

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการตกผลึก  $Mg_2Si$  ของโลหะผสม  
อะลูมิเนียม 6061 โดยเทคนิค Low-Energy  
Electron Microscopy (LEEM)



นางสาวรัตนภรณ์ วงษ์ทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2562

**ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING  $Mg_2Si$   
PRECIPITATION OF 6061 ALUMINIUM ALLOY BY  
LOW-ENERGY ELECTRON MICROSCOPY  
TECHNIQUE (LEEM)**

**Rattaporn Wongthong**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Doctor of Philosophy in Industrial Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2019**

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการตกผลึก  $Mg_2Si$  ของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดย  
เทคนิค Low-Energy Electron Microscopy (LEEM)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

วท

(อ. ดร.นรา สมัตถภาพงศ์)

ประธานกรรมการ

พ.น.:

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.นิวิท เจริญใจ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์)

กรรมการ

(ผศ. ดร.จงกล ศรีธรรม)

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รัตนภรณ์ วงษ์ทอง : การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการตกผลึก  $Mg_2Si$  ของโลหะผสม อะลูมิเนียม 6061 โดยเทคนิค Low-Energy Electron Microscopy (LEEM) (ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING  $Mg_2Si$  PRECIPITATION OF 6061 ALUMINIUM ALLOY BY LOW-ENERGY ELECTRON MICROSCOPY TECHNIQUE (LEEM))  
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล, 136 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 หลังผ่านการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึก (Precipitation Hardening) โดยในการทดลองได้ใช้การออกแบบแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล โดยกำหนดให้ใช้ปัจจัยที่ใช้ในงานวิจัย 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิอบละลาย (Solution Temperature) เวลาเอจจิง (Aging Time) และอุณหภูมิเอจจิง (Aging Temperature) โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังนี้ อุณหภูมิอบละลาย ( $^{\circ}C$ ) : 520, 540 และ 560 ; เวลาเอจจิง (ชม.) : 2, 8 และ 14 และอุณหภูมิเอจจิง ( $^{\circ}C$ ) : 175, 200 และ 225 และพิจารณาตัวแปรตามคือค่าความแข็งเท่านั้น จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) เทคนิคเอกซ์เรย์โฟโตอิมิชชันอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (X-ray Photoemission Electron Microscopy, X-PEEM) และเทคนิค Low Energy Electron Microscopy (LEEM)

จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยมีผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยคือ อุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจจิง อุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอจจิง และเวลาเอจจิงกับอุณหภูมิเอจจิงต่างก็มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและตัวแปรในสมการให้ลักษณะของเส้นตรงและโมเดลสามารถประมาณค่าความแข็งที่มีค่าผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 2.84$  BHN ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความผิดพลาด (Error หรือ Residual) มีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งเป็นไปตามข้อสมมติเบื้องต้นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

และจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) เทคนิค X-PEEM และ LEEM พบว่าโครงสร้างประกอบไปด้วยโลหะเนื้อพื้นเป็นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) ที่มีการกระจายตัวของตะกอน  $Mg_2Si$  ที่

เนื้อพื้น ( $\alpha$  เฟส) ซึ่งการเกิดตะกอน  $Mg_2Si$  ขึ้นกับปัจจัยที่ใช้ในระบบการชุบแข็งและพบว่าถ้าใช้ อุณหภูมิเองสูงหรือใช้เวลาเองจนเกินไปจะส่งผลให้เกิดการละลายตามขอบเกรน



สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

RATTANAPORN WONGTHONG : ANALYSIS OF FACTORS

AFFECTING  $Mg_2Si$  PRECIPITATION OF 6061 ALUMINIUM ALLOY BY  
LOW-ENERGY ELECTRON MICROSCOPY TECHNIQUE (LEEM).

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PORNSIRI JONGKOL, Ph.D.,136 PP.

ALUMINIUM ALLOY 6061/DESIGN OF EXPERIMENT/ARTIFICIAL AGING

This research investigates effects of factors on hardness of aluminum Al6061 which are treated by precipitation hardening or aging hardening. The  $3^3$  factorial design is used, and the main factors are solution temperature (520, 540 and 560°C), aging time (2, 8 and 14 hours), and aging temperature (175, 200, 225°C). The dependent variable is hardness. Analysis of variance is used to analyze data. The microstructure and chemical property are investigated by using Optical Microscope (OM), Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), (X-ray Photoemission Electron Microscopy, X-PEEM) and Low Energy Electron Microscopy (LEEM).

The results show that all factors affect hardness significantly. Two factor interaction which are found significant include solution temperature and aging time, solution temperature and aging temperature, and aging time and aging temperature. The relation of hardness and factor. The model shows the significant hardness error is less than  $\pm 2.84$  BHN, the 95% confidence intervals were attached to the estimates obtained from cases, the residual is normal distribution as follow the hypothesis of analysis of variance. The results of microstructure from Optical Microscope (OM), Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), X-PEEM

and LEEM reveal that Mg<sub>2</sub>Si particles are distributed all over aluminum, which depend on precipitation hardening factors. Furthermore, LEEM images indicate a high temperature and long period can cause grain growth.



School of Industrial Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature 

Advisor's Signature 

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย มาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ชนรรค์ เอื้อรักสกุล นักวิทยาศาสตร์ระบบลำเลียงแสง นางสาว ทิพย์อุษา วงศ์พินิจ นักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการ และคณะทำงานประจำห้องปฏิบัติการ ทุกท่าน ที่ให้การช่วยเหลือชี้แนะในเรื่องต่าง ๆ และให้ความร่วมมือตลอดการทำการทดลอง ณ สถานีทดลอง BL3.2Ub: PEEM สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน จังหวัดนครราชสีมา เป็นอย่างดีแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ ให้โอกาสในการศึกษา คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขงยุทธ เสริมสุขธินวัฒน์ ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กฤษณา สุพัทธนะ และ อาจารย์ ดร.จิรัฏฐิติกาลพงศ์ศรี หิรัญเกิด อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (F6) มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารีที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์

ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณศิริภา พงษ์พีระ คุณกัมพล อรนนท์ และ คุณภิญญา ศรีบุญเรือง ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการและให้กำลังใจมาโดยตลอด สำหรับ คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและ เคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอด ประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมาจนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

รัตนภรณ์ วงษ์ทอง



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ณ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
<b>2 ปรีทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม.....	5
2.1.1 การกำกับชื่อของอะลูมิเนียมผสม.....	5
2.2 โลหะอะลูมิเนียมผสม 6xxx.....	6
2.3 การชุบแข็งแบบตกผลึกหรือตกตะกอน (Precipitation Hardening).....	7
2.4 การจำแนกประเภทของเฟสที่เกิดในโลหะอะลูมิเนียมผสม.....	9
2.5 การทดสอบความแข็ง.....	10
2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	11
2.6.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope; OM).....	12
2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM).....	12
2.6.3 Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS).....	13
2.7 พลังงานแสงซินโครตรอน (Synchrotron Light).....	16

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.1	โฟโตอิเล็กตรอนอิมิชชันสเปกโตรโกปี (Photoelectron Emission Spectroscopy; PES).....	16
2.7.2	เอกซ์เรย์โฟโตอิมิชชันอิเล็กตรอนสเปกโตรสโกปี X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS).....	17
2.7.3	เทคนิค Low-Energy Electron Microscopy (LEEM).....	18
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
<b>3</b>	<b>วิธีดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>26</b>
3.1	ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 .....	26
3.2	การทดสอบเบื้องต้นก่อนกำหนดแผนการทดลอง .....	26
3.3	การวางแผนการทดลอง .....	27
3.4	ลำดับการทดลอง .....	29
3.5	วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนและสร้างแบบจำลอง .....	30
3.5.1	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ).....	34
3.5.2	การประมาณช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Intervals) .....	35
3.5.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking).....	35
3.6	การเตรียมการสำหรับการทดลอง .....	36
3.6.1	การเตรียมขนาดและผิวชิ้นงาน .....	36
3.7	อุปกรณ์และการดำเนินการทดลอง .....	38
3.7.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	38
3.7.2	ขั้นตอนการอบชุบชิ้นงาน .....	39
3.8	การทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Tester) .....	41
3.8.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	41
3.8.2	วิธีทดสอบความแข็งแบบบริเนล .....	42

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมี.....	44
3.9.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	44
3.9.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน .....	47
3.9.2.1 การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง จุลทรรศน์ แบบแสง(OM).....	47
3.9.2.2 การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) .....	48
3.9.2.3 การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบ โฟโตอิมิสชัน (Photoemission Electron Microscopy, PEEM) .....	49
3.9.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบธาตุ ของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 ด้วยเทคนิค X- PEEM และ LEEM ....	50
<b>4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....</b>	<b>52</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 .....	52
4.2 ผลการทดลอง.....	52
4.2.1 ผลการทดสอบความแข็ง .....	52
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	53
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	53
4.4 แบบจำลองโมเดลประมาณค่าความแข็ง.....	59
4.4.1 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ).....	60
4.4.2 การประมาณช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Intervals) .....	61
4.4.3 การสอบทวนความถูกต้องของโมเดล (Validation).....	62
4.5 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) .....	64
4.5.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution).....	65
4.5.2 การตรวจสอบความแปรปรวน .....	67
4.5.3 การตรวจสอบความอิสระของข้อมูล .....	68

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6	ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค .....	69
4.6.1	การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope; OM) .....	70
4.6.2	การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM) และเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) แบบ Point Analysis .....	88
4.6.3	เอกซ์เรย์โฟโตอิมิชชันอิเล็กตรอนสเปคโตรสโคปี (X-ray Photoemission Electron Microscopy, X-PEEM) และเทคนิค Low-Energy Electron Microscopy (LEEM) .....	91
5	สรุปผลการทดลอง .....	104
5.1	สรุปผลการทดลอง .....	104
5.1.1	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบแข็งด้วยวิธี การตกผลึก .....	104
5.1.2	ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี .....	104
	รายการอ้างอิง .....	106
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ตารางค่าความแข็ง ASTM .....	110
	ภาคผนวก ข. โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานทดลอง .....	113
	ภาคผนวก ค. การคำนวณแบบจำลองโมเดล .....	128
	ภาคผนวก ง. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	133
	ประวัติผู้เขียน .....	136

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สัญลักษณ์ (ระบบตัวเลข) กลุ่มอะลูมิเนียมขึ้นรูป .....	6
2.2	การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS.....	15
3.1	ส่วนผสมทางเคมีโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ตามมาตรฐาน .....	26
3.2	ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 .....	26
3.3	ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแบบ $3^3$ แฟคทอเรียล .....	27
3.4	รูปแบบทั่วไปของการออกแบบการทดลองแบบ $3^3$ แฟคทอเรียล .....	29
3.5	ลำดับการทดลองที่ได้จากการสุ่ม .....	30
3.6	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) .....	33
3.7	ตารางบันทึกผลค่าความแข็งที่ได้จากการทดลอง (BHN).....	44
4.1	ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 .....	52
4.2	ค่าความแข็งที่ได้จากการทดลอง (BHN) .....	53
4.3	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียล $3^3$ (ANOVA) .....	54
4.4	ค่าความแข็งที่ได้จากโมเดลประมาณค่าความแข็ง (BHN).....	60
4.5	ผลการสอบทวนแบบจำลองโมเดล .....	63
4.6	ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดลอง (Error หรือ Residual) .....	65
4.7	การทดลองทั้ง 27 เงื่อนไข .....	80
4.8	โครงสร้างจุดภาคทั้ง 27 เงื่อนไขที่ได้จากการทดลอง.....	81
4.9	ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แบบ Point Analysis.....	90

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพสมมูลโลหะผสมอะลูมิเนียม – แมกนีเซียม – ซิลิกอน ..... 7
2.2	(ก) การตกตะกอนที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกับแมทริกซ์ (Non-Coherent Precipitation) (ข) การตกตะกอนแบบมีแรงยึดเหนี่ยวกับแมทริกซ์ (Coherent Precipitation) (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2558)..... 8
2.3	ขั้นตอนการอบชุบของแผนภาพสมมูลอะลูมิเนียม-ทองแดง (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2558)..... 8
2.4	หลักการกัดหาคัดและพื้นผิวชิ้นงานทดสอบ (ASTM International, 2018) ..... 11
2.5	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Optical Microscope (OM) ยี่ห้อ OPTIKA..... 12
2.6	ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ..... 13
2.7	สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS..... 14
2.8	การวิเคราะห์การกระจายตัวธาตุแบบ Mapping Analysis ..... 15
2.9	แสดงสถานีทดลอง BL3.2 : PEEM ที่ใช้ในการทดสอบโดยใช้เทคนิค X-PEEM และ LEEM ..... 16
2.10	ตัวอย่างภาพที่ตรวจสอบ X-PEEM (Adesola et al., 2013) ..... 18
2.11	ตัวอย่างการถ่ายภาพด้วยเทคนิค LEEM อะลูมิเนียม 6063 (Sirichaiwetkul et al., 2019) ... 19
2.12	ความแข็งแรงหลังการทำเองจิงที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน (ASM Handbook., 1991) ..... 20
2.13	ค่าความแข็งแรงหลังเองจิงที่อุณหภูมิ 180°C (Demir and Gunduz ., 2009)..... 21
2.14	ค่าความแข็งแรงหลังเองจิงที่อุณหภูมิ 220°C (Ozturk et al., 2010)..... 22
2.15	แสดงขั้นตอนการทำการชุบแข็งแบบตกตะกอน (Gowrishankar et al., 2014) ..... 22
2.16	ค่าความแข็งแรงหลังเองจิงที่อุณหภูมิ 220°C (Toozandehjani et al., 2016)..... 23
2.17	ค่าความแข็งแรงหลังเองจิงที่อุณหภูมิ 180°C (Marceau et al., 2013)..... 23
2.18	ค่าความแข็งแรงหลังผ่านกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก (Tan F.C and Said R.M., 2009) ..... 24

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับค่าความแข็ง ก.ค่าความแข็งต่ำ ข.ค่าความแข็งสูง (Tan F.C and Said R.M., 2009) .....	25
3.1	ภาพเลื่อยสายพาน .....	37
3.2	ขนาดมิติชิ้นงานและชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.3	เตาเผาไฟฟ้า .....	38
3.4	เครื่องบันทึกอุณหภูมิ หรือ Data Logger.....	38
3.5	โปรแกรมแสดงขั้นตอนการอบชุบ .....	39
3.6	แสดงการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 520°C.....	40
3.7	การนำชิ้นงานทดลองชุบในน้ำ .....	40
3.8	การตั้งค่าอุณหภูมิที่ 175°C.....	41
3.9	เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล Wilson รุ่น MJ.....	42
3.10	ไมโครสโคปทุลเมคเกอร์ (Tool Making Microscope) .....	42
3.11	ชิ้นงานที่ผ่านการวัดความแข็งแบบบริเนล.....	43
3.12	การวัดขนาดรอยกดของชิ้นงานทดลอง .....	43
3.13	เครื่องขัดกระดาษทรายแบบละเอียดและเครื่องขัดผ้าสักหลาด .....	45
3.14	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ยี่ห้อ OPTIKA .....	45
3.15	รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) Hitachi รุ่น S-3000N.....	46
3.16	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบโฟโตมิสชัน (Photoemission Electron Microscopy, PEEM) .....	46
3.17	การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย.....	47
3.18	การขัดชิ้นงานด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมครอน .....	47
3.19	ชิ้นงานขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร สูง 3 มิลลิเมตร .....	48
3.20	การขัดชิ้นงานด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมครอน .....	49
3.21	เครื่องอัลตราโซนิก ยี่ห้อ GT SONIC รุ่น GT SONIC-D2 .....	50
3.22	อะซิโตนและเอทานอล .....	50

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยกับระดับของปัจจัยหลักแต่ละปัจจัย ..... 55
4.2	กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจิง ..... 56
4.3	กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอจิง ..... 57
4.4	กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิเอจิงกับเวลาเอจิง ..... 58
4.5	กราฟการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนเหลือคองค้ำ ..... 66
4.6	กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดที่แต่ละระดับของอุณหภูมิอบละลาย ..... 67
4.7	กราฟพล็อตระหว่างค่าส่วนเหลือคองค้ำที่แต่ละระดับของเวลาเอจิง ..... 67
4.8	กราฟพล็อตระหว่างค่าส่วนเหลือคองค้ำที่แต่ละระดับของอุณหภูมิเอจิง ..... 68
4.9	กราฟพล็อตระหว่างค่าส่วนเหลือคองค้ำกับค่าประมาณจากโมเดล ..... 69
4.10	กราฟพล็อตระหว่างค่าส่วนเหลือคองค้ำกับลำดับการทดลอง ..... 69
4.11	โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X เอจิงที่อุณหภูมิ 175°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ..... 71
4.12	โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X เอจิงที่อุณหภูมิ 200°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ..... 72
4.13	โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X เอจิงที่อุณหภูมิ 225°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ..... 73
4.14	โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X เอจิงที่อุณหภูมิ 175°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ..... 74
4.15	โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X เอจิงที่อุณหภูมิ 200°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ..... 75
4.16	โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X เอจิงที่อุณหภูมิ 225°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ..... 76
4.17	โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X เอจิงที่อุณหภูมิ 175°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ..... 77
4.18	โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X เอจิงที่อุณหภูมิ 200°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ..... 78



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19	โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X เองจิงที่อุณหภูมิ 225°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ..... 79
4.20	กราฟค่าความแข็งแรงเฉื่อยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเองจิง ..... 84
4.21	กราฟค่าความแข็งแรงเฉื่อยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับ อุณหภูมิเองจิง ..... 85
4.22	กราฟค่าความแข็งแรงเฉื่อยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิเองจิงกับเวลาเองจิง ..... 87
4.23	โครงสร้างจุลภาคและจุดตรวจสอบการวิเคราะห์แบบ Point Analysis ..... 88
4.24	สเปกตรัม EDS จากการวิเคราะห์จุดตรวจสอบแบบ Point Analysis ..... 89
4.25	แสดงผลการวิเคราะห์ Elemental Mapping ธาตุที่ละลายในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม (ก) อะลูมิเนียม (ข) แมกนีเซียม (ค) ซิลิคอน (ง) โครเมียม (จ) แมงกานีส (ฉ) เหล็ก (ช) ทองแดง ..... 91
4.26	โครงสร้างจุลภาคและพื้นที่ที่ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีที่อุณหภูมิ ก. อุณหภูมิ 25°C ข. อุณหภูมิ 100°C ค. อุณหภูมิ 200°C ง. อุณหภูมิ 250°C จ. อุณหภูมิ 300°C ฉ. อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ..... 93
4.27	สเปกตรัม XPS ของชิ้นงานที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค X-PEEM ที่อุณหภูมิ ก. อุณหภูมิ 25°C ข. อุณหภูมิ 100°C ค. อุณหภูมิ 200°C ง. อุณหภูมิ 250°C จ. อุณหภูมิ 300°C ฉ. อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ..... 95
4.28	โครงสร้างจุลภาคจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค LEEM ที่อุณหภูมิ ก. อุณหภูมิ 25°C ข. อุณหภูมิ 100°C ค. อุณหภูมิ 200°C ง. อุณหภูมิ 250°C จ. อุณหภูมิ 300°C ฉ. อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ..... 96
4.29	โครงสร้างจุลภาคและพื้นที่ที่ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีที่อุณหภูมิ ก. อุณหภูมิ 25°C ข. อุณหภูมิ 100°C ค. อุณหภูมิ 200°C ง. อุณหภูมิ 250°C จ. อุณหภูมิ 300°C ฉ. อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ..... 99
4.30	สเปกตรัม XPS ของชิ้นงานที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค X-PEEM ที่อุณหภูมิ ก. อุณหภูมิ 25°C ข. อุณหภูมิ 100°C ค. อุณหภูมิ 200°C ง. อุณหภูมิ 250°C จ. อุณหภูมิ 300°C ฉ. อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ..... 100

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31	โครงสร้างจุลภาคจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค LEEM ที่อุณหภูมิ
	ก. อุณหภูมิ 25°C ข. อุณหภูมิ 100°C ค. อุณหภูมิ 200°C ง.อุณหภูมิ 250°C
	จ.อุณหภูมิ 300°C ฉ.อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง..... 102



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	อุณหภูมิอบละลาย
B	=	เวลาเอจจิง
C	=	อุณหภูมิเอจจิง
°C	=	องศาเซลเซียส
hr	=	ชั่วโมง
BHN	=	หน่วยความแข็งแบบบริเนล
$R^2$	=	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
$R^2_{adj}$	=	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแก้
$\hat{y}$	=	ค่าประมาณความแข็งจากโมเดล
$e$	=	ค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม
$\mu$	=	ผลเฉลี่ยทั้งหมด
$H_0$	=	สมมติฐานหลัก
$H_1$	=	สมมติฐานรอง
$\alpha$	=	ระดับนัยสำคัญของการทดสอบ

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง แปรรูปได้ง่าย มีสีสนสวยงาม ไม่เป็นพิษกับร่างกาย (Miller et al., 2000) จากคุณสมบัติที่กล่าวมาทำให้อะลูมิเนียมถูกนำมาใช้งานแทนโลหะอื่น แต่การนำอะลูมิเนียมไปใช้งานจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติส่วนผสมทางเคมีและคุณสมบัติเชิงกลเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน การใช้ความร้อนเป็นอีกวิธีที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน การใช้ความร้อนเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลเรียกว่า การชุบแข็งแบบตกผลึกหรือตกตะกอนหรือเรียกอีกอย่างว่าการบ่มแข็ง (Precipitation Hardening)

อะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 เป็นอะลูมิเนียมผสมที่มีคุณสมบัติโดดเด่นเรื่องการขึ้นรูปง่าย ทนการกัดกร่อน ความแข็งแรงปานกลาง และอยู่ในกลุ่มที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยความร้อนได้ (Gowrishankar et al., 2014) จากคุณสมบัติที่กล่าวมาทำให้อะลูมิเนียมเกรดนี้นิยมนำไปใช้งาน โดยทั่วไปการชุบแข็งแบบตกผลึกหรือตกตะกอนมีขั้นตอนดังนี้ (ASM Handbook., 1991)

1) Solution Treatment เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนทำให้เฟสของสารละลายของแข็งของโลหะผสมกลายเป็นเฟสเดียวหรือเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ในสภาพที่เป็นของแข็ง

2) Quenching เป็นขั้นตอนของการนำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำหรือน้ำมันทำให้ได้โครงสร้างที่มีธาตุผสมละลายอยู่ในปริมาณที่มากกว่าสภาพสมดุล (Supersaturated Solid Solution)

3) Age Hardening หรือเอจจิง (Aging) เป็นกระบวนการให้ความร้อนกับชิ้นงานอีกครั้งเพื่อทำให้เกิดการตกผลึกหรือตกตะกอนของสารประกอบของแข็งของธาตุโลหะผสมกระจายอยู่ในโครงสร้างพื้นฐานของอะลูมิเนียม จากคุณสมบัติและวิธีการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยความร้อน 3 ขั้นตอน ดังที่กล่าวมาข้างต้นทำให้มีงานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 รวมไปถึงการศึกษาอะลูมิเนียมในกลุ่ม 6xxx ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันเพื่อให้เข้าใจถึงปัจจัยและกลไกในการ

ปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนมากขึ้น ในปี ค.ศ. 2012 ได้มีงานวิจัยที่ศึกษาการชุบแข็งแบบตกผลึกหรือตกตะกอนโดยใช้อุณหภูมิอบละลายที่ 530°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นเอจิงที่อุณหภูมิ 145, 165, 185, 205 และ 225 °C และเวลาใช้เวลาเอจิงนานสูงสุด 6 ชม. พบว่าให้ค่าความแข็งสูงสุด 137 HV ที่อุณหภูมิ 220 °C นาน 1 ชม. และ ที่อุณหภูมิ 225 °C นาน 2 ชม. (Masoud et al., 2012) ปี ค.ศ. 2014 มีงานวิจัยได้ศึกษาผลของการทำเอจิงต่อค่าความแข็ง โดยในการศึกษาใช้อุณหภูมิอบละลายที่ 550°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเอจิงที่อุณหภูมิ 100, 150 และ 200°C จากการศึกษาพบว่าการเอจิงที่อุณหภูมิต่ำจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิสูง แต่การเอจิงต้องใช้เวลานาน (Gowrishankar et al., 2014) และในปี 2016 มีการศึกษาผลของการทำเอจิงต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค โดยใช้อุณหภูมิอบละลายที่ 530°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเอจิงที่อุณหภูมิ 220°C เป็นเวลา 0.5-8 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการทำเอจิงและให้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 2 ชั่วโมง (Meysam et al., 2016) จากงานวิจัยเห็นได้ว่ามีการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งปัจจัยที่นักวิจัยใช้ในการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิอบละลาย เวลาอบละลาย อุณหภูมิเอจิงและเวลาเอจิง โดยในการศึกษานักวิจัยได้เลือกใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมือนหรือแตกต่างกัน นั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการศึกษา นอกจากนี้การศึกษาก็กล่าวมาปัจจุบันได้มีการนำหลักการออกแบบการทดลองมาใช้ในการศึกษามากขึ้นเห็นได้จากการนำหลักการออกแบบการทดลองแบบ 2<sup>3</sup> แฟคทอเรียล มาใช้สร้างโมเดลประมาณค่าความแข็งโดยกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ คือ อุณหภูมิอบละลาย 500°C , 595°C อุณหภูมิเอจิงที่ 175°C , 200°C และเวลาเอจิง 2 , 8 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าการทดลองพบว่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัยมีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญและสร้างโมเดลประมาณค่าความแข็งเชิงเส้นตรงที่มีความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ  $\pm 6.73$  BHN (Boonjubut K and Wantang T., 2014) และการศึกษาของ Al-Obaisi ที่ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อโลหะผสมอะลูมิเนียมโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2<sup>3</sup> แฟคทอเรียล วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (Al-Obaisi et al., 2016) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ใช้เทคนิค Low Energy Electron Microscopy (LEEM) ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ในขณะที่มีการให้ความร้อนกับชิ้นงานทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคในขณะที่อะลูมิเนียมมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Sirichaiwetkul et al., 2019)

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกหรือตกตะกอนของโลหะอะลูมิเนียมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอบชุบมาากแล้วและได้มีการนำหลักสถิติมาใช้ในการออกแบบการทดลองและสร้าง โมเดลเพื่อประมาณค่าความแข็งหรือความแข็งแรง และในงานวิจัยถึงแม้ได้มีการศึกษาด้านโลหะวิทยาในส่วนของตรวจสอบ

โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแต่เท่าที่ศึกษางานวิจัยยังไม่ได้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของ โลหะผสม อะลูมิเนียม 6061 ขณะขึ้นงานได้รับความร้อนและบันทึกภาพแบบ In-Situ

ดังนั้น ควรมีการศึกษากระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกโดยใช้หลักสถิติในการ ออกแบบการทดลองและสร้างแบบจำลองโมเดลในลักษณะสมการเชิงเส้นตรง (Linear) ในการ ทำนายค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์โฟโตอิมิชชันอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (X-ray Photoemission Electron Microscopy, X-PEEM) เทคนิค Low Energy Electron Microscopy (LEEM) และบันทึกภาพแบบ In-Situ เพื่อให้ เห็นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลึก  $Mg_2Si$  ในโครงสร้าง พื้นฐานโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061
2. เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพในกระบวนการทำ Artificial Aging ของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061
3. เพื่อสร้างโมเดลประมาณค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยใช้แผนการ ทดลองเชิงสถิติ

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยประเภททดลอง (Experimental Study) ดังนั้น จึงกำหนดชนิดและ ระดับของปัจจัยสำหรับการทดลอง ซึ่งปัจจัยที่เป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variable) สำหรับการ ทดลองมี 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิอบละลาย (Solution Temperature, °C) เวลาเอจิง (Aging Time, ชม.) และอุณหภูมิเอจิง (Aging Temperature, °C) และทำการทดลองที่ 3 ระดับของแต่ละปัจจัย โดยกำหนดระดับปัจจัย ดังนี้

1. อุณหภูมิอบละลายกำหนดให้ใช้ 520°C , 540°C และ 560°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เวลาเอจิงกำหนดให้ใช้ 2, 8 และ 14 ชั่วโมง
3. อุณหภูมิเอจิงกำหนดให้ใช้ 175 °C, 200°C และ 225°C

ตัวแปรตามที่พิจารณาคือ ค่าความแข็ง (Hardness) เท่านั้น ในส่วนของการวิเคราะห์การ เปลี่ยนแปลงของผลึก  $Mg_2Si$  ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) กล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เทคนิค Energy

Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) เทคนิคเอกซ์เรย์โฟโตอิมิชชันอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (X-ray Photoemission Electron Microscopy, X-PEEM) และเทคนิค Low Energy Electron Microscopy (LEEM)



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม

โลหะผสมอะลูมิเนียมถูกนำไปใช้งานกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบินและอุตสาหกรรมรถยนต์ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมรถยนต์ที่ปัจจุบันจะต้องผลิตให้มีน้ำหนักเบาเพื่อให้สามารถประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงได้มากขึ้น โลหะผสมอะลูมิเนียมถูกนำมาผลิตเป็นส่วนประกอบของรถยนต์ เช่น ล้อ ประตู และอื่น ๆ ซึ่งนอกจากจะมีน้ำหนักเบาแล้วยังมีความแข็งแรงและความแข็งแรงสูง ขึ้นรูปได้ง่าย นอกจากนี้ อะลูมิเนียมยังนิยมนำมาผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์เครื่องใช้ภายในครัวเรือน และอีกมากมายเนื่องจากคุณสมบัติที่กล่าวมาแล้วประกอบกับสามารถแต่งสีให้กับอะลูมิเนียมเพิ่มความสวยงามได้อีกด้วย

โลหะผสมอะลูมิเนียมสามารถจำแนกได้ 2 ประเภทที่สำคัญคือ โลหะผสมประเภทขึ้นรูปเย็น (Wrought) และประเภทหล่อหลอม (Castable) ซึ่งโลหะผสมทั้งสองประเภทจะมีทั้งสามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ (Heat Treatable) และไม่สามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ (Non Heat Treatable)

##### 2.1.1 การกำกับชื่อของอะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมขึ้นรูป (Wrought Aluminum) และอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูป (Wrought Aluminum Alloy) ตามระบบ American Standard of Testing Materials (ASTM) ดังตารางที่ 2.1 เช่น หลักที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุดในการแสดงหมวดหมู่ของโลหะผสมใน 8 กลุ่ม เช่น 1xxx แทนหมวดโลหะอะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99.00 โดยน้ำหนัก

หลักที่สอง เป็นตัวเลขที่ใช้กำกับโลหะอะลูมิเนียมที่มีการผสมโลหะอื่นให้มีปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น 2024 ที่ประกอบด้วย 4.5Cu, 1.5Mg, 0.5Si และ 0.1Cr เมื่อเปลี่ยนเป็น 2218 จะประกอบด้วย 4.0Cu, 2.0Ni, 1.5Mg และ 0.2Si ซึ่งเป็นการผสม Ni แทน Cr

หลักที่สามและสี่ เป็นตัวเลขที่แสดงชนิดย่อยของโลหะผสมที่เป็นชนิดเดียวกัน แต่แสดงส่วนผสมที่แตกต่างกัน เช่น 2014 ที่ประกอบด้วย 4.4Cu, 0.8Si, 0.8Mn และ 0.4Mg เมื่อเปลี่ยนเป็น 2017 จะประกอบด้วย 4.0Cu, 0.8Si, 0.5Mn และ 0.1Cr

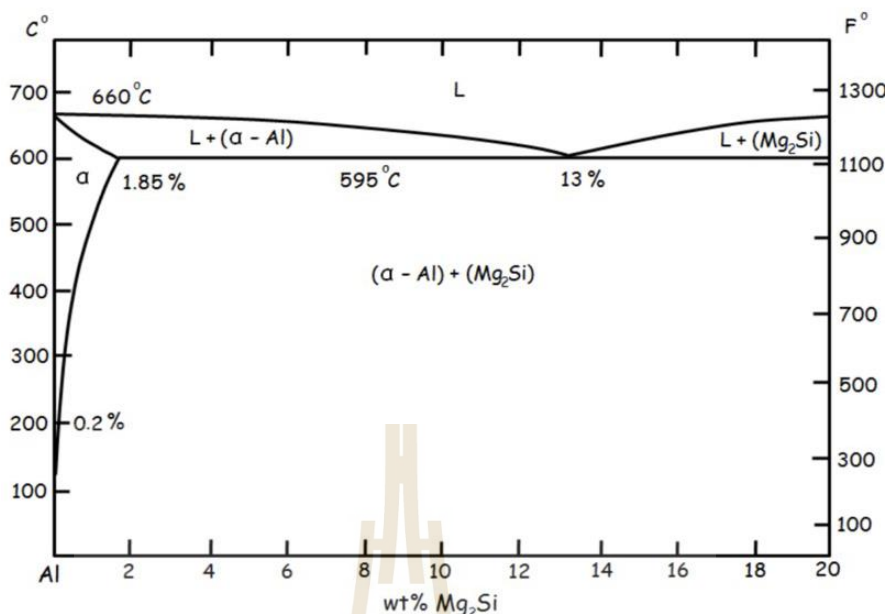


ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ (ระบบตัวเลข) กลุ่มอะลูมิเนียมขึ้นรูป

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1xxx	อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.00%
2xxx	ทองแดง (Copper, Cu)
3xxx	แมงกานีส (Manganese, Mn)
4xxx	ซิลิคอน (Silicon, Si)
5xxx	แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)
6xxx	แมกนีเซียม (Magnesium, Mg) และซิลิคอน (Silicon, Si)
7xxx	สังกะสี (Zinc, Zn)
8xxx	ธาตุอื่นๆ เช่น นิกเกิล (Nickel, Ni), ไทเทเนียม (Titanium, Ti), โครเมียม (Chromium, Cr), บิสมัท (Bismuth, Bi) และตะกั่ว (Lead, Pb)
9xxx	ยังไม่มีการใช้

## 2.2 โลหะอะลูมิเนียมผสม 6xxx

โลหะอะลูมิเนียมผสม 6xxx เป็นโลหะผสมที่สามารถนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนได้ ต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ขึ้นรูปง่าย มีความแข็งแรงปานกลาง และสามารถเชื่อมได้ (Boonchouytan et al, 2014) โลหะผสม 6xxx เป็นโลหะผสมที่มีส่วนผสมของแมกนีเซียมและซิลิคอน ทั้งนี้หากเติมธาตุแมกนีเซียมและซิลิคอนปริมาณสูงเกินไป โลหะผสมในสภาวะหลังการหล่อจะขาดสมบัติความเหนียว เนื่องจากแมกนีเซียมซิลิไซด์ ( $Mg_2Si$ ) และซิลิคอนมีสมบัติเปราะ ถ้าตกผลึกในเฟสแอลฟาอะลูมิเนียม  $\alpha-Al$  และมีลักษณะต่อเนื่องจะสูญเสียความเหนียว เมื่อพิจารณาโลหะผสมระหว่างอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมพบว่าโลหะผสมกลุ่มนี้สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอน (Precipitate Hardening) แตกต่างกับโลหะผสมอะลูมิเนียมและซิลิคอนที่ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนได้ แต่กลับมีสมบัติด้านการหล่อที่ดี ในขณะที่โลหะผสมแมกนีเซียม-ซิลิคอนนั้น จะเกิดการรวมตัวกันเป็นสารประกอบเชิงโลหะ  $Mg_2Si$  ที่ 37 % Si ทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียมแมกนีเซียม-ซิลิคอนมีสมบัติด้านการหล่อและสามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนได้ แต่ในกรณีโลหะผสม Al-Mg-Si รวมตัวกัน จะไม่ปรากฏสารประกอบเชิงโลหะของทั้งสามธาตุรวมกัน จะมีเพียงสารประกอบเชิงโลหะ  $Mg_2Si$  เท่านั้น ดังรูปที่ 2.1



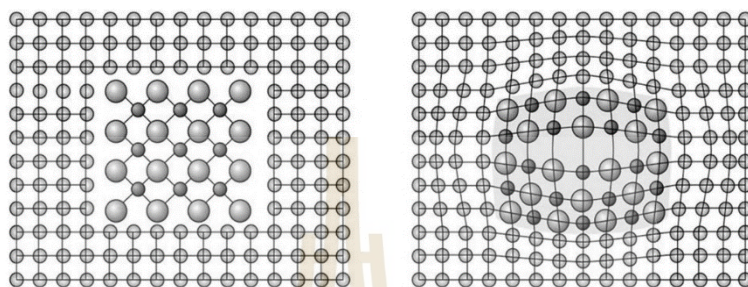
รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลโลหะผสมอะลูมิเนียม – แมกนีเซียม – ซิลิกอน (วิจิตร พงษ์บัณฑิต, 2542)

จากแผนภูมิสมดุลภาวะระบบกึ่งสองธาตุ (Quasi-Binary-System) ระหว่างอะลูมิเนียม และ Mg<sub>2</sub>Si ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงโลหะประเภท Congruent มีคุณสมบัติเหมือนโลหะบริสุทธิ์ดังรูป 2.1 จะเห็นว่าเฟส α-Al ยอมให้ Mg<sub>2</sub>Si ละลายได้สูงสุด 1.85% ที่อุณหภูมิ 595°C และให้ปฏิกิริยายูเทคติกที่ส่วนผสม Mg<sub>2</sub>Si 13% ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นแต่เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 595°C อัตราละลายของ Mg<sub>2</sub>Si ในเฟส α-Al จะลดลงเหลือ 0.2% ที่อุณหภูมิ 200°C ลักษณะดังกล่าวจึงทำให้โลหะอะลูมิเนียมผสม xxx สามารถนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงได้

### 2.3 การชุบแข็งแบบตกผลึกหรือตกตะกอน (Precipitation Hardening)

การชุบแข็งแบบตกผลึกหรือตกตะกอน (Precipitation Hardening) เป็นกระบวนการที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงเฟสที่เกิดขึ้นในสถานะของแข็ง โดยมีการเกิดเฟสของแข็งที่เป็นอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเมตร (Barbosa et al., 2006) โดยตะกอนที่เกิดขึ้นมีแรงยึดเหนี่ยวกับเนื้อพื้นที่มีความอ่อนเหนียวทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การตกตะกอนแล้วมีแรงยึดเหนี่ยวกับเนื้อพื้นหรือเรียกว่าโคเฮเรนต์พรีซิพิต (Coherent Precipitate) นั้นจะเพิ่มความแข็งแรงได้โดยหากพิจารณาที่รูป 2.2 (ก) จะเห็นว่าโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดขึ้นบริเวณศูนย์กลางของโครงสร้างเนื้อพื้นเป็นอิสระจากกันหรือไม่มีความยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างผลึก (Non-Coherent) ดังนั้น ขณะเกิดการ

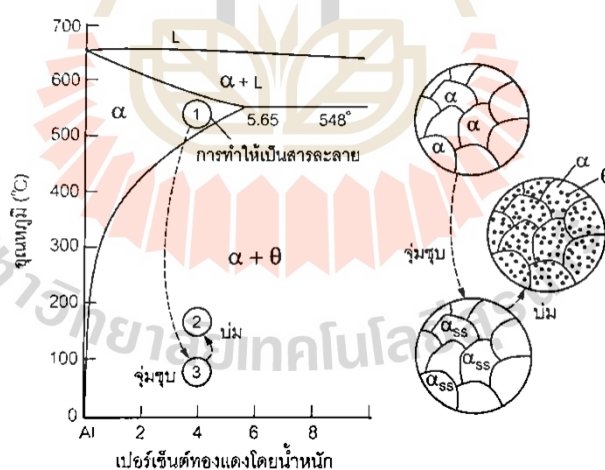
เคลื่อนไหวของ Slip Plane และดิสโลเคชัน (Dislocation) ทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงน้อยแต่หากเนื้อพื้นกับเฟสใหม่ที่เกิดจากการตกผลึกมีแรงยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) เมื่อมีแรงมากระทำแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างทั้งสองจะทำหน้าที่ขัดขวางการเกิดดิสโลเคชันส่งผลให้โลหะผสมมีความแข็งแรงขึ้น



รูปที่ 2.2 (ก) การตกตะกอนที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกับแมทริกซ์ (Non-Coherent Precipitation)

(ข) การตกตะกอนแบบมีแรงยึดเหนี่ยวกับแมทริกซ์ (Coherent Precipitation)

(ณรงค์ศักดิ์ ธรรม โชติ, 2558)



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการอบชุบของแผนภาพสมดุลอะลูมิเนียม-ทองแดง (ณรงค์ศักดิ์ ธรรม โชติ, 2558)

การชุบแข็งแบบตกผลึกหรือตกตะกอน (Precipitation Hardening) แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังตัวอย่างการพิจารณาจากแผนภาพสมดุลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ในรูปที่ 2.3 ซึ่งมีทองแดงผสมอยู่ 4% วิธีการอบชุบทั้ง 3 ขั้นตอนมี ดังนี้

1) Solution Treatment เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนทำให้เฟสของสารละลายของแข็งของโลหะผสมกลายเป็นเฟสเดียวหรือเป็นเนื้อเดียวกัน ( $\alpha$ ) ในสภาพที่เป็นของแข็งดังแสดงในตำแหน่งที่ 1 ในรูป 2.3

2) Quenching เป็นขั้นตอนของการนำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำหรือน้ำมันดังแสดงในตำแหน่งที่ 3 ในรูป 2.3 ทำให้ได้โครงสร้างที่มีธาตุผสมละลายอยู่ในปริมาณที่มากกว่าสภาพสมดุล (Supersaturated Solid Solution)

3) Age Hardening หรือเอจิง (Aging) เป็นกระบวนการให้ความร้อนกับชิ้นงานอีกครั้งดังแสดงในตำแหน่งที่ 2 ในรูป 2.3 เพื่อทำให้เกิดการตกผลึกหรือตกตะกอนของสารประกอบของแข็งของธาตุโลหะผสมกระจายอยู่ในโครงสร้างพื้นฐานของอะลูมิเนียม ( $\alpha + \theta$  ( $Al_2Cu$ )) จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าการทำ Solution Treatment นั้นอุณหภูมิที่ใช้ควรอยู่เหนือเส้น Solvus และต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติกที่อุณหภูมิ  $548^{\circ}C$  ดังรูปที่ 2.3

## 2.4 การจำแนกประเภทของเฟสที่เกิดในโลหะอะลูมิเนียมผสม

การจำแนกประเภทของเฟสที่เกิดในโลหะอะลูมิเนียมผสมโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

### 2.4.1 Intermetallic Particles ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

1) Constituent Particles เป็นเฟสที่เกิดขึ้นในวัสดุโลหะภายหลังจากสิ้นสุดการแข็งตัวของเนื้อวัสดุหรือภายหลังจากน้ำโลหะเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งหรือภายหลังจากสิ้นสุดงานหล่อเทกลไกการเกิดการสร้างเฟสเหล่านี้เนื่องจากส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมเหล่านี้มีความสามารถที่จะละลายในปริมาณที่จำกัด โดยขนาดการโตและรูปร่างของเฟสเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการแข็งตัวของน้ำโลหะ การหล่อเทเข้าแบบทรายจะมีความเร็วในการแข็งตัวช้ากว่าการหล่อเทเข้าแบบโลหะ การหล่อเทเข้าแบบทรายจะมีความเร็วในการแข็งตัวช้ากว่าการหล่อเทเข้าแบบโลหะและการทำให้เฟสเหล่านี้มีขนาดเล็กโดยการนำชิ้นงานที่หล่อไปทำการขึ้นรูป เช่น การอัดกระแทก เป็นต้น

2) Dispersoid Particles เป็นเฟสที่เกิดขึ้นภายในวัสดุโลหะขณะนำชิ้นงานไปทำการอบที่อุณหภูมิสูง ตัวอย่างเช่นในอะลูมิเนียม 7000 ที่มีธาตุจำพวก Cr, Mn และ Zr ซึ่งมีการละลายที่จำกัด ดังนั้นแมงกานีสจะเกิดการรวมตัวกับธาตุอื่นเมื่อชิ้นงานเย็นตัวจากการหลอมหรือภายหลัง Solidification

2.4.2 Precipitate Particles เป็นเฟสที่เกิดขึ้นภายหลังจากการละลายของเฟสต่าง ๆ ในช่วงการทำ Solution Heat Treatment และลดอุณหภูมิชิ้นงานลงอย่างรวดเร็วโดยการลดอุณหภูมิ

ลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะหุบชิ้นงานลงในน้ำหรือน้ำมันเพื่อให้เกิดโครงสร้างที่มีความอิ่มตัวย่างยิ่งยวด (Supersaturated Solid Solution) โดยในการลดอุณหภูมิของชิ้นงานลงอย่างรวดเร็วอาจเกิดปฏิกิริยาการสร้างของ Precipitate ในเนื้อวัสดุโลหะในช่วงนี้และสามารถแบ่งประเภทของ Precipitates ได้ 3 ชนิดคือ

1) GP/GPB Zone เป็นพรีซิพิตเตตช่วงเริ่มต้นหรืออาจเรียกว่า การรวมกลุ่มอะตอมที่ละลายในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม (Clusters) ซึ่งมีขนาดเล็กและมีโครงสร้างเหมือนกับโครงสร้างของเนื้อวัสดุโลหะผสม โดยจุดที่พบ GP/GPB Zone จะพบมากในบริเวณที่มีช่องว่าง (Vacancy) ของโครงสร้างซึ่งการกระจายตัวของ GP/GPB Zone เป็นแบบ Homogeneous หรือแบบ Heterogeneous ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของช่องว่างในโครงสร้างที่เกิดขึ้นขณะทำการชุบแข็งหรือลดอุณหภูมิของวัสดุโลหะผสมหลังจากการทำ Solution Heat Treatment

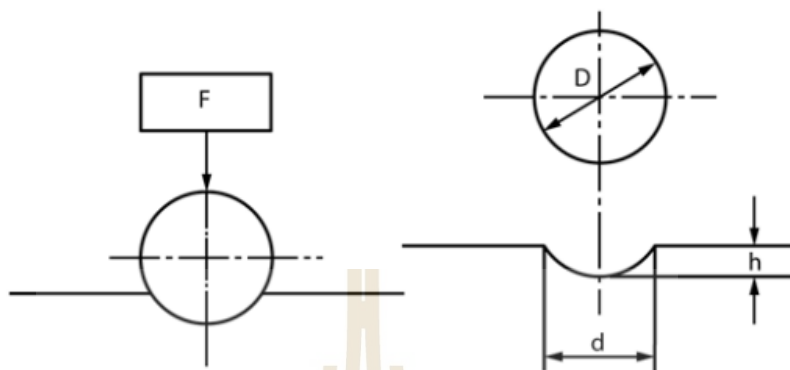
2) Metastable Precipitate เป็นพรีซิพิตเตตที่มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกับโครงสร้างของเนื้อวัสดุโลหะผสมและมีความเป็น Coherent อย่างน้อย 1 อินเตอร์เฟสมีดิสโลเคชันบนอินเตอร์เฟส ทำให้ Coherent ไม่สมบูรณ์มีการกระจายตัวของ GP/GPB Zone และมีการสร้างดิสโลเคชันขึ้น

3) Equilibrium Particles เป็นพรีซิพิตเตตที่มีขนาดใหญ่ เกิดมาจาก Metastable Precipitates มีการสร้างดิสโลเคชันและอินเตอร์เฟสขึ้นบริเวณขอบเกรนและขอบเกรนย่อย โดยอินเตอร์เฟสจะเกิดขึ้นระหว่างอนุภาคนาขนาดเล็กและโครงสร้างของเนื้อวัสดุโลหะผสม

## 2.5 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดลักษณะหับบอล (Ball Indenter) ทำจากเหล็กกล้าและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1, 2.5, 5 และ 10 มิลลิเมตร ขึ้นกับการทดสอบ ซึ่งการทดสอบความแข็งแบบบริเนลได้ถูกเสนอขึ้นโดย J.A. Brinell ในปี ค.ศ. 1900 โดยมีหลักการทดสอบ คือ การใช้หัวกด ที่มีลักษณะเป็นหับบอลกดลงบนชิ้นงานจนทำให้เกิดรอยกด (Impression) ลักษณะคล้ายครึ่งทรงกลมเนื่องจากวิธีการทดสอบนี้จะทำการแปรผลค่าความแข็งจากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด ดังนั้นรอยกดที่เกิดขึ้นไม่ควรมีลักษณะบิดเบี้ยวหรือลึกเกินไปจนอาจมีผลทำให้วัดค่าความแข็งผิดพลาดได้ เช่น เหล็กกล้าจะใช้น้ำหนักกด 3,000 กิโลกรัม สำหรับโลหะที่มีความแข็งรองลงไป เช่น ทองเหลือง หรือ อะลูมิเนียม จะใช้ค่าน้ำหนักกดลดลงมาคือ 2,000, 1,000 หรือ 500 กิโลกรัมตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM-E10 (ASTM International, 2018) การทดสอบความแข็งแบบบริเนลจะอาศัยการกดของหัวกดทรง

กลมที่มีลักษณะเป็นหัวบอล ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  ลงบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด  $F$  ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หลักการกดหัวบอลและพื้นผิวชิ้นงานทดสอบ (ASTM International, 2018)

โดยคงค่าแรงกดเป็นระยะเวลาจะขึ้นกับ โลหะที่นำมาทดสอบทำให้เกิดรอยกดที่มีความลึก  $h$  และมีเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดเฉลี่ย  $d$  ซึ่งได้จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดในแนวตั้งฉากกันสองค่าแล้วหาค่าเฉลี่ยค่าความแข็งคำนวณได้จากแรงกดหารด้วยพื้นที่รอยกดคือ

$$\text{Hardness} = \frac{2F}{\pi D \left[ D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]}$$

แต่ในทางปฏิบัตินั้นไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็งจากสูตรคำนวณ เพราะสามารถนำความยาวเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด ( $d$ ) และขนาดแรงกดที่ใช้เทียบกับตารางค่าความแข็งที่ได้คำนวณไว้แล้วได้โดยตรง

## 2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลักการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกครั้งนี้ใช้เทคนิคในการตรวจสอบ ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) เทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิมิชันอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (X-ray Photoemission Electron Microscopy, X-PEEM) และ เทคนิค Low-Energy Electron Microscopy (LEEM)

### 2.6.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเป็นกล้องที่ใช้แสงวิ่งผ่านเลนส์ส่องไปที่ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบและสะท้อนกลับมาทำให้เห็นเป็นรูปภาพ 2 มิติ โดยชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบควรมีขนาดที่สามารถวางบนแท่นวางชิ้นงานและชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบต้องมีการขัดเงา (Polishing) ด้วยผงขัดอะลูมินาหรือผงเพชรและการกัดให้เกิดรอย (Etching)

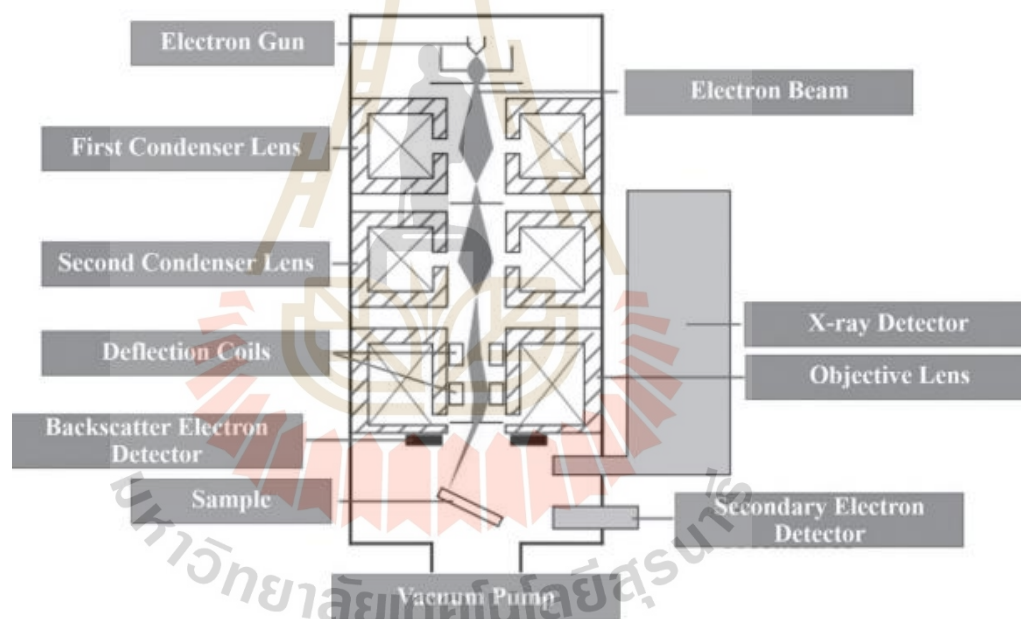


รูปที่ 2.5 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Optical Microscope (OM) ยี่ห้อ OPTIKA

### 2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุให้ดีกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง กล่าวคือ สามารถแยกแยะรายละเอียดของภาพได้มากกว่า มีกำลังขยายมากกว่ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบใช้แสง ซึ่งมีกำลังขยายตั้งแต่ 20-30,000 เท่า ทำให้การตรวจสอบด้วยวิธีนี้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยเพื่อตรวจสอบโครงสร้างของวัตถุ การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะใช้อิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงและใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทนเลนส์กระจกเพื่อลดขนาดลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลงและส่งลงบนผิวชิ้นงาน และมีขดลวดควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน (Scan Coil) ให้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนชิ้นงาน เมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบลงบนชิ้นงานตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของธาตุในชิ้นงานและปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนออกมา ทำให้สามารถตรวจสอบลักษณะผิวและวิเคราะห์ธาตุได้

โดยอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เกิดขึ้นจะใช้อุปกรณ์ตรวจจับ (Detector) เพื่อตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอนและแปลงสัญญาณเป็นภาพ สัญญาณภาพที่เกิดขึ้นได้แก่ สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI) สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image, BEI) และสัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-Ray Image, XRI) ทั้งนี้ขึ้นกับสิ่งที่ต้องการตรวจสอบผลที่ได้จากการใช้กล้อง SEM ตรวจสอบคือ ภาพของวัตถุที่กำลังขยายสูงและสามารถแยกแยะรายละเอียดของภาพได้ถึง 100 นาโนเมตร การวิเคราะห์ด้วยกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถตรวจสอบได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ ในการตรวจสอบชิ้นงานหรือตัวอย่างด้วยกล้อง SEM ต้องเตรียมชิ้นงานเพื่อให้สามารถวางบนแท่นวางตัวอย่าง (Sample Stage) แท่นวางตัวอย่างมีหลายรูปแบบและขนาดขึ้นกับยี่ห้อและรุ่นของเครื่อง ซึ่งโดยทั่วไปแท่นวางสามารถเคลื่อนที่ได้ 5 แกน ได้แก่ แกน X, Y, Z เอียง และหมุน



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

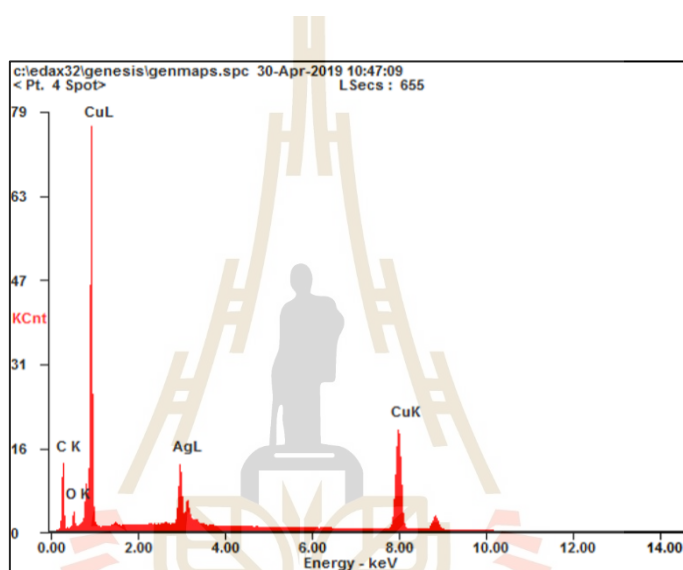
[https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/299\\_77.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/299_77.pdf) (สืบค้นเมื่อ 2 มิถุนายน 2563)

### 2.6.3 Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)

เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งปัจจุบันมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์ธาตุทั้งด้านวัสดุศาสตร์ ด้านชีวภาพ ภายภาพ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชิ้นส่วน



ขนาดเล็ก การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยหลักการของ EDS เมื่อชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการศึกษาถูกชนด้วยลำอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนของตัวอย่างให้หลุดออกจากอะตอมแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ดังนั้น เพื่อรักษาเสถียรภาพอิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรชั้นถัดไปจะเข้ามาแทนที่และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ (X-ray) ซึ่งเรียกว่ารังสีเอกซ์แบบแคแรกเทอริสติก (Characteristic X-ray) โดยพลังงานของรังสีเอกซ์ชนิดนี้มีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุ จากนั้นรังสีเอกซ์จะถูกประเมินและรายงานผลเป็นค่าสเปกตรัมรังสีเอกซ์ ดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS

<http://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/EDS.pdf> (สืบค้นเมื่อ 2 มิถุนายน 2563)

ซึ่งสเปกตรัม EDS ที่ได้ นั้น จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณของรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้และพลังงานของรังสีเอกซ์ในหน่วยของ keV ซึ่งพีคที่เกิดขึ้นจะบ่งบอกธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างที่ต้องการศึกษา นอกจากเทคนิค EDS จะสามารถวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพ (Qualitative Element Analysis) ว่ามีธาตุชนิดใดประกอบแล้วยังสามารถวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณ (Quantitative Element Analysis) ซึ่งสามารถบอก % ของธาตุวิเคราะห์ที่มีอยู่ได้ดังตารางที่ 2.2

## ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS

Element	Wt%	At%
CK	25.05	62.70
OK	03.19	05.99
AgL	13.64	03.80
CuK	58.13	27.51

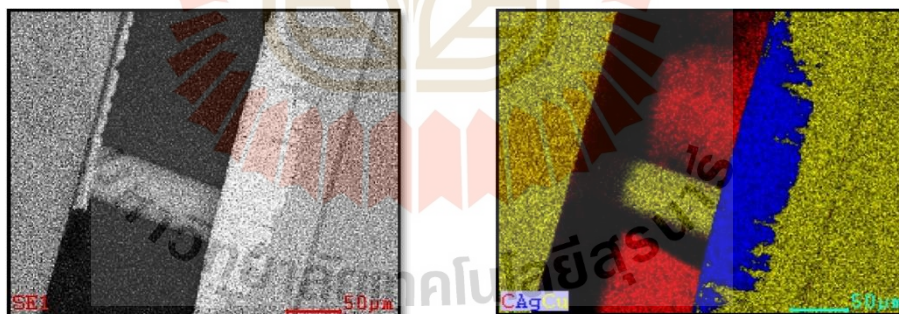
<http://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/EDS.pdf> (สืบค้นเมื่อ 2 มิถุนายน 2563)

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDS สามารถวิเคราะห์ได้ 3 วิธี ดังนี้ คือ

1. Point Analysis เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ค่าของอิเล็กตรอนกระตบอยู่หนึ่งบนพื้นผิวของตัวอย่างตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะจุดที่ต้องการ

2. Line Scan Analysis เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดตามแนวนบนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจ ซึ่งนิยมใช้ในกรณีหาของเขตของรอยต่อหรือเฟสของ โครงสร้าง

3. Mapping Analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นภาพแสดงลักษณะการกระจายของธาตุนบนพื้นที่นั้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การวิเคราะห์การกระจายตัวธาตุแบบ Mapping Analysis

<http://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/EDS.pdf> (สืบค้นเมื่อ 2 มิถุนายน 2563)

โดยในการทดลองครั้งนี้เลือกใช้การวิเคราะห์แบบ Point Analysis และ Mapping Analysis เพื่อวิเคราะห์จุดที่ต้องการตรวจสอบและลักษณะการกระจายของธาตุนบนพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบ

## 2.7 พลังงานแสงซินโครตรอน (Synchrotron Light)

แสงซินโครตรอนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดถึงเอกซ์เรย์ด้วยคุณสมบัติที่กล่าวมาจึงทำให้มีการนำแสงซินโครตรอนไปใช้ประโยชน์ในงานวิจัย โดยในที่นี้จะกล่าวถึงการนำแสงซินโครตรอนมาใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและตรวจสอบธาตุที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกซึ่งเป็นการทดลองที่เกิดขึ้นในการทดลองครั้งนี้ โดยเลือกเทคนิคที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ เอกซ์เรย์โฟโตอิมิชชันอิล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (X-PEEM) และ เทคนิค Low-Energy Electron Microscopy (LEEM) ซึ่งตั้งอยู่บริเวณสถานี 3.2b ในสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงสถานีทดลอง BL3.2 : PEEM ที่ใช้ในการทดสอบ โดยใช้เทคนิค X-PEEM และ LEEM

### 2.7.1 โฟโตอิล็กตรอนอิมิชชันสเปกโตรสโคปี (Photoelectron Emission Spectroscopy; PES)

เป็นเทคนิคเพื่อใช้วิเคราะห์และศึกษาคุณสมบัติบริเวณพื้นผิวของวัสดุโดยอาศัยหลักการจากปรากฏการณ์โฟโตอิล็กตริก (Photoelectric Effect) โดยฉายแสงที่มีค่าพลังงานหรือความยาวคลื่นค่าเดียว (Mono-Energetic) โดยทั่วไปแสงอยู่ในย่านของ UV ถึง X-ray ลงบนพื้นผิวของวัสดุหรือตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ หากแสงที่ฉายมีค่าพลังงานสูงกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy: BE) ของอิล็กตรอนในอะตอมที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่าง อิล็กตรอนจะถูกกระตุ้นให้หลุดออกจากอะตอมและพื้นผิวของวัสดุจากปรากฏการณ์โฟโตอิล็กตริก อิล็กตรอนที่

หลุดออกมาเรียกว่าโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจวัดค่าพลังงานจลน์ (Kinetic Energy : KE) ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Electron Energy Analyser โดยค่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่วัดได้มีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนดังสมการ

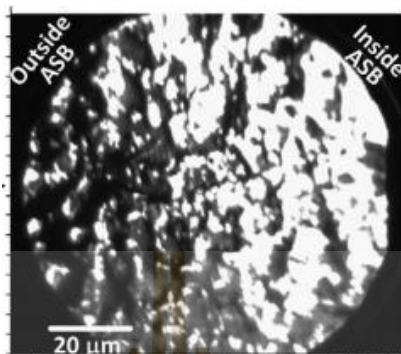
$$KE = h\nu - BE + e\Phi$$

$h\nu$  คือค่าพลังงานของแสงที่ใช้และ  $e\Phi$  คือค่า Work Function ของ Electron Energy Analyser โดยที่เทคนิคในกลุ่ม PES สามารถแยกย่อยออกได้ตามค่าพลังงานของแสงที่ใช้ในการกระตุ้นและวิเคราะห์พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอน โดยในการทำวิจัยครั้งนี้เลือกใช้เทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

### 2.7.2 เอกซ์เรย์โฟโตมิชชันอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวสูง โดยการวิเคราะห์จากโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดจากตัวอย่างที่ทดสอบโดยการยิงรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวลงบนชิ้นงานทำให้เกิดการปลดปล่อยโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) และจากสมการ  $KE = h\nu - BE + e\Phi$  ทำให้ในการตรวจสอบทำให้ทราบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน (Binding Energy, BE) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของอิเล็กตรอนในแต่ละระดับชั้นพลังงานของอะตอมของธาตุแต่ละธาตุ ค่าพลังงานที่ได้จากการวัดคือข้อมูลในการบ่งชี้ชนิดของอะตอมและปริมาณของอิเล็กตรอนที่มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเป็นข้อมูลในการบ่งบอกปริมาณของธาตุนั้นที่เป็นองค์ประกอบของสาร โดยเทคนิคนี้เป็นเทคนิคต่างจากการวิเคราะห์ธาตุทั่วไป โดยเทคนิค XPS ให้ข้อมูลเชิงเคมีคือค่าเลขออกซิเดชันหรือเลขวาเลนซี (Oxidation Number หรือ Valency Number) การที่เทคนิค XPS สามารถให้ข้อมูลเชิงเคมีได้นั้นเนื่องจากการเลื่อนของค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนเมื่ออะตอมข้างเคียงมีความต่างกัน (Chemical Shift) ซึ่งข้อเด่นของเทคนิคนี้คือ ข้อมูลที่ได้จากการวัดเป็นข้อมูลของอะตอมที่อยู่บนผิวและบริเวณใกล้ผิวของสารตัวอย่าง ดังนั้นเทคนิค XPS จึงเป็นเทคนิคสำหรับการตรวจวิเคราะห์ผิวของวัสดุหรือฟิล์มที่มีความบางมากและเหมาะที่จะใช้วิเคราะห์วัสดุที่ระดับลึกไม่เกิน 10 นาโนเมตร จากนั้น นำโฟโตอิเล็กตรอนมาเร่งให้เคลื่อนที่ผ่านเลนส์และโฟกัสลงบนฉากและได้ภาพพื้นผิวภาพที่เกิดขึ้นเกิดจากความแตกต่างของโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานทดสอบ ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเกิดขึ้นเนื่องจาก 1) ลักษณะรูปทรงบนพื้นผิว 2) ปริมาณการดูดกลืน

แสงบนแต่ละบริเวณของพื้นผิวที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถศึกษาชนิดและสถานะทางเคมีขององค์ประกอบรวมถึงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพรอบอะตอมของธาตุที่สนใจบนบริเวณนั้นได้

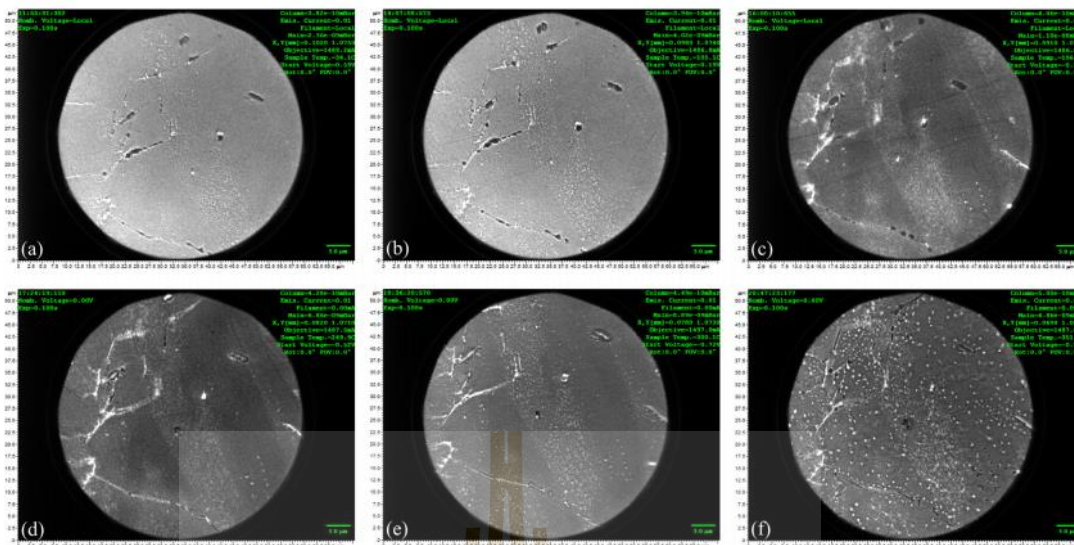


รูปที่ 2.10 ตัวอย่างภาพที่ตรวจสอบ X-PEEM (Adesola et al., 2013)

### 2.7.3 เทคนิค Low-Energy Electron Microscopy (LEEM)

เทคนิค LEEM เป็นเทคนิคที่สามารถถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างได้ด้วยความละเอียดในระดับนาโนเมตร ซึ่งหลักการทำงานของ LEEM เป็นการใช้อิเล็กตรอนกระตุ้นผิวหน้าชิ้นงานตัวอย่างเพื่อนำไปสร้างเป็นภาพด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า เทคนิคนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการศึกษาหลายด้าน เช่น ด้านวัสดุศาสตร์ และวิทยาการพื้นผิว นอกจากนี้ LEEM ยังสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคหรือเฟสของโลหะในขณะที่ให้ความร้อนกับชิ้นงานดังรูป 2.11 โดยมีการวิเคราะห์หลัก 2 โหมด คือ

1. Imaging Mode คือ การดูภาพเหมือนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั่วไป
2. Diffraction Mode คือ การดูโครงสร้างที่เป็นผลึกของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการถ่ายภาพด้วยเทคนิค LEEM อะลูมิเนียม 6063 (Sirichaiwetkul et al., 2019)

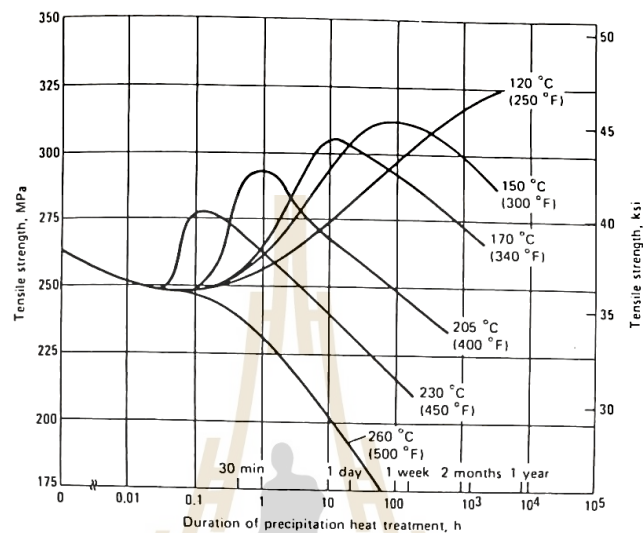
## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียมในกลุ่มที่มีความสามารถในการเพิ่มคุณสมบัติทางกลด้วยความร้อนหรือที่เรียกว่า การอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกหรือตกตะกอน (Precipitation Hardening) โดยในงานวิจัยหรือการศึกษานั้นส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการทั้ง 3 ขั้นตอน คือ

- 1) Solution Treatment หรือการอบละลาย
- 2) Quenching
- 3) Age Hardening หรือเอจจิง (Aging)

จากขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการทำอบละลาย (Solution treatment) นั้นอุณหภูมิที่ใช้ควรอยู่เหนือเส้น Solvus และต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติกของโลหะผสม (ASM Handbook., 1991) ในช่วงอุณหภูมินี้โลหะผสมจะมีเพียงเฟสเดียวคือ  $\alpha$  (Homogenous Phase) โดยที่ผลึกของสารประกอบของแข็งหรือเฟส  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) จะเริ่มละลายเป็นเฟส  $\alpha$  แต่ระยะเวลาที่จะทำให้เฟส  $\beta$  หมดไปอย่างสมบูรณ์นั้นต้องอาศัยระยะเวลาานเพราะการเคลื่อนที่ของอะตอมจะเป็นไปลักษณะการแพร่ (Pogatscher et al., 2011) แม้ว่าการใช้อุณหภูมิอบสูงจะสามารถเร่งปฏิกิริยาของการแพร่ได้ แต่การอบละลายโดยใช้อุณหภูมิสูงใกล้อุณหภูมิยูเทคติกหรือสูงกว่าจะไม่เป็นผลดีเนื่องจากจะมีสารละลายของเหลวร่วมกับสารละลายของแข็งและผลที่ตามมาคือเมื่อเย็นตัวลงจะเกิดเป็นโครงสร้างเตี้ยคติดอยู่บริเวณขอบเกรนทำให้โลหะผสมเปราะ (Brittle) ฉะนั้น ในช่วงนี้ควรควบคุม

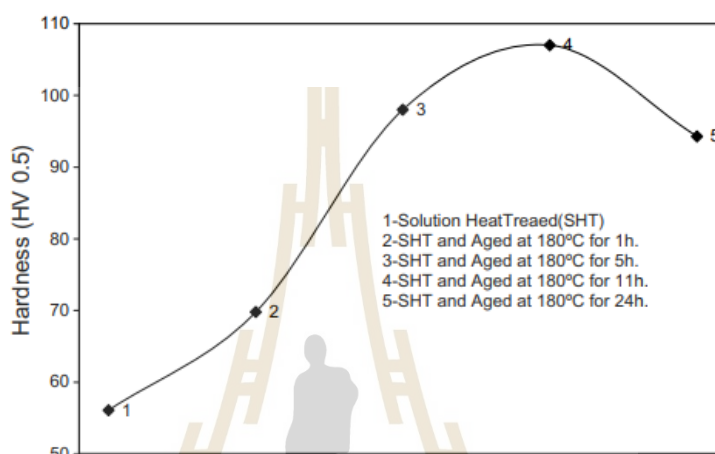
อุณหภูมิและเวลาเพื่อให้ได้เฟส  $\alpha$  เพียงเฟสเดียวเท่านั้น และในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการคือ การทำ Age Hardening หรือเอจจิง (Aging) นั้นสมบัติทางกลที่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาดัง รูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความแข็งแรงหลังการทำเอจจิงที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน (ASM Handbook., 1991)

จากที่กล่าวมาเบื้องต้นทำให้มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค ในกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกหรือตกตะกอน (Precipitation Hardening) จากอดีตจนถึงปัจจุบัน เช่น ในปี 2010 ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้อุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลายที่แตกต่างกัน โดยศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม 6063 และแบ่งชิ้นงานทดสอบออกเป็นสองชุด ชุดแรกใช้อุณหภูมิอบละลายที่  $490 \pm 5^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชุดที่สองใช้อุณหภูมิอบละลายที่  $530 \pm 5^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งสองชุดใช้อุณหภูมิเอจจิงที่  $140^{\circ}\text{C}$ ,  $180^{\circ}\text{C}$  และ  $220^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2, 4, 6, 8, 11, 12, 14, 16, 18 และ 20 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าการใช้อุณหภูมิเอจจิงที่  $180^{\circ}\text{C}$  ให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าการเอจจิงที่อุณหภูมิ  $140^{\circ}\text{C}$  และ  $220^{\circ}\text{C}$  โดยค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามเวลาและให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด 100HV ที่ 14 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามการเอจจิงที่อุณหภูมิ  $140^{\circ}\text{C}$  พบว่าสามารถให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าการเอจจิงที่อุณหภูมิ  $180^{\circ}\text{C}$  ได้แต่การเอจจิงนั้นต้องใช้เวลาจนถึง 17 ชั่วโมง และจากการศึกษาพบว่านอกจากค่าความแข็งแรงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้เอจจิงแล้วยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอบละลายอีกด้วย โดยการอบละลายที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าการอบละลายที่อุณหภูมิต่ำ (Meyveci et al., 2010)

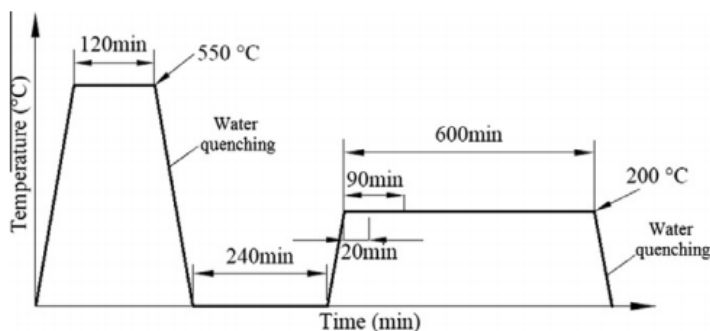
จากงานวิจัยดังกล่าวจะเห็นว่านอกจากกำหนดค่าให้ใช้อุณหภูมิอบละลายที่แตกต่างกันยังได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการกำหนดอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเอจิงที่แตกต่างกัน โดยในปี 2009 ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยกำหนดอุณหภูมิอบละลายที่  $530^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิเอจิงที่  $180^{\circ}\text{C}$  ในเวลาที่แตกต่างกัน 1, 5, 11 และ 24 ชั่วโมง ดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 ค่าความแข็งหลังเอจิงที่อุณหภูมิ  $180^{\circ}\text{C}$  (Demir and Gunduz ., 2009)

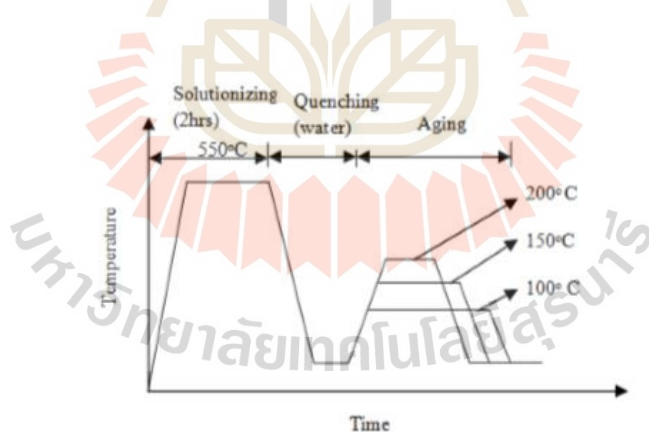
จากการศึกษาพบว่าที่ 11 ชั่วโมงให้ค่าความแข็งสูงสุด โดยการเกิดเฟส  $\beta$  ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) มีลำดับการเปลี่ยนแปลงดังนี้  $\text{SSS} \rightarrow \text{GP Zone} \rightarrow \beta''$  (needle shaped)  $\rightarrow \beta'$  (rod-shaped)  $\rightarrow \beta$  ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) (Demir and Gunduz ., 2009) ในปีเดียวกันมีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็ง โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 และกำหนดค่าให้ใช้อุณหภูมิอบละลาย  $500^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเอจิงที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  ที่เวลาแตกต่างกันคือ 0.5, 1.5, 2, 18 และ 48 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  ค่าความแข็งที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ เอจิง โดยให้ค่าความแข็งสูงสุดที่เวลา 2 ชั่วโมง และค่าความแข็งลดลงเมื่อใช้เวลาเอจิง 18 และ 48 ชั่วโมง และในปีเดียวกันได้ศึกษาโดยใช้อุณหภูมิอบละลายที่  $550^{\circ}\text{C}$  และเอจิงที่  $200^{\circ}\text{C}$  ในเวลาที่ต่างกันคือ ดังรูป 2.14 จากการศึกษาพบว่าให้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 600 นาที่ ที่ (Ozturk et al., 2010)





รูปที่ 2.14 ค่าความแข็งหลังเอจิงที่อุณหภูมิ 200°C (Ozturk et al., 2010)

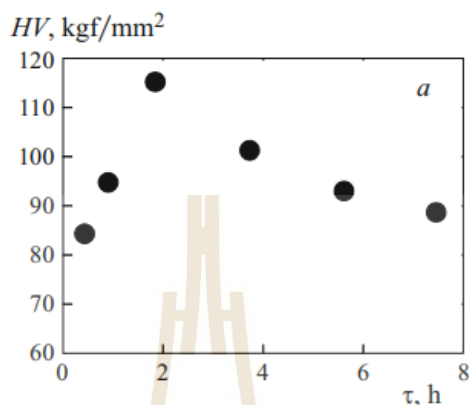
จากนั้น ในปี 2014 ได้มีการศึกษาสมบัติความแข็งโดยกำหนดอุณหภูมิอบละลายที่อุณหภูมิอบละลาย 550°C เป็นเวลา 2 ชม. และชุบอย่างรวดเร็วในน้ำแล้วให้ความร้อนอีกครั้งหรือเอจิงด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างคือ 100°C , 150°C และ 200°C ดังรูปที่ 2.15 จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งการเอจิงด้วยอุณหภูมิต่ำที่ 100°C จะให้ค่าความแข็งสูงที่สุดแต่ระยะเวลาที่ค่าความแข็งขึ้นสูงสุดจะใช้เวลาานกว่าการเอจิงที่ 150°C และ 200°C แต่การเอจิงโดยใช้อุณหภูมิสูงจะให้ค่าความแข็งสูงสุดโดยใช้เวลาน้อยกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิต่ำ (Gowrishankar et al., 2014)



รูปที่ 2.15 แสดงขั้นตอนการทำชุบแข็งแบบตกตะกอน (Gowrishankar et al., 2014)

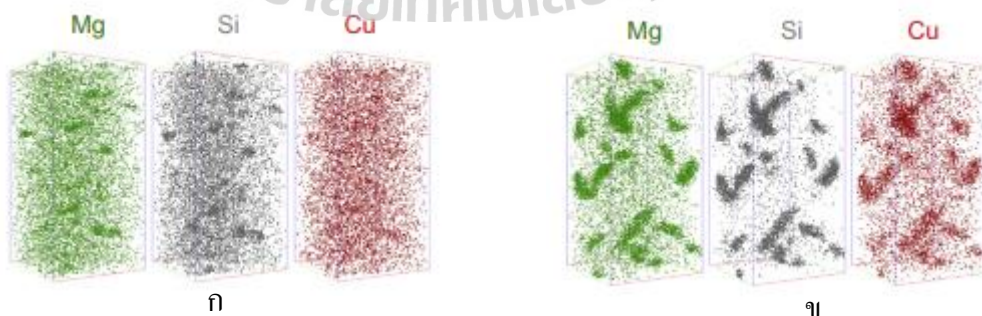
และในปี 2016 ได้มีการศึกษาอิทธิพลของการชุบแข็งแบบตกผลึกหรือตกตะกอนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล โดยกำหนดให้อุณหภูมิอบละลาย เวลาอบละลาย และอุณหภูมิเอจิงคงที่ คือ อบละลาย 530°C เป็นเวลา 4 ชม. และเอจิงที่ 220°C และกำหนดช่วงเวลาเอจิงเป็น 0.5 - 8 ชม. จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิเอจิงที่อุณหภูมิเดียวกันคือ 220°C ค่าความแข็งจะ

ขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการทำเองจึงและให้ค่าความแข็งสูงสุดที่ 2 ชม. ดังรูปที่ 2.16 และจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบเฟส  $Mg_2Si$  บนโครงสร้างพื้นอะลูมิเนียม (Toozandehjani et al., 2016)



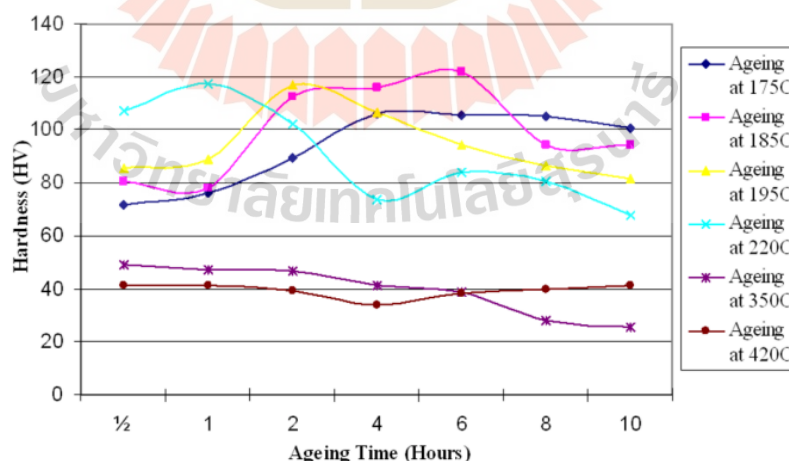
รูปที่ 2.16 ค่าความแข็งหลังเองจึงที่อุณหภูมิ 220°C (Toozandehjani et al., 2016)

นอกจากการศึกษาสมบัติทางกลที่เกี่ยวกับความแข็ง ความแข็งแรงที่ได้กล่าวไปข้างต้น ยังได้มีการศึกษาเกี่ยวกับอะตอมในระหว่างเกิดเป็นเฟส  $\beta''(Mg_2Si)$  โดยศึกษาอะลูมิเนียมเกรด 6111 ที่อุณหภูมิอบละลาย 560°C เป็นเวลา 10 นาที จากการศึกษพบว่า การให้ความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 4 นาที พบโครงสร้างอะตอมในลักษณะ GP Zone ดังรูปที่ 2.17ก ที่มีแมกนีเซียมและซิลิคอนละลายเป็นจำนวนมากและเมื่อเวลาผ่านไปเป็น 6 ชั่วโมง จะมีลักษณะเป็นเฟส  $\beta''(Mg_2Si)$  ดังรูปที่ 2.17ข



รูปที่ 2.17 ค่าความแข็งหลังเองจึงที่อุณหภูมิ 180°C (Marceau et al., 2013)

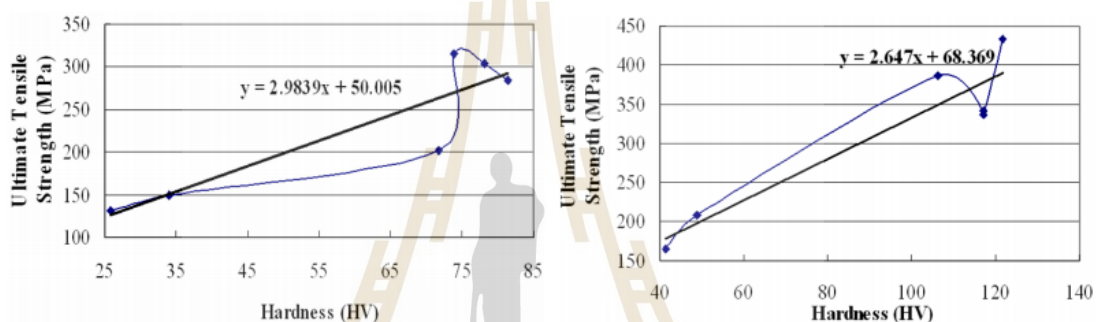
จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวมาเบื้องต้นปัจจุบันยังเห็นว่าการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) ได้ถูกนำมาใช้ควบคู่ไปกับงานวิจัยด้านต่าง ๆ มากขึ้น โดยในปี 2013 ได้มีงานวิจัยที่นำการออกแบบการทดลองมาใช้ในงานทดลองการเจาะขึ้นรูปแบบใช้แรงเสียดทาน (Friction Drilling) ของวัสดุ 3 ชนิดคือ อะลูมิเนียม ทองเหลือง และสแตนเลส โดยใช้ดอกเจาะที่ทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์และกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลองคือ อัตราป้อน (Feed Rate) เท่ากับ 80, 100 และ 120 มม.ต่อนาที และกำหนดความเร็วเท่ากับ 2500, 3000 และ 3500 รอบต่อนาที โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาแรงขับ (Thrust force) การกระจายตัวของความร้อน (Temperature Distribution) และการทดสอบความแข็ง (Hardness Test) (Boopathi et al., 2013) นอกจากนี้ ยังมีนักวิจัยนำมาใช้ในการออกแบบการศึกษาเศษกลึง อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดที่ใช้ในงานกลึง โดยมีเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองคือ วัสดุมีดกลึง ความเร็วตัด และอัตราป้อน (Monka et al., 2015) นอกจากการออกแบบการทดลองที่กล่าวมายังได้นำผลการศึกษามาสร้างสมการเพื่อทำนายผลตอบสนองที่สนใจโดยการสร้างสมการดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 เช่น การศึกษาค่าความแข็งและความแข็งแรงหลังการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยในการศึกษาได้กำหนดปัจจัยและเงื่อนไขครั้งนี้ คือ อุณหภูมิอบละลาย 500-550°C อุณหภูมิเอจิงที่ 175°C, 185°C, 195°C, 220°C, 350°C และ 420°C เป็นเวลา 0.5 – 10 ชั่วโมง จากการศึกษพบว่าค่าความแข็งสูงสุดในช่วงอุณหภูมิ 175°C - 195°C เวลา 2-6 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ค่าความแข็งหลังผ่านกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก

(Tan F.C and Said R.M, 2009)

จากรูปพบว่าเอจิงที่อุณหภูมิ 350°C และ 420°C ให้ค่าความแข็งต่ำเนื่องจากตะกอนหรือผลึก  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกมีขนาดโตและไม่มีแรงเชื่อมประสานกับเนื้อพื้น (Over Aging) ส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้หลังผ่านกระบวนการมีค่าต่ำ ดังนั้นถ้าต้องการให้ได้ค่าความแข็งสูงควรใช้อุณหภูมิต่ำและใช้เวลาเอจิงนานแทนการใช้อุณหภูมิเอจิงสูง นอกจากนั้นการทำเอจิงที่อุณหภูมิ 185°C จะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดเท่ากับ 432.84 MPa จากการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาได้้นำค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงที่ได้มาสร้างสมการคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่าความแข็งและความแข็งแรง โดยสมการที่สร้างขึ้นเป็นสมการเชิงเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.19 (Tan F.C and Said R.M , 2009)



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับค่าความแข็ง  
ก.ค่าความแข็งต่ำ ข.ค่าความแข็งสูง (Tan F.C and Said R.M., 2009)

และในปี 2014 ได้มีการนำการออกแบบการทดลองแบบ  $2^3$  แฟคทอเรียล มาใช้สร้างโมเดลประมาณค่าความแข็งโดยมีการกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ คือ อุณหภูมิอบละลาย 500°C , 595°C อุณหภูมิเอจิงที่ 175°C , 200°C และเวลาเอจิง 2 , 8 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัยมีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญและสร้างโมเดลประมาณค่าความแข็งเชิงเส้นตรงที่มีความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ  $\pm 6.73$  BHN (Boonjubut K and Wantang T., 2014)

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061

ตามมาตรฐาน (ASM Handbook., 1991) โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ตามมาตรฐาน

Al	Cu	Cr	Zn	Mn	Mg	Si	Fe
Base	0.15-0.40	0.04-0.35	Max.0.25	Max.0.15	0.80-1.20	0.40-0.80	Max.0.70

ดังนั้น ก่อนนำโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ไปทดลองได้นำไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น ARL 4460 เพื่อตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีให้ เป็นไปเป็นไปตามมาตรฐาน จากการตรวจสอบพบว่าส่วนผสมทางเคมีเป็นไปตามมาตรฐานดัง แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของ โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061

Al	Cu	Cr	Zn	Mn	Mg	Si	Fe
97.27	0.19	0.15	0.04	0.10	0.87	0.70	0.57

### 3.2 การทดสอบเบื้องต้นก่อนกำหนดแผนการทดลอง

ก่อนกำหนดแผนการทดลองได้มีการทดสอบเบื้องต้น (Trial Experiments) เพื่อปัจจัยและหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยพิจารณาพร้อมกับข้อแนะนำทางปฏิบัติของ ASM (ASM Handbook., 1991) ที่แนะนำให้ใช้อุณหภูมิอบละลายที่ 530°C และเอจิงที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งหลักการออกแบบการทดลองนั้นระยะห่างระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยต้องเท่ากัน เมื่อพิจารณาพร้อมกับข้อเสนอแนะและการทบทวนงานวิจัย

อื่น ๆ จึงสรุปได้เป็นตัวแปรและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง คือ อุณหภูมิอบละลาย (Solution Temperature) เวลาเอจิง (Aging Time) และอุณหภูมิเอจิง (Aging Temperature) โดยแต่ละปัจจัย มี 3 ระดับ ดังนี้ อุณหภูมิอบละลาย ( $^{\circ}\text{C}$ ) : 520, 540 และ 560 ; เวลาเอจิง (ชั่วโมง) : 2, 8 และ 14 และอุณหภูมิเอจิง ( $^{\circ}\text{C}$ ) : 175, 200 และ 225 ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแบบ  $3^3$  แฟคทอเรียล

ปัจจัย	ระดับต่ำ (-1)	ระดับปานกลาง (0)	ระดับสูง (+1)
Solution Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), A	520	540	560
Aging Time (hr), B	2	8	14
Aging Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), C	175	200	225

ตาราง 3.3 สรุประดับปัจจัยต่าง ๆ ของแต่ละปัจจัยในการทดลอง  $3^3$  แฟคทอเรียล ซึ่งการทดลอง แบบแฟคทอเรียลนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกันทั้งอิทธิพลของปัจจัยหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยหรือที่เรียกว่าอันตรกิริยา (Interactions) (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551) ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสามระดับนี้สามารถศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงได้และการทดลองนี้เป็นการศึกษา 3 ปัจจัย ดังนั้น สามารถจำแนกอิทธิพลที่เกิดขึ้นได้ 3 ประเภท คือ

- 1) อิทธิพลหลักหรืออิทธิพลปัจจัยเดียว (Main Effects) คือ อิทธิพลที่เกิดจากการพิจารณาครั้งละปัจจัย คือ ปัจจัย A, B และ C
- 2) อิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factor หรือ 2-Way Interaction) คือ อิทธิพลที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันครั้งละ 2 ปัจจัย คือ AB, AC และ BC
- 3) อิทธิพลร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย (Three-Factor หรือ 3-Way Interaction) คือ อิทธิพลที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันครั้งละ 3 ปัจจัย คือ ABC

### 3.3 การวางแผนการทดลอง

การออกแบบการทดลองใช้แผนการทดลองแบบ  $3^3$  แฟคทอเรียลอย่างเต็มรูปแบบ (Full Form Factorial Experiments) โดยมีการทดลองซ้ำจำนวน 2 ซ้ำ ลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized Design) เพื่อให้ความผิดพลาดของการทดลองที่ไม่สามารถควบคุมได้เฉลี่ยให้กับทุกค่าข้อมูล แผนการทดลอง  $3^3$  แฟคทอเรียล สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้สัญลักษณ์ 0, 1, 2 แทนระดับของปัจจัย เช่น 010 หมายถึง ปัจจัย A อยู่ที่ระดับต่ำ, ปัจจัย

B อยู่ในระดับกลาง และปัจจัย C อยู่ในระดับต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 แต่ในส่วนเชิงปริมาณจะใช้สัญลักษณ์  $-1, 0, 1$  ซึ่งจะง่ายในการสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regression Model)

จากตาราง 3.4 สามารถเขียนโมเดลคณิตศาสตร์ของค่าวัด (Response หรือ Dependent Variable) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังนี้

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + \tau_i\beta_j + \tau_i\gamma_k + \beta_j\gamma_k + \tau_i\beta_j\gamma_k + \varepsilon_{ijkl} \quad (3.1)$$

โดย	$\mu$	คือ ผลเฉลี่ยทั้งหมด
	$\tau_i$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ $i$ ของปัจจัย A, ( $i = 1, 2, 3$ )
	$\beta_j$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ $j$ ของปัจจัย B, ( $j = 1, 2, 3$ )
	$\gamma_k$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ $k$ ของปัจจัย C, ( $k = 1, 2, 3$ )
	$(\tau\beta)_{ij}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง $\tau_i$ และ $\beta_j$
	$(\tau\gamma)_{ik}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง $\tau_i$ และ $\gamma_k$
	$(\beta\gamma)_{jk}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง $\beta_j$ และ $\gamma_k$
	$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง $\tau_i, \beta_j$ และ $\gamma_k$
	$\varepsilon_{ijkl}$	$\approx (\tau\beta\gamma)_{ijkl}$

กำหนดให้  $y_{ijkl}$  คือผลการทดลองเมื่อปัจจัยอุณหภูมิอบละลาย (Solution Temp, A) อยู่ในระดับ  $i$  ( $i = 1, 2 \dots a$ ) เวลาเอจิง (Aging Time, B) อยู่ในระดับ  $j$  ( $j = 1, 2 \dots b$ ) และอุณหภูมิเอจิง (Aging Temp, C) อยู่ในระดับ  $k$  ( $k = 1, 2 \dots k$ ) และเรพลิเคตที่  $l$  ( $l = 1 \dots n$ ) ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รูปแบบทั่วไปของการออกแบบการทดลองแบบ  $3^3$  แฟคทอเรียล

Aging Time (hr), B	Aging Temp (°C), C	Solution Temp (°C), A					
		0		1		2	
0	0	$Y_{1111}$	$Y_{1112}$	$Y_{1121}$	$Y_{1122}$	$Y_{1131}$	$Y_{1132}$
	1	$Y_{1211}$	$Y_{1212}$	$Y_{1221}$	$Y_{1222}$	$Y_{1231}$	$Y_{1232}$
	2	$Y_{1311}$	$Y_{1312}$	$Y_{1321}$	$Y_{1322}$	$Y_{1331}$	$Y_{1332}$
1	0	$Y_{2111}$	$Y_{2112}$	$Y_{2121}$	$Y_{2122}$	$Y_{2131}$	$Y_{2132}$
	1	$Y_{2211}$	$Y_{2212}$	$Y_{2221}$	$Y_{2222}$	$Y_{2231}$	$Y_{2232}$
	2	$Y_{2311}$	$Y_{2312}$	$Y_{2321}$	$Y_{2322}$	$Y_{2331}$	$Y_{2332}$
2	0	$Y_{3111}$	$Y_{3112}$	$Y_{3121}$	$Y_{3122}$	$Y_{3131}$	$Y_{3132}$
	1	$Y_{3211}$	$Y_{3212}$	$Y_{3221}$	$Y_{3222}$	$Y_{3231}$	$Y_{3232}$
	2	$Y_{3311}$	$Y_{3312}$	$Y_{3321}$	$Y_{3322}$	$Y_{3331}$	$Y_{3332}$

### 3.4 ลำดับการทดลอง

เมื่อกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่ต้องการศึกษาแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบ  $3^3$  แล้วสามารถกำหนดเงื่อนไขการทดลองได้ทั้งหมด 27 เงื่อนไข และกำหนดให้มีการทดลองซ้ำ ดังนั้นมีการทดลองทั้งหมด 54 ครั้ง ดังตารางที่ 3.5 ซึ่งขึ้นงานทดสอบที่นำมากำหนดแต่ละเงื่อนไขทั้ง 54 เงื่อนไข ได้มาจากการสุ่มเพื่อให้ขึ้นงานแต่ละชิ้นมีโอกาสถูกเลือกเท่ากัน ในการทดลองของแต่ละเงื่อนไขที่ปรากฏในตารางเป็นแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized Design) โดยทำการสุ่มลำดับการทดลอง เช่น ในการสุ่มครั้งที่ 1 ได้เงื่อนไขการทดลอง คือ อบอุ่นที่  $520^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเอจิงที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก็ทดลองเงื่อนไขนี้เป็นลำดับแรก จากนั้นสุ่มการทดลองต่อไปทำเช่นนี้จนครบเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

ซึ่งลำดับการทดลองในตารางที่ 3.5 ตัวเลขในวงกลมแสดงเพียงบางส่วนของลำดับการทดลองที่เป็นไปแบบสุ่มเท่านั้น



ตารางที่ 3.5 ลำดับการทดลองที่ได้จากการสุ่ม

Aging Time (hr), B	Aging Temp (°C), C	Solution Temp (°C), A					
		520		540		560	
2	175	⑧	⑫	..	..	..	..
	200	①	⑭	..	..	..	..
	225	..	..	..	..	..	..
8	175	..	..	..	..	..	..
	200	..	..	..	..	..	..
	225	..	..	..	..	..	..
14	175	..	..	..	..	..	..
	200	..	..	..	..	..	..
	225	..	..	..	..	..	..

### 3.5 วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนและสร้าง

#### แบบจำลอง

แม้ว่าการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนและสร้างแบบจำลองในการทดลองครั้งนี้จะใช้สำเร็จรูปคือ โปรแกรมมินิแท็บ (Minitab) แต่ในที่นี้ได้แสดงสมมติฐานการคำนวณและหลักการวิเคราะห์จากโมเดลคณิตศาสตร์ที่ 3.1 ดังนี้

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + \tau_i\beta_j + \tau_i\gamma_k + \beta_j\gamma_k + \tau_i\beta_j\gamma_k + \varepsilon_{ijkl}$$

โดยค่าประมาณความแข็ง  $y_{ijkl}$  จากสมการได้จากการประมาณค่าที่ปัจจัยอุณหภูมิอบละลาย (Solution Temp, A) อยู่ที่ระดับ  $i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) เวลาเอจจิง (Aging Time, B) อยู่ที่ระดับ  $j$  ( $i = 1, 2, 3$ ) และอุณหภูมิเอจจิง (Aging Temp, C) อยู่ที่ระดับ ( $k = 1, 2, 3$ ) จากสมการจะเห็นว่าถ้าอิทธิพลรวมที่เกิดจากระดับปัจจัยของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมสองปัจจัยและสามปัจจัยที่เท่ากับศูนย์แล้ว  $y_{ijkl} = \mu$  แสดงว่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง แต่ถ้ามีปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมมีค่าไม่เท่ากับศูนย์จะทำให้ค่าความแข็งเบี่ยงเบนออกจากค่าเฉลี่ย ดังนั้น สามารถเขียนสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis,  $H_0$ ) และสมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis,  $H_1$ ) ของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมสำหรับการทดลองได้ดังนี้

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$$

$$H_1: \tau_i \text{ ของปัจจัยอุณหภูมิอบละลาย (A) อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \quad (3.2)$$

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

$$H_1: \beta_i \text{ ของปัจจัยเวลาเอจจิง (B) อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \quad (3.3)$$

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0$$

$$H_1: \gamma_i \text{ ของปัจจัยอุณหภูมิเอจจิง (C) อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \quad (3.4)$$

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$$

$$H_1: (\tau\beta)_{ij} \text{ ของปัจจัยร่วม (AB) อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \quad (3.5)$$

$$H_0: (\tau\gamma)_{ik} = 0$$

$$H_1: (\tau\gamma)_{ik} \text{ ของปัจจัยร่วม (AC) อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \quad (3.6)$$

$$H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0$$

$$H_1: (\beta\gamma)_{jk} \text{ ของปัจจัยร่วม (BC) อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \quad (3.7)$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทำได้โดยการหาผลรวมกำลังสองของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมสามารถเขียนสมการของผลรวมกำลังสองดังนี้

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC} \quad (3.8)$$

จากสมการสามารถหาผลรวมกำลังสองของค่าความผิดพลาดได้จาก

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} - SS_{ABC} \quad (3.8)$$

ผลรวมกำลังสองสามารถหาได้โดยการหาค่าประมาณของแต่ละปัจจัยและปัจจัยร่วมดังสมการ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (3.9)$$

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (3.10)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{j\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (3.11)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{\dots k}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} SS_{AB} &= \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} - SS_A - SS_B \\ &= SS_{\text{Subtotals(AB)}} - SS_A - SS_B \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} SS_{AC} &= \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{i\dots k}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} - SS_A - SS_C \\ &= SS_{\text{Subtotals(AC)}} - SS_A - SS_C \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} SS_{BC} &= \frac{1}{an} \sum_{i=1}^b \sum_{k=1}^c y_{\dots ik}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} - SS_B - SS_C \\ &= SS_{\text{Subtotals(BC)}} - SS_B - SS_C \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned}
 SS_{ABC} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AB} - SS_{AB} \\
 &= SS_{\text{Subtotals}(ABC)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AB} - SS_{AB}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

ดังนั้น สามารถหาค่าผลรวมกำลังสองของค่าความผิดพลาดได้จากสมการ

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Subtotals}(ABC)} \tag{3.17}$$

เมื่อนำค่ากำลังสองของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมของปัจจัยมาหารด้วย Degree of Freedom จะได้กำลังสองเฉลี่ยของแต่ละปัจจัย ถ้าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย (Mean Squares หรือ MS) จะมามีค่ามากกว่าค่ากำลังสองเฉลี่ยของค่าความผิดพลาด ( $MS_E$ ) ซึ่งมีค่าประมาณ  $\sigma$  ถ้าอัตราส่วนมีค่ามากแสดงว่าปัจจัยนั้นส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การทดสอบว่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมใดมีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญสามารถหาได้จากการนำค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยด้วยค่าความผิดพลาด ( $MS_E$ ) ดังสรุปไว้ในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Squares	$F_0$
A	$SS_A$	$a - 1$	$MS_A$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	$SS_B$	$b - 1$	$MS_B$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	$SS_C$	$c - 1$	$MS_C$	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	$SS_{AB}$	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	$SS_{AC}$	$(a - 1)(c - 1)$	$MS_{AC}$	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	$SS_{BC}$	$(b - 1)(c - 1)$	$MS_{BC}$	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	$SS_{ABC}$	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	$MS_{ABC}$	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	$SS_E$	$abc(n - 1)$	$MS_E$	
Total	$SS_T$	$abcn - 1$		

จากตาราง 3.6 สามารถทดสอบผลของอิทธิพลที่ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงด้วยการเปรียบเทียบค่า  $F_0$  ที่เกิดจากการหารกำลังสองเฉลี่ยด้วยค่าความผิดพลาด ( $F_0 = MS / MS_E$ ) กับค่าวิกฤตของการแจกแจงแบบ F ที่มีค่าเท่ากับ  $F_{\alpha, v_1, v_2}$  ในการทดลองครั้งนี้ กำหนดให้ใช้  $\alpha = 0.05$ ,  $v_1$  คือ Degree of Freedom ของปัจจัย และ  $v_2$  คือ Degree of Freedom ของ Error ดังนั้น ถ้าค่า  $F_0$  มีค่ามากกว่าค่า  $F_{\alpha, v_1, v_2}$  จะปฏิเสธ  $H_0$  นอกจากจะสามารถตรวจสอบด้วยค่า P-Value ถ้าค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยตาราง ANOVA สามารถสร้างแบบจำลองโมเดลประมาณค่าความแข็งแรงจากปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญได้ดังสมการ 3.18

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 \quad (3.18)$$

โดยกำหนดให้ $\hat{y}$	คือ	ค่าประมาณความแข็งแรง (Fitted Value)
$\beta_0$	คือ	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด
$\beta$	คือ	สัมประสิทธิ์การถดถอย
$x_1$	คือ	อุณหภูมิอบละลาย (Solution Temp, A)
$x_2$	คือ	อุณหภูมิเอจจิง (Aging Time, B)
$x_3$	คือ	เวลาเอจจิง (Aging Temp, C)

### 3.5.1 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ )

จากแบบจำลองโมเดลประมาณค่าความแข็งแรงสามารถทดสอบสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ได้จากสมการ

$$R^2 = SS_{\text{Model}} / SS_{\text{Total}} \quad (3.19)$$

โดย	$SS_{\text{Model}}$ คือ	ผลรวมกำลังสองของโมเดล
	$SS_{\text{Total}}$ คือ	ความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล

โดยค่า  $R^2$  ควรมีค่า  $0 \leq R^2 \leq 1$  หมายความว่าแบบจำลองโมเดลที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมในการประมาณค่าความแข็ง นอกจากนี้ยังสามารถทดสอบด้วยค่า  $R^2_{adj}$  ของโมเดลเนื่องจากค่า  $R^2$  ไม่สามารถแสดงขอบเขตของโมเดลได้ชัดเจนดังสมการ 3.20

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_E/(n-p)}{SS_T/(n-1)} \quad (3.20)$$

โดย  $n$  คือ จำนวนการทดลองทั้งหมด  
 $p$  คือ Degree of Freedom ของ โมเดล

### 3.5.2 การประมาณช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Intervals)

การประมาณช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ( $\alpha = 0.05$ ) จากการประมาณค่าจากโมเดลสามารถหาได้จากสมการ

$$Y \pm t_{\alpha/2, n-a} \sqrt{MSE} \quad (3.21)$$

ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $\alpha = 0.05$ ) ดังนั้น  $\alpha/2 = 0.025$  และค่า MSE หาได้จาก Sum of Squares ของปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญรวมกับ Sum of Squares ของ Error แล้วหารด้วย Degree of Freedom ดังนั้นสามารถหาค่า MSE ได้จากสมการ 3.22

$$\text{โดย } MSE = SS_{\text{Residual Error}} / df_{\text{Error}} \quad (3.22)$$

และค่า  $SS_{\text{Residual Error}}$  หาได้จาก

$$SS_{\text{Residual Error}} = SS_{\text{Total}} - SS_{\text{Model}}$$

### 3.5.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนและสร้างแบบจำลองโมเดลประมาณค่าความแข็งดังสมการที่ 3.18 หลังสร้างแบบจำลองต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล โดยสมมติฐานของการออกแบบการทดลองคือค่าความผิดพลาด (Error หรือ Residual) ของแบบจำลองต้องมีการ

แจกแจงปกติ (Normal Distribution) และมีความเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีความแปรปรวนคงที่

ค่าความผิดพลาด (Error หรือ Residual) คือค่าผลต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากสมการการทดลอง ( $y_{ijkl}$ ) กับค่าประมาณจากโมเดล ( $\hat{y}_{ijkl}$ ) ดังนั้น ( $e_{ijkl} = y_{ijkl} - \hat{y}_{ijkl}$ )

โดย	$e_{ijkl}$	คือ	ค่าความผิดพลาด (Error หรือ Residual)
	$y_{ijkl}$	คือ	ค่าความแข็งที่ได้จากการทดลอง
	$\hat{y}_{ijkl}$	คือ	ค่าประมาณความแข็งที่ได้จากการโมเดล (Fitted Value)

### 3.6 การเตรียมการสำหรับการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร และมีความยาวเท่ากับ  $25.4 \pm 0.01$  มิลลิเมตร จำนวน 54 ชิ้น

การเตรียมชิ้นงานเริ่มจากการนำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นเส้น (Rod) ไปตัดด้วยเครื่องตัดแบบสายพานให้ได้ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองจำนวน 54 ชิ้น แล้วกลึงให้ได้ความยาวตามที่กำหนดและมีผิวหน้าที่เรียบเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดจากขนาดของชิ้นงานและให้สามารถวัดค่าความแข็งได้ทันทีหลังผ่านกระบวนการอบชุบแข็ง เนื่องจากการวัดความแข็งแบบบริเนลชิ้นงานที่ได้จะนำไปทดสอบต้องได้ระนาบกับพื้นผิวทดสอบและมีผิวเรียบจึงจะสามารถวัดค่าความแข็งได้ รายละเอียดของการเตรียมการเพื่อการทดลองมีดังนี้

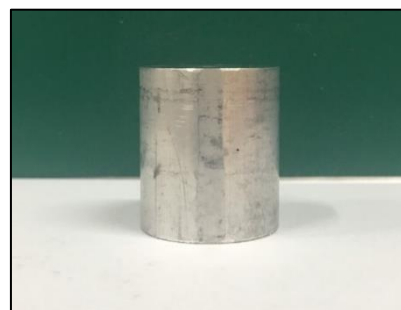
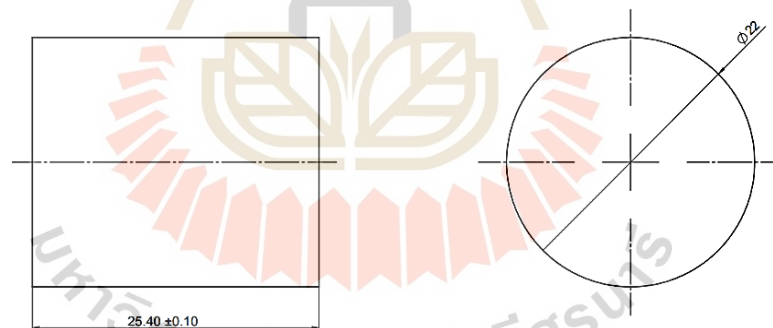
#### 3.6.1 การเตรียมขนาดและผิวชิ้นงาน

1) เลื่อยตัดเส้นอะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ยาว  $25.4 \pm 0.01$  มิลลิเมตร จำนวน 54 ชิ้น



รูปที่ 3.1 ภาพเลื่อยสายพาน

2) นำชิ้นงานไปกลึงปาดหน้าทั้งสองข้างให้ได้ความยาว  $25.4 \pm 0.01$  มิลลิเมตร และมีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 ขนาดมิติชิ้นงานและชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

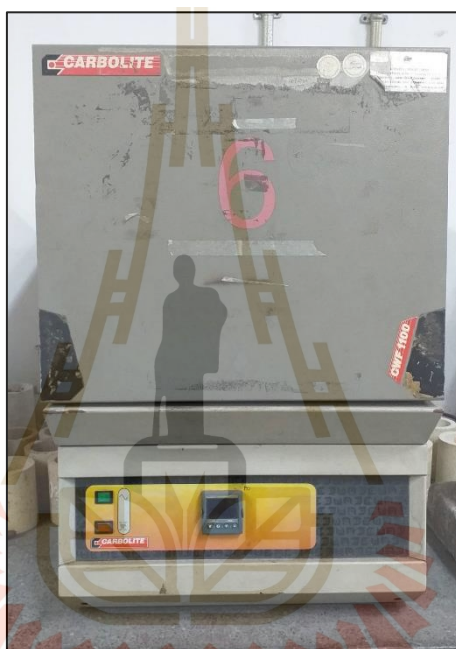


### 3.7 อุปกรณ์และการดำเนินการทดลอง

ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองนั้นได้มีการสอบเทียบเตาไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (Calibration) ด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ หรือ Data Logger

#### 3.7.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เตาเผาไฟฟ้า
- 2) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ หรือ Data Logger



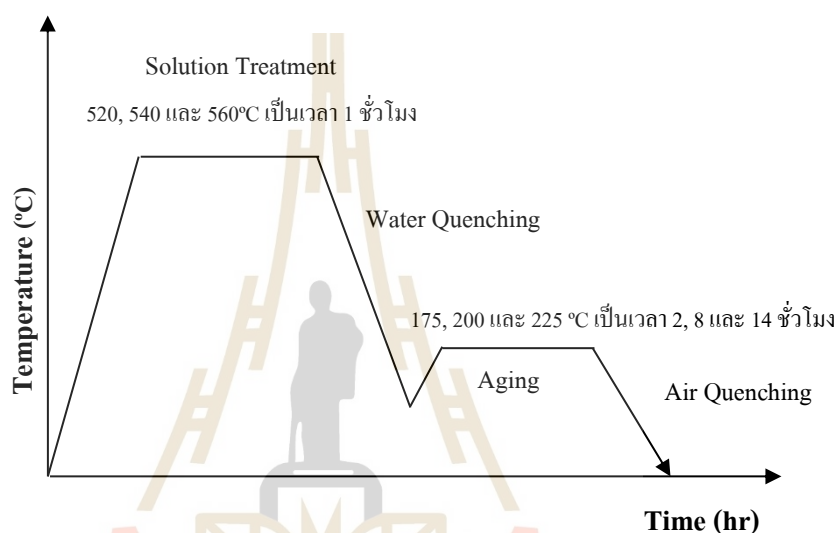
รูปที่ 3.3 เตาเผาไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ หรือ Data Logger

### 3.7.2 ขั้นตอนการอบชุบชิ้นงาน

รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการอบชุบชิ้นงานด้วยวิธีการตกผลึกโดยมีขั้นตอนหลัก ๆ อยู่ 3 ขั้นตอน คือ การอบละลาย (Solution Treatment) การชุบชิ้นงานในน้ำอย่างรวดเร็ว (Quenching) และ Age Hardening หรือเอจจิง (Aging) โดยอุณหภูมิและเวลาของการทำอบละลายและเอจจิงในการอบชุบแต่ละครั้งนั้นจะกำหนดโดยเงื่อนไขของแต่ละลำดับการทดลองในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ไลอะแกรมแสดงขั้นตอนการอบชุบ

เนื่องจากการทดลองทั้งหมดมีจำนวน 54 เงื่อนไข จากตารางที่ 3.5 จึงขอแสดงตัวอย่างขั้นตอนอบชุบชิ้นงานเงื่อนไขที่ 1 คือ อบละลายที่ 520°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเอจจิงที่ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งทดลองเป็นลำดับที่ 8 โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1) นำชิ้นงานเข้าเตาเผาไฟฟ้าปรับตั้งค่าอุณหภูมิเตาไปที่ 520°C รอจนอุณหภูมิภายในเตาเท่ากับ 520°C และเริ่มจับเวลาที่อุณหภูมิ 520°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.6 แสดงการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 520°C



รูปที่ 3.6 แสดงการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 520°C

2) หลังจากอบละลายที่ 520°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำชิ้นงานชุบในน้ำอย่างรวดเร็วที่ อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างการชุบในน้ำ



รูปที่ 3.7 การนำชิ้นงานทดลองชุบในน้ำ

3) นำชิ้นงานเข้าเตาและปรับตั้งค่าอุณหภูมิเตาที่ 175°C อีกครั้ง และเฝ้าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.8 แสดงการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 175°C



รูปที่ 3.8 การตั้งค่าอุณหภูมิที่ 175°C

4) เมื่อเอจิงที่ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วให้นำชิ้นงานออกจากเตาและวัดค่าความแข็งแบบบริเนลทันที

### 3.8 การทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Tester)

ภายหลังจากอบชุบชิ้นงานตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้วนำชิ้นงานมาวัดความแข็งแบบบริเนล โดยใช้เครื่องยี่ห้อ Wilson รุ่น MJ ขนาดหัวกด 10 มิลลิเมตร โหลด 500 kgf กดแช่เป็นเวลา 10 วินาที

#### 3.8.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล
- 2) ไมโครสโคปทูลเมคเกอร์ (Tool Making Microscope)



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล Wilson รุ่น MJ



รูปที่ 3.10 ไมโครสโคปทูลเมคเกอร์ (Tool Making Microscope)

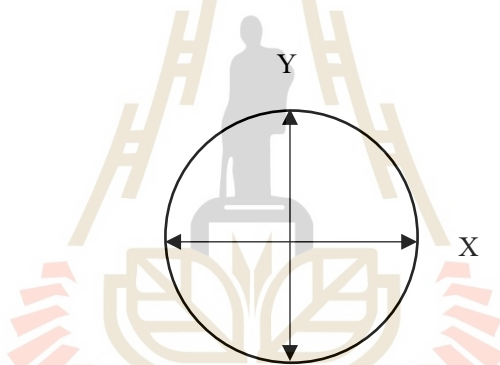
### 3.8.2 วิธีทดสอบความแข็งแบบบริเนล

- 1) นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบชุบแข็งมาวัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลขนาดหัวกด 10 มิลลิเมตร โหลด 500 kgf กดนาน 10 วินาที โดยแต่ละชิ้นกดวัดจำนวน 4 ครั้ง



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานที่ผ่านการวัดความแข็งแบบบริเนล

2) นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการวัดความแข็งมาวัดขนาดของรอยกดทั้ง 4 จุด ด้วยเครื่องไมโครสโคปทูลเมคเกอร์ โดยวัดขนาดในแนวแกน X จำนวน 2 ครั้ง และวัดขนาดในแนวแกน Y จำนวน 2 ครั้ง ดังรูป 3.12 แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละจุด



รูปที่ 3.12 การวัดขนาดรอยกดของชิ้นงานทดลอง

3) นำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการเฉลี่ยแต่ละจุดมาอ่านค่าความแข็งจากตาราง แสดงค่าความแข็งจาก ASTM ในภาคผนวก ก เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.92 มิลลิเมตร สามารถอ่านค่าความแข็ง จากตารางได้เท่ากับ 73 BHN

4) นำค่าความแข็งทั้ง 4 จุด มาเฉลี่ยอีกครั้งเพื่อให้ได้ความแข็งเฉลี่ยของแต่ละชิ้นงาน ทดสอบแล้วบันทึกผลการทดลองลงในตาราง 3.7

ตารางที่ 3.7 ตารางบันทึกผลค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบ (BHN)

Aging Time (hr), B	Aging Temp (°C), C	Solution Temp (°C), A					
		520		540		560	
2	175						
	200						
	225						
8	175						
	200						
	225						
14	175						
	200						
	225						

### 3.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมี

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมต้องเตรียมผิวของชิ้นงานให้เรียบและเงา โดยมีเครื่องมืออุปกรณ์และขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

#### 3.9.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) กระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และเบอร์ 1200
- 2) ผ้าสักหลาด
- 3) เครื่องขัดกระดาษทรายแบบละเอียด
- 4) เครื่องขัดผ้าสักหลาด
- 5) ฟองขัดอะลูมิเนียมขนาด 0.3 และ 0.05 ไมครอน
- 6) เครื่องเป่าลม
- 7) Keller's Each
- 8) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ยี่ห้อ OPTIKA
- 9) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S-3000N
- 10) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบโฟโตอิมิตชัน (Photoemission Electron Microscopy, PEEM)

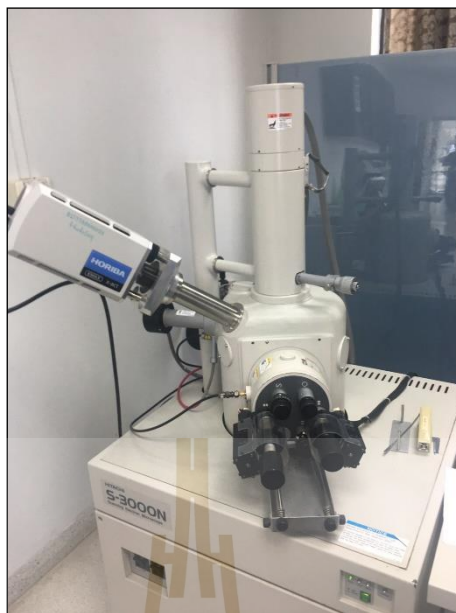


รูปที่ 3.13 เครื่องวัดกระดาศทราขแบบละเอียดและเครื่องวัดฟ้าสักหลาด

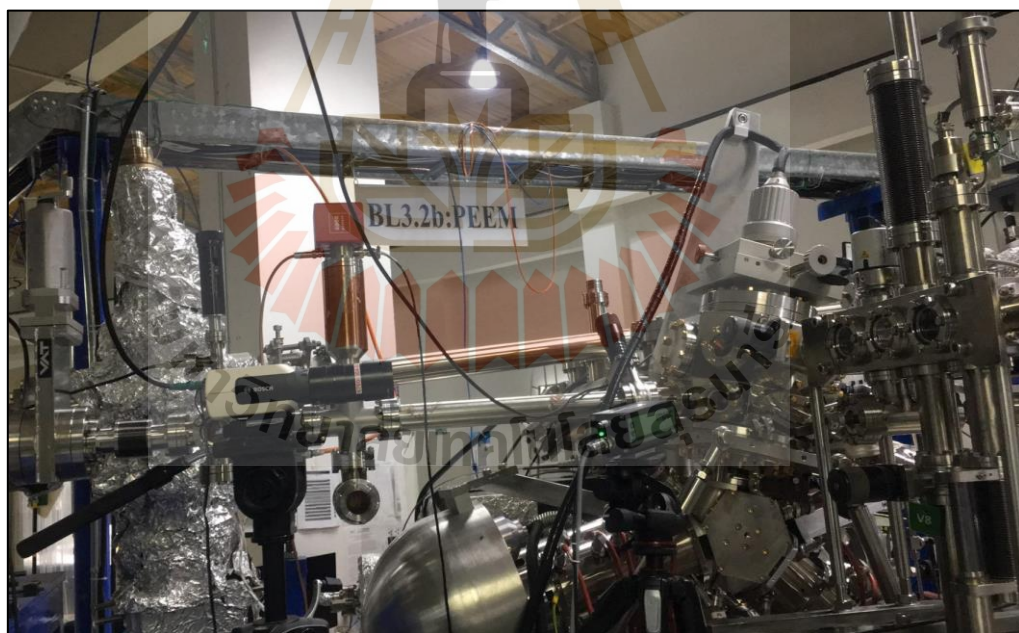


รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ยี่ห้อ OPTIKA





รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) Hitachi รุ่น S-3000N



รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบโฟโตอิมิสชัน (Photoemission Electron Microscopy, PEEM)

### 3.9.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

3.9.2.1 การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM)

1) จัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับจนผิวหน้าชิ้นงานมีความเรียบสม่ำเสมอ



รูปที่ 3.17 การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย

2) จากนั้น ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายและผ้าสักหลาดด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับเพื่อให้ชิ้นงานมีความเงาและไม่มีรอยขีดข่วน



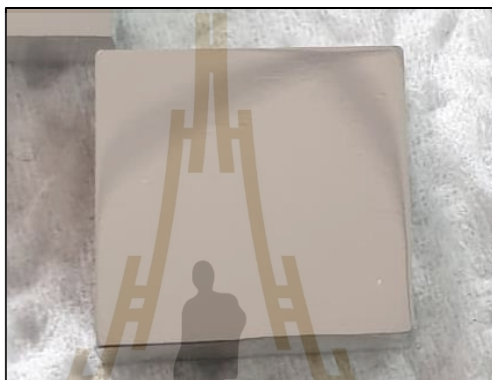
รูปที่ 3.18 การขัดชิ้นงานด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมครอน

3) นำชิ้นงานที่ขัดมาล้างด้วยน้ำและแอลกอฮอล์เป่าชิ้นงานให้แห้งแล้วนำไปกัดกรดที่เตรียมไว้ (Etching)

4) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.9.2.2 การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

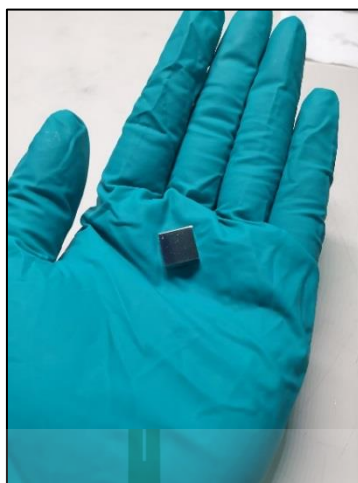
1) ตัดชิ้นงานให้มีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร สูง 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.19 ชิ้นงานขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร สูง 3 มิลลิเมตร

2) ขัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับจนผิวหน้าชิ้นงานมีความเรียบสม่ำเสมอ

3) จากนั้นขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายและผ้าสักหลาดด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับเพื่อให้ชิ้นงานมีความเงาและไม่มียอดขีดข่วน



รูปที่ 3.20 การขัดชิ้นงานด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมครอน

4) นำชิ้นงานที่ขัดมาล้างด้วยน้ำและแอลกอฮอล์เป่าชิ้นงานให้แห้งแล้วนำไปกัดกรดที่เตรียมไว้ (Etching)

5) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีแบบ Point Analysis โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์เรย์หรือเรียกว่า EDS หรือ EDX ในการแยกสัญญาณเอกเรย์ลักษณะเฉพาะ (Characteristic X-ray) ของธาตุที่อยู่ในชิ้นงานด้วยสเปกตรัมพลังงานซึ่งการตรวจสอบนี้ทำให้ได้สเปกตรัม EDS แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณเอกซ์เรย์ที่ตรวจจับได้กับพลังงานทำให้ทราบองค์ประกอบทางเคมีบริเวณจุดที่ต้องการตรวจสอบ

3.9.2.3 การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบโฟโตอิมิตชัน (Photoemission Electron Microscopy, PEEM)

- 1) ตัดชิ้นงานให้มีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร สูง 3 มิลลิเมตร
- 2) ขัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับจนผิวหน้าชิ้นงานมีความเรียบสม่ำเสมอ
- 3) ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายและผ้าสักหลาดด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับเพื่อให้ชิ้นงานมีความเงาและไม่มีรอยขีดข่วน
- 4) ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องอัลตราโซนิคโดยใช้สารละลายเป็นอะซิโตนและเอทานอล



รูปที่ 3.21 เครื่องอัลตราโซนิก ยี่ห้อ GT SONIC รุ่น GT SONIC-D2



รูปที่ 3.22 อะซิโตนและเอทานอล

5) นำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์โฟโตมิชชันอิเล็กตรอนสเปคโตรสโคปี (X-PEEM)

### 3.9.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค

#### X- PEEM และ LEEM

นำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมขนาดและเตรียมผิวกระดาษทรายและผงขัดอะลูมินาไปทำความสะอาดผิวด้วยอะซิโตนและเอทานอล จากนั้น นำชิ้นงานใส่ Sample Holder และทำการ

สปีดเตอริง (Sputtering) ด้วยอาร์กอนโดยเงื่อนไขการทำสปีดเตอริง คือ Energy 1.5 kV; Emission 5 mV เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นเริ่มเพิ่มอุณหภูมิให้กับชิ้นงานภายใต้สภาวะสุญญากาศความดันต่ำกว่า 9 mbar และตรวจสอบ XPS โดยใช้รังสีเอกซ์พลังงานต่ำที่ค่าพลังงาน 130 eV และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยการบันทึกภาพชิ้นงานด้วยเทคนิค LEEM ในขณะที่มีการเพิ่มอุณหภูมิชิ้นงานจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 300°C และบันทึกภาพแบบ In-Situ ที่อุณหภูมิ 25°C, 100°C, 200°C, 250°C และ 300°C ตามลำดับ

ซึ่งชิ้นงานที่นำมาให้ความร้อนเป็นชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 520°C และ 540°C เพื่อให้ครอบคลุมอุณหภูมิ 530°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ ASM Handbook แนะนำให้ใช้ในการทำการอบละลายสำหรับโลหะอะลูมิเนียม 6061 หลังจากนั้นจุ่มในน้ำอย่างรวดเร็ว (Quenching) เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีความอิ่มตัวยังยวดยิ่ง (Supersaturated Solid Solution) และนำมาให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 300°C และบันทึกภาพแบบ In-Situ ตามที่ได้กล่าวไปเบื้องต้น



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061

ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ด้วยเครื่องด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น ARL 4460 ซึ่งผลการตรวจสอบส่วนผสมพบว่าส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบเป็นไปตามค่ามาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของ โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061

Al	Cu	Cr	Zn	Mn	Mg	Si	Fe
97.27	0.19	0.15	0.04	0.10	0.87	0.70	0.57

#### 4.2 ผลการทดลอง

##### 4.2.1 ผลการทดสอบความแข็ง

จากการทดลองตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้และทดสอบความแข็งโดยวัดความแข็งแบบบริเนลขนาดหัวกด 10 มิลลิเมตร โหลด 500 kgf กดแช่เป็นเวลา 10 วินาที ได้ค่าความแข็งดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบ (BHN)

Aging Time (hr), B	Aging Temp (°C), C	Solution Temp (°C), A					
		520		540		560	
2	175	72.5	71.28	85.73	84	93.2	96.33
	200	84.43	81.93	98.6	100.4	108.75	108
	225	85.08	83.68	100.75	102.25	111.75	110.75
8	175	86.38	88.38	101	99.75	107	106.5
	200	93.3	94.03	107.75	105.75	115.5	118
	225	85.88	85.73	101.25	102.75	112.75	111.75
14	175	94.03	95.55	105.75	106.75	113.75	112.5
	200	94.78	93.3	108	105.5	114	113.5
	225	80.9	81.93	95.55	96.48	107	104.5

จากตาราง 4.2 พบว่าค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบที่เงื่อนไขเดียวกันโดยมีการทดสอบซ้ำนั้นมีความแตกต่างกันสูงสุด 3.13 BHN ที่เงื่อนไขการการอบละลายที่ 560°C และเอจิงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

#### 4.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

##### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

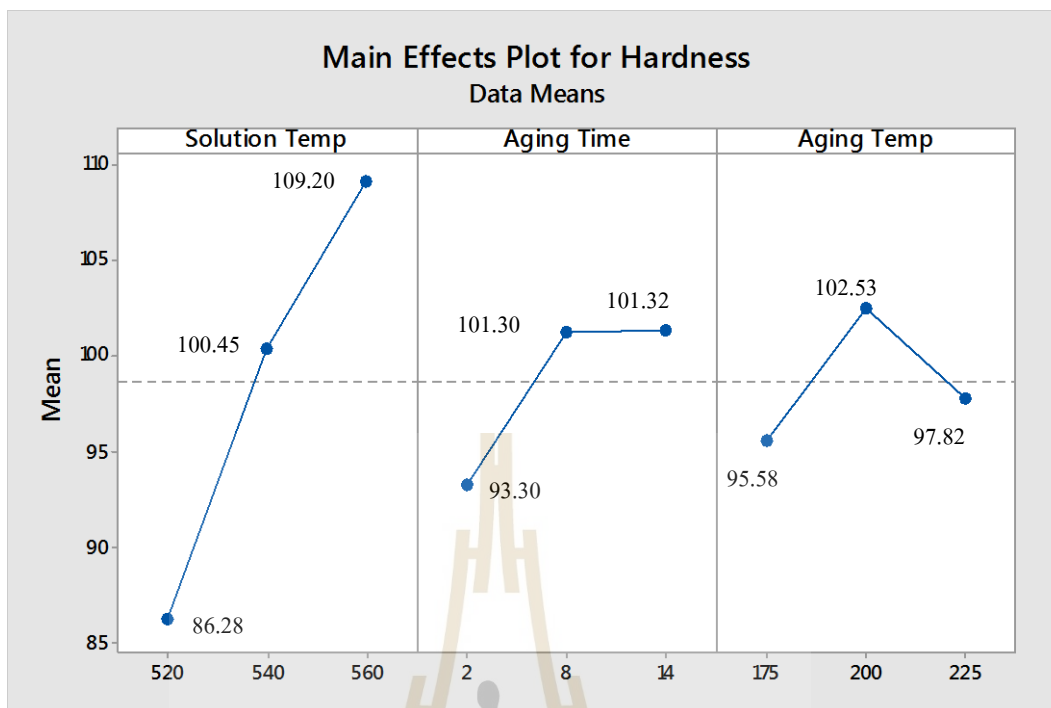
นำค่าความแข็งจากตารางที่ 4.2 มาวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติและแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.3



ตารางที่ 4.3 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3<sup>3</sup> (ANOVA)

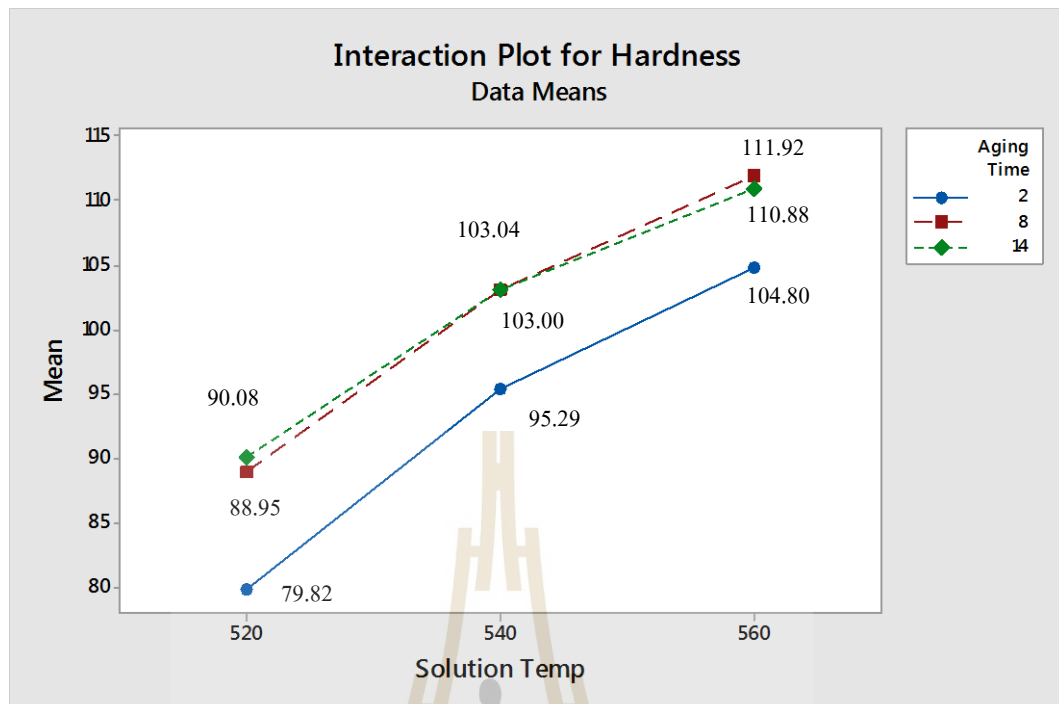
Source	DF	Sum of Squares	Mean of Squares	F <sub>0</sub>	P-Value
A	2	4813.03	2406.51	1826.51	0.000
B	2	770.14	385.07	292.26	0.000
C	2	453.29	226.64	172.02	0.000
AB	4	26.78	6.69	5.08	0.003
AC	4	49.69	12.42	9.43	0.000
BC	4	982.47	245.62	186.42	0.000
ABC	8	9.92	1.24	0.94	0.500
error	27	35.57	1.32		
total	53	7140.87			

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยมีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งอีกด้วย คือ อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจจิง (AB) อุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอจจิง (AC) และเวลาเอจจิงกับอุณหภูมิเอจจิง (BC) มีเพียงอิทธิพลร่วมสามปัจจัยระหว่างอุณหภูมิอบละลาย เวลาเอจจิงและอุณหภูมิเอจจิง (ABC) ที่ไม่มีส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเมื่อนำข้อมูลมาพล็อตระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยกับระดับของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมจะแสดงให้เห็นอิทธิพลของปัจจัยในลักษณะเชิงเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.1



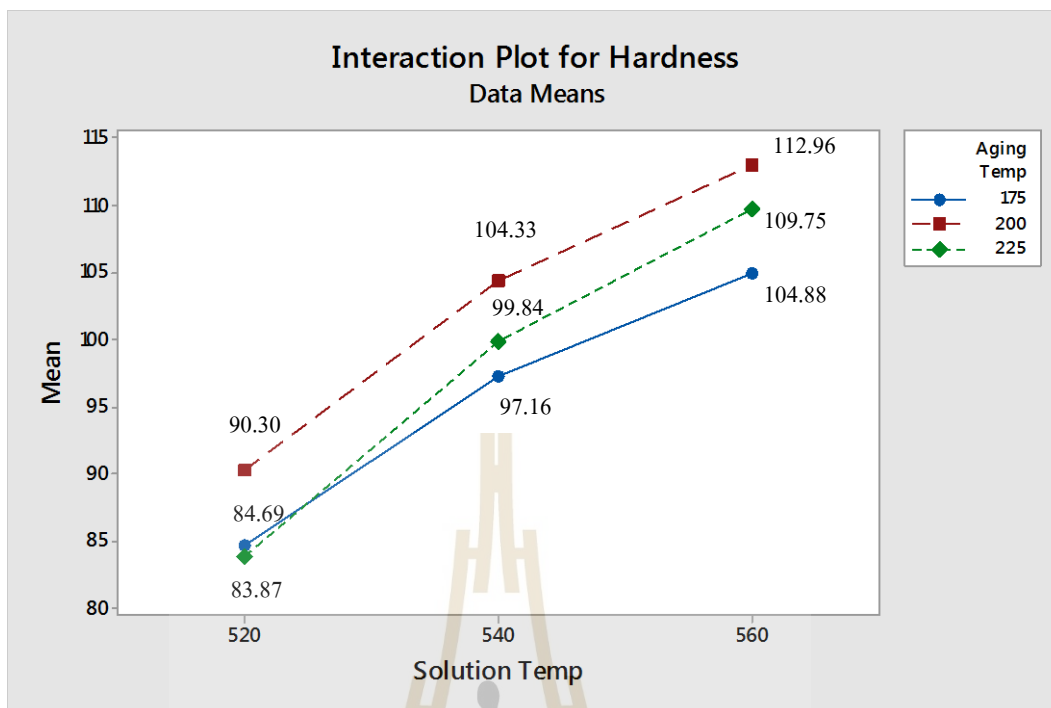
รูปที่ 4.1 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยกับระดับของปัจจัยหลักแต่ละปัจจัย

รูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักแต่ละปัจจัยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบละลาย ส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิอบละลาย (Pajaroen et al., 2013) โดยให้ค่าความแข็งเท่ากับ 86.28, 100.45 และ 109.20 BHN ที่อุณหภูมิ 520°C, 540°C และ 560°C ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเวลาเองจึงพบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในช่วงการเปลี่ยนแปลงเวลาจาก 2 ชั่วโมง เป็น 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นค่าความแข็งไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเองจึงเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิเองจึงจากกราฟพบว่าเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิเองจึงจาก 175°C เป็น 200°C ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอบละลายและเวลาเองจึงแต่พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเองจึงสูงขึ้น (นพพล และคณะ, 2555)



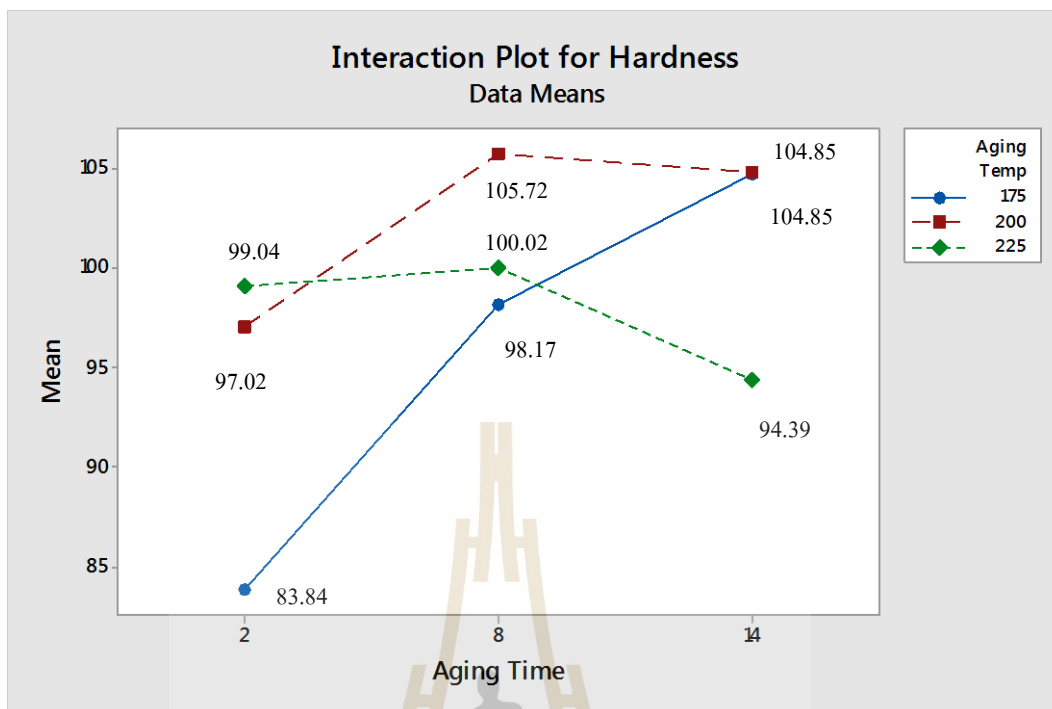
รูปที่ 4.2 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจิง

รูปที่ 4.2 แสดงอิทธิพลระหว่างอุณหภูมิอบละลายและเวลาเอจิง พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิอบละลายสูงขึ้นและเอจิงนานขึ้นตามระดับของปัจจัยส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นดังภาพ เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบละลายสูงจะทำให้การสลายตัวของสารละลายของแข็งแมกนีเซียมและซิลิกอนเข้าไปในเนื้อพื้นได้มากขึ้นเพราะการสลายตัวเป็นไปในลักษณะการแพร่และเมื่อชิ้นงานถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โครงสร้างของอะลูมิเนียมจะมีแมกนีเซียมและซิลิกอนละลายในโครงสร้างเกินสมดุลเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า Supersaturated Solid Solution และเป็นมีลักษณะเป็นกลุ่มของอนุภาค (Clusters) ของแมกนีเซียมและซิลิกอนและเมื่อเวลาในการทำเอจิงนานขึ้นกลุ่มของอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงเป็น GP-Zones พร้อมทั้งจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟส  $\beta''$  ( $Mg_2Si$ ) ที่มีลักษณะเป็น Needle-Shaped ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น (Kolobnev et.al., 2011 ; Buchanan et al., 2017) จากกราฟพบว่าค่าความแข็งที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอบละลายและเวลาที่ใช้ในการทำเอจิง



รูปที่ 4.3 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอจิง

ภาพที่ 4.3 นี้ให้เห็นอิทธิพลระหว่างอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิเอจิง จากภาพพบว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 175°C, 200°C และ 225°C หลังขึ้นงานผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 560°C ให้ค่าความแข็งสูงกว่าการอบละลายที่อุณหภูมิต่ำ โดยให้ค่าความแข็งเท่ากับ 104.88, 112.96 และ 109.75 BHN ตามลำดับ เนื่องจากการอบละลายที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้แมกนีเซียมและซิลิคอนเข้าไปในเนื้อพื้นได้มากขึ้นและได้โลหะผสมที่ความอึดตัวอย่างยิ่งยวดหลังจุ่มขึ้นงานในน้ำ (Quenching) และเมื่อขึ้นงานได้รับความร้อนอีกครั้งในขั้นตอนการทำเอจิง (Artificial Aging) จะทำให้กลุ่มอนุภาคของแมกนีเซียมและซิลิคอนเกิดเป็น GP-Zones และเปลี่ยนเป็น  $\beta''$ ( $Mg_2Si$ ) และ  $\beta'$ ( $Mg_2Si$ ) ซึ่งตะกอน  $\beta''$ ( $Mg_2Si$ ) และ  $\beta'$ ( $Mg_2Si$ ) มีแรงยึดเหนี่ยวกับโครงสร้างเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นไปในลักษณะของการแพร่ (Pogatscher et al., 2011)



รูปที่ 4.4 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิเองจึ่งกับเวลาเองจึ่ง

จากภาพที่ 4.4 ค่าความแข็งหลังการเองจึ่งที่อุณหภูมิและเวลาแตกต่างกัน พบว่าการเองจึ่งโดยใช้เวลา 2 ชั่วโมง ที่ใช้อุณหภูมิสูงจะให้ค่าความแข็งสูงกว่า โดยให้ค่าความแข็งเท่ากับ 83.84, 97.02 และ 98.98 BHN ที่อุณหภูมิ 175°C, 200°C และ 225°C ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มเวลาถึง 14 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิเองจึ่ง 225°C ให้ค่าความแข็งลดลงจากผลที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่พบว่าการเองจึ่งที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเองจึ่งที่อุณหภูมิต่ำในระยะเวลาสั้นแต่เมื่อเวลานานขึ้นพบว่าการใช้อุณหภูมิเองจึ่งต่ำจะให้ค่าความแข็งสูงสุดสูงกว่าการเองจึ่งด้วยอุณหภูมิสูง (Gowrishankar et al., 2014) เพราะการเกิดตะกอนของ  $Mg_2Si$  ที่ทำให้โลหะเกิดความแข็งจะเกิดในลักษณะการแพร่ (Pogatscher et al., 2011) ดังนั้น ถ้าการทำเองจึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงปริมาณของนิวเคลียสจะเกิดได้น้อยแต่ด้วยอุณหภูมิที่สูงจึงส่งผลให้นิวเคลียสหรือตะกอนที่เกิดเปลี่ยนเป็นเฟส  $\beta''(Mg_2Si)$  และ  $\beta'(Mg_2Si)$  ได้เร็วซึ่งเฟสนี้เองจะมีแรงเชื่อมประสานกับโครงสร้างพื้นฐานส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้น (Tan and Said, 2009)

ดังนั้น การเองจึ่งที่อุณหภูมิต่ำถึงแม้ว่าค่าความแข็งจะต่ำในช่วงแรกเพราะการแพร่จะดำเนินไปอย่างช้า ๆ และเกิดเป็นนิวเคลียสหรือตะกอนเป็นจำนวนมากเมื่อเวลาในการทำเองจึ่งนานจะส่งผลให้เปลี่ยนไปเป็นเฟสที่มีแรงเชื่อมประสานกับโครงสร้างเนื้อพื้นส่งผลให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเองจึ่งด้วยอุณหภูมิสูงแต่ทั้งการเองจึ่งด้วยอุณหภูมิสูงและต่ำเมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่าค่า

ความแข็งที่ได้จะลดลง จากภาพเห็นว่าการเอจิงที่ 225°C จะให้ค่าความแข็งเท่ากับ 100.02 BHN ที่เวลาเอจิงนาน 8 ชั่วโมง และค่าความแข็งลดลงมีแนวโน้มลดลงหลังเอจิงนาน 14 ชั่วโมง เนื่องจากเฟส  $\beta''(\text{Mg}_2\text{Si})$  และ  $\beta'(\text{Mg}_2\text{Si})$  เปลี่ยนเป็นสมดุลเฟสทำให้แรงเชื่อมประสานระหว่างตะกอนกับโครงสร้างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมหมดไปหรือเกิดปรากฏการณ์ Over Aging

#### 4.4 แบบจำลองโมเดลประมาณค่าความแข็ง

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.3 สามารถสร้างแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นที่พิจารณาเพียงปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับตัวแปรได้ดังนี้

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{33}x_3^2 \quad (4.1)$$

โดย	$\hat{y}$	คือ	ค่าประมาณความแข็ง (Fitted Value)
	$\beta_0$	คือ	ค่าความแข็งเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด
	$\beta$	คือ	สัมประสิทธิ์การถดถอย
	$x_1$	คือ	อุณหภูมิอบละลาย (Solution Temp, A)
	$x_2$	คือ	อุณหภูมิเอจิง (Aging Time, B)
	$x_3$	คือ	เวลาเอจิง (Aging Temp, C)

จากสมการที่ 4.1 สามารถสร้างแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นได้ดังสมการ 4.2 โดยตัวอย่างการสร้างแบบจำลองขอแสดงไว้ในภาคผนวก ค

$$\hat{y} = -2368 + 7.379A + 15.66B + 2.581C - 0.00872AB + 0.002845AC - 0.04255BC - 0.006764 A^2 - 0.11090 B^2 - 0.009330 C^2 \quad (4.2)$$

จากสมการโมเดลสามารถประมาณค่าความแข็งได้ด้วยการแทนค่าระดับของแต่ละปัจจัยที่ต้องการออกแบบลงในสมการ 4.2 เช่น ปัจจัย A คืออุณหภูมิอบละลายสามารถแทนค่าเป็น 520, 540 และ 560 ปัจจัย B คืออุณหภูมิเอจิงสามารถแทนค่าเป็น 175, 200 และ 225 และปัจจัย C คือเวลาเอจิงสามารถแทนค่าเป็น 2, 8 และ 14 ซึ่งสมการประมาณค่าความแข็งที่สร้างขึ้นโดยการ

กำหนดปัจจัยแบบแฟคทอเรียลแบบ  $3^3$  นี้สามารถสร้างแบบจำลองการถดถอยเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับตัวแปรทั้งแบบเชิงเส้นตรง (Linear) เพื่อดูแนวโน้มของค่าประมาณความแข็ง

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งที่ได้จากโมเดลประมาณค่าความแข็ง (BHN)

Aging Time (hr), B	Aging Temp (°C), C	Solution Temp (°C), A					
		520		540		560	
2	175	71.87	71.87	85.66	85.66	94.03	94.03
	200	83.78	83.78	98.99	98.99	108.79	108.79
	225	84.03	84.03	100.66	100.66	111.88	111.88
8	175	87.30	87.30	100.04	100.04	107.37	107.37
	200	92.83	92.83	106.99	106.99	115.75	115.75
	225	86.70	86.70	102.28	102.28	112.46	112.46
14	175	94.75	94.75	106.44	106.44	112.72	112.72
	200	93.90	93.90	107.01	107.01	114.72	114.72
	225	81.38	81.38	95.92	95.92	105.05	105.05

#### 4.4.1 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ )

จากโมเดลประมาณค่าความแข็งดังสมการที่ 4.2 สามารถทดสอบสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ได้จากสมการ

$$R^2 = SS_{\text{Model}} / SS_{\text{Total}} \quad (4.3)$$

โดย  $SS_{\text{Model}}$  คือ ผลรวมกำลังสองของโมเดล  
 $SS_{\text{Total}}$  คือ ความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล

แทนค่าเข้าไปในสมการที่ 4.3

$$\begin{aligned} SS_{\text{Model}} &= SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AB} + SS_{AB} + SS_{A^2} + SS_{B^2} + SS_{C^2} \\ &= 7089.11 \end{aligned}$$

$$SS_{\text{Total}} = 7140.87$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } R^2 &= 7089.11/7140.87 \\ &= 0.9928 \end{aligned}$$

โดยค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 99.28 ซึ่งค่า  $R^2$  ควรมีค่า  $0 \leq R^2 \leq 1$  ดังนั้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมในการประมาณค่าความแข็ง นอกจากนั้น ยังได้ทดสอบค่า  $R^2_{\text{adj}}$  ของโมเดลเนื่องจากค่า  $R^2$  ไม่สามารถแสดงขอบเขตของโมเดลได้ชัดเจนดังสมการ 4.4

$$R^2_{\text{adj}} = 1 - \frac{SS_E/(n-p)}{SS_T/(n-1)} \quad (4.4)$$

โดย  $n$  คือ จำนวนการทดลองทั้งหมด  
 $p$  คือ Degree of Freedom ของโมเดล

จากการทดสอบได้ค่า  $R^2_{\text{adj}}$  เท่ากับ 99.13 ดังนั้น จากการทดสอบค่า  $R^2$  ที่มีค่าเท่ากับ 99.28 และค่า  $R^2_{\text{adj}}$  ที่มีค่าเท่ากับ 99.13 ของแบบจำลอง โมเดลที่สร้างมีความเหมาะสมในการประมาณค่าความแข็งหลังการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกหรือดกตะกอน

#### 4.4.2 การประมาณช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Intervals)

การประมาณช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ( $\alpha = 0.05$ ) จากการประมาณค่าจากโมเดลสามารถหาได้จากสมการ

$$Y \pm t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{MSE} \quad (4.5)$$

$$\text{จาก } MSE = SS_{\text{Residual Error}}/df_{\text{Error}} \quad (4.6)$$

และค่า  $SS_{\text{Residual Error}}$  หาได้จาก

$$\begin{aligned} SS_{\text{Residual Error}} &= SS_{\text{Total}} - SS_{\text{Model}} \\ &= 7140.87 - 7089.11 \\ &= 51.76 \end{aligned} \quad (4.7)$$



และค่า Degree of Freedom ของปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญเท่ากับ 27 แทนค่าลงในสมการ 4.6 ได้

$$\begin{aligned} \text{MSE} &= \text{SS}_{\text{Residual Error}} / \text{df}_{\text{Error}} \\ &= 51.76 / 27 \\ &= 1.92 \\ \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{1.92} \\ &= 1.3856 \\ t_{0.025, 27} &= 2.0518 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ 4.5 จะได้

$$\begin{aligned} &= Y \pm t_{0.025, 27} \sqrt{\text{MSE}} \\ &= Y \pm (1.3856 \times 2.0518) \\ &= Y \pm 2.84 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความแข็งที่ประมาณได้จากโมเดลในช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ  $\pm 2.84$  BHN

#### 4.4.3 การสอบทวนความถูกต้องของโมเดล (Validation)

จากสมการที่ 4.2 โมเดลประมาณค่าความแข็งดังกล่าวสามารถแทนค่าได้ด้วยการแทนค่าจริงของระดับปัจจัยที่สนใจลงสมการ

$$\begin{aligned} \hat{y} &= -2368 + 7.379A + 15.66B + 2.581C - 0.00872AB + 0.002845AC - 0.04255BC \\ &\quad - 0.006764 A^2 - 0.11090 B^2 - 0.009330 C^2 \end{aligned}$$

โดยมีขั้นตอนการสอบทวน ดังนี้

1. ใส่ระดับของปัจจัยที่ต้องการประมาณค่าลงในแบบจำลองโมเดล เช่น ต้องการประมาณค่าความแข็งของชิ้นงานที่เงื่อนไขคือ อบละลายด้วยอุณหภูมิ 520 °C และเอจจึงที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังนั้น แทนค่าปัจจัยอุณหภูมิอบละลาย (A) ด้วย 520, ปัจจัยอุณหภูมิเอจจึง (B) ด้วย 2 และปัจจัยอุณหภูมิเอจจึง (C) ด้วย 200 ตามลำดับเพื่อประมาณค่าความแข็ง

2. นำชิ้นงานไปอบละลายด้วยอุณหภูมิ 520 °C และเอจิงที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้ววัดค่าความแข็งแบบบริเนล

3. นำค่าความแข็งที่ได้จากการวัดชิ้นงานทดสอบจริงมาเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งที่ได้จากแบบจำลองโมเดล โดยค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบโมเดลควรมีค่าอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ  $\pm 2.84$  BHN กับค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบงานจริง

ดังนั้น ในการทดลองครั้งนี้ได้ตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลทั้งหมด 5 เงื่อนไขดังนี้

1. อุณหภูมิอบละลาย 520 °C เอจิงที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. อุณหภูมิอบละลาย 520 °C เอจิงที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
3. อุณหภูมิอบละลาย 540 °C เอจิงที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. อุณหภูมิอบละลาย 540 °C เอจิงที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. อุณหภูมิอบละลาย 560 °C เอจิงที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากการทดลองตามเงื่อนไขและการแทนค่าในแบบจำลองโมเดลได้ผลการทดลองดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 4.5 ผลการสอบทวนแบบจำลองโมเดล

ระดับปัจจัย			ค่าความแข็งจากแบบจำลองโมเดล(BHN)	ค่าความแข็งจากการทดลอง(BHN)
A	B	C		
520	2	175	71.85 $\pm$ 2.84	74.30
520	8	175	87.27 $\pm$ 2.84	86.10
540	2	175	85.64 $\pm$ 2.84	86.75
540	2	200	98.98 $\pm$ 2.84	96.15
560	2	175	94.02 $\pm$ 2.84	96.39

จากการสอบทวนโมเดลด้วยวัสดุโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 พบว่าค่าความแข็งที่ได้อยู่ในช่วงของความเชื่อมั่นที่ 95% ของแบบจำลองโมเดลที่สร้างขึ้นและจากโมเดลที่สามารถประมาณค่าความแข็งได้ในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% นี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบค่าความแข็ง โดยมีข้อจำกัดคือการกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยควรเป็นไปตามการทดลองนี้ ดังนั้น สำหรับระดับปัจจัยอื่นๆ ยังคงต้องศึกษาเพิ่มเติม จากที่กล่าวมาข้างต้นและจากข้อมูลการจำหน่ายของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 ตามท้องตลาดพบว่ามีความแข็งสูงสุดไม่เกิน 90 BHN ในสภาพจำหน่าย ดังนั้น จากโมเดลสามารถกำหนดเงื่อนไขเพื่อให้ได้ค่าความแข็งไม่เกิน 90 BHN คือ กำหนดอุณหภูมิอบละลายที่ 540 °C เอจิงที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ค่าประมาณ

ความแข็งจากโมเดลเท่ากับ  $85.64 \pm 2.84$  BHN ที่นอกจากระดับปัจจัยนี้จะได้ค่าความแข็งตามที่ต้องการแล้วยังใช้เวลาในขั้นตอนการทำเองจึงน้อยทำให้ประหยัดเวลาและพลังงานในกระบวนการผลิต โดยทั่วไปอะลูมิเนียมเกรด 6061 มีความแข็งแรงสูงและทนต่อการกัดกร่อนได้ดีจึงนิยมนำไปทำแม่พิมพ์ จิ๊ก ฟิกเจอร์ นอกจากนี้อะลูมิเนียมผสมชนิดนี้ยังสามารถชุบอะโนไดซ์สีได้สวยงามเหมาะกับการใช้เป็นอุปกรณ์หรือเฟอร์นิเจอร์ตกแต่งอาคารสถานที่ ที่มา <http://www.sahamit.co.th/index.php/aluminium-alloy-th/6061-aluminium-alloy>, <https://www.juthawan.co.th/product-item/a6061/>, สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2563)

#### 4.5 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนและสร้างแบบจำลองโมเดลประมาณค่าความแข็งดังสมการที่ 4.2 ต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล โดยสมมติฐานของการออกแบบการทดลองคือค่าความผิดพลาด (Error) ของแบบจำลองต้องมีการแจกแจงปกติ (Normal Distribution) และมีความเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีความแปรปรวนคงที่

โดยค่าความผิดพลาด (Error หรือ Residual) คือค่าผลต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากสมการการทดลอง ( $y_{ijkl}$ ) กับค่าประมาณจากโมเดล ( $\hat{y}_{ijkl}$ ) ดังนั้น ( $e_{ijkl} = y_{ijkl} - \hat{y}_{ijkl}$ )

โดย	$e_{ijkl}$	คือ	ค่าความผิดพลาด (Error หรือ Residual)
	$y_{ijkl}$	คือ	ค่าความแข็งที่ได้จากการทดลอง
	$\hat{y}_{ijkl}$	คือ	ค่าประมาณความแข็งที่ได้จากการโมเดล (Fitted Value)

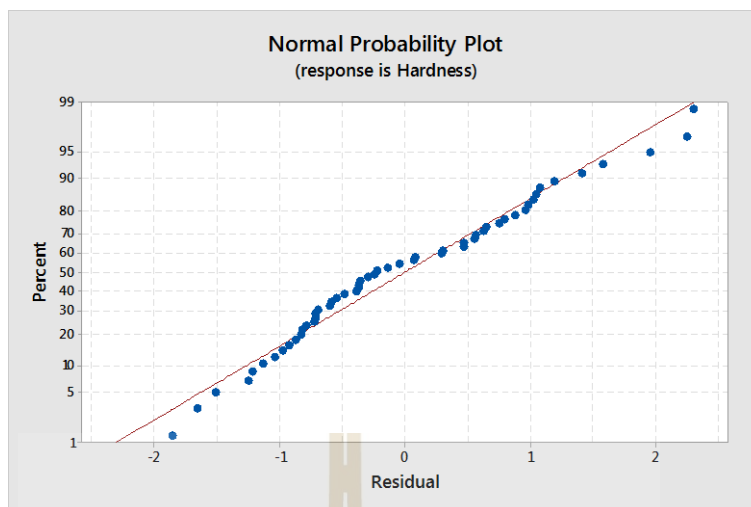
ตารางที่ 4.6 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดลอง (Error หรือ Residual)

Aging Time (hr), B	Aging Temp (°C), C	Solution Temp (°C), A					
		520		540		560	
2	175	0.63	-0.59	0.07	-1.66	-0.83	2.30
	200	0.65	0.55	-0.39	1.41	-0.04	-0.79
	225	1.05	-0.35	0.09	1.59	-0.13	-1.13
8	175	-0.92	1.08	0.96	-0.29	-0.37	-0.87
	200	0.47	1.20	0.76	-1.24	-0.25	2.25
	225	-0.82	-0.97	-1.03	0.47	0.29	-0.71
14	175	-0.72	0.80	-0.69	0.31	1.03	-0.22
	200	0.88	-0.60	0.99	-0.37	-0.72	-1.22
	225	-0.48	0.55	-0.37	0.56	1.95	-0.55

จากข้อสมมติฐานเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองดังกล่าวจึงนำค่าส่วนเหลือคงค้าง (Residual) ซึ่งมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับความผิดพลาดมาตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามสมมติฐานได้ดังนี้

#### 4.5.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

สามารถตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ เช่น การตรวจสอบพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ของค่าความผิดพลาดถ้าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติพล็อตที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าจุดพล็อตส่วนใหญ่เรียงอยู่ในแนวเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ 4.5 กราฟการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนเหลือค้ำ

จากรูป 4.5 พบว่ามีค่าส่วนเหลือค้ำที่มากกว่าตัวอื่น (Outlier) ดังนั้นสามารถตรวจสอบโดยการตรวจส่วนเหลือค้ำ (Residual) ที่ถูกเทียบเป็นค่ามาตรฐาน (Standardized Residual)

$$d_{ijkl} = \frac{e_{ijkl}}{\sqrt{MSE}} \quad (4.8)$$

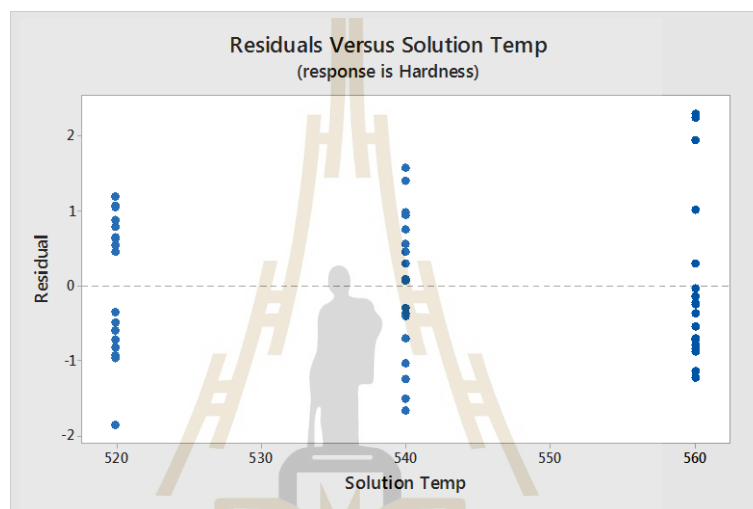
หากค่าความผิดพลาด  $e_{ijkl}$  มีสมมติฐานเป็นจริงคือมีการแจกแจงแบบปกติแล้ว ดังนั้นส่วนเหลือค้ำที่ถูกเทียบเป็นค่ามาตรฐานควรประมาณได้เป็นการกระจายแบบปกติ ดังนั้นประมาณ 68% ของส่วนเหลือค้ำที่ถูกเทียบเป็นค่ามาตรฐานควรตกอยู่ในช่วง  $\pm 1$  ประมาณ 95% ควรตกในช่วง  $\pm 2$  และ 99% ควรตกในช่วง  $\pm 3$  ถ้าส่วนเหลือค้ำมากกว่า 3 หรือ 4 ควรถูกนำมาพิจารณา (ปารเมศ ชูติมา, 2545) ดังนั้น จากรูป 4.5 นำค่าแทนในสมการที่ 4.8

$$\begin{aligned} d_{ijkl} &= \frac{2.30}{\sqrt{1.32}} \\ &= 2.00 \end{aligned}$$

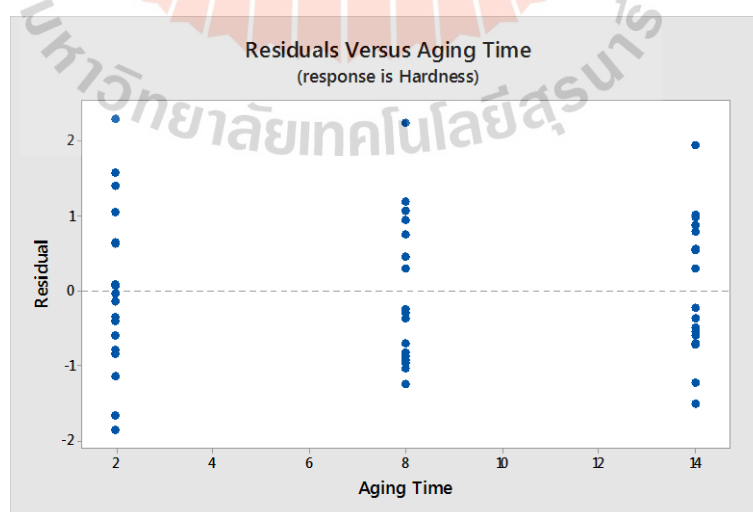
ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าส่วนเหลือค้ำที่นำมาพิจารณาไม่มีผลที่ทำให้ความแปรปรวนบิดเบือนไป

#### 4.5.2 การตรวจสอบความแปรปรวน

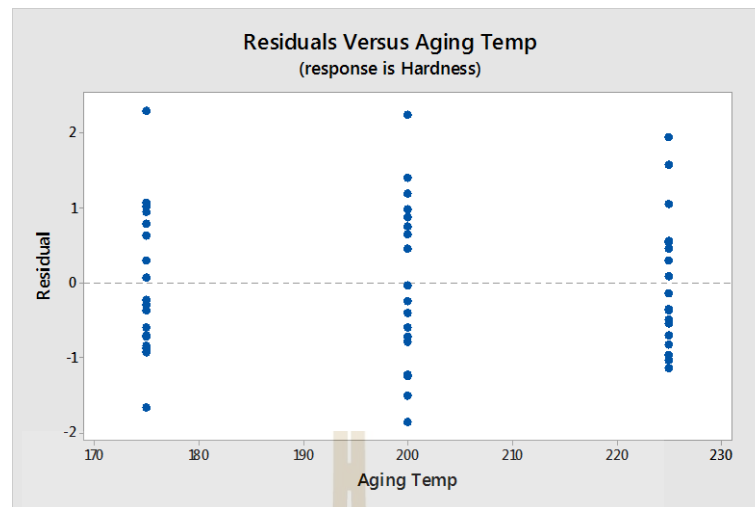
การตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ทำโดยการพล็อตระหว่างค่าส่วนเหลือคงค้างของข้อมูลกับแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย รูปที่ 4.6-4.8 แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนเหลือคงค้างที่แต่ละระดับปัจจัยมีการกระจายตัวที่สมมูลกัน จึงทำให้สรุปได้ว่าค่าความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดมีค่าคงที่ในแต่ละระดับของอุณหภูมิอบละลาย แต่ละลำดับของเวลาเอจจิงและแต่ละระดับของอุณหภูมิของอุณหภูมิเอจจิง



รูปที่ 4.6 กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดที่แต่ละระดับของอุณหภูมิอบละลาย



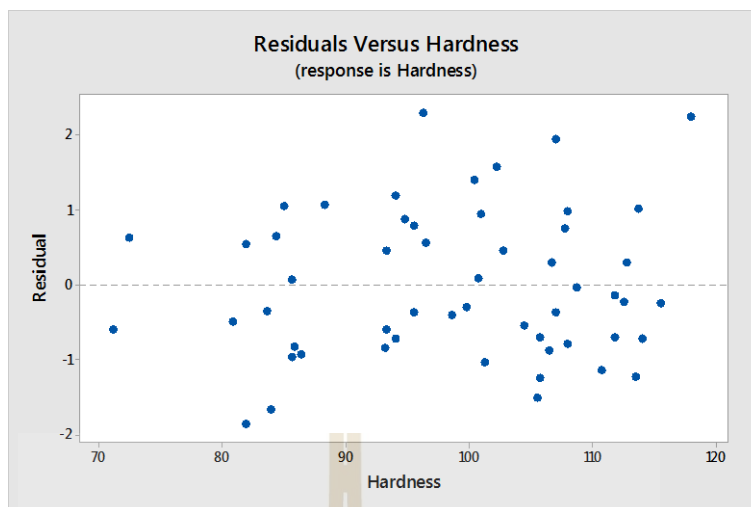
รูปที่ 4.7 กราฟพล็อตระหว่างค่าส่วนเหลือคงค้างที่แต่ละระดับของเวลาเอจจิง



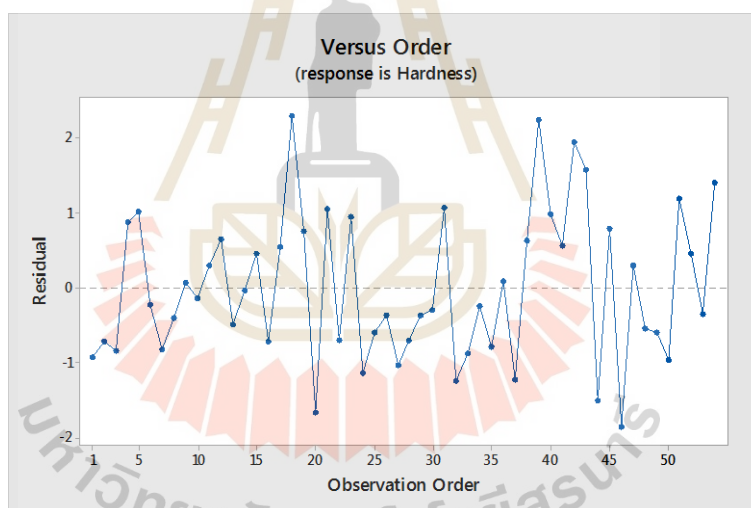
รูปที่ 4.8 กราฟพล็อตระหว่างค่าส่วนเหลือคงค้างของแต่ละระดับของอุณหภูมิเอจจิง

#### 4.5.3 การตรวจสอบความอิสระของข้อมูล

การตรวจสอบความอิสระของข้อมูลทำได้โดยการพล็อตระหว่างส่วนเหลือคงค้างกับค่าประมาณความแข็งจากโมเดลและลำดับการทดลอง รูปที่ 4.9 คือพล็อตระหว่างค่าส่วนคงเหลือคงค้างกับค่าประมาณจากโมเดล จะเห็นว่าค่าส่วนเหลือคงค้างมีการกระจายโดยไม่แสดงแนวโน้มหรือรูปแบบใด ๆ จึงสรุปได้ว่าความเป็นปรวนของค่าความผิดพลาดมีค่าคงที่ ส่วนรูปที่ 4.10 แสดงพล็อตระหว่างค่าส่วนเหลือคงค้างกับลำดับการทดลองจะเห็นว่าส่วนเหลือคงค้างมีค่าทั้งบวกและลบ โดยกระจายรอบค่า 0 และไม่มีแนวโน้มใด จึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดมีค่าคงที่



รูปที่ 4.9 กราฟพล็อตระหว่างค่าส่วนเหลือคงค้างกับค่าประมาณจากโมเดล



รูปที่ 4.10 กราฟพล็อตระหว่างค่าส่วนเหลือคงค้างกับลำดับการทดลอง

#### 4.6 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

จากการนำค่าความแข็งมาวิเคราะห์ผลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติพบว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความแข็งที่เกิดขึ้นเกิดจากการตกตะกอนของผลึก  $Mg_2Si$  ในโครงสร้างเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) ส่งผลให้ค่าความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยและระดับปัจจัยที่ได้ออกแบบไว้ คือ อุณหภูมิอบละลาย เวลาเอจจิง และ อุณหภูมิเอจจิง จากผลการทดลองดังกล่าวได้นำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและ



องค์ประกอบทางเคมีของธาตุเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและลักษณะการเปลี่ยนแปลงเฟสที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกหรือตกตะกอนเท่านั้น ดังนั้นเครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงาน ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope; OM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) แบบ Point Analysis เทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิมิชชันอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (X-ray photoemission electron microscopy, X-PEEM) และเทคนิค Low-Energy Electron Microscopy (LEEM) โดยมีขั้นตอนการตรวจสอบดังนี้

#### 4.6.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope; OM)

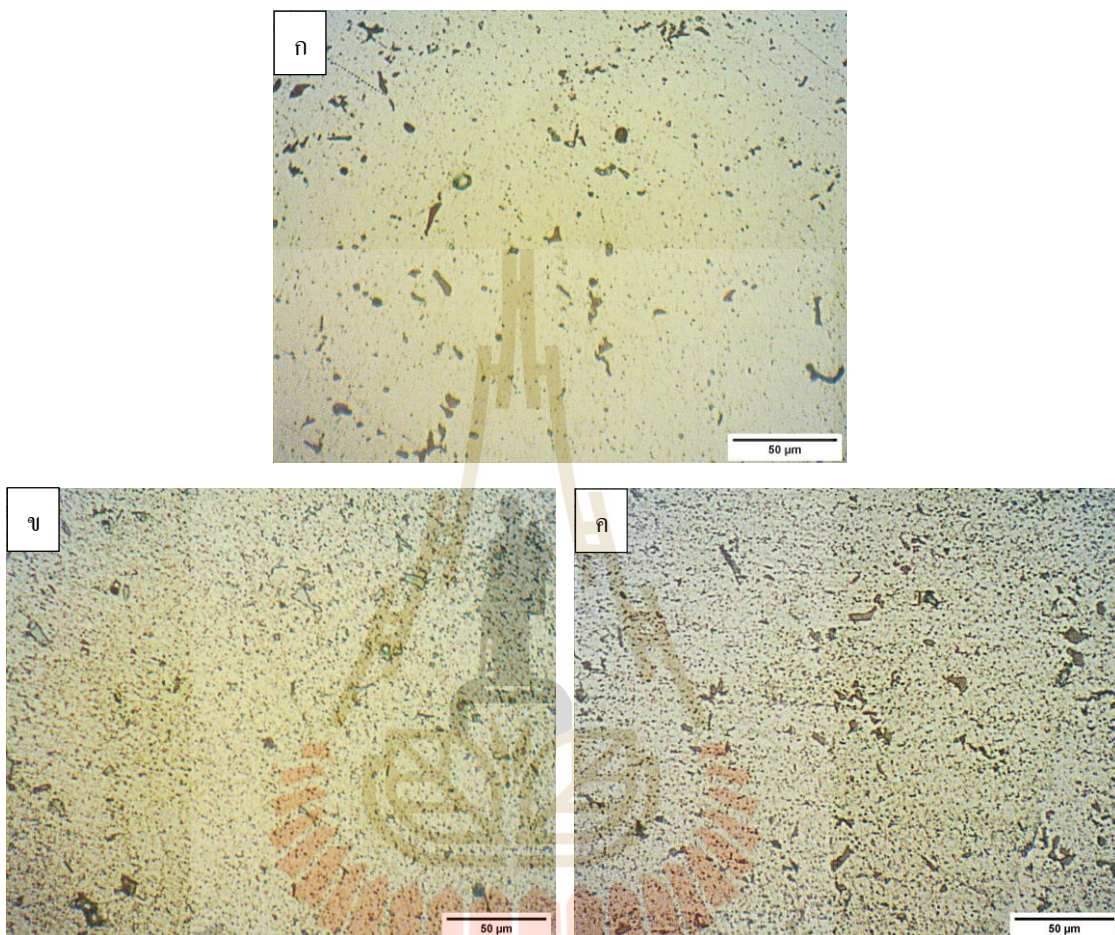
จากตาราง 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยตาราง ANOVA พบว่าอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญดังนั้นในการพิจารณาผลจะพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยมากกว่าการพิจารณาเพียงอิทธิพลหลัก (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

และจากตารางพบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยคือ เวลาเอจิงและอุณหภูมิเอจิงมีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งสูงกว่าอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจิงและอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอจิง ดังนั้นการแสดงผลภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X จะลำดับภาพดังนี้

- 1) โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 520°C
  - เอจิงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง
  - เอจิงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง
  - เอจิงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง
- 2) โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 540°C
  - เอจิงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง
  - เอจิงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง
  - เอจิงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง
- 3) โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 560°C และ
  - เอจิงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง
  - เอจิงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง
  - เอจิงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง

#### 4.6.1.1 โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 520°C

1) เองจิงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง

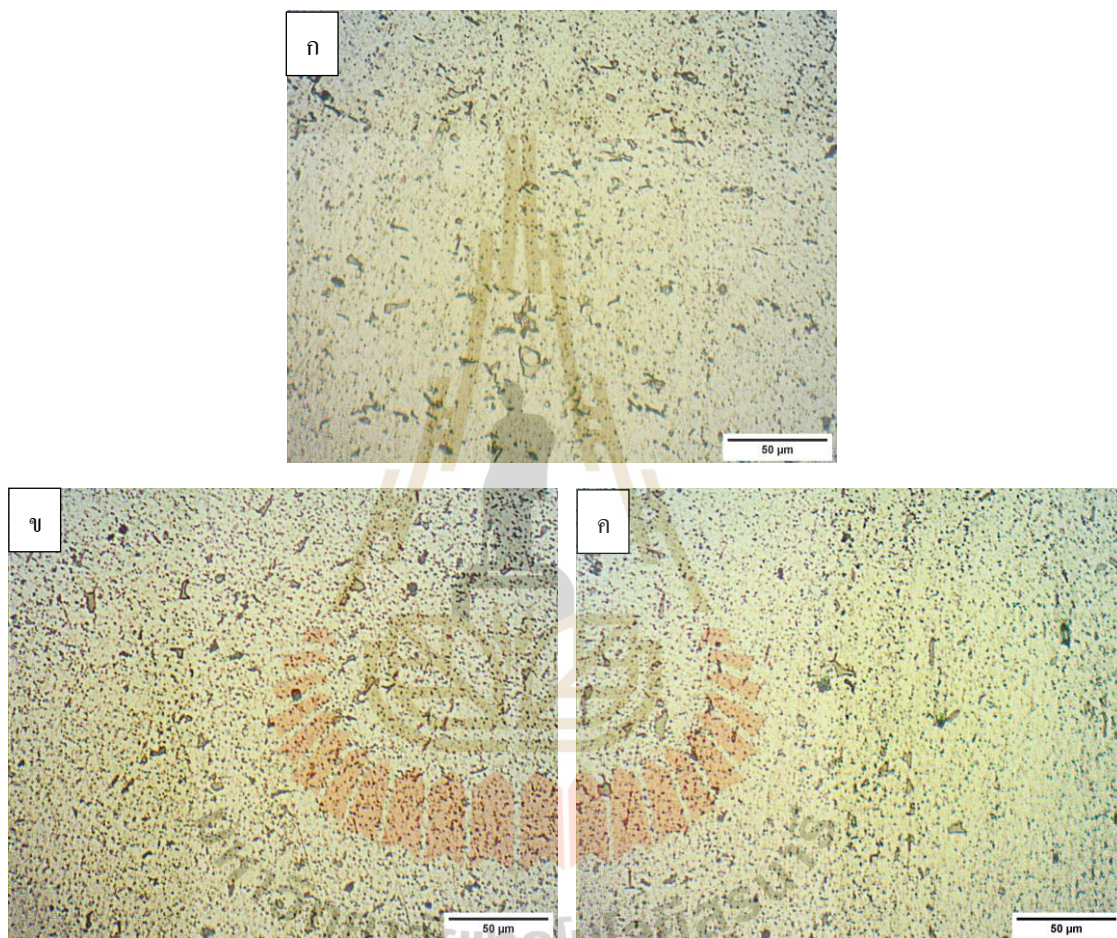


รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X เองจิงที่อุณหภูมิ 175°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 520°C เองจิงที่อุณหภูมิ 175°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จากภาพแสดงให้เห็นโครงสร้างพื้นที่เป็นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) และมีการตกตะกอน  $Mg_2Si$  บนเนื้อพื้นอะลูมิเนียม และมีอะลูมิเนียมออกไซด์บนผิวชิ้นงานเนื่องจากอะลูมิเนียมเกิดเป็นออกไซด์ได้ง่าย และจากภาพเห็นว่าชิ้นงานเองจิง 2 ชั่วโมง มีการกระจายตัวของ  $Mg_2Si$  น้อยกว่าการเองจิงที่ 8 และ 14 ชั่วโมง และการเองจิงที่ 14 ชั่วโมง จะเห็นว่ามีการตกตะกอนของ  $Mg_2Si$  มากกว่าการเองจิงที่ 8 ชั่วโมง เนื่องจาก

การใช้เวลาในการอบจึนนานส่งผลให้กลุ่มอะตอมของ  $Mg_2Si$  จับตัวกันได้มากกว่า สอดคล้องกับค่าความแข็งเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 71.89, 87.38 และ 94.79 BHN ตามลำดับเวลาที่ใช้ในการอบจึน

2) อบจึนที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง

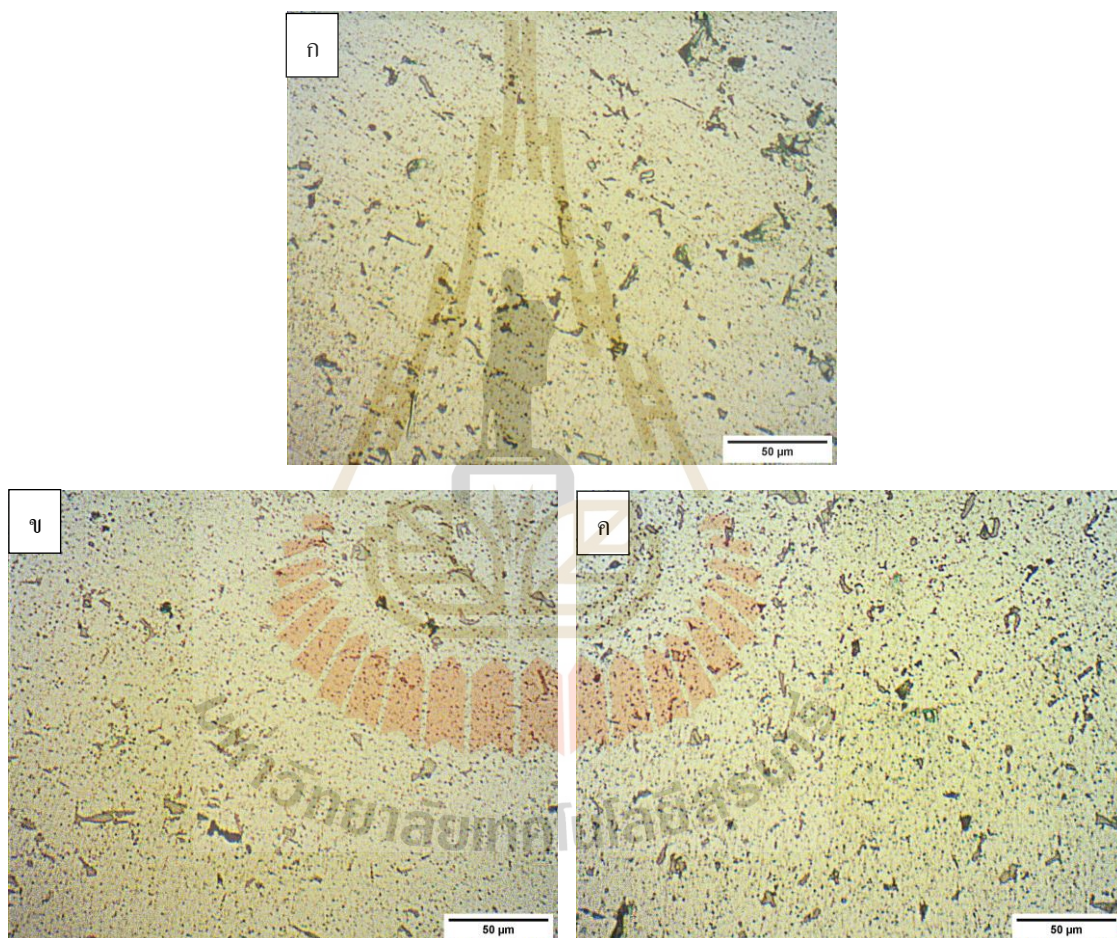


รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X ผ่านการอบจึนอุณหภูมิ 200°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 520°C อบจึนที่อุณหภูมิ 200°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จากภาพแสดงให้เห็นโครงสร้างพื้นที่เป็นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) และมีการตกตะกอน  $Mg_2Si$  บนเนื้อพื้นอะลูมิเนียม และมีอะลูมิเนียมออกไซด์บนผิวชิ้นงาน โดยรูปที่ 4.12 เป็นรูปที่ชิ้นงานผ่านการอบจึนที่อุณหภูมิสูงกว่า

รูป 4.11 จากภาพเห็นว่าชิ้นงานที่เอจิงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีการกระจายตัวของ  $Mg_2Si$  เพิ่มขึ้นที่เป็นเช่นนี้เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของแมกนีเซียมและซิลิคอนส่งผลให้มีตะกอน  $Mg_2Si$  มากกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ  $175^{\circ}C$  เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเอจิงส่งผลให้กลุ่มอะตอมของ  $Mg_2Si$  สามารถรวมตัวกันได้เร็วขึ้น เห็นได้จากค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 71.89 BHN ที่อุณหภูมิเอจิง  $175^{\circ}C$  และค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 83.18 BHN ที่อุณหภูมิเอจิง  $200^{\circ}C$

3) เอจิงที่อุณหภูมิ  $225^{\circ}C$  เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง



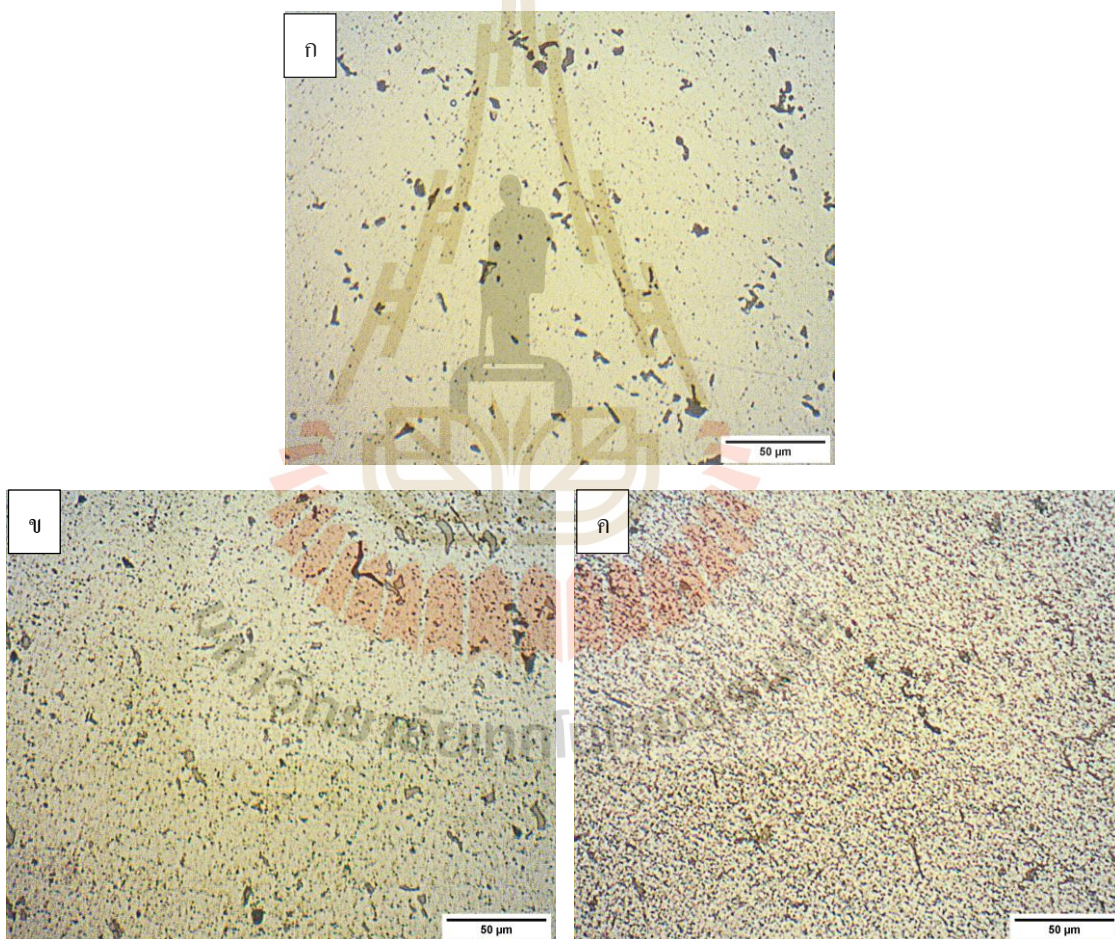
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X ผ่านการเอจิงอุณหภูมิ  $225^{\circ}C$  (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ  $520^{\circ}C$  เอจิงที่อุณหภูมิ  $225^{\circ}C$  (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จากภาพแสดงให้เห็น

โครงสร้างพื้นที่เป็นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) และมีการตกตะกอน  $Mg_2Si$  บนเนื้อพื้นอะลูมิเนียม และมีอะลูมิเนียมออกไซด์บนผิวชิ้นงานเช่นเดียวกับรูปที่ 4.11 และ 4.12 จากภาพเห็นว่าการกระจายตัวของ  $Mg_2Si$  เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันที่เป็นเช่นนี้เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของแมกนีเซียมและซิลิคอนส่งผลให้มีตะกอน  $Mg_2Si$  นอกจากนั้นยังเห็นว่ายังมีอะลูมิเนียมออกไซด์เกิดขึ้นที่ผิวของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 84.38, 85.81 และ 81.42 BHN ตามลำดับเวลาที่ใช้ในการทำเองจึงคือ 2, 8 และ 14 ชั่วโมง

#### 4.6.1.2 โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 540°C

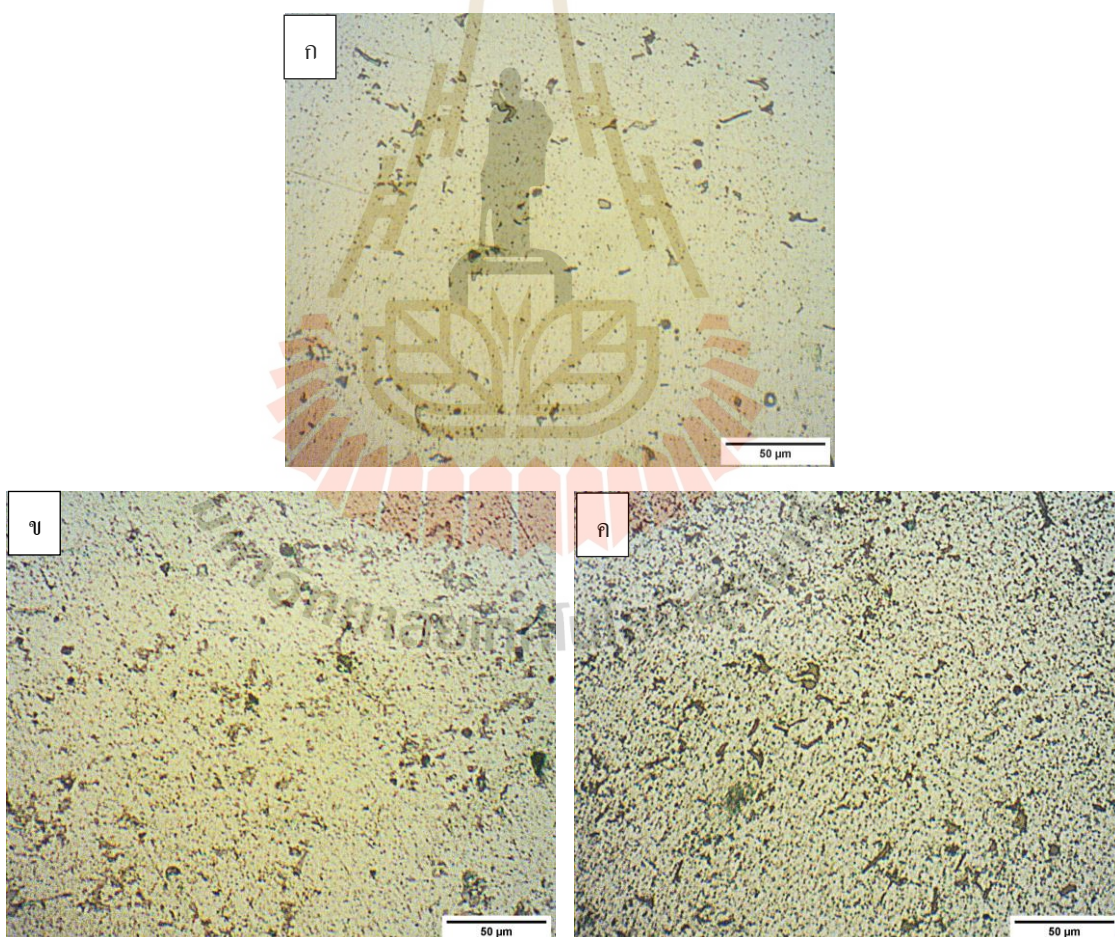
1) เองจึงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคที่กำดั่งขาย 50X ผ่านการอบละลายอุณหภูมิ 175°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

รูปที่ 4.14 จากภาพแสดงให้เห็นโครงสร้างพื้นที่เป็นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) และมีการตกตะกอน  $Mg_2Si$  บนเนื้อพื้นอะลูมิเนียม และมีอะลูมิเนียมออกไซด์บนผิวชิ้นงาน จากภาพเห็นว่าชิ้นงานเองจึง 2 ชั่วโมง มีตะกอน  $Mg_2Si$  น้อยกว่าการเองจึงที่ 8 และ 14 ชั่วโมง โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 84.87, 100.38 และ 106.25 BHN ตามลำดับ นอกจากนี้จะเห็นว่าการเกิดการตกตะกอนที่ 14 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ  $520^{\circ}C$  พบว่ามีการตกตะกอนของ  $Mg_2Si$  มากกว่า โดยค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 94.79 BHN เป็น 106.25 BHN เนื่องจากเวลาในการอบละลายที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้แมกนีเซียมและซิลิคอนละลายเข้าไปในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมเป็นเฟสเดียวในขั้นตอนการทำอบละลาย (Solution Treatment) ได้มากกว่าการอบละลายที่อุณหภูมิต่ำ

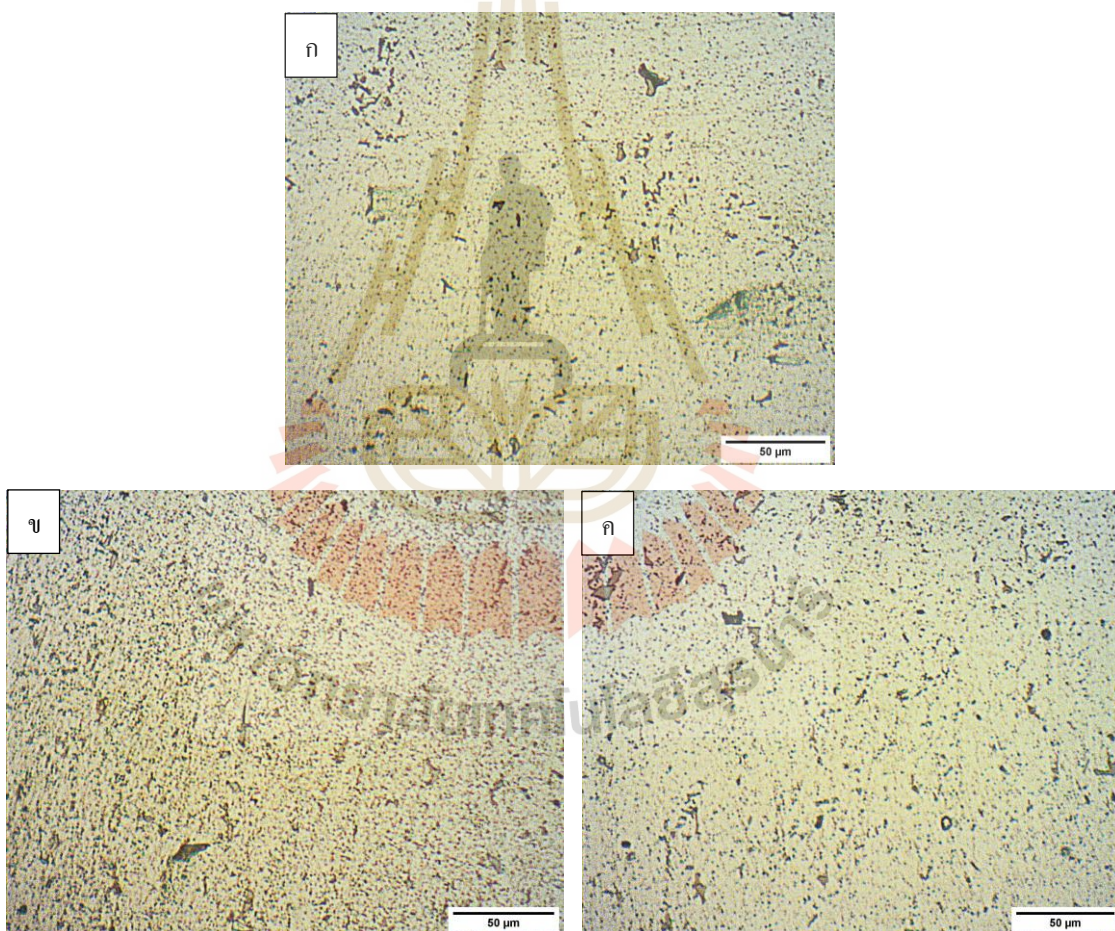
2) เองจึงที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}C$  เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง



รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X ผ่านการเองจึงอุณหภูมิ  $200^{\circ}C$  (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 540°C เองจิงที่อุณหภูมิ 200°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จากภาพแสดงให้เห็นโครงสร้างพื้นที่เป็นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) และมีการตกตะกอน  $Mg_2Si$  บนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและมีอะลูมิเนียมออกไซด์บนผิวชิ้นงาน จากรูปจะเห็นว่า การเองจิงที่อุณหภูมิ 200°C ตะกอน  $Mg_2Si$  มีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการเองจิงที่อุณหภูมิ 175°C โดยค่าความแข็งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 84.87, 100.38 และ 106.25 BHN เป็น 99.50, 106.75 และ 106.75 BHN ตามลำดับเวลาที่ใช้ในการเองจิง

3) เองจิงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง

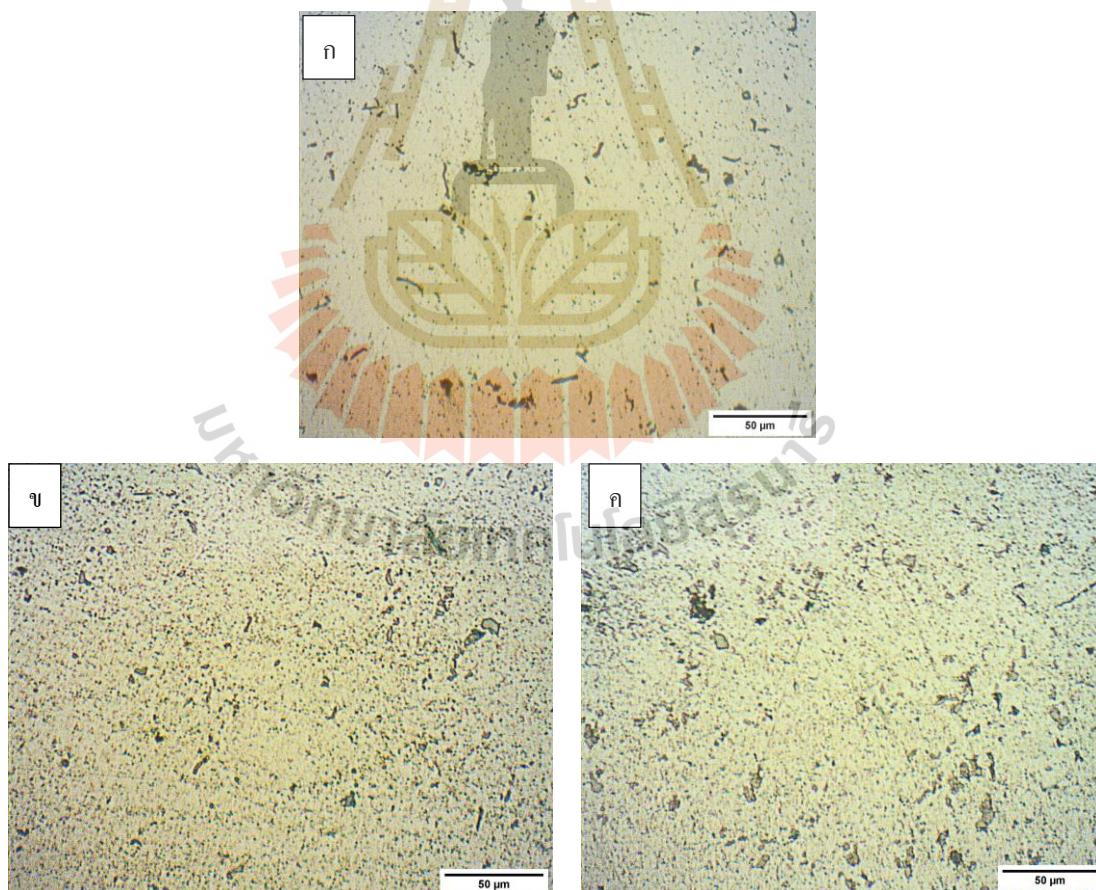


รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X ผ่านการเองจิงอุณหภูมิ 225°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

รูปที่ 4.16 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 540°C เองจิงที่อุณหภูมิ 225°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จากภาพแสดงให้เห็น โครงสร้างพื้นที่เป็นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) และมีการตกตะกอน  $Mg_2Si$  บนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและมีอะลูมิเนียมออกไซด์บนผิวชิ้นงาน จากรูปเห็นว่ามีการตกตะกอน  $Mg_2Si$  ที่เพิ่มขึ้นแม้ว่าจะใช้เวลาในการเองจิง เพียง 2 ชั่วโมง เพราะการเองจิงที่อุณหภูมิสูงจะเร่งการเกิดการรวมตัวเป็นตะกอน  $Mg_2Si$  แต่การใช้เวลาเองจิงนานเกินไปในการทำเองจิงที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ค่าความแข็งที่ได้นั้นกลับลดต่ำลงอีกครั้งเนื่องจากแรงเชื่อมประสานระหว่างตะกอนกับโครงสร้างพื้นฐานนั้นค่อย ๆ หดไป เห็นได้จากค่าความแข็งที่ลดลงจาก 106.75 BHN เป็น 102.00 BHN หลังเองจิงด้วยอุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และลดลงจาก 106.75 BHN เป็น 96.02 BHN หลังเองจิงด้วยอุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

#### 4.6.1.3 โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 560°C

1) เองจิงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง

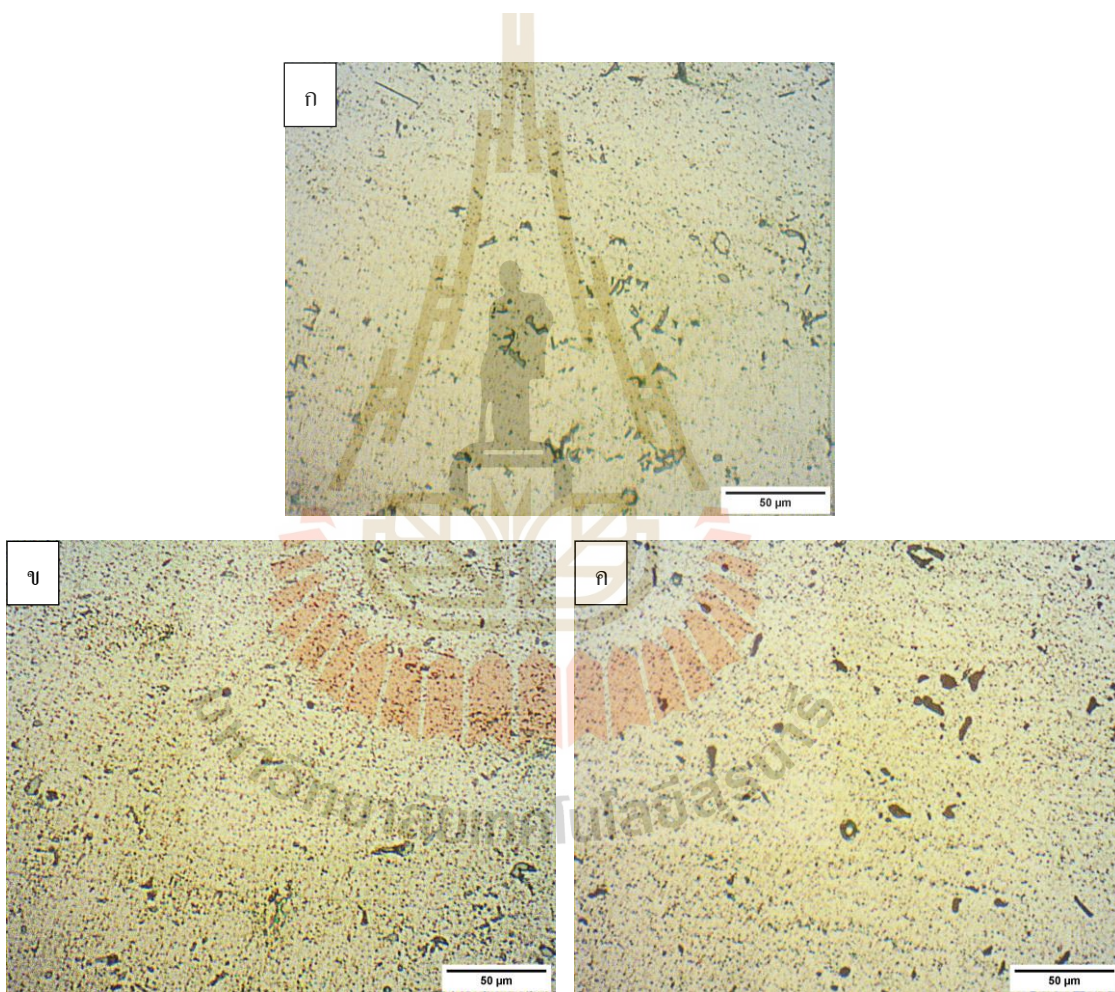


รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X ผ่านการอบละลายอุณหภูมิ 175°C (ก) เวลาเองจิง 2 ชั่วโมง (ข) เวลาเองจิง 8 ชั่วโมง (ค) เวลาเองจิง 14 ชั่วโมง



รูปที่ 4.17 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 560°C เองจึงที่อุณหภูมิ 175°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จากภาพแสดงให้เห็นโครงสร้างพื้นที่เป็นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) และมีการตกตะกอน  $Mg_2Si$  บนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและมีอะลูมิเนียมออกไซด์บนผิวชิ้นงาน จากรูปจะเห็นว่าตะกอน  $Mg_2Si$  มีการตกตะกอนบนชิ้นงานที่เวลาเองจึง 2 ชั่วโมง แต่การกระจายตัวที่ 8 และ 14 ชั่วโมง ตะกอน  $Mg_2Si$  มีการตกตะกอนมากและละเอียดกว่าการเองจึงที่ 2 ชั่วโมง โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 94.77, 106.75 และ 113.13 BHN

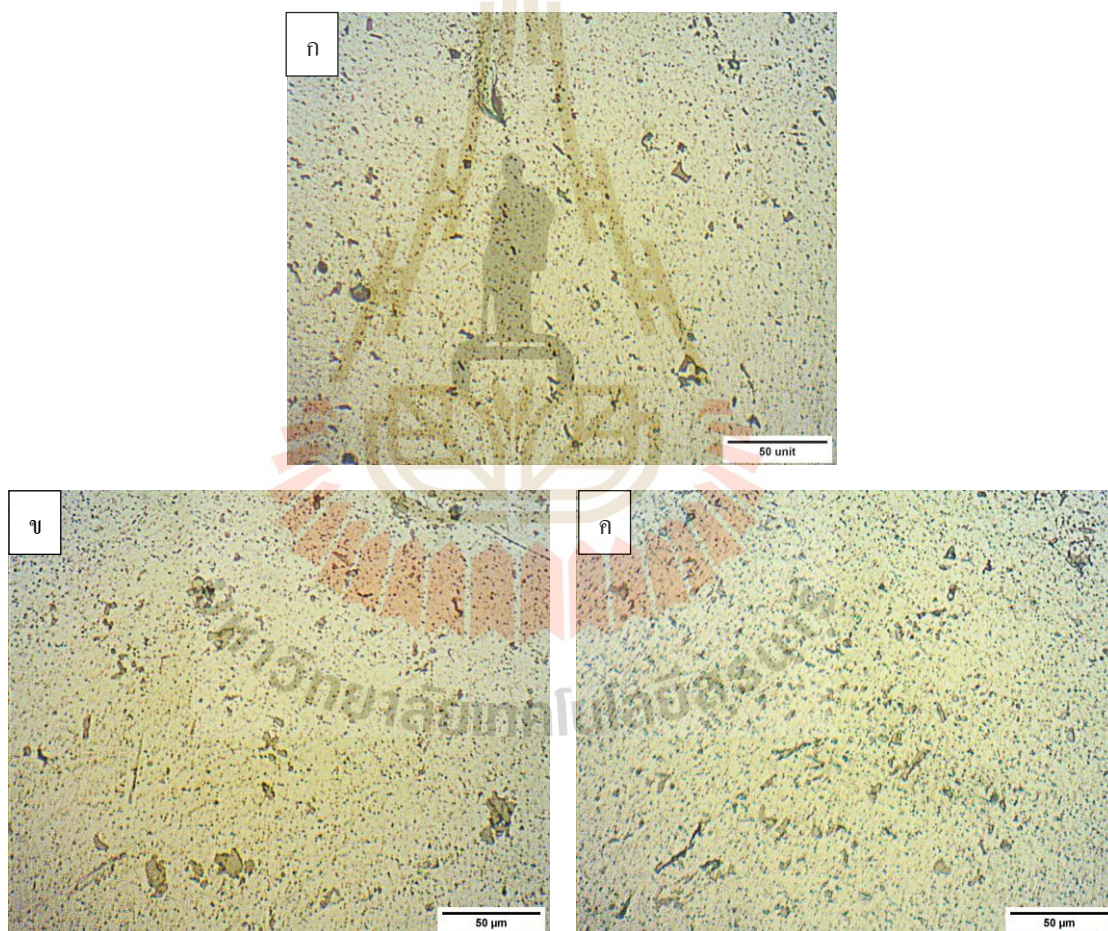
2) เองจึงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง



รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X ผ่านการเองจึงอุณหภูมิ 200°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

รูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 560°C เองจึงที่อุณหภูมิ 200°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จากภาพแสดงให้เห็นโครงสร้างพื้นที่เป็นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) และมีการตกตะกอน  $Mg_2Si$  บนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและมีอะลูมิเนียมออกไซด์บนผิวชิ้นงาน จากรูปจะเห็นว่าตะกอน  $Mg_2Si$  มีการตกตะกอนบนชิ้นงานที่เวลาเองจึง 2 ชั่วโมง เพิ่มมากขึ้นกว่าการเองจึงที่อุณหภูมิ 175°C โดยค่าความแข็งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 94.77 BHN เป็น 108.38 BHN เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเองจึงสูงขึ้นแม้เป็นการเองจึงในเวลาเท่ากันก็ทำให้การโตของนิวเคลียสในการเองจึงที่อุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้นกว่าการเองจึงที่อุณหภูมิต่ำ

3) เองจึงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 2, 8 และ 14 ชั่วโมง



รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50X ผ่านการเองจึงอุณหภูมิ 225°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

รูปที่ 4.19 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 560°C เองจึงที่อุณหภูมิ 225°C (ก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จากภาพแสดงให้เห็นโครงสร้างพื้นที่เป็นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) และมีการตกตะกอน  $Mg_2Si$  บนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและมีอะลูมิเนียมออกไซด์บนผิวชิ้นงาน จากรูปจะเห็นว่าตะกอน  $Mg_2Si$  มีการตกตะกอนบนชิ้นงานที่เวลาเองจึง 2 ชั่วโมง เพิ่มมากขึ้นกว่าการเองจึงที่อุณหภูมิ 175°C และ 200°C และจากภาพมีการตกตะกอนที่ใกล้เคียงกับการเองจึงที่ 8 ชั่วโมง สอดคล้องกับค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองที่ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 111.25 และ 112.25 BHN ที่เวลาเองจึง 2 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ

4.6.1.4 การพิจารณาโครงสร้างจุลภาคร่วมกับอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง

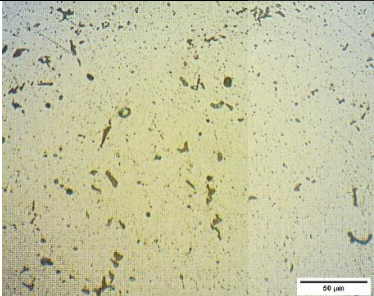
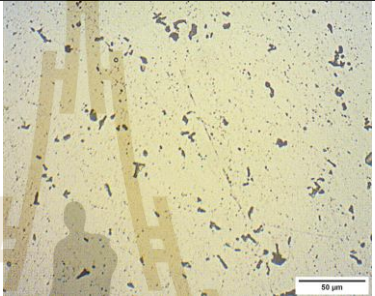
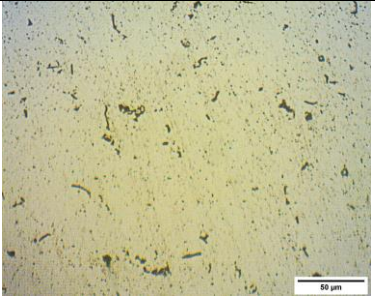
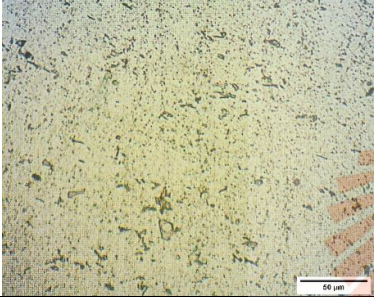

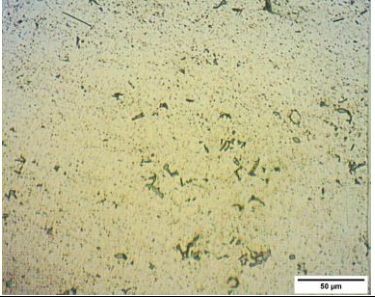
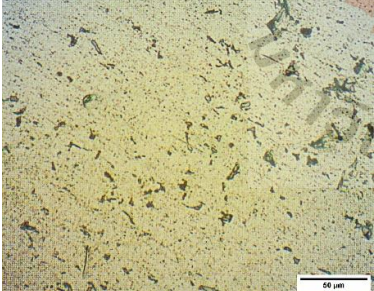

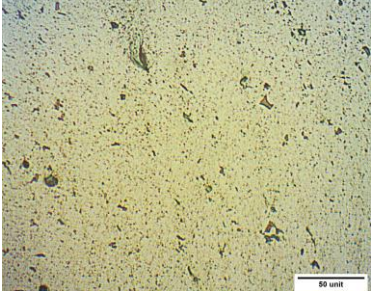
จากตารางการออกแบบการทดลองทั้ง 27 เงื่อนไข ดังแสดงอีกครั้งในตารางที่ 4.7 ดังนั้น หลังการทดลองมีภาพโครงสร้างจุลภาคทั้งหมด 27 รูป ตามเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.7 การทดลองทั้ง 27 เงื่อนไข

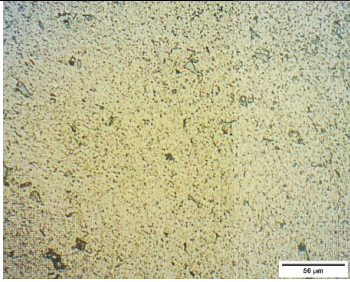
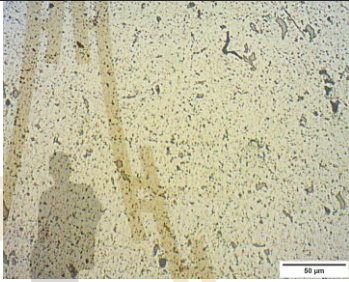
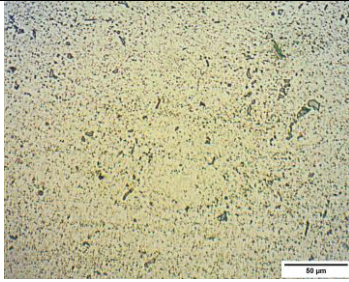
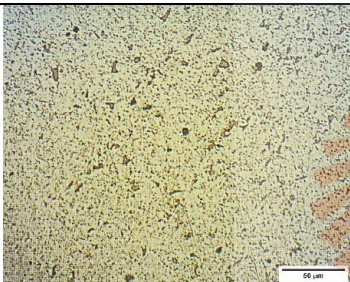
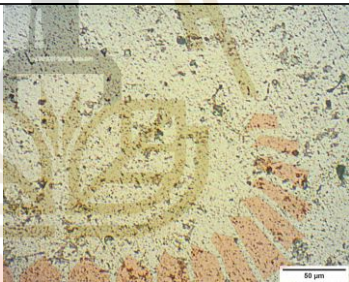
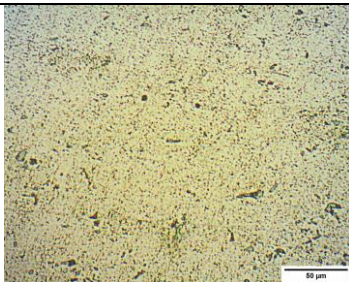
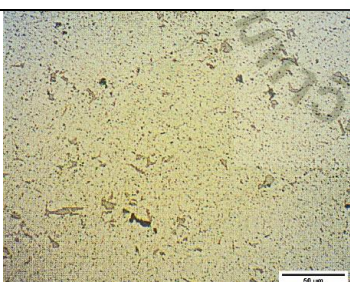

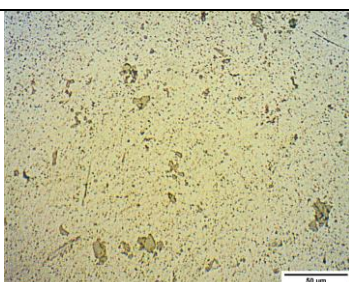
Aging Time (hr), B0	Aging Temp (°C), C	Solution Temp (°C), A			
		520	540	560	
2	175				ชุดที่ 1
	200				
	225				
8	175				ชุดที่ 2
	200				
	225				
14	175				ชุดที่ 3
	200				
	225				

จากตารางที่ 4.7 รูปโครงสร้างจุลภาคทั้งหมดจะขอแสดงตามลำดับทั้งหมด 3 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 4.8

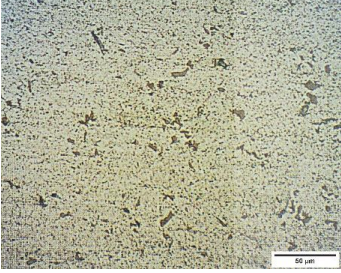
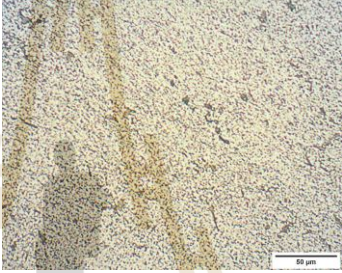
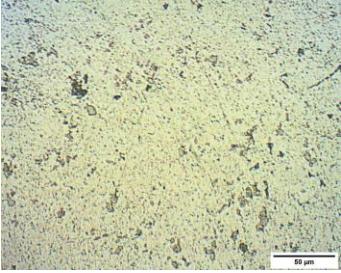
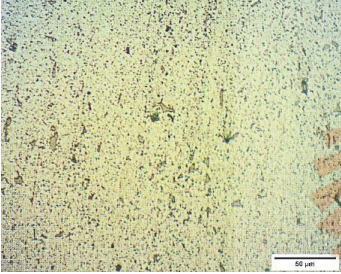
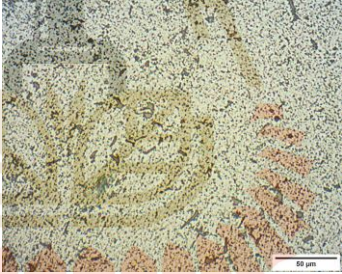
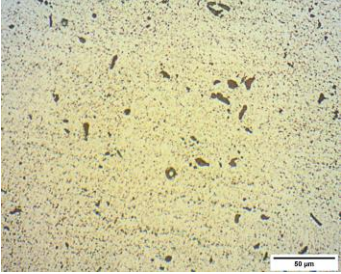
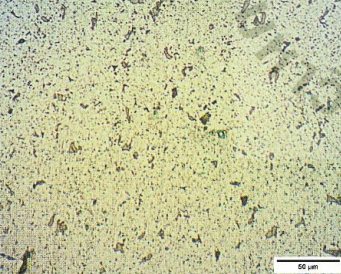

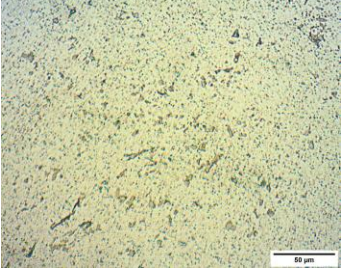
ตารางที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคทั้ง 27 เส้นใยที่ได้จากการทดลอง

Aging Time (hr), B	Aging Temp (°C), C	Solution Temp (°C), A		
		520	540	560
2	175			
	200			
	225			

ตารางที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคทั้ง 27 เงื่อนไขที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)

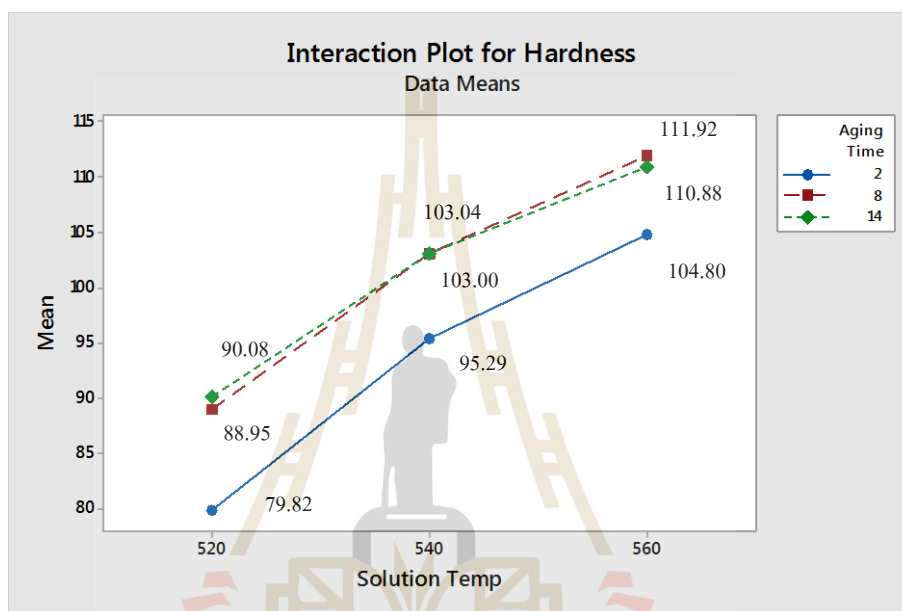
Aging Time (hr), B	Aging Temp (°C), C	Solution Temp (°C), A		
		520	540	560
8	175			
	200			
	225			

ตารางที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคที่ 27 เงื่อนไขที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)

Aging Time (hr), B	Aging Temp (°C), C	Solution Temp (°C), A		
		520	540	560
14	175			
	200			
	225			

จากรูปโครงสร้างจุลภาคทั้ง 27 รูป เมื่อพิจารณาร่วมกับกราฟแสดงอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Plot) สามารถอธิบายโครงสร้างจุลภาคร่วมกับอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งดังนี้

1. พิจารณาโครงสร้างจุลภาคร่วมกับกราฟแสดงอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจิง

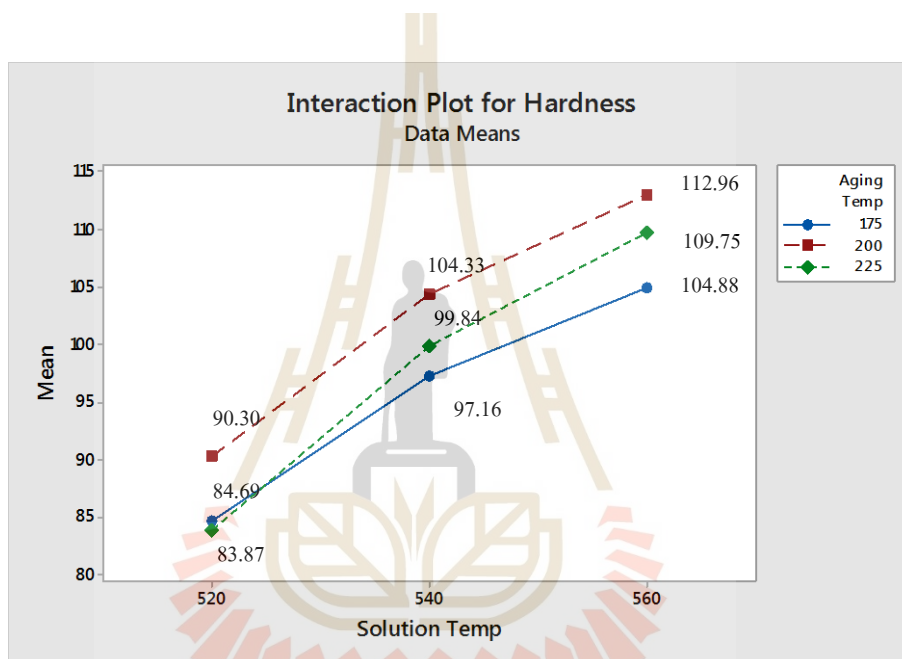


รูปที่ 4.20 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจิง

จากกราฟที่แสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจิงพบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้อบละลายคือ 520, 540 และ 560 °C ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการทำเอจิงคือ 2, 8 และ 14 ชั่วโมง โดยเวลาเอจิงที่ 8 และ 14 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ยใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาร่วมกับรูปโครงสร้างจุลภาคตามตารางที่ 4.8 พบว่าหลังการอบละลายที่อุณหภูมิที่ 520, 540 และ 560 °C แล้วเอจิงนานเป็นเวลา 8 และ 14 ชั่วโมง จะมีการกระจายตัวของตะกอน  $Mg_2Si$  กระจายตัวมากขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการทำเอจิงเนื่องจากการอบละลายที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้  $Mg_2Si$  ละลายหรือสลายตัวเข้าไปในเนื้อพื้นได้มากกว่าการอบละลายที่อุณหภูมิต่ำเพราะการการละลายของ  $Mg_2Si$  เป็นไปในลักษณะของการแพร่ (Diffusion) และเมื่อชิ้นงานถูกนำมาเอจิงด้วยเวลาที่ต่างกัน  $Mg_2Si$  ที่ตกตะกอนและเป็นตะกอนที่มีขนาดเล็กจะมีการกระจายตัวและขนาดโตขึ้นตามเวลาที่ใช้เอจิงเช่นกันเพราะตะกอนที่เกิดขึ้นมีเวลาในการขยายตัว

ของผลึกส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูป 4.20 จากผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการสังเกตการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างจุลภาคและบันทึกภาพแบบ In-Situ ซึ่งพบว่าการใช้ อุณหภูมิอบละลายที่สูงคือ 540 °C ภายหลังจากให้ความร้อนอีกครั้งพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีขนาด ของตะกอนหรือผลึกเฟส  $Mg_2Si$  โตและมีการละลายตามบริเวณตามขอบเกรนมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 520 °C

2.พิจารณาโครงสร้างจุลภาคร่วมกับกราฟแสดงอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับ อุณหภูมิเอจิง



รูปที่ 4.21 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอจิง

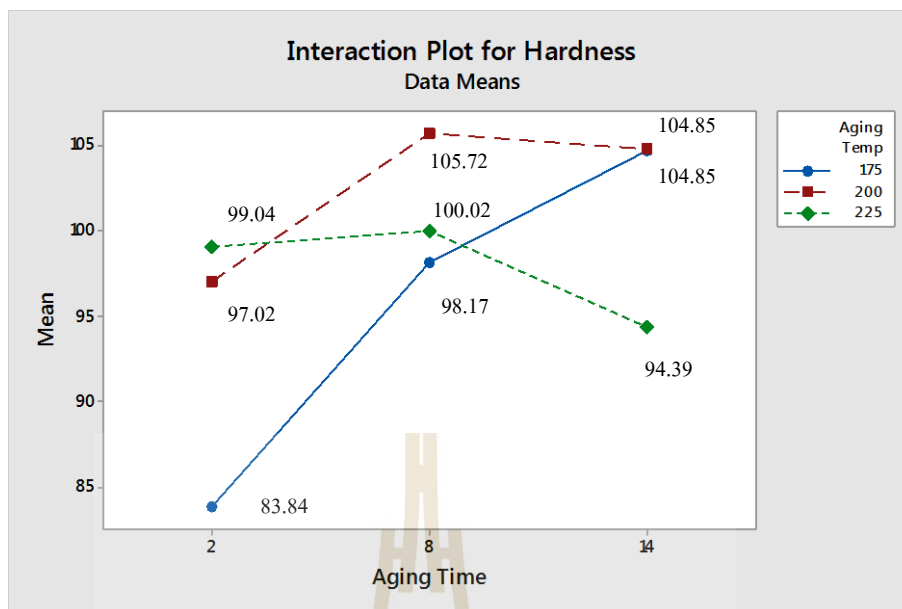
จากกราฟพบว่าหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 520, 540 และ 560 °C หลังจากนั้นทำการเอจิงที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ 175, 200 และ 225°C พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยสูงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิเอจิงเช่นกันกับการเพิ่มเวลาในการทำเอจิง โดยการอบละลายที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการอบละลายที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเอจิงที่อุณหภูมิเดียวกันที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากการอบละลายที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้  $Mg_2Si$  ละลายเข้าไปในเนื้อพื้น ได้มากกว่าการอบละลายที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากการละลายของแมกนีเซียมและซิลิคอนเข้าไปในเนื้อพื้นในลักษณะสารละลายแบบของแข็ง (Solid Solution) เป็นไปในลักษณะการแพร่ (Diffusion) และเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนอีกครั้งในขั้นตอนการทำเอจิงที่อุณหภูมิ 175, 200 และ 225°C พบว่าการเอจิงอุณหภูมิ



อุณหภูมิสูงส่งผลให้ตะกอนของ  $Mg_2Si$  มีขนาดโตกว่าการเองจึงที่อุณหภูมิต่ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากถ้าพิจารณาจากลำดับการเปลี่ยนแปลงการเกิดการตกตะกอนซึ่งมีลำดับการเกิดดังนี้  $SSS \rightarrow GP \text{ Zone} \rightarrow \beta'' \text{ (needle shaped)} \rightarrow \beta' \text{ (rod- shaped)} \rightarrow \beta \text{ (} Mg_2Si \text{)}$  (Demir and Gunduz ., 2009) ซึ่งการเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเริ่มจากกลุ่มอนุภาคของแมกนีเซียมและซิลิคอนก่อตัวเป็นนิวเคลียสและขยายตัวเป็นตะกอนหรือผลึกของ  $Mg_2Si$  โดยมีรูปร่างเปลี่ยนไปตามลำดับ  $\beta''$  (needle shaped) และ  $\beta'$  (rod- shaped) และค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นเฟส  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) ที่สมบูรณ์จากการเปลี่ยนแปลง จะเห็นว่าอุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยที่เป็นตัวเร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียสไปสู่การเปลี่ยนแปลงเฟส  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) ตามลำดับและจากลำดับการเปลี่ยนแปลงเฟสที่เกิดขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยการเกิดเฟส  $\beta''$  และ  $\beta'$  จะส่งผลให้เฟสมีแรงเชื่อมประสานกับโครงสร้างเนื้อพื้น (Coherent Precipitates) หรือเฟส  $\beta''$  และ  $\beta'$  มีผลทำให้เกิดลักษณะการบิดเบี้ยว (Distortion) ของแถวหรือแนวของอะตอมของอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) และเมื่อเฟสมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเฟส  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) ที่สมบูรณ์จะทำให้แรงเชื่อมประสานกับโครงสร้างอะลูมิเนียม (เฟส  $\alpha$ ) หดไปส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง

จากรูปโครงสร้างจุลภาคในตารางที่ 4.8 และค่าความแข็งแรงที่ได้จะเห็นว่าที่อุณหภูมิเองจึงสูงจะเร่งให้เกิดนิวเคลียสของตะกอนและเกิดการขยายตัวได้มากกว่าการเองจึงที่อุณหภูมิต่ำแต่จำนวนนิวเคลียสที่เกิดขึ้น นั้น จะน้อยกว่าการเองจึงด้วยอุณหภูมิต่ำดังแสดงรูปโครงสร้างจุลภาค ดังนั้น ถ้าต้องการให้มีนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากเพื่อให้ขยายตัวต่อไปเป็นตะกอนหรือผลึก  $Mg_2Si$  ที่ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นคืออยู่เฟสมีรูปร่างแบบ  $\beta'$  (rod- shaped) ควรเลือกใช้อุณหภูมิต่ำในการทำเองจึง

3. พิจารณาโครงสร้างจุลภาคร่วมกับกราฟแสดงอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิต่ำกับเวลาเองจึง



รูปที่ 4.22 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิเองจึ่งกับเวลาเองจึ่ง

จากกราฟพบว่า การเองจึ่งที่อุณหภูมิต่ำคือ 175°C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งต่ำกว่าการเองจึ่งที่อุณหภูมิ 200°C และ 225°C แต่เมื่อใช้เวลาเองจึ่งนานขึ้นเป็น 8 และ 14 ชั่วโมง พบว่าเองจึ่งที่อุณหภูมิต่ำคือ 175°C ค่าความแข็งยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นแต่การเองจึ่งที่อุณหภูมิ 200°C และ 225°C ถึงแม้ว่าจะให้ค่าความแข็งสูงในช่วงแรกแต่เมื่อใช้เวลาเองจึ่งนานขึ้นพบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง โดยการเองจึ่งที่อุณหภูมิ 225°C ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าการเองจึ่งที่อุณหภูมิ 175°C และ 200°C เมื่อพิจารณาาร่วมกับรูปโครงสร้างจุลภาคจะเห็นว่าที่อุณหภูมิเองจึ่งที่อุณหภูมิ 175°C การกระจายตัวของตะกอน  $Mg_2Si$  จะมีการกระจายตัวขนาดเล็กเป็นจำนวนมากและมีขนาดโตขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 8 และ 14 ชั่วโมง เพราะการเกิดตะกอน  $Mg_2Si$  ที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้จำนวนของนิวเคลียสเกิดขึ้นได้มากกว่าการเองจึ่งด้วยอุณหภูมิสูง ดังนั้นการเกิดนิวเคลียสและการขยายตัวนอกจากจะขึ้นกับอุณหภูมิเองจึ่งที่เป็นตัวเร่งให้เกิดการตกตะกอนแล้วเวลาที่จะส่งผลให้ขนาดของตะกอน  $Mg_2Si$  มีขนาดโตขึ้นเช่นกัน และเมื่อพิจารณาจากกราฟค่าความแข็งเฉลี่ยในการทำเองจึ่งที่อุณหภูมิต่ำคือ 175°C ค่าความแข็งที่ได้จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้เองจึ่ง เมื่อพิจารณาจากกราฟมีแนวโน้มให้ค่าความแข็งสูงสุด (Peak) สูงกว่าการเองจึ่งด้วยอุณหภูมิสูงเมื่อใช้เวลาเองจึ่งนานสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Gowrishankar et al., 2014) และจากค่าความแข็งที่ได้จากกราฟและโครงสร้างที่ได้กล่าวมาแล้วเบื้องต้นยังสอดคล้องกับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค LEEM ที่พบว่า การให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำการเปลี่ยนแปลงของเฟส  $Mg_2Si$  ยังคงเป็น

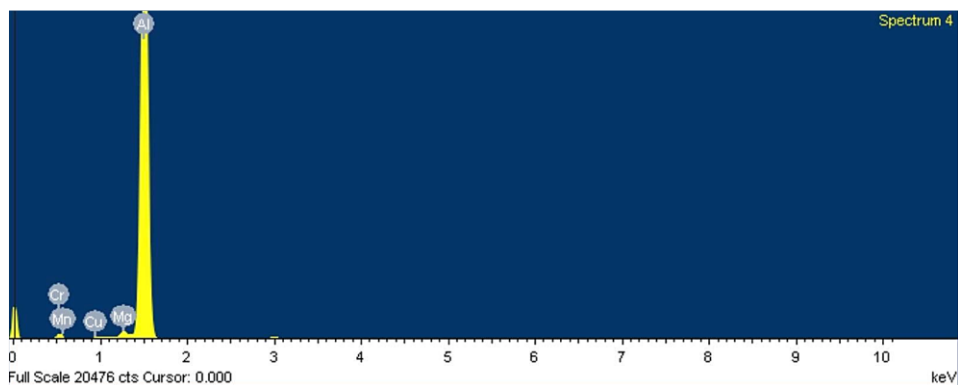
เฟสไม่สมบูรณ์คือมีลักษณะเป็น  $\beta''$  และ  $\beta'$  ที่มีขนาดเล็ก แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะเริ่มเห็นเฟส  $Mg_2Si$  และมีขนาดโตขึ้นและเมื่อเฟส  $Mg_2Si$  เปลี่ยนไปเป็นเฟส  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) ที่สมบูรณ์จะทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงและทำให้ทราบว่าไม่ควรใช้อุณหภูมิเองจึงสูงเกินไปและเวลานานเกินไปเพราะนอกจากจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงเฟสเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงที่สมบูรณ์ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงแล้วยังส่งผลให้เกิดการละลายตามขอบเกรนส่งผลให้สมบัติทางกลลดลงเช่นกัน สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่พบว่าการเองจึงถ้าต้องการค่าความแข็งแรงสูงควรใช้เลือกใช้อุณหภูมิเองจึงต่ำและให้ใช้เวลานานเองจึงนานแทนการใช้อุณหภูมิสูง (Tan and Said, 2009)

และเพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างจุลภาคดังกล่าวจึงนำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) และใช้เทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) แบบ Point Analysis และ X-ray Mapping ดังนี้

4.6.2 การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) แบบ Point Analysis



รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคและจุดตรวจสอบการวิเคราะห์แบบ Point Analysis



รูปที่ 4.24 สเปกตรัม EDS จากการวิเคราะห์จุดตรวจสอบแบบ Point Analysis

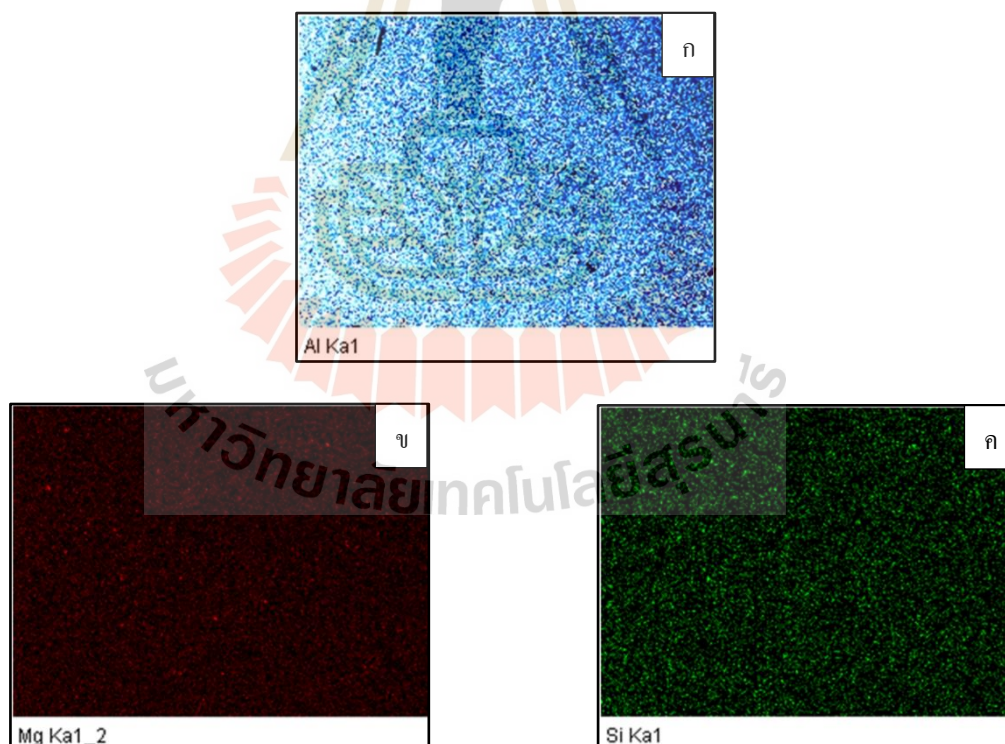
รูปที่ 4.24 สเปกตรัม EDS ของจุดตรวจสอบ (Spectrum 4) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณเอกซ์เรย์ที่ตรวจจับได้ (X-ray Counts) กับพลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งจากพีคที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นองค์ประกอบของธาตุบริเวณจุดตรวจสอบบนชิ้นงานทดสอบและได้ผลของปริมาณธาตุดังตารางที่ 4.9

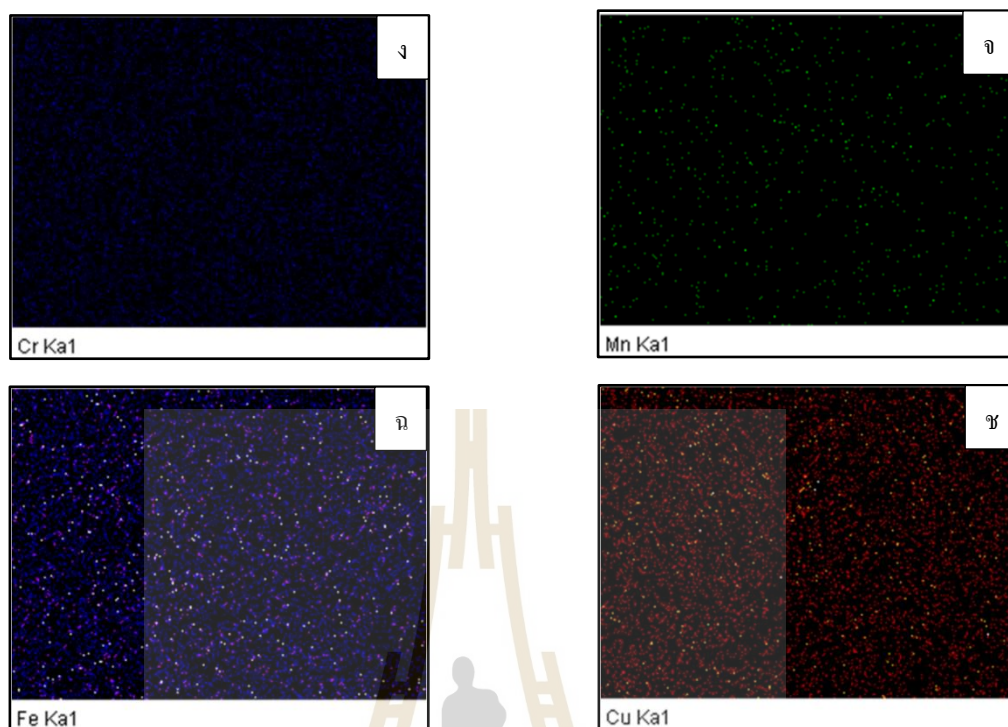
ตารางที่ 4.9 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แบบ Point Analysis

Element	C	Mg	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Cu
Weight%	1.84	0.62	97.03	0.22	0.08	0.08	0.03	0.12

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบ Point Analysis พบว่าจุดดังกล่าวมีปริมาณของธาตุอะลูมิเนียมเท่ากับ 97.03% แมกนีเซียม 0.62% ซิลิคอน 0.22% และมีธาตุอื่นเพียงเล็กน้อยดังแสดงในตารางที่ 4.9 จากปริมาณของธาตุที่ตรวจสอบสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการใช้วิธีตรวจสอบแบบ Point Analysis ในการตรวจสอบอาจทำให้จุดที่ต้องการตรวจสอบไม่ถูกตรวจสอบทั้งหมดและบริเวณเนื้อพื้นถูกตรวจสอบเนื่องจากจุดตรวจสอบมีขนาดเล็กและตรวจสอบเพียงจุดเดียว

นอกจากนั้นยังได้ตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุที่กระจายตัวในโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค X-ray Mapping ดังรูปที่ 4.25





รูปที่ 4.25 แสดงผลการวิเคราะห์ Elemental Mapping ธาตุที่ละลายในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม  
(ก) อะลูมิเนียม (ข) แมกนีเซียม (ค) ซิลิคอน (ง) โครเมียม (จ) แมงกานีส  
(ฉ) เหล็ก (ช) ทองแดง

รูป 4.25 (ข) (ค) แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Mapping จากการตรวจสอบพบว่า มีธาตุแมกนีเซียมและซิลิคอนละลายในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม

4.6.3 เอกซ์เรย์โฟโตอิมิชชันอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (X-ray Photoemission Electron Microscopy, X-PEEM) และเทคนิค Low-Energy Electron Microscopy (LEEM)

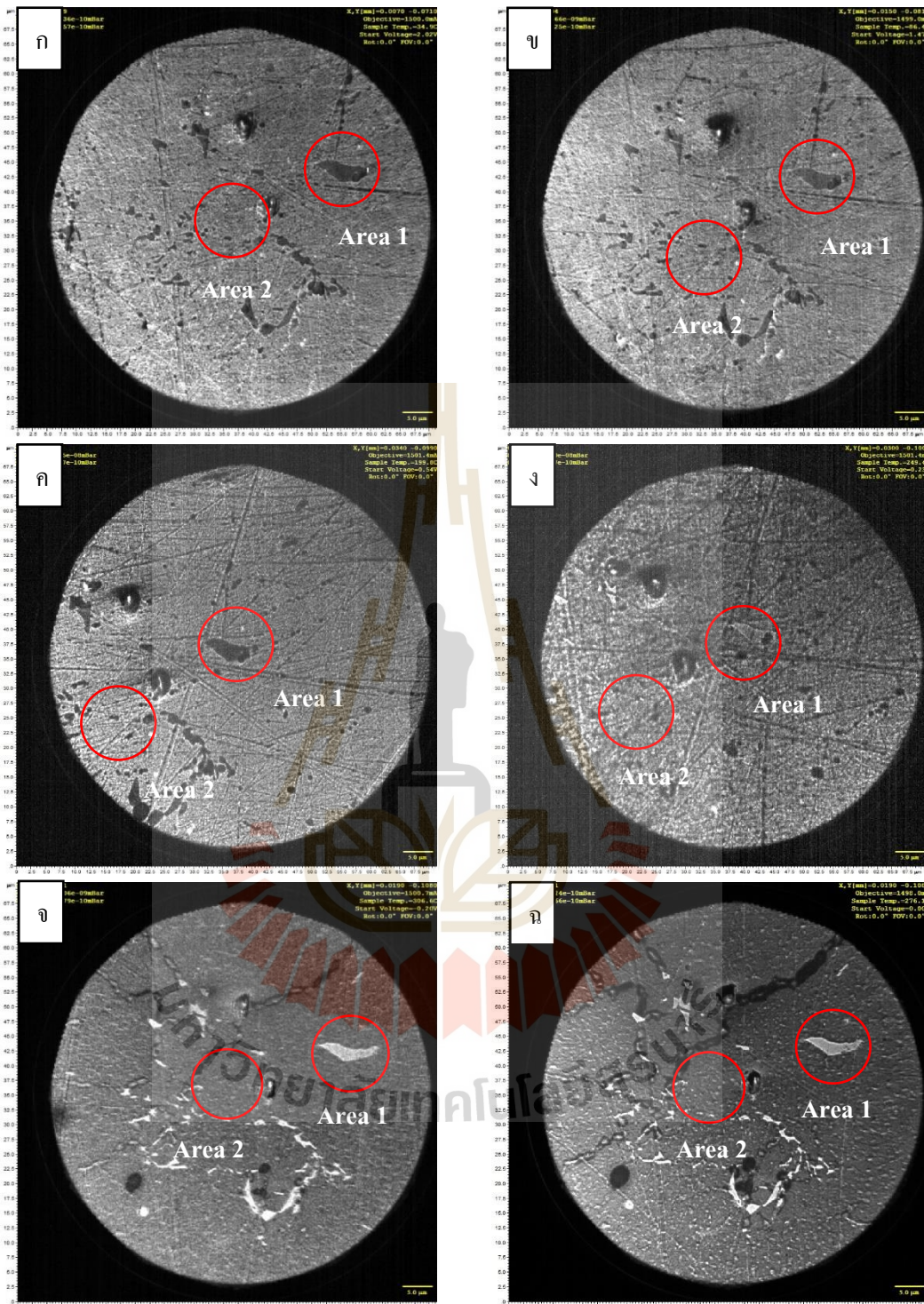
จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) การใช้เทคนิค EDS และการใช้เทคนิค X-ray Mapping ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและชนิดของธาตุในชิ้นงานนั้นเป็นการตรวจสอบชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกหรือตกตะกอนทั้ง 3 ขั้นตอนเรียบร้อยแล้ว คือ 1) Solution Heat Treatment 2) Quenching และ 3) Age Hardening หรือเอจิง และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและบันทึกภาพ

ดังนั้น เพื่อให้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคในขณะที่ชิ้นงานได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำอีกครั้งและเกิดการตกตะกอนหรือเฟส  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) จึงใช้เทคนิค LEEM ใน

การตรวจสอบและบันทึกภาพแบบ In-Situ เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในขณะที่ชิ้นงานได้รับความร้อน ณ อุณหภูมิที่ต้องการตรวจสอบและในขณะเดียวกันใช้เทคนิค X-PEEM วิเคราะห์ธาตุที่เกิดขึ้นในชิ้นงานขณะเพิ่มอุณหภูมิโดยใช้รังสีเอกซ์พลังงานต่ำที่ค่าพลังงาน 130 eV (Soft x-ray) ภายใต้สภาวะสุญญากาศความดันต่ำกว่า 9 mbar จากที่กล่าวมาดังนั้นชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบต้องผ่านการอบละลาย (Solution Treatment) และจุ่มน้ำอย่างรวดเร็ว (Quenching) เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีความอิ่มตัวยังยวดยิ่ง (Supersaturated Solid Solution) และเกิดการตกตะกอนหรือตกผลึกของเฟส  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) อีกครั้งเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำและจากข้อมูล ASM Handbook : Heat Treating แนะนำอุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลายคือ 530°C ดังนั้นในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและถ่ายภาพด้วย LEEM จึงเลือกเงื่อนไขที่ใช้ในการอบละลายคือที่อุณหภูมิ 520°C และ 540°C เพื่อให้ครอบคลุมอุณหภูมิ 530°C จากนั้นนำไปจุ่มน้ำอย่างรวดเร็ว (Quenching) และมาให้ความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิต่ำเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค โดยให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องคือ 25°C ถึง 300°C และบันทึกภาพแบบ In-Situ ที่อุณหภูมิ 25, 100, 200, 250 และ 300°C จากการทดลองได้ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค X-PEEM, LEEM ดังนี้

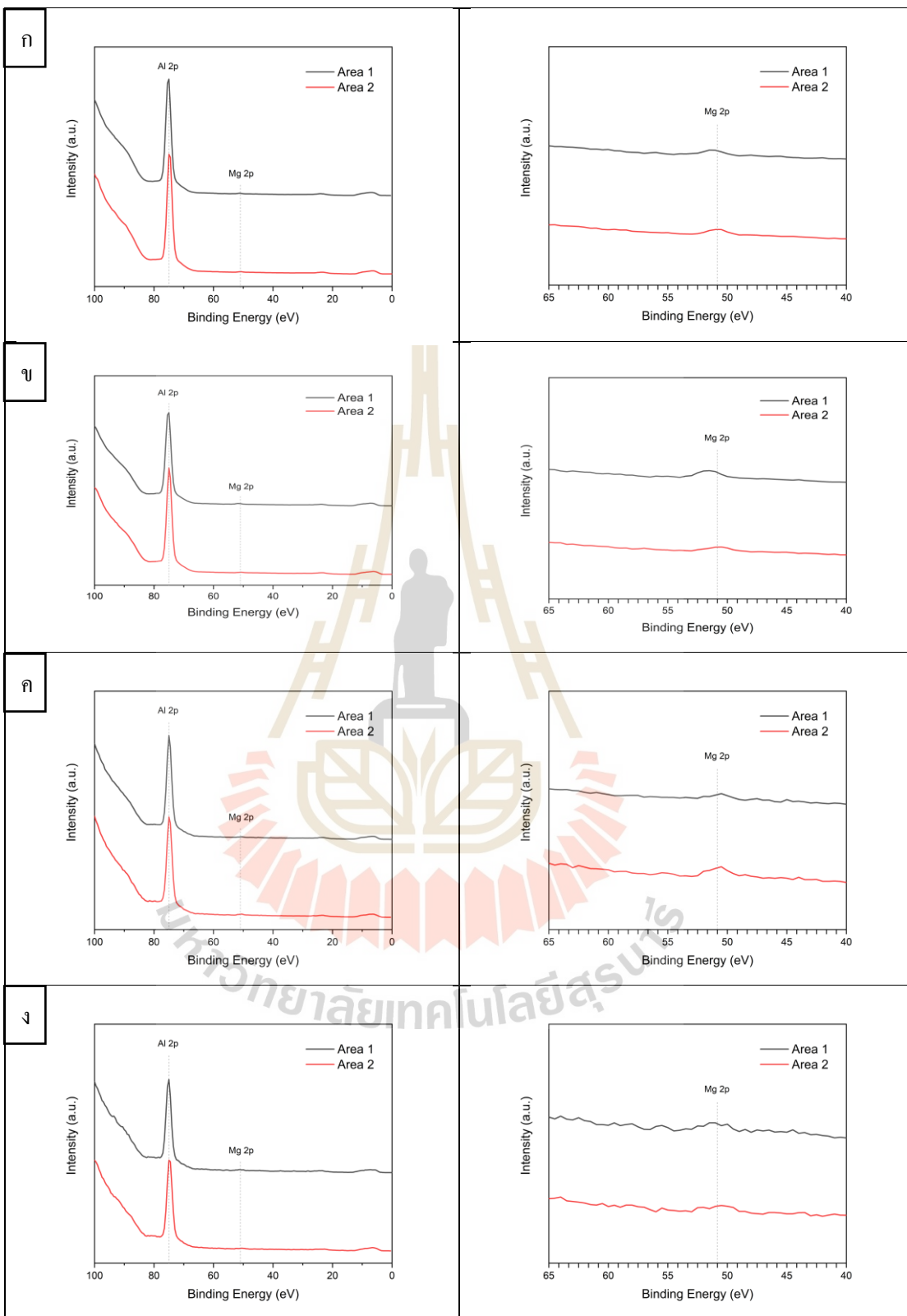
1) การตรวจสอบสเปกตรัม XPS และโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 520°C

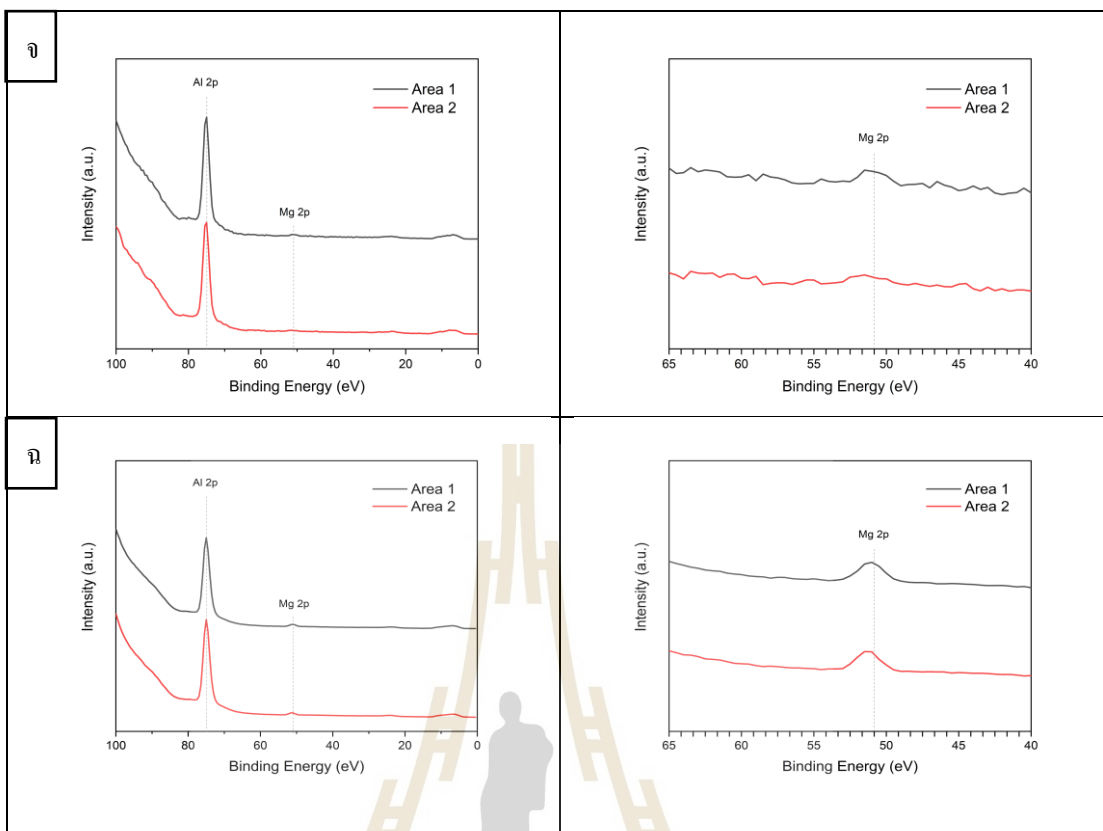
การตรวจสอบครั้งนี้ใช้รังสีเอกซ์พลังงานต่ำที่ค่าพลังงาน 130 eV (Soft x-ray) ภายใต้สภาวะสุญญากาศความดันต่ำกว่า 9 mbar โดยในการทดลองได้เพิ่มอุณหภูมิให้กับชิ้นงานจากอุณหภูมิ 25 - 300°C และตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งการตรวจสอบได้ตรวจสอบพื้นที่ที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และได้ผลการตรวจสอบกราฟสเปกตรัม XPS ดังรูป 4.27



รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคและพื้นที่ที่ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีที่อุณหภูมิ ก. อุณหภูมิ 25°C ข. อุณหภูมิ 100°C ค. อุณหภูมิ 200°C ง. อุณหภูมิ 250°C จ. อุณหภูมิ 300°C ฉ. อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง



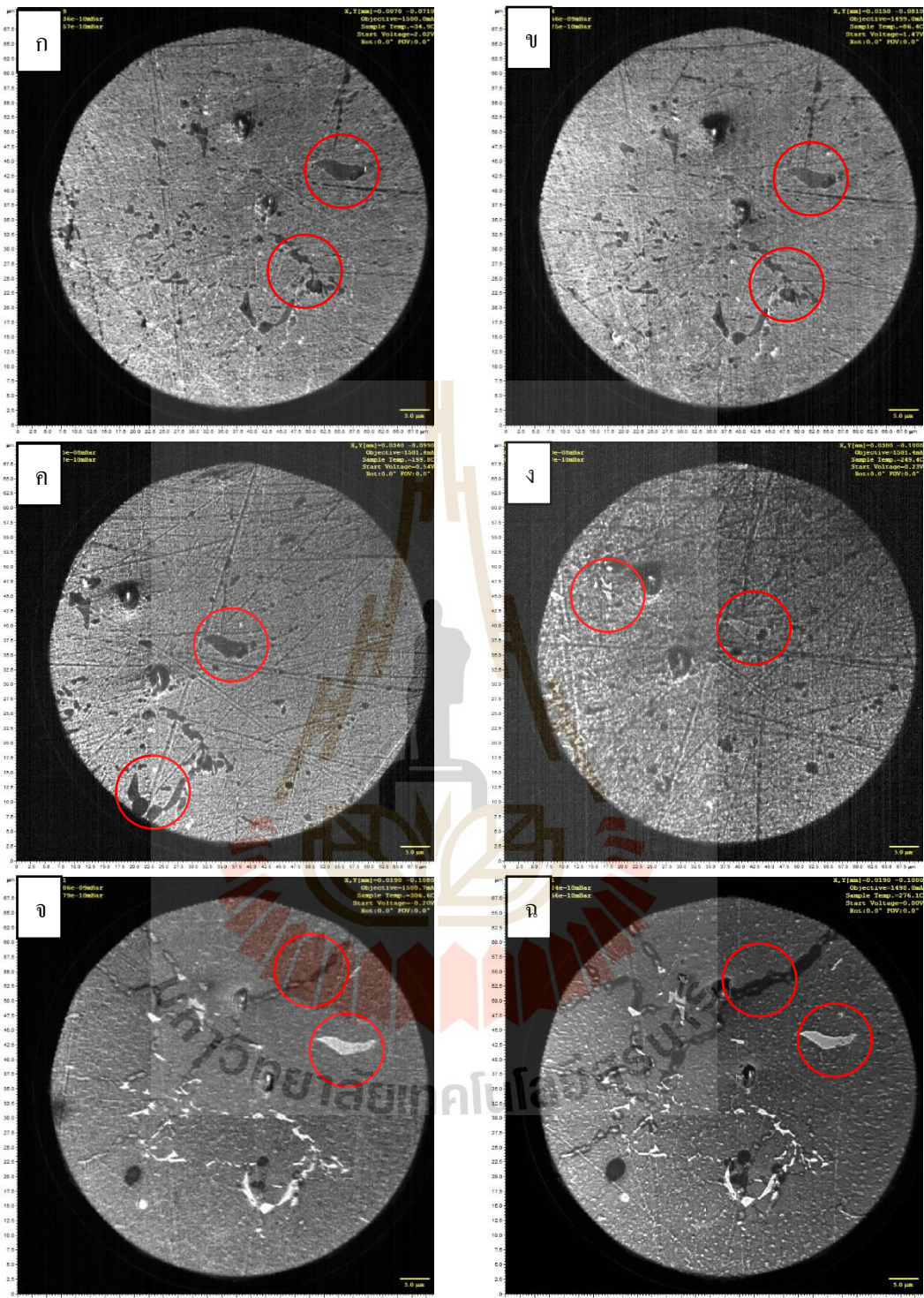




รูปที่ 4.27 สเปกตรัม XPS ของชิ้นงานที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค X-PEEM ที่อุณหภูมิ ก. อุณหภูมิ 25°C ข. อุณหภูมิ 100°C ค. อุณหภูมิ 200°C ง. อุณหภูมิ 250°C จ. อุณหภูมิ 300°C ฉ. อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

รูปที่ 4.27 (ก-จ) สเปกตรัม XPS แสดงพีคที่ 72 (Al2p) (Chale-Lara et al., 2019) และพีคที่ 49 (Mg2p) (Rheinheimer et al., 2017) ทั้งสองพื้นที่ที่ตรวจสอบ โดยพีคแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวที่ตรวจสอบเป็นอะลูมิเนียมและมีแมกนีเซียมเพียงเล็กน้อยและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 300°C และใช้เวลา 16 ชั่วโมง และตรวจสอบสเปกตรัมอีกครั้งพบว่าสเปกตรัม XPS พีคที่เกิดขึ้นยังคงแสดงพีคที่ 72 (Al2p) และพีคที่ 49 (Mg2p) เช่นเดียวกับรูปที่ 4.27 (ก-จ) แต่การเพิ่มเวลานาน 16 ชั่วโมงพบว่าปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.27 (ข)

จากนั้น ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค LEEM และบันทึกภาพแบบ In-Situ ได้ผลดังรูป 4.28

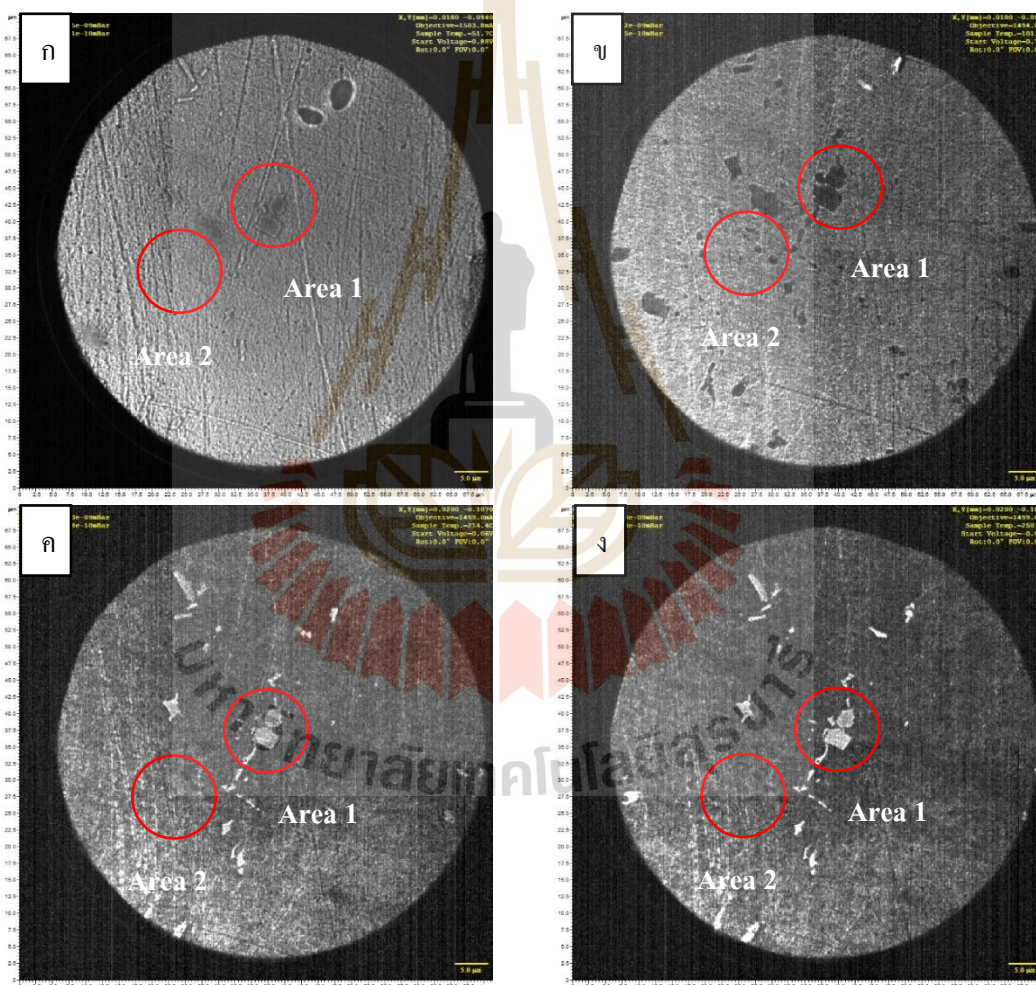


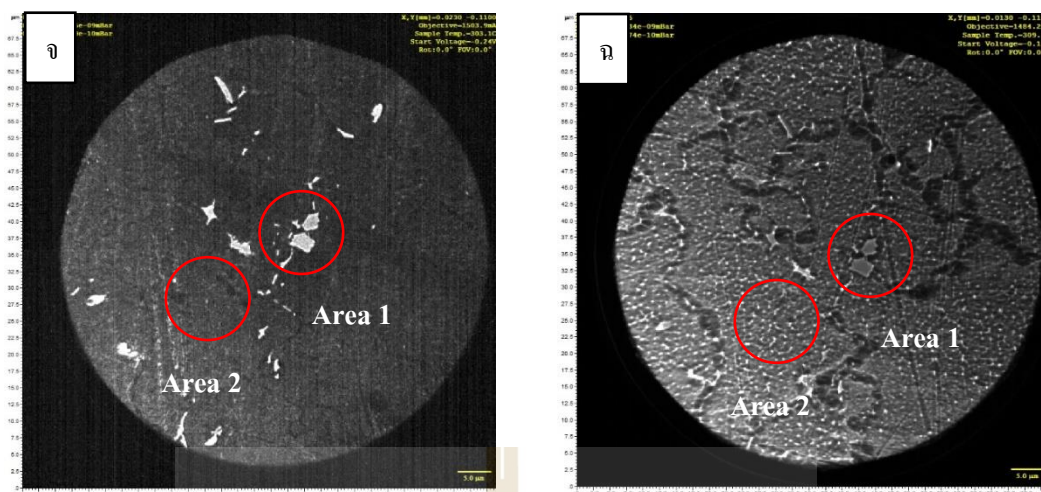
รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค LEEM ที่อุณหภูมิ ก. อุณหภูมิ 25°C ข. อุณหภูมิ 100°C ค. อุณหภูมิ 200°C ง. อุณหภูมิ 250°C จ. อุณหภูมิ 300°C ฉ. อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.28 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ใช้เทคนิค LEEM ถ่ายภาพในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิขึ้นงานโดยขึ้นงานผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 520°C และบันทึกภาพแบบ In-Situ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 300°C โดยบันทึกภาพขณะที่อุณหภูมิอยู่ที่ 25, 100, 200, 250 และ 300°C และเมื่ออุณหภูมิอยู่ที่ 300°C ทิ้งไว้นาน 16 ชั่วโมง และในขณะเดียวกันได้ตรวจสอบสเปกตรัม XPS ด้วยเทคนิค X-PEEM เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีในขณะที่ขึ้นงานได้รับความร้อน จากภาพพบว่าโครงสร้างมีลักษณะเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25°C ถึง 250°C โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิ 300°C ดังรูป 4.28(จ) โดยโครงสร้างมีการละลายตามขอบเกรนและละลายมากขึ้นเมื่อทิ้งไว้นาน 16 ชั่วโมง ดังรูป 4.28(ฉ) นอกจากนี้ยังเห็นตะกอน  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) กระจายอยู่ทั่วขึ้นงานอย่างชัดเจนเมื่อปล่อยเวลานาน 16 ชั่วโมง ซึ่งการเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส  $\beta$  หรือ  $Mg_2Si$  โดยมีลำดับการเปลี่ยนแปลงดังนี้  $SSS \rightarrow GP\ Zone \rightarrow \beta''$  (needle shaped)  $\rightarrow \beta'$  (rod- shaped)  $\rightarrow \beta$  ( $Mg_2Si$ ) (Demir and Gunduz ., 2009) และลักษณะเฟส  $\beta''$  ( $Mg_2Si$ ) ที่เกิดขึ้นจะกระจายตัวทั่วขึ้นงาน (Marceau et al., 2013) และจากงานวิจัยอื่นพบว่าเฟส  $\beta''$  ( $Mg_2Si$ ) มีขนาดประมาณ 5-10 นาโนเมตร (Barbosa et al., 2002) ดังนั้นจากรูป 4.28 โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นจะเริ่มเห็นเฟสหรือตะกอนของ  $Mg_2Si$  ที่อุณหภูมิสูง 300°C เนื่องจากสถานะหรือลำดับการเกิดของเฟส  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) จะเริ่มจากการเกิดเป็นกลุ่มของอนุภาคหรือ GP Zone แล้วเปลี่ยนสถานะของเฟสและรูปร่างตามลำดับจนเป็นเฟส  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) ซึ่งในลำดับของการเปลี่ยนแปลงเฟสตามลำดับที่เกิดขึ้นทำให้สมบัติทางกลหรือในการทดลองนี้จะวัดเป็นค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงสถานะจาก GP Zone  $\rightarrow \beta''$  (needle shaped)  $\rightarrow \beta'$  (rod- shaped)  $\rightarrow \beta$  ( $Mg_2Si$ ) และค่าความแข็งจะค่อยๆ ลดลงและหมดไปเมื่อ  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) มีขนาดโตและไม่มีแรงเชื่อมประสานกับเนื้อพื้น (Over Aging) ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 300°C จะเห็นการการละลายตามขอบเกรนและเมื่อปล่อยทิ้งไว้นาน 16 ชั่วโมง ทำให้เห็นตะกอน  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) อย่างชัดเจนและโครงสร้างมีการละลายตามขอบเกรนมากขึ้นซึ่งไม่เป็นผลดีส่งผลดีต่อสมบัติทางกลส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงและจากการตรวจสอบสเปกตรัม XPS ด้วยเทคนิค X-PEEM ควบคู่ในขณะที่บันทึกภาพทำให้เห็นพิกที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการเพิ่มอุณหภูมิคือพิกที่ 72 (Al2p) และพิกที่ 49 (Mg2p) โดยพิกที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวที่ตรวจสอบมีลักษณะเป็นเนื้อพื้นอะลูมิเนียม (Chale-Lara et al., 2019) และมีแมกนีเซียม (Rheinheimer et al., 2017) ละลายอยู่ในลักษณะสารละลายที่เป็นของแข็ง (Solid Solution) ดังนั้น ในการให้ความร้อนกับโลหะอะลูมิเนียม 6061 อีกครั้งควรเลี่ยงการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพราะจะทำให้เกิดการหลอมละลายตามขอบเกรนและส่งผลต่อสมบัติทางกล

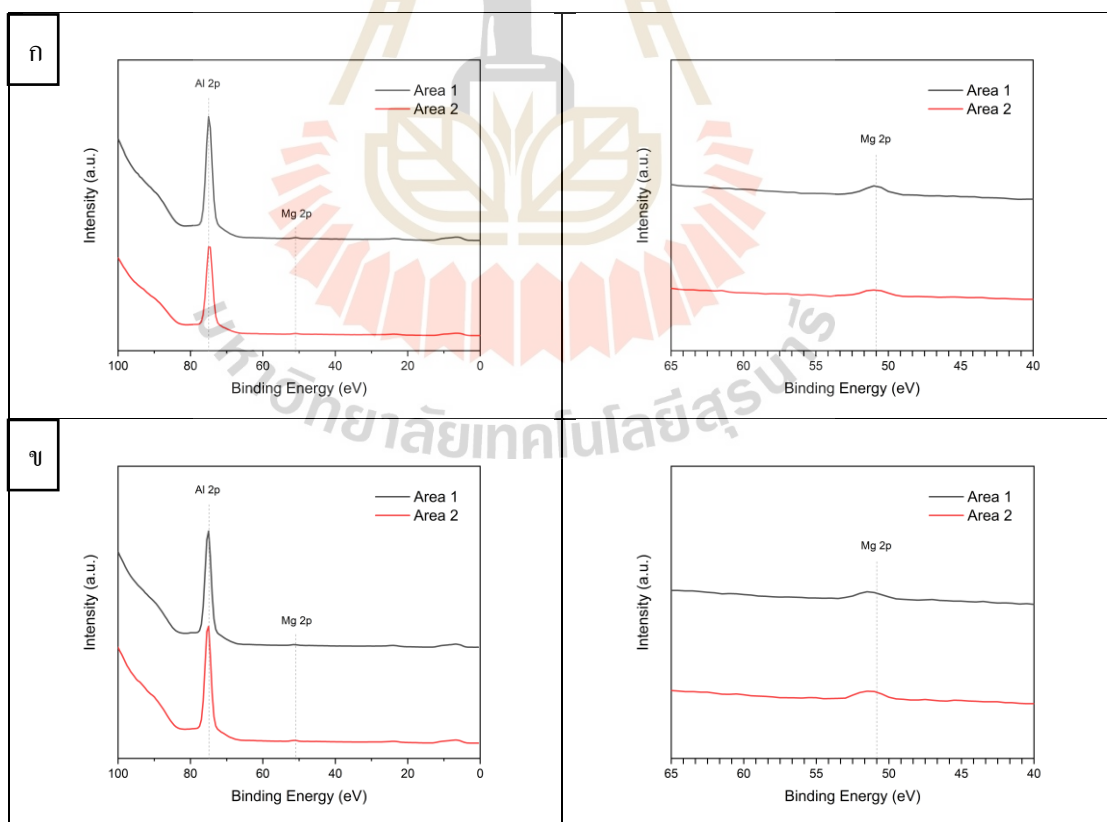
2) การตรวจสอบสเปกตรัม XPS และ โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่ อุณหภูมิ 540°C

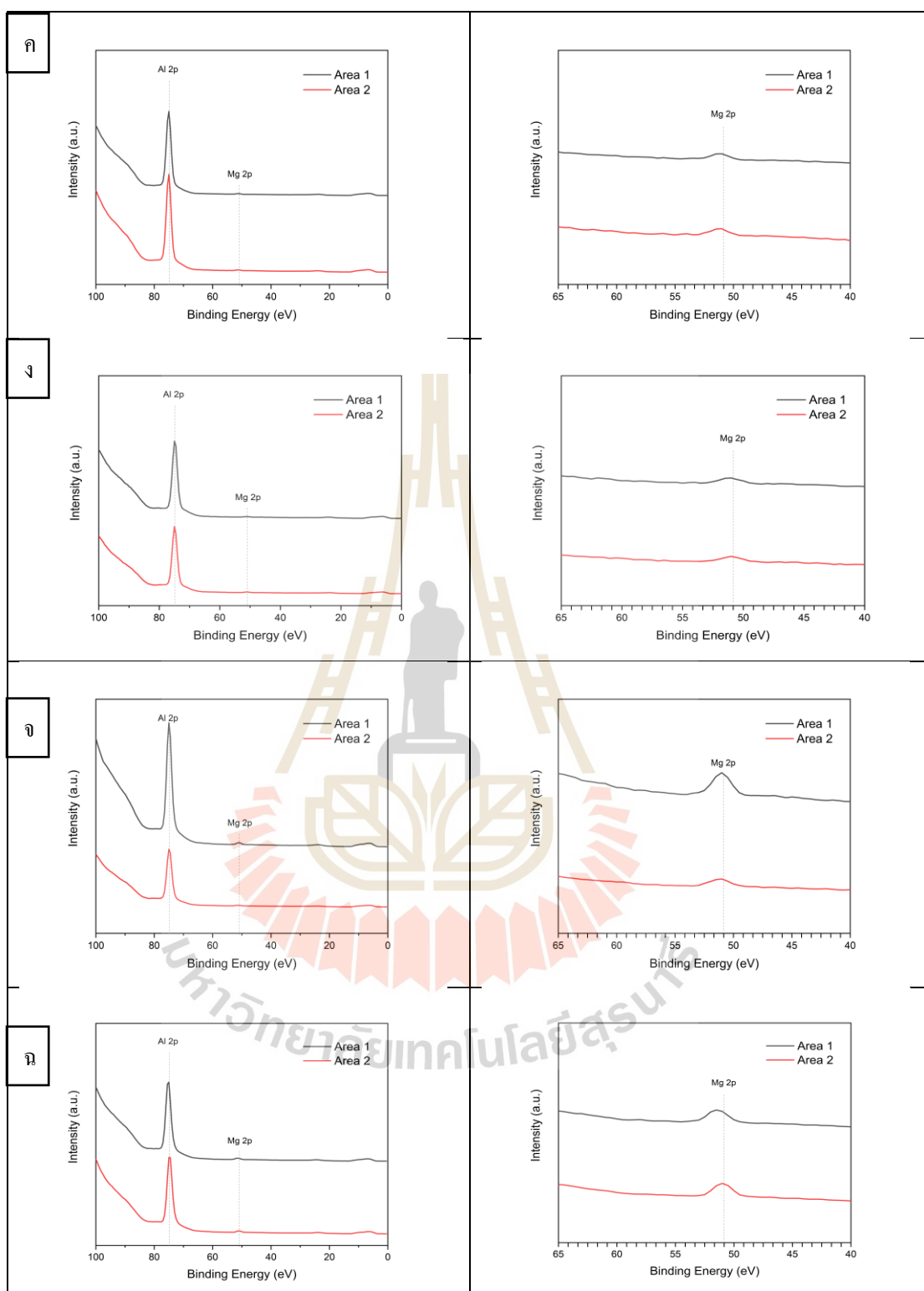
การตรวจสอบเช่นเดียวกับชิ้นงานที่อบละลายที่อุณหภูมิ 520°C คือใช้รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ ที่ค่าพลังงาน 130 eV (Soft x-ray) ภายใต้สภาวะสุญญากาศความดันต่ำกว่า 9 mbar โดยเพิ่มอุณหภูมิ ให้กับชิ้นงานจากอุณหภูมิ 25 - 300°C และตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งการตรวจสอบได้ ตรวจสอบพื้นที่ที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และได้ผลการตรวจสอบกราฟสเปกตรัม XPS ดัง รูป 4.30





รูปที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคและพื้นที่ที่ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีที่อุณหภูมิ ก. อุณหภูมิ 25°C  
 ข. อุณหภูมิ 100°C ค. อุณหภูมิ 200°C ง. อุณหภูมิ 250°C จ. อุณหภูมิ 300°C ฉ. อุณหภูมิ  
 300°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

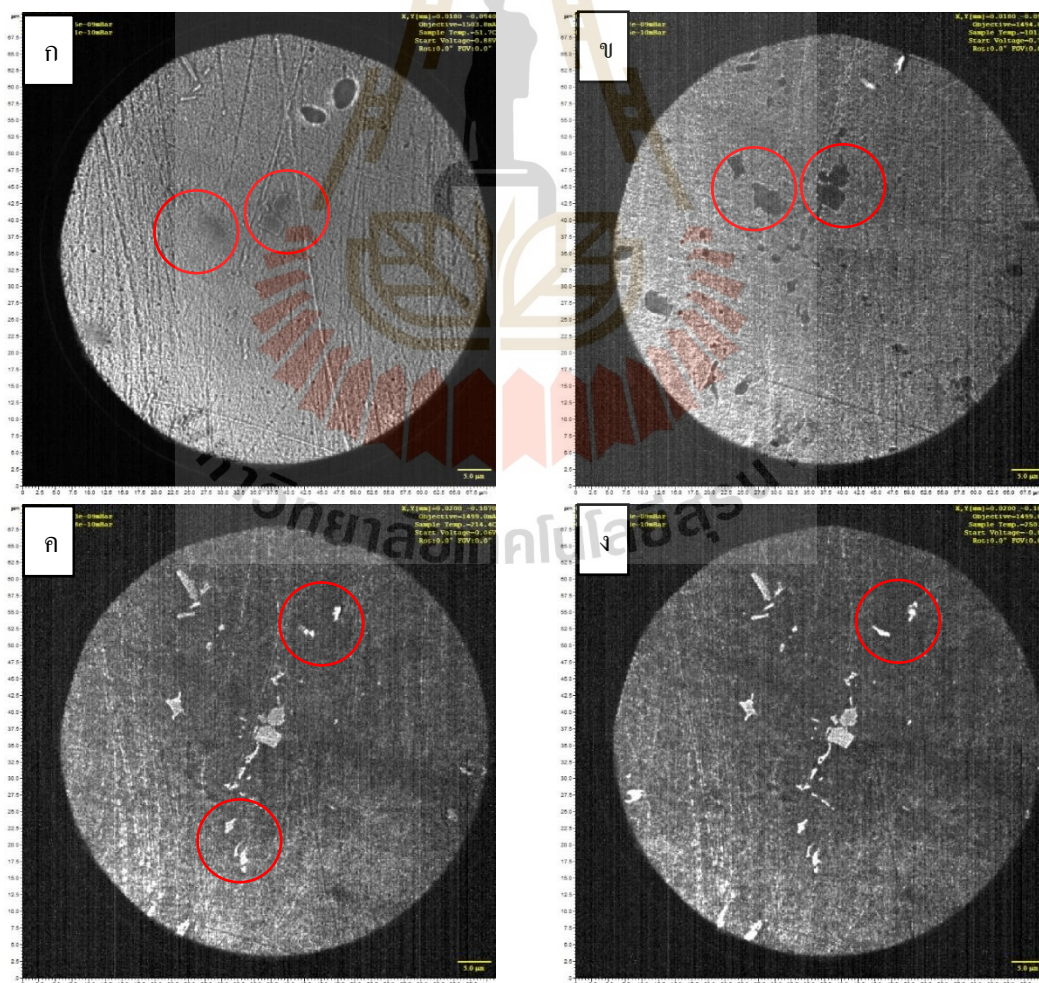




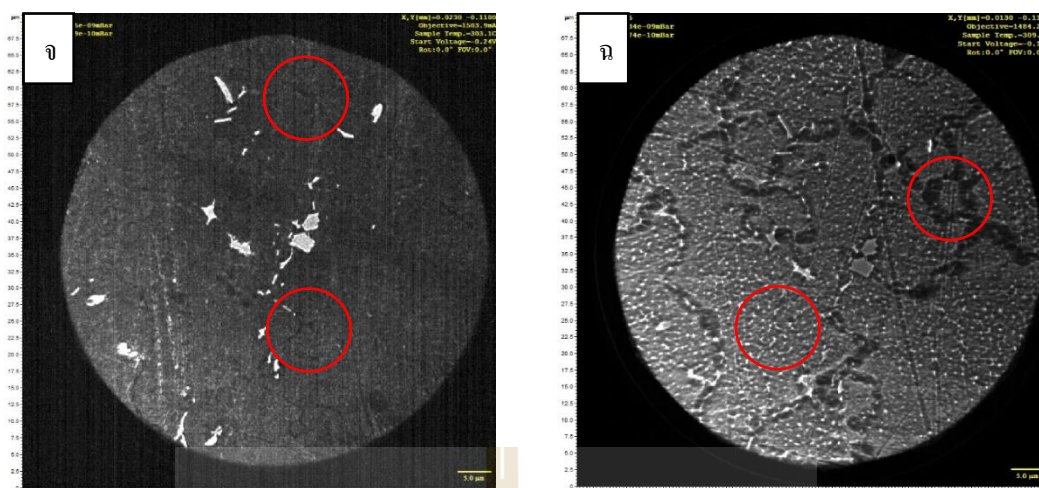
รูปที่ 4.30 สเปกตรัม XPS ของชั้นงานที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค X-PEEM ที่อุณหภูมิ ก. อุณหภูมิ 25°C ข. อุณหภูมิ 100°C ค. อุณหภูมิ 200°C ง. อุณหภูมิ 250°C จ. อุณหภูมิ 300°C ฉ. อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

รูปที่ 4.30 (ก-ง) สเปกตรัม XPS แสดงพีคที่ 72 (Al<sub>2</sub>p) และพีคที่ 49 (Mg<sub>2</sub>p) ทั้งสองพื้นที่ที่ตรวจสอบ โดยพีคแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวที่ตรวจสอบเป็นอะลูมิเนียมและมีแมกนีเซียมเพียงเล็กน้อยและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 300°C และปล่อยเวลานาน 14 ชั่วโมง พีคที่เกิดขึ้นยังคงแสดงพีคที่ 72 (Al<sub>2</sub>p) และพีคที่ 49 (Mg<sub>2</sub>p) เช่นเดียวกับรูปที่ 4.30 (ก-ง) แต่การเพิ่มอุณหภูมิที่ 300°C เวลา และปล่อยเวลานาน 14 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นเนื่องจากการตรวจสอบสเปกตรัม XPS เป็นการตรวจสอบผิวที่ความหนาไม่เกิน 10 นาโนเมตร ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 300°C แมกนีเซียมที่รวมตัวเป็นตะกอนหรือผลึกเฟส  $\beta$  (Mg<sub>2</sub>Si) ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) มีเวลาและอุณหภูมิช่วยเร่งให้เกิดการรวมตัวได้มากขึ้นทำให้เมื่อตรวจสอบสเปกตรัม XPS พบว่ามีปริมาณสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำแสดงในรูปที่ 4.30 (จ-ฉ)

จากนั้น ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค LEEM และบันทึกภาพแบบ In-Situ ได้ผลดังรูป 4.31







รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคได้จากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค LEEM ที่อุณหภูมิ ก. อุณหภูมิ 25°C ข. อุณหภูมิ 100°C ค. อุณหภูมิ 200°C ง. อุณหภูมิ 250°C จ. อุณหภูมิ 300°C ฉ. อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.31 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ใช้เทคนิค LEEM ถ่ายภาพในขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นโดยขึ้นงานผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 540°C และบันทึกภาพแบบ In-Situ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 300°C โดยบันทึกภาพขณะที่อุณหภูมิอยู่ที่ 25, 100, 200, 250 และ 300°C และเมื่ออุณหภูมิอยู่ที่ 300°C ทั้งไว้นาน 14 ชั่วโมง และในขณะเดียวกันได้ตรวจสอบสเปกตรัม XPS ด้วยเทคนิค X-PEEM เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีในขณะที่ขึ้นงานได้รับความร้อน จากรูปจะเห็นโครงสร้างจุลภาคเริ่มมีการละลายตามขอบเกรนเล็กน้อยดังรูป 4.31(จ) แต่เมื่อปล่อยเวลาเพิ่มเป็น 14 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีการละลายตามขอบเกรนมากขึ้นและมีการตกตะกอนหรือผลึกของเฟส  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) อย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสตามลำดับคือ  $SSS \rightarrow GP\ Zone \rightarrow \beta''$  (needle shaped)  $\rightarrow \beta'$  (rod-shaped)  $\rightarrow \beta$  ( $Mg_2Si$ ) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเฟสที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของเฟสเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงส่งผลให้เฟส  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) มีขนาดโตกว่า  $Mg_2Si$  ที่อยู่ในลักษณะ  $\beta''$  (needle shaped)  $\beta'$  (rod-shaped) ตามลำดับทำให้ที่อุณหภูมิสูงและเวลานาน  $Mg_2Si$  สามารถรวมตัวกันและมีขนาดโตกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำและใช้เวลาน้อยกว่า

จากการตรวจสอบด้วยเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (X-ray Photoemission Electron Microscopy, X-PEEM) และเทคนิค Low-Energy Electron Microscopy (LEEM) จะเห็นว่าขึ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่ 540°C มีการขยายตัวตามขอบเกรนมากกว่าขึ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 520°C ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการอบละลายที่อุณหภูมิ 540°C ปริมาณ

แมกนีเซียมและซิลิคอนจะสามารถละลายเข้าไปในเนื้อพื้นได้มากกว่าเนื่องจากการละลายเข้าไปในเนื้อพื้นเป็นไปในลักษณะการแพร่ (Diffusion) ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงจึงส่งผลให้การละลายเข้าไปในเนื้อพื้นละลายได้ดีกว่า และเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนอีกครั้งคือเพิ่มอุณหภูมิจาก 25°C ถึง 300°C แมกนีเซียมและซิลิคอนที่ละลายอยู่จึงรวมตัวกันเป็นนิวเคลียสและเกิดเป็นตะกอนของ  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) อีกครั้งตามลำดับการเปลี่ยนสถานะดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น ดังนั้นชิ้นงานที่ถูกทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิ 300°C ที่ผ่านการทำอบละลายที่อุณหภูมิ 540°C จึงมีขนาดตะกอนของ  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) โทกว่าและมีการละลายตามขอบเกรนมากกว่าการชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 520° ซึ่งการตรวจสอบโดยใช้อุณหภูมิสูงและเวลานานนี้เป็นการทดลองเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคเท่านั้น



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากข้อมูลการทดลองเมื่อนำมาวิเคราะห์ห้ข้อมูลทางสถิติ ตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

##### 5.1.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก

จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งหลังการชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจิง, อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอจิง และอิทธิพลร่วมระหว่างเวลาเอจิงกับอุณหภูมิเอจิง

ดังนั้น สามารถสร้างโมเดลจากปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมสองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญเพื่อทำนายความสัมพันธ์ของค่าความแข็งกับตัวแปรที่พิจารณาได้ดังนี้

$$\hat{y} = -2368 + 7.379A + 15.66B + 2.581C - 0.00872AB + 0.002845AC - 0.04255BC - 0.006764A^2 - 0.11090B^2 - 0.009330C^2$$

โดยโมเดลนี้มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 99.28 % แสดงว่าโมเดลสามารถแทนค่าหรือครอบคลุมข้อมูลจากการทดลองได้ถึง 99.28% สามารถประมาณค่าความแข็งที่มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 2.84$  BHN ที่ความเชื่อมั่น 95% และจากการตรวจสอบค่าความผิดพลาด (Errors หรือ Residuals) พบว่าเป็นไปตามสมมติฐานของการออกแบบการทดลองคือ มีการแจกแจงแบบปกติ และมีการกระจายตัวเป็นแบบสุ่มสม่ำเสมอที่แต่ละระดับของปัจจัยหลัก

##### 5.1.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

จากการตรวจสอบพบว่าโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) โครงสร้างที่เกิดขึ้นหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกหรือตกตะกอนประกอบด้วยโครงสร้างเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) และมีตะกอน  $Mg_2Si$  ที่มีขนาดเล็กกระจายตัวบนเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) และในการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) แบบ Point Analysis พบว่า บริเวณที่ตรวจสอบมีธาตุแมกนีเซียมและซิลิคอนเป็นองค์ประกอบ

และเมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค X-ray Mapping พบว่ามีธาตุแมกนีเซียมและซิลิคอนกระจายตัว  
ละลายในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม

นอกจากนั้น ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์  
โฟโตอิมิชชันอิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี (X-ray Photoemission Electron Microscopy, X-PEEM)  
และเทคนิค Low-Energy Electron Microscopy (LEEM) พบว่าโครงสร้างประกอบด้วยโครงสร้าง  
เนื้อพื้นอะลูมิเนียม ( $\alpha$  เฟส) และมีตะกอน  $Mg_2Si$  ที่มีขนาดเล็กกระจายตัวบนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมซึ่ง  
การเกิดตะกอน  $Mg_2Si$  นี้ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการชุบแข็งและพบว่าถ้าใช้  
อุณหภูมิเอจิงสูงหรือใช้เวลาเอจิงนานเกินไปนอกจากจะส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้ลดลงยังส่งผล  
ให้เกิดการละลายตามขอบเกรน



## รายการอ้างอิง

- นพพล เหลืองอักษร นฤมล ปลื้มจิตต์ และ นภิสพร มีมงคล. 2555. การศึกษาสมบัติทางกลของ อะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 ที่ผ่านกระบวนการดึงของแข็งและกระบวนการทางความร้อน T6, น 1337-1343. ใน การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี พ.ศ. 2555. เพชรบุรี.
- ประไพศรีสุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2551).การออกแบบและวิเคราะห์การ ทดลอง. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด
- ปารเมศ ชูติมา. (2545).การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิจิตร พงษ์บัณฑิต. (2542) เทคโนโลยีงานหล่อโลหะ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. กรุงเทพมหานคร
- Adesola, A.O., Odeshi, A.G., and Lanke, U.D. 2013. The effects of aging treatment and strain rates on damage evolution in AA 6061 aluminum alloy in compression. **Materials & Design.** 45: 212-221
- Al-Obaisi A.M., El-Danaf E.A., Ragab A.E., and Soliman M.S. 2016. Precipitation Hardening and Statistical Modeling of the Aging Parameters and Alloy Compositions in Al-Cu-Mg-Ag Alloys. **JMEPEG.** 2016, Vol 25, pp. 2432-2444
- ASTM International. E10-18 Standard Test Method for Brinell Hardness Metallic Material. West Conshohocken, PA; **ASTM International**, 2018.
- Barbosa, C., Dille, J., Delplancke, J.-L., Rebello, J. M. A. and Acselrad, O., 2006. A microstructural study of flash welded and aged 6061 and 6013 aluminum alloys. **Materials Characterization.** 57 : 187-192
- Barbosa, C., Rebello, J. M. A., Acselrad, O., Dille, J. and Delplancke, J.-L. 2002. Identification of Precipitates in 6013 Aluminum Alloy (Al-Mg-Si-Cu). **International Journal of Materials Research.** 93(3) : 208-211

- Boonchouytan, W., Chatthong, J., Rawangwong, S. and Burapa, R. 2014. Effect of Heat Treatment T6 on the Friction Stir Welded SSM 6061 Aluminum Alloys. **ScienceDirect**. 56 : 172-180
- Boonjubut K and Wantang T., 2014. Study of Factors Affecting Artificial Aging of 6061 Aluminum Alloy by Factorial Design. **Integrative Business & Economic**. Vol 3 : 62-70
- Boopathi, M., Shankar, S., Manikandakumar, S. and Ramesh,R. 2013. Experimental Investigation of Friction Drilling on Brass, Aluminium and Stainless Steel. **ScienceDirect**. Procedia Engineering 64 ( 2013 ) 1219 – 1226
- Buchanan, K., Colas, K., Ribis, J., Lopez, A. and Garnier, J. 2017. Analysis of the metastable precipitates in peak-hardness aged Al-MgSi(-Cu) alloys with differing Si contents. **Acta Materialia** 132 : 209-221.
- Chale-Laraa, F., Zapata-Torresb, M., Caballero-Brionesa, F., De la Cruzc, W., Cruz Gonzalez, N., Huerta-Escamillac, C., and Far'iasc, M.H. 2019. Deposit of AlN thin films by nitrogen reactive pulsed laser ablation using an Al target. *Revista Mexicana de Física* 65 : 345–350
- Chauhan, K.P.S. 2017. Influence of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Aluminium Alloys (6xxx Series): A Literature Review. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)** 6(03) : 386-389.
- Davis, J.R., Davidson, G.M., Lampman, S.R., Zorc, T.B., Daquila, J.L., Ronke, A.W. and Henniger, K.R. 1991. **ASM Handbook Vol 4 : Heat treating**. ASM International, United States of America.
- Demir, H. and Gündüz, S. 2009. The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy. **Materials and Design** 30 : 1480–1483
- Donik, C. 2018. Influence of Artificial aging on the Electrochemical Properties of The Aluminium AA 6063 Alloy. **Materials and technology** 52 : 71–75.
- Gowrishankar, M.C., Shravan, Rakesh, Rahul, Kini, A. and Sharma, S.S. 2014. Effect of Artificial Aging on Strength and Wear Behaviour of Solutionized Aluminium 6061 Alloy, pp. 388-393. **In 3rd World Conference on Applied Sciences, Engineering & Technology Kathmandu 27-29 September 2014:**
- Kolobnev, N.I., Ber L.B., Khokhlatova, L.B. and Ryabov, D.K. 2011. Structure, Properties and Application of Alloys of The Al – Mg – Si – (Cu) System. **Metal Science and Heat Treatment** 53 : 440-444.

- Marceau, R.K.W., Vaucorbeil de, A., Sha, G., Ringer, S.P. and Poole, W.J. 2013. Analysis of strengthening in AA6111 during the early stages of aging: Atom probe tomography and yield stress modelling. **Acta Materialia**. 61(19) : 7285-7303
- Masoud, I.M., Abu, M.T. and Al-Jarrah J.A. 2012. Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Hardening Properties of 6061 Aluminum Alloy. **Journal of Applied Sciences Research** 8(10) : 5106-5113.
- Miller, W.S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A.J., De Smet, P., Haszler, A. and Vieregge, A. 2000. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. **Materials Science and Engineering A280** : 37–49
- Monka, P., Monkova, K., Balara, M., Hloch, S., Rehor, J., Andrej, A. and Somsak, M. 2015. Design and experimental study of turning tools with linear cutting edges and comparison to commercial tools. **Int J Adv Manuf Technol**. DOI 10.1007/s00170-015-8065-3
- Ozturk, F., Esener, E., Toros, S., and Picu, R.C. 2010. Effects of aging parameters on formability of 6061-O alloy. **Materials and Design**. 31: 4847-4852
- Ozturk, F., Sisman, A., Toros, S., Kilic, S. and Picu, R.C. 2009. Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy. **Materials and Design** 31(2010): 972–975.
- Pajaroen, N., Plookphol, T., Wannasin, J. and Wisutmethangoon, S. 2013. Influence of Solution Heat Treatment Temperature and Time on the Microstructure and Mechanical Properties of Gas Induced Semi-Solid (GISS) 6061 Aluminum Alloy. **Applied Mechanics and Materials** Vols 313-314 (2013) : 67-71.
- Pal, S., Khajuria, A. and Akhtar, M. 2018. Influence of Aging on Hardness and Tool Wear of Artificially Aged Aluminium Alloy 6061. **Iaetsd Journal for Advanced Research in Applied Sciences** 5(2) : 477-481.
- Pogatscher, S., Antrekowitsch, H., Leitner, H., Ebner, T. and Uggowitzer, P.J. 2011. Mechanisms controlling the artificial aging of Al–Mg–Si Alloys. **Acta Materialia** 59(2011) : 3352-3363.
- Rajaa, S.M., Abdulhadi, H.A., Jabur, K.S., and Mohammed, G.R. 2018. **Aging Time Effects on the Mechanical Properties of Al 6061-T6 Alloy**. Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 8, No. 4, 2018, 3113-3115

- Rheinheimer, V., Unluer, C., Liu, J., Ruan, S., Pan, J., and Monteiro, J.M.P. 2017. XPS Study on the Stability and Transformation of Hydrate and Carbonate Phases within MgO Systems. **Article in Materials**. 10,75 : 1-16
- Sirichaivetakul, R., Wongpinij, T., Euaruksakul, C., Limmaneevichitr, C., and Kajornchaiyakul, J. 2019. In-situ study of microstructural evolution during thermal treatment of 6063 aluminum alloy. **Materials Letters** Vol 250 : 42-45
- Tan, C.F. and Said, M.R. 2009. Effect of Hardness Test on Precipitation Hardening Aluminium Alloy 6061-T6. **Chiang Mai Journal Science** 36(3) : 276-286.
- Toozandehjani, M., Mustapha, F., Ariffin, M.K.A., Zahari, N.I., Matori, K.A., Ostovan, F. and Fadaeifard, F. 2016. Effect of Artificial Aging on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy AA6061-T6. **Metal Science and Heat Treatment** 58 : 283–286.
- Zeid, A.E.F. 2019. Mechanical and electrochemical characteristics of solutionized AA 6061, AA6013 and AA 5086 aluminum alloys. **Journal of Materials Research and Technology** 8(2) : 1870





ภาคผนวก ก

ตารางค่าความแข็ง ASTM E10-18

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number 500 – kgf Load	Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number 500 – kgf Load	Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number 500 – kgf Load
2.00	158	2.36	113	2.72	84.4
2.01	156	2.37	112	2.73	83.8
2.02	154	2.38	111	2.74	83.2
2.03	153	2.39	110	2.75	82.6
2.04	151	2.40	109	2.76	81.9
2.05	150	2.41	108	2.77	81.3
2.06	148	2.42	107	2.78	80.8
2.07	147	2.43	106	2.79	80.2
2.08	146	2.44	105	2.80	79.6
2.09	144	2.45	104	2.81	79
2.10	143	2.46	104	2.82	78.4
2.11	141	2.47	103	2.83	77.9
2.12	140	2.48	102	2.84	77.3
2.13	139	2.49	101	2.85	76.8
2.14	137	2.50	100	2.86	76.2
2.15	136	2.51	99.4	2.87	75.7
2.16	135	2.52	98.6	2.88	75.1
2.17	134	2.53	97.8	2.89	74.6
2.18	132	2.54	97.1	2.90	74.1
2.19	131	2.55	96.3	2.91	73.6
2.20	130	2.56	95.5	2.92	73
2.21	129	2.57	94.8	2.93	72.5
2.22	128	2.58	94	2.94	72
2.23	126	2.59	93.3	2.95	71.5
2.24	125	2.60	92.6	2.96	71
2.25	124	2.61	91.8	2.97	70.5
2.26	123	2.62	91.1	2.98	70.1
2.27	122	2.63	90.4	2.99	69.6
2.28	121	2.64	89.7	3.00	69.1
2.29	120	2.65	89	3.01	68.6
2.30	119	2.66	88.4	3.02	68.2
2.31	118	2.67	87.7	3.03	67.7
2.32	117	2.68	87	3.04	67.3
2.33	116	2.69	86.4	3.05	66.8
2.34	115	2.70	85.7	3.06	66.4
2.35	114	2.71	85.1	3.07	65.9

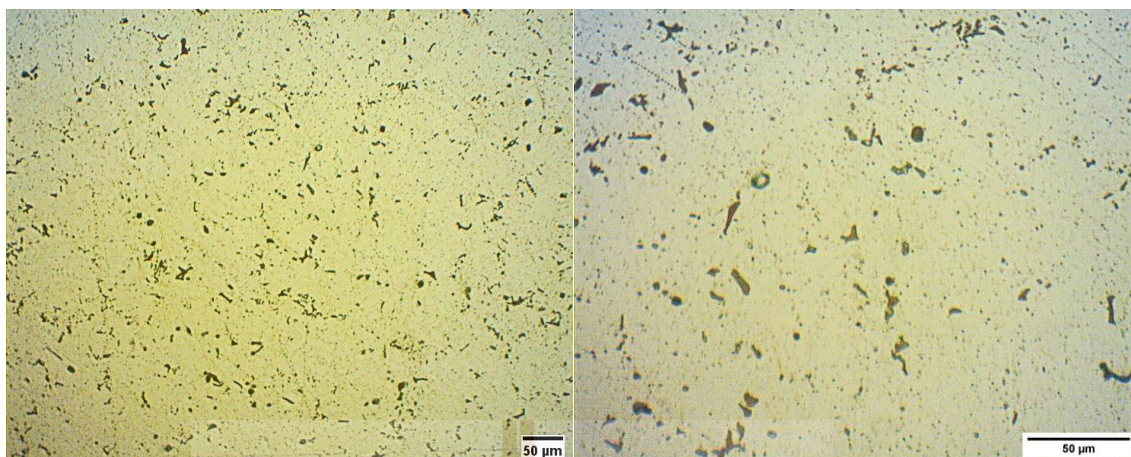
Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number 500 – kgf Load	Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number 500 – kgf Load	Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number 500 – kgf Load
3.08	65.5	3.40	53.4	3.72	44.4
3.09	65	3.41	53.1	3.73	44.1
3.10	64.6	3.42	52.8	3.74	43.9
3.11	64.2	3.43	52.5	3.75	43.6
3.12	63.8	3.44	52.2	3.76	43.4
3.13	63.3	3.45	51.8	3.77	43.1
3.14	62.9	3.46	51.5	3.78	42.9
3.15	62.5	3.47	51.2	3.79	42.7
3.16	62.1	3.48	50.9	3.80	42.4
3.17	61.7	3.49	50.6	3.81	42.2
3.18	61.3	3.50	50.3	3.82	42
3.19	60.9	3.51	50	3.83	41.7
3.20	60.5	3.52	49.7	3.84	41.5
3.21	60.1	3.53	49.4	3.85	41.3
3.22	59.8	3.54	49.2	3.86	41.1
3.23	59.4	3.55	48.9	3.87	40.9
3.24	59	3.56	48.6	3.88	40.6
3.25	58.6	3.57	48.3	3.89	40.4
3.26	58.3	3.58	48	3.90	40.2
3.27	57.9	3.59	47.7	3.91	40
3.28	57.5	3.60	47.5	3.92	39.8
3.29	57.2	3.61	47.2	3.93	39.6
3.30	56.8	3.62	46.9	3.94	39.4
3.31	56.5	3.63	46.7	3.95	39.1
3.32	56.1	3.64	46.4	3.96	38.9
3.33	55.8	3.65	46.1	3.97	38.7
3.34	55.4	3.66	45.9	3.98	38.5
3.35	55.1	3.67	45.6	3.99	38.3
3.36	54.6	3.68	45.4	3.72	44.4
3.37	54.4	3.69	45.1	3.73	44.1
3.38	54.1	3.70	44.9	3.74	43.9
3.39	53.8	3.71	44.6	3.75	43.6



ภาคผนวก ข

โครงสร้างจุดภาคขึ้นงานทดลอง

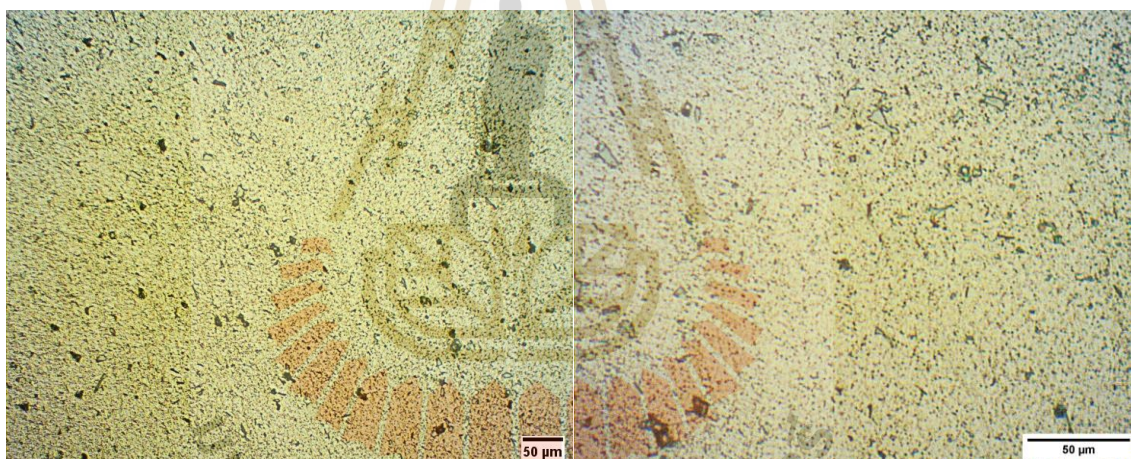
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



20x

50x

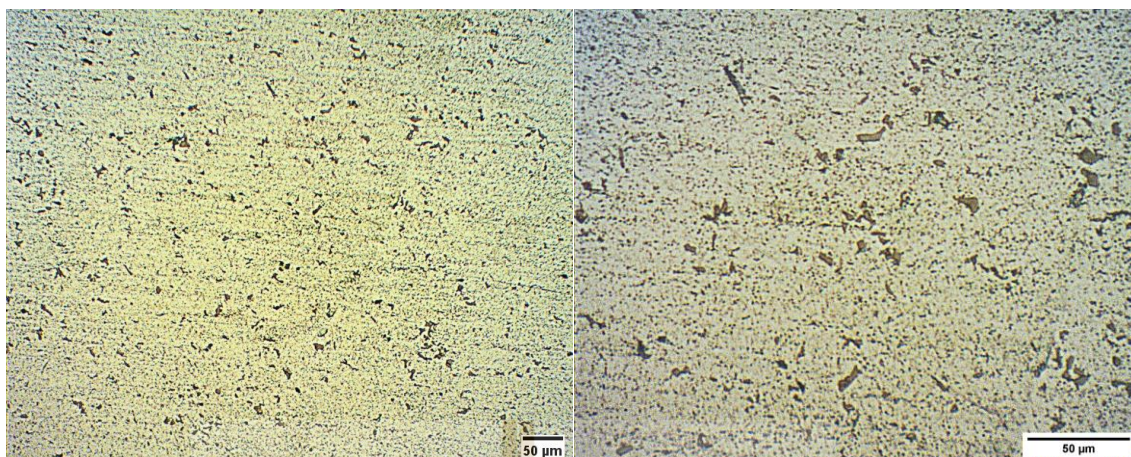
อบละลายที่อุณหภูมิ 520°C เจจิงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



20x

50x

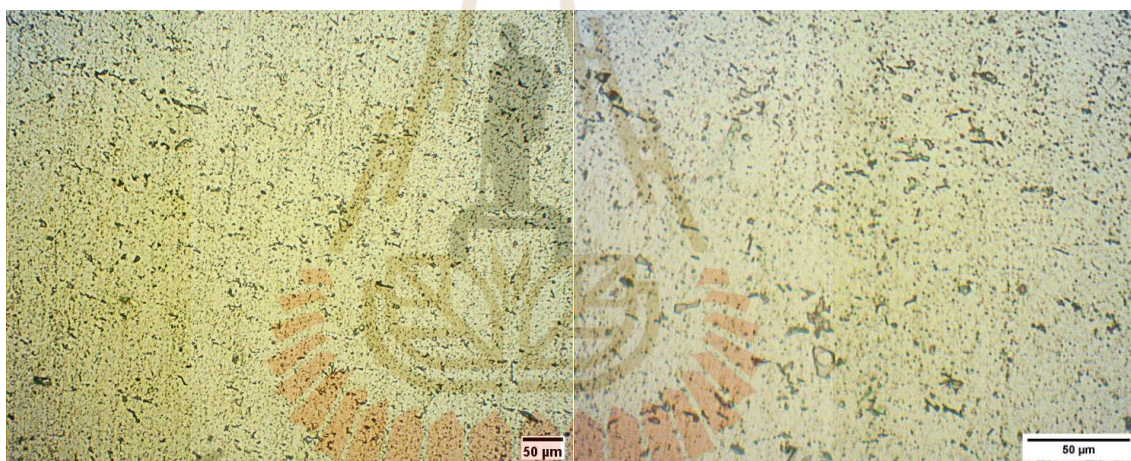
อบละลายที่อุณหภูมิ 520°C เจจิงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



20x

50x

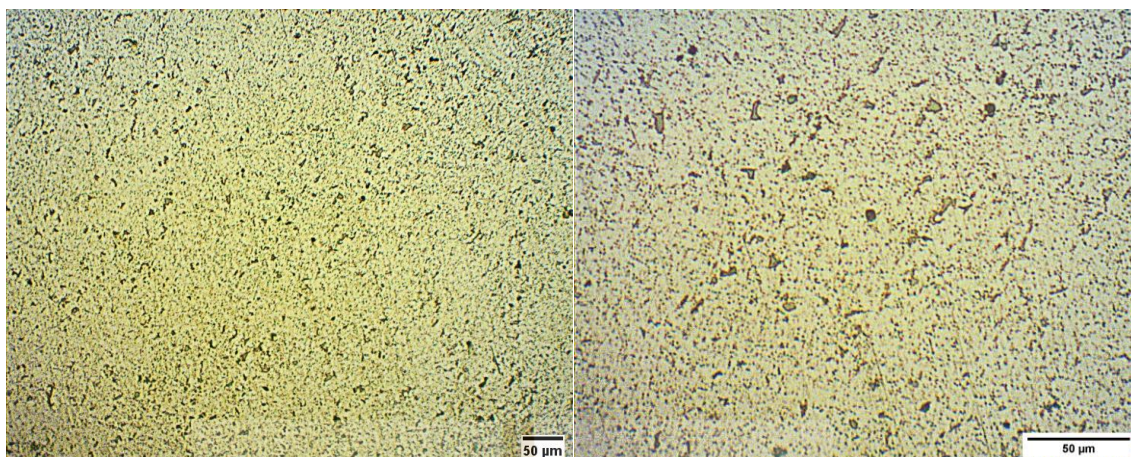
อบละลายที่อุณหภูมิ 520°C เองจึงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง



20x

50x

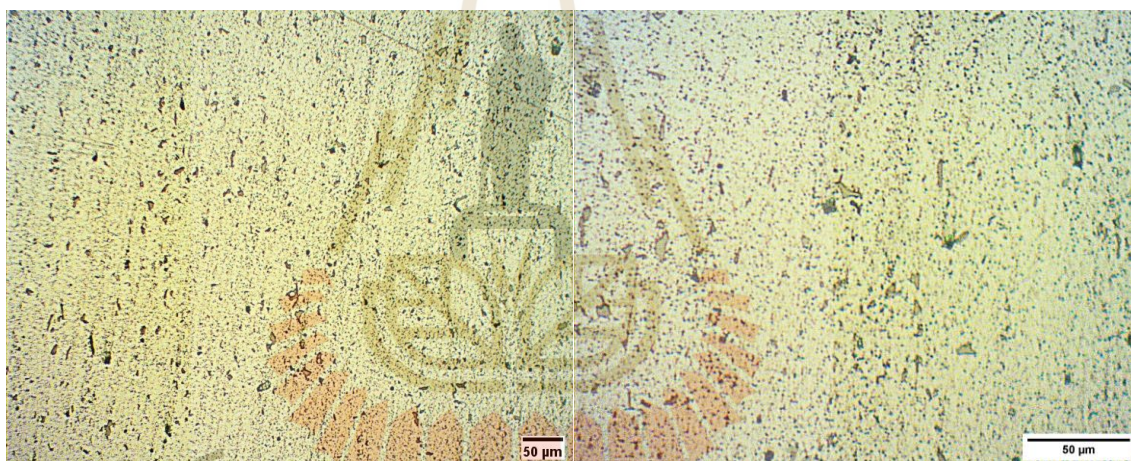
อบละลายที่อุณหภูมิ 520°C เองจึงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



20x

50x

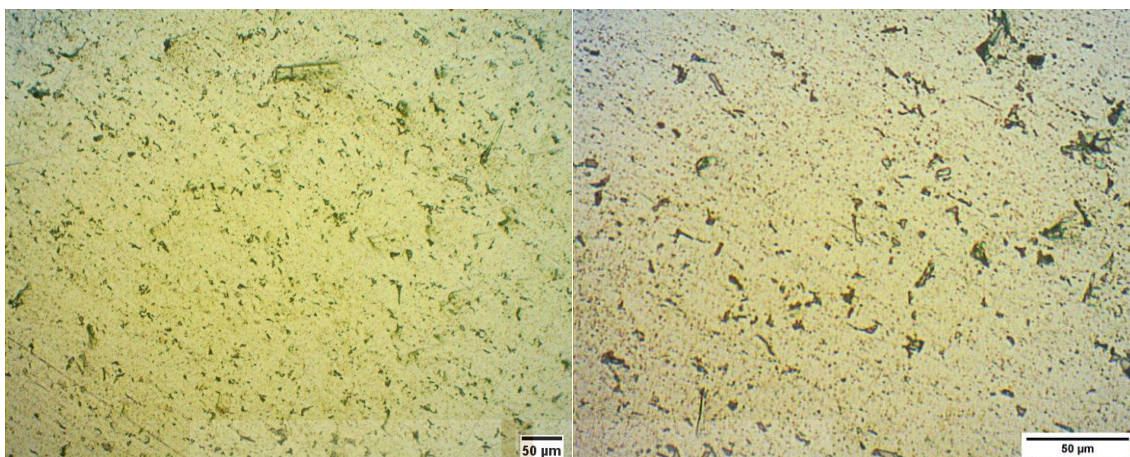
อบละลายที่อุณหภูมิ 520°C เองจึงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



20x

50x

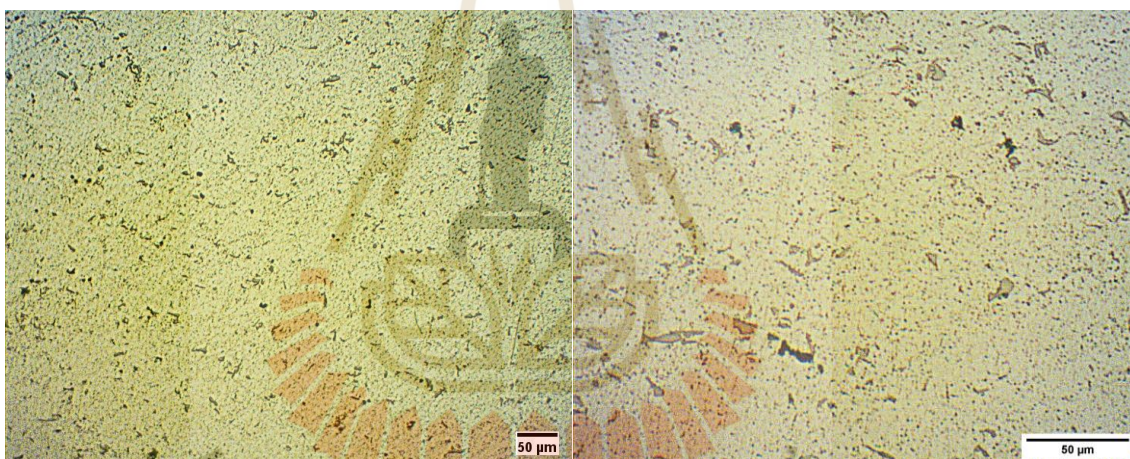
อบละลายที่อุณหภูมิ 520°C เองจึงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง



20x

50x

อบละลายที่อุณหภูมิ 520°C เองจึงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

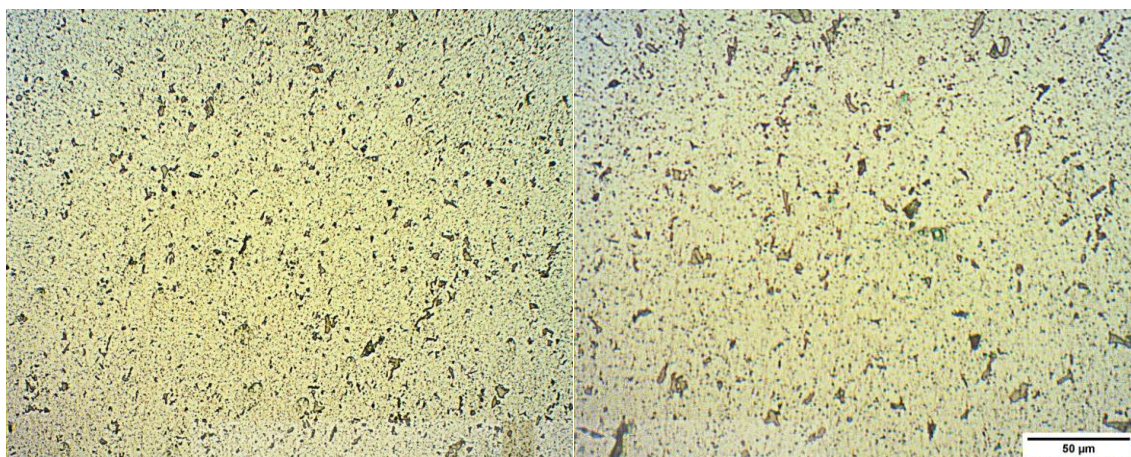


20x

50x

อบละลายที่อุณหภูมิ 520°C เองจึงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

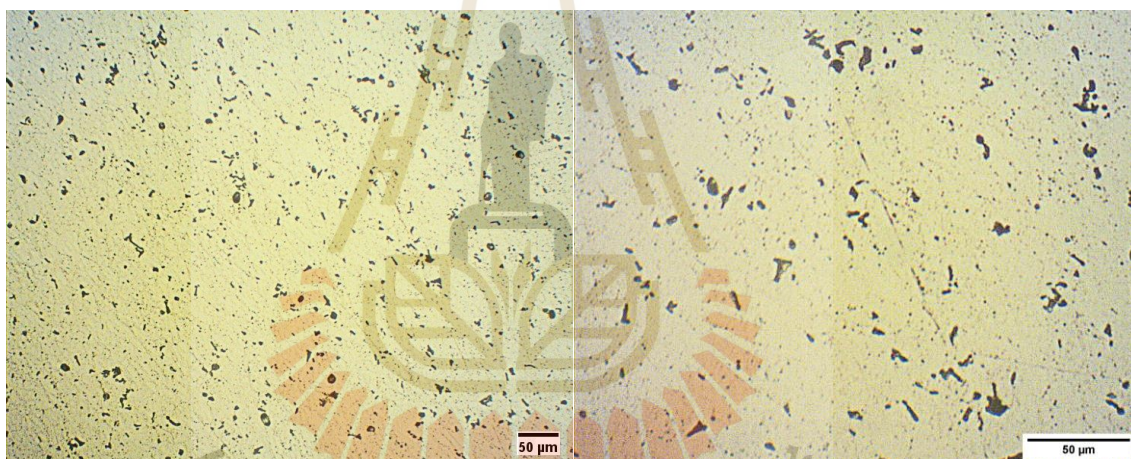




20x

50x

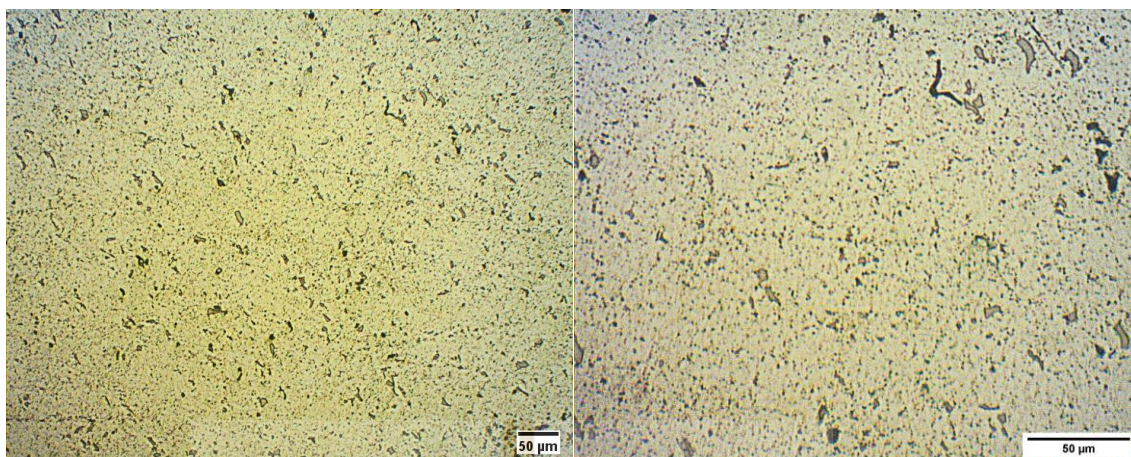
อบละลายที่อุณหภูมิ 520°C เองจึงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง



20x

50x

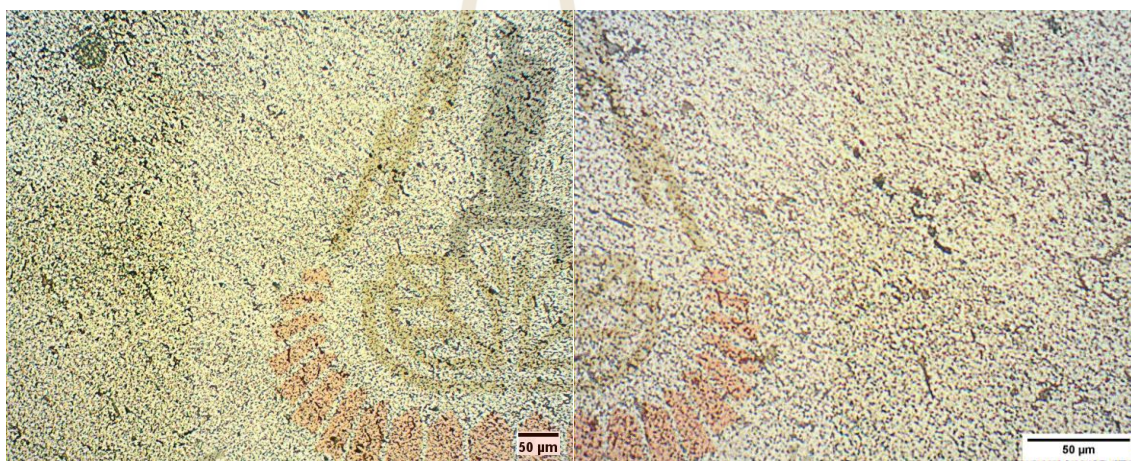
อบละลายที่อุณหภูมิ 540°C เองจึงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



20x

50x

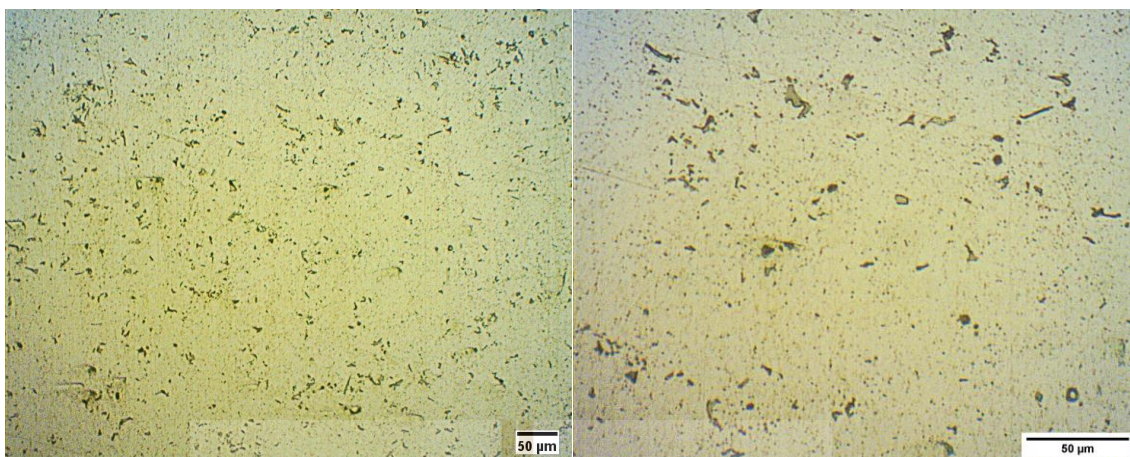
อบละลายที่อุณหภูมิ 540°C เองจึงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



20x

50x

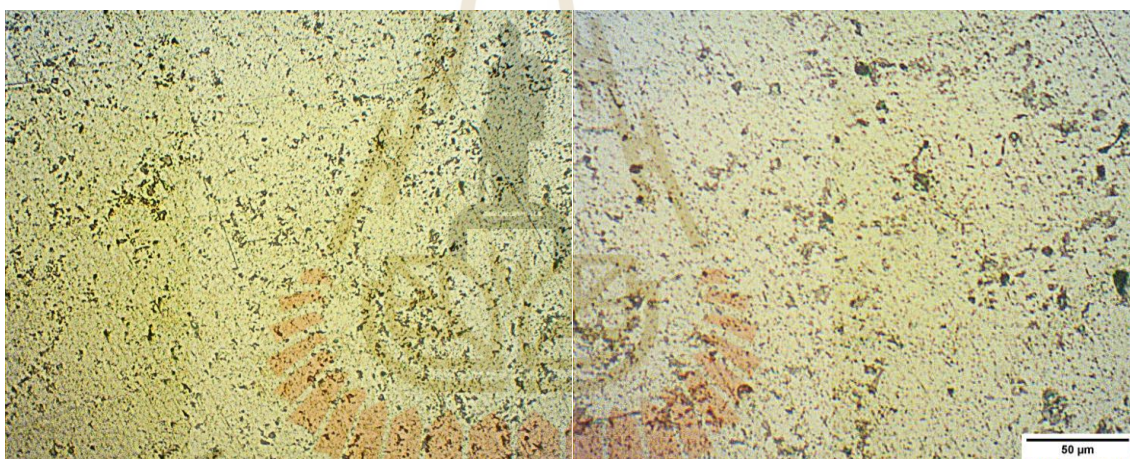
อบละลายที่อุณหภูมิ 540°C เองจึงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง



20x

50x

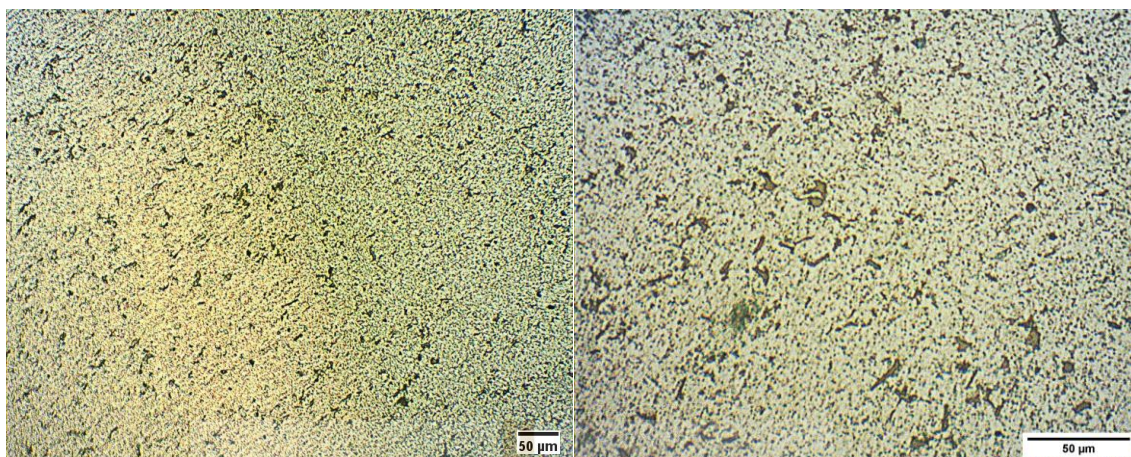
อบละลายที่อุณหภูมิ 540°C เจจิงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



20x

50x

อบละลายที่อุณหภูมิ 540°C เจจิงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



20x

50x

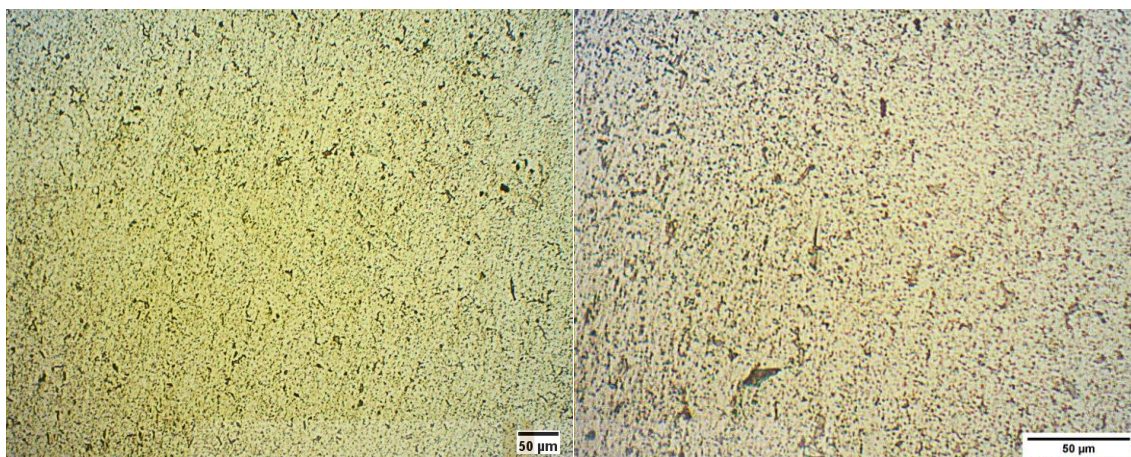
อบละลายที่อุณหภูมิ 540°C เองจึงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง



20x

50x

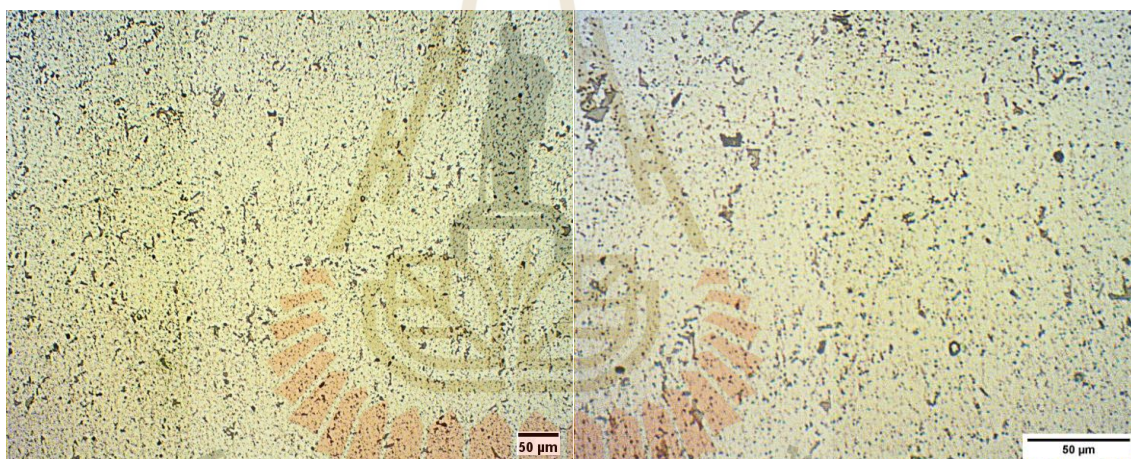
อบละลายที่อุณหภูมิ 540°C เองจึงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



20x

50x

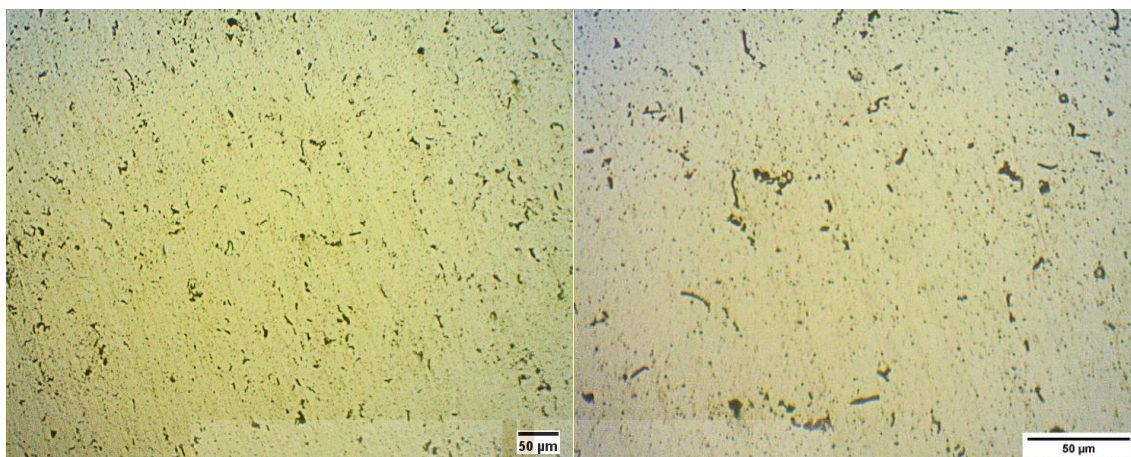
อบละลายที่อุณหภูมิ 540°C เองจึงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



20x

50x

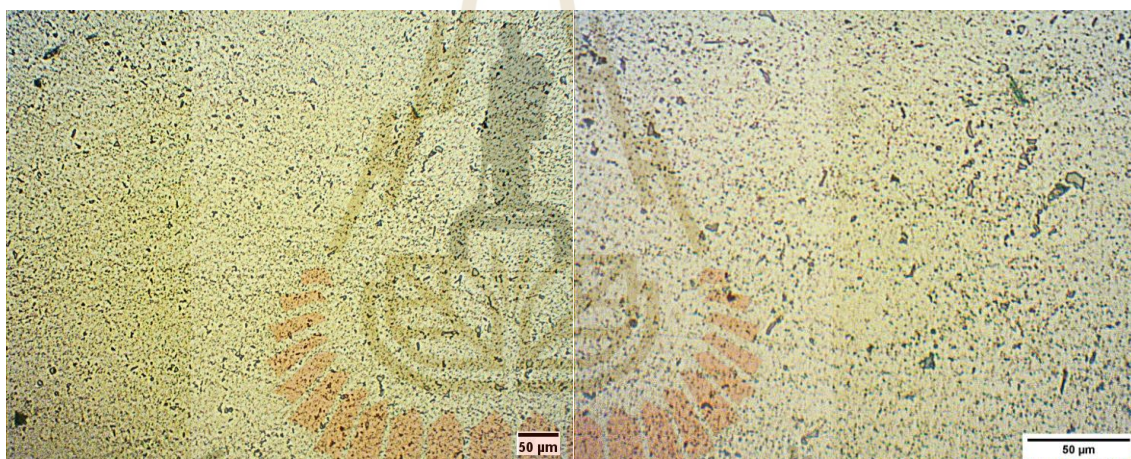
อบละลายที่อุณหภูมิ 540°C เองจึงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง



20x

50x

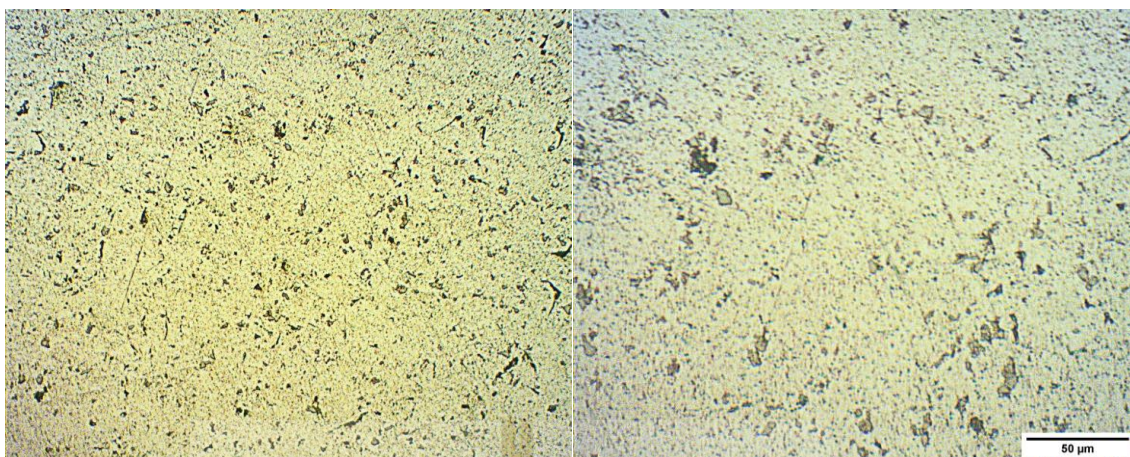
อบละลายที่อุณหภูมิ 560°C เจจิงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



20x

50x

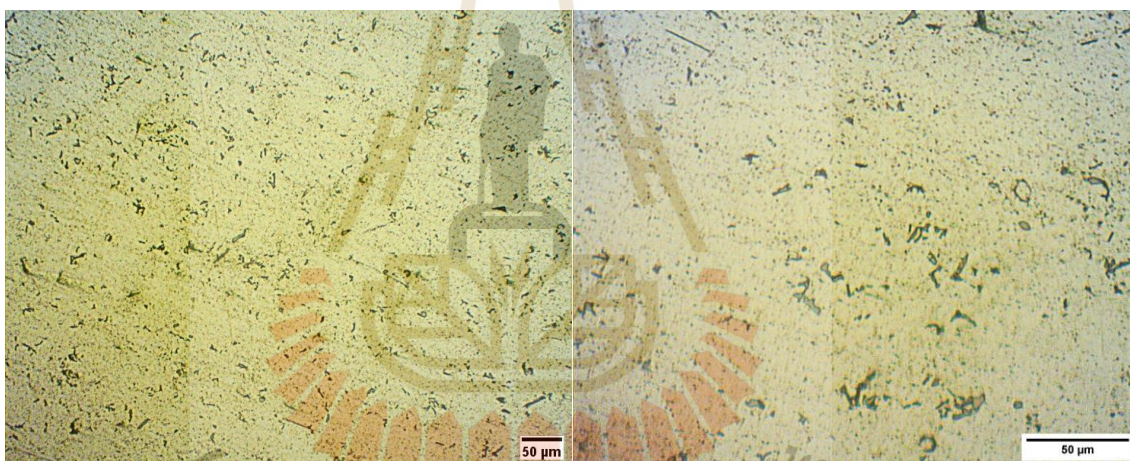
อบละลายที่อุณหภูมิ 560°C เจจิงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



20x

50x

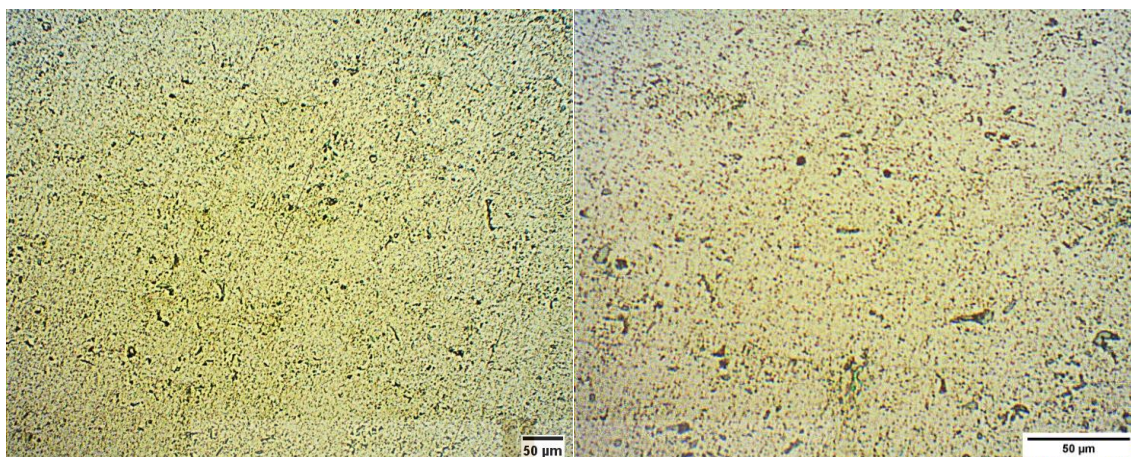
อบละลายที่อุณหภูมิ 560°C เองจึงที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง



20x

50x

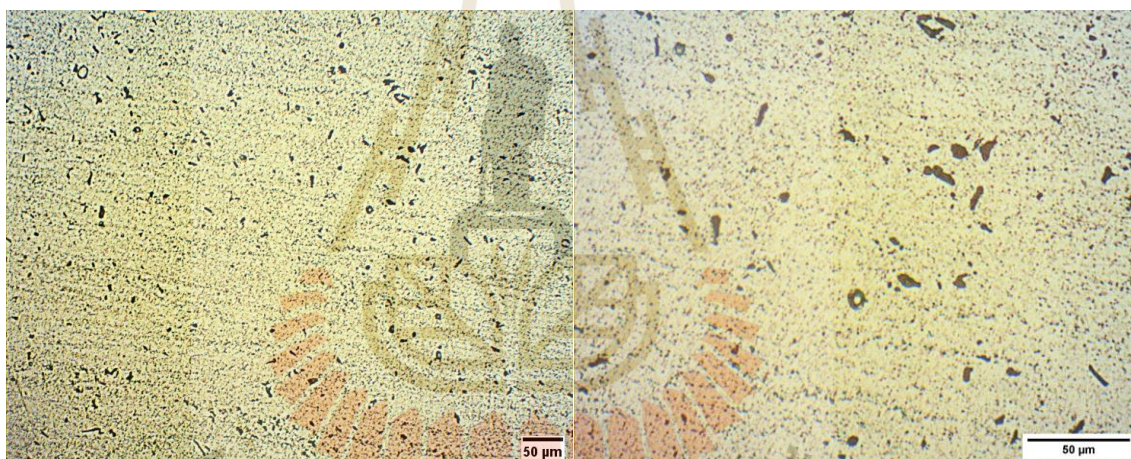
อบละลายที่อุณหภูมิ 560°C เองจึงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



20x

50x

อบละลายที่อุณหภูมิ 560°C เองจึงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

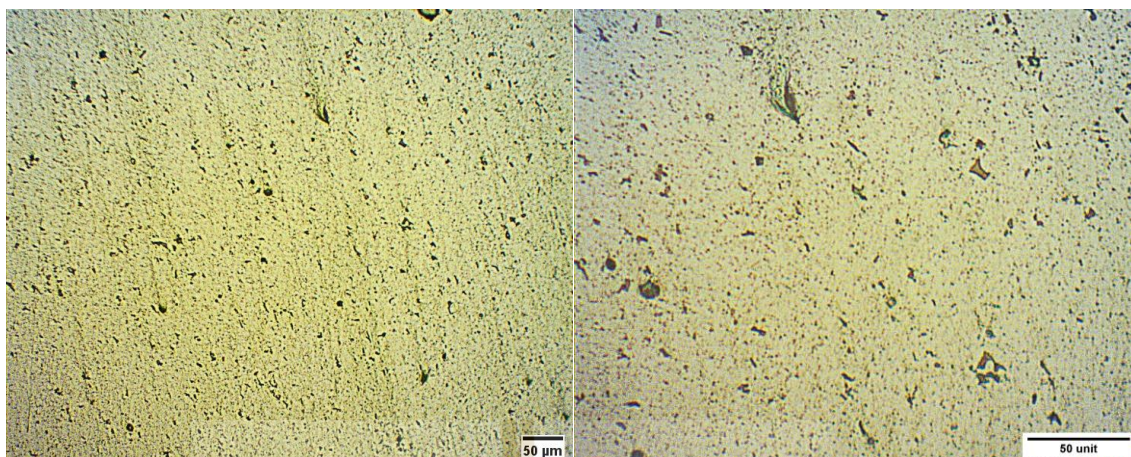


20x

50x

อบละลายที่อุณหภูมิ 560°C เองจึงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

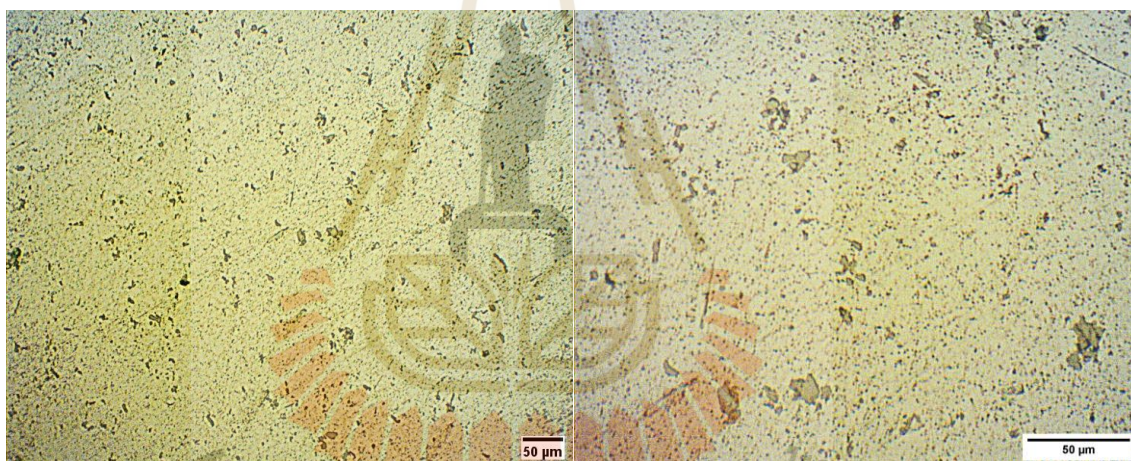




20x

50x

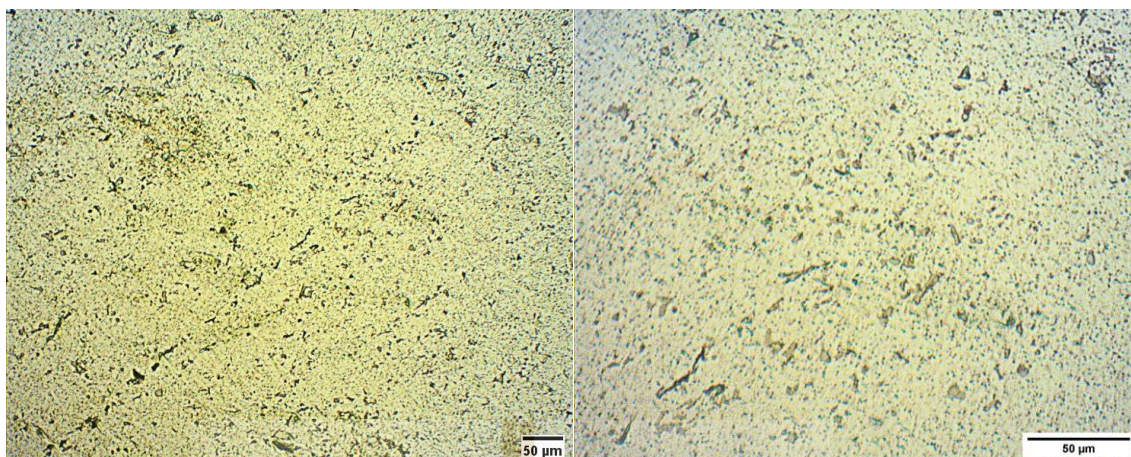
อบละลายที่อุณหภูมิ 560°C เองจึงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



20x

50x

อบละลายที่อุณหภูมิ 560°C เองจึงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



20x

50x

อบละลายที่อุณหภูมิ 560°C เองจึงที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาคผนวก ค

การคำนวณแบบจำลองโมเดล

จากโมเดลประมาณค่าความแข็งดั่งสมการ

$$\hat{y} = -2368 + 7.379A + 15.66B + 2.581C - 0.00872AB + 0.002845AC - 0.04255BC - 0.006764A^2 - 0.11090B^2 - 0.009330C^2$$

สามารถแสดงการสร้างสมการแบบจำลองการถดถอย (Regression Model) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปมินิแท็บ (Minitab) ได้ดังนี้

1. เปิดโปรแกรมมินิแท็บ



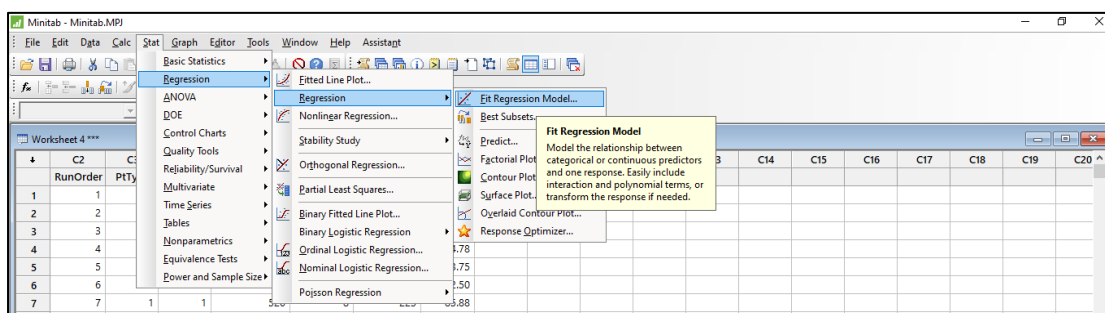
รูปที่ 1 ไอคอนโปรแกรมมินิแท็บ 17 (Minitab)

2. เมื่อเปิดโปรแกรมมินิแท็บจะได้อำนาจที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ  $3^3$  แฟกทอเรียล ดังแสดงใน Worksheet 4 จากนั้นป้อนค่าความแข็ง (Hardness) ที่ได้จากการทดลองลงในคอลัมน์ C8 เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regression Model) ดังแสดงในรูปที่ 2

	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
	RunOrder	PtType	Blocks	Solution Temp	Aging Time	Aging Temp	Hardness												
1	1	1	1	520	8	175	86.38												
2	2	1	1	560	14	200	114.00												
3	3	1	1	560	2	175	93.20												
4	4	1	1	520	14	200	94.78												
5	5	1	1	560	14	175	113.75												
6	6	1	1	560	14	175	112.50												
7	7	1	1	520	8	225	85.88												
8	8	1	1	540	2	200	96.60												
9	9	1	1	540	2	175	85.73												
10	10	1	1	560	2	225	111.75												
11	11	1	1	560	8	225	112.75												
12	12	1	1	520	2	200	84.43												
13	13	1	1	520	14	225	80.90												
14	14	1	1	560	2	200	108.75												
15	15	1	1	520	8	200	93.30												
16	16	1	1	520	14	175	94.03												
17	17	1	1	520	14	225	81.93												
18	18	1	1	560	2	175	96.33												
19	19	1	1	540	8	200	107.75												
20	20	1	1	540	2	175	84.00												
21	21	1	1	520	2	225	85.08												

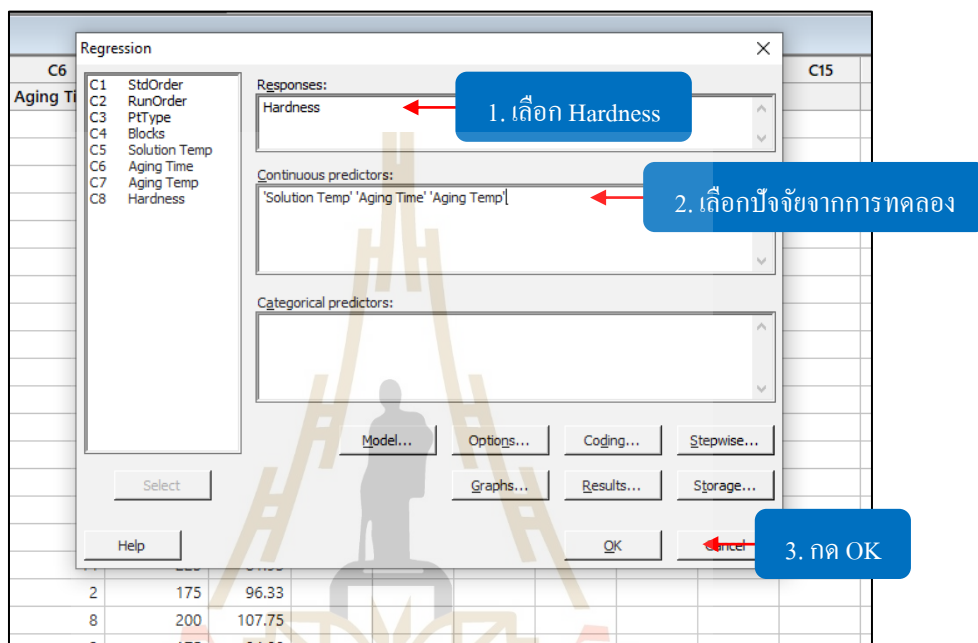
รูปที่ 2 ป้อนค่าความแข็ง (Hardness) ที่ได้จากการทดลอง

3. เลือกคำสั่ง Stat → Regression → Regression → Fit Regression Model ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 เลือกคำสั่งเพื่อสร้างโมเดลประมาณค่าความแข็ง

4. จากข้อ 3 เมื่อเลือกคำสั่ง Fit Regression Model จะได้นหน้าต่างข้อความดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อปรากฏกล่องข้อความให้เลือกตัวแปรตอบสนอง (Responses) ในที่นี้เป็นค่าความแข็งที่ได้จากการทดลอง (Hardness) และเลือกปัจจัยการทดลองเป็น Solution Temp, Aging Time และ Aging Temp ดังแสดงในรูป



รูปที่ 4 การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Responses) และปัจจัยเพื่อสร้างโมเดลประมาณค่าความแข็ง

5. จากข้อ 4 จะ ได้สมการ โมเดลประมาณค่าความแข็งดังแสดงในรูปที่ 5

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.08468	99.28%	99.13%	98.90%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-2368	234	-10.12	0.000	
Solution Temp	7.379	0.850	8.68	0.000	8847.67
Aging Time	15.66	1.05	14.93	0.000	1211.93
Aging Temp	2.581	0.312	8.26	0.000	1865.17
Solution Temp*Solution Temp	-0.006764	0.000783	-8.64	0.000	8749.00
Aging Time*Aging Time	-0.11090	0.00870	-12.75	0.000	22.33
Aging Temp*Aging Temp	-0.009330	0.000501	-18.62	0.000	769.00
Solution Temp*Aging Time	-0.00872	0.00185	-4.73	0.000	1097.17
Solution Temp*Aging Temp	0.002845	0.000443	6.42	0.000	1150.50
Aging Time*Aging Temp	-0.04255	0.00148	-28.83	0.000	99.67

Regression Equation

$$\text{Hardness} = -2368 + 7.379 \text{ Solution Temp} + 15.66 \text{ Aging Time} + 2.581 \text{ Aging Temp} - 0.006764 \text{ Solution Temp} * \text{Solution Temp} - 0.11090 \text{ Aging Time} * \text{Aging Time} - 0.009330 \text{ Aging Temp} * \text{Aging Temp} - 0.00872 \text{ Solution Temp} * \text{Aging Time} + 0.002845 \text{ Solution Temp} * \text{Aging Temp} - 0.04255 \text{ Aging Time} * \text{Aging Temp}$$

รูปที่ 5 สมการ โมเดลประมาณค่าความแข็ง

6. นำโมเดลดังกล่าวมาเขียนใหม่โดยการแทน Solution Temp ด้วยตัวแปร A, Aging Time ด้วยตัวแปร B และ Aging Temp ด้วยตัวแปร C และจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการเป็น

$$\hat{y} = -2368 + 7.379A + 15.66B + 2.581C - 0.00872AB + 0.002845AC - 0.04255BC - 0.006764A^2 - 0.11090B^2 - 0.009330C^2$$
 ดังแสดงสมการนี้ในบทที่ 4





ภาคผนวก ง

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รัตนภรณ์ วงษ์ทอง และ พรศิริ จงกล (2565). ผลของปัจจัยต่อความแข็งและการตกผลึก  $Mg_2Si$  ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061.วารสารวิจัย มทร.ศรีวิชัย ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม-เมษายน 2565.13 หน้า.



RMUTSVJ ออก ณ วันที่ ๒๒ /ก.ย./2563



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความวิจัย บทความวิชาการ  
วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ขอรับรองว่าบทความวิจัย

เรื่อง

ผลของปัจจัยต่อความแข็งและการตกผลึก  $Mg_2Si$  ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061  
Effect of Factors on Hardness and Precipitation of  $Mg_2Si$   
of aluminum alloy 6061

โดย

นางสาวรัตนภรณ์ วงษ์ทอง และ รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล

ได้ผ่านการพิจารณาจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
ให้ตีพิมพ์ในวารสารวิจัย มทร.ศรีวิชัย ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน มกราคม - เมษายน พ.ศ. 2565

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ลงชื่อ..... 

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประภาศรี ศรีชัย)

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวรัตนภรณ์ วงษ์ทอง เกิดวันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2527 ที่บ้านเพิ่ม ตำบลนาแค อำเภอนายูง จังหวัดอุดรธานี เริ่มการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านเพิ่ม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอุ่งทองพิทยาคม จังหวัดอุดรธานี เมื่อปี พ.ศ. 2544 ภายหลังจากได้ศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปีการศึกษา พ.ศ. 2545 ในสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2549

ปี พ.ศ.2550 ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ.2555

ปี พ.ศ.2557 ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี