

ผลของปัจจัยต่อความแข็งและการตกผลึก Mg_2Si

ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061

Effect of Factors on Hardness and Precipitation of Mg_2Si of Aluminum Alloy 6061

รัตนารณ์ วงษ์ทอง* และ พรศิริ จงกล

Rattanaporn Wongthong* and Pornsiri Jongkol

Received: 24 June 2020, Revised: 18 August 2020, Accepted: 22 September 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 หลังผ่านการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึก (Precipitation Hardening) หรือเอจิง ในการทดลองได้ใช้การออกแบบแผนการทดลองแบบ 3^3 แฟคทอเรียล กำหนดให้ใช้ปัจจัย 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิอบละลาย (Solution Temperature) เวลาเอจิง (Aging Time) และอุณหภูมิเอจิง (Aging Temperature) โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังนี้ อุณหภูมิอบละลาย ($^{\circ}C$) : 520, 540 และ 560; เวลาเอจิง (ชั่วโมง) : 2, 8 และ 14 และอุณหภูมิเอจิง ($^{\circ}C$) : 175, 200 และ 225 และพิจารณาตัวแปรตามคือค่าความแข็งเท่านั้น จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยมีผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจิง อุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอจิง และเวลาเอจิงกับอุณหภูมิเอจิง โดยการอบละลายที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ค่าความแข็งหลังการการอบชุบสูงขึ้นเนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบละลายสูงทำให้แมกนีเซียมและซิลิคอนแพร่เข้าไปในเนื้อพื้กลายเป็นเฟสเดียวกันได้ นอกจากนั้นการใช้เวลาเอจิงนานก็ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิเอจิงแต่การเอจิงควรระวังไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้ค่าความแข็งที่ได้ลดลงเนื่องจากแรงเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคนาโนเล็กของ Mg_2Si กับเนื้อพื้อะลูมิเนียมหมดไป และจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ด้วยวิธี Point Analysis พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผ่านการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกตะกอนหรือเอจิงปรากฏอนุภาคนาโนเล็กของเฟส Mg_2Si การกระจายตัวอยู่บนเนื้อพื้อะลูมิเนียมส่งผลให้โลหะผสมอะลูมิเนียมดังกล่าวมีค่าความแข็งสูงขึ้น

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

School of Industrial Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): Wongthong.r@gmail.com Tel: 06 2151 9596

คำสำคัญ: การบ่มเทียม, โลหะผสมอะลูมิเนียม 6061, การออกแบบการทดลอง

ABSTRACT

This research investigates the 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 was used to analyze the data. The results showed that all factors affected hardness significantly. Two factor interactions which were significantly found included solution temperature and aging time, solution temperature and aging temperature, and aging time and aging temperature. The study found that higher hardness was obtained at a higher solution temperature because using high solution temperature made more Mg and Si diffuse into the matrix and became homogeneous phase. Then increasing aging time caused an increase in hardness values as well. However, using too high aging temperature resulted in a decrease in hardness because bonding force between Mg_2Si particles with matrix aluminum was depleted. Furthermore, the results of microstructure from scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS) revealed that Mg_2Si particles were distributed all over aluminum. This resulted in greater hardness.

Key words: artificial aging, aluminum alloy grade 6061, design of experiment

บทนำ

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา แปรรูปได้ง่าย มีสีสวยงาม ไม่เป็นพิษกับร่างกาย มีความสามารถในการเพิ่มความแข็งและความแข็งแรง อะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 เป็นอะลูมิเนียมที่ได้รับความนิยมเนื่องจากคุณสมบัติที่ทนการกัดกร่อน ขึ้นรูปง่ายและมีความสามารถเพิ่มความแข็งด้วยความร้อนได้ จึงถูกนำมาใช้งานโครงสร้าง ยานยนต์ เรือ เฟอร์นิเจอร์ และอื่นๆ (Ozturk *et al.*, 2009; Chauhan, 2017) ซึ่งการนำมาใช้งานนั้นต้องมีการปรับปรุงสมบัติทางกลเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน การเพิ่มความแข็งด้วยความร้อนเป็นอีกวิธีที่ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกล ซึ่ง

การเพิ่มความแข็งด้วยวิธีนี้เป็นการทำให้เกิดการตกผลึกของเฟสที่สองในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมส่งผลให้ความแข็งและต้านทานแรงเพิ่มขึ้น (Gowrishankar *et al.*, 2014; Pal *et al.*, 2008) โดยในขั้นตอนการเพิ่มความแข็งด้วยความร้อนหรือกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอน (Precipitation Hardening) มีขั้นตอนการทำให้ความร้อนกับชิ้นงานจนทำให้เฟสที่สองละลายกลับเข้าไปในเฟสเนื้อพื้นกลายเป็นเฟสเดียว (Solution Heat Treatment) จากนั้นนำชิ้นงานชุบในน้ำหรือน้ำมันอย่างรวดเร็ว (Quenching) และทำให้เกิดการตกตะกอนของสารประกอบอีกครั้ง ส่งผลให้อะลูมิเนียมมีความแข็งเพิ่มขึ้น (Davis *et al.*, 1991) การตกตะกอนนี้เป็นการตกตะกอนของธาตุที่ละลายอยู่ในโครงสร้างพื้นของอะลูมิเนียมโดย

ลักษณะของการเกิดการตกตะกอนจะมีการเปลี่ยนแปลงตามลำดับคือ GP-Zone, Needle-Shaped) และ Lath-Shaped (Buchanan *et al.*, 2017; Zeid, 2019) ซึ่งการเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีนี้ถ้าปล่อยให้การตกตะกอนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิปกติเรียกว่าเอนจิงโดยธรรมชาติ (Natural Aging) แต่ถ้ามีการนำมาให้ความร้อนเรียกว่าการเอนจิงเทียมหรือ Artificial Aging

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงและสมบัติทางกลหลังการชุบแข็งด้วยวิธีการตกตะกอนหรือการทำเอนจิง โดยได้ศึกษาผลของการทำเอนจิงต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคในการศึกษาใช้อุณหภูมิอบละลาย 530 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นเอนจิงที่อุณหภูมิ 220 °C เป็นเวลา 0.5-8 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการทำเอนจิงและให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ 2 ชั่วโมง (Toozandehjani *et al.*, 2016) สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษาผลของค่าความแข็งแรงหลังการทำเอนจิงด้วยอุณหภูมิและเวลาในการทำอบละลายเดียวกันคือ อบละลาย 530 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเอนจิงที่อุณหภูมิ 145, 165, 185, 205 และ 225 °C และใช้เวลาเอนจิงนานสูงสุด 6 ชั่วโมง พบว่าให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด 137 HV ที่อุณหภูมิ 220 °C นาน 1 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 225 °C นาน 2 ชั่วโมง (Masoud *et al.*, 2012) นอกจากนี้จากผลการศึกษาผลของการทำเอนจิงต่อค่าความแข็งแรงโดยใช้อุณหภูมิอบละลาย 550 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และอุณหภูมิเอนจิง 100, 150 และ 200 °C พบว่าการเอนจิงที่อุณหภูมิต่ำจะให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าการเอนจิงที่อุณหภูมิสูงแต่การเอนจิงต้องใช้เวลานาน (Gowrishankar *et al.*, 2014)

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันมีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการ

ตกตะกอนของโลหะอะลูมิเนียมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอบชุบมามากแล้ว แต่ในการใช้หลักสถิติในการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนั้นอยู่ในวงจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้ใช้การทดลองแบบ 3³ แฟคทอเรียล คือ พิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิอบละลาย (Solution Temperature), เวลาเอนจิง (Aging Time) และอุณหภูมิเอนจิง (Aging Temperature) และทำการทดลองที่ 3 ระดับของแต่ละปัจจัย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงและการตกตะกอน Mg₂Si ของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การวางแผนการทดลอง

การออกแบบการทดลองใช้แผนการทดลองแบบ 3³ แฟคทอเรียลอย่างเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiments) ลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized Design) โดยกำหนดปัจจัยที่ใช้ 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิอบละลาย เวลาเอนจิงและอุณหภูมิเอนจิง โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังนี้ อุณหภูมิอบละลาย (°C) : 520, 540 และ 560 ; เวลาเอนจิง (ชั่วโมง) : 2, 8 และ 14 และอุณหภูมิเอนจิง (°C) : 175, 200 และ 225 ดังแสดงในตารางที่ 1 จากการกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยสามารถออกแบบเงื่อนไขการทดลองได้ทั้งหมด 27 เงื่อนไข และกำหนดให้มีการทดลองซ้ำแต่ละเงื่อนไขดังนั้นมีมีการทดลองทั้งหมด 54 ครั้ง

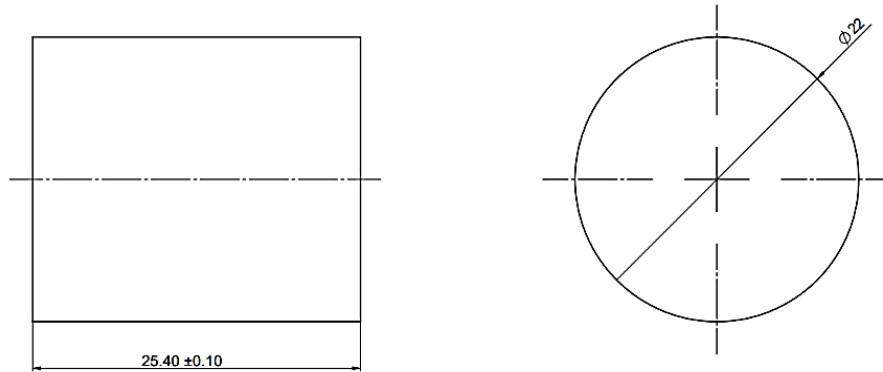
ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับปัจจัย

ปัจจัย	ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง
อุณหภูมิอบละลาย, A : (°C)	520	540	560
เวลาเอจิง, B : (ชั่วโมง)	2	8	14
อุณหภูมิเอจิง, C : (°C)	175	200	225

2. การเตรียมชิ้นงานทดลอง

การทดลองครั้งนี้ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตรยาว 25.4 ± 0.10 มิลลิเมตร จำนวน 54 ชิ้น

ดังแสดงในภาพที่ 1 และแสดงส่วนผสมทางเคมีตรวจสอบด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น ARL 4460 ดังตารางที่ 2



ภาพที่ 1 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061

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

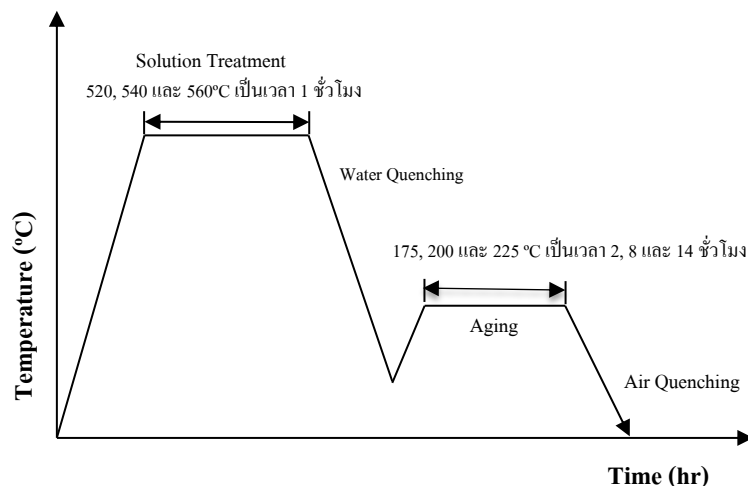
3. การทดลอง

ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการทดลองโดยมีขั้นตอนอยู่ 3 ขั้นตอน คือ การอบละลาย (Solution Treatment) การชุบในน้ำ (Quenching) และการทำเอจิง (Aging) โดยอุณหภูมิของการอบละลาย เวลา และอุณหภูมิเอจิงในการอบชุบแต่ละครั้งนั้นกำหนดโดยเงื่อนไขของแต่ละลำดับการทดลอง ในส่วนของการอบละลายนั้นใช้เวลาเท่ากันทุกเงื่อนไข คือ 2 ชั่วโมง หลังจากชิ้นงานผ่านการอบชุบตาม

เงื่อนไขที่กำหนดแล้วนำชิ้นงานมาวัดความแข็งแบบบริเนลตามมาตรฐาน ASTM E10 โดยใช้เครื่องยี่ห้อ Wilson รุ่น MJ ขนาดหัวกด 10 มิลลิเมตร โหลด 500 kgf กดแช่เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมาขัดเตรียมผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ และขัดด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับให้ผิวชิ้นงานเรียบและเงาเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกล้องจุลทรรศน์แบบ
อิเล็กตรอนยี่ห้อ HITACHI รุ่น S-3000N และ
ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Energy

Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) แบบ Point
Analysis (Donik, 2018)



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการทดลอง

4. วิธีการวิเคราะห์ผล

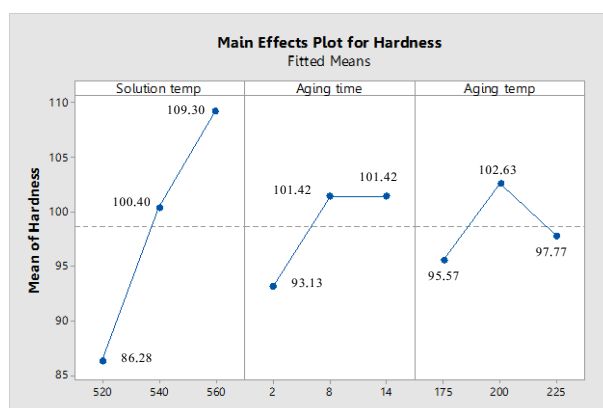
จากการทดลองตามแผนการทดลองที่
ออกแบบไว้แบบ 3^3 แฟคทอเรียล อย่างเต็มรูปแบบ
โดยมีการทดลองซ้ำจะได้ค่าความแข็งทั้งหมด 54
ข้อมูล นำค่าความแข็งที่ได้มาวิเคราะห์ความ
แปรปรวน (Analysis of Variances) ที่ระดับความ
เชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เพื่อพิจารณาปัจจัยหลักและ
ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญและ
ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์
แบบใช้แสง กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนและ
ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Energy
Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) แบบ Point
Analysis

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการทดลองนำผลของค่าความแข็งที่
ได้มาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ
และแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดัง
ตารางที่ 3 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตาราง
ที่ 3 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยมีอิทธิพล
ส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นยังมี
อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง
อีกด้วย คือ อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลาย
กับเวลาเอจิง (AB), อุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิ
เอจิง (AC) และเวลาเอจิงกับอุณหภูมิเอจิง (BC)
เมื่อนำข้อมูลมาพล็อตระหว่างค่าความแข็งเทียบกับ
ระดับของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมแสดงในภาพที่ 3,
4, 5 และ 6

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3³

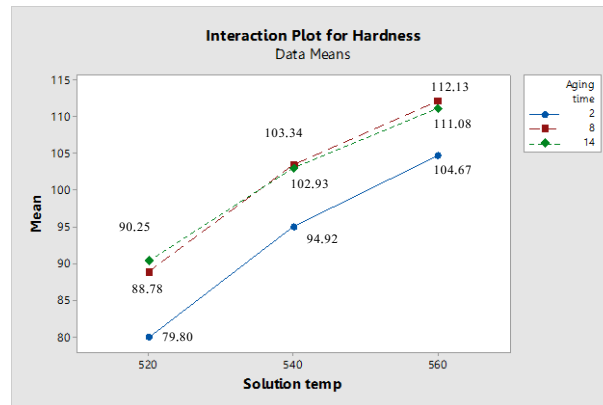
Source	DF	Sum of Squares	Mean of Squares	F ₀	P-Value
A	2	4848.72	2424.36	1961.30	0.000
B	2	824.80	412.40	333.63	0.000
C	2	470.45	235.22	190.29	0.000
AB	4	25.79	6.45	5.22	0.003
AC	4	54.35	13.59	10.99	0.000
BC	4	983.83	245.96	198.98	0.000
ABC	8	7.09	0.89	0.72	0.675
error	27	33.37	1.24		
total	54	7248.41			



ภาพที่ 3 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยกับระดับของปัจจัยหลักแต่ละปัจจัย

ภาพที่ 3 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักแต่ละปัจจัยพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบละลายส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิอบละลาย (Pajaroen *et al.*, 2013) โดยให้ค่าความแข็งเท่ากับ 86.28, 100.40 และ 109.30 BHN ที่อุณหภูมิ 520 °C, 540 °C และ 560 °C ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเวลาอบจึงพบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในช่วงการเปลี่ยนแปลงเวลาจาก 2 ชั่วโมง เป็น 8 ชั่วโมง

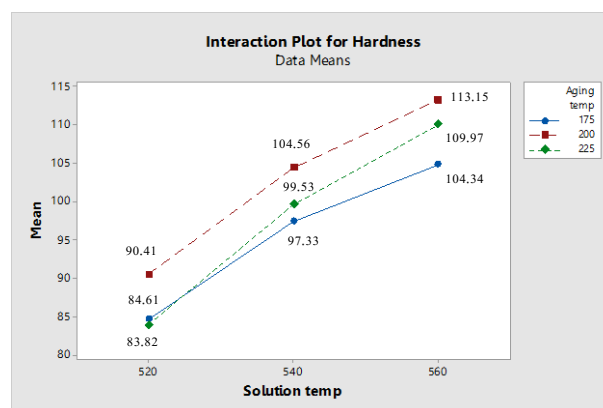
หลังจากนั้นค่าความแข็งไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาอบจึงเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิอบจึงจากกราฟพบว่าเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิอบจึงจาก 175 °C เป็น 200 °C ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอบละลายและเวลาอบจึงแต่พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิอบจึงสูงขึ้น (Luengaksorn *et al.*, 2012)



ภาพที่ 4 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายและเวลาเอจิง

ภาพที่ 4 แสดงอิทธิพลระหว่างอุณหภูมิอบละลายและเวลาเอจิง พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิอบละลายสูงขึ้นและ เอจิงนานขึ้นตามระดับของปัจจัย ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นดังภาพ เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบละลายสูงจะทำให้การสลายตัวของเฟส Mg_2Si เข้าไปในเนื้อพื้นได้มากขึ้นเพราะการสลายตัวเป็นไปในลักษณะการแพร่และเมื่อชิ้นงานถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โครงสร้างของอะลูมิเนียมจะมีแมกนีเซียมและซิลิคอนละลายในโครงสร้างเกินสมดุลเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า Supersaturated Solid

Solution และยังมีลักษณะเป็นกลุ่มของอนุภาค (Clusters) ของแมกนีเซียมและซิลิคอนและเมื่อเวลาในการ ทำเอจิงนานขึ้นกลุ่มของอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงเป็น GP-Zones พร้อมทั้งจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟส $\beta''(Mg_2Si)$ ที่มีลักษณะเป็น Needle-Shaped ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น (Kolobnev *et al.*, 2011; Buchanan *et al.*, 2017) จากกราฟพบว่าค่าความแข็งที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอบละลายและเวลาที่ใช้ในการทำเอจิง



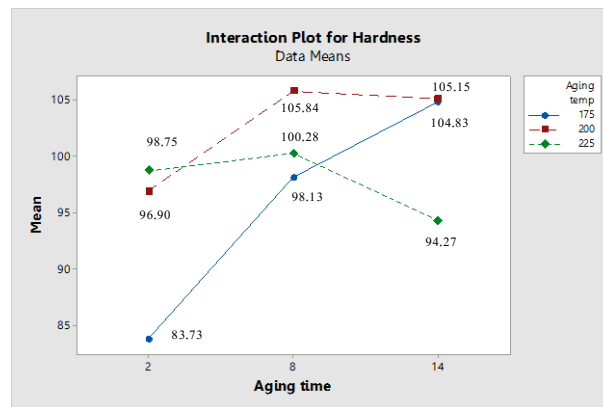
ภาพที่ 5 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิเอจิง

ภาพที่ 5 ซึ่งให้เห็นอิทธิพลระหว่างอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิเอจิง จากภาพพบว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 175 °C, 200 °C และ 225 °C หลังขึ้นงานผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 560 °C ให้ค่า

ความแข็งสูงกว่าการอบละลายที่อุณหภูมิต่ำ โดยให้ค่าความแข็งเท่ากับ 104.56, 113.15 และ 109.97 BHN ตามลำดับ จากค่าความแข็งจะเห็นว่าค่าความแข็งที่อุณหภูมิเอจิง 200 °C นั้นสูงกว่าการเอจิงที่

อุณหภูมิ 225 °C ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเอจิงที่อุณหภูมิสูงจะทำให้นิวเคลียสเกิดขึ้นได้น้อยและขยายตัวได้เร็วกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิต่ำ จากภาพสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิเอจิงได้ว่าเนื่องจากการอบละลายที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้แมกนีเซียมและซิลิคอนเข้าไปในเนื้อพื้นได้มากขึ้นและได้โลหะผสมที่มีความอึดตัวอย่างยิ่งยวดหลังจุ่มขึ้นงานในน้ำ

(Quenching) และเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนอีกครั้งในขั้นตอนการทำเอจิง (Artificial Aging) จะทำให้กลุ่มอนุภาคของแมกนีเซียมและซิลิคอนเกิดเป็น GP-Zones และเปลี่ยนเป็น $\beta''(\text{Mg}_2\text{Si})$ และ $\beta'(\text{Mg}_2\text{Si})$ ซึ่งตะกอน $\beta''(\text{Mg}_2\text{Si})$ และ $\beta'(\text{Mg}_2\text{Si})$ มีแรงยึดเหนี่ยวกับโครงสร้างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นไปในลักษณะของการแพร่ (Pogatscher *et al.*, 2011)



ภาพที่ 6 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิเอจิง

จากภาพที่ 6 ค่าความแข็งหลังการเอจิงที่อุณหภูมิและเวลาแตกต่างกัน พบว่าการเอจิงโดยใช้เวลา 2 ชั่วโมง ที่ใช้อุณหภูมิสูงจะให้ค่าความแข็งสูงกว่า โดยให้ค่าความแข็งเท่ากับ 83.73, 96.90 และ 98.75 BHN ที่อุณหภูมิ 175 °C, 200 °C และ 225 °C ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มเวลาถึง 14 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิเอจิง 225 °C ให้ค่าความแข็งลดลงจากผลที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่พบว่าการเอจิงที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิต่ำในระยะเวลาสั้นแต่เมื่อเวลานานขึ้นพบว่าการใช้อุณหภูมิเอจิงต่ำจะให้ค่าความแข็งสูงสุดสูงกว่าการเอจิงด้วยอุณหภูมิสูง (Gowrishankar *et al.*, 2014) เพราะการเกิดตะกอนของ Mg_2Si ที่ทำให้โลหะเกิดความแข็งจะเกิดในลักษณะการแพร่ (Pogatscher *et al.*, 2011) ดังนั้นถ้าการทำเอจิง

เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงปริมาณของนิวเคลียสจะเกิดได้น้อยแต่ด้วยอุณหภูมิที่สูงจึงส่งผลให้นิวเคลียสหรือตะกอนที่เกิดเปลี่ยนเป็นเฟส $\beta''(\text{Mg}_2\text{Si})$ และ $\beta'(\text{Mg}_2\text{Si})$ ได้เร็วซึ่งเฟสนี้เองจะมีแรงเชื่อมประสานกับโครงสร้างพื้นฐานส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้น (Tan and Said, 2009)

ดังนั้นการเอจิงที่อุณหภูมิต่ำถึงแม้ว่าค่าความแข็งจะต่ำในช่วงแรกเพราะการแพร่จะดำเนินไปอย่างช้าๆ และเกิดเป็นนิวเคลียสหรือตะกอนเป็นจำนวนมากเมื่อเวลาในการทำเอจิงนานจะส่งผลให้เปลี่ยนไปเป็นเฟสที่มีแรงเชื่อมประสานกับโครงสร้างเนื้อพื้นส่งผลให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเอจิงด้วยอุณหภูมิสูงแต่ทั้งการเอจิงด้วยอุณหภูมิสูงและต่ำเมื่อเวลาผ่านไปจะพบค่าความแข็งที่ได้จะลดลง จากภาพเห็นว่าการเอจิงที่ 225 °C จะให้ค่า

ความแข็งเท่ากับ 100.28 BHN ที่เวลาเอจิงนาน 8 ชั่วโมง และค่าความแข็งลดลงเท่ากับ 94.27 BHN หลังเอจิงนาน 14 ชั่วโมง เนื่องจากเฟส β'' (Mg_2Si) และ β' (Mg_2Si) เปลี่ยนเป็นสมดุลเฟสทำให้แรงเชื่อมประสานระหว่างตะกอนกับโครงสร้างเนื้อพื้น

อะลูมิเนียมหมดไปหรือเกิดปรากฏการณ์ Over Aging

ผลจากการทดลองเมื่อนำไปสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าความแข็งโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยได้สมการดังนี้

$$\text{Hardness} = -2293 + 7.099A + 15.605B + 2.582C - 0.006534A^2 - 0.11515B^2 - 0.009542C^2 - 0.00842AB + 0.003000AC - 0.04263BC$$

เมื่อ A คือ อุณหภูมิอบละลาย

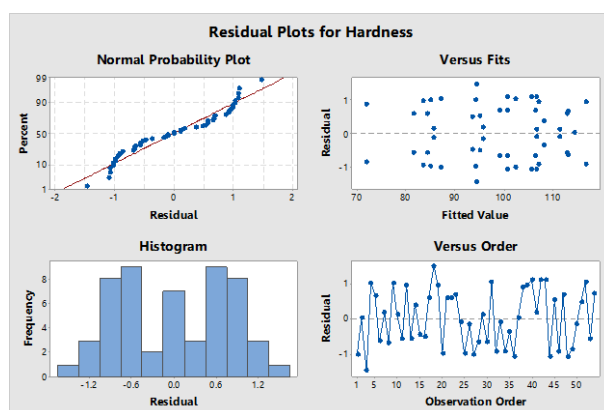
B คือ เวลาเอจิง

C คือ อุณหภูมิเอจิง

โดยโมเดลนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 99.54 % แสดงว่าโมเดลสามารถแทนค่าหรือครอบคลุมข้อมูลจากการทดลองได้ถึง 99.54% สามารถประมาณค่าความแข็งที่มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ± 2.28 BHN ที่ความเชื่อมั่น 95%

ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องข้อมูลทำได้โดยการตรวจสอบค่าความผิดพลาดซึ่งต้องมีการแจกแจงแบบปกติมีความอิสระต่อกันและมีความแปรปรวนคงที่ จากการตรวจสอบพบว่าค่าความผิดพลาดมีความแปรปรวนคงที่มีการแจกแจงแบบปกติและความอิสระของข้อมูล ดังภาพที่ 7



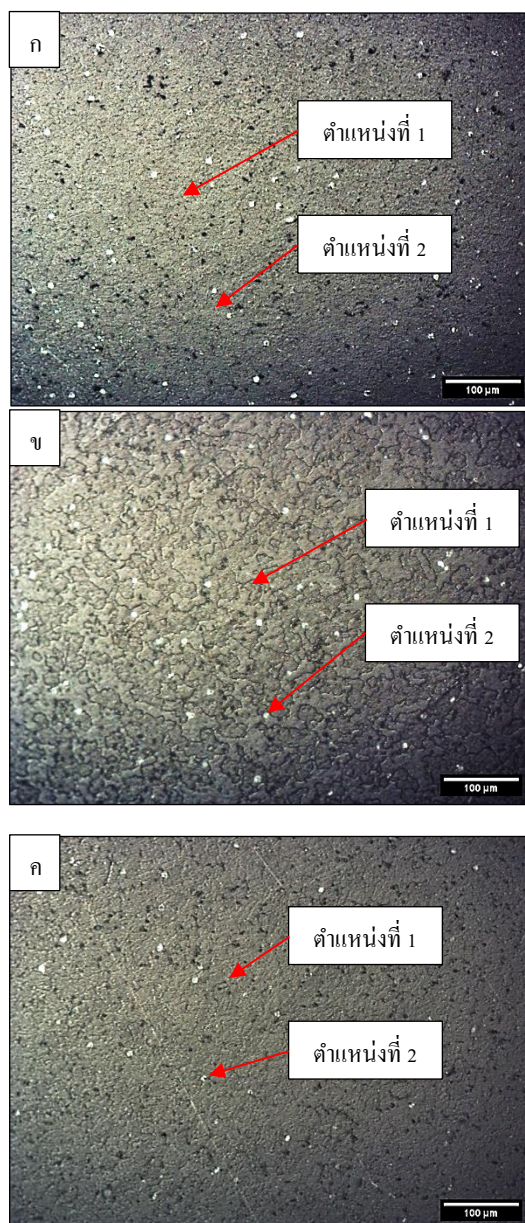
ภาพที่ 7 กราฟพล็อตระหว่างค่าส่วนเหลือคงค้าง

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเทคนิค Energy Dispersive X-ray

Spectroscopy (EDS) ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภาพที่ 8 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 20X ของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 520 °C, 540 °C และ

560 °C และเลือกเงื่อนไขเองจึงที่อุณหภูมิ 175 °C *et al.*, 1991)
เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มาแสดงโครงสร้างจุลภาค (Davis



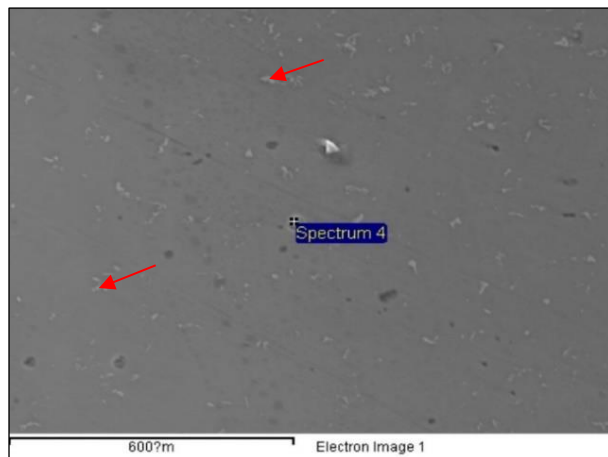
ภาพที่ 8 โครงสร้างจุลภาค (ก) อบละลายที่ 520 °C และเองจึงที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
(ข) อบละลายที่ 540 °C และเองจึงที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
(ค) อบละลายที่ 560 °C และเองจึงที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากภาพโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ
อย่างชัดเจน คือบริเวณเนื้อพื้นอะลูมิเนียม (α Phase)
(ตำแหน่งที่ 1) และบริเวณสีขาว (ตำแหน่งที่ 2) และ
เมื่อพิจารณาบริเวณสีขาวในตำแหน่งที่ 2 ที่กระจาย

ตัวบนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมเพื่อตรวจสอบโครงสร้าง
ดังกล่าวและจากภาพพบว่าภาพ (ก) (ข) และ (ค) มี
โครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 บริเวณอย่างชัดเจนทั้ง 3
ภาพ ในบทความนี้นำเสนอผลของการนำชิ้นงานที่

ผ่านการอบละลาย 540 °C มาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

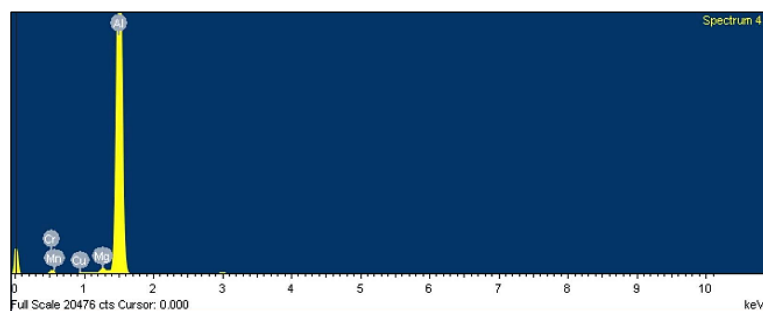
(EDS) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเพิ่มเติม โดยมีผลดังภาพที่ 9, 10 และตารางที่ 4



ภาพที่ 9 จุดตรวจสอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) แบบ Point Analysis

ภาพที่ 9 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างเนื้อพื้น (α Phase) และมีการกระจายตัวของเฟสสีขาวกระจายตัว อยู่ในเนื้อพื้นดังลูกศรชี้ตรวจสอบเฟส

ดังกล่าวด้วยการทำ Point Analysis ที่จุดสเปกตรัมที่ 4 ได้ผลการตรวจสอบดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 สเปกตรัม EDS จากการวิเคราะห์จุดตรวจสอบแบบ Point Analysis

ภาพที่ 10 สเปกตรัม EDS แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณเอกซ์เรย์ที่ตรวจจับได้ (X-ray Counts) กับพลังงาน (Energy)

จากพีคที่เกิดขึ้นในสเปกตรัมแสดงให้เห็นองค์ประกอบของธาตุบริเวณจุดตรวจสอบบนชิ้นงานทดสอบและได้ผลของปริมาณธาตุดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS

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

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบ Point Analysis พบว่าจุดดังกล่าวมีปริมาณของธาตุอะลูมิเนียมเท่ากับ 97.03% แมกนีเซียม 0.62% ซิลิกอน 0.22% และมีธาตุอื่นเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 4 จากปริมาณของธาตุที่ตรวจสอบสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการใช้วิธีตรวจสอบแบบ Point Analysis ในการตรวจสอบอาจทำให้จุดที่ต้องการตรวจสอบไม่ถูกตรวจสอบทั้งหมดและบริเวณเนื้อพื้นถูกตรวจสอบเนื่องจากจุดตรวจสอบมีขนาดเล็กและตรวจสอบเพียงจุดเดียว

สรุป

การทดลองครั้งนี้ได้ใช้ประโยชน์ของการออกแบบแฟคทอเรียลที่สามารถศึกษาผลของปัจจัยหลักและยังสามารถศึกษาผลของปัจจัยร่วม โดยใช้การออกแบบแบบ 3^3 แฟคทอเรียล จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัย คือ อุณหภูมิ ระยะเวลา และอุณหภูมิ เองจึงส่งผลต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกหรือตกตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าการใช้อุณหภูมิ ระยะเวลาสูง การใช้เวลาในการทำเองจึงเป็นเวลานานส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น มีเพียงอุณหภูมิ เองจึงที่พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและค่าความแข็งลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิเองจึงสูงเกินไป

นอกจากนั้นยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยคือ อุณหภูมิ ระยะเวลา กับเวลาเองจึง อุณหภูมิ ระยะเวลา กับอุณหภูมิเองจึง และเวลาเองจึง กับอุณหภูมิเองจึง โดยการใช้อุณหภูมิ ระยะเวลาสูง ร่วมกับการเองจึงเป็นเวลานาน และ การใช้อุณหภูมิ ระยะเวลาสูง ร่วมกับการใช้อุณหภูมิเองจึงสูง ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น มีเพียงอิทธิพลร่วมระหว่าง อุณหภูมิเองจึงและเวลาเองจึงที่ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิเองจึงสูงเกินไปและใช้เวลานาน

ความแข็งที่สูงขึ้นเกิดจากการตกตะกอนของเฟส Mg_2Si ในลักษณะเฟสที่ไม่สมดุลคือ $\beta''(Mg_2Si)$ และ $\beta'(Mg_2Si)$ บนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมหลังจากผ่านกระบวนการอบชุบด้วยวิธีการตกตะกอนส่งผลให้ความแข็งสูงขึ้น และสามารถสร้างโมเดลประมาณค่าความแข็งที่สามารถประมาณค่าความแข็งที่มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ± 2.28 BHN ที่ความเชื่อมั่น 95%

เอกสารอ้างอิง

- 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.
- 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: Heat treating**. ASM International, United States of America.
- Donik, C. 2018. Influence of artificial aging on the electrochemical properties of the aluminium AA 6063 Alloy. **Materials and Technology** 52: 71-75.
- Gowri Shankar, 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, 27-29 September 2014.** Kathmandu, Nepal.
- 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.
- Luengakorn, N., Pleamjit, N. and Meemongkol, N. 2012. Study the mechanical properties of aluminum alloy 6061 with semi-solid process and heat treatments T6, pp. 1337-1343. *In IE Network Conference 2012.* Sripatum University, Bangkok. (in Thai)
- Masoud, I.M., Abu, M.T. and Al-Jarrah, J.A. 2012. Effect of heat treatment on the microstructure and hardening properties of 6061aluminum alloy. **Journal of Applied Sciences Research** 8(10): 5106-5113.
- 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** 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. **Jaetsd 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.
- 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): 1870-1877.