

อิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของบรอนซ์อะลูมิเนียม

นางสาวสุพิชชา มาสมพงษ์ วศ.บ. (วิศวกรรมพอลิเมอร์)

โครงการการศึกษาวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2555

คณะกรรมการสอบโครงการการศึกษาวิจัย

..... ประธานกรรมการสอบโครงการการศึกษาวิจัย
(ผศ. ดร.นุชธนา พูลทอง)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการการศึกษาวิจัย
(ผศ. ดร.สิริพร โรจนนันต์)

..... กรรมการ
(ผศ.จตุลศิริ ศรีงามผ่อง)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อโครงการการศึกษาวิจัย	อิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของบรอนซ์อะลูมิเนียม
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นางสาวสุพิชชา มาสมพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร.ศิริพร โรจนนันต์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
สายวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2555

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาอิทธิพลของการทำกรรมวิธีทางความร้อนที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของบรอนซ์อะลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อ และผ่านการชุบขึ้นรูปร้อน วิธีการทดลองเริ่มจากการหลอมธาตุบริสุทธิ์แล้วหล่อเป็นอินกอต วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี หลังจากนั้นนำชิ้นงานส่วนหนึ่งไปชุบขึ้นรูปร้อนปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ กรรมวิธีทางความร้อนทำได้โดยการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวในสภาวะต่างกัน ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและวัดความแข็งของชิ้นงานทั้งหมด ผลการทดลองพบว่าชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe มีโครงสร้างเฟสบีตาไพร์ม และเฟสแกมมาสอง ความแข็งเฉลี่ยมีค่า 487 วิกเกอร์ หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ชิ้นงานที่เย็นตัวในน้ำให้ความแข็งเฉลี่ยสูงสุดมีค่า 491 วิกเกอร์ บรอนซ์อะลูมิเนียมส่วนผสมนี้ไม่สามารถชุบร้อนได้ สำหรับชิ้นงานหล่อส่วนผสม $\text{Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn}$ มีโครงสร้างเฟสบีตาไพร์ม และเฟสแลปะ ความแข็งเฉลี่ยมีค่า 409 วิกเกอร์ หลังชุบขึ้นรูปร้อนมีค่าความแข็งเฉลี่ย 459 วิกเกอร์ หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนพบว่าชิ้นงานหล่อและชิ้นงานชุบขึ้นรูปร้อนที่ทำให้เย็นตัวในน้ำให้ความแข็งเฉลี่ยสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันที่ 413 และ 412 วิกเกอร์ ตามลำดับ สรุปได้ว่าการทำกรรมวิธีทางความร้อนโดยการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นตัวในน้ำให้ความแข็งมีค่าใกล้เคียงกับงานหล่อ การชุบขึ้นรูปร้อนให้ค่าความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: กรรมวิธีทางความร้อน/โครงสร้างจุลภาค/ความแข็ง/บรอนซ์อะลูมิเนียม

Research Study Title	The Effect of Heat Treatment on Microstructures and Hardness of Aluminium Bronzes
Research Study Credits	6
Candidate	Miss Supitcha Masompong
Research Study Advisor	Asst. Prof. Dr. Siriporn Rojananan
Program	Master of Engineering
Field of Study	Materials Technology
Department	Materials Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2555

Abstract

The objective of this work is to study the effect of heat treatment on the microstructures and hardness of as-cast and hot forged aluminum bronzes. In the experiment, high purity of elements were melted and cast to ingots. Chemical analysis of ingots was checked. Some ingot specimens were hot forged and cooled in the air. The heat treatment process was carried on by the solution treatment at the temperature of 950 °C for 1 hour, cooled to room temperature in the different media. Microstructures and hardness were investigated. The results showed that the microstructures of the as-cast Cu-15.2Al-2.3Fe sample consisted of beta prime and gamma 2 with the averaged hardness of 487 HV. After heat treatment process, the water quenched samples exhibited the maximum averaged hardness of 491 HV. This alloy was unable to hot forge. The microstructure of the as-cast Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn revealed beta prime and kappa phase with the averaged hardness of 409 HV. The averaged hardness of the hot forged samples revealed 459 HV. The water quenching after solution treatment of cast and forged samples showed the maximum averaged hardness value of 413 and 412 HV, respectively. It could be concluded that the water quenching after solution heat treatment could be slightly enhanced the hardness.

Keywords: Aluminum Bronze/Hardness/Heat Treatment/Microstructures

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.สิริพร โรจนนันต์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย และให้ความรู้ทางวิชาการ ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.นุชธนา พูลทอง และ ผศ. จุลศิริ ศรีงามผ่อง ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ โรงงาน พี ซี เอส ผลิตภัณฑ์หล่อจ้ำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องวิเคราะห์ ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิคมิชันสเปกโตรสโคปี ขอขอบพระคุณ ภาควิชากรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือ ในการทบทวนรูปรีออน ขอขอบคุณ คุณเกศินี ศรีรักษาสินธุ์ ที่ให้คำปรึกษาในการใช้ซอฟต์แวร์เพื่ออ่านผลรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และขอขอบคุณ รุ่งพี รุ่งน้อม และเพื่อนๆ โดยเฉพาะคุณอัญญารัตน์ ประสันใจ คุณนพนันท์ ทองนิล คุณอาทิตย์ ชูเดช และคุณปิยนันท์ พันบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการเตรียมเครื่องมือ และอุปกรณ์ในระหว่างทำการวิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ค

กิตติกรรมประกาศ ง

สารบัญ จ

รายการตาราง ช

รายการรูปประกอบ ฎ

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับทองแดงบริสุทธิ์และโลหะผสมทองแดง	4
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับบรอนซ์อะลูมิเนียม	5
2.2.1 โลหะวิทยาพื้นฐานของบรอนซ์อะลูมิเนียม	6
2.2.2 ความสามารถในการทำกรรมวิธีทางความร้อน	9
2.2.3 วัสดุผสมที่มีบทบาทต่อบรอนซ์อะลูมิเนียม	11
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
3. การดำเนินงานวิจัย	22
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	22
3.2 วัสดุดิบ	23
3.3 การเตรียมอินกอตและตัดชิ้นงาน	25

	หน้า
3.4 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี	26
3.5 การชุบขึ้นรูปร้อน	27
3.6 การทำกรรมวิธีทางความร้อน	30
3.7 การทำตัวเรือนจับชิ้นงาน	31
3.8 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค	32
3.9 การทดสอบความแข็ง	34
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	35
4.1 ลักษณะทางกายภาพชิ้นงาน	35
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหล่อ	35
4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังชุบขึ้นรูปร้อน	36
4.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี	37
4.3 ชิ้นงานส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe	38
4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อและค่าความแข็ง	38
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนและค่าความแข็ง	43
4.3.3 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและค่าความแข็ง	44
4.4 ชิ้นงานส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn	63
4.4.1 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อและค่าความแข็ง	63
4.4.2 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	68
4.4.3 ความแข็งของชิ้นงานหล่อหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	79
4.4.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการชุบขึ้นรูปร้อน	80
4.4.5 โครงสร้างจุลภาคของงานชุบขึ้นรูปร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	83
4.4.6 ความแข็งของชิ้นงานชุบขึ้นรูปร้อนหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	91
4.4.7 การเปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงาน	93
5. สรุปผลการทดลอง	94

	หน้า
6. ข้อเสนอแนะ	96
เอกสารอ้างอิง	97
ภาคผนวก ก .สปรคตรัมวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS	100
ภาคผนวก ข. ตาราง	120
ภาคผนวก ค. JCDPS Card	125
ประวัติผู้วิจัย	128

รายการตาราง

ตาราง	หน้า	
2.1	ส่วนผสมทางเคมีของบรอนซ์อะลูมิเนียมที่ใช้ในแบบหล่อทราย	5
2.2	สมบัติทางกลของบรอนซ์อะลูมิเนียมที่ใช้ในแบบหล่อทราย	6
2.3	สมบัติทางกลของบรอนซ์อะลูมิเนียมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่แตกต่างกัน	11
2.4	สมบัติทางกลบรอนซ์อะลูมิเนียมส่วนผสม Cu-9Al-4Ni-4Fe	19
3.1	น้ำหนักวัดดูบของส่วนผสมที่ใช้ในการหล่ออินกอตขนาด 200 กรัม	24
4.1	ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานหล่อ	37
4.2	ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe	40
4.3	ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว	46
4.4	ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในน้ำ	49
4.5	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Mapping บนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในน้ำ	51
4.6	ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในอากาศ	53
4.7	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Mapping บนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในอากาศ	55
4.8	ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตา บริเวณที่ 1	57
4.9	ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตา บริเวณที่ 2	58
4.10	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Mapping บนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตา	60
4.11	ค่าความแข็งของชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	61
4.12	ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn	65

ตาราง (ต่อ) หน้า

4.13 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว	70
4.14 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในน้ำ	72
4.15 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในอากาศ	75
4.16 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในเตา	78
4.17 ความแข็งของชิ้นงานส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	79
4.18 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn	82
4.19 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว	84
4.20 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในน้ำ	86
4.21 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวในอากาศ	88
4.22 ผลการวิเคราะห์ธาตุบนชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังอบที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เย็นตัวเตา	91
4.23 ความแข็งของชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	92
4.24 ความแข็งของชิ้นงานหล่อและชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนก่อนและหลังผ่านกรรมวิธี ทางความร้อน	93
ข.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของอินกอตส่วนผสมเริ่มต้น Cu-14Al-3Fe	121
ข.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของอินกอตส่วนผสมเริ่มต้น Cu-14Al-3Fe -5Ni -1Mn	121
ข.3 ค่าความแข็งของชิ้นงานหล่อใช้น้ำหนักกด 200 กรัม	122
ข.4 ค่าความแข็งของชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนใช้น้ำหนักกด 200 กรัม	122

ตาราง (ต่อ) หน้า

ข.5 ค่าความแข็งของชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนใช้น้ำหนักกด 200 กรัม	123
ข.6 ค่าความแข็งของชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนใช้น้ำหนักกด 200 กรัม	123
ข.7 ค่าความแข็งของชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนใช้น้ำหนักกด 200 กรัม	124

รายการรูปประกอบ

รูป หน้า

2.1	แผนภาพเฟสสมดุลของทองแดงและอะลูมิเนียม	7
2.2	แผนภาพเฟสสมดุลของทองแดงและอะลูมิเนียมไม่เกินร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก	8
2.3	แผนภาพเฟสสมดุลของทองแดง-อะลูมิเนียมไม่เกินร้อยละ 16 และเหล็กร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก	13
2.4	แผนภาพสมดุล 4 ธาตุของทองแดง- อะลูมิเนียมไม่เกินร้อยละ 12 - เหล็กร้อยละ 5- นิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	14
2.5	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-10Al-2Fe ทำให้เย็นตัว โดยการจุ่มน้ำจากสภาพที่เป็นของเหลว	16
2.6	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-10Al-2Fe อุ่นแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส	17
2.7	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อเกรด C95200	17
2.8	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อเกรด C95300	18
2.9	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-9Al-3Fe-1Ni-1Mn	18
2.10	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-16Al-4.5Fe-0.6Ni-1.5Mn	20
2.11	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-(13-14)Al-(2.0-4.5)Fe-(0.4-0.6)Ni-(1.0-1.5)Mn	21
2.12	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-11.5Al-4.47Fe-4.60Ni	21
3.1	ผังการไหลของงาน	22
3.2	วัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมบรอนซ์อะลูมิเนียม	24
3.3	เครื่องตัดชิ้นงานขนาดเล็ก	25
3.4	เครื่องทดสอบออฟติกอลิมิชันสเปคโตรมิเตอร์	26
3.5	การวางชิ้นงานในการทดสอบ	27
3.6	ลักษณะภายนอกของชิ้นงานหลังวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี	27
3.7	เครื่องทุบขึ้นรูปร้อน	28
3.8	ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า	29
3.9	ภาพจำลองความสูงของชิ้นงานก่อนและหลังทุบขึ้นรูปร้อน	29
3.10	เตาอบไฟฟ้า	29

รูป (ต่อ) หน้า

3.11	วัฏจักรการให้ความร้อนและการเย็นตัวในตัวอย่างต่างกัน	30
3.12	การทำชิ้นงานให้เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว	31
3.13	การทำชิ้นงานให้เย็นตัวในน้ำ	31
3.14	เครื่องทำตัวเรือนด้วยเรซินชนิดร้อน	31
3.15	ชิ้นงานหลังทำตัวเรือน	32
3.16	กล้องจุลทรรศน์แสง	33
3.17	ชุดกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดและชุดวิเคราะห์ธาตุ	33
3.18	เครื่องทดสอบความแข็ง	34
4.1	ลักษณะภายนอกของชิ้นงานหล่อ	35
4.2	ชิ้นงานส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe	36
4.3	ชิ้นงานส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn	36
4.4	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe	38
4.5	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด	40
4.6	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu- 15.2Al -2.3 Fe	43
4.7	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว	44
4.8	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด	45
4.9	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในน้ำ	47
4.10	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในน้ำ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด	48
4.11	โครงสร้างจุลภาคบริเวณวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Mapping ชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในน้ำถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด	49
4.12	การกระจายตัวของธาตุในชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในน้ำ	50
4.13	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในอากาศ	51
4.14	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในอากาศ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด	52

รูป (ต่อ) หน้า	1
4.15 โครงสร้างจุลภาคบริเวณวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Mapping ชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในอากาศถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาง	54
4.16 การกระจายตัวของธาตุในชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในอากาศ	54
4.17 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตา	55
4.18 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตา ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวางบริเวณที่ 1	56
4.19 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตา ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวางบริเวณที่ 2	57
4.20 โครงสร้างจุลภาคบริเวณวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Mapping ชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตาถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาง	58
4.21 การกระจายตัวของธาตุในชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตา	59
4.22 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn	63
4.23 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาง	64
4.24 แผนภาพสมดุล 4 ธาตุของทองแดง- อะลูมิเนียมไม่เกินร้อยละ 12 - เหล็กร้อยละ 5- นิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	67
4.25 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn	67
4.26 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว	68
4.27 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในไนโตรเจนเหลวถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาง	69
4.28 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในน้ำ	71
4.29 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในน้ำถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาง	72
4.30 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในอากาศ	73
4.31 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในอากาศถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาง	74

รูป (ต่อ) หน้า

4.32	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในเตา	76
4.33	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในเตาถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	77
4.34	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn หลังชุบขึ้นรูปร้อน	80
4.35	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานชุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	81
4.36	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานชุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว	83
4.37	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานชุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในไนโตรเจนเหลวถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	84
4.38	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานชุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในน้ำ	85
4.39	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานชุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในน้ำถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	86
4.40	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานชุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในอากาศ	87
4.41	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานชุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในอากาศถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	88
4.42	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานชุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในเตา	89
4.43	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานชุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในเตาถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	90
ก.1	สเปกตรัมชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe	101
ก.2	สเปกตรัมชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว	102
ก.3	สเปกตรัมชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในน้ำ	103
ก.4	สเปกตรัมชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในอากาศ	104
ก.5	สเปกตรัมชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในอากาศ	105

รูป (ต่อ) หน้า

ก.6	สเปกตรัมบริเวณที่ 1 ชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตา	106
ก.7	สเปกตรัมบริเวณที่ 2 ชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.2Al-2.3Fe เย็นตัวในเตา	107
ก.8	สเปกตรัมชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn	108
ก.9	สเปกตรัมชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn	109
ก.10	สเปกตรัมชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว	110
ก.11	สเปกตรัมชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในน้ำ	111
ก.12	สเปกตรัมชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในอากาศ	112
ก.13	สเปกตรัมชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในเตา	113
ก.14	สเปกตรัมชิ้นงานหล่อส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในเตา	114
ก.15	สเปกตรัมชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn	115
ก.16	สเปกตรัมชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในไนโตรเจนเหลว	116
ก.17	สเปกตรัมชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในน้ำ	117
ก.18	สเปกตรัมชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในอากาศ	118
ก.19	สเปกตรัมชิ้นงานทุบขึ้นรูปร้อนส่วนผสม Cu-15.0Al-4.3Fe-4.2Ni-0.1Mn เย็นตัวในเตา	119