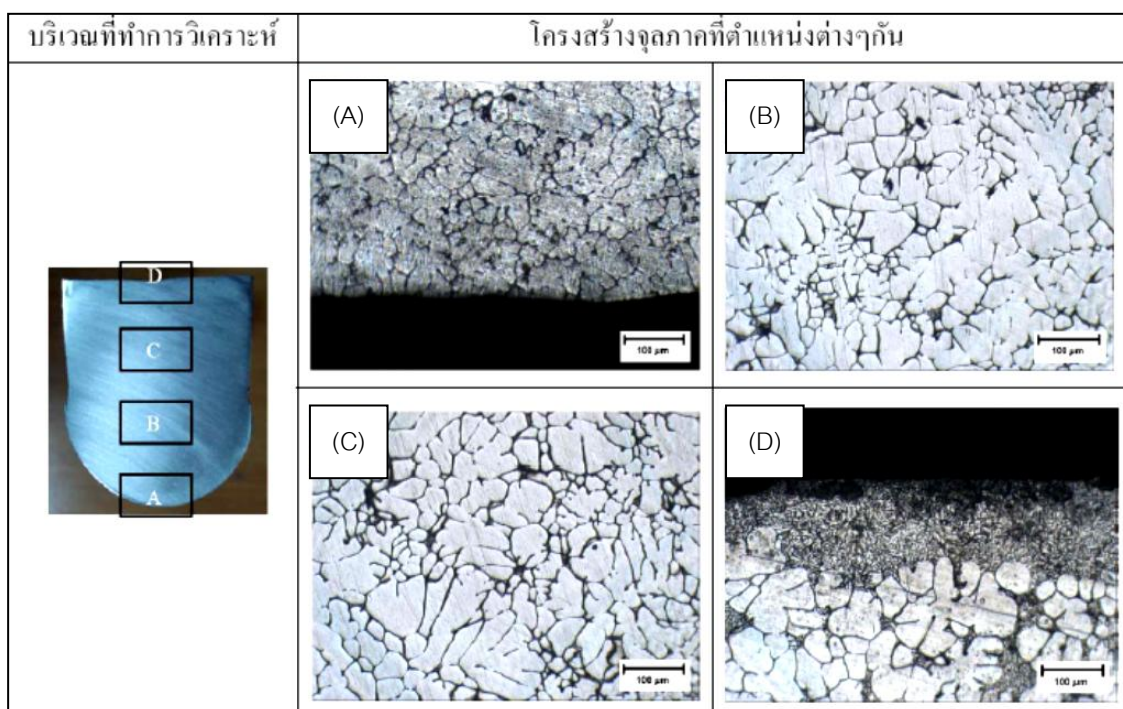
จากรูปพบว่าตำแหน่ง B และ C มีการแยกเฟสกันอย่างชัดเจน อาจเนื่องมาจากเป็นโซนสุดท้ายที่เกิดการเย็นตัว และอนุภาคของของแข็งได้ตกลงสู่กันของแม่พิมพ์ในระหว่างที่รอในแม่พิมพ์ช่วง 15-20 วินาที ทำให้บริเวณส่วนที่ใกล้กับหัวทูปเหลืออนุภาคของของแข็งอยู่น้อยมาก

3.2.2.2 ผลของเวลาในการปล่อยทิ้งไว้ (Holding time)

จากการทดลองในครั้งแรกพบว่าเวลาในการปล่อยให้น้ำอะลูมิเนียมเกิดการเย็นตัวในแม่พิมพ์ส่งผลให้เกิดการแยกเฟสของของแข็งและของเหลวขึ้น จึงได้ทดลองเพิ่มเวลาการปล่อยทิ้งไว้ในแก้วเพื่อให้อนุภาคของของแข็งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการปล่อยฟองแก๊สได้มีเวลาในการขยายขนาดอนุภาคขึ้น โดยเลือกใช้สภาวะ GISS ที่ 10 วินาที และปล่อยทิ้งไว้ในแก้ว 10 วินาทีก่อนเทลงในแม่พิมพ์ และรอจนชิ้นงานเริ่มแข็งที่ 15-20 วินาทีเช่นเดียวกับการทดลองแรก ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.4 และ โครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 3.9

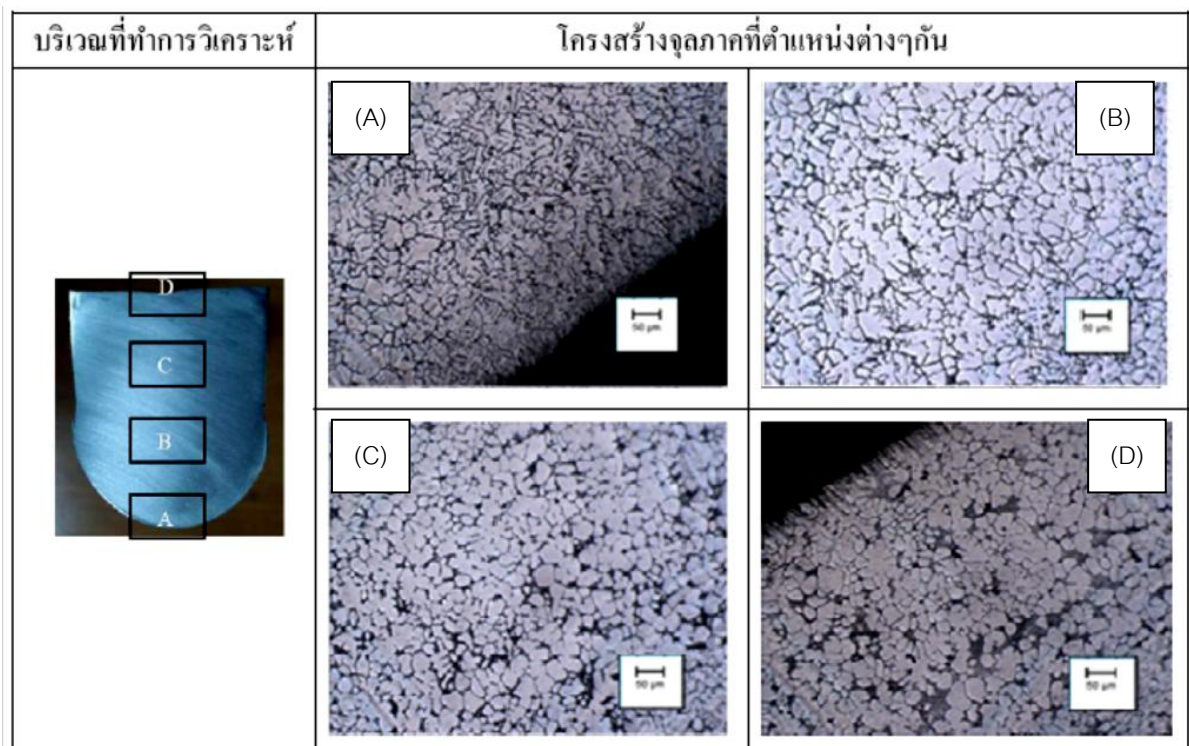
ตารางที่ 3.4 ผลการทดลองทุบขึ้นรูปที่สภาวะ GISS +Holding time ที่เวลาแตกต่างกัน

ลำดับ ชิ้นงาน	อุณหภูมิ หัวทุบ (°C)	อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาในการปล่อย ฟองแก๊ส (s)	เวลาในการปล่อย ทิ้งไว้(s)	เวลารอใน แม่พิมพ์ (s)	ผลการทดลอง
No.1-1	110	250	10	10	ทุบทันที	น้ำโลหะเหลวเกินไป
No.1-2	110	250	10	10	15-20	ชิ้นงานสมบูรณ์
No.2-1	110	250	15	5	15-20	ชิ้นงานสมบูรณ์
No.2-2	110	250	15	5	15-20	ชิ้นงานสมบูรณ์



รูปที่ 3.9 โครงสร้างจุลภาคที่สภาวะปล่อยฟองแก๊ส 10 วินาทีพร้อมทั้งปล่อยทิ้งไว้ 10 วินาที

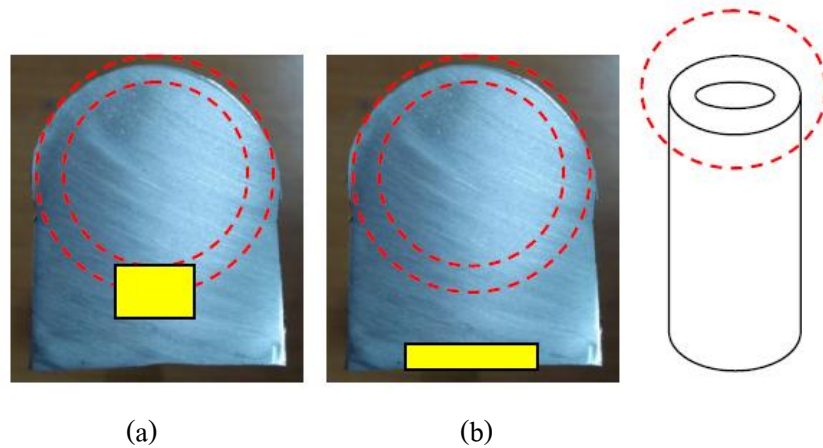
จากรูปที่ 3.9 พบว่าชิ้นงานเกิดการแยกเฟสเฉพาะที่บริเวณที่ได้รับความร้อนจากหัวทูปจึงเลือกการทดลองอีกสถานะหนึ่งคือสถานะปล่อยฟองแก๊ส 15 วินาทีพร้อมทั้งปล่อยทิ้งไว้ 5 วินาที เหตุที่การทดลองเลือกเวลาในการทดลองเช่นนี้เพราะว่าเวลาที่ใช้ก่อนการเทอะลูมิเนียมลงในแม่พิมพ์ไม่ควรเกิน 20 วินาทีเพราะจะทำให้ไม่สามารถเทน้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวออกจากเบ้าได้หมด เพราะบางส่วนเกิดการแข็งตัวไปแล้ว โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่สถานะปล่อยฟองแก๊ส 15 วินาทีพร้อมทั้งปล่อยทิ้งไว้ 5 วินาทีแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่สถานะปล่อยฟองแก๊ส 15 วินาทีพร้อมทั้งปล่อยทิ้งไว้ 5 วินาที

จากรูปที่ 3.10 พบว่าชิ้นงานมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น เกรนที่ได้ค่อนข้างกลมมากกว่าเกรนแรก การแยกเฟสโดยรวมลดลง และมีการกระจายทั่วไปไม่เกาะกลุ่มแยกเฟสชัดเจน ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าการเพิ่มเวลาในการปล่อยฟองแก๊สเพิ่มขึ้นมีส่วนในการทำให้แกนเดนไดรต์เกิดการแตกออกกลายเป็นเกรนกลมเพิ่มขึ้นในขณะที่การปล่อยทิ้งไว้มีส่วนให้เกรนขยายใหญ่ขึ้น จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่าเมื่อเทียบกันระหว่างการทดลองที่มีการปล่อยฟองแก๊สเพียงอย่างเดียว 20 วินาที, ปล่อยฟองแก๊ส 10 วินาที+ปล่อยทิ้งไว้ในแก้ว 10 วินาที และ ปล่อยฟองแก๊ส 15 วินาที+ปล่อยทิ้งไว้ในแก้ว 5 วินาที พบว่าเกรนสุดท้ายให้ผลออกมาดีที่สุด

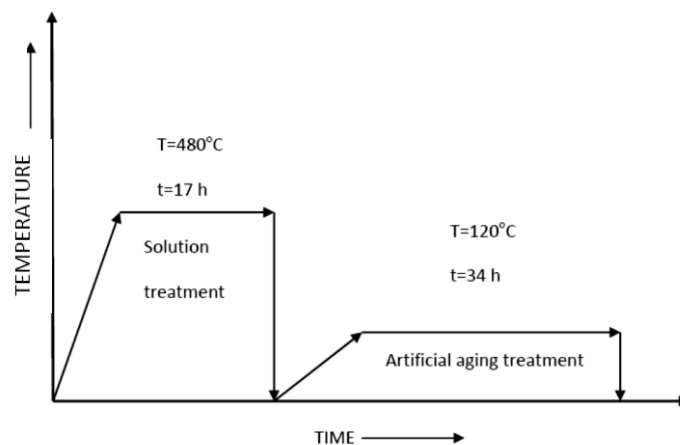
จากผลการทดลองโดยการเพิ่ม Holding time แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นและพบการแยกเฟสของของเหลวที่เฉพาะบริเวณที่ติดกับ punch การแก้ปัญหาเรื่องนี้มีผลต่อการนำชิ้นงานไปกลึงเป็นท่อขาเทียมเพราะตำแหน่งที่เกิดการแยกเฟสของของเหลวจากการทดลองแรกเกิดในแนวเดียวกับบริเวณที่ใช้งาน ในขณะที่บริเวณที่เกิดการแยกเฟสของของเหลวในการทดลองที่สองไม่มีผลต่อการนำไปใช้งานภายหลังการกลึง ดังแสดงในรูปที่ 3.11



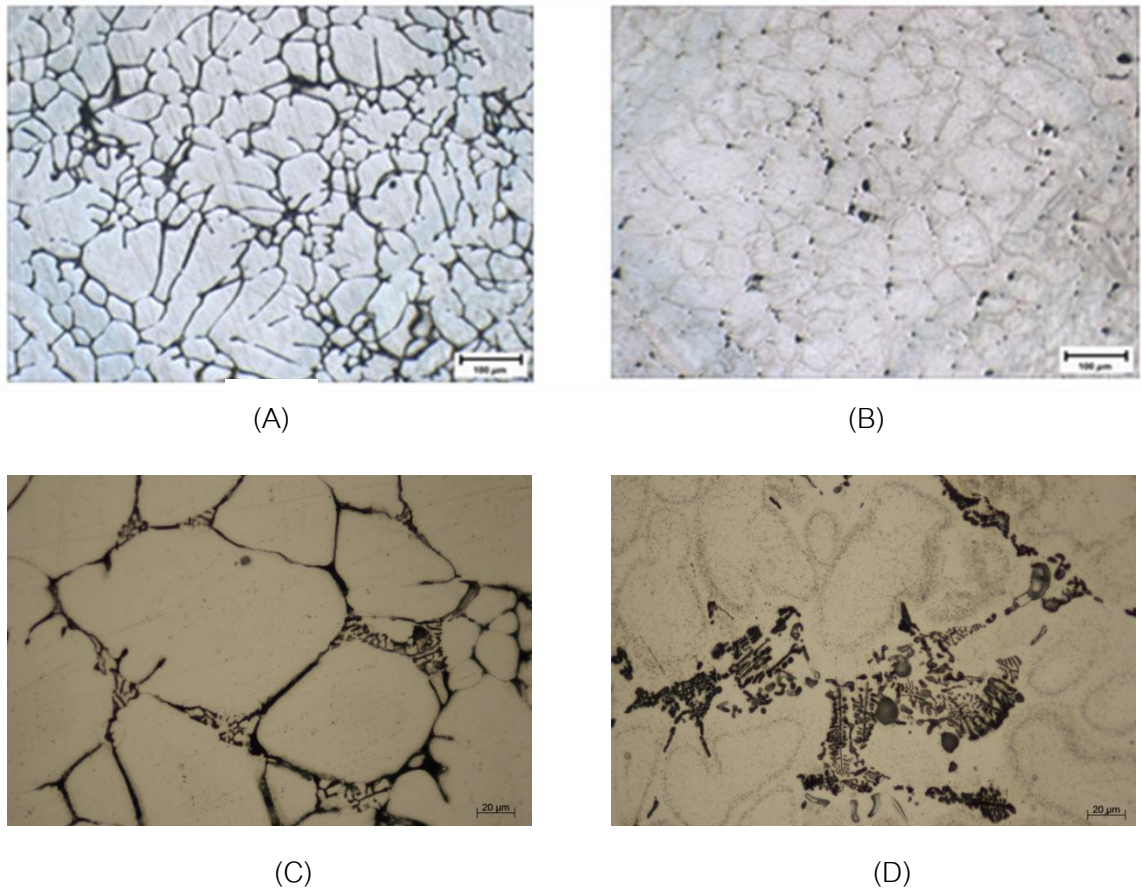
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งที่เกิดการแยกเฟสของของเหลว (a) การทดลองแรก (b) การทดลองที่สองและเส้นประที่แสดงบริเวณที่นำไปทำเป็นท่อขาเทียม

3.2.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน (Mechanical properties)

การศึกษสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเน้นไปที่ผลที่ได้เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) แบบ T6 โดยตัดผลการทดลองในเบื้องต้นออก กราฟจำลองกระบวนการปรับปรุงทางความร้อนแบบ T6 แสดงในรูปที่ 3.12 และ โครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไปแสดงในรูปที่ 3.13

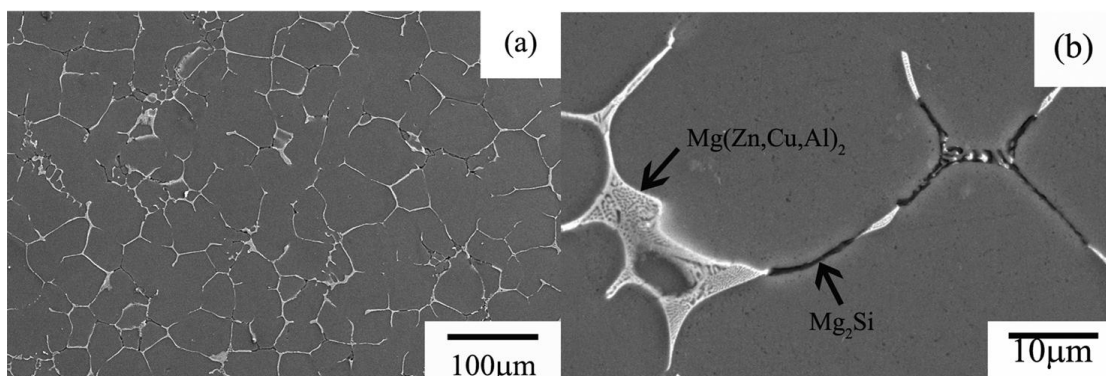


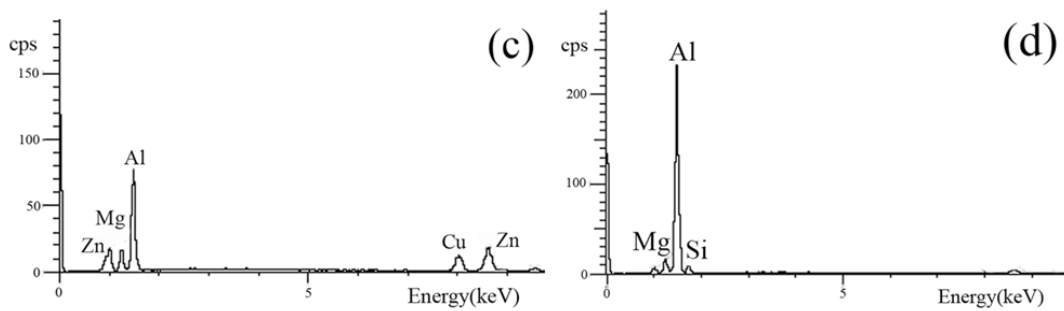
รูปที่ 3.12 กระบวนการปรับปรุงทางความร้อนแบบ T6 ของอะลูมิเนียมกิ่งของแข็งเกรด 7075



รูปที่ 3.13 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อน (A) และหลัง (B) ผ่านกระบวนการทางความร้อน โครงสร้างยูเทคติกก่อน (C) และหลัง (D) ผ่านกระบวนการทางความร้อน

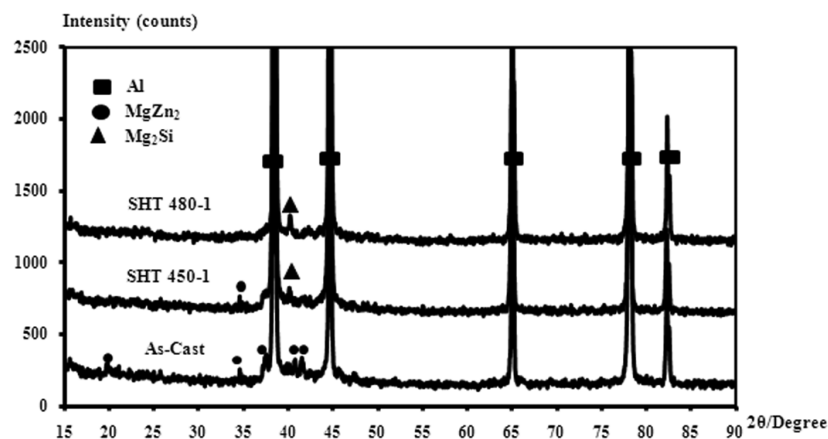
โครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายภาพด้วย SEM ของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 (อ้างอิงจากงานวิจัยของ Narissara, 2011) ที่ผ่านกระบวนการหล่ออัดสถานะกึ่งของแข็ง พบว่าการปล่อยฟองแก๊สที่ระยะเวลา 7 วินาที และรอ 30 วินาที ก่อนเทลงแม่พิมพ์ แล้วอัดด้วยความดันประมาณ 80 MPa จะให้ลักษณะโครงสร้างเกรนแบบไม่เป็นกิ่งไม้ (non-dendritic) ของ α -Al ซึ่งปรากฏในภาพเป็นสีเทา ส่วนสีขาวและสีดำที่ปรากฏระหว่างเกรนเรียกว่าเฟสของขอบเกรนประกอบด้วยเฟสต่างๆ ดังภาพถ่ายที่กำลังขยายสูงในรูป 3.14b





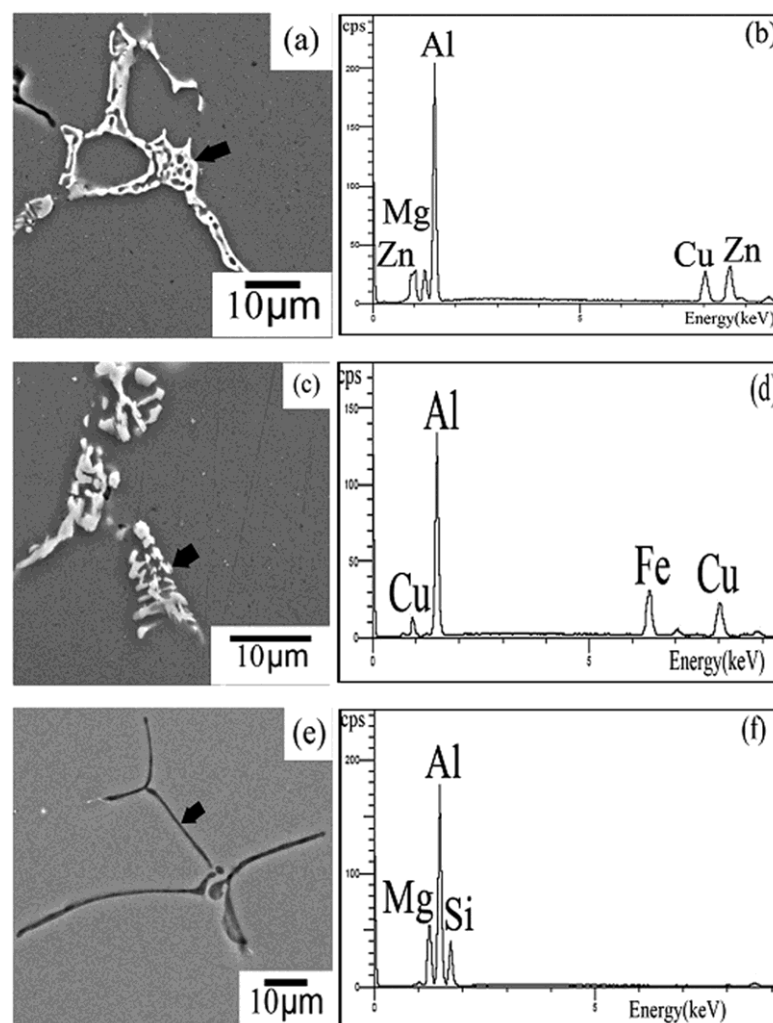
รูปที่ 3.14 ภาพถ่าย SEM ของ (a)-(b) อะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการหล่ออัดแบบ SSM (c) ผล EDS ของเฟสสีขาวในขอบเกรน (d) ผล EDS ของเฟสสีดำในขอบเกรน (ที่มา: Mahathaninwong.N, และคณะ 2012)

จากผลวิเคราะห์ด้วย EDS ในรูป 3.14c พบว่าเฟสสีขาวส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุ Zn Mg และ Cu เนื่องจากเกิดการเชกกรีเกินขึ้นในขั้นตอนการหล่อ จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าถ้าอะลูมิเนียมผสมในกลุ่ม 7000 มีสัดส่วน Zn/Mg มากกว่า 2.2 เฟสที่สองที่จะเกิดขึ้นจากการแข็งตัวของยูเทคติกคือ เฟส $MgZn_2$ ทั้งนี้อะลูมิเนียมผสม 7075 ในงานวิจัยนี้มีสัดส่วน Zn/Mg เท่ากับ 2.4 ดังนั้นจากโครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยเฟสของเฟสแอลฟาอะลูมิเนียมและเฟสของยูเทคติก ประกอบกับผล XRD ที่บ่งชี้ถึงเฟสหลักสองเฟสของ α -Al และ $MgZn_2$ ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ ดังในรูปที่ 3.15 ดังนั้นเฟสสีขาวที่ขอบเกรนควรจะเป็น quaternary $Mg(Zn,Cu,Al)_2$ phase โดยที่ อะตอม Al และ Cu บางอะตอมละลายใน η - $MgZn_2$ และฟอร์มผลึกเหมือนกับ $MgZn_2$ ดังที่มีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้[28] นอกจากนี้ผล EDS ของเฟสสีดำที่ขอบเกรนในรูป 3.14d คือ Mg_2Si ซึ่งมีปริมาณน้อยไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วย XRD



รูปที่ 3.15 แสดงผล XRD ของอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (As-cast) และตัวอย่างที่ผ่านการอบละลายที่ $450^{\circ}C$ 1 ชั่วโมง (SHT 450-1) และ $480^{\circ}C$ 1 ชั่วโมง (SHT 480-1) (ที่มา: Mahathaninwong.N, และคณะ 2012)

เฟสที่เหลืออยู่หลังจากการอบละลายที่ 450°C 1 ชั่วโมง มีรูปร่างคล้ายโครงกระดูก(skeleton shape) และเส้นสีดำยาว(elongated black shape) ดังแสดงในรูปที่ 3.16(c) และ (e) ตามลำดับ ทั้งสองเฟสนี้สามารถพบได้ทุกสภาวะการอบละลาย จากผล EDS ของเฟสทั้งสองในรูปที่ 3.16 (d) และ (f) ระบุว่าเฟส Al-Fe-Cu สำหรับ skeleton shape และเป็นเฟส Al-Mg-Si สำหรับ elongated black shape ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ N. M. Doroshenko et al.[29] เขาระบุว่าเฟสที่มีรูปร่าง skeleton จะเป็นเฟส $(\text{Cu, Fe})\text{Al}_6$ และ Cu_2FeAl , ขณะที่เฟสที่มีรูปร่าง elongated black เป็น Mg_2Si



รูปที่ 3.16 (a), (c), (e) ภาพถ่าย SEM (b), (d), (f) ผล EDS ของเฟสขอบเกรนที่เหลืออยู่หลังจากอบ

ละลายที่อุณหภูมิ 450°C 1 ชั่วโมง

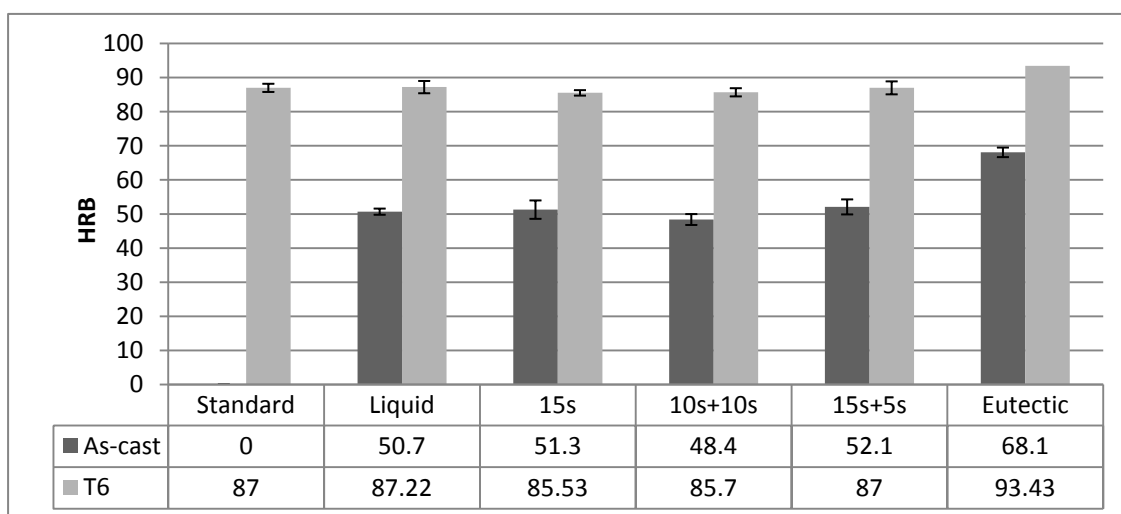
(ที่มา: Mahathaninwong,N, และคณะ 2012)

3.2.3.1 ค่าความแข็ง (Hardness Rockwell Scale B testing)

เทียบกับชิ้นงานก่อนการปรับปรุงทางความร้อน และมาตรฐานโดยทั่วไปของ Al 7075+T6 ตารางแสดงค่าความแข็งแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 และกราฟความแข็งแสดงดังรูปที่ 3.17

ตารางที่ 3.5 ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบ

เงื่อนไข	ค่าความแข็ง (HRB)	
	ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน	ผ่านกระบวนการทางความร้อน
Standard*	-	87.0
liquid	50.70 ± 0.9	87.22 ± 1.2
15s	51.31 ± 2.7	85.53 ± 1.8
10s+10s	48.40 ± 1.6	85.70 ± 0.8
15s+5s	52.10 ± 2.2	87.0 ± 1.2
Eutectic	68.10 ± 1.4	93.43 ± 1.9



รูปที่ 3.17 กราฟแสดงค่าความแข็งก่อนและหลังปรับปรุงทางความร้อน

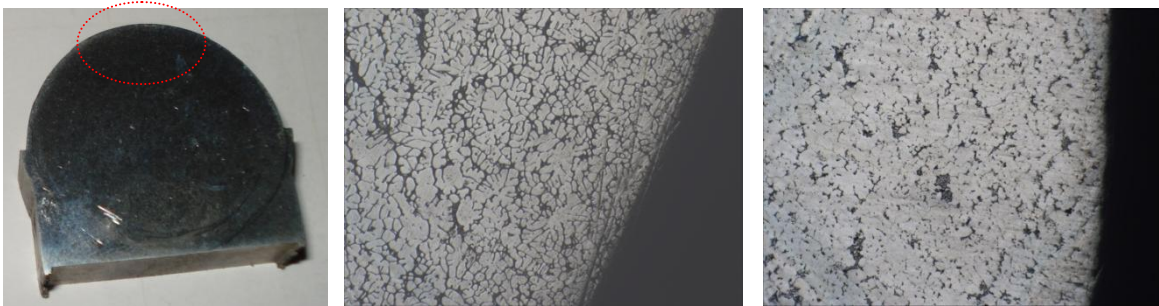
ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากขั้นตอนการบ่มที่ทำภายหลังขั้นตอนการอบละลายเพื่อละลายเฟสอื่นๆ นอกเหนือจากเฟสแอลฟาให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ให้อยู่ในรูปสารละลายของแข็งโดยที่ไม่เกิดเฟสใหม่ที่มีขนาดใหญ่และเปราะ แล้วจึงนำไปผ่านขั้นตอนการทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว ทำให้จำนวนสารละลายของแข็งที่ละลายในเมทริกซ์มีมากกว่าความสามารถในการละลายของสารละลายของแข็งปกติที่อุณหภูมิห้องซึ่งอยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัว

ยิ่งขูดที่ไม่มีความเสถียร เมื่อนำไปบ่มต่อทำให้สารละลายของแข็งเหล่านี้เกิดพรีซิพิตชันเป็นผลให้วัสดุมีความแข็งแรงขึ้นพรีซิพิตเฟส η' จะเป็นเฟสหลักที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการชุบในสภาวะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS ในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการอบละลายที่อุณหภูมิ 480°C เป็นเวลา 17 ชั่วโมงและบ่มที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 34 ชั่วโมง โดยค่าความแข็งของชิ้นงานกึ่งของแข็งมีค่ามากที่สุดที่เงื่อนไขการปล่อยฟองแก๊ส 15 วินาทีและปล่อยทิ้งไว้ 5 วินาที และในกรณีขึ้นรูปในสภาวะของเหลวก็ให้ค่าความแข็งภายหลังการทำ T6 สูงถึง 87.22 ± 1.2 HRB ซึ่งเมื่อเทียบกับมาตรฐานโดยทั่วไปของอะลูมิเนียม 7075 T6 ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 87 HRB แล้ว พบว่าการเลือกใช้สภาวะในการปรับปรุงทางความร้อนส่งผลต่อชิ้นงานที่มีโครงสร้างทั้งสองแบบได้เป็นอย่างดี

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งบริเวณที่เกิดการแยกเฟส ซึ่งเป็นลักษณะแอ่งยูเทคติกดังแสดงรูปที่ 3.18 พบว่าค่าความแข็งบริเวณนี้มีค่าสูงกว่าบริเวณอื่นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยภายหลังการทำ T6 อยู่ที่ 93.43 ± 1.9 HRB อันเนื่องมาจากเฟสยูเทคติกที่เกิดจะมีลักษณะเป็น lamellar คือผสมกันระหว่างเฟสของอะลูมิเนียมสลับกับเฟส $\text{Mg}(\text{Zn}, \text{Cu}, \text{Al})_2$ ซึ่งเป็นเฟสที่มีลักษณะเฉพาะคือแข็งแต่เปราะ จึงทำให้ค่าความแข็งในบริเวณนี้มีค่าสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ ที่มียูเทคติกอยู่บ้างตามขอบเกรนอันเกิดจากการแยกเฟสของสารละลาย (solute segregation) ซึ่งไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งโดยรวมมากนักเมื่อเทียบกับยูเทคติกที่อยู่รวมกันเป็นแอ่ง โครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบบริเวณแอ่งยูเทคติกและบริเวณอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 3.19



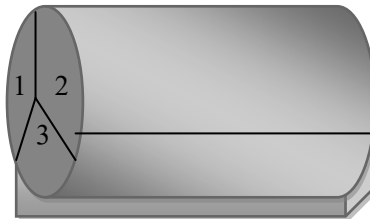
รูปที่ 3.18 แอ่งยูเทคติก (a) โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งแอ่งยูเทคติกก่อนทำ T6 (b) โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งแอ่งยูเทคติกหลังทำ T6 (b)



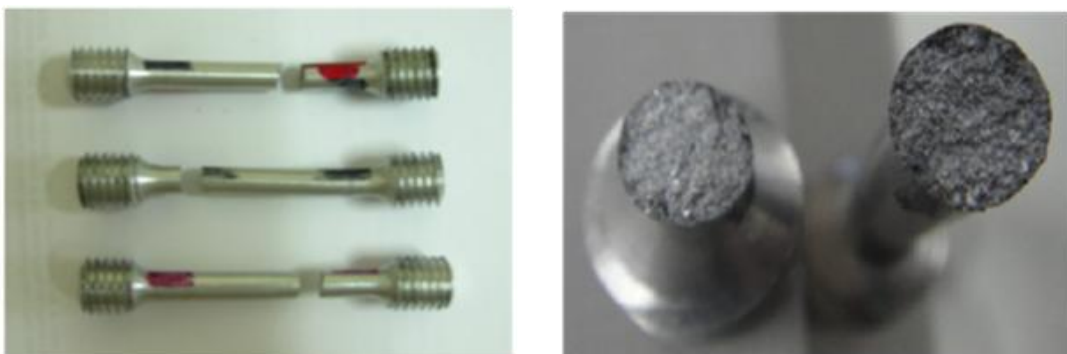
รูปที่ 3.19 บริเวณขอบล่าง (a) โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งขอบล่างก่อนทำ T6 (b) โครงสร้างจุลภาคตำแหน่งขอบล่างหลังทำ T6 (b)

3.2.3.2 การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength testing)

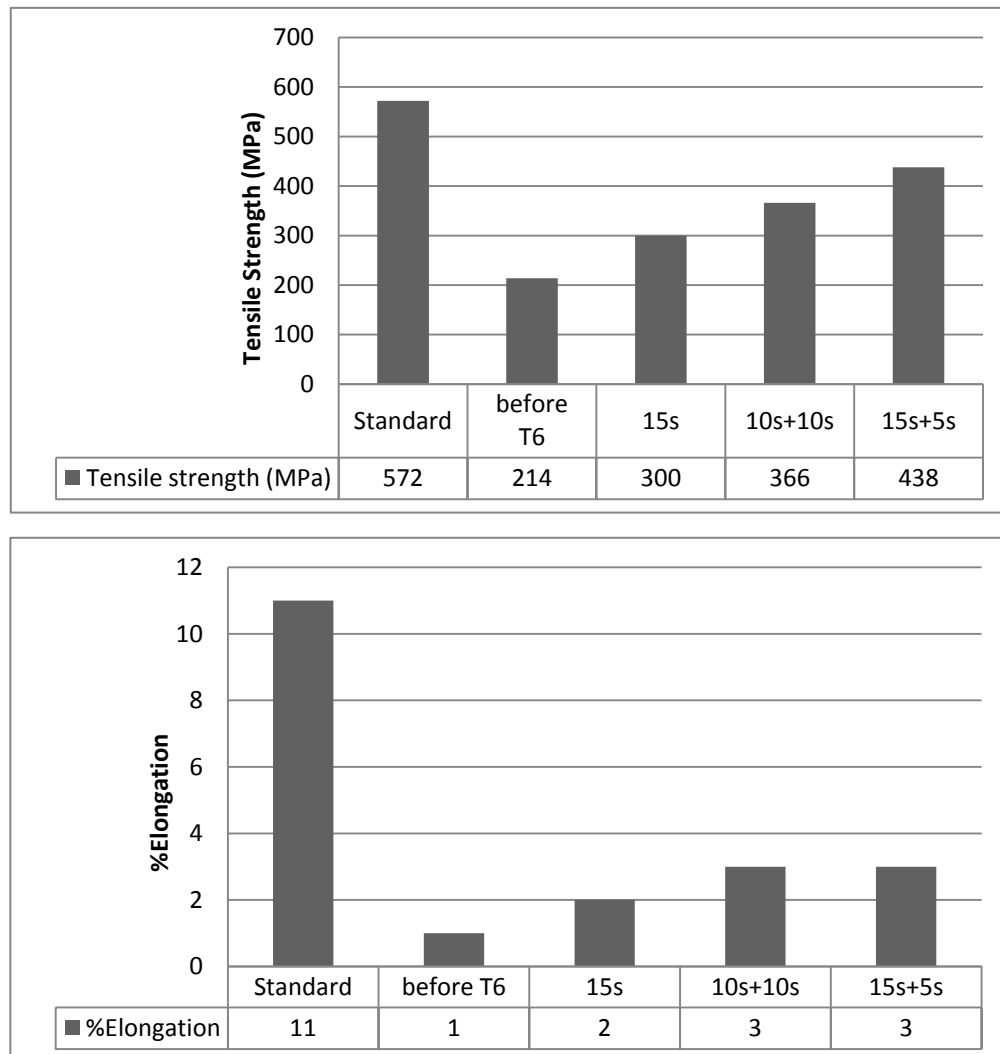
เพื่อทดสอบความแข็งแรงดึง ชิ้นงานจะถูกแบบออกเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 3.20 และผ่านการเตรียมชิ้นงานทดสอบการกึ่งตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึง ASTM E8 ลักษณะรอยขาดจากแรงดึงและผิวหน้ารอยขาดแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 แสดงการแบ่งส่วนชิ้นงานทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.21 ลักษณะรอยขาดจากแรงดึง (a) และผิวหน้ารอยขาด (b)

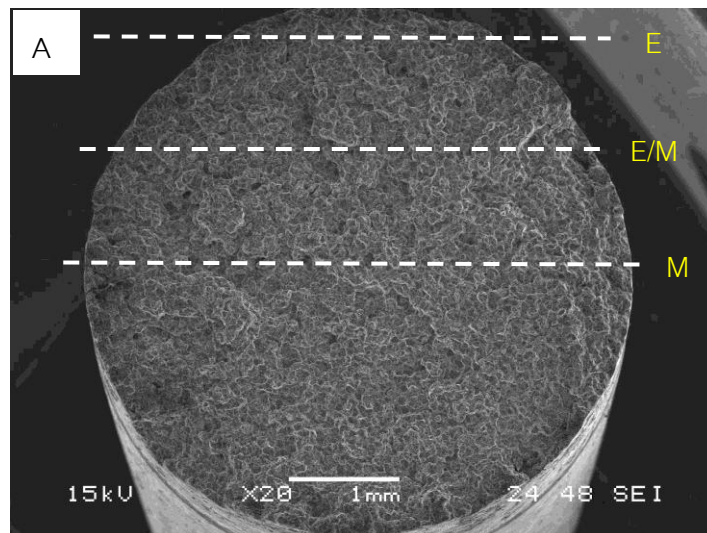


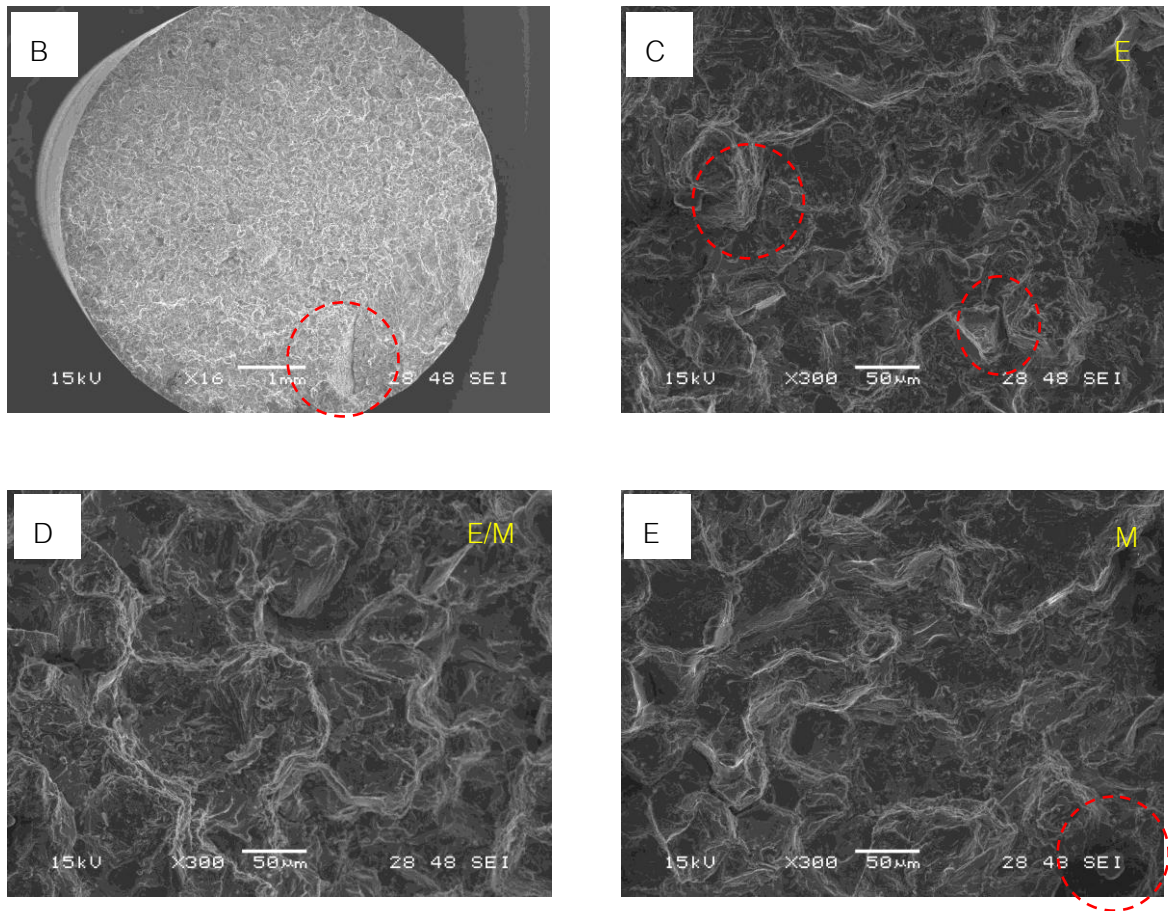
รูปที่ 3.22 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานตัวอย่างแท่งกระบอก
ต้นยาวก่อนและหลังปรับปรุงทางความร้อน

ผลการศึกษาความแข็งแรงการดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดของอะลูมิเนียมผสม 7075 ดังแสดงในกราฟเส้นรูปที่ 3.22 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปในสภาวะปล่อยของแข็ง 15 วินาทีและปล่อยทิ้งไว้ 5 วินาทีจะให้ค่าความแข็งแรงการดึงเฉลี่ยสูงสุดที่ 438 MPa และมีเปอร์เซ็นต์การยืดเฉลี่ยที่ 3% ผลจากการศึกษาการยืดจะถูกควบคุมโดยความบกพร่องในชิ้นงานและอินเตอร์เมทัลลิกเฟสที่ไม่สามารถละลายได้แม้ว่าค่าความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสม 7075 ในงานวิจัยนี้จะต่ำกว่าอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผลิตด้วยกระบวนการขึ้นรูปเย็น (Wrought) อันเนื่องจากชิ้นงานมีข้อบกพร่อง (defect) ในชิ้นงานที่ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อการวิเคราะห์รอยแตกผิว (หัวข้อ 3.2.4) แต่สามารถเทียบเคียงได้กับอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบ Thixo-casting

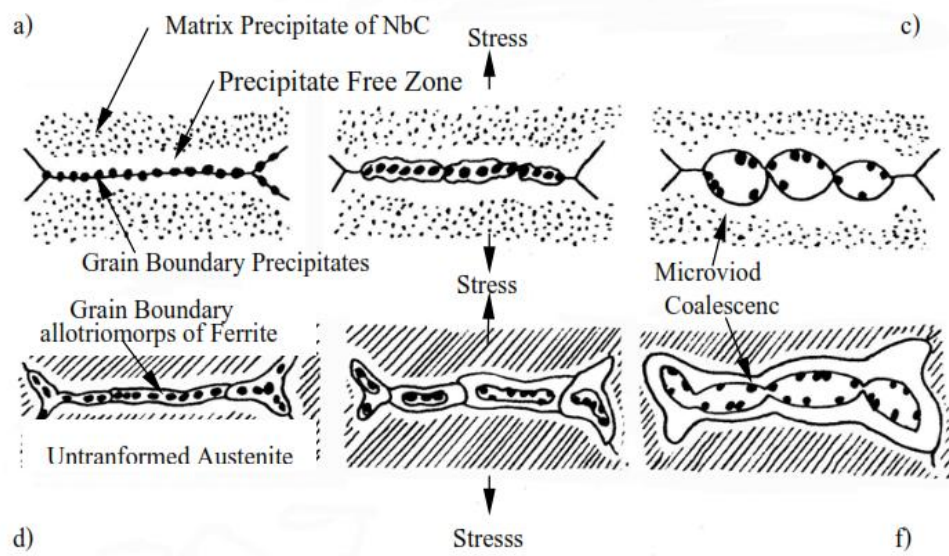
3.2.4 ผลการวิเคราะห์รอยแตกผิว (Fracture surface analysis)

ผิวรอยแตกชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึงเมื่อนำมาวิเคราะห์ภาพถ่ายพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด(SEM) ดังแสดงในรูปที่ 3.23 A โดยชิ้นงานที่นำไปวิเคราะห์คือชิ้นงานในสภาวะขึ้นรูปที่การปล่อยฟองแก๊ส15วินาทีและปล่อยทิ้งไว้5วินาทีที่ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 438MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดเท่ากับ4% พบว่าการวิบัติเกิดแบบผสม(ductile-brittle fracture mode) อันเห็นได้จากผิวรอยดึงบางส่วนที่ลักษณะเป็นรูพรุนเล็กๆ(dimples)ดังแสดงในรูปที่ 3.23 C และมีบางส่วนที่เกิดการแบบเปราะชนิดแตกตามขอบเกรน(intergranular)ดังแสดงในรูปที่ 3.23 D อันเนื่องมาจากเฟสยูเทคติกที่อยู่ตามขอบเกรน ทำให้บริเวณนี้มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะกว่าเนื้อโลหะทำให้เกิดการแตกหักได้ง่ายโดยกลไกการแตกหักตามขอบเกรนอ้างอิงได้จากงานวิจัยของD.N.Crowther and b.Mintz ,1992 แสดงในรูปที่ 3.24 นอกจากนี้เนื่องจากอินกอทที่ใช้ขึ้นรูปแท่งกระบอกตันขยวนี้มีสิ่งเจือปน(inclusion)ในเนื้อโลหะค่อนข้างสูงแม้จะทำการฟลักซ์(flux)ให้ดีแล้วยังหลงเหลือพวกสารมลทินเล็กๆอยู่ดังแสดงในรูป3.243E นอกจากนี้ยังมีการฝังตัวของฟิล์มออกไซด์(oxide film) ดังในชิ้นงานนี้จะเห็นว่าบริเวณที่ส่งผลต่อการแตกหักเป็นอย่างมากคือตำแหน่งที่มีฝังตัวของฟิล์มดังแสดงในรูปที่ 3.23 B จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปมีค่าความแข็งแรงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวไม่สูงเท่าที่ควร





รูปที่ 3.23 A-E) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของพื้นผิวรอยแตกชิ้นงานสภาวะ 15s+5s ที่ผ่านการทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.24 ลักษณะกลไกการแตกหักตามขอบเกรนในช่วงของการสูญเสียความเหนียวในขณะร้อนของเหล็กกล้า a-c) เป็นการเกิดขึ้นภายในบริเวณ PFZ d-f) เป็นการเกิดขึ้นภายในบริเวณ

ฟิล์มเฟอร์ไรท์ในช่วงของการเปลี่ยนเฟส

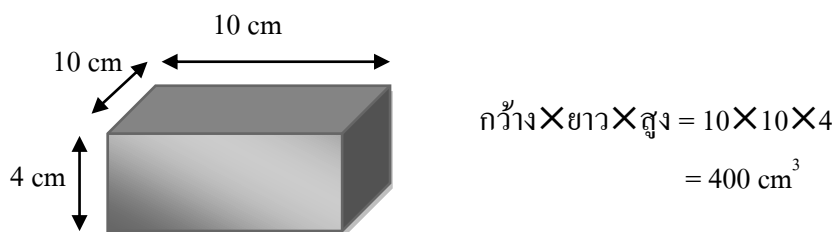
(D.N.Crowther and b.Mintz, 1992)

จากรูปที่ 3.24 เป็นการจำลองภาพการแตกหักตามขอบเกรนในช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟส อันเนื่องจากผลของชั้นฟิล์มเฟอร์ไรท์ที่มีความเครียดสะสมสูงอยู่ตามขอบเกรนเดิมของเฟสออสเทนไนท์ เมื่อชิ้นงานถูกแรงกระทำชั้นฟิล์มของเฟอร์ไรท์ซึ่งมีความอ่อนมากกว่าเกรนของออสเทนไนท์จะเกิดการเปลี่ยนรูปที่มากกว่าทำให้เกิดความเครียดสะสมขึ้นที่ชั้นฟิล์มของเฟอร์ไรท์ เกิด Microvoid ขึ้นตรงบริเวณผิวหน้าของอนุภาคกับเนื้อพื้นที่ตามขอบเกรนเดิมของออสเทนไนต์ซึ่งอยู่ภายในบริเวณชั้นฟิล์มของเฟอร์ไรท์ จากนั้น Microvoid จะขยายตัว (coalescence) จนทำให้เกิดการแตกหักแบบตามขอบเกรนดังรูปที่ 3.24 d-f

3.3 กรณีศึกษาการทุบขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนา (billet) ด้วยกรรมวิธีการทุบขึ้นรูปอะลูมิเนียมกิ่งของแข็ง

3.3.1 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งที่เตรียมได้จากกระบวนการ GISS

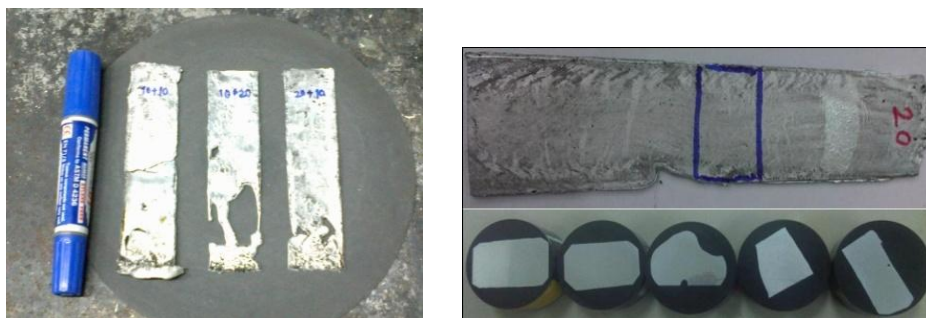
จากผลการทดลองหาปริมาณสัดส่วนแข็งเริ่มต้นของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ใช้ในงานวิจัย จะทำการปล่อยฟองแก๊สลงไปใต้น้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่ตักจากเบ้าแกรไฟต์ ปริมาณ 400 กรัม(การคำนวณปริมาณแสดงดังรูปที่ 3.26) ในกระบวยตัก (Ladle) ที่ทำจากสเตนเลส จากนั้นใช้แม่พิมพ์ทองแดงและปั๊มสุญญากาศเพื่อเก็บตัวอย่างของน้ำโลหะที่ปล่อยฟองแก๊สที่ระยะเวลาต่างกันคือ 3,10+10, 20, 10+20, 20+10 และ 30 วินาที ตามลำดับ เมื่อได้ชิ้นงานตัวอย่างแล้วจึงนำไปตัดบริเวณตรงกลางดังรูปที่ 3.26 และถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณเฟสของแข็งด้วยโปรแกรม Photoshop และ Image Tool ตามลำดับ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.27 พบว่าที่ระยะเวลาการปล่อยฟองแก๊ส 10 15 และ 20 วินาที ตามลำดับ ตัวแปรในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.6 และสัดส่วนของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆแสดงดังตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.25 ปริมาตรของรูปทรงแผ่นสี่เหลี่ยมหนาที่ใช้ในการวิจัย

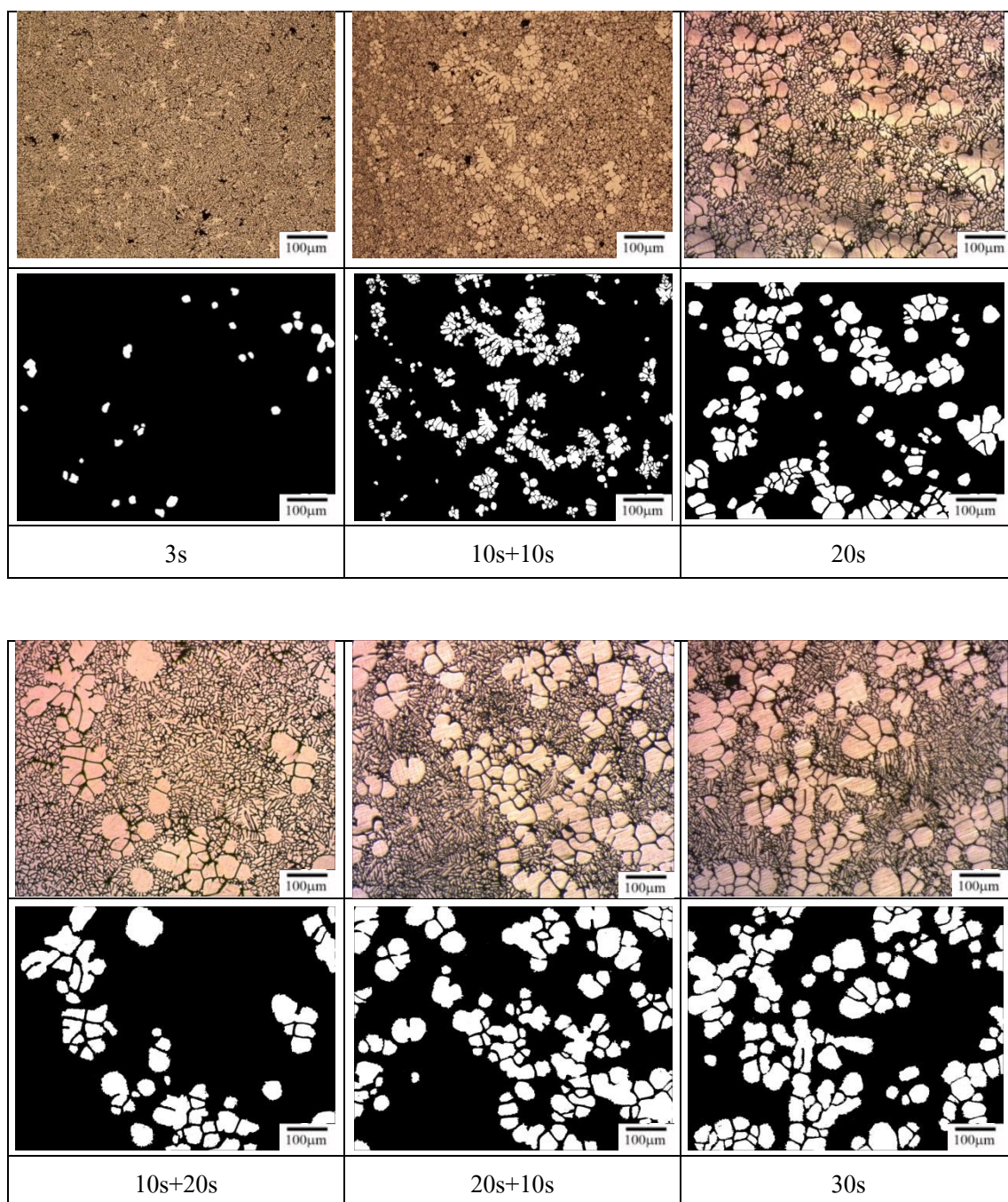
ตารางที่ 3.6 แสดงค่าต่างๆในการวัดสัดส่วนของแข็งของแต่ละเงื่อนไข

เงื่อนไข	อุณหภูมิเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิสุดท้าย ($^{\circ}\text{C}$)	ปริมาตรน้ำโลหะ (ml)	ผลการทดลอง
3s	643	631.9	400	เต็มแบบ
10s+10s	643	625.0	400	ไม่เต็มแบบ
20s	643	631.0	400	เต็มแบบ
10s+20s	643	627.4	400	ไม่เต็มแบบ
20s +10s	643	629.3	400	ไม่เต็มแบบ
30s	643	630.0	400	ไม่เต็มแบบ

*Liquidus: 633°C 

รูปที่ 3.26 ชิ้นงานจากแม่พิมพ์ทองแดงที่นำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ทำการถ่ายภาพที่กำลังขยาย 50x ชิ้นงานละ 6 รูปเพื่อนำไปหาสัดส่วนของแข็ง ตัวอย่างรูปที่ได้ และเปอร์เซ็นต์สัดส่วนของแข็ง แสดงได้ดังรูปที่ 3.26

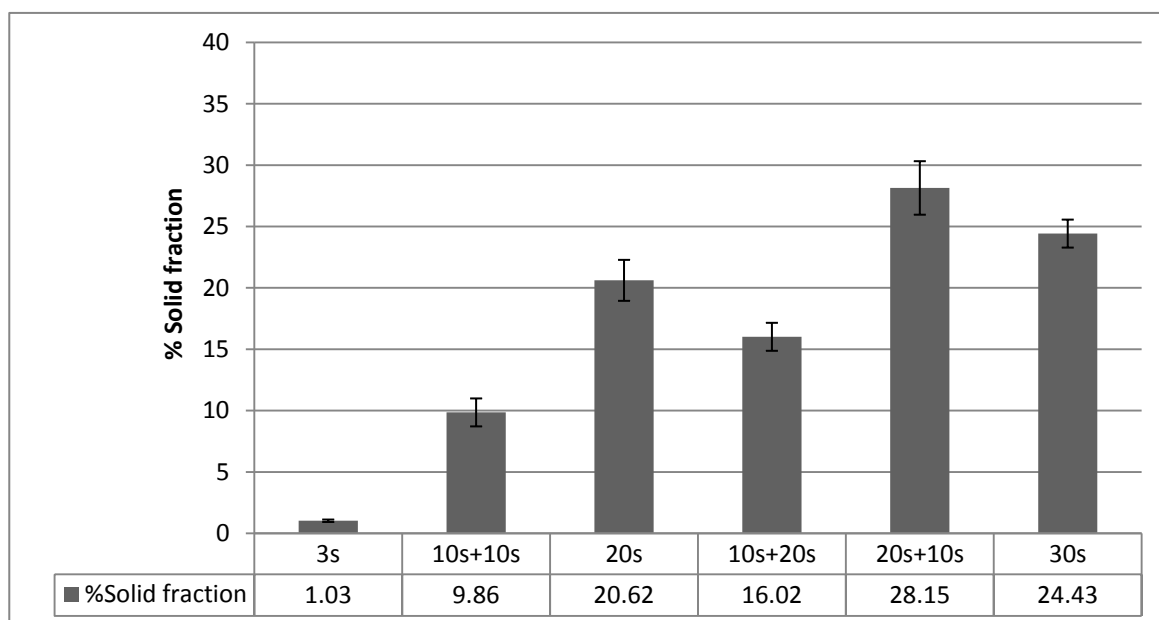


รูปที่ 3.27 โครงสร้างจุลภาคเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณเฟสของแข็งด้วยโปรแกรม

Photoshop และ Image Tool

ตารางที่ 3.7 แสดงสัดส่วนของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ ของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เงื่อนไข	เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส (วินาที)	เวลาที่ปล่อยทิ้งไว้ (วินาที)	สัดส่วนของแข็ง
3s	3	-	3.03 ± 1.69
10s+10s	10	10	20.32 ± 3.15
20s	20	-	24.64 ± 4.7
10s+20s	10	20	26.37 ± 3.15
20s+10s	20	10	30.86 ± 6.17
30s	30	-	31.14 ± 5.32



รูปที่ 3.28 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนของแข็งในแต่ละเงื่อนไข

เมื่อทำการเปรียบเทียบสัดส่วนของแข็งในแต่ละเงื่อนไข พบว่าค่าสัดส่วนของแข็ง (Solid Fraction) ของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 มีค่าแปรตามเวลาในการปล่อยฟองแก๊สและเวลาที่ปล่อยทิ้งไว้ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี คือ เวลาปล่อยฟองแก๊สมีผลต่อจำนวนของแข็ง ส่วนเวลาที่ทิ้งไว้มีผลต่อขนาดของของแข็ง เนื่องจากของแข็งมีเวลาในการเติบโตที่มากขึ้น จากรูปที่ 3.27 และ 3.28 สัดส่วนของแข็งในแต่ละเงื่อนไข แสดงให้เห็นว่าเมื่อปล่อยฟองแก๊ส 30 วินาทีที่มีจำนวนของแข็งมากที่สุด รองลงมาคือ 20+10, 10+20, 20, 10+10 และ 3 วินาที ตามลำดับ

3.3.2 ผลการทดลองทบขึ้นรูปและโครงสร้างจุลภาค

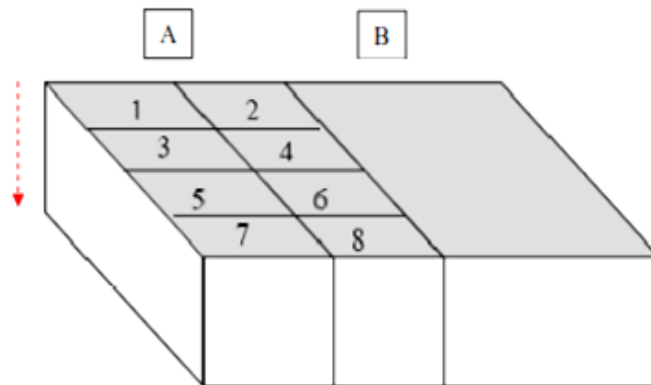
3.3.2.1 ผลของเวลาในการปล่อยฟองแก๊ส (GISS time)

ผลของเวลาในการปล่อยฟองแก๊สแสดงได้ดังตารางที่ 3.8 จากการทดลองพบว่าเวลาขึ้นงานเต็มแบบในสภาวะที่มีการปล่อยฟองแก๊ส 10วินาที, 20วินาทีและ30วินาที น้ำโลหะสามารถไหลได้ดีที่ 10วินาทีและ20วินาที ในกรณี 30วินาที น้ำโลหะค่อนข้างหนืดจึงมีน้ำโลหะบางส่วนติดอยู่ที่กันแก้ว แต่ก็ยังสามารถเทได้อยู่ โดยน้ำโลหะจะหนืดมากจนไม่สามารถเทได้หมดจนเหลือติดกันแก้วประมาณ100กรัม เมื่อปล่อยฟองแก๊สที่เวลา 40วินาที ในขณะที่การทบขึ้นรูปในสภาวะของเหลวพบว่าน้ำโลหะเหลวเกินไปจึงเกิดการรั่ว แม้จะได้ขึ้นงานที่มีน้ำหนักและความหนาตามต้องการ แต่ก็มีความอันตรายในทดลองจากน้ำโลหะที่รั่วออกมาจากแม่พิมพ์ จากผลการทดลองสามารถสรุปสภาวะในการขึ้นรูปในเบื้องต้นได้ว่าควรใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สอยู่ในช่วง 10-30วินาที นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ทำการทบขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมบาง(ขนาดครึ่งหนึ่ง) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบข้อบกพร่องที่เกิดเทียบกับแผ่นสี่เหลี่ยมหนา

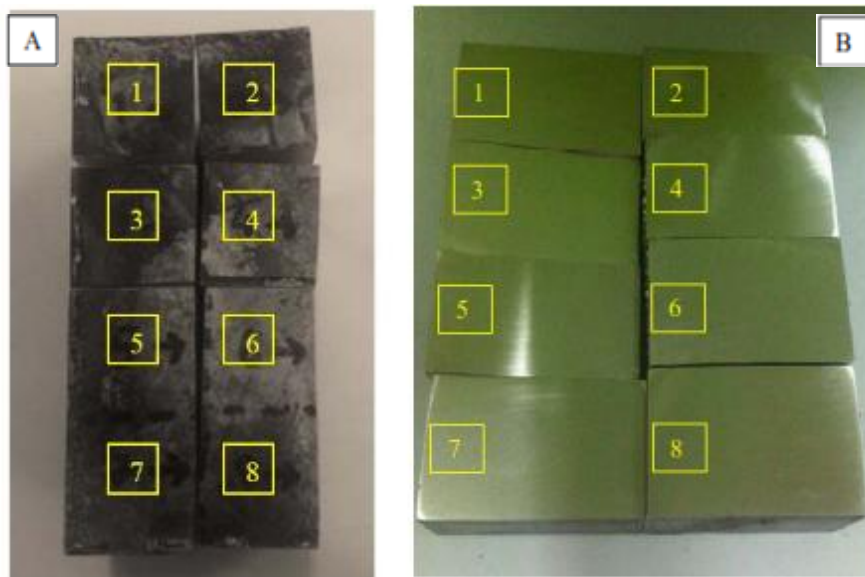
ตารางที่3.8 ผลการทดลองทบขึ้นรูปที่สภาวะ GISS ที่เวลาแตกต่างกัน

condition	GISS (s)	Holding time (s) ในแก้ว	ขนาดขึ้นงาน (กxยxส)	น้ำหนัก (g)	หมายเหตุ
Liquid	-	-	10x10x4	1042	Leak
SSM 10s (thin)	10	-	10x10x2	518	เต็มแบบ
SSM 10s	10	-	10x10x4.1	1086	เต็มแบบ
SSM 20s	20	-	10x10x4.2	1136	เต็มแบบ
SSM 30s	30	-	10x10x3.9	1052	เต็มแบบ ,ติดแก้วเล็กน้อย
SSM 40s	40	-	10x10x3.7	996	หนืดไป,ติดแก้ว

ขึ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปจะถูกนำไปตัดแบ่งเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่3.29 โดยขึ้นงานจะถูกแบ่งครึ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งไว้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวัดค่าความแข็งซึ่งจะตัดแบ่งเป็นชิ้นเล็กอีก8ชิ้นและนำไปจัดผิวดังทิศทางที่ลูกศรกำกับ อีกครึ่งหนึ่งจะถูกนำไปเตรียมเป็นขึ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง รูปขึ้นงานที่ผ่านการตัดและขัดผิวหน้าเพื่อไว้ตรวจสอบโครงสร้างและวัดความแข็งแสดงได้ดังรูปที่3.30


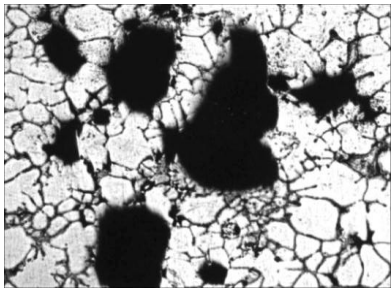

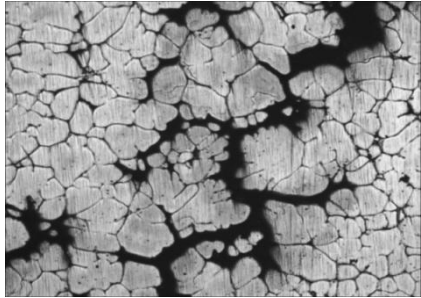
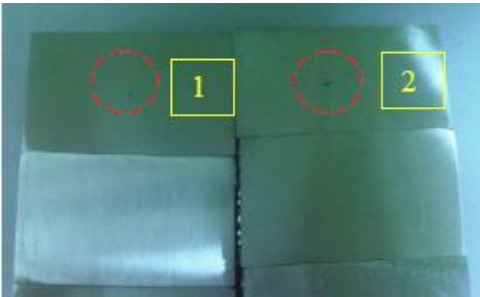
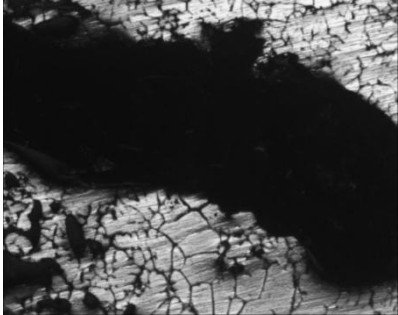

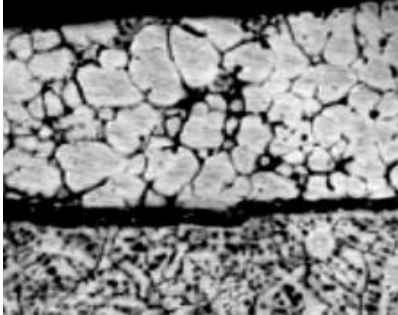


รูปที่ 3.29 แสดงการตัดแบ่งชิ้นงานเพื่อนำไปตรวจสอบและศึกษาการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.30 ชิ้นงานจริงจากมุมมอง (A) และชิ้นงานจริงจากมุมมองด้านข้าง (B)

เมื่อนำชิ้นมาวิเคราะห์จุดบกพร่องระดับมหภาค (Macrostructure) พบว่าจุดบกพร่องที่เห็นได้ด้วยตาเปล่าไม่พบในชิ้นงานที่ขึ้นรูปแผ่นบาง แต่จะพบในชิ้นงานแผ่นหนาที่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นในทุกสภาวะการขึ้นรูปแตกต่างกันไปดังแสดงในรูปที่ 3.31

Condition	ความบกพร่อง	
SSM 10s		
โพรงหดตัว (shrinkage) บริเวณใกล้กับรอยแตก		
SSM 20s		
รอยแตก (Hot crack) ที่ตรงกลางชั้นที่ 4		
SSM10s+10s		
ลักษณะของ โพรงหดตัว (Shrinkage) ในชั้นที่ 1 และ 2		
SSM 30s		
รอยแตกร้อน(Hot cracking) ที่ผิวของชั้นที่ 2,4,6		

หมายเหตุ : รูปอ้างอิงตำแหน่งของชั้นงาน สามารถดูได้จากรูปที่ 3.30

รูปที่ 3.31 จุดบกพร่องระดับมหภาคที่พบในชั้นงานทุบชั้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนา

จากรูปที่ 3.31 พบว่าข้อบกพร่องในชิ้นงานที่พบมีลักษณะคล้ายกับข้อบกพร่องที่พบในงานหล่ออ่อนเนื่องจากการชุบขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็งแบบ Rheo-forging นั้นไม่สามารถทำให้เปอร์เซ็นต์ตัดส่วนของแข็งสูงๆได้ ดังนั้นขณะขึ้นรูป น้ำโลหะจะยังคงมีเปอร์เซ็นต์ตัดส่วนของเหลวอยู่สูง และเนื่องจากอะลูมิเนียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ซึ่งเป็นเกรดที่เหมาะสมที่จะใช้ในงานรีดขึ้นรูป กล่าวคือเป็นเกรดที่ไม่เหมาะในการขึ้นรูปที่สภาวะของเหลว ยิ่งในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความหนาที่ต้องอาศัยแรงอัดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่เหมาะสม ดังนั้นข้อบกพร่องจึงเกิดขึ้นในชิ้นงานอันได้แก่ การแตกร้อน (Hot cracking) ที่เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเกินไปในบางส่วนของน้ำโลหะ ส่วนใหญ่ปัญหานี้มักเกิดที่ผิวของชิ้นงาน เนื่องจากผลของการเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอของน้ำโลหะและการเกิดโครงหดตัว (Shrinkage) อันเกิดจากการที่แรงดันของน้ำโลหะที่จะไหลไปทั่วแม่พิมพ์ไม่เพียงพอ เมื่อน้ำโลหะเย็นตัวลงก็จะทำให้ชิ้นส่วนไม่เต็มแม่พิมพ์เกิดการหดตัวที่ไม่สมบูรณ์หลังการชุบ บางสาเหตุเกิดจากการที่มีสิ่งสกปรกปะปนในน้ำโลหะมากเกินไปทำให้ส่วนที่ควรจะหดตัวได้อย่างสมบูรณ์เกิดความบกพร่องขึ้น หรือเกิดจากการที่มีอากาศเข้าไปมากกว่าน้ำโลหะก็จะทำให้การหดตัวไม่สมบูรณ์ด้วยเช่นเดียวกัน

จากผลการทดลองนี้จึงเป็นเหตุผลให้ทำการทดลองเพิ่มเพื่อดูผลของเวลาในการปล่อยทิ้งไว้ (Holding time) และการทดลองชุบขึ้นรูปชิ้นงานที่ตัดส่วนของแข็งเริ่มต้นต่ำมากๆคือ 3 วินาที เพื่อเปรียบเทียบว่าขนาดเกรนแบบใดจะให้ผลที่ดีกว่า สมมติฐานขนาดของของแข็งแสดงดังรูปที่ 3.32

○○	10
○○○○	20
○○○○○○	30
○○	10+10
○○○○	20+10
○○	10+20

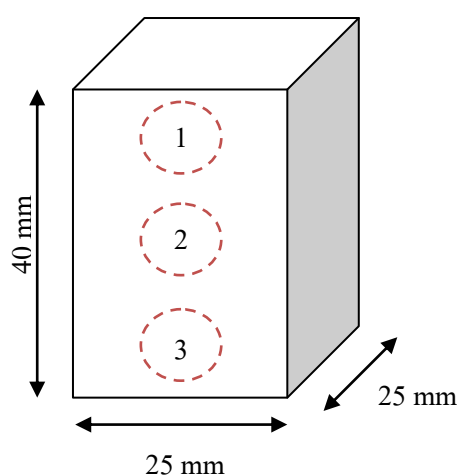
รูปที่ 3.32 สมมติฐานขนาดของของแข็ง (solid) ในแต่ละเงื่อนไข

3.3.2.2 ผลของเวลาในการปล่อยทิ้งไว้ (Holding time) เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปในสถานะ ของเหลวและในสถานะสัคส่วนกิ่งของแข็งต่ำ

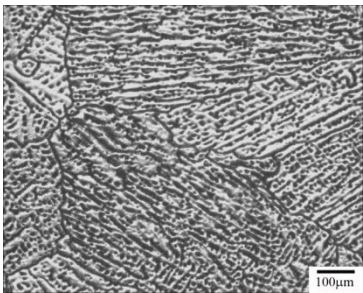
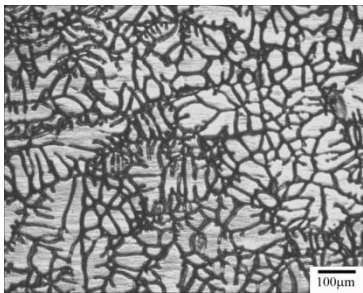
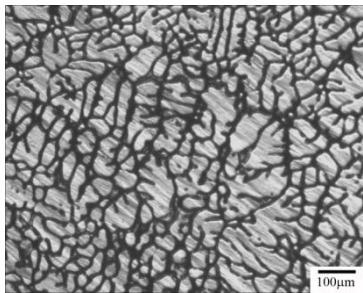
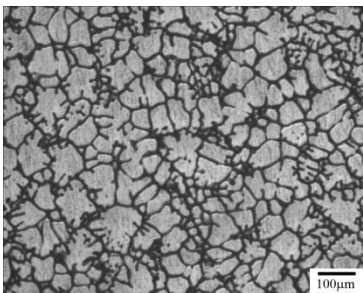
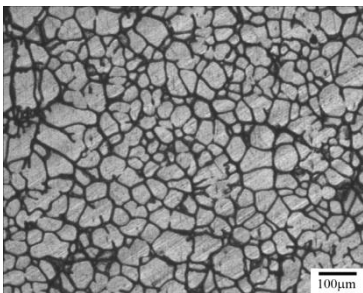
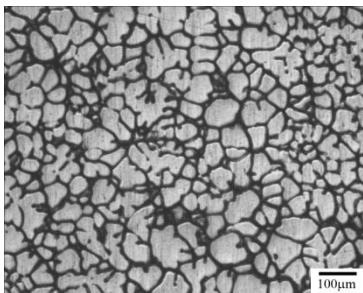
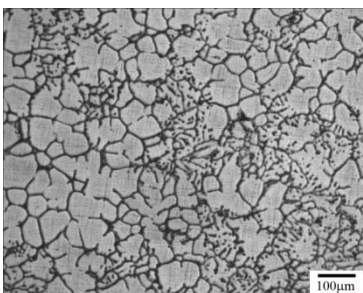
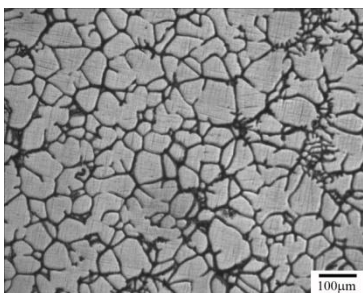
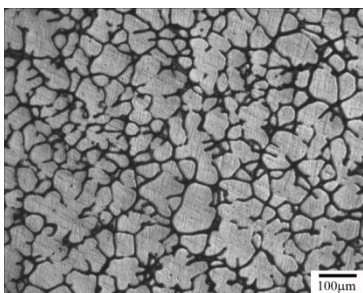
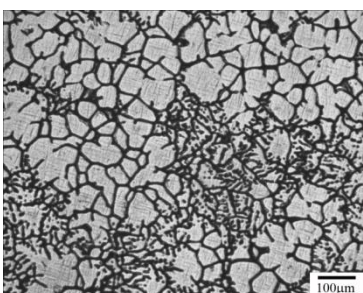
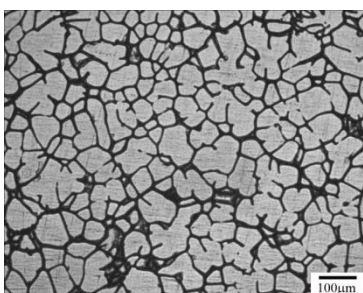
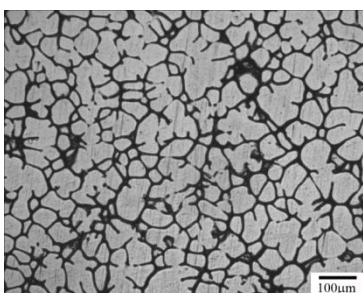
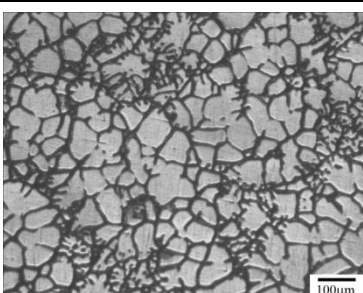
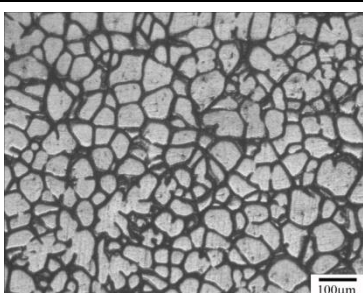
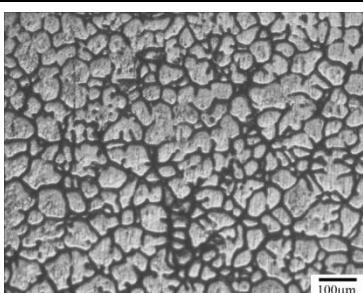
ผลของเวลาในการปล่อยฟองแก๊สและเวลาปล่อยทิ้งไว้แสดงได้ดังตารางที่ 3.9 จากการทดลองพบว่าเวลาขึ้นงานเต็มแบบในทุกสภาวะการทดลอง จึงให้นำชิ้นงานที่ตัดแบ่งแล้วมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบเป็นชิ้นงานชิ้นที่ 6 (อ้างอิงจากรูป 3.30) ตำแหน่งภาพที่ถ่ายด้วยกล้อง Optical Microscope (OM) แสดงดังรูปที่ 3.33 โครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 3.34

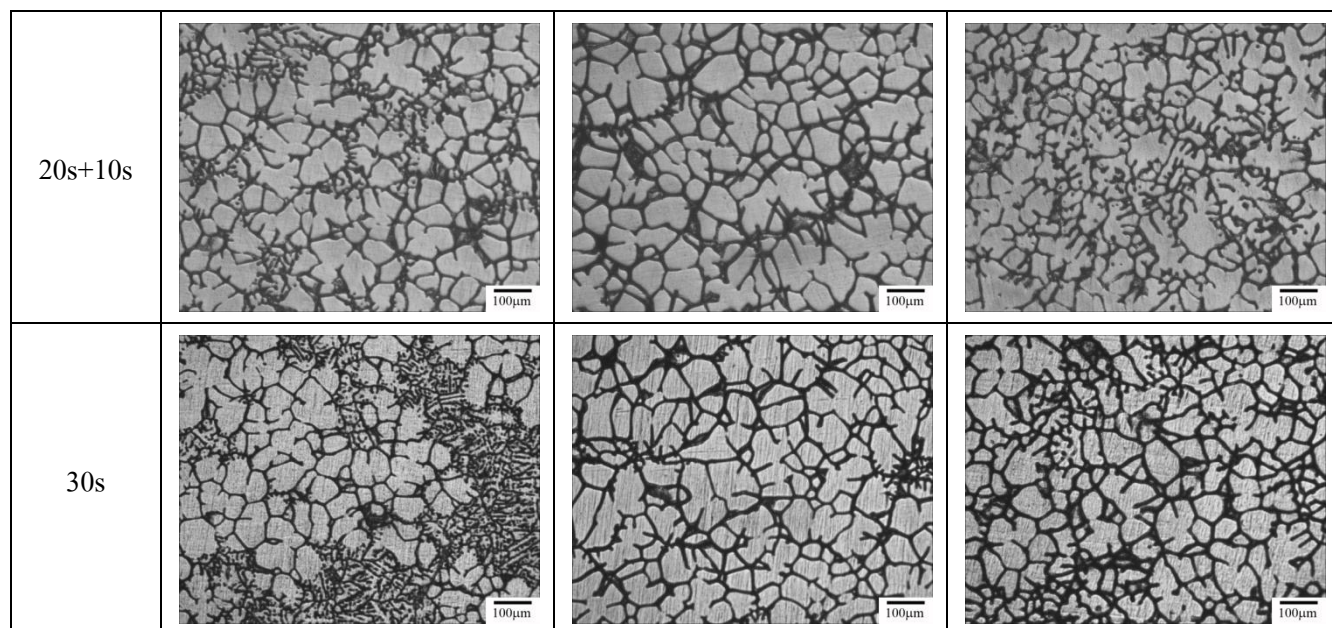
ตารางที่ 3.9 ผลการทดลองทุบขึ้นรูปที่สภาวะ GISS +Holding time ที่เวลาแตกต่างกัน

เงื่อนไข	เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส (วินาที)	เวลาที่ปล่อยทิ้งไว้ (วินาที)	อุณหภูมิเท (°C)	ขนาดชิ้นงาน (cm)	น้ำหนัก (kg)	ปริมาตร (ml)
Liquid	-	-	723	10 x 10 x 4.40	1.206	400
3s	3	-	643	10 x 10 x 3.90	1.082	400
10s+10s	10	10	643	10 x 10 x 4.08	1.090	400
20s	20	-	643	10 x 10 x 3.91	1.064	400
10s+20s	10	20	643	10 x 10 x 3.90	1.082	400
20s+10s	20	10	643	10 x 10 x 4.10	1.136	400
30s	30	-	643	10 x 10 x 4.20	1.164	400



รูปที่ 3.33 แสดงตำแหน่งภาพที่ถ่ายด้วยกล้อง Optical Microscope ในชิ้นงาน

Condition	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
liquid			
3s			
10s+10s			
20s			
10s+20s			

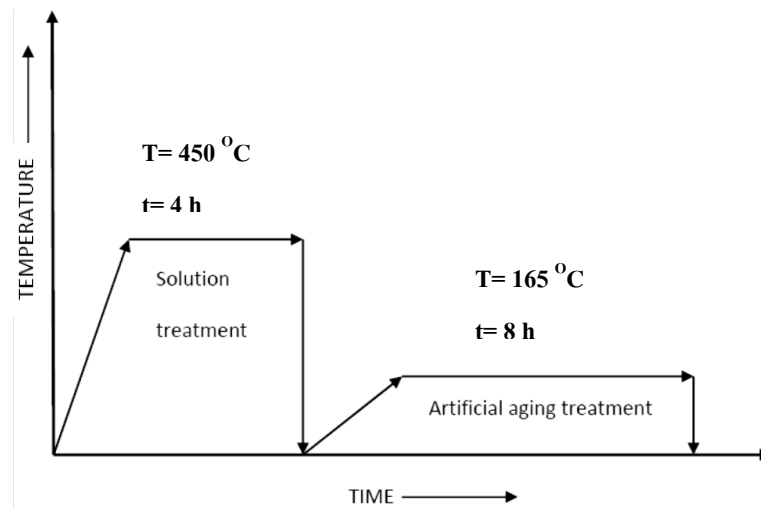


รูปที่ 3.34 โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆกันของชิ้นงานหมายเลข 6

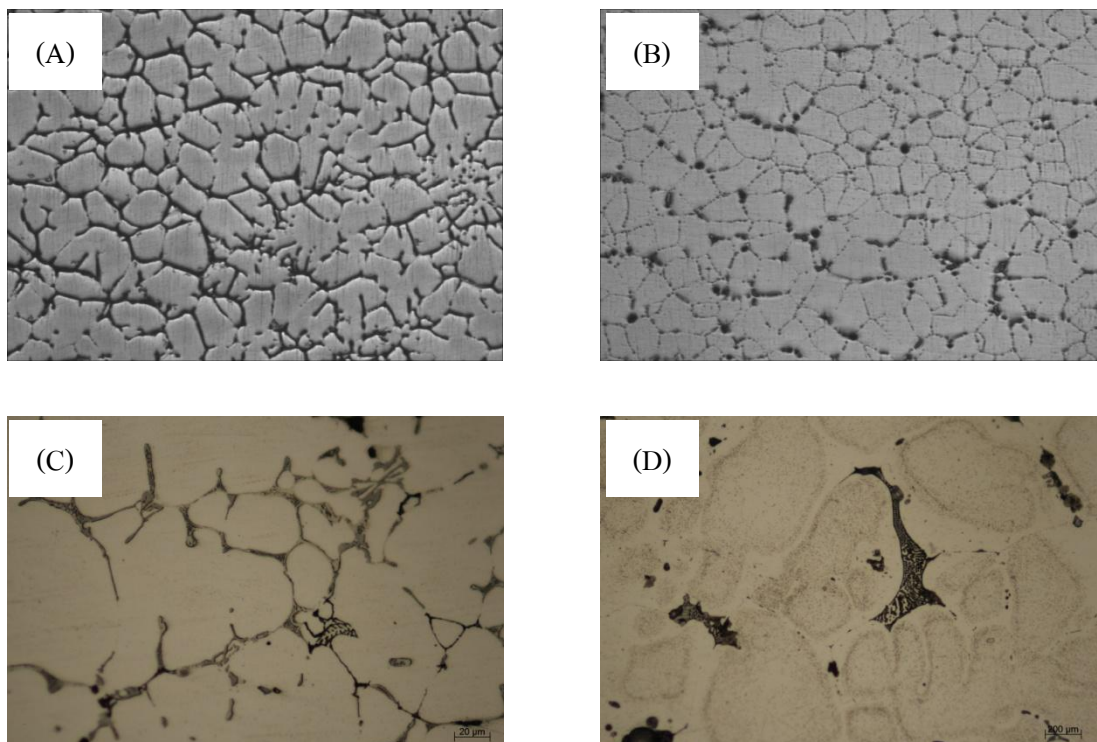
จากรูปที่ 3.34 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่สภาวะการชุบขึ้นรูปต่างๆกัน 3 บริเวณ คือบน กลาง ล่าง พบว่าที่ตำแหน่งบนของชิ้นงานพบการแยกเฟสสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ โดยชิ้นงานที่การปล่อยฟองแก๊สเพียงอย่างเดียวที่ 20วินาทีและ 30วินาที มีการเกิดการแยกเฟสที่ชัดเจนกว่า ชิ้นงานที่มีการเพิ่มผลของการปล่อยทิ้งไว้ด้วย เมื่อดูความเป็นเนื้อเดียวกันของอนุภาคโดยรวมพบว่า ที่การปล่อยฟองแก๊ส 30วินาทีให้ชิ้นงานที่เป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคเริ่มต้นที่เกิดจากการปล่อยฟองแก๊สที่ 30วินาทีมีขนาดเล็กมากและกระจายทั่วในน้ำโลหะ ในระหว่างการชุบขึ้นรูปอนุภาคเหล่านั้นก็จะเติบโตขึ้นและเนื่องจากยังมีความเป็นของเหลวอยู่สูงทำให้แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชุบเพียงพอที่จะอัดอนุภาคให้แน่นติดกัน ในขณะที่การขึ้นรูปที่อนุภาคของแข็งสูงๆและมีขนาดโตแล้ว ในระหว่างชุบอนุภาคเหล่านั้นจะเกิดการแข็งตัวก่อนชุบทำให้แรงที่ใช้ชุบไม่สามารถอัดให้อนุภาคแน่นติดกันได้ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้จะส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.3.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน (Mechanical properties)

การศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเน้นไปที่ผลที่ได้เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) แบบ T6 กราฟจำลองกระบวนการปรับปรุงทางความร้อนแบบ T6 แสดงในรูปที่ 3.35 และ โครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไปแสดงในรูปที่ 3.36



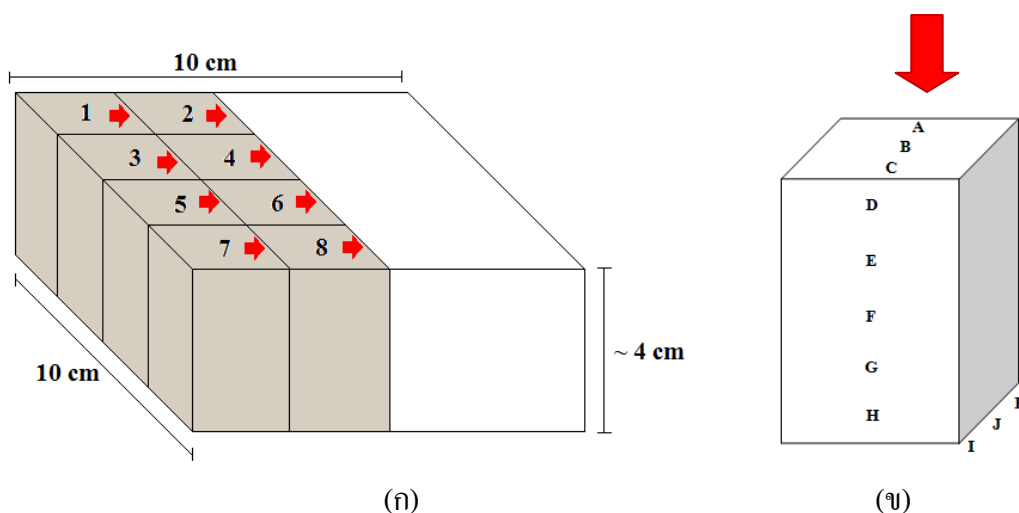
รูปที่ 3.35 กระบวนการปรับปรุงทางความร้อนของชิ้นงานแผ่นหนาแบบ T6



รูปที่ 3.36 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อน (A) และหลัง (B) ผ่านกระบวนการทางความร้อน โครงสร้างยูเทคติกก่อน (C) และหลัง (D) ผ่านกระบวนการทางความร้อน

3.3.3.1 การทดสอบความแข็งชนิดรีคเวลล์สเกลบี (Hardness Rockwell Scale B testing)

ชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงทางความร้อนจะถูกตัดแบ่งเพื่อนำมาวัดความแข็งเทียบกับชิ้นงานก่อนการปรับปรุงทางความร้อน ภาพจำลองชิ้นงานและตำแหน่งที่วัดความแข็งแสดงดังรูปที่ 3.37 มาตรฐาน โดยทั่วไปของ Al 7075+T6 ตารางแสดงค่าความแข็งแสดงได้ดังตารางที่ 3.10 และกราฟความแข็งแสดงดังรูปที่ 3.38

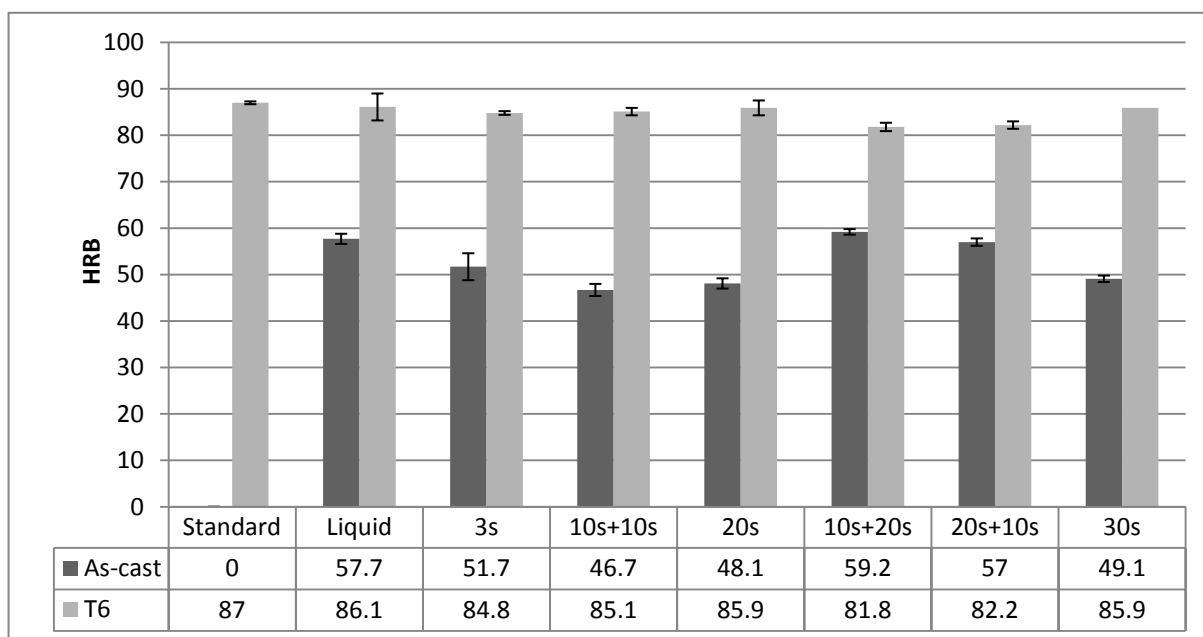


รูปที่ 3.37 ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป (ก) ตำแหน่งที่วัดความแข็ง (ข)

ตารางที่ 3.10 ค่าความแข็ง (HRB) เฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน

เงื่อนไข	ค่าความแข็ง (HRB)	
	ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน	ผ่านกระบวนการทางความร้อน
Standard*	-	87.0
liquid	57.7 ± 1.1	86.1 ± 0.3
3s	51.7 ± 2.9	84.8 ± 2.9
10s+10s	46.7 ± 1.3	85.1 ± 0.4
20s	48.1 ± 1.1	85.9 ± 0.8
10s+20s	59.2 ± 0.6	81.8 ± 1.6
20s+10s	57.0 ± 0.8	82.2 ± 0.9
30s	49.1 ± 0.7	85.9 ± 0.8

*aluminum 7075-T6 จาก www.matweb.com



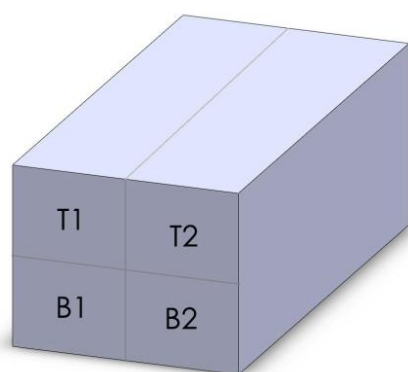
รูปที่ 3.38 เปรียบเทียบค่าความแข็ง (Hardness Rockwell scale B) ในแต่ละสภาวะ ของ ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน

ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากขั้นตอนการบ่มที่ทำภายหลังขั้นตอนการอบละลายเพื่อละลายเฟสอื่น ๆ นอกเหนือจากเฟสแอลฟาให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ให้อยู่ในรูปสารละลายของแข็งโดยไม่เกิดเฟสใหม่ที่มีขนาดใหญ่และเปราะ แล้วจึงนำไปผ่านขั้นตอนการทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว ทำให้จำนวนสารละลายของแข็งที่ละลายในเมทริกซ์มีมากกว่าความสามารถในการละลายของสารละลายของแข็งปกติที่อุณหภูมิห้องซึ่งอยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดที่ไม่มีความเสถียร เมื่อนำไปบ่มต่อทำให้สารละลายของแข็งเหล่านี้เกิดพรีซิพิตชันเป็นผลให้วัสดุมีความแข็งแรงขึ้นพรีซิพิตเฟส η' จะเป็นเฟสหลักที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการชุบในสภาวะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS ในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการอบละลายที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มที่อุณหภูมิ 165°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยค่าความแข็งของชิ้นงานในกรณีขึ้นรูปในสภาวะของเหลวให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดที่ 86.1 ± 0.3 HRB ค่าความแข็งของชิ้นงานกึ่งของแข็งมีค่ามากที่สุดที่เงื่อนไขการปล่อยฟองแก๊ส 20 วินาทีและ 30 วินาทีที่ 85.9 ± 0.8 HRB เท่ากัน รองลงมาคือที่เงื่อนไขการปล่อยฟองแก๊ส 10 วินาที+10วินาที, 3วินาที, 20วินาที+10วินาที และ 10วินาที+20วินาทีให้ค่าเท่ากับ 85.1 ± 0.4 HRB, 84.8 ± 2.9 HRB, 82.2 ± 0.9 HRB และ 81.8 ± 1.6 HRB ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับมาตรฐาน

โดยทั่วไปของอะลูมิเนียม 7075 T6 ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 87 HRBแล้ว พบว่าการเลือกใช้สภาวะในการปรับปรุงทางความร้อนส่งผลต่อชิ้นงานที่มีโครงสร้างทั้งสองแบบได้เป็นอย่างดี

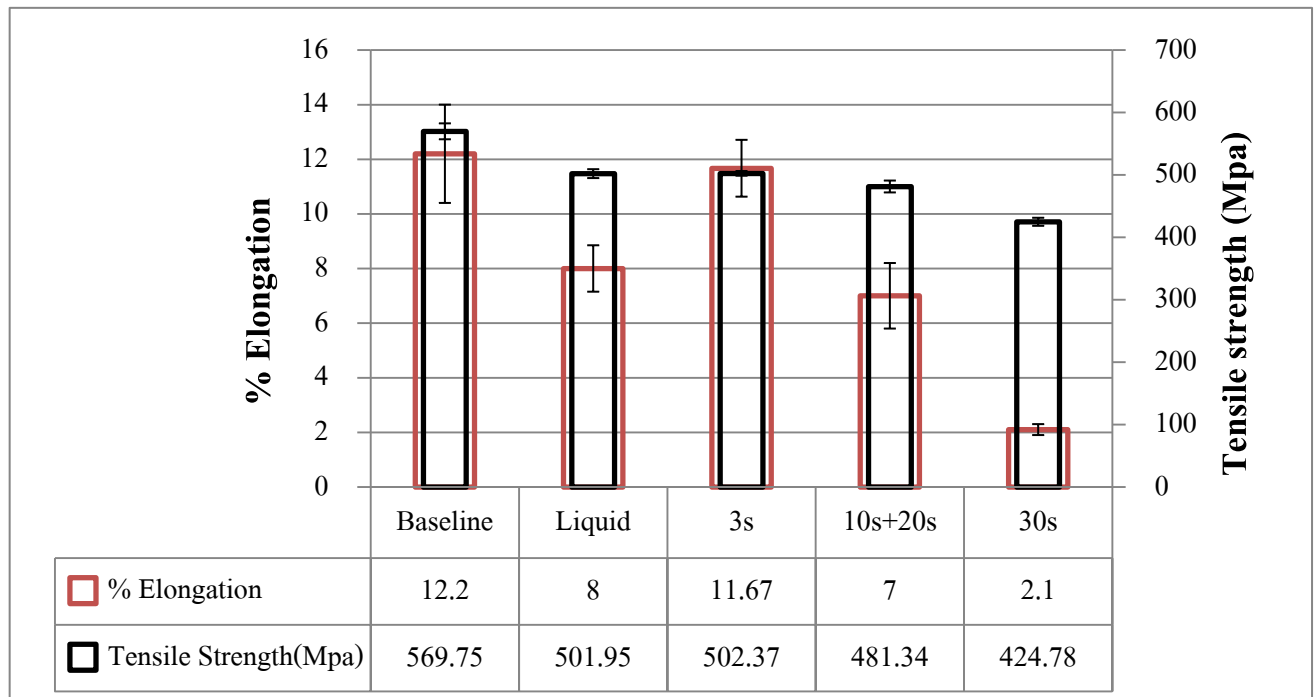
3.3.3.2 การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength testing)

เพื่อทดสอบความแข็งแรงดึง โดยชิ้นงานจะถูกแยกออกเป็น 4 ส่วนดังรูปที่ 3.39 และผ่านการเตรียมชิ้นงานทดสอบการกลึงตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึง ASTM E8 ค่าที่ได้จากการทดสอบโดยตัดผลสภาวะที่ทำการทดลองเบื้องต้นออกแสดงดังตารางที่ 3.11 กราฟแสดงดังรูปที่ 3.40 และตัวอย่างการวัดของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.39 แสดงการแบ่งส่วนชิ้นงานเพื่อนำไปกลึงทดสอบแรงดึงตามมาตรฐานตารางที่ 3.11 ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆกัน

ชิ้นงาน	Tensile strength	%Elongation
Baseline	569.75 ± 12.75	9.76 ± 0.45
Liquid	502.96 ± 5.13	8 ± 0.85
3s	501.10 ± 3.85	11.67 ± 1.01
10s+20s	474.59 ± 11.55	7.0 ± 1.19
30s	457.97 ± 6.44	2.1 ± 0.20



รูปที่3.40 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยมหนา

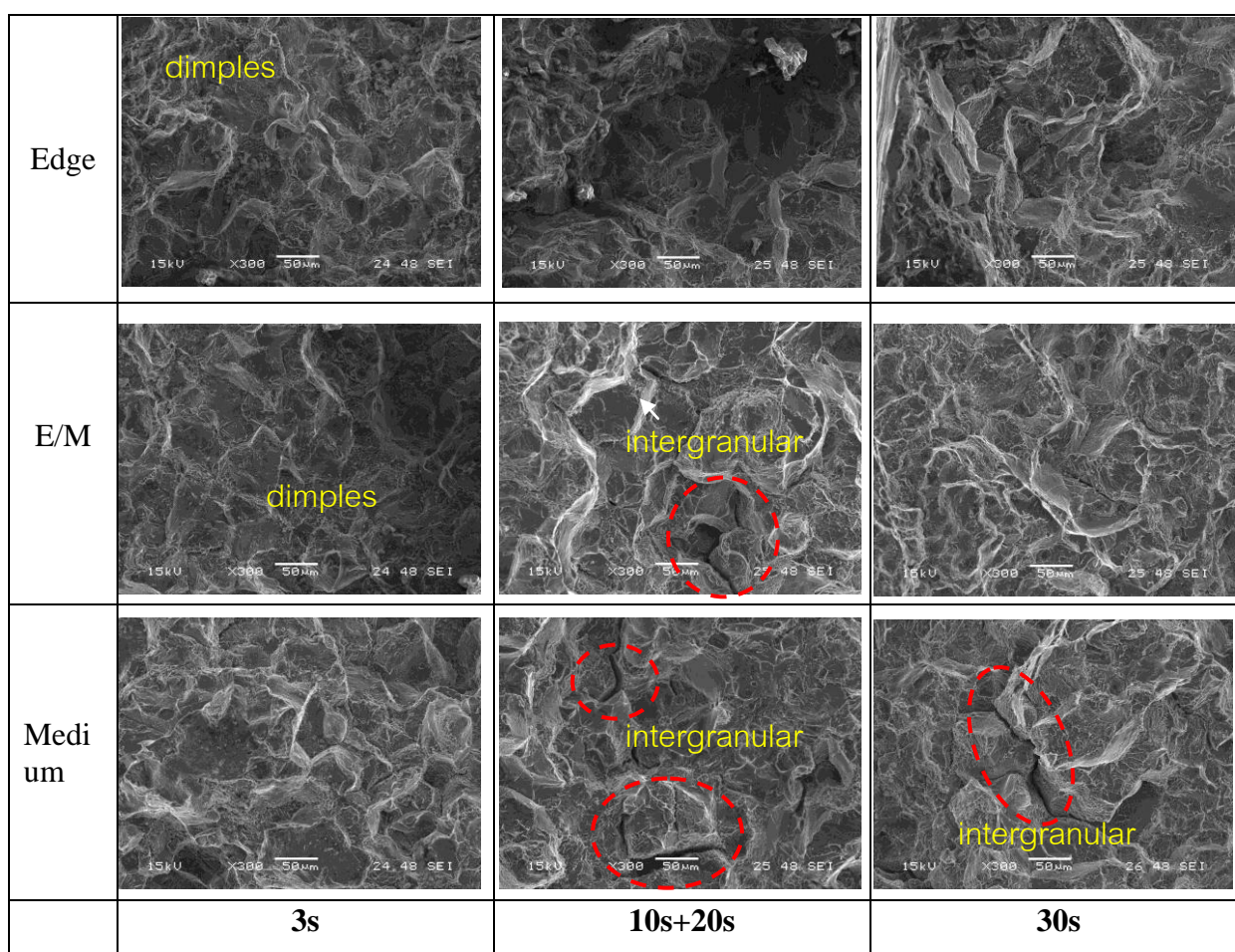


รูปที่3.41 ลักษณะการวิบัติแบบเปราะ (a) และการวิบัติแบบเหนียว (b)

ผลการศึกษาค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานแผ่นหนา พบว่าเมื่อเทียบกับ Baseline ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแบบของเหลวให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ 502.96 ± 5.13 MPa รองลงมาคือชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการปล่อยฟองแก๊ส 3 วินาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 501.10 ± 3.85 MPa แต่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงถึง 11.67 ± 1.01 ซึ่งเหตุผลของการแตกหักจะอธิบายในหัวข้อการวิเคราะห์รอยแตกต่อไป

3.3.4 การวิเคราะห์ผิวรอยแตกจากการทดสอบดึง (Fracture surface analysis)

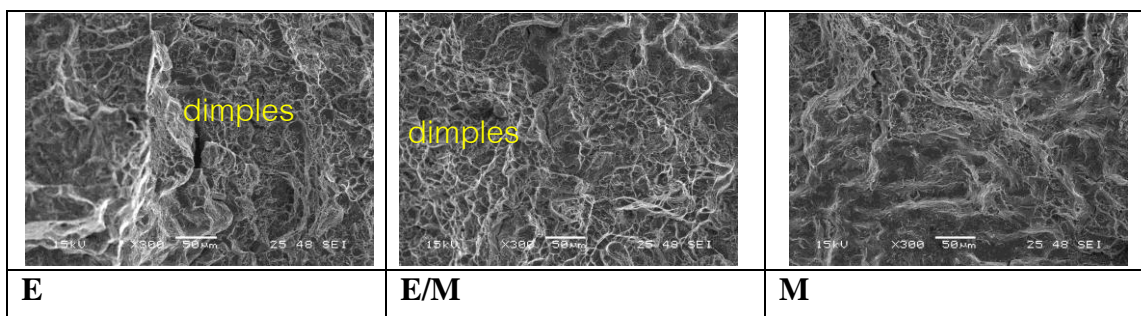
ผิวรอยแตกชิ้นงานทูปขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนาที่ผ่านการทดสอบแรงดึงเมื่อนำมาวิเคราะห์ภาพถ่ายพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด(SEM) โดยใช้ตำแหน่งในการถ่ายภาพเช่นเดียวกันกับรูปที่ 3.23 A โดยชิ้นงานที่นำไปวิเคราะห์มี 4 สภาวะคือชิ้นงานในสภาวะของเหลว, สภาวะขึ้นรูปที่การปล่อยฟองแก๊ส 3 วินาที, ปล่อยฟองแก๊ส 10 วินาที และปล่อยทิ้งไว้ 20 วินาที และปล่อยฟองแก๊ส 30 วินาที ภาพถ่ายผิวรอยแตกชิ้นงานที่ผ่านการทูปขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็งแสดงได้ดังรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.42 ผิวรอยแตกชิ้นงานที่ผ่านการทูปขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็งที่สภาวะการปล่อยต่าง ๆ กัน ชิ้นงานที่สภาวะการขึ้นรูป 3s ให้ค่าความแข็งแรงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยสูงสุด พื้นผิวแตกหักพบเป็นลักษณะของ dimples ผสมกับเกรนที่ถูกดึงขาดออกจากกัน เป็นลักษณะของการแตกหักแบบเหนียว (ductile fracture mode) ไม่พบการแตกตามขอบเกรนอาจเนื่องมาจากเกรนที่ได้จากการขึ้นรูปมีขนาดเล็กใกล้เคียงกันแน่น ในขณะที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปในสภาวะปล่อย

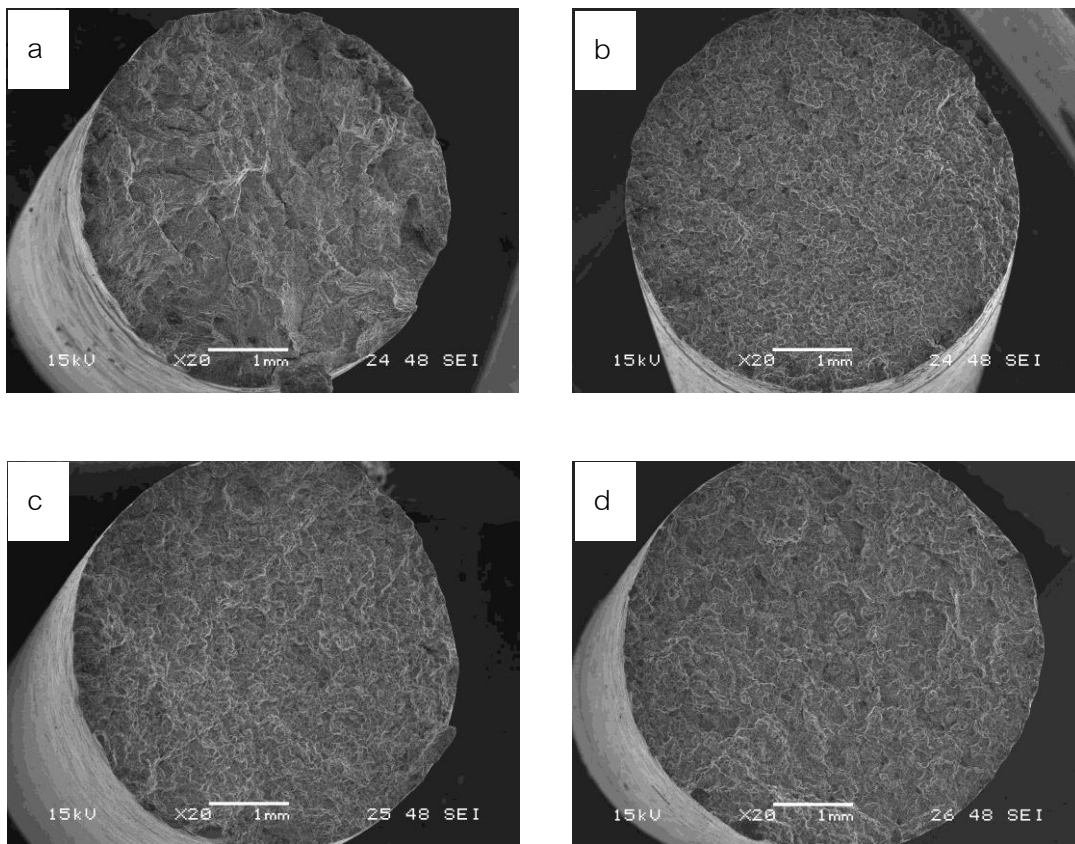
ฟองแก๊ส 10 วินาทีและปล่อยทิ้งไว้ 20 วินาทีและปล่อยฟองแก๊ส 30 วินาที เกิดการแตกหักแบบผสม (ductile-brittle fracture mode) คือมีทั้งบริเวณที่ขาดแบบdimplesและบริเวณที่เกิดการแตกหักตามขอบเกรน(intergranular) โดยการแตกหักตามขอบเกรนจะเห็นได้ชัดกว่ากรณีชิ้นงานแท่งกระบอกตันยาวอันเนื่องมาจากนอกจากที่ขอบเกรนจะเกิดการแตกเพราะเฟสยูเทคติกแล้วยังเกิดจากการที่เกรนที่เกิดอัดตัวกันไม่แน่นจากการที่ชิ้นงานบางส่วนเกิดการแข็งก่อนทอบขึ้นรูปเพราะชิ้นงานที่ขึ้นรูปมีความหนาในขณะที่แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปมีอุณหภูมิไม่สูงเพียงพอ เมื่อทำการทอบจึงทำให้บางส่วนที่แข็งไปก่อนแล้วไม่สามารถอัดตัวเข้ากันได้เต็มที่ กรณีนี้เกิดกับชิ้นงานที่มีสัดส่วนของแข็งสูงมากกว่าสัดส่วนของแข็งต่ำดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ในการขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานหนาโดยผ่านกระบวนการทอบขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งที่การใช้แม่พิมพ์ที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก การใช้สถานะขึ้นรูปที่สัดส่วนของแข็งต่ำให้ผลการขึ้นรูปที่ดีกว่า

เมื่อนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งที่ดีที่สุดคือการปล่อยฟองแก๊ส 30 วินาที เทียบกับการขึ้นรูปในสถานะของเหลวพบว่าแม้จะให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันคือ 501.10 ± 3.85 MPa และ 502.96 ± 5.13 MPa ตามลำดับ แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยของชิ้นงาน 3s มีค่าสูงกว่าถึง 3.7% ทั้งนี้เพราะรูปร่างของเกรนที่กลมและละเอียดจะมีความเหนียวกว่าเกรนที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์



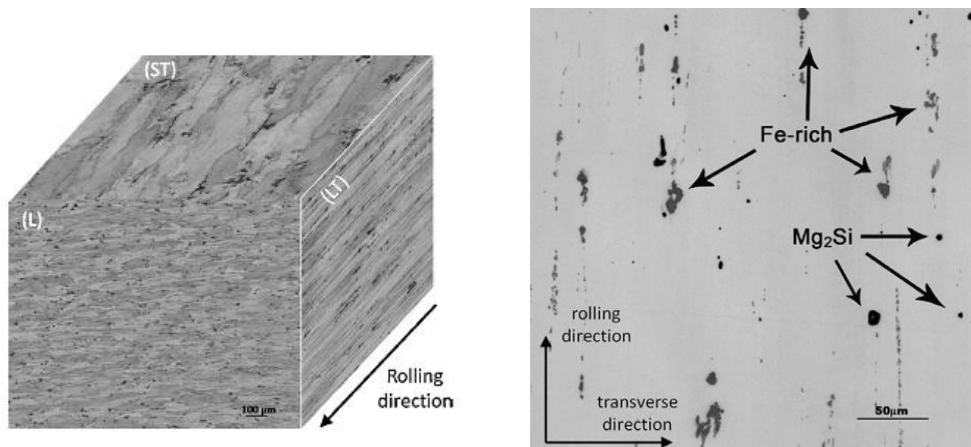
รูปที่ 3.43 ภาพถ่ายฟิรรอยแตกชิ้นงานที่ผ่านการทอบขึ้นรูปในสถานะของเหลว

จากรูปที่ 3.43 เป็นการแตกหักแบบเหนียวโดยพบลักษณะการแตกหักแบบdimple เยอะและชัดเจนกว่าในสถานะการขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งทำให้ชิ้นงานสามารถรับแรงดึงได้ค่อนข้างสูง รูปเปรียบเทียบผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึง โดยรวมของแต่ละสถานะการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 3.44

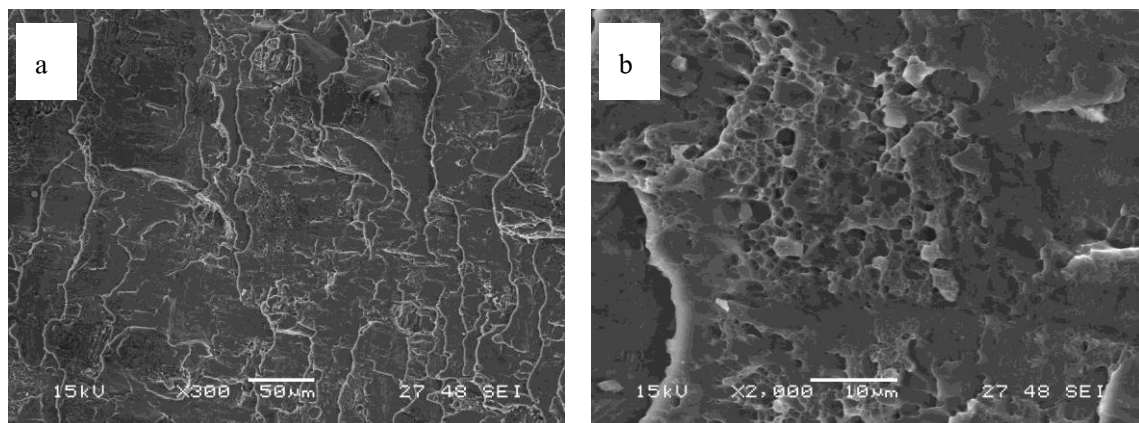


รูปที่ 3.44 ผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึงโดยรวมระหว่างการขึ้นรูปที่สภาวะของเหลว (a) สภาวะ3s (b) สภาวะ10s+20s(c)และสภาวะ30s(d)

ในกรณีของ Baseline ในงานวิจัยนี้คือแท่งอินกอตที่สังขึ้นเป็นอะลูมิเนียมผสมเกรด7075-T651 ที่ซึ่งผ่านขั้นตอนการรีดเพื่อลดความเค้นตกค้างและทำให้ได้ชิ้นงานที่ปราศจากตำหนิ ดังจะเห็นได้จากค่าความแข็งแรงดึงที่สูงถึง 569.75 ± 12.75 MPa โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.45[38] เมื่อนำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยายสูงๆจะพบว่ามิดimpleลักษณะตื้นๆกระจายอยู่ทั่วไป ดังรูปที่ 3.46 และการฉีกขาดของชิ้นงานเป็นมุม 45° ตามการไหลของระนาบ (glide plane) ดังแสดงในรูปที่ 3.47



รูปที่3.45 โครงสร้างจุลภาคของ 7075-T651 ก่อนการขึ้นรูปใดๆ (C.R.Harris, 2006)



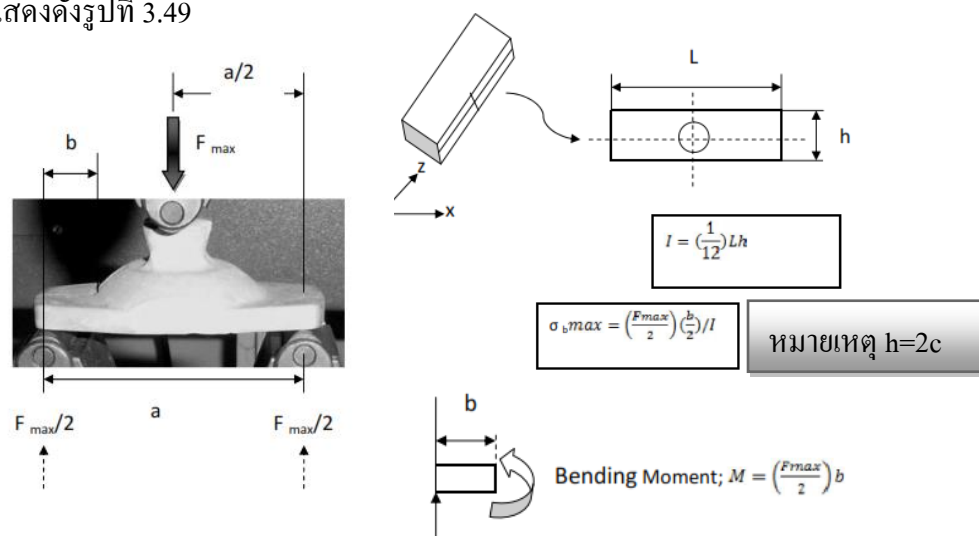
รูปที่3.46 ผิวรอยแตกจากแรงดึง (a) และ dimples ตื้นๆที่กระจายในชิ้นงาน (b)



รูปที่3.47 การฉีกขาดของชิ้นงานเป็นมุม45° ตามการไถลของระนาบ (glide plane)

3.4 การทดสอบแรงดัดแบบ 3จุด (Three-point bending test)

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบการดัดโค้งแบบ 3จุด (Three-point bending test) คือชิ้นงานข้อเท้าเทียม เหตุที่เลือกชิ้นงานนี้มาศึกษาเพราะในการส่งทดสอบชิ้นงานในส่วนข้อเท้าเทียมมีผลต่อการทดสอบตามมาตรฐานISO10328 โดยรวมเพราะมีผลต่อการเกิดการแตกหักจากการรับภาระโหลดแบบสถิตย์ (static) และแบบวัฏจักร (cyclic) โดยทดสอบเปรียบเทียบระหว่างข้อเท้าเทียมจากการกลึงแผ่นอะลูมิเนียมเกรด7075ที่ผ่านการชุบขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็ง (SF-7075 T6) เทียบกับอะลูมิเนียมเกรด7075ที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็ง (SH-7075 T6) และสภาวะของเหลว (LH-7075 T6) และอะลูมิเนียมเกรด356 (SH-356 T6) ที่ซึ่งเป็นเกรดที่เหมาะสมกับการฉีดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็งมาเปรียบเทียบด้วย เนื่องจากชิ้นงานที่ทำการทดสอบมีรูปทรงซับซ้อนแต่เมื่อพิจารณาบริเวณที่เกิดการวิบัติพบว่าจะเกิดที่ตำแหน่งที่บางที่สุดซึ่งมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้นค่าที่ต้องใช้ในการคำนวณคือความสูง (h) ความยาว (L) และความกว้างของชิ้นงานจากจุดวางชิ้นงานถึงหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่เกิดการวิบัติ (b) ของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่3.48 ความสูงของชิ้นงานชิ้นงานที่ได้งานชุบขึ้นรูปในสภาวะกึ่งแข็งและฉีดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็งมีค่าเท่ากับ5มิลลิเมตรและ6.5มิลลิเมตรตามลำดับ ความยาวรวมของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ31มิลลิเมตรและ30.5มิลลิเมตรตามลำดับและความยาวของชิ้นงานจากจุดวางชิ้นงานถึงหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่เกิดการวิบัติมีค่าเท่ากับ14มิลลิเมตรและ13.5มิลลิเมตรตามลำดับชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบทุกชิ้นจะทำการขีดผิวจนได้ระนาบทั้งบริเวณส่วนบนและฐานล่างเพื่อให้สามารถสัมผัสกับ Point ได้ทั้งสามจุด จากนั้นจึงให้โหลดกระทำโดยการทดลองนี้กำหนดความเร็วของการให้โหลดไว้ที่ 1.8 mm/min ทำการให้โหลดไปเรื่อยๆจนชิ้นงานเกิดการวิบัติ ก็จะได้ค่า Maximum load ค่าที่ได้จากการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.12 กราฟแสดงดังรูปที่ 3.49

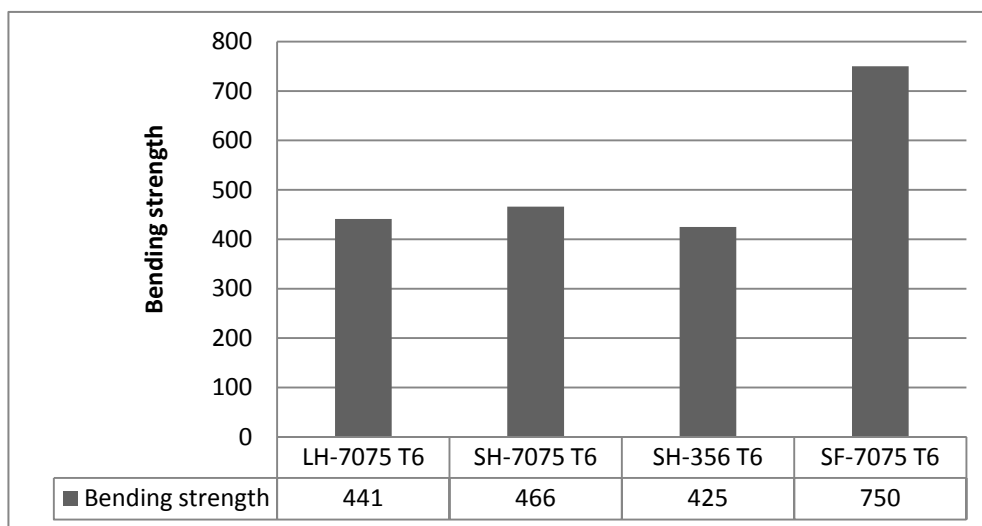


รูปที่ 3.48 ค่าที่ใช้ในการคำนวณการรับแรงดัดในชิ้นงานข้อเท้าเทียม

ตารางที่ 3.12 ค่าที่ได้จากการทดสอบการดัดโค้ง

ชิ้นงาน	2c	L	b
LH-7075-T6	6.5	30.5	9
SH-7075 T6	6.5	30.5	9
SH-356-T6	6.5	31	8
SF-7075 T6	5	31	8









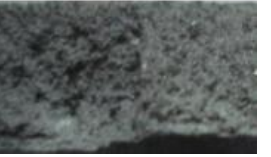



ชิ้นงาน	F_{max} (N)	$M = (\frac{F_{max}}{2})(b)$ (N-mm)	$I = \frac{1}{12}(L)(2c)^3$ (mm ⁴)	$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I}$ (MPa)
LH-7075 T6	20,700	93,150	685.56	441
SH-7075 T6	21,950	98,775	685.56	466
SH-356 T6	22,425	89,700	685.56	425
SF-7075 T6	23,450	93,800	312.5	750



รูปที่ 3.49 กราฟแท่งแสดงค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นส่วนข้อเท้าเทียมที่การขึ้นรูปต่างกัน

ผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่รับแรงดัดได้มากที่สุดคือชิ้นงาน SF-7075 T6 ที่รับแรงได้สูงถึง 23450 นิวตัน รองลงมาคือ SH-356 T6, SH-7075 T6 และ LH-7075 T6 ที่รับแรงได้ 22425 นิวตัน, 21950 นิวตัน และ 20700 นิวตันตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่หน้าตัดรับแรงที่ชิ้นงาน SF-7075 T6 มีความหนาน้อยกว่าทำให้เมื่อคำนวณหาความแข็งแรงจึงให้ค่าสูงสุดเท่ากับ

750 MPaรองลงมาคือ SH-356 T6, SH-7075 T6และ LH-7075 T6ที่ให้ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 466 MPa, 441 MPa และ 425 MPa ตามลำดับ ลักษณะการวิบัติของชิ้นงานภายหลังได้รับแรงตัดแสดงดังรูปที่ 3.50

ชิ้นงาน	ภาพรวมชิ้นงาน	บริเวณที่เกิดการวิบัติ	ผิวหน้ารอยแตก
LH-7075 T6			
SH-7075 T6			
SH-356 T6			
SF-7075 T6			

รูปที่ 3.50 ลักษณะการวิบัติของชิ้นงานภายหลังรับแรงตัด

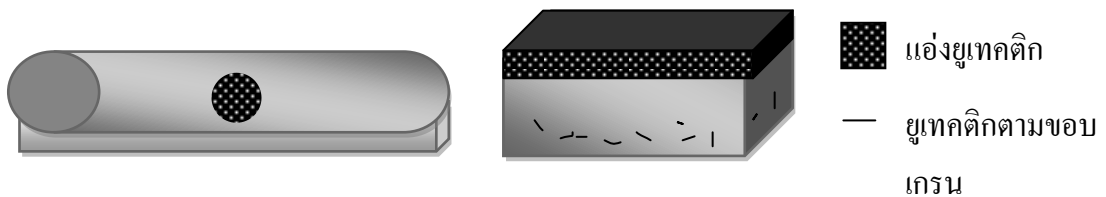
เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานพบว่า การทดสอบตามมาตรฐาน ISO 10328 กำหนดว่าชิ้นงานข้อเหวี่ยงต้องผ่านการทดสอบการรับแรงสถิตย์ (static load) ประมาณ 4500 นิวตัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกชิ้นงานข้อเหวี่ยงอะลูมิเนียมเกรด 356 ที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็งเป็นชิ้นงานที่ใช้ส่งทดสอบมาตรฐาน รวมถึงตัวจับยึดและปริมาตรฐานรองเข่าก็ใช้จากการขึ้นรูปแบบฉีดเช่นเดียวกัน เนื่องจากอะลูมิเนียมเกรดนี้เหมาะสมกับการใช้งานฉีดขึ้นรูปเพราะไม่ค่อยมีปัญหาเรื่องของการแตกร้อนที่จะพบได้ง่ายในอะลูมิเนียมที่มีช่วงยูเทคติกน้อยเช่น อะลูมิเนียมเกรด 7075 นอกจากนี้ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดยังให้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าอันเนื่องจากเสียค่าใช้จ่ายในการกลึงตกแต่งน้อยเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการทูลขึ้นรูปที่ยังไม่สามารถทูลเป็นชิ้นงานที่ขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานจริงได้

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

ผลจากการศึกษาการชุบขึ้นรูปชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่มีรูปทรงแตกต่างกัน 2 รูปทรงในสภาวะกึ่งของแข็งโดยการปล่อยแก๊สเฉื่อยลงในน้ำโลหะ (GISS) พบว่ามีความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปแต่ปัญหาทั่วไปที่พบในชิ้นงานคือการแยกเฟส (Segregation) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทั้ง 2 รูปทรงโดยเกิดที่ตำแหน่งต่างกัันดังแสดงในรูปที่ 4.1 นอกจากนี้ยังพบข้อบกพร่องอื่นๆ เช่น รูพรุนจากแก๊ส (Gas porosity) โพรงหดตัว (Shrinkage) การแตกร้อน (Hot tearing) และการฝังตัวของฟิล์มออกไซด์ (Oxide film) ผลจากการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งการเกิดการแยกเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทั้ง 2 รูปทรง

4.1.1 กรณีศึกษาการชุบขึ้นรูปแท่งกระบอกตันยาว (rod) ด้วยกรรมวิธีการชุบขึ้นรูปอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง

1. กระบวนการชุบขึ้นรูปสามารถขึ้นรูปโลหะอะลูมิเนียมเกรด 7075 รูปทรงแท่งกระบอกตันยาว ในสถานะกึ่งของแข็งได้
2. อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง คือ อุณหภูมิประมาณ 230-250°C และอุณหภูมิของหัวทูปอยู่ที่ 110-140°C ซึ่งอุณหภูมิของแม่พิมพ์และหัวทูปจะมีความสัมพันธ์กับเวลาในการปล่อยฟองแก๊สซึ่งมีผลต่อการแข็งตัวของน้ำโลหะ ถ้าอุณหภูมิแม่พิมพ์สูง แต่เวลาในการปล่อยฟองแก๊สน้อย จะทำให้น้ำโลหะเหลวเกินไป และมีผลต่อตอนทูป จะเกิดการรั่วของน้ำโลหะออกนอกแม่พิมพ์ ในขณะเดียวกันถ้าเวลาในการปล่อยฟองแก๊สมาก ปริมาณสัดส่วนของแข็งมาก น้ำโลหะมีความหนืดสูง ดังนั้น อุณหภูมิของแม่พิมพ์จะช่วยให้ น้ำโลหะไม่แข็งตัวเร็วก่อนจะทูป

3. เวลาในการปล่อยฟองแก๊สจะบอกถึงปริมาณสัดส่วนของแข็งที่ได้ ถ้าเวลาปล่อยฟองแก๊สมากก็จะเกิดสัดส่วนของแข็งมากด้วย โดยสภาวะที่เหมาะสมสามารถหุบขึ้นรูปชิ้นงานนี้ได้ คือ เวลาในการปล่อยฟองแก๊ส 15 วินาที และเวลาที่รอนในด้วยอีก 5 วินาที จะได้โครงสร้างที่มีเฟสของแข็งกระจายสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน ในขณะที่เดียวกันถ้าเวลาที่รอนในแก้วก่อนเทเป็น 10 วินาที โครงสร้างที่ได้จะมีขนาดของเกรนที่ขนาดใหญ่กว่ากรณีเวลาที่รอนในแก้วก่อนเทเป็น 5 วินาที ดังนั้นเวลาที่รอนในแก้วก่อนเทนานกว่าจะมีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค คือมีขนาดของเกรนกลมที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากมีเวลาให้เกรนเติบโต
4. ปริมาณของน้ำโลหะควรมีปริมาณที่เหมาะสมกับเวลาในการปล่อยฟองแก๊ส เพราะหากปริมาณน้ำโลหะน้อยแต่เวลาในการจุ่มแท่งแกรไฟต์มากเกินไป ก็จะทำให้ น้ำโลหะหนืดเกินไป ทำให้ยากต่อการเท เมื่อเทแล้วเกิดการไหลที่ไม่ราบรื่น และโลหะอาจเกิดการเย็นตัวก่อนการหุบ
5. สมบัติเชิงกลอันได้แก่ค่าความแข็ง ความแข็งแรงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ดีที่สุดได้จากชิ้นงานที่ขึ้นรูปที่สภาวะการปล่อยฟองแก๊ส 15 วินาที และเวลาที่รอนในด้วยอีก 5 วินาที โดยให้ค่าความแข็งเฉลี่ย 87 ± 1.2 HRB ความแข็งแรงเฉลี่ย 438 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ย 4% ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเลือกใช้สภาวะในการขึ้นรูปและการปรับปรุงทางความร้อนที่เหมาะสม

4.1.2 กรณีศึกษาการหุบขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนา (billet) ด้วยกรรมวิธีการหุบขึ้นรูปอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง

1. กระบวนการหุบขึ้นรูปสามารถขึ้นรูปโลหะอะลูมิเนียมเกรด 7075 รูปทรงสี่เหลี่ยมหนา ในสถานะกึ่งของแข็งได้
2. อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง คือ อุณหภูมิประมาณ 230-250°C และอุณหภูมิของหัวหุบอยู่ที่ 110-140°C เหตุผลเช่นเดียวกันกับการหุบขึ้นรูปชิ้นงานแท่งกระบอกตันยาว
3. เวลาในการปล่อยฟองแก๊สจะบอกถึงปริมาณสัดส่วนของแข็งที่ได้ ถ้าเวลาปล่อยฟองแก๊สมากก็จะเกิดสัดส่วนของแข็งมากด้วย โดยสภาวะที่เหมาะสมสามารถหุบขึ้นรูปชิ้นงานนี้ได้ คือ ใช้เวลาในการปล่อยฟองแก๊สที่ 3 วินาที โดยให้ชิ้นงานที่เป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุดทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคเริ่มต้นที่เกิดจากการปล่อยฟองแก๊สที่ 3 วินาทีมีขนาดเล็กมากและกระจายทั่วในน้ำโลหะ ในระหว่างการหุบขึ้นรูปอนุภาค

เหล่านี้นั้นก็จะเติบโตขึ้นและเนื่องจากยังมีความเป็นของเหลวอยู่สูงทำให้แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปทาบเพียงพอที่จะอัดอนุภาคให้แน่นติดกัน ในขณะที่การขึ้นรูปที่อุณหภูมิของแข็งสูงๆและมีขนาดโตแล้ว ในระหว่างทาบอนุภาคเหล่านี้นั้นจะเกิดการแข็งตัวก่อนทาบทำให้แรงที่ใช้ทาบไม่สามารถอัดให้อนุภาคแน่นติดกันได้

4. สมบัติเชิงกลอันได้แก่ค่าความแข็ง ความแข็งแรงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานกึ่งของแข็งที่ดีที่สุดได้จากชิ้นงานที่ขึ้นรูปที่สภาวะการปล่อยฟองแก๊ส 20 และ 30 วินาทีโดยให้ค่าความแข็งเฉลี่ย 85.9 ± 0.8 HRB แต่เมื่อเทียบรวมกับค่าสมบัติเชิงกลอื่นๆพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการขึ้นรูปคือการปล่อยฟองแก๊สเพียง 3 วินาทีโดยให้ค่าความแข็งเฉลี่ย 84.8 ± 2.9 HRB ความแข็งแรงเฉลี่ย 501.10 ± 3.85 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ย 11.67 ± 1.01 ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเลือกใช้สภาวะในการขึ้นรูปและการปรับปรุงทางความร้อนที่เหมาะสม

4.1.3 สรุปกระบวนการทาบขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง

จากการทดลองทั้งหมดพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะทาบจะทาบขึ้นรูปอะลูมิเนียมในสภาวะกึ่งของแข็งกับเกรดที่มีความแข็งแรงสูง ดังการทดลองกับอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องควบคุมสัดส่วนของแข็ง อุณหภูมิแม่พิมพ์ รวมถึงการให้แรงในการขึ้นรูปที่เหมาะสม ทั้งนี้เพราะการทาบขึ้นรูปแบบ Rheo-forging ที่ใช้ในงานวิจัยยังไม่เป็นที่นิยมเท่ากับแบบ Thixo-forging จึงทำให้มีผลการศึกษาในเรื่องนี้น้อยกว่ามาก แต่ถ้าสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปรวมทั้งการปรับปรุงทางความร้อนได้วิธีนี้จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการขึ้นรูป ยืดอายุแม่พิมพ์ได้เนื่องจากการใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการขึ้นรูปแบบของเหลว และได้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากผลการวิจัยในส่วนของการทาบขึ้นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมหนาพบว่า การขึ้นรูปที่เปอร์เซ็นต์สัดส่วนของแข็งต่ำ (ปล่อยฟองแก๊สอย่างเดียวก่อนขึ้นรูป 3 วินาที) ให้ผลทั้งโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลที่ดีกว่าการขึ้นรูปที่สัดส่วนของแข็งสูง ไม่เหมือนกับการขึ้นรูปแบบ Thixo-forging ที่มีทั้งการทาบขึ้นรูปที่สัดส่วนของแข็ง 50% จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติม อาจทดลองทาบขึ้นรูปชิ้นงานที่มีโครงสร้างซับซ้อน (Complex shape) หรืองานที่มีขนาดใกล้เคียงกับของจริง (Near net shape) เพื่อดูความเป็นไปได้ว่าสามารถทำได้หรือไม่ เพราะในสภาวะสัดส่วนของแข็งต่ำน้ำโลหะ

ยังคงมีความเป็นของเหลวสูง ถ้าควบคุมการไหลให้ดีจะสามารถขึ้นรูปชิ้นส่วนเหล่านี้ได้ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการกัดกลึงชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูปออกไปได้

2. ควรมีการศึกษาในส่วนของอุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มเติม เพราะอุณหภูมิแม่พิมพ์มีผลอย่างมากต่อโครงสร้างภายในของน้ำโลหะขณะอยู่ในแม่พิมพ์ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานและการเกิดการแข็งก่อนทอบขึ้นรูปซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลต่ำกว่าที่ควรจะเป็น
3. ควรทดลองเพิ่มเติมกับอะลูมิเนียมเกรดความแข็งแรงสูงอื่นๆ รวมถึงกับโลหะชนิดอื่นๆ เช่น โลหะที่ใช้ทางการแพทย์ เพราะกรรมวิธีการสามารถขึ้นรูปให้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงได้ โดยทั้งนี้จะต้องทำการทดลองไปพร้อมๆ กับการศึกษาในส่วนของ การปรับปรุงทางความร้อนด้วย

บรรณานุกรม

- [1] <http://www.prosthesesfoundation.or.th>
- [2] Kirkwood, D.H., 1996, "Semi-solid of High Melting Point Alloys," The 4th International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, 19-21 June, England, pp 3200-325.
- [3] วารสารNECTEC ฉบับเดือน มีนาคม-เมษายน 2551, เทคโนโลยีขาเทียมและสถานการณ์การวิจัยพัฒนาขาเทียมในประเทศไทย
- [4] วารสารเอ็มเทค ปีที่1 ฉบับที่ 10 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2548
- [5] Lange, K., Handbook of metal forming, 1919, McGraw-Hill Book company, ISBN 0-07-036285-8.
- [6] Lecture note, Sheffield University, 2003. Metal forming processes, Prof Manus
- [7] <http://chanasteel.com/spec/carbon.htm>
- [8] Edwards, L. and Endean, M., Manufacturing with materials, 1990, Butterworth Heinemann, ISBN 0-7506-2754-9.
- [9] เฉษฐา วรรณสินธุ์, เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมไดแคสตีงแบบกึ่งของแข็ง, The Third Thai Foundry Conference November 23, 2006
- [10] Wannasin, J., Martinez, R.A., and Flemings, M.C. 2006. Grain refinement of an aluminum alloy by introducing gas bubbles during solidification. Scripta Materialia. 55, 115–118.
- [11] M.Kiuchi, R.Kopp” Mushy/Semi-Solid Metal Forming Technology-Present and Future”
- [12] Lee Sang-Yong, Lee Jung-Hwan, Lee Young-Seon, Journal of Materials Processing Technology 111(2001) 42-47
- [13] S. Chayong, H.V Atkinson, P. Kapranos, Material Science and Engineering A 390 (2005)
- [14] W.Y.Kim, B.M. Kim, C.G. Kang, Journal of Materials Processing Technology 191 (2007) 372-376
- [15] C.G. Kang, J.S.Choi, Journal of Materials Processing Technology, Volume 73, Number1, January 1998, pp. 251-263(13)

- [16] S.M.Lee, C.G. Kang, Received: 20 February 2008 /Accepted: 19 May 2008, Springer - Verlag London Limited 2008, Int J Adv Manuf Technol DOI 10.1007/s00170-008-1575-5
- [17] G.Vaneetveld, A.Rassili, J.Lecomte-Beckers, Extrusion test of 7075 aluminum alloy at high solid Fraction; submitted to S2P, 2008
- [18] H.V Atkinson, K.Burke, G.Vaneetveld, Recrystallisation in the semi-solid state in 7075 aluminum alloy
- [19] Vasile George Cioata, Imre Kiss, Researches Regarding the Obtaining Process of Metallic Materials in Semi-Solid State
- [20] International Standard Ref.No.ISO10328:2006, Prosthetics structural testing of lower-limb Prostheses-Requirements and test methods
- [21] R.kopp, D.Neudenberger, G.Winning, Journal of Materials Processing Technology 111(2001) 48-52
- [22] B.Mintz et al., "Grain Size Strengthening in Steel and Its Relationship to Grain Boundary Segregation of Carbon", Materials Sci.Techol.,Vol 8, pp.537-540
- [23] C.R.Harris, Particle cracking damage evolution in 7075 wrought aluminum alloy under monotonic and cyclic loading conditions.M.S.Thesis.Georgia Institute of Technology, 2006.
- [24] Y-L.Deng,L. Wan, L-H Wu, Y.-Y.Zhang, X.-M.Zhang,J.Mater.Sci. 46 (2010) 875-881.
- [25] A.R.Eivani,H. Ahmed,J.Zhou,J.Duszezyk,Metaa,Mater.Trans.A.40A (2009) 717-728
- [26] S.L. George.R.D.Knutsen, Composition segregation in semi-solid metal cast AA7075 aluminum alloy, J.Mater Sci (2012) 47:4716-4725
- [27] Mahathaninwong.N,Wisutmethangoon.S,Plookphol.T and Wannasin, J.,Influence of Solution Heat Treatment on Microstructures of SemiSolid Cast 7075 Aluminium Alloy,Adv.Mater. Research Vol. 339 (2011) pp 371-374

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การทดสอบตามมาตรฐาน ISO 10328

การทดสอบขาเทียมตามมาตรฐาน ISO 10328 จากศูนย์สิทธิบัตรเพื่อการฟื้นฟู

ขั้นตอนการเลือกและประกอบชิ้นส่วนส่งทดสอบ

เนื่องจากงานวิจัยหนึ่งเป็นส่วนหนึ่งในงานวิจัยหลักที่ต้องการหากรรมวิธีการผลิตที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปชิ้นส่วนขาเทียม โดยศึกษาการขึ้นรูปหลักๆ 3 กรรมวิธีคือ การอัดรีดอะลูมิเนียมเกรด 6061 ในสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-solid Extrusion), การทุบขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 7075 ในสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-solid Forging) และการฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 356 ในสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-solid Die Casting) ผลการวิจัยในเบื้องต้นพบว่ากระบวนการอัดรีดขึ้นรูปและการทุบขึ้นรูปอะลูมิเนียมในสถานะกึ่งของแข็ง ทั้งสองกระบวนการมีความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปแต่ปัญหาที่พบคือการเกิดการแยกเฟส (Segregation) อันเนื่องมาจากการขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งแบบรีโอฟอร์มมิ่ง (Rheo-forming) ไม่สามารถทำที่สัดส่วนของแข็งสูงๆ ได้และค่าใช้จ่ายในการกัดกลึง (Machining) ยังสูงมาก ในขณะที่การฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 356 ในสถานะกึ่งของแข็งสามารถผลิตชิ้นส่วนข้อเท้าเทียม, ตัวจับยึดและพีรามิดฐานรองเข้าได้ ยกเว้นข้อเท้าเทียมที่มีความยาวและบางเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการจัดทำชุดขาเทียมต้นแบบ ทางทีมวิจัยจึงเลือกใช้ท่ออะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่สั่งซื้อจากภายนอกมาแทนที่

ชิ้นส่วนขาเทียมที่ผลิตโดยแต่ละกรรมวิธีจะถูกนำมาประกอบเป็นชิ้นเดียวกัน ส่วนประกอบของขาเทียมแกนในได้เข้าโลหะที่พร้อมส่งทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ ผ.1

ชิ้นงานรวมที่ส่งทดสอบ	ส่วนประกอบ	ชื่อ/กรรมวิธีการผลิต
		PYRAMID ADAPTER
		SEMI SOLID DIE CASTING
		TUBE CLAMP ADAPTER
		SEMI SOLID DIE CASTING
		TUBE CORE
		TUBE ADAPTER
		SEMI SOLID DIE CASTING
		FOOT ADAPTER
		SEMI SOLID DIE CASTING

รูปที่ ผ.1 ชิ้นงานขาเทียมโลหะได้เข้าชนิดแกนในที่ส่งทดสอบ

การประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกันจะใช้การสวมอัด (Interference fit) ซึ่งจะต้องใช้เครื่องกดประมาณ 10-20 ตัน เป็นตัวช่วย การสวมอัดแบบนี้จะใช้สำหรับการประกอบที่ไม่ต้องการถอดหรือถอดบ่อยครั้ง

เนื่องจากชิ้นงานเป็นโลหะอะลูมิเนียมจึงสามารถนำไปชุบผิวโดยการใช้ไฟฟ้าและสารเคมีเข้าช่วย (Anodized Aluminum) คือ ทำความสะอาดชิ้นงานที่จะชุบแล้วแช่ลงในอ่างน้ำยาชุบ และต่อชิ้นงานนั้นกับขั้วไฟฟ้า เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสตรง (DC) จะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดอะลูมิเนียมออกไซด์จับเกาะเป็นผิวบางๆ สีคล้ายเงิน มันระยับ ถ้าต้องการสีอื่นๆ ต้องนำชิ้นงานนั้นไปแช่ในน้ำยาอื่นอีกครั้งหนึ่ง วิธีการทำอะลูมิเนียมชุบผิวนี้นี้ จะทำให้ผลงานอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติเพิ่มขึ้น คือ ทนต่อการกัดกร่อน, มีความหนาเพิ่มขึ้น, ผิวแข็งทนการขีดขูดได้ดีและไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ตัวอย่างการชุบผิวของชิ้นส่วนท่อขาเทียมแสดงดังรูปที่ ผ.2



รูปที่ ผ.2ท่อขาเทียมที่ผ่านการชุบผิวสีต่างๆ
การจัดวางชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบ

ชิ้นงานจะถูกส่งทดสอบที่ศูนย์สิรินธรเพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพทางการแพทย์แห่งชาติ ในส่วนของหน่วยกายอุปกรณ์ เครื่องเครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบวัฏจักรที่ใช้ทดสอบคือ Universal foot test machine รุ่น 989-1 ของบริษัทSi-Plan Electronics Research Ltd. การจัดวางชิ้นงานจะเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 10328 โดยการทดลองนี้เน้นการนำไปใช้กับผู้ป่วยที่มีน้ำหนักไม่เกิน 100 กิโลกรัม (level P5) โดยแรงที่กระทำต่อปลายเท้า และสันเท้าขนาดเท่ากัน แนวของแรงที่กระทำเป็นแนวเดียวกับกระบอกสูบคือ กระทำที่ปลายเท้า 20 องศา และ ที่สันเท้า 15 องศา กับแนวตั้ง จำนวนรอบที่ใช้ทดสอบ 2 ล้านรอบ การจัดวางชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบแสดงดังรูปที่ ผ.3 และค่าที่ใช้เริ่มต้นในการทดสอบแสดงดังตารางที่ ผ.1



รูปที่ ผ.3 การจัดวางชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบ

หมายเหตุ: * ไม่จำเป็นต้องใช้Pyramid adapterและTube adapterในการทดสอบ

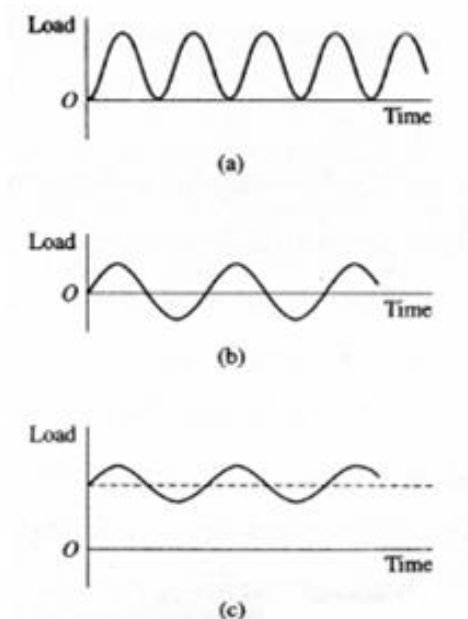
** เท้าเทียมที่ใช้เป็นของบริษัทที่เคยส่งทดสอบและผ่านมาตรฐานแล้วเพื่อตัดผลความเสียหายที่เกิดกับเท้าเทียมออกไป

ตารางที่ ผ.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงแบบวัฏจักร

ข้อมูลที่ต้องระบุก่อนการทดสอบ	ค่าเริ่มต้น	หมายเหตุ
Max Heel Displacement (การยุบตัวของสันเท้าสูงสุด)	5.42	เครื่องหยุดเมื่ออ่านค่าได้ 25.42
Min Heel Displacement (การยุบตัวของหน้าเท้าสูงสุด)	6.57	เครื่องหยุดเมื่ออ่านค่าได้ 36.57
Max Toe Displacement (การยุบตัวของสันเท้าต่ำสุด)	2.4	-
Min Toe Displacement (การยุบตัวของหน้าเท้าต่ำสุด)	0.614	-

การทดสอบความแข็งแรงแบบวัฏจักร (Dynamic testing)

การทดสอบความแข็งแรงแบบวัฏจักรเป็นการทดสอบการล้า (Fatigue) ของวัสดุจำพวกโลหะ ซึ่งถูกกระทำโดยหน่วยแรงหรือความเครียดที่มีค่าของ yielding stress หรือ strain แบบซ้ำไปซ้ำมา (repeated cycles) แล้วเกิดการวิบัติแบบเปราะ (brittle fracture) ดังรูปที่ ผ.4



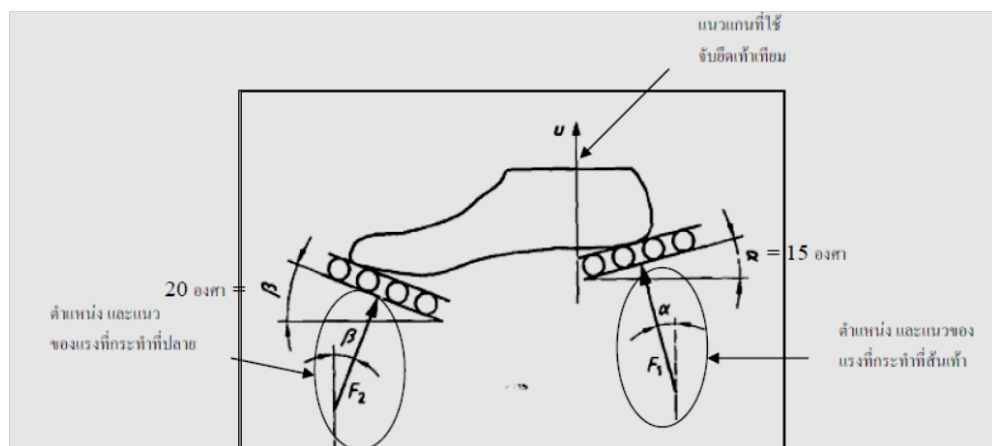
รูปที่ ผ.4 รูปแบบต่างๆของ Fatigue load

การวิบัติในลักษณะนี้เกิดขึ้นจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่จุดบกพร่องที่มีขนาดเล็กมากๆ ที่มักจะพบอยู่ที่ผิวของโครงสร้างหรือตัวอย่างทดสอบ หน่วยแรงดังกล่าวจะมีค่าสูงมากกว่าค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงบนหน้าตัดของโครงสร้างหรือตัวอย่างทดสอบมาก เมื่อวัสดุถูกกระทำโดยหน่วยแรงนี้แบบซ้ำไปซ้ำมาแล้ว จุดบกพร่องในวัสดุก็จะมีกรขยายตัวใหญ่เรื่อยๆ ซึ่งจะทำให้ค่าหน่วยแรงมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย จนในที่สุด พื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างหรือตัวอย่างทดสอบก็จะ

มีขนาดลดลงจนถึงจุดๆหนึ่งที่โครงสร้างหรือตัวอย่างทดสอบไม่สามารถรับแรงกระทำต่อไปได้อีก และจะทำให้โครงสร้างหรือตัวอย่างทดสอบเกิดการแตกหักแบบฉับพลัน (Sudden fracture) ขึ้น

การตั้งเครื่องทดสอบฝ่าเท้า

1. เปิดเบรกเกอร์ในห้องทดสอบส่วนประกอบกายอุปกรณ์เทียมซึ่งมีทั้งระบบไฟฟ้าในห้องและปั๊มลม
 2. ห้องปั๊มลม
 - 2.1 เปิด/ยกเบรกเกอร์ ของเครื่องดรายเออร์ ทั้งสองเครื่อง เนื่องจากการเดินท่อลมในห้องปัจจุบัน ใช้ลมที่ส่งผ่านเครื่องดรายเออร์ทั้งสองเครื่อง
 - 2.2 เช็คน้ำมันของเครื่องปั๊มลมตามที่ระบุที่ฝาหน้าของเครื่องปั๊มลม
 - 2.3 กดปุ่มพาวเวอร์สีแดง เพื่อเดินเครื่องปั๊มลม
 - 2.4 รอประมาณ 5 นาทีให้มีลมสูบเข้าแทงก์ ทราบได้จากมาตรวัดหน้าแทงก์ กดสวิทช์สีเขียวที่เครื่องดรายเออร์ทั้งสองตัว ไฟสีเขียวขึ้นระบุการทำงาน
 3. ห้องทดสอบส่วนประกอบกายอุปกรณ์เทียม
 - 3.1 เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ควบคุมเครื่องทดสอบฝ่าเท้า
 - 3.2 เปิดก๊อกท่อลม ที่ไว้สักครู่ มาตรวัดควรอ่านความดันลม ประมาณ 6 บาร์
 - 3.3คลิกที่ Servo control และ DPM
 - 3.4วางเท้าเทียมลงบนเครื่อง ขันนอตจับท่อให้แน่น ปรับเท้าให้อยู่ในแนวนิวทรอล (Neutral) โดยเท้าเทียมอยู่เหนือแผ่นจ่ายแรงเพียงเล็กน้อย ประมาณ 2 mm. อาจใช้มือช่วยดึงแผ่นแรงให้ใกล้กับฝ่าเท้าเทียม ได้เล็กน้อย (ส่วนใหญ่ที่สันเท้า)
- แนวในการวางชิ้นงานบนเครื่องทดสอบ แสดงในรูปที่ ผ.5 เพื่อให้ได้ตำแหน่งมุมปลายเท้าบิดออก (toe out) ของข้อเท้าเทียมและเท้าเทียม



รูปที่ ผ.5 แนวในการวางชิ้นงานบนเครื่องทดสอบ

3.5 ที่หน้าจอ servo control คอลัมน์ Heel load ปรับ ช่อง manual = 0.05 kN เลือก pressure on ค่า manual อาจเปลี่ยนแปลง ปรับใหม่อีกครั้งแล้วปรับค่าอื่นๆดังนี้

Ramp rate 0.1 kN/s -0.25 kN/s โดยปกติใช้ 0.25 kN/s

Frequency = 1Hz

Cycle limit = 2,000,000 ตั้งเพียงข้างเดียว

Max load = 1230 + pre-load = 1280 หรือ 1.280 kN

Min load = 50 + pre-load = 100 หรือ 0.1 kN ปรับ Toe load เหมือนกัน

3.6 บน desktop เลือก Tare โดยปรับค่า heel displacement และ Toe displacement ทำให้ค่าทั้งสองแสดงบน DPM=0

3.7 บน Desktop เลือก Trip เลือก 2 Trips

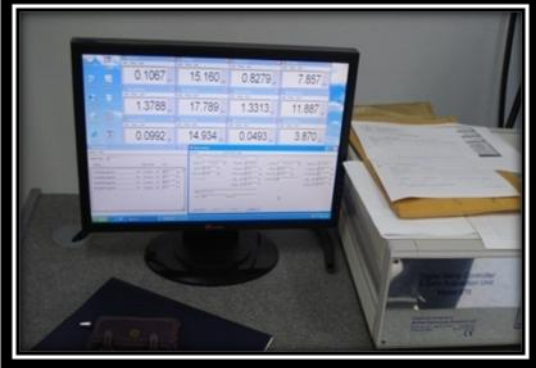

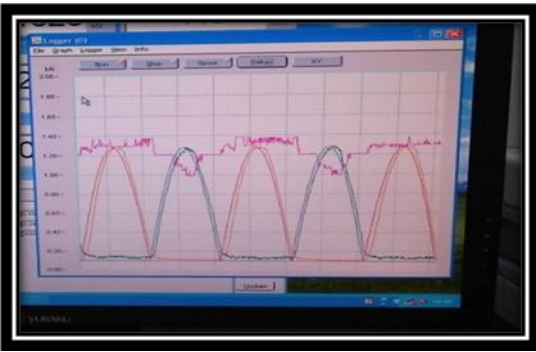
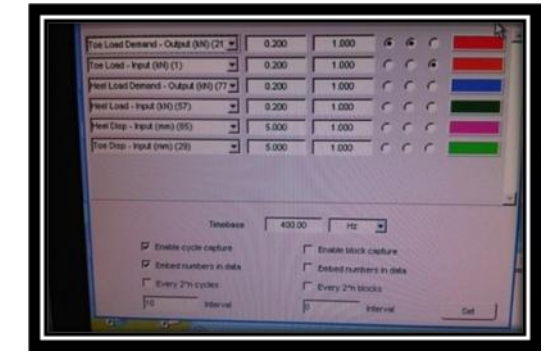
บรรทัดแรกระบุ Heel displacement, test stable และการยุบตัวของสันเท้าที่ต้องการให้เครื่องตัด ในการทดลองนี้เท่ากับ 25.42 mm (ค่า Max Heel displacement เริ่มต้นเท่ากับ 5.42 mm บวกเพิ่ม 20 mm)

บรรทัดที่สองระบุ Toe displacement, test stable และการยุบตัวของหน้าเท้าที่ต้องการให้เครื่องตัด ในการทดลองนี้เท่ากับ 36.57mm. (ค่า Max Toe displacement เริ่มต้นเท่ากับ 5.42mm บวกเพิ่ม 30 mm) ตามที่ ISO ระบุ ค่าแรงที่จ่ายจากเครื่องไม่ควรเกิน $1.1 \times \text{Max load}$ ซึ่งอาจเพิ่มได้

3.8 บน Desktop เลือก Data logger เลือกคำสั่ง Spool จากนั้นระบุชื่อไฟล์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลการทดสอบ แล้วจึงเลือก Run

3.9 เลือก Start บันทึกวันที่ทดสอบและค่า max and min heel displacement และ max and min toe displacement

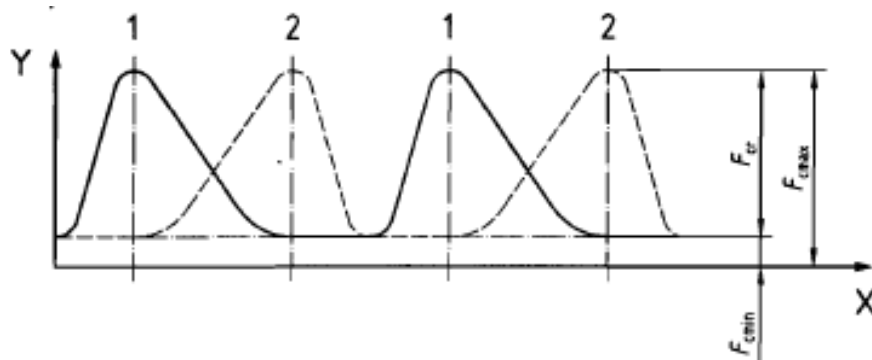
	
<p>โครงสร้างบางส่วนที่นำไปทดสอบ</p>	<p>การจัดวางชิ้นงานบนเครื่องทดสอบ</p>

	
<p>คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผล</p>	<p>ค่าต่างๆจากการทดสอบ</p>
	
<p>กราฟที่ได้จากการทดสอบแบบวัฏจักร</p>	<p>ความหมายของสีที่ปรากฏจากกราฟ</p>

รูปที่ ๘.6 ชิ้นงานขณะทดสอบและหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลการทดสอบขาเทียม
ได้เข้าชนิดแกนในแบบวัฏจักร

การอ่านค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบวัฏจักร (Dynamic testing)

การประมวลผลจะกระทำโดยคอมพิวเตอร์ซึ่งจะปรากฏกราฟที่เป็นลักษณะของคลื่นรูปไซน์ดังแสดงในรูปที่ ๘.7 กราฟจริงที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ ๘.8 และการอ่านค่าจากกราฟแสดงดังตารางที่ ๘.2









โดยกำหนดให้ X เวลา 1 ภาระที่สันเท้า
 Y แรงทดสอบ 2 ภาระที่เท้าส่วนหน้า

รูปที่ ผ.7 ตัวแปรตัวจักรภาระในการทดสอบตัวจักรแยกสำหรับเท้าเทียมแบบมีข้อและเท้าเทียม

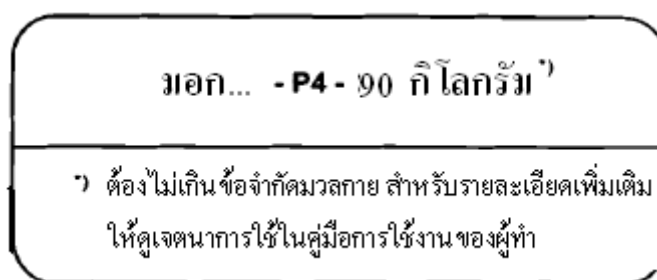


รูปที่ ผ.8 กราฟจริงที่ปรากฏหน้าจอคอมพิวเตอร์ขณะทำการทดสอบ

ตารางที่ ผ.2 การอ่านค่าจากสีที่ปรากฏจากกราฟ

สีที่ปรากฏ	ความหมาย
	ภาระที่โหลดกระทำต่อหน้าเท้า
	
	ภาระที่โหลดกระทำต่อสันเท้า
	
	การยุบตัวของสันเท้า
	การยุบตัวของหน้าเท้า

ผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่า ชิ้นงานตัวอย่างสามารถผ่านการทดสอบแบบวัฏจักรที่ 2 ล้ำรอบได้โดยค่าการเปลี่ยนรูปไม่เกินที่กำหนดไว้คือ สำหรับค่าการเปลี่ยนรูปที่รับได้ของส่วนสั้นเท้าและสำหรับค่าการเปลี่ยนรูปที่รับได้ของส่วนปลายเท้า ชิ้นส่วนประกอบโลหะ (ยกเว้นเท้าเทียม) ก็ไม่เกิดความเสียหายใดๆ การทดสอบนี้เป็นเพียงการทดสอบเพื่อจะดูแนวโน้มความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาการส่งทดสอบจนถึงขั้นตอนการออกเอกสารรับรองมาตรฐาน (ฉลากแสดงการรับรองมาตรฐานแสดงดังรูป ผ.9) เพื่อนำไปใช้กับผู้พิการที่มีน้ำหนักไม่เกิน 100 กิโลกรัม (level P5) ได้ในภายหลัง



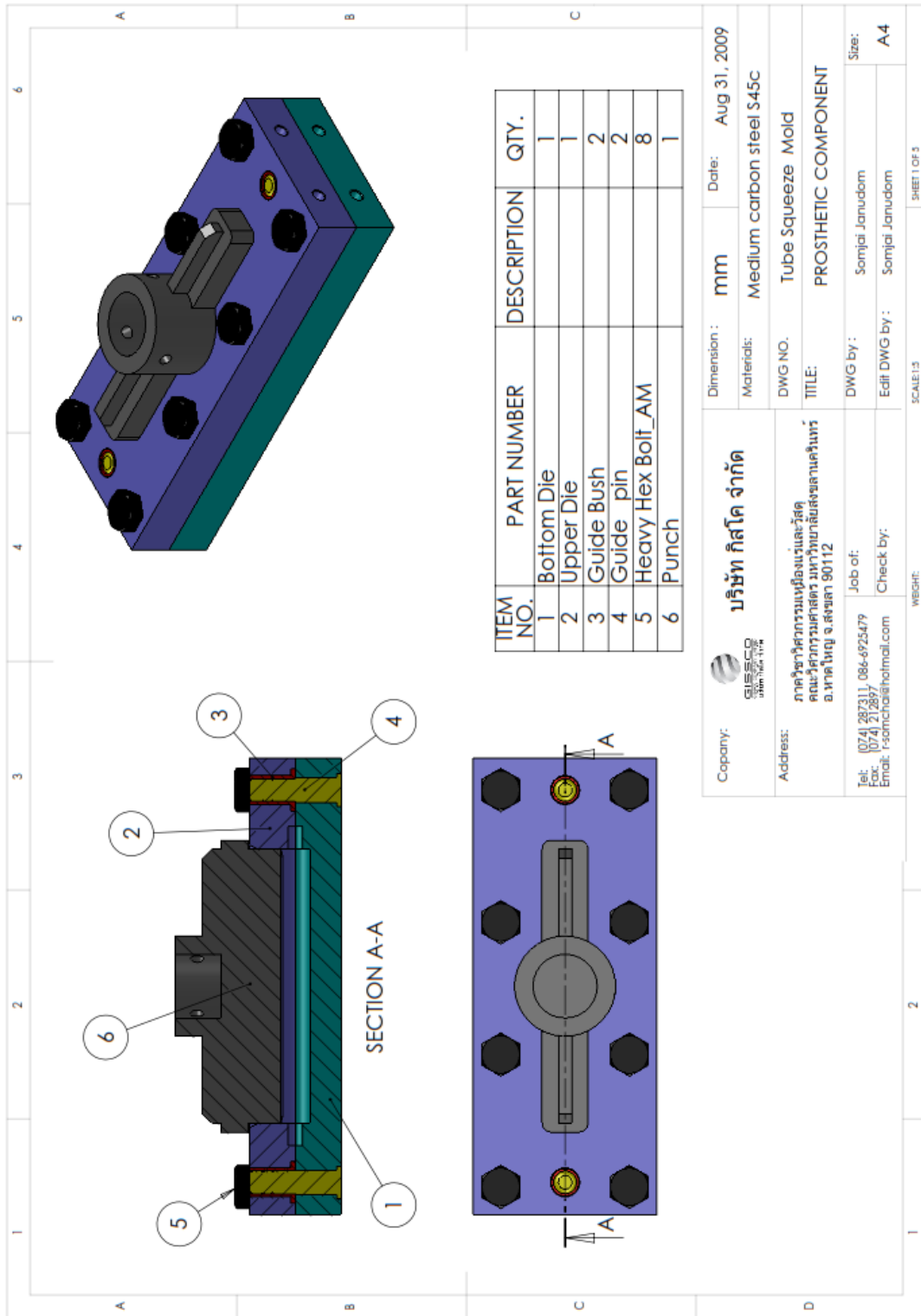
รูปที่ ผ.9 ตัวอย่างรูปแบบฉลากแสดงมาตรฐานการใช้งาน (ISO 10328 ภายอุปกรณ์ ฉบับภาษาไทย, 2552)

สรุปผลการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 10328

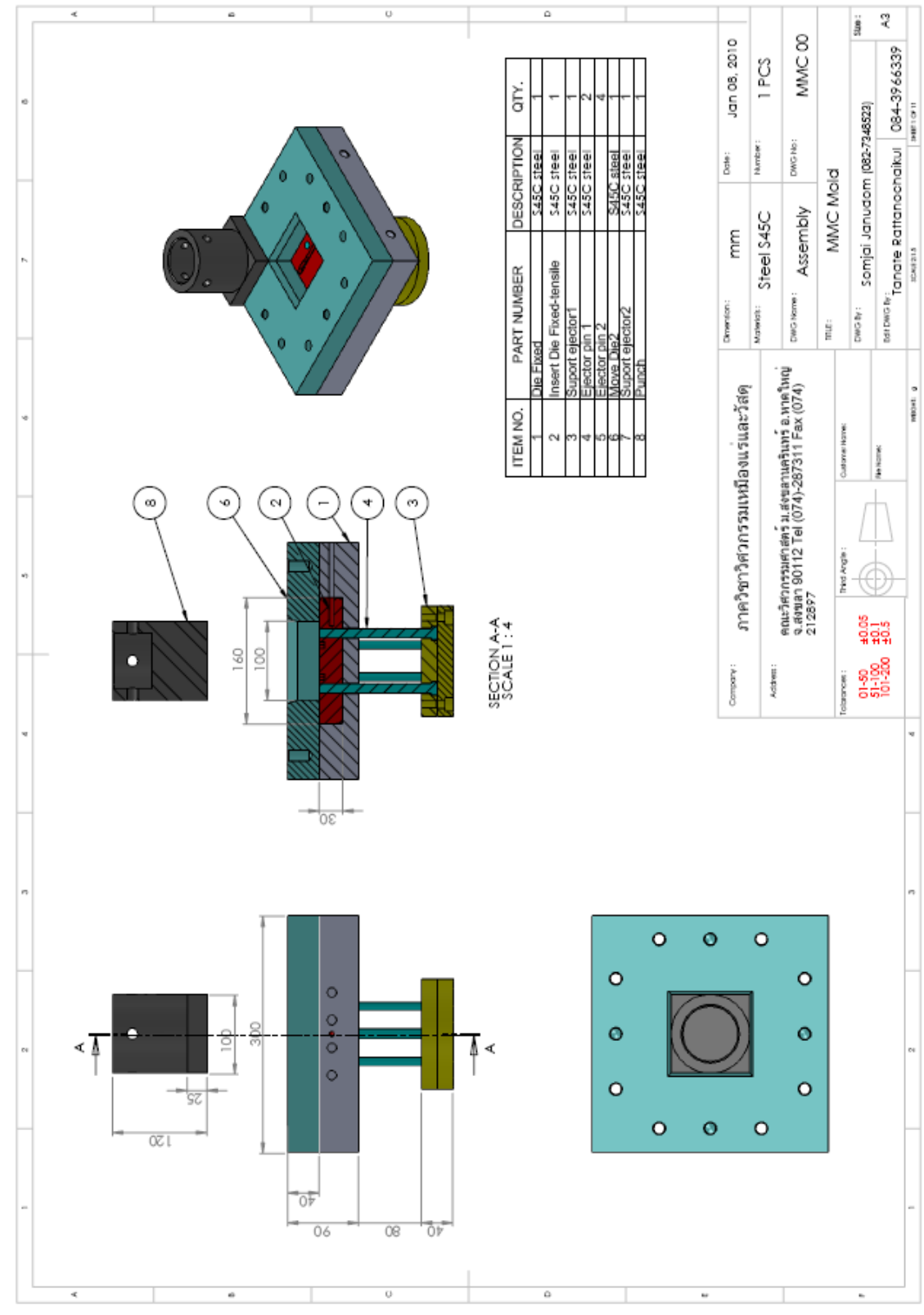
ชิ้นส่วนขาเทียมเบื้องต้นที่ส่งทดสอบการรับแรงแบบวัฏจักรตามมาตรฐาน ISO10328 พบว่าสามารถผ่านการทดสอบได้ที่ 2 ล้ำรอบ โดยไม่เกิดความเสียหายและค่าการเสียรูปไม่เกินตามค่ากำหนด

ภาคผนวก ข.

แบบ Drawing แม่พิมพ์และชิ้นส่วนขาเทียมที่ใช้ในการทดสอบมาตรฐาน



แบบ Drawing แม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยขึ้นรูปแท่งกระบอกต้นยาว



แบบ Drawing แม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยขึ้นรูปแผ่น

Company: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและวัสดุ

Address: คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.สงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112 Tel (074)-287311 Fax (074) 212897

Dimension: mm Date: Jan 08, 2010

Material: Steel S45C Number: 1 PCS

DWG Name: Assembly DWG No: MMC 00

Title: MMC Mold

Drawn By: Somjai Januadam (082-7346523)

Get DWG By: Tanate Rattanoachakul 084-3966339

Scale: A3

Sheet: 9 of 11

Sheet No: 9


Sheet Title: 9






Customer Name:

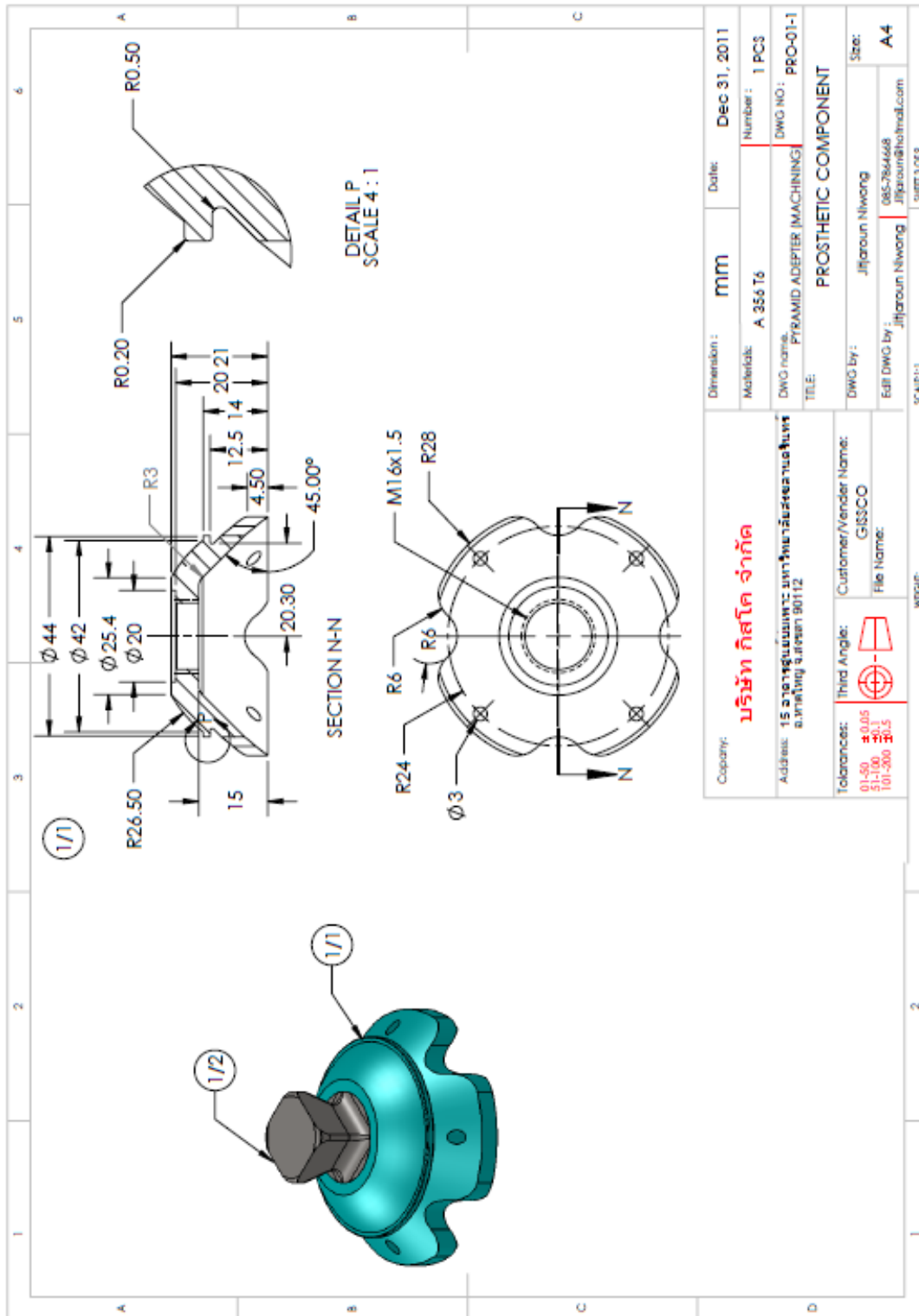
Part Name:

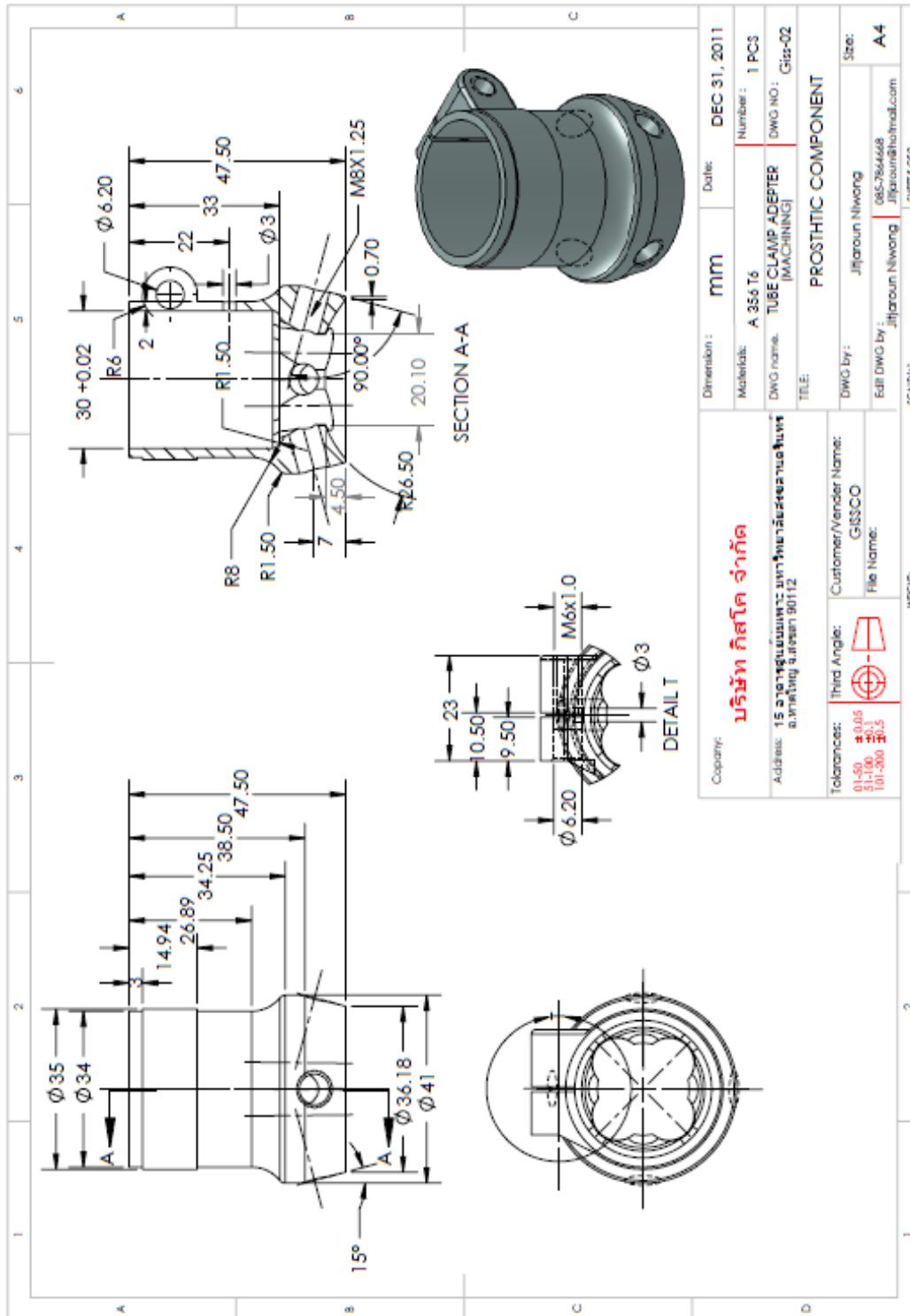
Tolerance: 01-50: ±0.05
51-100: ±0.1
101-200: ±0.3

Thread Angle:

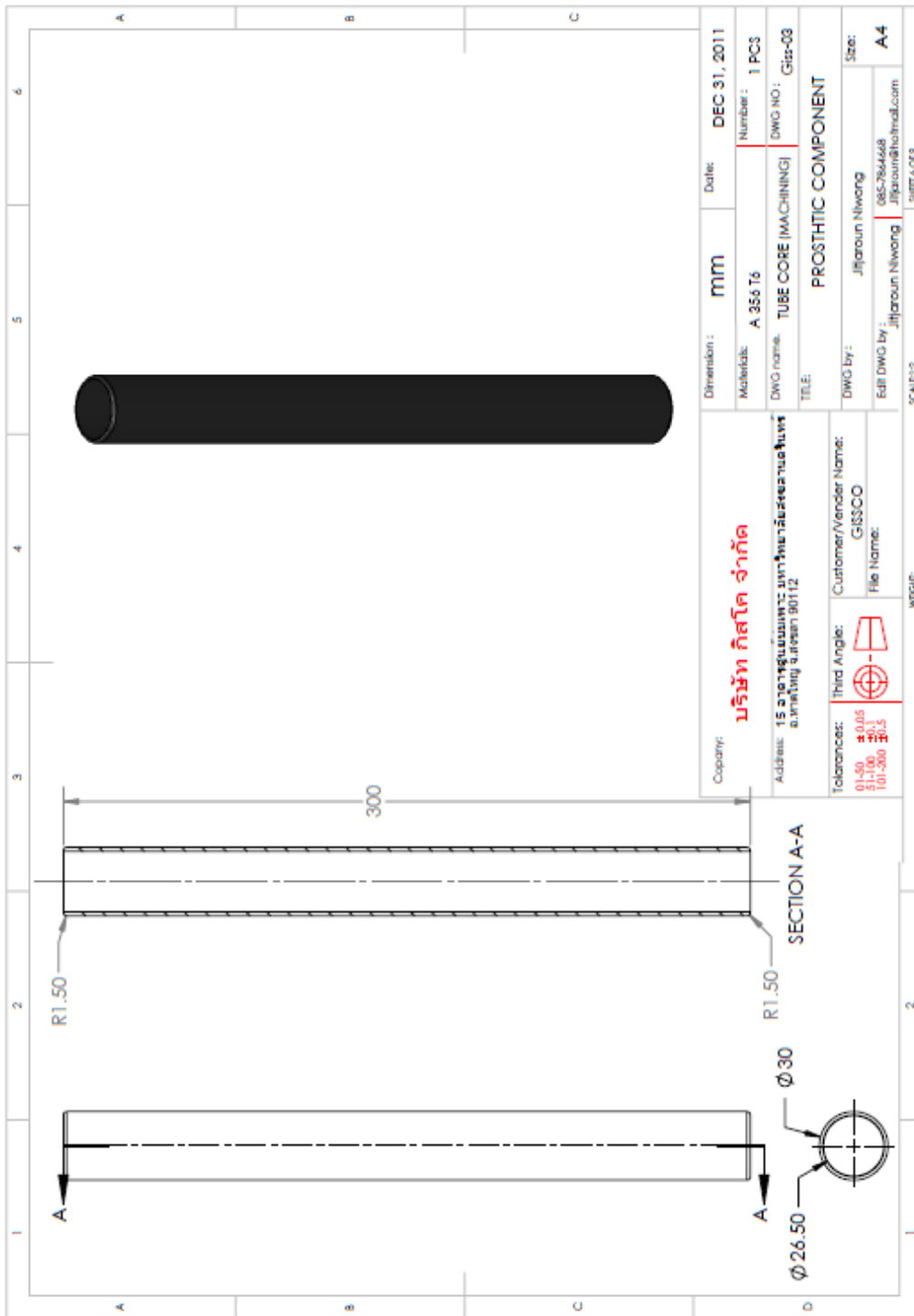
<p>Company: บริษัท กัสโค จำกัด</p> <p>Address: 15 ซอยสุขุมวิทพิเศษ บางนาภิรมย์ซอย 9 ถนนสุขุมวิท 90112</p> <p>Tolerances: 01-50 ±0.05 101-200 ±0.1 101-200 ±0.5</p> <p>Third Angle: </p> <p>Customer/Vender Name: GUSCO File Name:</p>		<p>Dimension: มม</p> <p>Material: A 356 T6</p> <p>DWG name: PART MACHINING</p> <p>TITLE: PROSTHETIC COMPONENT</p> <p>DWG By: Jijaroun Niwong</p> <p>Edit DWG by: Jijaroun Niwong 085-784468 jijaroun@hotmail.com</p> <p>SCALE:1:1</p> <p>DATE: Dec 31, 2011</p> <p>Number: 1 PCS</p> <p>DWG NO: PRO-8</p> <p>Size: A4</p>
---	--	---

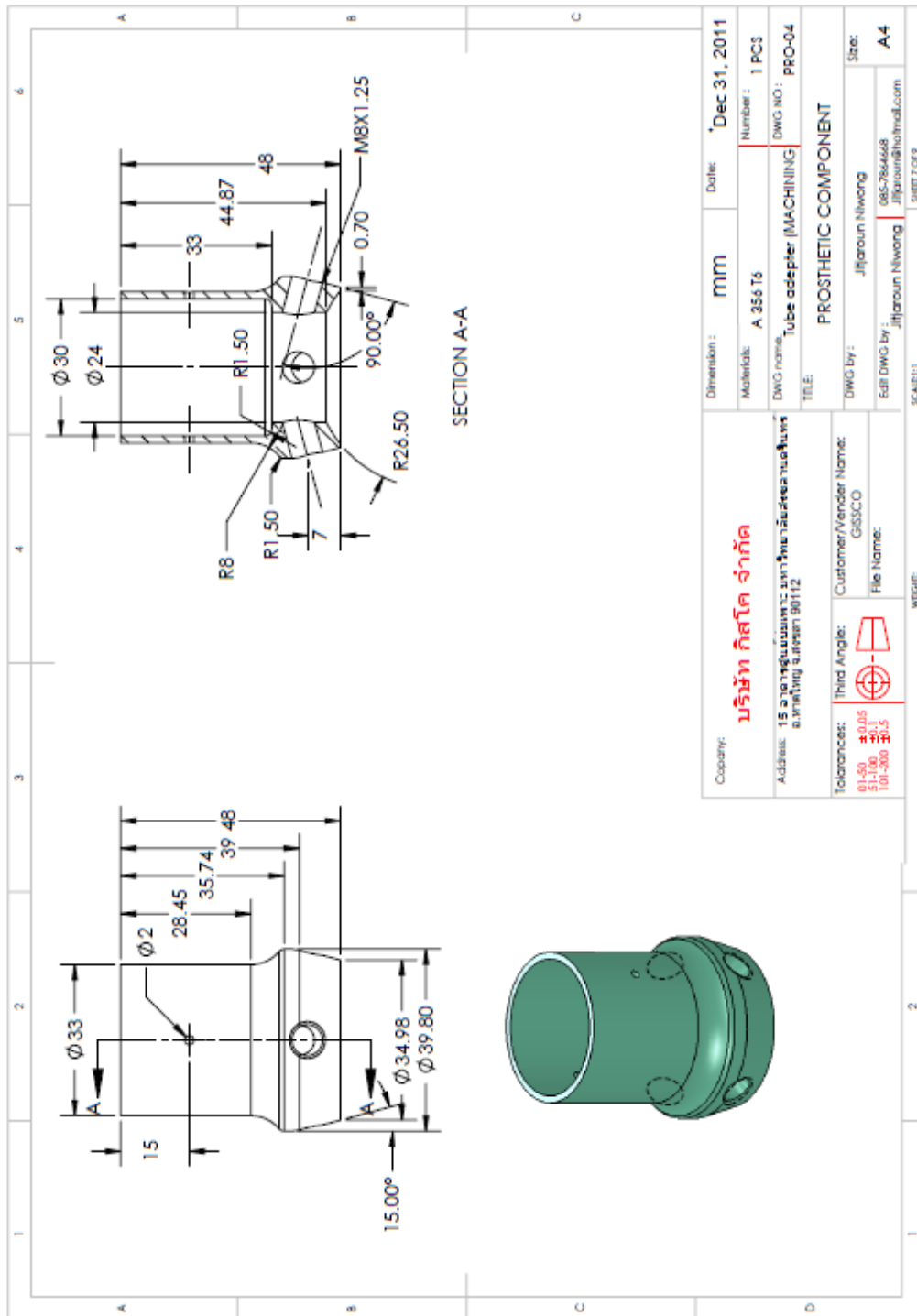
DRAWING PART MACHINING					
1	2	3	4	5	
					





Company:	บริษัท กัสโค จำกัด	Dimension :	mm	Date:	DEC 31, 2011
Address:	15 อารามราษฎร์นอก บางกอกน้อย กรุงเทพมหานคร จ.นนทบุรี อ.เมือง นนทบุรี 90112	Material:	A 356 T6	Number :	1 PCS
Tolerances:	Third Angle: 01.50 ±0.05 02.50 ±0.5 101-200 ±0.5	DWG name:	TUBE CLAMP ADAPTER (MACHINING)	DWG NO.:	Gisr-02
	Customer/Vender Name: GISSCO	TITLE:	PROSTHETIC COMPONENT		
	File Name:	DWG By:	Jijjaroun Niwong	Size:	A4
		Est DWG by:	Jijjaroun Niwong	065-7844468	
			Jijjaroun@hotmail.com		
		SCALE:	1:1	SHEET:	01/01





Company:	บริษัท กิโตะ จำกัด	Dimension :	mm	Date:	Dec 31, 2011
Address:	15 ซอยสุขุมวิทพิเศษ แขวงคลองตันใต้ เขตคลองเตย กรุงเทพฯ 10112	Material:	A 356 T6	Number :	1 PCS
Tolerances:	01-50 ±0.05 101-200 ±0.3	DWG name:	Tube adapter (MACHINING)	DWG NO.:	PRO-04
Third Angle:		TITLE:	PROSTHETIC COMPONENT		
Customer/Vendor Name:	GISCO	DWG By :	Jifaroun Niwong		
File Name:		Edit DWG by :	Jifaroun Niwong 085-7844668 jifaroun@hotmail.com		
Scale:		SCALE:	1:1		
Sheet No.:	2	Sheet Total:	8		

