



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

อิทธิพลตัวแปรการชุบเยือกแข็งที่มีผลต่อสมบัติแผ่นรีดทองแดง

EFFECT OF CRYOGENIC TREATMENT PARAMETERS ON COPPER ROLLED PLATE
PROPERTIES

ชเนรินทร์ รักสัตย์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ประจำปี พ.ศ. 2566

ผู้วิจัย : นายชเนรินทร์ รักษ์ตย์
 ชื่องานวิจัย : อิทธิพลตัวแปรการชุบเยือกแข็งที่มีผลต่อสมบัติแผ่นรีดทองแดง
 หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
 ประจำปี : 2566

บทคัดย่อ

การปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยการชุบเยือกแข็งเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของโลหะที่มีประสิทธิภาพสามารถทำให้สมบัติทางกลและสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะถูกปรับปรุงและมีค่าสูงในการปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะด้วยการชุบเยือกแข็ง การปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อนสูงพบได้ทั่วไปในหลายงานวิจัย กระบวนการให้ความร้อนและลดความร้อนแก่เหล็กเพื่อเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงสมบัติของเหล็กนั้นให้เหมาะสมกับสภาพที่จะนำไปใช้งาน ดังนั้น งานวิจัยเรื่องอิทธิพลตัวแปรการชุบเยือกแข็งที่มีผลต่อสมบัติแผ่นรีดทองแดง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา 1) อิทธิพลตัวแปรการอบอ่อนที่มีผลต่อสมบัติทองแดงบริสุทธิ์ 2) อิทธิพลตัวแปรการชุบเยือกแข็งที่มีผลต่อสมบัติทองแดงบริสุทธิ์ และ 3) ความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของทองแดงที่ผ่านการชุบเยือกแข็ง

วิธีดำเนินการโดยการตัดชิ้นงานทองแดงให้มีขนาด กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350, 450, 550 และ 650 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 นาที ทดสอบสมบัติวิเคราะห์ผลชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อน แล้วนำไปชุบเยือกแข็ง ทั้ง 2 วิธี คือ การชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งและการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว ทดสอบสมบัติ วิเคราะห์ผล และสรุปผลการทดสอบ

ผลการทดลองโดยสรุปพบว่า 1) อุณหภูมิและเวลาการอบอ่อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งของทองแดงบริสุทธิ์ลดลง แต่ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้า การยึดตัวและขนาดของเกรนเพิ่มขึ้น 2) การชุบเยือกแข็งชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนสามารถทำให้ ความแข็งแรงดึง ความแข็งเพิ่มขึ้น และความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงลดลง และ 3) นอกจากนั้นการชุบเยือกแข็งทำให้การยึดตัว และขนาดเกรนของทองแดงบริสุทธิ์ลดลง ด้วยเหตุนี้หากต้องการเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงดึงและลดความต้านทานไฟฟ้าของโลหะทองแดงบริสุทธิ์สามารถทำได้ด้วยการชุบเยือกแข็งไนโตรเจนเหลว การชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งทำให้ความแข็งแรงดึง ความแข็งเพิ่มขึ้น การยึดตัว ขนาดเกรนของทองแดงบริสุทธิ์และความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงบริสุทธิ์ลดลง ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที นำมาชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งเป็นชิ้นงานที่ดีกว่าชิ้นงานอื่น

คำสำคัญ การอบอ่อน การชุบเยือกแข็ง ทองแดง C1100

Name : Mr. Chanerin Ruksat, M.Eng.
Research Title : Effect of Cryogenic Treatment Parameters on Copper Rolled Plate Properties
Organization : Department of Industrial Engineering Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Year : 2023

Abstract

Improving the properties of metals by cryogenic is an effective method of improving the properties of metals. The mechanical properties and electrical properties of metals can be improved. There is a high value in improving the mechanical properties of metals by cryogenic. Improving the properties of metals with high heat is common in many research. The process of heating and reduce heating steel to change and improve the properties of steel is to be suitable for use. Therefore, research on the influence of cryogenic plating variables on the properties of pure copper rolled sheets. Purpose to : 1) study the influence of annealing variables on the properties of pure copper, 2) study the influence of cryogenic plating parameters on the properties of pure copper. and 3) study the relationship between the microstructure and properties of cryogenic copper.

Method of operation was by cutting copper pieces to a size width of 10 millimeter, a length of 100 millimeter, and a thickness of 1 millimeter. The workpiece was annealed at 350, 450, 550, and 650 degrees Celsius for 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, and 60 minutes. Testing the analytical properties of the annealing workpieces then cryogenic 2 methods are cryogenic using with cryogenic – drying furnace and immersed in liquid nitrogen. Testing properties, analyzing results and test results were summarized.

The results of the experiment were 1) found that increased annealing temperature and time result in a decrease in the tensile strength and hardness of copper but leads to the increase in conduct electricity elongation and grain size. 2) Cryogenic hardening of annealing copper workpieces makes tensile strength and hardness increased while the electrical resistance of copper decreases. and

3) in addition, cryogenic treatment reduces the elongation and grain size of copper. If it is need to increase tensile strength properties and reduce the electrical resistance of copper metal, it can be done by cryogenic in liquid nitrogen. Cryogenic with a cryogenic – drying furnace makes tensile strength and hardness increased but elongation, grain size and electrical resistance of copper decuated. For workpiece annealed at 350 °C for 60 minutes It cryogenic is in a cryogenic – drying furnace to create a workpiece that is better than any other pieces.

Keywords: annealing, cryogenic, copper C1100



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ อาจารย์สมควร แหวดี สำหรับคำแนะนำในการดำเนินการทำวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้การสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการดำเนินการจนทำให้งานวิจัยสามารถดำเนินการ และบรรลุผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ชเนรินทร์ รักสัตย์

ผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 สมมติฐานของงานวิจัย	3
1.6 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย	3
1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	25
3.2 วัสดุทดลอง	26
3.3 กระบวนการผลิตขึ้นทดสอบ	26
3.4 การทดสอบสมบัติขึ้นทดสอบ	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	
4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิอบอ่อนต่อสมบัติของทองแดง C1100	40
4.2 อิทธิพลของเวลาอบแช่ในการอบอ่อนต่อสมบัติของทองแดง C1100	47
4.3 อิทธิพลของการชุบเยือกแข็งต่อสมบัติของทองแดง C1100 ในเตาชุบเยือกแข็ง	57
4.4 อิทธิพลของการชุบเยือกแข็งต่อสมบัติของทองแดง C1100 ด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปลงการทดลอง	
5.1 สรุปลงการทดลอง	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
บรรณานุกรม	65
ภาคผนวก ก	
ตารางผลการทดสอบสมบัติ	67
ประวัติผู้วิจัย	112



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของทองแดงบริสุทธิ์เกรด C1100	26
3.2	จำนวนชิ้นทดสอบที่ตัวแปรการอบอ่อนในการทดลอง	27
3.3	จำนวนชิ้นทดสอบที่ตัวแปรการชุบเยือกแข็งทองแดงบริสุทธิ์ C1100	29



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	กรอบแนวความคิดสมมติฐานของงานวิจัย	4
2.1	แผนภาพอุณหภูมิ เวลา และขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติ	10
2.2	แผนภาพอุณหภูมิ เวลา และขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนและความเย็นเยือกแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D3	11
2.3	เครื่องปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็ง	13
2.4	เครื่องทดสอบแรงดึง	15
2.5	โครงสร้างจุลภาค	17
2.6	การทดสอบแบบปริเนลล์	17
2.7	ตำแหน่งที่เกิดจากการยุบตัวอย่างถาวรของชิ้นงานทดสอบ	19
2.8	การวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม 136 องศา	21
3.1	ขั้นตอนการดำเนินการ “การศึกษาอิทธิพลการอบชุบด้วยความร้อนและความเย็นที่มีผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ C1100”	25
3.2	ชิ้นงานทดสอบ	26
3.3	เตาอบอ่อนชิ้นงานทองแดงยี่ห้อ Nerberthem รุ่น N 60A	28
3.4	แผนภาพอุณหภูมิ-เวลา-ขั้นตอนสำหรับการอบอ่อนทองแดงบริสุทธิ์ C1100	28
3.5	เตาชุบเยือกแข็งยี่ห้อ AVEIS รุ่น AV-CM100	29
3.6	ถังไนโตรเจน ขนาด 25 ลิตร	30
3.7	แผนภาพอุณหภูมิ-เวลา-ขั้นตอนสำหรับการชุบเยือกแข็งทองแดงบริสุทธิ์ C1100	30
3.8	เครื่องทดสอบความต้านทานไฟฟ้า ยี่ห้อ Megger รุ่น DLRO10	31
3.9	วงจรวัดความต้านทานไฟฟ้า	31
3.10	ตัวอย่างชิ้นงานมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงดึง	32
3.11	เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง	32
3.12	ตำแหน่งการตัดชิ้นทดสอบโครงสร้างมหภาค	33
3.13	เครื่องตัดชิ้นส่วนโครงสร้างจุลภาคด้วยใบเสียดสีความเร็วสูง	33
3.14	แผนภาพการขึ้นรูปตัวเรือนแบบเย็น	34
3.15	การขัดหยาบด้วยกระดาษทราย	35

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.16	ทิศทางการขุดมันขึ้นทดสอบ	36
3.17	กล้องจุลทรรศน์แบบแสงกำลังขยายระหว่าง 50 - 1000 เท่า	37
3.18	เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ส์	37
3.19	ตำแหน่งการกดทดสอบชิ้นงาน	38
3.20	ตัวอย่างการลากเส้นตัดโครงสร้างเพื่อวัดขนาดเกรน	38
4.1	ความแข็งแรงดึงสูงสุดของทองแดงที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลาอบแห้ง 5 นาที	40
4.2	ความแข็งแรงครากของทองแดงที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 นาที	41
4.3	การยึดตัวสูงสุดของทองแดงที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 นาที	41
4.4	การยึดตัวที่จุดครากของทองแดงที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350-650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 นาที	43
4.5	ความแข็งทองแดงที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 นาที	44
4.6	โครงสร้างจุลภาคทองแดงระนาบตั้งฉากแนวรีดอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350-650 องศาเซลเซียส	45
4.7	โครงสร้างจุลภาคทองแดงระนาบตามแนวรีดอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350-650 องศาเซลเซียส	45
4.8	ขนาดเกรนของทองแดงที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 นาที	46
4.9	ความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 นาที	46
4.10	ความแข็งแรงดึงสูงสุดของทองแดงที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที	48
4.11	ความแข็งแรงครากของทองแดงที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที	48
4.12	การยึดตัวครากของทองแดงที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.13	การยึดตัวครากของทองแดงที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที	49
4.14	ความแข็งทองแดงที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที	50
4.15	โครงสร้างจุลภาคของทองแดงตามแนวรีดที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที	51
4.16	โครงสร้างจุลภาคของทองแดงขวางแนวรีดที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที	52
4.17	ขนาดเกรนของทองแดงที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที	53
4.18	ความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที	53
4.19	ความแข็งแรงดึงที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที	55
4.20	การยึดตัวที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที	55
4.21	โครงสร้างจุลภาคของทองแดงที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที	56
4.22	ความแข็งที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที	57
4.23	ความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที	58
4.24	ความแข็งแรงดึงที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที	59
4.25	การยึดตัวดึงที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที	59
4.26	โครงสร้างจุลภาคของทองแดงที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที	60
4.27	ความแข็งที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที	61
4.28	ความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยการชุบเยือกแข็งเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของโลหะที่มีประสิทธิภาพสามารถทำให้สมบัติทางกลและสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะถูกปรับปรุงและมีค่าสูงในการปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะด้วยการชุบเยือกแข็ง ในวงการเครื่องเสียง การปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยการชุบเยือกแข็งส่งผลทำให้การยืดอายุการใช้งานของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลดความเค้นตกค้างระหว่างชั้นบางของแผ่นฟิล์มแม่เหล็ก ลดการร้าวของกระแส นอกจากนี้ช่องว่างในการนำไฟฟ้าของวัสดุลดลงและทำให้การรบกวนสัญญาณลดลง ส่งผลทำให้เกิดการส่งสัญญาณเสียงมีความเสถียรและทำให้คุณภาพของเสียงที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น

การปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อนสูงพบได้ทั่วไปในหลายงานวิจัย กระบวนการให้ความร้อนและลดความร้อนแก่เหล็กเพื่อเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กนั้นให้เหมาะสมกับสภาพที่จะนำไปใช้งาน การอบชุบเหล็กด้วยความร้อนจึงเป็นกรรมวิธีที่มีความสำคัญกรรมวิธีหนึ่ง และใช้กันอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมโลหะ และเนื่องจากเหล็กกล้าเป็นโลหะที่ใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมโลหะ ซึ่งใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักร เครื่องยนต์ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ การอบชุบด้วยความร้อนแบบเดิมยังคงมีอยู่ [1] ในกระบวนการชุบแข็งแบบธรรมดาเหล็กจะถูกให้ความร้อนและแช่เป็นระยะเวลาหนึ่ง และเย็นตัวลงในน้ำมันที่อุณหภูมิห้องในทันที การเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิที่แข็งตัวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่การปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็งเป็นกระบวนการชุบแข็งด้วยอุณหภูมิตดลบ และนำมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง

ในปัจจุบันการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยการชุบเยือกแข็งด้วยประโยชน์ในการเพิ่มสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าให้ทองแดงบริสุทธิ์เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อทำให้ทองแดงบริสุทธิ์นำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น การศึกษาและพัฒนาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของทองแดงบริสุทธิ์ เพื่อหาวิธีการในการปรับปรุงสมบัติของทองแดงบริสุทธิ์ด้วยการชุบเยือกแข็ง ประกอบกับผู้วิจัยมีภาระงานเกี่ยวกับสนับสนุนการเรียนการสอนในรายวิชา (04411319) โลหะวิทยา หน่วยเรียนที่ 8 การอบชุบโลหะและรายวิชา (04411207) การทดสอบวัสดุ หน่วยเรียนที่ 8 การทดสอบแรงดึง และหน่วยเรียนที่ 9 การทดสอบความแข็ง จึงมีแนวคิดในการทำวิจัยอิทธิพลตัวแปรการชุบเยือกแข็งที่มีผลต่อสมบัติแผ่นรีดทองแดง ซึ่งผลของงานวิจัยที่ได้เป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนในวิชาโลหะวิทยาในงานวิศวกรรมและวิชาการทดสอบวัสดุในด้านการเรียนรู้เรื่องการปรับปรุงสมบัติของโลหะให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นโดยการอบชุบด้วยความร้อนความเย็นการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบชุบและการทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงดึงและความแข็งต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรการอบอุ่นที่มีผลต่อสมบัติทองแดงบริสุทธิ์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรการชุบเยือกแข็งที่มีผลต่อสมบัติทองแดงบริสุทธิ์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของทองแดงที่ผ่านการชุบเยือกแข็ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 อุณหภูมิในการอบอุ่น คือ 350 450 550 และ 650 องศาเซลเซียส
- 1.3.2 เวลาที่ใช้ในการอบอุ่น คือ 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที
- 1.3.3 อุณหภูมิภายในห้องชุบเย็นมีความคลาดเคลื่อน + และ - ไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส
- 1.3.4 สารให้ความเย็นแก่ห้องชุบเย็น คือ ไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีอุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส
- 1.3.5 การทำงานต่อเนื่องของเครื่องหรือระยะเวลาเดินเครื่องสูงสุด 10 วัน หรือ 240 ชั่วโมง
- 1.3.6 ทดลองวัสดุโลหะ ชนิด ทองแดงบริสุทธิ์ C1100
- 1.3.7 การทดสอบสมบัติ ประกอบด้วย การทดสอบความแข็งแรงดึง การทดสอบความแข็งแรงการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และการทดสอบความต้านทานไฟฟ้า

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบอิทธิพลตัวแปรการอบอุ่นที่มีผลต่อสมบัติทองแดงบริสุทธิ์
- 1.4.2 ทำให้ทราบอิทธิพลตัวแปรการชุบเยือกแข็งที่มีผลต่อสมบัติทองแดงบริสุทธิ์
- 1.4.3 ทำให้ทราบว่าความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการชุบเยือกแข็ง
- 1.4.4 เพิ่มคุณสมบัติของทองแดงบริสุทธิ์ โดยคาดว่าผลการทดลองจะทำให้สมบัติทางกลและสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะดีขึ้น
- 1.4.5 เป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนในรายวิชา (04411319) โลหะวิทยาในงานวิศวกรรม หน่วยเรียนที่ 8 การอบชุบโลหะและวิชา (04411207) การทดสอบวัสดุ หน่วยเรียนที่ 8 การทดสอบแรงดึง และหน่วยเรียนที่ 9 การทดสอบความแข็งแรง ในด้านการเรียนรู้การปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะ และการศึกษาการทดสอบคุณสมบัติทางกล โครงสร้างผลึก และอุณหภูมิที่มีผลทำให้ทองแดงบริสุทธิ์มีสมบัติทางกลและสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น

1.5 สมมติฐานของงานวิจัย

ผู้วิจัยมีความต้องการความสามารถในการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของทองแดง การทดลองนี้จึงตั้งสมมติฐาน คือ “การนำทองแดงไปอบให้มีขนาดเกรนที่มีความโตมักทำให้ทองแดงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกรนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นมีปริมาณขอบเกรนที่น้อย จึงมีส่วนของเกรนที่ขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าน้อยลง

1.6 กรอบแนวความคิดสมมติฐานของงานวิจัย

การปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยการชุบเยือกแข็ง (Deep Cryogenic Treatment: DCT) เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าสำคัญของวัสดุโลหะ เพื่อให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนวัสดุเหล่านั้นยาวนานขึ้นและมีความเหมาะสมในการนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่ (Next Generation Automotive) และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ (Smart Electronics) ซึ่งวิธีการโดยการตัดชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ให้มีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 450 550 และ 650 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที ทดสอบสมบัติ วิเคราะห์ผลชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อน แล้วนำไปชุบเยือกแข็ง ทั้ง 2 วิธี คือ การชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งและการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว ทดสอบสมบัติ วิเคราะห์ผล และสรุปผลการทดสอบ





รูปที่ 1.1 กรอบแนวความคิดสมมติฐานของงานวิจัย

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

การอบอ่อน หมายถึง

กระบวนการทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลง สมบัติ
ทางกายภาพ และทางเคมีของวัสดุเพื่อเพิ่มความเหนียว
และลดความแข็ง ทำให้ใช้งานได้มากขึ้น

การชุบเยือกแข็ง หมายถึง

กระบวนการการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็น
เยือกแข็ง (Deep Cryogenic Treatment: DCT)

ทองแดง C1100 หมายถึง

แผ่นรีดทองแดงบริสุทธิ์ มีน้ำหนักเบา และอ่อน อีกทั้ง
ยังมี ธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ไม่ถึง 0.7%

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเล่มนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีข้อมูลต่าง ๆ และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อที่ได้ลงมือปฏิบัติเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่ทำให้เกิดอิทธิพลตัวแปรการชุบเยือกแข็ง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทองแดงบริสุทธิ์ (Copper)

ทองแดง ถือเป็นโลหะที่ถูกใช้ประโยชน์มาตั้งแต่ยุคสัมฤทธิ์ (Bronze Age) จนถึงปัจจุบัน และเป็นโลหะที่ถูกใช้มากรองลงมาจากเหล็ก และอะลูมิเนียม ปัจจุบันมีการนำโลหะทองแดงมาใช้เป็นส่วนผสมของทอง และเงินมากขึ้น เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความสวยงาม และทนต่อการกัดกร่อน โดยใช้โลหะทองแดงในรูปทองแดงเจือสำเร็จรูป ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้ง่ายโลหะทองแดงบริสุทธิ์ใช้เรียกโลหะทองแดงที่มีส่วนผสมไม่เกิน 0.5 % โดยน้ำหนัก และใช้คำว่า โลหะทองแดงผสมกับโลหะทองแดงที่มีทองแดงไม่ต่ำกว่า 40 % แต่ไม่มากกว่า 99 % โดยน้ำหนัก [1]

ประโยชน์ทองแดง เป็นโลหะที่มีความสำคัญในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงเครื่องเรือนต่าง ๆ เพราะมีสมบัติที่ดีหลายประการ ได้แก่ เป็นโลหะที่สื่อไฟฟ้าและถ่ายเทความร้อนได้ดี มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง สามารถรีดขึ้นรูปได้ง่าย อุตสาหกรรมที่มีการใช้ทองแดง ได้แก่

- 1) อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์
- 2) อุตสาหกรรมเครื่องประดับ
- 3) อุตสาหกรรมก่อสร้าง
- 4) อุตสาหกรรมยานยนต์
- 5) อุตสาหกรรมผลิตเครื่องใช้ เครื่องเรือน
- 6) อุตสาหกรรมเครื่องทำความเย็น
- 7) อุตสาหกรรมการผลิตกระป๋องบรรจุภัณฑ์

สมบัติที่ทำให้ทองแดงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภท คือ ความแข็งแรง, สภาพการเป็นตัวนำ, ความต้านทานการกัดกร่อน, การแปรรูป และความอ่อนสามารถเพิ่มคุณสมบัติของทองแดงได้ โดยการเปลี่ยนส่วนประกอบ และวิธีการผลิต

สภาพการนำไฟฟ้า: ทองแดงเป็นโลหะในทางวิศวกรรมที่ถูกใช้ทำเป็นตัวนำไฟฟ้ามากที่สุด โดยที่เงิน และธาตุอื่น ๆ อาจจะถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ป้องกันการอ่อนตัวหรือเพื่อเพิ่มสมบัติอื่น ๆ โดยที่ไม่ทำให้เสียสภาพการนำไฟฟ้า

สภาพการนำความร้อน: เป็นสมบัติเดียวกันกับสภาพการนำไฟฟ้า โลหะผสมทองแดงอาจถูกใช้เพื่อให้ความต้านทานการกัดกร่อน กล่าวคือความสามารถในการนำความร้อนจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอัลลอยด์ ในขณะที่ความต้านทานการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้น

สี และลักษณะที่ปรากฏ: โดยทั่วไปแล้วทองแดงจะมีสีเฉพาะ และอาจเปลี่ยนสีได้โดยขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ อัลลอยด์ส่วนมากสามารถทำการเตรียมการ และบำรุงรักษามาตรฐานของพื้นผิวได้ง่าย ถึงแม้จะมีสภาวะการกัดกร่อนที่ไม่พึงประสงค์ อัลลอยด์ส่วนใหญ่ถูกใช้ในการปรับสภาพให้ทองแดงมีความเหมาะสมกับการใช้งาน ตั้งแต่การขึ้นรูป หรือภายหลังจากการชุบโลหะ โดยที่อัลลอยด์แต่ละชนิดจะให้สีเฉพาะตัวออกมาเริ่มตั้งแต่สีชมพูแชลมอน จนถึงสีเหลือง ส่วนสีทอง และเขียวจนถึงบรอนซ์ดำ จะเกิดจากสภาพอากาศ โดยการสัมผัสกับบรรยากาศสามารถทำให้พื้นผิวทองแดงเป็นสีเขียว หรือบรอนซ์ดำได้ หรือการทำอัลลอยด์พื้นผิวสนิมในรูปแบบผลิตภัณฑ์บางประเภท

ความต้านทานการกัดกร่อน: โลหะผสมทองแดงจะป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำ และไอน้ำได้ โลหะผสมทองแดงสามารถป้องกันการกัดกร่อนในสภาพอากาศของชนบท, ในทะเล และโรงงานอุตสาหกรรมได้ ทองแดงสามารถป้องกันน้ำเกลือ, ดิน, แร่ธาตุที่ไม่เกิดการออกซิเดชัน กรดอินทรีย์ และการกัดกร่อน แต่แอมโมเนีย, ฮาโลเจน, ซัลไฟด์, สารละลายที่มีแอมโมเนียไอออน และกรดออกซิไดซ์ จะทำลายทองแดงได้ เช่นเดียวกับโลหะผสมทองแดงที่ป้องกันการกัดกร่อนได้เพียงเล็กน้อย โดยความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะผสมทองแดงจะมาจากการสร้างแผ่นฟิล์มบนพื้นผิวของวัสดุ และฟิล์มนี้จะทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อนโลหะความอ่อนสามารถปรับปรุงได้โดยทำการอบอ่อน: สามารถทำได้โดยกระบวนการอบอ่อน หรือโดยการเชื่อม หรือขั้นตอนการประสาน

การชุบแข็ง/การเพิ่มความแข็ง: มีรูปแบบการเพิ่มความแข็งโดยทั่วไปมีอยู่ 5 รูปแบบของทองแดง คือ การเพิ่มความเครียด (Strain Hardening), การเพิ่มความแข็งแรงโดยสารละลายของแข็ง (Solid-Solution Hardening), การทำให้เกิดสารประกอบขนาดเล็ก (Precipitation Hardening) และ การเพิ่มความแข็งแรงโดยการกระจายตัวของเฟสที่สอง (Dispersion Strengthening) ส่วนรูปแบบที่ห้าคือ Spinodal Decomposition เป็นรูปแบบที่ใช้ในการค้าขายโดยตรง แต่จะประกอบด้วย ทองแดง-นิกเกิล-ดีบุก เท่านั้น การผสมกลไกการเพิ่มความแข็งแรงถูกใช้ในการเพิ่มสมบัติทางกลขั้นสูงสำหรับโลหะผสมทองแดงขั้นสูง [2]

มาตรฐานทองแดงกำหนดรายละเอียดของทองแดง และ ทองแดงผสม การใช้มาตรฐานให้เหมาะสมกับการกำหนดชนิด, รูปแบบ และสถานะของอัลลอยด์ ยิ่งไปกว่านั้น ยังมีมาตรฐานทองแดงผสมที่เกิดจากจากภาษาสามัญระหว่างผู้ผลิต, พ่อค้า และผู้ใช้งานจากภาวะ

การเปลี่ยนแปลงในโลกของโลหะ และการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ยิ่งเพิ่มความสำเร็จในการเปรียบเทียบ มาตรฐานของยุโรป, อเมริกา, ญี่ปุ่น และมาตรฐานทองแดงอื่น ๆ ในโลก

มาตรฐานทองแดงของยุโรปเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาโดย Comité Européen de Normalisation (CEN) โดยระบบนี้จะใช้เลขหกหลัก แอลฟา-เชิงตัวเลขในการระบุ ตัวอักษรตัวแรก “C” จะแสดงทองแดงผสม ตัวอักษรตัวที่สองจะแสดงรูปแบบการผลิต เช่น B คือจากแท่งอิงกอท สำหรับการหลอมใหม่เพื่อการหล่อผลิตภัณฑ์, C คือผลิตภัณฑ์จากการหล่อ, F คือวัสดุเติมเต็มสำหรับการประสาน และเชื่อม, M คือมาสเตอร์อัลลอยด์, R คือ Refined Unwrought Copper, S คือ เศษ, W คือ ผลิตภัณฑ์ขึ้นรูป และ X คือ วัสดุไม่ได้มาตรฐาน หมายเลขสามหลักถูกใช้ในการระบุวัสดุ และตัวอักษรตัวสุดท้ายจะแสดงกลุ่มวัสดุของทองแดง และเพื่อขยายระบบจำนวนชื่อที่ระบุในอเมริกาใต้ มาตรฐานของทองแดงสำหรับทองแดงผสมจะใช้ของ Unified Numbering System (UNS) ที่ออกโดย American Society for Testing and Materials (ASTM) และ Society of Automotive Engineers (SAE) ภายใต้ระบบของ UNS ทองแดง และทองแดงผสมจะระบุโดยใช้ตัวเลขห้าหลักที่ขึ้นต้นด้วยตัวอักษร C โดยรหัสห้าหลักนี้จะใช้พื้นฐานของการแทนที่ระบบตัวเลขเต็มที่มีสามหลัก ที่พัฒนาโดย U.S. Copper and Brass Industry. ระบบเก่าบริหารงานโดย Copper Development Association (CDA) และในเอกสารจำนวนมาก ข้อมูลทองแดงผสมยังคงแสดงด้วยหมายเลขของ CDA การระบุของ UNS ใช้เพียงเลขสองหลัก ส่วนขยายหมายเลขของ CDA เพื่ออำนวยความสะดวกให้กับส่วนประกอบใหม่ ๆ ตัวอย่างเช่น ทองเหลืองกลึงไสง่าย (free-cutting brass) หรือในชื่อของ CDA อัลลอยด์ คือ หมายเลข 360 จะกลายเป็น C36000 ซึ่งการระบุของ UNS เป็นระบบที่เข้ากันได้กับการระบุมาตรฐานของ ASTM, ASME และ SAE ในระบบ UNS หมายเลขจาก C10000 ถึง C79999 หมายถึงอัลลอยด์ที่ทำขึ้น ในขณะที่อัลลอยด์จากการหล่อจะมีชื่อจาก C80000 ถึง C99999 จากสองประเภทนี้สามารถแบ่งกลุ่มส่วนประกอบของทองแดงผสมได้เป็นหกกลุ่มใหญ่คือ ทองแดง, ทองแดงผสมอัลลอยด์ที่ปริมาณสูง (High-Alloy Coppers), ทองเหลือง, บรอนซ์, นิกเกิล และนิกเกิลเงิน ส่วนอัลลอยด์ที่ไม่อยู่ในหกกลุ่มนี้ และถูกแบ่งเป็น ทองแดง-สังกะสี อัลลอยด์ ส่วนประกอบที่ทำขึ้น หรืออัลลอยด์พิเศษ และการหล่อส่วนประกอบ มาตรฐานทองแดงของญี่ปุ่น JIS มีพื้นฐานมาจากมาตรฐาน ISO การกำหนดชื่อจะเริ่มต้นด้วยตัวอักษร JIS และตามด้วยตัวอักษร C สำหรับทองแดงที่หล่อขึ้น และทองแดงผสม หมายเลขสี่หลักที่ใช้จะขึ้นอยู่กับธาตุผสมที่ใส่เข้าไป ตัวอย่างเช่น JIS C1020 ประกอบด้วย Cu 99.9%, JIS C2720 คือ Cu-Zn (ทองเหลือง), JIS C5191 คือ Cu-Sn-P (Phosphor Bronze), JIS C3601 คือ Cu-Zn-Pb (ตะกั่วผสมทองเหลือง), JIS C6801 คือ Cu-Zn-Al (ทองเหลือง), JIS C 4430 คือ Cu-Zn-Sn (ทองเหลือง) และอื่น ๆ [3]

เกรดทองแดงเป็นหนึ่งในกลุ่มหลักของโลหะที่ทำการค้าขาย และถูกใช้อย่างแพร่หลายเพราะว่าสมบัติการเป็นสภาพตัวนำไฟฟ้า และความร้อนที่ดีเยี่ยม, ด้านทานการกัดกร่อน และทำการผลิตง่ายเกรดทองแดงไม่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก และสามารถทำการเชื่อมต่อโดยการบัดกรี และการประสานได้ เกรดทองแดงหลายชนิดสามารถทำการเชื่อมด้วยแก๊ส, อาร์ค และวิธีการเพิ่มความต้านทานได้ เกรดทองแดงถูกแบ่งเป็น 6 กลุ่มใหญ่: ทองแดง, Dilute Copper Alloys, ทองเหลือง, บรอนซ์, ทองแดง - นิกเกิล อัลลอยด์ และนิกเกิล - เงิน อัลลอยด์

1. ทองแดงบริสุทธิ์ที่ใช้ในการค้าเป็นหลัก เพราะมีน้ำหนักรวม และอ่อน อีกทั้งยังมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ไม่ถึง 0.7% เกรดของทองแดงบริสุทธิ์ที่ระบุโดย UNS คือ C10100 ถึง C13000 โดยเกรดทองแดงที่เบาขึ้นประกอบด้วยธาตุอัลลอยด์เพียงเล็กน้อยที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของทองแดงอย่างใดอย่างหนึ่ง

2. Electrolytic Tough Pitch Copper C11000 ทำมาจากทองแดงขี้ลบล ซึ่งทองแดงได้ผ่านการปรับแต่งให้มีสภาพการนำไฟฟ้า และ C11000 เป็นเกรดทองแดงที่ใช้ในการนำไฟฟ้าโดยทั่วไป เพราะมีสภาพการนำไฟฟ้าสูง มากกว่า 100% IACS และมีปริมาณออกซิเจนเท่ากับ C12500 แต่มีส่วนประกอบซัลเฟอร์ที่แตกต่างกัน โดย C11000 มีความไม่บริสุทธิ์ของโลหะอยู่ทั้งหมด 50 ppm รวมทั้งซัลเฟอร์

3. ทองแดงแบบไม่ผสมออกซิเจน C10100 และ C10200 ผลิตขึ้นโดยการหลอมเหนียวนำกระแสไฟฟ้า ด้วยขี้ลบลภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน และผลิตโดยกระบวนการป้องกันและลดอากาศ และทำให้มีไฮโดรเจนต่ำ

4. ทองแดง - นิกเกิล อัลลอยด์ (Copper-Nickels, Cupro-Nickels) คือเกรดทองแดงที่ประกอบด้วยนิกเกิล 1.5-45% เป็นธาตุหลัก ตามที่ Unified Numbering System (UNS) กำหนด ทองแดง-นิกเกิล อัลลอยด์ระบุด้วยหมายเลขจาก UNS C70000 ถึง UNS C73499 อัลลอยด์กลุ่มนี้ใช้ในการผลิตเหรียญ อุปกรณ์ที่ใช้ในน้ำทะเล เครื่องระเหย (Evaporators) ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Tubes) ระบบไฮดรอลิกในยานยนต์ (Automotive Hydraulic) และระบบหล่อเย็น (Cooling Systems)

5. นิกเกิล ไม่ได้มีส่วนประกอบของเงิน และอาจจะเป็นทองเหลืองที่เพิ่มนิกเกิลเข้าไป โดยที่นิกเกิลถูกเพิ่มเข้าไปในปริมาณมากแต่ในความเป็นจริงแล้วอยู่ระหว่าง 9 ถึง 30% ขึ้นอยู่กับงานที่ใช้ และปริมาณทองแดงมีแนวโน้มที่จะเท่าเดิมคือประมาณ 60 - 65% แต่สังกะสีจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิล ปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เปลี่ยนเป็นสีขาว เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน และลดความอ่อน

6. นิกเกิล เงิน ถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานที่ใช้โลหะนอกกลุ่มเหล็ก เนื่องจากสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน สี และคุณภาพในการขึ้นรูปเย็น วัสดุที่ทำมาจาก นิกเกิล เงิน เช่น หม้อ

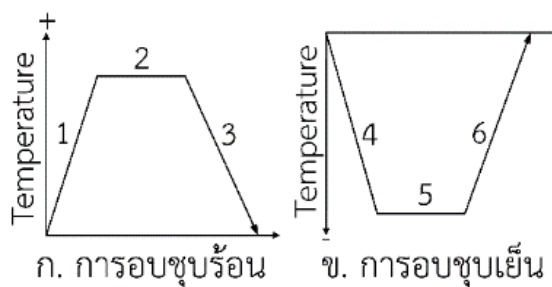
น้ำารถยนต์ ลูกกลิ้งของปากกา คีย์ของเครื่องดนตรี ตัวถังของทรานซิสเตอร์ (Transistor Casings) Electrical Contacts Architectural Ironmongery มืด และอื่น ๆ ตามที่ UNS กำหนดขึ้น นิกเกิลเงิน ระบุด้วยหมายเลขจาก C73500 ถึง C79999 [4]

2.1.2 การอบอ่อน (Annealing)

การอบอ่อนเป็นกระบวนการทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุเพื่อเพิ่มความเหนียวและลดความแข็ง ทำให้ใช้งานได้มากขึ้น โดยจะเกี่ยวข้องกับ การให้ความร้อนแก่วัสดุเหนืออุณหภูมิการตกผลึกซ้ำ การรักษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในระยะเวลาที่เหมาะสม จากนั้นจึงทำให้เย็นลงในการหลอม อะตอมจะเคลื่อนตัวในตาข่ายคริสตัลและจำนวนการเคลื่อนตัวจะลดลง นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของความเหนียวและความแข็ง เมื่อวัสดุเย็นลงจะตกผลึกใหม่ สำหรับโลหะผสมหลายชนิด รวมถึงเหล็กกล้าคาร์บอน ขนาดเม็ดผลึกและองค์ประกอบเฟส ซึ่งสุดท้ายแล้วจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ จะขึ้นอยู่กับอัตราการให้ความร้อนและอัตราการเย็นตัว การทำงานแบบร้อนหรือเย็นหลังจากกระบวนการอบอ่อนจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโลหะ ดังนั้นอาจใช้การอบชุบด้วยความร้อนเพิ่มเติมเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ ด้วยความรู้เกี่ยวกับ องค์ประกอบและไดอะแกรมของเฟส การอบชุบด้วยความร้อนสามารถใช้เพื่อปรับจากความแข็งและเปราะมากขึ้นเป็นนุ่มขึ้นและมีความเหนียวมากขึ้นในกรณีของโลหะที่เป็นเหล็ก เช่น เหล็ก การหลอมทำได้โดยการให้ความร้อนแก่วัสดุ (โดยทั่วไปจนกระทั่งเรืองแสง) ชั่วขณะหนึ่ง แล้วค่อย ๆ ปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องในอากาศนิ่ง ทองแดง เงิน และทองเหลืองสามารถทำให้เย็นลงในอากาศอย่างช้า ๆ หรืออย่างรวดเร็วโดยการทำให้เย็นลงในน้ำ วิธีนี้โลหะจะถูกทำให้อ่อนลงและเตรียมพร้อมสำหรับการทำงานต่อไป เช่น การสร้างรูปร่าง การปั๊ม หรือการขึ้นรูป [5]

2.1.3 กระบวนการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็ง

กระบวนการการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็ง (Deep Cryogenic Treatment: DCT) เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าสำคัญของวัสดุโลหะ เพื่อให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนวัสดุเหล่านั้นยาวนานขึ้น [6] ชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็งมักแสดงสมบัติของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่างความแข็งที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการตกผลึกของเฟสอันดับสอง (Second Phase) ในวัสดุนั้น ๆ เช่น การตกผลึกของเฟสเหล็กคาร์ไบด์ในพื้นหลักเฟลโลไทเนเหล็กเครื่องมือ [7] หรือการทำให้เฟสของโลหะมีขนาดเล็กลง เช่น การลดขนาดช่องว่างระหว่างชั้นลามেলাของเฟสเฟลโลไทเนเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางทำให้ความแข็งของเหล็กกล้าเพิ่มขึ้นได้ [8]

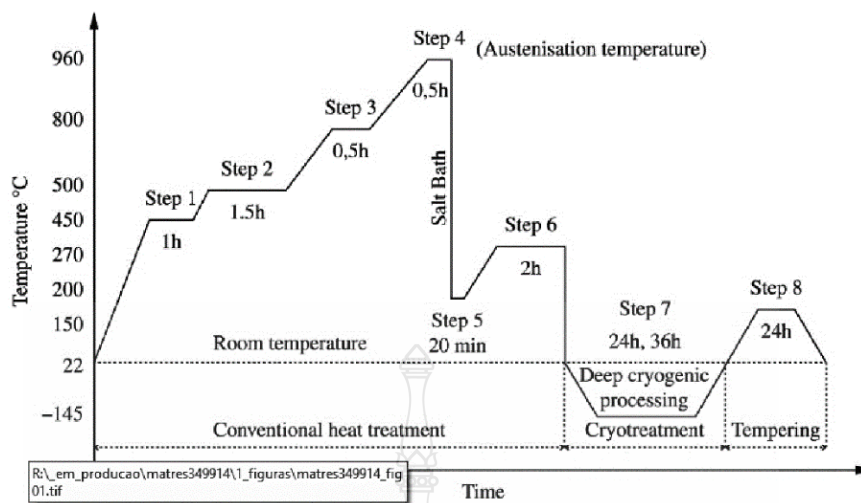


รูปที่ 2.1 แผนภาพอุณหภูมิ เวลา และขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติ
(Time-Temperature Sequence Diagram)

กระบวนการการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็งมีขั้นตอน

การดำเนินการดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นแผนภาพอุณหภูมิ-เวลา-ขั้นตอน (Temperature Time Sequence: TTS) ในกระบวนการการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อน (Heat Treatment) แผนภาพอุณหภูมิ-เวลา-ขั้นตอนมีลักษณะดังรูปที่ 1 แผนภูมิถูกสร้างขึ้นมาจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ขั้นตอนในกระบวนการการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อนประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน คือ การให้ความร้อนช่วงที่ 1 (Heating) การอบแช่ช่วงที่ 2 (Holding) และการเย็นตัวช่วงที่ 3 (Cooling) การให้ความร้อนในช่วงแรก โลหะจะถูกให้ความร้อนในอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 1 องศาเซลเซียสต่อหนึ่งนาที เพื่อไม่ให้โลหะเกิดวิกฤติภายใน และทำให้โลหะเกิดการบิดเบี้ยว เสียรูป หรือแตกร้าว [9] หลังจากอุณหภูมิของโลหะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อน เตาจะถูกรักษาอุณหภูมิที่ค่าดังกล่าวด้วยระยะเวลา 60 นาทีต่อความหนาของชิ้นงาน 25.4 มิลลิเมตร [10] ก่อนปล่อยให้เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง อัตราการเย็นตัวที่ต่ำจะทำให้ได้ความแข็งของเหล็กกล้าในอัตราที่แตกต่างกัน ในกรณีกระบวนการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อน เหล็กกล้า อัตราการเย็นตัวที่สูงทำให้ได้โครงสร้างมาเทนไซต์ซึ่งมีความแข็งสูง หรืออัตราการเย็นตัวที่ต่ำจะทำให้ได้โครงสร้างเพอไลต์ที่มีความหยาบและแสดงความแข็งต่ำ [9]

ในการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็งดังรูปที่ 2.1 ข. ประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอนเช่น การปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อน แต่มีวิธีการดำเนินการตรงกันข้ามกับการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อน กล่าวคือเมื่อชิ้นงานถูกใส่ลงไปในเครื่องปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็ง ชิ้นงานจะถูกให้ความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิของชิ้นงานลงไปที่อุณหภูมิที่กำหนด คือ -186 องศาเซลเซียสอัตราการให้ความเย็นที่กำหนดดังช่วงที่ 4 ในรูปที่ 2.1 ข. หลังจากนั้นชิ้นงานที่อุณหภูมิที่กำหนดจะถูกอบแช่เป็นเวลาคัล้ายกับการอบแช่ในการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อนดังช่วงที่ 5 ในรูปที่ 2.1 ข. สุดท้ายชิ้นงานจึงถูกทำการให้ความร้อนด้วยอัตราที่กำหนดสู่อุณหภูมิห้องดังช่วงที่ 6 ในรูปที่ 2.1 ข.



รูปที่ 2.2 แผนภาพอุณหภูมิ เวลา และขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนและความเย็นเยือกแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D3 [10]

รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพอุณหภูมิ เวลา และขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนและความเย็นเยือกแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D3 เหล็กกล้าเครื่องมือถูกนำไปทำการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงแก่เหล็กโดยการให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องสู่อุณหภูมิอบชุบ 960 องศาเซลเซียส ด้วยการให้ความร้อน 4 ขั้นตอนไปที่ 450 500 800 และ 960 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาอบแช่ 1 1.5 0.5 และ 0.5 ชั่วโมงตามลำดับ เมื่อทำการอบแช่ที่อุณหภูมิ 960 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาอบแช่ 0.5 ชั่วโมง ชิ้นงานถูกนำไปทำการจุ่มลงในอ่างเกลือเหลว (Salt Bath) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และอบแช่ที่อุณหภูมินั้น 20 นาที ก่อนทำการอบคืนไฟไปที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส และอบแช่ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงก่อนการทำให้เย็นตัวสู่อุณหภูมิห้อง หลังจากการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน ชิ้นงานถูกนำไปทำการปรับปรุงสมบัติด้วยความเย็นเยือกแข็งทันที เพื่อลดความเค้นตกค้างโดยการจุ่มชิ้นงานไปที่อุณหภูมิ -145 องศาเซลเซียส และจุ่มแช่ที่อุณหภูมินั้นเป็นเวลา 24 และ 36 ชั่วโมง ก่อนปล่อยให้ร้อนขึ้นสู่อุณหภูมิห้อง สุดท้ายชิ้นงานถูกนำไปทำการอบคืนไฟอีกครั้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาจุ่มแช่ 24 ชั่วโมง ผลการดำเนินการดังกล่าวทำให้เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D3 ไม่มีความเค้นตกค้างหลงเหลือแต่ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าลดลง

เมื่อพิจารณาแผนภาพอุณหภูมิ เวลา และขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติด้วยความเย็นเยือกแข็งดังรูปที่ 2.1 ข. พบว่าตัวแปรการปรับปรุงสมบัติด้วยความเย็นเยือกแข็งประกอบด้วยสิ่งต่าง ๆ ดังนี้

- 1) อัตราการให้ความเย็น (Cooling) ของอุณหภูมิภายในห้องบรรจุชิ้นงานที่สูงหรือต่ำส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของโลหะแต่ละชนิด ตัวอย่างของเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D3 นั้นมีอัตราการเย็นตัวของห้องบรรจุชิ้นงานที่ค่าประมาณ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที
- 2) การอบแช่ (Holding) ที่อุณหภูมิเยือกแข็งที่เร็วหรือช้าเกินไปจะส่งผลต่อสมบัติของเหล็กกล้าที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความเย็นเยือกแข็ง เวลาในการอบแช่ขึ้นกับความหนาและชนิดของเหล็กกล้า
- 3) การให้ความร้อน (Heating) แก่ชิ้นงานที่ผ่านการให้ความเย็นเยือกแข็งสู่อุณหภูมิห้องต้องทำด้วยความระมัดระวัง อัตราการให้ความร้อนที่สูงหรือต่ำมากเกินไปส่งผลทำให้สมบัติของเหล็กกล้าเปลี่ยนแปลงได้

2.1.5 ส่วนประกอบของกระบวนการการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็ง

รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของเครื่องปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็ง ที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนสำคัญ 4 ส่วน ดังนี้

- 1) ถังบรรจุชิ้นงานที่ผนังของถังบรรจุเป็นฉนวนสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของถังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง และควรมีค่าเท่ากับไนโตรเจนเหลว คือ -186 องศาเซลเซียส
- 2) พัดลมช่วยในการถ่ายเทอากาศภายในถังบรรจุ ถูกติดตั้งที่ด้านข้างของถังบรรจุชิ้นงาน พัดลมมีหน้าที่ในการดูดอากาศภายในถังเข้าออก หรือไหลวนไปมา การไหลวนของอากาศดังกล่าวส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในถังบรรจุชิ้นงานมีค่าคงที่เท่ากันในทุกตำแหน่งภายใน
- 3) ถังบรรจุไนโตรเจนเหลวเป็นถังสองชั้นที่ช่องว่างระหว่างชั้นของถังด้านนอกและด้านในมีการบุฉนวนกันความร้อนเพื่อไม่ให้ความร้อนภายนอกถ่ายเทเข้าสู่ด้านในถังบรรจุของเหลว นอกจากนี้ช่องว่างระหว่างชั้นของถังด้านนอกและด้านในมีการทำให้เป็นสุญญากาศเพื่อจุดประสงค์ในการทำให้ไนโตรเจนที่เติมลงไปมีสถานะเป็นของเหลว
- 4) อุปกรณ์ควบคุมการไหลของไนโตรเจนเหลวเข้าสู่ถังบรรจุชิ้นงาน อุปกรณ์ควบคุมการไหลนี้ถูกต่อเข้ากับชุดควบคุมอุณหภูมิภายในถังบรรจุชิ้นงาน หากอุณหภูมิภายในถังเกิดการเพิ่มขึ้น อุปกรณ์ควบคุมการไหลจะส่งถ่ายไนโตรเจนเข้าสู่ถังบรรจุชิ้นงาน เพื่อให้อุณหภูมิในถังบรรจุชิ้นงานมีค่าคงที่เท่ากับค่าที่กำหนด



รูปที่ 2.3 เครื่องปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็ง [10]

2.1.6 การใช้งานการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็งในงานอุตสาหกรรม

1) อุตสาหกรรมการขนส่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้งานการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็งสูง โดยมีจุดมุ่งหมายสำคัญในการปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นส่วนโลหะให้มีความทนทานและสามารถใช้งานได้ในระยะเวลายาวนาน ตัวอย่างการใช้งาน เช่น จานเบรกที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็งจะมีอายุการใช้งานยาวนานกว่าชิ้นงานทั่วไป ความสามารถในการยืดหยุ่นของสปริงมีค่าเพิ่มขึ้น ลูกสูบในเครื่องยนต์ทนทานต่อความร้อนเสียดทานได้ดี แทนเครื่องทนทานต่อแรงกระทำทั้งภายนอกและภายในได้ดีกว่า

2) ในอุตสาหกรรมการผลิต อุปกรณ์การตัดเฉือน เช่น มีดกลึง มีดเล็บ ดอกสว่านต่าง ๆ ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็ง มีความแข็ง ความแข็งแรง ความต้านทานการสึกหรอ และความคงรูปที่อุณหภูมิสูงได้ดี และทำให้อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้น

3) ในอุตสาหกรรมการเดินเรือ ชิ้นส่วนที่มีการหมุนและเคลื่อนที่ในเครื่องยนต์เรือหรือการขับเคลื่อนของเรือต่าง ๆ เมื่อชิ้นส่วนผ่านการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็ง อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล่านี้สามารถเพิ่มขึ้นได้ นอกจากนั้นการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็งทำให้ความเค้นตกค้างในชิ้นส่วนต่าง ๆ ลดลงและส่งผลทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานเพิ่มขึ้นได้

4) ในวงการเครื่องเสียง ชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น สวิตช์ สายไฟ หรืออุปกรณ์ต่อพ่วงอื่น ๆ ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็งส่งผลทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ดีและมีความเสถียรมากกว่าชิ้นส่วนทั่วไป

2.1.7 การตรวจสอบความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistance)

ความต้านทานของวัสดุคือการวัดความต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้านับถอยหลังของมันคือการนำไฟฟ้าเพื่อวัดความง่ายของกระแสไฟฟ้าที่จะผ่าน ความต้านทานมีความคล้ายคลึงกับแรงเสียดทานทางกล หน่วย SI ของความต้านทานคือโอห์ม (Ω) ในขณะที่การนำไฟฟ้าวัดโดยซีเมนส์ (S) (เดิมเรียกว่า "mho" ตามด้วย Ω) ความต้านทานของวัสดุส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ วัสดุที่ทำจากฉนวนไฟฟ้าเช่นยางมีแนวโน้มที่จะมีความต้านทานสูงมากและการนำไฟฟ้าต่ำ ในขณะที่วัสดุที่ทำจากตัวนำไฟฟ้าเช่นโลหะมีแนวโน้มที่จะมีความต้านทานต่ำมากและการนำไฟฟ้าสูง ความสัมพันธ์นี้ถูกวัดโดยความต้านทานหรือการนำไฟฟ้า อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของวัสดุไม่ได้เป็นปัจจัยเดียวของความต้านทานและการนำไฟฟ้า ยังขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของวัตถุ เพราะทรัพย์สินเหล่านี้มีความหลากหลายและไม่แน่นอน ตัวอย่างเช่น ความต้านทานของสายไฟสูงกว่าถ้ายาวและละเอียด และต่ำกว่าถ้าสั้นและหนา วัสดุทั้งหมดสามารถต้านทานกระแสไฟฟ้าได้ยกเว้นตัวนำยิ่งยวดที่มีความต้านทานเป็นศูนย์ ความต้านทาน (R) ของวัตถุถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของแรงดัน (V) ที่ตกคร่อมวัตถุนั้นต่อกระแส (I) ที่ไหลผ่านวัตถุ ในขณะที่ค่าสื่อนำไฟฟ้า (G) เป็นส่วนกลับ [11] ดังสมการที่ (2.1)

$$R = \frac{V}{I}, \quad G = \frac{I}{V} = \frac{1}{R} \quad (2.1)$$

2.1.8 การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Test) [15]

การทดสอบแรงดึงเป็นวิธีที่นิยมเพื่อศึกษาความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุ โดยใส่แรงกระทำไปยังวัสดุในแนวเดียวจนกระทั่งวัสดุนั้นแตกหักหากกล่าวโดยทั่ว ๆ ไป คือ การดึงชิ้นงานออกจากกันด้วยแรงในแนวแกนเดียวกัน และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานหากค่าความแข็งแรงทางแรงดึงของวัสดุอยู่ในช่วงต่ำกว่าค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้วัสดุเสียรูปถาวร วัสดุนั้นยังคงคุณสมบัติการยืดและคืนตัวได้ เช่น อีลาสโตเมอร์ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นได้ทั้งชิ้นงานของวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป โดยปลายทั้งสองด้านของชิ้นงานจะถูกยึดด้วยตัวจับชิ้นงานทั้งสองด้านและใส่แรงกระทำเข้าไป (แรงดึง/แรงกด) ด้วยอัตราคงที่ และอ่านค่าแรงจากโหลดเซลล์ (Load Cell) ที่ต่อกับตัวจับชิ้นงาน ข้อมูลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์เป็นกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงต่อระยะยืด หรือความเค้นต่อความเครียด ค่าสมบัติเชิงกลที่สนใจคือ



รูปที่ 2.4 เครื่องทดสอบแรงดึง [12]

ความแข็งแรงทางแรงดึง ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่วัสดุรับได้ก่อนเกิดการเสียรูป ภายใต้ความเค้นสูงสุดที่กระทำต่อวัสดุ

ความแข็งแรง ณ จุดแตกหัก แรงกระทำที่ทำให้วัสดุแตกหัก โดยตรวจจับจากค่าแรงนั้นจะลดต่ำลง ซึ่งสามารถเป็นคณลค่ากับความแข็งแรงของวัสดุได้

ความแข็งแรง ณ จุดคราก ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) ณ ความเค้นตำแหน่งนี้ วัสดุกำลังจะเสียรูปอย่างถาวรและเป็นการประมาณในทางปฏิบัติของขีดจำกัดความยืดหยุ่นของวัสดุ

ค่าโมดูลัสของยังส์ - เกรเดียน (Gradient) ของกราฟระหว่างความเค้นและความเครียดในความสัมพันธ์ในแนวเส้นตรง

การทดสอบแรงดึงเป็นค่าที่สำคัญในการออกแบบวัสดุเพื่อความปลอดภัยและสมบูรณ์ รวมถึงการควบคุมคุณภาพในด้านความทนทานในระหว่างขบวนการผลิตและการประกอบชิ้นส่วน

2.1.9 วิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการทดสอบแรงดึงของโลหะ ASTM E8 / E8M [13]

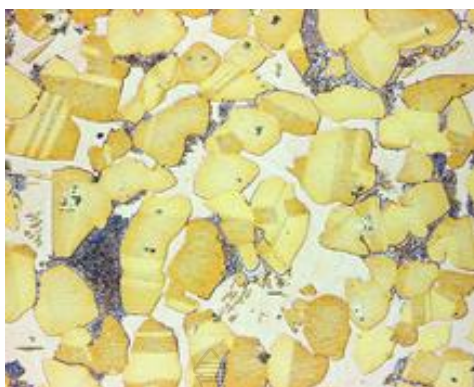
พัฒนาโดย American Testing and Materials Authority (ASTM) มาตรฐาน ASTM E8 / E8M เป็นมาตรฐานที่อธิบายคุณสมบัติของโลหะโดยเฉพาะ เช่นความแข็งแรงของผลผลิต, การยึดตัวของจุดผลผลิต, ความต้านทานแรงดึง, การยึดตัวและการลดพื้นที่ มาตรฐานนี้ครอบคลุมการทดสอบความเครียดการตัดการทรงตัวและการกระแทก ชื่อเต็มของมาตรฐานมีดังนี้: ASTM E8 / E8M วิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการทดสอบแรงดึงของวัสดุโลหะ

การทดสอบความเค้น ASTM E8 / E8M ดำเนินการกับวัสดุโลหะที่อุณหภูมิห้อง เป็นหนึ่งในกระบวนการทดสอบที่พบมากที่สุดในตัวอย่างโลหะ มาตรฐานนี้หมายถึงตัวอย่างประเภทต่าง ๆ เช่น ชนิดแผ่น ชนิดกลม แผ่นแถบลาด ลวดแบน แท่งสี่เหลี่ยม ท่อตีขึ้นรูปหล่อเหล็กก่อนและตัวอย่างผงโลหะ โดยทั่วไปหากธุรกิจกำหนดประเภทของตัวอย่างที่จะทดสอบและขนาดของตัวอย่าง

ตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM E8 / E8M มันค่อนข้างง่ายที่จะกำหนดกรอบการทดสอบที่เหมาะสม การเตรียมตัวอย่างเป็นขั้นตอนสำคัญในการปฏิบัติตามขั้นตอนการทดสอบ ASTM E8 / E8M อย่างเหมาะสมและมักเป็นวิธีที่ถูกรบกวนมากที่สุด ผลการเตรียมการทดสอบที่ไม่เหมาะสมหรือไม่ระมัดระวังในผลการทดสอบที่ไม่สอดคล้องกัน เมื่อพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนที่ระบุในมาตรฐานนี้มักจำเป็นต้องใช้การตัดเฉือนที่แม่นยำหรืออุปกรณ์ตัดเฉือนเพื่อให้แน่ใจว่ามีการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสม เพื่อให้เจ้าหน้าที่ผู้มีอำนาจสามารถปฏิบัติตามขั้นตอนการทดสอบที่ถูกต้องธุรกิจจะต้องกำหนดประเภทของตัวอย่างที่จะทดสอบเท่านั้น ในกรณีนี้กำหนดกรอบการทดสอบ ความสามารถที่เหมาะสม ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบความเครียดความแข็งแรงและความเหนียวของวัสดุโดยย่อภายใต้แรงดึงแกนเดียวข้อมูลนี้มีประโยชน์ในการเปรียบเทียบวัสดุการพัฒนาโลหะผสมการควบคุมคุณภาพและการออกแบบภายใต้เงื่อนไขบางประการการทดสอบมาตรฐาน ASTM E8 / E8M เป็นหนึ่งในบริการที่ได้รับจากองค์กรของเราภายใต้กรอบการให้บริการทดสอบโลหะ

2.1.10 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Examination) [14]

โครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างสเกลที่เล็กมากของวัสดุ ซึ่งกำหนดให้เป็นโครงสร้างของพื้นผิวที่เตรียมของวัสดุที่เปิดเผยโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่มีกำลังขยายมากกว่า 25 เท่า โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ (เช่น โลหะ โพลีเมอร์ เซรามิก หรือวัสดุผสม) สามารถมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรงดึง ความเหนียว ความแข็ง ความทนทานต่อการกัดกร่อน พฤติกรรมที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำ หรือความต้านทานต่อการสึกหรอ คุณสมบัติเหล่านี้จะควบคุมการใช้วัสดุเหล่านี้ในทางอุตสาหกรรมโครงสร้างจุลภาคในระดับที่เล็กกว่าที่สามารถมองเห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงมักเรียกว่าโครงสร้างนาโน ในขณะที่โครงสร้างที่มีการจัดเรียงอะตอมแต่ละตัวเรียกว่าโครงสร้างผลึก โครงสร้างนาโนของตัวอย่างทางชีววิทยาเรียกว่าโครงสร้างพิเศษ อิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคต่อคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุนั้นถูกควบคุมโดยข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่มีอยู่หรือไม่มีอยู่ในโครงสร้างเป็นหลัก ข้อบกพร่องเหล่านี้มีได้หลายรูปแบบ แต่ข้อบกพร่องหลักคือรูขุมชน แม้ว่ารูพรุนเหล่านั้นจะมีบทบาทสำคัญมากในการนิยามคุณลักษณะของวัสดุ องค์ประกอบของมันก็เช่นกัน ในความเป็นจริง สำหรับวัสดุหลายชนิด อาจมีขั้นตอนต่างกัน ขั้นตอนเหล่านี้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันและหากจัดการอย่างถูกต้องสามารถป้องกันการแตกหักของวัสดุได้

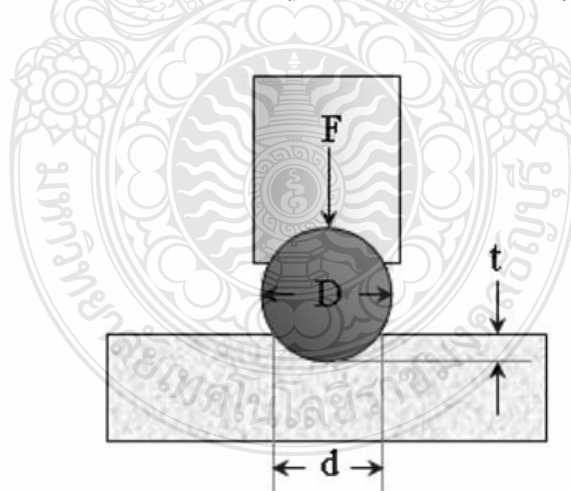


รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาค [14]

2.1.11 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ค่าความแข็งของวัสดุถือว่าเป็นสมบัติเชิงกลพื้นฐานที่สามารถชี้ให้เห็นคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุนั้นได้ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความเหนียว การทนต่อแรงเสียดสีและการสึกกร่อน เป็นต้น ปัจจุบันการวัดค่าความแข็งสามารถกระทำได้ง่าย เนื่องจากอุปกรณ์วัดความแข็งล้วนแต่เป็นระบบอัตโนมัติ แต่สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ การเลือกวิธีทดสอบให้เหมาะสมกับงานที่จะทดสอบ เพราะว่ามีวิธีทดสอบความแข็งนั้นมีหลายประเภท สำหรับวิธีการวัดความแข็งที่นิยมใช้ในงานโลหะนั้นมี 3 วิธี

1) การทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)



รูปที่ 2.6 การทดสอบแบบบริเนลล์ [15]

หลักการการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ อาศัยการกดของหัวกดทรงกลมที่ผลิตจากเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D ลงบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ดังรูป โดยคงค่าแรงกดเป็นระยะเวลา 10 ถึง 15 วินาทีสำหรับวัสดุประเภทเหล็กหรือเหล็กกล้า และคงค่าแรงเป็นระยะเวลา 30 วินาทีสำหรับโลหะอ่อน เช่น อะลูมิเนียม และ

ทองเหลือง เป็นต้น ทำให้เกิดรอยกดที่มีความลึก t และมีเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดเฉลี่ย d ซึ่งได้จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดในแนวตั้งฉากกันสองค่าแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยเครื่องมือวัดต้องมีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ค่าความแข็งคำนวณได้จากแรงกดหารด้วยพื้นที่รอยกด ดังสมการที่ (2.2)

$$\text{ค่าความแข็งบริเนลล์} = \frac{F}{A} = \frac{0.102f}{0.5\pi D[D-\sqrt{(D^2-d^2)}]} \quad (2.2)$$

แต่ในทางปฏิบัตินั้นไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็งจากสูตรคำนวณ เพราะสามารถนำความยาวเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (d) และขนาดแรงกดที่ใช้เทียบกับตารางค่าความแข็งที่ได้คำนวณไว้แล้วได้โดยตรง โดยทั่วไปลูกบอลที่ใช้เป็นหัวกดมีขนาด 10 มิลลิเมตร และสามารถใช้แรงกดได้ตั้งแต่ 500 กิโลกรัม สูงสุดถึง 3,000 กิโลกรัม หน่วยความแข็งของการทดสอบแบบบริเนลล์คือ BHN หรือ HB

ข้อดี การวัดค่าความแข็งแบบบริเนลล์จะให้รอยกดที่กว้างและลึก เพราะหัวกดมีขนาดใหญ่ ดังนั้นความหยาบของพื้นผิวชิ้นงานทดสอบและความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างทางจุลภาคจึงมีผลน้อยต่อการทดสอบ หรือกล่าวได้ว่าให้ค่าความแข็งเฉลี่ยของวัสดุที่ทดสอบ

ข้อเสีย ค่าความแข็งได้มาจากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด ฉะนั้นอาจเกิดความผิดพลาดจากการอ่านค่าของผู้ทำการทดสอบได้ นอกจากนี้รอยกดมีขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถทำการทดสอบกับชิ้นงานขนาดเล็กหรือชิ้นงานที่บางมาก ๆ ได้

ข้อจำกัด การทดสอบแบบบริเนลล์ไม่ควรใช้วัดความแข็งเกิน 450 HB เพราะค่าความแข็งที่สูงกว่านี้อาจจะทำให้เกิดการเสียรูปของหัวกด ทำให้รอยกดใหญ่กว่าความเป็นจริงหรือความแข็งที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรอยกดหรือระยะห่างของจุดศูนย์กลางรอยกดจากขอบของชิ้นงานควรมีค่าไม่น้อยกว่าสองเท่าของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยรอยกด ($2d$)

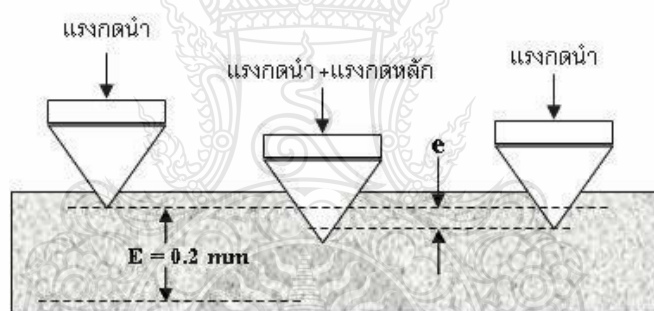
ความหนาของชิ้นงานทดสอบควรมีค่ามากกว่าสิบเท่าของความลึกรอยกด ($10t$) หรืออาจพิจารณาจากแรงกดให้เหมาะสมโดยไม่ทำให้เกิดการเสียรูปทางด้านหลังของชิ้นงาน

ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยรอยกด (d) ควรมีค่าอยู่ในช่วง $0.2D - 0.7D$ หรือประมาณ 2 – 7 มิลลิเมตรสำหรับลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เพราะหากรอยกดเล็กเกินไปจะทำให้ขอบของรอยกดไม่คมชัด ส่งผลให้วัดความยาวได้ยากและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการอ่านค่าความยาวจะมาก ในทางกลับกัน หากรอยกดมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดการกดตัวของเนื้อชิ้นงานด้านข้างมาก

2) การทดสอบแบบรอกเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

หลักการเป็นการวัดค่าความแข็งของวัสดุโดยการวัดความลึกของหัวกดซึ่งทำด้วยเพชรทรงกรวย หรือลูกบอลเหล็กกล้าที่มีขนาด 1.6 - 12.7 มิลลิเมตร (1/16 - 1/2 นิ้ว) และเลี้ยวอิทธิพลของผิวชิ้นงานทดสอบด้วยการใช้แรงกดนำค่าหนึ่ง (Minor Load) เพื่อกำหนดจุดอ้างอิงในการวัดความลึก การวัดความแข็งแบบรอกเวลล์สามารถแบ่งออกได้หลายหน่วยการทดสอบจากการใช้แรงกดและหัวกดที่ต่างกัน แต่วิธีการทดสอบที่นิยมใช้ทดสอบกับโลหะมี 3 วิธี คือ รอกเวลล์ซี (Rockwell - C) , รอกเวลล์บี (Rockwell - B) และรอกเวลล์เอ (Rockwell - A)

การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซีใช้หัวกดเพชรทรงกรวย มีมุมปลาย 120 ในการทดสอบเริ่มต้นจะให้แรงกดนำ (Minor Load) 10 Kgf กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ จากนั้นเพิ่มแรงกดหลัก (Major load) อีก 140 Kgf ค่าความแข็งจะถูกอ่านเมื่อนำแรงกดหลักออก ซึ่งเนื้อชิ้นงานที่ถูกกดจะคืนตัวกลับในปริมาณหนึ่ง และคงเหลือเพียงแรงกดนำ ซึ่งปลายหัวกดจะอยู่ ณ ตำแหน่งที่เกิดจากการยุบตัวอย่างถาวรของชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.7 ตำแหน่งที่เกิดจากการยุบตัวอย่างถาวรของชิ้นงานทดสอบ [15]

ในการคิดเป็นค่าความแข็งนั้น ถ้าให้ E คือค่าคงที่ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 100 ส่วน ส่วนละ 0.002 millimeter และ e คือความลึกที่เกิดจากการเสียรูปอย่างถาวรจากการกด ก็จะสามารถคำนวณค่าความแข็งได้ดังสูตรที่ (2.3)

$$\text{ความแข็งรอกเวลล์ซี} = 100 - \frac{e}{0.002} \text{ HRC} \quad (2.3)$$

ฉะนั้นวัสดุที่ถูกกดเข้าไปลึกมากกว่า 0.2 millimeter หรือวัสดุอ่อน จะไม่สามารถทำการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซีได้ ในกรณีนี้ควรใช้การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์บีหรือเอแทน

การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ปีมีขั้นตอนเหมือนกับการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี แต่ใช้หัวกดที่ทำจากลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1/16$ นิ้ว หรือ 1.59 มิลลิเมตร ใช้แรงกดหลัก 90 Kgf เหมาะกับการทดสอบวัสดุอ่อน เพราะมีการยืดช่วงของ E เป็น 0.26 มิลลิเมตร และแบ่งเป็น 130 ส่วน ส่วนละ 0.002 มิลลิเมตร ฉะนั้นค่าความแข็งจึงคำนวณดังสมการที่ (2.4)

$$\text{ความแข็งรอกเวลล์ปี} = 130 - \frac{e}{0.002} \text{ HRB} \quad (2.4)$$

ในขณะที่การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์เอจะกระทำเช่นเดียวกันกับการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี คือใช้หัวกดเพชรทรงกรวย และกำหนดระยะ $E = 0.2$ มิลลิเมตร แต่ใช้แรงกดหลัก 60 Kgf เพื่อให้เหมาะสมกับการทดสอบวัสดุที่อ่อนลง ในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าความแข็ง เพราะจะมีเข็มชี้บอกค่าความแข็ง หรือบางเครื่องเป็นระบบอัตโนมัติ สามารถแสดงค่าความแข็งเป็นตัวเลขโดยตรง

ข้อดี เป็นการทดสอบค่าความแข็งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถทดสอบวัสดุได้ครอบคลุมเกือบทุกชนิด การทดสอบทำได้ง่าย รวดเร็ว มีความคลาดเคลื่อนน้อยเพราะสามารถอ่านค่าความแข็งได้โดยตรงจากเครื่องทดสอบ สามารถใช้ชิ้นงานบางลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบบริเนลล์ เพราะหัวกดมีขนาดเล็กกว่า

ข้อเสีย ต้องเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบให้เรียบ ไม่มีรอยขีดข่วน ผิวต้องแห้งและสะอาด เพราะผิวชิ้นงานทดสอบจะมีผลต่อค่าความแข็งอย่างมากเนื่องจากรอยกดมีขนาดเล็กและไม่ลึกมาก (รอยกดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงประมาณ 0.2 – 1 มิลลิเมตร)

ข้อจำกัด ความหนาของชิ้นงานทดสอบต้องมีไม่น้อยกว่า 10 เท่าของความลึกรอยกด หรือมีมากพอที่ไม่ทำให้ผิวด้านหลังของชิ้นงานทดสอบเกิดการเสียรูปทรง

ระยะห่างของจุดศูนย์กลางรอยกดกับจุดศูนย์กลางรอยกดถัดไปหรือจากขอบของชิ้นงานทดสอบควรมีระยะไม่น้อยกว่า 3 มิลลิเมตร

การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี เหมาะกับการทดสอบวัสดุแข็ง เช่น เหล็กกล้าชุบแข็ง ค่าความแข็งที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแบบรอกเวลล์ซีอยู่ในช่วง 20 – 67 HRC

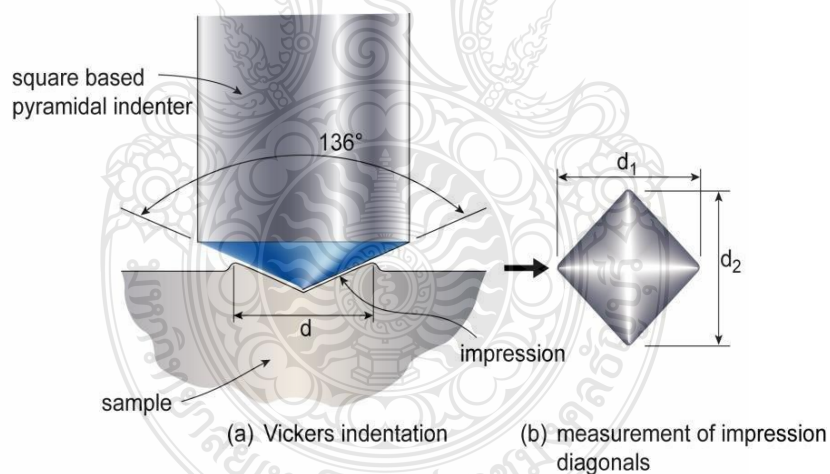
การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ปี เหมาะกับการทดสอบโลหะอ่อน เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อลูมิเนียม และทองแดง เป็นต้น ค่าความแข็งที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแบบรอกเวลล์ปีอยู่ในช่วง 35 – 100 HRB

การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์เอก็มีขั้นตอนเหมือนกับการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี แต่จะใช้แรงกดหลักต่ำกว่า คือ 60 Kgf ด้วยน้ำหนักกดที่น้อยกว่านี้เอง ทำให้รอยกด

ของการทดสอบกับวัสดุเดียวกันดีกว่าเมื่อเทียบกับรอกก์เวลล์ซีและจึงสามารถวัดความแข็งของวัสดุได้ในช่วงที่กว้างกว่าตั้งแต่โลหะอ่อนจนถึงเซรามิกส์ซึ่งมีความแข็งสูง แต่ข้อเสียในทางกลับกันก็คือความละเอียดในการแจกแจงระดับความแข็งจะหยากกว่าเล็กน้อย เช่น ความแข็งในระดับ 28 และ 30 รอกก์เวลล์ซี อาจวัดแล้วได้ค่าไม่ต่างกันถ้าวัดด้วยรอกก์เวลล์เอ อย่างไรก็ตามรอกก์เวลล์เอสามารถใช้ทดสอบความแข็งของชิ้นงานบางที่ความหนาต่ำสุดน้อยกว่ากรณีรอกก์เวลล์ซีทั้งนี้ขึ้นกับค่าความแข็งของวัสดุด้วย ถ้าความแข็งมารอยกดจะตื้นและความหนาต่ำสุดที่จะทดสอบได้ก็จะมีค่าน้อย

3) การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)

หลักการ เป็นการวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม 136 องศาฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบด้วยแรงกด F ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 – 120 Kgf โดยกดลงตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน การเคลื่อนที่ของหัวกดที่กดลงบนชิ้นงานจะใช้เวลา 15 วินาที แต่จะคงค่าแรงกดไว้อีกระยะหนึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น เหล็กกล้าจะคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที ในขณะที่วัสดุอ่อนจะคงแรงกดไว้นานกว่า เมื่อหัวกดถูกยกขึ้น รอยกดที่เกิดขึ้นจะถูกวัดขนาดโดยการวัดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 ด้วยความละเอียดการวัด 0.002 มิลลิเมตร ดังรูป ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (d) จะถูกนำไปคำนวณค่าความแข็งดังนี้



รูปที่ 2.8 การวัดค่าความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรทรงพีรามิดมุม 136 องศา [15]
สมการที่ (2.5)

$$\begin{aligned}
 \text{ความแข็งวิกเกอร์} &= \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่ผิวรอยกด}} & (2.5) \\
 &= \frac{0.102F \times 2 \cos 22^\circ}{d^2} \\
 &= \frac{0.189F}{d^2}
 \end{aligned}$$

เช่นเดียวกับการวัดความแข็งแบบบริเนลล์ ค่าความแข็งจะถูกคำนวณไว้แล้วที่ความยาวรอยกดและแรงกดขนาดต่าง ๆ ในรูปของตาราง หรืออาจมีการแสดงค่าความแข็งด้วยระบบอัตโนมัติเป็นตัวเลขจากเครื่องทดสอบโดยตรง หน่วยความแข็งคือ HV หรือ VHN

ข้อดี หัวกดมีขนาดเล็กและแรงที่ใช้กดต่ำ รอยกดจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าเกรนของโลหะ จึงสามารถวัดความแข็งได้ถึงระดับโครงสร้างจุลภาค เหมาะกับงานทดสอบที่ต้องการความละเอียดของค่าความแข็งสูง สามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง

ข้อเสีย ต้องเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบและสะอาดมากในระดับที่สามารถส่องดูผิวเรียบภายใต้กำลังขยาย 40X ได้ ต้องไม่มีคราบน้ำมัน รอยขีดข่วน หรือฟิล์มออกไซด์ อยู่บนผิวชิ้นงานทดสอบ

ข้อจำกัด ความหนาของชิ้นงานทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 1.2 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรอยกดกับขอบชิ้นงานทดสอบหรือขอบของรอยกด ควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกดมีผลต่อสมบัติของแดงบริสุทธิ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการแช่เยือกแข็งแบบลึกต่อสมบัติของเหล็กประเภทต่าง ๆ [16] การบำบัดด้วยความเย็นสามารถแปลงออสเทนไนต์ที่กักเก็บไว้เป็นมาร์เทนไซต์พร้อมกับการตกตะกอนของคาร์ไบด์ และด้วยเหตุนี้จึงช่วยเพิ่มความทนทานต่อการสึกหรอเมื่อเปรียบเทียบกับกรอบชุบด้วยความร้อนแบบทั่วไปของเหล็ก นอกจากนี้ยังเพิ่มความเค้นตกค้างในส่วนประกอบซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนมีอายุการใช้งานดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ดำเนินการเพื่อเปิดเผยกลไกของการบำบัดด้วยการแช่เยือกแข็งระดับลึกที่สัมพันธ์กับวัสดุต่าง ๆ สถานะการปรับสภาพและสมบัติของเหล็กสำหรับการใช้งานจริง

อิทธิพลของการรักษาความเย็นลึกในโครงสร้างจุลภาคสมบัติเชิงกลและสมบัติการสึกหรอของ Cubeizer โลหะผสมที่ศึกษา ตัวอย่างที่ถูกสัมผัสกับความเย็นที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันแช่เวลา 0.5 ชั่วโมง 16 ชั่วโมง 48 ชั่วโมงและ 72 ชั่วโมง โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ผลการศึกษาพบว่า มีรูปร่างที่แตกต่างกันในเมทริกซ์อัลฟาซึ่งมีรูปร่างที่แตกต่างกัน หลังจากข้อมูลปริมาณและขนาดเพิ่มขึ้นของเวลาการเก็บรักษาความร้อนเนื่องจากความแตกต่างระหว่างการหดตัวทางความร้อนและการขยายตัวของชิ้นตอนที่แตกต่างกัน ความเครียดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการปรับปรุงสมบัติโลหะด้วยความเย็นเยือกแข็ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค พบว่าความเค้นตกค้างสูงสุดเมื่อเวลาแช่ยาวนานที่สุด การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุ ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของ DCT เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด กับการเพิ่มขึ้นของ DCT

รอบความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย การลดลงของพื้นผิวความแข็งแรงสูงสุดเพิ่มขึ้น 17 % และ 49% ในแง่เวลา 72 ชั่วโมง หลังจากข้อมูลเกินกว่าสี่ชั่วโมงผลกระทบความเข้มของการทดสอบอัตราส่วนความร้อนลดลงประมาณห้าสิบเปอร์เซ็นต์ การวิเคราะห์การแตกหักของตัวอย่างที่ไม่ใช่ DCT และ DCT พบว่ามีรอยแตกบนพื้นผิวที่มีความเสียหายที่แตกต่างกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการต้านทานการแตกหักลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยการกระจายตัวของตะกอนตามขอบเกรน ค่าการนำความร้อนยังถูกตรวจสอบโดยใช้การวิเคราะห์เลเซอร์แฟลชเพื่อตรวจสอบ พบว่าการเสื่อมสภาพหลังจากการนำความร้อนเป็นสมบัติที่สำคัญมากสำหรับการใช้งานมากที่สุดของทองแดงเบริลเลียมอัลลอย ในช่วงอุณหภูมิของ 300 °C ถึง 600 °C ในชั่วโมงที่ 24 และชั่วโมงที่ 72 ตัวอย่างที่ไม่ใช่ DCT และ DCT จะถูกทดสอบในทุกกรณีของการศึกษาความแตกต่างเล็กน้อยในค่าการนำความร้อนพบว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช่ DCT หลังจาก 72 ชั่วโมงเพิ่มขึ้นประมาณ 5 %

2.2.2 เทคนิคใหม่ของการรักษาความเย็นในอุตสาหกรรม [17]

ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติของเครื่องมือและส่วนประกอบต้านทานการสึกหรอและความล้าได้ กระบวนการเหล่านี้สามารถใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุต่าง ๆ บางส่วนของการใช้งานที่น่าสนใจมากขึ้นของเทคโนโลยีใหม่นี้ ไม่เพียงแต่หลายเครื่องมือที่ใช้ในการกับเกียร์ ประสิทธิภาพของชิ้นส่วนดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด การรักษาอุณหภูมิต่ำยังสามารถเพิ่มความต้านทานการสึกหรอและความล้าของส่วนประกอบ เช่น เกียร์ ฯลฯ ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งหมายความว่ากระบวนการนี้สามารถเป็นเครื่องมือที่มีคุณค่าสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของชิ้นส่วนของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าและลดน้ำหนักการรักษาแบบหลายขั้นตอนใหม่เป็นอุณหภูมิต่ำกระบวนการที่ส่งวัสดุที่อุณหภูมิต่ำหลายขั้นตอนหรือช่วงที่อุณหภูมิถึง 180 °C ผลกระทบนี้เป็นแบบถาวรและมีผลต่อคุณภาพโดยรวมของชิ้นส่วน มันเป็นกระบวนการที่ประหยัดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่ไม่ผลิตของเสีย งานวิจัยนี้จะแนะนำเกี่ยวกับการรักษาอุณหภูมิต่ำและอธิบายถึงหน้าที่หลักและการประยุกต์ใช้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการผลิตของเกียร์ โครงการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเขตข้อมูลที่ระบุไว้ในบทความนี้ การใช้เทคโนโลยีนี้จะนำประโยชน์มหาศาลต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การปรับปรุงโดยตรงในสมบัติของวัสดุมีผลกระทบโดยตรงต่อต้นทุนและผลผลิตของบริษัทอุตสาหกรรม

2.2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิการแช่แข็งบนวัสดุ [18] ได้รับการตรวจสอบในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ผลที่ได้คือการบำบัดด้วยความเย็นทางอุตสาหกรรมแบบใหม่ที่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งความทนทานต่อการสึกหรอและอายุการใช้งานที่ล้า) ของเครื่องมือและส่วนประกอบต่าง ๆ ได้รับการพัฒนา กระบวนการเหล่านี้สามารถใช้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของวัสดุประเภทต่าง ๆ ได้ แอปพลิเคชันที่น่าสนใจบางอย่างของเทคโนโลยีใหม่นี้อยู่ในด้านการส่งสัญญาณ ไม่เพียงแต่เครื่องมือจำนวนมากที่ใช้สำหรับการตัดเฟือง (เตา เครื่องตัด เจาะ) เท่านั้นที่แสดงให้เห็นถึง

ประสิทธิภาพการทำงานที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การบำบัดด้วยการแช่แข็งยังสามารถเพิ่มความทนทานต่อการสึกหรอและความล้า (ซึ่งเชื่อถือได้) ของชิ้นส่วนเกียร์ (เฟือง เฟืองขับ) ได้อย่างมีนัยสำคัญ (ขึ้นวาง) ทำจากเหล็กกล้าคาร์บไรซ์ ซึ่งหมายความว่ากระบวนการที่เป็นนวัตกรรมนี้สามารถเป็นเครื่องมืออันมีค่าสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของส่วนประกอบระบบส่งกำลังและเพื่อการลดน้ำหนัก

2.3 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีเปิดการเรียนการสอนใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) วิชาเอก 1) วิศวกรรมระบบการผลิตอัตโนมัติ (Automation Production System Engineering) 2) วิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ (Industrial and Logistics Engineering) และหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต (Master of Engineering Program in Industrial and Manufacturing Engineering)

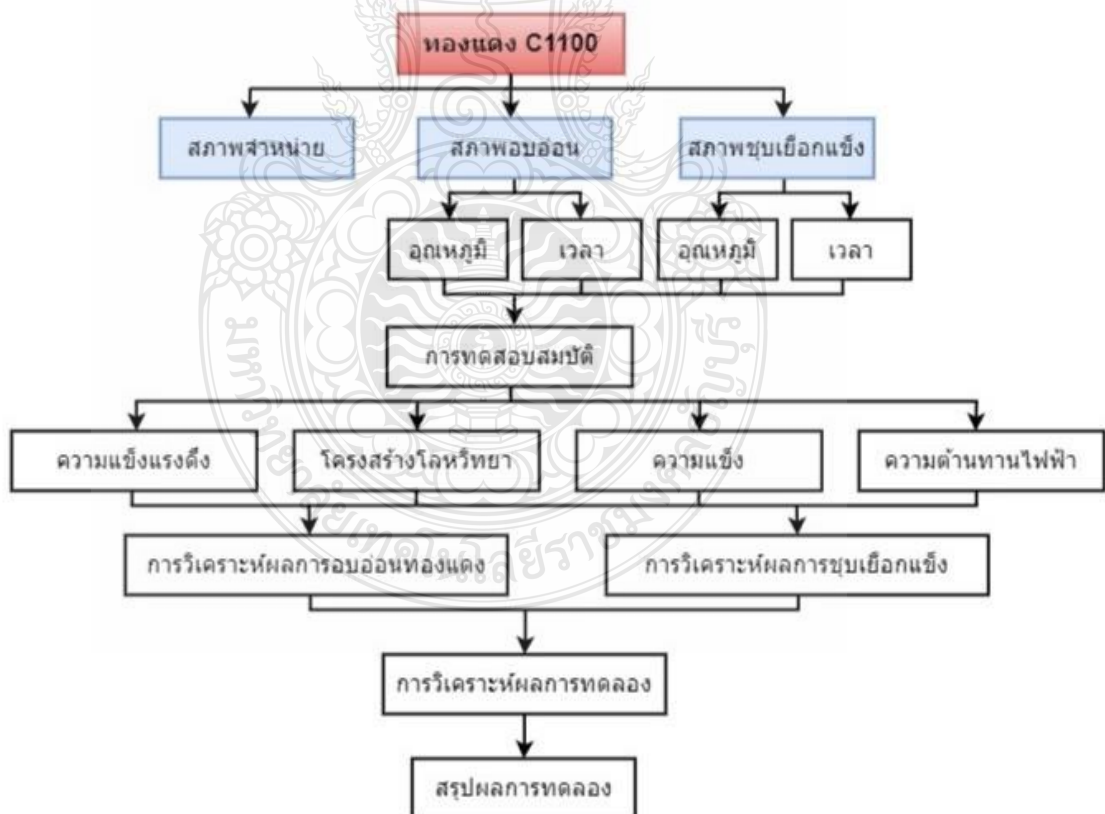
ได้มุ่งเน้นการพัฒนาทางด้านการเรียนการสอนและงานวิจัยมุ่งผลิตวิศวกรอุตสาหการที่มีทักษะอย่างสูงในเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต สามารถออกแบบพัฒนาวางแผนควบคุมจัดการ และประเมินผลระบบโดยรวมการลดเวลาการปฏิบัติงานค่าใช้จ่ายวัสดุพลังงาน และทรัพยากรอื่น ๆ การควบคุมคุณภาพการประกันคุณภาพการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน รวมถึงเทคนิคในการจัดการทางวิศวกรรมโอกาสด้านวิชาชีพและเป็นผู้ดำเนินการผลิต วิศวกรอุตสาหการนักปฏิบัติมืออาชีพ ผู้มีความพร้อมด้านวิชาการ สามารถปฏิบัติได้ มีทักษะ การสื่อสาร จรรยาบรรณ คุณธรรม จริยธรรม ระเบียบวินัย ความซื่อสัตย์สุจริต ขยันหมั่นเพียร รับผิดชอบต่อหน้าที่สังคมส่วนรวมเพื่อประโยชน์ของประเทศไทย และมีทัศนคติที่ดีต่อวิชาชีพวิศวกรรมอุตสาหการในระดับภูมิภาคอาเซียน [24]

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

จากการศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้ออกแบบการดำเนินการวิจัย ศึกษาอิทธิพลตัวแปรการชုပ်เยือกแข็งที่มีผลต่อสมบัติแผ่นรีดทองแดงบริสุทธิ์ โดยประยุกต์ให้เป็นการชုပ်เยือกแข็งทองแดง C1100 จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติความต้านทานไฟฟ้า ความแข็งแรงดึง โครงสร้างโลหะวิทยาของทองแดงบริสุทธิ์อ่อนที่ C1100 เพื่อให้ได้ผลการทดลองมีขั้นตอนในการดำเนินการ ดังนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

งานวิจัยเรื่อง อิทธิพลตัวแปรการชုပ်เยือกแข็งที่มีผลต่อสมบัติแผ่นรีดทองแดงบริสุทธิ์ที่มีแผนการดำเนินการทดลองดังรูปที่ 3.1 และมีการดำเนินการวิจัยดังนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการ “การศึกษาอิทธิพลการอบชุบด้วยความร้อนและความเย็นที่มีผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ C1100”

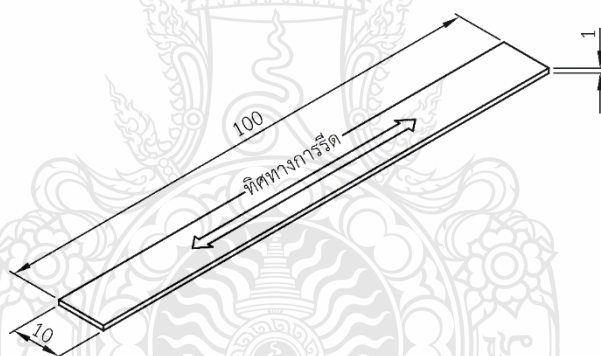
ภาพรวมการทดลอง “การศึกษาอิทธิพลการอบชุบด้วยความร้อนและความเย็นที่มีผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ C1100” แสดงดังรูปที่ 3.1 และมีรายละเอียดของการดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้

3.2 วัสดุทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ แผ่นรีดทองแดงบริสุทธิ์เกรด C1100 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1 ชิ้นงานแผ่นรีดถูกเตรียมให้มีลักษณะเป็นเป็นแผ่นรีด ที่มีความกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.2 ผิวของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง เป็นผิวในสภาพจำหน่ายไม่มีการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงก่อนการดำเนินการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของทองแดงบริสุทธิ์เกรด C1100

ธาตุ	Cu (wt%)	P (wt%)	S (wt%)
C1100	99.998	0.001	0.001



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานทดสอบ (หน่วย: มิลลิเมตร)

3.3 กระบวนการผลิตชิ้นทดสอบ

3.3.1 การอบอ่อน

ชิ้นทดสอบที่มีรูปร่างและขนาดดังรูปที่ 3.2 ถูกนำเข้าสู่กระบวนการทดลองในเบื้องต้นถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

- 1) กลุ่มที่ 1 คือ สภาพจำหน่าย ในกลุ่มนี้ ชิ้นงานจะไม่ผ่านการดำเนินการใด ๆ ทั้งสิ้น และถูกใช้เป็นสภาวะอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบสมบัติที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการอบอ่อน
- 2) กลุ่มที่ 2 คือ สภาพการอบอ่อน ชิ้นงานจะถูกนำไปอบให้ความร้อนในเตาอบชุบดังรูปที่ 3.2 โดยมีวิธีการเปลี่ยนแปลงความร้อนดังแผนภาพอุณหภูมิ-เวลา-ขั้นตอน (Time-

Temperature-Sequence diagram: TTS diagram) ดังรูปที่ 3.4 ประกอบด้วยตัวแปรการอบอุ่น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- อัตราการให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิการอบอุ่น (t_0-t_1) เท่ากับ 1 องศาเซลเซียสต่อ 1 นาที หรือเวลารวมการให้ความเย็น (t_0-t_1) เท่ากับ 120 นาที
- อุณหภูมิการอบอุ่น (T_1) เท่ากับ 350 450 550 และ 650 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
- ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอ่อนผิวเคลือบและเส้นลวดทองแดงบริสุทธิ์ [19,20] และข้อมูลแนะนำโดยสมาคมโลหะแห่งอเมริกา [21]
- เวลาในการอบแช่ (t_1-t_2) เท่ากับ 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที เวลาในการอบแช่ถูกกำหนดตั้งพื้นฐานการอบแช่ที่คิดจากความหนา 25 มิลลิเมตรต่อหนึ่ง ชั่วโมง [11] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.24 วินาที โดยคำนวณจากสูตรที่ (3.1)

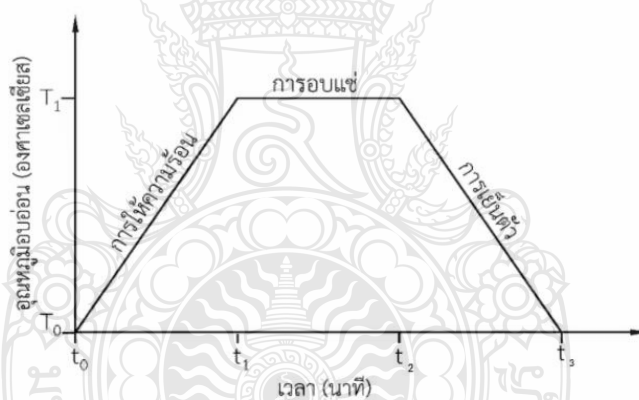
$$\begin{aligned}
 25 \text{ มิลลิเมตร} &= 60 \text{ นาที} & (3.1) \\
 1 \text{ มิลลิเมตร} &= \frac{1 \times 60}{25} \\
 &= 2.4 \text{ นาที หรือ } 144 \text{ วินาที}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.2 จำนวนชั้นทดสอบที่ตัวแปรการอบอุ่นในการทดลอง

อุณหภูมิ เวลา	350 °C	450 °C	550 °C	650 °C
5 นาที	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น
10 นาที	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น
15 นาที	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น
20 นาที	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น
25 นาที	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น
30 นาที	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น
35 นาที	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น
40 นาที	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น
45 นาที	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น
50 นาที	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น
55 นาที	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น
60 นาที	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น	4 ชั้น



รูปที่ 3.3 เตาอบอ่อนชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ที่ยี่ห้อ Nerberthem รุ่น N 60A



รูปที่ 3.4 แผนภาพอุณหภูมิ-เวลา-ขั้นตอนสำหรับการอบอ่อนทองแดงบริสุทธิ์ C1100

3.3.2 การชุบเยือกแข็ง

ในการชุบเยือกแข็ง ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนถูกนำมาชุบเยือกแข็ง 2 ลักษณะ คือ การชุบเยือกแข็งในเตาชุบเยือกแข็ง และการชุบเยือกแข็งด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1) กลุ่มที่ 1 คือ ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อน ใช้เป็นชิ้นงานอ้างอิง และไม่นำไปผ่านการชุบเยือกแข็ง

2) กลุ่มที่ 2 คือ กลุ่มชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนและถูกนำไปทำการชุบเยือกแข็งใน ชิ้นงานกลุ่มที่ 2 คือ ที่ผ่านการอบอ่อน ถูกนำไปชุบเยือกแข็งในเตาชุบเยือกแข็งดังรูปที่ 3.5 และ

นำไปจุ่มในถังไนโตรเจนเหลวดังรูปที่ 3.6 โดยวิธีการเปลี่ยนแปลงความเย็นดังแผนภาพอุณหภูมิ-เวลา-ขั้นตอน ในรูปที่ 3.7 ที่ประกอบด้วยตัวแปรการชุบเยือกแข็ง ดังนี้

- อัตราการให้ความเย็นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิจุบเยือกแข็ง (t_0-t_1) เท่ากับ 1 องศาเซลเซียสต่อ 1 นาที หรือเวลารวมการให้ความเย็น (t_0-t_1) เท่ากับ 120 นาที
- อุณหภูมิจุบเยือกแข็ง (T_1) เท่ากับ -196 องศาเซลเซียส
- เวลาในการอบแช่ที่อุณหภูมิจุบเยือกแข็ง (t_1-t_2) เท่ากับ 12 24 36 48 60 72 และ 84 ชั่วโมงตามลำดับ [22]
- การเย็นตัวจากอุณหภูมิจุบเยือกแข็งถึงอุณหภูมิห้อง (t_2-t_3) เกิดขึ้นในเตาชุบเยือกแข็ง

ตารางที่ 3.3 จำนวนชิ้นทดสอบที่ตัวแปรการชุบเยือกแข็งของแดงบริสุทธิ์ C1100

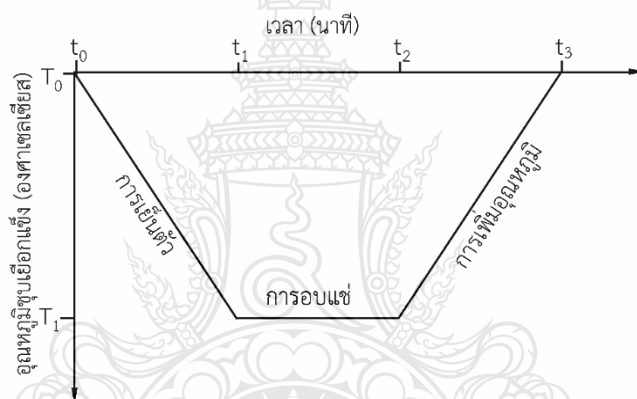
เวลา	12	24	36	48	60	72	84
อุณหภูมิ	ชั่วโมง	ชั่วโมง	ชั่วโมง	ชั่วโมง	ชั่วโมง	ชั่วโมง	ชั่วโมง
$-196\text{ }^{\circ}\text{C}$	4 ชิ้น	4 ชิ้น	4 ชิ้น	4 ชิ้น	4 ชิ้น	4 ชิ้น	4 ชิ้น



รูปที่ 3.5 เตาชุบเยือกแข็งยี่ห้อ AVEIS รุ่น AV-CM100



รูปที่ 3.6 ถังไนโตรเจนเหลว ขนาด 25 ลิตร



รูปที่ 3.7 แผนภาพอุณหภูมิ-เวลา-ขั้นตอนสำหรับการซูเปอร์เอือกแข็งของแก๊สไนโตรเจน C1100

3.4 การทดสอบสมบัติขั้นทดสอบ

ชิ้นส่วนในสภาพจำหน่าย ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อน ชิ้นงานที่ผ่านการซูเปอร์เอือกแข็งด้วยขั้นตอนดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.2 ถูกนำมาทำการตรวจสอบสมบัติเพื่อหาค่าตัวแปรการปรับปรุงสมบัติที่เหมาะสมที่ก่อให้เกิดสมบัติตามต้องการประกอบการตรวจสอบความต้านทานไฟฟ้า การทดสอบความแข็ง การทดสอบความแข็งแรงดึง และการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา ซึ่งมีรายละเอียดของการดำเนินการ ดังนี้

3.4.1 การตรวจสอบความต้านทานไฟฟ้า

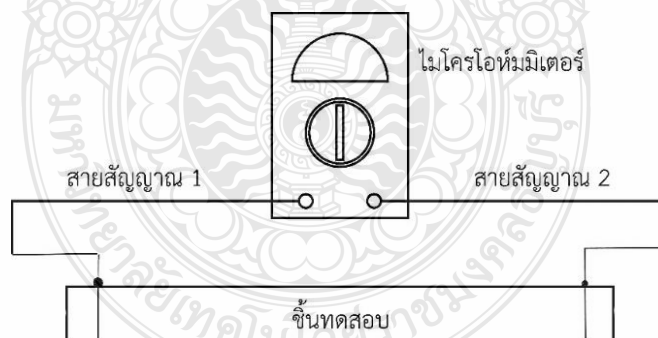
ขั้นทดสอบที่มีรูปร่างและขนาดดังรูปที่ 3.2 ถูกนำมาทำการวัดความต้านทานไฟฟ้า โดยการใช้ไมโครโอห์มมิเตอร์ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยการต่อวงจรของเครื่องวัดไมโครโอห์มมิเตอร์เข้ากับชิ้นงานดังรูปที่ 3.9 ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ได้ คือ ตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการนำ

ไฟฟ้าของชิ้นส่วนทองแดง ด้วยเหตุนี้ความต้านทานไฟฟ้าควรมีค่าต่ำเพื่อการนำไฟฟ้าที่ดี โดยมีการเตรียมชิ้นงาน ดังนี้

- 1) ทำการเตรียมผิวชิ้นงานโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 150 ขัดผิวชิ้นงานออก 1 ด้าน
- 2) ทำการวัดระยะเข้ามาฝั่งละ 1 เซนติเมตร
- 3) จากนั้นให้นำเครื่องมาวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ที่ตำแหน่งที่วัดกำหนดระยะไว้
- 4) ให้วัดซ้ำ 3 ครั้ง ที่จุดเดิมหรือจุดใหม่แต่ห่างกันเล็กน้อย เพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความต้านทานไฟฟ้า ยี่ห้อ Megger รุ่น DLRO10

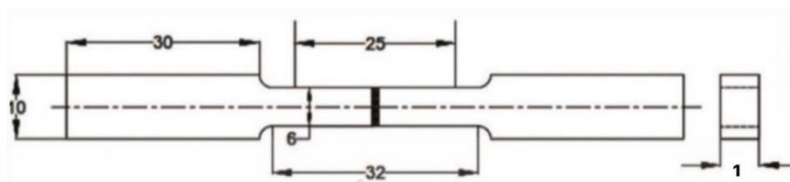


รูปที่ 3.9 วงจรการวัดความต้านทานไฟฟ้า

3.4.2 การทดสอบความแข็งแรงดึง

ชิ้นทดสอบดังรูปที่ 3.10 หลังจากผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนและความเย็นแล้วถูกนำมาทำการทดสอบความแข็งแรงดึง ชิ้นทดสอบถูกกำหนดขึ้นตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุแห่งอเมริกา หมายเลข ASTM E8 โดยมีขนาดและรูปร่างดังรูปที่ 3.10 ชิ้นทดสอบถูกทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึงยี่ห้อ GOTECH รุ่น GT-7001-LAC50 ดังรูปที่

3.11 โดยใช้อัตราการเกิดความเครียด (Strain rate) หรือความเร็วในการดึงทดสอบเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ต่อนาที



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างชิ้นงานมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงดึง (หน่วย : มิลลิเมตร) [16]



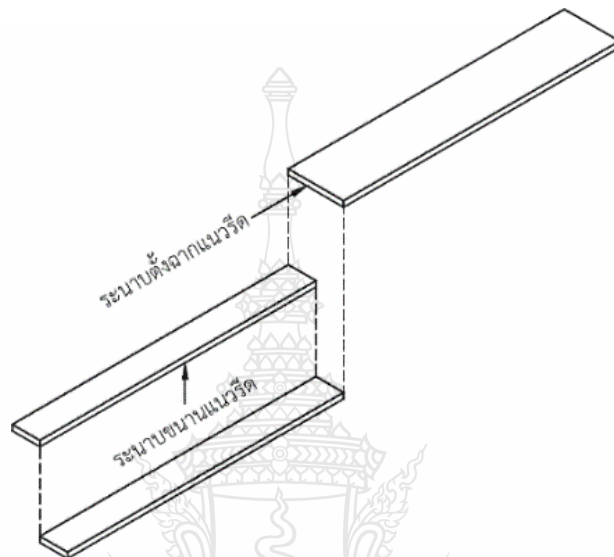
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง

3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา

1) การตัดชิ้นทดสอบ

ชิ้นงานทองแดงที่ได้ถูกนำมาทำการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยาด้วยการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ในการทดลองนี้กำหนดให้ตำแหน่งของการตรวจสอบในตำแหน่งระนาบที่ขนานกับด้านความยาวของชิ้นทดสอบ และตำแหน่งระนาบที่ตั้งฉากกับด้านความยาวของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 3.12

การตัดชิ้นทดสอบทำได้โดยใช้เครื่องตัดชิ้นส่วนโครงสร้างจุลภาคด้วยใบเสียดสีความเร็วสูง (High Speed Abrasive Wheel Cutting Machine) ที่มีการหล่อเย็นขณะทำการตัดที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.13 เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบเนื่องจากความร้อนในการตัด



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการตัดชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.13 เครื่องตัดชิ้นส่วนโครงสร้างจุลภาคด้วยใบเสียดสีความเร็วสูง

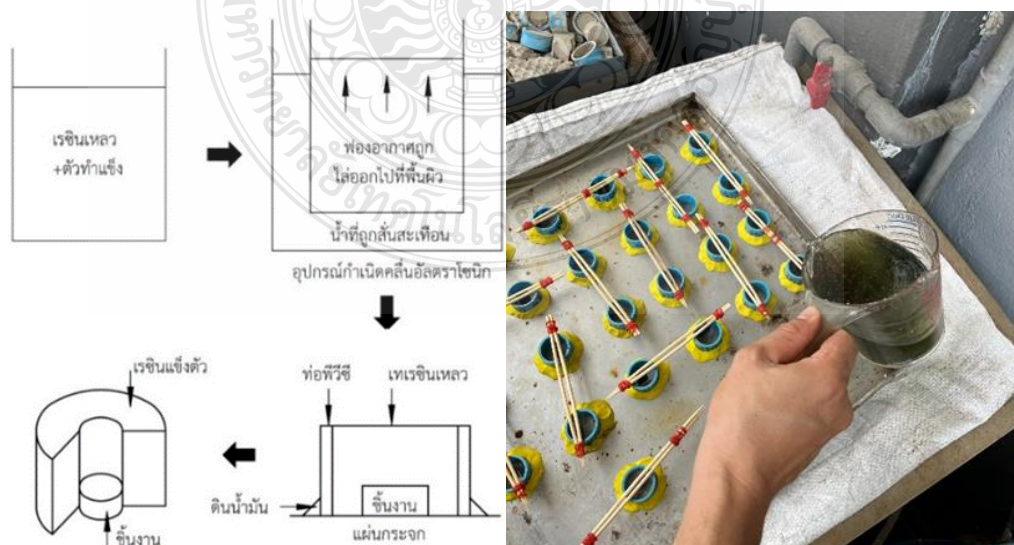
2) การหล่อตัวเรือนประคองชิ้นงาน

ชิ้นงานขนาดเล็กที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นส่วนโครงสร้างจุลภาคด้วยใบเสียดสีความเร็วสูงนั้นส่งผลทำให้มีความลำบากในการเตรียมผิวหน้าขึ้นทดสอบสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยาด้วยเหตุนี้การทำตัวเรือนประคองชิ้นงานเพื่อช่วยในการขัดและการตรวจสอบจึงมีความสำคัญที่ต้องดำเนินการ

การทำตัวเรือนประคองชิ้นงานแบบเย็นถูกเลือกใช้ในการทดลองและกำหนดให้ขนาดของตัวเรือนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร การขึ้นรูปตัวเรือนประคองชิ้นงานแบบเย็นนั้นใช้พอลิเอสเตอร์หรือ “เรซินหล่อ” เนื่องจากชิ้นงานทดสอบมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถเข้าเครื่องอัดเบกาไลท์ ชุดของเรซินหล่อประกอบด้วยเรซินเหลว (พอลิเอสเตอร์) และตัวทำให้แข็ง (Hardener) เรซินหล่อถูกนำไปใช้ในการเคลือบรูปพลาสติก หล่อตุ๊กตา หรือโมเดลต่าง ๆ ขั้นตอนในการทำการหล่อตัวเรือนช่วยขัดมีลักษณะดังรูปที่ 3.14 ดังนี้

- เรซินเหลวจะถูกผสมรวมเข้าด้วยกันกับตัวทำให้แข็งในสัดส่วนที่กำหนด (หากใส่ตัวทำให้แข็งน้อยเกินไปเรซินจะแข็งตัวช้า แต่ถ้าใส่ตัวทำให้แข็งมากเกินไปเรซินจะแข็งตัวอย่างรวดเร็วและทำให้อยู่ในรูปพลาสติกที่เปราะ)

ทาซีผึ้งหรือเจลใสทอประปาพีวีซีก่อนนำชิ้นงานมาไว้ในตำแหน่งกึ่งกลางของท่อประปาพีวีซี เพื่อป้องกันการถอดแบบยาก หลังจากนั้นนำท่อประปามายึดกับภาตสแตนเลสด้วยดินน้ำมันเพื่อป้องกันการรั่วซึมของเรซินเหลวที่จะถูกเทลงไป เมื่อยึดท่อกับภาตสแตนเลสแล้วให้นำชิ้นงานมาไว้ตรงตำแหน่งที่ต้องการ หลังจากนั้นให้ทำการเทเรซินเหลวที่ไล่ฟองอากาศแล้วมาเทใส่แบบ



รูปที่ 3.14 แผนภาพการขึ้นรูปตัวเรือนแบบเย็น

3) การขัดหยาบ

3.1) ขั้นตอนการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเริ่มต้นขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150-300-500-800-1500 และการขัดหยาบกระดาษทรายถูกติดเข้ากับแผ่นกระจกแล้วปล่อยให้แห้งไหลผ่านตำแหน่งการขัดดังรูปที่ 3.15

3.2) การเริ่มขัดเริ่มจากการกดตัวเรือนช่วยประคองการขัดที่ตำแหน่งด้านบนของชิ้นทดสอบลงมาด้านล่าง และทำซ้ำกันจนกระทั่งผิวหน้าของชิ้นงานมีความเรียบเป็นระนาบเดียวกันดังรูปที่ 3.14

3.3) เมื่อทำการเปลี่ยนการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายในเบอร์ที่สูงกว่า เช่น การเปลี่ยนจากเบอร์ 150 เป็นเบอร์ 400 1000 หรือ 1500 ตามลำดับ ควรมีการหมุนทิศทางการขัดทำมุม 90 องศาบ้างรอยขัดก่อนหน้า

3.4) ในการขัดแต่ละครั้ง ให้ขัดจนกระทั่งรอยกระดาษทรายในการขัดก่อนหน้าหายไปทั้งหมด จึงจะถือว่าการขัดขั้นตอนดังกล่าวสมบูรณ์



รูปที่ 3.15 การขัดหยาบด้วยกระดาษทราย

4) การขัดละเอียดด้วยผงขัด

4.1) การขัดละเอียด คือ การขัดผิวหน้าที่ผ่านการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ที่ละเอียดสุดด้วยผงเพชรที่มีความละเอียดประมาณ 1 - 3 ไมโครเมตร บนผ้าสักหลาด

4.2) ในการขัดละเอียดด้วยผงขัดถูกดำเนินการบนจานหมุนดังรูปที่ 3.16 ที่ความเร็วรอบประมาณ 150 - 200 รอบต่อนาที

4.3) ในการเติมผงขัดลงบนผ้าสักหลาดในชั้นตอนสุดท้าย ควรเติมผงขัดในจำนวนไม่มากเกินไป เพราะหากใส่มากเกินไป ผงขัดจะทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนผิวหน้าของชิ้นทดสอบได้ นอกจากนี้เมื่อทำการขัดต้องมีการเติมสารหล่อลื่นลงไปขณะทำการขัดด้วย สารหล่อลื่นนี้มีส่วนประกอบหลัก คือ แอลกอฮอล์



รูปที่ 3.16 ทิศทางการขัดมันชิ้นทดสอบ

5) การกัดชิ้นรอยขอบเกรน [23]

การกัดผิวหน้า (Etching) ชิ้นงานที่ผ่านการขัดมัน คือ การแสดงรายละเอียดของเกรนหรือเฟสในตำแหน่งที่ต้องการตรวจสอบ เทคนิคในการกัดผิวหน้าแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการ คือ การกัดด้วยวิธีการทางเคมี และการกัดด้วยวิธีการไฟฟ้าเคมี ในการทดลองนี้ใช้เทคนิคการกัดด้วยสารเคมี โดยสารเคมีที่ใช้ในการกัด คือ สารละลายที่ประกอบด้วย FeCl_3 จำนวน 25 กรัม + HCL จำนวน 25 มิลลิลิตร + น้ำ 100 มิลลิลิตร การกัดผิวหน้านี้ทำได้โดยการจุ่มสารละลายด้วยก้านสำลี และนำมาเช็ดบนพื้นผิวจำนวน 16 - 60 ครั้ง หรือ 16 - 60 วินาที

6) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ระนาบที่ผ่านการกัดชิ้นรอยถูกนำมาทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงดังรูปที่ 3.17 เพื่อทำการตรวจสอบเกรน เฟส และรายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทองแดงที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนและความเย็น



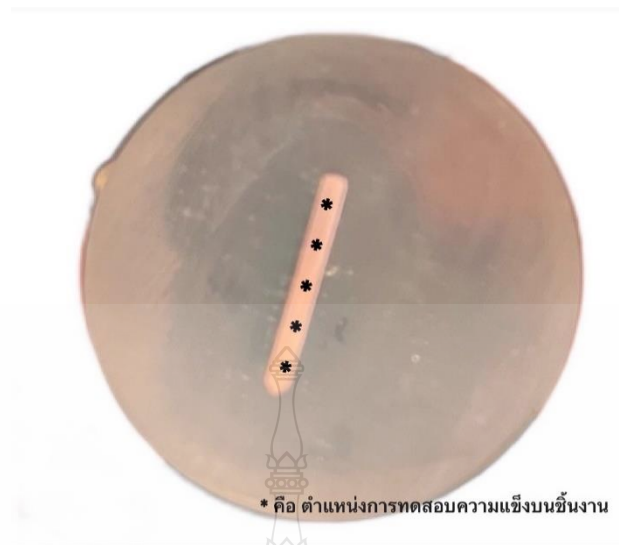
รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงกำลังขยายระหว่าง 50-1000 เท่า

3.4.4 การทดสอบความแข็ง

ชิ้นงานทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคถูกนำมาทำการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมทำได้โดยใช้การทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ดังรูปที่ 3.18 แบบสุ่มจำนวน 5 จุดดังรูปที่ 3.19 โดยกำหนดให้ใช้แรงกดทดสอบที่ 10 gf และเวลากดแช่ 10 วินาที



รูปที่ 3.18 เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์

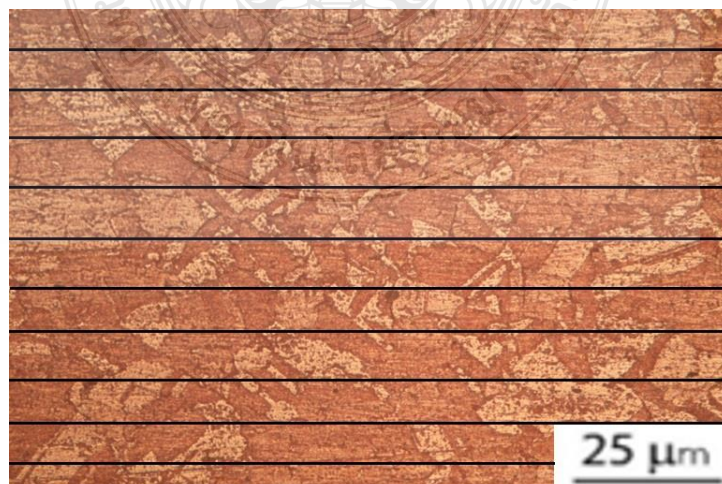


รูปที่ 3.19 ตำแหน่งการทดสอบชิ้นงาน

3.4.5 การวัดขนาดเกรน

หลังจากได้ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ให้นำโครงสร้างจุลภาคของทองแดงบริสุทธิ์ที่วัดขนาดเกรน ตาม ASTM E112-Grain Size Measurement Liner Interception โดยให้ลากเส้นตัดโครงสร้างจุลภาคของทองแดงแบบสุ่มดังรูปที่ 3.20 จากนั้นคำนวณขนาดเกรนตามสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$\text{ขนาดเกรน} = \frac{\text{ความยาวของเส้นที่ลากผ่านเกรน}}{\text{จำนวนจุดตัดที่ตัดผ่านเส้น}} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างการลากเส้นตัดโครงสร้างเพื่อวัดขนาดเกรน

ในการทดสอบสมบัติขึ้นทดสอบประกอบด้วย การทดสอบความแข็งแรงดึง (หน่วย MPa) ทดสอบ 3 ชั้น การทดสอบความแข็ง (หน่วย HV) ทดสอบ 5 จุด การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และการทดสอบความต้านทานไฟฟ้า (หน่วย ไมโครโอห์ม) ทดสอบ 3 จุด จากนั้นนำค่าที่ทดสอบแล้วนั้นมาหาค่าเฉลี่ย จึงตั้งสมมติฐานได้ดังนี้

1) เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อนที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงดึง ความแข็งมีค่ามากขึ้น แต่ขนาดเกรนและค่าทดสอบความต้านทานไฟฟ้าลดลง

2) เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไปทำการชุบเยือกแข็ง ทำให้ความแข็งแรงดึง ความแข็งมีค่าลดลง แต่ขนาดเกรนและค่าทดสอบความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

เมื่อทำการอบอ่อน และทดสอบสมบัติของชิ้นงานเสร็จแล้วนั้น เลือกชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งสูงสุด และความต้านทานไฟฟ้าที่ลดลง เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม เพื่อที่จะนำมาทำการชุบเยือกแข็ง



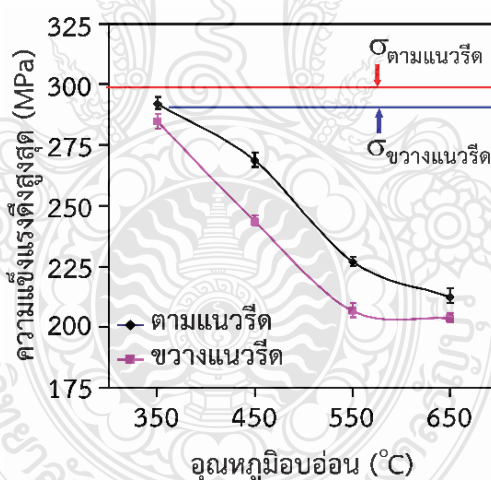
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากวิธีดำเนินการทดสอบสมบัติ ประกอบด้วย การทดสอบความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าแล้วนั้น จึงนำข้อมูลจากผลการทดลอง โดยข้อมูลค่าการทดสอบสมบัติจะแสดงอยู่ในภาคผนวก ก

4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิอบอ่อนต่อสมบัติของทองแดง C1100

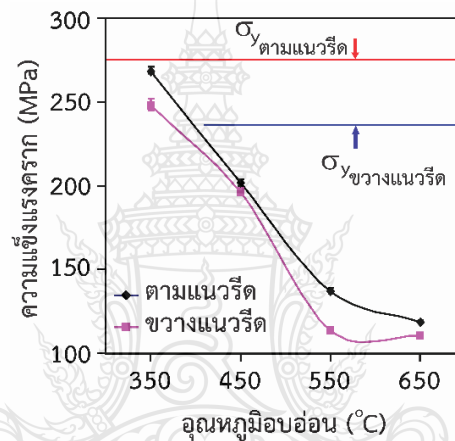
ชิ้นทดสอบทองแดงบริสุทธิ์ C1100 ที่มีความแข็งแรงดึงสูงสุด 298 และ 290 MPa เมื่อทิศทางการให้แรงทดสอบขนานกับแนวทางการรีดและขวางแนวการรีดตามลำดับ ถูกนำไปทำการทดสอบกับชิ้นงานถูกนำไปทำการอบอ่อนด้วยขั้นตอนดังแสดงในบทที่ 3 ที่ประกอบด้วยตัวแปรสำคัญ คือ อุณหภูมิการอบอ่อน 350 - 650 องศาเซลเซียส เวลาในการอบแช่ที่อุณหภูมิการอบอ่อนเท่ากับ 5 นาที ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนได้ถูกนำไปทำการทดสอบสมบัติและได้ผลการทดลองดังนี้



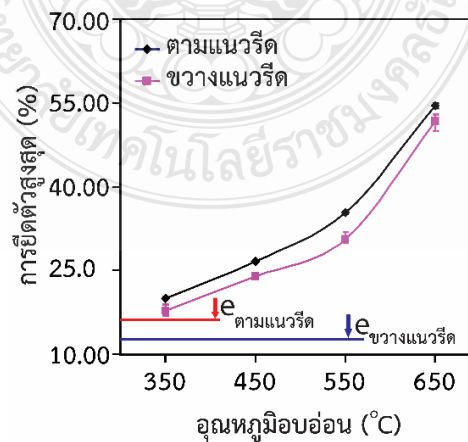
รูปที่ 4.1 ความแข็งแรงดึงสูงสุดของทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350-650 องศาเซลเซียสและเวลาอบแช่ 5 นาที

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นทดสอบทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส ที่เวลาการอบแช่ที่อุณหภูมิการอบอ่อน 5 นาที และความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่า ความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นทดสอบทองแดงแปรผกผันกับอุณหภูมิการอบอ่อน กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนทองแดงเพิ่มขึ้นความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลง ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดลดลงร้อยละ 3 10 28 และ 29 เมื่อ

เปรียบเทียบกับชิ้นงานสภาพจำหน่ายที่มีด้านความยาวขนานกับทิศทางการรีดที่อุณหภูมิอบอ่อน 350 - 650 องศาเซลเซียสตามลำดับ และมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของทองแดงมีค่าลดลง ร้อยละ 3 16 30 และ 32 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานสภาพจำหน่ายที่มีด้านความยาวตั้งฉากกับทิศทางการรีดที่อุณหภูมิอบอ่อน 350 - 650 องศาเซลเซียสตามลำดับ อุณหภูมิอบอ่อน 350 - 650 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางการรีดและการให้แรงของชิ้นทดสอบ ชิ้นงานที่มีด้านความยาวขนานกับทิศทางการรีดแสดงค่าความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานที่มีด้านความยาวขวางกับทิศทางการรีดเท่ากับร้อยละ 2.5 9.4 7.3 และ 4.1 ที่อุณหภูมิอบอ่อน 350 - 650 องศาเซลเซียสตามลำดับ



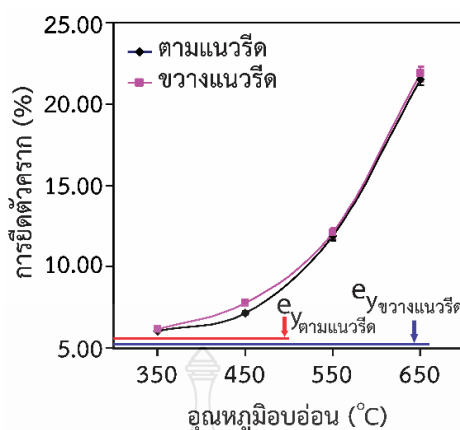
รูปที่ 4.2 ความแข็งแรงครากของทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 นาที



รูปที่ 4.3 การยืดตัวสูงสุดของทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 นาที

เมื่อพิจารณาความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบทองแดงที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิการอบอ่อน 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลาการอบอ่อน 5 นาที ดังผลการทดสอบความแข็งแรงครากดังรูปที่ 4.2 อุณหภูมิการอบอ่อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการลดความแข็งแรงของทองแดงเช่นเดียวกับการลดความแข็งแรงถึงสูงสุดในรูปที่ 4.1 อย่างไรก็ตามความแตกต่างของค่าความแข็งแรงครากมีความแตกต่างกันน้อยกว่าความแตกต่างของความแข็งแรงถึงสูงสุด โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการอบอ่อน 450 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบทองแดงที่มีด้านความยาวขนานกับทิศทางการรีดที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิการอบอ่อน 350 - 650 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบทองแดงสภาพจำหน่ายเท่ากับร้อยละ 2.4 26.7 50.2 และ 56.8 ตามลำดับ และความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบทองแดงที่มีด้านความยาวตั้งฉากกับทิศทางการรีดที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิการอบอ่อน 350 - 650 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบทองแดงสภาพจำหน่ายเท่ากับร้อยละ 1.6 19.5 53.4 และ 54.6 ตามลำดับ ความแข็งแรงครากของทองแดงมีแนวโน้มที่เท่ากันเมื่ออุณหภูมิการอบอ่อนมีค่าสูงเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิการอบอ่อนที่เพิ่มขึ้นสามารถส่งผลทำให้ความแข็งแรงถึงสูงสุดและความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบทองแดงมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อทำการวัดการยืดตัวสูงสุดของชั้นทดสอบความแข็งแรงดังที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิการอบอ่อน 350 - 650 องศาเซลเซียส และแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 4.3 พบว่า อุณหภูมิการอบอ่อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ทองแดงสามารถรีดยาวได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับทองแดงในสภาพจำหน่ายพบว่าชั้นทดสอบทองแดงที่มีด้านยาวขนานกับทิศทางการรีดและผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียสมีค่าการยืดตัวมากขึ้นร้อยละ 25.4 66.9 221.7 และ 240 ตามลำดับ ขณะที่ชั้นทดสอบทองแดงที่มีด้านยาวตั้งฉากกับทิศทางการรีดและผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียสมีค่าการยืดตัวมากขึ้นร้อยละ 48.6 100.0 155.1 และ 330 ตามลำดับ ผลการทดสอบที่ได้พบว่าชั้นทดสอบทองแดงที่มีด้านยาวตั้งฉากกับทิศทางการรีดมีแนวโน้มในการเกิดการยืดตัวที่สูงกว่า

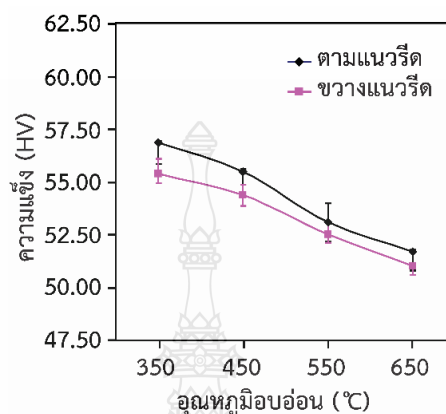


รูปที่ 4.4 การยึดตัวที่จุดครากของทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 นาที

การยึดตัวของขึ้นทดสอบทองแดงมีความแตกต่างเมื่อทำการวัดการยึดตัวที่จุดครากดังรูปที่ 4.4 เนื่องจากการยึดตัวเกิดขึ้นสูงกว่าในขึ้นทดสอบที่มีความยาวตั้งฉากกับทิศทางการรีดที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 7.0 ขณะที่ขึ้นทดสอบที่มีความยาวขนานกับทิศทางการรีดที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.0 ค่าการยึดตัวของขึ้นทดสอบที่มีความยาวตั้งฉากกับทิศทางการรีดที่มีค่ามากกว่านี้บ่งบอกให้ทราบว่าหากขึ้นงานโดนแรงกระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการรีด ขึ้นงานง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่า นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การยึดตัวที่จุดครากเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนเพิ่มขึ้นจาก 350 - 650 องศาเซลเซียส ส่งผลทำให้การยึดตัวของทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 550 และ 650 องศาเซลเซียส การยึดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ค่าการยึดตัวของขึ้นงานที่มีความยาวตั้งฉากและขนานกับทิศทางการรีดนั้นมีค่าเท่ากัน

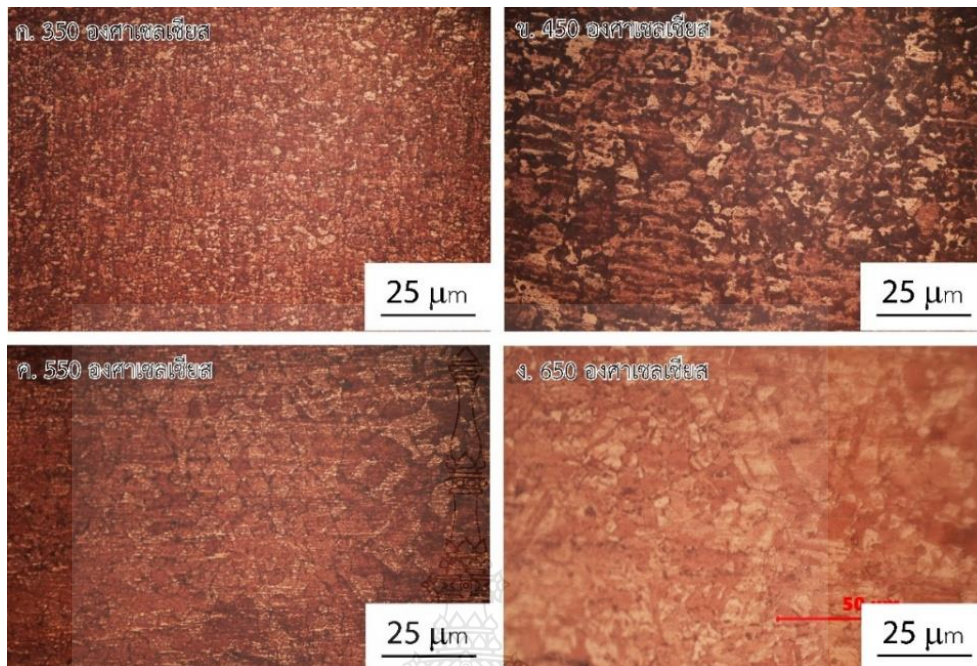
เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการอบอ่อน ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงคราก การยึดตัวสูงสุด และการยึดตัวที่จุดคราก พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึงลดลง และการยึดตัวของทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้เพื่อให้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของทองแดงเมื่อผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิแตกต่าง ความแข็งแรงของทองแดงจึงถูกทำการทดสอบและแสดงค่าความแข็งแรงดังรูปที่ 4.5 อุณหภูมิการอบอ่อนที่มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 350 ถึง 650 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาอบแห้ง 5 นาที ส่งผลทำให้ความแข็งแรงของทองแดงมีค่าลดลง ค่าความแข็งแรงมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 51.7 และ 51.0 HV สำหรับขึ้นงานตามแนวรีดและขวางแนวรีด เมื่อทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงของขึ้นงานตามแนวรีดที่ค่าต่ำกว่าขึ้นงานขวางแนวรีดเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงของทองแดงก่อนการอบอ่อน พบว่าความแข็งแรงของทองแดงมีค่าต่ำสุดเมื่อทำการอบอ่อนที่ 650 องศาเซลเซียสเท่ากับร้อยละ 14 สำหรับขึ้นงานตามแนวรีดและขวางแนวรีดทั้งสองแบบ เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง

ดึง การยืดตัว และความแข็งของทองแดงที่ผ่านการอบอ่อนที่ 350 - 650 องศาเซลเซียส และการอบ
 แชนท์ 5 นาที พบว่าชิ้นงานที่มีความแข็งแรงดึง และการยืดตัวสูงกว่าเกิดขึ้นเนื่องจากทองแดงมี
 ค่าความแข็งที่ต่ำกว่า

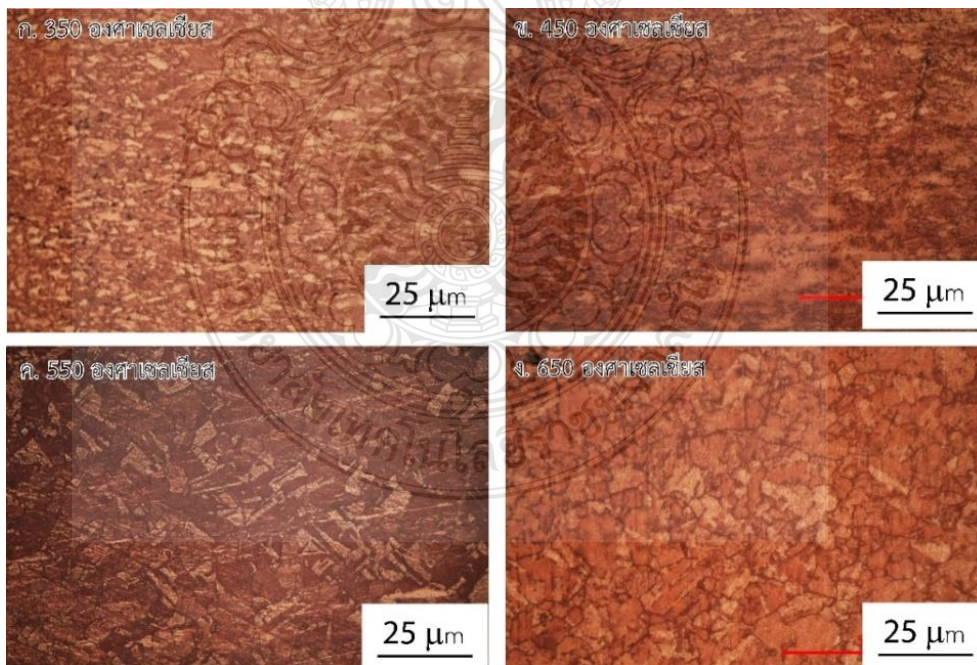


รูปที่ 4.5 ความแข็งทองแดงบริสุทธิ์ที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 นาที

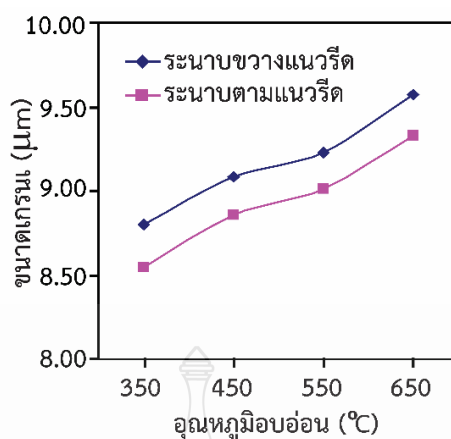
การเพิ่มความแข็งแรงดึงและความแข็งของทองแดงมีเหตุมาจากการเกิดการเปลี่ยนแปลง
 รูปร่างเกรนของทองแดง เกรนที่มีขนาดเล็กกว่ามักแสดงค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งที่มีค่าสูง
 กว่า ด้วยเหตุนี้ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส จึงถูกนำไปทำ
 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และได้ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคดังรูป
 ที่ 4.6 สำหรับระนาบขึ้นงานทองแดงขวางรอยรีด และรูปที่ 4.7 สำหรับขึ้นงานทองแดงระนาบตาม
 รอยรีด ความร้อนการอบอ่อนที่เพิ่มขึ้นจาก 350 - 650 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.7 ก.-ค. และรูปที่
 4.7 ก. - ค. ส่งผลทำให้เกรนของทองแดงที่ผ่านการรีดเกิดการเติบโตและมีขนาดเกรนใหญ่ขึ้นดังผล
 การวัดขนาดเกรนในรูปที่ 4.8 ขนาดเกรนของแดงมีขนาดใหญ่ที่สุดที่โตสุดเมื่อทำการอบอ่อน
 ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเท่ากับ 9.57 และ 9.33 ไมโครเมตร ที่ระนาบขวางแนวรีดและระนาบ
 ตามแนวรีด ตามลำดับ



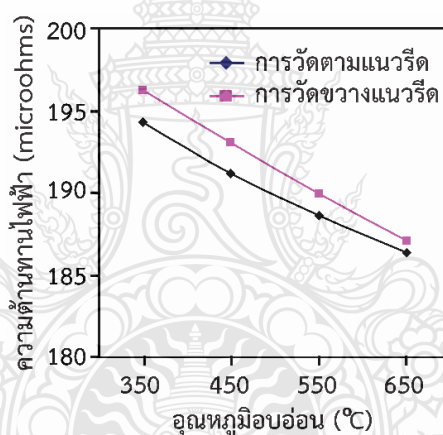
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของแดงบริสุทธิ์ที่ระนาบตั้งฉากแนวรีดอบอ่อนที่อุณหภูมิ
350 - 650 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของแดงบริสุทธิ์ที่ระนาบตามแนวรีดอบอ่อนที่อุณหภูมิ
350 - 650 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 ขนาดเกรนของทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 นาที



รูปที่ 4.9 ความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียสและเวลา 5 นาที

ด้วยความต้องการความสามารถในการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของทองแดง การทดลองนี้ จึงตั้งสมมติฐาน คือ “การนำทองแดงไปอบให้มีขนาดเกรนที่มีความโตมกทำให้ทองแดงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกรนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นมีปริมาณขอบเกรนที่น้อย จึงมีส่วนของเกรนที่ขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าน้อยลง” ด้วยเหตุนี้ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียสจึงถูกนำไปทำการวัดความสามารถในการนำไฟฟ้าด้วยการเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้า ในการทดลองนี้ทองแดงที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูง หมายถึงทองแดงที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ และขณะเดียวกันหากทองแดงมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ หมายถึงทองแดงที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบอุ่นและความต้านทานไฟฟ้าของทองแดง ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่าความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงที่ผ่านการอบอุ่นแปรผกผันกับการเพิ่มอุณหภูมิการอบอุ่น อุณหภูมิการอบอุ่นที่เพิ่มขึ้นจาก 350 - 650 องศาเซลเซียส สามารถลดความต้านทานไฟฟ้าในทองแดงประมาณร้อยละ 4.1 และ 4.7 สำหรับการวัดตามแนวการรีดและขวางแนวรีดตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้นี้ จึงเป็นการพิสูจน์ว่าสมมติฐานที่ตั้งไว้มีค่าเป็นจริง

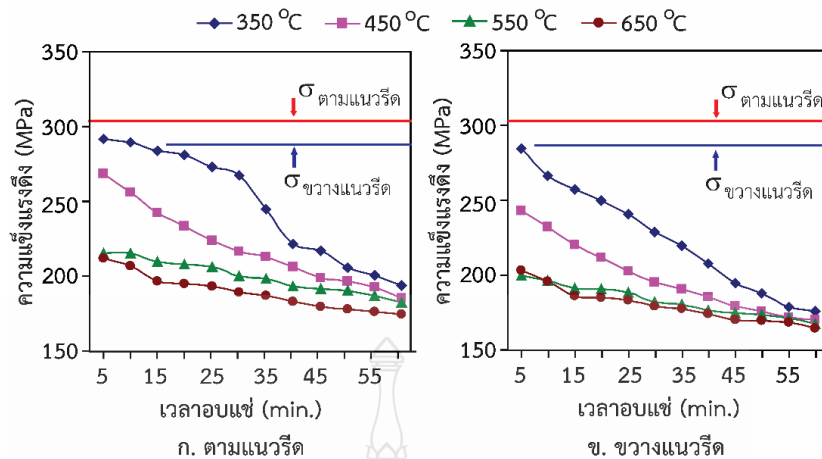
แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ C1100 ถูกเตรียมให้มีรูปร่างแตกต่างกันสองแบบ คือ มีด้านความยาวขนานกับแนวรีด และมีด้านความยาวตั้งฉากกับแนวรีด หลังจากนั้นขึ้นทดสอบถูกนำไปทำการอบอุ่นที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลาอบแช่ 5 นาที ขึ้นทดสอบที่ผ่านการอบอุ่นถูกนำไปทำการทดสอบสมบัติประกอบด้วยความแข็งแรงดึง ความแข็ง ความต้านทานไฟฟ้า และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

- อุณหภูมิการอบอุ่นที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึง ความแข็ง และความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงลดลง แต่ทำให้การยึดตัว และขนาดเกรนของทองแดงเพิ่มขึ้น
- การเพิ่มขึ้นของขนาดเกรนส่งผลทำให้ปริมาณขอบเกรนของทองแดงลดลง และส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งของทองแดงลดลง แต่ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้

4.2 อิทธิพลของเวลาอบแช่ในการอบอุ่นต่อสมบัติของทองแดง C1100

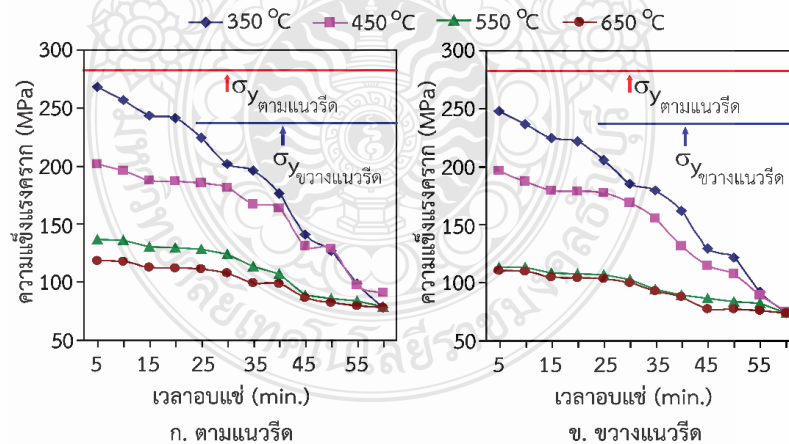
อุณหภูมิอบอุ่นส่งผลให้ความแข็งแรงดึงของทองแดงลดลงและการยึดตัวของทองแดงเพิ่มขึ้นดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาการนำทองแดงไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้าแล้ว พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการอบอุ่นสามารถทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ อย่างไรก็ตามหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของโลหะที่ผ่านการอบอุ่น คือ เวลาอบแช่ที่อุณหภูมิอบอุ่นที่กำหนด ด้วยเหตุนี้เวลาในการอบแช่จึงถูกกำหนดเป็นตัวแปรสำคัญในการศึกษาสมบัติของทองแดงในหัวข้อนี้ ในการศึกษาอิทธิพลเวลาอบแช่ในการอบอุ่นที่มีผลต่อสมบัติของทองแดงนั้น ขึ้นทดสอบทองแดงถูกทำการอบอุ่นที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และกำหนดเวลาอบแช่ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 5 - 60 นาที ผลการทดลองที่น่าสนใจมีดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงสูงสุด อุณหภูมิอบอุ่น และเวลาอบแช่ของขึ้นทดสอบทองแดง C1100 ที่มีความยาวตั้งฉากและขนานกับทิศทางการรีด ผลการทดลองพบว่า เมื่อเวลาอบแช่และอุณหภูมิการอบอุ่นในขั้นตอนการอบอุ่นเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึงสูงสุดของทองแดงมีแนวโน้มลดลง และพบการลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใช้อุณหภูมิการอบอุ่น 300 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาการอบแช่มากกว่า 40 นาที ในชิ้นงานที่มีการเตรียมชิ้นงานตามแนวรีด ดังรูปที่ 4.10 ก.



รูปที่ 4.10 ความแข็งแรงดึงสูงสุดของทองแดงที่บริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียสและเวลา 5 - 60 นาที

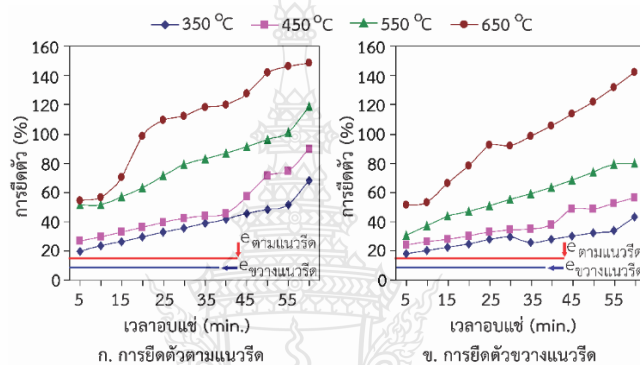
ขณะเดียวกันเมื่อตรวจสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบที่มีทิศทางขวางแนวรีดดังรูปที่ 4.10 ข. การเพิ่มเวลาอบแช่และอุณหภูมิการอบอ่อนในขั้นตอนการอบอ่อนส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบมีค่าลดลง แต่ไม่มีการลดความแข็งแรงลงอย่างรวดเร็วดังที่เกิดขึ้นในรูปที่ 4.10 ก. ความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าต่ำสุดที่ระยะเวลาการอบแช่ 60 นาที และอุณหภูมิการอบอ่อน 650 องศาเซลเซียสเท่ากับ 175 MPa และ 165 MPa สำหรับชิ้นทดสอบตามแนวรีด และขวางแนวรีดตามลำดับ



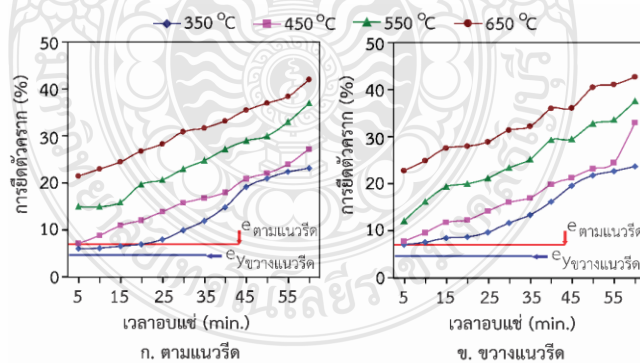
รูปที่ 4.11 ความแข็งแรงครากของทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที

การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงคราก เมื่อเวลาอบแช่และอุณหภูมิการอบอ่อนในขั้นตอนการอบอ่อนเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มลดลงคล้ายกับการลดลงของค่าความแข็งแรงดึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงครากของทองแดง C1100 ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และ

เวลาอบแห้ง 5 - 60 นาทีในรูปที่ 4.11 ข้อสังเกตสำคัญที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงดึงครากที่ทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และเวลาอบแห้งต่ำกว่า 25 นาที ความร้อนและระยะเวลาที่สั้นทำให้ค่าความแข็งแรงครากมีค่าสูงกว่าทองแดงในสภาพจำหน่าย อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาการอบแห้งมากกว่า 25 นาที และอุณหภูมิการอบอ่อนมากกว่า 350 องศา ความแข็งแรงครากมีค่าลดลง และมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อทำการอบแห้งที่ระยะเวลา 60 นาที ความแข็งแรงครากต่ำสุดที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และเวลาอบแห้ง 60 นาที มีค่าเท่ากับ 79 MPa และ 74 MPa สำหรับชิ้นทดสอบตามแนวรีด และขวางแนวรีดตามลำดับ

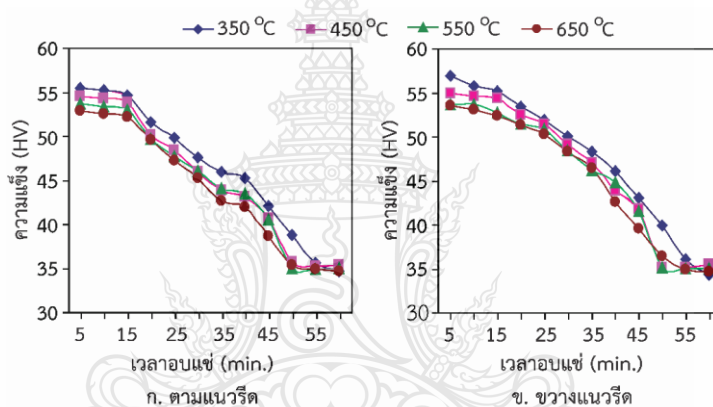


รูปที่ 4.12 การยืดตัวครากของทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียสและเวลา 5 - 60 นาที



รูปที่ 4.13 การยืดตัวครากของทองแดงที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที

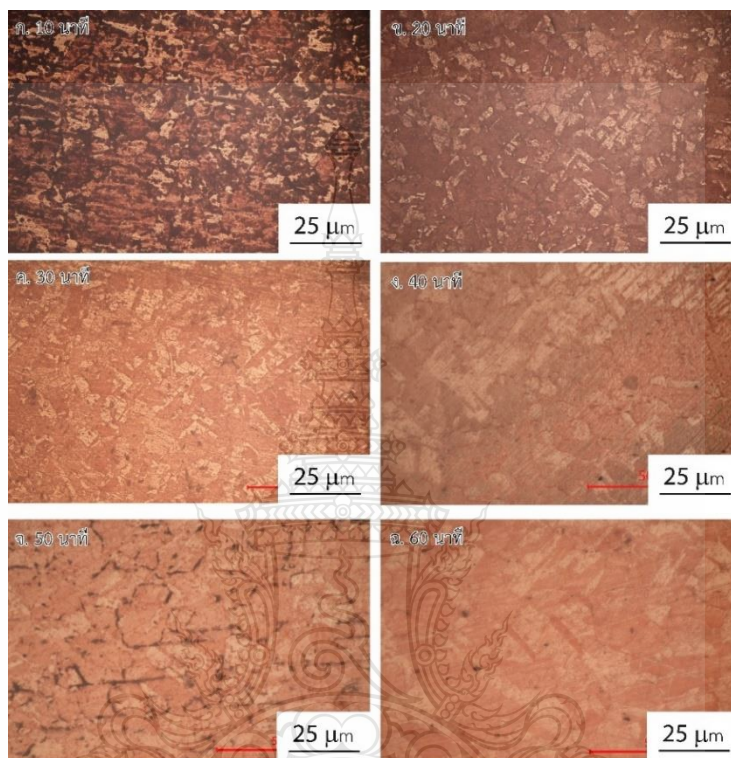
เมื่อเปรียบเทียบการยึดตัวของชิ้นทดสอบความแข็งแรงที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลาอบแช่ 5 - 60 นาที ทิศทางการเปลี่ยนแปลงค่าการยึดตัวสูงสุด และค่าการยึดตัวที่จุดครากมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการอบแช่และอุณหภูมิการอบอ่อนมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 เมื่อชิ้นงานทองแดงผ่านการอบอ่อนด้วยอุณหภูมิอบอ่อนต่ำสุดและเวลาการอบแช่ต่ำสุด ค่าการยึดตัวสูงสุดและค่าการยึดตัวที่จุดครากมีค่าสูงกว่าค่าการยึดตัวสูงสุดและค่าการยึดตัวที่จุดครากของทองแดงในสภาพจำหน่าย ค่าการยึดตัวสูงสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 149 และ 143 สำหรับชิ้นทดสอบตามแนวรีด และขวางแนวรีดตามลำดับ ขณะที่ค่าการยึดตัวที่จุดครากมีค่าเท่ากับร้อยละ 42 และ 43 สำหรับชิ้นทดสอบตามแนวรีด และขวางแนวรีดตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ความแข็งทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที

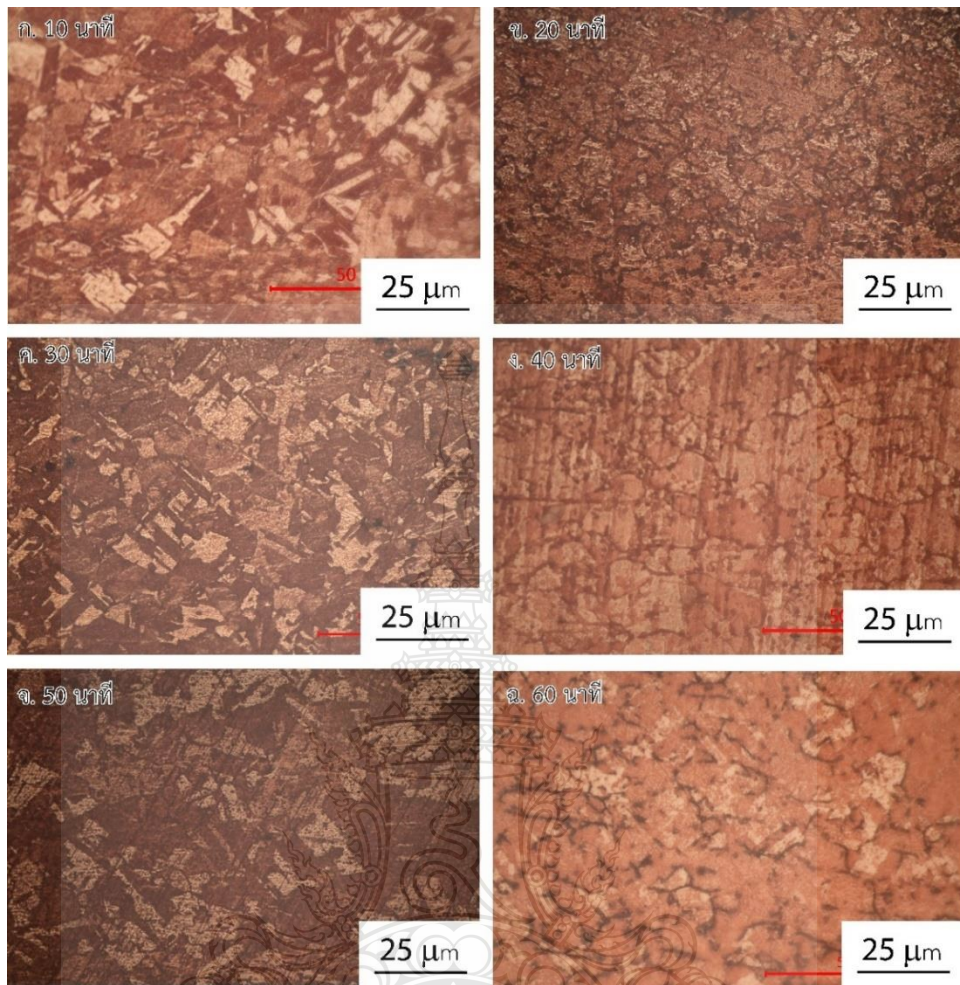
ความแข็งของชิ้นทดสอบที่ระนาบการทดสอบตั้งฉากกับแนวรีดและระนาบทดสอบขนานกับแนวรีดถูกทดสอบและแสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าเวลาในการอบแช่ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ทองแดงมีเวลาในการคลายความเครียดจากการรีดขึ้นรูป และขยายตัวให้มีขนาดใหญ่ขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้ความแข็งของทองแดงมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบการลดลงของความแข็งเมื่อเวลาในการอบแช่ในแต่ละอุณหภูมิการอบอ่อน พบว่าแนวโน้มการลดลงของความแข็งมีแนวโน้มคล้ายกัน ด้วยเหตุนี้จึงอาจกล่าวได้ว่า การเพิ่มระยะเวลาและอุณหภูมิในการอบอ่อนสามารถทำให้ความแข็งของทองแดงมีการลดลงได้ทั้งในระนาบที่ตั้งฉากและขนานกับแนวรีด อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานทั้งสอง พบว่าชิ้นงานที่มีระนาบทดสอบความแข็งขนานกับแนวรีด (หรือด้านความยาวตั้งฉากกับแนวการรีด) เมื่อกล่าวถึงชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง ดังรูปที่ 4.14 ข. นั้นมีค่าความแข็งที่สูงกว่าชิ้นงานที่มีระนาบทดสอบความแข็งตั้งฉากกับแนวรีด (หรือด้านความยาวขนานกับแนวการรีด) เมื่อ

กล่าวถึงขั้นตอนทดสอบความแข็งแรงดึง) ดังรูปที่ 4.14 ก. เล็กน้อยเมื่อเริ่มทำการอบอ่อน และมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันที่ค่าประมาณ 35 HV เมื่อใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 450 - 650 องศาเซลเซียส และเวลาอบแช่มากกว่า 50 นาที ในการอบอ่อนทองแดง



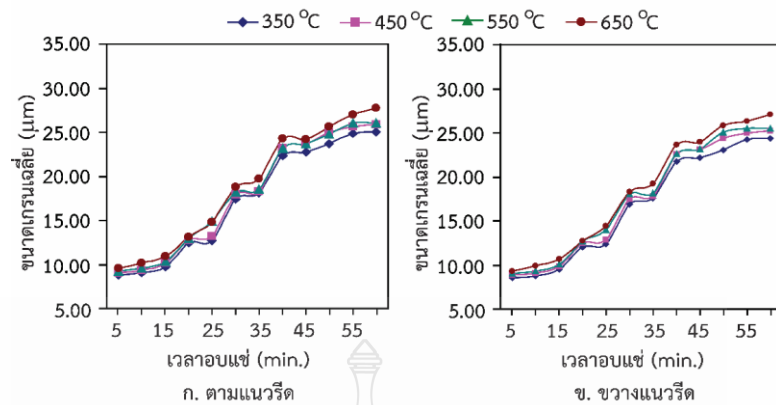
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของทองแดงบริสุทธิ์ตามแนวรีดที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสและเวลา 5 - 60 นาที

รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างของโครงสร้างจุลภาคของทองแดงในแนวระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทาง การรีดที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเวลาการอบแช่ 5 - 60 นาที เกรน ของทองแดงที่มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 10 ไมโครเมตร เมื่อทำการอบแช่ที่ 10 นาที มีความเด่นชัดและมีขอบเกรนที่ค่อนข้างหนาดังรูปที่ 4.15 ก. เมื่อเวลาอบแช่เพิ่มขึ้น เกรนของทองแดงมีการขยายตัว ใหญ่ขึ้น และแสดงเส้นขอบเกรนที่มีขนาดเล็กลง เมื่อใช้เวลาในการอบแช่เพิ่มมากขึ้นดัง การเปรียบเทียบในรูปที่ 4.15 ก. - ฉ. และเมื่อเวลาในการอบแช่เพิ่มสูงสุด เกรนของทองแดงมี ขนาดใหญ่ และมีขอบเกรนที่ไม่ชัดเจนดังรูปที่ 4.15 ฉ. การเกิดการเปลี่ยนแปลงของเกรนและ ขอบเกรนที่เกิดขึ้นนี้พบได้เช่นเดียวกันในตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของทองแดงในแนวระนาบที่ขนาน กับทิศทาง การรีดที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเวลาการอบแช่ 5 - 60 นาที ดังรูปที่ 4.16

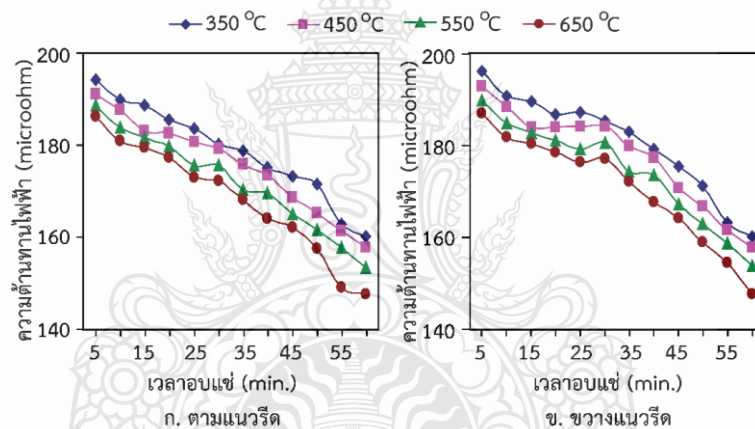


รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของทองแดงบริสุทธิ์ขวางแนวรีดที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสและเวลา 5 - 60 นาที

การพิจารณารูปร่างเกรนของทองแดงที่ผ่านการอบอ่อนที่ระยะเวลาแตกต่างกัน 5 - 60 นาที ที่อุณหภูมิการอบอ่อน 350 - 650 องศาเซลเซียส ทำได้โดยการตรวจหาค่าขนาดเกรนของทองแดง และแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.17 การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาการอบแช่ในขั้นตอนการอบอ่อน ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขนาดเกรนของทองแดงทั้งในระนาบการตรวจสอบที่ตั้งฉากและขนานกับ แนวรีดดังรูปที่ 4.17 ก. และ ข. ตามลำดับ ผลจากการตรวจวัดขนาดเกรนที่ได้จึงเป็นเหตุผลสำคัญ ของการเพิ่มการยึดตัวของทองแดงเมื่อทองแดงผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาการอบแช่ที่ เพิ่มขึ้น ขอบเกรนที่ลดลงและพื้นที่ของทองแดงที่เพิ่มขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ของเนื้อทองแดงเมื่อเกิด การดึงยืดออกง่ายขึ้น นอกจากนั้นการมีขอบเกรนลดลงจึงทำให้พื้นที่ในการต้านทานแรงกดจากการทดสอบความแข็งแรงลดลง จึงทำให้ทองแดงมีความแข็งแรงต่ำลง



รูปที่ 4.17 ขนาดเกรนของทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที



รูปที่ 4.18 ความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงบริสุทธิ์ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเวลา 5 - 60 นาที

สมมติฐานการนำไฟฟ้าของทองแดงตั้งระบุในหัวข้อที่ 4.1 คือ “การนำทองแดงไปอบให้มีขนาดเกรนที่มีความโตมกทำให้ทองแดงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกรนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นมีปริมาณขอบเกรนที่น้อย จึงมีส่วนของเกรนที่ขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าน้อยลง” ถูกนำมาทำการพิสูจน์อีกครั้งในหัวข้อนี้ ชิ้นงานทองแดงที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลาอบแห้ง 5 - 60 นาที ถูกนำไปทำการวัดความสามารถในการนำไฟฟ้าในรูปของส่วนกลับของความต้านทานไฟฟ้า ทองแดงที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิต่ำและเวลาอบแห้งสูง ควรมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ และได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.18

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอบแห้ง อุณหภูมิอบอ่อน และความต้านทานไฟฟ้าของทองแดง พบว่าเวลาการอบแห้งที่มีค่าสูงขึ้น และอุณหภูมิการอบอ่อนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงลดลง เวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นสูงสุด 60 นาที ที่อุณหภูมิการอบอ่อน 650 องศาเซลเซียส มีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงประมาณร้อยละ 24.6 เมื่อเปรียบเทียบกับทองแดงที่ผ่านการอบอ่อนที่เวลาการอบแห้ง 5 นาที ที่อุณหภูมิการอบอ่อน 350 องศาเซลเซียส ความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำลงหรือความสามารถในการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เกิดขึ้นได้เนื่องจากการเพิ่มขนาดเกรนของทองแดง อย่างไรก็ตามหากนำทองแดงที่ผ่านการอบอ่อนที่เวลาอบแห้งสูงและอุณหภูมิอบอ่อนสูงไปใช้ในการรับแรงต้องพิจารณาด้วยความระมัดระวังต่อไป

แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ C1100 ถูกเตรียมให้มีรูปร่างแตกต่างกันสองแบบ คือ มีด้านความยาวขนานกับแนวรีด และมีด้านความยาวตั้งฉากกับแนวรีด หลังจากนั้นขึ้นทดสอบถูกนำไปทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 - 650 องศาเซลเซียส และเวลาอบแห้ง 5-60 นาที ขึ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนถูกนำไปทำการทดสอบสมบัติประกอบด้วยความแข็งแรงดึง ความแข็ง ความต้านทานไฟฟ้า และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

- ระยะเวลาอบแห้งและอุณหภูมิการอบอ่อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึง ความแข็ง และความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงลดลง แต่ทำให้การยึดตัว และขนาดเกรนของทองแดงเพิ่มขึ้น
- การเพิ่มขึ้นของขนาดเกรนส่งผลทำให้ปริมาณขอบเกรนของทองแดงลดลง และส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งของทองแดงลดลง แต่ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้

4.3 อิทธิพลของการชุบเยือกแข็งต่อสมบัติของทองแดง C1100 ในเตาชุบเยือกแข็ง

หลังจากที่นำชิ้นงานไปอบอ่อนแล้วนั้น จึงนำไปทดสอบสมบัติดังต่อไปนี้ ความแข็งแรงดึง โครงสร้างโลหะวิทยา ความแข็ง ความต้านทานไฟฟ้า และนำชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนและทดสอบสมบัติเข้าเตาชุบเยือกแข็ง และทำการทดสอบสมบัติดังต่อไปนี้ ความแข็งแรงดึง โครงสร้างโลหะวิทยา ความแข็ง ความต้านทานไฟฟ้า

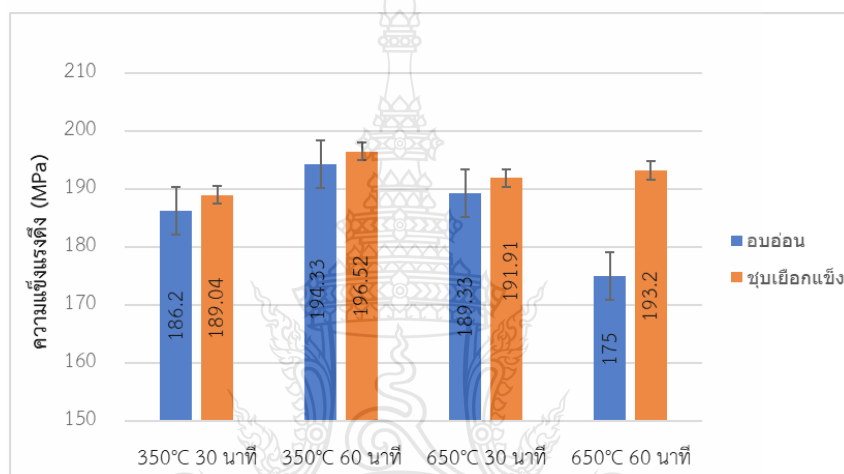
ปัญหาที่พบระหว่างทดสอบการชุบเยือกแข็ง คือ อัตราการสิ้นเปลืองไนโตรเจนเหลวสำหรับเตาชุบเยือกแข็งยี่ห้อ AVEIS รุ่น AV-CM100 เร็วเกินไป และไนโตรเจนเหลวทั้งหมด 198 ลิตร ทดสอบการชุบเยือกแข็งภายในเตาชุบใช้หมดในเวลา 5 ชั่วโมง

ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถดำเนินการตามแผนที่วางไว้ได้ ชิ้นงานที่ผ่านการชุบเยือกแข็งที่

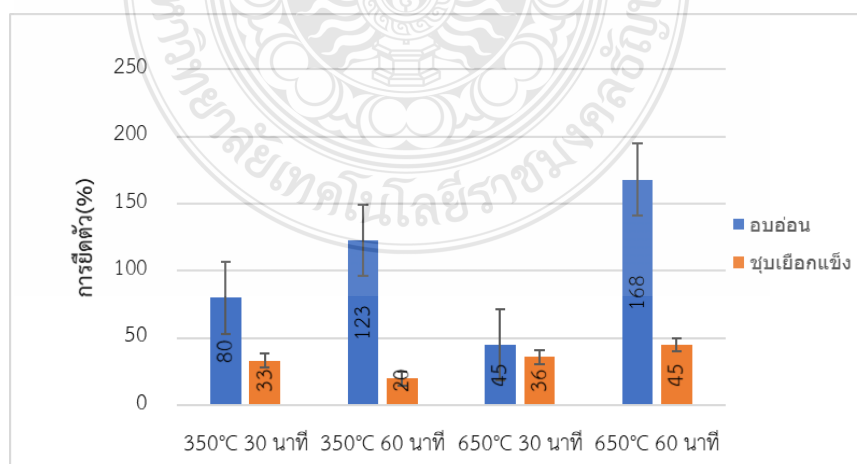
-196 องศาเซลเซียส ในเวลา 5 ชั่วโมง จึงถูกนำไปทำการทดสอบสมบัติ และได้ผลการทดสอบ ดังนี้

4.3.1 ความแข็งแรงดึง

การชุบเยือกแข็งต่อสมบัติของทองแดง C1100 ในเตาชุบเยือกแข็ง ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ในเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนและนำมาทำการชุบเยือกแข็งที่นำมาทดสอบความแข็งแรงดึงที่ 350 และ 650 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 และ 60 นาที เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.13 1.52 1.36 และ 10.4 ตามลำดับ และมีค่า การยืดตัวลดลงร้อยละ 58.75 20 83.74 และ 73.21 ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานที่ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที จะมีความแข็งแรงดึงสูงสุดและมีค่าความยืดตัวต่ำสุด



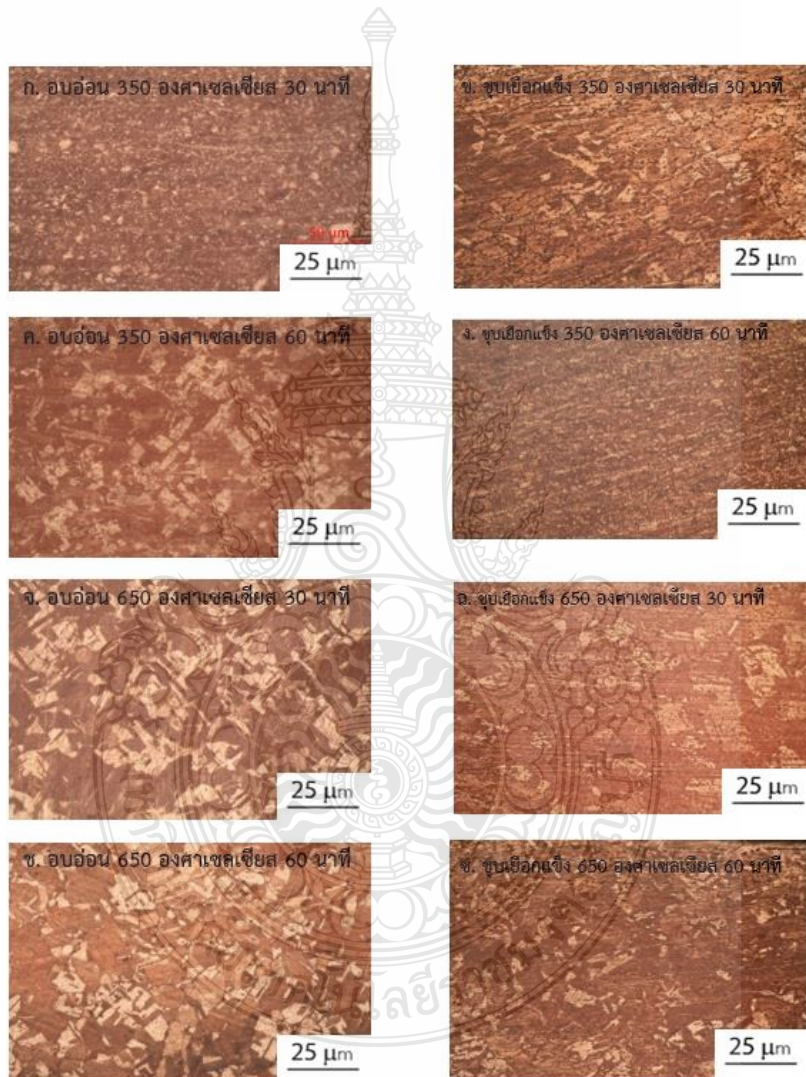
รูปที่ 4.19 ความแข็งแรงดึงที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที



รูปที่ 4.20 การยืดตัวที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที

4.3.2 โครงสร้างโลหะวิทยา

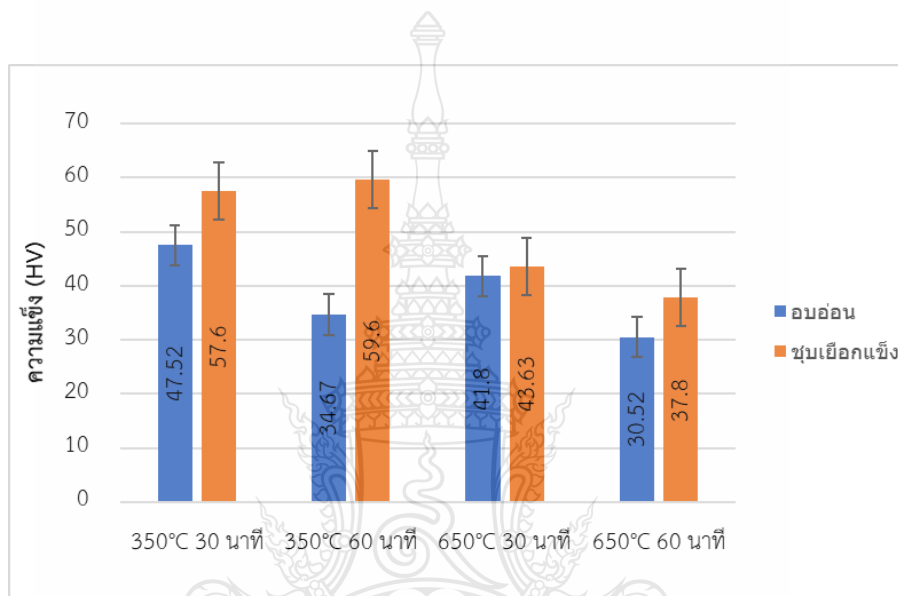
โครงสร้างจุลภาคของทองแดงบริสุทธิ์ โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที นำมาทำการชุบเยือกแข็งในเตาชุบเยือกแข็งที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส โดยการตัดทดสอบชิ้นงานและวัดขนาดหาค่าขนาดเกรนของทองแดง และแสดงผล ดังรูปที่ 4.21 พบว่าชิ้นงานที่อบอ่อนอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที จะมีขนาดของเกรนเล็กกว่าขนาดเกรนของชิ้นงานอื่น



รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของทองแดงบริสุทธิ์ที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที

4.3.3 ความแข็ง

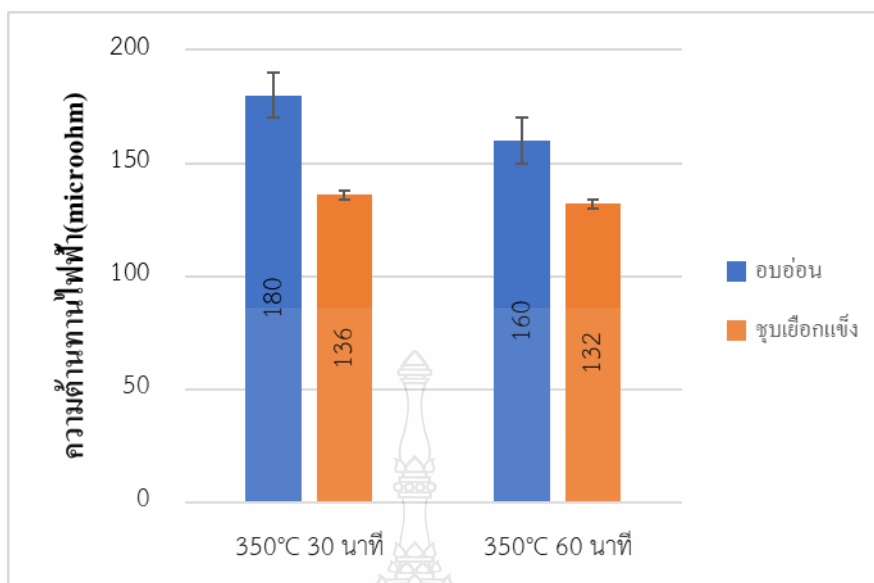
การชุบเยือกแข็งต่อสมบัติของทองแดง C1100 ในเตาชุบเยือกแข็ง ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ในเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนและนำมาทำการชุบเยือกแข็งที่นำมาทดสอบความแข็งที่ 350 และ 650 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 และ 60 นาที เพิ่มขึ้นร้อยละ 17.71.9 4.38 และ 23.85 ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานที่ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที จะมีความแข็งสูงสุด



รูปที่ 4.22 ความแข็งที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที

4.3.4 ความต้านทานไฟฟ้า

การชุบเยือกแข็งต่อสมบัติของทองแดง C1100 ในเตาชุบเยือกแข็ง ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ในเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนและนำมาทำการชุบเยือกแข็งที่นำมาทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ 350 และ 650 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 และ 60 นาที ลดลงร้อยละ 24.44 และ 17.5 ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานที่ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที จะมีความต้านทานไฟฟ้าลดลง และนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.23 ความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที

แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ C1100 หลังจากนำขึ้นทดสอบที่ทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 และ 60 นาที นำไปทำการชุบเยือกแข็งที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ที่เวลา 5 ชั่วโมง ขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบเยือกแข็งถูกนำไปทำการทดสอบสมบัติที่ประกอบด้วยความแข็งแรงดึง ความแข็ง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และความต้านทานไฟฟ้า ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

การชุบเยือกแข็งชิ้นงานทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน สามารถทำให้ ความแข็งแรงดึง ความแข็งเพิ่มขึ้น และความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงลดลง นอกจากนี้การชุบเยือกแข็งทำให้ การยึดตัว และขนาดเกรนของทองแดงลดลง ด้วยเหตุนี้หากต้องการเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงดึง และลดความต้านทานไฟฟ้าของโลหะทองแดง สามารถทำได้ด้วยการชุบเยือกแข็งไนโตรเจนเหลว

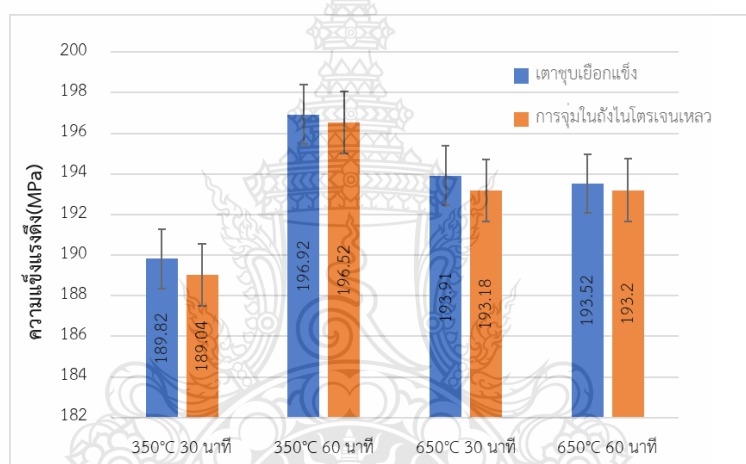
4.4 อิทธิพลของการชุบเยือกแข็งต่อสมบัติของทองแดง C1100 ด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว

เตาชุบเยือกแข็งที่ใช้ในการทดลองเป็นเตาชุบเยือกแข็ง มีข้อดีคือ สามารถตั้งเวลาและอุณหภูมิในการชุบเยือกแข็งได้ โดยไม่เสียเวลาในการนำชิ้นงานเข้า-ออก และมีไฟแสดงสถานะการใช้งาน และมีข้อเสียคือ การสิ้นเปลืองไนโตรเจนเหลวในปริมาณที่มากเกินไป และมีราคาแพง อัตราการสิ้นเปลืองของเตาชุบเยือกแข็งแบบพ่น (Spray) อยู่ที่ 40 L/hr. ด้วยเหตุนี้การลดอัตราการสิ้นเปลืองไนโตรเจนของการชุบเยือกแข็งต่อสมบัติของทองแดง C1100 ด้วยการจุ่มในถัง

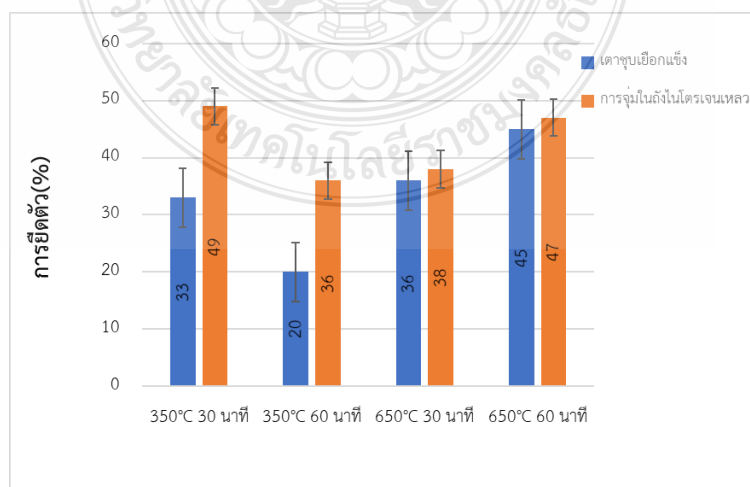
ไนโตรเจนเหลวจึงถูกปรับปรุงโดยการเปลี่ยนวิธีการชุบเยือกแข็งชิ้นงานทองแดงแบบพ่นเป็นแบบจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีอัตราการสิ้นเปลืองของไนโตรเจนแบบเหลว อยู่ที่ 5 L/hr. ผลการทดลองที่ได้ มีดังนี้

4.4.1 ความแข็งแรงดึง

การทดสอบความแข็งแรงดึงระหว่างการชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งแบบพ่น (Spray) กับ การชุบเยือกแข็งด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว พบว่าความแข็งแรงดึงของการชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งมีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น การยืดตัวลดลง แต่มีอัตราการสิ้นเปลืองไนโตรเจนมากกว่าการชุบเยือกแข็งด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว และชิ้นงานที่ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที จะมีความแข็งแรงดึงสูงสุดและมีค่าความยืดตัวต่ำสุด



รูปที่ 4.24 ความแข็งแรงดึงที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที



รูปที่ 4.25 การยืดตัวดึงที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที

4.4.2 โครงสร้างโลหะวิทยา

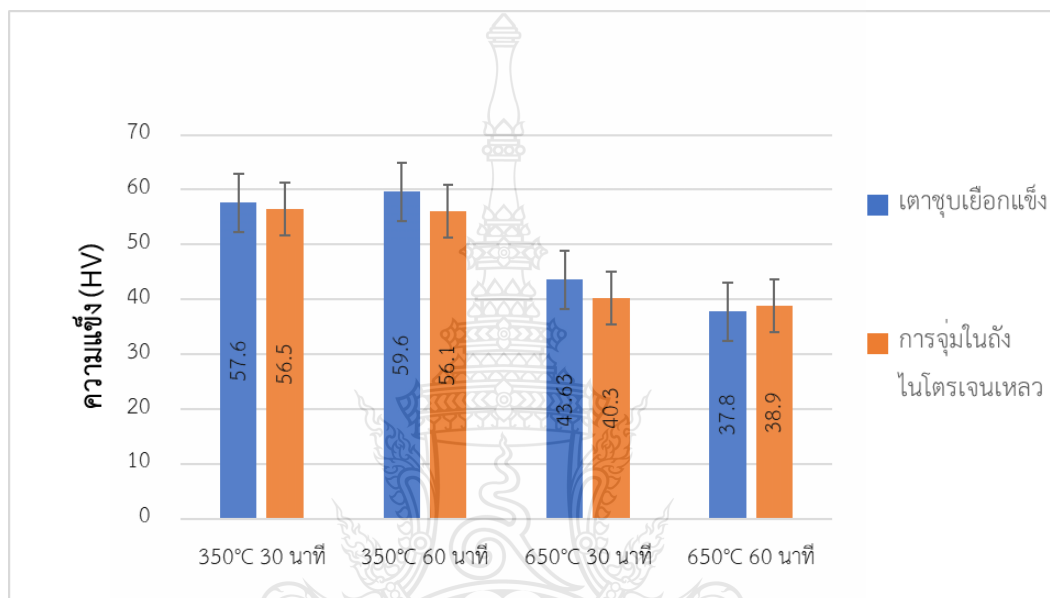
โครงสร้างจุลภาคของทองแดง ระหว่างการชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งแบบพ่น (Spray) กับ การชุบเยือกแข็งด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว โดยการขัดทดสอบชิ้นงานและวัดหาค่าขนาดเกรนของทองแดงและแสดงผล ดังรูปที่ 4.26 พบว่าชิ้นงานที่ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาทีของการชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งแบบพ่น (Spray) จะมีขนาดของเกรนเล็กกว่าขนาดเกรนของชิ้นงานอื่น



รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของทองแดงที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที

4.4.3 ความแข็ง

ความแข็ง ระหว่างการชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งแบบพ่น (Spray) กับการชุบเยือกแข็งด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว พบว่าความแข็งของการชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งมีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นและขึ้นงานที่ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที จะมีความแข็งสูงสุด

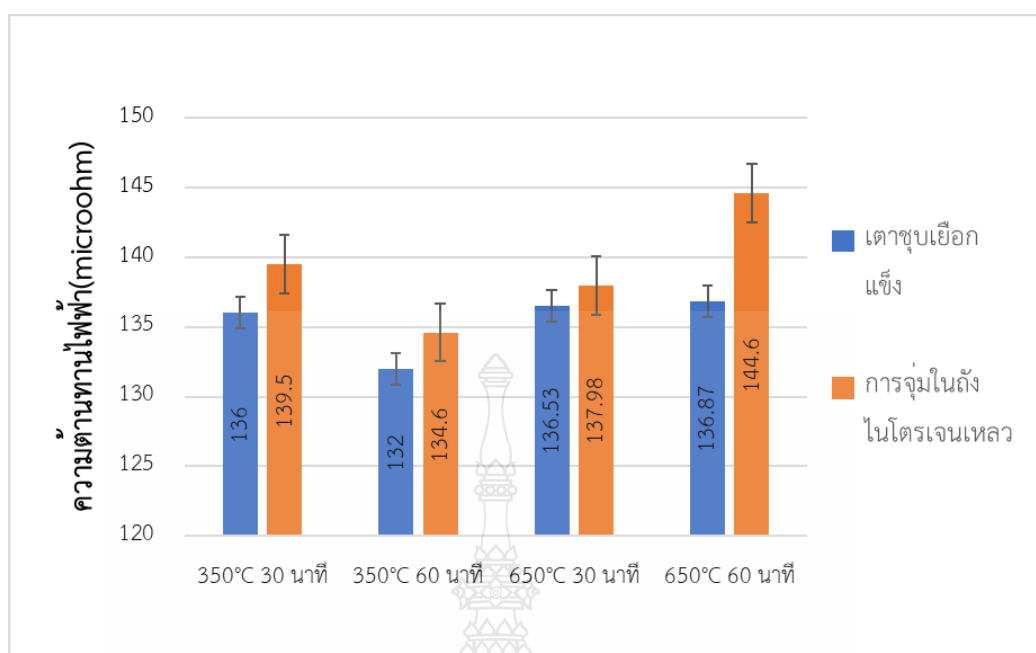


รูปที่ 4.27 ความแข็งที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที

4.4.4 ความต้านทานไฟฟ้า

ความต้านทานไฟฟ้า ระหว่างการชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งแบบพ่น (Spray) กับการชุบเยือกแข็งด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว พบว่าความต้านทานไฟฟ้าของการชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งมีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงและขึ้นงานที่ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที จะมีความต้านทานไฟฟ้าลดลง และนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ C1100 หลังจากนำขึ้นทดสอบที่นำไปทำการชุบเยือกแข็งที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส ระหว่างการชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งแบบพ่น (Spray) กับการชุบเยือกแข็งด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว ขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบเยือกแข็งถูกนำไปทำการทดสอบสมบัติที่ประกอบด้วยความแข็งแรงดึง ความแข็ง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และความต้านทานไฟฟ้า ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้



รูปที่ 4.28 ความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 350 และ 650 องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 60 นาที

การชุบเยือกแข็งด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว ทำให้ ความแข็งแรงดึง ความแข็ง มีค่าลดลง และความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การชุบเยือกแข็งทำให้ การยึดตัว และขนาดเกรนของทองแดงเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้การชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งทำให้ ความแข็งแรงดึง ความแข็งเพิ่มขึ้น การยึดตัว ขนาดเกรนของทองแดงและความต้านทานไฟฟ้าของ ทองแดงลดลงกว่าการชุบเยือกแข็งด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว แต่มีอัตราการสิ้นเปลือง ไนโตรเจนมากกว่า จากผลการทดลองควรใช้การชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งเพราะได้สมบัติ ดีกว่าการชุบเยือกแข็งด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลการทดลองตามสมมติฐาน การนำทองแดงไปอบให้มีขนาดเกรนที่มีความโตมกทำให้ทองแดงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกรนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นมีปริมาณขอบเกรนที่น้อย จึงมีส่วนของเกรนที่ขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าน้อยลงผล พบว่าอุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อนที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงดึง ความแข็งมีค่าลดลง ขนาดเกรน ค่าทดสอบความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จึงไม่เป็นไปตามสมมติฐาน

5.1.2 อุณหภูมิการอบอ่อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงดึงลดลง 30% ความแข็ง ความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงลดลง 4.7% แต่การยึดตัวของทองแดงเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของขนาดเกรน ทำให้ขอบของเกรนลดลง ทำให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งของทองแดงลดลง แต่ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

5.1.3 การชุบเยือกแข็งขึ้นงานทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน สามารถทำให้ ความแข็งแรงดึง ความแข็งเพิ่มขึ้น 1.52 % และความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงลดลง 24.44% นอกจากนั้นการชุบเยือกแข็งทำให้การยึดตัว และขนาดเกรนของทองแดงลดลง ด้วยเหตุนี้หากต้องการเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงดึงและลดความต้านทานไฟฟ้าของโลหะทองแดง สามารถทำได้ด้วยการชุบเยือกแข็งไนโตรเจนเหลว

5.1.4 การชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งทำให้ ความแข็งแรงดึง ความแข็งเพิ่มขึ้น การยึดตัว ขนาดเกรนของทองแดงและความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงลดลงกว่าการชุบเยือกแข็งด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว แต่มีอัตราการสิ้นเปลืองไนโตรเจนมากกว่า

จากผลการทดสอบสมบัติ พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที นำมาชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งเป็นชิ้นงานที่ดีกว่าชิ้นงานอื่น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็ง ถังบรรจุไนโตรเจนเหลว 198 ลิตร แต่อัตราการสิ้นเปลือง 40 ลิตร/ชั่วโมง จึงทำให้ต้องแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการนำมาชุบเยือกแข็งด้วยการจุ่มในถังไนโตรเจนเหลว ที่อัตราการสิ้นเปลือง 5 ลิตร/ชั่วโมง

5.2.2 ผลการทดลองของงานวิจัยนี้ทำให้ ผู้วิจัยมีความรู้ความเข้าใจในเรื่องการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อนความเย็นและการศึกษาการทดสอบสมบัติทางกล โครงสร้างผลึก และอุณหภูมิที่มีผลทำให้ทองแดงบริสุทธิ์มีสมบัติทางกลและสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น และสามารถนำไปใช้ใน

การสนับสนุนการเรียนการสอนในรายวิชา (04411319) โลหะวิทยาในงานวิศวกรรม หน่วยเรียนที่ 8 การอบชุบโลหะและวิชา (04411207) การทดสอบวัสดุ หน่วยเรียนที่ 8 การทดสอบแรงดึง และหน่วยเรียนที่ 9 การทดสอบความแข็ง

5.2.3 จากผลการทดลองการชุบเยือกแข็งด้วยเตาชุบเยือกแข็งที่ 5 ชั่วโมงเห็นได้ว่าแผ่นทองแดงบริสุทธิ์ C1100 มีแนวโน้มของสมบัติด้านความแข็งแรงดึง ความแข็งเพิ่มขึ้น การยืดตัว ขนาดเกรนของทองแดงบริสุทธิ์และความต้านทานไฟฟ้าของทองแดงบริสุทธิ์ลดลง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและศึกษาค้นคว้าต่อไป ดังนั้น ในการทดลองศึกษาครั้งต่อไปควรทดลองปรับตัวแปรเวลาในการชุบเยือกแข็งให้มากกว่านี้เพื่อให้ทองแดงบริสุทธิ์ C1100 มีคุณสมบัติดีขึ้น

5.2.4 ผู้วิจัยนำความรู้ความเข้าใจจากการทำวิจัยเรื่องอิทธิพลตัวแปรการชุบเยือกแข็งที่มีผลต่อสมบัติแผ่นรีดทองแดงไปใช้สอนเพิ่มเติมให้ความรู้แก่นักศึกษา ในรายวิชาปฏิบัติรายวิชา 04411319) โลหะวิทยาในงานวิศวกรรม หน่วยเรียนที่ 8 การอบชุบโลหะ และรายวิชา (04411207) การทดสอบวัสดุ หน่วยเรียนที่ 8 การทดสอบแรงดึง และหน่วยเรียนที่ 9 การทดสอบความแข็ง ให้นักศึกษาได้มีความรู้เพิ่มเติมมากยิ่งขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] ลักษณะทิพย์ พิงคารักษ์ และคณะ. (2565). การกำจัดตะกั่วและทองแดงที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้วิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยเปลือกหอย, สาขาวิชาสาธารณสุขศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี. วารสารวิชาการปทมวัน ปีที่ 12 ฉบับที่ 35 กันยายน-ธันวาคม 2565.
- [2] Total Materia. **คุณสมบัติทองแดง**. กรุงเทพมหานคร : IKKI (Thailand) Co. Ltd.
- [3] สุทัศน์ ยอดเพชร. (2563) หนังสือการศึกษาเทคนิคการผลิตทองแดงเจือเพื่อเป็นโลหะเจือหลักสำหรับการผลิตตัวเรือนเครื่องประดับโลหะเงินเจือ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [4] สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. (2557). การสำรวจสถานภาพอุตสาหกรรมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals): ทองแดง ภายใต้โครงการพัฒนาศูนย์วิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมเหล็กและโลหการ ประจำปีงบประมาณ 2557.
- [5] Michael F. Ashby, Hugh Shercliff, David Cebon,(2018). *Materials: Engineering, Science, Processing and Design* .
- [6] D. Joshi, S. Putatunda, and J. Boileau. (2018). **Influence of Cryogenic Treatment on the Electrical and Thermal Properties of Gray Cast Iron**. *Materials Science and Technology*, 1049-1059.
- [7] V. Raghavan (2015). **PHYSICAL METALLURGY: PRINCIPLES AND PRACTICE** Doi : <https://books.google.co.th/>
- [8] ASM TECHNICAL BOOKS Practical Heat Treating: Basic Principles (2 0 20) . American Society for Metals. USA.
- [9] Zainul Huda. **BOOK Metallurgy for Physicists and Engineers Fundamentals, Applications, and Calculations** (2020). Doi: <https://doi.org/10.1201/9780429265587>
- [10] I. Uygur, H. Gerengi, Y. Arslan, and M. Kurtay. (2015). "The Effects of Cryogenic Treatment on the Corrosion of AISI D3 Steel," *Materials Research*, 18, 569-574.
- [11] *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* Feb 2019, 141(2): 021002 (11 pages) Doi : <https://doi.org/10.1115/1.4041448>
- [12] Mecmesin. **การทดสอบแรงดึง**. Bangkok : Tossapon Building. <https://www.mecmesin.com/th>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] Eurolab. **วิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการทดสอบแรงดึงของโลหะ ASTM E8 / E8M.** Dr Sadik Ahmet Cd Turkey : Istanbul.
- [14] Adapted from ASM Metals Handbook Volme 9, Ninth Edition. (2020). **Metallography and Microstructures.** American Society for Metals: Published: December 01, 2020 Author(s): John Campbell.
- [15] ภิชาติ พานิชกุล และ อุษณีย์ กิตกำธร. 2563. การวัดความแข็ง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement_Of_Hardness.html
- [16] Enze Yao a, Huijie Zhang a,* , Kang Ma b, Conggang Ai b, Qiuzhi Gao a, Xiaoping Lin a. (2023). **Effect of deep cryogenic treatment on microstructures and performances of aluminum alloys.** Journal of Materials Research and Technology Volume 26, September–October 2023, Pages 3661-3675.
- [17] Chitrang A, Dumasia, Dr.V.A. Kulkarni, Kunal Sonaro. (2017). **A Review on the Effect of Cryogenic Treatment on Metals.** 2017/07
- [18] Luis Ángel Álava, Cryobest International, S.L. (2015). **Applications of Cryogenic Treatments in Transmission Manufacturing and Design.**
- [19] S. Du and Y. Li. (2015). **Effect of Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Magnetron Sputtered Cu Thin Films.** Advances in Materials Science and Engineering, doi: 10.1155/2015/969580.
- [20] Ravi Kumar¹, Manik² , Bhagel Singh² and Jasbir Singh Gill¹.(2018). **Enhancement of Mechanical Properties of Bulk Copper Processed by Room Temperature Rolling and Cryorolling.** Indian Journal of Science and Technology, Vol 11(28), DOI: 10.17485/ijst/2018/v11i28/130792, July 2018.
- [22] Z. Dong, X. Fei, B. Gong, X. Zhao, and J. Nie. (2021). **Effects of Deep Cryogenic Treatment on the Microstructure and Properties of Rolled Cu Foil.** Materials, vol. 14, no. 19, doi: 10.3390/ma14195498.
- [23] ASTM E407-23 **Standard Test Methods for Microetching Metals and Alloys.** American Standard for Testing Materials, USA, 2023.
- [24] ชเนรินทร์ รักสัตย์. (2561). **ปัจจัยตัวแปรการเชื่อมทิกที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304/AISI316 ในท่อส่งถ่ายน้ำผลไม้.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.



ภาคผนวก ก
ตารางผลการทดสอบสมบัติ

ตารางที่ 1 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 5 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	290.00	291.00	295.00	292.00	3.00	2.00
450	266.00	268.00	272.00	268.67	3.33	2.67
550	225.00	227.00	229.00	227.00	2.00	2.00
650	210.00	211.00	216.00	212.33	3.67	2.33

เวลาอบ 10 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	286.00	288	294.00	289.33	4.67	3.33
450	254.00	255	259.00	256.00	3.00	2.00
550	212	215.00	220.00	215.67	4.33	3.67
650	206.00	206	210.00	207.33	2.67	1.33

เวลาอบ 15 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	280.00	282.00	290.00	284.00	6.00	4.00
450	240.00	242.00	246.00	242.67	3.33	2.67
550	208.00	209.00	212.00	209.67	2.33	1.67
650	192.00	198.00	200.00	196.67	3.33	4.67

เวลาอบ 20 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	279.00	280.00	285.00	281.33	3.67	2.33
450	231.00	232.50	236.50	233.33	3.17	2.33
550	206.50	207.50	210.50	208.17	2.33	1.67
650	192.00	195.00	198.00	195.00	3.00	3.00

ตารางที่ 1 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 25 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	270.00	272.00	278.00	273.33	4.67	3.33
450	222.00	223.00	227.00	224.00	3.00	2.00
550	205.00	206.00	209.00	206.67	2.33	1.67
650	192.00	192.00	196.00	193.33	2.67	1.33

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 30 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	265.00	268.00	270.00	267.67	2.33	2.67
450	213.00	215.00	222.00	216.67	5.33	3.67
550	197.00	198.00	206.00	200.33	5.67	3.33
650	188.00	188.00	192.00	189.33	2.67	1.33

ตารางที่ 3 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 35 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	241.00	243.00	251.00	245.00	6.00	4.00
450	211.00	213.00	215.00	213.00	2.00	2.00
550	197.00	197.00	201.00	198.33	2.67	1.33
650	186.00	187.00	189.00	187.33	1.67	1.33

ตารางที่4 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 40 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	217.00	219.00	229.00	221.67	7.33	4.67
450	205.00	206.00	208.00	206.33	1.67	1.33
550	191.09	191.09	198.99	193.72	5.27	2.63
650	182.28	185.13	183.33	183.58	-0.25	1.30

ตารางที่5 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 45 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	213.00	214.00	224.00	217.00	7.00	4.00
450	196.00	200.00	202.00	199.33	2.67	3.33
550	189.00	190.00	196.00	191.67	4.33	2.67
650	176.00	179.00	184.00	179.67	4.33	3.67

ตารางที่6 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 50 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	203.00	205.00	209.00	205.67	3.33	2.67
450	197.00	195.00	199.00	197.00	2.00	0.00
550	187.00	190.00	195.00	190.67	4.33	3.67
650	176.00	178.00	180.00	178.00	2.00	2.00

ตารางที่7 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 55 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	198.00	200.00	204.00	200.67	3.33	2.67
450	190.00	193.00	196.00	193.00	3.00	3.00
550	187.25	187.00	188.00	187.42	0.58	0.17
650	175.00	177.00	178.00	176.67	1.33	1.67

ตารางที่8 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 60 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	190.00	195.00	198.00	194.33	3.67	4.33
450	184.00	185.00	188.00	185.67	2.33	1.67
550	181.00	182.00	185.00	182.67	2.33	1.67
650	174.00	175.00	176.00	175.00	1.00	1.00

ตารางที่9 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 5 นาที ตามขวางรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	282.00	284.58	288.00	284.86	3.14	2.86
450	242.00	242.31	246.00	243.44	2.56	1.44
550	204.00	206.00	210.00	206.67	3.33	2.67
650	202.00	203.00	206.00	203.67	2.33	1.67

ตารางที่10 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 10 นาที ตามขวางรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	279.00	282	286	282.33	3.67	3.33
450	231.00	231	235	232.33	2.67	1.33
550	194.00	196	200	196.67	3.33	2.67
650	190.00	199	199	196.00	3.00	6.00

ตารางที่11 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 15 นาที ตามขวางรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	274.00	277	281	277.33	3.67	3.33
450	219.00	219	223	220.33	2.67	1.33
550	189.00	191	195	191.67	3.33	2.67
650	181.00	189	189	186.33	2.67	5.33

ตารางที่12 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 20 นาที ตามขวางรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	272.00	275	279	275.33	3.67	3.33
450	211.00	210	215	212.00	3.00	1.00
550	188.00	190	194	190.67	3.33	2.67
650	180.00	188	188	185.33	2.67	5.33

ตารางที่13 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 25 นาที ตามขวางรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	264.00	267	271	267.33	3.67	3.33
450	202.00	201	206	203.00	3.00	1.00
550	186.00	188	192	188.67	3.33	2.67
650	178.00	186	186	183.33	2.67	5.33

ตารางที่14 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 30 นาที ตามขวางรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	258.00	260	263	260.33	2.67	2.33
450	193.00	194	199	195.33	3.67	2.33
550	180.00	182	186	182.67	3.33	2.67
650	174.00	182	183	179.67	3.33	5.67

ตารางที่15 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 35 นาที ตามขวางรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	233.00	235	238	235.33	2.67	2.33
450	188.00	190	195	191.00	4.00	3.00
550	178.00	180	184	180.67	3.33	2.67
650	172.00	180	181	177.67	3.33	5.67

ตารางที่16 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 40 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	211.00	213	216	213.33	2.67	2.33
450	183.00	185	189	185.67	3.33	2.67
550	174.00	176	180	176.67	3.33	2.67
650	169.00	177	178	174.67	3.33	5.67

ตารางที่17 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 45 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	206.00	208	211	208.33	2.67	2.33
450	176.00	179	183	179.33	3.67	3.33
550	172.00	174	179	175.00	4.00	3.00
650	165.00	173	174	170.67	3.33	5.67

ตารางที่18 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 50 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	183.00	185	187	185.00	2.00	2.00
450	173.00	176	180	176.33	3.67	3.33
550	171.00	173	178	174.00	4.00	3.00
650	164.00	172	173	169.67	3.33	5.67

ตารางที่19 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 55 นาที ตามขวางรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	176.00	178	180	178.00	2.00	2.00
450	169.00	172	176	172.33	3.67	3.33
550	169.00	171	175	171.67	3.33	2.67
650	163.00	171	172	168.67	3.33	5.67

ตารางที่20 ค่าความแข็งแรงดึง

เวลาอบ 60 นาที ตามขวางรอยรีด

ความแข็งแรงดึงสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	175.00	175	178	176.00	2.00	1.00
450	166.00	170	175	170.33	4.67	4.33
550	165.00	166	172	167.67	4.33	2.67
650	162.00	165	168	165.00	3.00	3.00

ตารางที่21 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 5 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	267.00	267.00	271.00	268.33	2.67	1.33
450	200.00	201.00	204.00	201.67	2.33	1.67
550	136.00	136	139.00	137.00	2.00	1.00
650	118.00	118	120.00	118.67	1.33	0.67

ตารางที่22 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 10 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	260.00	260.00	250.00	256.67	-6.67	-3.33
450	195.00	195.00	198.00	196.00	2.00	1.00
550	135.86	135.46	137.89	136.40	1.49	0.54
650	117.65	117.88	118.92	118.15	0.77	0.50

ตารางที่23 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 15 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	247.00	247.00	237.50	243.83	-6.33	-3.17
450	187.01	186.81	188.30	187.37	0.93	0.37
550	130.16	129.36	131.68	130.40	1.28	0.24
650	112.35	112.11	113.93	112.79	1.13	0.44

ตารางที่24 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 20 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	244.78	245.02	235.36	241.72	-6.36	-3.06
450	186.07	186.44	188.11	186.87	1.24	0.80
550	129.12	128.71	131.02	129.62	1.41	0.50
650	111.68	111.21	113.24	112.04	1.20	0.37

ตารางที่ 25 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 25 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	220.30	220.52	233.01	224.61	8.40	4.31
450	184.40	185.50	185.85	185.25	0.60	0.86
550	128.08	127.68	130.45	128.74	1.71	0.66
650	111.12	110.43	112.27	111.27	1.00	0.15

ตารางที่ 26 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 30 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	198.27	198.47	209.71	202.15	7.56	3.88
450	180.71	181.79	182.14	181.55	0.59	0.84
550	121.68	121.30	129.14	124.04	5.10	2.36
650	106.67	107.00	109.00	107.56	1.44	0.88

ตารางที่ 27 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 35 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	192.32	192.52	203.42	196.08	7.33	3.76
450	164.44	169.07	167.56	167.03	0.54	2.58
550	111.94	111.60	117.52	113.69	3.83	1.74
650	99.21	97.37	101.37	99.32	2.05	0.11

ตารางที่ 28 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 40 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	173.09	173.26	183.08	176.48	6.60	3.39
450	161.15	165.69	164.21	163.69	0.53	2.53
550	105.23	108.25	109.00	107.49	1.51	2.26
650	98.00	99.00	100.00	99.00	1.00	1.00

ตารางที่ 29 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 45 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	138.47	138.61	146.46	141.18	5.28	2.71
450	128.92	132.55	131.37	130.95	0.42	2.02
550	88.00	89.00	90.00	89.00	1.00	1.00
650	85.00	86.00	89.00	86.67	2.33	1.67

ตารางที่ 30 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 50 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	124.62	124.75	131.81	127.06	4.75	2.44
450	126.35	129.90	130.06	128.77	1.29	2.42
550	83.60	88.11	86.40	86.04	0.36	2.44
650	82.45	80.84	84.55	82.61	1.94	0.16

ตารางที่31 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 55 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	94.00	101.00	102.00	99.00	3.00	5.00
450	92.00	99.00	100.00	97.00	3.00	5.00
550	80.26	87.23	84.67	84.05	0.62	3.80
650	80.80	78.41	79.48	79.56	-0.09	-1.24

ตารางที่32 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 60 นาที ตามรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	92.00	92.00	92.00	92.00	0.00	0.00
450	90.00	91.00	91.00	90.67	0.33	0.67
550	79.00	78.00	79.00	78.67	0.33	-0.33
650	77.00	78.00	80.00	78.33	1.67	1.33

ตารางที่33 ค่าความแข็งแรงคราก ต่อ

เวลาอบ 5 นาที ตามขวางรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	245.00	247.00	252.00	248.00	4.00	3.00
450	195.00	195.00	199.00	196.33	2.67	1.33
550	112.00	113.00	116.00	113.67	2.33	1.67
650	110.00	110.00	112.00	110.67	1.33	0.67

ตารางที่34 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 10 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	234.00	235.00	240.00	236.33	3.67	2.33
450	186.00	186.50	190.00	187.50	2.50	1.50
550	111.51	112.51	115.49	113.17	2.32	1.66
650	109.52	109.52	111.51	110.18	1.33	0.66

ตารางที่35 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 15 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	222.30	223.25	228.00	224.52	3.48	2.22
450	177.81	178.29	181.64	179.25	2.39	1.43
550	106.60	107.56	110.41	108.19	2.22	1.59
650	104.56	104.56	106.46	105.19	1.27	0.63

ตารางที่36 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 20 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	220.37	221.32	223.00	221.56	1.44	1.19
450	177.34	177.81	181.15	178.77	2.38	1.43
550	105.97	106.91	109.75	107.54	2.21	1.58
650	103.86	103.86	105.75	104.49	1.26	0.63

ตารางที่37 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 25 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	204.77	205.65	207.21	205.88	1.33	1.10
450	175.80	176.27	179.58	177.22	2.36	1.42
550	105.25	106.19	109.00	106.81	2.19	1.57
650	103.15	103.15	105.02	103.77	1.25	0.63

ตารางที่38 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 30 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	184.30	185.08	186.49	185.29	1.20	0.99
450	168.00	169.00	170.00	169.00	1.00	1.00
550	101.41	102.31	105.03	102.91	2.11	1.51
650	99.70	99.70	101.52	100.31	1.21	0.60

ตารางที่39 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 35 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	178.77	179.53	180.90	179.73	1.17	0.96
450	154.56	155.48	156.40	155.48	0.92	0.92
550	92.94	93.77	96.26	94.32	1.94	1.38
650	92.06	92.06	93.74	92.62	1.12	0.56

ตารางที่40 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 40 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	160.89	161.58	162.81	161.76	1.05	0.87
450	131.00	132.00	133.00	132.00	1.00	1.00
550	87.88	88.66	91.02	89.18	1.83	1.31
650	86.00	88.00	91.00	88.33	2.67	2.33

ตารางที่41 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 45 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	128.71	129.26	130.25	129.41	0.84	0.69
450	114.00	115.00	116.00	115.00	1.00	1.00
550	86.00	86.00	87.00	86.33	0.67	0.33
650	75.29	77.04	79.66	77.33	2.33	2.04

ตารางที่42 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 50 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	120.64	121.62	124.09	122.12	1.97	1.48
450	107.00	108.00	109.00	108.00	1.00	1.00
550	83.14	83.14	84.10	83.46	0.64	0.32
650	73.00	74.00	85.00	77.33	7.67	4.33

ตารางที่43 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 55 นาที ตามขวางรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	91.00	92.00	93.00	92.00	1.00	1.00
450	89.00	89.00	90.00	89.33	0.67	0.33
550	80.00	82.00	85.00	82.33	2.67	2.33
650	75.00	76.00	77.00	76.00	1.00	1.00

ตารางที่44 ค่าความแข็งแรงคราก

เวลาอบ 60 นาที ตามขวางรอยรีด

ความแข็งแรงคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	84.00	84.00	86.00	84.67	1.33	0.67
450	75.00	76.00	76.00	75.67	0.33	0.67
550	73.00	73.00	75.00	73.67	1.33	0.67
650	73.00	74.00	74.00	73.67	0.33	0.67

ตารางที่45 การยัดตัวสูงสุด

เวลาอบ 5 นาที ตามรอยรีด

การยัดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	19.92	20.00	20.28	20.07	0.21	0.15
450	26.55	26.63	26.91	26.70	0.21	0.15
550	35.13	35.27	35.66	35.35	0.31	0.22
650	54.03	54.41	55.06	54.50	0.56	0.47

ตารางที่46 การยัดตัวสูงสุด

เวลาอบ 10 นาที ตามรอยรีด

การยัดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	23.08	23.16	23.44	23.23	0.21	0.15
450	29.71	29.79	30.07	29.86	0.21	0.15
550	51.26	51.5	51.67	51.48	0.19	0.22
650	55.61	56	56.67	56.09	0.58	0.48

ตารางที่47 การยัดตัวสูงสุด

เวลาอบ 15 นาที ตามรอยรีด

การยัดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	26.24	26.32	26.60	26.39	0.21	0.15
450	32.87	32.95	33.23	33.02	0.21	0.15
550	59.60	59.87	51.67	57.05	-5.38	-2.55
650	69.16	69.35	70.18	69.56	0.62	0.40

ตารางที่48 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 20 นาที ตามรอยรีด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	29.40	29.48	29.76	29.55	0.21	0.15
450	36.03	36.11	36.39	36.18	0.21	0.15
550	64.00	65.00	60.00	63.00	-3.00	-1.00
650	97.00	98.00	99.18	98.06	1.12	1.06

ตารางที่49 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 25 นาที ตามรอยรีด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	32.56	32.64	32.92	32.71	0.21	0.15
450	39.19	39.27	39.55	39.34	0.21	0.15
550	81.31	81.63	51.64	71.53	-19.89	-9.78
650	108.24	109.00	110.31	109.18	1.13	0.94

ตารางที่50 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 30 นาที ตามรอยรีด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	35.72	35.80	36.08	35.87	0.21	0.15
450	42.35	42.43	42.71	42.50	0.21	0.15
550	77.81	78.44	81.57	79.27	2.30	1.46
650	110.00	112.00	116.00	112.67	3.33	2.67

ตารางที่ 51 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 35 นาที ตามรอยรีด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	38.88	38.96	39.24	39.03	0.21	0.15
450	43.14	42.30	47.19	44.21	2.98	1.07
550	101.43	101.83	45.35	82.87	-37.52	-18.56
650	117.41	117.53	119.53	118.16	1.37	0.75

ตารางที่ 52 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 40 นาที ตามรอยรีด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	42.04	42.12	42.40	42.19	0.21	0.15
450	44.48	43.61	48.65	45.58	3.07	1.10
550	84.83	87.51	88.38	86.90	1.48	2.08
650	118.00	120.00	122.00	120.00	2.00	2.00

ตารางที่ 53 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 45 นาที ตามรอยรีด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	45.20	45.28	45.56	45.35	0.21	0.15
450	55.59	54.51	60.81	56.97	3.84	1.38
550	89.29	92.11	93.03	91.48	1.55	2.19
650	126.59	127.46	129.20	127.75	1.46	1.16

ตารางที่54 การยัดตัวสูงสุด

เวลาอบ 50 นาที ตามรอยรีด

การยัดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	48.36	48.44	48.72	48.51	0.21	0.15
450	69.49	68.13	76.01	71.21	4.80	1.72
550	93.99	96.96	97.93	96.29	1.64	2.30
650	140.65	141.62	143.56	141.94	1.62	1.29

ตารางที่55 การยัดตัวสูงสุด

เวลาอบ 55 นาที ตามรอยรีด

การยัดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	51.52	51.60	51.88	51.67	0.21	0.15
450	73.15	71.72	80.01	74.96	5.05	1.81
550	99.99	101.00	102.01	101.00	1.01	1.01
650	145.00	146.00	148.00	146.33	1.67	1.33

ตารางที่56 การยัดตัวสูงสุด

เวลาอบ 60 นาที ตามรอยรีด

การยัดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	54.00	75.00	76.00	68.33	7.67	14.33
450	65.00	99.00	105.00	89.67	15.33	24.67
550	100.00	126.00	131.00	119.00	12.00	19.00
650	140.00	151.43	153.49	148.31	5.18	8.31

ตารางที่ 57 การยึดตัวสูงสุด

เวลาอบ 5 นาที ตามขวางรอยรีด

การยึดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	17.00	17.50	19.00	17.83	1.17	0.83
450	23.50	23.88	24.63	24.00	0.63	0.50
550	30.00	30.00	32.00	30.67	1.33	0.67
650	50.00	52.00	53.00	51.67	1.33	1.67

ตารางที่ 58 การยึดตัวสูงสุด

เวลาอบ 10 นาที ตามขวางรอยรีด

การยึดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	20.00	18.60	22.00	20.20	1.80	0.20
450	26.32	24.36	27.56	26.08	1.48	1.72
550	35.00	35.00	41.00	37.00	4.00	2.00
650	51.00	54.00	54.00	53.00	1.00	2.00

ตารางที่ 59 การยึดตัวสูงสุด

เวลาอบ 15 นาที ตามขวางรอยรีด

การยึดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	22.80	19.30	25.10	22.40	2.70	3.10
450	29.20	24.60	30.60	28.13	2.47	3.53
550	44.40	41.20	45.50	43.70	1.80	2.50
650	65.00	67.00	67.00	66.33	0.67	1.33

ตารางที่60 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 20 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	25.90	20.10	28.60	24.87	3.73	4.77
450	32.40	24.90	33.90	30.40	3.50	5.50
550	49.30	41.60	50.50	47.13	3.37	5.53
650	80.60	76.40	83.10	80.03	3.07	3.63

ตารางที่61 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 25 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	29.60	20.90	32.60	27.70	4.90	6.80
450	35.90	25.10	37.70	32.90	4.80	7.80
550	54.70	42.00	56.00	50.90	5.10	8.90
650	86.90	87.10	103.00	92.33	10.67	5.23

ตารางที่62 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 30 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	20.70	32.60	35.50	29.60	5.90	8.90
450	24.60	38.80	40.70	34.70	6.00	10.10
550	42.40	60.70	62.20	55.10	7.10	12.70
650	89.50	81.00	106.10	92.20	13.90	2.70

ตารางที่ 63 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 35 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	23.60	18.60	35.50	25.90	9.60	2.30
450	23.10	40.35	42.30	41.33	0.97	0.98
550	42.40	66.70	68.40	59.17	9.23	16.77
650	81.00	98.50	116.70	107.60	9.10	9.10

ตารางที่ 64 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 40 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	25.90	18.60	39.10	27.87	11.23	1.97
450	23.10	44.40	46.50	38.00	8.50	14.90
550	73.40	42.40	75.20	63.67	11.53	21.27
650	108.40	81.00	128.40	105.93	22.47	24.93

ตารางที่ 65 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 45 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	28.50	18.60	43.00	30.03	12.97	1.53
450	57.70	27.70	60.50	48.63	11.87	20.93
550	80.70	42.40	82.70	68.60	14.10	26.20
650	119.20	81.00	141.00	113.73	27.27	32.73

ตารางที่ 66 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 50 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	31.40	18.60	47.30	32.43	14.87	1.03
450	35.10	33.20	78.70	49.00	29.70	13.90
550	88.80	42.40	90.90	74.03	16.87	31.63
650	131.10	81.00	155.10	122.40	32.70	41.40

ตารางที่ 67 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 55 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	34.54	18.60	52.03	35.06	16.97	0.52
450	38.61	33.20	86.57	52.79	33.78	14.18
550	97.68	42.40	99.99	80.02	19.97	37.62
650	144.21	81.00	170.61	131.94	38.67	50.94

ตารางที่ 68 การยืดตัวสูงสุด

เวลาอบ 60 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวสูงสุด	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	26.00	26.04	78.05	43.36	34.68	17.36
450	50.19	39.84	80.00	56.68	23.32	6.48
550	126.98	50.88	129.99	102.62	27.37	51.74
650	158.63	81.00	187.67	142.43	45.24	61.43

ตารางที่ 69 การยึดตัวคราก

เวลาอบ 5 นาที ตามรอยรีด

การยึดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	6.04	6.04	6.10	6.06	0.04	0.02
450	7.06	7.20	7.27	7.18	0.09	0.12
550	11.64	12.00	12.12	11.92	0.20	0.28
650	21.17	21.60	21.82	21.53	0.29	0.36

ตารางที่ 70 การยึดตัวคราก

เวลาอบ 10 นาที ตามรอยรีด

การยึดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	5.90	6.30	6.40	6.20	0.20	0.30
450	8.60	9.00	9.10	8.90	0.20	0.30
550	14.70	15.00	15.20	14.97	0.23	0.27
650	22.80	23.00	23.20	23.00	0.20	0.20

ตารางที่ 71 การยึดตัวคราก

เวลาอบ 15 นาที ตามรอยรีด

การยึดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	6.40	6.60	6.70	6.57	0.13	0.17
450	10.90	11.00	11.10	11.00	0.10	0.10
550	15.50	16.00	16.20	15.90	0.30	0.40
650	23.50	24.80	25.10	24.47	0.63	0.97

ตารางที่ 72 การยึดตัวคราก

เวลาอบ 20 นาที ตามรอยรีด

การยึดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	6.93	7.00	7.07	7.00	0.07	0.07
450	11.86	12.10	12.22	12.06	0.16	0.20
550	19.00	20.00	20.20	19.73	0.47	0.73
650	26.19	27.00	27.27	26.82	0.45	0.63

ตารางที่ 73 การยึดตัวคราก

เวลาอบ 25 นาที ตามรอยรีด

การยึดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	7.92	8.00	8.08	8.00	0.08	0.08
450	13.62	13.90	14.04	13.85	0.19	0.23
550	19.95	21.00	21.21	20.72	0.49	0.77
650	27.46	28.60	28.89	28.31	0.57	0.86

ตารางที่ 74 การยึดตัวคราก

เวลาอบ 30 นาที ตามรอยรีด

การยึดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	9.80	10.00	10.10	9.97	0.13	0.17
450	15.42	15.90	16.06	15.79	0.26	0.37
550	22.77	23.00	23.23	23.00	0.23	0.23
650	30.38	31.00	31.31	30.90	0.41	0.52

ตารางที่ 75 การยืดตัวคราก

เวลาอบ 35 นาที ตามรอยรีด

การยืดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	11.76	12.00	12.12	11.96	0.16	0.20
450	16.15	17.00	17.17	16.77	0.40	0.62
550	24.25	25.00	25.25	24.83	0.42	0.58
650	30.72	32.00	32.32	31.68	0.64	0.96

ตารางที่ 76 การยืดตัวคราก

เวลาอบ 40 นาที ตามรอยรีด

การยืดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	14.70	15.00	15.15	14.95	0.20	0.25
450	17.67	18.60	18.79	18.35	0.43	0.68
550	26.40	27.50	27.78	27.23	0.55	0.82
650	32.40	33.40	33.73	33.18	0.56	0.78

ตารางที่ 77 การยืดตัวคราก

เวลาอบ 45 นาที ตามรอยรีด

การยืดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	19.01	19.20	19.39	19.20	0.19	0.19
450	20.69	20.90	21.11	20.90	0.21	0.21
550	28.71	29.00	29.29	29.00	0.29	0.29
650	35.15	35.50	35.86	35.50	0.35	0.35

ตารางที่ 78 การยืดตัวคราก

เวลาอบ 50 นาที ตามรอยรีด

การยืดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	20.79	21.00	21.21	21.00	0.21	0.21
450	21.88	22.10	22.32	22.10	0.22	0.22
550	29.70	30.00	30.30	30.00	0.30	0.30
650	36.63	37.00	37.37	37.00	0.37	0.37

ตารางที่ 79 การยืดตัวคราก

เวลาอบ 55 นาที ตามรอยรีด

การยืดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	22.18	22.40	22.62	22.40	0.22	0.22
450	23.76	24.00	24.24	24.00	0.24	0.24
550	32.67	33.00	33.33	33.00	0.33	0.33
650	38.02	38.40	38.78	38.40	0.38	0.38

ตารางที่ 80 การยืดตัวคราก

เวลาอบ 60 นาที ตามรอยรีด

การยืดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	22.97	23.20	23.43	23.20	0.23	0.23
450	26.93	27.20	27.47	27.20	0.27	0.27
550	36.63	37.00	37.37	37.00	0.37	0.37
650	41.58	42.00	42.42	42.00	0.42	0.42

ตารางที่ 81 การยึดตัวคราก

เวลาอบ 5 นาที ตามขวางรอยรีด

การยึดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	6.10	6.20	6.30	6.20	0.10	0.10
450	7.60	7.80	7.90	7.77	0.13	0.17
550	11.76	12.20	12.40	12.12	0.28	0.36
650	21.38	22.00	22.30	21.89	0.41	0.51

ตารางที่ 82 การยึดตัวคราก

เวลาอบ 10 นาที ตามขวางรอยรีด

การยึดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	6.00	6.40	7.70	6.70	1.00	0.70
450	8.70	9.20	11.00	9.63	1.37	0.93
550	14.90	15.30	18.40	16.20	2.20	1.30
650	23.20	23.40	28.10	24.90	3.20	1.70

ตารางที่ 83 การยึดตัวคราก

เวลาอบ 15 นาที ตามขวางรอยรีด

การยึดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	6.65	7.03	7.15	6.94	0.21	0.29
450	11.69	11.86	11.88	11.78	0.09	0.08
550	19.11	19.3	19.87	19.21	0.10	0.09
650	27	27.8	28	27.60	0.40	0.60

ตารางที่ 84 การยัดตัวคราก

เวลาอบ 20 นาที ตามขวางรอยรีด

การยัดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	7.00	7.10	7.30	7.13	0.17	0.13
450	12.10	12.30	12.50	12.30	0.20	0.20
550	19.30	20.10	20.70	20.03	0.67	0.73
650	26.60	27.90	29.50	28.00	1.50	1.40

ตารางที่ 85 การยัดตัวคราก

เวลาอบ 25 นาที ตามขวางรอยรีด

การยัดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	8.00	8.20	8.30	8.17	0.13	0.17
450	13.90	14.20	14.40	14.17	0.23	0.27
550	20.30	21.40	21.80	21.17	0.63	0.87
650	28.00	29.20	29.60	28.93	0.67	0.93

ตารางที่ 86 การยัดตัวคราก

เวลาอบ 30 นาที ตามขวางรอยรีด

การยัดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	9.90	10.20	10.30	10.13	0.17	0.23
450	15.60	16.20	16.40	16.07	0.33	0.47
550	23.00	23.40	23.70	23.37	0.33	0.37
650	30.70	31.60	31.90	31.40	0.50	0.70

ตารางที่ 87 การยืดตัวคราก

เวลาอบ 35 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	11.90	12.20	12.40	12.17	0.23	0.27
450	16.30	17.30	17.50	17.03	0.47	0.73
550	24.50	25.40	25.80	25.23	0.57	0.73
650	31.00	32.50	33.00	32.17	0.83	1.17

ตารางที่ 88 การยืดตัวคราก

เวลาอบ 40 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	14.90	15.30	18.50	16.23	2.27	1.33
450	17.90	19.00	22.90	19.93	2.97	2.03
550	26.70	28.00	34.00	29.57	4.43	2.87
650	32.80	34.00	41.20	36.00	5.20	3.20

ตารางที่ 89 การยืดตัวคราก

เวลาอบ 45 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	19.20	19.60	19.90	19.57	0.33	0.37
450	20.90	21.30	21.70	21.30	0.40	0.40
550	28.90	29.50	30.00	29.47	0.53	0.57
650	35.40	36.10	36.80	36.10	0.70	0.70

ตารางที่ 90 การยืดตัวคราก

เวลาอบ 50 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	21.00	21.40	23.00	21.80	1.20	0.80
450	22.10	22.50	27.90	24.17	3.73	2.07
550	30.00	30.60	37.90	32.83	5.07	2.83
650	37.00	37.70	46.70	40.47	6.23	3.47

ตารางที่ 91 การยืดตัวคราก

เวลาอบ 55 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	22.30	22.90	23.00	22.73	0.27	0.43
450	23.90	24.50	24.90	24.43	0.47	0.53
550	32.80	33.70	34.20	33.57	0.63	0.77
650	38.20	42.00	43.00	41.07	1.93	2.87

ตารางที่ 92 การยืดตัวคราก

เวลาอบ 60 นาที ตามขวางรอยรืด

การยืดตัวคราก	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า บวก	ค่าลบ
350	23.60	23.60	23.80	23.67	0.13	0.07
450	27.40	27.70	28.00	27.70	0.30	0.30
550	37.30	37.60	38.00	37.63	0.37	0.33
650	42.30	42.70	43.10	42.70	0.40	0.40

ตารางที่93 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 5 นาที ตามรอยรีด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	60.5	57	58.9	61.1	58.25	59.15	-0.25	-1.35
450	49.3	45.8	44.6	45.5	49.5	46.94	-2.34	-2.36
550	52.1	42.9	49.9	35.6	30.4	42.18	7.72	-9.92
650	41.9	40.3	34.9	43.5	43.3	40.78	-5.88	-1.12

ตารางที่94 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 10 นาที ตามรอยรีด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	55.2	57.1	58.4	51.5	54.6	55.36	3.04	0.16
450	38.2	43.4	41.5	41.8	37.7	40.52	0.98	2.32
550	37.9	38.3	41.7	41	35.5	38.88	2.82	0.98
650	30.8	40.8	40	40.5	33.8	37.18	2.82	6.38

ตารางที่95 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 15 นาที ตามรอยรีด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	52.6	54.1	54.4	54.8	55.3	54.24	0.16	1.64
450	42.6	30.3	40.8	42.8	40.1	39.32	1.48	-3.28
550	36.9	37.6	37.6	36.8	38.8	37.54	0.06	0.64
650	36.9	34.9	36.5	36.2	38.9	36.68	-0.18	-0.22

ตารางที่ 96 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 20 นาที ตามรอยรีด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	46.7	51	50.4	50.4	50.6	49.82	0.58	3.12
450	39	37.9	38.2	39.7	39.5	38.86	-0.66	-0.14
550	37	37.6	35.2	34	36.2	36.00	-0.80	-1.00
650	36.8	34.6	34.7	35.9	34.8	35.36	-0.66	-1.44

ตารางที่ 97 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 25 นาที ตามรอยรีด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	48.5	46.4	48.5	47.9	49.8	48.22	0.28	-0.28
450	36.7	37.9	36.7	36.3	38.9	37.30	-0.60	0.60
550	36	35.9	35	31.3	36.5	34.94	0.06	-1.06
650	35.3	33.5	33.5	34.5	34.8	34.32	-0.82	-0.98

ตารางที่ 98 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 30 นาที ตามรอยรีด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	48.9	49.6	47.7	45.3	44.9	47.28	0.42	-1.62
450	36.3	36.2	33.3	39.5	34.7	36.00	-2.70	-0.30
550	34.9	32.2	32.5	34.6	34.9	33.82	-1.32	-1.08
650	31.2	34.7	35.9	31.9	30.7	32.88	3.02	1.68

ตารางที่ 99 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 35 นาที ตามรอยรีด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	45.3	47.2	45.5	42.6	49.6	46.04	-0.54	0.74
450	31.4	32.1	39.9	40.3	34.5	35.64	4.26	4.24
550	30.1	31.7	30.3	34.7	34	32.16	-1.86	2.06
650	29.2	31.3	31.6	30.5	30.7	30.66	0.94	1.46

ตารางที่ 100 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 40 นาที ตามรอยรีด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	41.3	40.9	47.2	47.6	48.9	45.18	2.02	3.88
450	35.7	31.1	35.3	37.5	32.7	34.46	0.84	-1.24
550	32.8	30.4	31.6	32.2	31.5	31.70	-0.10	-1.10
650	28.8	30	30.3	29.1	27.5	29.14	1.16	0.34

ตารางที่ 101 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 45 นาที ตามรอยรีด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	41.6	44.5	44.5	47.3	42.6	44.10	0.40	2.50
450	33.6	33.6	31.5	35.5	31.4	33.12	-1.62	-0.48
550	30.1	33.1	28.7	30.5	29.5	30.38	-1.68	0.28
650	27.9	29.9	28.4	28.7	28	28.58	-0.18	0.68

ตารางที่102 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 50 นาที ตามรอยรีด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	44	43.1	42.1	43	43.1	43.06	-0.96	-0.94
450	31.4	35.6	30.7	32.5	31.2	32.28	-1.58	0.88
550	30.1	30.1	30	30	30.1	30.06	-0.06	-0.04
650	26.5	26.9	25.8	26	27.6	26.56	-0.76	0.06

ตารางที่103 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 55 นาที ตามรอยรีด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	47.5	37.4	41.6	36.8	43.7	41.40	0.20	-6.10
450	34.9	31.6	29.1	31.2	32	31.76	-2.66	-3.14
550	29	30.8	29.5	29.8	28.9	29.60	-0.10	0.60
650	23.4	24.7	26.8	25.7	29.8	26.08	0.72	2.68

ตารางที่104 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 60 นาที ตามรอยรีด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	40.9	41.4	39.1	40	41.1	40.50	-1.40	-0.40
450	30.1	31	32	30.1	31.8	31.00	1.00	0.90
550	28.5	27.4	29.1	26.4	29.2	28.12	0.98	-0.38
650	25.4	24.8	24.2	25.5	27.8	25.54	-1.34	0.14

ตารางที่105 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 5 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	53.9	52.7	51.2	51.1	52.2	52.22	-1.02	-1.68
450	43.3	44.5	44.2	49.4	40.3	44.34	-0.14	1.04
550	39	38	37.2	39.1	32.9	37.24	-0.04	-1.76
650	45.2	36.9	36.6	30.8	34.6	36.82	-0.22	-8.38

ตารางที่106 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 10 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	45.9	46.2	51.4	48.9	56.6	49.80	1.60	3.90
450	40	39.9	47.7	40	44	42.32	5.38	2.42
550	30.9	35.8	40.1	32.7	33.8	34.66	5.44	3.76
650	37.6	36.4	35.8	31.6	35.6	35.40	0.40	-2.20

ตารางที่107 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 15 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	47.7	44.3	45.4	49.7	48.5	47.12	-1.72	2.82
450	40.2	41.2	42.2	40.1	40.6	40.86	1.34	-0.34
550	34.1	35.5	31.4	34.9	30.2	33.22	-1.82	-2.28
650	35.4	30.3	31.4	32.5	31.8	32.28	-0.88	-3.12

ตารางที่108 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 20 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	46.7	46.2	47	47.4	47.4	46.94	0.06	0.74
450	38.7	43.5	41.3	37	34.1	38.92	2.38	-4.58
550	30.1	32.7	35.3	33.3	31.2	32.52	2.78	-0.18
650	31.5	32.5	31.3	34.5	30.1	31.98	-0.68	-0.52

ตารางที่109 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 25 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	45.4	45.1	45.1	44.9	44.6	45.02	0.08	-0.08
450	41.3	36.6	34.4	34.8	35.5	36.52	-2.12	-0.08
550	28.8	30.5	31.3	32.7	37.1	32.08	-0.78	1.58
650	31.2	32	30.1	30.6	30.7	30.92	-0.82	-1.08

ตารางที่110 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 30 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	42.1	45.2	45.1	46.9	41.4	44.14	0.96	2.04
450	38.5	34	32.8	31.2	38.8	35.06	-2.26	-3.44
550	31.8	32.7	31.3	30.3	30.2	31.26	0.04	-0.54
650	30.1	28.4	30.1	29.5	30.4	29.70	0.40	-0.40

ตารางที่111 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 35 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	43.2	40.3	49.9	43.5	42.3	43.84	6.06	0.64
450	34.1	35	33.8	36.4	34.3	34.72	-0.92	-0.28
550	31.3	31.2	30	31.1	30.7	30.86	-0.86	-0.44
650	29.5	29.7	30.9	28.1	27.8	29.20	1.70	-0.50

ตารางที่112 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 40 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	41.3	43.5	40.4	42.8	43.7	42.34	-1.94	1.04
450	31.1	33.8	34.2	36.3	31.8	33.44	0.76	2.34
550	29	30.7	30.4	30	29.7	29.96	0.44	-0.74
650	28.1	28	27.8	27.9	28.8	28.12	-0.32	0.12

ตารางที่113 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 45 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	42	44.2	33.2	42.1	44.8	41.26	-8.06	-0.74
450	30.4	30.4	31.2	34.2	34.4	32.12	-0.92	1.72
550	28.3	30.6	27.1	28	27.3	28.26	-1.16	-2.34
650	27	27.7	28.7	25.6	26.5	27.10	1.60	-0.60

ตารางที่114 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 50 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	40	39.1	38.5	41.2	42.8	40.32	-1.82	0.32
450	31.2	30.9	30.6	34.4	30.8	31.58	-0.98	0.38
550	28.4	28.5	28.4	25.4	26.4	27.42	0.98	-1.08
650	29.1	26.3	25.8	27.1	26.4	26.94	-1.14	0.64

ตารางที่115 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 55 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	39.3	39.2	38.3	39.9	39.1	39.16	-0.86	-0.14
450	30.5	30	30.6	32.2	31.1	30.88	-0.28	0.38
550	25.6	24.6	25.5	28	26.9	26.12	-0.62	1.52
650	27.8	24.3	25.7	26.8	24.9	25.90	-0.20	1.60

ตารางที่116 ค่าความแข็ง

เวลาอบ 60 นาที ตามขวางรอยรืด

ความแข็ง	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	33.4	38.1	35.6	39.8	41.3	37.64	-2.04	4.24
450	27.1	31.4	29.7	30.2	28	29.28	0.42	2.18
550	25.3	25.8	24.6	26.9	25.4	25.60	-1.00	-0.20
650	25.1	25.8	24.9	24.4	24.7	24.98	-0.08	-0.82

ตารางที่117 ค่าความต้านทานไฟฟ้า

เวลาอบ 5 นาที ตามรอยรีด

ความต้านทานไฟฟ้า	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	193.00	194.90	195.00	194.30	0.70	1.30
450	192.10	191.25	190.21	191.19	-0.98	-0.91
550	187.87	189.00	189.00	188.62	0.38	0.75
650	186.80	186.00	186.30	186.37	-0.07	-0.43

ตารางที่118 ค่าความต้านทานไฟฟ้า

เวลาอบ 10 นาที ตามรอยรีด

ความต้านทานไฟฟ้า	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	190.96	189.00	189.52	189.83	-0.31	-1.13
450	187.26	188.00	187.52	187.59	-0.07	0.33
550	183.58	184.23	183.96	183.92	0.04	0.34
650	181.36	180	181.25	180.87	0.38	-0.49

ตารางที่119 ค่าความต้านทานไฟฟ้า

เวลาอบ 15 นาที ตามรอยรีด

ความต้านทานไฟฟ้า	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	189.00	188.00	189.00	188.67	0.33	-0.33
450	182.00	183.70	183.50	183.07	0.43	1.07
550	183.00	181.40	181.00	181.80	-0.80	-1.20
650	180.10	178.90	179.50	179.50	0.00	-0.60

ตารางที่120 ค่าความต้านทานไฟฟ้า

เวลาอบ 20 นาที ตามรอยรีด

ความต้านทานไฟฟ้า	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	185.30	185.90	185.50	185.57	-0.07	0.27
450	182.00	183.70	182.50	182.73	-0.23	0.73
550	180.10	179.90	179.50	179.83	-0.33	-0.27
650	177.00	179.00	176.00	177.33	-1.33	0.33

ตารางที่121 ค่าความต้านทานไฟฟ้า

เวลาอบ 25 นาที ตามรอยรีด

ความต้านทานไฟฟ้า	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	184.00	184.00	183.00	183.67	-0.67	-0.33
450	181.00	181.00	180.00	180.67	-0.67	-0.33
550	175.00	176.00	176.00	175.67	0.33	0.67
650	173.00	173.60	172.60	173.07	-0.47	0.07

ตารางที่122 ค่าความต้านทานไฟฟ้า

เวลาอบ 30 นาที ตามรอยรีด

ความต้านทานไฟฟ้า	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	181.00	180.00	180.00	180.33	-0.33	-0.67
450	179.00	179.60	179.10	179.23	-0.13	0.23
550	175.00	176.00	176.00	175.67	0.33	0.67
650	172.20	173.00	172.00	172.40	-0.40	0.20

ตารางที่123 ค่าความต้านทานไฟฟ้า

เวลาอบ 35 นาที ตามรอยรีด

ความต้านทานไฟฟ้า	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	178.90	179.00	178.53	178.81	-0.28	-0.09
450	176.30	176.30	175.20	175.93	-0.73	-0.37
550	170.00	171.00	170.00	170.33	-0.33	0.33
650	168.30	168.20	168.40	168.30	0.10	0.00

ตารางที่124 ค่าความต้านทานไฟฟ้า

เวลาอบ 40 นาที ตามรอยรีด

ความต้านทานไฟฟ้า	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	175.20	175.10	175.60	175.30	0.30	0.10
450	173.00	174.00	173.60	173.53	0.07	0.53
550	169.00	169.80	170.30	169.70	0.60	0.70
650	165.00	164.00	163.00	164.00	-1.00	-1.00

ตารางที่125 ค่าความต้านทานไฟฟ้า

เวลาอบ 45 นาที ตามรอยรีด

ความต้านทานไฟฟ้า	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	172.60	173.40	173.70	173.23	0.47	0.63
450	168.00	169.00	169.00	168.67	0.33	0.67
550	165.20	165.00	165.20	165.13	0.07	-0.07
650	162.40	161.00	162.90	162.10	0.80	-0.30

ตารางที่126 ค่าความต้านทานไฟฟ้า

เวลาอบ 50 นาที ตามรอยรีด

ความต้านทานไฟฟ้า	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	172.00	171.00	171.40	171.47	-0.07	-0.53
450	165.00	165.50	165.50	165.33	0.17	0.33
550	162.00	161.00	161.80	161.60	0.20	-0.40
650	157.50	157.32	158.00	157.61	0.39	0.11

ตารางที่127 ค่าความต้านทานไฟฟ้า

เวลาอบ 55 นาที ตามรอยรีด

ความต้านทานไฟฟ้า	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	162.60	163.00	163.40	163.00	0.40	0.40
450	162.00	161.00	161.40	161.47	-0.07	-0.53
550	157.00	157.80	158.40	157.73	0.67	0.73
650	148.90	149.69	149.00	149.20	-0.20	0.30

ตารางที่128 ค่าความต้านทานไฟฟ้า

เวลาอบ 60 นาที ตามรอยรีด

ความต้านทานไฟฟ้า	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าบวก	ค่าลบ
350	160.00	160.50	160.20	160.23	-0.03	0.23
450	157.00	157.80	158.40	157.73	0.67	0.73
550	153.00	153.50	154.00	153.50	0.50	0.50
650	147.00	148.00	148.00	147.67	0.33	0.67



ประวัติผู้วิจัย

1. หัวหน้าโครงการ

1.1 ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นาย ชเนรินทร์ รักสัตย์

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Chanerin Raksat

1.2 ตำแหน่งปัจจุบัน พนักงานมหาวิทยาลัย

1.3 หน่วยงานที่สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เบอร์โทรศัพท์ 02-549-4643 โทรสาร 02-549-3442

e-mail: chanerin.r@en.rmutt.ac.th

1.4 ประวัติการศึกษา

1.4.1 วศ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ ปีการศึกษา 2554 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1.4.2 วศ.ม. วิศวกรรมการผลิต ปีการศึกษา 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1.5 สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

1.5.1 การทดสอบวัสดุ

1.5.2 กระบวนการผลิต

1.6 ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นหัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย (ปัจจุบัน-2559)

1.6.1 ชื่อโครงการวิจัย

1) การประยุกต์เทคนิคการหมุนวนอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมทิกในการลดขนาดเฟสอะลูมิเนียม-ทองแดงในผิวเคลือบอะลูมิเนียมบนเหล็กกล้าผสมงบกองทุนส่งเสริมงานวิจัย ปี 2563 มทร.ธัญบุรี
สถานะ: หัวหน้าโครงการวิจัย สถานะโครงการวิจัย: เสร็จสิ้น

2) การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกแข็งโครเมียมสูงบนผิวเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ด้วยเทคนิคการเชื่อมทิกและแม่ก งบประมาณประจำปี 2562 มทร.ธัญบุรี สถานะ: ผู้ร่วมวิจัย สถานะโครงการวิจัย: เสร็จสิ้น

3) อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมทิกที่มีผลต่อสมบัติของรอยต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304/AISI316 ในท่อส่งถ่ายน้ำผลไม้ งบประมาณประจำปี 2561 มทร.ธัญบุรี สถานะ: ผู้ร่วมวิจัย สถานะโครงการวิจัย: เสร็จสิ้น

4) การเชื่อมซ่อมรอยเชื่อมต่อชนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304/AISI316 ในระบบส่งถ่ายน้ำผลไม้ งบกองทุนส่งเสริมงานวิจัย ปี 2561 มทร.ธัญบุรี สถานะ: หัวหน้าโครงการวิจัย สถานะโครงการวิจัย: เสร็จสิ้น

- 5) การศึกษาการเสื่อมสภาพของสมบัติรอยต่อเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304/AISI316 ในสารละลายน้ำผลไม้ สถานะ: ผู้ร่วมวิจัย สถานะโครงการวิจัย: เสร็จสิ้น

1.6.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน (อาจมากกว่า 1 เรื่อง)

- 1) ชเนรินทร์ รักสตัย ระพี กาญจนะ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ศักดิ์ชัย จันทศรี. “การศึกษาอิทธิพลกระแสเชื่อมอาร์กทั้งสะเตนแก๊สคลุมต่อสมบัติของรอยต่อระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L”. วารสารวิชาการปทุมวัน ปีที่ 10 ฉบับที่ 28 หน้า 79-88. แหล่งทุน: งบประมาณประจำปี 2561 มทร.ธัญบุรี
- 2) ศักดิ์ชัย จันทศรี ระพี กาญจนะ ชเนรินทร์ รักสตัย กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. “การเลือกใช้โลหะเติมสำหรับการเชื่อมทิกทอไรต์เชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI304 และเกรด AISI316L”. วารสารวิชาการปทุมวัน ปีที่ 10 ฉบับที่ 27 หน้า 16-25. แหล่งทุน: งบประมาณประจำปี 2561 มทร.ธัญบุรี
- 3) ชเนรินทร์ รักสตัย ระพี กาญจนะ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ ศักดิ์ชัย จันทศรี. “การประยุกต์การเชื่อมทิกแบบไม่ใช้โลหะเติมสำหรับการเชื่อมซ่อมรอยต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด”. วารสารวิชาการปทุมวัน ปีที่ 9 ฉบับที่ 26 หน้า 25-33. แหล่งทุน: งบประมาณประจำปี 2561 มทร.ธัญบุรี