

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดลองนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของบรอนซ์อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสม Cu-14Al-3Fe และส่วนผสม Cu-14Al-3Fe-5Ni-1Mn ที่งานหล่อและงานชุบขึ้นรูปร้อน ได้ศึกษาลักษณะทางกายภาพงานหล่อและงานชุบขึ้นรูปร้อน หลังจากนั้นศึกษาโครงสร้างจุลภาคและวัดความแข็งแรง ทำกรรมวิธีทางความร้อน ในบทนี้จะบรรยายลักษณะทางกายภาพของงานหล่อ และผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของทั้งสองส่วนผสม หลังจากนั้นจะแยกบรรยายที่ละส่วนผสม ไปในแต่ละหัวข้อตามลำดับดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพชิ้นงาน

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหล่อ

ลักษณะทางกายภาพของงานหล่อ ชิ้นงานส่วนผสมที่ต้องการเริ่มต้นคือ Cu-14Al-3Fe และ Cu-14Al-3Fe-5Ni-1Mn แสดงในรูปที่ 4.1 เห็นได้ว่าส่วนผสม Cu-14Al-3Fe และส่วนผสม Cu-14Al-3Fe-5Ni-1Mn มีสีเหลืองอ่อน ผิวด้านบนที่สัมผัสกับอากาศมีลักษณะเป็นผิวขุ่นเป็นริ้ว มีเศษสแตกติดอยู่ด้านบนเนื่องจากการเทน้ำโลหะที่ก้นเบ้าหลอม ผิวด้านล่างที่สัมผัสกับแบบหล่อเรียบ



(ก)

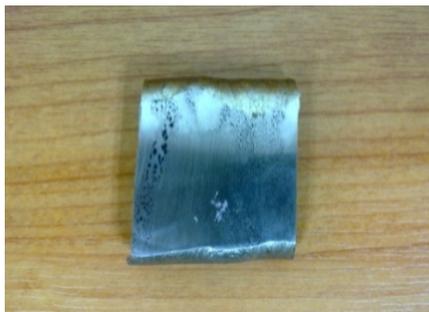


(ข)

รูปที่ 4.1 ลักษณะภายนอกของชิ้นงานหล่อ (ก) Cu-14Al-3Fe และ (ข) Cu-14Al-3Fe-5Ni-1Mn

4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังทอบขึ้นรูปร้อน

นำชิ้นงานหล่อที่มีส่วนผสมตั้งต้น Cu-14Al-3Fe และส่วนผสม Cu-14Al-3Fe-5Ni-1Mn มาทำการทอบขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส กำหนดให้ปริมาณการลดความหนาด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยความหนาชิ้นงานเดิม 10 มิลลิเมตร ทอบขึ้นรูปร้อนให้ความหนาลดลงเหลือ 8 มิลลิเมตร แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ พบว่าชิ้นงานส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe แดกหลังทอบ แสดงในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมนี้ไม่สามารถทอบขึ้นรูปร้อนได้ สำหรับชิ้นงานส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังทอบขึ้นรูปร้อนพบว่าชิ้นงานไม่มีรอยแตกเกิดขึ้นสามารถทอบขึ้นรูปร้อนได้ดังรูปที่ 4.3 แสดงว่าการเติม निकเกิด และแมงกานีสมีส่วนช่วยให้ทอบขึ้นรูปร้อนได้ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคซึ่งจะกล่าวต่อไปภายหลัง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 ชิ้นงานส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe (ก) ก่อนทอบขึ้นรูปร้อน (ข) หลังทอบขึ้นรูปร้อน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 ชิ้นงานส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn (ก) ก่อนทอบขึ้นรูปร้อน (ข) หลังทอบขึ้นรูปร้อน

4.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานหล่อที่มีส่วนผสมเริ่มต้นของ Cu-14Al-3Fe และ Cu-14Al-3Fe-5Ni-1Mn โดยเครื่องอิมพัลส์สเปกโตรมิเตอร์ ที่ได้จากโรงงาน พี ซี เอส ผลิตภัณฑ์หล่อ จำกัด ได้ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ตำแหน่ง และหาค่าเฉลี่ยได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 เห็นได้ว่าส่วนผสมแตกต่างไปจากส่วนผสมเริ่มต้น นอกจากนั้นพบว่ามีความธาตุอื่นปริมาณเล็กน้อย ได้แก่ ซิลิคอน ดีบุก สังกะสี ฟอสฟอรัส และตะกั่ว ตลอดจนการทดลองนี้ จึงเรียกชื่อส่วนผสมใหม่ตามที่ได้จากผลวิเคราะห์ เป็น Cu-15.2Al-2.3Fe และ Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn ตามลำดับ

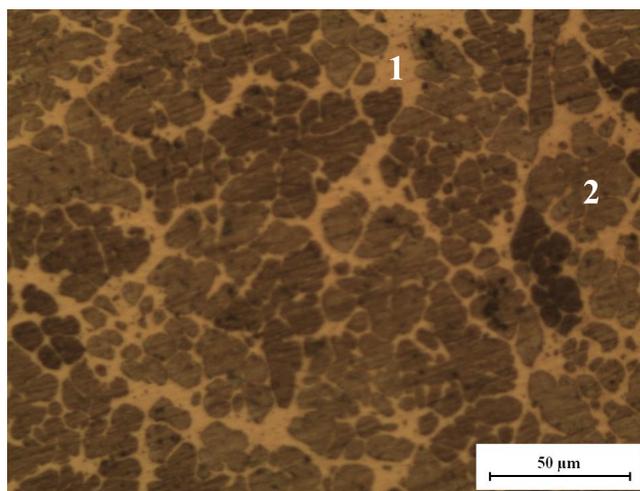
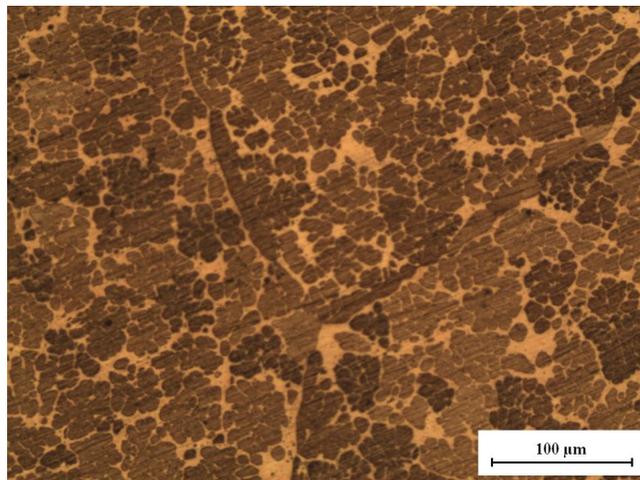
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานหล่อ

ธาตุ	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	ส่วนผสมเริ่มต้น Cu-14Al-3Fe	ส่วนผสมเริ่มต้น Cu-14Al-3Fe-5Ni-1Mn
Cu	Balance	Balance
Al	15.2123	15.0822
Fe	2.3415	4.2607
Ni	0.0574	4.2211
Mn	0.0290	0.1345
Si	0.0101	0.0107
Sn	0.0071	0.0088
Zn	0.0043	0.0053
P	0.0046	0.0045
Pb	0.0006	0.0005

4.3 ชิ้นงานส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe

4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อและค่าความแข็ง

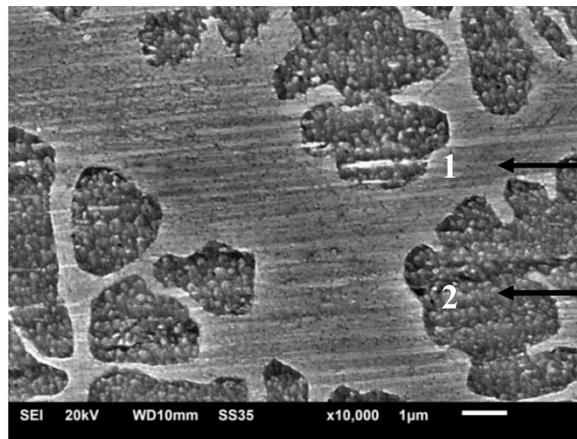
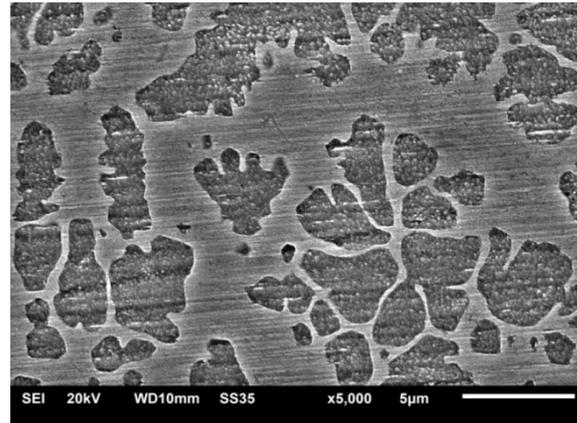
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่มีส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าโครงสร้างมี 2 เฟส เฟสที่มีลักษณะกลม (คล้ายดอกไม้) และโครงสร้างพื้น เพื่อต้องการดูโครงสร้างให้ชัดเจนขึ้น รวมทั้งต้องการวิเคราะห์เฟสจึงนำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดดังแสดงในรูปที่ 4.5 ผลการวัดความแข็งเฉลี่ยมีค่า 487 วิกเกอร์



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe

ผลการวิเคราะห์ธาตุแสดงในตารางที่ 4.2 (สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS แสดงในภาคผนวก ก. รูปที่ ก.1) พบว่าบริเวณที่ 1 เป็นบริเวณที่เห็นเป็นสีเทาอ่อน มีปริมาณอะลูมิเนียมร้อยละ 12.20 โดยน้ำหนัก มีเหล็กร้อยละ 1.57 โดยน้ำหนัก ที่เหลือเป็นทองแดง ทำให้ทราบว่าบริเวณนี้ไม่ใช่เฟสอัลฟา เนื่องจากเฟสอัลฟามีปริมาณอะลูมิเนียมน้อยกว่าร้อยละ 9.4 โดยน้ำหนัก บริเวณที่ 2 ที่เห็นเป็นสีเทาเข้ม มีปริมาณอะลูมิเนียมร้อยละ 15.52 โดยน้ำหนัก มีเหล็กร้อยละ 1.04 โดยน้ำหนัก ทำให้ทราบว่าบริเวณนี้เป็นเฟสแกมมาสอง จากแผนภาพเฟสสมดุลของทองแดง และอะลูมิเนียมที่มีเหล็กผสมอยู่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (ดังแสดงไว้แล้วในรูปที่ 2.3) ทำให้ทราบว่าเฟสที่สมดุลที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องควรเกิดเป็น 3 เฟส ประกอบด้วยเฟสอัลฟา เฟสแกมมาสอง และเฟสเดลตาของเหล็ก

จากการทดลองเฟสที่ได้ไม่สอดคล้องกับเฟสที่เกิดในแผนภาพเฟสสมดุล เนื่องจากในการทดลองหล่อชิ้นงานใช้แบบหล่อโลหะอุ่นที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ น้ำ โลหะแข็งตัวในแบบหล่อโลหะ 5 นาที นำออกจากแบบหล่อโลหะแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง การเย็นตัวดังกล่าวจึงเป็นการเย็นตัวที่เร็วกว่าการเย็นตัวในสภาวะสมดุล จึงเป็นสาเหตุทำให้เฟสที่เกิดแตกต่างกัน จากข้อมูลในแผนภาพเฟสสมดุลทำให้ทราบว่าเฟสบีตาเป็นเฟสที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ถ้าโลหะเย็นตัวช้ามากพอเฟสบีตาจะเปลี่ยนไปเป็นเฟสอัลฟา เฟสแกมมาสอง และเฟสเดลตาของเหล็ก แต่เนื่องจากในการทดลองการเย็นตัวของโลหะเร็วกว่าในสภาวะสมดุล จึงทำให้เฟสบีตาเปลี่ยนเป็นเฟสแกมมาสอง และเฟสที่บีตาที่คงเหลือเรียกว่า เฟสบีตาไพรม์ จึงไม่เกิดเฟสเดลตาของเหล็ก



เฟสบีตาไพร์ม

เฟสแกมมาสอง

รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe
ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวด

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe

ธาตุที่วิเคราะห์ได้	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	
	บริเวณที่ 1	บริเวณที่ 2
Cu	86.23	83.44
Al	12.20	15.52
Fe	1.57	1.04

เมื่อเทียบเคียงผลการทดลองที่ได้จากการทดลองนี้ กับผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับบรอนซ์อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมของระบบ 3 ธาตุ ของ Cu-Al-Fe ที่มีส่วนผสมใกล้เคียงกัน ดังเห็นได้จากงานวิจัยต่อไปนี้

จากงานวิจัยของ Cenoz [5] พบว่าโครงสร้างของบรอนซ์อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสม Cu-10Al-2Fe ที่ทำให้เย็นอย่างรวดเร็วจากการหลอมโลหะแล้วจุ่มน้ำเย็นทันที โลหะเปลี่ยนสภาพจากของเหลวไปเป็นของแข็ง โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นเป็นเฟสอัลฟาที่ขอบเกรนของเฟสบีตา และมีอนุภาคเหล็กเป็นเม็ดกลมขนาดเล็ก สามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในทางตรงกันข้ามชิ้นงานที่หล่อในแบบหล่อโลหะที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสอัลฟา และเฟสบีตาเท่านั้น ไม่พบว่ามีเฟสของเหล็ก

ทำนองเดียวกัน จากงานวิจัยของ Mustafa [7] พบว่าชิ้นงานส่วนผสม Cu-Al-Fe เกรด C95200 (Cu-8.8Al-1.5Fe) และ C95300 (Cu-9.7Al-0.9Fe) ที่ผ่านการหล่อในแบบหล่อโลหะที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสอัลฟา และเฟสบีตา ไม่พบว่ามีเฟสเดลตาของเหล็ก

จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า เฟสที่เกิดขึ้นจากการหล่อแล้วปล่อยให้เย็นตัวในแบบหล่อโลหะที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ไม่พบว่าจะเกิดเฟสเดลตาของเหล็ก โดยทั่วไปเฟสที่พบจากแผนภาพสมดุลนั้นมักเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสอย่างช้าๆ แล้วได้เฟสที่สมดุล การหล่อบรอนซ์อะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ยังเย็นช้าไม่พอที่จะทำให้เกิดเฟสเดลตาแยกตัวออกมา

จากงานวิจัยของ Li และคณะ [24] พบว่าบรอนซ์อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมของ Cu-14Al-4.5Fe และ Cu-14Al-4.5Zr-0.6Ce หล่อโดยใช้แบบหล่อทราย ใช้อุณหภูมิเท 1,180-1,240 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างจุลภาคของบรอนซ์ทั้งสองส่วนผสมนี้มีลักษณะคล้ายกัน ประกอบด้วยเกรนที่มีลักษณะเป็นเฟสบีตาตกค้าง (Retained β) หรือเรียกว่าเฟสบีตาไพรม์และเฟสอัลฟา มีความแข็ง 264 วิกเกอร์ เฟสที่เห็นเป็นสีขาวเป็นโครงสร้างยูเทคตอยของเฟสอัลฟา และเฟสแกมมาสอง มีความแข็ง 314 วิกเกอร์ เฟสที่เห็นเป็นเม็ดสีดำเป็นเฟสแคปปะสอง (K_{II}) มีความแข็ง 413 วิกเกอร์ ความแข็งโดยรวม

ของชิ้นงาน Cu-14Al-4.5Fe และ Cu-14Al-4.5ZFe-0.6Ce มีค่าความแข็งเฉลี่ย 276 และ 288 วิกเกอร์ ตามลำดับ

ในทางตรงกันข้าม โครงสร้างจุลภาคของบรอนซ์อะลูมิเนียมทั้งสองส่วนผสมนี้ ที่ผลิตเป็นผงโลหะ โดยใช้วิธีแก๊สอะตอมไมเซชันด้วยไนโตรเจน แล้วนำไปพ่นเคลือบโดยการใช้เปลวพลาสมาใช้กระแส 170 แอมแปร์ ขนาดผงที่เคลือบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 70-145 ไมครอน ระยะห่างการพ่น 50-100 มิลลิเมตร ได้ผิวเคลือบหนา 0.8-2.0 มิลลิเมตร ปล่อยให้ผิวเคลือบเย็นในอากาศปกติ โครงสร้างของผิวเคลือบเป็นสีเทาของเฟสบีตาไพร์มของ Cu_3Al มีความแข็ง 289 วิกเกอร์ และเฟสแคปปะหนึ่ง (K_1) มีความแข็ง 440 วิกเกอร์ ความแข็งโดยรวมของชิ้นงาน Cu-14Al-4.5Fe และ Cu-14Al-4.5ZFe-0.6Ce มีค่าความแข็งเฉลี่ย 297 และ 326 วิกเกอร์ตามลำดับ

จากบทความนี้ของ Li และคณะ [24] ทำให้เห็นว่าโครงสร้างที่ได้แตกต่างกันขึ้นกับอัตราการเย็นตัว งานหล่อด้วยแบบหล่อทรายได้เฟสบีตาไพร์ม เฟสอัลฟา เฟสแกมมาสอง และเฟสแคปปะสอง (β' , α , γ_2 , K_{II}) ชิ้นงานผิวเคลือบเย็นเร็วกว่ามีโครงสร้างสองเฟสของเฟสบีตาไพร์ม และเฟสแคปปะหนึ่ง (β' , K_1) ข้อสังเกตจากบทความงานวิจัยนี้พบว่าค่าบรราย และรูปภาพที่แสดงไม่ค่อยสอดคล้องกัน อ่านแล้วค่อนข้างสับสน

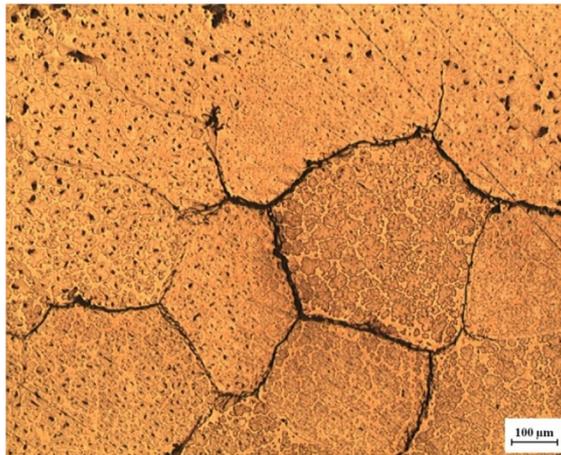
สิ่งที่ได้จากผลการทดลองนี้คือ บรอนซ์อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe มีเพียง 2 เฟสเท่านั้น คือเฟสบีตาไพร์มและเฟสแกมมาสอง การหล่อใช้แบบหล่อโลหะอุ่นที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เนื่องจากบรอนซ์อะลูมิเนียมมีช่วงการแข็งตัวแคบ หล่อได้ยากต้องระมัดระวังการแข็งตัวแบบไม่ต่อเนื่อง นอกจากนั้นทองแดงเป็นโลหะที่นำความร้อนได้ดี ถ่ายความร้อนได้ดีเช่นกัน การเย็นตัวตามปกติจึงมักไม่ได้เฟสตามแผนภาพสมดุล สำหรับเฟสบีตาเป็นเฟสที่เสถียรที่อุณหภูมิสูง จึงไม่น่าที่จะเกิดที่อุณหภูมิห้อง ที่ได้จากการหล่อโดยให้ชิ้นงานเย็นตัวช้าๆ ในทางตรงกันข้าม เฟสบีตาไพร์มสามารถเกิดได้เมื่อทำให้โลหะเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ส่วนแกมมาสองจะปรากฏเมื่อบรอนซ์อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมของปริมาณอะลูมิเนียมสูงเกินกว่าร้อยละ 9.4 โดยน้ำหนัก

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการชุบขึ้นรูปร้อนและค่าความแข็ง

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของ Cu-15.2Al-2.3Fe หลังผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) มีลักษณะเป็นเกรนคล้ายกับโครงสร้างงานหล่อแต่มีขนาดเล็กลง บางบริเวณพบว่าลักษณะเป็นริ้วที่เกิดจากไหลของเนื้อวัสดุ (Metal Flow) ไปตามแรงที่ถูกชุบ บริเวณที่เกิดรอยแตกแสดงในรูปที่ 4.8 (ข) พบว่ารอยแตกเกิดขึ้นตามขอบเกรน และค่าความแข็งของชิ้นงานหลังการชุบขึ้นรูปร้อนมีค่าความแข็งเฉลี่ยเป็น 536 วิกเกอร์ ซึ่งมีค่ามากกว่างานหล่อที่มีค่า 487 วิกเกอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานชุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu- 15. 2Al -2.3Fe

(ก) บริเวณทั่วไป และ (ข) บริเวณรอยแตก

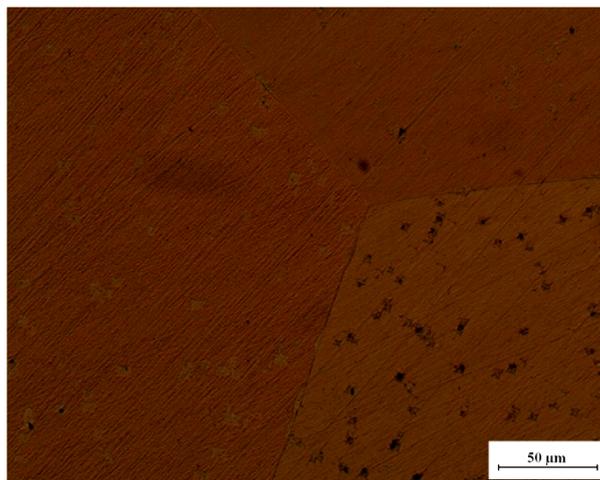
4.3.3 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและค่าความแข็ง

นำชิ้นงานหล่อของบรอนซ์อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe มาอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปเย็นตัวที่สภาวะแตกต่างกันดังนี้ (ก) เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว (ข) เย็นตัวในน้ำ (ค) เย็นตัวในอากาศ และ (ง) เย็นตัวในเตา แล้วศึกษาโครงสร้างจุลภาคและวัดความแข็ง สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนไม่ได้นำมาทำกรรมวิธีทางความร้อน เนื่องจากชิ้นงานหลังผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนแตกเสียหาย

4.3.3.1 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

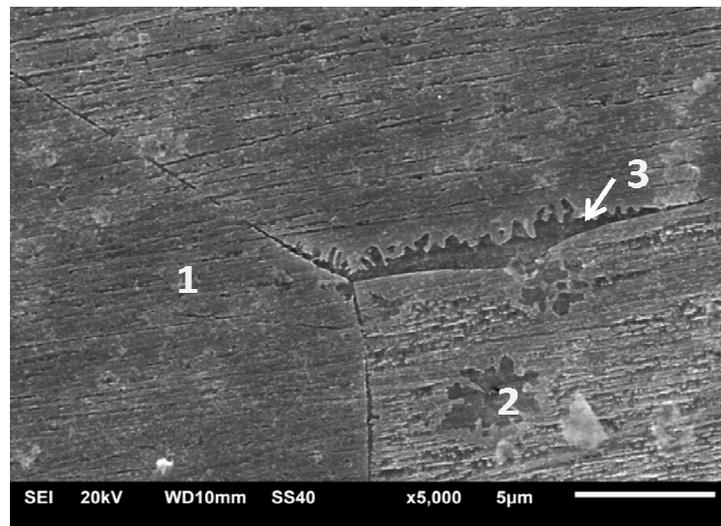
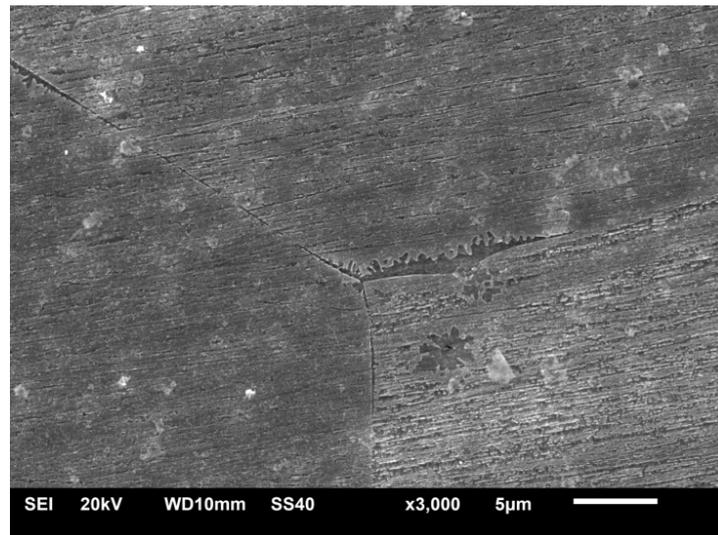
(ก) สภาวะการเย็นตัวในไนโตรเจนเหลว

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง แสดงในรูปที่ 4.7 มีลักษณะโครงสร้างเป็นเฟสบีตาไฟร์ม และมีอนุภาคนาโนเล็กเห็นเป็นจุด เนื่องจากกำลังขยายต่ำจึงสังเกตได้ยาก จึงนำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายสูงขึ้น



รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว

เมื่อนำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยายสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 เฟสส่วนใหญ่เป็นเฟสบีตาไพร์ม และมีเฟสแกมมาสองที่เห็นเป็นสี่เหลี่ยมอยู่ข้างในปริมาณเล็กน้อย เนื่องจากอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วส่งผลให้อะตอมของโลหะมีเวลาในการเคลื่อนที่ได้ น้อย ผลการวิเคราะห์ธาตุแสดงในตารางที่ 4.3 (สเปกตรัมแสดงในภาคผนวก ก. รูปที่ ก.2) พบว่า ส่วนผสมทางเคมีแตกต่างกันเล็กน้อย



รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe
หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว

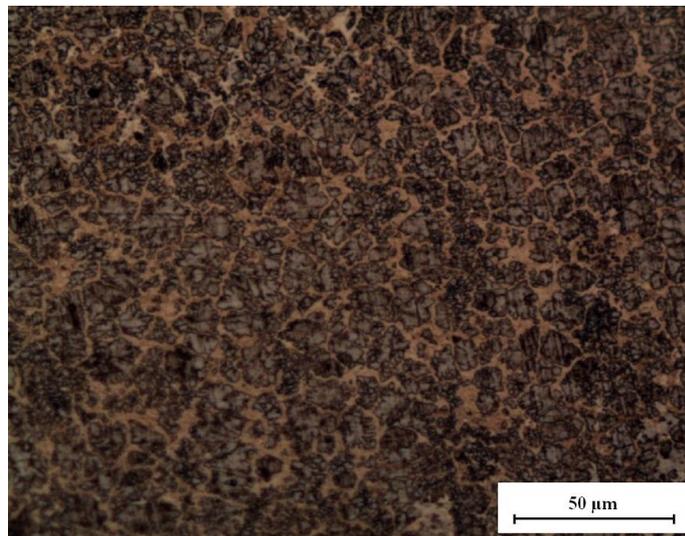
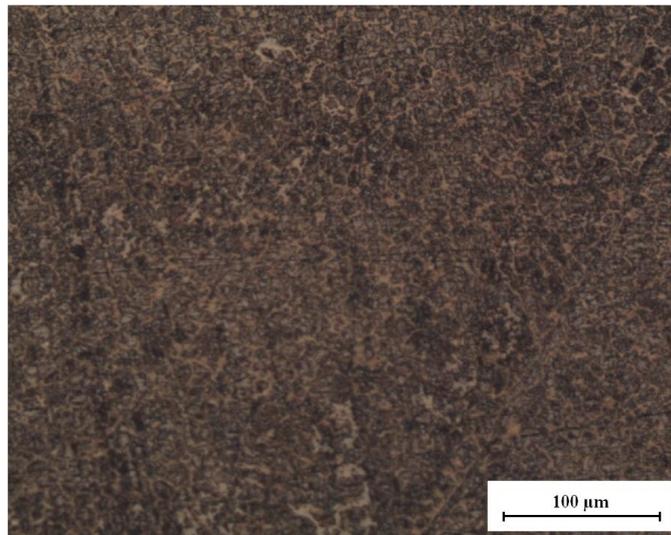
ธาตุที่วิเคราะห์ได้	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	บริเวณที่ 1	บริเวณที่ 2	บริเวณที่ 3
Cu	82.99	82.00	83.05
Al	14.56	15.52	14.56
Fe	2.45	2.48	2.39

บริเวณที่ 1 เป็นโครงสร้างพื้นของเฟสบีตาไพร์ม โดยทั่วไปพบว่าปริมาณอะลูมิเนียมร้อยละ 14.56 โดยน้ำหนัก มีเหล็กร้อยละ 2.45 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือเป็นทองแดง บริเวณที่ 2 เป็นโครงสร้างเฟสลักษณะกลมคล้ายดอกไม้ขนาดเล็กเป็นเฟสแกมมาสอง พบว่ามีปริมาณอะลูมิเนียมร้อยละ 15.52 โดยน้ำหนัก มีเหล็กร้อยละ 2.48 โดยน้ำหนัก ส่วนบริเวณที่ 3 มีปริมาณอะลูมิเนียมร้อยละ 14.56 โดยน้ำหนัก และมีเหล็กร้อยละ 2.39 โดยน้ำหนัก เป็นที่น่าสังเกตว่าบริเวณที่ 2 มีปริมาณอะลูมิเนียมมากกว่าบริเวณที่ 1 และ 3 เล็กน้อย ส่วนเหล็กแตกต่างกันไม่มาก ตามหลักการ การอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อต้องการเปลี่ยนเฟสทั้งหมดให้เป็นเฟสบีตาเพียงเฟสเดียวทั้งหมด หลังการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อระงับการเปลี่ยนแปลงเฟสไปเป็นเฟสอื่น เฟสที่ได้ควรเป็นเฟสบีตาไพร์มเพียงเฟสเดียว แต่ผลการทดลองนี้พบว่ามีเฟสแกมมาสองขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน หลงเหลืออยู่มีลักษณะเป็นวงคล้ายดอกไม้ และบริเวณขอบเกรน อาจเป็นไปได้ว่าในระหว่างการเย็นตัวในไนโตรเจนเหลว ปริมาณไนโตรเจนเหลวหมดก่อนจึงยับยั้งการเปลี่ยนเฟสได้ไม่หมด หรืออาจเนื่องมาจากเวลาที่ใช้ในการอบละลายเฟสให้เป็นเฟสบีตาเพียงเฟสเดียวใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง อาจไม่เพียงพอทำให้เฟสเดิมจากงานหล่อละลายไม่หมด

อย่างไรก็ตามผลการทดลองอบละลายเฟสแล้วทำให้เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว ช่วยระงับการเปลี่ยนเฟสโดยส่วนใหญ่ได้ เพราะการเกิดเฟสแกมมาสองมีปริมาณเล็กน้อยนั้น ซึ่งสามารถกำจัดเฟสแกมมาสองได้ถ้าใช้สภาวะการอบละลายเฟสที่เหมาะสม หรือปริมาณไนโตรเจนเหลวที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นข้อควรระมัดระวัง แนะนำว่าควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปเพื่อหาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้ได้เฟสบีตาไพร์มอย่างเดียว

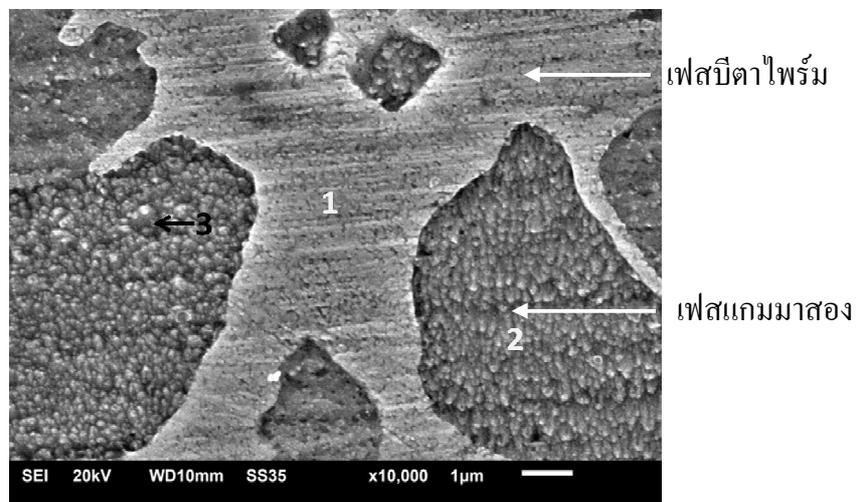
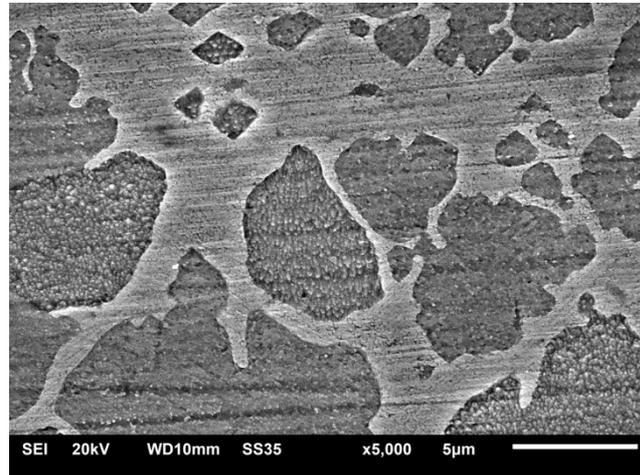
(ข) สภาพการเย็นตัวในน้ำ

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวในน้ำ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงแสดงในรูปที่ 4.9 ประกอบด้วย 2 เฟส คือเฟสแกมมาสอง และเฟสบีตาไพร์ม มีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างงานหล่อ สามารถเห็น โครงสร้างได้ชัดเจนขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในน้ำ

เมื่อนำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เห็นเกรนมีลักษณะคล้ายโครงร่างตาข่ายดังแสดงในรูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ธาตุแสดงในตารางที่ 4.4 (สเปกตรัมแสดงในภาคผนวก ก. รูปที่ ก.3)



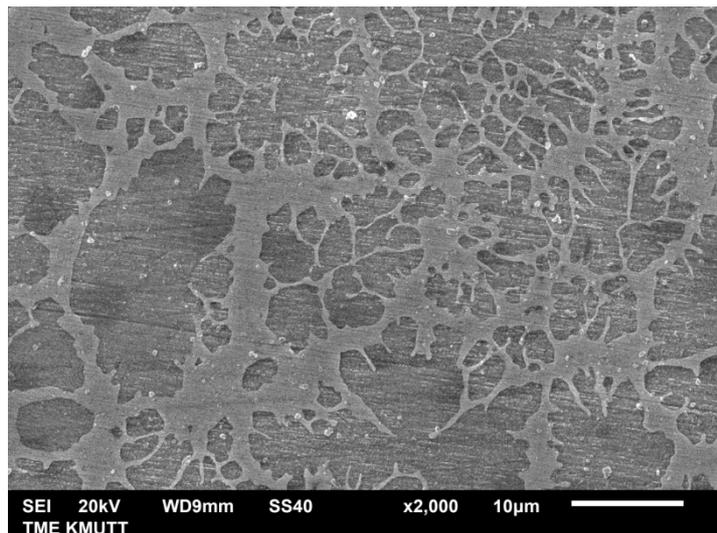
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในน้ำ
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe
หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในน้ำ

ธาตุที่วิเคราะห์ได้	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	บริเวณที่ 1	บริเวณที่ 2	บริเวณที่ 3
Cu	84.92	81.40	82.11
Al	12.60	16.09	15.47
Fe	2.48	2.51	2.41

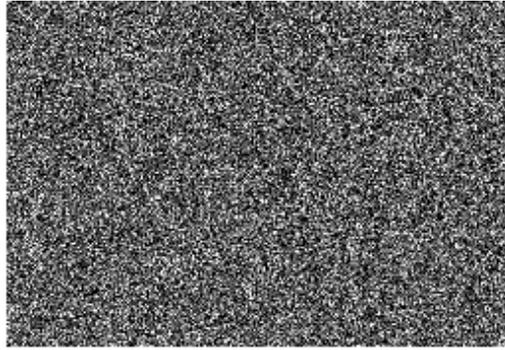
บริเวณที่ 1 เป็นโครงสร้างพื้น โดยทั่วไปเป็นเฟสบีตาไพร์ม พบว่ามีปริมาณอะลูมิเนียมร้อยละ 12.60 โดยน้ำหนัก มีเหล็กร้อยละ 2.48 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือเป็นทองแดง บริเวณที่ 2 และ 3 มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่ร้อยละ 16.09 โดยน้ำหนัก และ 15.47 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แสดงว่าเป็นเฟสแกมมาสอง

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ได้วิเคราะห์กระจายตัวของธาตุ (Mapping) เพิ่มเติมด้วย บริเวณที่ทำการ Mapping แสดงในรูปที่ 4.11

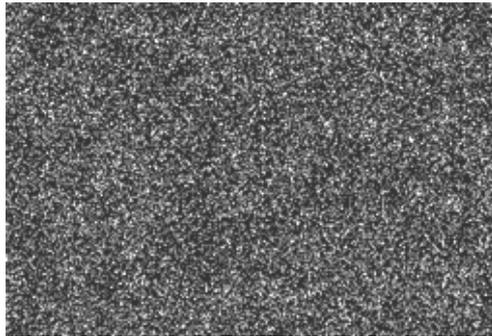


รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคบริเวณวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Mapping ชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในน้ำถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

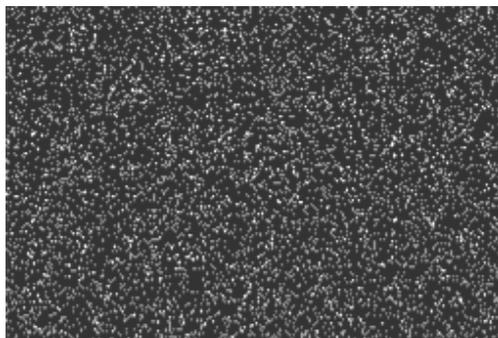
ผลการ Mapping เห็นเป็นจุดสีขาวแสดงถึงการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ ได้วิเคราะห์ธาตุทองแดง อะลูมิเนียม และเหล็ก ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.12 จากนั้น โปรแกรมคำนวณปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ทั้งหมด แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าธาตุแต่ละชนิดมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของธาตุในชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในน้ำ

(ก) ทองแดง (ข) อะลูมิเนียม และ (ค) เหล็ก

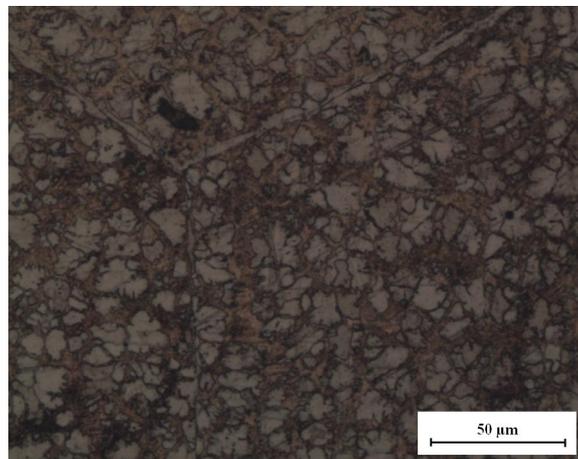
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Mapping บนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในน้ำ

ธาตุที่วิเคราะห์ได้	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Cu	83.16
Al	14.32
Fe	2.52

อย่างไรก็ตามการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวในน้ำเป็นการเย็นตัวที่ช้ากว่าเย็นตัวในไนโตรเจน ส่งผลทำให้มีเวลาในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเกิดเป็นลักษณะ โครงสร้าง 2 เฟส แต่จากแผนภาพเฟสสมดุล โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีเฟสอยู่ด้วยกัน 3 เฟส คือเฟสอัลฟา เฟสแกมมาสอง และเฟสเดลตา จากการทดลองไม่พบเฟสเดลตา เมื่อนำชิ้นงานไปวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุเหล็กพบว่าธาตุเหล็กมีการกระจายอยู่โดยทั่วทั้งเฟส และจากสเปกตรัมของทั้งเฟสอัลฟาและเฟสแกมมาสอง พบว่ามีฟิสิกขนาดเล็กลงของเหล็กเกิดขึ้น แสดงว่าเหล็กละลายอยู่ในเฟสอัลฟาและเฟสแกมมาสอง

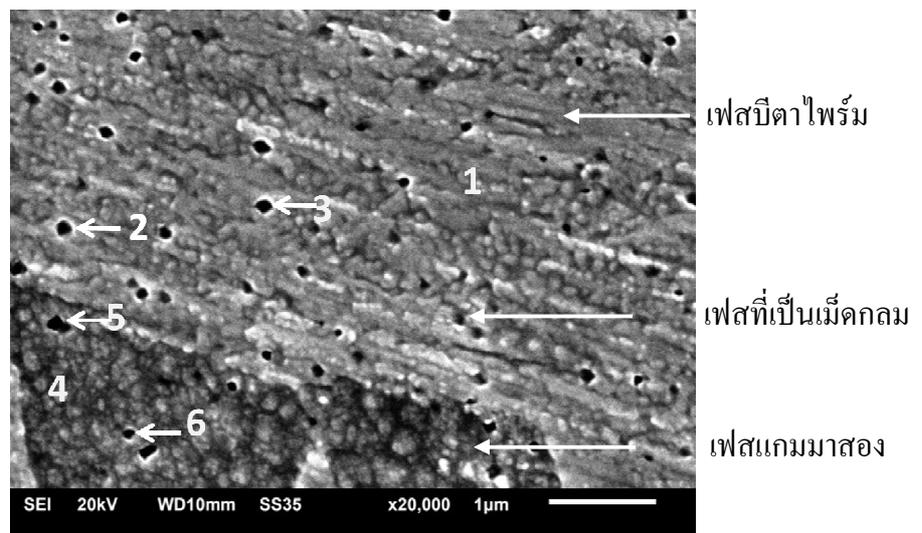
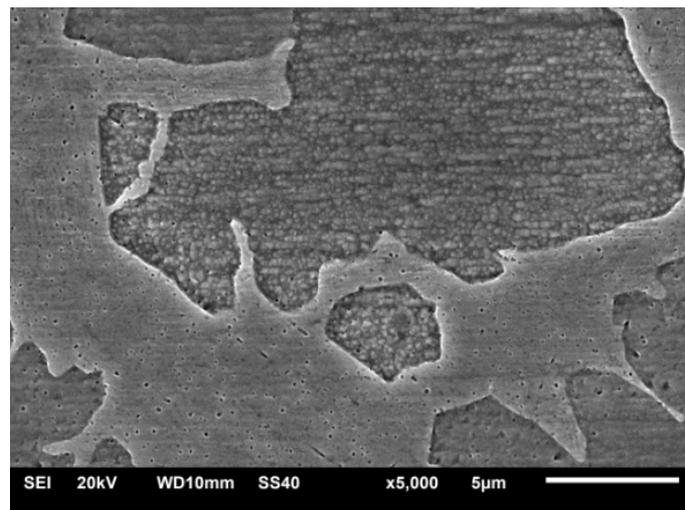
(ค) สภาพการเย็นตัวในอากาศ

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวในอากาศ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง แสดงในรูปที่ 4.13 มีลักษณะโครงสร้างเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่าการเย็นตัวในน้ำ เนื่องจากการเย็นตัวในอากาศมีเวลาในการเย็นตัวที่นานกว่าในน้ำ เวลาที่นานขึ้นส่งผลทำให้เกรนมีเวลาโตเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในอากาศ

เมื่อนำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เห็นเกรนมีลักษณะคล้ายโครงร่างตาข่ายขนาดใหญ่กว่าชิ้นตัวในน้ำแสดงในรูปที่ 4.14 เมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้นถึง 20,000 เท่า พบว่าเห็นอนุภาคที่เป็นเม็ดค่อนข้างกลมขนาดเล็กมากประมาณ 0.1 ไมครอน กระจายโดยทั่วไปผลการวิเคราะห์ธาตุทั้ง 6 จุดแสดงในตารางที่ 4.6 (สเปกตรัมแสดงในภาคผนวก ก. รูปที่ ก.4 – ก.5)



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe ชิ้นตัวในอากาศ
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe

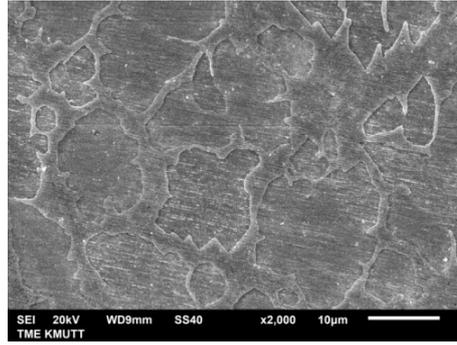
หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในอากาศ

ธาตุที่วิเคราะห์ได้	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	บริเวณที่ 1	บริเวณที่ 2	บริเวณที่ 3	บริเวณที่ 4	บริเวณที่ 5	บริเวณที่ 6
Cu	85.29	86.43	85.58	81.16	82.59	82.45
Al	12.66	11.62	12.47	16.19	15.52	15.26
Fe	2.05	1.95	1.95	2.65	1.89	2.29

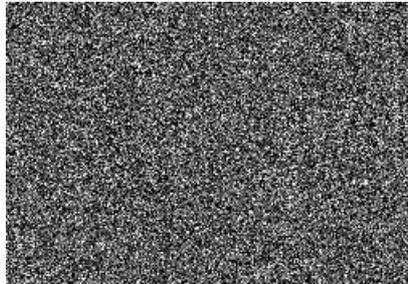
บริเวณที่ 1 เป็นโครงสร้างพื้นพบว่าปริมาณอะลูมิเนียมร้อยละ 12.66 โดยน้ำหนัก มีเหล็กร้อยละ 2.05 โดยน้ำหนัก ที่เหลือเป็นทองแดง เป็นเฟสบีตาไพร์ม บริเวณที่ 2 และ 3 เป็นบริเวณเม็ดกลมที่อยู่บนโครงสร้างพื้นของบริเวณที่ 1 พบว่าปริมาณอะลูมิเนียม และเหล็กใกล้เคียงกับบริเวณที่ 1 สำหรับบริเวณที่ 4 เป็นโครงสร้างพื้นที่อยู่ต่างแกนกับบริเวณที่ 1 มีปริมาณอะลูมิเนียมร้อยละ 16.19 โดยน้ำหนัก เป็นเฟสของแกมมาสอง บริเวณที่ 5 และ 6 เป็นบริเวณเม็ดกลมที่อยู่บนโครงสร้างพื้นของบริเวณที่ 4 มีปริมาณอะลูมิเนียมร้อยละ 15.52 โดยน้ำหนัก และ 15.56 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ปริมาณเหล็กร้อยละ 1.89 โดยน้ำหนัก และ 2.29 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนผสมใกล้เคียงกับส่วนผสมในบริเวณที่ 4

เนื่องจากเฟสที่เห็นเป็นเม็ดกลมมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณธาตุบนเฟสย่อมมีความคลาดเคลื่อนจึงมีผลกระทบมาจากโครงสร้างพื้นอย่างแน่นอน ทำให้ไม่ได้ข้อมูลที่แท้จริงว่าเฟสที่เห็นเป็นเม็ดสีดำนั้นเป็นเฟสที่มีส่วนผสมทางเคมีอย่างไร หรืออาจเป็นรูที่เกิดจากเฟสบริเวณนั้นหลุดออกไปจากการกัดกรดก็ได้ เป็นการยากในการวิเคราะห์เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีขนาดเล็กมาก

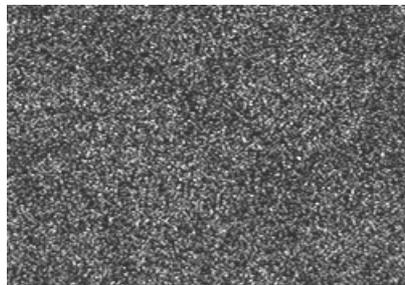
นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ได้วิเคราะห์กระจายตัวของธาตุ (Mapping) เพิ่มเติมด้วยบริเวณที่ทำการ Mapping แสดงในรูปที่ 4.15 ผลการ Mapping เห็นเป็นจุดสีขาวแสดงถึงการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ ได้วิเคราะห์ธาตุทองแดง อะลูมิเนียม และเหล็ก ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.16 จากนั้นโปรแกรมคำนวณปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ทั้งหมด แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าธาตุแต่ละชนิดมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ



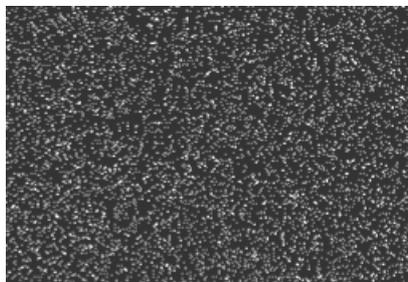
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคบริเวณวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Mapping ชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในอากาศถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของธาตุในชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในอากาศ
(ก) ทองแดง (ข) อะลูมิเนียม และ (ค) เหล็ก

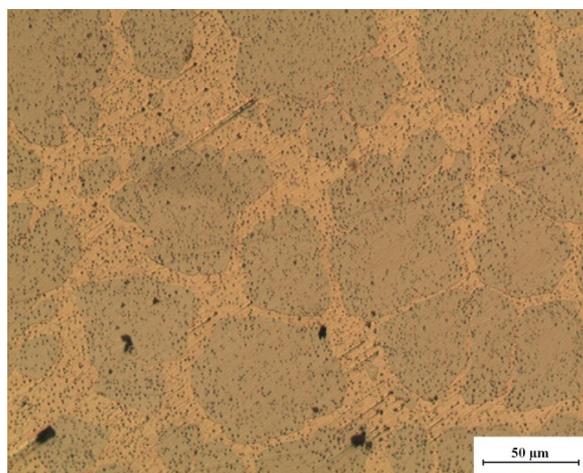
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Mapping บนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในอากาศ

ธาตุที่วิเคราะห์ได้	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
Cu	83.44
Al	14.33
Fe	2.43

อย่างไรก็ตาม จากการทดลองการเย็นตัวในอากาศเป็นการเย็นตัวที่ช้ากว่าเย็นตัวในน้ำ ส่งผลทำให้มีเวลาในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เพิ่มมากขึ้น แต่ยังไม่พอที่จะเกิดเฟสที่สมดุลตามแผนภาพ จึงเกิดเป็นลักษณะโครงสร้าง 2 เฟส ประกอบด้วยเฟสแกมมาสองรูปร่างที่ใหญ่กว่าเย็นตัวในน้ำ และเฟสบีตาไพร์ม

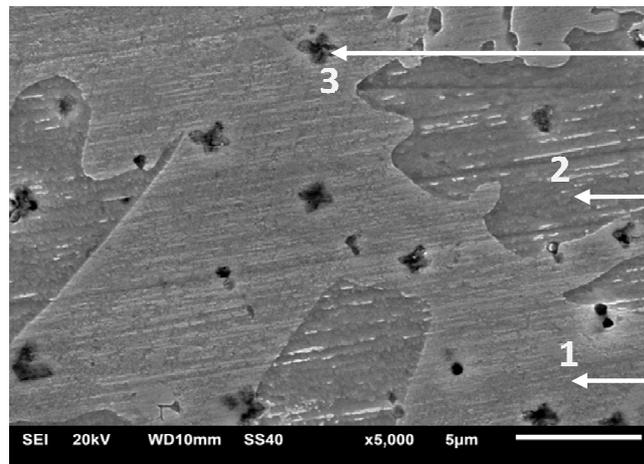
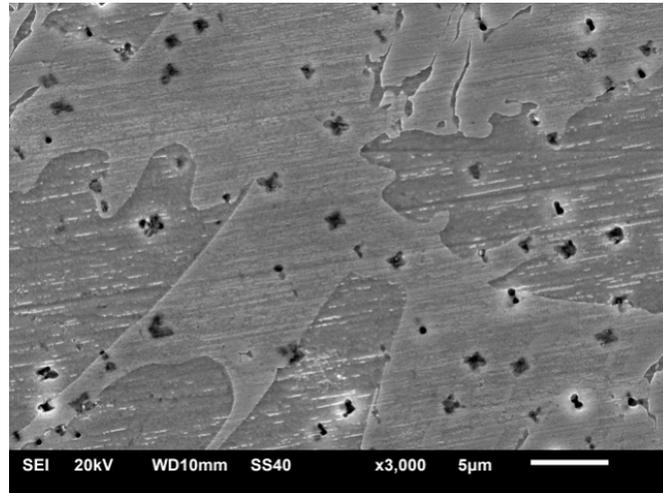
(ง) สภาพการเย็นตัวในเตา

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวในเตาถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงแสดงในรูปที่ 4.17 โครงสร้างเป็นเกรนขนาดใหญ่ประกอบด้วยเฟสบีตาไพร์ม เฟสแกมมาสอง และเฟสที่เป็นจุดสีดำขนาดเล็กกระจายอยู่โดยทั่วไป



รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตา

เมื่อนำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยายสูงขึ้น 2 บริเวณ รวมทั้งวิเคราะห์ส่วนผสมบริเวณละ 3 จุด รูปถ่ายบริเวณที่ 1 แสดงในรูปที่ 4.18 (สเปคตรัมของการวิเคราะห์ธาตุ ทั้ง 3 จุด แสดงในภาคผนวก ก. รูปที่ ก.6)



เฟสรูปร่างดาวสี่แฉก

เฟสแกมมาสอง

เฟสบีตาไพร์ม

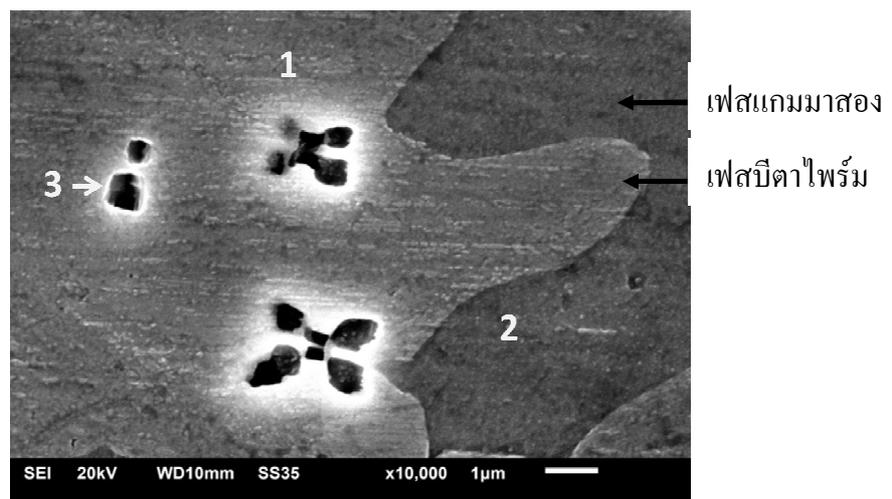
รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตา ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดบริเวณที่ 1

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe
หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในเตาบริเวณที่ 1

ธาตุที่วิเคราะห์ได้	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
Cu	85.57	84.33	86.93
Al	13.53	14.50	12.29
Fe	0.90	1.17	0.78

ผลการวิเคราะห์ที่บริเวณที่ 1 แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าจุดเล็กสีดำมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน กระจายตัวทั่วทั้งสองเฟส การเย็นตัวในเตามีอัตราการเย็นตัวประมาณ 3-5 องศาเซลเซียสต่อนาที มีอัตราการเย็นตัวช้าที่สุดเมื่อเทียบกับเย็นตัวในไนโตรเจนเหลว น้ำ และอากาศ ทำให้โลหะมีเวลาในการเปลี่ยนแปลงเฟส และทำให้เกรนโตขึ้น บริเวณที่ 1 พบว่าจุดที่ 2 มีปริมาณของอะลูมิเนียมร้อยละ 14.50 โดยน้ำหนัก และเหล็กอยู่มากที่สุดที่ร้อยละ 1.17 โดยน้ำหนัก

รูปถ่ายบริเวณที่ 2 แสดงในรูปที่ 4.19 (สเปกตรัมของการวิเคราะห์ธาตุ ทั้ง 3 จุด แสดงในภาคผนวก ก. รูปที่ ก.7)



รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตา
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดบริเวณที่ 2

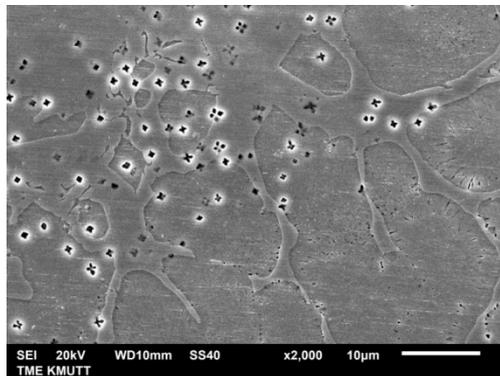
ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe
หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในเตาบริเวณที่ 2

ธาตุที่วิเคราะห์ได้	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
Cu	86.99	83.35	92.58
Al	12.39	15.79	6.93
Fe	0.61	0.86	0.49

ผลการวิเคราะห์ที่บริเวณที่ 2 แสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าจุดที่ 2 มีปริมาณของอะลูมิเนียมอยู่มากที่สุดที่ร้อยละ 15.79 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าการที่ชิ้นงานเย็นตัวในเตา เป็นการเย็นตัวที่ช้าแต่ยังช้าไม่พอที่จะจึงเกิดเฟสที่สมดุลตามเฟสในแผนภาพสมดุลเนื่องจาก การเย็นตัวช้าธาตุมีเวลามากพอในการแพร่ไปในบริเวณที่ใกล้เคียงกัน [25]

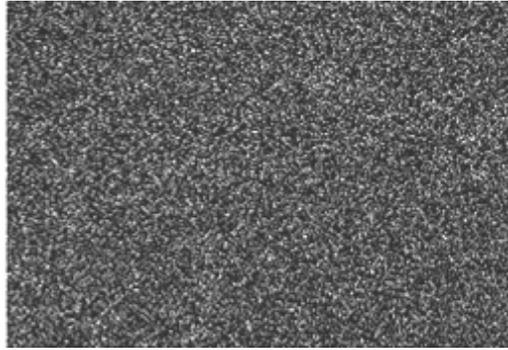
อนุภาคที่เห็นเป็นเม็ดเหลี่ยมในตำแหน่งที่ 3 มีขนาดเล็กมากประมาณได้ว่ามีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน ดังนั้น การวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS จึงได้ผลที่คลาดเคลื่อนไปย่อมมีผลจากโครงสร้างพื้นด้วย ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นสารประกอบที่มีสูตรทางเคมีเป็นอย่างไรแน่นอน [26]

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ได้วิเคราะห์กระจายตัวของธาตุ (Mapping) เพิ่มเติมด้วยบริเวณที่ทำการ Mapping แสดงในรูปที่ 4.20

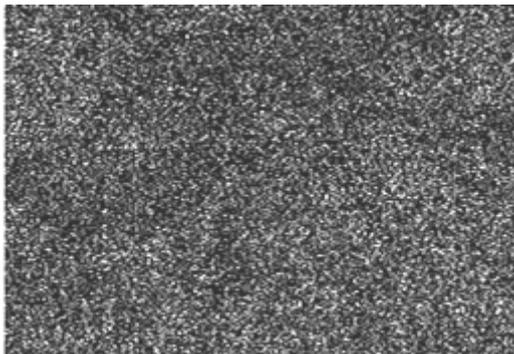


รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคบริเวณวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Mapping ชิ้นงานหล่อส่วนผสม
Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในอากาศถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด

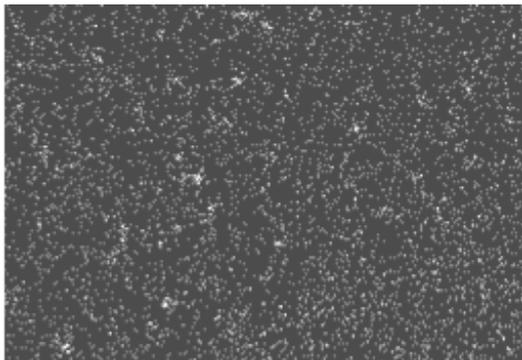
ผลการ Mapping เห็นเป็นจุดสีขาวแสดงถึงการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ ได้วิเคราะห์ธาตุทองแดง อะลูมิเนียม และเหล็ก ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.21 จากนั้น โปรแกรมคำนวณปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ทั้งหมด แสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าธาตุแต่ละชนิดมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของธาตุในชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตา

(ก) ทองแดง (ข) อะลูมิเนียม และ (ค) เหล็ก

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคMappingบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในเตา

ธาตุที่วิเคราะห์ได้	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
Cu	85.13
Al	13.59
Fe	1.28

อย่างไรก็ตามจากการทดลองการเย็นตัวในเตามีอัตราการเย็นตัวที่ช้าที่สุด แต่ยังไม่พอที่จะเกิดเป็นเฟสสมดุลตามแผนภาพซึ่งประกอบด้วย 3 เฟส คือเฟสอัลฟา เฟสแกมมาสอง และเฟสเดลตา เมื่อนำชิ้นงานไปวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุเหล็ก พบว่าธาตุเหล็กมีการกระจายอยู่โดยทั่วทั้งเฟส และจากสเปกตรัมของทั้งเฟสอัลฟา และเฟสแกมมาสองพบว่ามีความเข้มข้นของเหล็กเกิดขึ้น แสดงว่าเหล็กละลายอยู่ในเฟสทั้งสอง

4.3.3.2 ค่าความแข็งของชิ้นงานหล่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

ความแข็งของชิ้นงานหล่อและชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน โดยอบละลายเฟสที่อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้เย็นตัวที่สภาวะแตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 4.11

ความแข็งเฉลี่ยของงานหล่อมีค่า 487 วิกเกอร์ โครงสร้างประกอบด้วยเฟสบีตาไพร์ม และเฟสแกมมาสอง ซึ่งจากข้อมูลในแผนภาพเฟสสมดุลทำให้ทราบว่า เฟสแกมมาสองเกิดขึ้นเมื่อปริมาณของอะลูมิเนียมสูงเกินกว่าประมาณร้อยละ 15.6 โดยน้ำหนัก เป็นเฟสที่มีความแข็งสูงและเปราะ [17] ชิ้นงานที่เย็นตัวในไนโตรเจนเหลวมีความแข็งเฉลี่ย 433 วิกเกอร์ ซึ่งมีค่าความแข็งต่ำกว่างานหล่อเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นของเฟสบีตาไพร์ม ที่เปลี่ยนแปลงไม่ทันเนื่องจากเย็นตัวเร็ว

ตารางที่ 4.11 ค่าความแข็งของชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

สถานะของชิ้นงาน	ลักษณะโครงสร้างจุลภาค	ค่าความแข็งเฉลี่ย (วิกเกอร์)
ชิ้นงานหล่อ	เฟสบีตาไพร์ม และเฟสแกมมาสอง	487
ชิ้นงานหล่อเย็นตัวในไนโตรเจนเหลว	เฟสบีตาไพร์มเป็นส่วนใหญ่ (ที่กำลังขยายสูงเห็นเฟสแกมมาสองขนาดเล็กมาก)	433
ชิ้นงานหล่อเย็นตัวในน้ำ	เฟสบีตาไพร์ม และเฟสแกมมาสอง	491
ชิ้นงานหล่อเย็นตัวในอากาศ	เฟสบีตาไพร์ม เฟสแกมมาสองและเฟสที่เป็นเม็ดกลมสีดำ	458
ชิ้นงานหล่อเย็นตัวในเตา	เฟสบีตาไพร์ม เฟสแกมมาสองและเฟสที่เป็นเม็ดเหลี่ยมสีดำ	404

ชิ้นงานที่เย็นตัวในน้ำมีค่าความแข็งเฉลี่ย 491 วิกเกอร์ ซึ่งมีความแข็งสูงสุด ส่วนชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศ และในเตามีค่าความแข็งเฉลี่ย 458 และ 404 วิกเกอร์ ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เย็นตัวในน้ำมีโครงสร้างขนาดเล็กกว่าชิ้นงานที่เย็นตัวในอากาศ และในเตา จากรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่ามีอนุภาคขนาดเล็ก รูปร่างกลม รูปร่างสี่เหลี่ยม และรูปร่างคล้ายดาวสี่แฉก กระจายตัวอยู่โดยทั่วทั้งเฟสอัลฟา และเฟสแกมมาสองอนุภาคดังกล่าวมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อเย็นตัวช้าๆ ในเตา

จากการทดลองเห็นได้ชัดเจนว่าการเกิดอนุภาคขนาดเล็กที่มีรูปร่างกลม รูปร่างสี่เหลี่ยม และรูปร่างคล้ายดาวสี่แฉก มีผลทำให้ความแข็งของชิ้นงานลดลง จากทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับการทำกรรมวิธีทางความร้อน สามารถอธิบายได้ว่าการที่มีอนุภาคขนาดเล็กเกิดขึ้น ย่อมมีผลต่อความแข็งของโครงสร้าง เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้สามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้ แต่เมื่อขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ขึ้น ย่อมสูญเสียความสัมพันธ์เชิงโครงสร้าง (Coherency) กับโครงสร้างพื้นไป จึงส่งผลให้ความแข็งลดลง [24]

อย่างไรก็ตามในที่นี้ไม่สามารถบอกได้แน่ชัดว่าอนุภาคขนาดเล็ก รูปร่างกลม รูปร่างสี่เหลี่ยม และรูปร่างดาวสี่แฉก ที่เกิดขึ้นเป็นเฟสใด ต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไปเพื่อหาสูตรทางเคมีที่แน่นอน และโครงสร้างผลึกซึ่งเป็นสิ่งที่น่าสนใจ หากต้องการได้เฟสที่สมดุล แนะนำว่าหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จนแน่ใจได้ว่าได้เฟสปีตาทั้งหมด ทำให้เย็นตัวช้าๆลงมาถึงอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิมืดคอยที่ 565-568 องศาเซลเซียส แล้วใช้อุณหภูมิเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจนสมบูรณ์ แล้วจึงทำให้เย็นตัวที่อุณหภูมิต่ำโดยการจุ่มน้ำ จึงจะได้เฟสตามสภาวะสมดุลได้แก่ เฟสอัลฟา เฟสแกมมาสอง และเฟสเดลตา

สิ่งที่ได้ทราบจากการทดลองนี้คือ ทำให้ทราบว่าชิ้นงานบรอนซ์อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังผ่านการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวในน้ำได้ค่าความแข็งสูงสุด ซึ่งมีค่ามากกว่าโครงสร้างงานหล่อที่ใช้แบบหล่อโลหะอุ่นที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ถ้าในอุตสาหกรรมงานหล่อโดยใช้แบบหล่อโลหะอยู่แล้วจึงไม่มีความจำเป็นในการทำกรรมวิธีทางความร้อน เนื่องจากเป็นการเพิ่มต้นทุนมากขึ้นในทางตรงกันข้าม ถ้าในทางปฏิบัติของภาคอุตสาหกรรมที่ใช้กระบวนการหล่อด้วยแบบหล่อทราย ชิ้นงานเย็นตัวช้ามีโอกาสดำเนินการที่สมดุลได้เกรนขนาดใหญ่ เนื่องจากระหว่างการเย็นตัวในแบบหล่อทรายคล้ายกับชิ้นงานถูกอบอ่อน (Anneal) จึงได้ความแข็งต่ำกว่าเย็นตัวในแบบหล่อโลหะ