

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

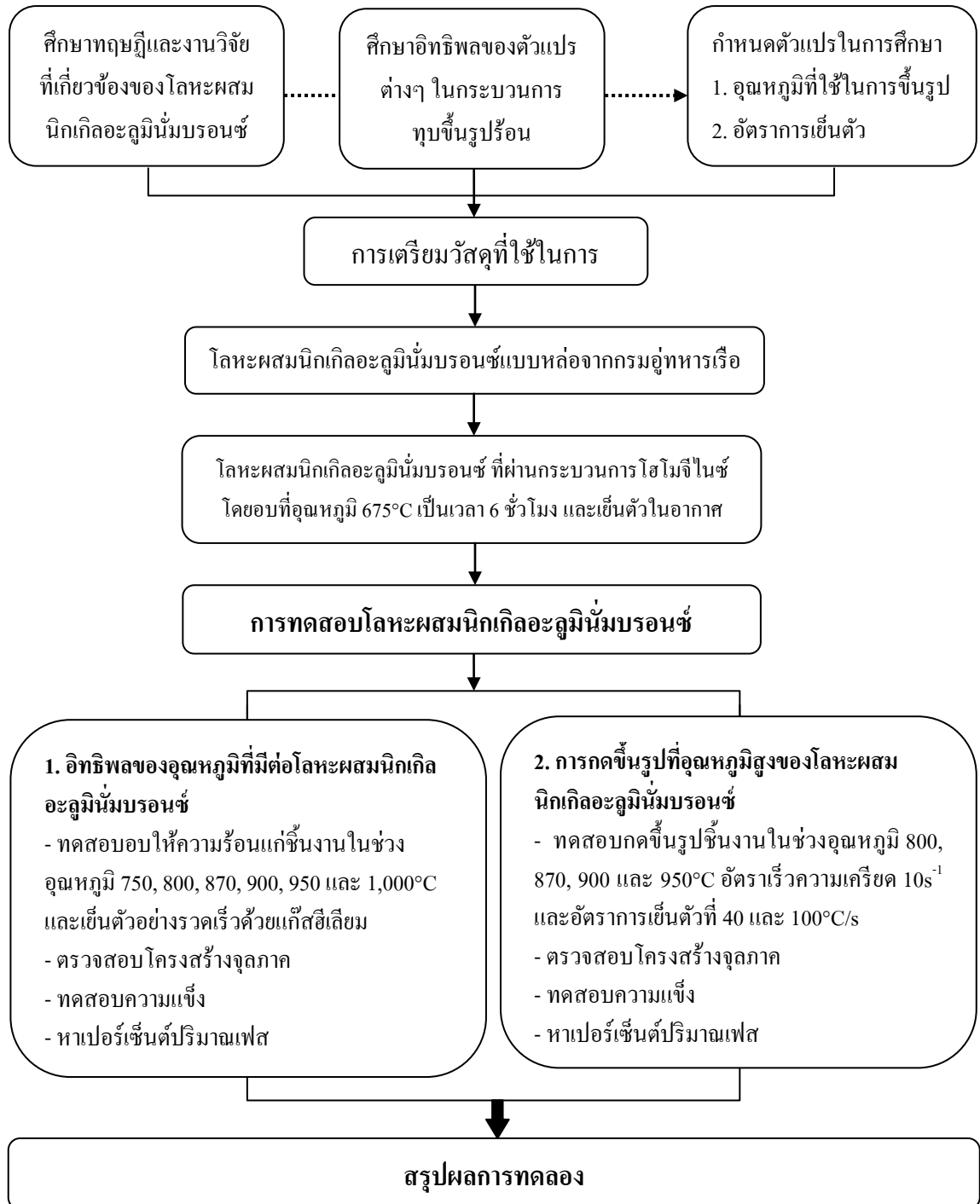
สำหรับในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงาน การเตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ และการทดสอบโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่างๆ แล้ววิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็ง เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาเก็บข้อมูลเบื้องต้นและทำการทดลองเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เริ่มจากการศึกษาข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์และกระบวนการทอบขึ้นรูปร้อน เพื่อกำหนดและเลือกใช้ตัวแปรในการทดลองที่มีผลต่อกระบวนการทอบขึ้นรูปร้อน อันประกอบด้วยอุณหภูมิที่ใช้ในการทอบขึ้นรูป และอัตราการเย็นตัวหลังการทอบขึ้นรูป หลังจากนั้นได้เตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบคือโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล่อโดยกรมอุตสาหกรรมเรือและผ่านกระบวนการโฮโมจิไนซ์ โดยอบที่อุณหภูมิ 675°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ โดยแนวทางการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. การทดสอบโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ $750-1,000^{\circ}\text{C}$ และเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วด้วยแก๊สฮีเลียม ด้วยเครื่องทดสอบไดลาโตมิเตอร์ แล้ววิเคราะห์กราฟการขยายตัวทางความร้อนของวัสดุ (Thermal Expansion) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทดสอบความแข็ง และหาเปอร์เซ็นต์ปริมาตรเฟส
2. การทดสอบโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ภายใต้สภาวะการกดขึ้นรูปร้อน โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ $800-950^{\circ}\text{C}$ หลังจากนั้นกดขึ้นรูปด้วยอัตราความเครียด 10 s^{-1} และอัตราการเย็นตัวที่ 40 และ 100°C/s ตามลำดับ ด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ แล้ววิเคราะห์กราฟความเค้น

และความเครียดจริง เพื่อประเมินความสามารถในการทบขึ้นรูปร้อนของชิ้นงาน ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทดสอบความแข็ง และหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟส แล้วจึงทำการวิเคราะห์ร่วมทั้งสรุปผลการทดลอง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย คือ โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล่อโดยกรรมอุทการเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล่อมีธาตุประกอบที่สำคัญคือ ทองแดง (Cu) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) และแมงกานีส (Mn) ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล่อ

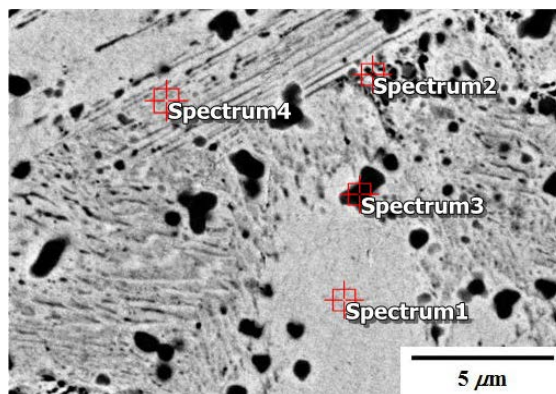
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล่อ (wt.%) [28]

ส่วนผสม	Cu	Al	Fe	Ni	Mn
โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์หล่อ	84.71	9.26	2.55	3.26	0.22

โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล่อโดยกรรมอุทการเร็วนี้ ประกอบด้วยธาตุเจือหลายชนิด จึงทำให้ไม่ได้มีจุดหลอมเหลวเดียวเหมือนโลหะบริสุทธิ์ แต่จะมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวที่ประกอบด้วยเฟสของเหลวและเฟสของแข็ง [15] โดยโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล่อโดยกรรมอุทการเร็วมีอุณหภูมิของการกลายเป็นของแข็ง (Solidus temperature) ที่อุณหภูมิ $1,044^{\circ}\text{C}$ และมีอุณหภูมิของการกลายเป็นของเหลว (Liquidus temperature) ที่อุณหภูมิ $1,068^{\circ}\text{C}$ จากบทที่ 2 ทราบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของโลหะทั่วไปมีค่า $0.5T_m$ [16] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสามารถเลือกช่วงอุณหภูมิในการทดสอบการคืบขึ้นรูปโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่อุณหภูมิ 534°C ขึ้นไป หลังจากนั้นได้เตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ โดยการนำโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่

ได้จากการหล่อไปผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ โดยการอบที่อุณหภูมิ 675°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยเตาอบชุบโลหะแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ เพื่อให้โครงสร้างมีความเป็นเนื้อเดียวกัน

รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล่อด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron; BSE) ซึ่งความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน หากมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงานมีค่าสูงภาพที่ได้จะสว่าง และหากมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงานมีค่าต่ำภาพที่ได้จะมีมืด [29, 30] จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพบว่าบริเวณสว่างคือเฟส α เป็นบริเวณที่มีทองแดงหนาแน่น (Cu rich) ส่วนบริเวณที่มีเหล็กและอะลูมิเนียมหนาแน่น (Fe-Al rich) เป็นสีดำ คือบริเวณของเฟส κ_1 มีลักษณะเป็นดอกกุหลาบหรือเม็ดกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า $20\ \mu\text{m}$ กระจายอยู่ตามขอบเกรนเฟส α และเฟส β' ซึ่งโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ใช้งานวิจัยนี้ไม่มีเฟส κ_2 เนื่องจากปริมาณธาตุเหล็กที่มีอยู่ในชิ้นงานน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt.%) นอกจากนี้บริเวณนิกเกิลและอะลูมิเนียมหนาแน่น (Ni-Al rich) ที่เห็นเป็นสีเทา คือเฟส κ_{III} มีลักษณะเป็นเส้นแถบซ้อนทับ และเฟส β' ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบมาเทนไซต์มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคอย่างไม่เป็นระเบียบ จึงปรากฏลักษณะเป็นบริเวณสีเทาและมีการกระจายตัวของอนุภาคเป็นเม็ดเล็กๆ สีดำบริเวณนั้น ซึ่งเฟส β' นั้นเป็นเฟสที่ไม่ต้องการให้มีในโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ เพราะสามารถเกิดการกัดกร่อนอันเนื่องจากการสูญเสียธาตุอะลูมิเนียมได้ง่าย เนื่องจากมีธาตุอะลูมิเนียมในปริมาณสูง ซึ่งสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการนำชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ไปอบที่อุณหภูมิ 675°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



รูปที่ 3.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล่อ

จากการตรวจสอบโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล่อ ด้วยเทคนิคสเปกโทรเมตรีรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ ในแต่ละเฟส ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 3.2 พบว่า

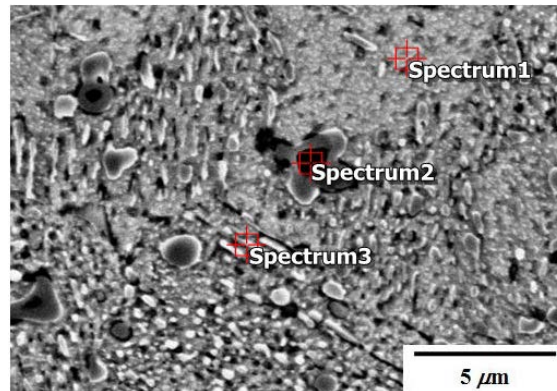
- บริเวณที่ยิงสเปกตรัมที่ 1 ที่มีลักษณะเป็นพื้นสีเทาอ่อน มีธาตุทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นเฟส α
- บริเวณที่ยิงสเปกตรัมที่ 2 ที่มีลักษณะเป็นพื้นสีเทาและมีเม็ดกลมๆสีดำกระจายในบริเวณนั้น ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของธาตุไม่สม่ำเสมอ มีปริมาณธาตุอะลูมิเนียมและนิกเกิลมากกว่าบริเวณเฟส α สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นเฟส β'
- บริเวณที่ยิงสเปกตรัมที่ 3 ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีดำ มีปริมาณธาตุเหล็กและธาตุอะลูมิเนียมมากกว่าบริเวณเฟส α สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นเฟส $\alpha + \kappa_{ii}$
- บริเวณที่ยิงสเปกตรัมที่ 4 ที่มีลักษณะเป็นแถบซ้อนทับกันสีเทา มีปริมาณธาตุอะลูมิเนียมและธาตุนิกเกิลมากกว่าบริเวณเฟส α สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นเฟส $\alpha + \kappa_{iii}$

ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีบริเวณต่างๆ ของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล่อ

โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ที่เตรียมจากการหล่อ	ส่วนประกอบทางเคมี (wt.%)				เฟส
	Al	Fe	Ni	Cu	
สเปกตรัมที่ 1	9.93	2.43	3.93	83.72	α
สเปกตรัมที่ 2	13.07	4.68	4.60	77.65	β'
สเปกตรัมที่ 3	11.34	20.70	7.14	60.83	$\alpha + \kappa_{ii}$
สเปกตรัมที่ 4	10.69	2.28	4.96	82.07	$\alpha + \kappa_{iii}$

เมื่อนำโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหลอมผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์ โดยอบที่อุณหภูมิ 675°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคขึ้น โดยเฟส β' จะเปลี่ยนเป็นเฟส α และ κ ทั้งหมด ทำให้โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์มีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้เฟส κ_{ii} จะขยายใหญ่ขึ้น ดังรูปที่

3.4 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โหมด BSE



รูปที่ 3.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์

และจากการตรวจสอบโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์ ด้วยเทคนิคสเปกโทรเมตรีรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ ในแต่ละเฟส ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 3.3 พบว่า

- บริเวณที่ยิงสเปกตรัมที่ 1 ที่มีลักษณะเป็นพื้นสีเทาอ่อน มีธาตุทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นเฟส α
- บริเวณที่ยิงสเปกตรัมที่ 2 ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีดำ มีปริมาณธาตุเหล็กและธาตุอะลูมิเนียมมากกว่าบริเวณเฟส α สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นเฟส $\alpha + \kappa_{ii}$
- บริเวณที่ยิงสเปกตรัมที่ 3 ที่มีลักษณะเป็นแถบซ้อนทับกันสีเทา มีปริมาณธาตุอะลูมิเนียมและธาตุนิกเกิลมากกว่าบริเวณเฟส α สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นเฟส $\alpha + \kappa_{iii}$

ตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีบริเวณต่างๆ ของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์

โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์	ส่วนประกอบทางเคมี (wt.%)				เฟส
	Al	Fe	Ni	Cu	
สเปกตรัมที่ 1	9.15	1.55	1.69	87.61	α
สเปกตรัมที่ 2	18.32	37.26	15.67	28.75	$\alpha + \kappa_{ii}$
สเปกตรัมที่ 3	11.88	2.98	5.45	79.70	$\alpha + \kappa_{iii}$

จากการเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีบริเวณต่างๆ ของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล่อ (ตารางที่ 3.2) และโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์ (ตารางที่ 3.3) พบว่ากระบวนการไฮโมจิไนซ์ โดยการอบที่อุณหภูมิ 675°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำให้ธาตุเหล็กและนิกเกิลบริเวณเฟส α ลดลง จากเดิมมีธาตุเหล็ก 2.43 wt.% หลังการไฮโมจิไนซ์ธาตุเหล็กลดลงเป็น 1.55 wt.% และจากเดิมมีธาตุนิกเกิล 3.93 wt.% หลังการไฮโมจิไนซ์ธาตุนิกเกิลลดลงเป็น 1.69 wt.% เนื่องจากการอบทำให้อะตอมของธาตุต่างๆ บริเวณเฟส α เกิดการแพร่และตกตะกอนเป็นเฟส κ ทำให้ธาตุเหล็กและนิกเกิล บริเวณเฟส κ_{ii} เพิ่มมากขึ้น จากเดิมมีธาตุเหล็ก 20.70 wt.% หลังการไฮโมจิไนซ์ธาตุเหล็กเพิ่มขึ้นเป็น 37.26 wt.% และจากเดิมมีธาตุนิกเกิล 7.14 wt.% หลังการไฮโมจิไนซ์ธาตุนิกเกิลเพิ่มขึ้นเป็น 15.67 wt.% นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเฟส κ_{ii} มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย

นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติทางกลของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล่อและโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการไฮโมจิไนซ์มีค่าความแข็งแรงครากเท่ากันคือ 280 MPa แต่โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการไฮโมจิไนซ์มีค่าความแข็งแรงสูงสุดลดลงเล็กน้อยจาก 686 MPa เป็น 676 MPa ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มมากขึ้นจาก 30 % เป็น 38 % และโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ได้จากการหล้อมีค่าความแข็งเท่ากับ 207 HB ซึ่งมากกว่าโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการไฮโมจิไนซ์ที่มีความแข็งเท่ากับ 180 HB นั่นคือกระบวนการทางความร้อนส่งผลต่อสมบัติทางกล การอบโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ทำให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความแข็งลดลง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการอบที่อุณหภูมิสูง 675°C

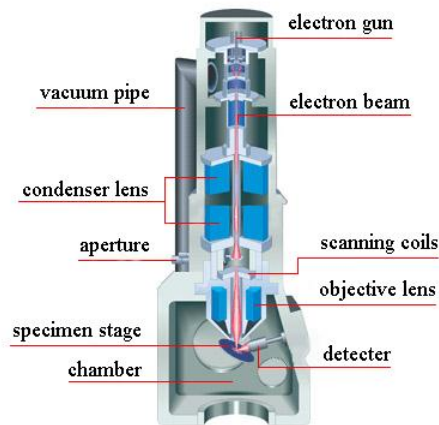
เป็นเวลา 6 ชั่วโมงนั้น ทำให้เฟส β' ซึ่งมีโครงสร้างแบบมาเทนไนต์หายไป และมีเฟส α ซึ่งเป็นเฟสที่มีความแข็งน้อยกว่า เฟส β' มากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงและค่าความแข็งลดลง แต่ความเหนียวเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งโครงสร้างที่ได้ยังมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นด้วย

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light Optical Microscope; LOM) เป็นกล้องจุลทรรศน์รูปแบบหนึ่งที่ใช้แสงเป็นตัวช่วยในการทำห้มองเห็นภาพ โดยแสงจะวิ่งผ่านระบบเลนส์ต่างๆ ประกอบด้วยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) และเลนส์ใกล้ตา (Eyepiece) กำลังขยายของภาพคือผลคูณของกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุกับกำลังขยายของเลนส์ใกล้ตา ความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของภาพขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเลนส์และแสงต้นกำเนิด กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการศึกษาลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ [15]

3.3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงมีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะ โครงสร้างจุลภาคบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ [29, 30]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะยิงลำแสงอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตนด์ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางวิ่งเข้ากระทบกับชิ้นงาน และแสดงสัญญาณอิเล็กตรอน รูปที่ 3.5 แสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [29, 30]



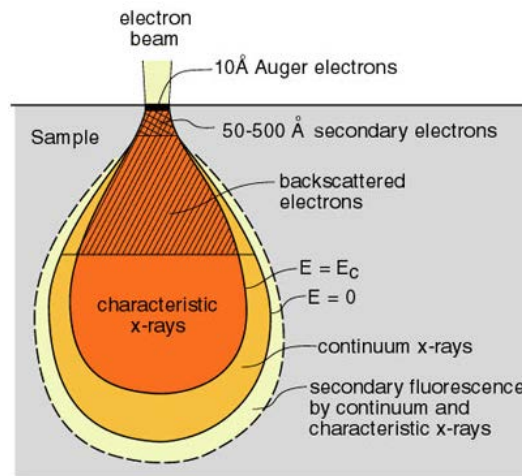
รูปที่ 3.5 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [30]

เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 แบ่งได้เป็น

- อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งใช้พลังงานต่ำสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอนชนิดนี้ใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน
- อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ค่าพลังงานต่างๆ ที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น เทคนิคสเปกโทรเมตรีรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive x-ray spectrometry; EDS) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลทางเคมี เพื่อวิเคราะห์ธาตุประกอบต่างๆ จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเทคนิคเทคนิคสเปกโทรเมตรีรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงานเกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน และมีการ

ปลดปล่อยรังสีเอกซ์ (X-ray) ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาสามารถนำไปวิเคราะห์หาธาตุประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ [29, 30]



รูปที่ 3.6 ระดับพลังงานจากอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงาน [30]

3.3.3 เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness) เป็นการทดสอบความแข็งแบบน้ำหนักกดที่ใช้หัวกดที่เป็นลูกบอลทำจากเหล็กกล้าชุบแข็งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร กดลงบนผิวชิ้นทดสอบด้วยน้ำหนักกด 3,000 กิโลกรัม สำหรับโลหะแข็ง 1,500 กิโลกรัม สำหรับโลหะที่มีความแข็งปานกลาง และ 500 กิโลกรัมหรือต่ำกว่านั้นสำหรับวัสดุอ่อนนุ่ม และสำหรับโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ทดสอบด้วยน้ำหนักกด 100 กิโลกรัม ในการทดสอบเมื่อแรงกดกระทำต่อลูกบอลแล้วจะต้องค้างไว้เป็น 30 วินาที เพื่อให้พื้นที่โลหะทดสอบเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรโดยสมบูรณ์ พื้นผิวของโลหะที่นำมาทดสอบต้องเรียบและได้ระนาบ ปราศจากฝุ่นคราบ น้ำมันหรือสนิม การแปรผลค่าความแข็งแบบบริเนลวัดเป็นแรงดันต่อหน่วยพื้นที่ของรอยกดที่เกิดขึ้นหลังจากเอาน้ำหนักกดออก โดยนำค่าแรงที่กระทำและเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดแทนลงในสูตร [31, 32]

$$\text{BHN} = \frac{2L}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

เมื่อ BHN คือค่าความแข็งแบบบริเนล (kg/mm^2)

L คือน้ำหนักกดที่กระทำ (kg)

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด (mm)

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (mm)

3.3.4 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness) เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีองศาของปลายแหลม 136° และน้ำหนักกดที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 0.2-1 กิโลกรัม การทดสอบนี้มีหลักการเดียวกันกับการทดสอบความแข็งแบบบริเนล คือค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของรอยกด สามารถหาค่าความแข็งได้จากสมการ

$$DPH = \frac{1.8544 F}{d^2}$$

เมื่อ DPH คือความแข็งแบบวิกเกอร์ (kg/mm^2)

F คือน้ำหนักกด (kg)

d คือความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ย (mm)

คุณลักษณะเด่นของหน่วยวัดค่าความแข็งนี้ คือ สามารถนำไปใช้ได้กับโลหะทุกชนิดโดยไม่คำนึงถึงขนาดใหญ่น้อย จึงมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายมากกว่า วิธีการทดสอบหาค่าความแข็งแบบอื่นๆ เพราะฉะนั้นถึงแม้ว่าน้ำหนักจะเปลี่ยน แต่รูปทรงของรอยที่เกิดจากการกดจะเหมือนกัน ถึงแม้จะเป็นวัสดุต่างชนิดกัน ก็สามารถหาค่าความแข็งได้โดยแค่เปลี่ยนน้ำหนักเท่านั้น อีกทั้งยังสามารถนำค่าที่ได้มาใช้ในการเปรียบเทียบได้อีกด้วย [31]

3.3.5 เครื่องไคลาโตมิเตอร์ (Dilatometer) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เป็นวิธีที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงานตัวอย่าง โดยการให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ชิ้นงานก็จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดด้วย วิธีนี้ใช้สำหรับศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของชิ้นงาน ตัวอย่าง เช่น การหดตัว การขยายตัว และการเปลี่ยนโครงสร้าง นอกจากนี้ยังสามารถศึกษากระบวนการแปรรูปร้อน โดยสามารถอบให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่าง และสามารถทำการกดแปรรูปร้อนชิ้นตัวอย่าง ตลอดจนควบคุมอัตราการเย็นตัวเมื่อเสร็จสิ้นการแปรรูป จึงสะดวกในการจำลองสถานะที่ใกล้เคียงกับกระบวนการชุบขึ้นรูปจริง [33]

หลักการทำงานของเครื่องไคลาโตมิเตอร์ นำชิ้นงานที่ต้องการทดสอบมาตัดให้ได้ขนาดตามที่กำหนดแล้วใส่เข้าไปในช่องสำหรับใส่ชิ้นตัวอย่างแล้วเปิดเครื่องเพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่กำหนดไว้ โดยมีเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) วัดความร้อนที่ผิวชิ้นงานเพื่อควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานตรงตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้ ในขณะที่ชิ้นงานจะมีการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเครื่องก็จะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนให้ตามช่วงของ

อุณหภูมิที่ต้องการตรวจสอบค่า [34] นอกจากนี้ยังสามารถจำลองกระบวนการขึ้นรูปร้อนต่างๆ เช่น การทุบขึ้นรูปร้อน (Hot forging) หรือการรีดร้อน (Hot rolling) เป็นต้น โดยสามารถทำการทดสอบ ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเนื่องจากการให้ความร้อน (Heating rate) หรือการทำให้ ชื้นงานเย็นตัว (Cooling rate) ที่อุณหภูมิ (Temperature) ต่างๆ ตามค่าความเครียด (Strain) และอัตรา ความเครียด (Strain rate) ที่กำหนดไว้ ผลที่ได้จากการทดสอบ คือ ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของแรง (Force) ที่ใช้อัดหรือดึงชื้นงาน [34]



รูปที่ 3.7 รูปภาพแสดงส่วนประกอบหลักของเครื่องไดลาโตมิเตอร์

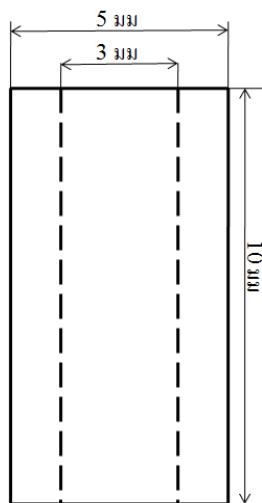
3.4 การทดสอบโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่อุณหภูมิสูง

การทดสอบโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่อุณหภูมิสูง ทำการทดสอบด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบ คือ การทดสอบโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์โดยการ อบทางความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการอบทางความร้อน ที่มีต่อ โครงสร้างจุลภาคและความแข็ง และการทดสอบกดขึ้นรูปโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ อุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวต่างๆ เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวในการกด ขึ้นรูปร้อนที่มีต่อ โครงสร้างจุลภาคและความแข็งของ โลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

3.4.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบทางความร้อนที่มีต่อโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการอบทางความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการอบทางความร้อนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็ง โดยทดสอบอบโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่อุณหภูมิ 750°C และ 800°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่วัสดุมีโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟส α , κ_{II} , κ_V และ β ทดสอบที่อุณหภูมิ 870°C และ 900°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่วัสดุมีโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟส α , κ_{II} และ β และทดสอบที่อุณหภูมิ 950°C และ 1,000°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่วัสดุมีโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟส α และ β

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการอบทางความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ คือโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านกระบวนการโฮมจีไนซ์ โดยชิ้นงานเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 มิลลิเมตร และสูง 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และให้ความร้อนกับชิ้นงานไปที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 750, 800, 870, 900, 950 และ 1,000°C จำนวนชิ้นงานทดสอบ 1 ชิ้นต่ออุณหภูมิ รวมทั้งสิ้นจำนวน 6 ชิ้น ทั้งนี้ให้อุณหภูมิชิ้นงานด้วยอัตราความร้อน 10°C/s แล้วคงอุณหภูมิในการทดสอบไว้ 60 วินาที จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วด้วยแก๊สฮีเลียม

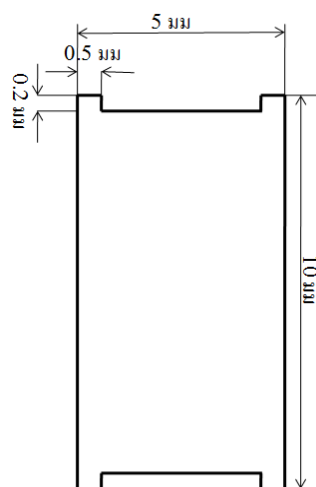


รูปที่ 3.8 ชิ้นงานทดสอบอบทางความร้อนด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์

3.4.2 การศึกษาการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกดขึ้นรูปโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ห้อธิพผลจากอุณหภูมิการขึ้นรูปและอัตราเร็วในการเย็นตัวที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค ปริมาณเฟส ความแข็ง รวมถึงความเค้นในการขึ้นรูปด้วย

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบกดขึ้นรูปโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ คือโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการไฮโมจิไนซ์ โดยชิ้นงานเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และสูง 10 มิลลิเมตร และบริเวณด้านบนของชิ้นงานมีร่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร และลึก 0.2 มิลลิเมตร สำหรับใส่สารหล่อลื่นคือผง โมลิบดีนัม (Molybdenum) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เพื่อช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานและหัวกด โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ 800, 870, 900 และ 950°C ทั้งนี้ให้อุณหภูมิขึ้นงานด้วยอัตราความร้อน 10°C/s จนถึงอุณหภูมิการทดสอบ แล้วคงอุณหภูมิในการทดสอบไว้ 60 วินาที เพื่อให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากันตลอดทั้งชิ้นงาน จากนั้นจึงกดขึ้นงานด้วยอัตราการเปลี่ยนรูปเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ ค่าอัตราความเครียดเท่ากับ 10 s^{-1} ซึ่งเป็นค่าอัตราความเครียดสูงสุดสำหรับเครื่องทดสอบไดลาโตมิเตอร์นี้เพื่อจำลองกระบวนการทอบขึ้นรูปร้อน แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัวที่ต่างกัน คือ 40 และ 100°C/s จำนวนชิ้นงานทดสอบกดขึ้นรูปโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่แต่ละอุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวต่อ 1 ชิ้น รวมทั้งสิ้นจำนวน 8 ชิ้น



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานทดสอบกดขึ้นรูปด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์

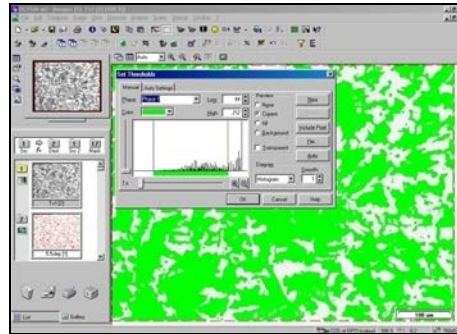
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

1. เตรียมชิ้นงาน โดยการขึ้นเรือนแบบร้อน และขัดหยาบผิวชิ้นงานให้เรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 600, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ หลังจากนั้นขัดมันผิวชิ้นงานด้วยน้ำผสมผงอะลูมินา (Al_2O_3) ขนาด 0.3 ไมครอน จนผิวหน้าชิ้นงานเรียบเป็นเงา แล้วกัดกรดบริเวณผิวหน้าชิ้นงาน ซึ่งกรดที่ใช้ประกอบด้วย เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) 5 กรัม กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 25 มิลลิลิตร และ น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร [23] โดยการจุ่มในกรด 3 วินาที ล้างด้วยน้ำกลั่นและแอลกอฮอล์ แล้วเป่าด้วยลมร้อนเพื่อให้ชิ้นงานแห้งสนิท
2. วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของ โลหะผสมนิกเกิลอะลูมินัมบรอนซ์ที่ผ่านการทดสอบอบทางความร้อนและกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่กำลังขยาย 200, 500 และ 1,000 เท่า
3. วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของ โลหะผสมนิกเกิลอะลูมินัมบรอนซ์ที่ผ่านการทดสอบอบทางความร้อนและกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000, 3,000 และ 5,000 เท่า พร้อมทั้งถ่ายรูปและบันทึกภาพโครงสร้างจุลภาค โดยชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์ นั้น ต้องมีการห่อด้วยกระดาษฟรอยด์และติดเทปคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมินัมบรอนซ์สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

4. วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟส ด้วยโปรแกรม Image analysis ซึ่งเป็นทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟสจากถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค หลักการทดสอบจะใช้สีแยกความแตกต่างของเฟสทั้งสอง (เฟส α และเฟส β') และคำนวณหาพื้นที่ของสีทั้งสองเป็นเปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟสออกมา [35] ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟสเป็นขั้นตอนทดสอบเดียวกับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยได้ทำการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟสชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการทดสอบไคลโตมิเตอร์โดยการอบทางความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (จำนวน 6 ชิ้นงาน) เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณเฟส α และเฟส β' และวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟสชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการทดสอบการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่างๆและเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัวต่างกัน (จำนวน 8 ชิ้นงาน) เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลจากอุณหภูมิการกดขึ้นรูปและอัตราเร็วในการเย็นตัวที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและเปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟส ซึ่งจะวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟสจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างแต่ละบริเวณ โดยจะทำการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ปริมาณเฟสชิ้นงานละ 10 บริเวณ รวมทั้งสิ้น 14 ชิ้นงาน และทำการหาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์เฟส α และเฟส β' ออกมา



รูปที่ 3.11 การใช้สีแยกความแตกต่างของเฟส α และเฟส β'

3.6 การทดสอบความแข็ง

3.6.1 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness) โดยใช้หัวกดแบบวิกเกอร์ ขึ้นทดสอบความแข็งเป็นขึ้นทดสอบเดียวกับชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบความแข็งโดยรวมของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการทดสอบอบทางความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความแข็งของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานทดสอบ ไดลาโตมิเตอร์มีความหนาเพียง 1 มิลลิเมตร ทำให้ไม่สามารถทดสอบความแข็งแบบบริเนลได้ โดยทำการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ด้วยแรงกด 1,000 กรัม ซึ่งเป็นแรงกดสูงสุดสำหรับเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์นี้ เพื่อหาค่าความแข็งโดยรวมของชิ้นงาน และใช้เวลาทดสอบ 15 วินาที ทำการวัดความแข็งชิ้นงาน 6 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 5 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ยรวมของความแข็งของชิ้นงาน

3.6.2 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness) โดยใช้หัวกดลูกบอลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร แรงกด 100 กิโลกรัม และกดเป็นระยะเวลา 15 วินาที ขึ้นทดสอบความแข็งเป็นขึ้นทดสอบเดียวกับชิ้นงานที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความแข็งโดยรวมของโลหะผสมนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่ผ่านการทดสอบการกดขึ้นรูปที่อุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวต่างกัน เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลจากอุณหภูมิการกดขึ้นรูปและอัตราการเย็นตัวที่มีผลต่อค่าความแข็ง โดยทำการวัดความแข็งชิ้นงาน 8 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 5 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ยรวมของความแข็งของชิ้นงาน