บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับทองแดงบริสุทธิ์และโลหะผสมทองแดง

ทองแดงจัดเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ต่ำ แต่มีความเหนียวสูง การปรับปรุงสมบัติทางกลของทองแดงสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การขึ้นรูปเย็น การเพิ่มความแข็งด้วยกรรมวิธีทางความร้อนและการทำให้เกิดเป็นสารละลายของของแข็ง เป็นต้น ซึ่งในแต่ละวิธีสามารถเพิ่มความแข็งให้กับทองแดงได้แตกต่างกัน [14, 15] มีการเติมธาตุผสมต่างๆเข้าไปในทองแดง [16] ทำให้เกิดโลหะผสมทองแดงหลายชนิดและมีสมบัติทางกลที่แตกต่างกันออกไป ส่งผลให้สามารถเลือกใช้งานได้ตามความเหมาะสมตามลักษณะงาน มีการจัดกลุ่มของโลหะผสมทองแดงออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ ดังนี้ [17-20]

กลุ่มที่ 1 โลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี เรียกว่า ทองเหลือง (Brasses) แบ่งกลุ่มย่อยออกไปตามลักษณะโครงสร้างจุลภาคดังนี้

ก. ทองเหลืองอัลฟา (α - Brass) ผสมสังกะสีสูงถึงร้อยละ 36 แบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย 2 กลุ่ม
   1. ทองเหลือง Yellow Alpha ผสมสังกะสี ร้อยละ 20 – 36
   2. ทองเหลือง Red Brass ผสมสังกะสี ร้อยละ 5 - 20

ข. ทองเหลืองอัลฟา- บีตา (α –β) ผสมสังกะสีร้อยละ 38 - 46

กลุ่มที่ 2 โลหะผสมระหว่างทองแดงกับธาตุอื่น เช่น อะลูมิเนียม ดีบุก ซิลิคอน เรียกว่า บรอนซ์ (Bronze) แบ่งออกไปหลายประเภทขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุผสม เช่น

ก. บรอนซ์ดีบุก

ข. บรอนซ์อะลูมิเนียม

ค. บรอนซ์ซิลิคอน

ง. บรอนซ์เบริลเลียม

กลุ่มที่ 3 โลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล เรียก ชื่อโลหะกลุ่มนี้ ทับศัพท์ภาษาอังกฤษว่า คูโปนิกเกิล (Cupro Nickels)

กลุ่มที่ 4 โลหะผสมระหว่างทองแดง นิกเกิล และสังกะสี เรียกชื่อโลหะกลุ่มนี้ ทับศัพท์ภาษาอังกฤษว่า นิกเกิลซิลเวอร์ (Nickel Silver) หรือ เจอร์มันซิลเวอร์ (German Silver)

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับบรอนซ์อะลูมิเนียม

ตามคำจำกัดความของสมาคม American Society for the Testing of Materials บรอนซ์อะลูมิเนียม หมายถึง โลหะผสมระหว่างทองแดงกับอะลูมิเนียม โดยมีอะลูมิเนียมผสมอยู่ระหว่าง ร้อยละ 5 – 15 โดยน้ำหนัก อาจมีเหล็กผสมอยู่ได้สูงถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และอาจให้มีแมงกานีสหรือนิกเกิลผสมได้ สำหรับซิลิคอนจะผสมได้ไม่เกินร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM B-148-52 แบ่งชั้นคุณภาพของบรอนซ์อะลูมิเนียมเป็น 4 ชั้นคุณภาพ ขึ้นอยู่กับส่วนผสม และสมบัติทางกล ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 [17]

มนัส สถิรจินดา [17] รายงานว่า ประเทศไทยมีการใช้บรอนซ์อะลูมิเนียม ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากโรงงานหล่อโลหะผสมทองแดงที่ดำเนินกิจการอยู่ยังขาดเทคโนโลยี ที่จะหล่อบรอนซ์อะลูมิเนียมให้ได้คุณภาพตามมาตรฐาน การหล่อบรอนซ์อะลูมิเนียมกระทำได้ยากเมื่อเทียบกับการหล่อบรอนซ์ดีบุก หรือบรอนซ์ฟอสฟอรัส เพราะบรอนซ์อะลูมิเนียมมีช่วงในการแข็งตัวที่แคบมาก การหดตัวสูง และการดูดแก๊สได้มากในขณะที่ทำการหล่อหลอม

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของบรอนซ์อะลูมิเนียมที่ใช้ในแบบหล่อทราย [17]

ธาตุ	หมายเลขโลหะผสม ปริมาณ(ร้อยละ)			
	9A	9B	9C	9D
ทองแดง (ต่ำสุด)	86.0	86.0	83.0	78.0
อะลูมิเนียม	8.5 – 9.5	9.0 – 11.0	10.0 – 11.5	10.0 – 11.5
เหล็ก	2.5 – 4.0	0.75 – 1.5	3.0 – 5.0	3.0 - 5.0
แมงกานีส (สูงสุด)	-	-	0.5	3.5
นิกเกิล	-	-	2.5สูงสุด	3.0 -5.5
ผลรวม (ต่ำสุด)	99.0	99.0	99.5	99.5

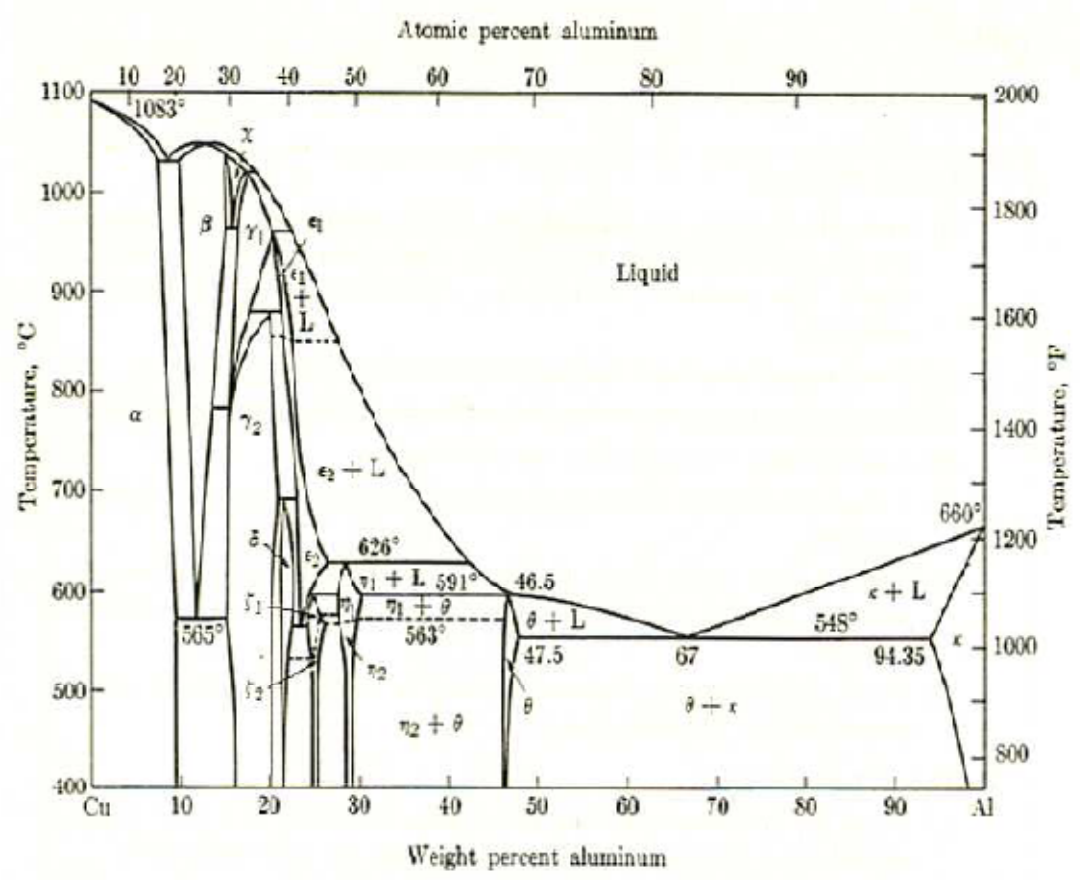
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกลของบรอนซ์อะลูมิเนียมที่ใช้ในแบบหล่อทราย [17]

สมบัติทางกล	หมายเลขโลหะผสม			
	9A As-cast	9B	9C	9D
ความต้านแรงดึงสูงสุด (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	65,000	65,000	75,000	90,000
ความต้านแรงดึงที่จุดคราก (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	25,000	25,000	30,000	40,000
ร้อยละการยืดตัว (ร้อยละ)	20	20	12	6
ค่าความแข็งบริเนล (แรงกด 3,000 กิโลกรัม)	110	110	150	190

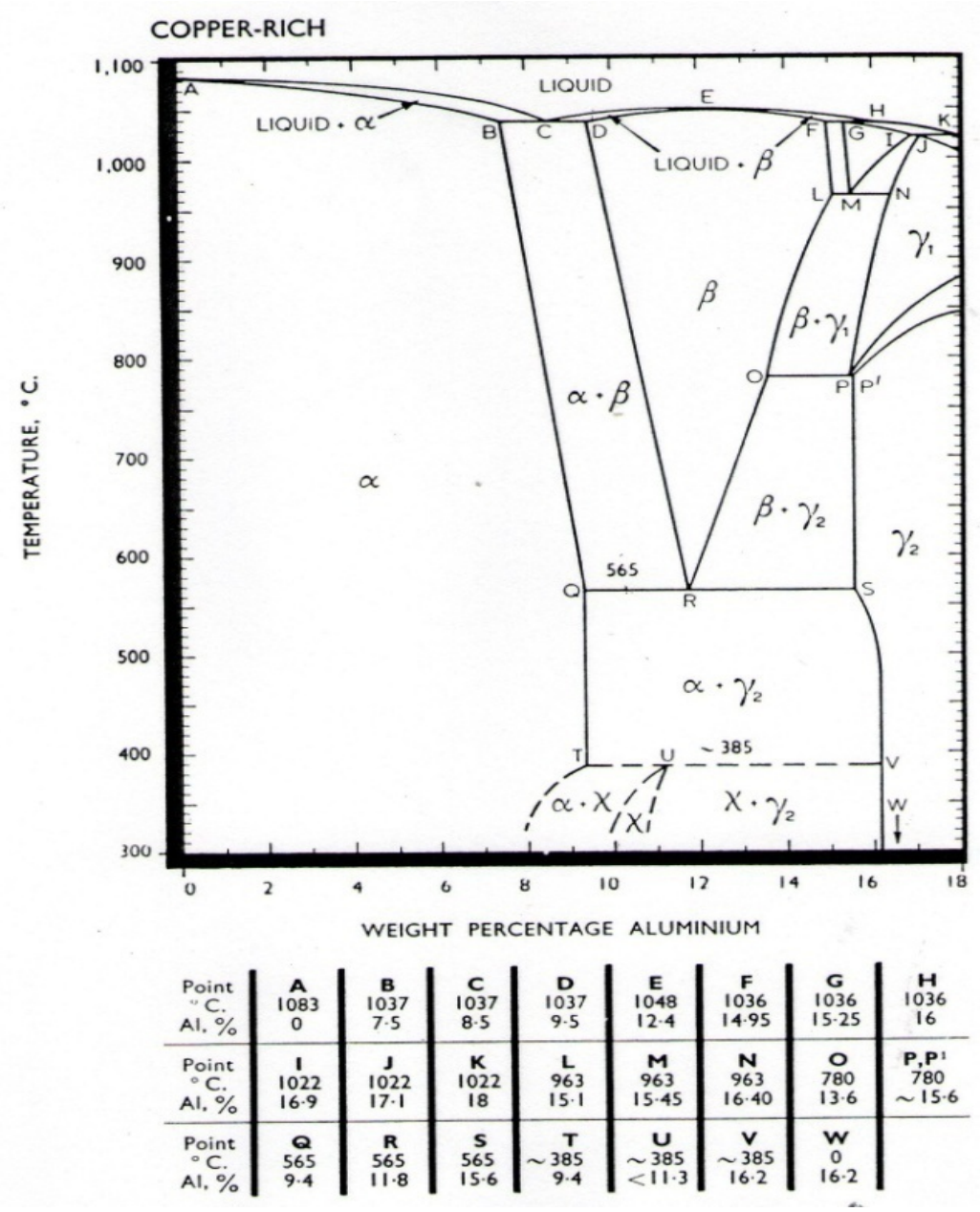
2.2.1 โลหะวิทยาพื้นฐานของบรอนซ์อะลูมิเนียม

แผนภาพเฟสสมดุลของโลหะผสม 2 ธาตุ ของทองแดง และอะลูมิเนียมแสดงในรูปที่ 2.1 และแผนภาพเฟสสมดุลของทองแดงและอะลูมิเนียมผสมไม่เกินร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 2.2 เห็นได้ว่าเส้น Liquidus และ Solidus ที่แคบมาก โดยเฉพาะเมื่อมีอะลูมิเนียมผสมอยู่มากกว่าร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก หรือส่วนที่เลยจุดยูเทคติค (อะลูมิเนียมร้อยละ 8.5 โดยน้ำหนัก)

อะลูมิเนียมสามารถละลายในทองแดง และเกิดเป็นสารละลายของของแข็งที่เรียกว่า อัลฟา (Alpha, α) ซึ่งมีระบบผลึกเป็น FCC (Face Center Cubic) เป็นลักษณะโครงสร้างที่มีความเหนียวสูง เฟสอัลฟาจะมีอะลูมิเนียมละลายได้สูงถึงร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1,037 องศาเซลเซียส และจะเพิ่มเป็นร้อยละ 9.4 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส [17]



รูปที่ 2.1 แผนภาพเฟสสมดุลของทองแดงและอะลูมิเนียม [21]



Point	A	B	C	D	E	F	G	H
°C.	1083	1037	1037	1037	1048	1036	1036	1036
Al, %	0	7·5	8·5	9·5	12·4	14·95	15·25	16
Point	I	J	K	L	M	N	O	P,P¹
°C.	1022	1022	1022	963	963	963	780	780
Al, %	16·9	17·1	18	15·1	15·45	16·40	13·6	~15·6
Point	Q	R	S	T	U	V	W	
°C.	565	565	565	~385	~385	~385	0	
Al, %	9·4	11·8	15·6	9·4	<11·3	16·2	16·2	

รูปที่ 2.2 แผนภาพเฟสสมดุลของทองแดงและอะลูมิเนียมไม่เกินร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก [16]

เฟสบีตา (Beta, β) เป็นสารละลายของของแข็งอีกชนิดหนึ่ง ระหว่างทองแดงและอะลูมิเนียมมีระบบผลึกเป็น BCC (Body Center Cubic) เป็นลักษณะโครงสร้างที่มีความแข็งกว่าอัลฟา เฟสบีตาเกิดที่อุณหภูมิ 1,037 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยายูเทคติคของโลหะทองแดง – อะลูมิเนียม หลอมเหลวที่มีส่วนผสมอะลูมิเนียมร้อยละ 8.5 โดยน้ำหนัก แตกตัวให้เฟสอัลฟา (อะลูมิเนียมร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนัก) และเฟสบีตา (อะลูมิเนียมร้อยละ 9.5 โดยน้ำหนัก) [17]

สำหรับ แกมมาหนึ่ง (Gamma, γ_1) เป็นเฟสอีกแบบหนึ่งมีลักษณะคล้ายกับเฟสบีตา เกิดอยู่ในช่วงอุณหภูมิสูง จากเอกสารอ้างอิงหลายฉบับไม่มีรายละเอียดมากนักเกี่ยวกับเฟสแกมมาหนึ่ง เพราะเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจะสลายตัวให้ เฟสแกมมาสองร่วมกับเฟสบีตา สำหรับเฟสแกมมาสอง (Gamma, γ_2) จะปรากฏในแผนภาพเฟสสมดุล เมื่อปริมาณของอะลูมิเนียมสูงเกินกว่าร้อยละ 9.4 โดยน้ำหนัก เป็นเฟสที่มีความแข็งสูง แต่เปราะแตกหักง่าย เป็นลักษณะโครงสร้างประเภทสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) โดยมีสูตร Cu_9Al_4 มีระบบผลึกเป็นลูกบาศก์เชิงซ้อน (Complex Cublic) [17]

ปฏิกิริยายูเทคตอยด์ เกิดที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส มีลักษณะคล้ายคลึงกับปฏิกิริยายูเทคตอยด์ที่เกิดกับเหล็กกล้าคาร์บอน และโครงสร้างภายหลังที่เกิดปฏิกิริยาจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับเพิร์ไลท์ของเหล็กกล้าคาร์บอน ปฏิกิริยายูเทคตอยด์ที่กล่าวถึงนี้คือ เฟสบีตา (อะลูมิเนียมร้อยละ 11.8 โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส จะแตกตัวเป็นเฟสอัลฟา (อะลูมิเนียมร้อยละ 9.4 โดยน้ำหนัก) กับเฟสแกมมาสอง (อะลูมิเนียมร้อยละ15.6 โดยน้ำหนัก) ดังปฏิกิริยาที่แสดง

$$\beta(11.8\%\ Al) \rightleftharpoons \alpha\ (9.4\%\ Al) + \gamma_2(15.6\%\ Al)$$

ในช่วงอุณหภูมิต่ำประมาณ 385 องศาเซลเซียส ในสภาวะสมดุลการเย็นตัวจะปรากฏว่า เฟสไช(Chi, χ) ซึ่งจากเอกสารอ้างอิงไม่ได้ให้รายละเอียด คงแสดงไว้เพียงมีพื้นที่ในแผนภาพเฟสสมดุล ที่แยกตัวระหว่างเฟสอัลฟากับเฟสไช และเฟสไชกับเฟสแกมมาสอง ซึ่งไม่มีผลใดๆ ต่อลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกล เนื่องจากในทางปฏิบัติ การเย็นตัวของโลหะไม่อยู่ในสภาวะสมดุล จนทำให้ปรากฏเฟสไช ได้

2.2.2 ความสามารถในการทำกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatable)

จากแผนภาพเฟสสมดุลของทองแดง และอะลูมิเนียม ดังได้กล่าวแล้วใน รูปที่ 2.2 ปรากฏปฏิกิริยายูเทคตอยด์ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส

$$\beta(11.8\%\ Al) \rightleftharpoons \alpha\ (9.4\%\ Al) + \gamma_2(15.6\%\ Al)$$

ปฏิกิริยานี้จะเกิดได้สมบูรณ์ ต้องปล่อยให้โลหะผสมเย็นตัวช้า แต่ถ้าการเย็นตัวในช่วงอุณหภูมินี้เป็นไปอย่างรวดเร็ว เฟสบีตาไม่สามารถแยกตัวให้ เฟสอัลฟากับเฟสแกมมาสองได้ จะปรากฏ

โครงสร้างในลักษณะกึ่งสมดุล (Metastable) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างคล้ายคลึงกับมาร์เทนไซต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างของเหล็กกล้าคาร์บอนภายหลังผ่านการชุบแข็ง บรอนซ์อะลูมิเนียมที่สามารถชุบแข็งได้นี้ต้องเป็นบรอนซ์อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมของอะลูมิเนียมอยู่ระหว่างร้อยละ 9.4 – 15.6 โดยน้ำหนัก กล่าวคือ เป็นส่วนผสมของทองแดง และอะลูมิเนียมที่จะให้ปฏิกิริยายูเทคตอยด์ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส ในด้านการผลิตบรอนซ์ผสมอะลูมิเนียมชั้นคุณภาพที่สามารถชุบแข็งได้ มีการผสมอะลูมิเนียมประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อเผาให้ร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โครงสร้างเดิมที่ประกอบด้วยเฟสอัลฟา และเฟสแกมมาสอง จะเปลี่ยนเป็นเฟสบีตา และเมื่อทำการชุบในน้ำเย็นโดยรวดเร็ว เฟสบีตาไม่สามารถแตกตัวให้เฟสอัลฟา และเฟสแกมมาสอง (ปฏิกิริยายูเทคตอยด์) ทันจึงเกิดโครงสร้างกึ่งสมดุล ที่เรียกว่า บีตาไพร์ม (β') ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับมาร์เทนไซต์ และเมื่ออบคืนไฟ (Temper)โครงสร้างกึ่งสมดุลจะคืนกลับเข้าสู่สภาวโครงสร้างที่สมดุล มีลักษณะเหมือนเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ [17, 22]

มนัส สถิรจินดา [17] รายงานว่านำบรอนซ์อะลูมิเนียมที่มีอะลูมิเนียมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มาเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แล้วนำไปจุ่มน้ำได้ความต้านทานแรงดึงสูงถึง 680 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร อัตราการยืดตัวร้อยละ 4

แต่ถ้าปล่อยให้เย็นจากอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ลงช้าๆ จนถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส แล้วนำไปจุ่มน้ำได้ค่าความต้านทานแรงดึง 430 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร อัตราการยืดตัวร้อยละ 17 ปรากฏว่าโลหะมีความเหนียวสูงขึ้น เพราะโครงสร้างที่ได้ส่วนหนึ่งเป็นเฟสอัลฟา ที่เหลือเป็นเฟสบีตาไพร์ม [17]

การปล่อยให้เย็นจากอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ลงมาช้าๆจนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แล้วนำไปจุ่มน้ำได้ค่าความต้านทานแรงดึงเพียง 300 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร อัตราการยืดตัวร้อยละ 5 เพราะว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เฟสบีตาเปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟสอัลฟา และเฟสแกมมาสองหมดแล้ว แม้ว่าให้เย็นเร็วจากอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อปรากฏเฟสแกมมาสองขึ้น อัตราการยืดตัวกลับลดลงและค่าความต้านทานแรงดึงไม่สูงขึ้นด้วย [17]

จากผลการทดลองที่กล่าวมานี้ เป็นแนวทางในการอบชุบความร้อนบรอนซ์อะลูมิเนียม ถ้าต้องการความต้านทานแรงดึงสูงควรทำการจุ่มน้ำหลังอบที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอบคืนตัวไฟเพื่อคลายความเครียด จะเป็นการเพิ่มความเหนียวเล็กน้อย แต่ถ้าต้องการความเหนียวสูง ความต้านทานแรงดึงลดลง ควรปล่อยให้บรอนซ์เย็นจากอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ลงมาช้าๆจนถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส จึงทำการจุ่มน้ำ และสุดท้ายทำการอบคืนไฟ เพื่อลดความเครียดที่อุณหภูมิต่ำไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการตกผลึกของเฟสอัลฟา และเฟสแกมมาสอง จากเฟสบีตาไพร์ม การเปรียบเทียบผลการทดลองอบชุบโดยเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และปล่อยให้เย็นตัวในอัตราการเย็นตัวที่ต่างกัน ได้รวมไว้เป็นตารางแสดงสมบัติทางกลของบรอนซ์อะลูมิเนียมดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลของบรอนซ์อะลูมิเนียมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่แตกต่างกัน [17]

ชิ้นงานผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	โครงสร้างจุลภาค	ความต้านทานแรงดึง (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)	อัตราการยืดตัว (ร้อยละ)
จุ่มน้ำทันที	ไม่ได้บอก	680	4
ปล่อยให้เย็นตัวช้าๆ จนถึง อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสแล้วจุ่มน้ำ	เฟสอัลฟาและเฟสบีตาไพร์ม	430	17
ปล่อยให้เย็นตัวช้าๆ จนถึง อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสแล้วจุ่มน้ำ	เฟสอัลฟาและเฟสแกรมมสอง	300	5

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของบรอนซ์อะลูมิเนียม สามารถกระทำได้โดยการผสมธาตุเหล็ก นิกเกิล และแมงกานีส โดยธาตุผสมจะมีบทบาทต่อบรอนซ์อะลูมิเนียม

2.2.3 ธาตุผสมที่มีบทบาทต่อบรอนซ์อะลูมิเนียม

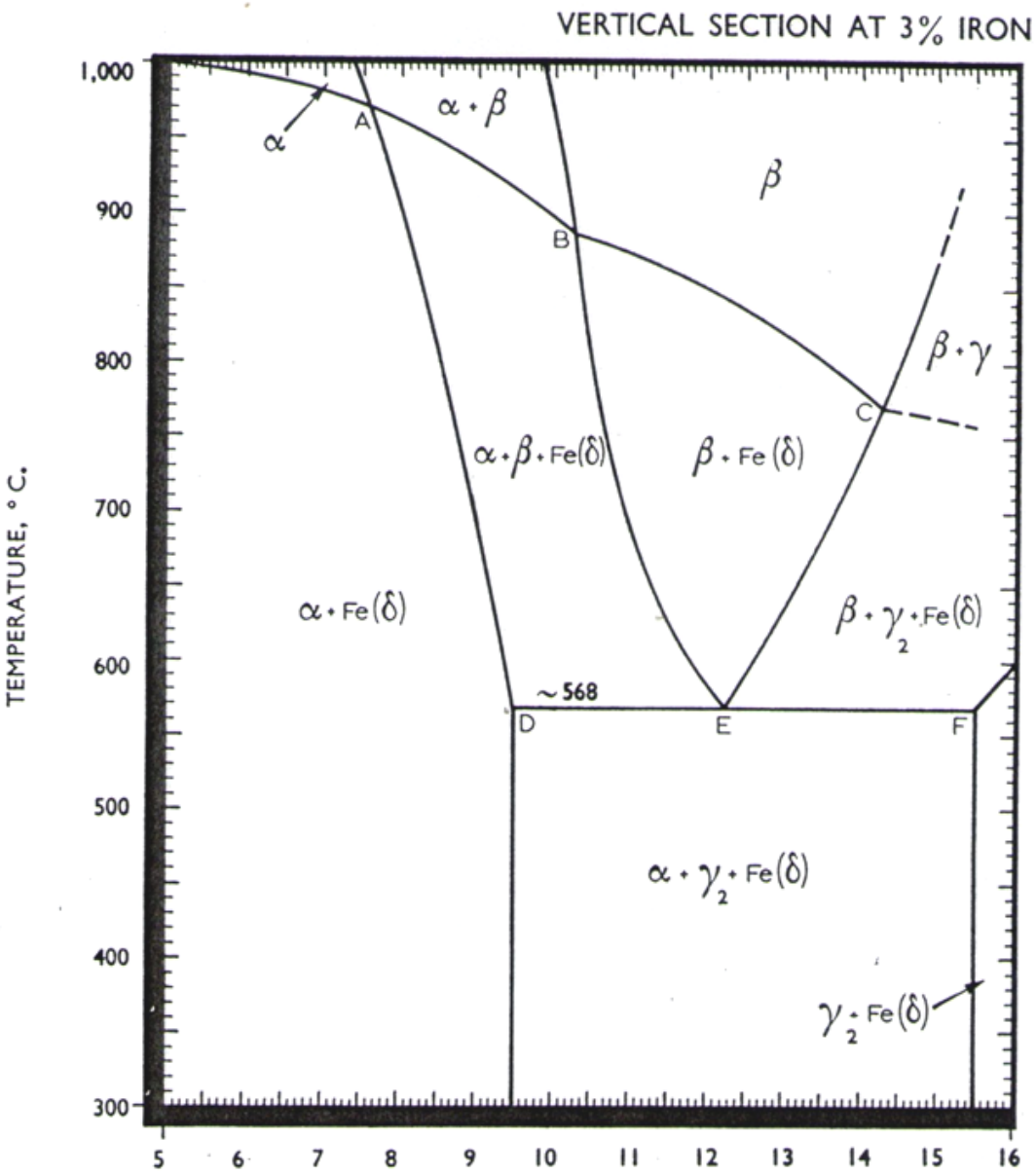
1) เหล็ก

เมื่อผสมเหล็กลงในบรอนซ์อะลูมิเนียมจะช่วยทำหน้าที่ทำให้โลหะมีเกรนที่มีขนาดละเอียดเพิ่มมากขึ้น เหล็กมีผลทำให้แผนภาพเฟสสมดุลของทองแดง–อะลูมิเนียมเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย เหล็กมี

ความสามารถในการละลายได้ดีในทองแดง แต่จะลดอัตราการละลายลดลงเมื่อมีปริมาณอะลูมิเนียมผสมเพิ่มมากขึ้น ที่อุณหภูมิสูงเหล็กจะละลายได้ดีในเฟสอัลฟา แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส เหล็กจะเริ่มแยกตัวและตกผลึกกระจัดกระจายในเฟสอัลฟาเป็นเฟสเดลตา (Delta, δ) และเมื่ออุณหภูมิลดลงมาที่ 850 องศาเซลเซียส ปรากฏเฟสเดลตา มีผลทำให้โครงสร้างจุลภาคของบรอนซ์อะลูมิเนียมในสภาพหลังการหล่อมีเกรนละเอียด และในขณะเดียวกันเป็นการป้องกันการขยายตัวของเฟสบีตาในช่วงอุณหภูมิสูง และทำให้การแตกตัวให้ปฏิกิริยายูเทคตอยด์ของเฟสบีตาเกิดได้ในอัตราช้าลง บรอนซ์อะลูมิเนียมส่วนใหญ่มีการผสมเหล็กระหว่างร้อยละ 3 – 5 โดยน้ำหนัก ภาพตัดของแผนภาพเฟสสมดุลสามธาตุของทองแดง อะลูมิเนียมและเหล็กที่มีส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 2.3 [17]

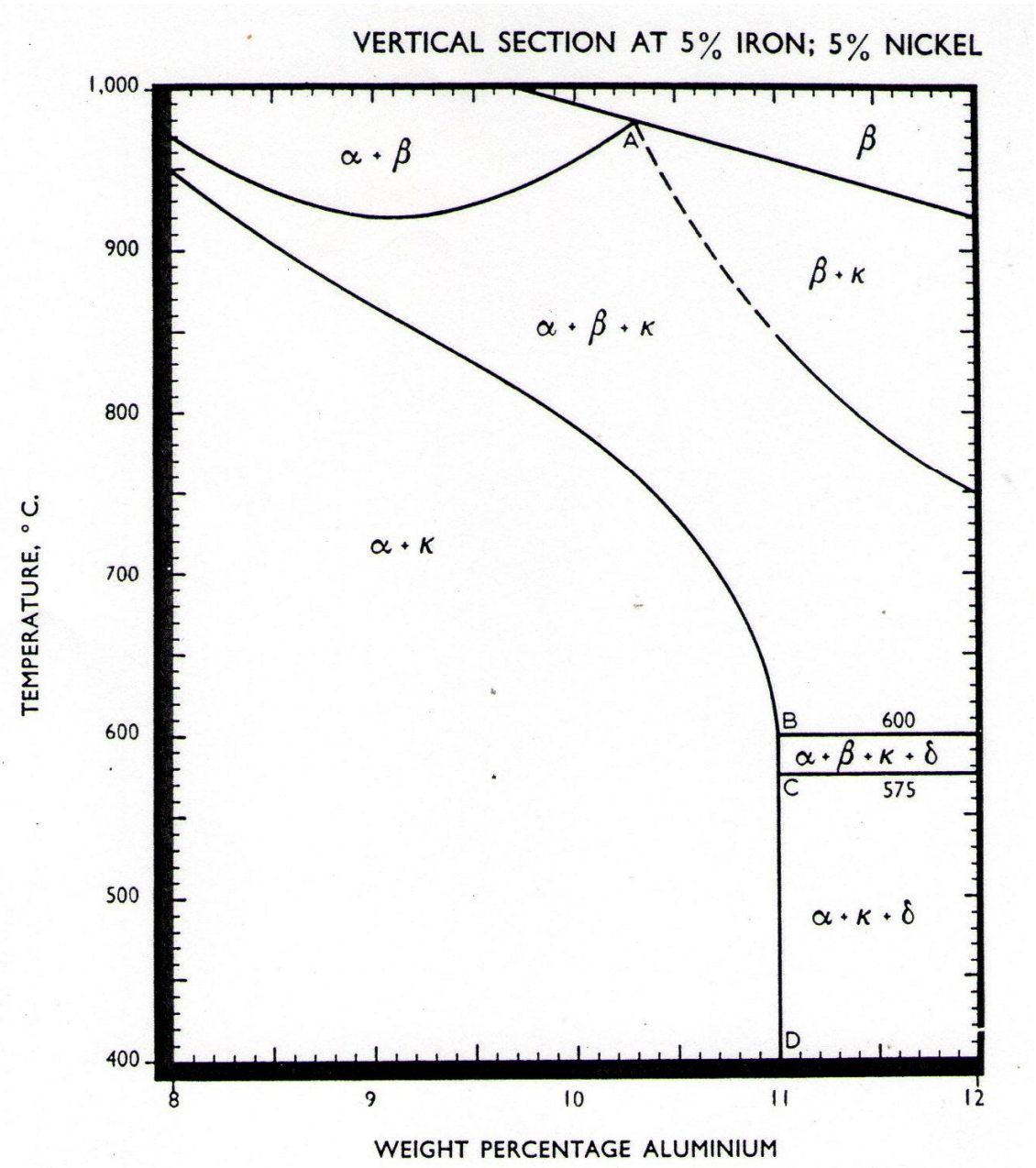
2) นิกเกิล

การผสมนิกเกิลจะไม่ผสมเพียงอย่างเดียวต้องมีการผสมร่วมกับธาตุเหล็กเสมอ แผนภาพเฟสสมดุลระบบธาตุ 4 ธาตุ ของทองแดง อะลูมิเนียม ที่มีปริมาณเหล็กคงที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และนิกเกิลคงที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปรากฏเฟสแคปปะ (Kappa, κ) เป็นเฟสที่เกิดจากอะลูมิเนียม และนิกเกิลรวมตัวกันปรากฏที่อุณหภูมิสูง และมีผลขยายอาณาเขตของเฟสอัลฟา โดยมีเฟสแคปปะกระจายอยู่ทั่วไป ทำให้โลหะบรอนซ์อะลูมิเนียมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นโดยที่ความเหนียวไม่ลดลง และในช่วงที่ปริมาณของอะลูมิเนียมในโลหะผสมสูงเกินกว่าร้อยละ 11 โดยน้ำหนัก เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 575 องศาเซลเซียส ปรากฏเฟสแคปปะไปแทนที่เฟสบีตาส่งผลทำให้บรอนซ์อะลูมิเนียมมีความแข็งแรง และความเหนียวสูง แต่ปริมาณของนิกเกิลและเหล็กอยู่ในขอบเขตแต่ละธาตุไม่เกินร้อยละ 5 – 6 โดยน้ำหนัก แต่ถ้าเกินจะส่งผลทำให้ความเหนียวลดลง จากภาพตัดของแผนภาพเฟสสมดุลระบบ 4 ธาตุ ดังรูปที่ 2.4 [17]



Point	A	B	C	D	E	F
° C.	970	885	770	~ 568	~ 568	~ 568
Al, %	7·6	10·3	~ 14·3	9·5	12·3	15·5

รูปที่ 2.3 แผนภาพเฟสสมดุลของทองแดง-อะลูมิเนียมไม่เกินร้อยละ16 และเหล็กร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก [16]



Point	A	B	C	D
°C.	~ 980	600	575	400
Al, %	~ 10·3	11	11	11

รูปที่ 2.4 แผนภาพเฟสสมดุล 4 ธาตุของทองแดง- อะลูมิเนียมไม่เกินร้อยละ 12 – เหล็กร้อยละ 5- นิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก [16]

3) แมงกานีส

ไม่มีอิทธิพลอย่างชัดเจนทางด้านโครงสร้างจุลภาคของบรอนซ์อะลูมิเนียม เพราะแมงกานีสสามารถละลายให้สารละลายของแข็งได้ปริมาณสูงในเฟสอัลฟา ถึงร้อยละ 14 โดยน้ำหนักปริมาณของแมงกานีสที่สามารถละลายได้ในทองแดง เปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมจะสูงกว่าในอัตราส่วนแมงกานีสร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ต่ออะลูมิเนียมร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก ผลที่สำคัญของแมงกานีสที่มีต่อบรอนซ์อะลูมิเนียม คือแมงกานีสจะทำให้ปฏิกิริยายูเทคตอยด์ เกิดได้ช้ามาก

$$\beta(11.8\%\ \mathrm{Al}) \rightleftharpoons \alpha\ (9.4\%\ \mathrm{Al}) + \gamma_2(15.6\%\ \mathrm{Al})$$

ทำให้บรอนซ์อะลูมิเนียมแม้จะผ่านการหล่อ โดยปล่อยให้เย็นตัวในแบบหล่อทรายได้โครงสร้างเฟสอัลฟากับเฟสบีตาที่อุณหภูมิห้อง เป็นผลให้บรอนซ์อะลูมิเนียมมีความแข็งแรง ความแข็ง และความเหนียวสูง ในทางปฏิบัติมีการผสมแมงกานีสร่วมกับเหล็กและนิกเกิล โดยมีปริมาณรวมกันอยู่ในช่วงร้อยละ 5-8 โดยน้ำหนัก ดังตัวอย่างบรอนซ์อะลูมิเนียมมาตราฐาน ASTM B-148-52 ชั้นคุณภาพ 9D ผสมอะลูมิเนียมร้อยละ 10.0 – 11. 5 โดยน้ำหนัก ผสมเหล็กร้อยละ 3 – 5 โดยน้ำหนัก ผสมแมงกานีส ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก และผสมนิกเกิลร้อยละ 3.5 – 5 โดยน้ำหนัก

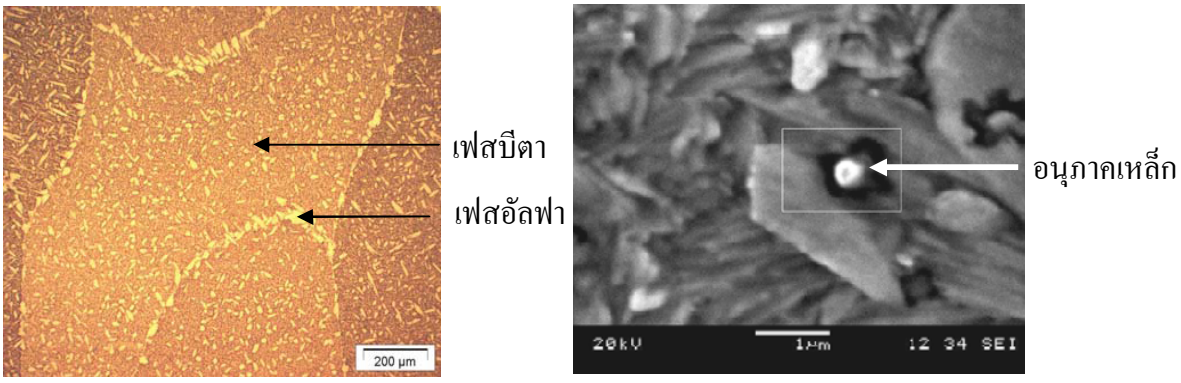
นอกจากธาตุผสมที่สำคัญของบรอนซ์อะลูมิเนียมตามที่กล่าวมาแล้ว ยังมีธาตุผสมอื่นๆ อีกที่ผสมในบรอนซ์อะลูมิเนียม แต่มีผลน้อยมากทางด้านความแข็งแรง ดังเช่น ตะกั่ว ผสมในบรอนซ์อะลูมิเนียมประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการกลึงตัดหรือเจาะ ซิลิคอนมีผลคล้ายคลึงกับอะลูมิเนียมเทียบผลของซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จะเท่ากับอะลูมิเนียมร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ในบรอนซ์อะลูมิเนียม อะลูมิเนียมร้อยละ 6 – 7 โดยน้ำหนัก ผสมซิลิคอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีคุณสมบัติเชิงกลเทียบเท่ากับบรอนซ์อะลูมิเนียม ที่มีอะลูมิเนียมผสมอยู่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก สำหรับฟอสฟอรัส และสังกะสีจัดอยู่ในลักษณะสารมลทิน ถ้ามีปริมาณเกินกว่าปริมาณที่เป็นลักษณะติดมากับวัตถุดิบ จะมีผลทำให้โลหะผสมสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลโดยเฉพาะความเหนียว

จากมาตรฐานของ ASTM และ B.S. รายงานว่า โลหะผสมบรอนซ์อะลูมิเนียมที่ผสมแมงกานีสสูงร้อยละ 11.0-14.0 โดยน้ำหนัก จัดชั้นคุณภาพใหม่เป็นโลหะผสม CMA (Cast Manganese Aluminium Bronze) เป็นโลหะผสมที่มีสมบัติทางด้านหล่อ (Castability) สูง สามารถเชื่อมได้ง่าย มีความต้านแรงดึงสูง และอัตราการยืดตัวสูง [17]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

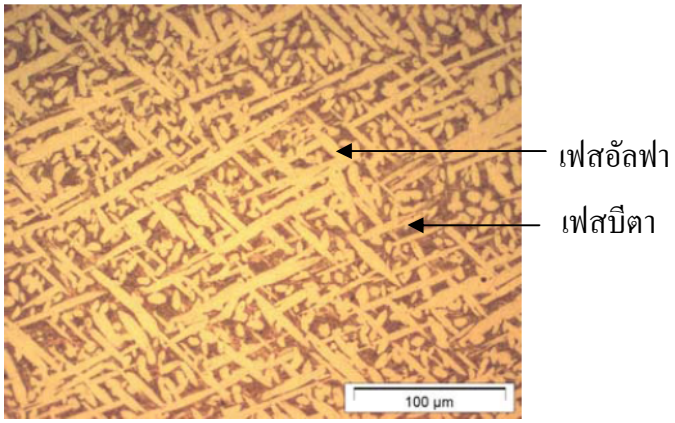
งานวิจัยของ Cenoz [5] พบว่าโครงสร้างจุลภาคของบรอนซ์อะลูมิเนียมส่วนผสม Cu-10Al-2Fe ชิ้นงานที่ทำให้เย็นตัวโดยการจุ่มน้ำจากสภาพที่เป็นของเหลว แสดงดังรูปที่ 2.5 พบว่าเกิด เฟสอัลฟาที่ขอบเกรนของเฟสบีตา และมีอนุภาคของเหล็กเป็นเม็ดกลม แต่ชิ้นงานที่หลอมเหลวแล้วหล่อในแบบหล่อโลหะอุ่นที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.6 ประกอบด้วย เฟสอัลฟา เฟสแกมมาสอง เฟสบีตา และเฟสแกมมาไพร์ม เห็นได้ว่าส่วนผสมของบรอนซ์อะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน ทำให้เย็นตัวในแบบหล่อโลหะที่อุ่นด้วยอุณหภูมิต่างกันได้โครงสร้างแตกต่างกัน [5,6]

จากงานวิจัยนี้พบว่าการให้อัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเฟสอัลฟา การให้อัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วและไม่มีการอุ่นแบบหล่อโลหะ ส่งผลทำให้เกิดโครงสร้างของเฟสอัลฟามีขนาดที่เล็ก เป็นสีขาวกระจายอยู่โดยรอบในเฟสบีตา เนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้การเกิดนิวเคลียสของเฟสอัลฟา ที่ขอบเกรนของเฟสบีตา และรอบอนุภาคที่มีเหล็ก การอุ่นแบบหล่อโลหะที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสได้เฟสอัลฟา มีลักษณะเป็นเข็ม กระจายบนโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟสบีตา เพราะฉะนั้นสภาวะการเย็นตัว และการอุ่นแบบหล่อโลหะมีผลต่อโครงสร้างจุลภาค



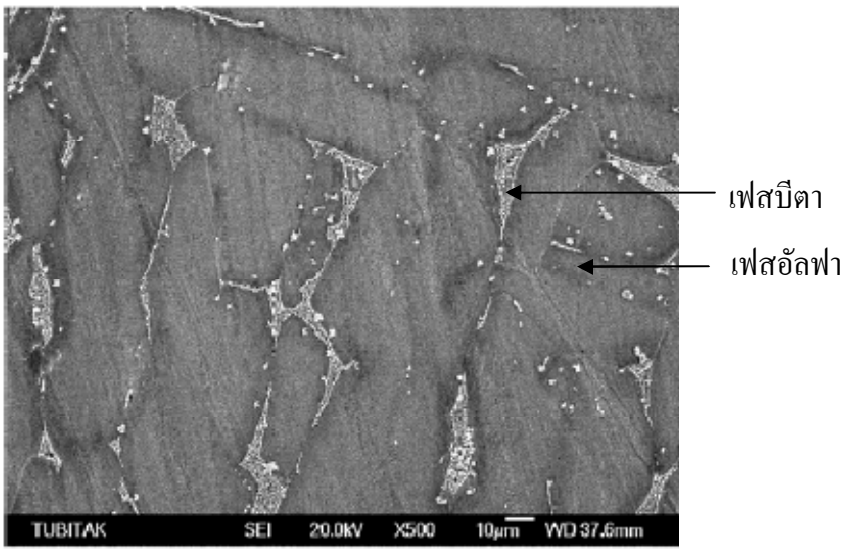
(ก) (ข)

รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-10Al-2Fe ทำให้เย็นตัวโดยการจุ่มน้ำจากสภาพที่เป็นของเหลว [5,6]
(ก) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (ข) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

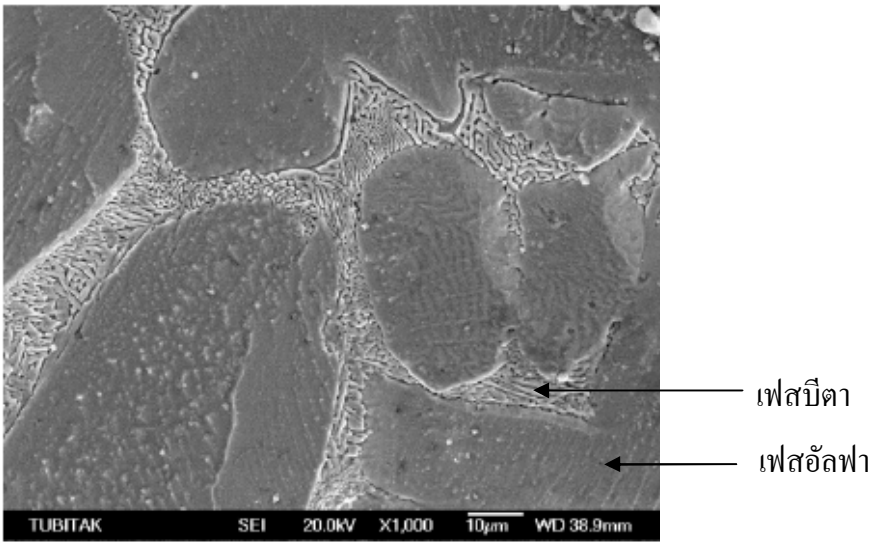


รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-10Al-2Fe อุ่นแบบหล่อโลหะที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส [5,6]

งานวิจัยของ Mustafa [7] พบว่าโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานส่วนผสม Cu-Al-Fe เกรด C95200 (Cu-8.8Al-1.5Fe) และ C95300 (Cu-9.7Al-0.9Fe) หล่อในแบบหล่อโลหะ มีการอุ่นแบบหล่อโลหะที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 2.7 และ 2.8 มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคเป็นเดรนไดรต์ของเฟสบีตา มีเฟสอัลฟาเป็นเฟสพื้น เมื่อปริมาณอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้นขนาดเดรนไดรต์มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น

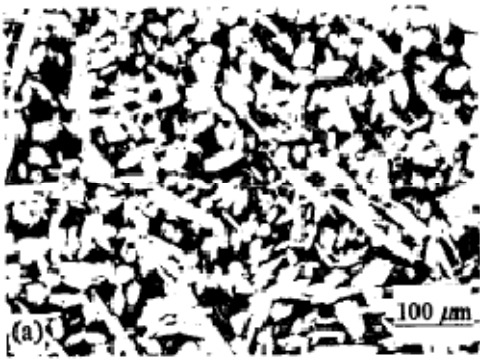


รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อเกรด C95200 [7]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อเกรด C95300 [7]

งานวิจัยของ Li และคณะ [8] พบว่าโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานส่วนผสม Cu-9Al-3Fe-1Ni-1Mn หล่อในแบบหล่อโลหะ แสดงดังรูปที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของงานหล่อมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ของเฟสอัลฟา และเฟสบีตาไพร์ม(β')



รูปที่ 2.9 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-9Al-3Fe-1Ni-1Mn [8]

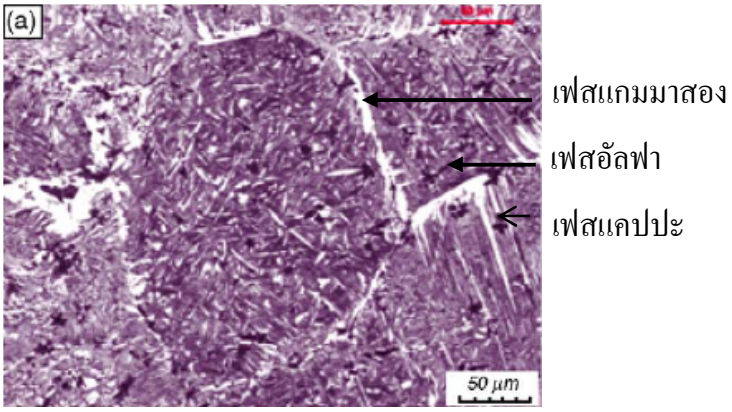
งานวิจัยของ Kaplan [9] ศึกษาวิธีการผลิตที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของบรอนซ์อะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมของ Cu-9Al-4Fe-4Ni โดยใช้แบบหล่อทราย และแบบหล่อโลหะที่อุ่น แบบหล่อที่อุณหภูมิ 450-500 องศาเซลเซียส และนำชิ้นงานไปทำกรรมวิธีทางความร้อน โดยอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปจุ่มน้ำและอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ผลของสมบัติทางกลแสดงดังตารางที่ 2.4 เห็นได้ว่าความ

แข็งของชิ้นงานที่ผ่านการทำกรรมวิธีทางความร้อนได้ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับความแข็งของชิ้นงานที่ได้จากแบบหล่อทราย และแบบหล่อโลหะ ชิ้นงานจากแบบหล่อโลหะมีค่าความแข็งที่มากกว่าชิ้นงานที่หล่อจากแบบหล่อทราย เพราะฉะนั้นวิธีการผลิตที่แตกต่างกันและการทำกรรมวิธีทางความร้อน ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็ง

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกลของบรอนซ์อะลูมิเนียมส่วนผสม Cu-9Al-4Fe-4Ni

ชนิดแบบหล่อ	กระบวนการผลิต	ความต้านแรงดึงสูงสุด (เมกะพาสคัล)	การยืดตัว (ร้อยละ)	ความแข็ง (บริเนล)
แบบหล่อทราย	สภาพงานหล่อ	600-610	8-12	178-185
แบบหล่อทราย	อบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปจุ่มน้ำ และอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	670-680	8-12	200-205
แบบหล่อโลหะ	สภาพงานหล่อ	600-670	8-12	178-200
แบบหล่อโลหะ	อบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปจุ่มน้ำ และอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	740-760	8-12	210-225

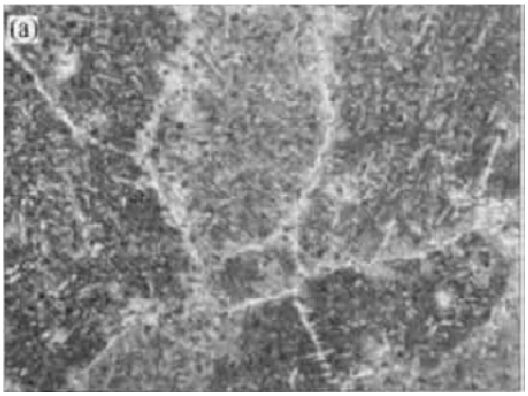
งานวิจัยของ Li และคณะ [10] พบว่าโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานส่วนผสม Cu-16Al-4.5Fe-0.6Ni-1.5Mn หล่อในแบบหล่อโลหะ แสดงดังรูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคงานหล่อมีรูปร่างเป็นเกรนกลมขนาดใหญ่ ภายในเกรนมีเฟสขนาดเล็กรูปร่างเป็นเส้นยาวรี และมีจุดสีดำกระจายอยู่โดยทั่ว จากการทดลองได้กล่าวไว้ว่าบริเวณเฟสขอบเกรน มีลักษณะเป็นแท่งปลายแหลม (Widmanstattern) คือเฟสแกมมาสอง บริเวณพื้นคือเฟสอัลฟา และอนุภาคสีดำคือเฟสแคปปะ



รูปที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-16Al-4.5Fe-0.6Ni-1.5Mn [10]

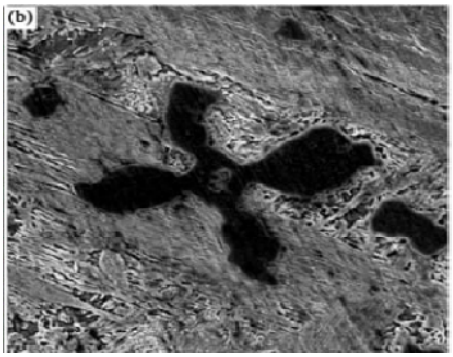
งานวิจัยของ Li และคณะ [11] ศึกษาการเตรียมบรอนซ์อะลูมิเนียม สมบัติทางกลและพฤติกรรมการสึกหรอของ Cu-14Al-X สำหรับทำดาย วิธีการหลอมเป็นการหลอมทีละเบ้า ส่วนผสมที่ใช้ได้แก่ (75-80)Cu-(13-14)Al-(2.0-4.5)Fe-(1.0-1.5)Mn-(0.4-0.6)Ni-(1.0-2.6)อื่นๆ เริ่มจากการใส่วัตถุดิบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำได้แก่ อะลูมิเนียมและใส่วัตถุดิบที่มีจุดหลอมเหลวสูงได้แก่ ทองแดงลงในเตาเป็นอันดับแรก ต่อมาจึงเติมธาตุที่ใช้ในปริมาณน้อยได้แก่ โคบอลต์ นิกเกิล เหล็ก และแมงกานีส ไว้ตรงกลางระหว่างทองแดงกับอะลูมิเนียม (เผื่ออะลูมิเนียมไว้ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักสำหรับการสูญเสียจาก Pre-deoxygenation) หลังจากใส่วัตถุดิบเสร็จ ใช้กำลังไฟต่ำประมาณ 5-6 นาที เพื่อไล่น้ำมันและแก๊ส (ใช้เตาอะไรไม่ได้บอก) จากนั้นใช้กำลังไฟสูงให้โลหะหลอมเข้าด้วยกันอย่างรวดเร็วเท่าที่จะทำได้ หลังจากโลหะหลอมเหลวสมบูรณ์แล้ว ใส่ถ่านเพื่อปกคลุมผิวน้ำโลหะหนาประมาณ 20-30 มิลลิเมตร แล้วเป่าแก๊สด้วยไนโตรเจนหรืออาร์กอนเสร็จแล้ว เติมอะลูมิเนียมอีกร้อยละ 5 เพื่อทำกระบวนการ Pre-deoxygenation อุณหภูมิหลอมใช้ 1,200-1,260 องศาเซลเซียส สุดท้ายทำกระบวนการ De oxygenation โดยการเติม C_2Cl_6 และ C_2Cl_4 เพื่อทำให้น้ำโลหะบริสุทธิ์ขึ้น ก่อนเทน้ำโลหะ ได้ตรวจสอบปริมาณแก๊ส ก่อนเทน้ำโลหะในแบบทราย อุณหภูมิเทใช้ 1,180-1,240 องศาเซลเซียส นำชิ้นงานหล่อ (CA) ไปวัดความแข็ง ทำกรรมวิธีทางความร้อน โดยการอบละลายเฟสที่ 920 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จุ่มในน้ำมันให้เย็นตัวลง (QU) หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 450, 580 และ 640 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ให้สัญญาลักษณ์แทนด้วย HT1, HT2 และ HT3 ตามลำดับ เฟสที่เกิดแสดงในรูปที่ 2.11 ผลการทดลองพบว่าการทำกรรมวิธีทางความร้อน สามารถเพิ่มสมบัติทางกลให้ดีขึ้นโดยการอบละลายเฟสที่ 920 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง และลักษณะโครงสร้างจุลภาคงานหล่อมีรูปร่างเป็น

เกรนกลมขนาดใหญ่ บริเวณขอบเกรนจะมีสีขาว ภายในเกรนมีเฟสขนาดเล็กกระจายอยู่รูปร่างเส้นยาว และมีจุดสีดำขนาดเล็กกระจายอยู่โดยทั่ว การทดลองได้กล่าวว่าบริเวณเฟสขอบเกรนคือเฟสแกมมาสอง บริเวณพื้นคือเฟสอัลฟา และจุดสีดำคือเฟสแคปปะ



รูปที่ 2.11 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม
Cu-(13-16)Al-(2.0-4.5)Fe-(0.4-0.6)Ni-(1.0-1.5)Mn [11]

งานวิจัยของ Daroonparvar และคณะ [13] พบว่าโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-11.54Al-4.47Fe-4.60Ni (มาตรฐาน ASTM B 148) มีเกรนรูปร่างกลม เฟสรูปร่างดาวสี่แฉก และเฟสรูปร่างยาวรีกระจายอยู่โดยทั่ว ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จากการทดลองได้กล่าวไว้ว่า เฟสรูปร่างดาวสี่แฉก คือเฟสแคปปะที่มีธาตุหลักคือ นิกเกิล รวมตัวกับเหล็กและอะลูมิเนียม โดยมีเฟสพื้นเป็นเฟสอัลฟา



รูปที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-11.54Al-4.47Fe-4.60Ni [13]