สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ซ
รายการรูปประกอบ	ญ

บทที่

1. บทนำ	**1**
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของการดำเนินการวิจัย	6
1.4 กระบวนการศึกษาวิจัย	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**8**
2.1 อะลูมิเนียม	8
2.2 อะลูมิเนียมและโลหะผสมของอะลูมิเนียม	9
2.3 การกำกับภาวะประสงค์สำหรับโลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม	11
2.4 การกำหนดสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมผสม	13
2.4.1 คุณสมบัติของอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส หมายเลข 3003	15
2.4.2 แผนภาพสมดุลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมงกานีส-ซิลิกอน	16
2.5 กระบวนการแข็งตัวและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อหมายเลข 3003	17
2.6 กระบวนการโฮโมจีไนซ์	19
2.6.1 กระบวนการโฮโมจีไนซ์ของอะลูมิมิเนียมผสมหมายเลข 3003	21
2.6.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในช่วงระยะการให้ความร้อนเริ่มต้น (Heating)	21

หน้า

2.6.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในช่วงระยะเวลาของการอบแช่ (Soaking) 24
2.7 การเกิดผลึกใหม่ 26
2.7.1 หลักการแนวคิดพื้นฐานของการเกิดผลึกใหม่ในโลหะและโลหะผสม 26
2.7.2 กลไกการเกิดผลึกใหม่จาก Particle Stimulated Nucleation (PSN) 28
2.7.3 กลไกยับยั้งหรือขัดขวางการเกิดผลึกใหม่จาก Pinning effect หรือ Zener drag 29
2.8 การขยายตัวของเกรน (Grain growth) 31
2.9 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion process) 32
2.9.1 ส่วนประกอบของเครื่องรีดอัดอะลูมิเนียม 32
2.10 ปัญหาผิวเปลือกส้มหลังการแปรรูปเย็น 33

3. การดำเนินงานวิจัย 35
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ใช้ในการทดลอง 35
3.2 การอบโฮโมจีไนซ์แท่งอะลูมิเนียมบิลเลท 35
3.3 รูปแบบการอบโฮโมจีไนซ์ 37
3.4 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อน (Hot Extrusion) 41
3.5 การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ 41
3.5.1 ชิ้นงานตัวอย่างจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท 42
3.5.2 ชิ้นงานตัวอย่างจากท่อหลังกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อน 43

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง 46
4.1 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท 46
4.1.1 ขนาดเกรนของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท 46
4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการ อบโฮโมจีไนซ์ (As cast billet) 49
4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 52
4.1.4 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 56

หน้า

4.1.5 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 61
4.1.6 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 65
4.1.7 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 69
4.1.8 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 72
4.1.9 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศ 76
4.2 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานท่อหลังกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป 79
4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานท่อหลังกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป 81
4.4 ผลทดสอบการเกิดปัญหาผิวส้ม (Orange peel surface) 86
4.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) 90

5. สรุปผลการทดลอง **94**
5.1 สรุปผลการทดลอง 94
5.2 ข้อเสนอแนะ 96

เอกสารอ้างอิง **97**

ภาคผนวก **100**
ก แผนภาพความเค้นดึง-อัตรายืดตัวของชิ้นงานท่อจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกัน 101
ข กราฟความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของชิ้นงานท่อก่อนและหลังกระบวนการดึงขึ้นรูปเย็น 105

ประวัติผู้วิจัย **114**

รายการตาราง

ตาราง **หน้า**

2.1 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น และอะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม 13

2.2 ส่วนผสมเคมีของอะลูมิเนียม-แมงกานีสหมายเลข 3003 ตามมาตรฐานASTM B221M-02 15

2.3 คุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของอะลูมิเนียมผสมแมงกานีสหมายเลข 3003 15

2.4 ค่าสมบัติทางกลโดยทั่วไปของอะลูมิเนียมผสมแมงกานีสหมายเลข 3003 15

2.5 ลักษณะทางกายภาพของเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมงกานีส-ซิลิกอน 16

3.1 ส่วนผสมทางเคมีของแท่งอะลูมิเนียมที่หลอมและหล่อขึ้นเองภายในบริษัทฯ 35

3.2 ส่วนผสมทางเคมีของแท่งอะลูมิเนียมที่นำเข้าจากต่างประเทศ 35

3.3 การกำหนดรูปแบบการอบโฮโมจีไนซ์ของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท 37

3.4 พารามิเตอร์ในการอัดรีดขึ้นรูป 41

4.1 ขนาดเกรนโดยเฉลี่ยโดยการวิธีวัดแบบ Circular intercept ตามมาตรฐาน ASTM no. E112-96 48

4.2 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS ของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ (As cast billet) 51

4.3 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS ของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 55

4.4 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS ของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 59

4.5 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS ของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 63

4.6 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS ของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 67

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.7 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS ของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	71
4.8 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS ของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	75
4.9 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS ของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศ	77
4.10 เปรียบเทียบลักษณะของขนาดเกรนที่ได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างท่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อน	84
4.11 ผลการตรวจวัดค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ย (Ra) ของชิ้นงานท่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกันและนำไปดึงขึ้นรูปเย็น	89
4.12 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM no. B557M ของชิ้นงานท่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกัน	92

รายการรูปประกอบ

รูป **หน้า**

1.1 ตัวอย่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด 3003 ที่ใช้ทำเป็นชิ้นส่วน ของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนในรถยนต์ยนต์ 2

1.2 แผนภาพกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อนผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมหน้าตัดต่างๆ 2

1.3 กระบวนการทางความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการอบโฮโมจีไนซ์และการอัดรีดขึ้นรูป 3

1.4 แสดงรูปชิ้นงานของลูกค้าที่ผลิตจากท่ออะลูมิเนียมที่ส่งมอบมาจากผู้ผลิตอื่น 5

1.5 แสดงรูปชิ้นงานของลูกค้าที่ผลิตจากท่ออะลูมิเนียมที่ส่งมอบจากบริษัทฯ ที่ผู้เขียนปฏิบัติงานอยู่ 5

2.1 กระบวนการสกัดสารประกอบอะลูมิน่าโดยสังเขป 9

2.2 การสกัดโลหะอะลูมิเนียมด้วยการแยกธาตุด้วยไฟฟ้า 9

2.3 การแบ่งกลุ่มของโลหะอะลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม 10

2.4 ภาพตัวอย่างของโลหะอะลูมิเนียมขึ้นนรูปทางกล (wrought aluminum) 10

2.5 ภาพตัวอย่างของโลหะอะลูมิเนียมกลุ่มงานหล่อ (cast aluminum) 11

2.6 แผนภาพสมดุลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมงกานีส-ซิลิกอน 16

2.7 กลไกการแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียม 17

2.8 โครงสร้างทางจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อหมายเลข 3003 18

2.9 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส เกรด 3003 20

2.10 ฟังก์ชันการกระจายตัวของธาตุที่ตกตะกอนในโลหะผสม 20

2.11 ผลการวัดค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของอะลูมิเนียมผสม หมายเลข 3003 ระหว่างการอบโฮโมจีไนซ์ 22

2.12 ภาพถ่าย TEM การกระจายตัวของอนุภาคในอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 3003 23

2.13 ผลการวัดค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 3003 ในช่วงของการอบแช่ 24

2.14 พื้นที่การกระจายตัวและความหนาแน่นของอนุภาคที่ตกตะกอนระหว่าง การอบแช่ที่อุณหภูมิ 600^{o}C 25

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป **หน้า**

2.15 ภาพถ่าย TEM การตกตะกอนของอนุภาคสารประกอบในอะลูมิเนียมผสม หมายเลข 3003 ที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน 26

2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้อบอ่อนกับเปอร์เซ็นต์ของการตกผลึกใหม่ 27

2.17 แสดงการสะสมพลังงานตรงบริเวณส่วนที่เสียรูปร่างของโลหะพื้นกับส่วนของอนุภาคของสารประกอบ 28

2.18 ภาพถ่าย TEM แสดงให้เห็นการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กตามบริเวณขอบเกรน 29

2.19 ภาพถ่าย TEM การเสียรูปแบบถาวรตรงบริเวณก่อนทางออกแม่พิมพ์ของการอัดรีดแท่งอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 3003 ที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน 30

2.20 ผลของอุณหภูมิต่อขนาดเกรนที่ตกผลึกใหม่ 31

2.21 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องรีดอัดอะลูมิเนียม 33

2.22 ตัวอย่างปัญหาผิวเปลือกส้มที่ปรากฏขึ้นตรงบริเวณผิวดัดโค้งของชิ้นงาน 33

3.1 แสดงสายวัดอุณหภูมิชนิด K Type และสลักอะลูมิเนียม 36

3.2 แสดงการตอกสายวัดอุณหภูมิที่แท่งอะลูมิเนียมบิลเลท 36

3.3 แสดงชุดบันทึกค่าอุณหภูมิของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท 36

3.4 แสดงเตาอบโฮโมจีไนซ์ที่ใช้ในการอบแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท 37

3.5 กราฟบันทึกผลการอบโฮโมจีไนซ์ Billet no.2 ด้วยรูปแบบการอบ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 38

3.6 กราฟบันทึกผลการอบโฮโมจีไนซ์ Billet no.3 ด้วยรูปแบบการอบ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 38

3.7 กราฟบันทึกผลการอบโฮโมจีไนซ์ Billet no. 4 ด้วยรูปแบบการอบ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 39

3.8 กราฟบันทึกผลการอบโฮโมจีไนซ์ Billet no.5 ด้วยรูปแบบการอบที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง 39

3.9 กราฟบันทึกผลการอบโฮโมจีไนซ์ Billet no.6 ด้วยรูปแบบการอบ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 40

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป **หน้า**

3.10 กราฟบันทึกผลการอบโฮโมจีไนซ์ Billet no.7 ด้วยรูปแบบการอบที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง 40

3.11 เครื่องอัดรีดขึ้นรูปร้อนยี่ห้อ UBE ขนาด 1,650 ตัน (Hot extrusion machine) 41

3.12 แผ่นตัวอย่างจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท 42

3.13 การตัดชิ้นงานตัวอย่างจากแผ่นตัวอย่างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท 42

3.14 การจัดเตรียมชิ้นงานตัวอย่างจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทเพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค 43

3.15 การตัดตัวอย่างชิ้นงานทดสอบจากท่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อน 44

3.16 การจัดเตรียมชิ้นงานตัวอย่างจากชิ้นงานท่อสำหรับตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างทางจุลภาค 44

3.17 การจัดเตรียมชิ้นงานตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM no. B557M 45

3.18 เครื่องทดสอบแรงดึงที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลและการเกิดผิวส้มที่ผิวชิ้นงาน 45

3.19 เครื่องตรวจวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน 45

4.1 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยาย 300 เท่า ของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์และผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ในแต่ละรูปแบบ 48

4.2 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ 49

4.3 บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ 50

4.4 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ 51

4.5 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ 52

4.6 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 53

4.7 บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 54

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป **หน้า**

4.8 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 55

4.9 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 56

4.10 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 57

4.11 บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 58

4.12 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 59

4.13 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 60

4.14 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 61

4.15 บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 62

4.16 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 63

4.17 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 64

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป **หน้า**

4.18 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการ อบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบ และอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 65

4.19 บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่าน กระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบ และอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง 66

4.20 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่ง อะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง 67

4.21 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท ที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัว ในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง 68

4.22 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการ อบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 69

4.23 บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่าน กระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงให้เย็นตัวปล่อยในอากาศ 70

4.24 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่ง อะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 71

4.25 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท ที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 72

4.26 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการ อบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบ และอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ 73

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป **หน้า**

4.27 บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง 74

4.28 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง 74

4.29 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง 75

4.30 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศ 76

4.31 บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศ

4.32 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศ 77

4.33 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศ 78

4.34 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานตัวอย่างท่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกัน 80

4.35 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างท่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกัน 83

4.36 ภาพถ่ายบริเวณผิวของผิวชิ้นงานตัวอย่างท่อก่อนนำไปทำการดึงขึ้นรูปเย็น 87

4.37 ภาพถ่ายบริเวณผิวของชิ้นงานตัวอย่างท่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกันและนำไปทำการดึงขึ้นรูปเย็น 88

4.38 กราฟแท่งเปรียบเทียบผลการตรวจวัดค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของชิ้นงานท่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกันและนำไปดึงขึ้นรูปเย็น 90

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.39	กราฟแท่งเปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานท่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกัน	93
ก.1	แผนภาพความเค้นดึง-อัตรายืดตัวของชิ้นงานท่อจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์	101
ก.2	แผนภาพความเค้นดึง-อัตรายืดตัวของชิ้นงานท่อจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	101
ก.3	แผนภาพความเค้นดึง-อัตรายืดตัวของชิ้นงานท่อจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	102
ก.4	แผนภาพความเค้นดึง-อัตรายืดตัวของชิ้นงานท่อจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	102
ก.5	แผนภาพความเค้นดึง-อัตรายืดตัวของชิ้นงานท่อจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง	103
ก.6	แผนภาพความเค้นดึง-อัตรายืดตัวของชิ้นงานท่อจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	103
ก.7	แผนภาพความเค้นดึง-อัตรายืดตัวของชิ้นงานท่อจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง	104
ก.8	แผนภาพความเค้นดึง-อัตรายืดตัวของชิ้นงานท่อจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศ	104
ข.1	กราฟความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของชิ้นงานท่อก่อนทำการดึงขึ้นรูปเย็น	105

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
ข.2	กราฟความหยาบผิวโดยเฉลี่ยหลังดึงขึ้นรูปเย็นของชิ้นงานท่อที่อัดรีดจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์	106
ข.3	กราฟความหยาบผิวโดยเฉลี่ยหลังดึงขึ้นรูปเย็นของชิ้นงานท่อที่อัดรีดจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	107
ข.4	กราฟความหยาบผิวโดยเฉลี่ยหลังดึงขึ้นรูปเย็นของชิ้นงานท่อที่อัดรีดจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	108
ข.5	กราฟความหยาบผิวโดยเฉลี่ยหลังดึงขึ้นรูปเย็นของชิ้นงานท่อที่อัดรีดจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	109
ข.6	กราฟความหยาบผิวโดยเฉลี่ยหลังดึงขึ้นรูปเย็นของชิ้นงานท่อที่อัดรีดจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง	110
ข.7	กราฟความหยาบผิวโดยเฉลี่ยหลังดึงขึ้นรูปเย็นของชิ้นงานท่อที่อัดรีดจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	111
ข.8	กราฟความหยาบผิวโดยเฉลี่ยหลังดึงขึ้นรูปเย็นของชิ้นงานท่อที่อัดรีดจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง	112
ข.9	กราฟความหยาบผิวโดยเฉลี่ยหลังดึงขึ้นรูปเย็นของชิ้นงานท่อที่อัดรีดจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศ	113