

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม ในกระบวนการอบอ่อน

Study of the Microstructure and Mechanical Properties of Copper-Nickel-Chromium Alloy in Annealing Process

อภิชาติ แสนรัชฎากร และ ดนัยณัฐ จันปุม*

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

199 หมู่ 3 ตำบลพังโคน อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร 47160

Apichat Sanratsadakhon and Danainut Janpum*

Program in Industrial Engineering, Faculty of Industry and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus

199, Moo 3, Phang Khon Sub-district, Phang Khon District, Sakon Nakhon Province, 47160

*Corresponding author Email: Danainut.ja@rmuti.ac.th

(Received: November 02, 2025 / Revised: December 27, 2025 / Accepted: December 28, 2025)

บทคัดย่อ

โลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม (Cu-Ni30-Cr2) เป็นวัสดุที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับความต้องการของอุตสาหกรรมที่ต้องใช้วัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมทางทะเล แต่เนื่องจากโครงสร้างแบบเดนไดรต์ และพฤติกรรมระหว่างการแข็งตัวของวัสดุซึ่งนำไปสู่คุณสมบัติแอนไอโซทรอปิ วัสดุนี้จึงเป็นอุปสรรคในกระบวนการขึ้นรูปและการกระบวนการแมกซิ่งนึ่ง ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำเสนอกระบวนการอบอ่อนในการทดลองเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเดิมกับวัสดุที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน โดยใช้อุณหภูมิคงที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองพบว่าการใช้กระบวนการอบอ่อน ในด้านโครงสร้างจุลภาคพบว่ากระบวนการอบอ่อนมีการกระจายตัวขององค์ประกอบที่ดีขึ้น มีส่วนช่วยเพิ่มความเหนียวของวัสดุ ในด้านค่าความแข็งสูงสุด 186 HV สรุปได้ว่ากรรมวิธี As-cast + Annealing เป็นกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดในการทดสอบของงานวิจัยนี้ เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีความต้องการสูงด้านความทนทาน เช่น อุตสาหกรรมพลังงาน และอุตสาหกรรมทางทะเล

คำสำคัญ: โลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม กระบวนการอบอ่อน โครงสร้างจุลภาค

Abstract

Copper-nickel-chromium alloy (Cu-Ni30-Cr2) is a material developed to meet the needs of industries requiring corrosion-resistant materials, especially in marine environments. However, due to its dendrite structure and anisotropic behavior during solidification, this material poses obstacles in forming and machining processes. This study aimed to demonstrate an annealing process to determine the microstructure and mechanical properties of the original and annealed materials. Annealing was performed at a constant temperature of 500°C for 3 hours. The results showed that annealing improved the compositional distribution of the alloy's components, contributing to increased toughness. The maximum hardness reached 186 HV. In conclusion, the As-cast + Annealing method is the most suitable process for this research, ideal for applications in industries demanding high toughness, such as the energy and marine industries.

Keywords: Copper-nickel-chromium alloy, Annealing process, Microstructure

1. บทนำ

โลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม (Cu-Ni30-Cr2) เป็นวัสดุที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับความต้องการของอุตสาหกรรมที่ต้องใช้วัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมทางทะเล ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นในด้านความแข็งแรงสูงและความต้านทานต่อการกัดกร่อนในน้ำทะเล วัสดุนี้จึงถูกนำไปใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรมการขนส่งทางทะเล และการผลิตอุปกรณ์ที่ต้องการความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง เช่น ท่อคอนเดนเซอร์บนเรือเดินทะเล [1] โลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม เป็นโลหะผสมที่พัฒนาขึ้นจากโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล ซึ่งมีธาตุทองแดง-นิกเกิลเป็นส่วนผสมหลักและมีธาตุโครเมียมเป็นองค์ประกอบเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความเหนียว และความต้านทานการกัดกร่อนของน้ำทะเล โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม [2] มีโครงสร้างแบบเดนไดรต์ (Dendrite) มีความสามารถในการขึ้นรูปต่ำ การผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมทางทะเลจึงถูกจำกัดด้วยกระบวนการแมกซิงนิง (Machining) ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงและมีของเสีย ด้วยพฤติกรรมระหว่างการแข็งตัวของวัสดุซึ่งนำไปสู่คุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) นั้นหมายถึงคุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกันไปในแต่ละทิศทาง [3] การเกิดแอนไอโซทรอปิกนี้อาจส่งผลต่อการขึ้นรูปโลหะ และเกิดข้อบกพร่อง เช่น รอยแตกกร้าว หรือรอยฉีกขาดได้ นอกจากนี้การแยกตัวของโลหะขนาดเล็กในระหว่างการแข็งตัว ซึ่งเป็นการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของธาตุโลหะผสมในระดับเดนไดรต์ ทำให้เกิดบริเวณที่มีสิ่งเจือปนและรูพรุนจากการหดตัวของเนื้อโลหะเมื่อเย็นตัว รอยแตกสามารถแพร่กระจายผ่านบริเวณที่อาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอในเนื้อวัสดุ [4] จากปัญหาดังกล่าวนั้นหมายความว่าวัสดุนี้ยังไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมที่หลากหลายได้ และงานที่ต้องการความแข็งแรงเชิงกล จากการศึกษาทางวิจัยของโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม พบว่าหลังจากวัสดุในสภาวะหล่อขึ้นรูป (As-cast) โครงสร้างจุลภาคแบบเดนไดรต์สามารถปรับปรุงให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) ได้มากขึ้นด้วยกระบวนการอบอ่อน (Annealing) [5] ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่ได้รับการยอมรับในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำเสนอกระบวนการอบอ่อนในงานวิจัยนี้

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม (Cu-Ni30-Cr2) ผลิตโดยใช้กระบวนการหล่อในแม่พิมพ์ทรายเขียว ตามมาตรฐานการป้องกันของสหราชอาณาจักร Defence Standard 02-824 (NES 824) เพื่อเป็นการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมโครงสร้างจุลภาคในกระบวนการอบอ่อน ที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงและเกรนโครงสร้างของวัสดุ เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมต่อไป

2. วัสดุโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม (Cu-Ni-Cr)

สมบัติวัสดุโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม (Cu-Ni30-Cr2) ผลิตตามมาตรฐานการป้องกันของสหราชอาณาจักร Defence Standard 02-824 (NES 824) [6] ผลิตโดยใช้กระบวนการหล่อในแม่พิมพ์ทรายเขียว แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมี

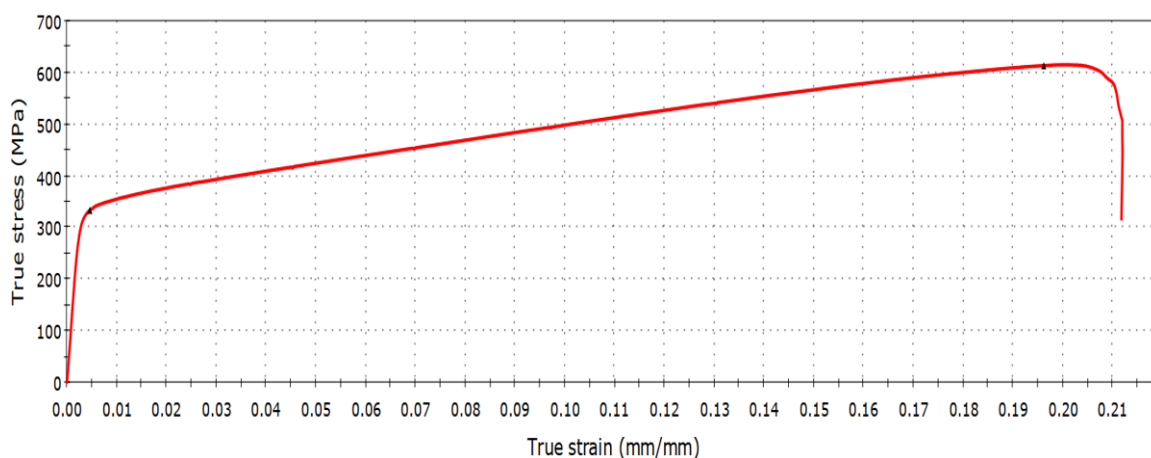
Cu	Ni	Cr	Fe	Mn	Si	Zr	Ti
ส่วนที่เหลือ	29.0-32.0	1.6-2.0	0.5-1.0	0.5-1.0	0.20-0.40	0.05-0.15	0.03-0.15

ตารางที่ 2 ปริมาณรวมของสิ่งเจือปน 0.070% โดยน้ำหนัก

Pd	P	Bi	S	C	Co	B
0.005	0.005	0.001	0.005	0.020	0.050	0.001

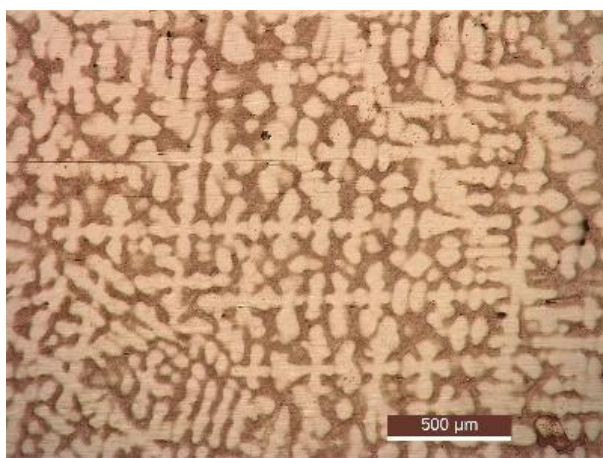
ธาตุผสมที่สำคัญหลักคือ ทองแดง (Copper) จะป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำและไอน้ำได้ การกัดกร่อนในสภาพอากาศในทะเล สามารถป้องกันน้ำเกลือ, โลหะผสมทองแดงจะสร้างแผ่นฟิล์มบนพื้นผิวของวัสดุและฟิล์มนี้จะทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อน นิกเกิล (Nickel) มีลักษณะแข็งและเหนียวมีค่าการนำไฟฟ้าที่เหมาะสม (25% ของทองแดง) และการนำความร้อน มีความทนทานสูงต่อการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศและด้านทานกรด โครเมียม (Chromium) เป็นองค์ประกอบที่ทำให้โลหะผสม Cu-Ni สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงและการต้านทานการสึกกร่อนของน้ำทะเลและการกัดเซาะของของแข็ง

ทดสอบแรงดึง (True stress-strain) ตามมาตรฐาน ASTM 208-14 ชิ้นงานขนาด 12.770 มิลลิเมตร กำหนดค่า 0.2 Yield Strength ผลการทดสอบ Elongation 20.01%, Modulus (E-modulus) 125.483 Gpa, Yield Strength 322.766 Mpa, Ultimate Tensile Strength 503.977 Mpa [7] แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผลการทดสอบแรงดึงวัสดุเดิม (As-cast)

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Cu-Ni-Cr มีโครงสร้างดั้งเดิมเป็นแบบเดนไดรต์ (dendrite) แสดงดังรูปที่ 2 จะเกิดขึ้นในกระบวนการหล่อ เมื่อเกิดการเย็นตัวในขณะที่โลหะแข็งตัว อะตอมของโลหะทองแดงจะเริ่มจับตัวก่อน เนื่องจากมีจุดหลอมตัวสูงกว่า เมื่อจับตัวใหญ่ขึ้นก็จะไล่พวกสารมลทินซึ่งยังเหลวอยู่ให้หนีออกไปบริเวณผลึก ดังนั้นเมื่อโลหะแข็งตัวหมด สารมลทินจะมารวมตัวกันอยู่บริเวณขอบเกรน (Grain Boundary)



รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคเดิมโลหะผสม Cu-Ni-Cr

3. วิธีการทดลอง

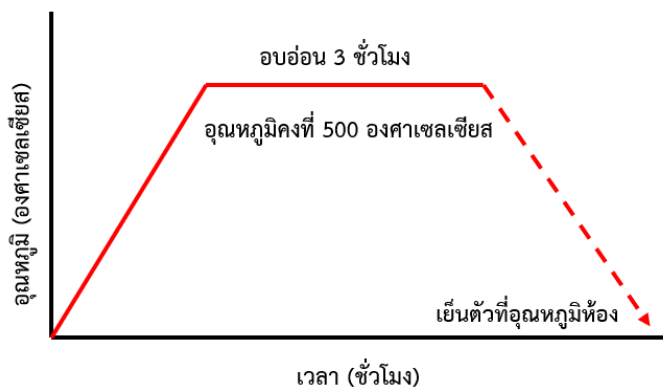
การทดลองด้วยกระบวนการอบอ่อนใช้วัสดุเป็นวัสดุเดิม (As-cast) อินกอต (Ingot) แสดงดังรูปที่ 3 เพื่อทำการทดลองกระบวนการอบอ่อน (Annealing) โดยเตรียมชิ้นงานขนาด 10×10 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ตั้งเวลาในโปรแกรมของเตา KS 80 อุณหภูมิคงที่ 500 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐานการป้องกันของสหราชอาณาจักร Defence Standard 02-824 (NES 824) [6] แสดงดังรูปที่ 4 (ก) เตาอบ KS 80, (ข) ขั้นตอนการอบอ่อนอุณหภูมิคงที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการอบ 3 ชั่วโมง



รูปที่ 3 วัสดุเดิม (As-cast) อินกอต (Ingot)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 (ก) เตาอบ KS 80, (ข) ขั้นตอนการอบอ่อนอุณหภูมิคงที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการอบ 3 ชั่วโมง

หลังจากทำการทดลองการอบอ่อนเสร็จแล้วจะทำการศึกษาสมบัติของวัสดุ นำชิ้นงานมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยทำการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายน้ำ เรียงเบอร์ดังนี้ 180, 200, 400, 600, 800, 1,000 และ 1,200 ขั้นตอนสุดท้ายของการขัดปรับผิวจะใช้ผงอะลูมินาขนาด 0.01 ไมโครเมตร ขัดบนผ้าสักหลาดเพื่อให้ได้ผิวที่ละเอียด แล้วนำไปกัดกรด 1% Fe Cl₃ 1:1 HCl และน้ำกลั่นผสมเจือจาง ใช้เวลากัดกรดประมาณ 10-15 วินาที เมื่อได้ชิ้นงานแล้วจะตรวจสอบถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์ LEICA DM2500 M เลนส์ HP PLAN EPI แสดงดังรูปที่ 5

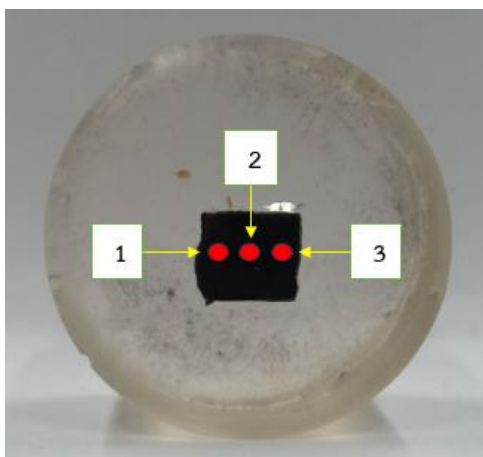


รูปที่ 5 กล้องจุลทรรศน์ LEICA DM2500 M

ต่อจากนั้นนำชิ้นงานทั้งหมดมาทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Micro Vickers Hardness Tester รุ่น HMV-G31S ENG 230V แรงกด 0.2 HV (1.961 N) ขนาดของหัวกด 0.043 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 6 ตำแหน่งที่จุดกดทดสอบค่าความแข็งจำนวน 3 จุด แสดงดังรูปที่ 7 และหาค่าความแข็งโดยเฉลี่ย



รูปที่ 6 เครื่องทดสอบความแข็ง Micro Vickers Hardness Tester



รูปที่ 7 ตำแหน่งจุดกดทดสอบค่าความแข็ง

4. ผลการทดลอง

4.1 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคหลังกระบวนการอบอ่อน

As-Cast เปรียบเทียบกับ As-Cast + Annealing ที่ขยาย 5X และ 10X จะเห็นความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคซึ่งสามารถอธิบายและเปรียบเทียบผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 8

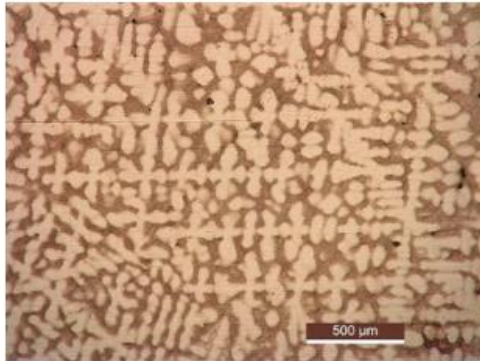
As-Cast

มีลักษณะโครงสร้างแบบเดนไดรต์ (Dendritic) หรือโครงสร้างที่เกิดจากการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของของเหลวเมื่อลดอุณหภูมิลงในแม่พิมพ์ หรือ อินกอต (Ingot) ลักษณะจะเป็นเส้นกิ่งก้านของผลึกที่ยังไม่สลายตัวเพราะยังมีการกระจายตัวขององค์ประกอบต่างๆ อยู่ไม่สมดุล รอยต่อระหว่างก้านเดนไดรต์ยังค่อนข้างคมและยังไม่ได้เกิดการปรับสมดุลองค์ประกอบอะตอมในเนื้อโลหะอย่างทั่วถึง ลักษณะนี้ทำให้โลหะมีความไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบและความเค้นค้างในเนื้อวัสดุค่อนข้างสูง

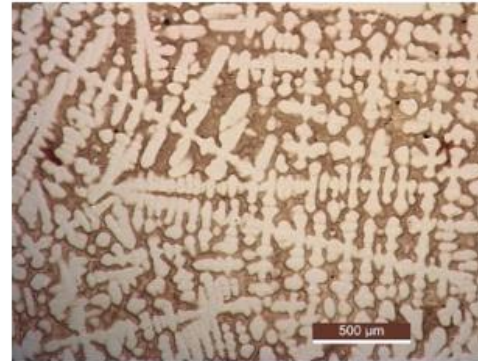
As-Cast + Annealing

หลังจากอบอ่อน (Annealing) และค่อยๆ เย็นตัวโครงสร้างจะเปลี่ยนไปเป็นรูปร่างที่เรียบขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นเห็นได้ชัดว่าโครงสร้างเดนไดรต์เดิมมีแนวโน้ม พอร์มตัวแบบกลมมนมากขึ้น และมีการเรียงตัวของเนื้อโลหะที่เรียบกว่าเดิม เกิด

การฟื้นตัว (recovery) ของผลึกภายใน ซึ่งช่วยลดความเค้นคงค้าง และองค์ประกอบต่างๆ กระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น บริเวณที่เคยมีแนวเดนไดรต์คมจะค่อยๆ หายไป กรอบลายจะกลมและเรียบขึ้นกระบวนการอบอ่อน (Annealing) จึงช่วยให้โครงสร้างขยายตัวแบบใหม่และลดความไม่สมดุลขององค์ประกอบ จึงทำให้คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพดีขึ้น [8]

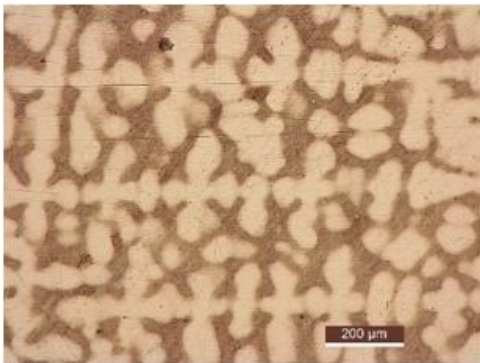


As-Cast

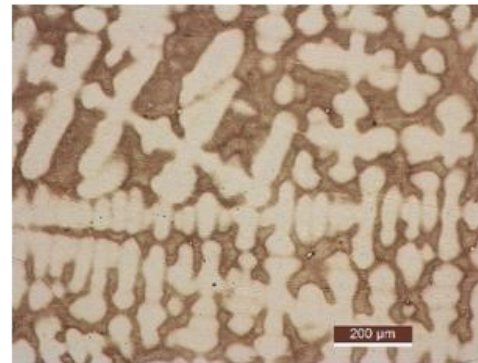


As-Cast + Annealing

(ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 5X



As-Cast



As-Cast + Annealing

(ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 10X

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค (ก) โครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 5X (ข) โครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 10X

จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง ความเรียบ ความเค้นคงค้าง และการกระจายองค์ประกอบ ของชิ้นงานทดสอบวัสดุ As-cast และ As-cast + Annealing พบว่าวัสดุ As-cast มีโครงสร้างเดนไดรต์หยาบ และชิ้นงานวัสดุ As-Cast + Annealing มีลักษณะที่ขอบเรียบ เกรนใหญ่และมีการเรียงตัวดีขึ้น และพบว่าความเค้นคงค้างลดลงเมื่อทำการทดลองแบบ As-Cast + Annealing เนื่องจากการอบอ่อนช่วยปรับสมดุลองค์ประกอบและโครงสร้าง แสดงผลสรุปดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปการเปลี่ยนแปลงหลัก

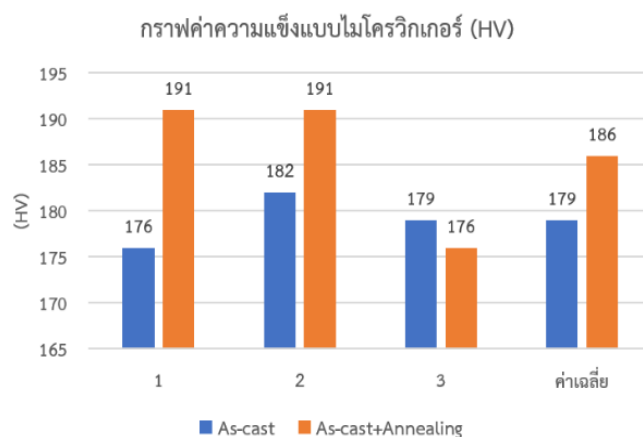
ลักษณะ	As-Cast	As-Cast + Annealing
โครงสร้าง	เดนไดรต์หยาบ	ขอบเรียบขึ้น
ความเรียบ	ไม่เรียบ, มีแถบขอบคม	เรียบชัด, ฟอรัมใหญ่
ความเค้นคงค้าง	สูง	ลดลง
การกระจายองค์ประกอบ	ไม่สม่ำเสมอ	กระจายดีขึ้น

4.2 ผลการทดสอบค่าความแข็ง

จากผลการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV) ของชิ้นงาน As-cast และ As-cast + Annealing ที่ตำแหน่งกุด 3 จุด พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนหลังผ่านกระบวนการอบคืนไฟ (annealing) แสดงค่าความแข็งดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV)

ค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV)		
จุดกุด	As-cast	As-cast + Annealing
1	176	191
2	182	191
3	179	176
ค่าเฉลี่ย	179	186



รูปที่ 9 ค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV)

จากรูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV) ของชิ้นงาน As-cast และ As-cast + Annealing ที่ตำแหน่งกุด 3 จุด และค่าเฉลี่ย โดยใช้แรงกด 0.2 HV (1.961 N) ขนาดของหัวกด 0.043 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าหลังผ่านกระบวนการ annealing ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากค่าความแข็งเฉลี่ยประมาณ 179 HV เป็น 186 HV จากการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างพบว่า As-Cast ยังมีความแข็งต่ำสุด จากโครงสร้างเดนไดรต์และรูพรุน As-Cast + Annealing แข็งกว่า As-Cast สะท้อนถึงผลของการอบอ่อนที่ช่วยปรับโครงสร้างจุลภาคและส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ

5. สรุป

จากการศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของกระบวนการทางกลและความร้อน ได้แก่ การหล่อ (As-Cast), การอบอ่อน (Annealing) ต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Cu-Ni30-Cr2 เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานในอุตสาหกรรม ผลการทดลองหลักเป็นความแข็ง (Hardness) ของ As-Cast + Annealing สรุปผลการทดลอง ดังนี้

1) ผลโครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน As-Cast มีลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์หยาบ ไม่เรียบ, มีแถบขอบคม, มีรูพรุนและการแยกตัวของธาตุสูง และชิ้นงาน As-Cast + Annealing มีเกรนสมมาตรขึ้น ความพรุนลดลง และมีการกระจายองค์ประกอบดีขึ้น

2) ค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (HV) ของชิ้นงาน As-Cast มีค่าความแข็ง 179 HV และชิ้นงาน As-Cast + Annealing มีค่าความแข็ง 186 HV

3) กรรมวิธี As-Cast + Annealing เป็นทางเลือกที่ดีในการพัฒนาโลหะผสม Cu Ni30-Cr2 สำหรับใช้งานจริง เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมพลังงานและอุตสาหกรรมทางทะเล เป็นต้น

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาในอนาคต

- 1) ควรศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการอบอ่อน เช่น อุณหภูมิและระยะเวลา เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่สุด
- 2) แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติมในด้าน สมบัติเชิงความล้า (fatigue) และความต้านทานการกัดกร่อนแบบเฉพาะทางเพื่อการใช้งานในระยะยาว
- 3) ผลลัพธ์สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงวัสดุอื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่มโลหะผสมทองแดง นิกเกิล-โครเมียม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณที่ปรึกษาและผู้ร่วมวิจัยทุกท่าน ขอขอบคุณนายเอกกิตติ์ธณภูมิ ว่องวรณานนท์ สำหรับวัสดุที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชภัฏวชิรเวศน์ วิทยาเขตสกลนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่ในการวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Findik, F, & Rehman, F (2025) A spinodal Cu-Ni-Cr alloy. WIT Transactions on Engineering Sciences, 2.
- [2] Xu, X., Zhu, N., Zheng, W., & Lu, X. G. (2016). Experimental and computational study of interdiffusion for fcc Ni-Cu-Cr alloys. Calphad, 52, 78-87.
- [3] Du, J., Guo, Z., Zhang, A., Yang, M., Li, M., & Xiong, S. (2017). Correlation between crystallographic anisotropy and dendritic orientation selection of binary magnesium alloys. Scientific reports, 7(1), 13600.
- [4] Li, Z., Liu, Y., Jia, P., Luo, C., Zhang, R., Qi, H., & Yang, W. (2021). Effect of austenite reverted transformation-annealing heat treatment on microstructure and mechanical properties of Fe-0.14 C-5Mn-1Al-Ce steel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 235(6), 2221-2229.
- [5] Ministry of Defence Defence Standard 02-824 (NES 824), Issue 1 Publication Date (01 April 2000).
- [6] บริษัทศูนย์วิจัยโลหะวิทยา แอล พี เอ็น (ประเทศไทย) จำกัด. 2565. ผลการทดสอบแรงดึง. สมุทรปราการ: ม.ป.ท
- [7] Wongvaranon, K., Rojananan, S., & Thipprakmas, S. (2024). Characterization of microstructural evolution and mechanical properties of Cu-Ni-Cr alloys deformed by ECAP. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 09544089241296616.
- [8] Abreu, C. M., Feijoo, I., & Pérez, C. (2022). Effect of the annealing treatment on the microstructure and corrosion resistance of a Cu-Al-Ni alloy. Metals, 12(9), 1473.