



การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 โดยใช้กระบวนการทางความร้อน
Improvement of Mechanical Property of Aluminum Alloy 7075 by Heat
Treatment Process

อนันต์ ศรีมุกข์
Anan Srimuk

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Industrial and Systems Engineering
Prince of Songkla University

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 โดยใช้กระบวนการ
ทางความร้อน
ผู้เขียน นาย อนันต์ ศรีมุข
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล) (รองศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

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

.....
(ดร.สมใจ จันทร์อุตม)

.....กรรมการ
(ดร.สมใจ จันทร์อุตม)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตน์วิไล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวรรณ คล้อยภยันต์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
และระบบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(ดร.สมใจ จันทร์อุตม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ

(นาย อนันต์ ศรีมุข)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นาย อนันต์ ศรีมุข)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 โดยใช้กระบวนการทางความร้อน
ผู้เขียน	นาย อนันต์ ศรีมุกข์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 โดยใช้กระบวนการทางความร้อน (กระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง) และการคำนวณต้นทุนที่เกิดขึ้นของกระบวนการทางความร้อน โดยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล จะช่วยเพิ่มความแข็งและความทนแรงดึงที่เหมาะสมกับลักษณะของการนำไปใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยจะใช้ อะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิคพันฟองแก๊สเป็นวัสดุในการวิจัย หากเปรียบเทียบกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งและกระบวนการหล่อแบบเก่า พบว่า กระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้สูงขึ้นและลดข้อบกพร่องต่างๆ ของชิ้นงานลง ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนมีปัจจัย 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางจุลภาค ปัจจัยดังกล่าว คือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการ อุณหภูมิอบละลายที่ใช้ในงานวิจัย คือ 450 480 และ 510°C และใช้เวลาในการอบละลาย 4 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง (ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง) จากเงื่อนไขการทดลองข้างต้นที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด คือ การอบละลายที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วตามด้วยการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง ซึ่งให้ค่าความแข็ง ความแข็งแรงคราก ความทนแรงดึงและเปอร์เซ็นต์ความยืดเท่ากับ 88.56 HRB 335.97 MPa 479.95 MPa และ 6% ตามลำดับ ซึ่งหากเปรียบเทียบค่าสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิอบละลายเดียวกันแต่ใช้เวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง (ค่าความแข็ง ความแข็งแรงคราก ความทนแรงดึงและเปอร์เซ็นต์ความยืดเท่ากับ 87.56 HRB 333.99 MPa 477.32 MPa และ 6.92% ตามลำดับ) และ 8 ชั่วโมง ด้วยวิธีการทางสถิติ พบว่า ค่าสมบัติเชิงกลที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกัน จากการทดสอบสามารถตัดสินใจเลือกกระบวนการที่ใช้เวลาในการอบละลาย 4 ชั่วโมงในการคำนวณต้นทุนของกระบวนการ เนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำกว่ากระบวนการที่ใช้เวลาในการอบละลาย 8 ชั่วโมงและให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งการคำนวณต้นทุนจะคำนวณที่ระดับกำลังการผลิต 90,000 180,000 และ 270,000 ชิ้นต่อปี จากการคำนวณต้นทุนต่อหน่วยในระดับการผลิต 270,000 ชิ้นต่อปี ให้ต้นทุนต่อหน่วยต่ำกว่าระดับกำลังการผลิตอื่นๆ คือ อุณหภูมิอบละลาย 450, 480 และ 510°C ให้ต้นทุนต่อหน่วยเท่ากับ 789.22 792.69 และ 796.73 บาท ตามลำดับ

Thesis Title	Improvement of mechanical property of aluminum alloy 7075 by heat treatment process
Author	Mr. Anan Srimuk
Major Program	Industrial and Systems Engineering
Academic Year	2014

ABSTRACT

The objectives of this research are to increase the mechanical properties of aluminum alloy 7075 using heat treatment process (T6 condition followed by two-step artificial aged) and analyse cost throughout the process. This mechanical property improvement will increase hardness and tensile strength that appropriate characteristics with any kinds of work. This research used squeeze casting with GISS technique to produce an aluminum 7075 part. This process increases mechanical property and decreases numbers of defect when compared with the Conventional Liquid Cast (CLC). Two factors of heat treatment process that affect the mechanical properties and microstructures of aluminum are temperature and time. The solution temperature used in the research are 450, 480 and 510°C for 4 and 8 hours then followed by two-step artificial aging (The first 120°C for 2 hrs. and the second 170 °C for 1.5 hrs.). In this research the condition that has the best result in this research obtained from the solution treatment at 450°C for 8 hours and two-step artificial aging. It will give 88.56 HRB, 335.97 MPa, 479.95 MPa and 6% of result hardness, yield strength, tensile strength and %elongation. If compare mechanical properties at the same solution temperature and use solution time are 4 hrs. (The hardness, yield strength, tensile strength and %elongation equal 87.56 HRB, 333.99 MPa, 477.32 MPa and 6.92% respectively) and 8 hrs. With statistical methods found the mechanical properties that are not different. The capacity of production for calculated cost per unit in the laboratory scale are 90,000 180,000 and 270,000 pieces/year. From the cost calculation per unit 270,000 pieces/year's production, the condition that makes cost per unit lower than other capacities is 450, 480 and 510°C of solution temperature. Cost per unit of this condition equals 789.22 792.69 and 796.73 baht respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล ประธานกรรมการที่ปรึกษา ดร.สมใจ จันทร์อุตม กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำ แนวทาง และวิธีแก้ไขปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์และการติดตามความก้าวหน้าของงานวิจัย รวมไปถึงการตรวจทานความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนาวิไล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวรรณ คล้อยภยันต์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาเป็นคณะกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบความก้าวหน้าวิทยานิพนธ์ที่ให้ข้อเสนอแนะและแนวทางในการแก้ไขปัญหา ซึ่งเป็นผลทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์และเกิดความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทุกๆ ท่านที่ให้ความช่วยเหลือตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งการดำเนินการวิจัยสำเร็จจลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบคุณบัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้ความสะดวกและคำแนะนำในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนเครื่องและอุปกรณ์ในการทำวิจัย และขอขอบคุณบริษัท กิสโค จำกัด และทีมงานวิจัยอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งทุกๆ ท่าน ที่ทำให้งานวิจัยครั้งนี้ดำเนินการได้อย่างราบรื่นและสมบูรณ์

ขอขอบคุนหน่วยบริหารงานวิจัย นวัตกรรมและทรัพย์สินทางปัญญา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนเงินทุนงานวิจัย และขอขอบคุณทีมงานของหน่วยบริหารงานวิจัย ที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในเรื่องต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวศรีมุข ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา ขอขอบคุณนักศึกษาบัณฑิตศึกษา ในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบ ที่ให้กำลังใจและคำปรึกษาจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี และขอขอบคุณทุกๆ ท่านที่ไม่ได้กล่าวมา ณ ที่นี้ที่มีส่วนร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญรูปภาพ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 การสำรวจเอกสาร	2
1.3 วัตถุประสงค์	8
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	8
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม	10
2.2 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบกึ่งของแข็ง (SEMI-SOLID METAL)	17
2.3 กระบวนการทางความร้อน	22
2.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	23
2.5 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติเชิงกล	24
2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	31
2.7 การคำนวณต้นทุน	38
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย	41
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	42
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	43
3.3 การเตรียมชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี GISS	47
3.4 การออกแบบการทดลอง	48
3.5 ขั้นตอนการทดลองกระบวนการทางความร้อน	48
3.6 การเตรียมชิ้นงานและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	50
3.7 การเตรียมชิ้นงานและการทดสอบความแข็ง	51
3.8 การเตรียมชิ้นงานและการทดสอบความทนแรงดึง	53
3.9 การวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งและความทนแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ	56
3.10 การวิเคราะห์ต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย	65
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075	65
4.2 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบกึ่ง ของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS	68
4.3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลด้วยวิธีการทางสถิติ	71
4.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังผ่านกระบวนการทางความ ร้อน	86
4.5 การวิเคราะห์ต้นทุน	92
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	114
5.1 สรุปผลการวิจัย	114
5.2 ข้อเสนอแนะ	115
บรรณานุกรม	117
ภาคผนวก ก	121
ภาคผนวก ข	128
ประวัติผู้เขียน	137

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติเชิงฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม	11
2.2	สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูป	12
2.3	สัญลักษณ์การทำ TEMPER	14
2.4	รายละเอียดและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการทำ TEMPER ในสถานะต่างๆ ของอะลูมิเนียม	15
2.5	สเกลการทดสอบความแข็งและชนิดของหัวกดของการวัดความแข็งแบบบร็อคเวลล์	26
2.6	การวิเคราะห์หาความแปรปรวนการทดลองเชิงแพททอเรียล 2 ปัจจัย	34
3.1	ส่วนผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 (W.T.%)	42
3.2	อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลอง	48
3.3	รายละเอียดขนาดต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบ	54
3.4	ลำดับการทดลองของกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน	56
3.5	ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การ อบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C	58
3.6	ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การ อบละลาย 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C	59
3.7	ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การ อบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C ผลิตจำนวน 2 ล็อตต่อหนึ่งวัน	62
4.1	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน	67
4.2	ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS	69
4.3	ค่าความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้ เทคนิค GISS	70
4.4	ค่าความแข็งแรงคราก (YIELD STRENGTH) ของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป กึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS	70
4.5	ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและการป่มแข็ง เทียม (T6)	72
4.6	ตาราง ANOVA FOR HARDNESS (การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาใน การอบละลายของกระบวนการทางความร้อน)	75
4.7	ค่าความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและการป่ม แข็งเทียม (T6)	79
4.8	ตาราง ANOVA FOR TENSILE STRENGTH (การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและ เวลาในการอบละลายของกระบวนการทางความร้อน)	82

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 ค่าความแข็งแรงครากของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและการบ่มแข็งเทียม (T6)	85
4.10 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและการบ่มแข็งเทียม (T6)	86
4.11 ประเภทของต้นทุนตามกระบวนการ (PROCESS-BASED COST MODEL)	92
4.12 ข้อกำหนดเฉพาะและความต้องการของกระบวนการทางความร้อน	94
4.13 อัตราค่าไฟแบบ TIME OF USE (TOU)	95
4.14 ช่วงเวลาที่ใช้ไฟฟ้าส่องสว่างสำหรับการผลิต 1 กะ (90,000 ชิ้น/ปี)	96
4.15 ต้นทุนน้ำประปาในการชุบแข็งชิ้นงาน	97
4.16 ต้นทุนค่าเครื่องจักร (ค่าเสื่อมของเครื่องจักร)	97
4.17 ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องจักรตามอายุการใช้งาน [34]	98
4.18 ต้นทุนบำรุงรักษาเครื่องจักร	98
4.19 ต้นทุนอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน	98
4.20 ต้นทุนคงที่ของกระบวนการทางความร้อน	99
4.21 ต้นทุนอะลูมิเนียม 7075	100
4.22 ต้นทุนแรงงานสำหรับการผลิต 1 กะ	101
4.23 ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการตามทฤษฎีของอุณหภูมิอบละลาย 450°C	102
4.24 ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้จริงของของอุณหภูมิอบละลาย 450°C	103
4.25 ช่วงเวลาที่เตาอบละลายใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละวัน	104
4.26 ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าของเตาอบละลาย	105
4.27 ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการตามทฤษฎีของแต่ละอุณหภูมิบ่มแข็งเทียม	105
4.28 ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้จริงของแต่ละอุณหภูมิบ่มแข็งเทียม	106
4.29 ช่วงเวลาที่เตาบ่มแข็งเทียมใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละวัน	106
4.30 ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าของเตาบ่มแข็งเทียม	106
4.31 ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าของเงื่อนไขการทดลองที่ใช้อุณหภูมิอบละลาย 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง	107
4.32 ต้นทุนในกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน กรณีที่ผลิต 90,000 ชิ้น/ปี (1 กะ)	108
4.33 ช่วงเวลาที่เครื่องจักรใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละวัน กรณีผลิตชิ้นงานวันละ 2 และ 3 ล็อต (เฉพาะเงื่อนไขที่ใช้เวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง)	110
4.34 ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าของเตาอบละลาย (กรณีผลิตจำนวน 2 ล็อต/วัน)	111

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.35	ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าของเตาป้อนแข็งเทียม (ผลิตจำนวน 2 ล็อต/วัน สำหรับอุณหภูมิอบละลาย 450°C)	111
4.36	ต้นทุนในกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน กรณีที่ผลิต 180,000 ชิ้น/ปี (2 กะ)	112
4.37	ต้นทุนในกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน กรณีที่ผลิต 270,000 ชิ้น/ปี (3 กะ)	113

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	แบบจำลองต้นทุนของการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีกึ่งของแข็ง	7
2.1	สัญลักษณ์ของการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมหล่อผสมตาม ANSI STANDARD	13
2.2	แผนภาพสมดุอะลูมิเนียม-สังกะสี	17
2.3	โครงสร้างจุลภาค ก) โครงสร้างจุลภาคเกรนแบบเดรนไดร์ท และ ข) โครงสร้างจุลภาคเกรนแบบก้อนกลม	18
2.4	กระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งแบบ THIXOCASTING	19
2.5	กระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งแบบ RHEOCASTING	20
2.6	เส้นทางการเติบโตและการ COARSENING ของอนุภาคของแข็ง	21
2.7	แบบจำลองกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยเทคนิคการพ่นพองแก๊ส	22
2.8	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบมีจุดคราก	29
2.9	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบไม่มีจุดคราก	30
2.10	เส้นโค้งเปรียบเทียบความเค้น-ความเครียด ก) วัสดุเปราะ และ ข) วัสดุพลาสติก	31
2.11	โครงสร้างของต้นทุนตามกระบวนการ (PBCM)	40
3.1	ขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย	41
3.2	โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิค GISS ก.) ลักษณะที่ได้จากการขึ้นรูป และ ข.) โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม	42
3.3	เตาเผาอุณหภูมิต่ำ	43
3.4	เตาต้มแข็งเทียม	43
3.5	เลื่อยสายพานแนวนอน	44
3.6	เครื่องกัดแนวตั้ง	44
3.7	เครื่องขัดกระดาษทรายและขัดสักหลาด	45
3.8	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	45
3.9	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	46
3.10	เครื่องทดสอบความทนแรงดึง	46
3.11	เครื่องทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์	47
3.12	การตัดแบ่งชิ้นงาน ก.) ชิ้นงานทดสอบความทนแรงดึง และ ข.) ชิ้นงานทดสอบความแข็ง	47
3.13	ไดอะแกรมของกระบวนการทางความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย	49
3.14	การกัดผิวชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้าง	50
3.15	การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายน้ำ	50
3.16	การขัดชิ้นงานด้วยโดยใช้ผ้าหยาบ (CLOTH PAD) ร่วมกับผงขัดอะลูมินา	51
3.17	กัดปาดหน้าชิ้นงานให้เรียบก่อนนำไปวัดความแข็ง	52

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18	ขึ้นงานสำหรับทดสอบความแข็ง ก) ขึ้นงานหลังผ่านการกัดปาดผิวหน้า และ ข) ตำแหน่งในการวัดความแข็งบนขึ้นงาน 52
3.19	การติดตั้งขึ้นงานทดสอบความแข็ง 53
3.20	การเตรียมขึ้นงานสำหรับทดสอบความทนแรงดึง 53
3.21	ขึ้นงานทดสอบความทนแรงดึงลักษณะกระดูก (DOG BONE) 54
3.22	ขึ้นงานทดสอบแรงดึง 54
3.23	การติดตั้งขึ้นงานทดสอบความทนแรงดึง 55
3.24	การเฉลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความแข็งในขึ้นงาน 57
3.25	ขึ้นงานที่ใช้ทดสอบความทนแรงดึง (ให้ค่า X MPA ต่อหนึ่งขึ้น) 58
3.26	แผนภาพแสดงขั้นตอนและเวลาของกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เวลาการอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C 61
3.27	แผนภาพแสดงขั้นตอนและเวลาของกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เวลาการอบละลาย 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C 61
3.28	แผนภาพแสดงขั้นตอนและเวลาของกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เวลาการอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C (การผลิต 2 ล็อตต่อหนึ่งวัน) 64
4.1	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการึงของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS (AS CAST) ก) เกรนก่อนกลม และ ข) เกรนดอกกุหลาบ 66
4.2	การวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้กล้อง SEM 68
4.3	กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง (ค่าความแข็ง) 73
4.4	กราฟความเป็นอิสระของข้อมูล (I CHART OF RESIDUALS OF HARDNESS) 73
4.5	กราฟแสดงการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล 74
4.6	การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน (ความแข็ง) 75
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอุณหภูมิและเวลาในการอบละลาย 77
4.8	อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายที่ส่งผลต่อความแข็ง 77
4.9	กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง (ความทนแรงดึง) 80
4.10	กราฟความเป็นอิสระของข้อมูล (I CHART OF RESIDUALS OF TENSILE STRENGTH) 80
4.11	กราฟแสดงการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล (ความทนแรงดึง) 81
4.12	การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน (ความทนแรงดึง) 82
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับอุณหภูมิและเวลาในการอบละลาย 84
4.14	อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายที่ส่งผลต่อความทนแรงดึง 84
4.15	ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง 87

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.16	ค่าความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง	87
4.17	ค่าความแข็งแรงครากและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง	88
4.18	แบบจำลองแสดงต้นทุนในกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง	93

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์จากอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้นทุกปีและเป็นโลหะที่นำมาใช้ประโยชน์เป็นอันดับสองรองจากเหล็ก เนื่องจากอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติเด่นหลายอย่าง เช่น มีน้ำหนักเบา แข็งแรง ทนทาน ยืดตัวได้ง่าย มีความเหนียวสูง ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อน นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ที่สำคัญคือง่ายต่อการขึ้นรูป จากสมบัติดังกล่าวทำให้เป็นทางเลือกในใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุหลักของการออกแบบผลิตภัณฑ์ต่างๆ ของนักออกแบบ วิศวกร และสถาปนิก อะลูมิเนียมสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมโครงสร้าง อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ในแต่ละอุตสาหกรรมจะมีวิธีการขึ้นรูปอะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน การขึ้นรูปอะลูมิเนียมสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี เช่น การหล่อขึ้นรูป (casting) การอัดรีดขึ้นรูป (extrusion) การรีดขึ้นรูป (rolling) การทุบขึ้นรูป (forging) [1] เป็นต้น

ในการแข่งขันเชิงธุรกิจของอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมนั้น การผลิตผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพสูงและมีต้นทุนในการผลิตต่ำถือเป็นเรื่องสำคัญที่จะสามารถนำไปแข่งขันกับบริษัทอื่นได้ กระบวนการขึ้นรูปอะลูมิเนียมส่วนใหญ่นิยมใช้ คือ กระบวนการหล่อฉีด (die casting) เพราะสามารถผลิตได้จำนวนมาก แต่มีข้อเสียหลายอย่าง เช่น มีโพรงอากาศในชิ้นงาน สมบัติเชิงกลต่ำและแม่พิมพ์ที่ใช้มีอายุการใช้งานที่สั้นจึงทำให้เกิดต้นทุนในการผลิตสูงมาก อะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้ไม่สามารถนำไปปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนได้โดยตรง เพราะมีรูพรุนในชิ้นงานมาก หากต้องการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน จำเป็นต้องนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปหรือการรีดขึ้นรูปเพื่อลดขนาดและกำจัดรูพรุนจากการศึกษาและทำการวิจัยที่ผ่านมาของ J. Wannasin ได้พัฒนากระบวนการขึ้นรูปที่สามารถแก้ไขข้อเสียของวิธีหล่อฉีดขึ้น โดยกระบวนการขึ้นรูปดังกล่าว คือ กระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคโนโลยีฟันทองแก๊ส (Gas Induced Semi-Solid; GISS) [2] ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็งที่คล้ายกับวิธี New Rheocasting แบบใหม่ โดยการใช้การฟันทองแก๊ส (อาร์กอนหรือไนโตรเจน) ผ่านแท่งกราฟไฟต์พูนที่มีรูพรุนขนาดเล็กมาก ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะในขณะที่แข็งตัวและทำให้เกิดนิวคลีเอชัน (nucleation) ของอนุภาคของแข็งที่มีโครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลม (spheroidal grain) และอีกอย่างหนึ่งคือ อะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อประเภทนี้จะมีความพรุนน้อยมาก จึงสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนได้โดยตรง โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปหรือรีดขึ้นรูป โลหะอะลูมิเนียมผสมโดยทั่วไปมีหลายกลุ่มซึ่งกลุ่มที่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน ได้แก่ อะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 2XXX, 6XXX และ 7XXX อะลูมิเนียมกลุ่มที่มีค่าสมบัติเชิงกลสูง คือ อะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX ซึ่งสามารถนำไปเป็นโครงสร้างของอากาศยาน ยานยนต์และโครงสร้างของอาคารได้ โดยเกรดที่นิยมใช้ คือ เกรด 7075 ซึ่ง

มีสมบัติเด่น ได้แก่ มีความแข็งแรงสูงเทียบเท่ากับเหล็กโครงสร้าง ด้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี สามารถปรับปรุงคุณภาพผิวได้หลายวิธีและความสามารถในการตัดกลึงดีมาก [3] เมื่อเปรียบเทียบกับ โลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 กับโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรดอื่นๆ ที่สามารถนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนได้ เช่น เกรด 2XXX และ 6XXX พบว่าโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 มีสมบัติทางกล เช่น ความแข็ง (hardness) และความทนแรงดึง (tensile strength) มากกว่า [4]

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนมีปัจจัยที่สำคัญ คือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบละลายและการบ่มแข็งเทียม ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง (hardness) และความทนแรงดึง (tensile strength) หากนำอะลูมิเนียมเกรด 7075 มาผ่านกระบวนการทางความร้อนก็สามารถนำมาใช้แทนวัสดุอื่นที่ต้องการความแข็งแรงสูงๆ ในการใช้งาน เช่น เหล็กโครงสร้าง โดยที่อะลูมิเนียมเกรด 7075 อาจจะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับงานบางอย่างได้และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้หรือปรับปรุงการผลิตในอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม เพื่อที่จะทำให้ผลิตอะลูมิเนียมที่มีคุณภาพ มีสมบัติเชิงกลที่สูง และสามารถแข่งขันในเชิงธุรกิจได้

1.2 การสำรวจเอกสาร

การสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียมจะมีปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล คือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน (heat treatment) โดยช่วงของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้จะขึ้นอยู่กับเกรดของอะลูมิเนียม ในส่วนของการขึ้นรูป อะลูมิเนียมมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพราะกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปจะต้องทำให้ชิ้นงานที่ได้มีรูพรุนขนาดเล็กหรือมีรูพรุนน้อยที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดการเสียรูปของอะลูมิเนียมขณะปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน และอาจเกิดการขยายตัวของโพรงอากาศ (Blister) ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal) กระบวนการขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งที่ใช้คือ กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส (GISS) [2] ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะใช้ในวงการอุตสาหกรรมของไทย

ในปัจจุบันการเลือกใช้อะลูมิเนียมจะมองถึงสมบัติเชิงกล ลักษณะของงานที่จะนำไปใช้และราคา โดยแต่ละงานจะใช้อะลูมิเนียมเกรดที่แตกต่างกัน หากอะลูมิเนียมที่ได้ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการทางความร้อนสมบัติเชิงกลและราคาจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลูกค้าที่จะเลือกซื้อให้ถูกกับลักษณะที่จะนำไปใช้งาน ดังนั้นในการทำงานวิจัยครั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะของงานที่กำลังจะนำเสนอในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ส่วนหลักๆ คือ กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส การปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนของอะลูมิเนียมและการคำนวณต้นทุนในกระบวนการผลิต โดยมีรายละเอียดของงานวิจัยในแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีพ่นฟองแก๊สในน้ำโลหะ (Gas Induced Semi-Solid; GISS)

ในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์จากอะลูมิเนียม ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง น้ำหนักเบา มีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูงและราคาถูก เพื่อตอบสนองต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งปัจจุบันมีการศึกษาและทำการวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อหาวิธีที่สามารถผลิตอะลูมิเนียมให้มีสมบัติดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

จากงานวิจัยของ J. Wannasin และคณะ ในปี ค.ศ. 2006 ได้พัฒนาระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบกึ่งของแข็งขึ้น (Semi-Solid Metal Forming ;SSM) กระบวนการดังกล่าว คือ กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส (Gas Induced Semi-Solid ;GISS) เป็นกระบวนการที่ใช้เทคนิคการปล่อยแก๊ส (ไนโตรเจนหรืออาร์กอน) ผ่านแท่งกราฟไฟต์พูนที่มีรูพรุนขนาดเล็กมาก เพื่อให้เกิดโลหะกึ่งของแข็งและในขณะที่น้ำโลหะเกิดการแข็งตัวซึ่งจะทำให้เกิดนิวเคลียส (nucleation) ของอนุภาคของแข็งขึ้น หลังจากการแข็งตัวของโลหะกึ่งของแข็งจะทำให้ได้โครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม [2, 5, 6] กระบวนการ GISS กำลังถูกพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานผลิตชิ้นส่วนอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยการพัฒนาเครื่องจักรที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรม die casting [5] ซึ่งจะนำเทคนิค GISS ไปใช้ ซึ่งได้ทำการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ไปกับเครื่องไดคาสต์ (die casting) มีการปรับเปลี่ยนเครื่องจักรบางส่วนให้เป็นขั้นตอนการผลิตแบบอัตโนมัติ ในปัจจุบันได้นำกระบวนการดังกล่าวไปใช้ขึ้นรูปขาเทียมอะลูมิเนียมแกนในชนิดได้เข้า เครื่องมือผ่าตัด และอื่นๆ หลังจากผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ GISS แล้ว สามารถนำชิ้นงานไปปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อนได้เพราะการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้มีรูพรุนน้อยมาก ผิวของชิ้นงานเรียกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปด้วยการหล่อไดคาสต์แบบเก่า กระบวนการนี้ยังถูกพัฒนาและผลักดันเพื่อที่จะใช้ในวงการอุตสาหกรรมทั้งในและนอกประเทศอย่างต่อเนื่อง

1.2.2 การปรับปรุงคุณสมบัติของอะลูมิเนียมโดยกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment)

กระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) คือ การทำให้เนื้ออะลูมิเนียมและโครงสร้างทางจุลภาคเปลี่ยนแปลงไปโดยใช้ความร้อน ทำให้อะลูมิเนียมที่ได้มีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยใช้ปัจจัย 2 ปัจจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น คือ อุณหภูมิและเวลา อะลูมิเนียมที่สามารถนำมาปรับปรุงด้วยกระบวนการทางความร้อนได้แก่ อะลูมิเนียมกลุ่ม 2XXX, 5XXX บางตัว (ส่วนมากไม่นิยมทำ), 6XXX และ 7XXX ลักษณะของกระบวนการทางความร้อนแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ การอบละลายและการบ่มแข็งเทียม ในการบ่มแข็งเทียมสามารถแยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การบ่มแข็งแบบขั้นตอนเดียว (single aged) [7] และการบ่มแข็งแบบสองขั้นตอน (double aged) ซึ่งการบ่มแข็งทั้งสองประเภทนี้จะให้ผลแตกต่างกัน

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีใหม่ๆ ยังมีให้เห็นในงานวิจัยต่างๆ เช่น การขึ้นรูปอะลูมิเนียมด้วยวิธีการหล่อไดคาสต์แรงดันสูงแบบโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal High Pressure Die Casting) ซึ่ง H. Möller ได้พิสูจน์ว่าการอบละลายโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่จะต้องอบที่อุณหภูมิ 540°C โดยจะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดหลังจากการบ่มแข็งเทียม 1 ชั่วโมง [6] การอบละลายในช่วงเวลาที่สั้นจะทำให้เกิดการละลายที่สมบูรณ์ของโลหะผสม ในขณะที่ยังคงรักษาโครงสร้างเดิมไว้ ซึ่งเป็นการแข็งตัวอย่างมีนัยสำคัญที่อุณหภูมิห้องของอะลูมิเนียมเกรด A356 หลังจากการอบละลายที่ 540°C แล้วตามด้วยการทำให้เย็นตัวด้วยน้ำ ความแข็งแรงสูงสุดที่ได้รับจะต้องผ่านการบ่มแข็งเทียมที่ 160-190°C ซึ่งตรงกับที่ Rosso และ Actis Grande [8] ได้กล่าวไว้ว่า เวลาที่สั้นที่สุดสำหรับกระบวนการอบละลายของอะลูมิเนียม A356 ที่ขึ้นรูปโดย Rheocast ที่อุณหภูมิ 540°C เวลา 1 ชั่วโมง จะให้ความแข็งแรงสูงสุด

ในบางงานวิจัยมีการหาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและการเปรียบเทียบกระบวนการทางความร้อนที่ใช้ เช่น L. XiWu ได้ศึกษาอิทธิพลของการบ่มแข็งเทียมครั้งเดียวที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม-คอปเปอร์-เซอร์โคเนียม [9] โดยนำมาอบละลายที่อุณหภูมิ 475°C เป็นเวลา 50 นาทีและชุบเย็นในน้ำที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ 100 120 140 และ 160°C เป็นเวลาถึง 88 ชั่วโมง ผลปรากฏว่ากระบวนการบ่มมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลและการนำไฟฟ้า อุณหภูมิการบ่มแข็งเทียมที่สูงขึ้นจาก 100 ถึง 160°C ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงลดลงในขณะที่ค่าความแข็งแรงครากเพิ่มขึ้นและการนำไฟฟ้าของโลหะมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดถึง 16.5% ค่าความทนแรงดึงและค่าความแข็งแรงที่จุดครากเท่ากับ 591 และ 541 MPa ตามลำดับ เมื่อทำการบ่มที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงดึงลดลง 1% เท่านั้น ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างการบ่มแข็งเทียมแบบขั้นตอนเดียวกับการบ่มแข็งเทียมแบบสองขั้นตอน โดย M. Chemingui ได้ทำการศึกษาการบ่มแข็งเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม โดยใช้การบ่มแข็งเทียมสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 70°C และ 135°C ที่เวลาต่างๆ กัน [10] ซึ่งจะนำโลหะผสม 7020 มาทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 475°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชุบเย็นใน 3 ตัวกลาง ได้แก่ น้ำใส น้ำแข็ง (0°C) น้ำเย็น (10°C) และอากาศ จากนั้นทำการบ่มแข็งเทียมตามธรรมชาติเป็นเวลา 84 ชั่วโมง ผลปรากฏว่าการชุบเย็นในน้ำเย็นจะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดหลังจากบ่มแข็งเทียมหนึ่งครั้งที่อุณหภูมิ 135°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขึ้นงานมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 18.82% ค่าความแข็งแรงครากเท่ากับ 362.32 MPa และพริซิพิตีเทตมีขนาดเล็ก ส่วนการบ่มแข็งเทียมสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงและที่อุณหภูมิ 135°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีปริมาตรสัดส่วนของพริซิพิตีเทตสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงครากเพิ่มขึ้นเท่ากับ 392.78 MPa และขึ้นงานมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 18.60% ซึ่งยังคงความเหนียวไว้ พริซิพิตีเทตมีความหนาแน่นสูง ทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันต่ำและความเค้นสูง ความแข็งแรงครากสูง [11] ที่ได้จากการบ่มแข็งเทียมสองขั้นตอนมีค่ามากกว่าการบ่มครั้งเดียว และในปี ค.ศ. 2009 S. Emani ได้ทำการเปรียบเทียบการบ่มแข็งเทียมสองขั้นตอน (double aging) กับ thermomechanical ของโลหะผสมอะลูมิเนียมอัดขึ้นรูป 7075 ขนาด 5.08x0.635 cm² ที่ได้มาจากการอัดขึ้นรูป โดยการนำชิ้นงานทุกชิ้นมาทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 490°C เป็นเวลา 30 นาที และชุบเย็นในน้ำ สำหรับการบ่มแข็งเทียมสองขั้นตอนจะทำการบ่มครั้งแรก

ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 4-240 นาที และชุบเย็นในน้ำ จากนั้นทำการบ่มแข็งเทียมครั้งที่สองที่ 177°C ที่เวลาต่างๆ กัน สำหรับ thermomechanical จะทำการบ่มแข็งเทียมสองขั้นตอนและรีดให้เปลี่ยนรูป 5, 25 และ 50% ผลปรากฏว่าที่อุณหภูมิ 121°C การเพิ่มเวลาบ่มในช่วงแรกเป็น 55 นาที จะได้ค่าความแข็งสูงสุด 191 HV และเวลาการบ่มมากกว่า 55 นาที ที่อุณหภูมิ 121°C ค่าความแข็งจะลดลงเป็น 182 HV ส่วนอิทธิพลของ thermomechanical จะมีความแข็งครากและความทนแรงดึงมากกว่าการบ่มครั้งเดียว [10, 1] หรือการบ่มสองขั้นตอนเนื่องมาจากการรีดเย็น อย่างไรก็ตามการบ่มแข็งเทียมสองขั้นตอนจะมีความแข็งที่จุดครากและความทนแรงดึงต่ำ แต่ให้ค่าความเหนียวสูงสุด ต่อมา D. Wang ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการกัดกร่อนร่วมกับความเค้นของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่เกิดจากอิทธิพลของ pre-strain และการบ่มแข็งเทียมสองขั้นตอน โดยการนำโลหะ 7075 [12] มาให้ความร้อนที่ 470°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และชุบเย็นในน้ำที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมารีดร้อนที่อุณหภูมิ 430°C แล้วจึงนำมาทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 470 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยแช่ในอ่างเกลือในเตาเผาและชุบน้ำเย็นในน้ำ หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาทำ T6 (470°C/1 ชม. + 120°C/24 ชม.), T651 (470°C/1 ชม. + 5% pre-strain + 120°C/24 ชม.), T76 (470°C/ 1 ชม. + 120°C/6 ชม. + 165°C/16 ชม.) และ HTA (470°C + 5% pre-strain + 200°C/5-30 นาที + 120°C/24 ชม.) ผลปรากฏว่าความทนแรงดึงของตัวอย่างที่ทำ T651 เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ทำ T6 การทำ pre-strain ก่อนบ่มจะทำให้เกิดดิสโลเคชันในตัวอย่างและพริซิพิตภายในเกรน หลังจากการบ่มที่ 120°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ความทนแรงดึงของตัวอย่างที่ทำ HTA0.5 และ HTA1 ต่ำกว่าตัวอย่าง T651 แต่มากกว่า T6 ในขณะที่ตัวอย่าง HTA5 มีค่าความทนแรงดึงมากกว่า T76 และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 9.6%

1.2.3 การคำนวณต้นทุนของกระบวนการ (cost analysis)

ในการคำนวณต้นทุนของกระบวนการผลิตสามารถคำนวณได้หลายรูปแบบ เช่น การคำนวณต้นทุนกิจกรรม การคำนวณต้นทุนตามกระบวนการ เป็นต้น ซึ่งได้มีการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

S. Akamphon [13] ศึกษาต้นทุนของกระบวนการชุบสังกะสีโดยใช้วิธีที่ต่างกันในการชุบ คือ การชุบแบบเดิม ICG-eleetroplate และ ICG-electroless โดยจะวิเคราะห์ต้นทุนรวมทั้งหมดที่เกิดจากกระบวนการชุบ ซึ่งมีการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ในการชุบ เช่น พื้นที่ผิวในการชุบ, ราคาสังกะสีและความหนาของนิกเกิลของเหล็กที่ชุบ จากการวิจัยและทดลองพบว่าต้นทุนรวมของกระบวนการที่ทำให้ต้นทุนน้อยที่สุด คือ ICG-eleetroplate การวิเคราะห์ต้นทุนของกระบวนการดังกล่าวจะแยกเป็นขั้นตอนในการผลิต

Bloch and Ranganathan [14] ทำการศึกษาแบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการ ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพเพื่อประเมินค่าในรูปแบบที่แตกต่างกันของอุปกรณ์ในการประกอบชิ้นส่วนและพื้นที่ทดสอบ แนวคิดการออกแบบสำหรับการผลิตเป็นการพยายามเพิ่มการวิเคราะห์ต้นทุนทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เริ่มต้นจนได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์และทดสอบมาตรฐานโดยการประเมินทางเลือก

ซึ่งจะวิเคราะห์ต้นทุนโดยเข้าถึงบัญชีของแต่ละขั้นตอนในกระบวนการตามลำดับ และสังเกตสิ่งต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อต้นทุนทั้งหมดในขั้นตอนที่แตกต่างกัน โดยนำผลที่ได้รับจากกระบวนการในแบบจำลอง มาประเมินค่าส่วนประกอบที่แตกต่างกันของต้นทุนตามเกณฑ์ จากการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่า ผลผลิตจากกระบวนการที่ 1 และกระบวนการที่ 2 มีความแตกต่างกัน โดยผลผลิตจากกระบวนการที่ 1 ซึ่งไม่มีการซ่อมแซมผลผลิตมีต้นทุนและอัตราการเกิดของเสียต่ำกว่าผลผลิตจากกระบวนการที่ 2 ซึ่งมีการซ่อมแซมผลผลิต

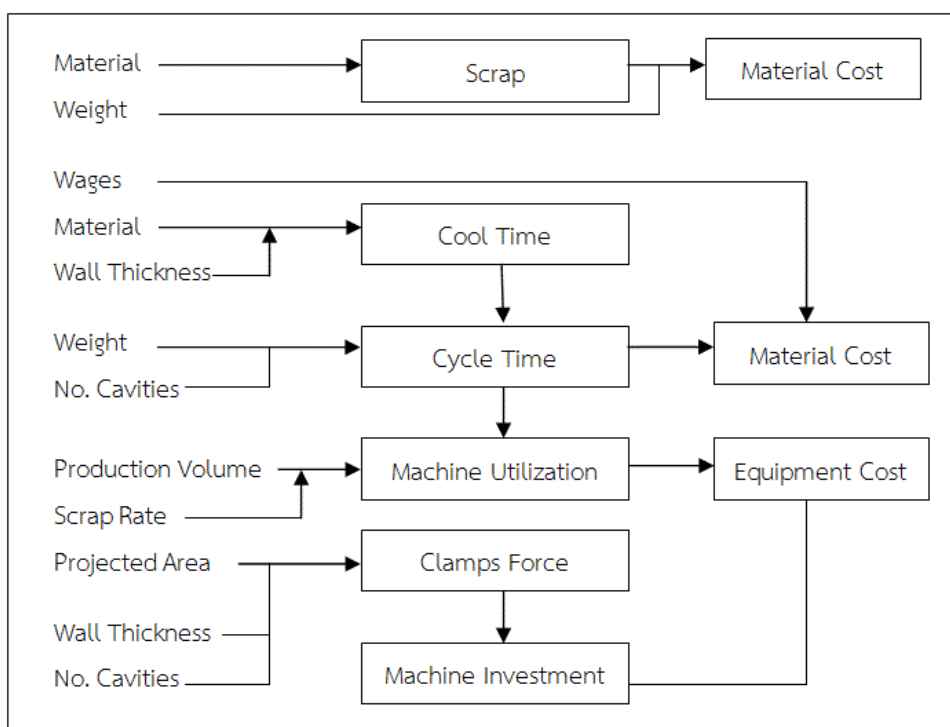
Johnson and Kirchain [15] ทำการพัฒนาและประเมินค่าทั่วไปของผลผลิตโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการ เพื่อตอบสนองความต้องการในลักษณะ ต้นทุนการแข่งขัน โดยวัดผลกับเป้าหมายของการประเมินในการลดต้นทุน การพัฒนากระบวนการผลิตและต้นทุนการผลิตผลผลิต ศึกษาทั้งที่เป็นผลผลิตเดี่ยวและการใช้ผลผลิต ซึ่งใช้แผงคานรยนต์เป็นผลผลิตในการทำการศึกษ เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นเพื่อแสดงให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายทั้งหมดจะประหยัดค่าใช้จ่ายต่อชิ้นลงเท่าใด และการลงทุนในการผลิตถ่วงน้ำหนักมีค่า R^2 สูงกว่าต้นทุนแบบถ่วงน้ำหนัก เมื่อความสัมพันธ์ต้นทุนคงที่ของการลงทุนการผลิตถ่วงน้ำหนักตัวชี้วัด ได้ค่า R^2 สูงสุด (0.62) ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.025 สามารถประหยัดต้นทุนคงที่ได้เมื่อทำการประเมินประสิทธิภาพผลผลิตตามปริมาณที่ต้องการ

Koslowske [16] ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมกับต้นทุนที่เกิดขึ้น โดยทำการศึกษารายการการผลิตเซรามิกหลายชั้นของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง (SOFCs) ในโรงงานต้นแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้นำเสนอถึงกระบวนการปรับปรุงรูปแบบค่าใช้จ่าย โดยออกแบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการเพื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิต Anode Supported และกระบวนการผลิต Electrolyte Supported จากการวิจัยพบว่า Anode Supported มีราคาต้นทุนต่อหน่วยเท่ากับ \$119.83 และ Electrolyte Supported มีราคาต้นทุนต่อหน่วยเท่ากับ \$8.97 เมื่อมีขนาดกำลังผลิต 700,000 ชิ้นต่อปี

Johnson and Kirchain [17] ทำการศึกษาพัฒนาต้นทุนจากการออกแบบแผงคานรยนต์ ในการออกแบบผลผลิตต้องมีการประเมินค่าระหว่างประสิทธิภาพ คุณลักษณะ และค่าใช้จ่าย ซึ่งวัสดุทางเลือกมีบทบาทสำคัญในการตัดสินใจเกี่ยวกับกระบวนการ วัสดุมีผลกระทบต่อผลผลิตหลายด้าน จึงได้ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุและกระบวนการ และมีการออกแบบขั้นตอนผ่านการประยุกต์ใช้แบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการก่อนทำการผลิตจริง ในแบบจำลองจะแสดงผลการเลือกวัสดุและต้นทุนในการประกอบผลผลิต ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุสำหรับการหล่อผลผลิต 2 ชนิดที่แตกต่างกันคือ เหล็กและแมกนีเซียม จากการวิจัยพบว่า การประกอบชิ้นส่วนจากการออกแบบวัสดุโดยใช้แมกนีเซียมให้ต้นทุนต่ำกว่าการประกอบชิ้นส่วนจากการออกแบบวัสดุโดยใช้เหล็ก

Chen and Lin [18] ได้ศึกษาและอธิบายถึงความต้องการในการนำแบบจำลองต้นทุนทางเทคนิคไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาธุรกิจของกระบวนการผลิตโลหะ แบบจำลองต้นทุนเป็นวิธีการที่ใช้ในการจำแนกต้นทุนออกเป็นส่วนย่อยๆ และใช้สำหรับประมาณการต้นทุนที่จะเกิดขึ้น สำหรับเทคโนโลยีใหม่ๆ การที่สามารถกระจายต้นทุนออกตามแหล่งที่ทำให้เกิดต้นทุน นับว่า

เป็นความสำเร็จของธุรกิจ แบบจำลองต้นทุนด้านอุตสาหกรรมที่ดีต้องสามารถพยากรณ์ต้นทุนวัตถุดิบ ต้นทุนแรงงาน และต้นทุนค่าใช้จ่ายในโรงงานอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกนิยามกระบวนการผลิตเป็นขั้นตอนที่สำคัญต้องนิยามให้ชัดเจน ขั้นตอนที่สองสร้างแบบจำลองตามกรอบที่ตั้งไว้ สำหรับกระบวนการผลิตแบบกึ่งของแข็งแสดงดังรูปที่ 1.1 ขั้นตอนที่สามเก็บรวบรวมข้อมูลความสัมพันธ์ของข้อมูลเป็นขั้นตอนที่ยากที่สุดของการทำแบบจำลอง ต้นทุน และขั้นตอนสุดท้ายคือตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด



รูปที่ 1.1 แบบจำลองต้นทุนของการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีกึ่งของแข็ง
(ที่มา : Y.M. Chen and J. J. Lin) [18]

โดยในงานวิจัยครั้งนี้จะคำนวณต้นทุนในระดับโรงงานขนาดเล็ก ซึ่งจะอ้างอิงการคำนวณต้นทุนตามกระบวนการ (Process-Based cost model) เพื่อให้ทราบต้นทุนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนในแต่ละสถานะ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายและการบ่มแข็งเทียมเพื่อที่จะทำให้อะลูมิเนียมเกรด 7075 มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น โดยปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน T6 และวิเคราะห์ต้นทุนเบื้องต้นในระดับห้องปฏิบัติการของกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมมติฐานของงานวิจัยหลังจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 แล้วสมบัติเชิงกลที่ได้จะมีค่าที่สูงขึ้นและสูงเทียบเท่ากับเหล็กโครงสร้าง

1.3 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลให้กับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิค Gas induced semi-solid โดยจะปรับปรุงสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงและความทนแรงดึง
- 2) เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนที่เกิดขึ้นในกระบวนการการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale)

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 โดยใช้กระบวนการทางความร้อนแล้วทำการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง (double aged) เมื่อนำอะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิค Gas Induced Semi-Solid แล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลง จากนั้นนำไปอบละลายที่อุณหภูมิ 450 480 และ 510°C เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง (จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ช่วงของอุณหภูมิอบละลายที่ 450-510°C และเวลาในการอบละลาย 1-8 ชั่วโมง เป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคได้ดีที่สุด) แล้วจึงทำชิ้นงานให้เย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเงื่อนไขการอบละลายมีทั้งหมด 6 เงื่อนไข หลังจากผ่านการอบละลายแล้วนำชิ้นงานไปบ่มแข็งเทียมสองครั้ง โดยครั้งที่ 1 จะใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นชุบชิ้นงานให้เย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำไปบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง (จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ช่วงของอุณหภูมิบ่มแข็งเทียมที่ 120-170°C และเวลาในการบ่มแข็งเทียม 30 นาที ถึง 12 ชั่วโมง จะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด) และตามด้วยการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องอีกครั้ง
- 2) หลังจากผ่านกระบวนการปรับปรุงทางความร้อนแล้ว นำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติเชิงกล โดยจะทดสอบความแข็งแรงแบบบร็อกเวลล์ สเกล B ตามมาตรฐาน ASTM E18-03 และทดสอบค่าความทนแรงดึงของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E8-04 และศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไป
- 3) วิเคราะห์ต้นทุนเบื้องต้นในกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ในระดับโรงงานขนาดเล็ก

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากการวิจัยในครั้งนี้คาดว่าจะมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมอะลูมิเนียมและผู้ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- 1) ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิและเวลาที่ทำให้ค่าสมบัติเชิงกลมีค่าสูงเมื่อเทียบกับเหล็กโครงสร้าง เพื่อที่เป็นทางเลือกในการเลือกใช้วัสดุ

2) ทำให้ทราบถึงโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง ซึ่งโครงสร้างจุลภาคเป็นส่วนที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลในด้านของความแข็ง (hardness) และความทนแรงดึง (tensile strength)

3) สามารถนำผลที่ได้จากการวิจัยไปใช้ในอุตสาหกรรมและทางพาณิชย์ เช่น การเลือกใช้อะลูมิเนียมเพราะอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา มีความเงางาม มีสมบัติเชิงกลที่สูงเมื่อเทียบกับเหล็กโครงสร้าง เป็นต้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่องการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 โดยใช้กระบวนการทางความร้อน จะทำการศึกษาทฤษฎีในเรื่องสมบัติเชิงกล โครงสร้างทางวิทยา หลังผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง (double aged) และการวิเคราะห์ต้นทุนที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม

ในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่จะกล่าวถึง คือ ลักษณะทั่วไปและสัญลักษณ์ที่ใช้แทนโลหะผสมอะลูมิเนียม ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของกลุ่มโลหะผสมอะลูมิเนียมที่นำมาใช้ในงานวิจัย คือ กลุ่ม 7XXX และมีรายละเอียดของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ในด้านต่างๆ

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของโลหะผสมอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีปริมาณการใช้งานมากเป็นอันดับสองรองจากเหล็กและเป็นวัสดุที่เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติเด่นหลายประการดังนี้

- 1) มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบาและมีกำลังวัสดุต่อน้ำหนักสูง จึงนิยมนำมาทำเป็นเครื่องใช้ ตลอดจนถึงส่วนของยานยนต์ เครื่องบิน จรวด ซีปนาวุธ ผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น
- 2) มีความเหนียวมาก สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆ ได้ง่าย โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก
- 3) จุดหลอมเหลวต่ำ สามารถหลอมละลายได้ง่ายและมีอัตราการไหลตัวสูง
- 4) มีค่าการนำไฟฟ้าสูง (International Association of Classification Societies; IACS)
- 5) เป็นโลหะที่ไม่มีพิษต่อร่างกายและไม่มีค่าการนำความร้อนสูงในภาชนะหุงต้มอาหาร ทนทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดสนิมได้ดี
- 6) เป็นโลหะที่สามารถพัฒนาได้อย่างไม่หยุดยั้ง เช่น กระบวนการในการขึ้นรูป การปรับเป็นส่วนผสมของธาตุต่างๆ ในอะลูมิเนียม เป็นต้น

2.1.2 สมบัติเชิงฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม

สมบัติเชิงฟิสิกส์ คือ สมบัติของธาตุ สารหรือวัสดุที่สามารถสังเกตได้จากลักษณะภายนอกหรือจากการทดลองที่ไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี เช่น สถานะ เนื้อสาร สี กลิ่น รส ความหนาแน่น จุดเดือด จุดหลอมเหลว การนำไฟฟ้า การละลายน้ำ ความแข็ง ความเหนียว เป็นต้น รายละเอียดของสมบัติเชิงฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม

ลำดับ	สมบัติเชิงฟิสิกส์	ค่า	หน่วย
1	หมายเลขอะตอม	13	
2	น้ำหนักอะตอม	26.97	
3	วาเลนซ์	3	
4	โครงสร้างผลึก	F.C.C	
5	มิติของแลตทิส	4.049	°A
6	ความหนาแน่นที่ 20 °C	2.6989	g/mm^3
7	จุดหลอมเหลว	660.2	°C
8	จุดเดือด	2450	°C
9	การหดขณะแข็งตัว	6.6	%
10	ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	94.4	cal/g
11	ความร้อนแฝงของการเป็นไอ	2260	cal/g
12	ความร้อนจำเพาะที่ 100 °C	0.224	cal/g
13	การนำความร้อนที่ 20 °C	0.57	cal/g
14	การสะท้อนแสงจากหลอดทั้งสแตน	90	%
15	การสะท้อนแสง 2000 - 2500 °A	86-87	%
16	การสะท้อนแสง 10000 °A	96	%
17	สี	ขาวเงิน	

ที่มา : วิจิตร พงษ์บัณฑิต (2542)

2.1.3 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูป

การกำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูป ซึ่งกำหนดโดยสมาคมอะลูมิเนียมแห่งอเมริกา (The Aluminum Association of America) ในปี ค.ศ. 1954 โดยทำการแบ่งโลหะผสมอะลูมิเนียมขึ้นรูปออกเป็นกลุ่มๆ ซึ่งใช้ส่วนผสมของธาตุเคมีต่างๆ เป็นเกณฑ์ และใช้ระบบตัวเลข 4 หลักในการระบุเกรดของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ตัวเลขหลักที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุดในการแบ่งกลุ่มโลหะผสม ซึ่งจะบ่งบอกถึงส่วนผสมหลัก ดังตารางที่ 2.2 เช่น 1XXX แทนโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.0% ผสมอยู่ เป็นต้น

ตัวเลขหลักที่สอง เป็นสัญลักษณ์บ่งบอกว่ามีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของโลหะให้แตกต่างไปจากโลหะมาตรฐาน โดยที่ตัวเลข 0 คือ โลหะมาตรฐาน

ตัวเลขหลักที่สามและสี่ เป็นสัญลักษณ์ที่บ่งบอกถึงชนิดของธาตุรองอื่นๆ ที่ผสมอยู่ในอะลูมิเนียม เช่น อะลูมิเนียมเกรด 7075 มีความหมายตามสัญลักษณ์ดังนี้

ตัวเลขหลักที่หนึ่ง เลข 7 หมายถึง มีสังกะสีเป็นส่วนผสมหลัก

ตัวเลขหลักที่สอง เลข 0 หมายถึง อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมตามมาตรฐาน

ดั้งเดิม

ตัวเลขหลักที่สามและสี่ เลข 75 หมายถึง มีธาตุอื่นๆ เป็นส่วนผสมรอง คือ สังกะสี แมกนีเซียม ทองแดง โครเมียม เหล็ก ซิลิกอน แมงกานีส ไทเทเนียม เป็นต้น

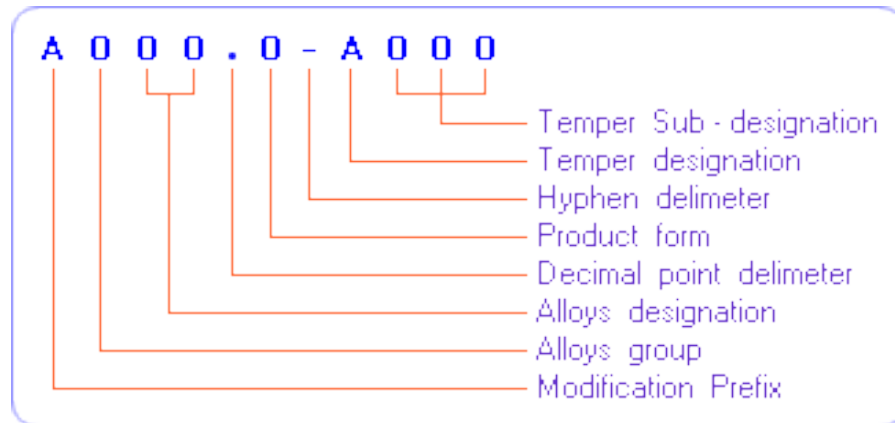
นอกจากนี้ยังมีข้อยกเว้นเฉพาะอะลูมิเนียมในกลุ่ม 1XXX ตัวเลขหลักที่สามและสี่จะแสดงปริมาณอะลูมิเนียมที่เป็นจุดตกนิยมนองตำแหน่งที่ปรากฏภายหลัง 99% เช่น เกรด 1060 เกรด 1080 หมายถึง อะลูมิเนียมขั้นรูปที่มีอะลูมิเนียมผสมอยู่ 99.60% และ 99.80% ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขั้นรูป

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1XXX	อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.0%
2XXX	ทองแดง (Copper, Cu)
3XXX	แมงกานีส (Manganese, Mn)
4XXX	ซิลิกอน (Silicon, Si)
5XXX	แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)
6XXX	แมกนีเซียมและซิลิกอน (Magnesium, Mg and Silicon, Si)
7XXX	สังกะสี (Zinc, Zn)
8XXX	ธาตุอื่นๆ (Other Element)
9XXX	ยังไม่มีให้นำไปใช้ (Unused Series)

ที่มา : วิจิตร พงษ์บัณฑิต (2542)

อย่างไรก็ตามยังมีการกำหนดและแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมหล่อผสม โดย American Aluminum Association Casting Alloy ได้กำหนดมาตรฐานและแยกประเภทของอะลูมิเนียมหล่อผสมโดยได้จดทะเบียนไว้กับสำนักงานมาตรฐานแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (American National Standard Institute) หรือ ANSI Standard แต่ยังคงแบ่งกลุ่มออกเป็น 9 กลุ่มเหมือนกับ ASM (American Society of Metals) โดยสัญลักษณ์ของการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมหล่อผสมตาม ANSI Standard แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ของการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมหล่อผสมตาม ANSI Standard [20]

A : อักษรตัวแรก หมายถึง สมาชิกของ Alloys ที่เหมือนกันอยู่ในกลุ่มเดียวกัน (หมายถึง Aluminum Alloy) แม้ว่าส่วนผสมจะแตกต่างกัน

O : Alloy group หมายถึง ตัวกำหนดธาตุหลักของ Alloy หรือ Major Alloying จะแสดงเป็นตัวเลขหนึ่งหลักโดยเริ่มจาก 1 ถึง 9

OO : Alloys designation หมายถึง ความแตกต่างของสมาชิกในกลุ่ม Alloys เดียวกัน ความหมายของตัวเลขที่กำหนดเหมือนกับ Major Alloy โดยกำหนดเป็นตัวเลข 2 หลัก นอกจากนี้ในบางครั้งตัวเลข 2 หลัก คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ ไม่น้อยกว่าของ Al ที่ผสมอยู่ เช่น 190.X เท่ากับว่ามี Al ผสมอยู่ 99.90%

.O : หมายถึง รูปแบบการผลิตหรือ Product form แสดงเป็นตัวเลขหนึ่งหลัก หลังจุดทศนิยมดังนี้

.0 : คือ Casting specification

.1 : คือ Ingot specification

.2 : คือ Ingot specification ที่ควบคุมส่วนผสมน้อยกว่า .1 Ingot specification

A : Temper designation หมายถึง เป็นตัวกำหนดแทนกรรมวิธี Temper ของกระบวนการทางความร้อนที่ใช้กับโลหะผสมที่สามารถผ่านกระบวนการทางความร้อนได้ (Heat treatable Alloy) มีสัญลักษณ์ดังนี้

F : As Cast Condition หมายถึง งานที่ผ่านการหล่อโดยไม่ต้องใช้กรรมวิธีใดๆ ควบคุมภายหลังกการหล่อขึ้นรูป

H : Strain Hardened หมายถึง สภาพของงานที่แข็งตัวเนื่องจากความเครียดจากการทำ Cold working เช่น งานรีดขึ้นรูปต่างๆ เป็นต้น

O : Anneal หมายถึง การอบอ่อน ใช้กับงานหล่อที่ต้องการนำไปอบอ่อนเพื่อสามารถปรับปรุงขนาดหรือรูปร่างให้คงที่ (stability) ขณะใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความเหนียว (ductility) ให้กับชิ้นงานได้หลังจากผ่านกระบวนการดังกล่าว

W : Solution Heat Treat หมายถึง การอบเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของธาตุให้เป็นสารละลายของแข็งเฟสเดียวใช้กับ Alloys ที่สามารถชุบแข็งด้วยตัวเองได้ ทำในบรรยากาศปกติ (อุณหภูมิห้อง) หลังการทำ Heat treatment

T : หมายถึง การอบด้วยความร้อนโดยกำหนดกรรมวิธี Temper ที่แน่นอนดีกว่า F หรือ O การกำหนดกรรมวิธี “F”, “O” และ “T” ทุกกระบวนการที่มาจาก การหล่อด้วยแบบทรายและแบบเหล็ก

OOO : Temper Sub-designation หมายถึง ตัวเลขที่ระบุกรรมวิธีการทำ Temper ที่มีการระบุอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ โดยสามารถแยกออกเป็นประเภทได้ 10 ประเภท ซึ่งจะเริ่มจาก T1 ถึง T10 แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์การทำ Temper

สัญลักษณ์	รายละเอียด
T1	การปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในบรรยากาศปกติ (อุณหภูมิห้อง) และทำการบ่มแข็งโดยธรรมชาติซึ่งสภาพงานไม่เปลี่ยนแปลง
T2	การปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในบรรยากาศปกติ (อุณหภูมิห้อง) ความแข็งจะเกิดขึ้นจากการใช้งานที่อุณหภูมิปกติโดยธรรมชาติ
T3	การอบละลายแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งโดยธรรมชาติซึ่งจะทิ้งชิ้นงานไว้ในบรรยากาศปกติ (อุณหภูมิห้อง) จะเกิดความแข็ง
T4	การอบละลายและการบ่มแข็งโดยธรรมชาติ เพื่อให้เกิดความแข็งคงตัว
T42	การอบละลายจาก “O” และ “F” Temper เพื่อปรับสภาพของชิ้นงานหล่อก่อนบ่มแข็งโดยธรรมชาติ เพื่อให้ความแข็งคงตัว
T5	การปล่อยให้ชิ้นงานให้ค่อยๆ เย็นตัวลงในสภาพเดิม แล้วนำไปบ่มแข็งเทียม (Artificially Aged) โดยนำงานที่ทำการชุบแข็งแล้วกลับมาอบอีกครั้งในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 200°C เพื่อทำให้เกิดเฟสใหม่ที่ให้ความแข็งได้สูงสุด
T52	การจัดความเค้นตกค้างโดยทำการกดอัดชิ้นงาน ภายหลังจากการอบละลายหรือหลังจากการปล่อยให้เย็นตัวจากสภาพเดิม
T54	การจัดความเค้นตกค้างโดยใช้แรงดึงและแรงอัดชิ้นงาน ภายหลังจากการรีดขึ้นรูป
T6	การอบละลาย การชุบแข็ง และทำการบ่มแข็งเทียม ตามลำดับ
T61	การอบละลายแล้วทำการชุบแข็งก่อนทำการบ่มแข็งเทียมเพื่อให้ได้ความแข็งและความแข็งแรงสูงสุด
T62	การทำการอบละลายจาก “O” และ “F” Temper จากนั้นนำไปชุบแข็งก่อนแล้วทำการบ่มแข็งเทียม

ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์การทำ Temper (ต่อ)

สัญลักษณ์	รายละเอียด
T7	การอบละลายและอบคงสภาพ (stabilized) มีการทำ overage เพื่อปรับปรุงขนาดให้คงที่มีความเสถียรแต่ไม่สูญเสียสมบัติเชิงกล
T71	การอบละลายและอบคงสภาพ (การยี้ระยะเวลาและอุณหภูมิ) ทำ overage เพื่อลดความเครียดและปรับปรุงให้มีขนาดคงที่ มีความเสถียร แต่สมบัติเชิงกลจะลดลง
T8	การอบละลาย การขึ้นรูปเย็น และการบ่มแข็งเทียมตามลำดับ
T9	การอบละลาย การบ่มแข็งเทียมและการขึ้นรูปเย็น ตามลำดับ
T10	การทำให้ชิ้นงานเย็นตัวตามปกติ การขึ้นรูปเย็นและการบ่มแข็งเทียมตามลำดับ

ที่มา : วิจิตร พงษ์บัณฑิต (2542)

รายละเอียดและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการทำ Temper ในสถานะต่างๆ ของอะลูมิเนียม ของประเทศอังกฤษ ยุโรป และอเมริกา แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 รายละเอียดและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการทำ Temper ในสถานะต่างๆ ของอะลูมิเนียม

สถานะของอะลูมิเนียม	อังกฤษ	ยุโรป	อเมริกา
As cast	M	F	F
Stress relieved, annealed	TS	O	O
Controlled cooling after casting, naturally aged	-	T1	-
Solution heat treated & naturally aged	TB	T4	T4
Solution heat treated & stabilized	TB7	-	-
Artificially aged (precipitation treated)	TE	T5	T5
Solution treated & Artificially aged	TF	T6	T6
Solution treated & Artificially underaged	-	T64	-
Solution treated & stabilized	-	T7	T7
Solution treated, Artificially aged & stabilized	TF7	-	-

ที่มา : วิจิตร พงษ์บัณฑิต (2542)

จากตารางที่ 2.4 รายละเอียดและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการทำ Temper ในสถานะต่างๆ ของอะลูมิเนียม โดยแต่ละสถานะมีความหมายดังนี้

As Cast หมายถึง อะลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อ

Annealed หมายถึง ได้รับการอบอ่อนเป็นการอบเพื่อกำจัดความเค้นตกค้าง เช่นเดียวกับการอบคลายความเค้นตกค้าง

Controlled cooling after casting หมายถึง งานหล่อภายหลังการหล่อจะมีการควบคุมอัตราการเย็นตัวให้ช้าลง มีแนวคิดคล้ายลักษณะของการนำงานหล่อกลับไปอบซ้ำ แต่เป็นการทำให้ต่อเนื่องในขั้นตอนเดียว

Naturally Aged หมายถึง การบ่มโดยธรรมชาติด้วยการปล่อยให้อะลูมิเนียมผสมมีการปรับสภาพด้วยตัวเองโดยใช้เวลาตามที่กำหนด

Artificially Aged หรือ precipitation treated หมายถึง งานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียม คือ การอบให้เกิดผลเช่นเดียวกับการบ่มแข็ง ซึ่งทำให้เกิดการตกตะกอนลักษณะเดียวกันกับที่เกิดจากการบ่มแข็ง

Solution treated หมายถึง การอบละลาย

Stabilized หมายถึง โลหะอะลูมิเนียมผสมผ่านการอบคงสภาพ

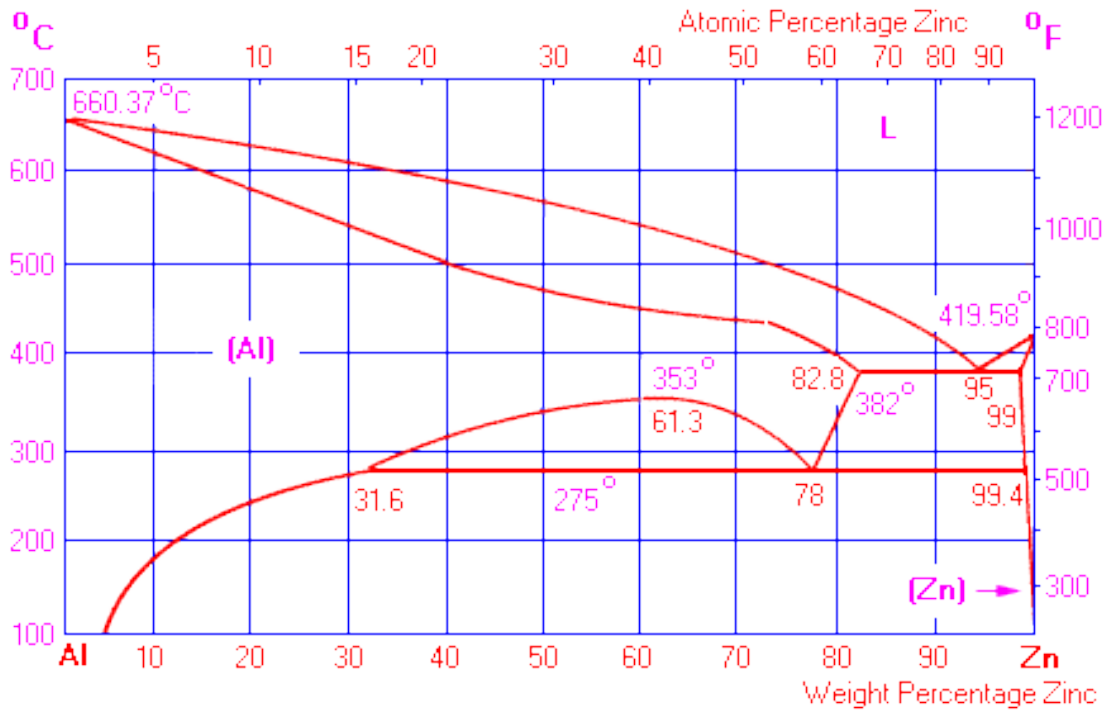
สัญลักษณ์การทำ Temper TB/T4 หมายถึง การบ่มแข็งนานอย่างน้อย 6 วัน เพื่อช่วยให้โครงสร้างภายในที่ได้คงสภาพในระดับโครงสร้างจุลภาค

สัญลักษณ์การทำ Temper TE/T5 หมายถึง การอบที่เกี่ยวข้องกับการชุบหรือเป็นการทำให้งานหล่อเย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำทันทีภายหลังจากการนำงานที่แข็งตัวออกจากแม่พิมพ์

สัญลักษณ์การทำ Temper TF/T6 หมายถึง การอบเพื่อให้ได้ความแข็งแรงในระดับสูงสุดพร้อมทั้งความสามารถในการยืดตัว (Ductility) อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

2.1.4 โลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7XXX

แผนภาพสมดุลอะลูมิเนียม-สังกะสี ในรูปที่ 2.2 จะพบว่า สังกะสี (Zn) มีอุณหภูมิการหลอมละลายต่ำกว่าอะลูมิเนียม (Al) คือ อุณหภูมิที่ 419.5°C โครงสร้างผลึกของสังกะสีเป็นแบบ Hexagonal ซึ่งแตกต่างจากอะลูมิเนียม การผสมสังกะสี 4-8% และแมกนีเซียม 1-3% ในอะลูมิเนียมใช้ในการผลิตอะลูมิเนียมผสมที่แปรรูปเย็น สามารถใช้กระบวนการทางความร้อนในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ อะลูมิเนียมในกลุ่ม 7XXX บางเกรดสามารถพัฒนาสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงและความแข็งแรงสูงสุด อะลูมิเนียมผสมสังกะสีและแมกนีเซียม ทั้งสองธาตุมีความสามารถในการละลายในสถานะสารละลายของแข็งสูง นอกจากนี้ การเพิ่มทองแดง 1-2% ลงในกลุ่ม 7XXX ทำให้มีคุณสมบัติ ด้านความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสมสังกะสีและแมกนีเซียมสูงขึ้น จะนิยมนำไปใช้งานทางด้านอากาศยาน ที่มีความต้องการ ความแข็งแรงสูง



รูปที่ 2.2 แผนภาพสมดุลอะลูมิเนียม-สังกะสี [21]

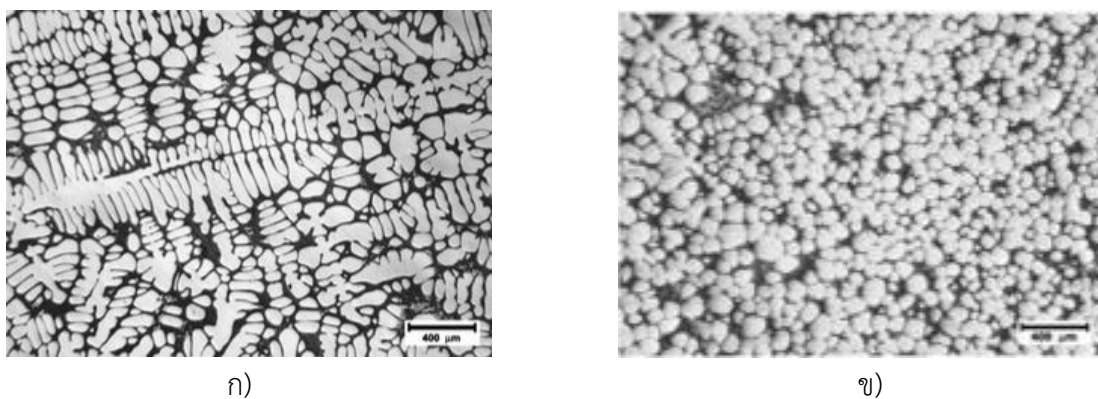
2.1.5 โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075

โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 มีธาตุผสมต่างๆ ได้แก่ สังกะสี (Zn) แมกนีเซียม (Mg) ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) เหล็ก (Fe) ซิลิกอน (Si) แมงกานีส (Mn) ไทเทเนียม (Ti) และอะลูมิเนียม (Al) โดยที่มีส่วนผสมของสังกะสีประมาณ 1 ถึง 8% ซึ่งเป็นธาตุหลัก และเมื่อทำการรวมกับแมกนีเซียมในปริมาณเล็กน้อย ทำให้อะลูมิเนียมมีความทนแรงดึงตั้งแต่ระดับปานกลางจนถึงสูงมาก ส่วนธาตุอื่นๆ เช่น ทองแดง และโครเมียม ที่ถูกเติมเข้าไปในปริมาณเล็กน้อย อะลูมิเนียม 7075 สามารถตัดได้ง่าย สามารถชุบอะโนไดซ์แข็งได้ นิยมใช้ทำแม่พิมพ์เป่าขวดพลาสติก แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก อุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โต๊ะเครื่องมือ แผ่นรองสแตมปีง โครงสร้างลำตัวของอุปกรณ์มือถือ และชิ้นส่วนที่มีความเค้นสูง โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 จะลดความต้านทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากการกัดกร่อนภายใต้แรงเค้น (stress-corrosion cracking) และถูกใช้ใน temper ที่มีอายุเกินมาเล็กน้อย เพื่อให้ได้การรวมกันของความทนแรงดึง ความต้านทานการกัดกร่อน และค่าความต้านทานการแตกหัก

2.2 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal)

กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบกึ่งของแข็ง [22] เป็นการผลิตขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการหล่อในขณะที่น้ำโลหะเหลวแข็งตัวบางส่วน โดยที่น้ำโลหะที่แข็งตัวแล้วนั้นจะมีโครงสร้างไม่เป็นเดนดริต (Non-dendritic grain) (ลักษณะของโครงสร้างเกรนแบบเดนดริต แสดงดังรูปที่ 2.3 ก))

หรืออาจจะเรียกว่าเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular grain) ดังรูปที่ 2.3 ข) ซึ่งเกรนก้อนกลมที่ลอยตัวอยู่ในน้ำโลหะเหลวนั้นจะทำให้อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง มีความหนืดมากกว่าน้ำโลหะเหลวหลายเท่าและโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมทำให้มีความหนืดน้อยกว่าโลหะในสถานะกิ่งแข็งกิ่งเหลวที่มีโครงสร้างแบบเดนไดรท์



รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาค ก) โครงสร้างจุลภาคเกรนแบบเดนไดรท์ และ ข) โครงสร้างจุลภาคเกรนแบบก้อนกลม

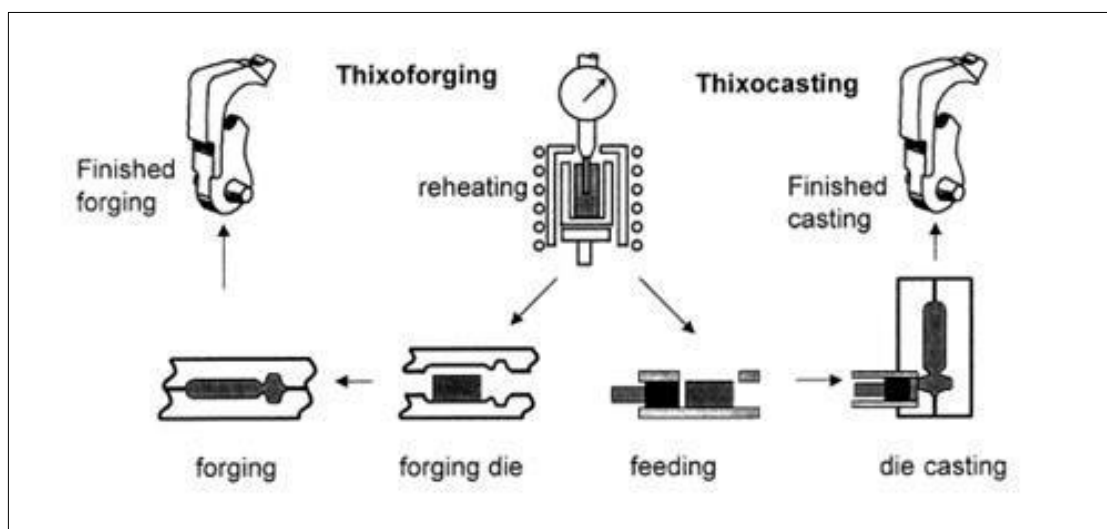
(ที่มา : J. Wannasin, R.A. Martinez, and M.C. Fleming) [2], [22]

ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบกิ่งของแข็งมีหลายวิธีโดยการสร้าง Solid Particles ในปริมาณที่เหมาะสม ในขณะที่น้ำโลหะกำลังแข็งตัวทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ (Forced Convection) เพื่อให้เกิดการแตกตัวของเกรนเดนไดรท์หรือมีการเกิด Nucleation มากขึ้น [23, 24] การทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้วัตถุแข็งรูปร่างเหมือนไม้พายกวนน้ำโลหะ การใช้พลังงานสนามแม่เหล็ก (Electro-magnetic) [25] โดยบางส่วนที่เริ่มแข็งตัวจะถูกกระตุ้นด้วยการกวน โครงสร้างเดนไดรท์ก็จะแตกตัว การกวนและการเทให้น้ำโลหะเกิดการเคลื่อนที่ ใช้การสั่นโดยแรงอัลตราโซนิก (Ultrasonic vibration) ในการควบคุมการแข็งตัวและเวลาที่เหมาะสมทำให้ได้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม อย่างไรก็ตามการเติมสารบางชนิดที่เพิ่มการเกิด Nucleation ในการอบโลหะที่อุณหภูมิในช่วงกิ่งแข็งเป็นเวลานานๆ นั้น จะทำให้เกิดโลหะกิ่งของแข็งได้ด้วยเหมือนกัน ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปกิ่งของแข็งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการขึ้นรูปกิ่งของแข็งแบบ Thixocasting และ Rheocasting โดยมีรายละเอียดของวิธีการขึ้นรูปดังนี้

2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปกิ่งของแข็งแบบ Thixocasting

กระบวนการขึ้นรูปกิ่งของแข็งแบบ Thixocasting เป็นเทคนิคการขึ้นรูปขึ้นงานที่มีรูปร่างใกล้เคียงรูปร่างสุดท้าย (Near net shape) จากวัสดุตั้งต้นที่มีโครงสร้างแบบไม่เป็นเดนไดรท์ภายในแม่พิมพ์โลหะ ซึ่งการขึ้นรูปขึ้นงานภายในแม่พิมพ์แบบปิดเรียกว่า Thixocasting ในขณะที่การขึ้นรูปในแม่พิมพ์แบบเปิดเรียกว่า Thixoforging ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปแบบ

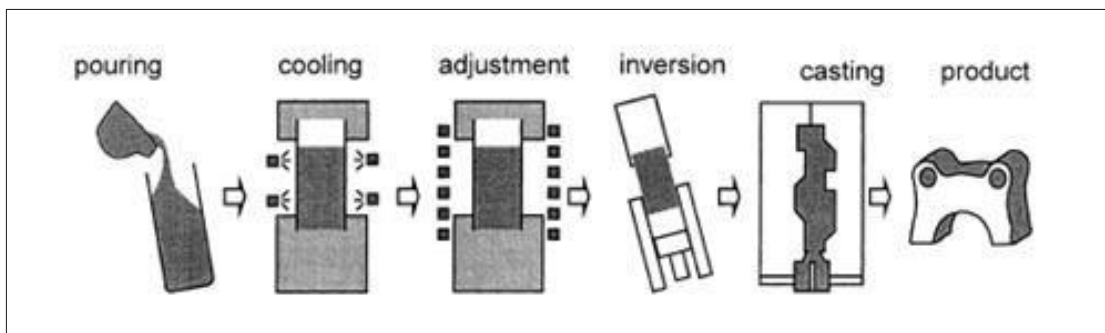
Thixocasting สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการอบให้ความร้อนกับวัสดุตั้งต้นและทำให้เกิดการหลอมเหลวบางส่วน ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการควบคุมสัดส่วนของแข็งรูปร่างกลมที่มีความละเอียดที่กระจายตัวอยู่ในโลหะหลอมเหลว และขั้นตอนการขึ้นรูปในแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ชิ้นงานสำเร็จ



รูปที่ 2.4 กระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งแบบ Thixocasting [26]

2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting

กระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting คือกระบวนการที่ใช้ในการผลิตโลหะกึ่งแข็งโดยการให้แรงเฉือนระหว่างการแข็งตัว จากนั้นส่งผ่านน้ำโลหะกึ่งแข็งที่ได้สู่แม่พิมพ์เพื่อใช้ในการขึ้นรูปโดยตรง ซึ่งสามารถใช้เทคโนโลยีการผลิต เช่น การกวนด้วยแรงทางกลหรือการใช้แรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับการผลิตวัสดุตั้งต้น แต่การขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างภายในชิ้นงาน ซึ่งต้องแก้ไขด้วยการให้ความร้อนคงที่เป็นระยะเวลาสั้น รวมถึงปัญหาจากความซับซ้อนในการควบคุมกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามการผลิตด้วยเทคนิคเหล่านี้ยังมีความน่าสนใจเนื่องจากมีความคุ้มค่าในภาพรวมของกระบวนการผลิตและมีประสิทธิภาพในการจัดการพลังงาน ทำให้ปัจจุบันการพัฒนากระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นเป็นไปตามหลัก Slurry-on-demand ซึ่งถือเป็นกระบวนการ New Rheocasting process (NRC) ดังรูปที่ 2.5 โดยทำการหลอมโลหะและควบคุมการแข็งตัวให้เกิดน้ำโลหะกึ่งแข็งด้วยเทคนิคที่กล่าวมาข้างต้น และทำการให้ความร้อนอีกครั้งเพื่อควบคุมอุณหภูมิทั้งชิ้นงานให้สม่ำเสมอ จากนั้นจึงส่งเข้าสู่แม่พิมพ์เพื่อทำการขึ้นรูปต่อไป



รูปที่ 2.5 กระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting [26]

กระบวนการขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal) นักวิจัยทำการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนอากาศยาน หรือแม้กระทั่งอุปกรณ์ทางการแพทย์ต่างๆ แต่ก็ยังไม่มีความสำเร็จหลายทำให้ข้อได้เปรียบและประโยชน์ของ SSM ไม่สามารถนำมาใช้ได้อย่างเต็มที่ การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting เป็นการลดต้นทุนในกระบวนการผลิตแบบ SSM โดยการนำวิธีนี้ไปใช้ในกระบวนการหล่อแบบ Die casting จะทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ ซึ่งทำให้ได้คุณภาพและสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า ในการลดต้นทุนการผลิตสามารถลดได้จากปัจจัยต่างๆ เช่น การลดเวลาในการผลิตต่อชิ้น (Cycle time) การลดของเสีย (Defective) การเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และการลดต้นทุนในกระบวนการทางความร้อน เป็นต้น

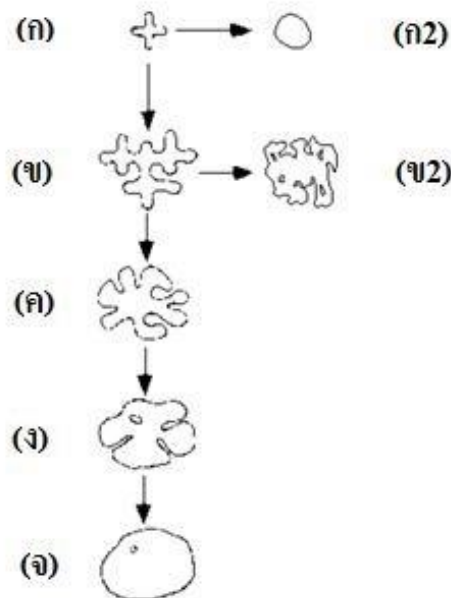
ปัจจุบันนี้มีกระบวนการที่สามารถสร้างโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมได้หลากหลายวิธีด้วยกัน เช่น กรรมวิธีการกวนทางกล (Mechanical Stirring) การกวนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Stirring) การสั่นด้วยอุลตราโซนิก (Ultrasonic vibrations) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะต้องอาศัยตัวกลางเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ไหลวน (Agitation) โดยในกระบวนการกวนทางกลจะใช้ใบพัดหรือแท่งทรงกระบอกเพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไหลวนของน้ำโลหะ การกวนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าจะอาศัยแรงทางไฟฟ้าเป็นตัวพาให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะเหลว ส่วนการสั่นก็ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไหลวนของน้ำโลหะเหลวได้เช่นกัน แต่กระบวนการเหล่านี้ก็ยังมีข้อเสียหลายอย่าง เช่น มีราคาสูงและการเกิดไมโครเซกกริเกรชัน เนื่องจากการกวนที่สัดส่วนของแข็งสูงๆ ซึ่งหลักการเกิดเกรนแบบก้อนกลมเกิดจากการแตกตัวของกิ่งเดนไดรท์จะต้องทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไหลวนในช่วงก่อนที่จะมีการแข็งตัวเท่านั้น โดยจะเป็นช่วงที่มีกิ่งเดนไดรท์ที่เล็กมากๆ และอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเนื่องจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง

ต่อมานักวิจัยได้พัฒนากระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting อย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดกระบวนการขึ้นรูปใหม่ๆ เกิดขึ้นมา [27] เช่น New Rheocasting (NRCTM) Semi-Solid Rheocast (SSRTM) Sub Liquidus Casting (SLCTM) กระบวนการ CSIR และ Advanced Rheo-diecast Technique (ART) Gas Induced Semi-Solid (GISS) เป็นต้น

2.2.2 กลไกของกระบวนการขึ้นรูปกิ่งของแข็งแบบ Rheocasting

การเกิดของอนุภาคของแข็ง (Solid Particles) [24] จากการศึกษาและทำวิจัยของนักวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ส่วนเล็กๆ ที่มีรูปร่างแบบ Equiaxed จำนวนมาก โดยอาจจะเกิดจากกระบวนการ Nucleation and Growth หรือ กระบวนการการแตกของเดนไดรต์ (Dendrite Fragmentation) หรืออาจจะเป็นผลมาจากทั้งสองกระบวนการที่เกิดขึ้นในขณะที่โลหะเกิดการแข็งตัว โดยอนุภาคของแข็งเหล่านี้จะโตด้วยการกระจายของอะตอม หรือ Coarsening ทำให้เกรนที่มีรูปร่างแบบ Equiaxed เปลี่ยนเป็นเกรนแบบก้อนกลม

อนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นเริ่มเกิดขึ้นเริ่มเกิดนั้นมีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก เกรนก้อนกลมจะเกิดได้โดยตรงจากเกรน Equiaxed ตามกลไกวิวัฒนาการอนุภาคของแข็ง ดังรูปที่ 2.6 โดยเริ่มจาก (ก) ไป (ก₂) ถ้าหากอนุภาคมีขนาดใหญ่เกินไปการเกิดเกรนก้อนกลมก็จะไปตามเส้นทางจาก (ก) ไป (ข) และหากสภาวะไม่เป็นตามที่กำหนดก็จะไม่เกิดเกรนแบบก้อนกลม ซึ่งจะแสดงในเส้นทางจาก (ข) ไป (ข₂)

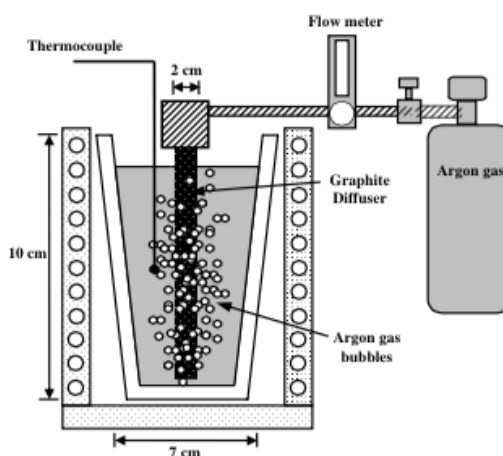


รูปที่ 2.6 เส้นทาง การเติบโตและการ Coarsening ของอนุภาคของแข็ง
(ที่มา : M.C. Flemings and W.L. Johnson.) [24]

2.2.3 กระบวนการขึ้นรูปกิ่งของแข็งโดยเทคนิคการพ่นฟองแก๊ส

กระบวนการขึ้นรูปกิ่งของแข็งโดยเทคนิคการพ่นฟองแก๊ส (Gas Induced Semi-Solid) [22] เป็นกระบวนการสร้างโลหะกิ่งของแข็งโดยใช้เทคนิคการพ่นฟองแก๊สผ่านแท่งกราฟไฟต์พอร์น ซึ่งเป็นเทคนิคแบบใหม่สำหรับการผลิตโลหะกิ่งของแข็งที่มีหลักการคล้ายกับกระบวนการหล่อ

แบบ Rheocasting ที่ทำให้ได้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม โดยสมบัติของโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการ ได้แก่ อุณหภูมิต่ำกว่าโลหะหลอมเหลว โลหะที่เริ่มแข็งตัวบางส่วนในขณะที่เทใส่แม่พิมพ์จะมีความหนืดสูงกว่าน้ำโลหะ มีความเค้นขณะเคลื่อนตัวต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว เป็นต้น จากสมบัติดังกล่าวทำให้มีข้อดีหลายอย่างที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในแม่พิมพ์และลดการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage) และยังสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ได้อีกด้วย กระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยเทคนิคการพ่นฟองแก๊ส แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แบบจำลองกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยเทคนิคการพ่นฟองแก๊ส
(ที่มา : เจษฎา วรรณสินธุ์) [22]

2.3 กระบวนการทางความร้อน

กระบวนการทางความร้อนเป็นกระบวนการที่ทำให้สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไป โดยอะลูมิเนียมที่สามารถใช้กระบวนการทางความร้อนปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ ได้แก่ อะลูมิเนียมกลุ่ม 2XXX, 4XXX, 6XXX และ 7XXX ส่วนอะลูมิเนียมกลุ่ม 1XXX, 3XXX, 4XXX (บางเกรด) และ 5XXX ไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้

2.3.1 การอบละลาย (Solution Treatment)

อุณหภูมิในการอบละลายจะมีความใกล้เคียงกับการเกิดสารประกอบยูเทคติก ดังนั้นในกระบวนการหลอมจึงต้องควบคุมอุณหภูมิอย่างเข้มงวด การอบละลายโดยทั่วไปเป็นการทำให้อะลูมิเนียมเกิดเป็นสารละลายภายในเตาอบที่มีแรงอัดอากาศและมีการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอย่างสม่ำเสมอ

งานหล่อที่ได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานด้วยระบบการวนอากาศภายในเตา ซึ่งหากเป็นเตาขนาดใหญ่อาจจะต้องมีการติดตั้งพัดลมเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาการมี

ความร้อนสูงเกินไปในบางบริเวณของชิ้นงาน ซึ่งความร้อนเฉพาะจุดดังกล่าวนี้สามารถทำให้เกิดการหลอมเหลวเฉพาะจุดในบริเวณเล็กๆ นอกจากนี้ในปัจจุบันการอบทำให้เกิดการละลายของโครงสร้างโดยส่วนใหญ่จะใช้เตาไฟฟ้าที่สร้างความร้อนจากขดลวดความต้านทาน ในขณะที่เตาอบแบบใช้แก๊สฟืนเปลวไฟให้ความร้อนเป็นวิธีที่ทำให้เกิดปัญหากับงานหล่อประเภทอะลูมิเนียม แต่ก็สามารถใช้งานได้เช่นกัน

2.3.2 การชุบเย็น (Quenching)

การชุบเย็นเป็นกระบวนการลดอุณหภูมิหรือทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ในสภาวะสารละลายของแข็งอิมิตวียังยวด โดยการจุ่มลงในตัวกลางต่างๆ เช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเกลือ หรือสารละลายพอลิเมอร์ เป็นต้น (ตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ น้ำ) เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนเฟสและเพิ่มความแข็งของโลหะ การชุบเย็นสามารถทำได้หลังจากการผ่านขั้นตอนการอบละลายแล้ว

2.3.3 การบ่มแข็ง (Aging)

กระบวนการนี้ทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสกึ่งโลหะที่มีความละเอียดมาก และช่วยเพิ่มความแข็งได้ การบ่มอาจทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้ ได้แก่ การบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural aging) เป็นการวางชิ้นงานไว้ ณ อุณหภูมิห้อง และการบ่มแข็งเทียม (Artificial aging) เป็นการนำเอาชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอน โดยอุณหภูมิของการบ่มนี้ขึ้นอยู่กับเกรดของโลหะผสมและเวลาของการบ่มที่ให้ความแข็งสูงสุดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการบ่ม

2.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา เป็นการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและขนาดของเกรนที่เกิดจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ซึ่งการตรวจสอบดังกล่าวจะทำการร่วมกับการตรวจสอบทางสายตาโดยจะดูทั้งโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค โดยการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาสามารถตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope ;OM)

การตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงนั้น ชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบจะต้องเตรียมโดยการกัดผิวชิ้นงานให้เรียบ จากนั้นนำชิ้นงานไปขัดกับกระดาษทรายน้ำเบอร์ต่างๆ ที่กำหนดไว้ ตามด้วยการกัดกับผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมินา แล้วจึงใช้สารละลายเจือจาง Keller's reagent กัดผิวชิ้นงาน หลังจากนั้นนำไปล้างทำความสะอาดและใช้ไดรฟ์เป่าให้ชิ้นงานแห้งก่อนนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้าง

2.4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ;SEM)

การตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะต้องเตรียมชิ้นงานก่อนการตรวจสอบโครงสร้างโดยนำชิ้นงานไปผ่านการกัดผิวให้เรียบแล้วจึงนำชิ้นงานไปตรวจสอบ

2.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (Transmission Electron Microscopy ;TEM)

การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน จะต้องเตรียมชิ้นงานให้อยู่ในรูปฟิล์มบางในระดับไมโครเมตร (ประมาณ 50-100 μm) เพื่อให้สัญญาณอิเล็กตรอนจาก primary beam สามารถทะลุผ่านและเดินทางเข้าสู่ดีเทคเตอร์ที่อยู่ด้านล่างได้ ดังนั้นในกรณีนี้จึงจำเป็นต้องเพิ่มขั้นตอนการตัดหรือเฉือนชิ้นงานออกมาเป็นฟิล์มบางๆ ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า microtoming หรือ sectioning โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า microtome ในการตัดชิ้นงาน

จุดประสงค์ของการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาเพื่อดูพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยดูลักษณะการกระจายตัวของ อนุภาคต่างๆ และลักษณะของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป โดยในงานวิจัยครั้งนี้จะตรวจสอบโครงสร้างด้วย กล้องจุลทรรศน์ 2 ชนิด คือ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (SEM)

2.5 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) เป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ของวัสดุ เมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำต่อวัสดุ ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความทนแรงดึง (Tensile strength) ความสามารถในการยืดตัว (Elongation) ความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุทางด้านความแข็งและความทนแรงดึง โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.5.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

วัสดุแต่ละชนิดมีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน เนื่องจากอิทธิพลของธาตุต่างๆ ที่ ผสมอยู่ในวัสดุตั้งแต่กระบวนการผลิต กระบวนการแปรรูป รวมไปถึงสมบัติโดยธรรมชาติของวัสดุ นั้นๆ อย่างไรก็ตามสมบัติทางกลด้านความแข็งของวัสดุจึงเป็นดัชนีชี้วัดตัวหนึ่งที่นิยมใช้ตรวจสอบ ในทางโลหะวิทยา ซึ่งโดยทั่วไปการวัดความแข็งของวัสดุในแต่ละประเภทนั้นจะมีข้อควรพิจารณา ต่างๆ ที่แตกต่างกัน เช่น วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด กระบวนการในการวัดหรือข้อจำกัดบางอย่าง

ของวัสดุอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีความสำคัญและควรมีความเข้าใจเพื่อที่จะสามารถเลือกใช้งานได้อย่างเหมาะสมและไม่เกิดความผิดพลาด

นิยามของความแข็ง คือ ความต้านทานต่อแรงกดหรือการขีดสีของวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปสามารถทดสอบได้โดยใช้การทดสอบแบบทำลาย ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในทางโลหะวิทยา การวัดความแข็งนั้นจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านต่อการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนพื้นผิวของวัสดุทดสอบ โดยในที่นี้จะกล่าวถึงการทดสอบความแข็งที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell hardness test)

เป็นการวัดความแข็งโดยอาศัยแรงกดคงที่กระทำผ่านลูกบอลทรงกลมลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ ซึ่งลูกบอลที่ใช้ในการทดสอบนั้น คือ เหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ โดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ค่าความแข็งสามารถคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว โดยพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นผิวโค้ง โดยจะใช้วิธีการ คือ ใช้บอลเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งมาอย่างดี หรือทังสเตนคาร์ไบด์ กดลงบนผิวชิ้นงานที่จะทดสอบ (ผิวชิ้นงานต้องมีความเรียบ) โดยใช้แรง 3,000 กิโลกรัม สำหรับวัสดุแข็ง และ 500 กิโลกรัม สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลาในการกด 30 วินาที เป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (Indentation) และคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.1

$$HB = \frac{2P}{\pi D \left[D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]} \quad (2.1)$$

เมื่อ HB คือ ค่าความแข็ง Brinell (kg/mm²)

P คือ แรงกดที่กระทำ (kg)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด (mm)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (mm)

โดยมีเงื่อนไขในการทดสอบชิ้นงาน ดังนี้

- 1) ผิวชิ้นงานทดสอบจะต้องมีหน้าตัดเรียบ ปราศจากออกไซด์หรือวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น สารหล่อลื่นทุกชนิด
- 2) ความหนาของชิ้นงานทดสอบจะต้องเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดรอยใต้ผิวชิ้นงานทดสอบ โดยทั่วไปมีการกำหนดความหนาดำสุด เท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (d)
- 3) อุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ระหว่าง 10°C ถึง 35°C
- 4) ระยะห่างระหว่างรอยกดในเหล็กกล้า ทองแดง และทองเหลือง ควรมีระยะห่างอย่างน้อยที่สุด 3 เท่าของความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมรอยกด แต่สำหรับโลหะเบา เช่น

ดีบุก ตะกั่ว อะลูมิเนียม ควรมีระยะห่างอย่างน้อยที่สุด 6 เท่าของความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมรอยกด

2.5.1.2 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test)

หลักการในการทดสอบมีความคล้ายคลึงกับการทดสอบแบบบริเนลล์ แต่มีข้อแตกต่างกัน คือ ใช้หัวกดที่มีขนาดเล็กกว่าและแรงที่ใช้กดน้อยกว่า ค่าของแรงที่ใช้กดและขนาดของหัวกดสามารถเปลี่ยนได้ขึ้นอยู่กับสเกลของความแข็งที่จะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่ใช้ทดสอบ การอ่านค่าความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง วิธีการทดสอบจะใช้แรงกระทำเพียงเล็กน้อยคือ 10 กิโลกรัม จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งอาจมีตั้งแต่ 60-100 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ โดยการใช้หัวกดประเภทต่างๆ ของการวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สเกลการทดสอบความแข็งและชนิดของหัวกดของการวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์

สเกล	ประเภทหัวกด	แรงกด (Kgf.)	การใช้งาน
A	หัวกดเพชร	60	ซีเมนต์คาร์ไบด์ เหล็กกล้าที่มีขนาดบางและเหล็กกล้าชุบแข็งผิวไม่ลึก
B	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ($\frac{1}{16}$ ")	100	โลหะผสมทองแดง (Copper alloys) เหล็กกล้าที่ไม่แข็งมาก (Soft steels) โลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminum alloys) และเหล็กอ่อนอบเหนียว
C	หัวกดเพชร	150	เหล็กกล้า เหล็กหล่อที่มีความแข็งสูง เหล็กอ่อนอบเหนียวชนิดเพอร์ริติก ไทเทเนียม เหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิวลึก และวัสดุอื่นๆ ที่มีความแข็งมากกว่า 100 HRB
D	หัวกดเพชร	100	เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง เหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิว และเหล็กหล่ออบเหนียวชนิดเพอร์ริติก
E	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ($\frac{1}{8}$ ")	100	เหล็กหล่อ โลหะผสมของอะลูมิเนียม โลหะผสมของแมกนีเซียม และโลหะสำหรับผลิตแบร์ริง
F	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ($\frac{1}{16}$ ")	60	โลหะผสมของทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน โลหะแผ่นบางที่ไม่แข็ง
G	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ($\frac{1}{16}$ ")	150	บรอนซ์ผสมฟอสฟอรัส โลหะผสมทองแดง-เบอริเลียม เหล็กหล่ออบเหนียว
H	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ($\frac{1}{8}$ ")	60	อะลูมิเนียม สังกะสี และตะกั่ว

ตารางที่ 2.5 สเกลการทดสอบความแข็งและชนิดของหัวกดของการวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ (ต่อ)

สเกล	ประเภทหัวกด	แรงกด (Kgf.)	การใช้งาน
K	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ($\frac{1}{8}$ ")	150	โลหะสำหรับผลิตแปรงและวัสดุอื่นๆ ที่บางและอ่อน โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ Anvil effect
L	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ($\frac{1}{4}$ ")	60	โลหะสำหรับผลิตแปรงและวัสดุอื่นๆ ที่บางและอ่อน โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ Anvil effect

หมายเหตุ Kgf (Kilogram force) หมายถึง หน่วยของแรงที่ใช้ในการกด

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการทดสอบด้วยวิธีการแบบร็อคเวลล์ พบว่าสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุต่างๆ ได้หลายระดับและมีขั้นตอนไม่ซับซ้อน โดยสามารถวัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลล์วัดไม่ได้ การใช้งานสะดวกและอ่านค่าได้รวดเร็วเพราะอ่านโดยตรงจากเครื่อง รวมไปถึงรอยกดที่บุ๋มลงไปบนชิ้นงานมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีข้อควรพิจารณาในการทดสอบดังนี้

1) ผิวของวัสดุที่นำมาทดสอบนั้นต้องมีหน้าตัดเรียบได้ระดับตั้งฉากกับหัวกด รวมไปถึงไม่มีสิ่งแปลกปลอม เช่น น้ำมันหรือเศษวัสดุที่ติดมาเพราะจะทำให้ค่าที่ทำให้เกิดความผิดพลาดได้

2) ความหนาของวัสดุที่ใช้ทดสอบต้องมีความหนาเป็น 8 เท่าของความลึกรอยกด

3) ตำแหน่งของรอยกดต่างๆ ควรมีระยะห่างระหว่างกันโดยวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋มไม่น้อยกว่า 4 เท่า

4) ขณะที่หัวกดกำลังกดลงในวัสดุทดสอบต้องไม่มีแรงสั่นสะเทือนจากแท่นวางวัสดุทดสอบหรือจากภายนอกซึ่งสิ่งเหล่านี้จะมีผลทำให้ค่าที่อ่านได้มีความผิดพลาด

การอ่านค่าความแข็งที่ได้จากเครื่องนั้น จะมีสัญลักษณ์ที่จะต้องอ่าน 2 ส่วน คือ ตัวเลขค่าความแข็งที่วัดได้และสัญลักษณ์ของสเกลที่ใช้วัดความแข็ง (แสดงถึงลักษณะหัวกดที่ใช้วัดค่าและแรงกดที่ใช้) ตัวอย่างการอ่านค่าความแข็งสามารถอ่านได้ดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 เช่น 65.0 HRC หมายความว่า ตัวเลขความแข็งที่อ่านได้เท่ากับ 65.0 ด้วยการวัดแบบ Rockwell สเกล C ที่ใช้หัวกดแบบเพชร และมีค่าของแรงกดเท่ากับ 150 Kgf

ตัวอย่างที่ 2 เช่น 70.0 HRB หมายความว่า ตัวเลขความแข็งที่อ่านได้เท่ากับ 70.0 ด้วยการวัดแบบ Rockwell สเกล B ที่ใช้หัวกดแบบลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง และมีค่าของแรงกดเท่ากับ 100 Kgf

2.5.1.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test)

การทดสอบแบบวิกเกอร์คล้ายกับการวัดความแข็งแบบบริเนลล์ในแง่ที่ว่าค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่แตกต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปพีระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5-120 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ เนื่องจากหัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมากๆ ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่อ่อนมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ (VHN ประมาณ 1,500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนเฉพาะแรงกดเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ โดยวัสดุที่ใช้ทดสอบจะต้องมีลักษณะดังนี้

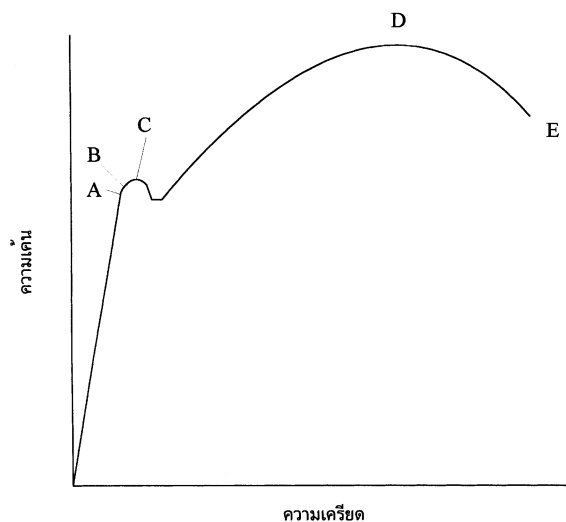
- 1) ผิวชิ้นงานทดสอบจะต้องมีหน้าตัดเรียบ ปราศจากออกไซด์หรือวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น สารหล่อลื่นทุกชนิด
- 2) ความหนาของชิ้นงานทดสอบจะต้องเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดรอยใต้ผิวชิ้นงานทดสอบ โดยทั่วไปมีการกำหนดความหนต่ำสุด เท่ากับ 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด
- 3) อุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ระหว่าง 10°C ถึง 35°C
- 4) ระยะห่างระหว่างรอยกดในเหล็กกล้า ทองแดง และทองเหลือง ควรมีระยะห่างอย่างน้อยที่สุด 3 เท่าของความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมรอยกด แต่สำหรับโลหะเบา เช่น ดีบุก ตะกั่ว อะลูมิเนียม ควรมีระยะห่างอย่างน้อยที่สุด 6 เท่าของความยาวเฉลี่ย

จากการวัดความแข็งทั้ง 3 วิธีที่กล่าวมานั้น มีข้อสังเกตว่าการทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์เป็นวิธีการที่มีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบวัสดุทุกประเภท ตั้งแต่วัสดุอ่อนจนถึงวัสดุที่มีความแข็งมาก ซึ่งค่าที่อ่านได้มีค่าที่ค่อนข้างแม่นยำกว่าการทดสอบด้วยวิธีการอื่นๆ ตลอดจนขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน

ดังนั้นการทดสอบความแข็งที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ คือ การทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์ โดยใช้สเกลมาตรฐานแบบสเกล B ในการทดสอบความแข็งของชิ้นงานภายหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 เพื่อให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องและแม่นยำเพื่อการวิเคราะห์ต่อไป

2.5.2 การทดสอบความทนแรงดึง (Tensile test)

วิธีการทดสอบความทนแรงดึงสามารถทำได้โดยการนำวัสดุตัวอย่างที่จะทดสอบมาทำการดึงช้าๆ ด้วยแรงและอัตราเร็วคงที่แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดเพื่อนำมาพล็อตเป็นกราฟเส้น เรียกว่า เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ดังรูปที่ 2.8 โดยในการทดสอบวัสดุนั้นจะมีมาตรฐานของขนาดวัสดุทดสอบกำหนดไว้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ มาตรฐานของการทดสอบที่นิยมใช้ ได้แก่ มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), JIS (Japanese Industrial Standards), BS (British Standards) หรือ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) โดยได้กำหนดขนาดและรูปร่างของวัสดุทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับการกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย



รูปที่ 2.8 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบมีจุดคราก
(ที่มา : การทดสอบแรงดึง (Tension Test)) [28]

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด พบว่า เกิดค่าต่างๆ ขึ้นดังนี้
จุด A เรียกว่า พิกัดสัดส่วน (Proportional limit) เกิดขึ้นหลังจากดึงขึ้นทดสอบอย่างช้าๆ ชิ้นงานทดสอบจะค่อยๆ ยืดออก ทำให้ได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุค (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่า ความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดและภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอลาสติก (Elastic behavior) นั่นคือ เมื่อปล่อยแรงกระทำชิ้นงานทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

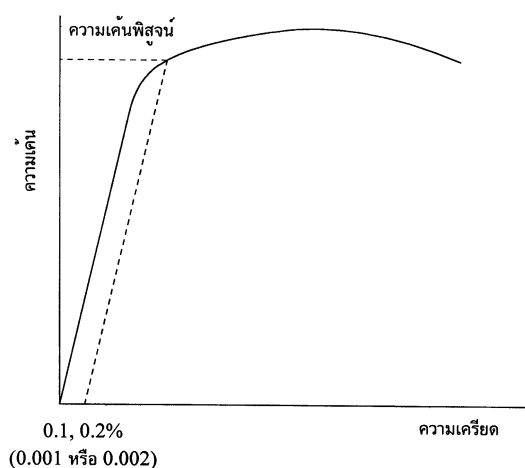
จุด B เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) เป็นจุดกำหนดค่าความเค้นสูงสุด ที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เกิดขึ้นหลังจากเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วน เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic deformation)

จุด C เรียกว่า จุดคราก (Yield Point) เป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกและค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก หรือ Yield Strength ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

จุด D เรียกว่า ความเค้นแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) หรือความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดออกจากกัน (Fracture)

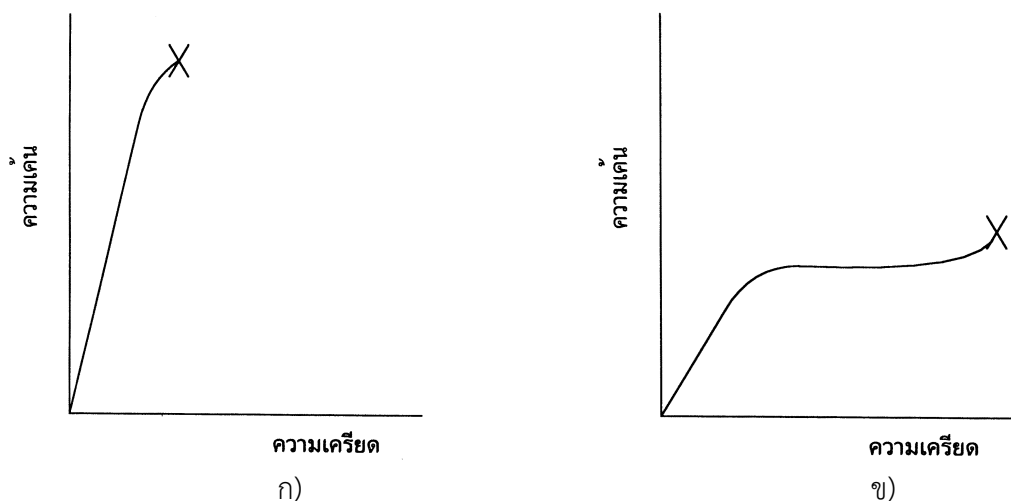
จุด E เรียกว่า จุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) หรืออาจเรียกว่า ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียวมีค่าต่ำกว่าความเค้นสูงสุด ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (cold work) มักจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด

วัสดุหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่สามารถหาความเค้นจุดครากได้โดยวิธีการกำหนดความเครียดที่ 0.10-0.20 เปอร์เซ็นต์ของความยาวเดิม (Original Gage Length) จากนั้นลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งค่าความเค้นที่จุดตัดนี้สามารถนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2 เปอร์เซ็นต์ Offset



รูปที่ 2.9 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบไม่มีจุดคราก
(ที่มา : การทดสอบแรงดึง (Tension Test)) [28]

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุทดสอบจะเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไปแล้ว พื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุทดสอบจะลดลง ทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่ยังสามารถคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (cold work) มาแล้ว จะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูปที่ 2.10 ก) ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.10 ข)



รูปที่ 2.10 เส้นโค้งเปรียบเทียบความเค้น-ความเครียด ก) วัสดุเปราะ และ ข) วัสดุพลาสติก
(ที่มา : การทดสอบแรงดึง (Tension Test)) [28]

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การนำสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ ทำให้ข้อสรุปที่ได้มีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เช่น ในการวิเคราะห์การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การบันทึกผลสถิติที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งต้องใช้การวิเคราะห์ค่าทดสอบของชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัยคือ สถิติพรรณนา (Descriptive statistic) เพื่อหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ส่วนสถิติเชิงอนุมาน (Inferential statistic) ใช้ในการหาค่าความแปรปรวนและอิทธิพลของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง เป็นการหาค่ากลุ่มตัวอย่างเพื่อที่จะนำไปแทนประชากรได้อย่างเพียงพอและมีความเหมาะสมที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพในงานวิจัย ไม่มีความสับสนเปลืองในเรื่องต่างๆ เช่น แรงงาน เวลา งบประมาณ ฯลฯ โดยการหาขนาดตัวอย่างในงานวิจัยนี้จะใช้ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง จากการทดลองในลักษณะเดียวกัน ซึ่งใช้ค่าที่ได้รับการแนะนำให้ใช้ (ในกรณีนี้จะใช้กลุ่มตัวอย่างโดยการอ้างอิงงานทดลองในลักษณะเดียวกันและจากมาตรฐาน ASTM) เนื่องจากต้นทุนของวัสดุในการทดลองมีราคาสูง จึงกำหนดขนาดตัวอย่างด้วยวิธีนี้ เพื่อประหยัดต้นทุนและเวลาในการทดลอง

2.6.2 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย (ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง)

คือ ปัจจัย A และปัจจัย B โดยในแต่ละปัจจัยจะประกอบไปด้วย a และ b ระดับ ซึ่งทุกเงื่อนไขการทดลองจะอยู่ในรูปของการออกแบบแฟกทอเรียล คือ ในการทดลองแต่ละซ้ำประกอบไปด้วยการทดลองร่วมระหว่างปัจจัยทั้งหมด $a \times b$ การทดลอง โดยปกติมีจำนวนการทำซ้ำทั้งหมด n ครั้ง

ซึ่งจะกำหนดให้ $y_{i..}$ เป็นผลรวมของข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ระดับ i ของปัจจัย A $y_{.j.}$ เป็นผลรวมของข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ระดับ j ของปัจจัย B $y_{ij.}$ เป็นผลรวมของข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมด ณ ตำแหน่ง ij ของปัจจัย A และ $y_{...}$ เป็นผลรวมของข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง โดยการหาค่าเฉลี่ยของ $\bar{y}_{i..}$, $\bar{y}_{.j.}$, $\bar{y}_{ij.}$ และ $\bar{y}_{...}$ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$y_{i..} = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^b y_{ijk} \quad \bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{bn} \quad i = 1, 2, \dots, a \quad (2.2)$$

$$y_{.j.} = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^a y_{ijk} \quad \bar{y}_{.j.} = \frac{y_{.j.}}{an} \quad j = 1, 2, \dots, b \quad (2.3)$$

$$y_{ij.} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{ij.} = \frac{y_{ij.}}{n} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \end{matrix} \quad (2.4)$$

$$y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{...} = \frac{y_{...}}{abn} \quad (2.5)$$

เมื่อกำหนดให้ y_{ijk} คือ ผลที่ได้จากการสังเกตเมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) และปัจจัย B อยู่ที่ระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) สำหรับการซ้ำที่ k ($k = 1, 2, \dots, n$) รูปแบบสมการทั่วไปของการออกแบบแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เนื่องจากลำดับในการสังเกตทั้ง $a \times b \times n$ ครั้ง โดยการทดลองแต่ละเงื่อนไขจะถูกเลือกมาอย่างสุ่ม (Randomness) ซึ่งเป็นการออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely randomized design) แบบจำลองคณิตศาสตร์ของแฟกทอเรียล แสดงดังสมการที่ 2.6

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \end{cases} \quad (2.6)$$

โดยที่ μ คือ ผลเฉลี่ยทั้งหมด
 τ_i คือ ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของปัจจัย A
 β_j คือ ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของปัจจัย B
 $(\tau\beta)_{ij}$ คือ ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ β_j

\mathcal{E}_{ijk} คือ องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม (ปัจจัยทั้งคู่ที่ค่าตายตัว (Fixed) และผลต่อการทดลอง (Treatment Effect) หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมด)

ดังนั้นจะได้ว่า $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ และ $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ และในทำนองเดียวกันอันตรกิริยามีค่า

ตายตัวและกำหนดให้ $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$ เนื่องจากการทดลองมีจำนวนการทำซ้ำ n ครั้ง ดังนั้นจำนวนข้อมูลที่เก็บได้มีค่าเท่ากับ $a \times b \times n$ ข้อมูล

ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการอบละลาย (A) และเวลาในการอบละลาย (B) โดยให้ทั้งสองปัจจัยมีค่าความสำคัญเท่ากัน

ผลที่เกิดจากอุณหภูมิในการอบละลาย

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ At least one } i$$

ผลที่เกิดจากเวลาในการอบละลาย

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ At least one } j$$

ผลของอันตรกิริยาที่เกิดระหว่างอุณหภูมิในการอบละลายและเวลาในการอบละลาย

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ for all } i, j$$

$$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ At least one } i, j$$

ซึ่งในการทดสอบสมมติฐานทั้งสามนี้จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ปัจจัยในการทดสอบเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดลอง ในการคำนวณค่าของผลรวมของแต่ละปัจจัย (Sum of Square) สามารถหาค่าได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$SS_{\text{Total}} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \quad (2.7)$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i.}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \quad (2.8)$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \quad (2.9)$$

$$SS_{\text{Subtotal}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \quad (2.10)$$

$$SS_{AB} = SS_{Subtotal} - SS_A - SS_B \quad (2.11)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad (2.12)$$

หรือ

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotal} \quad (2.13)$$

โดยที่ SS_{Total} คือ ผลรวมของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม

SS_A คือ ผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากปัจจัย A

SS_B คือ ผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากปัจจัย B

SS_{AB} คือ ผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B

SS_E คือ ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากความผิดพลาด

$SS_{Subtotal}$ คือ ผลรวมของกำลังสองครึ่งหนึ่งของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม

จากสมการที่ 2.6 เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์หาความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ โดยในการทดสอบจะใช้การทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลแบบ F โดยอาศัยการใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์หาความแปรปรวนการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย [29]

Source of Variation	Sum of Square	Degrees of Freedom	Mean Square	F_0
A treatments	SS_A	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B treatments	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interaction	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	
Total	SS_T	$abn - 1$		

2.6.3 สมมติฐานในการทดลอง

ปัจจัยที่ถูกกำหนดในการทดลองว่ามีอิทธิพลต่อการทดลองหรือไม่โดยการตั้งสมมติฐานหลักและความสัมพันธ์ของปัจจัย สามารถตรวจสอบผลด้วยวิธีการทางสถิติดังต่อไปนี้

1) การพิจารณา Main Effect

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของ ปัจจัย A

$H_0 : \tau_1 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของปัจจัย A ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \tau_1 \neq 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลปัจจัย A แตกต่างกัน

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของ ปัจจัย B

$H_0 : \beta_1 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของปัจจัย B ไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \beta_1 \neq 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของปัจจัย B แตกต่างกัน

2) การพิจารณา 2 Factor Interaction Effect

ทดสอบอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างอุณหภูมิในการอบละลายและเวลาในการอบละลาย

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$ for all i, j ทุกระดับ ไม่มีอิทธิพลของ Interaction ($i=1, 2, \dots, n ; j=1, 2, \dots, m$)

$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ At least one i, j โดยมีบาง i, j มีอิทธิพลของ Interaction ($i=1, 2, \dots, n ; j=1, 2, \dots, m$)

2.6.4 การทดลองค่าเฉลี่ยที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม

การทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยสองกลุ่มนั้น โดยใช้ข้อมูลที่รวบรวมได้จากกลุ่มตัวอย่าง ในแต่ละกลุ่มนั้นเป็นข้อมูลในอันตรภาคหรืออัตราส่วน โดยนำค่าเฉลี่ย (\bar{X}) ที่ได้จากการคำนวณจากกลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่มนั้นมาเปรียบเทียบกัน ทั้งนี้เพื่อนำไปสู่การสรุปว่า ค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่มนั้น แตกต่างกันหรือไม่ โดยจะแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

1) กลุ่มตัวอย่างมีขนาดใหญ่ ($n \geq 30$) หมายถึง กลุ่มตัวอย่างของ n_1 และ n_2 ซึ่งมีจำนวนของข้อมูลแต่ละกลุ่มมากกว่าหรือเท่ากับ 30 ข้อมูล ดังนั้นในการทดสอบทางสถิติจะทดสอบโดยใช้ Z-test โดยสามารถคำนวณค่า Z ได้จากสมการ 2.14

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (2.14)$$

ซึ่งในทางปฏิบัติอาจไม่สามารถหาค่า σ_1^2 และ σ_2^2 ได้ โดยจะสามารถใช้ค่า s_1^2 และ s_2^2 แทนได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.15

$$Z = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (2.15)$$

2) กลุ่มตัวอย่างขนาดเล็ก ($n < 30$) หมายถึง กลุ่มตัวอย่างของ n_1 และ n_2 ซึ่งมีจำนวนของข้อมูลแต่ละกลุ่มน้อยกว่า 30 ข้อมูล ดังนั้นในการทดสอบทางสถิติจะทดสอบโดยใช้ t-test โดยต้องคำนึงถึงองศาเสรี (Degree of Freedom ; DF) จะแยกออกเป็น 2 กรณี คือ

ก. ไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากรทั้ง 2 กลุ่ม และตั้งข้อตกลง (Assume) ค่าความแปรปรวนของประชากรทั้งสองกลุ่มเท่ากัน ($\sigma_1^2 = \sigma_2^2$) โดยหาค่า t และองศาเสรี จากสมการที่ 2.16 และ 2.17

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left[\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right]}} \quad (2.16)$$

$$DF = n_1 + n_2 - 2 \quad (2.17)$$

ข. ไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากรทั้ง 2 กลุ่ม และตั้งข้อตกลง (Assume) ค่าความแปรปรวนของประชากรทั้งสองกลุ่มไม่เท่ากัน ($\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$) โดยหาค่า t และองศาเสรี จากสมการที่ 2.18 และ 2.19

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (2.18)$$

$$DF = \frac{\left[\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2} \right]}{\frac{\left[\frac{s_1^2}{n_1} \right]^2}{n_1 - 1} + \frac{\left[\frac{s_2^2}{n_2} \right]^2}{n_2 - 1}} \quad (2.19)$$

2.6.5 การเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparison)

ปกติการทดสอบ F-Test จะพบว่าเป็นการทดสอบโดยรวม (over all test) โดยเป็นการทดสอบว่ามีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันหรือไม่ ถ้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Significant) ก็จะบอกว่า มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ เท่านั้นโดยไม่สามารถบอกได้ว่าคู่ใดเป็นคู่ที่เกิดความแตกต่าง ซึ่งจำเป็นต้องทำการทดสอบหลังการวิเคราะห์ โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณ ในที่นี้จะอธิบายการเปรียบเทียบพหุคูณเฉพาะเงื่อนไขความเท่ากันของความแปรปรวนและบางวิธีที่นิยมใช้ โดยประกอบไปด้วย 3 วิธี ดังนี้

1) Least-Significant Different (LSD)

วิธี Least-Significant Different หรือ LSD หรือ Fisher's Least-Significant Different เป็นเทคนิคที่ Fisher ได้พัฒนาเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประชากรครั้งละหลายคู่ ซึ่งใช้สมการที่ 2.20 ในการคำนวณ

$$LSD = t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad (2.20)$$

ค่า MS_E ได้จากการคำนวณหาค่าความแปรปรวนจากตาราง ANOVA ซึ่งขั้นตอนในการคำนวณค่าเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในแต่ละคู่ ดังต่อไปนี้

- (1) คำนวณค่า LSD โดยใช้สมการที่ 2.20
- (2) คำนวณความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย $\bar{x}_i - \bar{x}_j$
- (3) นำค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$ มาเปรียบเทียบกับค่า LSD
 - ก. ถ้า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| \leq$ ค่า LSD แสดงว่า $\mu_1 = \mu_2$
 - ข. ถ้า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| >$ ค่า LSD แสดงว่า $\mu_1 \neq \mu_2$

2) Turkey's Honestly Significant Different (HSD)

วิธี Turkey's Honestly Significant Different หรือ HSD เป็นการเปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขที่มีจำนวนของขนาดตัวอย่างแต่ละกลุ่มเท่ากัน โดยใช้สมการที่ 2.21 ในการคำนวณ

$$T_\alpha = q_\alpha(a, f) \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.21 ค่าของ q หาได้จากตารางค่าวิกฤติของ Studentized Rough

Statistic โดยมีขั้นตอนในการคำนวณค่าเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในแต่ละคู่ ดังต่อไปนี้

- (1) คำนวณค่า HSD โดยใช้สมการที่ 2.21
- (2) คำนวณความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย $\bar{x}_i - \bar{x}_j$
- (3) นำค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$ มาเปรียบเทียบกับค่า HSD
 - ก. ถ้า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| \leq$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 = \mu_2$
 - ข. ถ้า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| >$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 \neq \mu_2$

3) The Sheffe's Post hoc Comparison (Sheffe')

วิธี The Sheffe's Post hoc Comparison นี้สามารถเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ โดยใช้สมการที่ 2.22 ในการคำนวณ

$$CV_d = \sqrt{(K-1)(F^*)(MS_w)\left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}\right)} \quad (2.22)$$

F^* คือ ค่า F ที่เปิดจากตารางค่าวิกฤติของ F โดยมี $df_1 = K-1$, $df_L = N-K$

MS_w คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณความแปรปรวนภายในกลุ่มซึ่งได้จากตารางการวิเคราะห์ ANOVA ซึ่งมีขั้นตอนในการคำนวณค่าเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในแต่ละคู่ ดังต่อไปนี้

- (1) คำนวณค่า CV_d โดยใช้สมการที่ 2.22
- (2) คำนวณความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย $\bar{x}_i - \bar{x}_j$
- (3) นำค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$ มาเปรียบเทียบกับค่า CV_d
 - ก. ถ้า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| <$ ค่า CV_d แสดงว่า $\mu_1 = \mu_2$
 - ข. ถ้า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| \geq$ ค่า CV_d แสดงว่า $\mu_1 \neq \mu_2$

ในงานวิจัยจะทำการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparison) โดยวิธี Turkey's Honestly Significant Different (HSD) เนื่องจากในแต่ละกลุ่มตัวอย่างมีขนาดของตัวอย่างที่เท่ากัน

2.7 การคำนวณต้นทุน

ในงานวิจัยนี้เป็นการคำนวณต้นทุนในระดับโรงงานขนาดเล็กโดยจะคำนวณต้นทุนที่เกิดขึ้นในกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยใช้กระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ซึ่งเป็นการคำนวณเพื่อให้ทราบถึงต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการ โดยมีนิยามของต้นทุนมีดังนี้

ต้นทุน (cost) หมายถึง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินกิจกรรมต่างๆ

ต้นทุนการผลิต (production cost) หมายถึง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินกิจกรรมทางการผลิตเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ดี มีคุณภาพ ตามความต้องการของลูกค้า

ในการคำนวณต้นทุนนั้นจำเป็นที่จะต้องแบ่งต้นทุนออกเป็นประเภทเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ในที่นี่จะใช้การวิเคราะห์ต้นทุนตามกระบวนการ (Process-Based Cost Model) ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของต้นทุนออกเป็น 2 ประเภท ใหญ่ๆ คือ ต้นทุนคงที่ (Fixed costs) และต้นทุนผันแปร (Variable costs) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.8.1 ต้นทุนคงที่ (Fixed costs)

ต้นทุนคงที่ คือ ต้นทุนรวมที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามระดับของการผลิตในช่วงของการผลิต แต่ต้นทุนคงที่ต่อหน่วยจะเปลี่ยนแปลงในทางลดลงถ้าปริมาณการผลิตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งประกอบด้วยต้นทุน ดังต่อไปนี้

1) ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงาน (overhead cost) ค่าใช้จ่ายทางอ้อม เป็นผลรวมของค่าใช้จ่าย ค่าวัสดุทางอ้อม ค่าไฟส่องสว่าง ค่าน้ำประปา ค่าใช้จ่ายในการขายและบริหาร

2) ต้นทุนค่าเครื่องจักร (equipment cost) ต้นทุนค่าเครื่องจักร จะคิดจากค่าเสื่อมของเครื่องจักร และอุปกรณ์ ในช่วงของการผลิตเท่าๆ กัน ซึ่งจะมีการประเมินค่าเสื่อมราคาในลักษณะเส้นตรง โดยกำหนดให้มีอายุการใช้งานเครื่องจักรและอุปกรณ์

3) ต้นทุนค่าอุปกรณ์ (tooling cost) ต้นทุนค่าอุปกรณ์จะคิดจากต้นทุนการรักษาสภาพเครื่องจักรให้สามารถใช้งานได้ตลอดเวลา โดยครอบคลุมไปถึงการซ่อมแซม และการบำรุงรักษาเครื่องจักรตามอายุการใช้งาน

4) ต้นทุนการก่อสร้าง (building cost) คือ ต้นทุนที่ลงทุนสำหรับสิ่งก่อสร้างที่เกี่ยวกับการผลิต เช่น ตึก อาคารสำนักงาน เป็นต้น

2.7.2 ต้นทุนผันแปร (Variable costs)

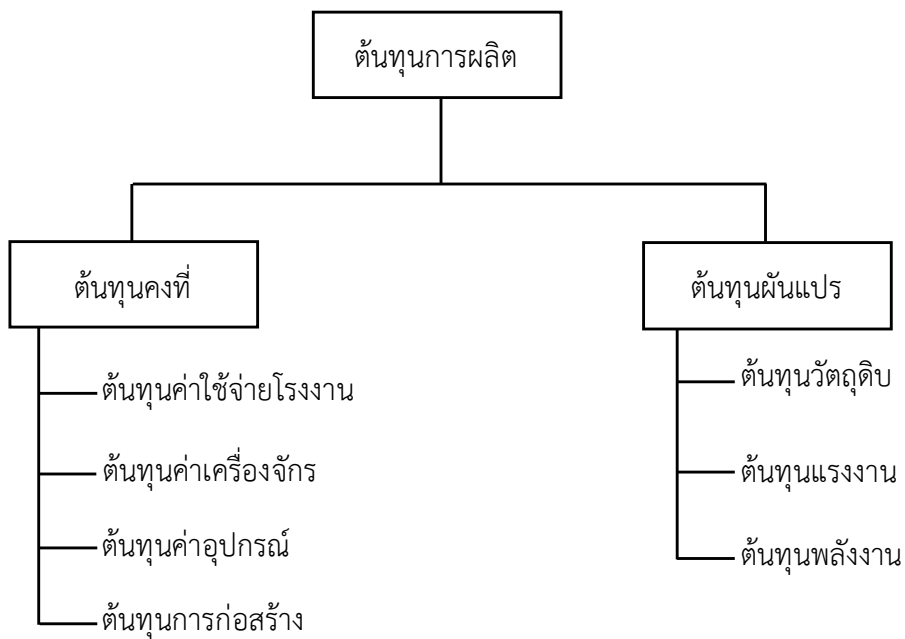
ต้นทุนผันแปร หมายถึง ต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงในระดับกิจกรรมหรือปริมาณในกระบวนการผลิต ต้นทุนผันแปรของต้นทุนต่อหน่วยจะเท่าๆ กัน ทุกหน่วย ประกอบด้วยต้นทุน ดังต่อไปนี้

1) ต้นทุนวัตถุดิบ (material cost) คือ วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต

2) ต้นทุนแรงงาน (labor cost) คือ ค่าใช้จ่ายหรือค่าตอบแทนให้แก่พนักงานหรือลูกจ้างหรือคนทำงานที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต

3) ต้นทุนพลังงาน (energy cost) คือ ต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต คำนวณโดยใช้อัตราค่าไฟแบบ Time of Use (TOU) ซึ่งเป็นการคิดอัตราการใช้งานที่แตกต่างตามช่วงเวลาที่ใช้งาน

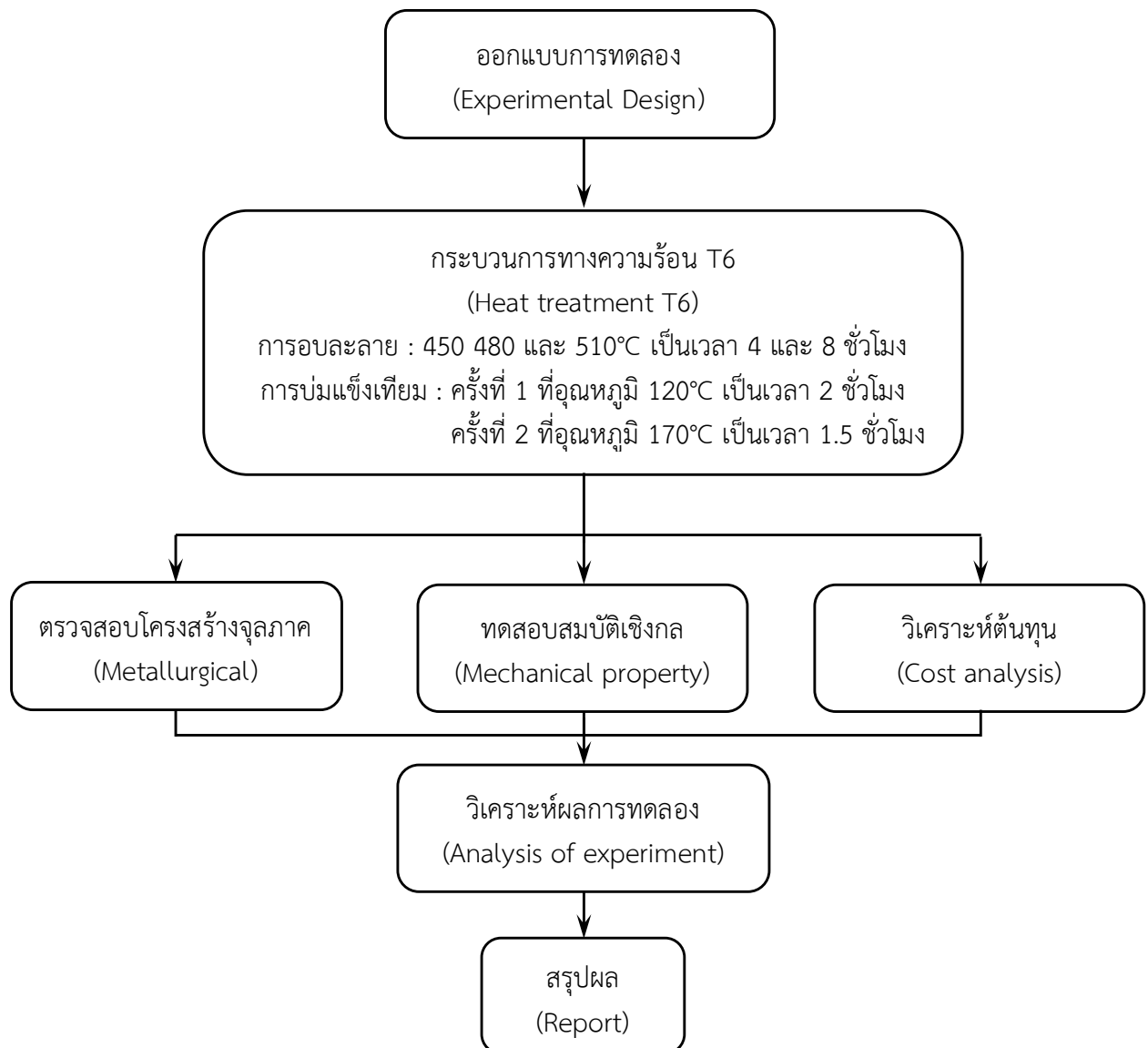
จากข้อมูลข้างต้นสามารถแสดงโครงสร้างของต้นทุนได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของต้นทุนตามกระบวนการ (PBCM)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย

การดำเนินการวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 แบบกึ่งของแข็งโดยใช้กระบวนการทางความร้อน ซึ่งจะทำให้การตรวจสอบสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้น หลังจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติด้านความแข็งแรงและความทนแรงดึง ส่วนกระบวนการทางความร้อนที่ใช้ คือ กระบวนการทางความร้อน T6 หลังจากนั้นทำการคำนวณต้นทุนที่เกิดขึ้นของกระบวนการในระดับโรงงานขนาดเล็ก โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย

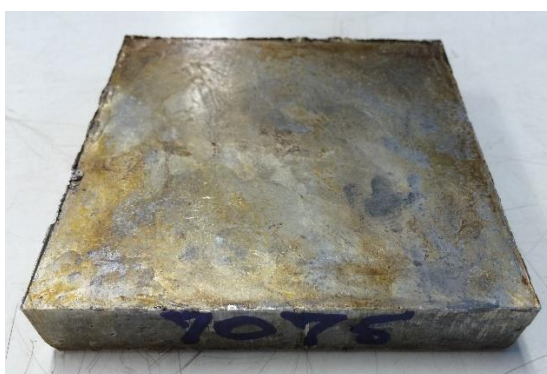
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 เป็นวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองซึ่งมีส่วนผสมของธาตุต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 จากตารางพบว่ามีสังกะสี (Zn) เป็นธาตุผสมหลักและแมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุผสมรองลงมา ธาตุเหล่านี้ช่วยทำให้อะลูมิเนียมเกรดดังกล่าว มีความแข็งแรงสูง (high strength) ทนต่อการกัดกร่อน (corrosion resistance) โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ใช้ในการทดลองผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิคกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส (Gas Induced Semi-Solid ;GISS) เทคนิคดังกล่าวเป็นกระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting เทคนิคการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบ GISS นั้น จะทำการหลอมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 700°C จากนั้นตักน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวประมาณ 0.5 กิโลกรัม และรออุณหภูมิของน้ำโลหะอะลูมิเนียมลดลงถึง 645°C จากนั้นใช้แก๊สไนโตรเจน พ่นผ่านแท่งกราฟไฟต์พอร์นซึ่งใช้ความดันแก๊สในช่วง 4-5 บาร์ และอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 5 ลิตร/นาที เพื่อสร้างโลหะกึ่งของแข็งที่เป็นเกรนแบบก้อนกลมที่เกิดจากการนิวคลีเอชันหรือเกิดจากการแตกหักของเดนไดรต์ เนื่องจากกระแสไหลวนของน้ำโลหะ แล้วจึงนำสเลอรี่กึ่งของแข็งเทลงสู่แม่พิมพ์โดยมีอุณหภูมิของแม่พิมพ์ 300°C แล้วอัดขึ้นรูปโดยใช้ความดัน 1,500 psi ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิค GISS มีขนาด 100 x 100 x 15 cm³ แสดงดังรูปที่ 3.2 ก.) และโครงสร้างที่เกิดใหม่จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบ GISS เป็นโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมดังรูปที่ 3.2 ข.)

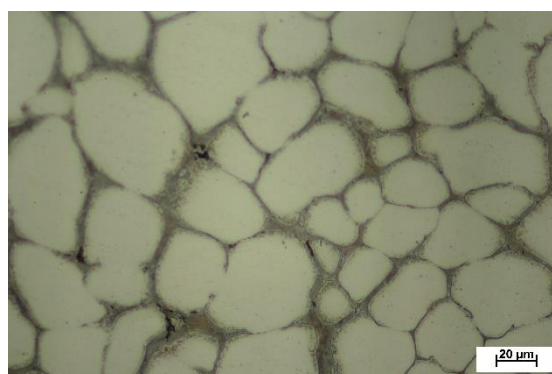
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 (W.T.%)

Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Si	Al
6.08	2.50	1.93	0.19	0.46	0.4	Bal.

หมายเหตุ Bal. คือ สัดส่วนของธาตุอะลูมิเนียมที่นอกเหนือจากส่วนผสมทางเคมีดังตาราง



ก.)



ข.)

รูปที่ 3.2 โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิค GISS ก.) ลักษณะที่ได้จากการขึ้นรูป และ ข.) โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย เรื่องการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโลหะผสม อะลูมิเนียมเกรด 7075 โดยใช้กระบวนการทางความร้อน มีดังต่อไปนี้

3.2.1 เตาเผาอุณหภูมิต่ำ สำหรับทำ Solid Solution

เตาเผาอุณหภูมิต่ำ (เตาอบละลาย) ที่ใช้ในงานวิจัย ยี่ห้อ Nabertherm รุ่น SN278509 แสดงดังรูปที่ 3.3 สามารถตั้งอุณหภูมิในการเผาได้ตั้งแต่ 25 ถึง 1100°C โดยในงานวิจัย ใช้อุณหภูมิในการอบละลายที่อุณหภูมิ 450, 480 และ 510°C และใช้เวลาในการอบละลาย 4 และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ



รูปที่ 3.3 เตาเผาอุณหภูมิต่ำ

3.2.2 เตาอบ สำหรับ Aging

เตาอบที่ใช้ในงานวิจัย ยี่ห้อ Memmart รุ่น UNE600 แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยใช้ในกระบวนการบ่มแข็งเทียม ซึ่งในงานวิจัยใช้อุณหภูมิในการบ่มแข็งเทียม 2 ครั้ง โดยที่ครั้งที่ 1 ใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และครั้งที่ 2 ใช้อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 เตาบ่มแข็งเทียม

3.2.3 เลื่อยสายพานแนวนอน

เลื่อยสายพานแนวนอนที่ใช้ในงานวิจัย ยี่ห้อ Carif รุ่น Carif 260 ซึ่งใช้ในการตัดแบ่งชิ้นงานให้มีขนาดตามที่กำหนด (ขนาดที่ใช้ในการทดสอบความแข็งและความทนแรงดึง) ก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เลื่อยสายพานแนวนอน

3.2.4 เครื่องกัดแนวตั้ง

เครื่องกัดแนวตั้งที่ใช้ในงานวิจัย ยี่ห้อ HELLER ใช้ในการกัดปาดหน้าและกัดขึ้นรูปชิ้นงานลักษณะ dog bone ของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ให้มีพื้นผิวเรียบและได้ขนาด เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความแข็งและความทนแรงดึง แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องกัดแนวตั้ง

3.2.5 เครื่องขัดกระดาษทรายและขัดสีกหลาด

เครื่องขัดกระดาษทรายและขัดสีกหลาด ยี่ห้อ FRECONix ใช้ในการขัดผิวชิ้นงานก่อนนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องขัดกระดาษทรายและขัดสีกหลาด

3.2.6 น้ำยาและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน ได้แก่

- ก. สารละลายเจือจาง Keller's reagent
- ข. กรดไฮโดรฟลูออริก ความเข้มข้น 48% 2 ml
- ค. กรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 3 ml
- ง. กรดไนตริกส์ 5 ml
- จ. น้ำ 190 ml

3.2.7 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope ;OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ยี่ห้อ Olympus ที่ใช้ในงานวิจัยมีกำลังขยายตั้งแต่ 20 50 100 200 และ 500 เท่า ตามลำดับ ซึ่งใช้สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางวิทยา แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ;SEM)

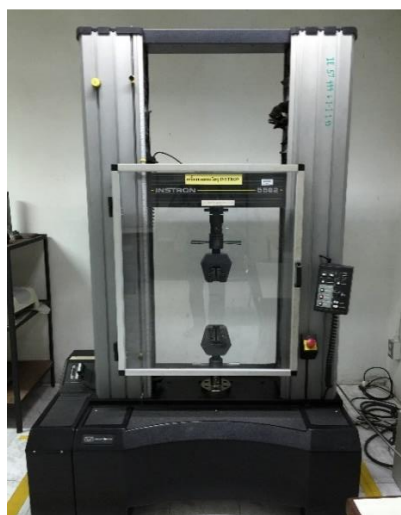
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.2.9 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง

เครื่องทดสอบความทนแรงดึง ยี่ห้อ Instron รุ่น 5528 เป็นเครื่องที่ใช้ทดสอบความทนแรงดึง แสดงดังรูปที่ 3.10 มีวิธีการคือ นำตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการกัดให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM-E8 มาดึงอย่างช้าๆ จะให้ค่าความเค้นและความเครียด ซึ่งสามารถมาหาค่าความต้านทานแรงดึงได้



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง

3.2.10 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell hardness test)

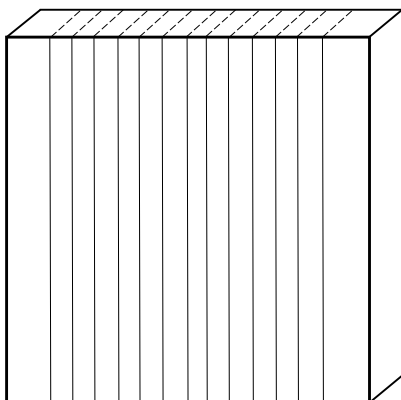
เครื่องทดสอบความแข็ง แสดงดังรูปที่ 3.11 หน่วยที่ใช้ทดสอบความแข็งคือ HRB จะใช้แรงกระทำ (Load force) 100 กิโลกรัม หัวกดที่ใช้เป็นลูกบอลเหล็ก ซึ่งจะอ่านค่าได้จากหน้าจอบนตัวเครื่องโดยตรง โดยชิ้นงานที่ทดสอบจะต้องมีพื้นผิวที่เรียบ ไม่ขรุขระ หรือเป็นหลุม เพื่อที่จะทำให้ค่าที่วัดได้เป็นค่าที่แท้จริงและเพื่อยืดอายุในการใช้งานของหัวกด



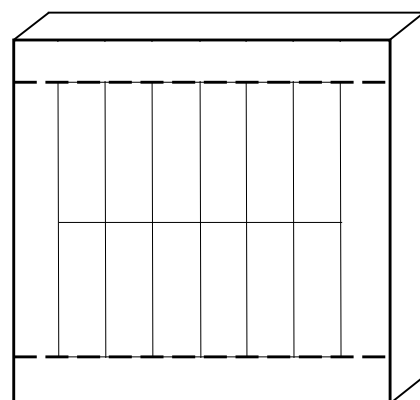
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์

3.3 การเตรียมชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี GISS

โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธี GISS แล้วนั้น (ขนาด $100 \times 100 \times 15 \text{ mm}^3$, ดังรูปที่ 3.2 ก.) จะต้องนำมาตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน ให้มีขนาด $6 \times 100 \times 15 \text{ mm}^3$ เพื่อนำไปเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบความทนแรงดึง และตัดให้มีขนาด $10 \times 40 \times 15 \text{ mm}^3$ เพื่อนำไปเป็นชิ้นงานทดสอบความแข็ง โดยการแบ่งชิ้นงานในการทดสอบความทนแรงดึงและการทดสอบความแข็งแสดงดังรูปที่ 3.12



ก)



ข)

รูปที่ 3.12 การตัดแบ่งชิ้นงาน ก.) ชิ้นงานทดสอบความทนแรงดึง และ ข.) ชิ้นงานทดสอบความแข็ง

3.4 การออกแบบการทดลอง

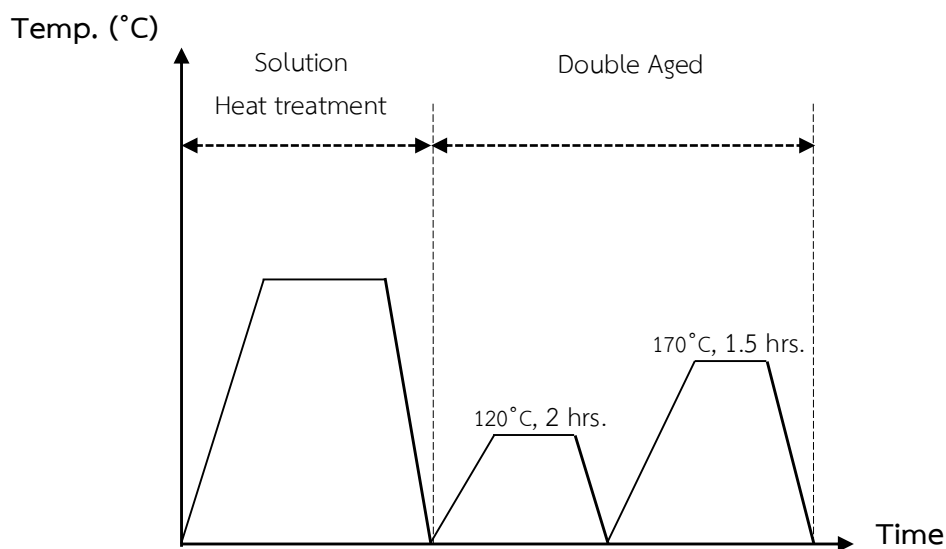
การออกแบบการทดลองจะยึดตาม ASTM E8 และ ASTM E18 ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน ซึ่งมีปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล คือ อุณหภูมิ (temperature) และเวลา (time) จากการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องในเรื่องของการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน พบว่าอุณหภูมิที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างของอะลูมิเนียมเกรด 7075 โดยแบ่งอุณหภูมิออกเป็น 2 ประเภท คือ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบละลายอยู่ในช่วง 450-510 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบ่มแข็งเทียมอยู่ในช่วง 120-170 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 3.2 จำนวนชิ้นงานตัวอย่างในการทดสอบความแข็งจะใช้จำนวน 2 ตัวอย่างและจำนวนทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งต่อหนึ่งเงื่อนไข ส่วนจำนวนชิ้นงานตัวอย่างในการทดสอบความทนแรงดึงจะใช้จำนวน 2 ตัวอย่างและจำนวนทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งต่อหนึ่งเงื่อนไข

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลอง

การอบละลาย		การบ่มแข็งเทียมสองครั้ง			
		บ่มครั้งที่ 1		บ่มครั้งที่ 2	
450°C	4 hrs.	120°C	2 hrs.	170°C	1.5 hrs.
	8 hrs.				
480°C	4 hrs.				
	8 hrs.				
510°C	4 hrs.				
	8 hrs.				

3.5 ขั้นตอนการทดลองกระบวนการทางความร้อน

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนสามารถทำได้หลายวิธี โดยขึ้นอยู่กับเกรดและประเภทของวัสดุที่ใช้ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้ T6 ซึ่งการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้ T6 โดยที่กระบวนการดังกล่าวจะต้องนำอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS ไปผ่านการอบละลาย (solution heat treatment) การชุบ (quenching) และการบ่มแข็งเทียม (artificial aging) ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการทางความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.13 และมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.13 ไดอะแกรมของกระบวนการทางความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย

1) การอบละลาย (Solution heat treatment) เป็นการอบละลายโครงสร้างซึ่งจะทำให้ธาตุผสมละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับอะลูมิเนียมโดยการให้ความร้อนซึ่งในที่นี้จะใช้อุณหภูมิ 450, 480 และ 510°C โดยแต่ละอุณหภูมิจะปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ จากนั้นทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการชุบลงในน้ำทันทีหลังจากครบเวลาอบละลาย ซึ่งจากกระบวนการนี้จะส่งผลให้อะลูมิเนียมผสมเกิดเฟสใหม่ที่ทำให้ธาตุที่ผสมอยู่เกิดความเสถียรและพลังงานจลน์ลดลงในระดับโครงสร้างจุลภาค

2) การชุบ (Quenching) เป็นการลดอุณหภูมิลงหรือทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ขณะที่วัสดุอยู่ในช่วงอุณหภูมิสูงโดยการจุ่มลงในของเหลวที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการดูดซับพลังงานความร้อนที่แตกต่างกัน เช่น น้ำ น้ำมัน หรือน้ำเกลือ เพื่อทำให้เกิดการแปลงเฟส ผลลัพธ์ที่ตามมาจากกระบวนการดังกล่าว คือ ความแข็งของอะลูมิเนียมผสมเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ตัวกลางในการเย็นตัวที่ใช้ คือ น้ำที่อุณหภูมิห้อง

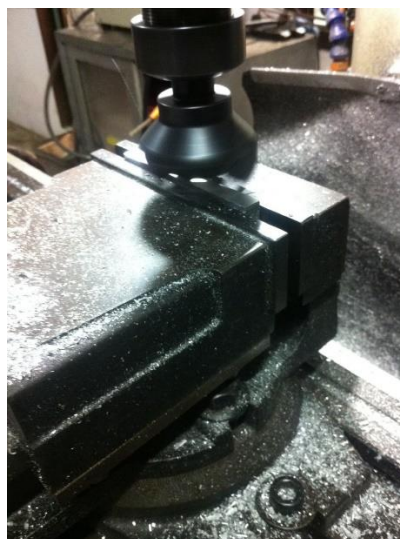
3) การบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging) เป็นการใช้พลังงานความร้อนที่เหมาะสมเพื่อให้อะตอมของธาตุผสมที่ละลายอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการอบละลายมาเกิดการตกตะกอนหรือตกผลึกของเฟสใหม่ที่มีความสมดุลมากขึ้น ซึ่งทำให้ผลที่ได้จากกระบวนการนี้ คือ วัสดุเกิดการต้านแรงกระทำได้สูงขึ้น มีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการบ่มแข็งเทียมสองครั้งที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ 170°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ตามลำดับ

นอกจากนี้หลังจากกระบวนการทางความร้อนเสร็จสิ้นในทุกๆ เงื่อนไขการทดลองแล้ว จะต้องนำชิ้นงานไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 1-5°C เพื่อรักษาสสมบัติของโครงสร้างให้คงสภาพเดิม ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่ลดต่ำลงจะส่งผลให้ด้านทานต่อการเปลี่ยนของเฟสหรือการเคลื่อนที่ของอะตอมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

3.6 การเตรียมชิ้นงานและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางวิทยา มีวิธีการเตรียมชิ้นงานดังต่อไปนี้

1) นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนไปกัดผิวชิ้นงานให้เรียบโดยใช้เครื่องกัดแนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 3.14 (ขนาดของชิ้นงานทดสอบเท่ากับขนาดของชิ้นงานทดสอบความแข็ง)



รูปที่ 3.14 การกัดผิวชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้าง

2) นำชิ้นงานที่ผ่านการกัดผิวให้เรียบแล้ว ไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 320 โดยวิธีการขัดจะต้องขัดชิ้นงานไปในทิศทางเดียวกันจนกระทั่งรอยขีดข่วนและรอยขีดหมดไปแล้วหมุนชิ้นงานไปเป็นมุมฉากและขัดชิ้นงานอีกครั้ง จนกระทั่งรอยขีดที่มีอยู่เดิมหายไปหมด โดยทำซ้ำในขั้นตอนข้างต้นเรื่อยๆ โดยเพิ่มความละเอียดของกระดาษทรายเป็น 600 800 และ 1200 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายน้ำ

3) หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปขัดผิวให้ละเอียดจนไม่เห็นรอยขีดข่วนบนผิวชิ้นงาน โดยใช้ผ้าหยาบ (Cloth pad) ร่วมกับผงขัดอะลูมินา (Alumina Powder) ขนาด 5 1 และ 0.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยมีวิธีการขัดเหมือนกับการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การขัดชิ้นงานด้วยโดยใช้ผ้าหยาบ (Cloth pad) ร่วมกับผงขัดอะลูมินา

4) นำชิ้นงานไปเป่าให้แห้งแล้วนำไปกัดกรดโดยใช้ระยะเวลาในการกัดประมาณ 5-7 วินาที แล้วล้างออกด้วยน้ำเปล่า ก่อนนำไปส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและทำการวิเคราะห์โครงสร้างในขั้นตอนถัดไป

5) ส่วนการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) นั้น สามารถนำชิ้นงานที่ผ่านการกัดปาดผิวหน้าชิ้นงานไปทดสอบได้เลย โดยที่ไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานในข้อที่ 2-4

ในการเก็บรักษาชิ้นงานในการตรวจสอบโครงสร้างจะต้องใส่ถุงซิปล็อกเพื่อไม่ให้ชิ้นงานทำปฏิกิริยากับอากาศและจำเป็นที่จะต้องเก็บไว้ในที่มีอุณหภูมิที่เย็น เนื่องจากหากโลหะได้รับความร้อนอะตอมภายในจะเกิดการเคลื่อนที่ตลอดเวลา เพื่อการลดการเคลื่อนที่ของอะตอมจึงจำเป็นที่จะต้องรักษาชิ้นงานทดสอบไว้ในอุณหภูมิที่มีความเย็น

3.7 การเตรียมชิ้นงานและการทดสอบความแข็ง

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็ง (hardness test) จะใช้ชิ้นงานที่มีขนาด $15 \times 10 \times 40 \text{ mm}^3$ (ซึ่งเป็นขนาดที่มีความเหมาะสมกับการทดสอบ กล่าวคือ การมีความหนาและพื้นที่หน้าตัดที่พอเพียงต่อการที่หัวกดสัมผัสต่อบริเวณที่ใช้ทดสอบ) ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนไปกัดปาดหน้าชิ้นงานให้เรียบก่อนนำไปวัดความแข็ง ดังรูปที่ 3.17 เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานของหัวกดและให้ได้ค่าความแข็งที่ถูกต้องที่สุด

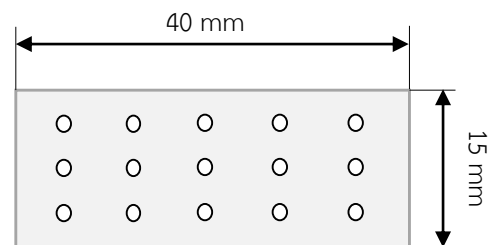


รูปที่ 3.17 กัดปาดหน้าชิ้นงานให้เรียบก่อนนำไปวัดความแข็ง

หลังจากกัดปาดผิวชิ้นงาน จะได้ชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.18 ก) โดยในการวัดความแข็งของชิ้นงานจะวัดความแข็งทั้งหมด 15 จุด เพื่อหาค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานแต่ละชิ้น แสดงดังรูปที่ 3.18 ข)



ก)



ข)

รูปที่ 3.18 ชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็ง ก) ชิ้นงานหลังผ่านการกัดปาดผิวหน้า และ ข) ตำแหน่งในการวัดความแข็งบนชิ้นงาน

ในการทดสอบความแข็งนั้นจะใช้เครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test) โดยใช้หัวกดบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง $\frac{1}{16}$ " (สเกล B) ในการวัดจะตั้งค่าแรงกดที่เครื่องวัดความแข็งเท่ากับ 100 Kgf. ตามมาตรฐานการตรวจวัด ASTM E18 ลักษณะการติดตั้งชิ้นงานและการทดสอบการกดแสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบความแข็ง

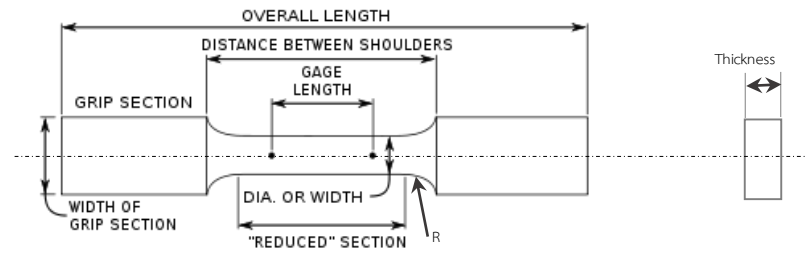
3.8 การเตรียมชิ้นงานและการทดสอบความทนแรงดึง

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความทนแรงดึง (tensile test) จะใช้ชิ้นงานที่ได้มาตรฐานตาม ASTM E8 โดยหลังจากชิ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อนแล้ว จะต้องนำชิ้นงานไปผ่านการกัดให้มีลักษณะเป็นชิ้นงานทดสอบแบบ dog bone ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบความทนแรงดึง

โดยชิ้นงานที่นำไปกัดมีขนาด $6 \times 15 \times 100 \text{ mm}^3$ ซึ่งจะกัดชิ้นงานให้มีลักษณะดังรูปที่ 3.21 และมีรายละเอียดของขนาดชิ้นงานทดสอบดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.21 ชิ้นงานทดสอบความทนแรงดึงลักษณะกระดูก (Dog bone)

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดขนาดต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบ

Nominal width	Dimension (mm)
Grip section	30
Overall length	100
Width of grip section	10
Distance between shoulders	40
Gage length	25 ± 0.1
DIA. Or width	6 ± 0.1
Radius	6
Reduced section	32
Thickness	4

หลังจากการกัดชิ้นงานให้มีรูปร่างเป็นชิ้นงานทดสอบแบบ dog bone และมีขนาดตาม ASTM E8 แล้ว จะต้องนำชิ้นงานมาตรวจสอบด้วยตาเพื่อหารอยแตกหรือรอยบิ่นบนชิ้นงาน เพราะถ้าหากชิ้นงานที่มีลักษณะดังกล่าวจะไม่สามารถนำไปทดสอบแรงดึงได้ ซึ่งถ้านำชิ้นงานไปทดสอบก็จะให้ค่าความทนแรงดึงที่ไม่ตรงตามความเป็นจริงและไม่สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ได้ ชิ้นงานที่ผ่านการกัดเป็นรูป dog bone แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง

ในการทดสอบความทนแรงดึง ก่อนการทดสอบจะต้องติดตั้งชิ้นงานเข้ากับปากตัวจับด้านล่างก่อนแล้วค่อยๆ เคลื่อนปากจับด้านบนลงมาให้พอดีที่ปากจับชิ้นงานสามารถจับได้ ความเร็วในการทดสอบความทนแรงดึงนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.1

$$v = \frac{G \times 60}{1000} \quad (3.1)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วในการทดสอบแรงดึง

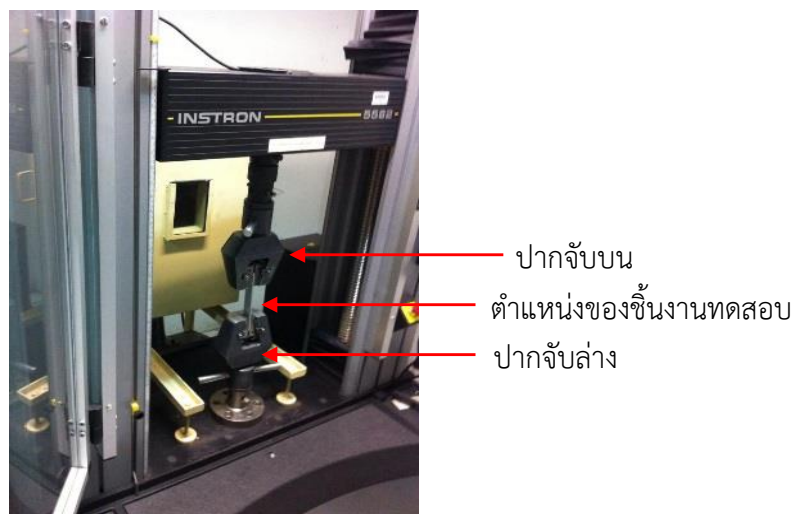
G คือ Gage Length

หน่วยของความเร็วในการทดสอบ คือ เมตร/วินาที

ซึ่งในการทดสอบจะใช้ความเร็วในการทดสอบจากการคำนวณจากสมการข้างต้น ได้ค่าความเร็ว เท่ากับ

$$v = \frac{25 \times 60}{1000} = 1.5 \text{ เมตร/วินาที}$$

หลังจากป้อนค่าและตรวจสอบค่าต่างๆ แล้ว ให้ทำการตรวจสอบอีกครั้งจากนั้นเริ่มทำการทดสอบได้ โดยติดตั้งชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 3.23 เมื่อชิ้นงานขาดออกจากกันแล้วให้เก็บข้อมูลที่ได้จากเครื่องทดสอบ เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.23 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบความทนแรงดึง

3.9 การวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งและความทนแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งและความทนแรงดึงจำเป็นต้องกำหนดขนาดของตัวอย่างและการทำซ้ำ เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือให้กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการกำหนดตัวอย่างและการทำซ้ำด้วยการอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM ของการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนของอะลูมิเนียมและอ้างอิงจากงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงที่ได้มีการวิจัยที่ผ่านมา เนื่องจากต้นทุนของวัสดุ (Al 7075) ในการทดลองมีราคาสูง โดยกำหนดให้มีขนาดตัวอย่างเท่ากับ 2 ตัวอย่างและมีการทำซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์ทางสถิติจะใช้การวิเคราะห์แบบแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย โดยไม่มีการบล็อกปัจจัย ซึ่งในการทำการทดลองจะทำการสุ่มการทดลองแต่ละเงื่อนไขโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติในการกำหนดลำดับการทดลองเพื่อให้ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลที่ได้มาอย่างสุ่ม ซึ่งแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ลำดับการทดลองของกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน

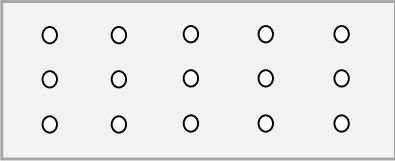
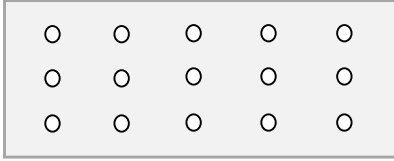
StdOrder	RunOrder	PtType	Block	Sol. HT. Time	Sol. HT Temp.
1	1	1	1	450	4
2	2	1	1	450	8
7	3	1	1	450	4
15	4	1	1	480	4
14	5	1	1	450	8
3	6	1	1	480	4
17	7	1	1	510	4
16	8	1	1	480	8
12	9	1	1	510	8
6	10	1	1	510	8
8	11	1	1	450	8
5	12	1	1	510	4
11	13	1	1	510	4
10	14	1	1	480	8
1	15	1	1	450	4
4	16	1	1	480	8
18	17	1	1	510	8
9	18	1	1	480	4

การเก็บข้อมูลของค่าความแข็งและค่าความทนแรงดึงมีลักษณะการเก็บดังต่อไปนี้

3.9.1 การเก็บข้อมูลค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

ลักษณะและการเก็บข้อมูลของค่าความแข็งที่ได้จากการวัด มีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1) ในการวัดความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 จำนวน 1 ชิ้น จะทำการวัดทั้งหมด 15 จุด ซึ่งให้แต่ละจุดแทนด้วย $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{15}$ จากการวัดความแข็ง 1 ชิ้นจะได้ค่าเฉลี่ยคือ \bar{X}_1 ของชิ้นที่ 1 (เป็นการเฉลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความแข็งในชิ้นงาน) ในการทดลองแต่ละซ้ำจะประกอบไปด้วยชิ้นงานที่นำมาวัดความแข็ง 2 ชิ้น และจะได้ค่าความแข็งของชิ้นที่ 2 จะได้ค่าเฉลี่ย \bar{X}_2 แสดงดังรูปที่ 3.24

	
ชิ้นที่ 1 $\frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{15}}{15} = \bar{X}_1$	ชิ้นที่ 2 $\frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{15}}{15} = \bar{X}_2$

รูปที่ 3.24 การเฉลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความแข็งในชิ้นงาน

2) นำค่าเฉลี่ย \bar{X}_1 และ \bar{X}_2 มาหาค่าเฉลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความแข็งระหว่างชิ้นงาน ซึ่งจะได้ค่า \bar{X} สำหรับการทดลองแต่ละซ้ำ โดยหนึ่งเงื่อนไขการทดลองจะมีการทดลอง 3 ซ้ำ และจะให้ค่า \bar{X} ทั้งหมด 3 ค่าต่อหนึ่งเงื่อนไขการทดลอง

3) นำค่า \bar{X} ที่ได้ทั้งหมดไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์แบบแพททอเรียล 2 ปัจจัย

3.9.2 การเก็บข้อมูลค่าความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

ลักษณะและการเก็บข้อมูลของค่าความทนแรงดึงที่ได้จากการวัด มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ในการทดสอบค่าความทนแรงดึง 1 ชิ้น จะให้ค่าความทนแรงดึง 1 ค่า ซึ่งจะให้แทนเป็นค่า X ของแต่ละชิ้น แสดงดังรูปที่ 3.25 ในการทดลองหนึ่งซ้ำจะให้ค่า X สองค่า จากนั้นนำค่า X ทั้งสองค่ามาหาเฉลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความทนแรงดึงระหว่างชิ้นงานจะได้เป็น \bar{X} ของแต่ละซ้ำ โดยหนึ่งเงื่อนไขการทดลองจะมีการทดลอง 3 ซ้ำ และจะให้ค่า \bar{X} ทั้งหมด 3 ค่าต่อหนึ่งเงื่อนไขการทดลอง



รูปที่ 3.25 ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบความทนแรงดึง (ให้ค่า X MPa ต่อหนึ่งชิ้น)

2) นำค่า \bar{X} ที่ได้ทั้งหมดไป วิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์แบบแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

3.10 การวิเคราะห์ต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน

ในการวิเคราะห์ต้นทุนของการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 นั้น จะแบ่งการวิเคราะห์ต้นทุนออกเป็น 2 ส่วน คือ อะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านการอบละลาย 4 ชั่วโมง และอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านการอบละลาย 8 ชั่วโมง ซึ่งในการวิเคราะห์ต้นทุนจำเป็นต้องทราบกระบวนการในแต่ละขั้นตอนของการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนและเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน โดยรายละเอียดและเวลาแต่ละขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 3.5 (การอบละลาย 4 ชั่วโมง) และตารางที่ 3.6 (การอบละลาย 8 ชั่วโมง)

ตารางที่ 3.5 ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C

ลำดับที่	ขั้นตอน	เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด
1	อุ่นเตาอบละลายให้ได้อุณหภูมิ 450°C	90*	08:00	09:30
2	นำชิ้นงานเข้าเตาอบละลาย	5	09:30	09:35
3	เวลาอบละลาย	240	09:35	13:35
4	อุ่นเตาบ่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 120°C	40**	14:55	13:35
5	นำชิ้นงานออกจากเตาอบละลายแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ	10	13:35	13:45
6	นำชิ้นงานเข้าเตาบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1	5	13:45	13:50
7	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1	120	13:50	15:50
8	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ	10	15:50	16:00

ตารางที่ 3.5 ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C (ต่อ)

ลำดับที่	ขั้นตอน	เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด
9	อุ่นเตาบ่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 170°C	20**	16:00	16:20
10	นำชิ้นงานเข้าเตาบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2	5	16:20	16:25
11	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2	90	16:25	17:55
12	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ	10	17:55	18:05

หมายเหตุ * อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาอบละลาย คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5°C/min.

** อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาบ่มแข็งเทียม คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3°C/min

จากตารางที่ 3.5 เป็นเวลาและขั้นตอนของการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้เวลาการอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C โดยใช้เวลาดูดกระบวนการทั้งหมด 645 นาที ซึ่งการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 480°C และ 510°C ใช้เวลาดูดกระบวนการเท่ากับ 651 และ 657 นาทีตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ตลอดกระบวนการมีความแตกต่างกันเพราะเวลาที่ใช้ในการอุ่นเตาอบละลายไม่เท่ากัน (อุณหภูมิ 450°C ใช้เวลาอุ่นเตาเท่ากับ 90 นาที อุณหภูมิ 480°C ใช้เวลาอุ่นเตาเท่ากับ 96 นาที และอุณหภูมิ 510°C ใช้เวลาอุ่นเตาเท่ากับ 106 นาที)

ตารางที่ 3.6 ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การอบละลาย 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C

ลำดับที่	ขั้นตอน	เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด
1	อุ่นเตาอบละลายให้ได้อุณหภูมิ 450°C	90*	08:00	09:30
2	นำชิ้นงานเข้าเตาอบละลาย	5	09:30	09:35
3	เวลาอบละลาย	480	09:35	17:35
4	อุ่นเตาบ่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 120°C	40**	16:55	17:35
5	นำชิ้นงานออกจากเตาอบละลายแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ	10	17:35	17:45
6	นำชิ้นงานเข้าเตาบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1	5	17:45	17:50
7	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1	120	17:50	19:50
8	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ	10	19:50	20:00
9	อุ่นเตาบ่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 170°C	20**	20:00	20:20

ตารางที่ 3.6 ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การอบละลาย 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C (ต่อ)

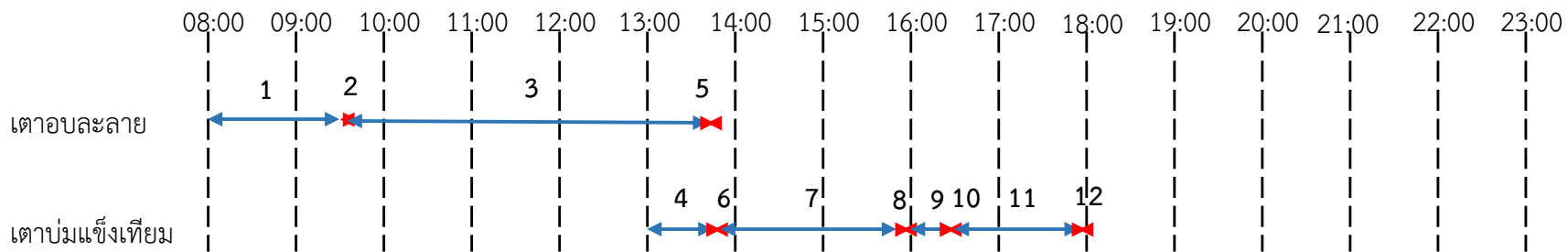
ลำดับที่	ขั้นตอน	เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด
10	นำชิ้นงานเข้าเตาอบแห้งเทียมครั้งที่ 2	5	20:20	20:25
11	อบแห้งเทียมครั้งที่ 2	90	20:25	21:55
12	นำชิ้นงานออกจากเตาอบแห้งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ	10	21:55	22:05

หมายเหตุ * อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาอบละลาย คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5°C/min.

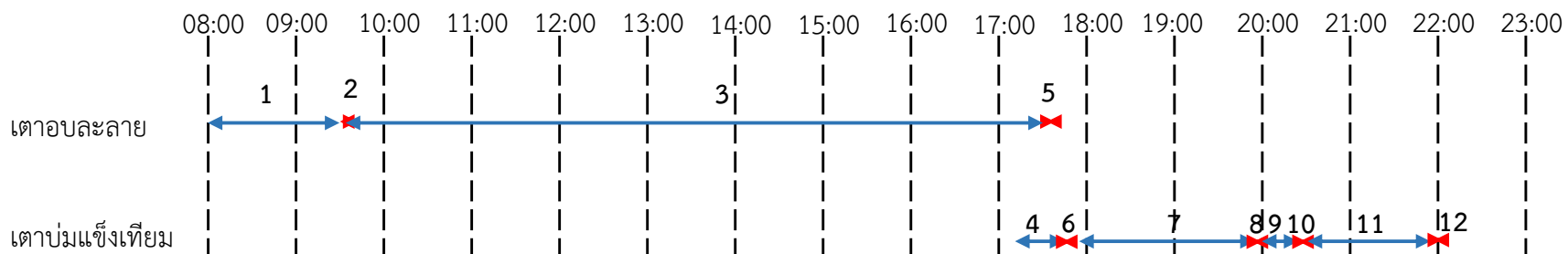
** อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาอบแห้งเทียม คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3°C/min.

จากตารางที่ 3.6 เป็นเวลาและขั้นตอนของการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้เวลาการอบละลาย 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C โดยใช้เวลาตลอดกระบวนการทั้งหมด 885 นาที ซึ่งการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 480°C และ 510°C ใช้เวลาตลอดกระบวนการเท่ากับ 891 และ 897 นาที ตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ตลอดกระบวนการมีความแตกต่างกันเพราะเวลาที่ใช้ในการอุ่นเตาอบละลายไม่เท่ากัน (อุณหภูมิ 450°C ใช้เวลาอุ่นเตาเท่ากับ 90 นาที อุณหภูมิ 480°C ใช้เวลาอุ่นเตาเท่ากับ 96 นาที และอุณหภูมิ 510°C ใช้เวลาอุ่นเตาเท่ากับ 106 นาที)

จากตารางที่ 3.5 และ 3.6 สามารถเขียนแผนภาพแสดงขั้นตอนและเวลาของกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนได้ดังรูปที่ 3.26 (ใช้เวลาการอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C) และรูปที่ 3.27 (ใช้เวลาการอบละลาย 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C)



รูปที่ 3.26 แผนภาพแสดงขั้นตอนและเวลาของกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เวลาการอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C



รูปที่ 3.27 แผนภาพแสดงขั้นตอนและเวลาของกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เวลาการอบละลาย 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C

หมายเหตุ \longleftrightarrow แสดงการทำงานของเครื่องจักร \longleftrightarrow แสดงการทำงานของคน
 ความกว้าง 1 ช่อง เท่ากับเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งเริ่มการทำงาน 08:00-18:05 น. (รูปที่ 3.26) และเริ่มทำงาน 08:00-22:05 น. (รูปที่ 3.27)

จากรูปที่ 3.26 และรูปที่ 3.27 พบว่าในการคิดค่าจ้างแรงงานจำเป็นต้องจ้างแรงงาน 2 กะ หรือจ้างแบบ OT ซึ่งการจ้าง 2 กะ จะทำให้ค่าจ้างแรงงานถูกกว่าจ้างแบบ OT สำหรับการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เวลาในการอบละลาย 4 ชั่วโมง สามารถทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนได้ 2 ล็อตต่อหนึ่งวัน เพื่อเป็นการใช้เครื่องจักรและแรงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถแสดงรายละเอียดขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน 2 ล็อตต่อหนึ่งวัน ได้ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C ผลิตจำนวน 2 ล็อตต่อหนึ่งวัน

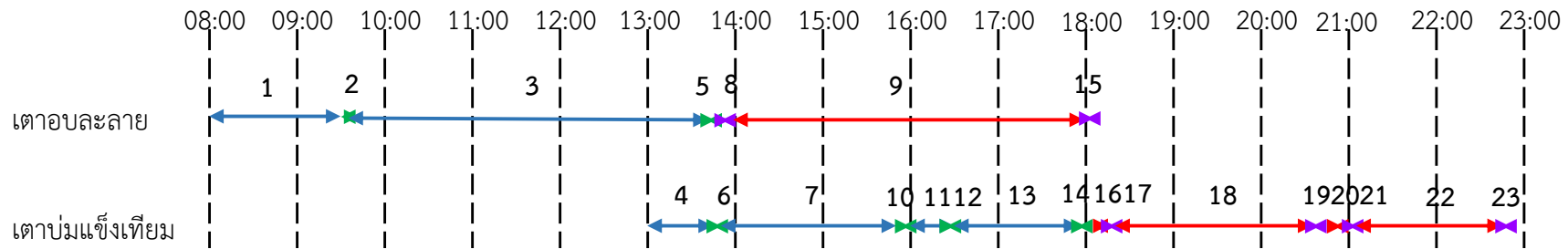
ลำดับที่	ขั้นตอน	เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด
1	อุ่นเตาอบละลายให้ได้อุณหภูมิ 450°C (1)	90*	08:00	09:30
2	นำชิ้นงานเข้าเตาอบละลาย (1)	5	09:30	09:35
3	เวลาอบละลาย (1)	240	09:35	13:35
4	อุ่นเตาบ่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 120°C (1)	40**	13:05	13:45
5	นำชิ้นงานออกจากเตาอบละลายแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (1)	10	13:35	13:45
6	นำชิ้นงานเข้าเตาบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1 (1)	5	13:45	13:50
7	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1 (1)	120	13:50	15:50
8	นำชิ้นงานเข้าเตาอบละลาย (2)	5	13:50	13:55
9	เวลาอบละลาย (2)	240	13:55	17:55
10	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (1)	10	15:50	16:00
11	อุ่นเตาบ่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 170°C (1)	20**	16:00	16:20
12	นำชิ้นงานเข้าเตาบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 (1)	5	16:20	16:25
13	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 (1)	90	16:25	17:55
14	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (1)	10	17:55	18:05
15	นำชิ้นงานออกจากเตาอบละลายแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (2)	10	18:05	18:15

ตารางที่ 3.7 ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การอบละลาย 4 ชั่วโมง ผลิตจำนวน 2 ลีตต่อหนึ่งวัน (ต่อ)

ลำดับที่	ขั้นตอน	เวลาที่ ใช้ (นาที)	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด
16	รอเตाप่มแข็งเทียมอุณหภูมิลดลง ถึงอุณหภูมิ 120°C (2)	20**	18:05	18:25
17	นำชิ้นงานเข้าเตाप่มแข็งเทียมครั้งที่ 1 (2)	5	18:25	18:30
18	ป่มแข็งเทียมครั้งที่ 1 (2)	120	18:30	20:30
19	นำชิ้นงานออกจากเตाप่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (2)	10	20:30	20:40
20	อุ่นเตाप่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 170°C (2)	20**	20:40	21:00
21	นำชิ้นงานเข้าเตाप่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 (2)	5	21:00	21:05
22	ป่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 (2)	90	21:05	22:35
23	นำชิ้นงานออกจากเตाप่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (2)	10	22:35	22:45

หมายเหตุ * อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาอบละลาย คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5°C/min.
 ** อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตाप่มแข็งเทียม คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3°C/min.
 (1) ลีตที่ 1
 (2) ลีตที่ 2

จากตารางที่ 3.7 สามารถเขียนแผนภาพแสดงขั้นตอนและเวลาของกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนใหม่ได้ดังรูปที่ 3.28 (ใช้เวลาการอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C) โดยแผนภาพนี้จะแสดงการผลิตแบบ 2 ลีตต่อหนึ่งวัน ซึ่งใช้เวลาทั้งหมด 1,180 นาที ส่วนการอบละลายที่อุณหภูมิ 480°C และ 510°C จะใช้เวลาเท่ากับ 1,186 นาที และ 1,192 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 3.28 แผนภาพแสดงขั้นตอนและเวลาของกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เวลาการอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C (การผลิต 2 ล็อตต่อหนึ่งวัน)

หมายเหตุ

ล็อตที่ 1	↔ (blue)	แสดงการทำงานของเครื่องจักร	↔ (green)	แสดงการทำงานของคน
ล็อตที่ 2	↔ (red)	แสดงการทำงานของเครื่องจักร	↔ (purple)	แสดงการทำงานของคน

ความกว้าง 1 ช่อง เท่ากับเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งเริ่มการทำงาน 08:00-22:45 น.

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

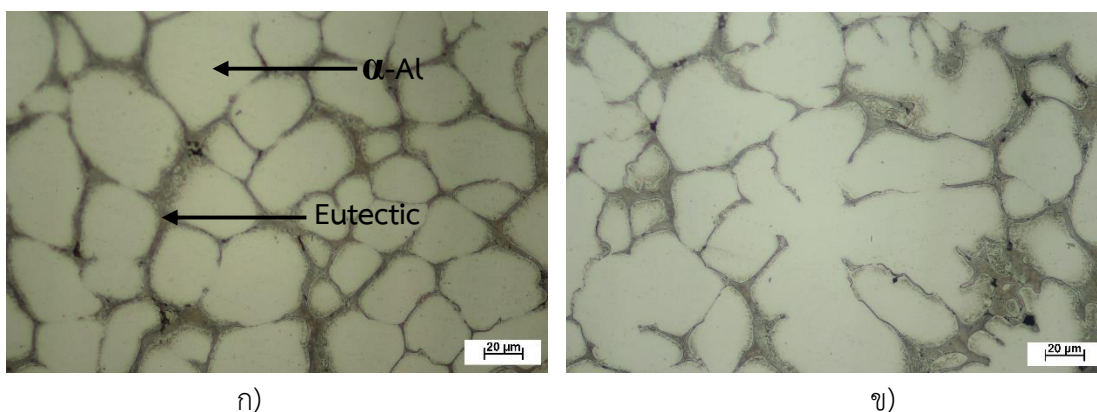
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาค่าสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยใช้กระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง (double aged) ซึ่งในบทที่ 2 และ 3 ได้กล่าวถึงทฤษฎีและวิธีการดำเนินงานวิจัย ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการวิจัยซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะแบ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วน คือ การหาค่าความแข็งแรงสูงสุด การหาค่าความทนแรงดึงสูงสุด ค่ากำลังครากและค่า %elongation ของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ในสถานะต่างๆ การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค และการวิเคราะห์ต้นทุนเบื้องต้นในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) เพื่อให้ทราบถึงต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่อชิ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075

โครงสร้างจุลภาคเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ค่าสมบัติเชิงกลของโลหะเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของโลหะสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การชุบผิวแข็ง การปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน (heat treatment process) เป็นต้น โดยการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 นั้น เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนแต่ละเงื่อนไขและเปรียบเทียบกับโครงสร้างเดิมก่อนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคก่อนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน T6 (as cast)

ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS จะมีลักษณะเป็นเกรนแบบก้อนกลม ดังรูปที่ 4.1 ก) ซึ่งเกิดจากการทำให้น้ำโลหะแข็งตัวบางส่วนก่อนการขึ้นรูป โดยการปล่อยฟองแก๊สไปบริเวณเพื่อให้เกรนแบบกึ่งไม้แตกตัวและเกิดเป็นเกรนแบบก้อนกลมขึ้น และบางบริเวณเกรนที่ได้จะเป็นเกรนดอกกุหลาบ (rosettarian) ดังรูปที่ 4.1 ข) โดยที่โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS จะประกอบด้วยเฟส α -Al ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างแบบก้อนกลมที่ล้อมรอบด้วยเฟสยูเทคติก (α -Al + Mg(Zn,Cu,Al)₂) [30] และพบว่าบริเวณที่เฟสยูเทคติกมีเฟส intermetallic [31] ซึ่งเฟสนี้เป็นการฟอร์มตัวของธาตุ Fe, Cu และ Al



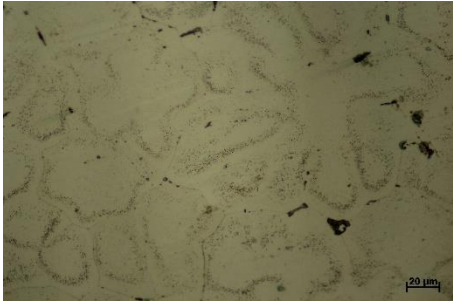
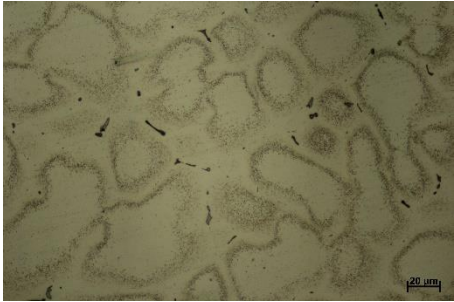
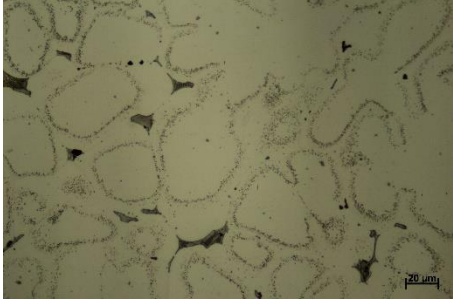
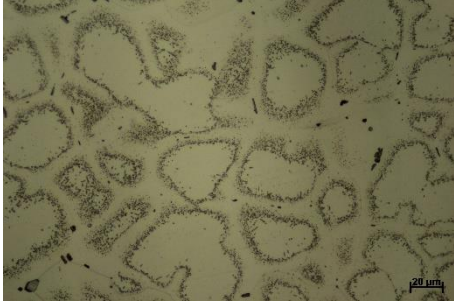
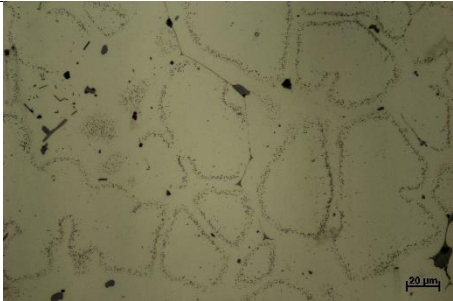
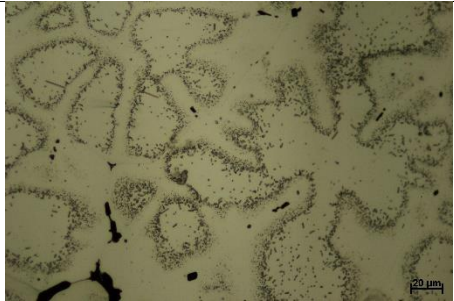
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการึงของแข็ง โดยใช้เทคนิค GISS (as cast) ก) เกรนก้อนกลม และ ข) เกรนดอกกุหลาบ

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

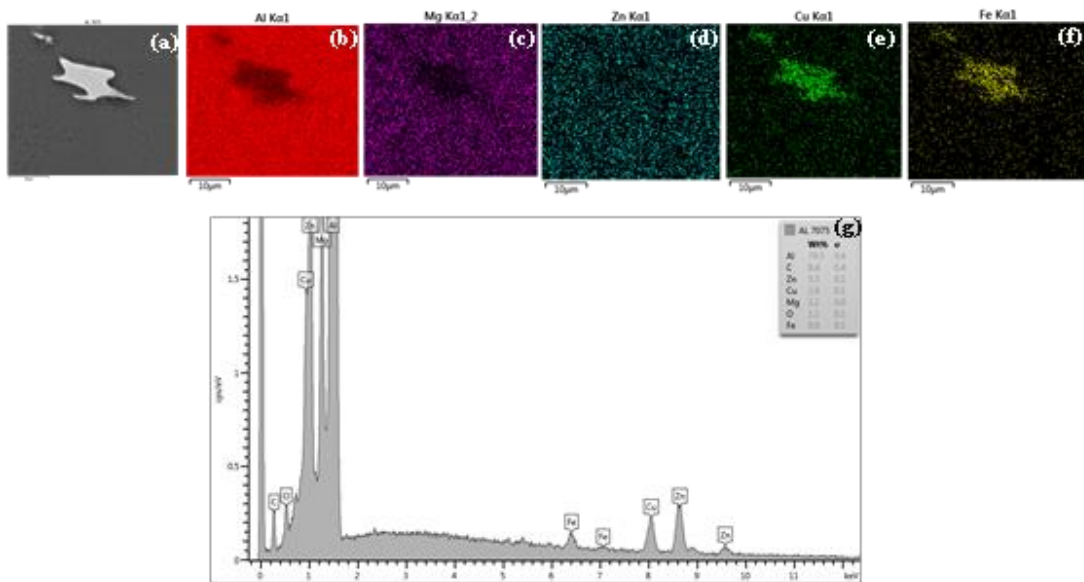
หลังจากนำเอาอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการึงของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS ไปผ่านการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน ทำให้โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไป โดยเฟสยูเทคติกจะละลายและรวมตัวกับ เฟส α -Al ซึ่งมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปแสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะแสดงโครงสร้างจุลภาคของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง โดยทุกเงื่อนไขผ่านการบ่มแข็งเทียมสองขั้นตอน

โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะสังเกตเห็นว่า รูปร่างของเกรนจะไม่มีแตกต่างไปจากโครงสร้างก่อนปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน โดยสามารถสรุปได้ว่า การศึกษาโครงสร้างจุลภาคก่อนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน T6 โครงสร้างจุลภาคจะมีอะลูมิเนียมเป็นเฟส α มีลักษณะเป็นก้อนกลมกระจายตัวอยู่ร่วมกับสังกะสีที่มีลักษณะเป็นเส้น เมื่อนำอะลูมิเนียมเกรด 7075 ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมแบบสองขั้นตอน พบว่ามีการละลายและการก่อตัวของเฟสใหม่ขึ้นมา โดยพบว่าเฟสยูเทคติกมีความบางลงเนื่องจากการอบละลายทำให้เกิดการรวมตัวเข้ากับเฟส α และพบว่ามีเฟส intermetallic phase เพิ่มขึ้น (Cu_2FeAl_7) [31]

ตารางที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน

อุณหภูมิ อบ ละลาย	เวลาอบละลาย	
	4 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง
450°C		
480°C		
510°C		

ซึ่งการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงไม่สามารถแยกได้ว่าเป็นการรวมตัวของธาตุใด โดยในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุต่างๆ จะต้องนำเอาชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยจะการวิเคราะห์โครงสร้างของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.2 จากรูปจะวิเคราะห์ธาตุทั้งหมด 5 ธาตุ คือ Al, Mg, Zn, Cu และ Fe ซึ่งพบว่าธาตุ Al มีการกระจายตัวได้มากที่สุด ธาตุ Mg และ Zn มีการกระจายตัวได้น้อยกว่าธาตุ Al ส่วนธาตุ Cu และ Fe มีการกระจายตัวได้น้อยและยังมีการเกาะกลุ่มของธาตุดังกล่าวอยู่ด้วยกัน



รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้กล้อง SEM

4.2 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS

ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล จำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบความแข็งและความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 เพื่อหาค่าความแข็งและความทนแรงดึงเริ่มต้นของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS เพื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับความเปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 7075 (as cast)

ในการทดสอบค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 (as cast) จะใช้อะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS และตัดเป็นชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด $40 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$ ซึ่งใช้ชิ้นงานในการวัดค่าความแข็งเริ่มต้นก่อนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนและการบ่มแข็งเทียมแบบสองขั้นตอน จำนวนทั้งหมด 3 ชิ้น ในแต่ละขั้นจะวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์และใช้หัวกดสเกล B (ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ($\frac{1}{16}$ ")) ในการวัดค่าความแข็งจะทำการวัดค่าความแข็งทั่วทั้งชิ้นงานจำนวน 15 จุด/ชิ้น ค่าความแข็งของชิ้นงานแต่ละชั้นแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS

ตำแหน่งที่	ชิ้นงานตัวอย่าง (HRB)		
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
1	59.3	60.4	62.3
2	62.9	57.8	60.4
3	62.3	60.2	61.5
4	67.2	64.0	62.2
5	59.7	54.9	58.7
6	60.2	63.1	59.5
7	58.9	62.6	60.1
8	60.3	60.2	62.5
9	62.6	60.9	61.6
10	64.5	59.7	59.0
11	62.4	63.1	58.4
12	63.0	62.3	62.5
13	59.9	62.8	64.2
14	64.2	59.6	60.3
15	61.3	64.2	61.2
\bar{X}	61.9	61.1	61.0

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 61.3 HRB โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยใช้โลหะเหลวในงานทดลองของ นพพล เหลืองอักษร และ นฤมล ปลื้มจิตต์. พบว่า ค่าความแข็งที่ได้มีค่ามากกว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบใช้โลหะเหลว โดยค่าความแข็งของการขึ้นรูปโดยใช้โลหะเหลวให้ค่าความแข็งเท่ากับ 60 HRB [32]

4.2.2 ค่าความทนแรงดึง (Tensile strength) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 7075 (as cast)

ในการทดสอบค่าความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 (as cast) จะใช้อะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS และตัดเป็นชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด $6 \times 15 \times 100 \text{ mm}^3$ ซึ่งจะใช้ชิ้นงานในการวัดค่าความทนแรงดึงเริ่มต้นก่อนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนและการบ่มแข็งเทียมแบบสองขั้นตอน จำนวนทั้งหมด 3 ชิ้น ค่าความทนแรงดึงที่ได้แต่ละชิ้นดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS

	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	\bar{X}
ค่าความทนแรงดึง (MPa)	212.12	206.99	215.87	211.66

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS มีค่าความทนแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 211.66 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการขึ้นรูปโดยใช้โลหะเหลวในงานทดลองของ นพพล เหลืองอักษร และ นฤมล ปลื้มจิตต์. พบว่า ค่าความทนแรงดึงที่ได้มีค่ามากกว่าค่าความทนแรงดึงที่ใช้การขึ้นรูปโดยใช้โลหะเหลว โดยค่าความทนแรงดึงที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้โลหะเหลวให้ค่าเท่ากับ 195.00 MPa [32]

4.2.3 ค่าความแข็งแรงคราก (Yield strength) และ ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด (%Elongation) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 7075 (as cast)

ค่าความแข็งแรงครากและเปอร์เซ็นต์ความยืดของอะลูมิเนียมเกรด 7075 (as cast) ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS ได้จากการทดสอบค่าความทนแรงดึง ซึ่งค่าความแข็งแรงครากของอะลูมิเนียมเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด คือค่าการยืดตัวของวัสดุ ซึ่งจากการทดสอบค่าความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 (as cast) ให้ค่าความแข็งแรงครากและค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงคราก (Yield strength) ของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS

	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	\bar{X}
ค่าความแข็งแรงคราก (MPa)	148.48	144.89	151.11	148.16
เปอร์เซ็นต์ความยืด (%)	2.7	3.4	2.9	3

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าความแข็งแรงครากและค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 148.16 MPa และ 3% ตามลำดับ

4.3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลด้วยวิธีการทางสถิติ

จากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ในงานวิจัยนี้จะใช้ขนาดตัวอย่างในการทดลองเท่ากับ 3 ซ้ำ โดยอ้างอิงจากการทดลองจาก ASTM และการทดลองที่ผ่านมา

4.3.1 การวิเคราะห์ค่าความแข็ง (Hardness)

การวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมแบบสองขั้นตอน จะทำการวิเคราะห์ค่ากลางของข้อมูล สมมติฐานการทดลอง การวิเคราะห์ตัวแบบการทดลอง ซึ่งจะใช้โปรแกรมสถิติในการวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1.1 การตั้งสมมติฐานการทดลอง

การตั้งสมมติฐานการทดลอง เพื่อพิสูจน์ว่าอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายมีผลต่อความแข็งหรือไม่ โดยการกำหนดให้ τ คือ อุณหภูมิในการอบละลาย และ β คือ เวลาในการอบละลาย โดยใช้สมมติฐานดังต่อไปนี้

1) การพิจารณา Main Effect

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของอุณหภูมิในการอบละลาย (ปัจจัย A)

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 \text{ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของอุณหภูมิในการ}$$

อบละลายไม่แตกต่างกัน

$$H_1 : \text{at least one } \tau_i \neq 0 ; i = 1, 2, 3 \text{ สำหรับทุกระดับ}$$

อิทธิพลของอุณหภูมิในการอบละลายแตกต่างกัน

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของเวลาในการอบละลาย (ปัจจัย B)

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 \text{ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของเวลาในการอบละลาย}$$

ไม่แตกต่างกัน

$$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \text{ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของเวลาในการอบละลาย}$$

แตกต่างกัน

2) การพิจารณา 2 Factor Interaction Effect

ทดสอบอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างอุณหภูมิในการอบละลายและเวลาในการอบละลาย

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$ for all i, j ทุกระดับ ไม่มีอิทธิพลของ Interaction ($i=1, 2, 3 ; j=1, 2$)

$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ At least one i, j โดยมีบาง i, j มีอิทธิพลของ Interaction ($i=1, 2, 3 ; j=1, 2$)

4.3.1.2 การวิเคราะห์ค่ากลางของข้อมูล

การวิเคราะห์ค่ากลางของข้อมูลจะทำการวิเคราะห์ค่ากลาง คือ ค่าเฉลี่ย เพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางสถิติ ซึ่งจะใช้ข้อมูลของค่าความแข็งเฉลี่ยในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและการบ่มแข็งเทียม (T6)

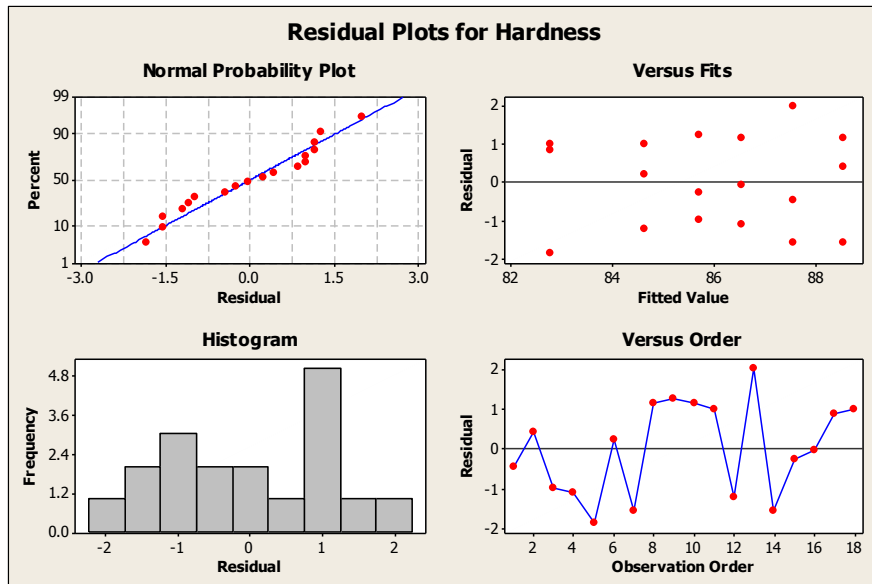
ลำดับ	สถานะของการทดลอง		ความแข็งเฉลี่ย (HRB)			\bar{X}
	อุณหภูมิอบละลาย	เวลาอบละลาย	Rep. 1	Rep 2	Rep. 3	
1	450°C	4 hrs.	87.12	86.00	89.57	87.56
2	450°C	8 hrs.	88.97	89.71	86.99	88.56
3	480°C	4 hrs.	84.71	86.96	85.45	85.71
4	480°C	8 hrs.	85.44	87.70	86.50	86.55
5	510°C	4 hrs.	80.90	83.76	83.62	82.76
6	510°C	8 hrs.	84.83	83.40	85.60	84.61

หมายเหตุ ทุกสถานะการทดลองจะผ่านการบ่มแข็ง 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 ใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 hrs. ส่วนครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 hrs. ตามลำดับ

4.3.1.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง

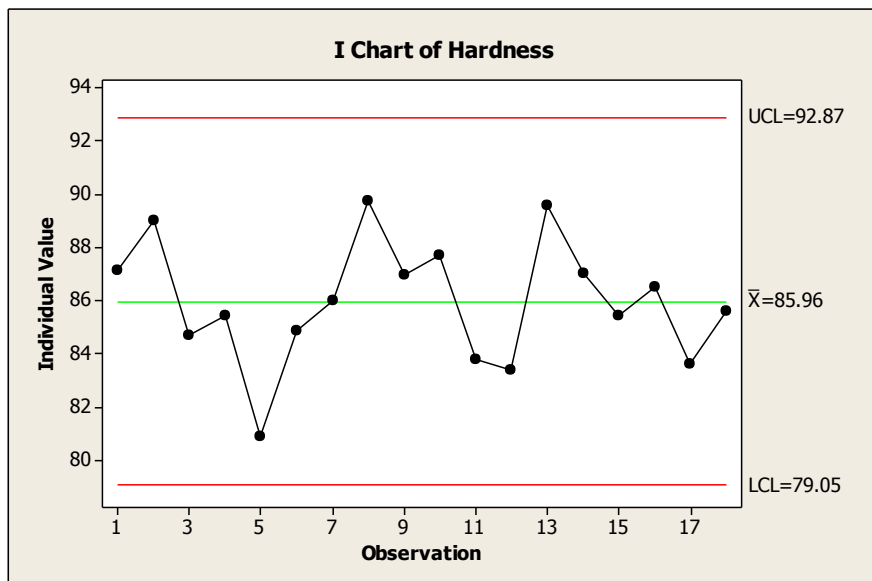
จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยจะนำไปคำนวณด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งได้ผลการคำนวณดังต่อไปนี้

โดยเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อพิสูจน์ว่าข้อมูลมีลักษณะแบบสุ่ม เป็นเส้นตรง และการกระจายตัวเป็นลักษณะใด เพื่อให้มั่นใจว่าค่าของความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลองทั้งหมดอยู่ภายใต้การควบคุม แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะพิจารณา ดังนี้



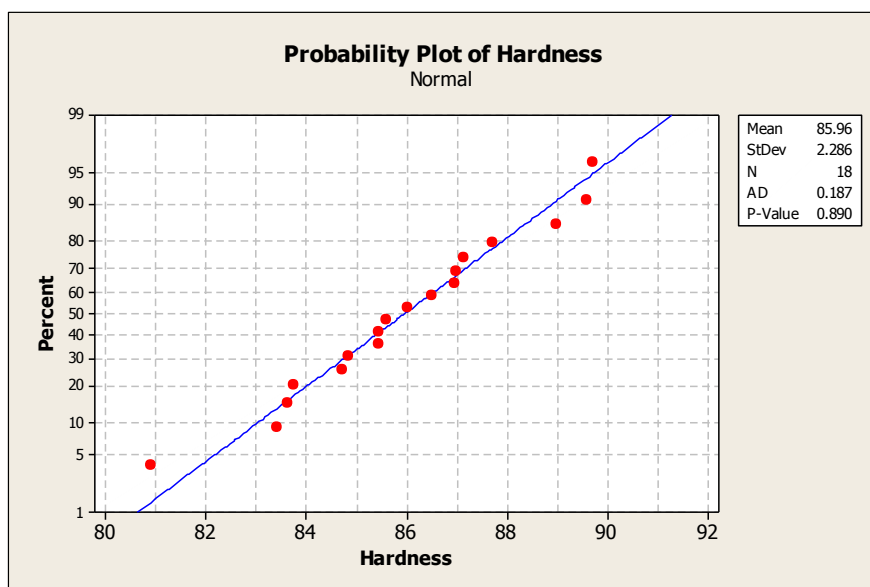
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง (ค่าความแข็ง)

1) พิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล โดยจะดูจากกราฟ Residual Versus the Order of the Data จากรูปที่ 4.3 (Model Adequacy Checking) เป็นการพิจารณาว่าข้อมูลมีลักษณะสุ่มอยู่ภายใต้พิสัยควบคุมหรือไม่ จากการพิจารณาจุดในรูปดังกล่าวไม่พบความผิดปกติของเส้นกราฟข้อมูล แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม ความเป็นอิสระของข้อมูล สามารถพิจารณาจากกราฟ Residual โดยกราฟที่ได้ไม่มีจุดที่อยู่นอกควบคุม (Out of Control) ไม่มีการรัน (Run) ของข้อมูล และไม่เกิดแนวโน้ม (Trend) ของข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.4 สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน (ข้อมูลมีลักษณะแบบสุ่ม)



รูปที่ 4.4 กราฟความเป็นอิสระของข้อมูล (I Chart of Residuals of hardness)

2) พิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลเป็นเส้นตรงหรือไม่ โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.3 (Model Adequacy Checking) จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่มีบางจุดกระจายตัวออกนอกเส้น ทำให้ต้องทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลโดยใช้ Normal Probability ในการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.5 จากข้อกำหนด Alpha (α) = 0.05 ซึ่งสามารถอ่านค่า P-value ได้ = 0.890 ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล

3) พิจารณาข้อมูลรอบค่าศูนย์ ลักษณะการกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกัน โดยมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ (Model Adequacy Checking) แสดงดังรูปที่ 4.3 ลักษณะของข้อมูล Residuals versus the fitted values ที่ได้จะมีค่าบางค่าที่จะกระจายตัวออกห่างจากศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอ ทำให้ไม่มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขของการทดลอง ซึ่งจะต้องมีการทดสอบสอบความเท่ากันของความแปรปรวนในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ในรูปที่ 4.6 แสดงช่วงของความเชื่อมั่น ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแข็งจากเงื่อนไขต่างๆ มีความเหลื่อมกัน แสดงให้เห็นว่า ความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลอง 6 เงื่อนไขการทดลองนั้น ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถทดสอบได้ดังนี้

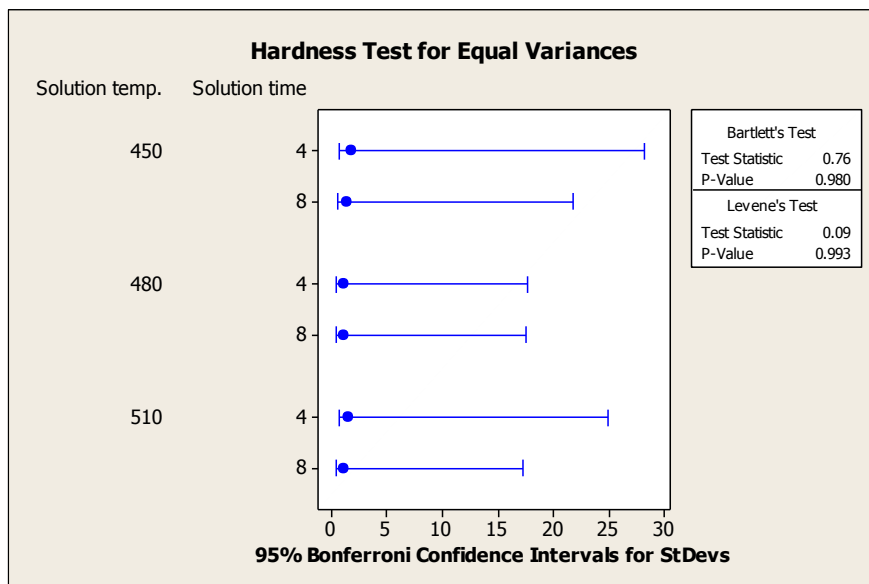
การทดสอบความแตกต่างของความแปรปรวน โดยใช้สมมติฐานการทดลอง ซึ่งจะกำหนดให้ σ_i^2 ; $i=1, 2, 3, \dots, 6$ คือ ความแปรปรวนของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2 = \sigma_6^2$ ความแปรปรวนของเงื่อนไขการทดลองทั้ง 6 เท่ากัน

$H_1 : \text{at least one } \sigma_i^2 \neq 0 ; i=1, 2, 3, \dots, 6$ ความแปรปรวนของเงื่อนไขการทดลองทั้ง 6 ไม่เท่ากัน

โดยทำการทดสอบสมมติฐานการทดลองดังกล่าว ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

จาก Bartlett's Test แสดงผลการคำนวณค่าความแปรปรวนแสดงดังรูปที่ 4.6 นั่นคือ ยอมรับ H_0 เนื่องจากค่า P-value = 0.980 ซึ่งมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่า $\alpha = 0.05$ จึงสามารถสรุปได้ว่าความแปรปรวนของเงื่อนไขการทดลองทั้ง 6 เงื่อนไขนั้น มีค่าเท่ากัน หรือมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.6 การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน (ความแข็ง)

จากข้อมูลค่าความแข็งในตารางที่ 4.5 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลของค่าความแข็งในเงื่อนไขการทดลองต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตาราง ANOVA for Hardness (การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายของกระบวนการทางความร้อน)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-Value
Temp.	2	57.680	57.680	28.840	14.73	0.001
Time	1	6.783	6.783	6.783	3.46	0.087
Temp.*Time	2	0.889	0.889	0.444	0.23	0.800
Error	12	23.502	23.502	1.958		
Total	17	88.854				
S = 1.39945		R-Sq = 73.55%		R-Sq(adj) = 80.74%		

จากตารางที่ 4.6 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 73.55% นั่นคือ ความผันแปรต่างๆ ของการทดลองที่สามารถควบคุมได้ (Controllable) เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์หรือ

ปัจจัยต่างๆ ที่กำหนดให้คงที่ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 73.55% ส่วนที่เหลือประมาณ 26.45% เกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) ดังนั้นในการออกแบบการทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองที่ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

4.3.1.4 ทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานในงานวิจัยนี้ จะทำการพิจารณาผลที่ได้จากผลกระทบหลัก (main effects) และผลกระทบ 2 ปัจจัย (interaction) ซึ่งแสดงการทดสอบดังนี้

พิจารณาผลกระทบหลัก (main effects)

1) ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของอุณหภูมิอบละลาย (Factor A)

$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3$ สำหรับทุกระดับอิทธิพลของอุณหภูมิอบละลายไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \text{at least one } \tau_i \neq 0 ; i = 1, 2, 3$ สำหรับบางระดับอิทธิพลของอุณหภูมิอบละลายแตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.6 ทำให้ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่าของ P-value = 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลมาสนับสนุนว่า อิทธิพลของอุณหภูมิอบละลาย หรือ (Factor A) มีผลต่อค่าความแข็งที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2) ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของเวลาอบละลาย (Factor B)

$H_0 : \beta_1 = \beta_2$ สำหรับทุกระดับอิทธิพลของเวลาอบละลายไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2$ สำหรับบางระดับอิทธิพลของเวลาอบละลายแตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.6 ทำให้ยอมรับ H_0 เนื่องจากค่าของ P-value = 0.087 ซึ่งมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับค่า $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลมาสนับสนุนว่า อิทธิพลของเวลาอบละลาย หรือ (Factor B) ไม่มีผลต่อค่าความแข็งที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

พิจารณา 2 Factor Interaction Effect

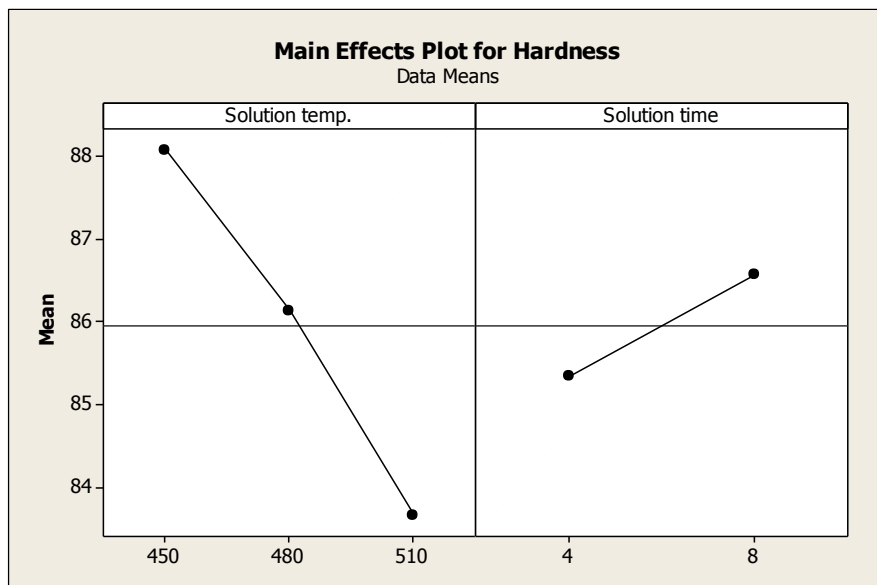
ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบละลาย

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$ for all i, j ทุกระดับ ไม่มีอิทธิพลของ Interaction ($i=1, 2, 3 ; j=1, 2$)

$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ At least one i, j โดยมีบาง i, j มีอิทธิพลของ Interaction ($i=1, 2, 3 ; j=1, 2$)

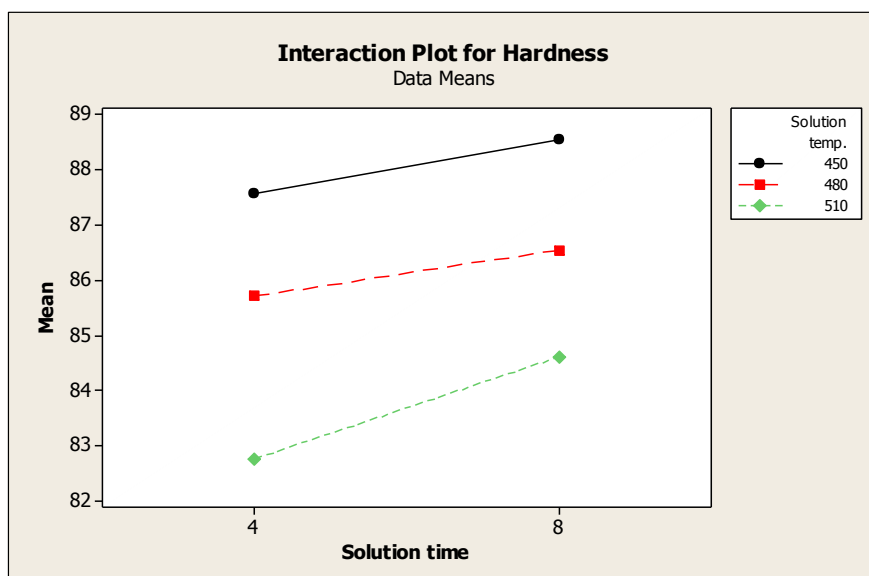
จากตารางที่ 4.6 ทำให้ยอมรับ H_0 เนื่องจากค่าของ P-value = 0.800 ซึ่งมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับค่า $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลมาสนับสนุนว่า อิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบละลาย ไม่มีผลต่อค่าความแข็งที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

อุณหภูมิของการอบละลายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็ง ซึ่งพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจาก 450°C เป็น 480°C และ 510°C ทำให้ค่าของความแข็งเฉลี่ยของแต่ละอุณหภูมิในการอบละลายนั้นลดลง และการใช้เวลาในการอบละลาย 4 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง พบว่าเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอุณหภูมิและเวลาในการอบละลาย

และผลของทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายที่ส่งผลต่อความแข็ง แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายที่ส่งผลต่อความแข็ง

4.3.2 การวิเคราะห์ค่าความทนแรงดึง (Tensile strength)

จากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ในงานวิจัยนี้จะใช้ขนาดตัวอย่างในการทดลองเท่ากับ 3 ซ้ำ โดยอ้างอิงจากการทดลองจาก ASTM และการทดลองที่ผ่านมา

4.3.2.1 การตั้งสมมติฐานการทดลอง

การตั้งสมมติฐานการทดลอง เพื่อพิสูจน์ว่าอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายมีผลต่อความทนแรงดึงหรือไม่ โดยการกำหนดให้ τ คือ อุณหภูมิในการอบละลาย และ β คือ เวลาในการอบละลาย โดยใช้สมมติฐานดังต่อไปนี้

1) การพิจารณา Main Effect

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของอุณหภูมิในการอบละลาย (ปัจจัย A)

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 \text{ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของอุณหภูมิในการ}$$

อบละลายไม่แตกต่างกัน

$$H_1 : \text{at least one } \tau_i \neq 0 ; i = 1, 2, 3 \text{ สำหรับทุกระดับ}$$

อิทธิพลของอุณหภูมิในการอบละลายแตกต่างกัน

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของเวลาในการอบละลาย (ปัจจัย B)

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 \text{ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของเวลาในการอบละลาย}$$

ไม่แตกต่างกัน

$$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \text{ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของเวลาในการอบละลาย}$$

แตกต่างกัน

2) การพิจารณา 2 Factor Interaction Effect

ทดสอบอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างอุณหภูมิในการอบละลายและเวลาในการอบละลาย

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ for all } i, j \text{ ทุกระดับ ไม่มีอิทธิพลของ Interaction}$$

($i=1, 2, 3 ; j=1, 2$)

$$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ At least one } i, j \text{ โดยมีบาง } i, j \text{ มีอิทธิพลของ}$$

Interaction ($i=1, 2, 3 ; j=1, 2$)

4.3.2.2 การวิเคราะห์ค่ากลางของข้อมูล

การวิเคราะห์ค่ากลางของข้อมูลจะทำการวิเคราะห์ค่ากลาง คือ ค่าเฉลี่ย เพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางสถิติ ซึ่งจะใช้ข้อมูลของค่าความทนแรงดึงเฉลี่ยในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและการบ่มแข็งเทียม (T6)

ลำดับ	สถานะของการทดลอง		ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)			\bar{X}
	อุณหภูมิอบละลาย	เวลาอบละลาย	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	
1	450 °C	4 hrs.	467.87	479.39	484.69	477.32
2	450 °C	8 hrs.	491.99	487.98	459.88	479.95
3	480 °C	4 hrs.	440.93	477.95	450.95	456.61
4	480 °C	8 hrs.	460.85	467.90	474.71	467.82
5	510 °C	4 hrs.	433.00	397.00	416.00	415.33
6	510 °C	8 hrs.	427.60	439.36	410.91	425.96

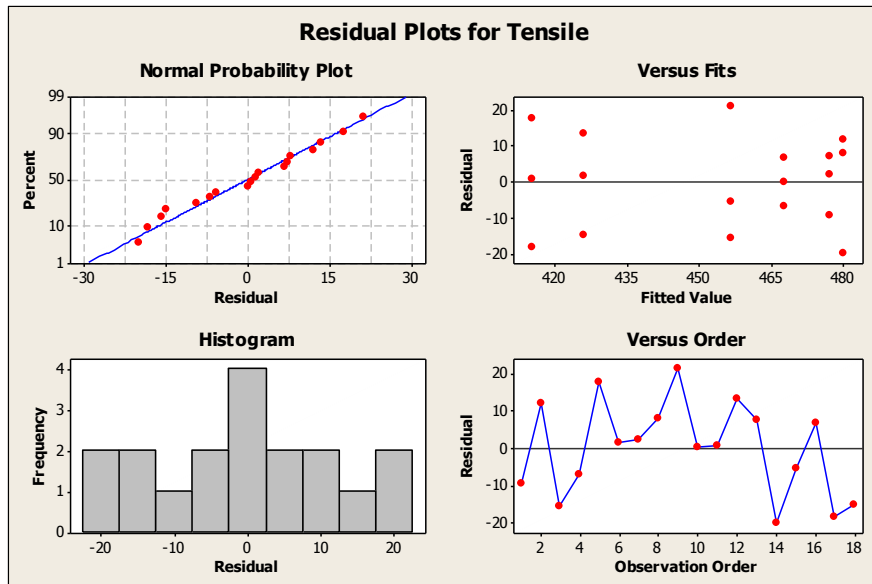
หมายเหตุ ทุกสถานะการทดลองจะผ่านการบ่มแข็ง 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 ใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 hrs. ส่วนครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 hrs. ตามลำดับ

4.3.2.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยจะนำไปคำนวณด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งได้ผลการคำนวณดังต่อไปนี้

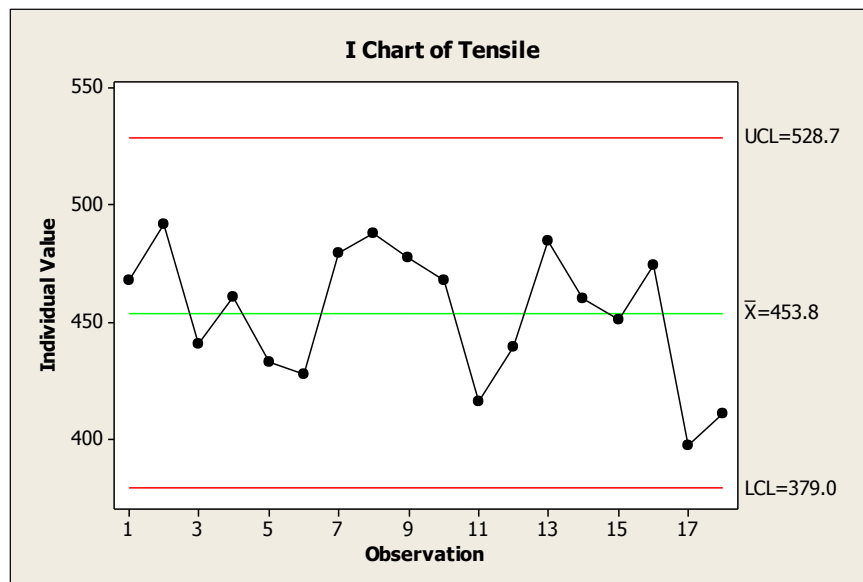
เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อพิสูจน์ว่าข้อมูลมีลักษณะแบบสุ่ม เป็นเส้นตรง และการกระจายตัวเป็นลักษณะใด เพื่อให้มั่นใจว่าค่าของความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลองทั้งหมดอยู่ภายใต้การควบคุม ซึ่งจะพิจารณาดังนี้

1) พิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล โดยจะดูจากกราฟ Residual Versus the Order of the Data จากรูปที่ 4.9 (Model Adequacy Checking) เป็นการพิจารณาว่าข้อมูลมีลักษณะสุ่มอยู่ภายใต้พิสัยควบคุมหรือไม่ จากการพิจารณาจุดในรูปดังกล่าวไม่พบความผิดปกติของเส้นกราฟข้อมูล แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง (ความทนแรงดึง)

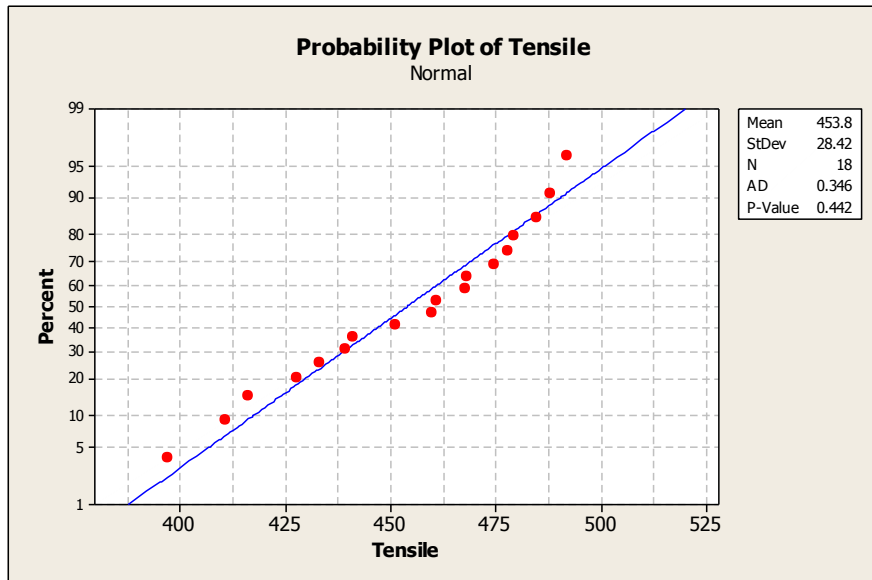
ความเป็นอิสระของข้อมูล สามารถพิจารณาจากกราฟ Residual โดยกราฟที่ได้ไม่มีจุดที่อยู่นอกควบคุม (Out of Control) ไม่มีการรัน (Run) ของข้อมูล และไม่เกิดแนวโน้ม (Trend) ของข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.10 สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน (ข้อมูลมีลักษณะแบบสุ่ม)



รูปที่ 4.10 กราฟความเป็นอิสระของข้อมูล (I Chart of Residuals of Tensile strength)

2) พิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลเป็นเส้นตรงหรือไม่ โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.9 (Model Adequacy Checking) จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่มีบางจุดกระจายตัวออกนอกเส้น ทำให้ต้องทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลโดยใช้ Normal Probability ในการ

ทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.11 จากข้อกำหนด Alpha (α) = 0.05 ซึ่งสามารถอ่านค่า P-value ได้ = 0.442 ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล (ความทนแรงดึง)

3) พิจารณาข้อมูลรอบค่าศูนย์ ลักษณะการกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกัน โดยมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ (Model Adequacy Checking) แสดงดังรูปที่ 4.9 ลักษณะของข้อมูล Residuals versus the fitted values ที่ได้จะมีค่าบางค่าที่จะกระจายตัวออกห่างจากศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอ ทำให้ไม่มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขของการทดลอง ซึ่งจะต้องมีการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ในรูปที่ 4.12 แสดงช่วงของความเชื่อมั่น ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความทนแรงดึงจากเงื่อนไขต่างๆ มีความเหลื่อมกัน แสดงให้เห็นว่า ความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลอง 6 เงื่อนไขการทดลองนั้น ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถทดสอบได้ดังนี้

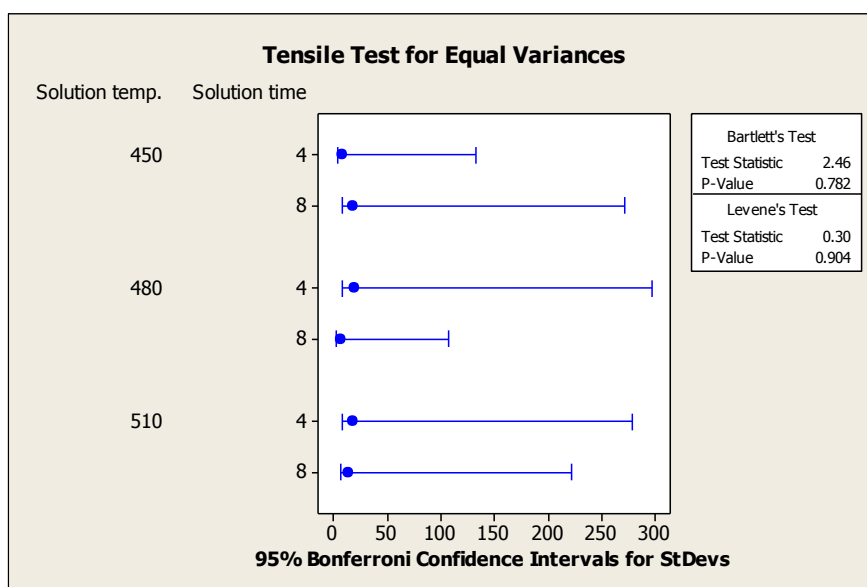
การทดสอบความแตกต่างของความแปรปรวน โดยใช้สมมติฐานการทดลอง ซึ่งจะกำหนดให้ σ_i^2 ; $i=1, 2, 3, \dots, 6$ คือ ความแปรปรวนของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2 = \sigma_6^2$ ความแปรปรวนของเงื่อนไขการทดลองทั้ง 6 เท่ากัน

$H_1 : \text{at least one } \sigma_i^2 \neq 0 ; i=1, 2, 3, \dots, 6$ ความแปรปรวนของเงื่อนไขการทดลองทั้ง 6 ไม่เท่ากัน

โดยทำการทดสอบสมมติฐานการทดลองดังกล่าว ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

จาก Bartlett's Test แสดงผลการคำนวณค่าความแปรปรวนแสดงดังรูปที่ 4.12 นั่นคือ ยอมรับ H_0 เนื่องจากค่า P-value = 0.782 ซึ่งมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่า $\alpha = 0.05$ จึงสามารถสรุปได้ว่าความแปรปรวนของเงื่อนไขการทดลองทั้ง 6 เงื่อนไขนั้น มีค่าเท่ากัน หรือมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.12 การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน (ความทนแรงดึง)

จากข้อมูลค่าความทนแรงดึงในตารางที่ 4.7 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลของค่าความทนแรงดึงในเงื่อนไขการทดลองต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ตาราง ANOVA for Tensile strength (การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายของกระบวนการทางความร้อน)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-Value
Temp.	2	10720.5	10720.5	5360.8	24.30	0.000
Time	1	299.3	299.3	299.3	1.36	0.267
Temp.*Time	2	68.9	68.9	34.4	0.16	0.857
Error	12	2646.9	2646.9	220.6		
Total	17	13735.7				

S = 14.8518 R-Sq = 80.73% R-Sq(adj) = 72.70%

จากตารางที่ 4.8 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 80.73% นั่นคือ ความผันแปรต่างๆ ของการทดลองที่สามารถควบคุมได้ (Controllable) เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์หรือปัจจัยต่างๆ ที่กำหนดให้คงที่ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 80.73% ส่วนที่เหลือประมาณ 19.27% เกิด

จากปัจจัยต่างๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) ดังนั้นในการออกแบบการทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองที่ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

4.3.2.4 ทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานในงานวิจัยนี้ จะทำการพิจารณาผลที่ได้จากผลกระทบหลัก (main effects) และผลกระทบ 2 ปัจจัย (interaction) ซึ่งแสดงการทดสอบดังนี้

พิจารณาผลกระทบหลัก (main effects)

1) ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของอุณหภูมิอบละลาย (Factor A)

$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3$ สำหรับทุกระดับอิทธิพลของอุณหภูมิอบละลายไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \text{at least one } \tau_i \neq 0 ; i = 1, 2, 3$ สำหรับบางระดับอิทธิพลของอุณหภูมิอบละลายแตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.8 ทำให้ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่าของ P-value = 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลมาสนับสนุนว่า อิทธิพลของอุณหภูมิอบละลาย หรือ (Factor A) มีผลต่อค่าความทนแรงดึงที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2) ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของเวลาอบละลาย (Factor B)

$H_0 : \beta_1 = \beta_2$ สำหรับทุกระดับอิทธิพลของเวลาอบละลายไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2$ สำหรับบางระดับอิทธิพลของเวลาอบละลายแตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.8 ทำให้ยอมรับ H_0 เนื่องจากค่าของ P-value = 0.267 ซึ่งมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับค่า $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลมาสนับสนุนว่า อิทธิพลของเวลาอบละลาย หรือ (Factor B) ไม่มีผลต่อค่าความทนแรงดึงที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

พิจารณา 2 Factor Interaction Effect

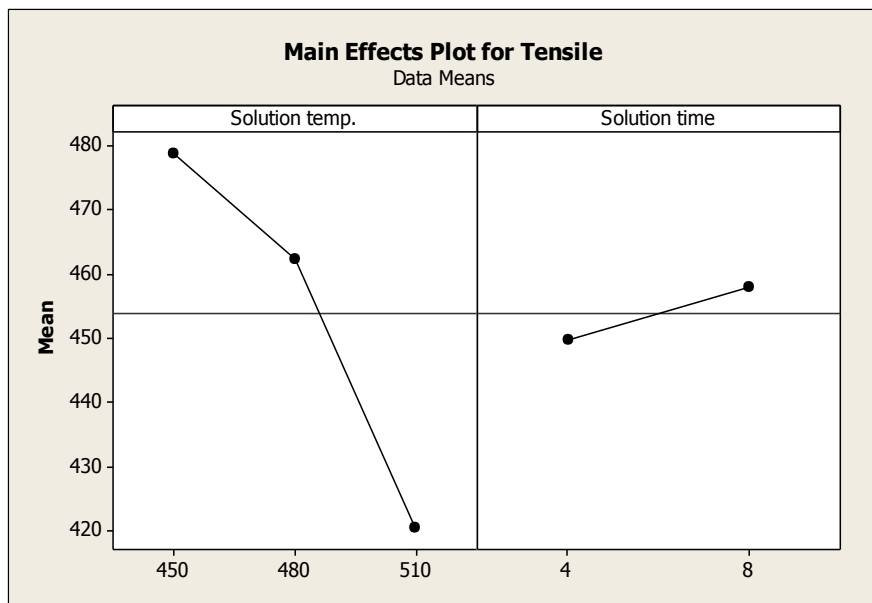
ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบละลาย

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$ for all i, j ทุกระดับ ไม่มีอิทธิพลของ Interaction ($i=1, 2, 3 ; j=1, 2$)

$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ At least one i, j โดยมีบาง i, j มีอิทธิพลของ Interaction ($i=1, 2, 3 ; j=1, 2$)

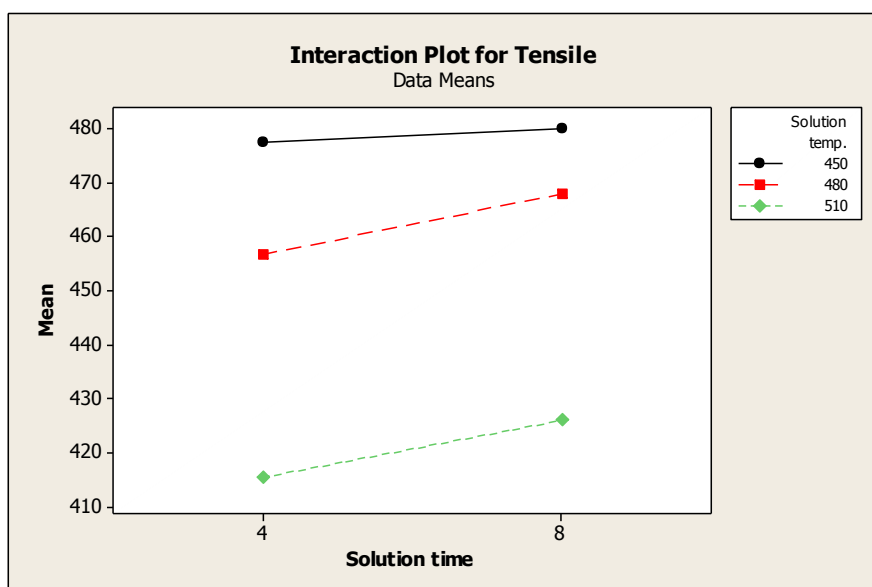
จากตารางที่ 4.8 ทำให้ยอมรับ H_0 เนื่องจากค่าของ P-value = 0.857 ซึ่งมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับค่า $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลมาสนับสนุนว่า อิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบละลาย ไม่มีผลต่อค่าความทนแรงดึงที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

อุณหภูมิของการอบละลายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนแรงดึง ซึ่งพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจาก 450°C เป็น 480°C และ 510°C ทำให้ค่าของความทนแรงดึงเฉลี่ยของแต่ละอุณหภูมิในการอบละลายนั้นลดลง และการใช้เวลาในการอบละลาย 4 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง พบว่าเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้ความทนแรงดึงเฉลี่ยของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับอุณหภูมิและเวลาในการอบละลาย

และผลของทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายที่ส่งผลต่อความทนแรงดึง แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายที่ส่งผลต่อความทนแรงดึง

4.3.3 การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงคราก (Yield strength) และเปอร์เซ็นต์การยืด (%Elongation)

การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงครากและเปอร์เซ็นต์การยืดเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบความทนแรงดึง ซึ่งจะนำมาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ดังต่อไปนี้

4.3.3.1 การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงคราก (Yield strength)

การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงคราก ซึ่งได้จากการทดสอบความทนแรงดึง จึงนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่ากลางของข้อมูลจะทำการวิเคราะห์ค่ากลาง คือ ค่าเฉลี่ย เพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางสถิติ ซึ่งจะใช้ข้อมูลของค่ากำลังครากเฉลี่ยในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงครากของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนและการบ่มแข็งเทียม (T6)

ลำดับ	สถานะของการทดลอง		ค่ากำลังคราก (MPa)			\bar{X}
	อุณหภูมิอบละลาย	เวลาอบละลาย	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	
1	450°C	4 hrs.	327.58	335.57	339.28	333.99
2	450°C	8 hrs.	344.40	341.59	321.92	335.97
3	480°C	4 hrs.	308.65	334.56	315.66	319.62
4	480°C	8 hrs.	322.59	327.53	332.30	327.47
5	510°C	4 hrs.	303.10	277.90	291.2	290.73
6	510°C	8 hrs.	299.32	307.56	287.64	289.17

หมายเหตุ ทุกสถานะการทดลองจะผ่านการบ่มแข็ง 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 ใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 hrs. ส่วนครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 hrs. ตามลำดับ

ในการทดสอบทางสถิติของค่าความแข็งแรงคราก (Yield strength) จะทำการทดสอบข้อมูลเหมือนกับสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งแรงและความทนแรงดึง ซึ่งจากการทดสอบให้ผลการทดสอบเช่นเดียวกันกับค่าความทนแรงดึง

4.3.3.1 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การยืด (%Elongation)

การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ซึ่งในที่นี้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดจากการทดสอบความทนแรงดึง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่ากลางของข้อมูลจะทำการวิเคราะห์ค่ากลาง คือ ค่าเฉลี่ย เพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางสถิติ ซึ่งจะใช้ข้อมูลของค่าเปอร์เซ็นต์การยืดเฉลี่ยในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน และการบ่มแข็งเทียม (T6)

ลำดับ	สถานะของการทดลอง		เปอร์เซ็นต์ความยืด (%)			\bar{X}
	อุณหภูมิอบละลาย	เวลาอบละลาย	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	
1	450°C	4 hrs.	6.90	7.00	6.85	6.92
2	450°C	8 hrs.	6.15	5.95	5.90	6.00
3	480°C	4 hrs.	5.60	6.10	5.45	5.72
4	480°C	8 hrs.	4.95	4.80	5.60	5.12
5	510°C	4 hrs.	5.15	5	4.85	5.00
6	510°C	8 hrs.	4.75	4.6	4.3	4.55

หมายเหตุ ทุกสถานะการทดลองจะผ่านการบ่มแข็ง 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 ใช้อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 hrs. ส่วนครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 hrs. ตามลำดับ

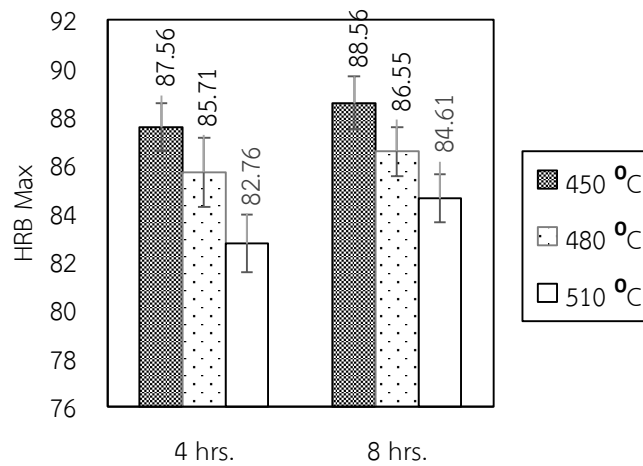
ซึ่งลักษณะการทดสอบทางสถิติของค่าเปอร์เซ็นต์การยืด (%Elongation) จะทดสอบข้อมูลเหมือนกับสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งและความทนแรงดึง ซึ่งจากการทดสอบให้ผลการทดสอบเช่นเดียวกันกับค่าความทนแรงดึง

4.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังผ่านกระบวนการทางความร้อน

ค่าสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง โดยในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบค่าความแข็งและความทนแรงดึงของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง เพื่อให้เห็นค่าของสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

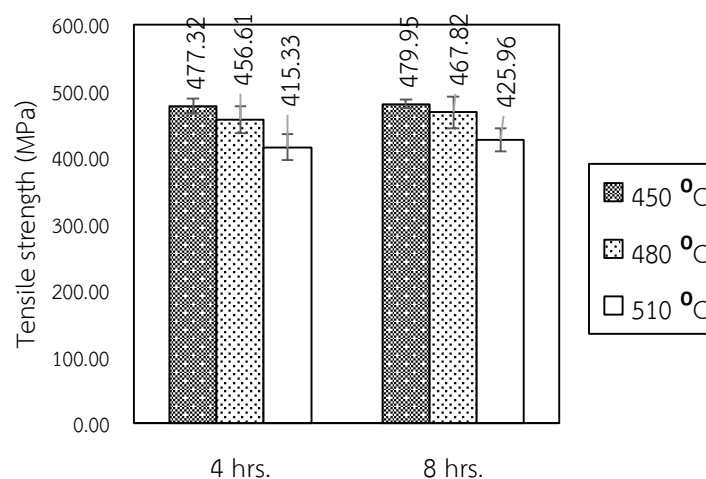
ความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.15 จะเห็นว่า ค่าความแข็งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 88.56 HRB โดยค่าความแข็งที่ได้มาจากเงื่อนไขการทดลอง คือ การอบละลายที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าหากใช้เวลาในการอบละลาย 8 ชั่วโมงจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าเวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง ซึ่งอุณหภูมิที่ให้ค่าความแข็งสูงสุดทั้งสองช่วงเวลา คือ อุณหภูมิ 450°C และความแข็งจะลดลงตามลำดับเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบละลาย 480°C และ 510°C ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

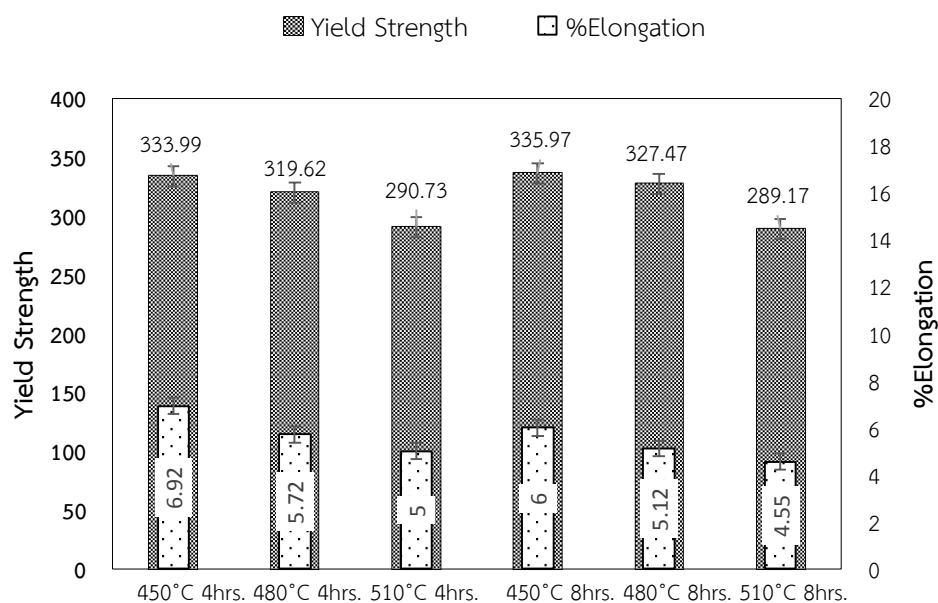
4.4.2 ค่าความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

การทดสอบความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนทุกอุณหภูมิ พบว่าความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 479.95 MPa (ค่ากำลังครากเท่ากับ 335.97 MPa และ %Elongation เท่ากับ 6.92) โดยให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดที่เงื่อนไขการทดลองเดียวกันกับค่าความแข็งสูงสุด ซึ่งอุณหภูมิที่ให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดแต่ละช่วงเวลาอบละลาย คือ อุณหภูมิ 450°C และลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 480°C และ 510°C แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ค่าความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

ส่วนค่าความแข็งแรงครากและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ที่ได้จากการทดสอบความทนแรงดึง แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งแรงครากและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

จากสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง (อุณหภูมิอบละลาย 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง) เมื่อนำสมบัติเชิงกลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ *N.Mahathaninwong* ซึ่งเป็นการใช้กระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมหนึ่งครั้งในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล [30] (อุณหภูมิอบละลาย 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมหนึ่งครั้ง ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) โดยให้ค่าความทนแรงดึงที่ได้จากกระบวนการเท่ากับ 477.32 และ 455 MPa ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงมีค่าเท่ากับ 87.56 และ 87.8 HRB ตามลำดับ และค่า %Elongation มีค่าเท่ากับ 6.92 และ 4 ตามลำดับ จากค่าความทนแรงดึง ค่าความแข็งแรงพบว่า การบ่มแข็งเทียมสองครั้งให้ค่าความทนแรงดึงมากกว่าการบ่มแข็งเทียมหนึ่งครั้ง ส่วนค่าความแข็งแรงให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน และใช้เวลาในกระบวนการน้อยกว่า ซึ่งทำให้มีต้นทุนการผลิตที่ถูกลง

ค่าสมบัติเชิงกลที่ได้จากการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง มีค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกันและเวลาอบละลายต่างกัน จึงจำเป็นต้องทดสอบหาความแตกต่างระหว่างกระบวนการที่ใช้เวลาในการอบละลาย 4 และ 8 ชั่วโมง ด้วยวิธีการ การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Turkey's Honestly Significant Different (HSD) เพื่อเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจในการผลิตของผู้ประกอบการหรือการตัดสินใจเลือกซื้อของผู้บริโภค

4.4.3 การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Turkey 's Honestly Significant Different (HSD)

การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Turkey เพื่อต้องการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิอบละลายที่ 4 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง มีความแตกต่างกันหรือไม่แตกต่างกัน โดยวิเคราะห์จากค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง (hardness) และค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ที่ได้จากการทดลอง โดยกำหนดให้ μ_1 และ μ_2 คือ สภาวะของกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เวลาในการอบละลาย 4 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสามารถตั้งสมมติฐานได้ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \quad \text{ค่าเฉลี่ยของการทดลองที่ใช้เวลาในการอบละลายทั้ง 2 สภาวะ (ที่อุณหภูมิเดียวกัน) ไม่แตกต่างกัน}$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \quad \text{ค่าเฉลี่ยของการทดลองที่ใช้เวลาในการอบละลายทั้ง 2 สภาวะ (ที่อุณหภูมิเดียวกัน) แตกต่างกัน}$$

ในการวิเคราะห์ความแตกต่างของสภาวะที่ใช้อุณหภูมิลบละลายเดียวกัน ที่เวลาอบละลาย 4 และ 8 ชั่วโมง นั้น จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์ค่าความแข็ง (hardness) และค่าความทนแรงดึง (tensile strength) โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

4.4.3.1 การวิเคราะห์ค่าความแข็ง โดยใช้การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Turkey สามารถคำนวณได้จากสูตรคำนวณที่ 2.21 ซึ่งจะต้องคำนวณค่า MS_E แต่ในที่นี้จะใช้ค่า MS_E จากตารางที่ 4.6 แล้วนำมาแทนค่าลงในสูตร โดยที่ $\alpha = 0.05$, $a = 2$, $f = 12$, $n = 3$ และ $MS_E = 1.958$ ซึ่งสามารถคำนวณค่าได้ดังนี้

$$T_\alpha = q_\alpha(a, f) \sqrt{\frac{MS_E}{n}}$$

$$T_{0.05} = q_{0.05}(2, 12) \sqrt{\frac{1.958}{3}}$$

$$T_{0.05} = 3.08(0.81)$$

$$T_{0.05} = 2.49$$

คำนวณค่าความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย $X_i - X_j$ โดยนำค่าเฉลี่ยจากตารางที่ 4.5 มาวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) สภาวะที่ใช้อุณหภูมิอบละลายที่ 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและ 8 ชั่วโมง

$$|\bar{X}_{450^{\circ}\text{C}, 4 \text{ hrs.}} - \bar{X}_{450^{\circ}\text{C}, 8 \text{ hrs.}}| \text{ แทนค่า } |87.56 - 88.56| = 1.00$$

นำค่า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$ เปรียบเทียบกับค่า HSD โดยที่ ค่าของ $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| >$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 \neq \mu_2$ แต่ถ้า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \leq$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 = \mu_2$ ผลจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างเวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C พบว่า Do not reject H_0 หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของการทดลองที่ใช้เวลาในการอบละลายทั้ง 2 สภาวะ (ที่อุณหภูมิเดียวกัน) ไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2) สภาวะที่ใช้อุณหภูมิอบละลายที่ 480°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและ 8 ชั่วโมง

$$|\bar{X}_{480^{\circ}\text{C}, 4 \text{ hrs.}} - \bar{X}_{480^{\circ}\text{C}, 8 \text{ hrs.}}| \text{ แทนค่า } |85.71 - 86.55| = 0.84$$

นำค่า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$ เปรียบเทียบกับค่า HSD โดยที่ ค่าของ $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| >$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 \neq \mu_2$ แต่ถ้า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \leq$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 = \mu_2$ ผลจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างเวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 480°C พบว่า Do not reject H_0 หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของการทดลองที่ใช้เวลาในการอบละลายทั้ง 2 สภาวะ (ที่อุณหภูมิเดียวกัน) ไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3) สภาวะที่ใช้อุณหภูมิอบละลายที่ 510°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและ 8 ชั่วโมง

$$|\bar{X}_{510^{\circ}\text{C}, 4 \text{ hrs.}} - \bar{X}_{510^{\circ}\text{C}, 8 \text{ hrs.}}| \text{ แทนค่า } |82.76 - 84.61| = 1.85$$

นำค่า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$ เปรียบเทียบกับค่า HSD โดยที่ ค่าของ $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| >$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 \neq \mu_2$ แต่ถ้า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \leq$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 = \mu_2$ ผลจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างเวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 510°C พบว่า Do not reject H_0 หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของการทดลองที่ใช้เวลาในการอบละลายทั้ง 2 สภาวะ (ที่อุณหภูมิเดียวกัน) ไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลจากการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านการอบละลายและการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง พบว่าค่าความแข็งของอะลูมิเนียมที่ได้จาก

การใช้เวลาในการอบละลาย 4 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง มีค่าความแข็งที่ไม่แตกต่างกันในทุกอุณหภูมิอบละลาย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.4.3.2 การวิเคราะห์ค่าความทนแรงดึง โดยใช้การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธี Turkey สามารถคำนวณได้จากสูตรคำนวณที่ 2.21 ซึ่งจะต้องคำนวณค่า MS_E แต่ในที่นี้จะใช้ค่า MS_E จากตารางที่ 4.8 แล้วนำมาแทนค่าลงในสูตร โดยที่ $\alpha = 0.05$, $a = 2$, $f = 12$, $n = 3$ และ $MS_E = 220.6$ โดยสามารถคำนวณค่าได้ดังนี้

$$T_\alpha = q_\alpha(a, f) \sqrt{\frac{MS_E}{n}}$$

$$T_{0.05} = q_{0.05}(2, 12) \sqrt{\frac{220.6}{3}}$$

$$T_{0.05} = 3.08(8.58)$$

$$T_{0.05} = 26.43$$

คำนวณค่าความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย $X_i - X_j$ โดยนำค่าเฉลี่ยจากตารางที่ 4.7 มาวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) สภาวะที่ใช้อุณหภูมิอบละลายที่ 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและ 8 ชั่วโมง

$$|\bar{X}_{450^\circ\text{C}, 4 \text{ hrs.}} - \bar{X}_{450^\circ\text{C}, 8 \text{ hrs.}}| \text{ แทนค่า } |477.32 - 479.95| = 2.63$$

นำค่า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$ เปรียบเทียบกับค่า HSD โดยที่ ค่าของ $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| >$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 \neq \mu_2$ แต่ถ้า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \leq$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 = \mu_2$ ผลจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างเวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450°C พบว่า Do not reject H_0 หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของการทดลองที่ใช้เวลาในการอบละลายทั้ง 2 สภาวะ (ที่อุณหภูมิเดียวกัน) ไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2) สภาวะที่ใช้อุณหภูมิอบละลายที่ 480°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและ 8 ชั่วโมง

$$|\bar{X}_{480^\circ\text{C}, 4 \text{ hrs.}} - \bar{X}_{480^\circ\text{C}, 8 \text{ hrs.}}| \text{ แทนค่า } |456.61 - 467.82| = 11.21$$

นำค่า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$ เปรียบเทียบกับค่า HSD โดยที่ ค่าของ $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| >$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 \neq \mu_2$ แต่ถ้า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \leq$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 = \mu_2$ ผลจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างเวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 480°C พบว่า Do not reject H_0 หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของการทดลองที่ใช้เวลาในการอบละลายทั้ง 2 สภาวะ (ที่อุณหภูมิเดียวกัน) ไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3) สภาวะที่ใช้อุณหภูมิตอบละลายที่ 510°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและ 8 ชั่วโมง

$$|\bar{X}_{510^\circ\text{C}, 4 \text{ hrs.}} - \bar{X}_{510^\circ\text{C}, 8 \text{ hrs.}}| \text{ แทนค่า } |415.33 - 425.96| = 10.63$$

นำค่า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$ เปรียบเทียบกับค่า HSD โดยที่ ค่าของ $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| >$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 \neq \mu_2$ แต่ถ้า $|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \leq$ ค่า HSD แสดงว่า $\mu_1 = \mu_2$ ผลจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างเวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 510°C พบว่า Do not reject H_0 หมายความว่า ค่าเฉลี่ยของการทดลองที่ใช้เวลาในการอบละลายทั้ง 2 สภาวะ (ที่อุณหภูมิเดียวกัน) ไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลจากการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านการอบละลายและการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง พบว่าค่าความทนแรงดึงของอะลูมิเนียมที่ได้จากการใช้เวลาในการอบละลาย 4 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง มีค่าความทนแรงดึงที่ไม่แตกต่างกันในทุกอุณหภูมิอบละลาย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.5 การวิเคราะห์ต้นทุน

การวิเคราะห์ต้นทุนเป็นการวิเคราะห์เพื่อการตัดสินใจในการกำหนดทางเลือกของการดำเนินงาน โดยในงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์ต้นทุนของกระบวนการผลิต ทำให้ทราบถึงจุดที่มีต้นทุนการผลิตที่สูง รวมถึงสาเหตุและที่มาที่ทำให้ต้นทุนการผลิตมีค่าสูง ในการวิเคราะห์ต้นทุนครั้งนี้ จะใช้วิธีการวิเคราะห์ต้นทุนตามกระบวนการ (Process-Based Cost Model ;PBCM) ซึ่งจะแยกประเภทของต้นทุนออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ต้นทุนคงที่ (fixed costs) และต้นทุนผันแปร (variable costs) โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.11

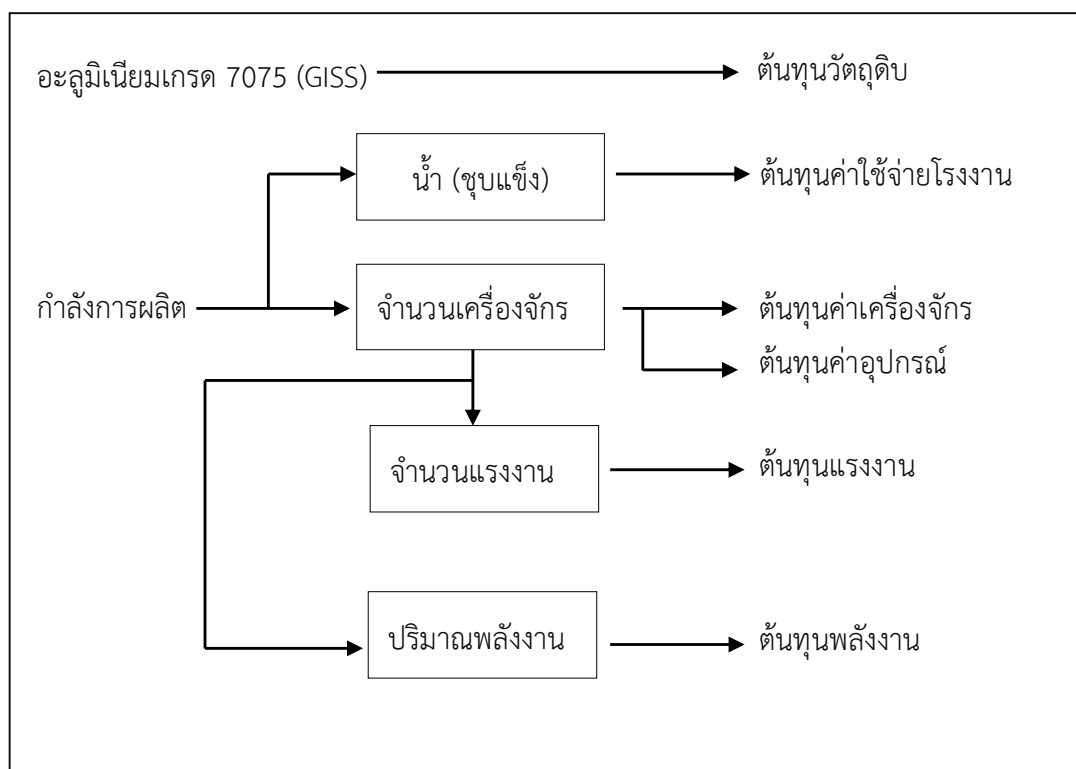
ตารางที่ 4.11 ประเภทของต้นทุนตามกระบวนการ (Process-Based Cost Model)

ประเภทของต้นทุน	ลำดับ	รายละเอียด	หมายเหตุ
ต้นทุนคงที่	1	ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงาน	
	2	ต้นทุนค่าเครื่องจักร	
	3	ต้นทุนค่าอุปกรณ์	
	4	ต้นทุนการก่อสร้าง	ไม่นำมาคำนวณ

ตารางที่ 4.11 ประเภทของต้นทุนตามกระบวนการ (Process-Based Cost Model) (ต่อ)

ประเภทของต้นทุน	ลำดับ	รายละเอียด	หมายเหตุ
ต้นทุนผันแปร	5	ต้นทุนวัตถุดิบ	
	6	ต้นทุนแรงงาน	
	7	ต้นทุนพลังงาน	

ในที่นี้จะวิเคราะห์ต้นทุนของกระบวนการทางความร้อนสำหรับโรงงานขนาดเล็กที่มีเตาอบละลายและเตาบ่มแข็งเทียมอย่างละ 1 เตา ซึ่งมีขนาดความจุภายในเตาเป็น 10 เท่าของเตาที่ใช้สำหรับงานทดลองในห้องปฏิบัติการ ($36 \times 36 \times 48 \text{ in}^3$) [33] โดยการวิเคราะห์ต้นทุนสามารถเขียนแบบจำลองแสดงต้นทุนของกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง ได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แบบจำลองแสดงต้นทุนในกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

จากการวิเคราะห์ความแตกต่างของสมบัติเชิงกลที่ได้จากกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เวลาในการอบละลาย 4 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง ด้วยการทดสอบสมมติฐานและการเปรียบเทียบพหุคูณโดยใช้วิธีการ Turkey's Honestly Significant Different (HSD) พบว่า สมบัติเชิงกลที่ได้ไม่แตกต่างกัน ซึ่งการวิเคราะห์ต้นทุนของกระบวนการทางความร้อนในงานวิจัยครั้งนี้ จะคำนวณต้นทุนของกระบวนการทางความร้อนที่ผ่านการอบละลายเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ระดับกำลังการผลิตต่างๆ คือ 90,000 (1 กะ) 180,000 (2 กะ) และ 270,000 (3 กะ) ขึ้น/ปี (กำลังการผลิตสูงสุดของเตาเท่ากับ

300 ขึ้น/กะ) โดยยึดข้อกำหนดเฉพาะต่างๆ และความต้องการของกระบวนการทางความร้อน T6 ที่จำเป็นต้องกระบวนการผลิต อันได้แก่ กำลังการผลิต จำนวนชั่วโมงการทำงานต่อกะ เวลาในการทำงานต่อปี ฯลฯ จาก GISSCO COMPANY LIMITED และอัตราการใช้สาธารณูปโภคต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ข้อกำหนดเฉพาะและความต้องการของกระบวนการทางความร้อน

ลำดับที่	รายการ	จำนวน/ค่า	หน่วย
1	ขนาดของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS	100x100x15	mm
2	ความจุเตาเผาสูงสุดต่อกะ	300	ขึ้น
3	ราคาวัตถุดิบต่อขึ้น	750	บาท
4	จำนวนชั่วโมงการทำงานต่อกะ	8	ชั่วโมง
5	วันทำงานต่อปี	300	วัน
6	จำนวนคนงานต่อกะ	1	คน
7	อัตราค่าจ้างแรงงานปกติ	300	บาท
8	ปริมาณน้ำที่ใช้ต่อวัน (ซบแข็ง)	0.3	m ³
9	กำลังไฟของเตาอบละลาย	40	kW
10	กำลังไฟของเตาบ่มแข็งเทียม	33	kW

ที่มา : GISSCO COMPANY LIMITED การไฟฟ้าและการประปา

การวิเคราะห์ต้นทุนระดับโรงงานขนาดเล็กของการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง จะยกตัวอย่างการคำนวณโดยแสดงรายละเอียดต่างๆ ในเงื่อนไขการทดลองที่ใช้อุณหภูมิอบละลาย 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ซึ่งใช้แรงงาน 1 กะ กำลังการผลิต 90,000 ขึ้น/ปี (ผลิตวันละ 300 ขึ้น เนื่องจากความจุเตาสูงสุด) โดยมีวันทำงาน 300 วัน/ปี แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.5.1 ต้นทุนคงที่ (Fixed costs)

ต้นทุนคงที่ คือ ต้นทุนรวมที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามระดับของการผลิตในช่วงของการผลิต แต่ต้นทุนคงที่ต่อหน่วยจะเปลี่ยนแปลงในทางลดลงถ้าปริมาณการผลิตเพิ่มมากขึ้น โดยในกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน สามารถคำนวณต้นทุนคงที่ได้จากสมการที่ 4.1

$$FC = C_{\text{overhead}} + C_{\text{equipment}} + C_{\text{tooling}} + C_{\text{building}} \quad (4.1)$$

เมื่อ C_{overhead}	คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงาน (บาท/ปี)
$C_{\text{equipment}}$	คือ ต้นทุนค่าเครื่องจักร (บาท/ปี)
C_{tooling}	คือ ต้นทุนค่าอุปกรณ์ (บาท/ปี)
C_{building}	คือ ต้นทุนการก่อสร้าง (บาท/ปี)

โดยการคำนวณต้นทุนคงที่ จะแบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

4.5.1.1 ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงาน

ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงานหรือค่าเสียหายการผลิต โดยมีต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการบริหาร (เงินเดือน) การขาย การพัฒนาของกระบวนการ การอบรมพนักงาน ค่าส่งเสริมการตลาด ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด ค่าสาธารณูปโภค (ค่าโทรศัพท์ ค่าไฟฟ้าส่องสว่าง ค่าน้ำ) ฯลฯ ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงาน ในที่นี้จะคำนวณเฉพาะค่าไฟฟ้าส่องสว่างและค่าน้ำเท่านั้น เนื่องจากการคำนวณต้นทุนในครั้งนี้เป็นการคำนวณต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อนเท่านั้น

1) ต้นทุนค่าไฟฟ้าส่องสว่าง คำนวณโดยใช้อัตราค่าไฟแบบ Time of Use (TOU) ซึ่งเป็นการคิดอัตราการใช้งานที่แตกต่างตามช่วงเวลาที่ใช้งาน แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 อัตราค่าไฟแบบ Time of Use (TOU)

ระดับแรงดัน	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)		ค่าบริการ (บาท/ เดือน)
	On-peak	Off-peak	
แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์	4.5827	2.1495	312.24
แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์	5.2674	2.1872	46.16

หมายเหตุ on-peak : 09:00-22:00 น. วันจันทร์-ศุกร์

Off-peak : 22:00-09:00 น. วันจันทร์-ศุกร์ และ 00:00-24:00 น. วันเสาร์-อาทิตย์ และวันหยุดราชการปกติ

ไฟฟ้าส่องสว่างจะใช้หลอดไฟจำนวน 8 หลอด (อ้างอิงจากห้องปฏิบัติการ) ซึ่งเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 47 นิ้ว ซึ่งมีความต้องการไฟฟ้า 36 W (รวมบาลาสต์อีก 10 W รวมเป็น 46 W) โดยมีรายละเอียดการเปิด-ปิดการใช้งานไฟฟ้าสว่างดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ช่วงเวลาที่ใช้ไฟฟ้าส่องสว่างสำหรับการผลิต 1 กะ (90,000 ชิ้น/ปี)

เงื่อนไขการทดลอง	เวลาเปิดการใช้งาน	เวลาปิดการใช้งาน	จำนวนเวลาที่ใช้ (นาที)
450°C, 4 ชั่วโมง	18:00	18:30	30
480°C, 4 ชั่วโมง	18:00	18:30	30
510°C, 4 ชั่วโมง	18:00	18:30	30

จากตารางที่ 4.14 สามารถคิดค่าไฟฟ้าได้จากสมการ 4.2

$$C_{\text{electricity}} = PW \times N_{\text{hr./day}} \times N_{\text{WD/year}} \times P_{\text{electricity}} \quad (4.2)$$

เมื่อ PW คือ พลังงานที่ใช้ (kw)
 $N_{\text{hr./day}}$ คือ จำนวนชั่วโมงทำงานต่อวัน (hrs./day)
 $N_{\text{WD/year}}$ คือ จำนวนวันทำงานต่อปี (วัน)
 $P_{\text{electricity}}$ คือ อัตราค่าไฟต่อหน่วย (บาท/หน่วย)

การคำนวณต้นทุนไฟฟ้าของไฟฟ้าส่องสว่าง ใช้กำลังไฟฟ้า 46 W (0.046 kW) ทำงานวันละ 0.5 ชั่วโมง/วัน เนื่องจากการคำนวณค่าไฟฟ้าของไฟฟ้าส่องสว่าง จะต้องคิดค่าไฟ on-peak ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} C_{\text{electricity}} &= PW \times N_{\text{hr./day}} \times N_{\text{WD/year}} \times P_{\text{electricity}} \\ C_{\text{electricity}} &= \{(0.046 \times 8) \times (0.5 \times 300) \times 5.2674\} \\ C_{\text{electricity}} &= 290.76 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

2) ต้นทุนน้ำประปา ในส่วนของโรงงานขนาดเล็ก 1 วันสามารถผลิตได้จำนวน 300 ชิ้น (ที่ระดับกำลังการผลิต 90,000 ชิ้น/ปี) ซึ่งใช้น้ำสำหรับการชุบแข็งทั้งหมด 300 ลิตร/ล็อต (0.3 m³/วัน หรือ 90 m³/ปี) โดยราคาน้ำประปาต่อหน่วยเท่ากับ 16.0 บาท (อัตราค่าน้ำประปาของราชการและธุรกิจขนาดเล็ก) และมีค่าบำรุงรักษา ค่าบริการรายปีเท่ากับ 600 บาท (ข้อมูลข้างต้นอ้างอิงจากการประปาส่วนภูมิภาค) สามารถคำนวณค่าน้ำประปาจากสมการที่ 4.3 และมีรายละเอียดดังตาราง 4.15

$$C_{\text{water}} = \text{service charge} + (V \times P_{\text{water}}) \quad (4.3)$$

เมื่อ V คือ ปริมาณที่ใช้ต่อปี (m³/year)

P_{water} คือ ราคาค่าน้ำประปาต่อหน่วย (บาท/หน่วย)

ตารางที่ 4.15 ต้นทุนน้ำประปาในการขุดแข็งชิ้นงาน

รายละเอียด	จำนวน	หน่วย
ค่าบริการต่อปี	600	บาท
ปริมาณน้ำที่ใช้ต่อวัน	0.3	m^3
ปริมาณน้ำที่ใช้ต่อปี	90	m^3
ค่าน้ำประปาต่อลูกบาศก์เมตร	16	บาท
ต้นทุนน้ำประปา	2,040	บาท/ปี

ที่มา : การประปาส่วนภูมิภาค (Provincial waterworks authority)

ดังนั้น ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงานหรือค่าเสียหุ้ยการผลิต เท่ากับ $290.76 + 2,040 = 2,330.76$ บาท/ปี

4.5.1.2 ต้นทุนค่าเครื่องจักร

ต้นทุนค่าเครื่องจักรจะคิดจากค่าเสื่อมของเครื่องจักร และอุปกรณ์ ในช่วงของการผลิตเท่าๆ กัน ซึ่งจะทำให้การประเมินค่าเสื่อมราคาในลักษณะเส้นตรง โดยกำหนดให้มีอายุการใช้งานเครื่องจักรและอุปกรณ์ 10 ปี (คิดมูลค่าซากของเครื่องจักรเป็น 40% ของราคาเครื่องจักร) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ต้นทุนค่าเครื่องจักร (ค่าเสื่อมของเครื่องจักร)

ลำดับที่	รายการ	ราคาเครื่องจักร	มูลค่าซาก	ค่าเสื่อมราคา	หน่วย
1	เตาเผาอุณหภูมิต่ำ	1,200,000	480,000	72,000	บาท
2	เตาต้มแข็งเทียม	700,000	280,000	42,000	บาท

ดังนั้น ต้นทุนค่าเครื่องจักร (ค่าเสื่อมของเครื่องจักร) เท่ากับ $72,000 + 42,000 = 114,000$ บาท/ปี

4.5.1.3 ต้นทุนค่าอุปกรณ์

ต้นทุนค่าอุปกรณ์จะคิดจากต้นทุนการรักษาสภาพเครื่องจักรให้สามารถใช้งานได้ตลอดเวลา โดยครอบคลุมไปถึงการซ่อมแซมและการบำรุงรักษาเครื่องจักรตามอายุการใช้งาน ซึ่งในที่นี้จะคำนวณเปอร์เซ็นต์การบำรุงรักษาเครื่องจักรจากอายุของเครื่องจักร ดังตารางที่ 4.17 (เครื่องจักรที่ใช้เป็นเครื่องจักรใหม่จึงคิดที่ 2% ของราคาเครื่องจักร)

ตารางที่ 4.17 ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องจักรตามอายุการใช้งาน [34]

อายุเครื่องจักร (ปี)	เปอร์เซ็นต์การบำรุงรักษา
0-5	2%
6-10	5%
11-15	8%
16-20	11%
20-25	14%

จากตารางที่ 4.17 สามารถคำนวณค่าบำรุงรักษาเครื่องจักรได้ดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ต้นทุนบำรุงรักษาเครื่องจักร

ลำดับที่	รายการ	อายุการใช้งาน	ราคาเครื่องจักร	ค่าบำรุงรักษา	หน่วย
1	เตาเผาอุณหภูมิต่ำ	0-5	1,200,000	24,000	บาท
2	เตาต้มแข็ง	0-5	700,000	14,000	บาท

ต้นทุนอุปกรณ์ยังรวมไปถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน และค่าใช้จ่ายอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต โดยในที่นี้จะคิดค่าวัสดุสิ้นเปลืองที่ใช้ภายในโรงงาน เช่น ถุงมือ ผ้า ถุงซิปลง ผ้าปิดจมูก คีมจับชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ต้นทุนอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน

ลำดับที่	รายละเอียด	จำนวน	หน่วยละ (บาท)	มูลค่า (บาท)
1	ถุงมือผ้าทอ	4 โหล	50	200
2	ถุงมือหนัง	2 คู่	250	500
3	ผ้าปิดจมูก	10 โหล	40	400
4	ถุงซิปลงขนาด			200
5	คีมจับชิ้นงาน ขนาด 25 นิ้ว	3	700	2,100
6	กระดาษทรายขัดเหล็กละเอียดเบอร์			400
ต้นทุนอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน				3,800

ดังนั้น ต้นทุนอุปกรณ์ เท่ากับ $24,000 + 14,000 + 3,800 = 41,800$ บาท/ปี

4.5.1.4 ต้นทุนค่าก่อสร้าง

ต้นทุนที่เกี่ยวกับสิ่งปลูกสร้างอาคาร โรงงาน รวมถึงค่าเสื่อมของการใช้งานของสิ่งปลูกสร้าง แต่ยกเว้น ที่ดิน เพราะที่ดินไม่มีการเสื่อมราคา ต้นทุนค่าก่อสร้างจะไม่นำมาคำนวณเนื่องจากการวิเคราะห์ต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อนเท่านั้น

จากการคำนวณต้นทุนคงที่ทั้ง 4 ประเภท โดยสามารถคำนวณต้นทุนคงที่โดยใช้สมการ 4.1 ซึ่งมีรายละเอียดต้นทุนคงที่ ดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ต้นทุนคงที่ของกระบวนการทางความร้อน

ลำดับที่	รายละเอียด	จำนวน	หน่วย
1	ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงาน	2,330.76	บาท/ปี
2	ต้นทุนค่าเครื่องจักร		
	ค่าเสื่อมราคาของเตาเผาอุณหภูมิต่ำ	72,000	บาท/ปี
	ค่าเสื่อมราคาของเตาต้มแข็ง	42,000	บาท/ปี
3	ต้นทุนค่าอุปกรณ์		
	ต้นทุนบำรุงรักษาเตาเผาอุณหภูมิต่ำ	24,000	บาท/ปี
	ต้นทุนบำรุงรักษาเตาต้มแข็ง	14,000	บาท/ปี
	ต้นทุนอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน	3,800	บาท/ปี
4	ต้นทุนการก่อสร้าง	N/A	ชิ้น/ปี
	ต้นทุนคงที่ของกระบวนการทางความร้อน	158,130.76	บาท/ปี

ดังนั้น ต้นทุนคงที่ของกระบวนการทางความร้อนเท่ากับ 158,130.76 บาท/ปี

4.5.2 ต้นทุนผันแปร (Variable costs)

ต้นทุนผันแปร หมายถึง ต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงในระดับกิจกรรมหรือปริมาณในกระบวนการผลิต ต้นทุนผันแปรของต้นทุนต่อหน่วยจะเท่าๆ กัน ทุกหน่วย โดยสามารถคำนวณต้นทุนผันแปรได้จากสมการที่ 4.4

$$VC = C_{\text{material}} + C_{\text{labor}} + C_{\text{energy}} \quad (4.4)$$

เมื่อ C_{material} คือ ต้นทุนวัตถุดิบ (บาท/ปี)
 C_{labor} คือ ต้นทุนแรงงาน (บาท/ปี)
 C_{energy} คือ ต้นทุนพลังงาน (บาท/ปี)

โดยการคำนวณต้นทุนผันแปร จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

4.5.2.1 ต้นทุนวัตถุดิบ

ต้นทุนวัตถุดิบเป็นค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับค่าวัตถุดิบที่นำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการต้มแข็งเทียมสองครั้ง ในที่นี้จะหมายถึงวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

คือ อะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยเทคนิคการพ่นพองแก๊ส (GISS) โดยต้นทุนของวัตถุดิบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.5

$$C_{\text{material}} = P_{\text{Al}} \times N \quad (4.5)$$

เมื่อ P_{Al} คือ ราคาอะลูมิเนียม GISS (บาท/ชิ้น)

N คือ จำนวนที่ใช้ต่อปี (ชิ้น/ปี)

ต้นทุนอะลูมิเนียม 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็ง โดยใช้เทคนิคการพ่นพองแก๊ส (GISS) โดยมีรายละเอียดของต้นทุนอะลูมิเนียม 7075 ดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ต้นทุนอะลูมิเนียม 7075

ลำดับที่	รายละเอียด	ปริมาณ	หน่วย
1	ราคาวัตถุดิบ	750	บาท
2	กำลังการผลิต	90,000	ชิ้น/ปี
ต้นทุนวัตถุดิบ		67,500,000	บาท/ปี

ที่มา : GISSCO COMPANY LIMITED

ดังนั้น ต้นทุนวัตถุดิบของกระบวนการทางความร้อน เท่ากับ 67,500,000 บาท/ปี

4.5.2.2 ต้นทุนแรงงาน คือ ค่าใช้จ่ายหรือค่าตอบแทนให้แก่พนักงานหรือลูกจ้างหรือคนทำงานที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต โดยต้นทุนแรงงานสามารถคำนวณได้ 2 วิธี คือ การคำนวณค่าแรงปกติและการคำนวณค่าแรง OT (Over time) โดยระยะเวลาในการทำงานปกติเท่ากับ 8 ชั่วโมง และ OT เท่ากับ 3 ชั่วโมง สำหรับกรณีที่ทำการผลิตจำนวน 1 ล็อต (9,000 ชิ้น/ปี และใช้วันในการทำงาน 300 วัน) ดังสมการที่ 4.6 และ 4.7 และรายละเอียดของต้นทุนแรงงาน แสดงดังตารางที่ 4.22

$$C_{\text{labor}} = P_{\text{labor}} \times \text{WD} \quad (4.6)$$

เมื่อ P_{labor} คือ ค่าแรงปกติต่อวัน (บาท/วัน)

WD คือ วันทำงาน (workday) (วัน/ปี)

$$C_{\text{laborOT}} = \left(\frac{P_{\text{labor}}}{N_{\text{hrs.(WD)}}} \right) \times 1.5 \times N_{\text{hrs.(OT)}} \times \text{WD}_{\text{OT}} \quad (4.7)$$

เมื่อ $N_{hrs.(WD)}$ คือ ชั่วโมงการทำงานต่อวัน
 $N_{hrs.(OT)}$ คือ ชั่วโมงการทำงาน OT ต่อวัน
 WD_{OT} คือ วันทำงาน (workday)

ตารางที่ 4.22 ต้นทุนแรงงานสำหรับการผลิต 1 กะ

รายละเอียด	จำนวน	หน่วย
จำนวนคนงานต่อกะ	1	คน
อัตราค่าแรงงาน	300*	บาท
วันในการทำงาน	300	กะ
ค่าแรงงานปกติต่อปี	90,000	บาท
ชั่วโมงทำงานปกติต่อวัน	8	ชั่วโมง
ชั่วโมง OT ต่อวัน	3	ชั่วโมง
ค่าแรง OT ต่อวัน	168.75	บาท
ค่าแรง OT ต่อปี	50,625	บาท
ต้นทุนแรงงาน (กรณีไม่มี OT)	90,000	บาท/ปี
ต้นทุนแรงงาน (กรณีมี OT)	140,625	บาท/ปี

ที่มา : กระทรวงแรงงาน (Ministry of labor) ค่าแรงขั้นต่ำของจังหวัดสงขลา

ดังนั้น ต้นทุนแรงงานของกระบวนการทางความร้อน เท่ากับ 140,625 บาท/ปี

4.5.2.3 ต้นทุนพลังงาน คือ ต้นทุนค่าไฟฟ้า คำนวณโดยใช้อัตราค่าไฟแบบ Time of Use (TOU) ซึ่งเป็นการคิดอัตราการใช้งานที่แตกต่างตามช่วงเวลาที่ใช้งาน จากตารางที่ 4.13 โดยการคิดต้นทุนค่าไฟฟ้าจะแยกคิดเป็น 2 กรณี เนื่องจากในกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้งจะต้องใช้เตา 2 ชนิด คือ เตาอบละลายและเตาบ่มแข็งเทียม ในการใช้งานเตาอบละลายและเตาบ่มแข็งเทียมจำเป็นที่จะต้องคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ต้องใช้เพื่อที่จะนำไปคำนวณต้นทุนพลังงานไฟฟ้าได้ เพราะในแต่ละอุณหภูมิมีการใช้พลังงานความร้อนที่แตกต่างกัน สามารถคำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้ได้สมการที่ 4.8 [35]

$$q = C_{p,s} (T_e - T_i) \quad (4.8)$$

โดยที่ q คือ พลังงานความร้อนที่ต้องการ (J/kg)
 $C_{p,s}$ คือ ความจุความร้อนจำเพาะของโลหะในสถานะของแข็ง (J/kg °C)
 T_e คือ อุณหภูมิสุดท้ายของเตา (ที่ต้องการ) (°C)
 T_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของเตา (°C)

จากสมการที่ 4.8 เป็นการคำนวณพลังงานความร้อนที่ต้องการทางทฤษฎี ซึ่งในการคำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้จริงจะต้องใช้ประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องจักรซึ่งในที่นี้หมายถึงเตาอบละลายและเตาต้มแข็งเทียมโดยเตาที่ใช้เป็นระบบปิด โดยสามารถกำหนดให้ค่าของประสิทธิภาพการใช้งานเท่ากับ 0.9 (หรือ 90%) เนื่องจากการสูญเสียของความร้อนออกนอกระบบน้อย สามารถคำนวณพลังงานที่ใช้จริงได้จากสมการที่ 4.9

$$\text{ประสิทธิภาพการใช้งาน} = \frac{\text{พลังงานที่ต้องการตามทฤษฎี}}{\text{พลังงานที่ใช้จริง}} \times 100 \quad (4.9)$$

ในการคำนวณต้นทุนของพลังงานกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง จะต้องคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการของเตาอบละลายและเตาต้มแข็งเทียม โดยแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

1) การคำนวณพลังงานความร้อนที่ต้องการตามทฤษฎีของเตาเผาอุณหภูมิต่ำ โดยใช้สมการที่ 4.8 ซึ่งกำหนดให้ $C_{p,s}$ ของอะลูมิเนียมเท่ากับ 1,190 J/kg [34] อุณหภูมิเริ่มต้นของเตา (T_i) เท่ากับ 25°C ในที่นี้จะแสดงการคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการของอุณหภูมิอบละลาย 450°C โดยมีรายละเอียดดังนี้

$$\begin{aligned} q &= C_{p,s} (T_e - T_i) \\ q &= 1,190(450 - 25) \\ &= 505,750 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

จากการคำนวณข้างต้นเป็นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบละลายอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 450°C จำนวน 1 กิโลกรัม ซึ่งในการอบละลายแต่ละครั้งจะอบละลายอะลูมิเนียมจำนวน 300 ชิ้น หรือ 150 กิโลกรัม (ความจุเตาสูงสุด) โดยพลังงานความร้อนที่ต้องการในการอบละลายอะลูมิเนียม จำนวน 150 กิโลกรัม/ล็อต แสดงค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการตามทฤษฎี ดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการตามทฤษฎีของอุณหภูมิอบละลาย 450°C

	ค่าพลังงานความร้อน
พลังงานความร้อนที่ต้องการ (J/kg)	505,750
พลังงานความร้อนที่ต้องการ (J) (กำลังการผลิต 300 ชิ้น)	75,862,500

จากตารางที่ 4.23 เป็นค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการตามทฤษฎีของเตาอบละลาย ซึ่งสามารถคำนวณค่าพลังงานที่ใช้จริงได้จากสมการที่ 4.9 กำหนดให้ประสิทธิภาพการใช้งานเท่ากับ 0.9 (หรือ 90%) ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการใช้งาน} = \frac{\text{พลังงานที่ต้องการตามทฤษฎี}}{\text{พลังงานที่ใช้จริง}} \times 100$$

$$0.9 = \frac{75,862,500}{\text{พลังงานที่ใช้จริง}} \times 100$$

$$\text{พลังงานที่ใช้จริง} = \frac{75,862,500}{0.9} \times 100$$

$$\text{พลังงานที่ใช้จริง} = 8,429,166,666.67 \text{ J}$$

พลังงานที่ใช้ 1 J เท่ากับ 0.00027778 kW hr. ซึ่งสามารถคำนวณพลังงานที่ใช้จริงต่อชั่วโมงได้ดังนี้

$$\text{พลังงานที่ใช้จริง} = 2,341.44 \text{ kW hr.}$$

จากการคำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้จริง แสดงค่าดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้จริงของของอุณหภูมิอบละลาย 450 °C

	ค่าพลังงานความร้อน
พลังงานความร้อนที่ใช้จริง (J)	8,429,166,666.67
พลังงานความร้อนที่ใช้จริง (kW·hr.)*	2,341.44
พลังงานความร้อนที่ใช้จริง (kW·hr.)**	234.14

หมายเหตุ * ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้จริงในช่วงของการอุ่นเตาแต่ละอุณหภูมิอบละลาย

** ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้จริงในช่วงของการอบละลายซึ่งคิดที่ 10% ของช่วงการอุ่นเตาเพราะช่วงนี้เป็นช่วงที่มีความผันแปรเล็กน้อยจากอุณหภูมิอบละลายที่กำหนด

โดยในแต่ละเงื่อนไขจะใช้เวลาในกระบวนการที่แตกต่างกัน ซึ่งรายละเอียดของระยะเวลาการใช้พลังงานไฟฟ้าของเตาอบละลาย แสดงดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 ช่วงเวลาที่เตาอบละลายใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละวัน

เงื่อนไขการทดลอง	ลักษณะการทำงาน	เตาอบละลาย	
		ช่วง on-peak (นาที)	ช่วง off-peak (นาที)
450°C, 4 hrs.	อุ่นเตา	30	60
	อบชิ้นงาน	240	-
รวมเวลา		270	60
480°C, 4 hrs.	อุ่นเตา	36	60
	อบชิ้นงาน	240	-
รวมเวลา		276	60
510°C, 4 hrs.	อุ่นเตา	42	60
	อบชิ้นงาน	240	-
รวมเวลา		282	60

จากตารางที่ 4.25 สามารถคิดค่าไฟฟ้าได้จากสมการ 4.2

$$C_{\text{electricity}} = PW \times N_{\text{hrs./day}} \times N_{\text{WD/year}} \times P_{\text{electricity}}$$

เมื่อ PW คือ พลังงานที่ใช้ (kW·hr.)

$N_{\text{hrs./day}}$ คือ จำนวนชั่วโมงทำงานต่อวัน

$N_{\text{WD/year}}$ คือ จำนวนวันทำงานต่อปี

$P_{\text{electricity}}$ คือ อัตราค่าไฟต่อหน่วย (บาท/หน่วย)

ในการคำนวณจะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการอุ่นเตาอบละลาย และ ช่วงการอบละลาย ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

ก) การคำนวณค่าไฟฟ้าในช่วงการอุ่นเตาอบละลาย ในช่วงนี้จะคิดค่าไฟฟ้า 2 แบบ คือ ช่วง on-peak 30 นาที (0.5 ชั่วโมง) และช่วง off-peak 60 นาที (1 ชั่วโมง) โดยอัตราค่าไฟต่อหน่วย นำมาจากตาราง 4.13 ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

$$C_{\text{electricity}} = PW \times N_{\text{hrs./day}} \times N_{\text{WD/year}} \times P_{\text{electricity}}$$

$$C_{\text{electricity}} = (2,341.44 \times 0.5 \times 300 \times 5.2674) + (2,341.44 \times 1 \times 300 \times 2.1872)$$

$$C_{\text{electricity}} = 3,386,347.47 \text{ บาท/ปี}$$

ข) การคำนวณค่าไฟฟ้าในช่วงการอบละลาย ในช่วงนี้จะคิดค่าไฟฟ้า เฉพาะ ช่วง on-peak 240 นาที (4 ชั่วโมง) ซึ่งพลังงานความร้อนที่ใช้ในช่วงนี้คิดเป็น 10% ของช่วงการอุ่น เตอบละลาย หรือเท่ากับ 234.14 โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

$$C_{\text{electricity}} = PW \times N_{\text{hrs./day}} \times N_{\text{WD/year}} \times P_{\text{electricity}}$$

$$C_{\text{electricity}} = (234.14 \times 4 \times 300 \times 5.2674)$$

$$C_{\text{electricity}} = 1,479,993.08 \text{ บาท/ปี}$$

ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าของเตอบละลายที่อุณหภูมิอบละลาย 450°C ทั้งสองช่วง แสดงดังตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าของเตอบละลาย

ต้นทุนพลังงานไฟฟ้า	อุณหภูมิอบละลาย (°C)
	450
ช่วงการอุ่นเตอบละลาย	3,386,347.47
ช่วงการอบละลาย	1,479,993.08
รวม	4,866,340.55

2) การคำนวณพลังงานความร้อนที่ต้องการตามทฤษฎีของเตาบ่มแข็งเทียม จากสมการที่ 4.8 สามารถคำนวณพลังงานความร้อนที่ต้องการ โดยกำหนดให้ $C_{p,s}$ ของอะลูมิเนียมเท่ากับ 1,190 J/kg [35] อุณหภูมิเริ่มต้นของเตา (T_i) เท่ากับ 25°C และในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนความจุของเตาสามารถจุได้ 300 ชั่น (150 กิโลกรัม) ซึ่งค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการของแต่ละอุณหภูมิของการบ่มแข็งเทียมแสดงดังตารางที่ 4.27 โดยลักษณะการคำนวณจะเหมือนกับการคำนวณพลังงานความร้อนที่ต้องการตามทฤษฎีของเตาเผาอุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 4.27 ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการตามทฤษฎีของแต่ละอุณหภูมิบ่มแข็งเทียม

	อุณหภูมิบ่มแข็งเทียม (°C)	
	120	170
พลังงานความร้อนที่ต้องการ (J/kg)	113,050	172,550
พลังงานความร้อนที่ต้องการ (J) (กำลังการผลิต 300 ชั่น)	16,957,500	25,882,500

จากตารางที่ 4.27 เป็นค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการตามทฤษฎี ซึ่งสามารถคำนวณค่าพลังงานที่ใช้จริงของเตาบ่มแข็งเทียมได้จากสมการที่ 4.9 ผลจากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้จริงของแต่ละอุณหภูมิบ่มแข็งเทียม

	อุณหภูมิบ่มแข็งเทียม (°C)	
	120	170
พลังงานความร้อนที่ใช้จริง (J)	1,884,166,667	2,875,833,333
พลังงานความร้อนที่ใช้จริง (kW-hr.)*	523.38	798.84
พลังงานความร้อนที่ใช้จริง (kW-hr.)**	52.34	79.88

หมายเหตุ * ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้จริงในช่วงของการอุ่นเตาแต่ละอุณหภูมิบ่มแข็งเทียม

** ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้จริงในช่วงของการบ่มแข็งเทียมซึ่งคิดที่ 10% ของช่วงการอุ่นเตาเพราะช่วงนี้เป็นช่วงที่มีความผันแปรเล็กน้อยจากอุณหภูมิบ่มแข็งเทียมที่กำหนด

โดยในแต่ละเงื่อนไขจะใช้เวลาในกระบวนการที่แตกต่างกัน ซึ่งรายละเอียดของระยะเวลาการใช้พลังงานไฟฟ้าของเตาบ่มแข็งเทียม แสดงดังตารางที่ 4.29

ตารางที่ 4.29 ช่วงเวลาที่เตาบ่มแข็งเทียมใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละวัน

เงื่อนไขการทดลอง	ลักษณะการทำงาน	เตาบ่มแข็งเทียม	
		ช่วง on-peak (นาที)	ช่วง off-peak (นาที)
450°C, 4 hrs.	อุ่นเตา	60	-
	อบชิ้นงาน	210	-
รวมเวลา		270	0
480°C, 4 hrs.	อุ่นเตา	60	-
	อบชิ้นงาน	210	-
รวมเวลา		270	0
510°C, 4 hrs.	อุ่นเตา	60	-
	อบชิ้นงาน	210	-
รวมเวลา		270	0

จากตารางที่ 4.29 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เตาบ่มแข็งเทียมใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละวัน โดยสามารถนำมาคำนวณค่าไฟฟ้าได้จากสมการ 4.2 โดยแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.30

ตารางที่ 4.30 ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าของเตาบ่มแข็งเทียม

ต้นทุนพลังงานไฟฟ้า	อุณหภูมิบ่มแข็งเทียม (°C)	
	120	170
ช่วงการอุ่นเตาอบละลาย (บาท)	551,369.97	420,782.35
ช่วงการอบละลาย (บาท)	165,410.99	189,352.06
รวม	716,780.96	610,134.40

ดังนั้นต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าของกระบวนการในเงื่อนไขการทดลองที่ใช้อุณหภูมิอบละลาย 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง (ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง) สำหรับการผลิต 1 กะ แสดงดังตารางที่ 4.32

ตารางที่ 4.31 ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าของเงื่อนไขการทดลองที่ใช้อุณหภูมิอบละลาย 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

รายละเอียด	จำนวน	หน่วย
ค่าบริการต่อปี	553.92	บาท
ค่าไฟของเตาอบละลายต่อปี	4,866,340.55	บาท/ปี
ค่าไฟเตาบ่มแข็งเทียมต่อปี	1,326,915.37	บาท/ปี
ค่าไฟรวมทั้งปี	6,193,809.84	บาท/ปี

ดังนั้นต้นทุนพลังงานของกระบวนการทางความร้อนเท่ากับ 6,193,809.84 บาท/ปี

จากสมการที่ 4.4 สามารถคำนวณต้นทุนผันแปรต่อปีได้ ดังต่อไปนี้

$$VC = C_{\text{material}} + C_{\text{labor}} + C_{\text{energy}}$$

$$VC = 67,500,000 + 140,625 + 6,193,809.84$$

$$VC = 73,834,434.84 \text{ บาท/ปี}$$

ต้นทุนรวมของกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง ในเงื่อนไขการทดลองที่ใช้อุณหภูมิอบละลาย 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง โดยการผลิตอะลูมิเนียมเกรด 7075 ได้ 90,000 ชิ้น/ปี ซึ่งสามารถคำนวณต้นทุนต่อหน่วยได้จากสมการที่ 4.10

$$C_{\text{cost/unit}} = \left(\frac{FC + VC}{N_{\text{piece/year}}} \right) \quad (4.10)$$

เมื่อ FC คือ ต้นทุนคงที่ (บาท/ปี)

VC คือ ต้นทุนผันแปร (บาท/)

$N_{\text{piece/year}}$ คือ จำนวนผลิตต่อปี (ชิ้น)

$$C_{\text{cost/unit}} = \left(\frac{158,130.76 + 73,834,434.84}{90,000} \right)$$

$$C_{\text{cost/unit}} = 822.14 \text{ บาท/ชิ้น}$$

ในการคำนวณต้นทุนต่อหน่วยของเงินไอการทดลองดังกล่าวมีต้นทุนต่อหน่วยเท่ากับ 822.14 บาท/ชิ้น โดยจะแยกเป็นต้นทุนคงที่ต่อหน่วยเท่ากับ 1.76 บาท และต้นทุนผันแปรต่อหน่วยเท่ากับ 820.38 บาท และการคำนวณต้นทุนในเงินไออื่นๆ ที่มีกำลังการผลิต 90,000 ชิ้น/ปี แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.32

ตารางที่ 4.32 ต้นทุนในกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน กรณีที่ผลิต 90,000 ชิ้น/ปี (1 กะ)

รายการ	เวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง		
	450°C	480°C	510°C
ต้นทุนคงที่			
ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงาน	2,330.76	2,330.76	2,330.76
ต้นทุนค่าเครื่องจักร	114,000	114,000	114,000
ต้นทุนค่าอุปกรณ์	41,800	41,800	41,800
ต้นทุนการก่อสร้าง	N/A	N/A	N/A
ต้นทุนคงที่ต่อหน่วย (บาท)	1.76	1.76	1.76
ต้นทุนผันแปร			
ต้นทุนวัตถุดิบ	67,500,000	67,500,000	67,500,000
ต้นทุนแรงงาน			
ต้นทุนแรงงานปกติ	90,000	90,000	90,000
ต้นทุนแรงงาน OT	50,625	50,625	50,625
ต้นทุนพลังงาน	6,193,809.84	6,933,432.02	7,725,289.26
ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย (บาท)	820.38	828.60	837.39
ต้นทุนรวม (บาท)	73,992,565.60	74,732,189.54	75,524,046.78
รวมต้นทุนต่อหน่วย (บาท)	822.14	830.36	839.15

จากตารางที่ 4.32 พบว่าต้นทุนต่อหน่วยของกระบวนการทางความร้อน T6 ที่ใช้เวลาในการอบละลาย 4 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง ที่อุณหภูมิอบละลาย 450, 480 และ 510°C ให้ค่าของต้นทุนต่อหน่วยเท่ากับ 822.14 830.36 และ 839.15 บาท ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.26 (บทที่ 3) เป็นแผนภาพแสดงการระยะเวลาของกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง ที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่ายังสามารถใช้งานเครื่องจักรและคนได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถทำการผลิตชิ้นงานได้จำนวน 2 ล็อต/วัน

หรือ 180,000 ขึ้น/ปี (2 กะ) และ 3 ลีต/วัน หรือ 270,000 ขึ้น/ปี (3 กะ) ซึ่งในการคำนวณต้นทุนใหม่นี้ ส่วนที่แตกต่างไปจากเดิมคือ ต้นทุนพลังงานและต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงาน โดยตารางเวลาแสดงการใช้ไฟฟ้าของกระบวนการผลิตในกระบวนการทางความร้อนโดยการผลิต 2 และ 3 ลีต/วัน แสดงดังตารางที่ 4.33 ในส่วนของการคำนวณต้นทุนพลังงานและต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงานของกระบวนการทางความร้อนที่ใช้เวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง โดยการผลิตจำนวน 2 และ 3 ลีต/วัน มีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 4.33 ช่วงเวลาที่เครื่องจักรใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละวัน กรณีผลิตชิ้นงานวันละ 2 และ 3 ลีต (เฉพาะเงื่อนไขที่ใช้เวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง)

เงื่อนไขการทดลอง	ลักษณะการทำงาน	กรณีผลิต 2 ลีต (2 กะ)				กรณีผลิต 3 ลีต (3 กะ)			
		เตาอบละลาย		เตาต้มแข็งเทียม		เตาอบละลาย		เตาต้มแข็งเทียม	
		ช่วง on-peak (นาทีก)	ช่วง off-peak (นาทีก)	ช่วง on-peak (นาทีก)	ช่วง off-peak (นาทีก)	ช่วง on-peak (นาทีก)	ช่วง off-peak (นาทีก)	ช่วง on-peak (นาทีก)	ช่วง off-peak (นาทีก)
450°C, 4 ชั่วโมง	อุ่นเตา	30	60	80	-	30	60	100	20
	อบชิ้นงาน	480	-	385	35	705	15	385	245
รวมเวลา		510	60	465	35	735	75	485	265
480°C, 4 ชั่วโมง	อุ่นเตา	36	60	80	-	36	60	100	20
	อบชิ้นงาน	480	-	379	41	705	15	379	251
รวมเวลา		516	60	459	41	741	75	479	271
510°C, 4 ชั่วโมง	อุ่นเตา	42	60	80	-	42	60	100	20
	อบชิ้นงาน	480	-	373	47	705	15	373	298
รวมเวลา		522	60	453	47	747	75	473	318

ก) การคำนวณต้นทุนพลังงานของกระบวนการทางความร้อนที่ใช้อุณหภูมิอบละลาย 450°C และเวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง ในการผลิตจำนวน 2 ลีต/วัน ซึ่งมีวิธีการคำนวณเหมือนกับที่ระดับกำลังการผลิต 90,000 ชิ้น/ปี โดยมีรายละเอียดดังนี้

การคำนวณค่าไฟฟ้าของเตาเผาอุณหภูมิต่ำ แสดงดังตารางที่ 4.34

ตารางที่ 4.34 ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าของเตาอบละลาย (กรณีผลิตจำนวน 2 ลีต/วัน)

ต้นทุนพลังงานไฟฟ้า	อุณหภูมิอบละลาย (°C)		
	450	480	510
ช่วงการอุ่นเตาอบละลาย (บาท)	3,386,347.47	4,021,499.55	4,708,886.69
ช่วงการอบละลาย (บาท)	2,959,986.17	3,168,926.37	3,377,866.57
รวม	6,346,333.63	7,190,425.92	8,086,753.26

การคำนวณค่าไฟฟ้าของเตาบ่มแข็งเทียม แสดงดังตารางที่ 4.35

ตารางที่ 4.35 ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าของเตาบ่มแข็งเทียม (ผลิตจำนวน 2 ลีต/วัน สำหรับอุณหภูมิอบละลาย 450°C)

ต้นทุนพลังงานไฟฟ้า	อุณหภูมิบ่มแข็งเทียม (°C)	
	120	170
ช่วงการอุ่นเตาอบละลาย (บาท)	551,369.97	841,564.69
ช่วงการอบละลาย (บาท)	330,821.98	335,643.70
รวม	882,191.96	1,177,208.40

ต้นทุนพลังงานต่อปี เท่ากับ 8,406,287.90 บาท (รวมค่าบริการรายปี 553.92 บาท)

ข) การคำนวณต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงาน โดยแยกเป็น ค่าน้ำประปาในการชุบแข็ง และค่าไฟฟ้าส่องสว่าง ซึ่งจากการประมาณการใช้น้ำประปาต่อวันเท่ากับ 0.6 m³ ซึ่งเป็น 2 เท่าของการการผลิตจำนวน 1 ลีต/วัน โดยสามารถคำนวณค่าน้ำประปาได้จากสมการที่ 4.2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

$$\begin{aligned}
 C_{\text{water}} &= \text{service charge} + (V \times P_{\text{water}}) \\
 &= 600 + \{0.6 \times 300 \times 16\} \\
 &= 3,480 \text{ บาท/ปี}
 \end{aligned}$$

ส่วนต้นทุนค่าไฟฟ้าส่องสว่าง มีการเปิดใช้งานไฟฟ้าส่องสว่าง ตั้งแต่เวลา 18:00 - 23:00 น. ซึ่งรวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง สามารถคิดค่าไฟฟ้าส่องสว่างได้ดังนี้

$$C_{\text{electricity}} = PW \times N_{\text{WD/year}} \times P_{\text{electricity}}$$

$$C_{\text{electricity}} = \{(0.046 \times 8) \times (5 \times 300) \times 5.2674\}$$

$$C_{\text{electricity}} = 2,907.60 \text{ บาท/ปี}$$

รายละเอียดต้นทุนของกระบวนการผลิตที่ 180,000 ชิ้น/ปี (วันทำงาน 300 วัน) โดยใช้พนักงานจำนวน 1 คน/กะ และมีกะการทำงานจำนวน 2 กะ โดยมีรายละเอียดของต้นทุนดังตารางที่ 4.36

ตารางที่ 4.36 ต้นทุนในกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน กรณีที่ผลิต 180,000 ชิ้น/ปี (2 กะ)

รายการ	เวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง		
	450°C	480°C	510°C
ต้นทุนคงที่			
ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงาน	6,387.60	6,387.60	6,387.60
ต้นทุนค่าเครื่องจักร	114,000	114,000	114,000
ต้นทุนค่าอุปกรณ์	41,800	41,800	41,800
ต้นทุนการก่อสร้าง	N/A	N/A	N/A
ต้นทุนคงที่ต่อหน่วย (บาท)	0.9	0.9	0.9
ต้นทุนผันแปร			
ต้นทุนวัตถุดิบ	135,000,000	135,000,000	135,000,000
ต้นทุนแรงงาน			
ต้นทุนแรงงานกะที่ 1	90,000	90,000	90,000
ต้นทุนแรงงานกะที่ 2	90,000	90,000	90,000
ต้นทุนพลังงาน	8,406,287.90	9,242,998.41	10,131,943.96
ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย (บาท)	797.70	802.35	807.29
ต้นทุนรวม (บาท)	143,748,475.50	144,585,186.01	145,474,131.56
รวมต้นทุนต่อหน่วย (บาท)	798.60	803.25	808.19

จากตารางที่ 4.36 สามารถคำนวณต้นทุนต่อหน่วยของกระบวนการทางความร้อน T6 ที่ใช้เวลาในการอบละลาย 4 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง ที่อุณหภูมิ 450 480 และ 510°C โดยการผลิตจำนวน 180,000 ชิ้น/ปี ให้ค่าของต้นทุนต่อหน่วยเท่ากับ 798.60 803.25 และ 808.19 บาท ตามลำดับ

ส่วนที่ระดับกำลังการผลิต 270,000 ชิ้น/ปี (วันทำงาน 300 วัน) จะมีการคำนวณต้นทุนต่างๆ เหมือนกับระดับกำลังการผลิตที่ 180,000 ชิ้น/ปี โดยใช้พนักงานจำนวน 1 คน/กะ และมีกะการทำงาน 3 กะ โดยมีรายละเอียดของต้นทุนต่างๆ ดังตารางที่ 4.37

ตารางที่ 4.37 ต้นทุนในกระบวนการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน กรณีที่ผลิต 270,000 ชิ้น/ปี (3 กะ)

รายการ	เวลาอบละลาย 4 ชั่วโมง		
	450°C	480°C	510°C
ต้นทุนคงที่			
ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงาน	9,517.87	9,517.87	9,517.87
ต้นทุนค่าเครื่องจักร	114,000	114,000	114,000
ต้นทุนค่าอุปกรณ์	41,800	41,800	41,800
ต้นทุนการก่อสร้าง	N/A	N/A	N/A
ต้นทุนคงที่ต่อหน่วย (บาท)	0.61	0.61	0.61
ต้นทุนผันแปร			
ต้นทุนวัตถุดิบ	202,500,000	202,500,000	202,500,000
ต้นทุนแรงงาน			
ต้นทุนแรงงานกะที่ 1	90,000	90,000	90,000
ต้นทุนแรงงานกะที่ 2	90,000	90,000	90,000
ต้นทุนแรงงานกะที่ 3	90,000	90,000	90,000
ต้นทุนพลังงาน	10,154,222.61	11,091,585.05	12,182,521.79
ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย (บาท)	788.61	792.08	796.12
ต้นทุนรวม (บาท)	213,089,540.48	213,089,540.48	215,117,839.66
รวมต้นทุนต่อหน่วย (บาท)	789.22	792.69	796.73

จากตารางที่ 4.37 ต้นทุนต่อหน่วยของกระบวนการทางความร้อน T6 ที่ใช้เวลาในการอบละลาย 4 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง ที่อุณหภูมิ 450 480 และ 510°C โดยการผลิตจำนวน 270,000 ชิ้น/ปี ให้ค่าของต้นทุนต่อหน่วยเท่ากับ 789.22 792.69 และ 796.73 บาท ตามลำดับ

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลและข้อเสนอแนะ แสดงถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยทั้งหมด และข้อเสนอแนะเพิ่มเติมที่ได้จากการทำวิจัย ซึ่งจะกล่าวถึง 2 หัวข้อหลักๆ ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนและการบ่มแข็งเทียมที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ และการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยในระดับในระดับโรงงานขนาดเล็ก มีรายละเอียด ดังนี้

5.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค พบว่า ก่อนปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนและการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 7075 มีลักษณะเป็นเฟส α ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นเกรนก่อนกลมและมีเฟสยูเทคติกล้อมรอบ เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนและการบ่มแข็งเทียมสองครั้งที่สภาวะต่างๆ จะเห็นว่าขอบเกรนมีการละลายและทำให้ขอบเกรนมีความบางลง ซึ่งธาตุดังกล่าวจะละลายและรวมตัวกับธาตุอื่นๆ เพื่อเกิดการรวมตัวของเฟสใหม่ โดยจากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง ผลจากการตรวจสอบ พบว่ามีการเกิดการฟอร์มตัวของเฟสใหม่ขึ้นมา คือ เฟส Cu_2FeAl_7 หรือเรียกว่า intermetallic phase

5.1.2 สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075

ในงานวิจัยจะศึกษาสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ซึ่งได้แก่ สมบัติเชิงกลทางด้านความแข็ง (hardness) ความทนแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรงคราก (Yield strength) และเปอร์เซ็นต์ความยืด (%Elongation) ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมแบบสองขั้นตอนในสภาวะที่แตกต่างกัน

5.1.2.1 สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองขั้นตอน

ค่าความแข็ง ค่าความทนแรงดึง ความแข็งแรงครากและเปอร์เซ็นต์ความยืดของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS มีค่า 61.3 HRB 211.66 MPa 148.16 MPa และ 3% ตามลำดับ เนื่องจากอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปดังกล่าวส่งผลให้มีค่าสมบัติเชิงสูงเพราะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเกรนก้อนกลมและสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการรีดเพื่อลดรูปพูนเหมือนกับการหล่อขึ้นรูปแบบเก่า (Conventional Liquid Cast)

5.1.2.2 สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเกรด 7075 หลังผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองขั้นตอน

เงื่อนไขที่ให้สมบัติเชิงกลที่สูงของกระบวนการทางความร้อน คือ อุณหภูมิอบละลาย 450°C เวลา 8 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง จะให้ความแข็งแรง ค่าความแข็งแรงครากและเปอร์เซ็นต์ความยืด เท่ากับ 88.56 HRB และ 479.95 MPa 335.97 MPa และ 6% ตามลำดับ

5.1.3 การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยในระดับโรงงานขนาดเล็ก

จากการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยของอะลูมิเนียมเกรด 7075 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกึ่งของแข็งโดยใช้เทคนิค GISS และกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง โดยคำนวณต้นทุนการผลิตที่กำลังการผลิต 90,000 180,000 และ 270,000 ชิ้น/ปี ซึ่งต้นทุนต่อหน่วยต่ำสุดจะต้องผลิตที่กำลังการผลิต 270,000 ชิ้น/ปี (3 กะ) โดยมีต้นทุนต่อหน่วย 789.22 792.69 และ 796.73 บาท สำหรับอุณหภูมิอบละลาย 450 480 และ 510°C ตามลำดับ สำหรับต้นทุนต่อหน่วยต่ำสุดของแต่ละกะจะต้องใช้อุณหภูมิอบละลาย 450°C เวลา 4 ชั่วโมง และการบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าต้นทุนต่อหน่วยเท่ากับ 822.14 798.60 และ 789.22 บาท ตามลำดับ สำหรับกำลังการผลิตที่ 90,000 180,000 และ 270,000 ชิ้น/ปี

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการวิเคราะห์ต้นทุนเป็นการวิเคราะห์ให้เห็นค่าประมาณของต้นทุนต่อหน่วย ซึ่งในกรณีที่ใช้ในโรงงานจริง อาจจะต้องเพิ่มต้นทุนในส่วน of ค่าใช้จ่ายโรงงานและต้นทุนค่าก่อสร้างร่วมด้วย

5.2.2 ค่าของต้นทุนทั้งหมดเป็นการคำนวณต้นทุนที่ใช้เกณฑ์ของความต้องการต่างๆ
จากห้องปฏิบัติการ

บรรณานุกรม

- [1] S. Emani, Benedyk, J. Nash, and D. Chen. "Double aging and thermo-mechanical heat treatment of AA7075 aluminum alloy extrusion." *J. Mater Sci*, vol.44, pp.6384-6391, 2009.
- [2] J. Wannasin and M. Flemings. "Grain refinement of an aluminum alloy by introducing gas bubbles during solidification." *Scripta*, vol. 55, pp. 115-118, 2006.
- [3] EverySpec. "Data Sheet AMS QQA 2 0 0 / 1 1 7 0 7 5 ." Internet : http://www.everyspec.com/FED_SPECS/Q/_QQ-A-200_11E_41159 [Nov 1, 2013].
- [4] Thai-German. "Aluminium Alloys" Internet : <http://www.thai-germansteel.com> [Nov 1, 2013].
- [5] S. Thanabumrunkul, S. Janudom, R. Burapa, P. Dulyapraphant and J. Wannasin. "Industrial development of gas induced semi-solid process." *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*, vol. 20, pp. s1016-s1021, 2010.
- [6] H. Möller, G. Govender, and Stumpf. "The T6 Heat Treatment of Semi-Solid Metal Processed Alloy A356." *Open Material Science Journal*, vol. 2, pp. 6-10, 2008.
- [7] S. Kim, Kim D.Y., Kim, W.G., and Woo, K.D. "The study on characteristics of heat treatment of direct squeeze cast 7075 wrought Al alloy." *Materials Science and Engineering*, pp. 721-726, 2001.
- [8] M. Rosso and M. Actis Grande. "Optimization of heat treatment cycles for automotive parts produced by rheocasting process." *Solid State Phenom* 2006, pp. 116-117, 2006.
- [9] L. XiWu, BaiQing, XIONG., YongAn, ZHANG., Cheng HUA., Feng WANG., BaoHong, ZHU., and HongWei. "Effect of one-step aging on microstructure and properties of a novel Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy." *Science in China Series E : Technological Science*, vol. 52, pp. 67-71, 2009.
- [10] M. Chemingui, M. Khitouni, K. Jozwiak, Gérard Mesmacque, and AbdelwahebKolsi. "Characterization of the mechanical properties changes in an Al-Zn-Mg alloy after a two-step ageing treatment at 70 and 135 °C." *Material and Design*, vol. 31, pp. 3134-3139, 2010.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] S. Toros, F. Ozturk. "Modeling uniaxial temperature and strain rate dependent behavior of Al-Mg alloys." Computational Materials Science, 2010.
- [12] D. Wang, Ni, D.R., and Ma, Z.Y. "Effect of pre-strain and two-step aging on microstructure and stress corrosion cracking of 7050 alloy." Materials Science and Engineering, vol.A494, pp.360-366, 2008.
- [13] S. Akamphon, S. Sukkasi. "Reduction of zinc consumption with enhanced corrosion protection in hot-dip galvanized coatings: A process-based cost analysis." Resources, Conservation and Recycling, 2012.
- [14] C. Bloch and R. Ranganathan. "Process-Based Cost Modeling." Journal of hybrid and Manufacturing Technology, vol. 15, pp. 288-294, 2007.
- [15] M.D. Johnson and R. Kirchain. "Developing and Assessing Commonality Metrics for product Families : A Process-Based cost modeling Approach." Journal of Engineering Management, vol.57, pp. 1-15, 2009.
- [16] M. Koslowske. "A process based cost model for muti-layer ceramic manufacturing of solid oxide fuel cell." Materials science, 2007.
- [17] M.D. Johnson and R. Kirchain. "Quantifying the effects of part consolidation and development cost on material selection decision : A process-based costing approach." International Journal of Production Economic, vol.119, pp.174-186, 2009.
- [18] Y.M. Chen and J. J. Lin. "Cost effective design for injection molding." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol.15, pp. 1-21, 2009.
- [19] วิจิตร พงษ์บัณฑิต. "การหลอมละลายและการปรับปรุงทางโลหะวิทยาของอะลูมิเนียมผสม." เทคโนโลยีการหล่อโลหะ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, กรุงเทพมหานคร, 2542.
- [20] สัญลักษณ์ของการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมหล่อผสมตาม ANSI Standard. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.aluminiumlearning.com/html/index_casting.html (วันที่ค้นข้อมูล 12 ธันวาคม 2556).
- [21] แผนภาพผสมดอลูมิเนียม-สังกะสี. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.aluminiumlearning.com/html/index_casting.html (วันที่ค้นข้อมูล 12 ธันวาคม 2556).
- [22] เจษฎา วรณสินธุ์. "เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมไดคาสติงแบบกึ่งของแข็ง." ประชุมวิชาการงานหล่อไทย ครั้งที่ 3, หน้า 1-12, 2549.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] S. Nafisi and R Gomashchi. " Combined grain refining and medication of conventional and rheocast A356 Al-Si alloy." Material characterization 57, pp. 377-378, 2006.
- [24] M.C. Flemings and W.L. Johnson. "High viscosity liquid and semi-solid metal casting: Process and products." Plenary lecture word foundry conferance 2002, 2002.
- [25] C.G. Kang, J.W. Bea and B.M. Kim. "The grain size control of A356 aluminum alloy by horizontal electromagnatic stirring for rheology forging." Materials processing technology 2007, pp. 187-188, 2007.
- [26] Semi-Solid Metal Forming [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.rheomet.com/technology-en.asp?BigClassID=2> (วันที่ค้นข้อมูล 31 มีนาคม 2557)
- [27] G. Hong-min and Y. Xiang-jie. "Preparation of semi-solid slurry containing fine and globular particles for wrought aluminum alloy 2024." Trans. Nonferrous Met. Soc. China 17, pp. 799-804, 2007.
- [28] การทดสอบแรงดึง (Tension Test). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://orddept-crma-tensiontest.blogspot.com/2008_09_01_archive.html (วันที่ค้นข้อมูล 1 มีนาคม 2557).
- [29] Douglas C. Montgomery. "Design and Analysis of Experiments." Eight edition, John Wiley & Sons, Ins, 2013.
- [30] N Mahathaninwong. " Microstructure and Properties of Semi-Solid Al Alloy 7075 after Heat Treatment." Ph.D. Thesis of Prince of Songkla University, Engineering in Materials Engineering, 2012.
- [31] A. Venugopal, R. Panda, S. Manwatkar and et al. "Effect of Microstructure on the Localized Corrosion and Stress Corrosion Behaviours of Plasma-Electrolytic-OxidationTreated AA7075 Aluminum Alloy Forging in3.5wt.% NaCl Solution." International Journal of Corrosion, 2012.
- [32] นพพล เหลืองอักษร และ นฤมล ปลื้มจิตต์. "การศึกษาสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 ที่ผ่านกระบวนการกึ่งของแข็งและกระบวนการทางความร้อน T6." วิทยานิพนธ์การศึกษามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2555.
- [33] Heat Treat Ovens & Draw and Temper Furnaces. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.wisovenm.com/batch-ovens/heat-treat-tempering-oven> (วันที่ค้นข้อมูล 14 กรกฎาคม 2558).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [34] สนั่น เกชาอารี. "กลยุทธ์การบำรุงรักษาเครื่องจักรกล". วารสารสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), vol. 9, pp. 12-14, 2552.
- [35] เจษฎา วรรณสินธุ์. "การหล่อโลหะสำหรับวิศวกร". ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2553.

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 480°C

ลำดับที่	ขั้นตอน	เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด
1	อุ่นเตาอบละลายให้ได้อุณหภูมิ 480°C	96*	08:00	09:36
2	นำชิ้นงานเข้าเตาอบละลาย	5	09:36	09:41
3	เวลาอบละลาย	240	09:41	13:41
4	อุ่นเตาบ่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 120°C	40**	13:11	13:51
5	นำชิ้นงานออกจากเตาอบละลายแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ	10	13:41	13:51
6	นำชิ้นงานเข้าเตาบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1	5	13:51	13:56
7	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1	120	13:56	15:56
8	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ	10	15:56	16:06
9	อุ่นเตาบ่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 170°C	20**	16:06	16:26
10	นำชิ้นงานเข้าเตาบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2	5	16:26	16:31
11	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2	90	16:31	18:01
12	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ	10	18:01	18:11

หมายเหตุ

* อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาอบละลาย คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5°C/min.

** อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาบ่มแข็งเทียม คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3°C/min

ตารางที่ ก.2 ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 510°C

ลำดับที่	ขั้นตอน	เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด
1	อุ่นเตาอบละลายให้ได้อุณหภูมิ 510°C	102*	08:00	09:42
2	นำชิ้นงานเข้าเตาอบละลาย	5	09:42	09:47
3	เวลาอบละลาย	240	09:47	13:47
4	อุ่นเตาบ่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 120°C	40**	13:17	13:47
5	นำชิ้นงานออกจากเตาอบละลายแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ	10	13:47	13:57
6	นำชิ้นงานเข้าเตาบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1	5	13:57	14:02
7	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1	120	14:02	16:02
8	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ	10	16:02	16:12
9	อุ่นเตาบ่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 170°C	20**	16:12	16:32
10	นำชิ้นงานเข้าเตาบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2	5	16:32	16:37
11	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2	90	16:37	18:07
12	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ	10	18:07	18:17

หมายเหตุ

* อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาอบละลาย คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5°C/min.

** อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาบ่มแข็งเทียม คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3°C/min

ตารางที่ ก.3 ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 480°C ผลิตจำนวน 2 ล็อตต่อหนึ่งวัน

ลำดับที่	ขั้นตอน	เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด
1	อุ่นเตาอบละลายให้ได้อุณหภูมิ 480°C (1)	96*	08:00	09:36
2	นำชิ้นงานเข้าเตาอบละลาย (1)	5	09:36	09:41
3	เวลาอบละลาย (1)	240	09:41	13:41
4	อุ่นเตาบ่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 120°C (1)	40**	13:11	13:51
5	นำชิ้นงานออกจากเตาอบละลายแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (1)	10	13:41	13:51
6	นำชิ้นงานเข้าเตาบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1 (1)	5	13:51	13:56
7	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1 (1)	120	13:56	15:56
8	นำชิ้นงานเข้าเตาอบละลาย (2)	5	13:56	14:01
9	เวลาอบละลาย (2)	240	14:01	18:01
10	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (1)	10	15:56	16:06
11	อุ่นเตาบ่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 170°C (1)	20**	16:06	16:26
12	นำชิ้นงานเข้าเตาบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 (1)	5	16:26	16:31
13	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 (1)	90	16:31	18:01
14	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (1)	10	18:01	18:11
15	นำชิ้นงานออกจากเตาอบละลายแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (2)	10	18:11	18:21
16	รอเตาบ่มแข็งเทียมอุณหภูมิลดลง ถึงอุณหภูมิ 120°C (2)	20**	18:11	18:31
17	นำชิ้นงานเข้าเตาบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1 (2)	5	18:31	18:36
18	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 1 (2)	120	18:36	20:36
19	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (2)	10	20:36	20:46
20	อุ่นเตาบ่มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 170°C (2)	20**	20:46	21:06
21	นำชิ้นงานเข้าเตาบ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 (2)	5	21:06	21:11

ตารางที่ ก.3 ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การอบละลาย 4 ชั่วโมง ผลิตจำนวน 2 ลีตต่อหนึ่งวัน (ต่อ)

ลำดับที่	ขั้นตอน	เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด
22	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 (2)	90	21:11	22:41
23	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (2)	10	22:41	22:51

หมายเหตุ

* อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาอบละลาย คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5°C/min.

** อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาบ่มแข็งเทียม คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3°C/min.

(1) ลีตที่ 1

(2) ลีตที่ 2

ตารางที่ ก.4 ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 510°C ผลิตจำนวน 2 ล็อตต่อหนึ่งวัน

ลำดับที่	ขั้นตอน	เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด
1	อุ่นเตาอบละลายให้ได้อุณหภูมิ 510°C (1)	106*	08:00	09:42
2	นำชิ้นงานเข้าเตาอบละลาย (1)	5	09:42	09:47
3	เวลาอบละลาย (1)	240	09:47	13:47
4	อุ่นเตาปั๊มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 120°C (1)	40**	13:17	13:57
5	นำชิ้นงานออกจากเตาอบละลายแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (1)	10	13:47	13:57
6	นำชิ้นงานเข้าเตาปั๊มแข็งเทียมครั้งที่ 1 (1)	5	13:57	14:02
7	ปั๊มแข็งเทียมครั้งที่ 1 (1)	120	14:02	16:02
8	นำชิ้นงานเข้าเตาอบละลาย (2)	5	14:02	14:07
9	เวลาอบละลาย (2)	240	14:07	18:07
10	นำชิ้นงานออกจากเตาปั๊มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (1)	10	16:02	16:12
11	อุ่นเตาปั๊มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 170°C (1)	20**	16:12	16:32
12	นำชิ้นงานเข้าเตาปั๊มแข็งเทียมครั้งที่ 2 (1)	5	16:32	16:37
13	ปั๊มแข็งเทียมครั้งที่ 2 (1)	90	16:37	18:07
14	นำชิ้นงานออกจากเตาปั๊มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (1)	10	18:07	18:17
15	นำชิ้นงานออกจากเตาอบละลายแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (2)	10	18:17	18:27
16	รอเตาปั๊มแข็งเทียมอุณหภูมิลดลง ถึงอุณหภูมิ 120°C (2)	20**	18:17	18:37
17	นำชิ้นงานเข้าเตาปั๊มแข็งเทียมครั้งที่ 1 (2)	5	18:37	18:42
18	ปั๊มแข็งเทียมครั้งที่ 1 (2)	120	18:42	20:42
19	นำชิ้นงานออกจากเตาปั๊มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (2)	10	20:42	20:52
20	อุ่นเตาปั๊มแข็งเทียมให้ได้อุณหภูมิ 170°C (2)	20**	20:52	21:12
21	นำชิ้นงานเข้าเตาปั๊มแข็งเทียมครั้งที่ 2 (2)	5	21:12	21:17

ตารางที่ ก.4 ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยใช้การอบละลาย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 510°C ผลิตจำนวน 2 ลีตต่อหนึ่งวัน (ต่อ)

ลำดับที่	ขั้นตอน	เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาเริ่ม	เวลาสิ้นสุด
22	บ่มแข็งเทียมครั้งที่ 2 (2)	90	21:17	22:47
23	นำชิ้นงานออกจากเตาบ่มแข็งเทียมแล้วทำให้เย็นด้วยน้ำ (2)	10	22:47	22:57

หมายเหตุ

* อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาอบละลาย คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5°C/min.

** อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของเตาบ่มแข็งเทียม คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 3°C/min.

(1) ลีตที่ 1

(2) ลีตที่ 2

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งของกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

ตำแหน่งที่	Rep. 1		Rep 2		Rep. 3	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1	89.3	85.9	84.2	87.2	89.9	91.5
2	88.3	84.3	86.3	82.3	86.4	87.8
3	82.5	87.3	84.9	87.2	90.6	90.7
4	80.2	86.9	87.5	85.8	86.7	92.3
5	86.3	90.2	90.3	91.2	90.3	87.6
6	88.7	89.4	83.5	82.2	88.8	86.4
7	84.3	83.7	88.6	88.9	92.9	89.5
8	87.9	87.2	80.1	89.1	87.6	90.9
9	80.2	92.9	81.2	83.4	87.6	89.4
10	89.3	88.9	82.2	88.9	92.9	87.4
11	86.6	85.9	88.7	90.1	89.7	89.3
12	85.9	92.3	82.1	90.9	92.9	92.5
13	90.4	94.8	80.2	85.2	86.4	92.5
14	82.3	87.9	80.4	90.3	86.3	91.9
15	85.3	88.4	84.4	92.7	90.9	87.5
\bar{X}	85.83	88.40	84.31	87.69	89.33	89.81

ตารางที่ ข.2 ค่าความแข็งของกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 480°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งเทียบสองครั้ง

ตำแหน่งที่	Rep. 1		Rep 2		Rep. 3	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1	88.3	80.7	87.2	86.4	82.3	87.4
2	84.9	82.6	85.3	81.7	86.2	88.9
3	82.7	85.9	79.9	88.9	89.3	87.5
4	83.8	82.6	88.1	89.1	81.6	86.4
5	89.2	78.9	88.3	90.2	88.2	87.3
6	82.4	88.6	87.4	89.4	80.9	89.2
7	83.7	85.3	86.4	88.3	84.9	87.4
8	82.4	86.5	88.9	79.2	88.3	82.1
9	85.7	82.5	89.1	80.4	85.6	86.3
10	85.4	83.6	89.9	86.7	78.5	85.4
11	79.9	84.3	82.3	90.9	83.5	78.3
12	83.3	86.7	88.1	89.5	89.6	86.4
13	85.6	89.7	85.3	87.3	86.4	86.9
14	79.7	88.5	87.1	88.9	83.5	81.2
15	89.2	88.6	88.9	89.7	87.3	86.7
\bar{X}	84.41	85.00	86.81	87.11	85.07	85.83

ตารางที่ ข.3 ค่าความแข็งของกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 510°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

ตำแหน่งที่	Rep. 1		Rep 2		Rep. 3	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1	78.8	80.3	85.4	86.5	85.1	80.4
2	80.1	85.2	85.1	82.9	88.7	81.7
3	83.4	79.5	84.3	88.5	78.9	88.6
4	84.3	80.2	87.4	86.5	80.1	84.3
5	75.5	80.4	79.5	83.6	84.6	79.6
6	84.3	84.3	80.2	83.4	86.2	83.6
7	80.1	81.1	83.7	81.9	83.4	86.1
8	80.4	84.4	85.1	79.4	84.5	85.3
9	78.6	88.4	80.6	85.6	86.1	80.4
10	84.3	79.1	78.8	84.3	84.3	84.3
11	79.4	78.5	79.4	79.5	80.5	88.6
12	78.9	80.1	83.3	83.6	81.9	83.5
13	79.8	81.4	85.3	84.2	83.5	88.3
14	80.1	76.7	87.1	84.6	80.7	79.7
15	79.1	80.4	84.3	88.7	85.1	80.5
\bar{X}	80.47	81.33	83.30	84.21	83.57	83.66

ตารางที่ ข.4 ค่าความแข็งของกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

ตำแหน่งที่	Rep. 1		Rep 2		Rep. 3	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1	94.2	90.2	88.4	86.5	87.9	86.5
2	88.8	95.3	85.7	88.7	90.3	87.4
3	90.3	90.3	88.9	91.9	84.7	90.1
4	89.4	87.6	86.5	86.7	88.5	83.4
5	90.3	90.4	88.3	89.6	85.7	81.5
6	90.2	88.5	87.9	90.6	85.4	87.4
7	90.5	87.2	90.3	93.5	87.2	84.5
8	88.4	86.5	91.7	89.3	90.5	90.4
9	87.5	80.5	86.7	88.7	93.5	85.6
10	84.4	87.3	88.7	90.6	84.6	88.4
11	84.6	88.3	93.4	93.4	85.7	85.6
12	91.8	89.8	95.4	93.9	90.1	86.2
13	83.6	89.9	89.6	89.7	88.6	87.6
14	90.1	90.4	90.3	85.7	87.6	85.4
15	88.6	94.3	90.9	89.9	80.3	89.1
\bar{X}	88.85	89.10	89.51	89.91	87.37	86.61

ตารางที่ ข.5 ค่าความแข็งของกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 480°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งเทียบสองครั้ง

ตำแหน่งที่	Rep. 1		Rep 2		Rep. 3	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1	85.3	85.4	88.5	89.4	85.4	87.7
2	88.2	80.1	83.5	88.7	84.8	86.6
3	82.5	84.3	87.7	87.9	82.9	88.5
4	84.5	85.3	86.6	89.2	85.9	87.2
5	85.3	87.4	85.7	89.4	88.6	84.9
6	82.4	84.5	84.4	88.7	87.5	88.5
7	85.3	80.1	84.5	87.5	88.5	87.7
8	85.4	88.5	87.8	89.2	89.8	88.6
9	85.3	87.5	85.6	88.4	85.9	87.9
10	88.1	84.6	82.3	90.2	84.8	87.4
11	88.6	87.5	89.8	88.4	85.6	80.3
12	88.6	84.5	89.6	86.7	87.9	84.5
13	82.3	86.5	88.3	89.6	89.4	84.5
14	84.4	86.4	87.7	88.3	80.6	88.8
15	85.3	89.2	90.1	87.3	88.5	85.8
\bar{X}	85.43	85.45	86.81	88.59	86.41	86.59

ตารางที่ ข.6 ค่าความแข็งของกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 510°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งเทียบสองครั้ง

ตำแหน่งที่	Rep. 1		Rep 2		Rep. 3	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1	82.1	85.5	80.4	79.5	84.3	85.4
2	85.7	89.4	83.2	82.2	86.5	86.2
3	83.2	84.5	86.4	87.5	86.2	85.3
4	87.2	86.4	79.6	82.4	83.4	81.5
5	88.8	88.4	81.2	83.2	87.1	86.6
6	84.2	87.3	84.5	86.5	85.1	79.8
7	84.3	83.5	85.5	83.2	84.4	85.3
8	83.4	85.3	79.5	80.5	85.8	86.5
9	87.5	85.4	87.5	82.5	84.3	85.8
10	85.4	86.4	83.5	79.4	87.1	86.3
11	80.6	79.6	88.2	86.5	88.9	84.3
12	79.4	85.4	80.1	85.3	87.4	85.4
13	80.4	82.9	83.3	85.4	85.3	87.9
14	87.4	85.9	86.2	86.3	86.3	85.4
15	82.8	86.5	82.5	80.1	85.9	88.4
\bar{X}	84.16	85.49	83.44	83.37	85.87	85.34

ตารางที่ ข.7 ค่าความทนแรงดึงของกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

Solution Temp.	450°C	480°C	510°C	450°C	480°C	510°C
Solution Time	4 ชั่วโมง			8 ชั่วโมง		
Rep.1/1	465.12	438.98	428.62	499.87	463.12	423.98
Rep.1/2	469.51	442.87	437.38	484.11	458.57	431.21
Rep.2/1	475.09	475.92	390.10	484.2	465.73	436.61
Rep.2/2	483.69	479.97	403.90	491.76	470.07	442.11
Rep.3/1	486.66	454.22	419.98	466.36	469.76	418.93
Rep.3/2	482.72	447.67	412.02	453.40	479.66	402.89

ตารางที่ ข.8 ค่ากำลังครากของกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

Solution Temp.	450°C	480°C	510°C	450°C	480°C	510°C
Solution Time	4 ชั่วโมง			8 ชั่วโมง		
Rep.1/1	325.58	307.29	300.03	349.91	324.18	296.79
Rep.1/2	328.66	310.01	306.17	338.88	321.00	301.85
Rep.2/1	332.56	333.14	273.07	338.94	326.01	305.63
Rep.2/2	338.58	335.98	282.73	344.23	329.05	309.48
Rep.3/1	340.66	317.95	293.99	326.45	328.83	293.25
Rep.3/2	337.90	313.37	288.41	317.38	335.76	282.02

ตารางที่ ข.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดของกระบวนการทางความร้อน T6 และการบ่มแข็งเทียมสองครั้ง

Solution Temp.	450°C	480°C	510°C	450°C	480°C	510°C
Solution Time	4 ชั่วโมง			8 ชั่วโมง		
Rep.1/1	7.0	5.4	5.2	6.1	5.1	4.4
Rep.1/2	6.8	5.8	5.1	6.2	4.8	5.1
Rep.2/1	6.5	6.0	4.9	5.8	4.9	4.5
Rep.2/2	7.5	6.2	5.1	6.1	4.7	4.7
Rep.3/1	6.2	5.4	5.0	5.9	5.3	4.5
Rep.3/2	7.5	5.5	4.7	5.9	5.9	4.1

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นาย อนันต์ ศรีมุข
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610120042
 วุฒิกการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมการผลิต)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการการศึกษา)

- ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2556 ได้รับจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ หน่วยบริหารงานวิจัย นวัตกรรมและทรัพย์สินทางปัญญา
- ทุนอุดหนุนการทำวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีการศึกษา 2556 ได้รับจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Anan Srimuk, Somjai Janudom and Napisphon Meemongkol. 2014. The T6 Heat Treatment of Semi-Solid 7075 Al alloy and cost analysis laboratory scale. International Conference on Materials, Mechatronics, Manufacturing and Mechanical Engineering 2014 (ICMMMM 2014). October 24-25, 2014. Kuching, Malaysia.

Anan Srimuk, Somjai Janudom and Napisphon Meemongkol. "The T6 Heat Treatment of Semi-Solid 7075 Al alloy and cost analysis laboratory scale." American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture, pp.49-54, 2014