

อิทธิพลของปัจจัยในการบ่มสองระยะที่มีผลต่อสมบัติทางกล
ของอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024



นางสาวกมลชนก ปรีชาเวช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**INFLUENCE OF DOUBLE AGING PARAMETERS ON
MECHANICAL PROPERTIES OF
2024 ALUMINIUM ALLOY**

Kamonchanok Preechawech

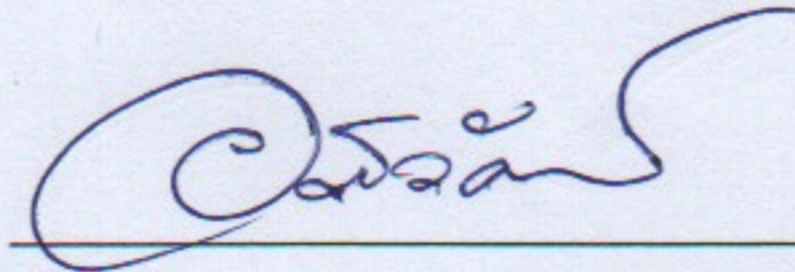


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and
Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2018**

อิทธิพลของปัจจัยในการบ่มสองระยะที่มีผลต่อสมบัติทางกล
ของอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024

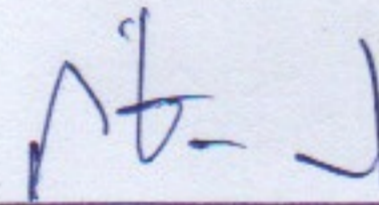
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



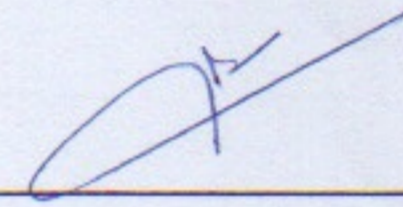
(ผศ. ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ)

ประธานกรรมการ



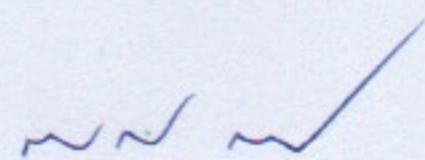
(ผศ. ดร.กัญชลา สุดตาชาติ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



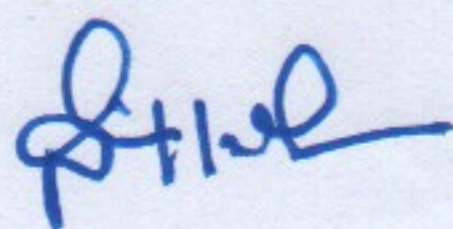
(ผศ. ดร.วรรณนัช บุ่งสุต)

กรรมการ



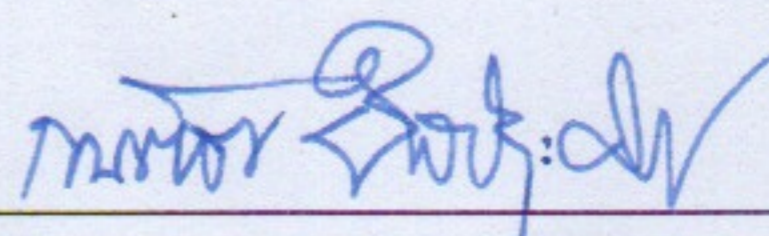
(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนัตร์ ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์



กมลชนก ปรีชาเวช : อิทธิพลของปัจจัยในการบ่มสองระยะที่มีผลต่อสมบัติทางกลของ
อะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 (INFLUENCE OF DOUBLE AGING PARAMETERS ON
MECHANICAL PROPERTIES OF 2024 ALUMINIUM ALLOY) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญชลา สุตตาชาติ, 88 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป
ที่นำมาผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 แบบสองระยะ โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลา
ในการบ่มแข็งเทียมที่มีผลต่อสมบัติทางกล ขึ้นตัวอย่างถูกอบละลายที่อุณหภูมิ 505 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชุบเย็นในน้ำที่อุณหภูมิห้องและนำชิ้นตัวอย่างไปผ่านกระบวนการ
การบ่มแข็งเทียมขั้นต้นที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12, 15 และ 18 ชั่วโมง
ส่วนการบ่มแข็งเทียมสองระยะ หลังการอบละลายชิ้นตัวอย่างจะถูกบ่มแข็งเทียมครั้งแรกที่อุณหภูมิ
110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และชุบเย็นในน้ำ และบ่มแข็งเทียมครั้งที่สองที่อุณหภูมิ
170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 30 และ 36 ชั่วโมง จากผลการทดสอบพบว่า
ชิ้นงานที่ได้รับการบ่มแข็งขั้นต้นมีค่าความแข็งสูงสุด 80.60 HRB ที่ระยะเวลาบ่ม 15 ชั่วโมง
ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 429.20 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 14.85 เปอร์เซ็นต์ และชิ้นงาน
ที่ได้รับการบ่มแข็งเทียมสองระยะมีค่าความแข็งสูงสุด 80.10 HRB ที่ระยะเวลาบ่ม 24 ชั่วโมง
ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 496.78 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 20.41 เปอร์เซ็นต์ จากผล
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า θ Phase
(Al_2Cu/Al_2CuMg) สำหรับการบ่มสองระยะ มีขนาดเล็กกว่าและกระจายตัวมากกว่าเมื่อเทียบกับ
การบ่มขั้นต้นเดียว จึงให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดสูงกว่าและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมากกว่าการบ่ม
แข็งแบบขั้นต้นเดียว

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา กมลชนก
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา กบ-จ

KAMONCHANOK PREECHAWECH : INFLUENCE OF DOUBLE AGING
PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF 2024 ALUMINIUM
ALLOY. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KANCHALA SUDTACHAT,
PhD., 88 PP.

ALUMINIUM ALLOY 2024/ HEAT TREATMENT T6/PRECIPIATION/
MECHANICAL PROPERTIES

This research was aimed to investigate influence of double aging parameters, time and temperature, on mechanical properties of rolling aluminium alloy 2024. Specimen was solution treated at 505 °C for 4 hours and quenching in water at room temperature. For single aging, specimen was aged at 190 °C for 12, 15 and 18 hours. In case of double aging, the first aged was at 110 °C for 8 hours and the second aged was at 170 °C for 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 30 and 36 hours. It was found that the maximum hardness was observed by 80.60 HRB at 15 hours of single aging with the highest tensile strength 429.20 MPa and elongation 14.85%. The maximum hardness in case of double aging was found by 80.10 HRB at 24 hours with the highest tensile strength 496.78 MPa and elongation 20.41%. Scanning electron microscopy (SEM) was used to illustrate the microstructure revealed that secondary phase (Al_2Cu/Al_2CuMg) in double aging specimen was smaller and better dispersed than in single aging specimen. Therefore, the double aging specimen has indicated higher strength and elongation.

School of Manufacturing Engineering

Academic year 2018

Student's Signature Kamonchanok

Advisor's Signature Kanchala

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วง เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการ และทางด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญชลา สุตตาชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ ที่ประสาทวิชาความรู้ ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาในการทำงานวิจัย และให้ความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา รวมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนสำเร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณนัช บุ่งสุด หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้โอกาสในการศึกษา คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ อาจารย์สิริพร ชันทองคำ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ที่ให้คำแนะนำปรึกษาชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณคมสัน ภาษยเดช, คุณนพพร แฉวเพชร, คุณมานิช แสงศาสตร์, คุณกฤษณา ศรีรักรักษ์ และคุณวิเชษฐ์ เผือกแดง วิศวกรและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

กมลชนก ปรีชาเวช

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชณววรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminium alloys).....	4
2.1.1 อะลูมิเนียมขึ้นรูป (Wrought aluminium alloy).....	5
2.1.2 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนโลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมสำหรับ งานขึ้นรูป (Wrought aluminum and Wrought aluminum alloys).....	6
2.1.3 อะลูมิเนียมผสม กลุ่ม 2XXX.....	8
2.1.4 โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024.....	11
2.2 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบรีดขึ้นรูป (Rolling).....	11
2.3 กระบวนการทางความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม.....	14
2.3.1 การกำหนดสัญลักษณ์กระบวนการทางความร้อนสำหรับ โลหะผสมอะลูมิเนียม (Temper Designation for Aluminum Alloys).....	14
2.3.2 การเพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีการตกตะกอน (Precipitation strengthening).....	17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2.1	การเพิ่มการอบละลาย (Solution heat treatment).....	18
2.3.2.2	การชุบเย็น (Quenching).....	18
2.3.2.3	การบ่มแข็ง (Aging).....	19
2.3.2.4	พรีซิพิตชันในโลหะผสมที่ผ่านการบ่มแข็ง (Precipitation in age hardening alloys).....	20
2.4	สมบัติทางกล (Mechanical properties).....	26
2.4.1	การทดสอบความแข็ง (Hardness Test).....	26
2.4.1.1	การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell hardness test).....	27
2.4.1.2	การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell hardness test)....	28
2.4.1.3	การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test).....	30
2.4.2	การทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	31
2.5	การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา.....	39
2.5.1	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopes; OM).....	39
2.5.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM).....	42
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	48
3.1	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	49
3.2.1	เตาเผาอุณหภูมิสำหรับอบละลาย.....	49
3.2.2	เตาอบอุณหภูมิสำหรับการบ่มแข็งเทียม.....	50
3.2.3	เลื่อยสายพานแนวนอน.....	51
3.2.4	เครื่องกัดแนวตั้ง.....	51
3.2.5	เครื่องขัดกระดาษทรายและขัดสีกล้า.....	52
3.2.6	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	52
3.2.7	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	53

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.8	เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบร็อคเวลล์.....	53
3.2.9	เครื่องทดสอบแรงดึง.....	54
3.3	การเตรียมชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการรีดขึ้นรูป...54	
3.4	ขั้นตอนการทดลองด้วยกระบวนการทางความร้อน.....	55
3.5	การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบความแข็ง.....	56
3.6	การเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	56
3.7	การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึง.....	57
4	ผลการดำเนินการวิจัย.....	58
4.1	ชิ้นงานวัตถุดิบ (As received).....	58
4.1.1	สมบัติทางกล (ค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงดึง).....	58
4.1.2	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัตถุดิบ.....	59
4.2	ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย.....	60
4.2.1	สมบัติทางกล (ค่าความแข็ง).....	60
4.2.2	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในสภาวะที่ผ่านการอบละลาย.....	60
4.3	ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมขั้นตอนเดียว.....	61
4.3.1	สมบัติทางกล (ค่าความแข็ง และค่าความแข็งแรงดึงในสภาวะที่ดีที่สุด)....	61
4.3.2	โครงสร้างจุลภาคของทุกสภาวะในการบ่มแข็งเทียมขั้นตอนเดียว.....	62
4.3.3	โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ Under aging, Peak aging และ Over aging ในการบ่มแข็งเทียมขั้นตอนเดียวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM).....	63
4.4	ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมสองระยะ.....	68
4.4.1	สมบัติทางกล (ค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงดึงในสภาวะที่ดีที่สุด)....	68
4.4.2	โครงสร้างจุลภาคของทุกสภาวะในการบ่มแข็งเทียมสองระยะ.....	70
4.4.3	โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ Under aging, Peak aging และ Over aging ในการบ่มแข็งเทียมสองระยะ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM).....	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	78
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	78
5.1.1 ชิ้นงานวัตถุดิบ (As received).....	78
5.1.2 ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย.....	78
5.1.3 ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียบขั้นตอนเดียว.....	79
5.1.4 ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียบสองระยะ.....	79
5.1.5 เปรียบเทียบสมบัติทางกลระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียบ ขั้นตอนเดียวและการบ่มแข็งเทียบสองระยะที่ให้สมบัติทางกลที่ดี.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	88

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูป.....7
2.2	สัญลักษณ์ของกระบวนการทางความร้อน (Temper) สำหรับโลหะผสม อะลูมิเนียม.....15
2.3	ลำดับการพรีซีพเทชัน.....23
2.4	สเกลการทดสอบความแข็งและชนิดของหัวกดของการวัดความแข็งแบบรีอคเวลล์.....29
2.5	ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ใช้เป็นมาตรฐานในประเทศต่าง ๆ.....32
3.1	ส่วนผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 2024 (wt%).....49
4.1	ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานวัตถุบอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป.....58
4.2	ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป ที่ผ่านการอบ ละลายที่อุณหภูมิ 505 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....60
4.3	ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป ที่ผ่านการบ่ม แข็งเทียมขึ้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 12, 15 และ 18 ชั่วโมง.....61
4.4	ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป ที่ผ่านการบ่ม แข็งเทียมสองระยะ โดยบ่มแข็งครั้งที่สอง ที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 30 และ 36 ชั่วโมง.....68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ปริมาณการใช้โลหะอะลูมิเนียมผสมจำแนกตามอุตสาหกรรม พ.ศ. 2556..... 1
2.1	แผนภาพสมดุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง.....9
2.2	ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมทองแดงเมื่อมีปริมาณธาตุผสมทองแดงที่แตกต่างกัน และผ่านกระบวนการในการบ่มแข็งเทียม..... 9
2.3	การเปลี่ยนเฟสของอะลูมิเนียมผสมทองแดงและการเกิดเฟสของอะลูมิเนียม ผสมทองแดงและแมกนีเซียม.....10
2.4	การรีดขึ้นรูปโลหะรูปทรงต่าง ๆ..... 12
2.5	อะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปแบบการรีดร้อน..... 13
2.6	ผลของการรีดขึ้นรูปร้อนทำให้เกรนเปลี่ยนแปลง..... 13
2.7	อะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปแบบการรีดเย็น..... 14
2.8	การเปลี่ยนแปลงเฟสของ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง.....20
2.9	พลังงานอิสระของ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง..... 21
2.10	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระในเฟสลำดับต่าง ๆ..... 22
2.11	โครงสร้างผลึกของปริซิพิตของ θ'' , θ' และ θ เมื่อเทียบกับเมตริกซ์..... 24
2.12	ตำแหน่งการนิวคลีเอชันใน โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง.....25
2.13	แผนภาพ TTT ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง.....25
2.14	การแพร่ของทองแดงจาก θ'' ไปยัง θ' ทำให้ θ' โตขึ้นในขณะที่ θ'' เริ่มหายไป.....26
2.15	ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....32
2.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress-Strain ภายใต้แรงกระทำในแนวแกน.....33
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ Aluminum alloy และการหาค่า Yield strength ที่ 0.2% offset.....35
2.18	การเกิดคอคอดก่อนการแตกหักในชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....37
2.19	ลักษณะการแตกหักแบบถ้วยและกรวย (Cup and cone fracture).....38
2.20	Ductile fracture surface (Ductile metals) and Brittle fracture surface (Brittle metals).....39

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.21 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	40
2.22 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่อง SEM.....	43
3.1 แผนภาพลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	48
3.2 อะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีดขึ้นรูป.....	49
3.3 เตาเผาอุณหภูมิต่ำ.....	50
3.4 เตาบ่มแข็งเทียม.....	50
3.5 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน.....	51
3.6 เครื่องกัดแนวตั้ง.....	51
3.7 เครื่องขัดกระดาษทรายและสกัดหาลาด.....	52
3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	52
3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	53
3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	53
3.11 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	54
3.12 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบ.....	55
3.13 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงลักษณะแบน.....	55
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของชิ้นงานวัสดุอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป.....	59
4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป.....	59
4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูปที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 505 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	60
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 รีดขึ้นรูป ในสถานะที่ดีที่สุด ที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมขั้นตอนเดียว เป็นเวลา 15 ชั่วโมง.....	62
4.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งเทียมขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา (ก) 12 ชั่วโมง, (ข) 15 ชั่วโมง, (ค) 18 ชั่วโมง (กำลังขยาย 5X) และ (ง) 18 ชั่วโมง (กำลังขยาย 20X).....	63

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.6	โครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมชั้นตอนเดียวที่ 12 ชั่วโมง.....64
4.7	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) และ (ข) Al_2Cu/Al_2CuMg65
4.8	โครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมชั้นตอนเดียวที่ 15 ชั่วโมง.....65
4.9	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส.....66
4.10	โครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมชั้นตอนเดียวที่ 18 ชั่วโมง.....67
4.11	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) และ (ข) Al_2Cu/Al_2CuMg67
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการบ่มแข็งเทียมสองระยะและค่าความแข็ง (HRB).....69
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของชิ้นงาน อะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 รีดขึ้นรูป ในสภาวะที่ดีที่สุด ที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมสอง ระยะ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....69
4.14	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งเทียมสองระยะ (ก) บ่มแข็งครั้งแรกที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และบ่มแข็งครั้งที่สองที่ อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา (ข) 3 ชั่วโมง, (ค) 6 ชั่วโมง, (ง) 9 ชั่วโมง (จ) 12 ชั่วโมง, (ฉ) 15 ชั่วโมง, (ช) 18 ชั่วโมง, (ซ) 24 ชั่วโมง, (ณ) 30 ชั่วโมง และ (ญ) 36 ชั่วโมง.....71
4.15	โครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมสองระยะที่ 12 ชั่วโมง.....73
4.16	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) และ (ข) Al_2Cu/Al_2CuMg73
4.17	โครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมสองระยะที่ 24 ชั่วโมง.....74
4.18	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) และ (ข) Al_2Cu/Al_2CuMg74
4.19	โครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมสองระยะที่ 24 ชั่วโมง.....75
4.20	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) Al_2Cu/Al_2CuMg และ (ข) $Al-Cu-Fe-Mn$75
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการบ่มแข็งและค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่าน การบ่มแข็งเทียมชั้นตอนเดียวและชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมสองระยะ.....76
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของชิ้นงานอะลูมิเนียม ผสมเกรด 2024 รีดขึ้นรูป ชิ้นงานวัตถุดิบ, ชิ้นงานผ่านการบ่มแข็งเทียมชั้นตอนเดียวและ ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมสองระยะ.....77

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ปริมาณการใช้โลหะอะลูมิเนียมผสมจำแนกตามอุตสาหกรรม พ.ศ. 2556..... 1
2.1	แผนภาพสมดุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง.....9
2.2	ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมทองแดงเมื่อมีปริมาณธาตุผสมทองแดงที่แตกต่างกัน และผ่านกระบวนการในการบ่มแข็งเทียม.....9
2.3	การเปลี่ยนเฟสของอะลูมิเนียมผสมทองแดงและการเกิดเฟสของอะลูมิเนียม ผสมทองแดงและแมกนีเซียม.....10
2.4	การรีดขึ้นรูปโลหะรูปทรงต่าง ๆ.....12
2.5	อะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปแบบการรีดร้อน.....13
2.6	ผลของการรีดขึ้นรูปร้อนทำให้เกรนเปลี่ยนแปลง.....13
2.7	อะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปแบบการรีดเย็น.....14
2.8	การเปลี่ยนแปลงเฟสของ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง.....20
2.9	พลังงานอิสระของ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง.....21
2.10	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระในเฟสลำดับต่าง ๆ.....22
2.11	โครงสร้างผลึกของปริซิพิตของ θ'' , θ' และ θ เมื่อเทียบกับเมตริกซ์.....24
2.12	ตำแหน่งการนิวคลีเอชันใน โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง.....25
2.13	แผนภาพ TTT ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง.....25
2.14	การแพร่ของทองแดงจาก θ'' ไปยัง θ' ทำให้ θ' โตขึ้นในขณะที่ θ'' เริ่มหายไป.....26
2.15	ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....32
2.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress-Strain ภายใต้แรงกระทำในแนวแกน.....33
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ Aluminum alloy และการหาค่า Yield strength ที่ 0.2% offset.....35
2.18	การเกิดคอคอดก่อนการแตกหักในชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....37
2.19	ลักษณะการแตกหักแบบถ้วยและกรวย (Cup and cone fracture).....38
2.20	Ductile fracture surface (Ductile metals) and Brittle fracture surface (Brittle metals).....39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	40
2.22 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่อง SEM.....	43
3.1 แผนภาพลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	48
3.2 อะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีดขึ้นรูป.....	49
3.3 เตาเผาอุณหภูมิต่ำ.....	50
3.4 เตาบ่มแข็งเทียม.....	50
3.5 เครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน.....	51
3.6 เครื่องกัดแนวตั้ง.....	51
3.7 เครื่องขัดกระดาษทรายและสีกหลาด.....	52
3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	52
3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	53
3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	53
3.11 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	54
3.12 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบ.....	55
3.13 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงลักษณะแบน.....	55
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของชิ้นงานวัสดุดิบ อะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป.....	59
4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุดิบอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป.....	59
4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูปที่ผ่านการอบ ละลายที่อุณหภูมิ 505 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	60
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของชิ้นงาน อะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 รีดขึ้นรูป ในสถานะที่ดีที่สุด ที่ผ่านการบ่มแข็งเทียม ขั้นตอนเดียว เป็นเวลา 15 ชั่วโมง.....	62
4.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งเทียมขั้นตอนเดียว ที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา (ก) 12 ชั่วโมง, (ข) 15 ชั่วโมง, (ค) 18 ชั่วโมง (กำลังขยาย 5X) และ (ง) 18 ชั่วโมง (กำลังขยาย 20X).....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

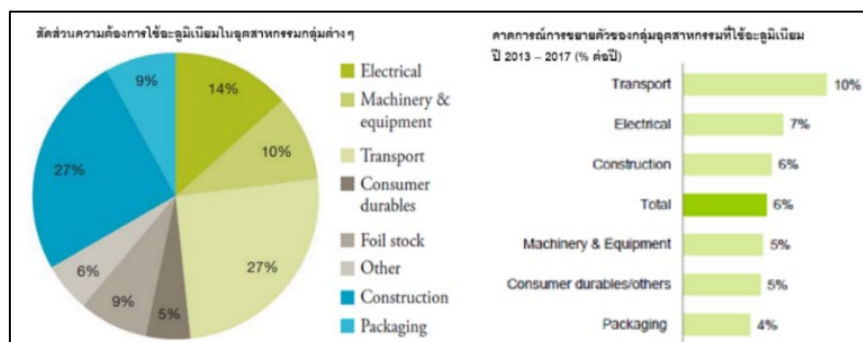
รูปที่	หน้า
4.6	โครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมชั้นตอนเดียวที่ 12 ชั่วโมง.....64
4.7	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) และ (ข) Al_2Cu/Al_2CuMg65
4.8	โครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมชั้นตอนเดียวที่ 15 ชั่วโมง.....65
4.9	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส.....66
4.10	โครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมชั้นตอนเดียวที่ 18 ชั่วโมง.....67
4.11	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) และ (ข) Al_2Cu/Al_2CuMg67
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการบ่มแข็งเทียมสองระยะและค่าความแข็ง (HRB).....69
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของชิ้นงาน อะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 รีดขึ้นรูป ในสภาวะที่ดีที่สุด ที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมสอง ระยะ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....69
4.14	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งเทียมสองระยะ (ก) บ่มแข็งครั้งแรกที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และบ่มแข็งครั้งที่สองที่ อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา (ข) 3 ชั่วโมง, (ค) 6 ชั่วโมง, (ง) 9 ชั่วโมง (จ) 12 ชั่วโมง, (ฉ) 15 ชั่วโมง, (ช) 18 ชั่วโมง, (ซ) 24 ชั่วโมง, (ฅ) 30 ชั่วโมง และ (ญ) 36 ชั่วโมง.....71
4.15	โครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมสองระยะที่ 12 ชั่วโมง.....73
4.16	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) และ (ข) Al_2Cu/Al_2CuMg73
4.17	โครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมสองระยะที่ 24 ชั่วโมง.....74
4.18	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) และ (ข) Al_2Cu/Al_2CuMg74
4.19	โครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมสองระยะที่ 24 ชั่วโมง.....75
4.20	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) Al_2Cu/Al_2CuMg และ (ข) $Al-Cu-Fe-Mn$75
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการบ่มแข็งและค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่าน การบ่มแข็งเทียมชั้นตอนเดียวและชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมสองระยะ.....76
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของชิ้นงานอะลูมิเนียม ผสมเกรด 2024 รีดขึ้นรูป ชิ้นงานวัตถุดิบ, ชิ้นงานผ่านการบ่มแข็งเทียมชั้นตอนเดียวและ ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมสองระยะ.....77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

เนื่องจากความต้องการใช้อะลูมิเนียมที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องทุก ๆ ปี จากข้อมูลการผลิตอะลูมิเนียมขึ้นต้นทั่วโลก อะลูมิเนียมยังเป็นธาตุที่มีมากที่สุดเป็นอันดับสามในพื้นที่ผิวโลก และเป็นโลหะสำคัญที่ถูกนำมาใช้งานในปัจจุบัน อีกทั้งความต้องการในการเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อการนำไปใช้งานไม่ว่าจะเป็น อุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องจักร ชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนอากาศยาน และโครงสร้างทางวิศวกรรมต่าง ๆ เป็นต้น เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ คือ มีน้ำหนักเบา มีความเหนียวสูง แข็งแรงทนทาน ทนทานต่อการเกิดสนิม และการฟุกร่อนในบรรยากาศที่ใช้งานทั่วไป นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และที่สำคัญคือไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ ทั้งนี้ในปัจจุบันโลหะอะลูมิเนียมผสมเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นอันดับสองรองจากเหล็ก และยังคงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุหลักในการออกแบบเพื่อนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมโครงสร้าง อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ แทนโลหะกลุ่มเหล็กที่มีน้ำหนักมาก โลหะผสมจึงถูกพิจารณาโดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มโลหะที่มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งโลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด และมีแนวโน้มสูงที่จะถูกนำมาใช้งานในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากเป็นอันดับต้น ๆ ในแต่ละภาคอุตสาหกรรมจะมีการขึ้นรูปที่ต่างกัน สามารถขึ้นรูปได้หลายวิธีไม่ว่าจะเป็น การหล่อขึ้นรูป การทุบขึ้นรูป การอัดรีด เป็นต้น เพื่อนำไปใช้งานได้เหมาะสม



รูปที่ 1.1 ปริมาณการใช้โลหะอะลูมิเนียมผสมจำแนกตามอุตสาหกรรม พ.ศ. 2556

ทั้งนี้โลหะอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 เป็นอะลูมิเนียมที่มีทองแดง (Copper: Cu) เป็นส่วนผสมหลัก นิยมนำมาใช้ในชิ้นส่วนอากาศยาน นอกจากจะเป็นส่วนประกอบของเครื่องบินแล้ว ยังเป็นชิ้นส่วนเพื่อใช้ประกอบเครื่องบินด้วย เช่น หมุดย้ำ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูง สามารถนำมาปรับปรุงด้วยกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลได้อีกด้วยจะส่งผลให้สามารถนำไปใช้ในสภาวะงานที่ต้องการและงานที่เหมาะสมได้มากขึ้น ซึ่งการใช้งานโลหะอะลูมิเนียมผสมที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลายาวนานจะสามารถใช้งานได้ช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น (Strong time dependence of strength) เนื่องจากจะเกิดการสูญเสียสมบัติเชิงกลเมื่อใช้งานเป็นเวลายาวนาน และจะต้องมีการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนชิ้นงานเมื่อครบกำหนดของระยะเวลาการใช้งานที่ปลอดภัย ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมผสมเพื่อให้ทนต่อสภาวะต่าง ๆ ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 ของ Hülya Kacar (2003), D.A.P Reis (2012), Nicolaos D. (2017), Y.F. Song (2017), Y.C. Lin (2012) และ Siriwan Pannaray (2011) มีการนำกรรมวิธีทางความร้อนมาใช้ด้วยกันหลายวิธี ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มสมบัติทางกลคือ อุณหภูมิและเวลา เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ได้สมบัติทางกลที่ดี อีกทั้งยังมีงานวิจัยอื่น ๆ ของ T. Ram (2017), Xioa Yan Liu (2010), S.Menargues (2014), N. Mahathaninwong (2011), L.O.R. Lima (2013) ที่เกี่ยวข้องในเรื่องของกรรมวิธีทางความร้อนที่ส่งผลให้ได้สมบัติทางกลที่ดี ซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอน (Precipitation hardening) ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มแข็งขึ้นหรือเวลาที่มากเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงสูงสุดลดลง ในขณะที่เดียวกันขนาดการตกตะกอนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ขนาดความหนาแน่นของการตกตะกอนลดลง และก่อตัวหยาบขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง ซึ่งเป็นในลักษณะเดียวกัน

ดังนั้น จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้จึงนำโลหะอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูปมาศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการบ่มสองระยะ โดยใช้กระบวนการทางความร้อนที่เรียกว่า “T6” ที่มีผลต่อสมบัติทางกล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 รีดขึ้นรูป ที่ผ่านกรรมวิธีการบ่มสองระยะโดยกระบวนการทางความร้อน T6

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ในการบ่มสองระยะ เพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ดี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สถานที่ดำเนินงานวิจัย ณ อาคารเครื่องมือ 6 (F6) และอาคารเครื่องมือ 10 (F10) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.1 กำหนดกระบวนการทางความร้อนในการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน

- 1) การบ่มแข็งเทียมขั้นตอนเดียว
- 2) การบ่มแข็งเทียมสองระยะ

1.3.2 การกำหนดปัจจัยในกระบวนการทางความร้อน

- 1) อุณหภูมิ
- 2) เวลา

1.3.3 ศึกษาสมบัติทางกล

- 1) ค่าความแข็ง
- 2) ค่าความแข็งแรงดึง

1.3.4 ศึกษาโครงสร้างจุลภาค

- 1) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM)
- 2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบปัจจัยในการบ่มสองระยะที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป

1.4.2 มีความรู้ความเข้าใจต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป ภายหลังจากการบ่มสองระยะ ซึ่งจะป็นองค์ความรู้ที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminium alloys)

โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีปริมาณการใช้งานมากเป็นอันดับสองรองจากเหล็ก และเป็นวัสดุที่เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ ดังนี้

1. มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบาและมีกำลังวัสดุต่อน้ำหนักสูง จึงนิยมนำมาทำเป็นเครื่องใช้ ตลอดจนชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องบิน จรวด ชีปนาอวกาศ บรรจุก๊าซ ชี้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

2. มีความเหนียวมาก สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้ง่าย โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก

3. จุดหลอมเหลวต่ำ สามารถหลอมได้ง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง

4. เป็นโลหะที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกายและมีค่าการนำความร้อนไม่สูงในภาชนะหุงต้มอาหาร ทนทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดสนิมได้ดี

5. มีค่าการนำไฟฟ้าสูง (International Association of Classification Societies; IACS1) จึงใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในงานที่ต้องคำนึงถึงเรื่องน้ำหนักเบาเป็นสำคัญ เช่น สายไฟฟ้าแรงสูง

6. เป็นโลหะที่มีดัชนีการสะท้อนของแสงสูง จึงนิยมให้ทำแผ่นสะท้อนแสงในแฟลชถ่ายรูป งานสะท้อนแสงในโคมไฟหรือไฟหน้ารถยนต์

7. เป็นโลหะที่สามารถพัฒนาได้อย่างไม่หยุดยั้ง เช่น การนำไปผสมกับโลหะอื่น ๆ กลายเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมให้มีสมบัติที่ดีขึ้น และหลากหลาย ส่งผลเป็นการเพิ่มขอบเขตการใช้งานของอะลูมิเนียมกว้างขวางมากขึ้น รวมถึงกระบวนการในการขึ้นรูป กระบวนการทางความร้อน เป็นต้น

อะลูมิเนียมที่ใช้กันทั่วไปนั้น สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และอะลูมิเนียมผสม ซึ่งมีข้อแตกต่างกันดังนี้

- 1) อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ คือ โลหะที่มีปริมาณอะลูมิเนียมไม่น้อยกว่า 99% โดยน้ำหนัก มีสิ่งแปลกปลอมปน (Impurity) อย่างละเล็กละน้อยที่สำคัญ ได้แก่ ทองแดง ซิลิคอน เหล็ก และแมกนีเซียม อะลูมิเนียมนี้มีกำลังวัสดุไม่สูงมากนักแต่มีความเหนียวมาก ทั้งนี้เพราะว่าอะลูมิเนียมมี

ระบบผลึกเป็นแบบ (Face Center Cubic, FCC) ซึ่งเหมาะสำหรับทำภาชนะเครื่องครัว เครื่องใช้ไม้สอยต่างๆที่ไม่ต้องการกำลังวัสดุสูงมากนัก

2) อะลูมิเนียมผสม คือ อะลูมิเนียมที่สามารถผสมกับโลหะได้หลายชนิด เช่น ทองแดง แมกนีเซียม สังกะสี ซิลิกอน และแมงกานีส โลหะผสมกับอะลูมิเนียมเหล่านี้จะทำให้อะลูมิเนียมมีสมบัติทางกลเปลี่ยนไปตามความต้องการ ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เองจึงทำให้อะลูมิเนียมผสมถูกนำไปใช้งานกันอย่างกว้างขวางมากขึ้น นอกจากนี้หากนำอะลูมิเนียมผสมไปผ่านกระบวนการทางความร้อนจะทำให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น ทั้งนี้การเลือกอะลูมิเนียมเพื่อนำไปใช้งานจะต้องคำนึงถึง ความเหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้ดังนี้

- (1) รูปร่างลักษณะ และสมบัติ
- (2) กรรมวิธีการหล่อ
- (3) การปรับปรุงสมบัติโดยวิธีทางความร้อน
- (4) ความคงทนต่อสภาพแวดล้อมในการใช้งานด้านวิศวกรรม

โลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม (Aluminum and aluminum alloys) ที่ใช้กันทั่วไปสามารถจำแนกได้ 2 ประเภทหลักๆ คือ โลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมสำหรับงานหล่อ โลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมสำหรับงานขึ้นรูป โดยจะกล่าวถึงเฉพาะโลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมสำหรับงานขึ้นรูป

2.1.1 อะลูมิเนียมขึ้นรูป (Wrought aluminium alloy)

การจำแนกประเภทของอะลูมิเนียมผสม

โลหะอะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะอื่น ๆ ได้หลายชนิด เช่น โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง, อะลูมิเนียม-ซิลิกอน, อะลูมิเนียม-แมกนีเซียม, อะลูมิเนียม-สังกะสี หรืออาจจะมีโลหะผสมอะลูมิเนียมกับหลาย ๆ ธาตุรวมกัน เช่น อะลูมิเนียม-ทองแดง-ซิลิกอน และแมกนีเซียม ซึ่งโลหะผสมแต่ละประเภทจะมีสมบัติแตกต่างกัน สามารถเลือกใช้งานได้ อย่างกว้างขวาง อะลูมิเนียมผสมจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. อะลูมิเนียมผสมประเภทรีดขึ้นรูป (Wrought aluminium alloys) เป็นโลหะผสมที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีด การอัดขึ้นรูปออกมาเป็นแผ่น หรือเป็นแท่ง ซึ่งมีที่สามารถชุบแข็งด้วยความร้อนได้ (Heat treatable) และที่ไม่สามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ ส่วนใหญ่จะมีทองแดง ซิลิกอน และแมกนีเซียมเป็นธาตุผสม

2. อะลูมิเนียมผสม ประเภทหล่อ (Cast aluminium alloys) เป็นโลหะที่มีสมบัติพิเศษ มีความสามารถในการไหลได้ดี ช่วยให้การหล่อเป็นรูปพรรณกระทำได้ง่าย ส่วนใหญ่ของ

โลหะผสมประเภทนี้สามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ โลหะผสมที่สำคัญ ได้แก่ อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน

2.1.2 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนโลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมสำหรับงานขึ้นรูป

(Wrought aluminum and Wrought aluminum alloys)

โลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมสำหรับงานขึ้นรูป หมายถึง โลหะอะลูมิเนียมและโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปทางกล เช่น การรีด (Rolling) การอัดขึ้นรูป (Extrusion) เป็นต้น และสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ โดยมีการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมกลุ่มนี้ตามส่วนผสมทางเคมีโดย The International Alloy Designation System (IADS) ได้ 8 กลุ่ม โดยแบ่งหมวดหมู่ตามส่วนผสมและใช้เลข 4 หลักเป็นสัญลักษณ์ในการกำกับชื่อของโลหะอะลูมิเนียม

ตัวเลขหลักที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุดในการแบ่งกลุ่มโลหะผสมซึ่งบ่งบอกถึงส่วนผสมหลัก เช่น 1XXX แทนโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.0% ผสมอยู่ เป็นต้น

ตัวเลขหลักที่สอง เป็นสัญลักษณ์บ่งบอกว่ามีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของโลหะให้แตกต่างไปจากโลหะมาตรฐาน โดยโลหะมาตรฐานจะแทนด้วยตัวเลข 0

ตัวเลขหลักที่สามและสี่ เป็นสัญลักษณ์ที่บ่งบอกถึงชนิดของธาตุรองอื่น ๆ ที่ผสมอยู่ในอะลูมิเนียม เช่น อะลูมิเนียมเกรด 2024 มีความหมายตามสัญลักษณ์ดังนี้

ตัวเลขหลักที่หนึ่ง เลข 2 หมายถึง มีทองแดงเป็นส่วนประกอบหลัก

ตัวเลขหลักที่สอง เลข 0 หมายถึงอะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมตามมาตรฐานดั้งเดิม

ตัวเลขหลักที่สามและสี่ เลข 24 หมายถึง มีธาตุอื่น ๆ เป็นส่วนผสมรอง คือ ทองแดง แมกนีเซียม แมงกานีส เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีข้อยกเว้นเฉพาะอะลูมิเนียมในกลุ่ม 1XXX ตัวเลขหลักที่สามและสี่ จะแสดงปริมาณอะลูมิเนียมที่เป็นจุดทศนิยมสองตำแหน่งที่ปรากฏภายหลัง 99% เช่น เกรด 1060 เกรด 1080 หมายถึงอะลูมิเนียมขึ้นรูปที่มีอะลูมิเนียมผสมอยู่ 99.60% และ 99.80% ตามลำดับ และโดยมีการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียมกลุ่มนี้ตามส่วนผสมทางเคมีโดย The International Alloy Designation System (IADS) ได้ 8 กลุ่ม ดังนี้

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูป

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1XXX	อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.0%
2XXX	ทองแดง
3XXX	แมงกานีส
4XXX	ซิลิคอน
5XXX	แมกนีเซียม
6XXX	แมกนีเซียม กับ ซิลิคอน
7XXX	สังกะสี
8XXX	ธาตุอื่น ๆ

1. โลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure aluminum) โดยมีอะลูมิเนียมไม่ต่ำกว่า 99.0% สัญลักษณ์คือ 1XXX

2. โลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง (Aluminum-copper alloys) เป็น โลหะอะลูมิเนียมที่ผสมทองแดง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงจากกลไกการตกตะกอน (Precipitation hardening) แต่มีข้อเสียคือเกิดการกัดกร่อนจากแรงกระทำ (Stress corrosion cracking) ได้ง่าย สัญลักษณ์คือ 2XXX ตามส่วนผสมทางเคมีใช้สำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยทำการอบเพื่อเพิ่มความแข็งแรง เช่น หมุดย้ำสำหรับเครื่องบิน กระดาษล้อรถถัง

3. โลหะอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส (Aluminum-manganese alloys) สัญลักษณ์คือ 3XXX ตามส่วนผสมทางเคมีใช้ทำภาชนะหุงต้ม อุปกรณ์เก็บอาหารและสารเคมี กระจปอง เครื่องดื่มที่มีความแข็งแรงสูงกว่า 1XXX

4. โลหะอะลูมิเนียมผสมซิลิคอน (Aluminum-silicon alloys) สัญลักษณ์คือ 4XXX ตามส่วนผสมทางเคมีซิลิคอนที่ผสมในโลหะอะลูมิเนียม ซึ่งทำให้โลหะผสมมีน้ำหนักเบา คุณสมบัติการไหลตัวที่ดี เหมาะที่จะหล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน

5. โลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (Aluminum-magnesium alloys) สัญลักษณ์คือ 5XXX ตามส่วนผสมทางเคมี ใช้สำหรับผลิตอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเดินเรือทะเล/ทางทะเล

6. โลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิคอน (Aluminum-magnesium-silicon alloys) มีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการตกแต่งผิวสุดท้าย เช่น การกลึง และสามารถเพิ่มความแข็งแรงจากกลไกการตกตะกอน (Precipitation hardening) สัญลักษณ์คือ 6XXX ตาม

ส่วนผสมทางเคมี ใช้สำหรับทำเฟอร์นิเจอร์ (กรอบประตู หน้าต่าง) อิเล็กทรอนิกส์ และใช้ในงานสถาปัตยกรรม

7. โลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี (Aluminum-zinc alloys) สามารถเพิ่มความแข็งแรงจากกลไกการตกตะกอน (Precipitation hardening) ได้ โดยสามารถเพิ่มจนมีความแข็งแรงสูงมากกว่าโลหะอะลูมิเนียมกลุ่มอื่น ๆ สัญลักษณ์คือ 7XXX ตามส่วนผสมทางเคมี ใช้ผลิตชิ้นส่วนอากาศยาน

8. โลหะอะลูมิเนียมผสมธาตุอื่น ๆ (Miscellaneous aluminum alloys) เช่น โลหะอะลูมิเนียมผสมลิเทียม เป็นต้น สัญลักษณ์คือ 8XXX ตามส่วนผสมทางเคมี ใช้ผลิตชิ้นส่วนอากาศยาน

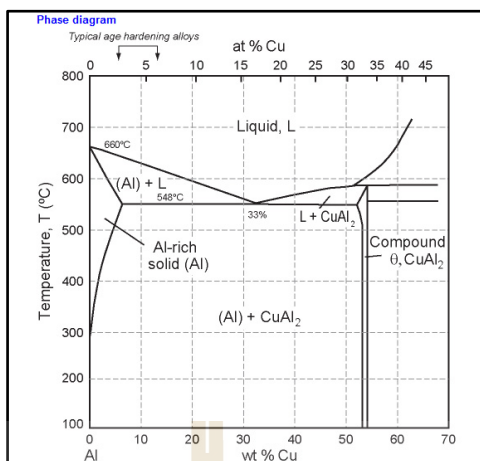
2.1.3 อะลูมิเนียมผสม กลุ่ม 2XXX

สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียมผสม 2XXX

- 1) มีความแข็งแรง กลึงไสได้ดี
- 2) สามารถเชื่อมได้
- 3) ทนทานต่อการกัดกร่อนจากแรงกล
- 4) ทนความร้อนได้สูง

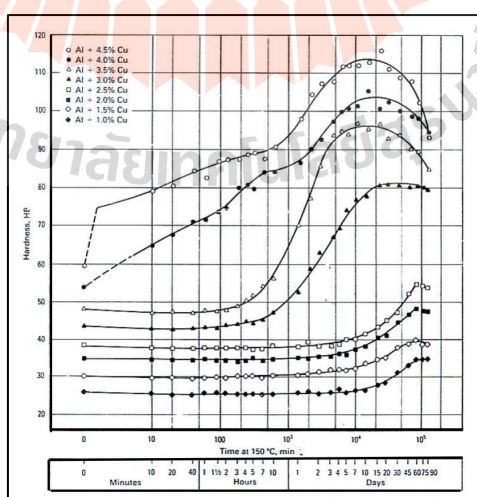
อะลูมิเนียมเกรด 2000 หรือ Al-Cu-Mg-Mn นี้ได้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1906 โดยชาวเยอรมัน ชื่อ Alfred Wilm ซึ่งต้องการค้นหาวัสดุโลหะผสมที่สามารถนำมาใช้แทนถังใต้น้ำหมึกที่เดิมทีโลหะทองแดงผสม แต่เนื่องจากความแข็งแรงเชิงกลที่สูงมากของอะลูมิเนียมกลุ่มนี้มักถูกใช้ในงานชิ้นส่วนและโครงสร้างเครื่องบิน เช่น 2017 นิยมนำมาใช้ทำหมุด (Rivet) ยึดของเครื่องบิน และเกรดที่นิยมใช้ในปัจจุบันกับโครงสร้างและชิ้นส่วนของเครื่องบิน คือ 2024

โลหะอะลูมิเนียมกลุ่มนี้จะเป็นโลหะผสม Al-Cu alloy เป็นหลัก โดยมี Mg ผสมเติมเป็นธาตุรองและมีธาตุอื่นในปริมาณเล็กน้อยรวมอยู่ในเนื้อโลหะด้วย โลหะผสมชนิดหนึ่งที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวางคือ Duralumin หรือโลหะผสมเกรด 2024 ซึ่งจะมี 4.5%Cu เป็นธาตุผสมเติมหลัก มี 1.5%Mg, 0.9%Si และ 0.6%Mn ผสมรวมอยู่ด้วย ทั้งนี้ Cu, Mg, Si และ Mn จะละลายปนในเนื้อเมตริกซ์ของอะลูมิเนียมและทำให้เกิดสารละลายของแข็ง (Solution strengthening) และบางส่วนจะจับตัวรวมกันกลายเป็นสารประกอบโลหะ Al_2CuMg และเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อน แบบ T6 โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 จะมีความแข็งแรงดิ่งที่สูง นิยมใช้เป็นโครงสร้างเครื่องบิน

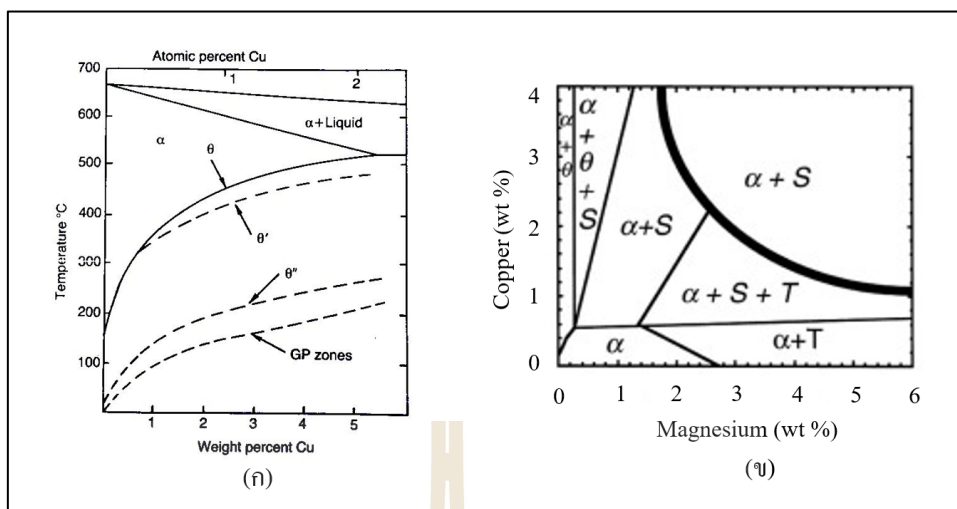


รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง

จากรูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลภาคของอะลูมิเนียม-ทองแดง จะเห็นได้ว่าปริมาณทองแดงมากที่สุดที่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกับอะลูมิเนียมในสภาวะสารละลายของแข็งนั้นมีปริมาณ 5.65% ที่อุณหภูมิประมาณ 548 °C และเมื่ออุณหภูมิลดลงปริมาณการละลายเป็นเนื้อเดียวกันของทองแดงในอะลูมิเนียมจะลดลงอย่างรวดเร็วเหลือ 0.25% ที่อุณหภูมิห้อง และที่อัตราส่วนผสมของทองแดง 54% ตำแหน่งเหนืออุณหภูมิ 548 °C เล็กน้อย ทองแดงจะจับตัวกับอะลูมิเนียมกลายเป็นสารประกอบ



รูปที่ 2.2 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมทองแดงเมื่อมีปริมาณธาตุผสมทองแดงที่แตกต่างกัน และผ่านกระบวนการในการบ่มแข็งเทียม



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนเฟสของอะลูมิเนียมผสมทองแดงและการเกิดเฟสของอะลูมิเนียม

ผสมทองแดงและแมกนีเซียม

(ก) แผนภาพการเปลี่ยนเฟสของอะลูมิเนียมผสมทองแดง

(ข) แผนภาพการเกิดเฟสของอะลูมิเนียมผสมทองแดงและแมกนีเซียม

โลหะ Al₂Cu เรียกว่า θ -phase ในกรณีที่ปริมาณทองแดงน้อยกว่า 0.5% ทองแดงทั้งหมดจะละลายเป็นเนื้อเดียวกับอะลูมิเนียมกลายเป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่า “ α -phase” เมื่อปริมาณทองแดงมากกว่า 0.5% และอยู่ระหว่าง 0.5-54% เนื้อโลหะที่อุณหภูมิห้องจะประกอบด้วย $\alpha + \theta$ -phase ดังนั้นถ้าโลหะผสมมีปริมาณทองแดงในระหว่าง 0.5-5.65% ถูกอบให้ร้อนจนมีอุณหภูมิ 500-548 °C จะมีผลทำให้อนุภาค Al₂Cu ไม่สามารถแยกออกจากสภาวะการละลายเป็นเนื้อเดียวกับ α -phase ได้ทันที ทำให้ Al₂Cu ทั้งหมดยังคงอยู่ในสภาพสารละลายของแข็งแม้ว่าจะมีอุณหภูมิต่ำที่อุณหภูมิห้องก็ตาม เรียกสารละลายของแข็งชนิดนี้ว่าสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solid solution) ซึ่งสารละลายชนิดนี้จะขาดความเสถียรที่อุณหภูมิห้องและจะต้องเกิดการแยกตัวของ Al₂Cu ในเวลาต่อไปหรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และดังรูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับเวลาในการบ่มแข็งเทียมอะลูมิเนียมผสมทองแดงที่อุณหภูมิการบ่มแข็งเทียม 150 °C พบว่าที่เวลาในการบ่มแข็งเทียมมากขึ้นและปริมาณทองแดงมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งมากขึ้นเช่นกัน และจากรูปที่ 2.3 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณสัดส่วนทองแดงทำให้อะลูมิเนียมมีความแข็งสูง ซึ่งพบในชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมและโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 จะมีลักษณะของการพรีซิพิตเอตอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของปริมาณของทองแดงกับแมกนีเซียม ถ้าสัดส่วนของทองแดงต่อแมกนีเซียม

มากกว่า 8 ลักษณะของพรีซิพิตจะมีรูปร่างเป็นแผ่น (Plate shape) ซึ่งมีลำดับการตกตะกอนของเฟส Al_2Cu เป็นดังนี้

Supersaturated solid solution \rightarrow GPZ (discs) $\rightarrow \theta''$ (discs) $\rightarrow \theta'$ (plates) $\rightarrow \theta$ (Al_2Cu)

ถ้าสัดส่วนของทองแดงต่อแมกนีเซียมต่ำไม่เกิน 4 พรีซิพิตหลัก ๆ จะมีรูปร่างเป็นระแนง (Lath shape) หรือเฟส S ซึ่งมีการลำดับการตกตะกอนของเฟสของแข็ง Al_2CuMg ดังนี้

Supersaturated solid solution (SSS) \rightarrow GPZ(rods) $\rightarrow S'$ (laths) $\rightarrow S$ (Al_2CuMg)(laths)

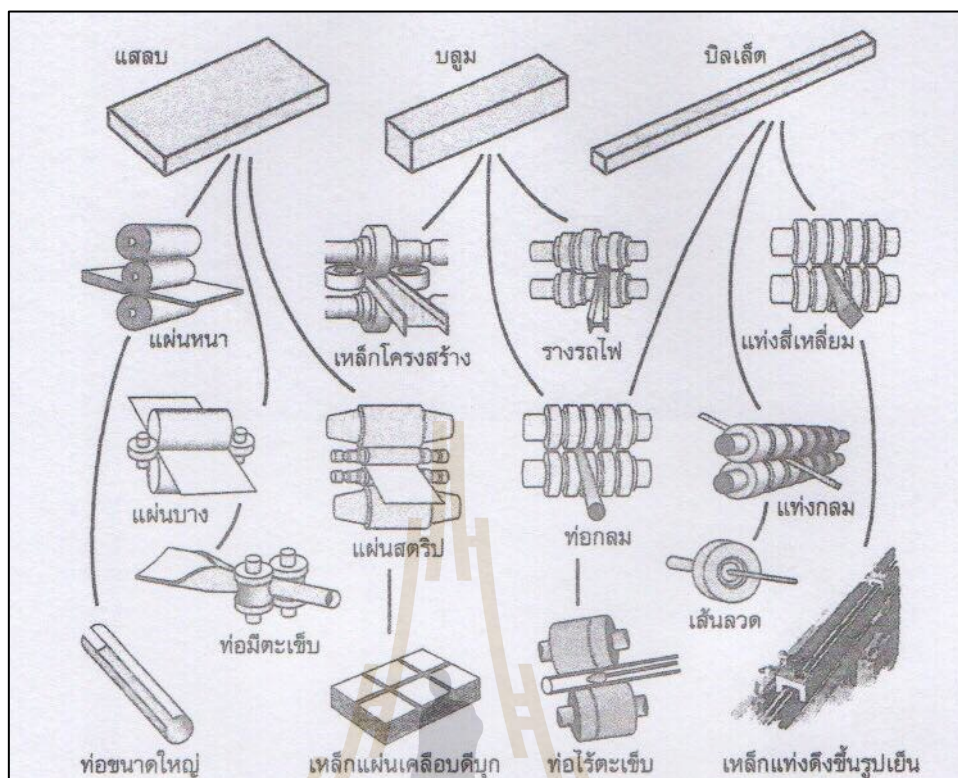
ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เมื่อส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันหรือเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อลักษณะการตกตะกอนที่ต่างกัน และพรีซิพิตจะมีลักษณะที่ต่างกัน

2.1.4 โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024

โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 เป็นโลหะผสมซึ่งประกอบด้วย อะลูมิเนียม ทองแดง แมกนีเซียม และแมงกานีส ($Al-Cu-Mg-Mn$) ซึ่งเป็นโลหะผสมที่ทำการแปรรูปได้ยาก ทั้งในรูปแบบขึ้นรูปร้อน (Hot work) และขึ้นรูปเย็น (Cold work) เนื่องจากมีความเหนียว (Ductility) ต่ำ แต่มีความสามารถในการรับแรงดึงสูงกว่าโลหะผสมอะลูมิเนียมชนิดอื่น ๆ และสามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการอบชุบได้ เนื่องจากในเนื้อโลหะมีสารประกอบที่มีโครงสร้างทางจุลภาคที่เป็นสารประกอบโลหะหลายชนิด คือ S-shape ที่เป็น Al_2CuMg และ θ -phase ที่เป็น Al_2Cu และ T-phase ที่เป็น Al_6CuMg_4 โดยแมงกานีสที่ผสมอยู่ในเนื้อโลหะผสมจะทำให้โลหะผสมดังกล่าวทนทานต่อการกัดกร่อน เหล็กที่ผสมอยู่จะเป็นสารมลทิน (Impurity) ที่จับตัวรวมกับธาตุอื่น ๆ เป็น $(Mn, Fe)Al_6$ ทำให้เนื้อโลหะมีความอ่อนเหนียวความแข็งแรงจึงลดลง อย่างไรก็ตามการละลายของทองแดงในเนื้ออะลูมิเนียมจะทำให้โลหะแข็งขึ้น และการผสมแมกนีเซียมนั้นจะช่วยให้โลหะเกิดการแยกเฟสของแข็งขึ้นโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทางความร้อน ทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 นิยมใช้ทำกระทะล้อรถยนต์ หมุดย้ำต่าง ๆ และโครงสร้างรวมถึงชิ้นส่วนของเครื่องบิน

2.2 กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบรีดขึ้นรูป (Rolling)

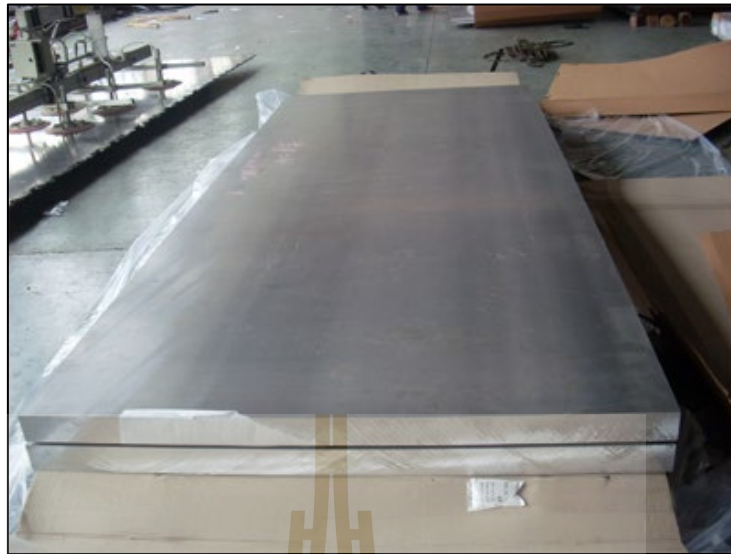
การรีด เป็นกระบวนการลดขนาดหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างหน้าตัดของชิ้นงานใช้แรงอัดผ่านลูกรีด การรีดขึ้นรูปสามารถทำให้เกิดรูปทรงได้หลายแบบ ดังรูปที่ 2.4 ชิ้นงานเริ่มต้นอาจจำแนกได้ 3 ชนิดด้วยกันคือ บลูม (Bloom) บิลเล็ต (Billet) และสแลบ (Slab)



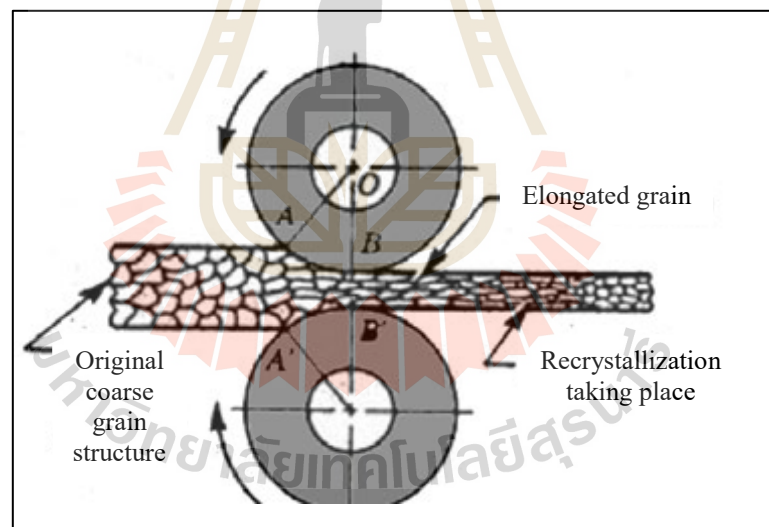
รูปที่ 2.4 การรีดขึ้นรูปโลหะรูปทรงต่าง ๆ

การรีดนั้นมียหลายลักษณะหากพิจารณาตามรูปทรงของชิ้นงาน โดยแบบแรกเป็นการรีดแผ่นเรียบธรรมดา ชิ้นงานที่ได้จะเป็นแผ่นหนาขนาดใหญ่ หรือเป็นแผ่นบางที่มีความยาวมาก ๆ แล้วม้วนเป็นรูปทรงกระบอกเพื่อสะดวกในการขนย้ายหรือรีดเป็นแผ่นแล้วนำไปทำเป็นท่อมีตะเข็บ เป็นต้น การรีดถัดมาคือ การรีดขึ้นรูปเป็นรูปทรงต่าง ๆ เช่น การรีดขึ้นเป็นรูปตัวไอ (I-beam) ซึ่งเป็นการรีดขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง โดยการลดขนาดนั้นต้องมีหลายขั้นตอนการรีดสามารถทำได้ทั้งการรีดร้อนและการรีดเย็น การรีดทั้ง 2 แบบนี้ มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน คือ

1. การรีดร้อน จะใช้พลังงานในการรีดน้อยกว่าการรีดเย็นเพราะเนื้อโลหะมีความนุ่มเนื่องจากอุณหภูมิให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ เกรนที่ผ่านการรีดที่แบนและยึดออกจะสามารถคืนรูปกลับมาสู่เกรนที่มีรูปทรงสมมาตรได้เพราะอุณหภูมิสูง ทำให้เนื้อโลหะไม่เกิดความเค้นตกค้าง โลหะจึงมีความอ่อนเหนียว แต่ข้อจำกัดของการรีดร้อนคือ ควบคุมขนาดของชิ้นงานให้เที่ยงตรงได้ยากเพราะโลหะที่อุณหภูมิสูงจะขยายตัว เมื่ออุณหภูมิลดลงจะเกิดการหดตัวทำให้ควบคุมขนาดได้ยาก

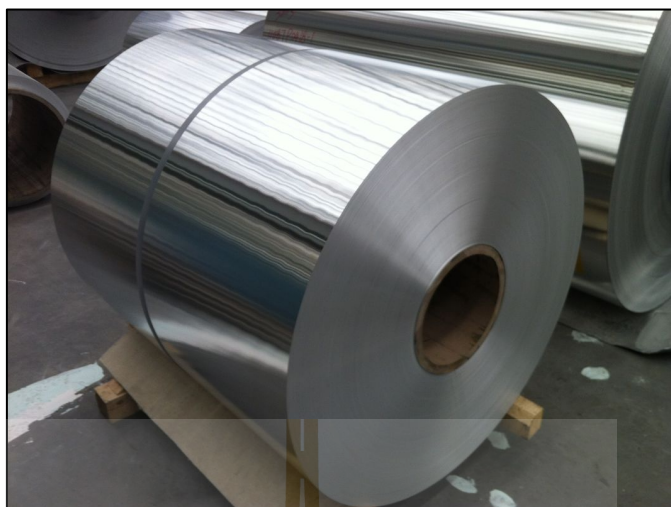


รูปที่ 2.5 อะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปแบบการรีดร้อน



รูปที่ 2.6 ผลของการรีดขึ้นรูปร้อนทำให้เกรนเปลี่ยนแปลง

2. การรีดเย็น สามารถควบคุมขนาดที่เที่ยงตรงได้ดีกว่าการรีดร้อนมาก จะมีข้อจำกัดเพียงเกรนที่ผ่านการรีดเย็นจะมีการแบนและยืดตัวออก และเนื่องจากอุณหภูมิการรีดต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่เกรนที่แบนจึงไม่สามารถกลับสู่รูปทรงสมมาตรได้ ทำให้เกิดความเค้นตกค้าง ชิ้นงานรีดเย็นจึงมีความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานรีดร้อน



รูปที่ 2.7 อะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปแบบการรีดเย็น

2.3 กระบวนการทางความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม (Heat treatment of aluminum alloy)

กระบวนการทางความร้อนเป็นกระบวนการที่ทำให้สมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไป เป็นวิธีการที่อาศัยความร้อนในการทำให้เนื้ออะลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไปในทางที่แข็งแรงขึ้น โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

Heat treatable คือ โลหะผสมอะลูมิเนียมที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ ได้แก่ โลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 2XXX, 4XXX, 6XXX และ 7XXX

Non heat treatable คือ อะลูมิเนียมที่ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ ได้แก่ โลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 1XXX, 3XXX, 4XXX (บางตัว) และ 5XXX

2.3.1 การกำหนดสัญลักษณ์กระบวนการทางความร้อนสำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม (Temper designation for aluminum alloys)

การกำหนดกระบวนการทางความร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียมขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน โดยได้กำหนดตามมาตรฐาน ASM (American Society of Metals) โดยสถานะ Temper หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางโลหะกรรมต่าง ๆ จนแสดงสมบัติทางกายภาพและทางกลเป็นที่พึงพอใจของผู้ใช้ สัญลักษณ์ที่ใช้กำกับสถานะนี้เป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษ ได้แก่ F, O, H, W และ T ใช้เขียนหลังชื่อโลหะผสมโดยที่พิจารณาน้ำ อาจจะมีตัวเลขตามหลัง 1 หรือ 2 ตัว ตัวเลขตัวที่หนึ่งแสดงความแตกต่างในสาระสำคัญของแต่ละกรรมวิธี ตัวเลขตัวที่สองอาจแสดงถึงความแตกต่างในเรื่องปลิกย่อยเล็กน้อย ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์ของกระบวนการทางความร้อน (Temper) สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม

สัญลักษณ์	ใช้แทน	หมายถึง
F	สภาพเดิม ผ่านการขึ้นรูปตามปกติ	ชิ้นงานที่ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ต่อเนื่อง หรือทางกล เช่น งานหล่อ หมายถึง สภาพที่ได้จากการหล่อ
O	สภาพการอบอ่อน	เป็นการอบคลาย ทำให้อ่อนด้วยการอบอ่อน หรือการอบ ทำให้ผลึกใหม่ มีคุณสมบัติด้าน ความอ่อนและเหนียวมักใช้กับงานขึ้นรูป เย็น
H	ทำให้มีความแข็งที่เกิดจากการขึ้นรูปเย็น	ใช้กับงานที่ต้องการเพิ่มสมบัติทางกลให้สูงขึ้น โดยการแปรรูปเย็น อาจจะมีกรรมวิธีทางความร้อนควบคู่หรือไม่ก็ได้
H1	ทำให้แข็งโดยการขึ้นรูปเย็นอย่าง เดียว	เป็นการผ่านกระบวนการแปรรูปเย็นอย่าง เดียว มีตัวเลขตัวที่สองกำกับอยู่ด้วย จะแสดงความรุนแรงของการแปรรูป วัตต์ด้วยปริมาณของการแปรรูป ในบางครั้ง อาจมีตัวเลขตัวที่สามกำกับไว้ เพื่อบอกถึง การควบคุม การอบคลาย หรือระดับถึง สมบัติทางกลพิเศษ
H2	ทำให้แข็งโดยการแปรรูปเย็นแล้ว ทำการอบละลาย	ใช้กับงานแปรรูปเย็น เพื่อต้องการเพิ่มความ แข็งแรงของวัสดุเกินกว่าระดับที่ต้องการ เล็กน้อย ต่อจากนั้นจึงนำไปอบละลาย จะเห็นว่าความแข็งแรงถูกลดลงระดับหนึ่ง แต่ยังคงปริมาณการแปรรูปเย็นเหลืออยู่
H3	ทำให้แข็งโดยการแปรรูปเย็น และ คงรูป	ใช้กับงานที่ผ่านการแปรรูปเย็น เพื่อเพิ่ม ความแข็งแรงให้แก่วัสดุ จากนั้นนำไปทำ กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้โลหะคงรูป ความร้อนที่ให้นี้ยังไม่มากพอที่จะลด ความเครียด ทำให้มีความเค้นตกค้างใน โลหะ

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์ของกระบวนการทางความร้อน (Temper) สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม
(ต่อ)

สัญลักษณ์	ใช้แทน	หมายถึง
W	สภาพไม่คงรูป หลังทำการอบละลาย	ใช้กับโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่สามารถแตกตัวขึ้นได้เองเท่านั้น หมายถึง หลังจากกรรมวิธีให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการละลายตัวของธาตุผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันกับอะลูมิเนียม จากนั้นทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากโลหะชนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลง (ทางโครงสร้าง) ตลอดเวลาที่ทิ้งไว้ในอากาศ ดังนั้นจึงต้องระบุนเวลาหลังกรรมวิธี การให้ความร้อนกำกับไว้ด้วย
T	ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาแล้ว	ใช้กับโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งอาจทำร่วมกับกรรมวิธีทางกลด้วยหรือไม่ก็ได้ ซึ่งทำให้ชิ้นงานเสถียรภาพการอบคลายใช้อักษรตัว T ตามด้วย เลข 2-10 เป็นข้อกำหนดของการทำงาน เพื่อเปลี่ยนสภาพของชิ้นงานแตกต่างกันออกไป โดยการเติมตัวเลขตัวเดียวหรือหลายตัวก็ได้
T2	สภาพอบอ่อน	เป็นการอบอ่อนเพื่อให้โลหะเกิดการอ่อนตัว ทำให้เหนียวขึ้น ใช้กับงานที่ได้จากการหล่อ
T3	อบละลายและการแปรรูปเย็น	เป็นภาวะโลหะภายหลังการทำอบละลายต่อจากการทำแปรรูปเย็น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุ
T4	อบละลายและการบ่มได้เองจนอยู่ในสภาพคงรูป	ใช้กับโลหะที่ทำการอบละลายแล้ว ต่อจากนั้นทิ้งไว้จนเกิดการบ่มธรรมชาติ ทำให้เกิดความแข็งและเกิดการคงรูป
T5	การบ่มด้วยวิธีทางความร้อน	ไม่ต้องทำการอบละลาย มีเพียงแค่ขั้นตอนการบ่มแข็งเทียม

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์ของกระบวนการทางความร้อน (Temper) สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม (ต่อ)

สัญลักษณ์	ใช้แทน	หมายถึง
T6	อบละลาย และอบบ่มแข็ง	ใช้กับโลหะที่ผ่านการอบละลายต่อจากนั้น ใช้กรรมวิธีทางความร้อน เพื่อทำให้เกิดการบ่มแข็งเทียม
T7	อบละลายและทำให้คงสภาพ	ใช้กับโลหะที่ผ่านการอบละลาย โดยมีการควบคุมทั้งอุณหภูมิและเวลา เพื่อควบคุมการโตของเกรน หรือช่วยควบคุมความเค้นตกค้างในเกรนที่หลงเหลืออยู่ในโลหะหรือควบคุมทั้งสองอย่าง
T8	อบละลายแล้วแปรรูปเย็น และอบบ่มแข็ง	ใช้กับโลหะที่ผ่านการอบละลาย เพื่อให้โลหะเหนียวขึ้น จากนั้นทำการแปรรูปเย็น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุขึ้นอีก โดยการบ่มแข็ง
T9	อบละลายแล้วอบบ่มแข็ง และแปรรูปเย็น	ใช้กับโลหะที่ผ่านการอบละลาย แล้วทำการอบบ่มแข็ง จากนั้นจึงทำการแปรรูปเย็น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุ
T10	อบบ่มแข็งแล้วแปรรูปเย็น	ใช้กับโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อให้เกิดการบ่มแข็ง โดยไม่ผ่านการอบอ่อนมาก่อน ต่อจากนั้นทำการแปรรูปเย็นอีก เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุ

2.3.2 การเพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีการตกตะกอน (Precipitation strengthening)

กระบวนการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โลหะผสมอะลูมิเนียมมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การเพิ่มความแข็งแรงด้วยการแปรรูป (Work hardening) การเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอน (Precipitation strengthening) การเพิ่มความแข็งแรงด้วยการทำให้เป็นสารละลายของแข็ง (Solid solution strengthening) และการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการใช้การกระจายอนุภาค (Dispersion strengthening) โดยทั้ง 4 กระบวนการนี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงอย่างมีประสิทธิภาพได้ เนื่องจากการสร้างสภาพที่มีสิ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) ซึ่งรายละเอียด

ของวิธีในการเพิ่มความแข็งแรงของงานวิจัยนี้ คือ กระบวนการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอน ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วย

- 1) การอบละลาย (Solution heat treatment)
- 2) การชุบเย็น (Quenching)
- 3) การบ่มแข็ง (Aging)

โดยแต่ละขั้นตอนของกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอนมีความสำคัญและวิธีการที่แตกต่างกันไป รายละเอียดดังนี้

2.3.2.1 การอบละลาย (Solution heat treatment)

การอบละลายเป็นขั้นตอนแรกในกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยการตกตะกอน ซึ่งเป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิระหว่างเส้น Solvus และเส้น Solidus และคงที่ไว้ที่อุณหภูมิดังกล่าว เพื่อละลายเฟสที่สอง คือ Al_2Cu หรือ Al_2CuMg ซึ่งเป็นยูเทคติกเฟสให้อยู่ในรูปของสารละลายของแข็งและมีการแพร่ทั่วทั้งชิ้นงาน โดยอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายขึ้นอยู่กับเกรดและปริมาณของธาตุผสมในโลหะผสมดังกล่าว ตัวอย่างเช่น โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง (Al-Cu alloy) ดังรูปที่ 2.8 จะใช้ระดับของอุณหภูมิจนถึง $548\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลานานพอให้ทองแดงที่ผสมอยู่ ซึ่งไม่เกินจุดอิ่มตัวละลายเข้าไปในเนื้อของอะลูมิเนียมให้หมด จากนั้นทำให้อะลูมิเนียมเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการชุบลงในน้ำ เนื่องจากการเย็นตัวที่เกิดขึ้นเร็วทำให้อะลูมิเนียมที่เกินจุดอิ่มตัวที่อุณหภูมิห้องจะถูกกักอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียมและไม่มีโอกาสเคลื่อนที่แยกตัวออกจากเนื้ออะลูมิเนียมเป็นเฟสใหม่ได้ เมื่อมองในระดับโครงสร้างทางจุลภาคอะตอมของทองแดงถือเป็นสิ่งแปลกปลอมที่ปนอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียม ส่งผลให้การเรียงตัวของอะลูมิเนียมบิดเบี้ยวไปจากที่ควรเป็น ก่อให้เกิดเครียด (Strain) ขึ้นในขั้นตอนนี้และมีผลให้โลหะสร้างแรงต้านต่อแรงกระทำภายนอกที่มากกว่า คือ โลหะมีความแข็งแรงมากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากทองแดงที่มีอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียม

2.3.2.2 การชุบเย็น (Quenching)

การชุบเย็นเป็นการทำให้โลหะผสมมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิสูง เพื่อให้ทองแดงและอะลูมิเนียมที่เป็นสารละลายของแข็งในกระบวนการแรก ยังคงอยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ โดยนำโลหะผสมจากขั้นตอนในการอบละลายมาทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยธาตุเหล่านี้จะอยู่ในรูปของสารละลายของแข็งที่มีสภาวะของแข็งอิ่มตัวยังขาด (Supersaturated solid solution) และพร้อมที่จะตกตะกอนออกมาเมื่อนำมาผ่านกระบวนการในขั้นตอนของการบ่มแข็ง

2.3.2.3 การบ่มแข็ง (Aging)

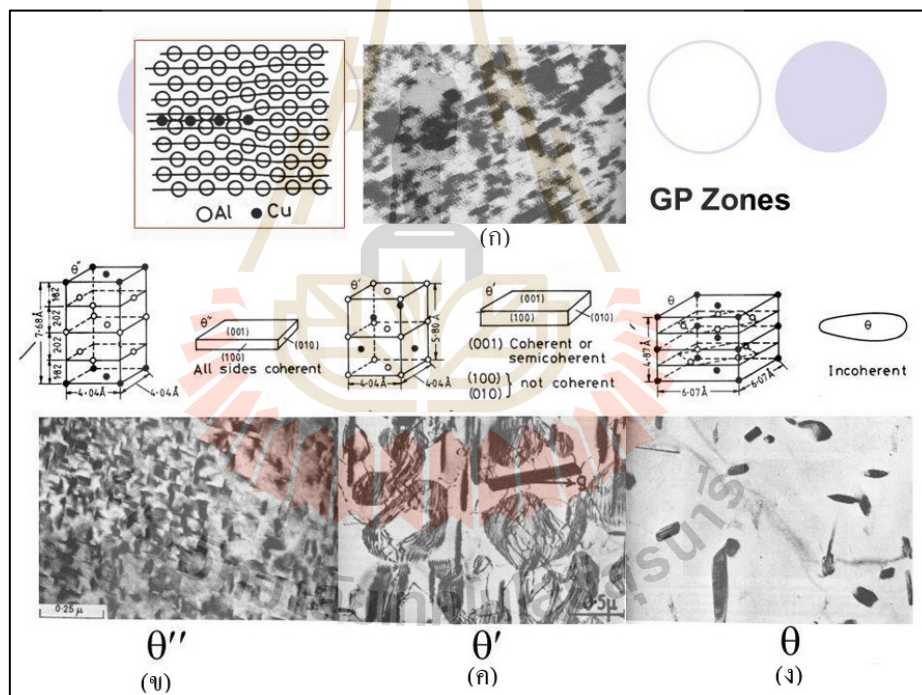
กระบวนการนี้ทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสกิ่งโลหะที่มีความละเอียดมากและช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้ การบ่มแข็งอาจทำได้โดยการวางชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่า “การบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural aging)” หรือนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอน เรียกว่า “การบ่มแข็งเทียม (Artificial aging)” โดยอุณหภูมิของการบ่มแข็งขึ้นอยู่กับเกรดและชนิดของโลหะผสม และเวลาในการบ่มแข็งที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการบ่มแข็ง วิธีการบ่มแข็งนี้ทำต่อเนื่องจากการทำให้ธาตุผสมละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับอะลูมิเนียม ทองแดงที่มีปริมาณเกินจุดอิ่มตัวแต่ละลายอยู่เป็นเนื้อเดียวกับอะลูมิเนียม นั้นไม่มีเสถียรภาพ โดยมันจะพยายามก่อตัวเป็นเฟสใหม่เพื่อแยกตัวออกจากเนื้ออะลูมิเนียม การก่อตัวนี้ต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของทั้งอะตอมอะลูมิเนียมและอะตอมของทองแดง แต่การเคลื่อนตัวของอะตอมในเนื้อโลหะในสภาพของแข็งทำได้ลำบากมากในทางปฏิบัติถือว่าไม่เกิดขึ้น จึงต้องทำให้อะลูมิเนียมได้รับความร้อน เพื่อช่วยให้อะตอมของธาตุในเนื้อโลหะสามารถเคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้น เนื่องจากเฟสใหม่ที่จะเกิดจากทองแดงที่เกินจุดอิ่มตัวกับอะลูมิเนียมบางส่วนนั้นมีระบบผลึกแตกต่างจากระบบผลึกของเนื้ออะลูมิเนียมที่มีอยู่เดิม ดังนั้น ในช่วงของการเกิดเฟสใหม่นี้อะตอมของธาตุทั้งสองต้องขยับตัวไปอยู่ในตำแหน่งที่สมดุลของเฟสใหม่ ส่งผลให้เกิดความไม่สอดคล้องในเรื่องขนาดและรูปร่างของผลึกของเฟสใหม่และเฟสเก่า ก่อให้เกิดสเตรนขึ้นในเนื้อของอะลูมิเนียม ทำให้โลหะสามารถต้านทานต่อแรงกระทำได้สูงขึ้นคือแข็งแรงมากขึ้น กรรมวิธีทางความร้อนแบบนี้จึงเป็นการให้พลังงานที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดสภาวะของการเริ่มเกิดเป็นเฟสใหม่

ความแข็งแรงของโลหะจะสูงมากเฉพาะในช่วงที่อยู่ระหว่างขบวนการเกิดของเฟสใหม่เท่านั้น ถ้าผ่านพ้นช่วงนี้ไปถึงขั้นที่เกิดเฟสใหม่เป็นรูปร่างที่แน่นชัดจากเนื้ออะลูมิเนียมเดิมแล้วอะตอมของธาตุในเฟสใหม่จะไม่เหนียว (Coherent bond) กับอะตอมของธาตุในเฟสเก่า ซึ่งหมายความว่า จะไม่เกิดสเตรน และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมก็จะลดลงกว่าเดิม ปรัชญาการนี้เรียกว่า “การบ่มมากเกินไป (Overaging)” ในขณะที่มีการบ่มแข็งเทียม จะเกิดปรากฏการณ์เพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียมผสมด้วยการตกตะกอนขึ้น เนื่องจากการบิดเบี้ยวของแลตทิซ สาเหตุจากการเกิด Coherency precipitation ของ Al_2Cu ซึ่งมีขนาดเล็กมาก และกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งเป็นผลให้โลหะผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งเวลาในการบ่มแข็งเทียมต้องเลือกให้มีความเหมาะสมเพราะอาจส่งผลให้เกิดการบ่มมากเกินไป ขนาดของพรีซิพิตเตออาจจะมีใหญ่ทำให้สมบัติทางกลลดลงได้

2.3.2.4 ปริธิพิเทชันในโลหะผสมที่ผ่านการบ่มแข็ง (Precipitation in age hardening alloys)

หากพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง มีลำดับขั้นตอนในการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

1. จีพีโซน (GP Zone) ดังรูปที่ 2.8 (ก) เป็นแผนภาพสมดุลาของอะลูมิเนียม-ทองแดง พิจารณาโลหะผสม Al-4wt%Cu ที่ถูกนำมาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 548 °C โดยที่อุณหภูมินี้ทองแดงอยู่ในสภาวะสารละลายของแข็ง เฟส α (FCC) เมื่อนำโลหะผสมนี้มาชุบน้ำ ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิต่ำอย่างรวดเร็ว จนไม่มีเวลาในการเปลี่ยนเฟส ปริมาณของทองแดงในสารละลายของแข็งจึงสูงกว่าความสามารถในการละลายจริง ซึ่งจะเป็แรงผลักดัน



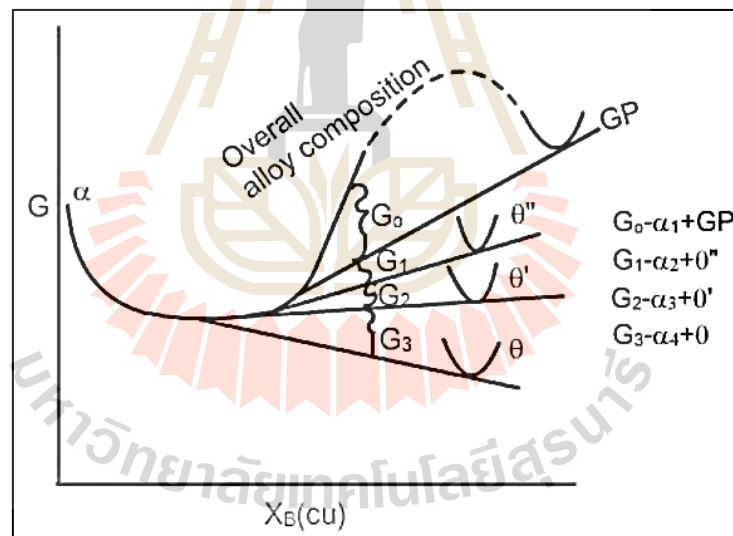
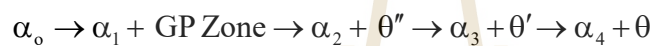
รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงเฟสของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง

(ก) จีพีโซน (ข) θ'' (ค) θ' และ (ง) θ

สำหรับการปริธิพิเทชันของเฟส θ (Al_2Cu) อย่างไม่ก็ตามถ้านำชิ้นงานนี้มาบ่มที่อุณหภูมิต่ำหรือที่อุณหภูมิต่ำกว่า 180 °C เป็นระยะเวลาหนึ่งปริธิพิเทตที่เริ่มนิวเคลียเอทเริ่มแรกเป็นโคเฮียเรนท์จีพีโซนเพราะพลังงานที่กีดขวางการนิวเคลียเอชันของจีพีโซนต่ำมาก

เนื่องจากอินเตอร์เฟสระหว่างจีพีโซนกับเมตริกซ์เป็นแบบโคเฮซีเรนท์เต็มที่ พลังงานอินเตอร์เฟสจึงต่ำมาก นอกจากนี้พลังงานความเครียดที่เกิดจากการฟอร์มจีพีโซนก็ต่ำด้วย เพราะการเรียงตัวของจีพีโซนอยู่ในทิศทางที่เมตริกซ์มีความอ่อนที่สุด (ทิศทาง $\langle 100 \rangle$) ดังรูปที่ 2.8 (ก) แสดงให้เห็นจีพีโซนในโลหะผสม Al-Cu จากรูปนี้ความหนาแน่นของจีพีโซนมีค่าใกล้เคียงกับการเรียงตัวของอะตอม 2 ชั้น และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 นาโนเมตร ระยะห่างโดยเฉลี่ยของแต่ละจีพีโซนประมาณ 10 นาโนเมตร จากรูปที่ 2.8 (ก) บริเวณของจีพีโซนจะมีความเข้มของภาพมากกว่าบริเวณรอบข้าง ซึ่งเกิดจากสนามความเครียดโคเฮซีเรนท์ที่ตั้งฉากกับจีพีโซน

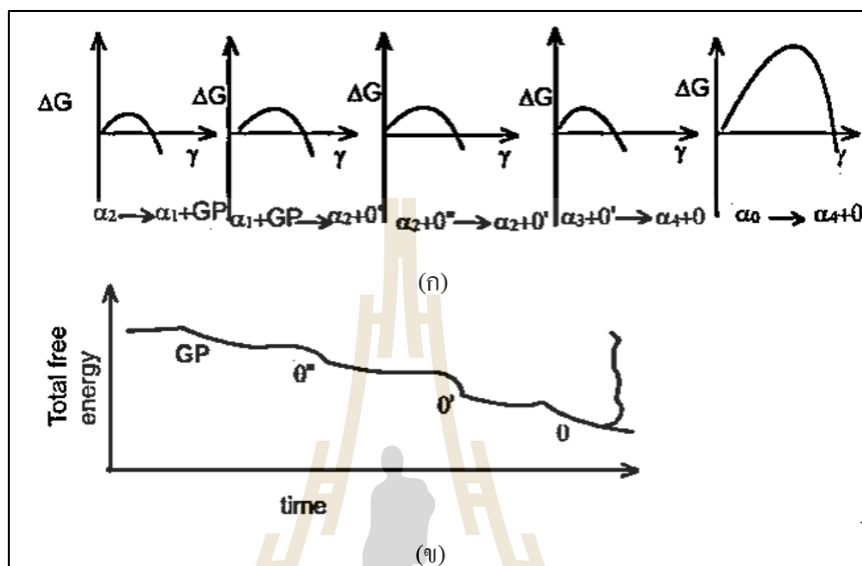
2. ทรานซิชันเฟส (Transition Phase) ภายหลังจากฟอร์มจีพีโซนระบบจะมีการเปลี่ยนเฟสไปตามลำดับ ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะผสม ดังตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นแผนภาพของพลังงานอิสระกับกระบวนการเปลี่ยนเฟส ดังนี้



รูปที่ 2.9 พลังงานอิสระของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง

ในที่นี้เรากำหนดให้จีพีโซนอยู่บนเส้นพลังงานอิสระเส้นเดียวกับเมตริกซ์ เนื่องจากมีโครงสร้างผลึกที่เหมือนกัน ทรานซิชันเฟส θ'' และ θ' เป็นเฟสที่เสถียรภาพน้อยกว่าเฟส θ จึงมีพลังงานอิสระที่สูงกว่า พลังงานอิสระถูกลดลงตามลำดับการเปลี่ยนเฟส โดยที่สภาวะที่เสถียรภาพที่สุดประกอบไปด้วย $\alpha_4 + \theta$ และมีพลังงานอิสระต่ำสุดเท่ากับ G_4 การฟอร์มตัวของ θ'' และ θ' ก่อนพรีซิพิตเตมาเป็น θ เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานที่ขวางกั้น

การนิวเคลียชันของ θ สูงกว่าเฟส θ'' และ θ' ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกันกับการนิวเคลียเอทของจีพีโซน
 ตอนเริ่มแรกของการพรีซิพิตชัน ดังรูปที่ 2.10 (ก) นอกจากนี้การเปลี่ยนเฟสแบบทรานซิชั่น
 ทำให้พลังงานอิสระของระบบลดลงได้รวดเร็วกว่าการเปลี่ยนเฟสเป็น θ โดยตรง ดังรูปที่ 2.10 (ข)



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระในเฟสลำดับต่าง ๆ

(ก) พลังงานกีดขวางการเปลี่ยนเฟสในลำดับต่าง ๆ

(ข) การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระตามลำดับเวลาของการเปลี่ยนเฟส

จากรูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างผลึกของ θ'' , θ' และ θ เทียบกับ
 เมตริกซ์ เฟส θ'' มีโครงสร้างผลึกเป็นเตตราโกนอล ซึ่งจริงๆแล้วเป็นโครงสร้างแบบ FCC ที่มีการ
 บิดตัวไปโดยมีอะตอมของทองแดงและอะลูมิเนียมเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบบนระนาบ (001)
 ความสัมพันธ์ของการเรียงตัวระหว่าง θ'' กับเมตริกซ์ คือ $(001)_{\theta''}$ ขนานกับ $(001)_{\alpha}$ และ $[001]_{\theta''}$
 ขนานกับ $[001]_{\alpha}$ ภาพถ่ายจาก TEM ในรูปที่ 2.8 (ข) แสดงให้เห็นความเข้มของ θ'' ที่แตกต่างไป
 จากเมตริกซ์ θ'' มีความหนาประมาณ 10 นาโนเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 100 นาโนเมตร

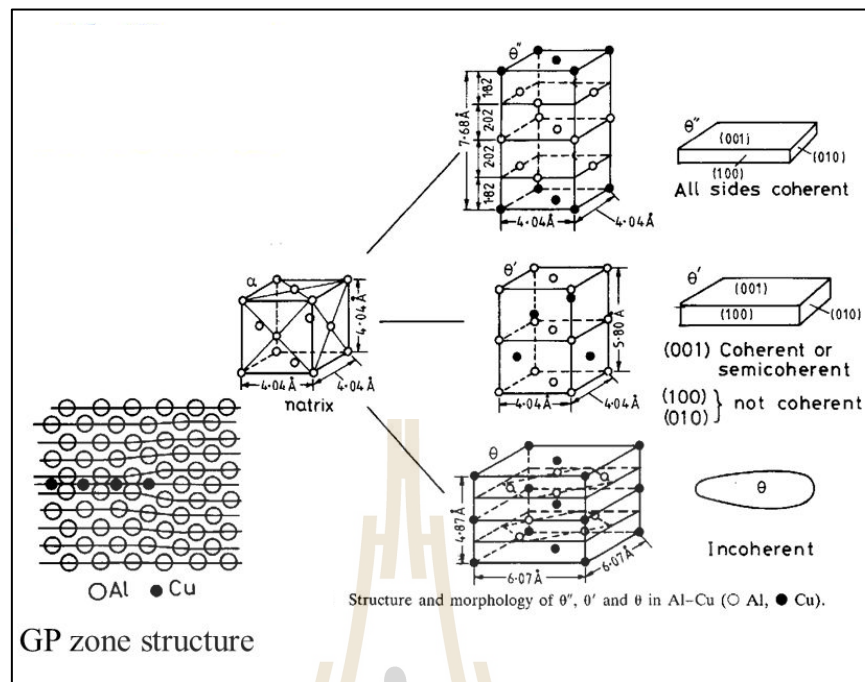
ตารางที่ 2.3 ลำดับการพรีซิพิตชัน

Base metal	Alloy	Precipitation sequence
Aluminum	Al-Ag	GPZ (spheres) \rightarrow γ' (plates) \rightarrow γ (Ag_2Al)
	Al-Cu	GPZ (discs) \rightarrow θ'' (discs) \rightarrow θ' (plates) \rightarrow θ (Al_2Cu)
	Al-Cu-Mg	GPZ (rods) \rightarrow S' (laths) \rightarrow S (Al_2CuMg) (laths)
	Al-Zn-Mg	GPZ (spheres) \rightarrow n' (plates) \rightarrow n (MgZn_2) (plates or rods)
	Al-Mg-Si	GPZ (rods) \rightarrow β' (rods) \rightarrow β (Mg_2Si) (plates)
Copper	Cu-Be	GPZ (discs) \rightarrow γ' \rightarrow γ (CuBe)
	Cu-Co	GPZ (spheres) \rightarrow β (Co)(plates)
Iron	Fe-C	ϵ - carbide(discs) \rightarrow Fe_3C (plates)
	Fe-N	α'' (discs) \rightarrow (Fe_4N)
Nickel	Ni-Cr-Ti-Al	γ' (cubes or spheres)

θ' มีโครงสร้างแบบเตตราโกนอลและมีส่วนประกอบใกล้เคียงกับ Al_2Cu ระนาบ $(001)_{\theta'}$ เหมือนกับ $(001)_{\alpha}$ แต่ระนาบ (001) และ (010) มีโครงสร้างผลึกเดี่ยวที่ต่างไปจากเมตริกซ์ แผ่นของ θ' ขนานกับระนาบ (001) ของเมตริกซ์เช่นเดียวกับการจัดตัวของ θ' ในช่วงแรกของการฟอร์มตัวหน้ากว้างของแผ่นจะฟอร์ม โคลเฮียเรนท์กับเมตริกซ์ แต่จะสูญเสียความเป็นโคลเฮียเรนท์ไปเมื่อ θ' ขยายตัวขึ้น

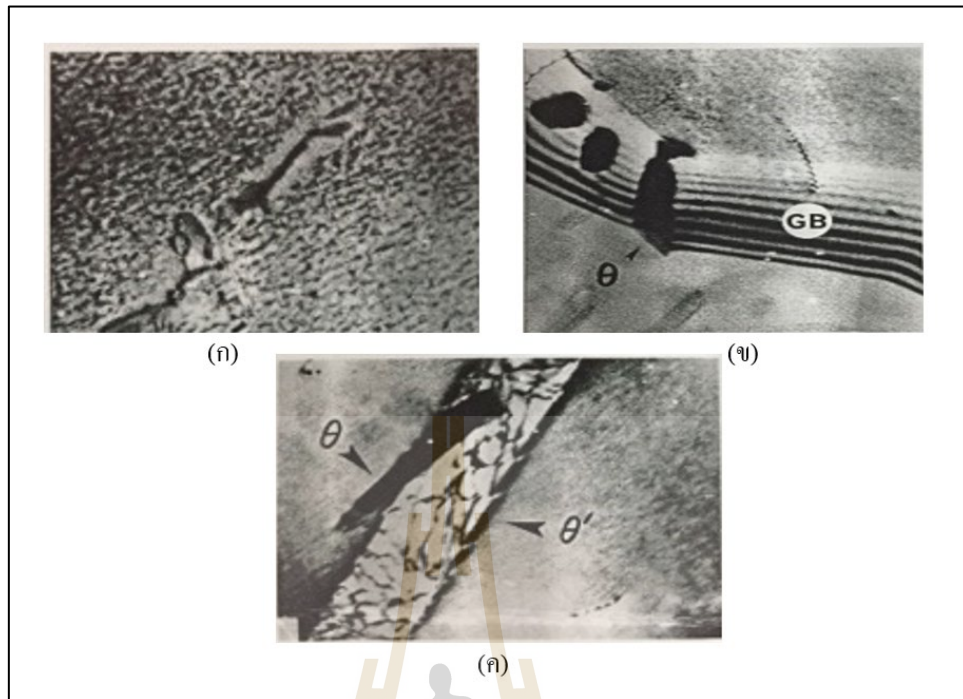
ในขณะที่ขอบของ θ' ฟอร์มอิน โคลเฮียเรนท์กับเมตริกซ์ จากรูปที่ 2.8 (ค) θ' มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครมิเตอร์ และมีดิสโลเคชันเกิดขึ้นที่หน้ากว้างเนื่องจากความเครียด ดิสโลเคชันนี้มีชื่อเรียกว่ามีสฟิตดิสโลเคชัน เนื่องจากส่วนขอบของจาน θ' เป็นอิน โคลเฮียเรนท์จึงไม่ปรากฏสนามความเครียดจากโคลเฮียเรนท์ดังที่พบใน θ''

เฟสเสถียรภาพ θ มีส่วนประกอบโดยประมาณคือ Al_2Cu และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบบอดีเซนเตอร์เตตราโกนอล (Body-centered tetragonal) ดังรูปที่ 2.11 ทุก ๆ อินเตอร์เฟสของ θ จะฟอร์มอิน โคลเฮียเรนท์กับเมตริกซ์ รูปที่ 2.8 (ง) แสดงให้เห็น θ ที่มีขนาดใหญ่และมีการกระจายตัวกันอย่างห่าง ๆ



รูปที่ 2.11 โครงสร้างผลึกของพรีซิพิตของ θ' , θ' และ θ เมื่อเทียบกับเมตริกซ์ α

การเปลี่ยนเฟสจากจีพีโซนไปเป็น θ' เกิดขึ้นบนจีพีโซนนั่นเอง ในขณะที่ θ' นิวคลีเอทบนดิสโลเคชันในเมตริกซ์และมีการเรียงตัวใน 2 แนวตามทิศทาง $\langle 100 \rangle$ ของเมตริกซ์ เพราะว่าดิสโลเคชันในเมตริกซ์มีความสามารถในการลดสนามความเครียดที่เกิดในทิศทาง (100) ได้ดีที่สุด ดังรูปที่ 2.12 (ก) แสดงการนิวคลีเอชันของ θ' บนดิสโลเคชันในขณะที่ θ' เริ่มละลายไปหลังจากที่เวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง θ เริ่มนิวคลีเอทบนขอบเกรน ดังรูปที่ 2.12 (ข) หรืออินเตอร์เฟสระหว่าง θ' กับเมตริกซ์ ดังรูปที่ 2.13 (ค) ลำดับการเปลี่ยนเฟสทั้งหมดนี้เกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อโลหะผสมได้รับการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้นของแข็ง (Solvus line) ของจีพีโซน แต่ถ้าอุณหภูมิของการบ่มอยู่สูงกว่าเส้นของแข็งของ θ' แต่ต่ำกว่าเส้นของแข็งของ θ' พรีซิพิตที่ฟอร์มเริ่มแรกจะเป็น θ' ที่นิวคลีเอทบนขอบเกรน เช่นเดียวกันถ้าโลหะผสมเดิมมีจีพีโซนอยู่ในเมตริกซ์ถูกนำมาให้ความร้อนสูงกว่าเส้นของแข็งของจีพีโซน จะพบว่าจีพีโซนจะละลายไปซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่ารีเวอร์ชัน (Reversion)

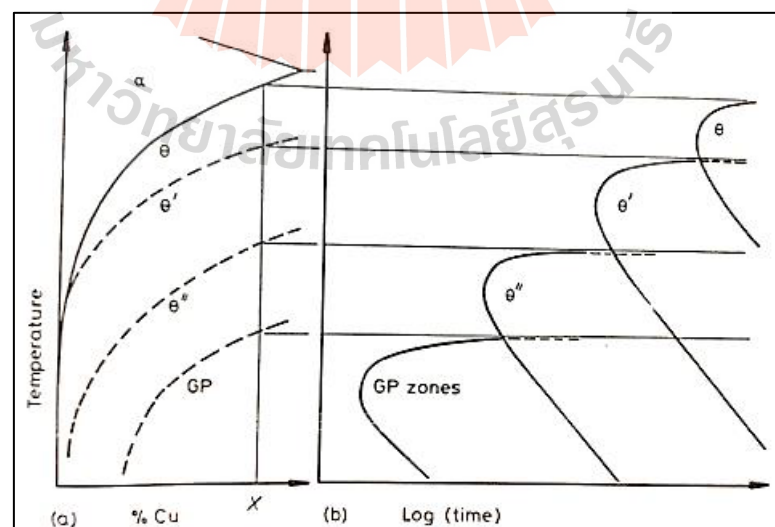


รูปที่ 2.12 ตำแหน่งการนิวคลีโอเซชันในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง

(ก) $\theta'' \rightarrow \theta'$ ที่ดิสโลเคชัน

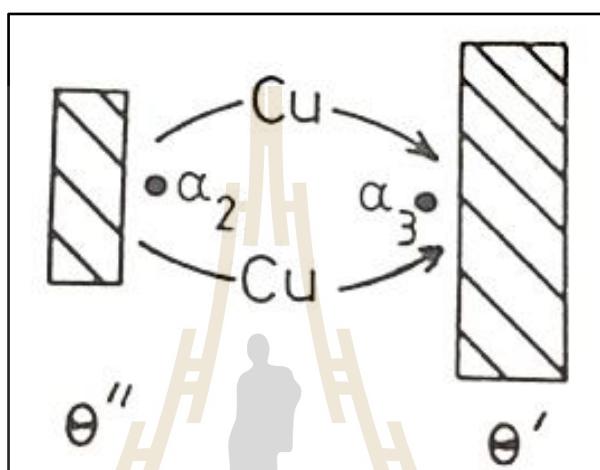
(ข) θ นิวคลีโอเซทที่ขอบเกรน

(ค) $\theta' \rightarrow \theta$ ที่อินเตอร์เฟสระหว่างเมตริกซ์กับ θ'



รูปที่ 2.13 แผนภาพ TTT ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง

อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มกับลำดับการพรีซิพิตชันด้วยแผนภาพ TTT ดังรูปที่ 2.13 อัตราการเปลี่ยนรูปที่เร็วที่สุดขึ้นอยู่กับอัตราการนิวคลีเอชันว่าเป็นไปได้เร็วเพียงใด ดังนั้นในช่วงเริ่มแรกของการพรีซิพิตเตต จะมีจำนวนพรีซิพิตเตตมากและมีการกระจายตัวกันอย่างหนาแน่น ในขณะที่ลำดับหลัง ๆ ของการพรีซิพิตเตชัน ขนาดพรีซิพิตเตตโตขึ้นและอยู่ห่างกันมากขึ้น



รูปที่ 2.14 การแพร่ของทองแดงจาก θ'' ไปยัง θ' ทำให้ θ' โตขึ้นในขณะที่ θ'' เริ่มหายไป

จากรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นกลไกการเปลี่ยนแปลงจากเฟส $\theta'' \rightarrow \theta'$ ย้อนกลับไปพิจารณารูปที่ 2.9 พบว่าความเข้มข้นของทองแดงในเมตริกซ์ที่ใกล้เคียงกับ $\theta'' (\alpha_2)$ สูงกว่าในเมตริกซ์ที่ใกล้เคียงกับ $\theta' (\alpha_3)$ ดังนั้น Cu ในเมตริกซ์จะแพร่ออกจากบริเวณของเฟส θ'' ทำให้เฟส θ'' เริ่มละลายไปในขณะที่ θ' เริ่มโตขึ้น

2.4 สมบัติทางกล (Mechanical properties)

สมบัติทางกล (Mechanical properties) เป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของวัสดุ เมื่อมีแรงภายนอกกระทำต่อวัสดุ ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความทนแรงดึง (Tensile strength) ความสามารถในการยืดตัว (Elongation) ความคืบ (Creep) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงสมบัติทางกลของวัสดุทางด้านความแข็งและความทนแรงดึง โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.4.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

ความแข็ง คือ คุณสมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทานหรือทนต่อการเสียรูปแบบพลาสติก โดยปกติเกิดจากการทำให้เป็นรอยจากการกด อย่างไรก็ตามความแข็งอาจรวมถึง

ความต้านทานต่อการตัด การขีด การขีด และ การตัด การวัดความแข็ง ความแข็ง ไม่ใช่คุณสมบัติเนื้อแท้ของวัสดุที่กำหนดได้ด้วยค่าจำกัดความที่แน่นอนบนหน่วยพื้นฐานของมวล ความยาว และเวลา ค่าคุณสมบัติความแข็งคือ ผลของกระบวนการวัดที่กำหนด ความแข็งของวัสดุได้ประเมินมาอย่างยาวนาน โดยความต้านทานต่อการขีดและการตัด ตัวอย่างเช่น วัสดุ B ขีดวัสดุ C เป็นรอยแต่ไม่สามารถขีดวัสดุ A เป็นรอย ในทางกลับกันวัสดุ A ขีดวัสดุ B เป็นรอยเล็กน้อยและขีดวัสดุ C เป็นรอยมาก

การทดสอบความแข็งโดยการเปรียบเทียบมีข้อจำกัดในการใช้งานและไม่สามารถให้ข้อมูลตัวเลขที่แม่นยำหรือกำหนดสเกลเฉพาะสำหรับวัสดุและโลหะสมัยใหม่ วิธีโดยปกติเพื่อหาค่าความแข็งคือ การวัดจากความลึกหรือพื้นที่ของรอยกดที่เหลือทิ้งไว้จากหัวกดที่มีรูปร่างภาระ (Load) และเวลาที่เจาะจง วิธีมาตรฐานหลัก 3 มาตรฐาน สำหรับการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและขนาดของรอยกด คือ ร็อคเวลล์ บริเนลล์ และวิกเกอร์ แต่ละวิธีของมาตรฐานได้ถูกแบ่งเป็นสเกลกำหนดโดยภาระที่ใช้และลักษณะของหัวกด ด้วยเหตุผลของการใช้งานและสอบเทียบ

2.4.1.1 การทดสอบความ แข็งแบบบริเนลล์ (Brinell hardness test)

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์เป็นการวัดความแข็งโดยอาศัยแรงกดคงที่กระทำผ่านลูกบอลทรงกลมลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ ซึ่งลูกบอลที่ใช้ในการทดสอบ คือ บอลที่ทำจากเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ โดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตร ค่าความแข็งสามารถคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหน่วยพื้นที่ผิว โดยพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นผิวโค้ง โดยจะใช้วิธีการคือ ใช้บอลเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งมาอย่างดีหรือบอลทังสเตนคาร์ไบด์ กดลงบนผิวชิ้นงานที่จะทดสอบซึ่งผิวชิ้นงานจะต้องมีความเรียบ โดยใช้แรง 3,000 กิโลกรัม สำหรับวัสดุแข็ง และ 500 กรัมสำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลาในการกด 30 วินาที เป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (Indentation) และคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.5

$$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \quad (2.5)$$

โดยที่	HB	คือ ค่าความแข็ง Brinell (kg/mm ²)
	P	คือ แรงกดที่กระทำ (kg)
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด (mm)
	d	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (mm)

โดยมีเงื่อนไขในการทดสอบชิ้นงาน ดังนี้

1. ผิวชิ้นงานทดสอบจะต้องมีหน้าตัดเรียบปราศจากออกไซด์หรือวัสดุชนิดอื่น ๆ เช่น สารหล่อลื่นทุกชนิด
2. ความหนาของชิ้นงานทดสอบจะต้องเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดรอยใต้ผิวชิ้นงานทดสอบ โดยทั่วไปมีการกำหนดความหนาดำสุดเท่ากับ 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (d)
3. อุณหภูมิที่ทดสอบอยู่ระหว่าง 10 °C ถึง 35 °C
4. ระยะห่างระหว่างรอยกดในเหล็กกล้า ทองแดง และทองเหลือง ควรมีระยะห่างอย่างน้อยที่สุด 3 เท่าของความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมรอยกด แต่สำหรับโลหะเบา เช่น ดีบุก ตะกั่ว อะลูมิเนียม ควรมีระยะห่างอย่างน้อยที่สุด 6 เท่าของความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมรอยกด

2.4.1.2 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test)

หลักในการทดสอบมีความคล้ายคลึงกับการทดสอบแบบบริเนลล์ แต่มีข้อแตกต่างกันคือ ใช้หัวกดที่มีขนาดเล็กกว่าและแรงที่ใช้กดน้อยกว่า ค่าของแรงที่ใช้กดและขนาดของหัวกดสามารถเปลี่ยนได้ขึ้นอยู่กับสเกลของความแข็งที่จะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่ใช้ทดสอบ การอ่านค่าความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง วิธีการทดสอบจะใช้แรงกระทำเพียงเล็กน้อย คือ 10 กิโลกรัม จากนั้นเพิ่มแรงกระทำขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งขนาดแรงมีตั้งแต่ 60-100 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ โดยการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ของการวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ ดังตารางที่ 2.3

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการทดสอบด้วยวิธีการแบบร็อคเวลล์ พบว่าสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุต่าง ๆ ได้หลายระดับและมีขั้นตอนไม่ซับซ้อน โดยสามารถวัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลล์วัดไม่ได้ การใช้งานสะดวกและอ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านได้โดยตรงจากเครื่อง รวมไปถึงรอยกดที่บ่มลงไปในชิ้นงานมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีข้อควรพิจารณาในการทดสอบดังนี้

1. ผิวของวัสดุที่นำมาทดสอบต้องมีหน้าตัดเรียบและตั้งฉากกับหัวกด รวมไปถึงไม่มีสิ่งแปลกปลอม
2. ความหนาของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบต้องมีความหนาเป็น 8 เท่าของความลึกรอยกด
3. ตำแหน่งของรอยกดต่าง ๆ ควรมีระยะห่างควรมีระยะห่างระหว่างกัน โดยวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบ่มไม่น้อยกว่า 4 เท่า
4. ขณะที่หัวกดกำลังกดลงในวัสดุทดสอบต้องไม่มีแรงสั่นสะเทือนจากแท่นวางวัสดุทดสอบหรือจากภายนอก

5. การอ่านค่าความแข็งที่ได้จากเครื่องนั้นจะมีสัญลักษณ์ที่จะต้องอ่าน 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

ตารางที่ 2.4 สเกลการทดสอบความแข็งและชนิดของหัวกดของการวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์

สเกล	ประเภทหัวกด	แรงกด (Kgf)	การใช้งาน
A	หัวกดเพชร	60	ซีเมนต์คาร์ไบด์ เหล็กกล้าที่มีขนาดบางและเหล็กกล้าชุบแข็งผิวไม่ลึก
B	ลูกบอลเหล็กกล้า ชุบแข็ง $\left(\frac{1}{16}\right)''$	100	โลหะผสมทองแดง เหล็กกล้าที่ไม่แข็งมาก โลหะผสมอะลูมิเนียม และเหล็กอ่อนอบเหนียว
C	หัวกดเพชร	150	เหล็กกล้า เหล็กหล่อที่มีความแข็งสูง เหล็กอ่อนอบเหนียวชนิดเพอร์ริติก ไทเทเนียม เหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิวลึก และวัสดุอื่น ๆ ที่มีความแข็งมากกว่า 100 HRB
D	หัวกดเพชร	100	เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง เหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิว และเหล็กหล่ออบเหนียวชนิดเพอร์ริติก
E	ลูกบอลเหล็กกล้า ชุบแข็ง $\left(\frac{1}{8}\right)''$	100	เหล็กหล่อ โลหะผสมของอะลูมิเนียม โลหะผสมของแมกนีเซียม และโลหะสำหรับผลิตแปรง
F	ลูกบอลเหล็กกล้า ชุบแข็ง $\left(\frac{1}{16}\right)''$	60	โลหะผสมของทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน โลหะแผ่นบางที่ไม่แข็ง
G	ลูกบอลเหล็กกล้า ชุบแข็ง $\left(\frac{1}{16}\right)''$	150	บรอนซ์ผสมฟอสฟอรัส โลหะผสมทองแดง-เบอริเลียม เหล็กหล่ออบเหนียว

ตารางที่ 2.4 สเกลการทดสอบความแข็งและชนิดของหัวกดของการวัดความแข็งแบบรีอคเวลล์ (ต่อ)

สเกล	ประเภทหัวกด	แรงกด (Kgf)	การใช้งาน
H	ลูกบอลเหล็กกล้า ชุบแข็ง $\left(\frac{1}{8}\right)''$	60	อะลูมิเนียม สังกะสี และตะกั่ว
K	ลูกบอลเหล็กกล้า ชุบแข็ง $\left(\frac{1}{8}\right)''$	150	โลหะสำหรับผลิตแบร็งและวัสดุอื่นๆที่บางและอ่อน โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ Anvil effect
L	ลูกบอลเหล็กกล้า ชุบแข็ง $\left(\frac{1}{4}\right)''$	60	โลหะสำหรับผลิตแบร็งและวัสดุอื่นๆที่บางและอ่อน โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ Anvil effect

หมายเหตุ Kgf (Kilogram force) หมายถึง หน่วยของแรงที่ใช้ในการกด

2.4.1.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test)

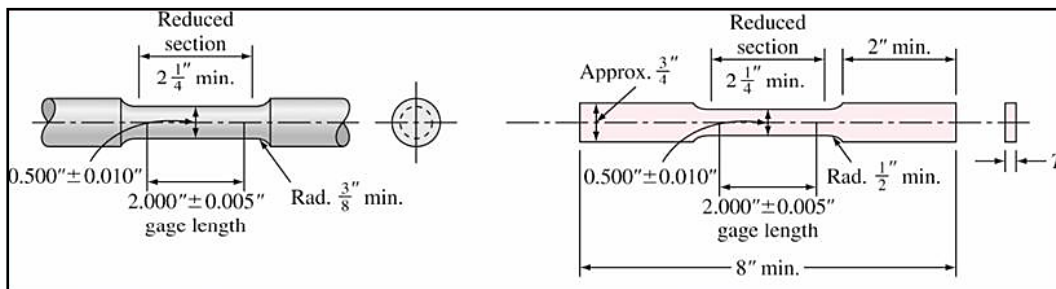
การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์คล้ายกับการวัดความแข็งแบบบริเนลล์ ในแง่ที่ว่าค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่แตกต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปทรงพีระมิด โดยแรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5-120 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ เนื่องจากหัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมาก ๆ ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่อ่อนมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมาก ๆ (VHN ประมาณ 1,5000) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกดจะเปลี่ยนเฉพาะแรงกดเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ โดยวัสดุที่ใช้ในการทดสอบจะต้องมีลักษณะดังนี้

1. ผิวชิ้นงานทดสอบจะต้องมีหน้าตัดเรียบ
2. ความหนาของชิ้นงานทดสอบจะต้องเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดรอยใต้ผิวชิ้นงานทดสอบ โดยทั่วไปมีการกำหนดความหนาดำสุดเท่ากับ 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด
3. อุณหภูมิในการทดสอบอยู่ระหว่าง 10 °C ถึง 35 °C
4. ระยะห่างระหว่างรอยกดในเหล็กกล้า ทองแดง และทองเหลือง ควรมีระยะห่างอย่างน้อยที่สุด 3 เท่าของความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมรอยกด แต่สำหรับโลหะเบา เช่น ดีบุก ตะกั่ว อะลูมิเนียม ควรมีระยะห่างอย่างน้อยที่สุด 3 เท่าของความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมรอยกด

จากวิธีการวัดความแข็งที่กล่าวมาทั้ง 3 วิธีนั้น มีข้อสังเกตว่าการทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์เป็นวิธีการที่มีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบวัสดุทุกประเภท ตั้งแต่วัสดุอ่อนจนถึงวัสดุที่มีความแข็งมากซึ่งค่าที่อ่านได้มีค่าที่ค่อนข้างแม่นยำกว่าการทดสอบด้วยวิธีอื่น ๆ ตลอดจนถึงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน

2.4.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการดึงชิ้นงานทดสอบซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบตกอยู่ได้สภาวะการยืด และเป็นกระบวนการที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการเสียรูป โดยการเสียรูปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของชิ้นทดสอบจากแรงที่กระทำ การตรวจวัดการเสียรูปจะวัดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นทดสอบเทียบกับขนาดเริ่มต้น นั่นคือการเสียรูปจะวัดจากความยาวของระยะทดสอบ (Gage length) ที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบเทียบกับระยะทดสอบเริ่มต้น ระยะทดสอบเป็นช่วงความยาวมาตรฐานที่ใช้ในการวัดระดับการยืดหรือการเสียรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ ชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงอาจเป็นชิ้นงานรูปทรงกระบอกหรือเป็นชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่น ดังรูปที่ 2.15 ปลายทั้งสองข้างของชิ้นงานที่ใช้สำหรับยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบจะต้องมีขนาดและพื้นผิวที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการหลุดออกระหว่างการดึงชิ้นงาน ส่วนขนาดความยาวของเกจ (Gauge length, L_0) จะถูกกำหนดให้เป็นค่ามาตรฐาน ซึ่งจะแปรผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_0) หรือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (A_0) ดังตารางที่ 2.4 เนื่องจากถ้าหากชิ้นงานมีขนาดของความยาวเกจที่มากเกินไปอาจทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ที่ได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง นอกจากนี้แล้วก่อนการกลึงขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึง ชิ้นงานโลหะควรผ่านการอบชุบเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยาก่อนการทดสอบ เพื่อเป็นการป้องกันรอยตำหนิ เช่น การเกิด Oxide scale ที่ผิวชิ้นงานซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุของการแตกหักก่อนเวลาอันควร (Premature failure) อันเนื่องมาจากเป็นจุดสะสมของความเค้น (Stress concentration) ที่รอยตำหนิ หากชิ้นงานต้องมีการผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านความแข็งที่ผิวของชิ้นงาน (Surface hardening) ตัวอย่างเช่น การทำ Nitriding, Carburizing หรือการเคลือบที่ผิว (Surface coating) ในกรณีนี้ควรนำชิ้นงานมาผ่านกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ภายหลังจากการกลึงขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อผลการทดสอบสมบัติแรงดึงของชิ้นงานที่สนใจนั้นจะรวมถึงสมบัติพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุง



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 2.5 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ใช้เป็นมาตรฐานในประเทศต่าง ๆ

Type specimen	United State (ASTM)	Great Britain	Germany
Sheet ($L_0/\sqrt{A_0}$)	4.50	5.65	11.30
Rod ($L_0/\sqrt{D_0}$)	4.00	5.00	10.00

โดยปกติแล้วเมื่อโลหะหรือวัสดุได้รับแรงดึง (Tensile loading) จะมีการเปลี่ยนรูปร่างแบบยืดหยุ่นและแบบพลาสติก (Elastic and plastic deformation) โดยในตอนแรกโลหะจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างแบบยืดหยุ่นก่อน โดยมีความสัมพันธ์ของค่าแรงที่กระทำกับชิ้นงาน (Applied load) และการยืดตัว (Extension) ที่เป็นเส้นตรง (Linear relationship) ค่า Load และ Extension สามารถนำมาคำนวณหาความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering stress) และความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering strain) ที่จุดใด ๆ ดังรูปที่ 2.23 โดยใช้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

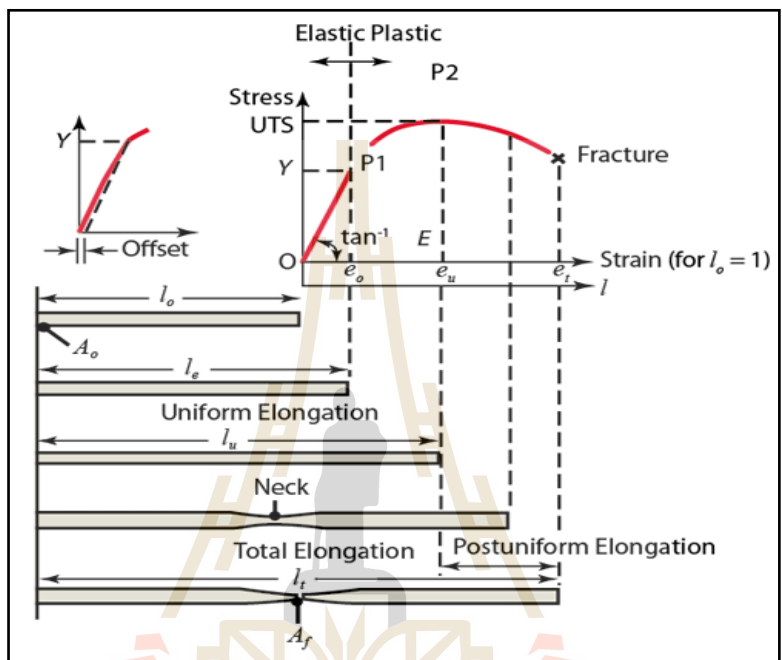
$$\sigma = \frac{P}{A_0} \tag{2.6}$$

และ

$$\epsilon = \frac{L_0 - L_f}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{2-7}$$

โดยที่ σ คือ ความเค้นทางวิศวกรรม
 ϵ คือ ความเครียดทางวิศวกรรม

- P คือ แรงดึงที่กระทำนานกับความยาวของชิ้นงาน
- A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงาน
- L_0 คือ ความยาวเดิมของชิ้นงาน
- L_f คือ ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน



รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress-Strain ภายใต้แรงกระทำในแนวแกน

ค่าโมดูลัสของยังส์ (Young's modulus, E) หากพิจารณากราฟความสัมพันธ์ Engineering Stress-Strain ในช่วงที่โลหะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอีลาสติก ถ้านำแรงที่กระทำต่อชิ้นงานออกไปจะทำให้รูปทรงของชิ้นงานโลหะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุคส์ (Hooke's Law) โดยที่ค่าความชันของความสัมพันธ์ Engineering stress-Engineering strain นี้คือ Young's modulus (E)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \tag{2.8}$$

ค่า Young's modulus นั้นมีความสำคัญในเชิงวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการคดงของวัสดุ (Deflection of material) ตัวอย่างเช่น ในเรื่องของการโค้งตัว การงอของแท่งคานเหล็ก

เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกในสิ่งก่อสร้างต่างๆ เช่น สะพาน อาคาร เรือ เป็นต้น นอกจากนี้แล้วในการใช้งานของอุปกรณ์กีฬา เช่น เทนนิส แบดมินตัน กอล์ฟ ก็ยังต้องการสมบัติเฉพาะของวัสดุคงกล่าวเพื่อให้สัมพันธ์กับการใช้งานที่ต้องการ

จุดคราก (Yield point, σ_y) หากชิ้นงานได้รับแรงกระทำอย่างสม่ำเสมอจะเกิดปรากฏการณ์ Yielding ซึ่งเป็นจุดแรกที่ชิ้นงานโลหะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) โดยค่าความแข็งแรงที่จุดนี้ เรียกว่า “Yield strength (σ_y)” และสามารถหาค่าได้จากค่าแรงที่กระทำตรงตำแหน่งการเกิด Yielding (P_y) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน ดังสมการที่ 2.9

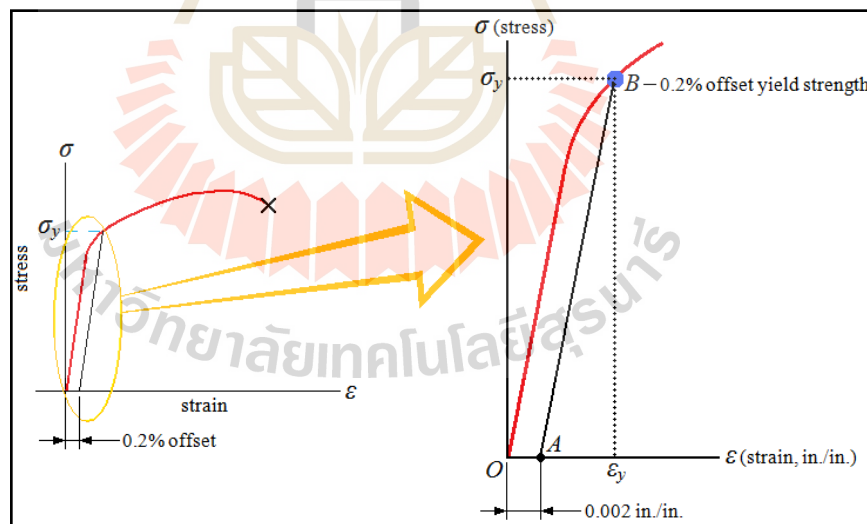
$$\sigma_y = \frac{P_y}{A_0} \quad (2.9)$$

การเกิด Yielding สามารถพบในโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC เช่น เหล็กและเหล็กกล้าหรือในโลหะผสมจำพวกไทเทเนียมและโมลิบดีนัม โดยเฉพาะในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steels) จะสามารถสังเกตจุด Yield ได้ชัดเจนจากกราฟความสัมพันธ์ของ Engineering stress-strain ดังรูปที่ 2.24 การเกิดปรากฏการณ์ Yield point elongation จะเริ่มเกิด Yielding ของชิ้นงานโลหะครั้งแรกที่จุด Upper yield point ซึ่งสังเกตได้ว่าค่าแรงดึงจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงจุด Lower yield point และโลหะจะเกิดการยึดตัวโดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดึงในช่วงนี้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งในช่วงนี้จะเรียกว่า Yield point elongation และยังคงใช้แรงเพิ่มขึ้นในการทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนรูป การเกิดปรากฏการณ์ Yield point elongation ดังกล่าวนั้นเกิดจากการที่โลหะมีปริมาณของธาตุผสมที่สามารถแทนที่อะตอมในโครงสร้างเดิมแบบแทรกที่ (Interstitial) หรือแทนที่ (Substitutional) อยู่จำนวนเล็กน้อย เช่น คาร์บอนหรือไนโตรเจน เป็นต้น อะตอมของธาตุทั้งสองชนิดนี้มีขนาดที่เล็กกว่าอะตอมของเหล็กมากทำให้สามารถแทรกอยู่ในโครงสร้างของเหล็กแบบแทรกที่ได้ อะตอมของคาร์บอนและไนโตรเจนสามารถหยุดการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้ (Dislocation pinning) ดังนั้น จึงต้องใช้ความเค้นในการดึงให้ดิสโลเคชันหลุดออกจากอะตอมดังกล่าว ความเค้นที่ว่านี้คือความเค้นที่จุด Upper yield point เมื่อดิสโลเคชันถูกดึงออกจากอะตอมที่ขัดขวาง ดิสโลเคชันจึงจะสามารถเคลื่อนที่โดยใช้แรงหรือความเค้นที่น้อยลงหรืออาจเกิดการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันกลุ่มใหม่ทำให้ค่าความเค้นลดลงมาถึงจุดที่เรียกว่า “Lower yield point” นอกจากนี้ยังพบว่าหากเหล็กคาร์บอนต่ำนี้มีปริมาณคาร์บอนหรือไนโตรเจนมากก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Yield point เช่นนี้ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

ส่วนโลหะที่ไม่ปรากฏ Yield point ที่ชัดเจน เช่น อะลูมิเนียม ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC จะแสดงเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง Engineering stress-strain ที่ค่อนข้างต่อเนื่องในกรณีนี้สามารถหาค่า Yield strength ได้จากการอ่านค่าแรงกระทำที่ 0.2% ของ Strain ($P_{0.2}$)หารด้วยพื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงาน

$$\sigma_{0.2\%y} = \frac{P_{0.2\%}}{A_0} \quad (2.10)$$

การหาค่า Yield strength ของชิ้นงานที่ไม่แสดง Yield point ที่ชัดเจนสามารถทำได้โดยลากเส้นตรงขนานกับเส้นความชันของ Stress-strain curve โดยมีจุดตัดแกน X ที่ 0.2% offset หรือคิดเป็น Strain = 0.002 ดังรูปที่ 2.17 จุดตัดของเส้นตรงที่ 0.2% offset นี้กับ Stress-strain curve จะแสดงค่า Stress ที่ 0.2% strain หรือค่า Yield strength ที่ 0.2% offset การหาค่า Yield ด้วยวิธีนี้สามารถกำหนดค่า % offset ที่ 0.1% หรือ 0.5% ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การนำไปใช้งานให้เหมาะสม ค่า Yield strength ของวัสดุที่มีความอ่อนมาก เช่น ทองแดงหรือเหล็กหล่อเทา ซึ่งจะไม่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ที่เป็นเส้นตรง



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ Aluminum alloy และการหาค่า Yield strength ที่ 0.2% offset

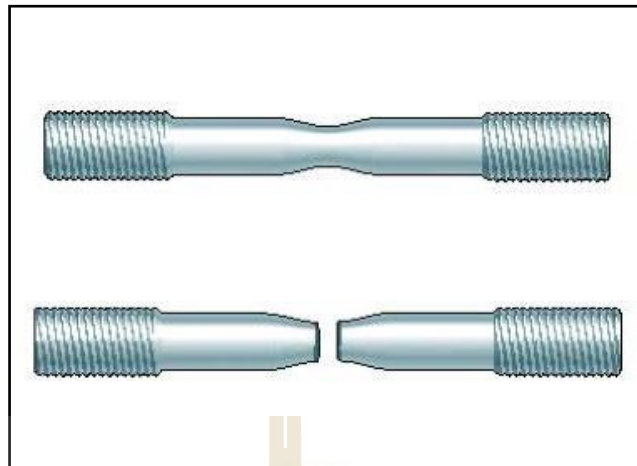
ค่า Yield strength ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงจุดเริ่มต้นการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกนั้นมีความสำคัญอย่างมากทางวิศวกรรมด้านการก่อสร้างโครงสร้างการออกแบบโดยมีการใช้ค่า

แฟกเตอร์ความปลอดภัย (Safety factor) เข้ามาคำนวณ ดังแสดงในสมการที่ 2.11 ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งเพื่อใช้ในการประมาณหรือทำนายค่าความแข็งแรงของวัสดุให้สามารถนำมาใช้งานทางวิศวกรรมได้อย่างปลอดภัย (Working stress, σ_w) เช่น ถ้าหากค่า Working strength (σ_w) คือ 500 MPa ถูกกำหนดในการใช้งาน โดยมี Safety factor คือ 1.8 นั้นหมายถึงควรเลือกวัสดุที่มีค่า Yield strength คือ 900 MPa เพื่อนำมาใช้งานในกรณีดังกล่าว และสามารถใช้ค่าความแข็งแรงถึงสูงสุด Ultimate tensile strength แทนค่า Yield strength ได้

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{\text{Safety Factor}} \cdot \frac{\sigma_{TS}}{\text{Safety Factor}} \quad (2.11)$$

ค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, σ_{TS}) เมื่อชิ้นงานโลหะได้รับแรงกระทำอย่างต่อเนื่องเลยจากจุดที่เกิดการครากไปพบว่าจะต้องใช้แรงเพิ่มมากขึ้นเพื่อทำให้ชิ้นงานโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ดังแสดงจากกราฟ Stress-strain curve ที่เพิ่มขึ้น ในช่วงนี้โลหะจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเรียกว่า “การเกิด Work hardening” หรือ “Strain hardening” โลหะแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการเกิด Strain hardening ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึก (Crystal structure) และส่วนผสมทางเคมี (Chemical composition) ซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันในระบบของโครงสร้างผลึกที่มี Slip systems จำนวนมาก เช่น FCC จะสามารถเกิด Slip ได้ง่ายและทำให้จำนวนของดิสโลเคชันเพิ่มจำนวนมากตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อโลหะมีแรงกระทำจะทำให้ดิสโลเคชันขัดขวางการเคลื่อนที่ของกันและกันทำให้ต้องมีการใช้แรงกระทำมากขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อที่จะทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปหรือเกิด Strain hardening นั้นเอง เมื่อให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องกราฟ Stress-strain จะเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดที่เรียกว่า Ultimate tensile strength (UTS, σ_{TS}) ที่จุดนี้แสดงถึงค่าความแข็งแรงสูงสุดที่โลหะหรือวัสดุสามารถรับแรงกระทำได้ จากนั้นพื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานโลหะจะเริ่มเกิดการคอดลงและโดยทั่วไปมักจะเกิดที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงาน เรียกว่าการเกิดคอคอด (Necking) ดังรูปที่ 2.18 ภายหลังจากการเกิดคอคอดโลหะจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกอย่างไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform plastic deformation) เนื่องจากพื้นที่ในการรับแรงมีขนาดลดลงตามลำดับกราฟ Engineering stress-strain จะลดต่ำลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะการแตกหัก (Fracture) ในที่สุดโดยค่าความแข็งแรงของวัสดุที่จุดแตกหัก (σ_{fracture}) สามารถหาได้จากค่าแรงกระทำสุดท้ายที่เกิดการแตกหักหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงานดังสมการ

$$\sigma_{\text{fracture}} = \frac{P_{\text{fracture}}}{A} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.18 การเกิดคอคอดก่อนการแตกหักในชิ้นงานทดสอบแรงดึง

ความแข็งแรง ณ จุดแตกหัก (Fracture strength, σ_f) ภายหลังที่ชิ้นงานทดสอบคอคอดลงเมื่อความสัมพันธ์ของ Stress-strain โดยจุดสูงสุดพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุเป็นแบบพลาสติกที่ไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform plastic deformation) และค่า Stress จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดที่วัสดุเกิดการแตกหัก จุดนี้เรียกว่า “ความแข็งแรง ณ จุดแตกหัก” หรือ “Fracture strength (σ_f)” ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าแรงกระทำ ณ จุดที่วัสดุเกิดการแตกหักหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน ดังแสดงในสมการที่ 2.13

$$\sigma_{\text{fracture}} = \frac{P_{\text{fracture}}}{A_0} \quad (2.13)$$

ความเครียด ณ จุดแตกหัก (Fracture Strain, ϵ_f) ค่า Fracture strain สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ Stress-strain โดยการลากเส้นขนานกับเส้นความชันของกราฟตรงจุดสุดท้ายที่เกิดการแตกหักตามลำดับลงมาตัดกับแกน X ระยะห่างระหว่างเส้นขนานทั้งสองเส้นตามแกนอนนี้แสดงค่า Fracture strain

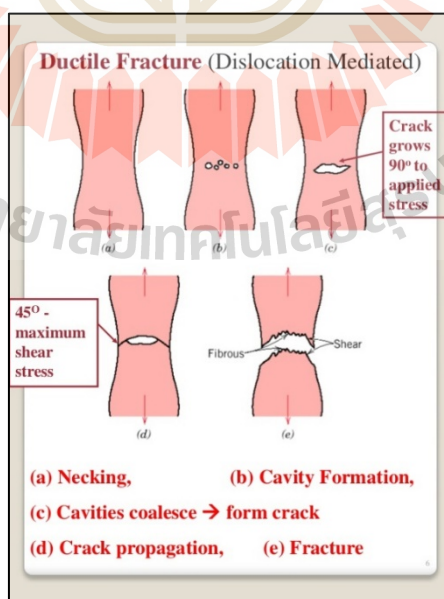
ความยืดหยุ่นตัว (Tensile ductility) ค่าความยืดหยุ่นตัวของชิ้นงาน (Tensile ductility) สามารถหาได้จากเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) หรือเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน (%RA) ดังสมการ

$$\% \text{Elongation} = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (2.14)$$

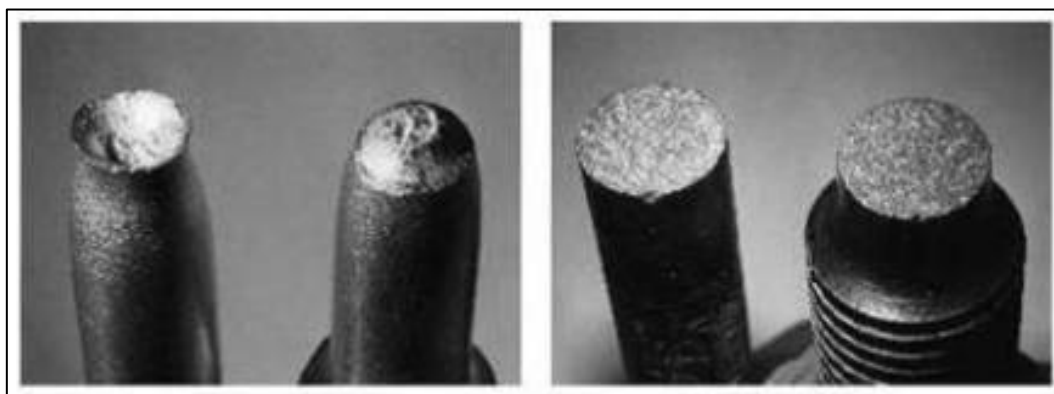
$$\%RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100 \quad (2.15)$$

โดยที่ A_f คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานหลังการแตก

ลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน (Fracture characteristics of the tested specimens) สำหรับโลหะที่มีความยืดหยุ่นสูง (Ductile metals) โดยทั่วไปจะแสดงการแตกหักแบบถ้วยและกรวย (Cup and cone) ดังรูปที่ 2.19 เมื่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเกิดการคอดลง (Necking) ภายหลังจากกราฟ Stress-strain ผ่านจุดสูงสุดภายในบริเวณพื้นที่หน้าตัดจะเกิดช่องว่างเล็ก ๆ ที่เรียกว่า “Microvoid” จำนวนมากและ Microvoid ต่าง ๆ เหล่านี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนมาเชื่อมกัน เกิดเป็นรอยแตกขนาดใหญ่บริเวณตรงกลาง โดยมีระนาบของรอยแตกตั้งฉากกับทิศทางแรงดึง ก่อนที่ชิ้นงานเกิดการแตกหักจะมีการฟอร์มตัวของรอยแตกตามระนาบแรงเฉือน (Shear plane) ขึ้นที่ขอบของชิ้นงานและเกิดการเชื่อมโยงของรอยแตกทั้งสองเกิดเป็นลักษณะการแตกหักแบบ Cup and cone เมื่อสังเกตพื้นผิวการแตกหักจะเห็นเป็นสี่เหลี่ยมเนื่องจากเป็นพื้นผิวที่ขรุขระ ดังรูปที่ 2.19 การแตกหักแบบ Ductile fracture นี้จะมีการดูดซับพลังงานระหว่างการแตกหักค่อนข้างมาก เพราะระหว่างการแตกหักจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกอย่างเห็นได้ชัด ชิ้นงานจึงมักมีค่า Tensile ductility ที่ค่อนข้างดี



รูปที่ 2.19 ลักษณะการแตกหักแบบถ้วยและกรวย (Cup and cone fracture)



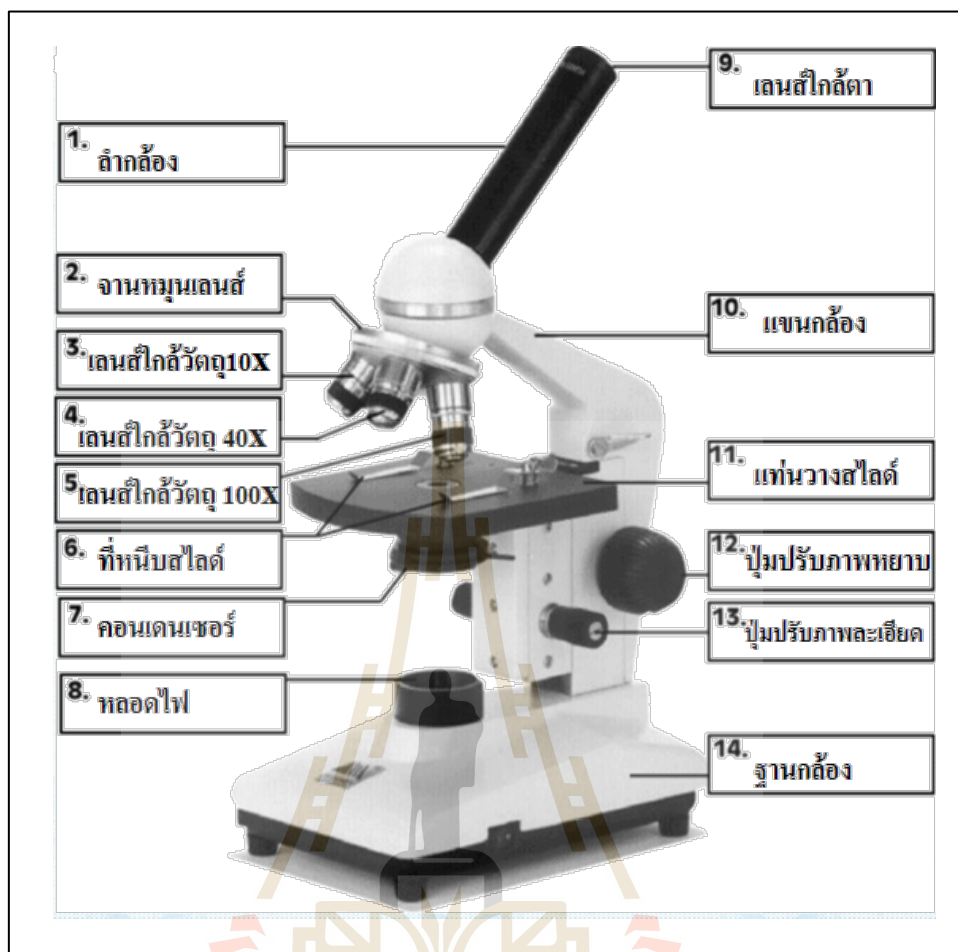
รูปที่ 2.20 Ductile fracture surface (Ductile metals) and Brittle fracture surface (Brittle metals)

สำหรับโลหะที่มีความเปราะ (Brittle metals) จะมีลักษณะพื้นผิวการแตกหักที่เรียบและแวววาว ดังรูปที่ 2.20 ในบางกรณีอาจมองเห็นเป็นกลุ่มของ Brittle facets หากชิ้นงานมีขนาดของเกรน (Grain) ที่หยาบมากหรือหากเกรนของโลหะมีขนาดเล็ก เราสามารถตรวจสอบ Brittle facets ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) การแตกหักแบบ Brittle fracture นี้ จะมีการดูดซับพลังงานระหว่างการแตกหักค่อนข้างน้อย โดยส่วนใหญ่วัสดุชิ้นนั้นจะมีค่า Yield strength ที่ค่อนข้างสูง และมีค่า Tensile ductility ที่ต่ำซึ่งสังเกตได้จากการที่ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกน้อย

2.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopes; OM)

กล้องจุลทรรศน์ชนิดที่พบได้มากที่สุด คือ ชนิดที่ประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรก เรียกว่า กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) เป็นอุปกรณ์ใช้แสงอย่างหนึ่ง มีเลนส์อย่างน้อย 1 ชิ้น เพื่อทำการขยายภาพวัตถุที่วางในระนาบโฟกัสของเลนส์นั้น ๆ ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

1. ฐาน (Base) ทำหน้าที่รับน้ำหนักทั้งหมดของกล้องจุลทรรศน์ มีรูปร่างสี่เหลี่ยมหรือวงกลม ที่ฐานจะมีปุ่มสำหรับปิดเปิดไฟฟ้า
2. จานหมุน (Evolving nosepiece) เป็น ส่วน ของกล้องที่ใช้สำหรับหมุนเพื่อเปลี่ยนกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ
3. เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) 10X จะติดอยู่เป็นชุดกับจานหมุน ซึ่งเป็นส่วน ของกล้องที่ประกอบด้วยเลนส์ ซึ่งรับแสงที่ส่องผ่านมาจากวัตถุที่นำมาศึกษา (Specimen) เมื่อลำแสงผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ เลนส์ใกล้วัตถุจะขยายภาพของวัตถุนั้น ได้ 10 เท่า จากวัตถุจริง และ ทำให้ภาพที่ได้เป็นภาพจริงหัวกลับ
4. เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) 40X จะติดอยู่เป็นชุดกับจานหมุน ซึ่งเป็นส่วน ของกล้องที่ประกอบด้วยเลนส์ ซึ่งรับแสงที่ส่องผ่านมาจากวัตถุที่นำมาศึกษา (Specimen)

เมื่อลำแสงผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ เลนส์ใกล้วัตถุจะขยายภาพของวัตถุนั้น ได้ 40 เท่า จากวัตถุจริง และทำให้ภาพที่ได้เป็นภาพจริงหัวกลับ

5. เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) 100 X จะติดอยู่เป็นชุดกับจานหมุน ซึ่งเป็นส่วนของกล้องที่ประกอบด้วยเลนส์ ซึ่งรับแสงที่ส่องผ่านมาจากวัตถุที่นำมาศึกษา (Specimen) เมื่อลำแสงผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ เลนส์ใกล้วัตถุจะขยายภาพของวัตถุนั้น ได้ 100 เท่า จากวัตถุจริง และทำให้ภาพที่ได้เป็นภาพจริงหัวกลับ

6. ที่หนีบสไลด์ (Stage clip) ใช้หนีบสไลด์ให้ติดอยู่กับแท่นวางวัตถุ ในกล้องรุ่นใหม่จะมี Mechanical stage แทนเพื่อควบคุมการเลื่อนสไลด์ให้สะดวกยิ่งขึ้น

7. คอนเดนเซอร์ (Condenser) จะอยู่ด้านใต้ของแท่นวางวัตถุ เป็นเลนส์รวมแสงเพื่อรวมแสงผ่านไปยังวัตถุที่อยู่บนสไลด์ สามารถเลื่อนขึ้นลงได้โดยมีปุ่มปรับลำกล้อง (Body tube) เป็นส่วนที่อยู่ต่อจากมือจับ

8. หลอดไฟ เป็นแหล่งกำเนิดแสง

9. เลนส์ใกล้ตา (Eyepiece lens หรือ Ocular lens) เลนส์นี้จะสวมอยู่กับลำกล้อง มีตัวเลขแสดงกำลังขยายอยู่ด้านบน เช่น 5X, 10X หรือ 15X เป็นต้น กล้องที่ใช้ในปฏิบัติการจุลชีววิทยาทั่วไปนั้น มีกำลังขยายของเลนส์ตาที่ 10X รุ่นที่มีเลนส์ใกล้ตาเลนส์เดียวเรียก “Monocular Microscope” ชนิดที่มีเลนส์ใกล้ตาสองเลนส์เรียก “Binocular Microscope” แท่นวางวัตถุ (Stage) เป็นแท่นสำหรับวางสไลด์ตัวอย่างที่ต้องการศึกษามีลักษณะเป็นแท่นสี่เหลี่ยมหรือวงกลมตรงกลางมีรูให้แสงจากหลอดไฟส่องผ่านวัตถุแท่นนี้สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ด้านในของแท่นวางวัตถุจะมีครีป สำหรับยึดสไลด์และมีอุปกรณ์ช่วยในการเลื่อนสไลด์ เรียกว่า “Mechanical stage” นอกจากนี้ยังมีสเกลบอกตำแหน่งของสไลด์บนแท่นวางวัตถุ ทำให้สามารถบอกตำแหน่งของภาพบนสไลด์ได้

10. แขนกล้อง (Arm) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ยึดระหว่างลำกล้องและฐานกล้อง เป็นตำแหน่งที่ใช้จับกล้องในขณะที่เคลื่อนย้ายกล้องจุลทรรศน์

11. แท่นวางสไลด์ (Stage) เป็นแท่นที่ใช้วางสไลด์ (Slide) ตัวอย่างที่ต้องการศึกษาที่ตรงกลางแท่นวางสไลด์

12. ปุ่มปรับภาพหยาบ (Coarse adjustment knob) ใช้เลื่อนตำแหน่งของแท่นวางวัตถุขึ้นลง เมื่ออยู่ในระยะโฟกัสก็จะมองเห็นภาพได้ ปุ่มนี้มีขนาดใหญ่จะอยู่ที่ด้านข้างของตัวกล้อง

13. ปุ่มปรับภาพละเอียด (Fine adjustment knob) เป็นปุ่มขนาดเล็กอยู่ถัดจากปุ่มปรับภาพหยาบออกมาทางด้านนอกที่ตำแหน่งเดียวกัน หรือกล้องบางชนิดอาจจะอยู่ใกล้ ๆ กัน

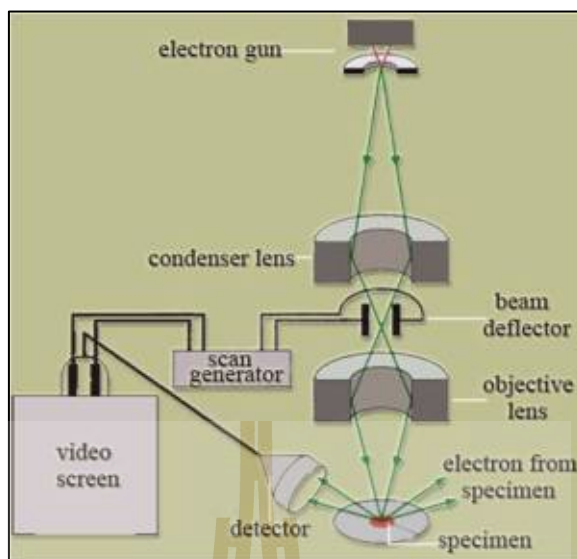
เมื่อปรับด้วยปุ่มปรับภาพหยาดจน มองเห็นภาพแล้วจึงหมุนปุ่มปรับภาพละเอียดจะทำให้ได้ภาพคมชัดยิ่งขึ้น

14. ฐาน (Base) เป็นส่วนล่างสุดของกล้องจุลทรรศน์ ทำหน้าที่รับน้ำหนักตัวกล้องทั้งหมด

2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

การตรวจสอบ โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะต้องมีการเตรียมชิ้นงาน การเตรียมสำหรับชิ้นงานที่ต้องมีการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะต้องมีการเตรียมผิวงาน โดยการขัดให้เรียบ เพื่อให้สัญญาณในการตรวจสอบที่ดี จากนั้นจึงทำการเคลือบชิ้นงานด้วยทองคำหรือคาร์บอน เพื่อช่วยให้เกิดการสะท้อนของอิเล็กตรอนในงานที่ต้องใช้ Backscattered electron detector (BSE) ซึ่งเป็นตัวตรวจจับสัญญาณ Primary electron ที่ชนตัวอย่างแล้วกระเจิงย้อนกลับในทิศทางเดิม ทุกขั้นตอนของการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้นมีความสำคัญต่อคุณภาพของภาพที่จะถูกบันทึกและผลการวิเคราะห์ ดังนั้นขั้นตอนต่าง ๆ เช่น การเตรียมตัวอย่าง การ Fix การ Dehydrate การเก็บรักษาชิ้นงานตัวอย่าง การเคลือบ การตั้งค่าใช้งานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การเลือกจุดบันทึกภาพที่ตอบโจทย์รวมไปถึงรายละเอียดอื่น ๆ ต้องถูกใส่ใจเป็นอย่างยิ่ง

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะ โฟกัส โดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย



รูปที่ 2.22 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่อง SEM

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ D.A.P. Reis และคณะ (2012) ได้ศึกษาผลของการบ่มแข็งเทียมที่มีต่อสมบัติทางกลของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ที่ใช้ในงานอากาศยาน โดยกระบวนการทางความร้อน แบบ T6 ซึ่งทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 495, 505 และ 515 °C ตามด้วยการทำให้เย็นตัวในน้ำและทำการบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ 190 และ 208 °C หลังจากนั้นก็นำไปทดสอบสมบัติด้านความแข็ง และความแข็งแรงดึง ทดสอบการล้า พบว่าชิ้นงานที่ทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 505 °C และบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ 208 °C นาน 2 ชั่วโมง มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และสามารถทนต่อการล้าที่ขนาดแรงกระทำสูงสุดที่ 110.23 MPa ที่จำนวนรอบคือ 7.8×10^6

งานวิจัยของ Y.F. Song และคณะ (2017) ได้ศึกษาการบ่มแข็งสองระยะที่มีผลต่อเสถียรภาพมิติของโลหะผสม Al-Cu-Mg โดยกระบวนการทางความร้อน แบบ T6 ซึ่งทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 505 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการบ่มแข็งครั้งแรกที่ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการบ่มแข็งครั้งที่สอง 190 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางกลด้วยการวัดความแข็ง, ทดสอบแรงดึง และสังเกตลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค พบว่า เวลาที่ 24 ชั่วโมง ค่า Micro-yield strength และค่าความแข็งวิกเกอร์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ ϵ_c ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเพิ่มขึ้นมากกว่า 24 ชั่วโมง พบว่าค่า Micro-yield strength และค่าความแข็งวิกเกอร์ลดลง ในขณะที่ ϵ_c เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการก่อตัวหยาบของเฟส S' กลไกรักษาเสถียรภาพที่หลากหลาย สังเกตได้จาก เช่น การขัดขวาง

การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน, ผลการตกตะกอนของ S' และการจัดพลังงานยึดหยุ่นที่เก็บเอาไว้ในระหว่างการบ่ม

งานวิจัยของ Hülya Kaçar และคณะ (2003) ได้ศึกษา ผลกระทบของสภาวะในการเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนต่อพฤติกรรมการสึกหรอของอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 โดยกระบวนการทางความร้อน แบบ T4 และ T6 ซึ่งทำการอบละลายเดียวกันที่อุณหภูมิ $495 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และชุบเย็นในน้ำอุณหภูมิห้องในส่วนของ T4 ทำการบ่มแข็งธรรมชาติ และ T6 ทำการบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นนำไปวัดค่าความแข็งรีดเคเวล สเตลบี, ทดสอบการสึกหรอ และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่าการบ่มแข็งธรรมชาติที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 สัปดาห์ มีความต้านทานการสึกหรอมากที่สุด การสูญเสียมวลที่เพิ่มขึ้น เมื่อให้เม็ดกรวด, ความเร็ว และน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ความสึกของร่องรอยการสึกหรอนั้นมากหรือน้อย ตัวอย่างที่มีการบ่มแข็งธรรมชาติที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 สัปดาห์มากกว่าตัวอย่างที่มีการบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และจากการตรวจสอบทางโลหะวิทยาของชิ้นงาน เฟสสารประกอบเชิงโลหะ Al_2Cu จะขยายใหญ่ ขึ้นกับอุณหภูมิในการบ่มแข็ง

งานวิจัยของ Nikolaos D. Alexopoulos และคณะ (2017) ได้ศึกษาผลของการบ่มแข็งที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของการตกตะกอน, แรงดึง และพฤติกรรมการเพิ่มความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 โดยใช้อะลูมิเนียมผสมแบบแผ่นที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T3 มีความหนา 3.2 มม. สำหรับการทดสอบแรงดึงทำการบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $190 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $210 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในเวลาที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.5-98 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดสภาวะการบ่มครบทั้ง 3 สภาวะคือ Under aging, Peak aging และ Over aging และทดสอบสมบัติในการเรียงความแข็งแรงดึง ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิในการบ่มแข็งเทียมที่ $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่า Yield stress จะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการบ่มแข็งเทียมเพิ่มขึ้น และสูงสุดที่เวลา 48 ชั่วโมงโดยเมื่อเวลานานขึ้นค่าจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ที่อุณหภูมิ $190 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $210 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ก็เป็นไปในลักษณะเดียวกัน ซึ่งเงื่อนไขในส่วนของคุณสมบัติและเวลาในการบ่มแข็งจะต้องนำมาทดลองและศึกษาต่อไป เพื่อลดเวลาดังกล่าวให้ไวขึ้นและมีประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่าหรือดีขึ้นกว่าเดิมที่เหมาะสมกับอะลูมิเนียม 2024 เพื่อประสิทธิภาพในการใช้งานในด้านต่าง ๆ ต่อไป

งานวิจัยของ T. Ram Prabhu (2016) ได้ศึกษาระยะเวลาในการบ่มแข็งที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลและการนำไฟฟ้าสำหรับโลหะผสมอลูมิเนียมขนาดต่างๆ ของอะลูมิเนียมผสม AA2219 โดยแบ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออกเป็น 4 ขนาด คือ 25, 50, 75 และ 125 โดยทำการอบละลายที่อุณหภูมิ $535 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และไปชุบในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ $60\text{-}71 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3-5 วินาที จากนั้นทำการบ่มแข็ง

ที่อุณหภูมิ 191 ± 5 °C ในเวลาที่แตกต่างกัน 8 อย่าง (20, 22, 23, 25, 26, 27, และ 29 ชั่วโมง) และเย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้องพบว่า เวลา Peak ageing ของขนาด 25-75 อยู่ที่ 23 ชั่วโมง และขนาด 120 อยู่ที่ 25 ชั่วโมง และค่าจุดคราก และค่าความแข็งแรงดึง อยู่ระหว่าง 288-304 MPa และ 410-428 MPa ส่วนค่าความแข็งแรงและการนำความร้อนอยู่ที่ 121-128 BHN และ 30-30.96% IACS ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคการตกตะกอนหายากเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็ง ไม่พบการแยกตัวของตะกอนในโครงสร้างจุลภาคสำหรับกรณีใด ๆ ของเส้นผ่านศูนย์กลางรอบบาร และเวลาในการบ่มแข็งความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ใกล้กันระหว่างความแข็งแรง/ความแข็ง และค่าการนำไฟฟ้าในอัลลอยด์ AA2219 คือ ใช้ได้กับพารามิเตอร์การอบชุบความร้อนที่เลือกอุณหภูมิที่ 535 °C บ่มแข็งที่อุณหภูมิที่ 191 °C และเวลาในการบ่มแข็งที่ 23 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามความชันของแนวโน้มนั้นแตกต่างกันไป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบารรอบที่แตกต่างกัน

งานวิจัยของ Xiao Yan Liu และคณะ (2010) ได้ศึกษาการอบละลายที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของโลหะผสม Al-Cu-Mg-Ag โดยทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 510, 515, 520 และ 525 เป็นเวลา 1, 1.5, 2 และ 2.5 ชั่วโมง และชุบเย็นด้วยน้ำ และทำการบ่มแข็งเทียมทันทีที่อุณหภูมิ 185 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าคุณสมบัติทางกลเพิ่มขึ้นแล้วก็ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบละลาย และเฟสเหลือจะถูกละลายในเมทริกซ์ที่ละลาย ส่วนของการตกตะกอนและขนาดของกรนที่ตกผลึกเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของเวลาในการอบละลายจะมีผลเล็กน้อยต่อโครงสร้างทางจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของ Al- Cu-Mg-Ag อัลลอยด์ อุณหภูมิที่สูงของโลหะผสม Al-Cu-Mg-Ag คือ 525 °C ความแข็งแรง ณ จุดครากและค่าการยึดตัวจะดีที่สุดเมื่อโลหะผสมอบละลายที่อุณหภูมิที่ 515 °C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง คือ 504 MPa และ 12.2% ตามลำดับ กลไกการแตกหักของตัวอย่างคือ การแตกหักแบบเหนียว

งานวิจัยของ B. Tyouke และคณะ (2017) ได้ศึกษา โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสม Al-Cd ดำเนินการตรวจสอบโดยใช้ การวัดค่าความแข็งรีอเวล (HRF), โครงสร้างโลหะวิทยา, XRD, SEM และ EDS พบว่าวิวัฒนาการของค่าความแข็งนั้นยืนยันว่าโลหะผสมที่ศึกษาเป็นโลหะผสมชุบแข็งโลหะผสม Al-2%Cd มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น (ความแข็ง 48.75 HRF) เมื่อเทียบกับโลหะผสมอื่นๆ ผลของ XRD และกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) เผยว่า เฟสหลักเป็น α -Al ทั้งหมด ของโครงสร้างผลึก CFC และไม่มีเฟสใหม่เกิดขึ้น

งานวิจัยของ S. Menargues และคณะ (2014) ได้ศึกษากระบวนการความร้อน T6 แบบสั้นใหม่สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิกอนที่ขึ้นรูปโดยกึ่งของแข็ง โดยใช้เป็น A356 และ A357 แบบหล่อ โดยทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 520 °C, 530 °C และ 540 °C เป็นเวลาดั้งแต่ 5 นาที ถึง 5 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวโดยการชุบน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C และทำการบ่มแข็งเทียม

ที่อุณหภูมิ 160 °C, 170 °C และ 180 °C และเย็นตัวในอากาศ เวลาในการบ่มแข็งอยู่ระหว่าง 1 ถึง 5 ชั่วโมง การพัฒนากระบวนการความร้อนด้วย T6 ใหม่ โดยใช้เวลาน้อยกว่า 30 นาที ในการรักษาให้ความร้อนระยะสั้นใหม่นี้ โลหะผสมมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับโลหะผสมที่ผ่านกระบวนการความร้อนในสภาวะมาตรฐาน (เวลาในการอบละลายระหว่าง 6 ชั่วโมง ถึง 8 ชั่วโมง) การให้ความร้อนใหม่นี้ ดำเนินการอบละลายที่อุณหภูมิที่ 540 °C ทำให้แมกนีเซียมละลายได้อย่างสมบูรณ์ ขณะเดียวกันก็ลดการเติบโตของเกรน α -phase และซิลิคอนยูเทคติก แม้ว่าการทดลองนี้ทำการทดลองกับอะลูมิเนียมผสม A356 และ A357 ซึ่งสอดคล้องกับ Sub-Liquidus-Casting กระบวนการ (SLC) ผลอาจนำไปใช้กับส่วนประกอบที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีของแข็งอื่น ๆ หรือโลหะผสมอื่น ๆ Al-Si โลหะผสมที่ชุบแข็งซึ่งก่อให้เกิดการตกตะกอนของแมกนีเซียมเป็นสารประกอบเชิงโลหะ

งานวิจัยของ L. O. R. Lima และคณะ (2013) ได้ศึกษาอิทธิพลของการบ่มแข็งสองระยะ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม AA7050 โดยกระบวนการทางความร้อนแบบ T7451, T6 และ T614-65 โดยทำการอบละลายที่อุณหภูมิเดียวกันคือ 485 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แบบ T7451 บ่มแข็งครั้งแรกที่ 110 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และบ่มแข็งครั้งที่สองที่ 175 °C แบบ T6 บ่มแข็งครั้งแรกที่ 130 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และบ่มแข็งครั้งที่สองที่ 175 °C เป็นเวลา 30 นาที และบ่มแข็งครั้งที่สองที่ 65 °C การบ่มแข็งสองครั้งสนับสนุนการตกตะกอนของเฟส η' สภาวะที่เลือกคือ T614-65 เพราะอุณหภูมิในสภาวะนี้สนับสนุนการเกิด GP โซนระหว่างขั้นตอนแรกและจาก GP โซนไปเป็นอนุภาค η' ที่ขั้นตอนที่สอง แสดงให้เห็นว่าการบ่มแข็งนานที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้สมบัติทางกลดีขึ้น

งานวิจัยของ N. Mahathaninwong และคณะ (2011) ได้ศึกษา กระบวนการให้ความร้อน T6 ของอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ขึ้นรูปกึ่งของแข็ง โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลายอยู่ที่ 450 °C และ 480 °C ที่เวลา 1, 4, 8 และ 12 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นตัวที่อุณหภูมิ 25 °C และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120 °C, 145 °C, 165 °C และ 185 °C ในเวลาที่ต่างกัน พบว่าช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมอยู่ที่ 450 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สภาวะที่สูงที่สุดในการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงดึงที่สูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มแข็งขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงลดลง ในขณะที่ขนาดการตกตะกอนเพิ่มขึ้นด้วยอุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ขนาดความหนาแน่นของการตกตะกอนลดลง เนื่องจากแรงผลักดันในการเกิดผลึกต่ำลงเมื่ออุณหภูมิในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเวลาที่เหมาะสมในการเพิ่มความแข็งแรงมีระยะที่สั้น เนื่องจากอัตราการแพร่ที่สูงขึ้น ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น เฟส η' เป็นตัวตอบสนองหลักในการเพิ่มความแข็งแรง ในขณะที่นิวเคลียสเริ่มต้นของเฟส η ในชิ้นงานที่ให้อุณหภูมิในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้น พบว่าความแข็งแรง

ลดลง พลังงานกระตุ้นสำหรับกระบวนการชุบแข็งตกตะกอนของโลหะผสมที่ได้จากการวิจัยนี้คือ 95,827 J/mol

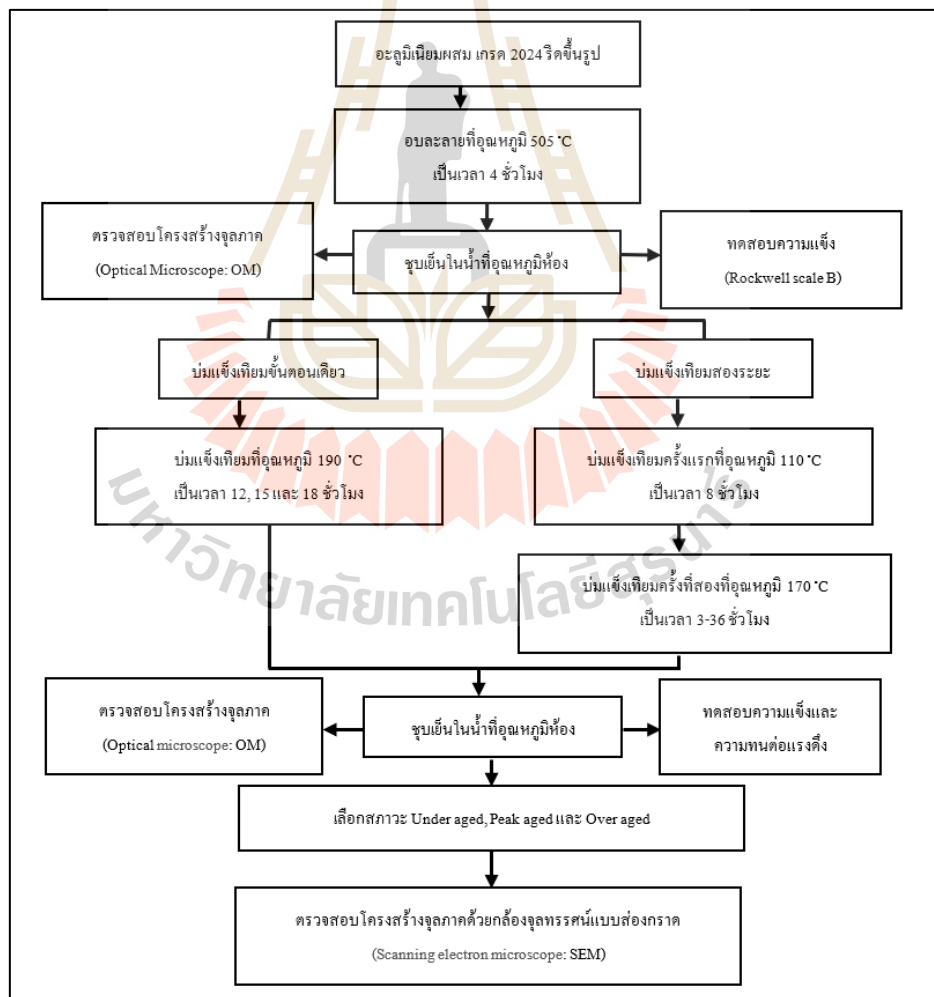
จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นและจากการสืบค้นของผู้วิจัยพบว่า ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคของกระบวนการความร้อนต่าง ๆ เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเกรด 2024 มีหลากหลายรูปแบบและที่สำคัญกระบวนการทางความร้อน T6 เป็นที่น่าสนใจถึงแนวโน้มในการพัฒนาสมบัติทางกลที่ดีขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงผลของตัวแปรคืออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน T6 ที่เหมาะสม เพื่อให้สมบัติทางกลที่ดี โดยศึกษาจากงานวิจัยที่มีมาก่อน



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 แบบบริดจ์ขึ้นรูปทางกล ได้แก่ สมบัติด้านความแข็งและความทนต่อแรงดึง ส่วนกระบวนการทางความร้อนที่ใช้คือ กระบวนการทางความร้อนแบบ T6 โดยที่ในกระบวนการนั้นมีการดำเนินการในการบ่มแข็งเทียมสองลักษณะด้วยกัน คือ การบ่มแข็งเทียมขึ้นตอนเดียว และการบ่มแข็งเทียมสองระยะ โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแผนลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้อะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 แบบรีดขึ้นรูป เป็นวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง ซึ่งมีส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1 จากตารางพบว่า มีทองแดง (Cu) เป็นธาตุผสมหลัก และแมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุผสมรองลงมา ธาตุเหล่านี้จะช่วยให้อะลูมิเนียมเกรดดังกล่าว มีความแข็งแรงสูง (High strength) อะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ที่ใช้ในการทดลองผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีดขึ้นรูป ดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของโลหะผสมอะลูมิเนียม เกรด 2024 (wt%)

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Al
4.56	1.57	0.65	0.50	0.50	0.04	Bal.



รูปที่ 3.2 อะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีดขึ้นรูป

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ มีดังนี้

3.2.1 เตาเผาอุณหภูมิต่ำสำหรับอบละลาย (Solution treatment)

เตาเผาอุณหภูมิต่ำที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.3 สามารถตั้งอุณหภูมิในการเผาได้ตั้งแต่ 25 °C ถึง 1,500 °C



รูปที่ 3.3 เตาเผาอุณหภูมิต่ำ

3.2.2 เตาอบอุณหภูมิต่ำสำหรับการบ่มแข็งเทียม (Aging)

เตาอบอุณหภูมิต่ำสำหรับการบ่มแข็งเทียมแสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งในงานวิจัยใช้
อุณหภูมิในการบ่มแข็งเทียม 2 ครั้ง



รูปที่ 3.4 เตาบ่มแข็งเทียม

3.2.3 เลื่อยสายพานแนวนอน

เลื่อยสายพานแนวนอนใช้ในการตัดแบ่งชิ้นงานวิจัย เพื่อให้มีขนาดเหมาะสมกับการทดสอบ ก่อนผ่านกระบวนการทางความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เลื่อยสายพานแนวนอน

3.2.4 เครื่องกัดแนวตั้ง

เครื่องกัดแนวตั้งจะใช้ในการปาดหน้าให้มีผิวเรียบแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องกัดแนวตั้ง

3.2.5 เครื่องขัดกระดาษทรายและขัดสักหลาด

เครื่องขัดกระดาษทรายและขัดสักหลาด ใช้ในการเตรียมผิวหน้าชิ้นงานก่อนนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องขัดกระดาษทรายและสักหลาด

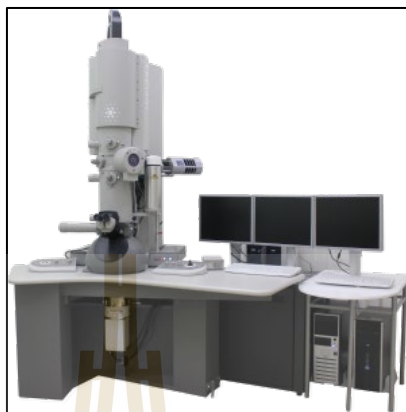
3.2.6 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope: OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่ใช้ในงานวิจัยมีกำลังขยายตั้งแต่ 50, 100, 200 และ 500 เท่าตามลำดับ ซึ่งใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.2.8 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell hardness test)

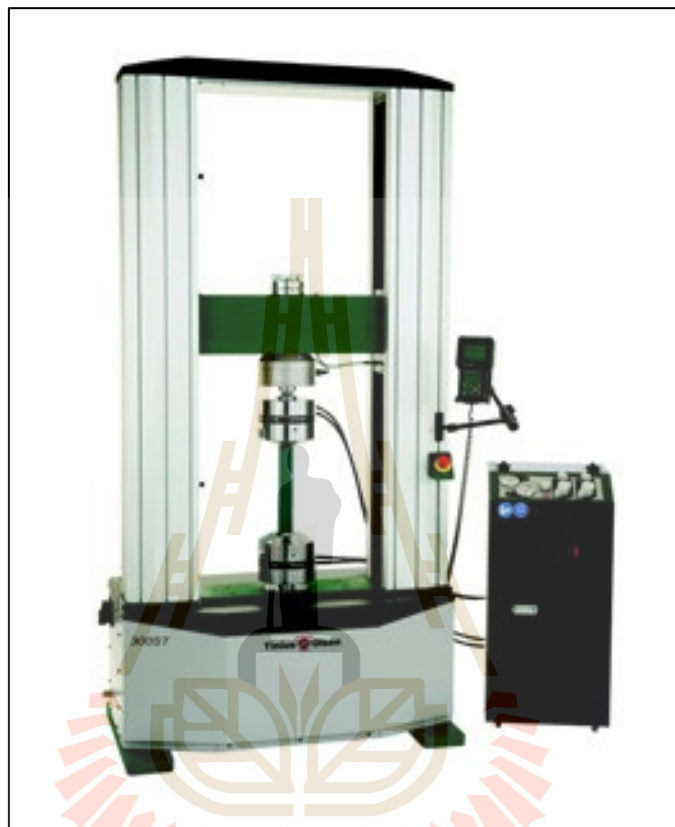
เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ แสดงดังรูปที่ 3.9 หน่วยที่ใช้ในการทดสอบความแข็งคือ HRB ใช้แรงกระทำ (Load force) 100 กิโลกรัม หัวกดที่ใช้เป็นลูกบอลเหล็ก ซึ่งอ่านค่าความแข็งได้จากหน้าจอบนตัวเครื่องโดยตรง โดยชิ้นงานที่ทดสอบจะต้องมีพื้นผิวที่เรียบไม่ขรุขระ



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์

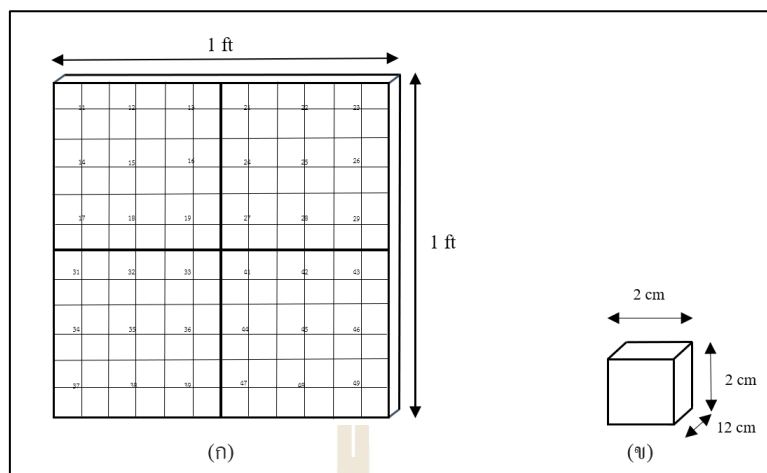
3.2.9 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

เครื่องทดสอบแรงดึง ดังรูปที่ 3.11 ใช้ทดสอบ เพื่อตรวจสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานในสถานะต่าง ๆ ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.3 การเตรียมชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการรีดขึ้นรูป อะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยการรีดขึ้นรูปนั้น มีขนาด 1 ft × 1 ft ดังรูปที่ 3.12 (ก) จะมีลักษณะเป็นแผ่นขนาดใหญ่ ซึ่งจะต้องตัดชิ้นงานด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแบ่งออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยทำการแบ่งเป็นส่วน ๆ หลัก 4 ส่วนด้วยกัน และนำไปกัดผิวให้เรียบโดยเครื่องกัด ดังรูปที่ 3.12 (ข) ชิ้นงานสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 3.12 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบ

(ก) การตัดแบ่งชิ้นงานเป็นส่วน ๆ

(ข) ชิ้นงานสำหรับการทำการทดสอบ

3.4 ขั้นตอนการทดลองด้วยกระบวนการทางความร้อน

ในการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนมีปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลคือ อุณหภูมิ (Temperature) และเวลา (Time) ซึ่งจากการงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องของการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนนั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ที่ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ การอบละลาย (Solution heat treatment) การชุบเย็น (Quenching) และการบ่มแข็ง (Aging) โดยมีขั้นตอนและวิธีการทดลองดังนี้

- 1) ตัดชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 2024 ให้มีขนาดที่ต้องการอบละลายในเตาเผาอุณหภูมิต่ำ
- 2) ภายหลังจากการอบละลาย นำชิ้นงานออกจากเตาเผาเพื่อทำการชุบเย็นในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ชิ้นงานอยู่ในสถานะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solid solution)
- 3) นำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายและชุบเย็นในน้ำที่อุณหภูมิห้อง ไปทำการบ่มแข็งเทียม โดยในการบ่มแข็งเทียมครั้งแรก และชุบเย็นในน้ำที่อุณหภูมิห้องอีกครั้ง เพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ภายหลังจากการเย็นตัวของชิ้นงานพักชิ้นงานไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนทำการบ่มแข็งเทียมครั้งที่สองเพื่อให้เกิดการนิวคลิเอชันในระหว่างการรอคอยการบ่มแข็งในครั้งที่สอง

- 4) นำชิ้นงานภายหลังจากบ่มแข็งเทียมในครั้งแรกมาทำการบ่มแข็งเทียมครั้งที่สองด้วย และชุบเย็นในน้ำที่อุณหภูมิห้องอีกครั้ง เพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยขั้นตอนนี้จะเกิดการตกตะกอนของสารละลายของแข็ง (Precipitate) ตามลำดับการเปลี่ยนแปลง

นอกจากนี้แล้วหลังจากกระบวนการการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนเสร็จสิ้นในทุกๆเงื่อนไขการทดลองแล้ว จะต้องนำชิ้นงานไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 1-5 °C เพื่อรักษาสมบัติของโครงสร้างให้คงสภาพเดิม ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำลงจะส่งผลให้ด้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของเฟสหรือการเคลื่อนที่ของอะตอมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

- 5) เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการอบละลายและบ่มแข็งเทียมแล้ว นำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทราย เพื่อปรับผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบก่อนนำไปวัดค่าความแข็งด้วยการวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกลบี

3.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบความแข็ง

ในการทดสอบความแข็ง จะใช้การทดสอบแบบร็อคเวลล์ สเกลบี โดยมีขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานดังนี้

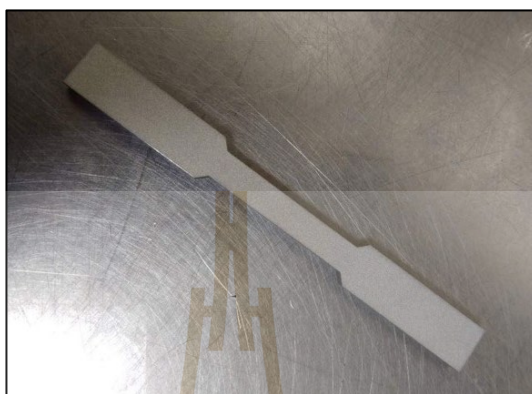
- 1) นำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายและการบ่มแข็งเทียมครบทุก ๆ สภาพการทดลอง นำมาขัดด้วยกระดาษทราย เพื่อปรับผิวหน้าชิ้นงานให้มีความสม่ำเสมอ
- 2) ทำการตั้งค่าเครื่องวัดความแข็ง โดยให้ขนาดของแรงกด 100 kgf โดยในการวัดความแข็งของชิ้นงานจะวัดความแข็งโดยกำหนดจุดวัดความแข็งตามความเหมาะสม เพื่อหาค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานแต่ละชิ้น

3.6 การเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์

- 1) นำชิ้นงานภายหลังจากวัดความแข็ง มาทำการหล่อเย็น (Cold mount) ด้วยเรซินและตัวเร่งปฏิกิริยา (Hardener) ด้วยอัตราส่วนผสม 5:1 นำชิ้นงานวางในท่อพีวีซีแล้วเทเรซินลงในท่อพีวีซี ทิ้งไว้จนแข็ง แล้วจึงนำชิ้นงานออกจากท่อพีวีซี ซึ่งการนำชิ้นงานมาหล่อเรซินนี้จะช่วยให้การจับชิ้นงานเพื่อขัดกระดาษทรายนั้น สะดวกและง่ายขึ้น อีกทั้งยังทำให้ชิ้นงานไม่เอียง มีผิวเรียบระนาบ
- 2) ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่างๆตามลำดับจากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอะลูมินา ขนาด 5 μm และ 1 μm ตามลำดับ
- 3) นำชิ้นงานที่ผ่านการขัด มาถ่ายภาพ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.7 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึง

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง มีลักษณะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E8 ดังรูปที่ 3.13 เพื่อศึกษาความสามารถในการทนต่อแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงลักษณะแบน

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 รีดขึ้นรูป นำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 และศึกษาถึงความสัมพันธ์ของสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาค โดยการนำเสนอผลการทดลองและการอภิปรายผล ตามหัวข้อต่อไปนี้

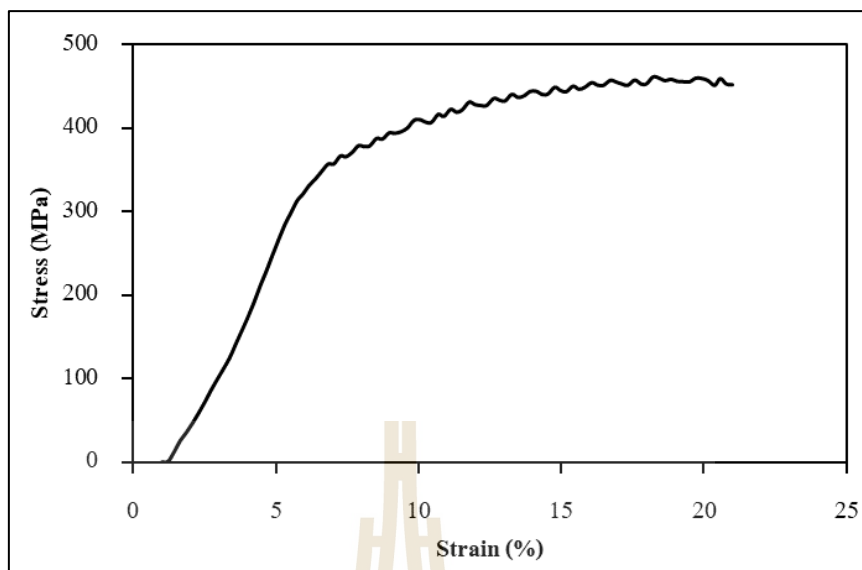
4.1 ชิ้นงานวัตถุดิบ (As received)

4.1.1 สมบัติทางกล (ค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงดึง)

จากการทดสอบวัดค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 ชิ้นงานวัตถุดิบ จากตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงานในแต่ละบริเวณใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงตารางที่ 4.1 โดยค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 75.68 HRB ในขณะที่ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) อยู่ที่ 461.74 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) มีค่าเป็น 21.02 % ดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็ง โดยเฉลี่ยของชิ้นงานวัตถุดิบอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งโดยเฉลี่ย หน่วย (HRB)
	As received
1	75.85
2	75.98
3	75.20
เฉลี่ย	75.68



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของชิ้นงาน
วัสดุคิบอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป

4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุคิบ

ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง จะเห็นได้ว่า
ชิ้นงานวัสดุคิบอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป จะมีลักษณะเกรนยืดแบนเป็นแนวยาว
ตามแนวรีดขึ้นรูป และมีจุดสีดำเล็กน้อยกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุคิบอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป

4.2 ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย

4.2.1 สมบัติทางกล (ค่าความแข็ง)

จากการทดสอบวัดค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 รีดขึ้นรูป ในสภาวะที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 505 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำไปชุบเย็นในน้ำที่อุณหภูมิห้อง จากการทดสอบในตำแหน่งต่างๆของชิ้นงานในบริเวณใกล้เคียงกัน มีค่าความแข็งที่แตกต่างกันเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.2 โดยค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 65.56 HRB

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูปที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 505 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งโดยเฉลี่ย หน่วย (HRB)
	ST 505-4
1	63.48
2	68.25
3	64.95
เฉลี่ย	65.56

4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในสภาวะที่ผ่านการอบละลาย



รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูปที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 505 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะเห็นได้ว่า ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูปในสภาวะที่ผ่านการอบละลายจะมีลักษณะเกรน เป็นแนวยาวตามแนวการรีดขึ้นรูป และมีจุดดำที่เพิ่มมากขึ้นกระจายตัวอยู่ ซึ่งลักษณะโครงสร้าง จุลภาคนี้อสอดคล้องกับงานวิจัยของ D.A.P Reis และคณะ (2012) ดังรูปที่ 4.3

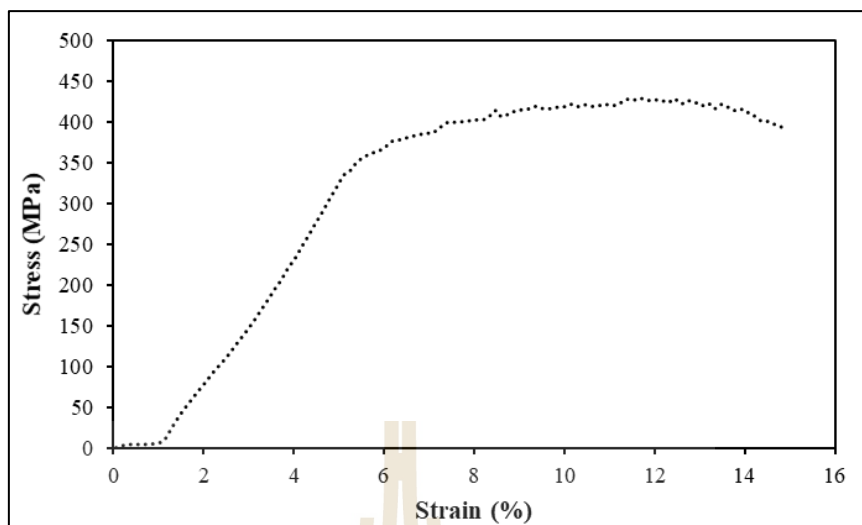
4.3 ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมขั้นตอนเดียว

4.3.1 สมบัติทางกล (ค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงดึงในสภาวะที่ดีที่สุด)

จากการทดสอบวัดค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูปที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 505 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการ ชุบเย็นในน้ำที่อุณหภูมิห้อง และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 12, 15 และ 18 ชั่วโมง พบว่า ค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่ 15 ชั่วโมง โดยค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 80.60 HRB ดังตารางที่ 4.3 ในขณะที่ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) อยู่ที่ 429.20 MPa และเปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (%Elongation) มีค่าเป็น 14.85 % ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งสภาวะการบ่มแข็งเทียมเพื่อให้ได้ ค่าความแข็งสูงสุดใกล้เคียงกับงานวิจัยของ D.A.P. Reis และคณะ (2012) ที่ศึกษาอะลูมิเนียม 2024-T6 พบว่า ค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่การบ่มแข็งเทียม 208 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แต่เปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (%Elongation) ให้ค่าน้อยกว่างานวิจัยนี้ ซึ่งสังเกตได้ว่าเมื่อเวลาในการบ่มแข็งเทียม เพิ่มขึ้นค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น และค่าความแข็งลดลงเมื่อเวลาเวลาในการบ่มนานขึ้น ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูปที่ผ่านการบ่ม แข็งเทียมขั้นตอนเดียว ที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 12, 15 และ 18 ชั่วโมง

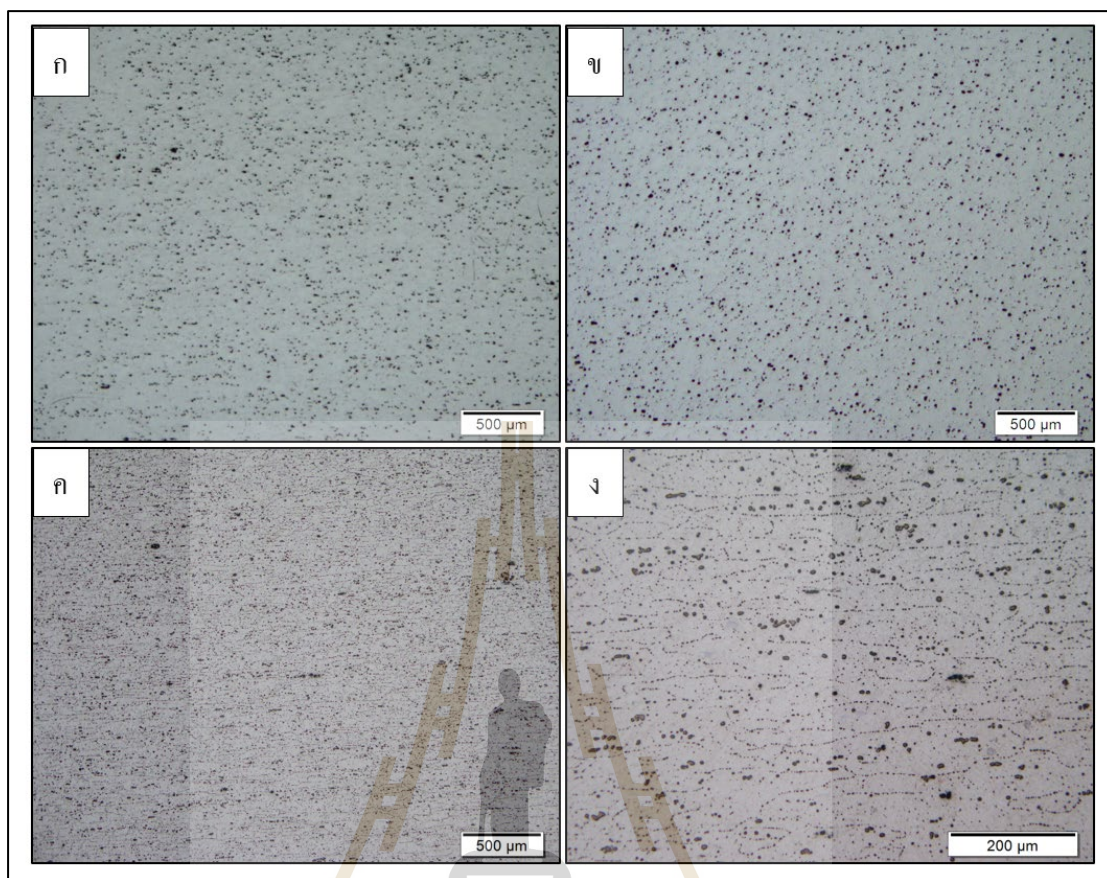
ค่าความแข็งโดยเฉลี่ย หน่วย (HRB)			
ชิ้นงาน	12 ชั่วโมง	15 ชั่วโมง	18 ชั่วโมง
1	80.00	80.63	68.32
2	76.90	81.35	65.90
3	71.12	79.67	72.12
เฉลี่ย	76.00	80.55	68.78



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ริดขึ้นรูป ในสถานะที่ตีที่สุดที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมขึ้นตอนเดียว เป็นเวลา 15 ชั่วโมง

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของทุกสถานะในการบ่มแข็งเทียมขึ้นตอนเดียว

ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะเห็นได้ว่า ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 ริดขึ้นรูป ในทุกสถานะที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมจะมีโครงสร้างจุลภาคในลักษณะที่แตกต่างกัน แต่ยังคงมีลักษณะเป็นแนวยาวตามแนวการริดขึ้นรูป จะมีลักษณะเกรนเป็นแนวยาวตามแนวริดขึ้นรูป และมีจุดดำที่เพิ่มมากขึ้นกระจายตัวอยู่ ซึ่งการบ่มแข็งเทียมที่ 12 ชั่วโมง จุดสีดำจะเกิดขึ้นทั่วบริเวณชิ้นงาน แต่ขนาดและการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เมื่อบ่มแข็งเทียมที่ 15 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นว่าจุดสีดำมีขนาดที่สม่ำเสมอทั่วบริเวณชิ้นงาน ซึ่งเป็นสถานะที่ทำให้ค่าความแข็งสูงสุด (Peak aging) และเมื่อบ่มแข็งเทียมนานขึ้นจนถึงเวลาที่ 18 ชั่วโมง จุดสีดำจะมีขนาดใหญ่ขึ้น หนาแน่นมากขึ้น และเกาะกลุ่มกันบริเวณเกรนและรอบ ๆ ขอบเกรน ซึ่งเป็นสถานะที่ทำให้ค่าความแข็งลดลง (Over aging) ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งเทียมขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา (ก) 12 ชั่วโมง, (ข) 15 ชั่วโมง, (ค) 18 ชั่วโมง (กำลังขยาย 5X) และ (ง) 18 ชั่วโมง (กำลังขยาย 20X)

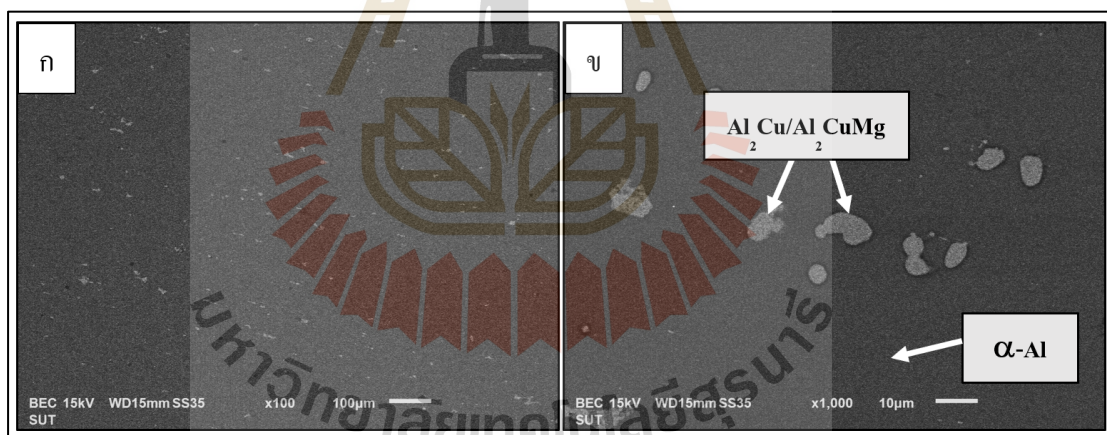
ทั้งนี้ลักษณะโครงสร้างจุลภาคในส่วนของพื้นสีขาวที่แสดงโดยกล้อง OM คือ พื้นสีดำที่แสดงโดยกล้อง SEM และลักษณะจุดสีดำที่แสดงโดยกล้อง OM คือ จุดสีขาวที่แสดงโดยกล้อง SEM ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นจะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 4.3.3 ต่อไป

4.3.3 โครงสร้างจุลภาคของสถานะ Under aging, Peak aging และ Over aging

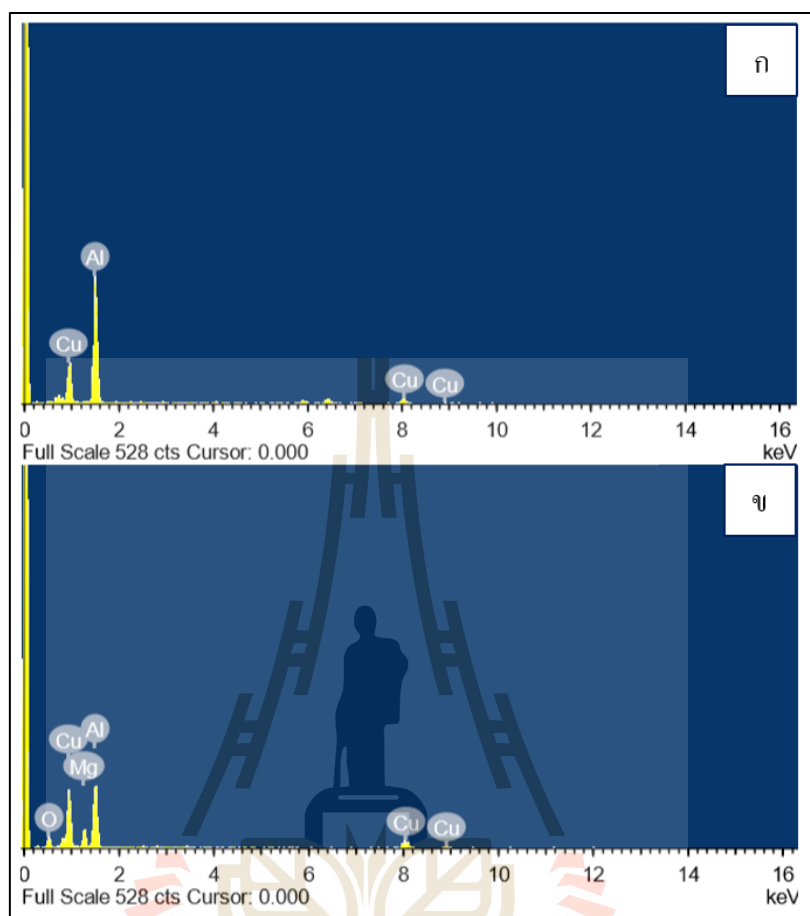
การบ่มแข็งเทียมขั้นตอนเดียวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากภาพถ่าย SEM ที่สภาวะการบ่มแข็งเทียมเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ดังรูป (ก) และ (ข) พบว่า มีจุดสีขาวเกิดขึ้นบริเวณชิ้นงาน แต่ไม่หนาแน่นและมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ เมื่อทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ดังรูปที่ 4.7 พบว่า จุดสีขาวที่เกิดขึ้นรูป (ก)

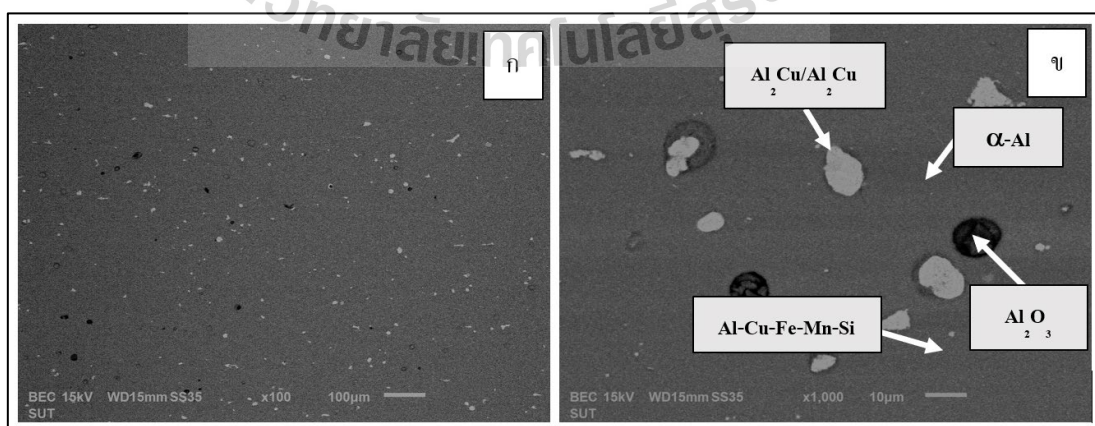
และ (ข) คือเฟส $\text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}_2\text{CuMg}$ ส่วนพื้นซึ่งงานก็คือ เฟส $\alpha\text{-Al}$ และที่สภาวะการบ่มแข็งเทียมเป็นเวลา 15 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.8 (ก) และ (ข) พบว่าจุดสีขาว กระจายอยู่ทั่วบริเวณซึ่งงานอย่างหนาแน่น และมีจุดสีดำอยู่เล็กน้อย อีกทั้งผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ดังรูปที่ 4.9 พบว่า จุดสีขาวที่กระจายตัวต่อเนื่องทั่วบริเวณซึ่งงาน คือ พบว่าเฟสรูป (ก) $\text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}_2\text{CuMg}$ จุดสีดำคือ (ข) อะลูมินา (Al_2O_3) ที่ตกค้างติดซึ่งงานระหว่างทำการขัด นอกจากนี้ยังมีเฟสอื่น ๆ (ค) Al-Cu-Fe-Mn-Si กระจายตัวอย่างเบาบางเป็นจุดเล็ก ๆ ละเอียดสีขาวบริเวณขอบเกรน และเมื่อทำการบ่มแข็งที่เวลา 18 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.10 พบว่า จุดสีขาวมีความหนาแน่นมากขึ้น และขนาดใหญ่ขึ้น มีการเกาะกลุ่มกันตามบริเวณขอบเกรน ซึ่งผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ดังรูปที่ 4.11 จุดขาว ๆ ที่ก่อตัวหนาแน่นและขยายขึ้น เกาะกลุ่มกันบริเวณขอบเกรน คือ เฟส $\text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}_2\text{CuMg}$ ซึ่งเกิดจากสภาวะบ่มแข็งนานเกินไป (Over aging) เป็นผลทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง เนื่องจากเป็นผลของปริมาณการแพร่ของเฟส $\text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}_2\text{CuMg}$ เข้าสู่เฟส $\alpha\text{-Al}$ ซึ่งผลในลักษณะเดียวกันนี้ได้พบในงานวิจัยของ ศิริวรรณ พรรณราย และคณะ (2011) ซึ่งสิ่งที่ตกตะกอนออกมามีลักษณะเหมือนกันกับงานวิจัยนี้



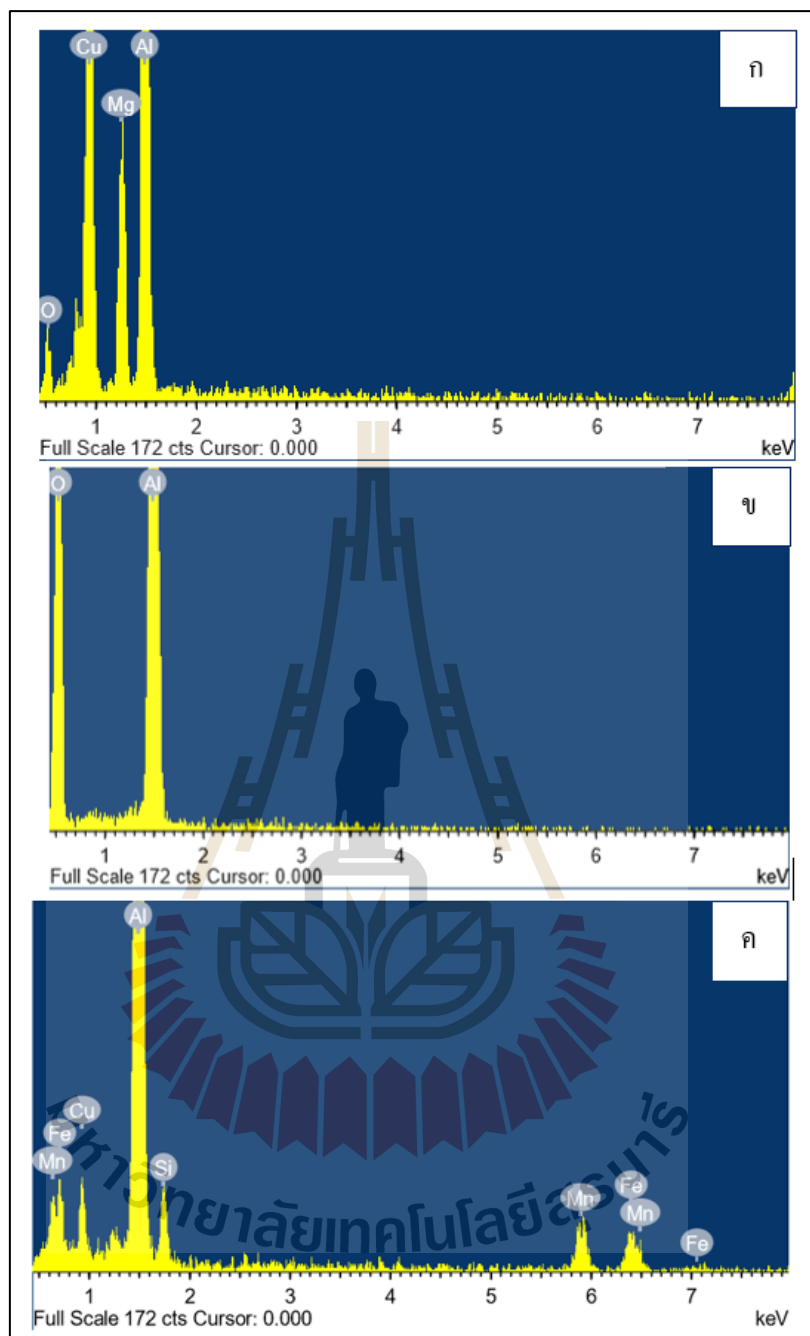
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของซึ่งงานที่บ่มแข็งเทียมขึ้นตอนเดียวที่ 12 ชั่วโมง



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) และ (ข) $\text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}_2\text{CuMg}$



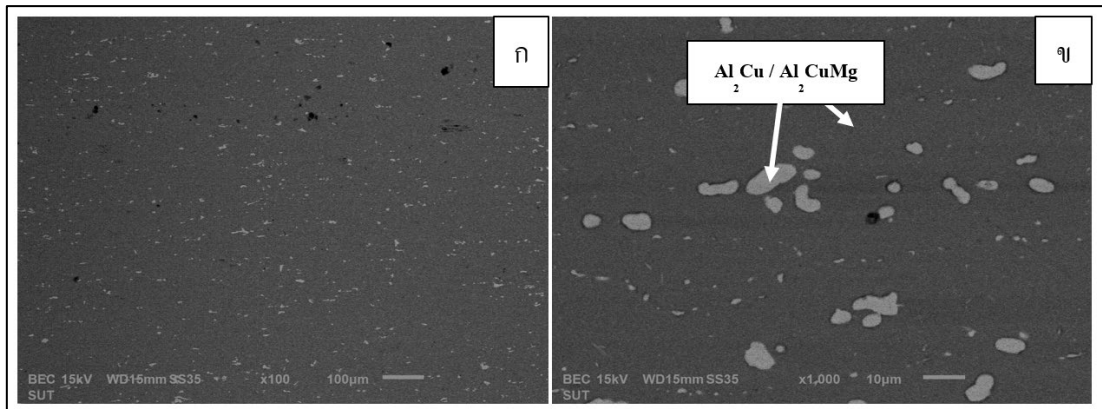
รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมขั้นตอนเดียวที่ 15 ชั่วโมง



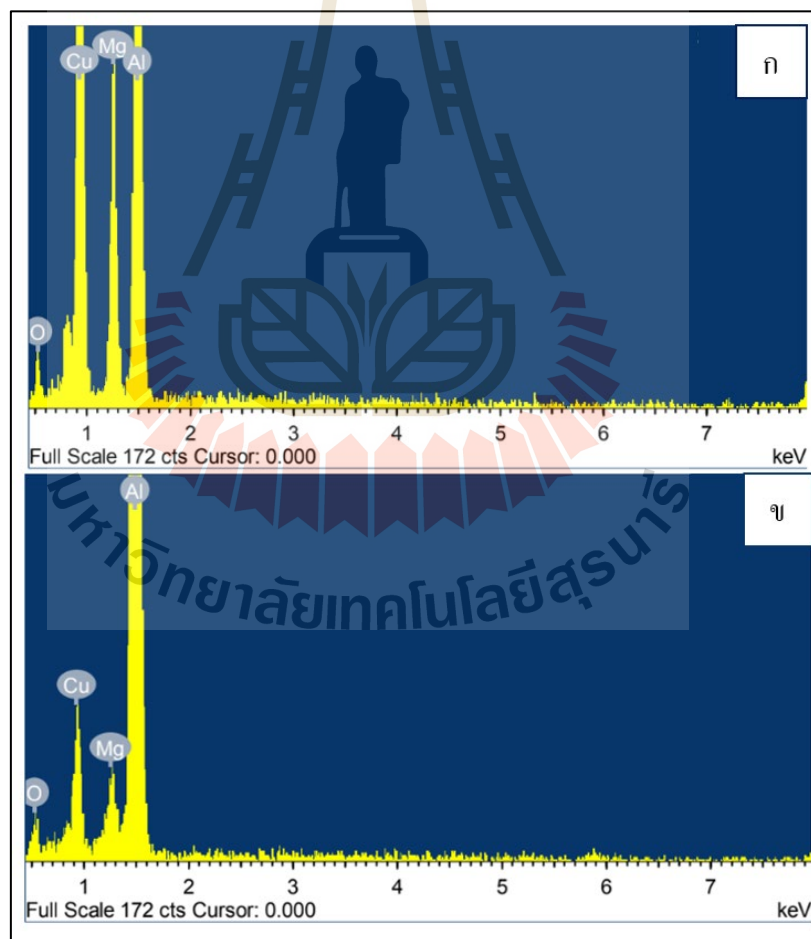
รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส

(ก) Al₂Cu/Al₂CuMg

(ข) Al-Cu-Fe-Mn-Si (ค) Al₂O₃



รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาพโดย SEM ของชิ้นงานที่ป่นแข็งเทียมขึ้นตอนเดียวที่ 18 ชั่วโมง



รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) และ (ข) Al_2Cu/Al_2CuMg

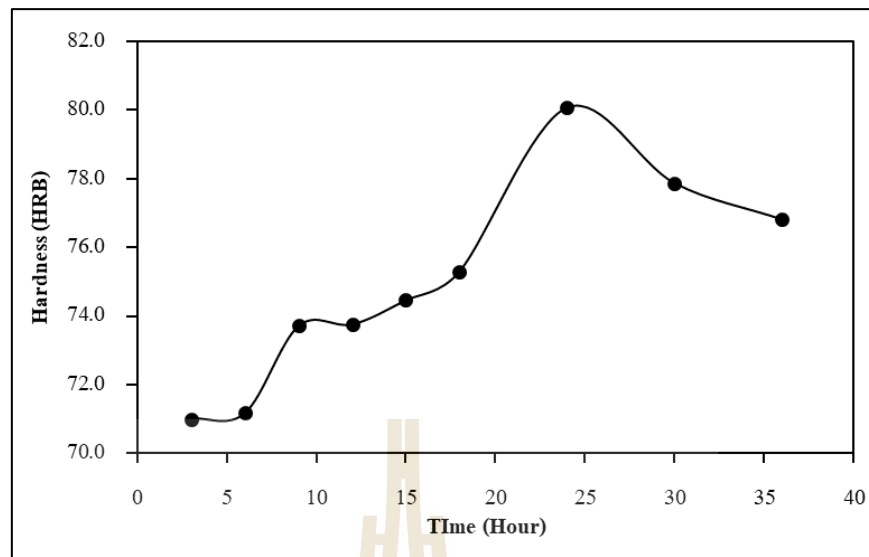
4.4 ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมสองระยะ

4.4.1 สมบัติทางกล (ค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงดึงในสถานะที่ดีที่สุด)

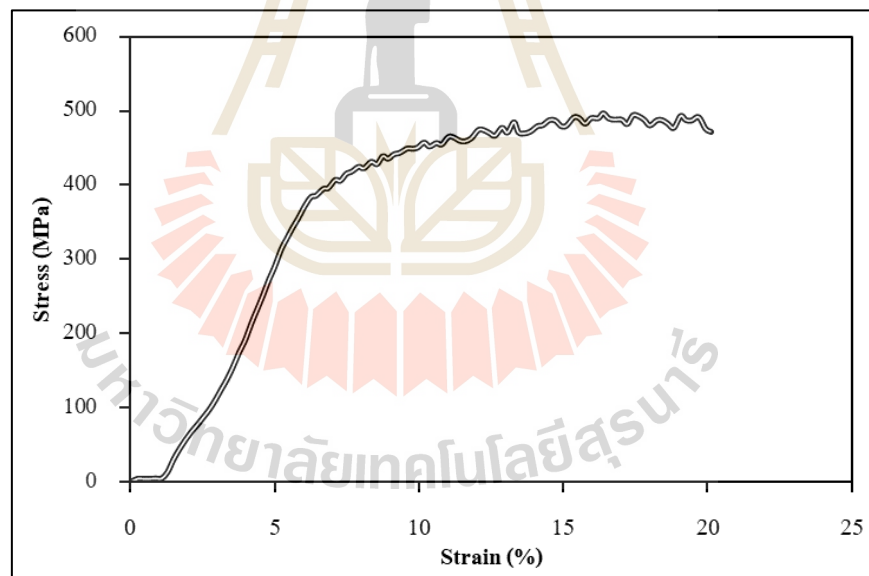
จากการทดสอบวัดค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 รีดขึ้นรูปที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 505 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการชุบเย็นในน้ำที่อุณหภูมิห้อง และทำการบ่มแข็งเทียมครั้งแรกที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นทำการบ่มแข็งเทียมครั้งที่สอง ที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 30 และ 36 ชั่วโมง พบว่า ค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่ 24 ชั่วโมง โดยค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 80.10 HRB ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่า ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อให้เวลาในการบ่มแข็งนานขึ้น และเมื่อถึงจุดที่ค่าความแข็งสูงสุดแล้ว และเมื่อให้เวลาในการบ่มแข็งนานเกินไป (Over aging) ค่าความแข็งจะลดลง ขณะที่ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) อยู่ที่ 496.78 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) มีค่าเป็น 20.41 % ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Y.F. Song และคณะ (2017) ซึ่งศึกษาการบ่มแข็งสองระยะของอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 ซึ่งให้ค่าความแข็งสูงสุดที่เวลาในการบ่มแข็ง 24 ชั่วโมง แต่ค่าความแข็งที่ได้และสมบัติทางด้านความแข็งแรงดึงต่ำกว่างานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป ที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมสองระยะ โดยบ่มแข็งครั้งที่สอง ที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 30 และ 36 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งโดยเฉลี่ย หน่วย (HRB)								
	3	6	9	12	15	18	24	30	36
1	71.62	70.87	73.38	73.75	74.28	74.37	79.85	77.57	78.10
2	70.38	71.47	74.03	73.75	74.80	75.30	80.30	78.18	75.53
เฉลี่ย	71.00	71.20	73.70	73.80	74.50	74.80	80.10	77.90	76.8



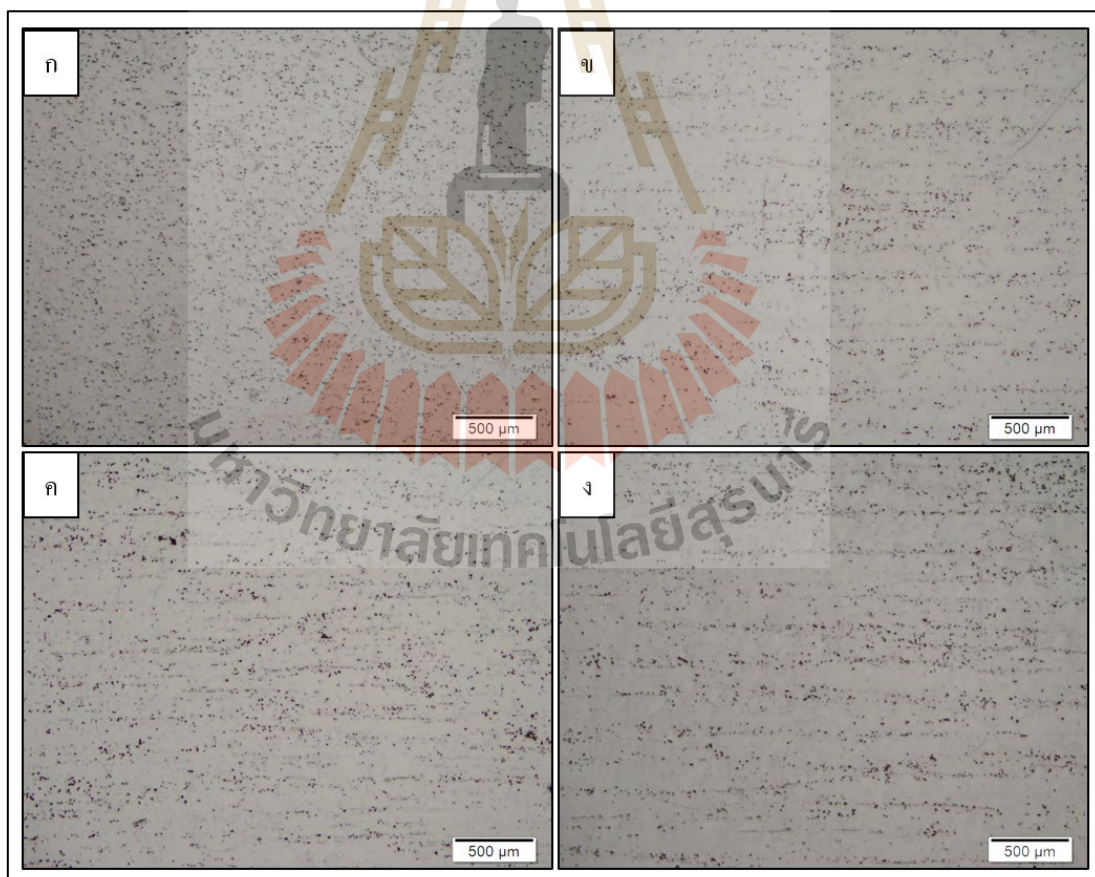
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการบ่มแข็งเทียมสองระยะและค่าความแข็ง (HRB)



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของชิ้นงาน อะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 รีดขึ้นรูป ในสภาพที่ดีที่สุด ที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมสองระยะ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.4.2 โครงสร้างจุลภาคของทุกสภาวะในการบ่มแข็งเทียมสองระยะ

ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 รีดขึ้นรูป ในทุกสภาวะที่ผ่านการบ่มแข็งเทียม จะมีโครงสร้างจุลภาคในลักษณะที่แตกต่างกันในแต่ละระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็ง ซึ่งจากรูปที่ 4.14 (ก) เป็นสภาวะที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมครั้งแรกที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่ามีจุดสีดำขนาดเล็กถึงปานกลางกระจายตัวอย่างต่อเนื่อง จากนั้นทำไปผ่านการบ่มแข็งเทียมครั้งที่สองที่อุณหภูมิที่ 170 °C รูปที่ 4.8 (ข) - (ง) ลักษณะจุดสีดำจะมีการเกาะกลุ่มกันตามแนวรีดในแนวยาวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงรูปที่ 4.8 (ง) เป็นเวลาในการบ่มแข็งที่ให้ค่าความแข็งสูงสุด ลักษณะจุดดำกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจะมีขนาดเล็กและเบาบางลง แต่เมื่อให้เวลาในการบ่มแข็งนานขึ้น จะเห็นได้ว่ามีจุดดำที่มีขนาดใหญ่ในลักษณะหยาบเพิ่มมากขึ้นกระจายตัวอยู่กระจายตัวหนาแน่นบริเวณเกรนและรอบ ๆ ขอบเกรน ดังรูปที่ 4.8 (ฉ) และ (ญ)



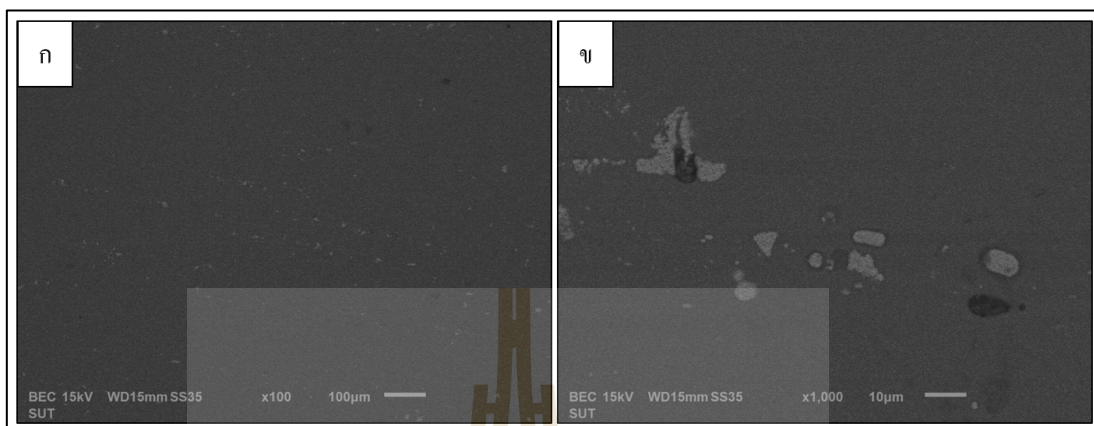


รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งเทียมสองระยะ (ก)บ่มแข็งครั้งแรกที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และบ่มแข็งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา (ข) 3 ชั่วโมง, (ค) 6 ชั่วโมง, (ง) 9 ชั่วโมง (จ) 12 ชั่วโมง, (ฉ) 15 ชั่วโมง, (ช) 18 ชั่วโมง, (ซ) 24 ชั่วโมง, (ฌ) 30 ชั่วโมง และ (ญ) 36 ชั่วโมง

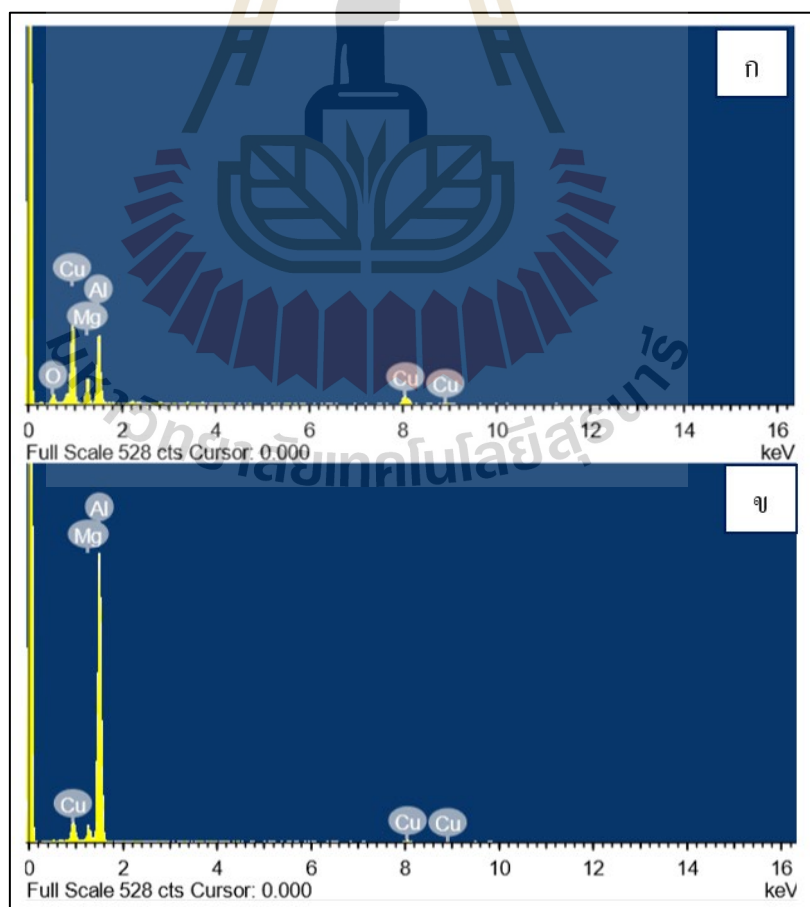
ทั้งนี้ลักษณะโครงสร้างจุลภาคในส่วนของพื้นสีขาวที่แสดงโดยกล้อง OM คือ พื้นสีดำที่แสดงโดยกล้อง SEM และลักษณะจุดสีดำที่แสดงโดยกล้อง OM คือ จุดสีขาวที่แสดงโดยกล้อง SEM ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นจะถูกนำเสนอในหัวข้อ 4.4.3 ต่อไป

4.4.3 โครงสร้างจุลภาคของสถานะ Under aging, Peak aging และ Over aging ในการบ่มแข็งเทียมสองระยะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

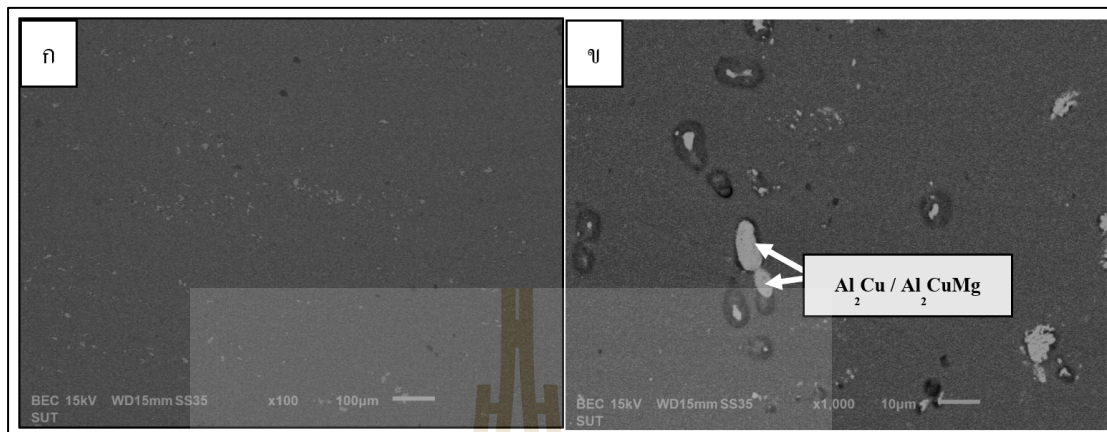
จากภาพถ่าย SEM ที่สภาวะการบ่มแข็งเทียมเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.15 (ก) และ (ข) สังเกตว่ามีจุดสีขาวกระจายตัวเล็กน้อยอยู่บริเวณชิ้นงาน ซึ่งผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ดังรูปที่ 4.16 (ก) และ (ข) พบว่าจุดสีขาวที่เกิดขึ้นเป็นเฟส Al_2Cu/Al_2CuMg และที่สภาวะการบ่มแข็งเทียมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.17 (ก) (ข) พบว่าจุดสีขาว กระจายอยู่ทั่วบริเวณชิ้นงาน มีทั้งจุดที่เห็นได้ชัดและจุดที่มีความเล็กละเอียด ซึ่งผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ดังรูปที่ 4.18 (ก) และ (ข) พบว่าจุดสีขาวที่กระจายตัวทั่วบริเวณชิ้นงานอย่างเห็นได้ชัดเจน คือ เฟส Al_2Cu/Al_2CuMg เป็นจุดสีขาวขนาดเล็กละเอียดกระจายตัวเบาบางอยู่บริเวณขอบเกรน และเมื่อทำการบ่มแข็งที่เวลา 36 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.19 พบว่า จุดสีขาวมีความหนาแน่นและขยายขึ้นเกาะกลุ่มกันตามบริเวณขอบเกรนเป็นแนวยาว ซึ่งผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ดังรูปที่ 4.20 (ก) จุดขาว ๆ ที่ก่อตัวหนาแน่นและขยายขึ้น เกาะกลุ่มกันบริเวณขอบเกรน คือ เฟส Al_2Cu/Al_2CuMg และมีจุดสีขาวลักษณะเล็กละเอียดบางส่วนกระจายตัวอยู่เช่นกันเป็นเฟสอื่น ๆ ดังรูปที่ 4.20 (ข) ซึ่งลักษณะการตกตะกอนเช่นนี้เกิดจากสภาวะบ่มแข็งนานเกินไป (Over aging) เป็นผลทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการบ่มแข็งขึ้นตอนเดียว และมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Y.F. Song และคณะ (2017) และผลในลักษณะเดียวกันนี้ได้พบในงานวิจัยของ ศิริวรรณ พรรณราย และคณะ (2011) ซึ่งสิ่งที่ตกตะกอนออกมามีลักษณะเหมือนกันกับงานวิจัยนี้



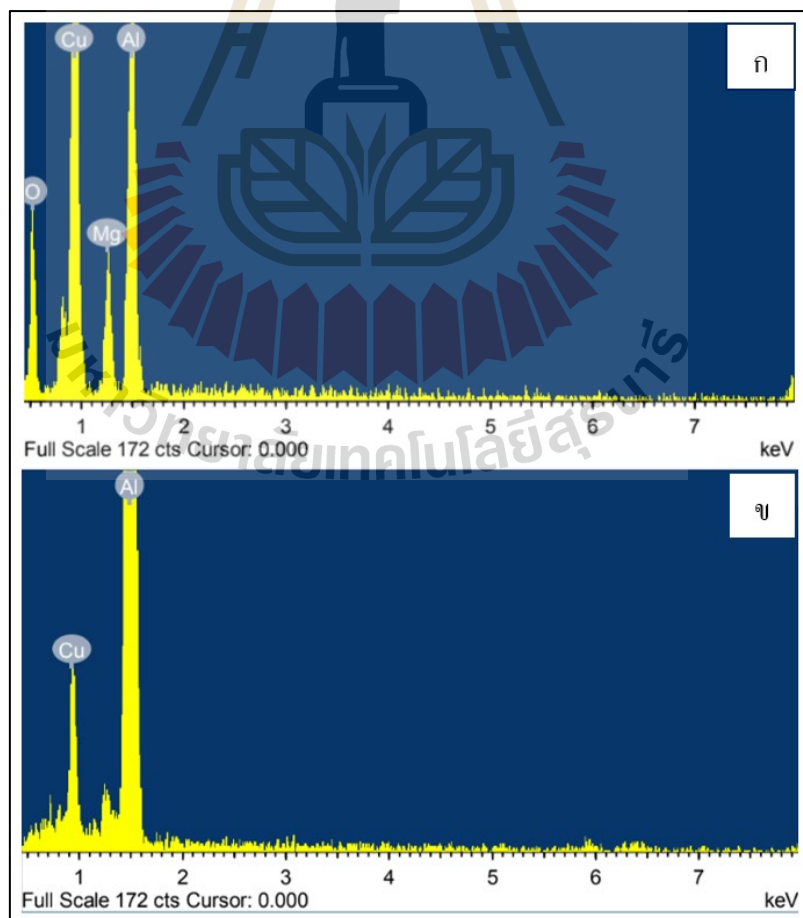
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาพโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมสองระยะที่ 12 ชั่วโมง



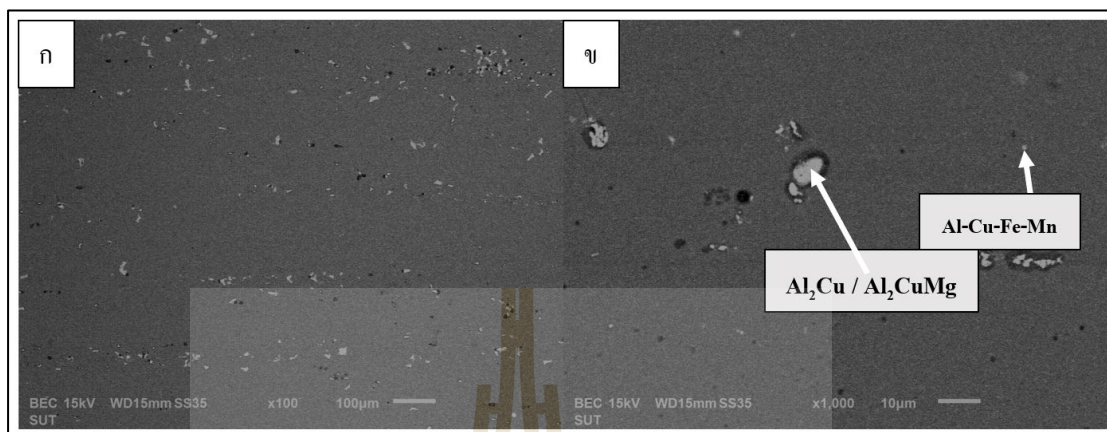
รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) และ (ข) $\text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}_2\text{CuMg}$



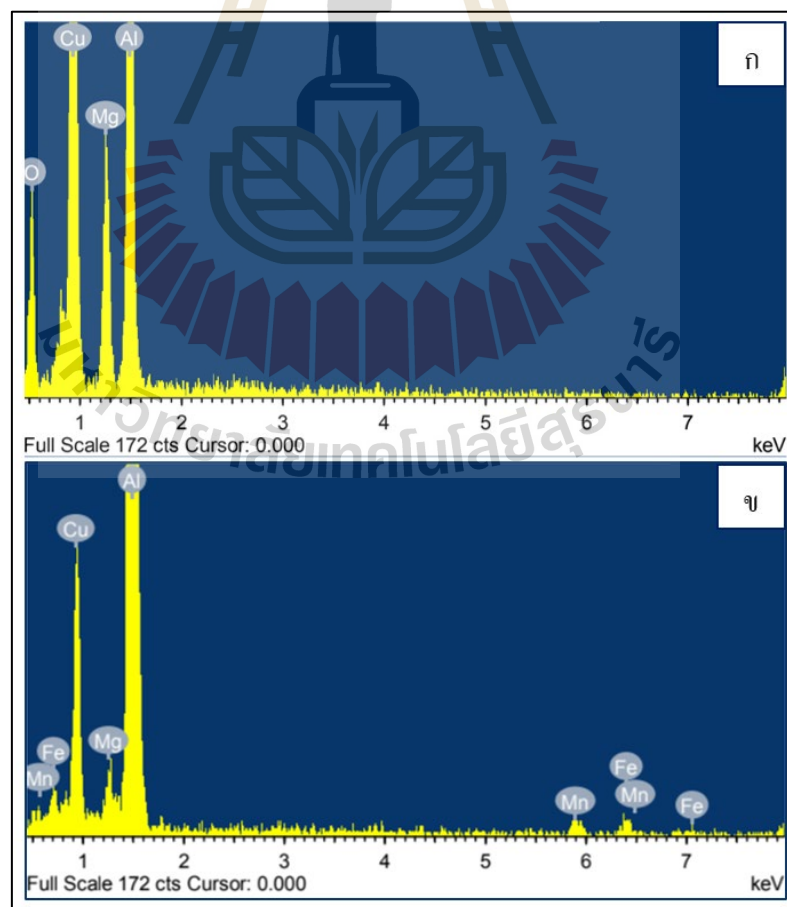
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาพโดย SEM ของชิ้นงานที่บ่มแข็งเทียมสองระยะที่ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) และ (ข) $\text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}_2\text{CuMg}$



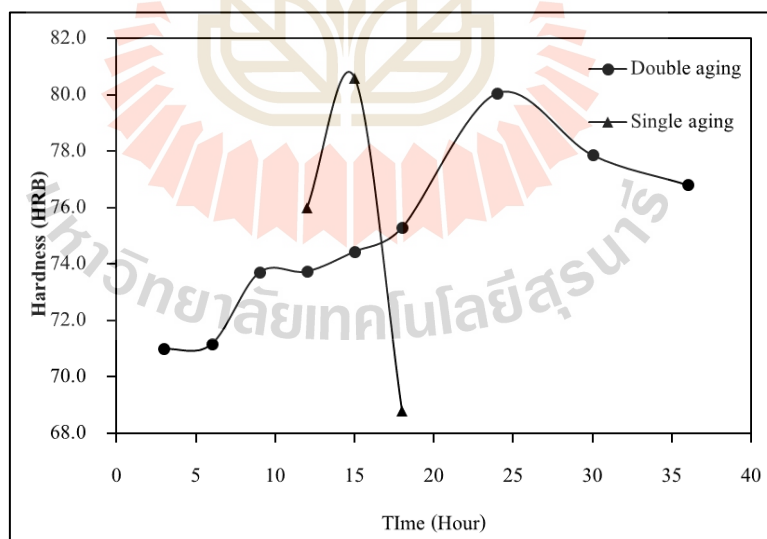
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาพโดย SEM ของชิ้นงานที่ป่นแข็งเทียมสองระยะที่ 24 ชั่วโมง



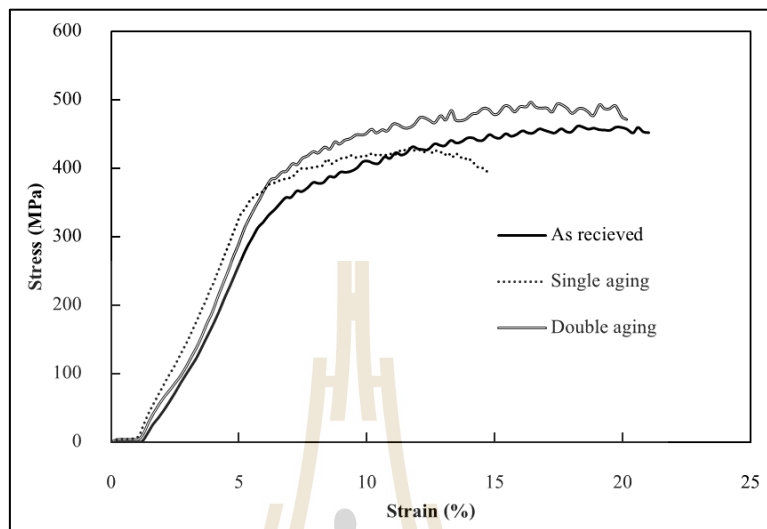
รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วย EDS ของเฟส (ก) $\text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}_2\text{CuMg}$
และ (ข) Al-Cu-Fe-Mn

เมื่อนำสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งขึ้นตอนเดียวและชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งสองระยะมาเปรียบเทียบกัน จะได้ผลดังนี้

จากรูปที่ 4.21 พบว่า เมื่อให้เวลาในการบ่มแข็งที่นานขึ้นค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่เมื่อให้เวลาให้การบ่มแข็งที่นานเกินไปจะทำให้ค่าความแข็งลดลง (Over aging) อีกทั้งเมื่อให้อุณหภูมิที่สูงขึ้นก็จะทำให้ค่าความแข็งสูงสุดเกิดเร็วขึ้น ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าในการบ่มแข็งขึ้นตอนเดียวนั้นใช้อุณหภูมิในการบ่มแข็งที่ $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มแข็งสองระยะที่ $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งค่าความแข็งที่ได้ระหว่างสองสภาวะนี้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่การบ่มแข็งขึ้นตอนเดียวจะใช้เวลาน้อยกว่าการบ่มแข็งสองระยะ ทั้งนี้การบ่มแข็งสองระยะจะให้สมบัติความเหนียวที่ดีกว่าการบ่มแข็งขึ้นตอนเดียวซึ่งสังเกตจากรูปที่ 4.22 โดยค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่บ่มแข็งขึ้นตอนเดียวที่ให้ค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่ 14.85 และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่บ่มแข็งสองระยะที่ให้ค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่ 20.41 ซึ่งต่างกันถึง 5.56 % ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่า งานวิจัยของ Y.F. Song ซึ่งมีการใช้กรรมวิธีทางความร้อน T6 โดยบ่มแข็งเทียมสองระยะในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการบ่มแข็งและค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมขึ้นตอนเดียวและชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมสองระยะ



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 รีดขึ้นรูป ชิ้นงานวัตถุดิบ, ชิ้นงานผ่านการบ่มแข็งเทียมขั้นตอนเดียวและชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมสองระยะ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการบ่มสองระยะ โดยใช้กระบวนการทางความร้อนที่เรียกว่า T6 และหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ดี และเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างการบ่มแข็งเทียบชั้นตอนเดียวกับการบ่มแข็งเทียบสองระยะของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมเกรด 2024 รีดขึ้นรูป จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ชิ้นงานวัตถุดิบ (As received)

1) ชิ้นงานวัตถุดิบอะลูมิเนียมผสม แมกนีเซียม เกรด 2024 ที่ผ่านการรีดขึ้นรูป เมื่อทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยเกรนที่ยึดแบนเป็นแนวยาวตามทิศทางการรีดขึ้นรูป เฟสหลักคือ α -Al และเฟสยูเทคติก บริเวณขอบเกรนประกอบไปด้วย α -Al และ Al_2Cu/Al_2CuMg

2) ค่าความแข็งมีค่าเฉลี่ย 75.68 HRB ในขณะที่ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) 461.74 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) 21.02 %

5.1.2 ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 505 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่าเกรนมีลักษณะที่ยึดแบนเป็นแนวยาวในส่วนของเฟส α -Al มีลักษณะเป็นพื้นผิวสีขาวและยังคงมีแนวริ้วที่ปรากฏอยู่ อีกทั้งมีจุดสีดำกระจายตัวเพิ่มขึ้นทั่วบริเวณชิ้นงาน ซึ่งเป็นเฟส Al_2Cu/Al_2CuMg กระจายตัวอยู่บริเวณรอบของเฟสหลัก เนื่องจากเมื่อทำการอบละลายที่อุณหภูมิสูงและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จะทำให้เฟส Al_2Cu/Al_2CuMg อยู่ในรูปของสารละลายของแข็งที่มีสถานะของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution) ถูกกักอยู่บริเวณเกรนและบริเวณใกล้เคียงกับขอบเกรน ซึ่งมีค่าความแข็งเฉลี่ย 65.56 HRB

5.1.3 ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียบชั้นตอนเดียว

1) ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งสูงสุดในการบ่มแข็งเทียบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ซึ่ง Al_2Cu/Al_2CuMg มีการตกตะกอนอย่าง

สม่ำเสมอทั่วบริเวณชิ้นงาน และเมื่อให้เวลาในการบ่มแข็งนานขึ้นค่าความแข็งจะลดลง (Over aging) เนื่องจาก Al_2Cu/Al_2CuMg มีกระจายตัวหนาแน่นบริเวณเกรนและรอบ ๆ ขอบเกรน อีกทั้งยังมีการตกตะกอนที่หยาบขึ้น จึงทำให้ค่าความแข็งลดลง

2) ค่าความแข็งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 80.60 HRB ในขณะที่ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) 429.20 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) 14.85 %

5.1.4 ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียบสองระยะ

1) ค่าความแข็งสูงสุดในการบ่มแข็งเทียบครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะพบ Al_2Cu/Al_2CuMg มีความละเอียดกระจายตัวอย่างต่อเนื่อง และเมื่อให้เวลาในการบ่มแข็งนานขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งลดลง (Over aging) เนื่องจากเฟส Al_2Cu/Al_2CuMg มีการตกตะกอนที่หยาบขึ้นและมีการกระจายตัวหนาแน่นบริเวณเกรนและรอบ ๆ ขอบเกรน

2) ค่าความแข็งมีค่าเฉลี่ย 80.10 HRB ในขณะที่ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) 496.78 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) 20.41 %

5.1.5 เปรียบเทียบสมบัติทางกลระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียบขั้นตอนเดียว และการบ่มแข็งเทียบสองระยะที่ให้สมบัติทางกลที่ดี

เปรียบเทียบสมบัติทางกลระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียบแบบ Single aging และ Double aging ค่าความแข็งสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการบ่มแข็งเทียบแบบ Single aging จะใช้เวลาในการบ่มแข็งสั้นกว่า อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในการบ่มแข็งเทียบแบบ Double aging ที่ต่ำกว่า จึงให้ค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ที่มากกว่า Single aging

5.2 ข้อเสนอแนะ

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลายอาจส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคก่อนทำการบ่มแข็งเทียบ ในการทดลองจึงควรทดลองใช้อุณหภูมิในการอบละลายมากกว่าหนึ่งสถานะและนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ได้สถานะที่ให้สมบัติทางกลที่ดีขึ้น

รายการอ้างอิง

- การทดสอบแรงดึง (Tension Test). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://orddept-crma-tensiontest.blogspot.com> (วันที่ค้นข้อมูล 27 ตุลาคม 2561).
- ชลิตต์ มธุรสมนตรี และคณะ. (2544). *กระบวนการผลิต*. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ. หน้า 117.
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2558). *วัสดุวิศวกรรม*. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดดูเคชั่น. 588 หน้า.
- ศิริกุล วิสุทธิ์เมธางกูร. (2543). *โลหกรรมกายภาพ*. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศิริวรรณ พรรณราย (2555). *อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียม 2024 ที่ได้จากการขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. (2557). “การสำรวจสถานภาพอุตสาหกรรมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals)”. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย.
- Alexopoulos, N. D., Velonaki, Z., Stergiou, C. I., & Kourkoulis, S. K. (2017). **Effect of ageing on precipitation kinetics, tensile and work hardening behavior of Al-Cu-Mg (2024) alloy**. *Materials Science and Engineering: A*, 700, 457-467.
- Ameran Foundrymen's Society, Inc. (1996). **Aluminum casting technology**. Des Plaines. Illinois.
- Dieter, G.E. (1998). **Mechanical metallurgy**. SI metric edition. McGraw-Hill, ISBN 007-100406-8.
- Hashemi, S. (2006). **Foundation of materials science and engineering**. 4th edition. McGraw-Hill. ISBN 007-125690-3.
- Liu, X. Y., Pan, Q. L., Lu, Z. L., Cao, S. F., He, Y. B., & Li, W. B. (2010). **Effects of solution treatment on the microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mg-Ag alloy**. *Materials & Design*, 31(9), 4392-4397.

- Kaçar, H., Atik, E., & Meriç, C. (2003). **The effect of precipitation-hardening conditions on wear behaviours at 2024 aluminium wrought alloy.** *Journal of Materials Processing Technology*, 142(3), 762-766.
- L. O. R. Lima, S. C. Jacumasso. (2013). **Influence of secondary ageing on mechanical properties of an AA7050 aluminium alloy.** 22nd International Congress of Mechanical Engineering.
- Mahathaninwong, N., Plookphol, T., Wannasin, J., & Wisutmethangoon, S. (2012). **T6 heat treatment of rheocasting 7075 Al alloy.** *Materials Science and Engineering: A*, 532, 91-99.
- Menargues, S., Martín, E., Baile, M. T., & Picas, J. A. (2015). **New short T6 heat treatments for aluminium silicon alloys obtained by semisolid forming.** *Materials Science and Engineering: A*, 621, 236-242.
- Prabhu, T. R. (2017). **Effects of ageing time on the mechanical and conductivity properties for various round bar diameters of AA 2219 Al alloy.** *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(1), 133-142.
- Reis, D. A., Couto, A. A., Domingues Jr, N. I., Hirschmann, A. C., Zepka, S., & de Moura Neto, C. (2012). **Effect of artificial aging on the mechanical properties of an aerospace aluminum alloy 2024.** In *Defect and Diffusion Forum* (Vol. 326, pp. 193-198). Trans Tech Publications.
- Song, Y. F., Ding, X. F., Zhao, X. J., Xiao, L. R., & Guo, L. (2017). **The effect of stress-aging on dimensional stability behavior of Al-Cu-Mg alloy.** *Journal of Alloys and Compounds*, 718, 298-303.
- Tyouke, B., Larouech, M., Tamraoui, Y., & Saad, E. (2017). **Microstructure and mechanical properties of Al-Cd binary aluminium alloy.** *Journal of Science and Arts*, 17(1), 131.
- Yan, J. (2006). **Strength Modelling of Al-Cu-Mg Type Alloys.** (Doctoral dissertation, University of Southampton).

ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Kamonchanok Preechawech, Somsak Siwadamrongpong, Kachala Sudtachat and Siriporn Kuntongkum. (2019). Influence of artificial aging on mechanical properties of rolling and semi-solid casting aluminium alloy 2024. The Academics World 524th International Conference on Mining, Material, and Metallurgical Engineering (ICMMME). 22-23 April 2019, Chiang Mai, Thailand.



INFLUENCE OF ARTIFICIAL AGING ON MECHANICAL PROPERTIES OF ROLLING AND SEMI-SOLID CASTING ALUMINIUM ALLOY 2024

¹KAMONCHANOK PREECHAWECH, ²SOMSAK SIWADAMRONGPONG,
³KANCHALA SUDTACHAT, ⁴SIRIPORN KUNTONGKUM

¹School of Mechanical and Process System Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

^{2,3,4}School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

E-mail: ¹numiim17@gmail.com, ²somsaksi@sut.ac.th, ³kanchala@sut.ac.th, ⁴nok_832@hotmail.com

Abstract - This work was aimed to investigate the mechanical properties of rolled and semi-solid casted aluminium alloy 2024. T6 heat treatment as follows: solution treated at 505 °C for 4 h followed by quenching in water at room temperature and then artificially aged at 190 °C for 12 h, 15 h and 18 h, was carried out. Rockwell hardness scale B (HRB) and tensile tests were investigated for mechanical properties. Optical Microscope was used to illustrate the microstructure. It was found that maximum hardness was observed at 15 hours aging time for both Al2024. Maximum strength of rolled Al2024 was found to be higher than that of semi-solid casted Al2024. It might be due to the influence of cold work of the rolled Al2024.

Keywords - Aluminium alloy 2024, Aging, Precipitation, Mechanical property

I. INTRODUCTION

The use of aluminium alloys in industry are widely and replacing steel usage in aerospace and aviation industries owing to their light weight, excellent thermal stability, and good corrosion resistance and high strength/density ratio etc. [1-2]

The strength of the Al alloys were usually come out with heat treatment processes. In heat treatment process, the second phase was precipitated within matrix phase. The values of hardness and strength increase as a result of a new precipitate due to period of time and heat from supersaturated solid solution. [2,3] Alloy 2024 is an aluminium alloy which containing copper, magnesium, manganese some minor alloying elements.

It's used in engineering applications widely such as aeroplane constructions, orthopaedic soles, rivet and pulling wheels. [2,4] The strength of alloys arises mainly from the nanoscaled precipitates as a result of natural or artificial aging. After solution treating, quenching and aging S phase (Al₂CuMg) was

identified as the equilibrium phase of the aluminium alloy 2024. The several stages were typically given as the following sequence [5-7]:

SSS → G.P. zone → S'' → S' → S

The investigation of several aging times and temperature on mechanical properties of Aluminium alloy 2024 has been reported by Y.C. Lin et al [8]. However, studies of aging influence on semi-solid casted Aluminium Alloy is very rare. Therefore, the present study, influence of T6 heat treatment was investigated on rolled and semi-solid casted Al2024.

II. MATERIAL AND METHODS

2.1. Materials

Rolled 2024 Aluminium Alloy with a dimension of 370 mm x 370 mm x 12 mm. In the present study, the raw material with a dimension of 370 mm x 370 mm x 12 mm semi-solid casted aluminium alloy with a dimension of 100 mm x 100 mm x 20 mm were used in this study. The composition of the rolled plate and semi-solid casted 2024 aluminium alloy was provided in Table 1 and Table 2.

Table 1 : Chemical composition of Rolled 2024 aluminium alloy (wt%)

Element	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Al
Content	4.56	1.57	0.65	0.50	0.50	0.04	Bal.

Table 2 : Chemical composition of 2024 Semi-solid casted aluminium alloy (wt%)

Element	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Al
Content	5.09	1.67	0.63	0.40	0.33	0.04	Bal.

2.2 Samples preparation

Artificial aging (T6) of the alloy was performed using an electric muffle furnace. The aging specimens were cut with a dimension of 10 mm x 20 mm x 12 mm by Horizontal Band Saw machine. Tensile test

specimens were cut by wire electrode into shape according to the ASTM E8 specification. The specimens were solution treated at 505 °C for 4 hrs, and quenched in water at room temperature. Thereafter artificially aged at 190 °C for 12, 15 and

18 hrs and quenched in water at room temperature was carried out.

2.3 Characterization of materials

The sample for optical microscopic examination were prepared using conventional metallographic techniques and alumina powder. The aged specimens were evaluated in hardness, Rockwell Scale B, and tensile strength.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Fig.1 showed microstructure of as receives (a) rolled Aluminium 2024 and (b) semi-solid casted aluminium 2024 prior to process of heat treatment. It was obvious that microstructure was different. Fig.1a. Showed the columnar grains of rolled Aluminium while Fig.1b illustrated the globular structure of semi-solid casted Al2024. However, both structures were consisted of primary phase α -Al and eutectic mixture of Al and Cu surrounding around grain boundaries.



Fig.1. As receives microstructure of (a) rolled Aluminium alloy 2024 and (b) semi-solid casted aluminium alloy 2024



Fig.2. Microstructure of samples after solution treated (a) rolled Aluminium Alloy 2024 and (b) semi-solid casted aluminium alloy 2024

Fig.2 Show the microstructure of samples after solution treated at 505 °C for 4 hrs. Both microstructures were consisted of α -Al and secondary phase (Al_2Cu) in which secondary phase (Al_2Cu) located along the grain boundary becomes discontinuous and round in shape. It was considered that secondary phase (Al_2Cu) was dissolved into the α -Al matrix. After quenching the soluted atoms in the matrix were in the supersaturated condition and tend to precipitate out during further aging stage. It can be observed from Fig.3 that specimen's hardness was increased as aging time increase due to increasing of precipitate phase. The hardness was found to reach the highest around 15 hours aging time with 81 HRB for rolled Aluminium 2024.

Table 1 : Rockwell hardness (HRB) of rolled plated and semi-solid casted aluminium alloy 2024

Aging time (hrs)	Rockwell Hardness (HRB)	
	Rollled plate	Semi-solid casted
As received	76	36
12	76	72
15	81	80
18	69	73

Table 1 shows the Rockwell hardness scale B (HRB) of rolled and semi-solid casted aluminium alloy 2024 that was solution treated at 505 °C for 4 hours and followed by quenching in water temperature and aging at 190 °C for 12, 15 and 18 hours. The hardness of rolled Al2024, as solution treated samples, was quite higher than that of semi-solid casted Al2024. It should be due to cold work effect on the rolled Al2024. The hardness was become maximum at 15 hours aging time for both of Al2024 with closed value of maximum hardness. Then, when time aging further increase to 18 h, the hardness was revealed to over aging caused by coarsening of precipitate.

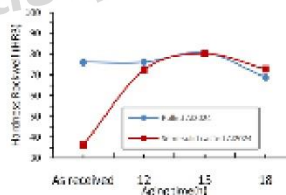


Fig.3. Effects of aging time on the Rockwell hardness (HRB) of rolled and semi-solid casted aluminium alloy 2024

Influence of Artificial Aging on Mechanical Properties of Rolling and Semi-Solid Casting Aluminium Alloy 2024

The initial increase in hardness was explained by the diffusion from secondary phase (Al_2Cu) particles. At the beginning of aging treatment the soluted atoms diffuse and locally cluster to form the GP-zone throughout in the matrix. The GP-zone yielded mechanical property improvement due to the higher stress required to force dislocation through the

coherent zone. With increase aging time the GP-zone was transformed and the intermediate s' precipitates might be formed. Along the aging time, the intermediate precipitate phases were grown and transformed, finally, to s phase incoherent. As the s phase growing number of dislocation was decreased and resulting to drop of hardness.[9]

Table 2 : Ultimate strength (σ), Elongation (EL) and Rockwell Hardness (HRB) of rolled and semi-solid casted aluminium alloy 2024

Heat treatment	σ_{max} (Mpa)	EL(%)	HRB
As received Rolled of Al2024	470	18	75
SST at 505 °C / 4h and 190 °C / 15 h	483	15	81
As Casted of Semi-solid Al2024	230	33	37
SST at 505 °C / 4h and 190 °C / 15 h	395	11	80

Fig.4 to Fig.5 showed the microstructure of samples aging for rolled and semi-solid casted aluminium alloy 2024, respectively. It was revealed that microstructure of solution treated specimens, Fig. 4 (a) and Fig.4 (a) indicated the small eutectic phase along the grain boundary. The eutectic phase was considered to dissolve into α -Al during solution treatment. The phase transformation to form secondary phase (Al_2Cu) during aging stage yield fine and disperse of secondary phase (Al_2Cu) (Fig.4(b)(c) and Fig.5(b)(c)) until reaching the maximum at 15 hour aging time. Then, it was found that coarsening of secondary phase (Al_2Cu) was illustrated in Fig.4(d) and Fig.5(d) and lead to droping of mechanical properties. Table 2 showed results of tensile test on as received samples and maximum cases. It was shown that the strength and hardness of semi-solid casted Al2024 were improved by huge effect compare to the rolled Al2024.

It may due to influence of cold work on rolled Al2024 that resulted in quite high strength and hardness for as received rolled Al2024. Ductility of specimen was found to drop in proportion of increasing of strength. Consequently, rolled Al2024 exhibited remarkable higher strength than semi-solid casted Al2024.

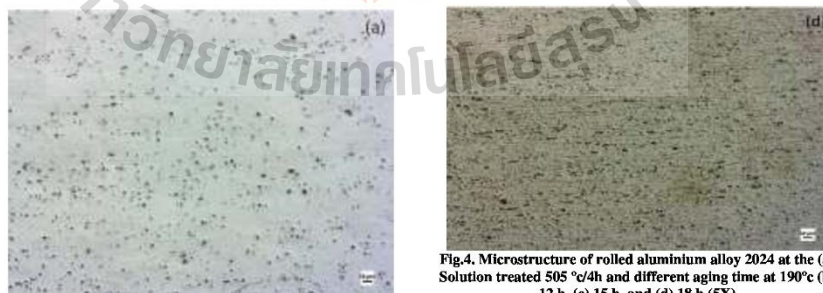


Fig.4. Microstructure of rolled aluminium alloy 2024 at the (a) Solution treated 505 °C/4h and different aging time at 190°C (b) 12 h, (c) 15 h and (d) 18 h (5X)

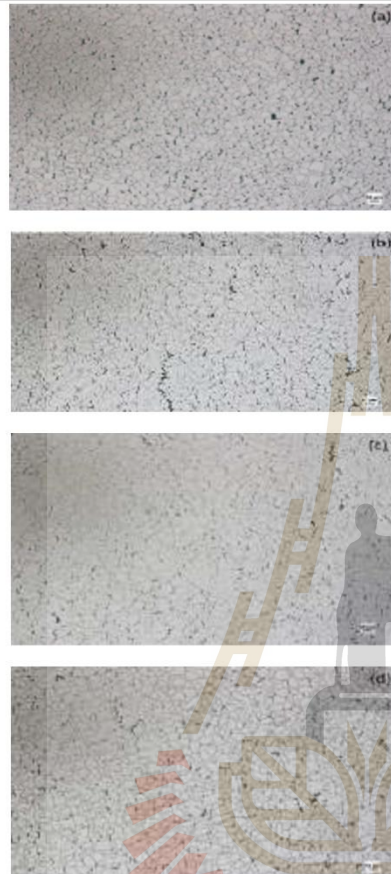


Fig.5. Microstructure of semi-solid casted aluminium alloy 2024 at the (a) Solution treated 505 °C/4h and different aging time at 190 °C (b) 12 h, (c) 15 h and (d) 18 h (5X)

CONCLUSIONS

Rolled and semi-solid casted Al2024 were T6 treated, the following conclusions could be drawn from the tested results:

1. Strength and hardness of rolled and semi-solid casted Al2024 were increased as longer aging time and reached the maximum at 15 hours aging time
2. Rolled Al2024 exhibited higher strength than semi-solid casted Al2024 at 15 hours aging time. It could be considered as the influence of cold rolling processes.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank National Research Council of Thailand and Suranaree University of Technology for support grant to conduct this research.

REFERENCES

- [1] D. A.P. Reis et al., "Effect of Artificial Aging on the Mechanical Properties of an Aerospace Aluminum Alloy 2024", Defect and Diffusion Forum, Vols. 326-328, pp. 193-198, 2012
- [2] Kaçar, Hülya, Enver Atik, and Cevdet Meriç. "The effect of precipitation-hardening conditions on wear behaviours at 2024 aluminium wrought alloy." *Journal of Materials Processing Technology* 142, no. 3 (2003): 762-766.
- [3] Scheuring, Jason N., and A. F. Grandt. "An Evaluation of Aging Aircraft Material Properties." *ASME-PUBLICATIONS-AD 47* (1995): 99-110.
- [4] Tyouke, B., M. Larouech, Y. Tamraoui, and E. Saad. "microstructure and mechanical peoperties of Al-Cd binary aluminium alloy." *Journal of Science and Arts* 17, no. 1 (2017): 131.
- [5] Li, Hai, Wei Xu, Zhixiu Wang, Bijun Fang, Renguo Song, and Ziqiao Zheng. "Effects of re-ageing treatment on microstructure and tensile properties of solution treated and cold-rolled Al-Cu-Mg alloys." *Materials Science and Engineering: A* 650 (2016): 254-263.
- [6] Sun, Daren, Xi-chen Sun, Derek O. Northwood, and Jerry H. Sokolowski. "Thermoelectric power characterization of a 2024 aluminum alloy during solution treatment and aging." *Materials characterization* 36, no. 2 (1996): 83-92.
- [7] Alexopoulos, Nikolaos D., Zaneta Velonaki, Constantinos I. Siergiou, and Stavros K. Kourkoulis. "Effect of ageing on precipitation kinetics, tensile and work hardening behavior of Al-Cu-Mg (2024) alloy." *Materials Science and Engineering: A* 700 (2017): 457-467.
- [8] Lin, Y. C., Yu-Chi Xia, Yu-Qiang Jiang, Hua-Min Zhou, and Lei-Ting Li. "Precipitation hardening of 2024-T3 aluminum alloy during creep aging." *Materials Science and Engineering: A* 565 (2013): 420-429
- [9] Song, Y. F., X. F. Ding, L. R. Xiao, X. J. Zhao, Z. Y. Cai, L. Guo, Y. W. Li, and Z. Z. Zheng. "Effects of two-stage aging on the dimensional stability of Al-Cu-Mg alloy." *Journal of Alloys and Compounds* 701 (2017): 508-514.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวกมลชนก ปรีชาเวช เกิดเมื่อวันที่ 17 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2537 ณ จังหวัดจันทบุรี ศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านตรอกนอง ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนศรีฤทัย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนขลุ่ยระนาดภิเษก อำเภอขลุ่ย จังหวัดจันทบุรี ในปีการศึกษา 2555 และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม ออกแบบผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2560 ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาตรีได้สหกิจศึกษา ณ บริษัท ลิกมัน ไลท์ติ้ง จำกัด ตำแหน่ง ผู้ช่วยวิศวกร ในแผนก Product Development

หลังจากสำเร็จการศึกษาได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม การผลิต ณ สถาบันการศึกษาเดิม ขณะศึกษาระดับปริญญาโท ผู้วิจัยได้เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชา ปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต และผลงานวิจัยได้เข้าร่วมประชุมวิชาการ นานาชาติปรากฏดังภาคผนวก ก.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี