

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

กระบวนการโฮโมจิไนซ์เป็นกรรมวิธีหนึ่งที่ทำให้แท่งอะลูมิเนียมบิลเลทหมายเลข 3003 ที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมมีคุณภาพที่ดีขึ้น ทั้งนี้เพราะกระบวนการอบโฮโมจิไนซ์นี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งบิลเลทซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป (extrude ability) และขนาดเกรนของชิ้นงาน (grain size) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป สำหรับอะลูมิเนียมอัลลอยหมายเลข 3003 นั้น โครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไปในระหว่างกระบวนการอบโฮโมจิไนซ์คือการลดปริมาณความเข้มข้นของธาตุแมงกานีสที่ละลายอยู่ในสารละลายของแข็ง เปลี่ยนแปลงขนาด ความหนาแน่น และ การกระจายตัวของอนุภาคสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกเฟสที่อยู่ภายในของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท รวมถึงการควบคุมการตกตะกอนของธาตุแมงกานีสภายใต้การควบคุมอุณหภูมิการอบ เวลาการอบและรูปแบบของการอบที่เหมาะสม งานวิจัยนี้ศึกษาถึงอิทธิพลของกระบวนการโฮโมจิไนซ์ต่อโครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ให้ผลลัพธ์ด้านคุณภาพในเรื่องของขนาดเกรนหลังกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (extrusion) และการเกิดปัญหาผิวส้ม (orange peel surface) ที่ผิวของชิ้นงานภายหลังการแปรรูปเย็น ซึ่งได้ผลการวิจัยดังนี้

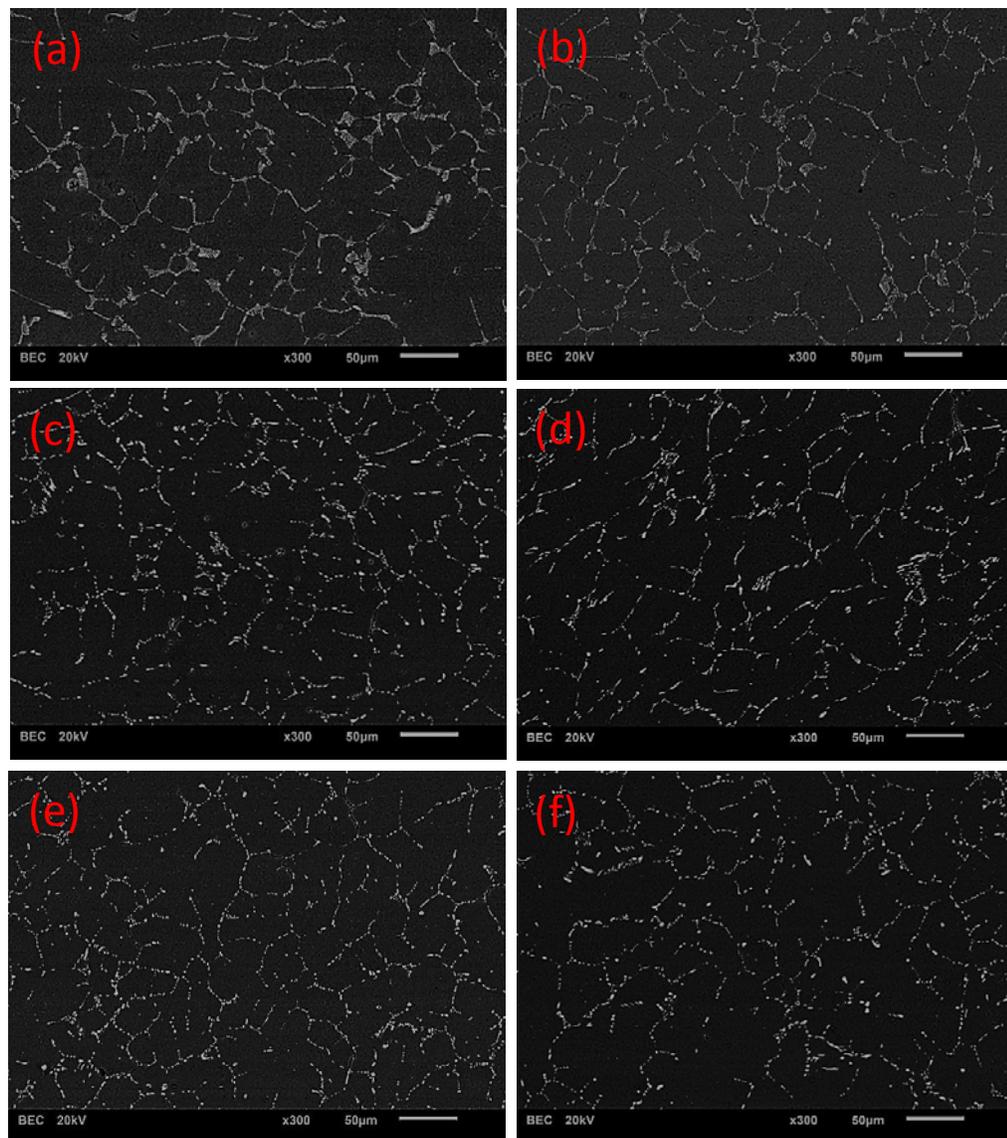
4.1 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท

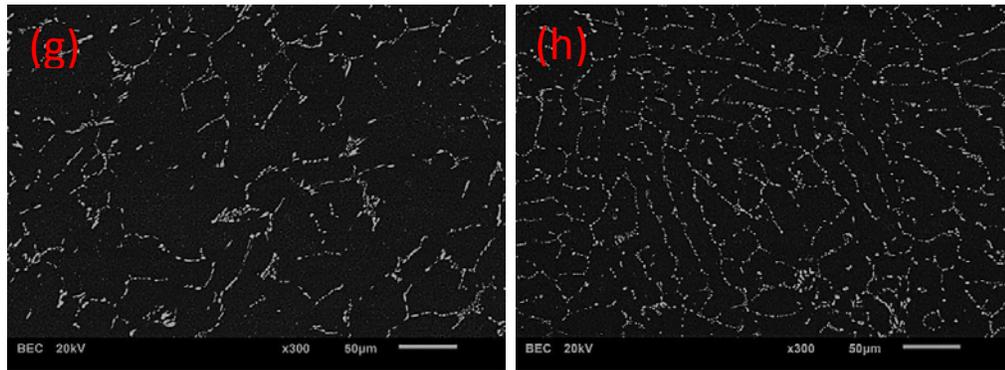
จากการวิจัยเมื่อนำเอาตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทหมายเลข 3003 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 178 มิลลิเมตร ยาว 350 มิลลิเมตร มาผ่านกระบวนการอบโฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ เวลา และรูปแบบการอบที่แตกต่างกันมาตรวจดูโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าการเปลี่ยนแปลงของขนาด การกระจายตัว และปริมาณของธาตุผสมที่อยู่ในอนุภาคสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกเฟส ซึ่งได้ยืนยันด้วยการทำ SEM-EDS และจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่าการกระจายตัวของอนุภาคสารประกอบขนาดเล็กๆ ที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างพื้นในปริมาณและความหนาแน่นที่แตกต่างกันดังผลการศึกษาวินิจฉัยต่อไปนี้

4.1.1 ขนาดเกรนของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท

จากรูป 4.1 เป็นภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 300 เท่าเพื่อเปรียบเทียบขนาดเกรนของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทก่อนผ่านกระบวนการอบโฮโมจิไนซ์และหลังผ่านกระบวนการอบโฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการใช้วิธีการลากเส้นวงกลมตัดผ่าน

ขอบเกรน (circular intercept method) และคำนวณหาขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยตามมาตรฐานของ ASTM no. E112-96 [24] พบว่าขนาดเกรนของชิ้นงานตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทก่อนผ่านกระบวนการอบไฮโดรโมจิไนซ์และหลังผ่านกระบวนการอบไฮโดรโมจิไนซ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรน โดยมีขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 25-26 μm ยกเว้นในกรณีของตัวอย่างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิสูงและใช้เวลานานพบว่าขนาดของเกรนจะมีขนาดที่โตขึ้นจากเดิมเล็กน้อย โดยมีขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 28-31 μm ในขณะที่แท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศจะมีขนาดของเกรนที่เล็กกว่า โดยมีขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 21 μm ดังผลที่แสดงในตารางที่ 4.1





รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคที่กำลังขยาย 300 เท่า ของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์และผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ในแต่ละรูปแบบเมื่อ

- (a) บิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ (As cast)
- (b) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (c) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (d) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (e) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (f) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (g) อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (h) บิลเลทนำเข้าจากต่างประเทศ (ไม่ทราบถึงรูปแบบการผลิต)

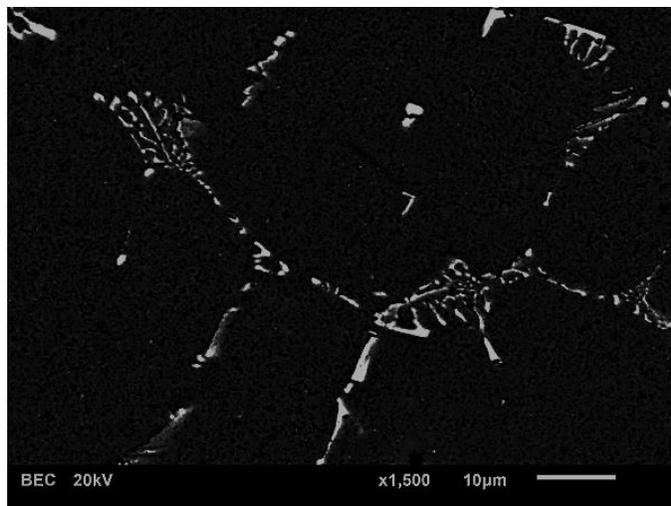
ตารางที่ 4.1 ขนาดเกรน โดยเฉลี่ย โดยการวัดแบบ Circular intercept ตามมาตรฐาน ASTM no. E112-96

ตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
ขนาดเกรน โดยเฉลี่ย (μm)	26	26	25	26	25	28	31	21

4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลตที่ไม่ผ่านกระบวนการ

อบไฮโมจิไนซ์ (As cast billet)

จากการนำแท่งอะลูมิเนียมบิลเลตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์มาทำการตรวจสอบบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าอนุภาคของสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกเฟสที่อยู่ตามบริเวณตำแหน่งของขอบเกรน (grain boundary) จะมีลักษณะโครงสร้างยูเทคติก (eutectic) ที่หยาบ เป็นแท่งเข็มแหลมคมปราศจากความกลมมน และเป็นโครงข่ายร่างแหต่อเนื่อง ดังแสดงในรูป 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์

เมื่อนำตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์มาทำการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของธาตุผสมโดยวิธีการแมปปิง (mapping) พบว่ามีการกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) อยู่บนโครงสร้างดังแสดงผลในรูป 4.3

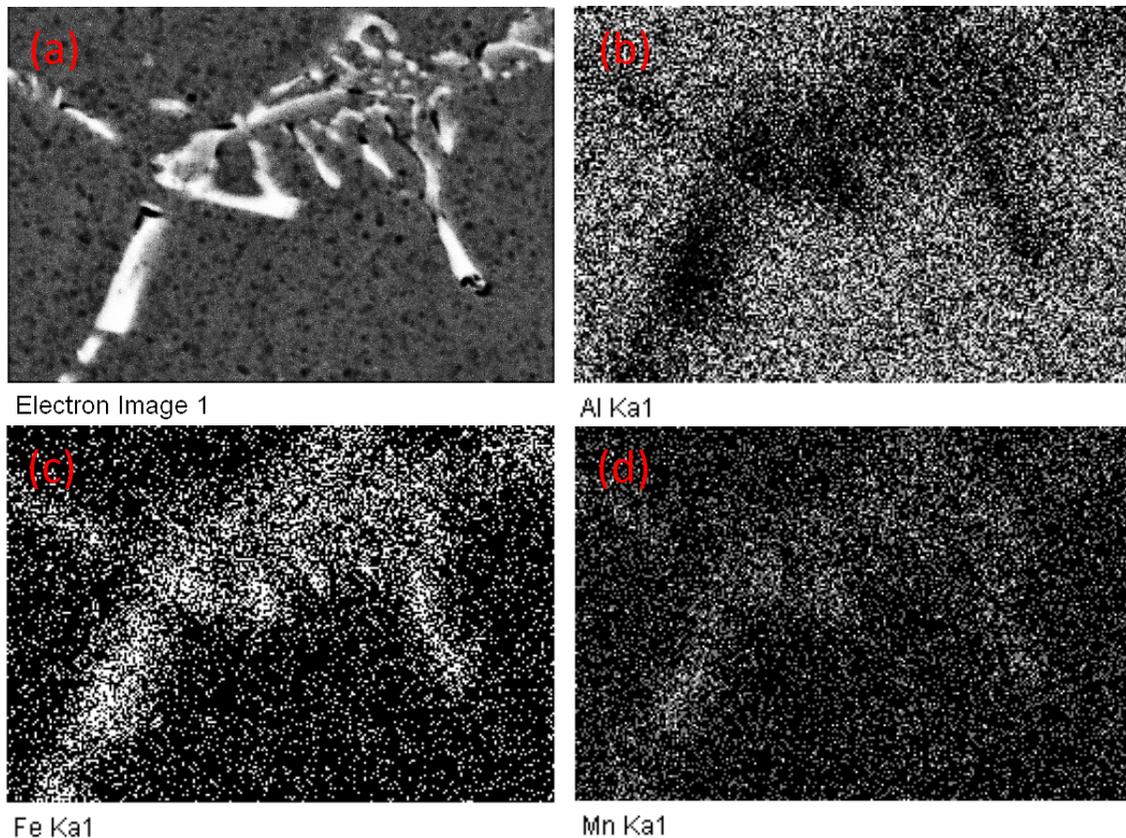
จากรูป 4.3 (a) เป็นภาพโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ซึ่งใช้เป็นบริเวณอ้างอิงในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสม

จากรูป 4.3 (b) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุอะลูมิเนียมตรงบริเวณอ้างอิง พบว่าธาตุอะลูมิเนียมส่วนใหญ่จะปรากฏให้เห็นในลักษณะที่กระจายตัวล้อมรอบโครงสร้างของ

สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก โดยมีธาตุอะลูมิเนียมส่วนหนึ่งกระจายตัวอยู่บน โครงสร้างสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกเฟส

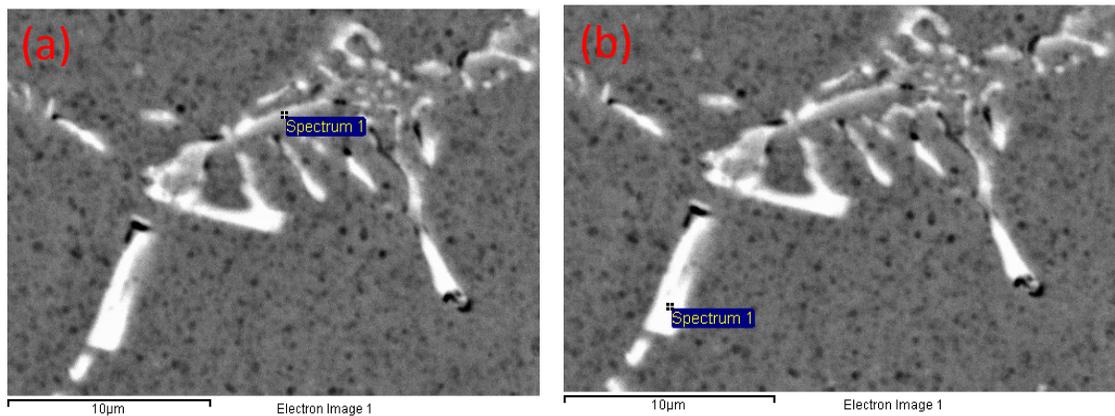
จากรูป 4.3 (c) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุเหล็กตรงบริเวณอ้างอิงพบว่าธาตุเหล็กมีการแพร่กระจายที่มีลักษณะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนสีขาวที่เห็นได้อย่างชัดเจนตรงตำแหน่งของอินเทอร์เมทัลลิกเฟส โดยมีธาตุเหล็กบางส่วนกระจายตัวอยู่บนโครงสร้างพื้น

จากรูป 4.3 (d) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุแมงกานีสตรงบริเวณอ้างอิงพบว่าธาตุแมงกานีสมีลักษณะของการแพร่กระจายตัวไปทั่วทั้งบริเวณ โครงสร้าง โดยตรงบริเวณตำแหน่งของอินเทอร์เมทัลลิกเฟสนั้นพบว่าการรวมกลุ่มของธาตุแมงกานีสปรากฏอยู่แต่ไม่มีความเด่นชัดมากนักเมื่อเทียบกับการกระจายตัวของธาตุเหล็กตรงบริเวณเดียวกัน



รูปที่ 4.3 (a) บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์, (b) การกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม, (c) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก, (d) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส

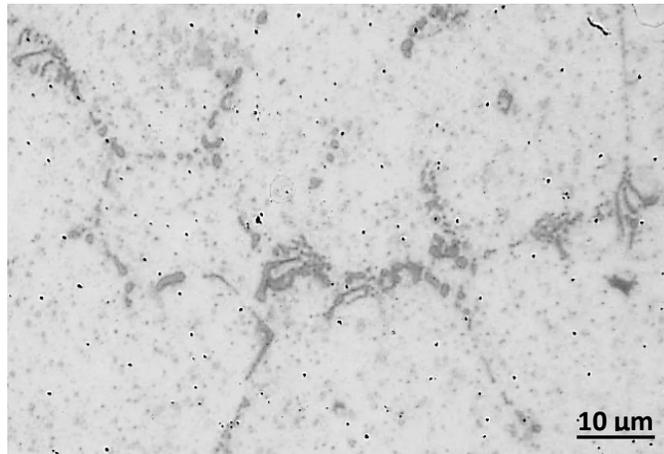
และจากการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมตรงบริเวณโครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสโดยใช้เทคนิค SEM-EDS พบว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมที่ได้มีความสอดคล้องกับรูปแบบการกระจายตัวของธาตุผสมที่วิเคราะห์ได้จากวิธีการทำ Mapping โดยพบว่าปริมาณธาตุเหล็กที่ตรวจพบตรงบริเวณจุดวิเคราะห์ที่ 1 และ 2 ที่ค่าที่สูงถึง 8.92% และ 7.99% ตามลำดับ และพบปริมาณธาตุแมงกานีสตรงบริเวณจุดวิเคราะห์ที่ 1 และ 2 มีค่าอยู่ที่ 2.34% และ 3.99% ตามลำดับ ในขณะที่ธาตุซิลิกอนตรวจพบเฉพาะตรงบริเวณจุดวิเคราะห์ที่ 2 เท่านั้นในปริมาณที่มีค่าอยู่ที่ 0.21% ดังแสดงผลในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.4 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์, (a) จุดวิเคราะห์ที่ 1, (b) จุดวิเคราะห์ที่ 2

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS

Check point	Element	Al K	Fe K	Mn K	Si K	Total
(a)	Weight%	88.74	8.92	2.34	0.00	100.00
	Atomic%	94.39	4.50	1.11	0.00	
(b)	Weight%	87.81	7.99	3.99	0.21	100.00
	Atomic%	93.58	4.12	2.09	0.21	

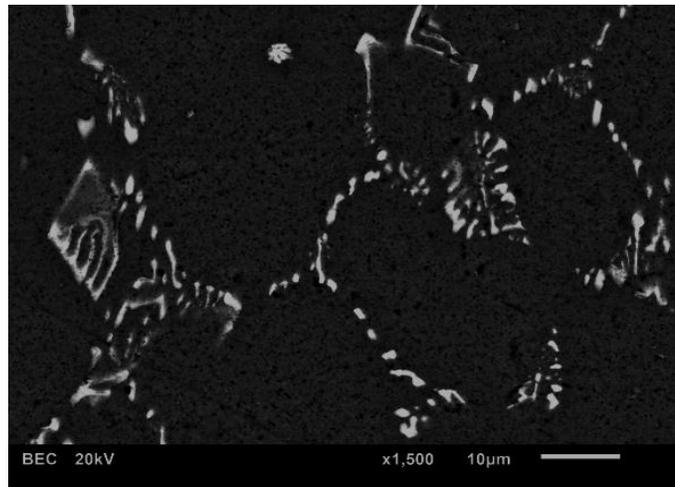


รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของ
แท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมที่ได้จากการทำ Mapping และผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมตรงบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสโดยใช้เทคนิค SEM-EDS ยืนยันได้ว่าปริมาณของธาตุผสมของเหล็ก (Fe), แมงกานีส (Mn) และซิลิกอน (Si) ที่ผสมอยู่ในอะลูมิเนียมอัลลอยหมายเลข 3003 ภายหลังจากการหล่อแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทส่วนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกเฟสที่กระจายอยู่ตามบริเวณขอบเกรนในรูปของ $Al_6(Mn,Fe)$ และ $\alpha-Al(Mn,Fe)Si$ และเมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงตามที่แสดงในรูปที่ 4.5 แล้วไม่พบว่ามีการตกตะกอนขนาดเล็กเกิดขึ้นบนบริเวณโครงสร้างพื้น จึงเป็นไปได้ว่าธาตุแมงกานีสส่วนหนึ่งจะละลายอยู่ในรูปของสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturated solid solution) ตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 [12]

4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

จากการนำแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศมาทำการตรวจสอบบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าลักษณะโครงข่ายร่างแหของอนุภาคของสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกเฟสที่อยู่ตามบริเวณตำแหน่งของขอบเกรนนั้นจะเริ่มมีการกระจายตัวแตกออกเป็นปล้องเล็กๆ เกิดขึ้น แต่ยังคงพบลักษณะของโครงสร้างยูเทคติก (eutectic) ปรากฏหลงเหลืออยู่ดังแสดงในรูป 4.6



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

และเมื่อนำตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของธาตุผสม โดยวิธีการแมปปิง (mapping) พบว่ามีการกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe), แมงกานีส (Mn) เกิดขึ้นบนโครงสร้างดังแสดงผลในรูป 4.7

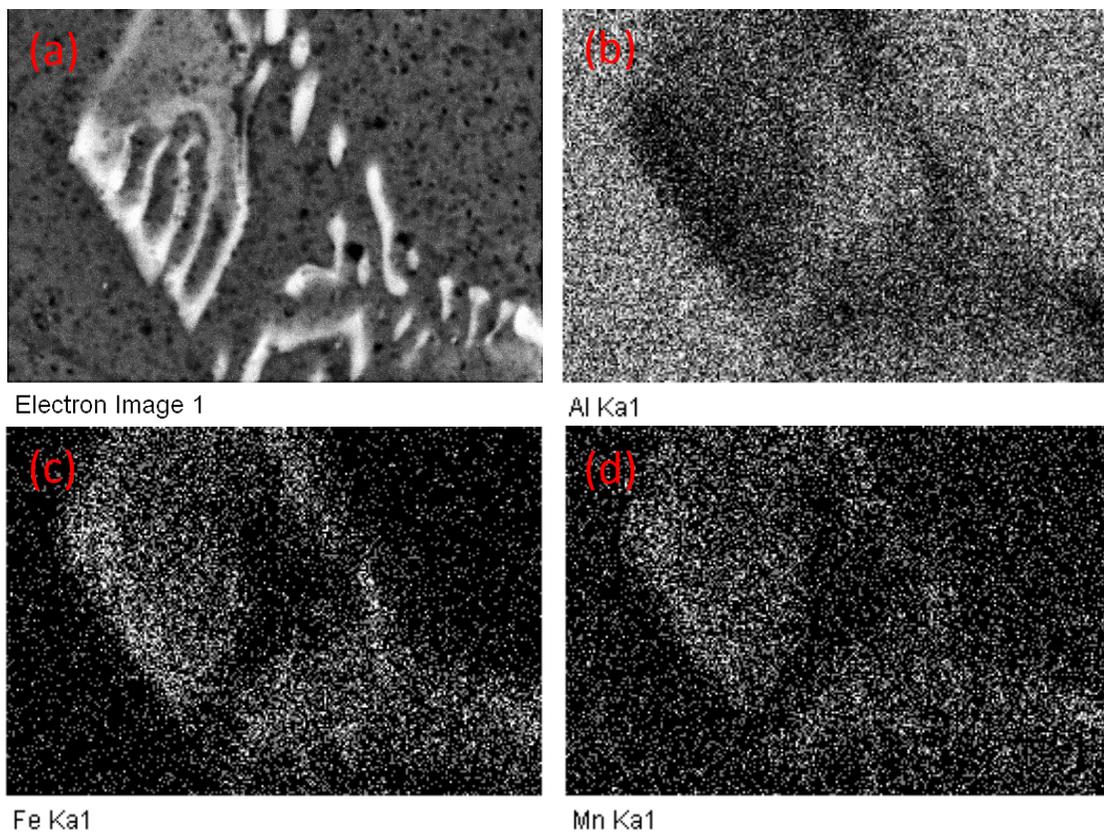
จากรูป 4.7 (a) เป็นภาพโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ซึ่งใช้เป็นบริเวณอ้างอิงในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสม

จากรูป 4.7 (b) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุอะลูมิเนียมตรงบริเวณอ้างอิงพบว่าธาตุอะลูมิเนียมส่วนใหญ่จะปรากฏให้เห็นในลักษณะที่กระจายตัวล้อมรอบโครงสร้างสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกโดยมีธาตุอะลูมิเนียมส่วนหนึ่งกระจายตัวอยู่บนโครงสร้างสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกเฟสเช่นเดียวกับตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์

จากรูป 4.7 (c) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุเหล็กตรงบริเวณอ้างอิงพบว่าธาตุเหล็กมีการแพร่กระจายที่มีลักษณะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนสีขาวตรงบริเวณตำแหน่งของอินเตอร์เมทัลลิก

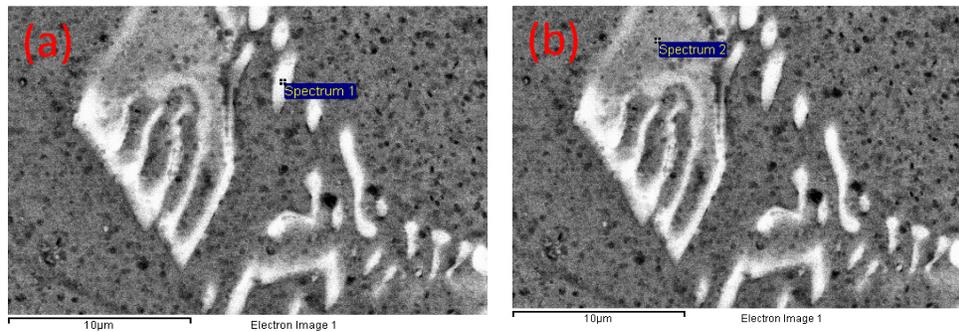
เฟสเช่นเดียวกัน แต่ไม่มีความเด่นชัดเหมือนกับตัวอย่างแท่งตัวอย่างอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์

จากรูป 4.7 (d) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุแมงกานีสตรงบริเวณอ้างอิงพบว่าธาตุแมงกานีสมีลักษณะของการแพร่กระจายตัวไปทั่วทั้งบริเวณ โครงสร้าง โดยตรงบริเวณตำแหน่งของอินเตอร์เมทัลลิกเฟสพบว่าการรวมกลุ่มของธาตุแมงกานีสปรากฏอยู่ แต่ไม่มีความเด่นชัดเช่นเดียวกับตัวอย่างแท่งตัวอย่างอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์



รูปที่ 4.7 (a) บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ, (b) การกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม, (c) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก, (d) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส

จากการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมเฉพาะจุดตรงบริเวณ โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสโดยเทคนิค SEM-EDS พบว่าผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมที่ได้มีความสอดคล้องกับรูปแบบการกระจายตัวของธาตุผสมที่วิเคราะห์ได้จากวิธีการทำ Mapping โดยพบว่าปริมาณธาตุเหล็กที่ตรวจพบตรงบริเวณจุดวิเคราะห์ที่ 1 และ 2 ที่ค่า 2.70% และ 3.36% ตามลำดับ และพบปริมาณธาตุแมงกานีสตรงบริเวณจุดวิเคราะห์ที่ 1 และ 2 มีค่าอยู่ที่ 1.90% และ 2.96% ตามลำดับ ในขณะที่ตรวจพบปริมาณของธาตุซิลิกอนทั้ง 2 จุดวิเคราะห์ โดยตรงบริเวณจุดวิเคราะห์ที่ 1 มีค่าซิลิกอนอยู่ที่ 0.07% และจุดวิเคราะห์ที่ 2 มีค่าซิลิกอนอยู่ที่ 0.05% ดังแสดงผลตารางที่ 4.3 ซึ่งจากผลที่ได้นี้เป็นที่ยืนยันได้ว่าจุดวิเคราะห์ทั้งสองเป็นสารประกอบที่รวมตัวกันอยู่ในรูปของ $\alpha\text{-Al(Mn,Fe)Si}$



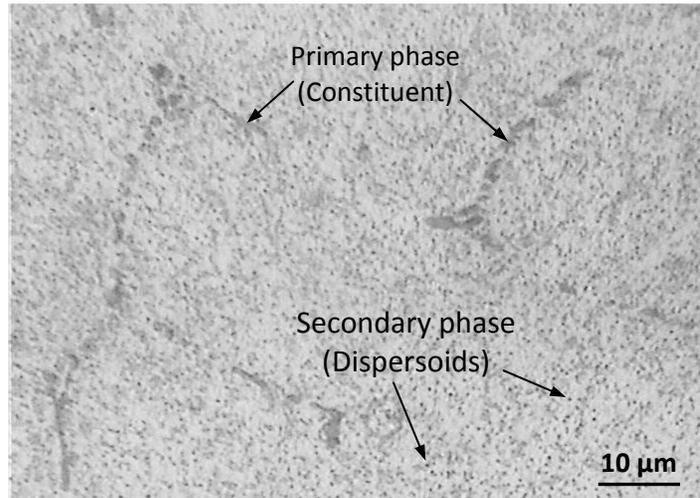
รูปที่ 4.8 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ, (a) จุดวิเคราะห์ที่ 1, (b) จุดวิเคราะห์ที่ 2

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณ โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS

Check point	Element	Al K	Fe K	Mn K	Si K	Total
a)	Weight%	95.34	2.70	1.90	0.07	100.00
	Atomic%	97.65	1.33	0.95	0.07	
b)	Weight%	93.63	3.36	2.96	0.05	100.00
	Atomic%	96.77	1.68	1.50	0.05	

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมที่ได้จากการทำ Mapping และผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมตรงบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสโดยใช้เทคนิค SEM-EDS พบว่าปริมาณธาตุผสมของเหล็ก

(Fe) ตรงบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสมีค่าลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของธาตุเหล็กที่พบตรงบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรเจนไนซ์ ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์พิจารณาพร้อมกับภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4.9 แล้วพบว่ามีการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก (dispersoids) มีการกระจายตัวที่มีความหนาแน่นสูงมากเกิดขึ้นอยู่บนโครงสร้างพื้น จึงมีความเป็นไปได้ที่ว่าในช่วงระยะเวลาของการอบแช่เป็นระยะเวลานานที่อุณหภูมิไฮโดรเจนไนซ์ต่ำซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ธาตุแมงกานีสมีอัตราการตกตะกอนที่สูง ทำให้ปริมาณของธาตุเหล็กที่อยู่ตรงบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสลดลงไปเนื่องจากการแพร่ไปรวมตัวกับธาตุแมงกานีสที่ตกตะกอนออกมาจากสารละลายของแข็งอะลูมิเนียมและก่อตัวรวมกันเป็นสารประกอบขนาดเล็กๆ กระจายอยู่บนโครงสร้างพื้นอะลูมิเนียมในรูปของ $Al_6(Mn,Fe)$ [14]

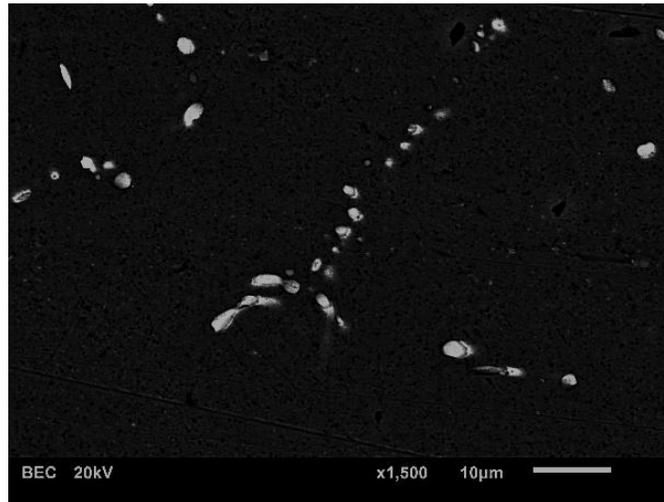


รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

4.1.4 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

จากการนำแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศมาทำการตรวจสอบบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าลักษณะ โครงข่ายร่างแหของอนุภาคของ

สารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกเฟสที่อยู่ตามบริเวณตำแหน่งของขอบเกรนนั้นมีการกระจายและแตกออกเป็นปล้องๆ ในปริมาณที่มากขึ้น มีลักษณะที่กลมมนและมีขนาดที่โตกว่าเมื่อเทียบกับแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

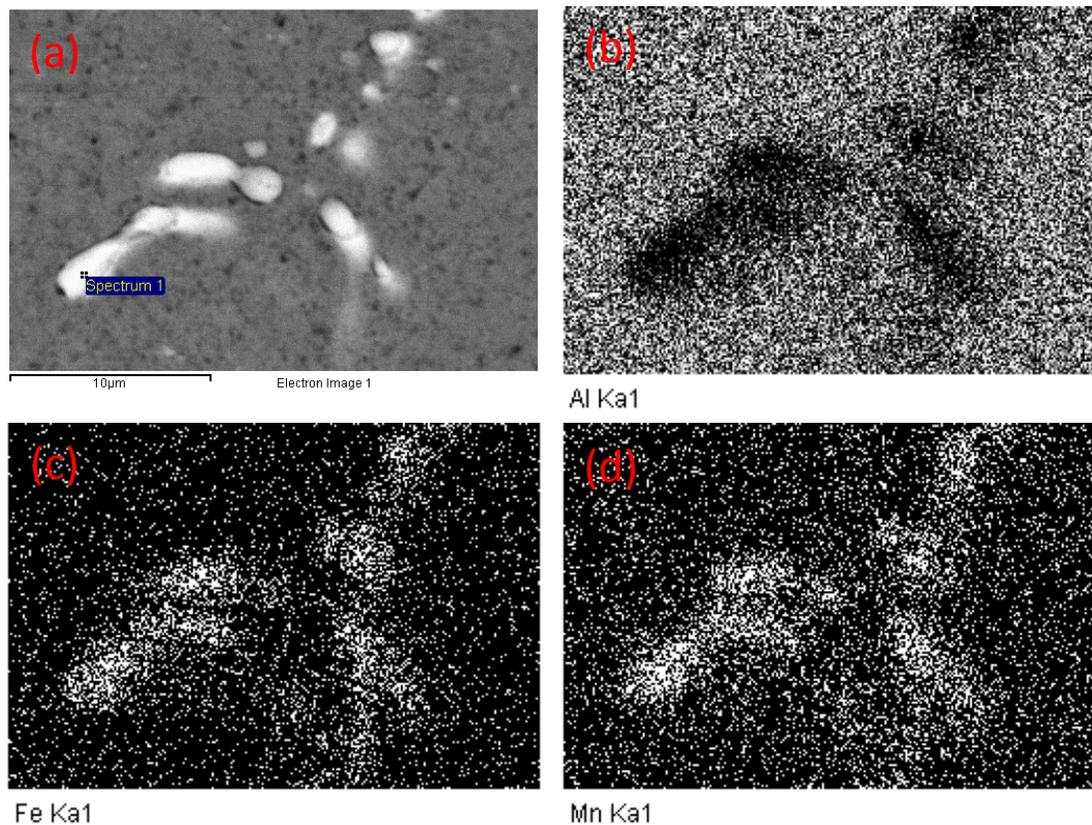
และเมื่อนำตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของธาตุผสมโดยวิธีการแมปปิง (Mapping) พบว่ามีการกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe), แมงกานีส (Mn) เกิดขึ้นบนโครงสร้างดังแสดงผลในรูป 4.11

จากรูป 4.11 (a) เป็นภาพโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่าซึ่งใช้เป็นบริเวณอ้างอิงในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสม

จากรูป 4.11 (b) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุอะลูมิเนียมตรงบริเวณอ้างอิงพบว่าธาตุอะลูมิเนียมส่วนใหญ่จะปรากฏให้เห็นในลักษณะที่กระจายตัวล้อมรอบโครงสร้างสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก โดยมีธาตุอะลูมิเนียมส่วนหนึ่งกระจายตัวอยู่บนโครงสร้างสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกเฟส

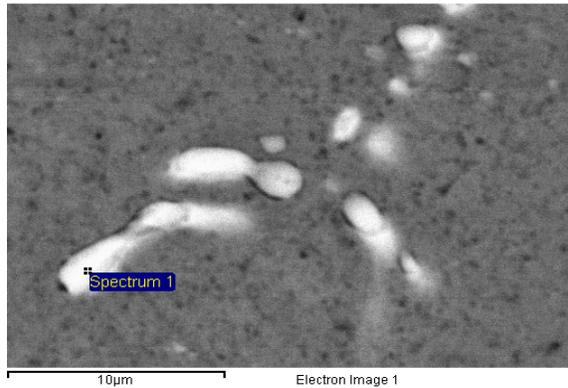
จากรูป 4.11 (c) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุเหล็กตรงบริเวณอ้างอิง พบว่าธาตุเหล็กมีการแพร่กระจายที่มีลักษณะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนสีขาวตรงตำแหน่งของอินเตอร์เมทัลลิกที่มีความเด่นชัดเจนมากกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างแท่งตัวอย่างอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบอบไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง

จากรูป 4.11 (d) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุแมงกานีสตรงบริเวณอ้างอิง พบว่าธาตุแมงกานีสมีลักษณะของการแพร่กระจายตัวไปทั่วทั้งบริเวณ โครงสร้าง แต่ตรงบริเวณตำแหน่งของอินเตอร์เมทัลลิกเฟสพบว่ามีกรรวมกลุ่มของธาตุแมงกานีสที่มีความเด่นชัดเจนที่มากกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างแท่งตัวอย่างอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบอบไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.11 (a) บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ, (b) การกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม, (c) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก, (d) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส

จากการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมเฉพาะจุดตรงบริเวณ โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟส โดยเทคนิค SEM-EDS พบว่าผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมที่ได้มีความสอดคล้องกับรูปแบบการกระจายตัวของธาตุผสมที่วิเคราะห์ได้จากวิธีการทำ Mapping โดยพบว่าปริมาณธาตุเหล็ก, แมงกานีส และซิลิกอนมีค่าอยู่ที่ 5.03%, 5.18% และ 0.16% ตามลำดับ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.12 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

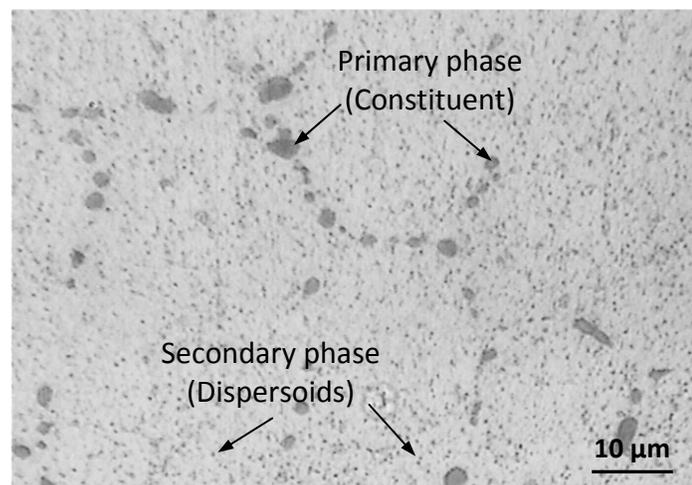
ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณ โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS

Element	Al K	Fe K	Mn K	Si K	Total
Weight%	89.64	5.03	5.18	0.16	100.00
Atomic%	94.60	2.56	2.68	0.16	

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมที่ได้จากการทำ Mapping และผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมตรงบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟส โดยใช้เทคนิค SEM-EDS พบว่ามีปริมาณธาตุผสมของเหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) ตรงบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของธาตุเหล็กและแมงกานีสที่พบตรงบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ รวมถึงธาตุซิลิกอนที่ยังคงตรวจพบในจุดวิเคราะห์บริเวณดังกล่าวเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจุดวิเคราะห์บริเวณดังกล่าวมีการรวมตัวกันของธาตุผสมมาเป็นสารประกอบที่อยู่ในรูปของ $\alpha\text{-Al(Mn,Fe)Si}$ ที่มีการกระจาย

ตัวและมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการใช้อุณหภูมิในการอบไฮโมจีไนซ์ที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงลักษณะการตกตะกอนของอนุภาคนาขนาดเล็กลงจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงตามที่แสดงในรูปที่ 4.13 แล้วพบว่ามีการกระจายตัวของตะกอนเล็ก ๆ เกิดขึ้นบนโครงสร้างพื้นในปริมาณความหนาแน่นที่น้อยกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

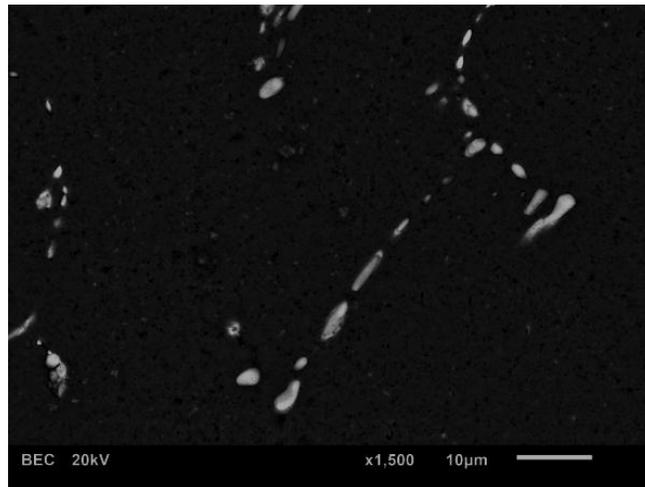
จากการนำผลทดลองที่ได้ทั้งหมดของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ มาพิจารณาร่วมกับทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 3003 [19] สามารถวิเคราะห์ได้ว่าในช่วงระยะเวลาของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 585°C ธาตุเหล็ก, แมงกานีส และซิลิกอนมีการแพร่และตกตะกอนออกมารวมตัวกันในรูปของสารประกอบ $\alpha\text{-Al}(\text{Mn,Fe})\text{Si}$ ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (constituent) ตามบริเวณขอบเกรน ในขณะที่เวลาเดียวกับที่ธาตุแมงกานีสอีกส่วนหนึ่งถูกทำให้ละลายเข้าไปอยู่ในรูปของสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวดภายในโครงสร้างเนื้ออะลูมิเนียม โดยธาตุแมงกานีสเหล่านี้จะตกตะกอนออกมาเป็นอนุภาคนาขนาดเล็กลง (dispersoids) ในรูปของ $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$ บนโครงสร้างพื้นอีกครั้งในช่วงระยะเวลาของการเย็นตัวภายหลังการอบแห้ง และเนื่องจากการเย็นตัวภายในอากาศซึ่งมีอัตราการเย็นตัวที่สูง ส่งผลให้ช่วงระยะเวลาที่จะเกิดการตกตะกอนออกมานั้นมีจำกัด ทำให้ปริมาณความหนาแน่นของการตกตะกอนมีจำนวนน้อย



รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

4.1.5 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

จากการนำแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศมาทำการตรวจสอบบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าลักษณะโครงข่ายร่างแหของอนุภาคของสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกเฟสที่อยู่ตามบริเวณตำแหน่งของขอบเกรนนั้นมีการกระจายและแตกออกเป็นปล้องๆ ในปริมาณที่มากขึ้น มีลักษณะที่กลมมนและพบว่าบางจุดจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิที่ 585°C นาน 4 ชั่วโมง



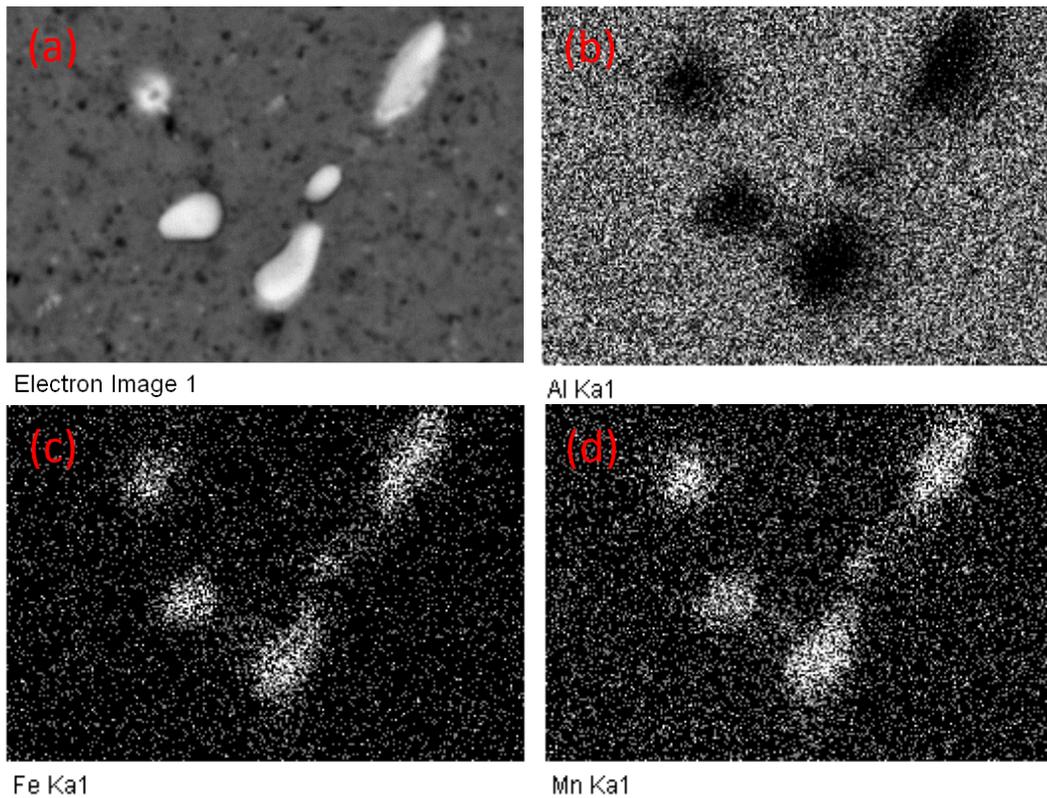
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

และเมื่อนำตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของธาตุผสม โดยวิธีการแมปปิง (mapping) พบว่ามีการกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) เกิดขึ้นบนโครงสร้างดังแสดงผลในรูป 4.15

จากรูป 4.15 (a) เป็นภาพโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่าซึ่งใช้เป็นบริเวณอ้างอิงในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสม

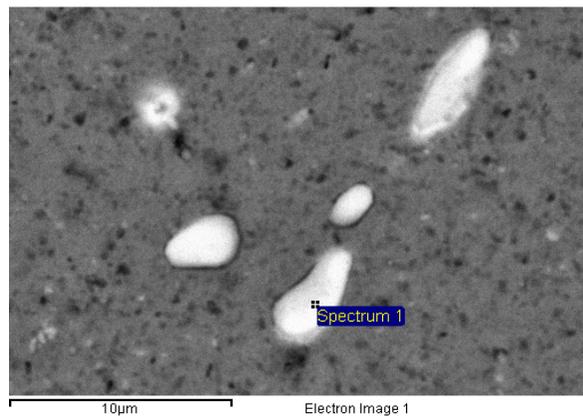
จากรูป 4.15 (b) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุอะลูมิเนียมตรงบริเวณอ้างอิง พบว่าธาตุอะลูมิเนียมส่วนใหญ่จะปรากฏให้เห็นในลักษณะที่กระจายตัวล้อมรอบโครงสร้างสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก โดยมีธาตุอะลูมิเนียมส่วนหนึ่งกระจายตัวอยู่บน โครงสร้างสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกเฟส

จากรูป 4.15 (c) และ (d) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุเหล็กและแมงกานีสตรงบริเวณอ้างอิง พบว่าธาตุเหล็กและแมงกานีสมีการแพร่กระจายที่มีลักษณะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนสีขาวตรงตำแหน่งของอินเตอร์เมทัลลิกที่มีความชัดเจนเช่นเดียวกับแท่งตัวอย่างอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบอบไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.15 (a) บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ, (b) การกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม, (c) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก, (d) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส

และจากการนำตัวอย่างดังกล่าวมาวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมตรงบริเวณโครงสร้างอินเทอร์เมทัลลิกเฟสโดยเทคนิค SEM-EDS พบว่ามีปริมาณของธาตุเหล็กและแมงกานีสที่มากกว่าแท่งตัวอย่างอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมง โดยพบว่าปริมาณของธาตุเหล็กมีค่าอยู่ที่ 6.92% และปริมาณของธาตุแมงกานีสมีค่าอยู่ที่ 8.43% ตามลำดับ ในขณะที่ธาตุซิลิกอนยังคงตรวจพบในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณของธาตุซิลิกอนอยู่ที่ 0.13% ดังแสดงผลในตารางที่ 4.5



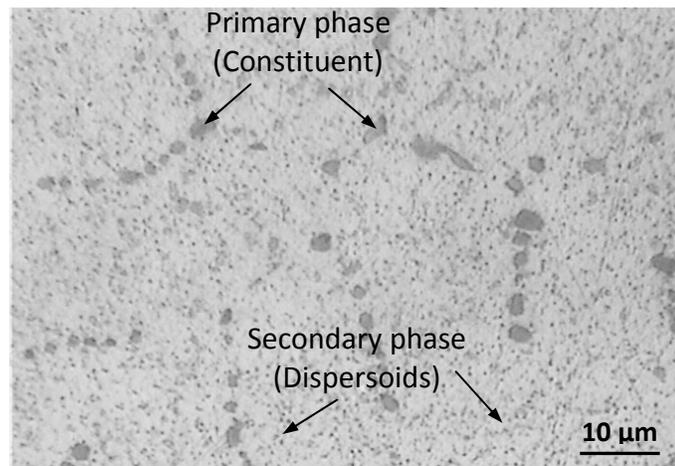
รูปที่ 4.16 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเทอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการไฮโดรโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างอินเทอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS

Element	Al K	Fe K	Mn K	Si K	Total
Weight%	84.52	6.92	8.43	0.13	100.00
Atomic%	91.87	3.55	4.44	0.14	

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมที่ได้จากการทำ Mapping และผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมตรงบริเวณอินเทอร์เมทัลลิกเฟสโดยใช้เทคนิค SEM-EDS พบว่ามีปริมาณธาตุผสมของเหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) ตรงบริเวณอินเทอร์เมทัลลิกเฟสมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของธาตุเหล็กและแมงกานีสที่พบตรงบริเวณอินเทอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและอบไฮโดรโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4

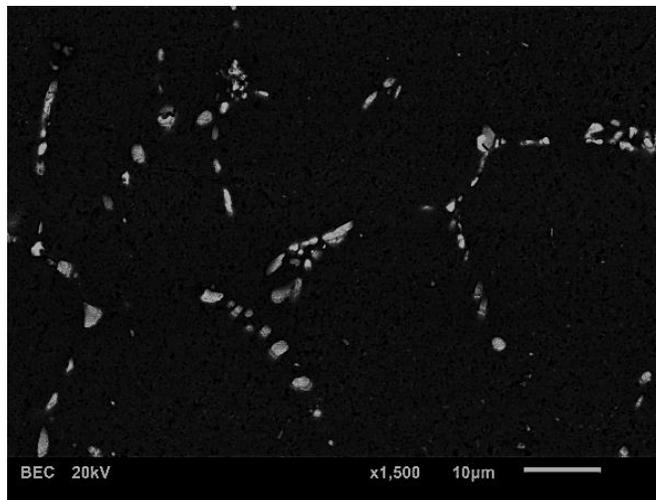
ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ รวมถึงธาตุซิลิกอนที่ยังคงตรวจพบในจุดวิเคราะห์บริเวณดังกล่าว เช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กๆ ที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างพื้นจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงตามที่แสดงในรูปที่ 4.17 แล้วพบว่ายังคงมีการกระจายตัวในปริมาณที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ชี้ให้เห็นว่าการทำไฮโดรโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ส่งผลทำให้ธาตุผสมมีการรวมตัวกันเป็นสารประกอบที่อยู่ในรูปของ α -Al(Mn,Fe)Si ในปริมาณที่มากขึ้นและมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น (constituent) แปรผันตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบไฮโดรโมจิไนซ์ที่สูงขึ้น ในขณะที่ธาตุแมงกานีสส่วนหนึ่งที่ถูกทำให้ละลายเข้าไปอยู่ในรูปของสารละลายของแข็งอิมตัวยังยวดยภายในโครงสร้างเนื้ออะลูมิเนียมยังคงถูกจำกัดปริมาณในการตกตะกอนออกมาเป็นอนุภาคขนาดเล็กๆ (dispersoids) บนโครงสร้างพื้น เนื่องจากมีอัตราการเย็นตัวภายในอากาศเช่นเดียวกันกับแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่อบไฮโดรโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

4.1.6 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื้อที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

จากการนำแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื้อที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงทำการตรวจสอบบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าลักษณะโครงข่ายร่างแหของอนุภาคของสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกเฟสที่อยู่ตามบริเวณตำแหน่งของขอบเกรนนั้นมีการกระจายและแตกออกเป็นปล้องๆ ในปริมาณที่มากขึ้น มีลักษณะที่กลมมนและมีขนาดที่โตขึ้นเช่นเดียวกับแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง

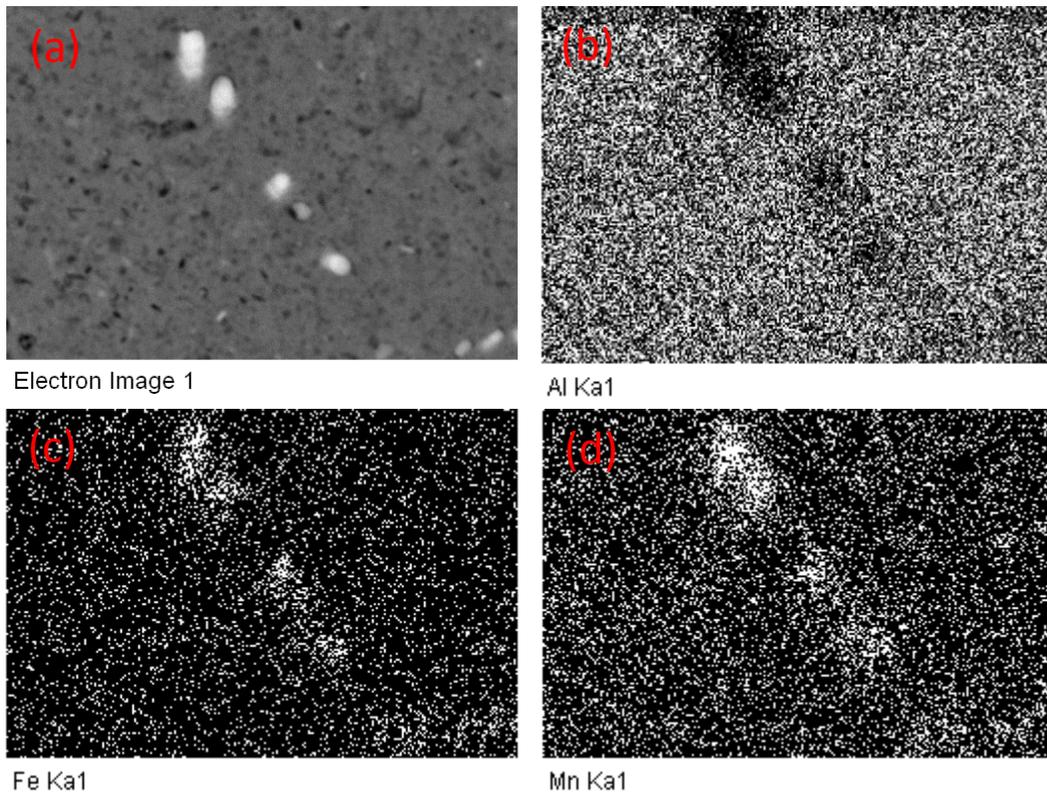


รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื้อที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

และเมื่อนำตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของธาตุผสม โดยวิธีการทำแมปปิ้ง (Mapping) พบว่ามีการกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe) และธาตุแมงกานีส (Mn) เกิดขึ้นบนโครงสร้างดังแสดงผลในรูป 4.19

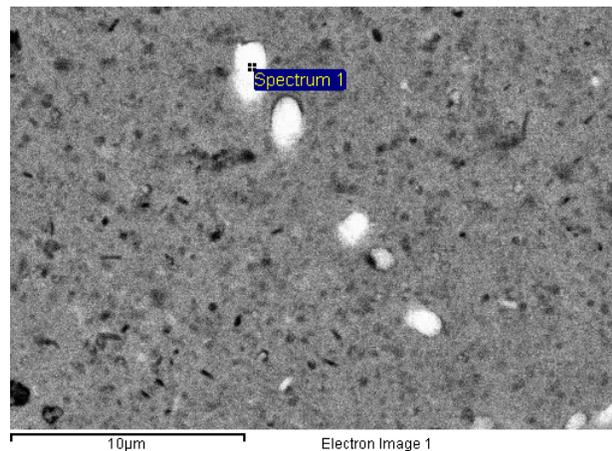
จากรูป 4.19 (a) เป็นภาพโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนืองที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่าและใช้เป็นบริเวณอ้างอิงในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสม

จากรูป 4.19 (b), (c) และ (d) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุอะลูมิเนียม, เหล็ก และแมงกานีสตรงบริเวณอ้างอิง ซึ่งพบว่าธาตุอะลูมิเนียม, เหล็กและแมงกานีสมีการแพร่กระจายที่มีลักษณะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนสีขาวตรงตำแหน่งของอินเตอร์เมทัลลิกที่มีความชัดเจนเช่นเดียวกับแท่งตัวอย่างอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



รูปที่ 4.19 (a) บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนืองที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง, (b) การกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม, (c) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก, (d) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส

และจากการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมตรงบริเวณ โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสโดยเทคนิค SEM-EDS พบว่าปริมาณธาตุเหล็กที่วิเคราะห์ได้มีค่าที่สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบเท่ากับอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศโดยมีค่าอยู่ที่ 8.22% ในขณะที่ปริมาณของธาตุแมงกานีสและธาตุซิลิกอนที่วิเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ที่ 8.94% และ 0.18% ตามลำดับ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.6



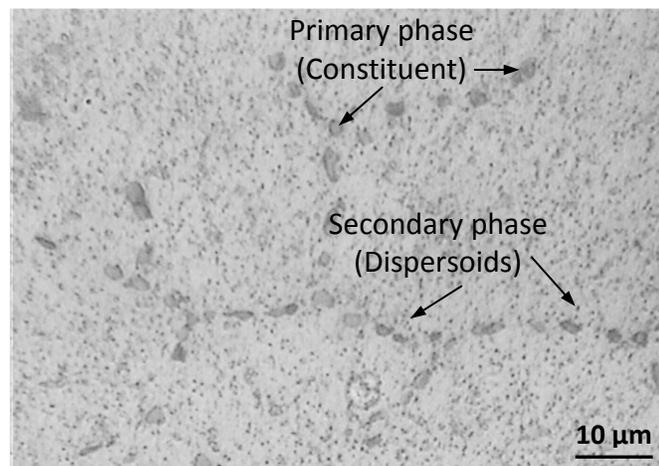
รูปที่ 4.20 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณ โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS

Element	Al K	Fe K	Mn K	Si K	Total
Weight%	82.66	8.22	8.94	0.18	100.00
Atomic%	90.64	4.36	4.81	0.19	

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมที่ได้จากการทำ Mapping และผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมตรงบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสโดยใช้เทคนิค SEM-EDS พบว่าธาตุผสมมีการรวมตัวกันเป็นสารประกอบที่อยู่ในรูปของ α -Al(Mn,Fe)Si ที่มีขนาดและปริมาณธาตุผสมของเหล็ก (Fe), แมงกานีส (Mn) และธาตุซิลิกอน (Si) ใกล้เคียงกับตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะการตกตะกอน

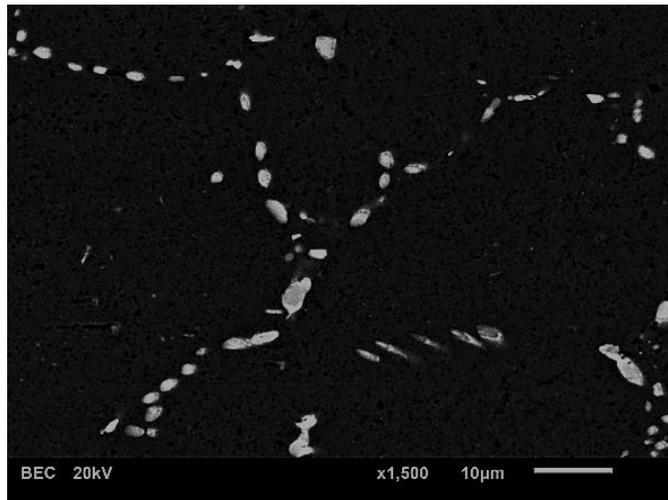
ของอนุภาคขนาดเล็กๆ ที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างพื้นจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงตามที่แสดงในรูปที่ 4.21 พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็กๆ ที่ตกตะกอน บนโครงสร้างพื้นในปริมาณความหนาแน่นที่มีมากกว่ากับแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้วิเคราะห์ให้ได้ว่าในช่วงสแตปแรกของการอบแช่ที่อุณหภูมิสูงที่ 615°C นาน 4 ชั่วโมงนั้น ธาตุเหล็ก, แมงกานีส และซิลิกอนมีการแพร่และตกตะกอนออกมารวมตัวกันในรูปของสารประกอบ $\alpha\text{-Al}(\text{Mn,Fe})\text{Si}$ ในปริมาณที่มากขึ้นและมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น (constituent) ในขณะเวลาเดียวกับที่ธาตุแมงกานีสอีกส่วนหนึ่งถูกทำให้ละลายเข้าไปอยู่ในรูปของสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวดภายในโครงสร้างเนื้ออะลูมิเนียม หลังจากเสร็จสิ้นระยะเวลาอบแช่ในช่วงสแตปแรก แท่งอะลูมิเนียมบิลเลทถูกปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิต่ำ 480°C นาน 4 ชั่วโมง ซึ่ง ณ.ที่อุณหภูมินี้ ธาตุแมงกานีสไม่สามารถละลายอยู่ในรูปของสารละลายของแข็งได้อย่างสมบูรณ์ทำให้มีตกตะกอนออกมาเป็นอนุภาคขนาดเล็กๆ (dispersoids) ในรูปของ $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$ บนโครงสร้างพื้น และเนื่องจากการอบแช่ที่อุณหภูมิต่ำในสแตปที่สองนี้มีการปล่อยระยะเวลาของการอบแช่ที่นาน 4 ชั่วโมงจึงทำให้อนุภาคขนาดเล็กๆ (dispersoids) มีการตกตะกอนและแพร่ออกมาในปริมาณความหนาแน่นที่มากกว่าและอาจมีขนาดที่ใหญ่กว่าการอบแบบสแตปเดียวที่อุณหภูมิสูงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศทันทีเนื่องจากถูกจำกัดระยะเวลาของการตกตะกอนและการแพร่ตัวจากอัตราการเย็นตัวที่สูง



รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง

4.1.7 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

จากการนำแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศทำการตรวจสอบบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าลักษณะ โครงข่ายร่างแหของอนุภาคของสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกเฟสที่อยู่ตามบริเวณตำแหน่งของขอบเกรนนั้นมีการกระจายและแตกออกเป็นปล้องๆ ในปริมาณที่มากขึ้น มีลักษณะที่กลมมนและมีขนาดที่โตขึ้นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ใช้เวลาอบแช่ที่สั้นกว่า 4 ชั่วโมง



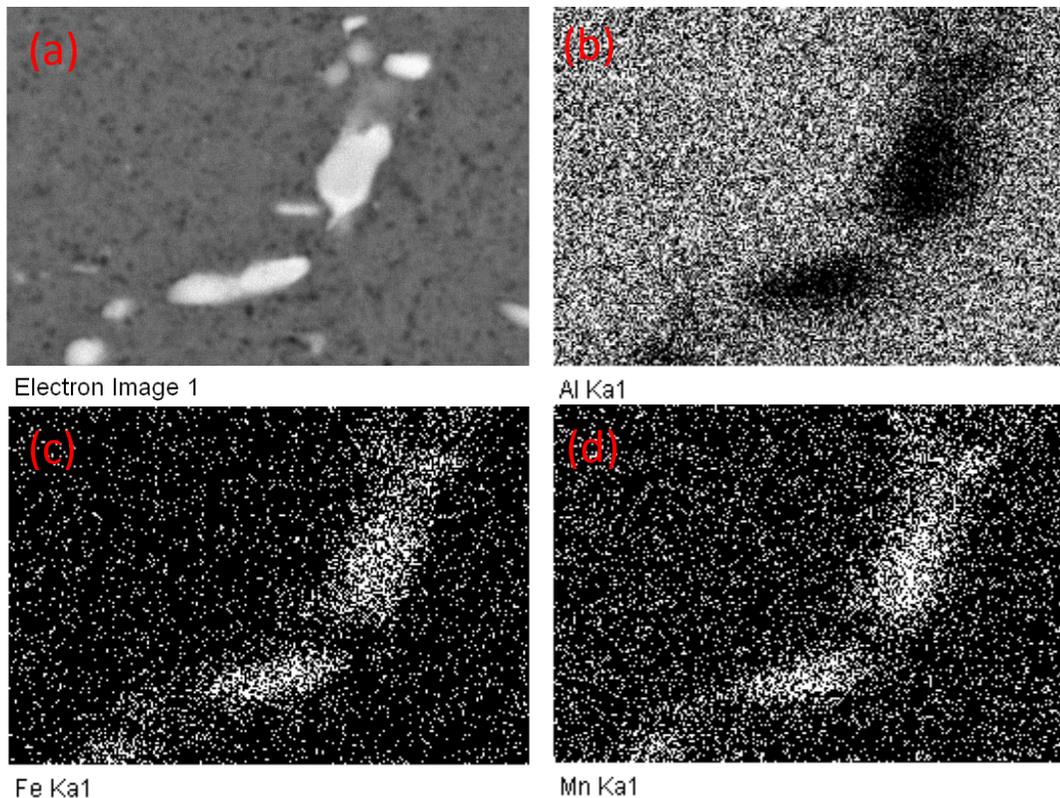
รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

และเมื่อนำตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของธาตุผสม โดยวิธีการแมปปิง (mapping) พบว่ามีการกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe), แมงกานีส (Mn) เกิดขึ้นบนโครงสร้างดังแสดงผลในรูป 4.23

จากรูป 4.23 (a) เป็นภาพโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศซึ่งถ่าย

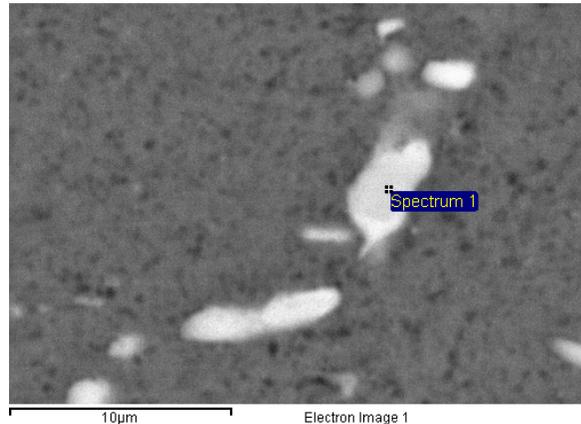
ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่าและใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสม

จากรูป 4.23 (b), (c) และ (d) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุอะลูมิเนียม, เหล็ก และแมงกานีสตรงบริเวณอ้างอิง ซึ่งพบว่าธาตุอะลูมิเนียม, เหล็กและแมงกานีสมีการแพร่กระจายที่มีลักษณะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนสีขาวตรงตำแหน่งของอินเตอร์เมทัลลิกที่มีความชัดเจนเช่นเดียวกับแท่งตัวอย่างอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ใช้เวลาอบแห้งที่สั้นกว่า 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.23 (a) บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ, (b) การกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม, (c) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก, (d) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส

และจากการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมตรงบริเวณโครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสโดยเทคนิค SEM-EDS พบว่าปริมาณธาตุเหล็ก, แมงกานีสและซิลิกอนที่วิเคราะห์ได้มีค่าที่สูงกว่าเมื่อเทียบแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ใช้เวลาอบแช่ที่สั้นกว่า 4 ชั่วโมง โดยมีค่าอยู่ที่ 8.84%, 10.79% และ 0.34% ตามลำดับ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.7



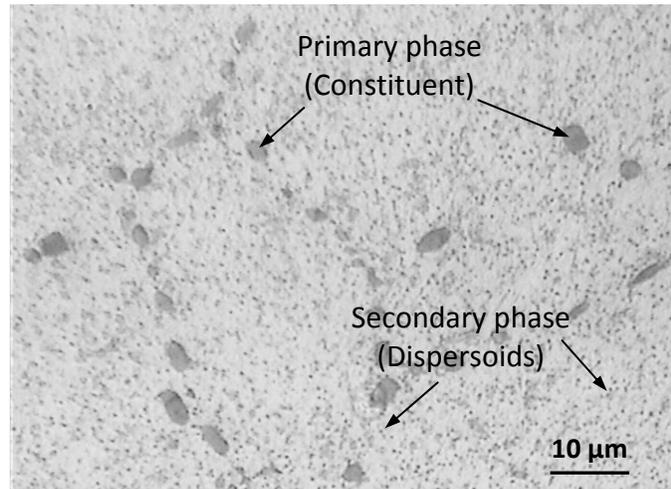
รูปที่ 4.24 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณโครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS

Element	Al K	Fe K	Mn K	Si K	Total
Weight%	80.03	8.84	10.79	0.34	100.00
Atomic%	88.99	4.75	5.90	0.36	

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมที่ได้จากการทำ Mapping และผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมตรงบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสโดยใช้เทคนิค SEM-EDS แสดงให้เห็นแนวโน้มว่าปริมาณธาตุผสมของเหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) และซิลิกอน มีการรวมตัวกันเป็นสารประกอบที่อยู่ในรูปของ α -Al(Mn,Fe)Si ในปริมาณที่มากขึ้นและมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น (constituent) แปรผันตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบไฮโมจิไนซ์ที่สูงและระยะเวลาของการอบแช่ที่นานขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงลักษณะการตกตะกอนของอนุภาคนาขนาดเล็กๆ ที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างพื้นจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงตามที่แสดงในรูปที่ 4.25 แล้วพบว่ายังคงมีการกระจายตัวในปริมาณที่มีความ

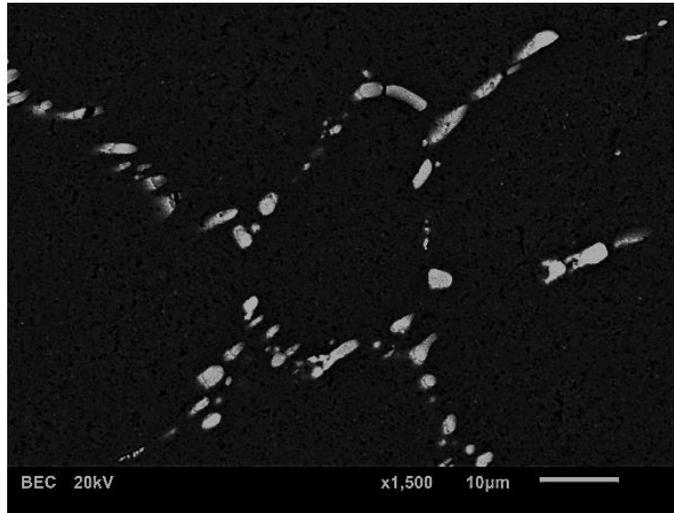
หนาแน่นใกล้เคียงกับตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ที่ปล่อยให้มีการเย็นตัวในอากาศเหมือนกัน



รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

4.1.8 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

จากการนำแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงทำการตรวจสอบบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าลักษณะโครงข่ายร่างแหของอนุภาคของสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกเฟสที่อยู่ตามบริเวณตำแหน่งของขอบเกรนนั้นมีการกระจายและแตกออกเป็นปล้องๆ ในปริมาณที่มากขึ้น มีลักษณะที่กลมมนและมีขนาดที่โตขึ้นเช่นเดียวกับแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง

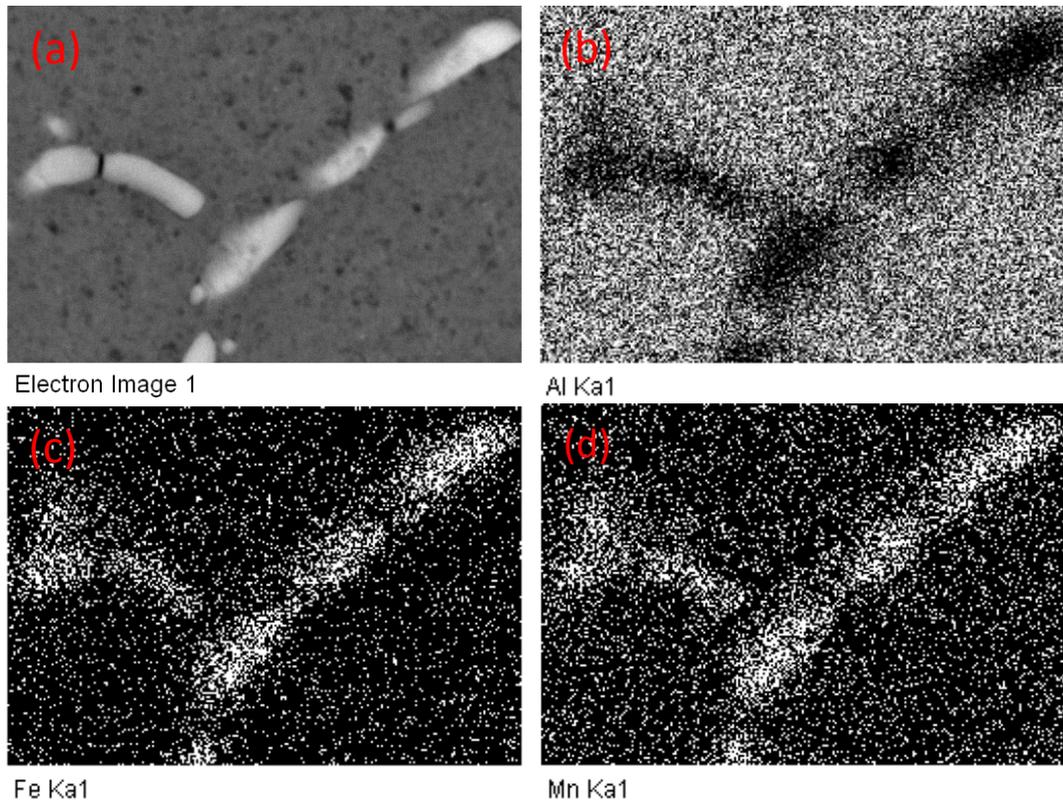


รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

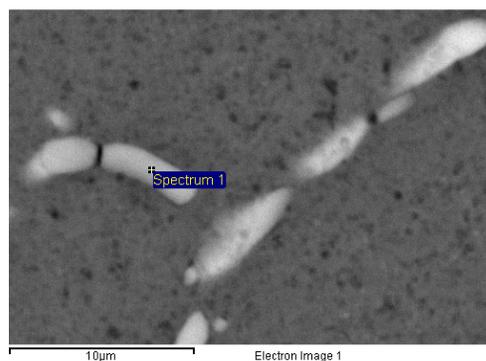
และเมื่อนำตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของธาตุผสมโดยวิธีการแมปปิง (mapping) พบว่ามีการกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe), แมงกานีส (Mn) เกิดขึ้นบนโครงสร้างดังแสดงผลในรูป 4.27

จากรูป 4.27 (a) เป็นภาพโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่าซึ่งใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสม

จากรูป 4.27 (b), (c) และ (d) เป็นภาพแสดงการตรวจหาปริมาณและตำแหน่งของธาตุอะลูมิเนียม, เหล็ก และแมงกานีสตรงบริเวณอ้างอิง ซึ่งพบว่าธาตุอะลูมิเนียม, เหล็ก และแมงกานีสมีการแพร่กระจายที่มีลักษณะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนสีขาวตรงตำแหน่งของอินเตอร์เมทัลลิกที่มีความชัดเจนเช่นเดียวกับแท่งตัวอย่างอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



รูปที่ 4.27 (a) บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อใหม่ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง, (b) การกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม, (c) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก, (d) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส

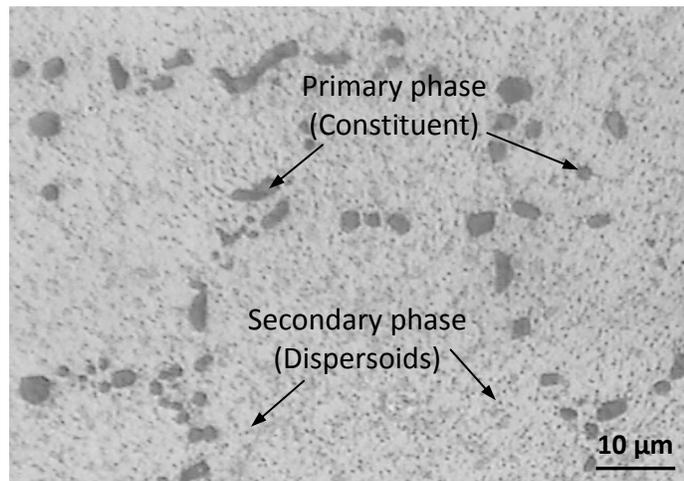


รูปที่ 4.28 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อใหม่ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณ โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS

Element	Al K	Fe K	Mn K	Si K	Total
Weight%	80.73	9.41	9.74	0.12	100.00
Atomic%	89.52	5.04	5.31	0.13	

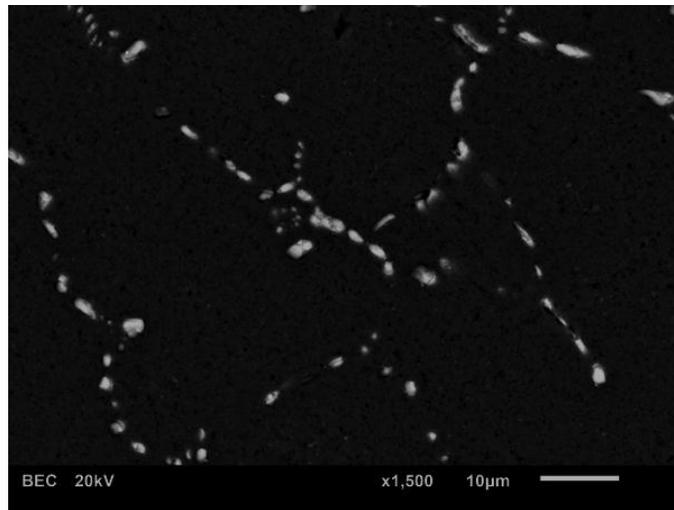
จากตารางที่ 4.8 เป็นผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมบริเวณ โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟส ซึ่งพบว่า ปริมาณธาตุหลัก, แมงกานีสและซิลิกอนที่วิเคราะห์ได้มีค่าอยู่ที่ 9.41%, 9.74% และ 0.12% ตามลำดับ โดย ธาตุผสมเหล่านี้มีการรวมตัวกันเป็นสารประกอบที่อยู่ในรูปของ α -Al(Mn,Fe)Si ที่มีปริมาณธาตุผสมและ ขนาดของอนุภาค Constituent ที่ใกล้เคียงกับแท่งตัวอย่างอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการตกตะกอนของ อนุภาคขนาดเล็กๆ ที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างพื้นจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ตามที่แสดงในรูปที่ 4.29 แล้วพบว่าปริมาณการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็กๆ (dispersoids) ที่ ตกตะกอนบนโครงสร้างพื้นจะมีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่าน กระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบ ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง



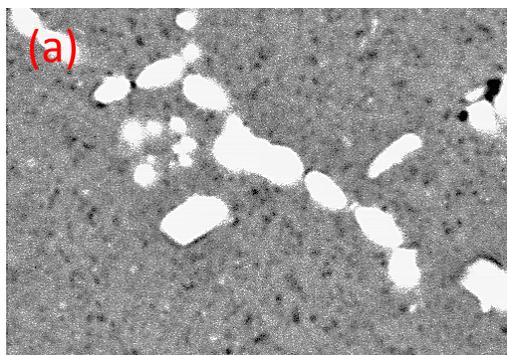
รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่าน กระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบ ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง

4.1.9 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศ

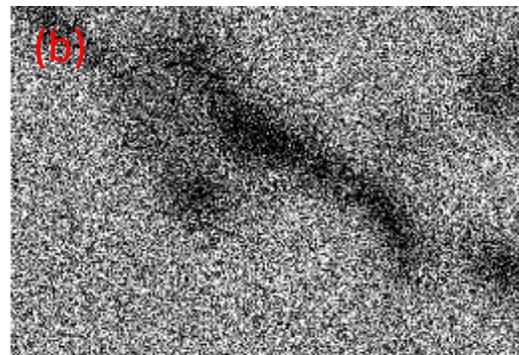
จากรูปที่ 4.30, 4.31, 4.32 และ 4.33 เป็นภาพถ่ายบริเวณอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า, รูปวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมโดยวิธีการทำแมปปิง (mapping), รูปการวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมตรงบริเวณ โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS และรูปถ่ายของการกระจายตัวและตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กๆบนโครงสร้างพื้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ทางบริษัทฯของผู้ทำการศึกษาวิจัยปฏิบัติงานอยู่นำเข้ามาจากต่างประเทศและทางผู้วิจัยเองไม่ทราบถึงกระบวนการผลิตที่แท้จริง



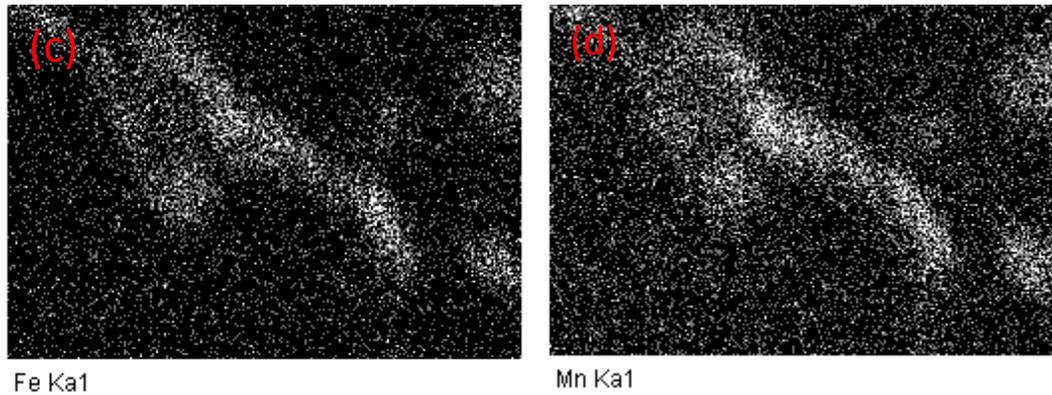
รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศ



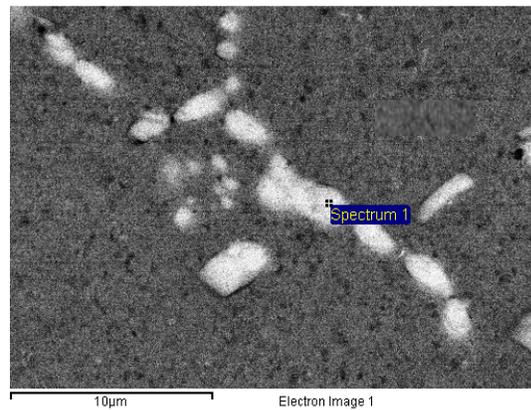
Electron Image 1



Al Ka1



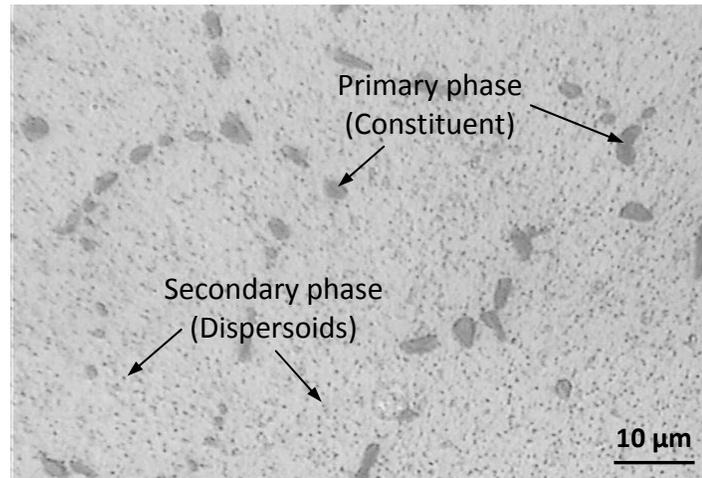
รูปที่ 4.31 (a) บริเวณที่ใช้วิธีการ Mapping วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ, (b) การกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม, (c) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก, (d) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส



รูปที่ 4.32 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

ตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณธาตุผสมบริเวณ โครงสร้างอินเตอร์เมทัลลิกเฟสด้วยวิธีการทำ SEM-EDS

Element	Al K	Fe K	Mn K	Si K	Total
Weight%	84.20	6.77	9.02	0.01	100.00
Atomic%	89.70	5.32	4.97	0.01	



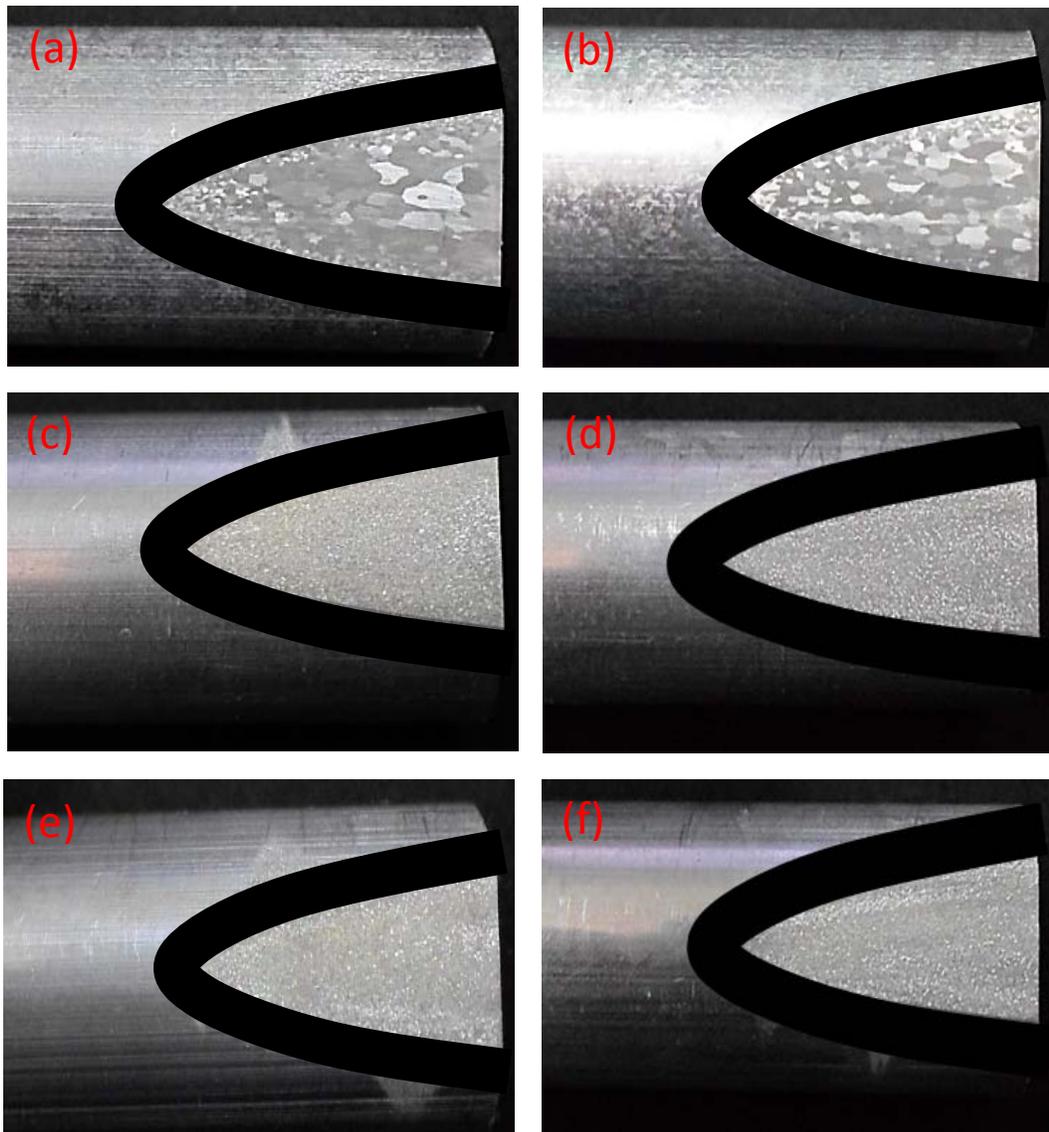
รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

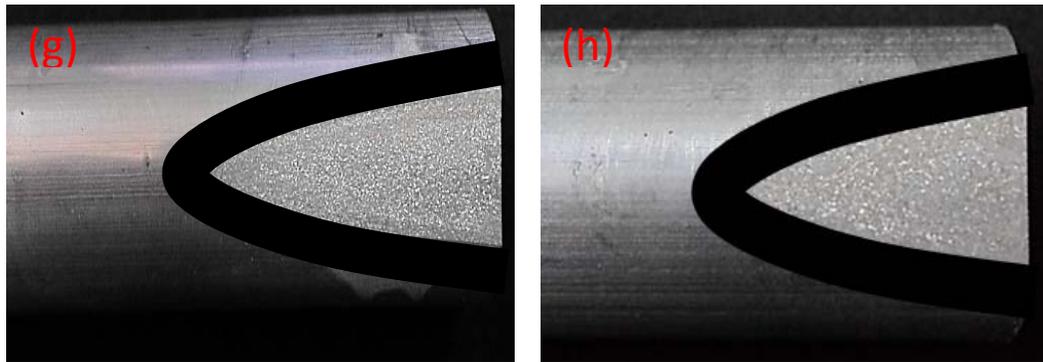
จากผลการตรวจสอบตัวอย่างแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้ามาจากต่างประเทศพบว่าอนุภาคของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกเฟสที่อยู่ตามบริเวณตำแหน่งของขอบเกรนมีลักษณะของการกระจายตัวและแตกออกเป็นปล้องๆที่มีรูปร่างกลมมนและมีขนาดที่ใกล้เคียงกับแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ทางผู้ศึกษาวิจัยได้ทำผลิตและทดลองอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และจากการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของธาตุผสมโดยวิธีการแมปปิง (mapping) พบว่าการกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe), แมงกานีส (Mn) มีการรวมตัวกันที่เด่นชัดอยู่ตรงบริเวณบนอินเทอร์เมทัลลิกเฟส โดยมีปริมาณธาตุผสมของเหล็ก, แมงกานีสและซิลิกอนตรงบริเวณดังกล่าวมีค่าอยู่ที่ 6.77%, 9.02% และ 0.01% ตามลำดับ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าธาตุผสมเหล่านี้มีการรวมตัวกันเป็นสารประกอบที่อยู่ในรูปของ $\alpha\text{-Al(Mn,Fe)Si}$ หรืออาจจะอยู่ในรูปของ $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของธาตุซิลิกอนที่ตรวจพบมีค่าที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผู้ศึกษาวิจัยได้ทำผลิตและทดลองอบไฮโมจีไนซ์

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการตกตะกอนของอนุภาคนาขนาดเล็กๆ ที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างพื้นจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงตามที่แสดงในรูปที่ 4.33 แล้วพบว่าการกระจายตัวของอนุภาคนาขนาดเล็กๆ (dispersoids) ที่ตกตะกอนอยู่บนโครงสร้างพื้นในลักษณะที่มีปริมาณความหนาแน่นไม่มากเช่นเดียวกับแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผู้ศึกษาวิจัยได้ทำการทดลองอบไฮโมจีไนซ์และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

4.2 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานท่อหลังกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป

จากการนำเอาแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทหมายเลข 3003 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 178 มิลลิเมตร ยาว 350 มิลลิเมตร ที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนส์และที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนส์ที่อุณหภูมิ เวลา และรูปแบบการอบที่แตกต่างกันทั้งหมดมาทำการอัดรีดขึ้นรูปร้อน (hot extrusion) เป็นชิ้นงานท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.0 มิลลิเมตร ความหนา 1.2 มิลลิเมตร ภายใต้การกำหนดพารามิเตอร์ในการอัดรีดขึ้นรูปที่เหมือนกันทุกบิลเลท จากนั้นนำตัวอย่างชิ้นงานท่อมาทำการตัดปาดผิวทำมุมประมาณ 5.7 องศา จากผิวด้านนอก OD ถึงผิวด้านใน ID เพื่อเปรียบเทียบขนาดเกรนที่ได้ของแต่ละชิ้นงานตัวอย่างในระดับมหภาค ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.34





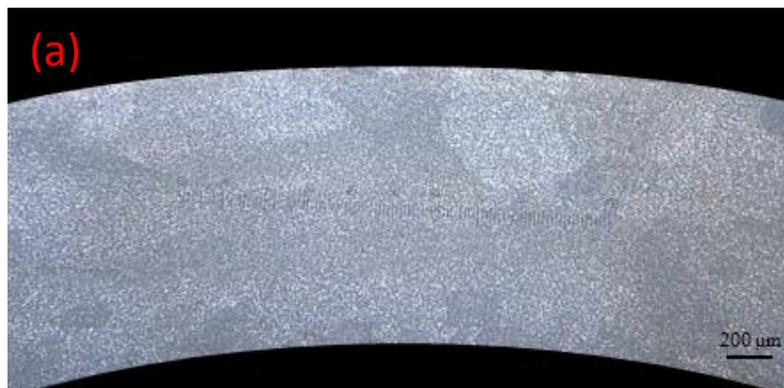
รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานตัวอย่างต่อหลังจากกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกันเมื่อ

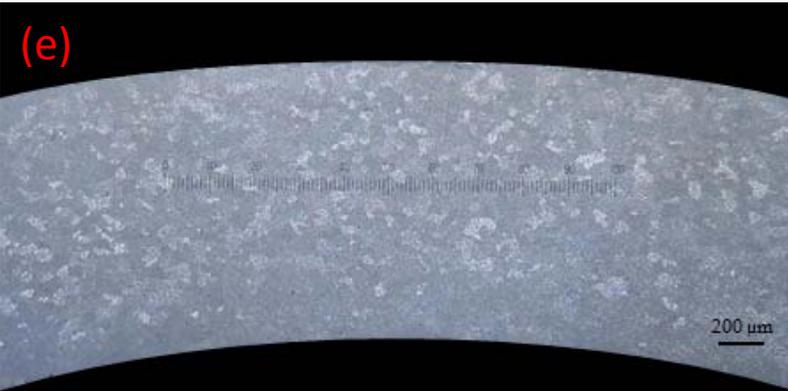
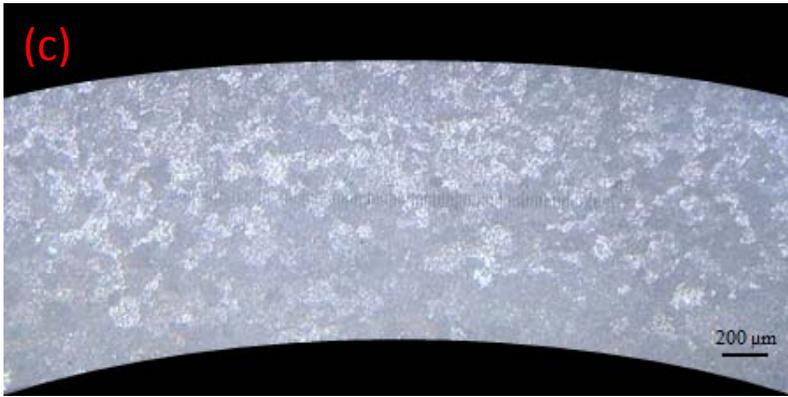
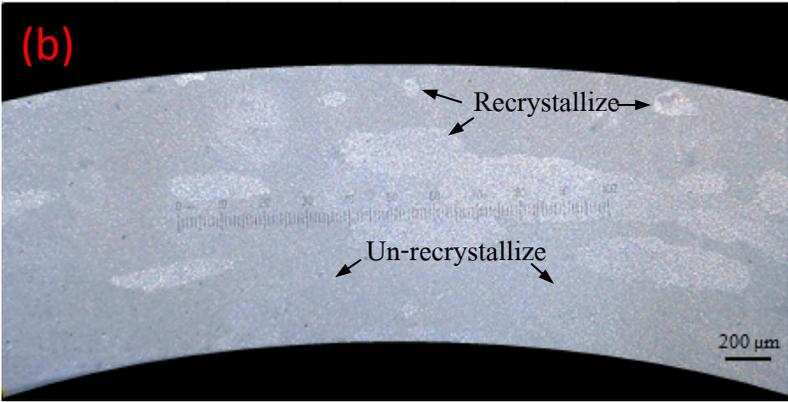
- (a) Billet no.1 ที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ (As cast)
- (b) Billet no.2 อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (c) Billet no.3 อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (d) Billet no.4 อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (e) Billet no.5 อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื้อที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (f) Billet no.6 อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (g) Billet no.7 อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื้อที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (h) Billet no.8 ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ (ไม่ทราบถึงรูปแบบการผลิต)

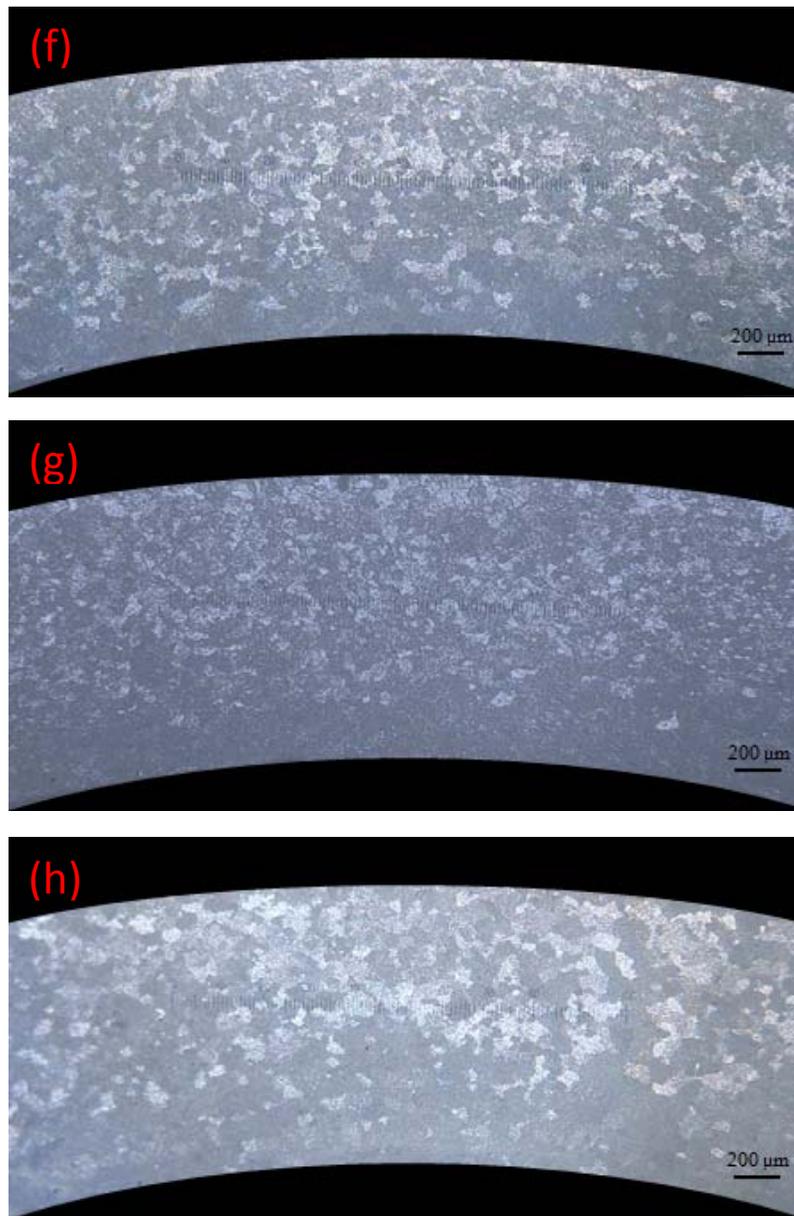
จากรูปที่ 4.34 แสดงผลการเปรียบเทียบขนาดเกรนในระดับมหภาคของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด ซึ่งพบว่าชิ้นงานตัวอย่างต่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์และที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ มีขนาดของเกรนที่หยาบมาก สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้อย่างชัดเจนดังแสดงในรูป 4.34 (a), (b) ในขณะที่ชิ้นงานตัวอย่างต่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์ในรูปแบบอื่นๆ และ ชิ้นงานตัวอย่างต่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้ามาจากต่างประเทศมีขนาดของเกรนที่ละเอียดและใกล้เคียงกันเมื่อมองในระดับมหภาค ดังแสดงในรูป 4.34 (c) ถึง 4.34 (h) ตามลำดับ

4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานท่อหลังกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป

จากรูปที่ 4.35 เป็นภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในแนวตัดขวางของชิ้นงานตัวอย่างท่อทั้งหมดเพื่อเปรียบเทียบขนาดเกรนในระดับจุลภาค ซึ่งพบว่าชิ้นงานตัวอย่างท่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลขที่ไม่นำผ่านกระบวนการโฮโมจิไนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 (a) มีลักษณะของเกรนที่หยาบกระจายเต็มพื้นที่หน้าตัดและมีขนาดเกรนที่ใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างท่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลขที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและตัวอย่างท่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลขที่ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนซ์ในรูปแบบอื่นๆ ส่วนแท่งบิลเลขที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ปรากฏโครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะของการเกิดผลึกใหม่ที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากมีการเกิดผลึกใหม่ขึ้นมาเป็นบางส่วน (partial recrystallize) ปนอยู่กับโครงสร้างเดิมของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลขที่มีลักษณะที่เป็นไฟเบอร์ (fibrous structure) ปรากฏอยู่บนหน้าตัดของชิ้นงาน โดยผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นนี้มีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ มีทั้งขนาดเกรนที่ใหญ่และเล็กปนกันอยู่ดังแสดงในรูป 4.35 (b) ในขณะที่ชิ้นงานตัวอย่างท่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลขที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C, 615°C นาน 4 ชั่วโมง และ 615°C นาน 8 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และชิ้นงานตัวอย่างท่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลขที่นำเข้ามาจากต่างประเทศมีลักษณะของการเกิดผลึกใหม่ที่สมบูรณ์บนพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน โดยลักษณะของเกรนที่ได้จะมีความละเอียดและมีขนาดใกล้เคียงกันดังแสดงในรูป 4.35 (c), (d), (f), (h) ตามลำดับ ในส่วนของชิ้นงานตัวอย่างท่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลขที่ผ่านกระบวนการอบโฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 และ 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง พบว่ามีลักษณะของการเกิดผลึกใหม่ที่สมบูรณ์บนพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเช่นเดียวกัน มีขนาดของเกรนที่ใกล้เคียงกันและมีความละเอียดของเกรนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานตัวอย่างท่อทั้งหมด ดังแสดงในรูป 4.35 (e), (g) ตามลำดับ







รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการอบความร้อนรูปรีดขึ้นรูปร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกันเมื่อ

- (a) Billet no.1 ที่ไม่ผ่านการอบโซลิวไนซ์ (As cast)
- (b) Billet no.2 อบโซลิวไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (c) Billet no.3 อบโซลิวไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (d) Billet no.4 อบโซลิวไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

- (e) Billet no.5 ออบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (f) Billet no.6 ออบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (g) Billet no.7 ออบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (h) Billet no.8 ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ (ไม่ทราบถึงรูปแบบการผลิต)

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบลักษณะของขนาดเกรนที่ได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างต่อหลังจากกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อน

ตัวอย่างชิ้นงานต่อจาก แท่งอะลูมิเนียมบิลเลต	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
ลักษณะเกรนจาก ภาพถ่ายโครงสร้าง จุลภาค	หยาบ	หยาบ	ละเอียด	ละเอียด	ละเอียด มาก	ละเอียด	ละเอียด มาก	ละเอียด

จากพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานต่อภายหลังจากกระบวนการอัดรีดร้อน พบว่ามีความสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์และที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ในแต่ละรูปแบบที่แตกต่างกัน และมีความสอดคล้องกับทฤษฎีเรื่องกลไกยับยั้งหรือขัดขวางการเกิดผลึกใหม่จาก Pinning effect หรือ Zener drag ที่กล่าวไว้ว่า อนุภาคขนาดเล็ก (dispersoids) ที่ตกตะกอนนั้นเปรียบเสมือนกับแท่งเข็ม (pinning) ที่ปักอยู่ตามขอบเกรน ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กๆ ที่ตกตะกอนนี้จะมีอะตอมที่มีแรงยึดเหนี่ยวกับโครงสร้างพื้นที่สูง (coherent) ทำให้ป้องกันการเคลื่อนที่ของขอบเกรนหรือทำให้ขอบเกรนมีการเคลื่อนที่ช้าลงระหว่างที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยแรงปักของอนุภาคแท่งเข็มที่อยู่ตามบริเวณขอบเกรนจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญคือปริมาณกระจายตัวและขนาดของอนุภาคที่ตกตะกอน โดยอนุภาคตะกอนที่มีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวในปริมาณที่มีความหนาแน่นสูงจะส่งผลให้อะตอมมีแรงยึดเหนี่ยวกับโครงสร้างพื้นที่สูงกว่าอนุภาคตะกอนที่มีขนาดใหญ่และมีการกระจายตัวในปริมาณที่มีความหนาแน่นต่ำ [21]

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ก่อนนำมาผ่านกระบวนการอัดรีด พบว่าธาตุแมงกานีสส่วนใหญ่จะละลายอยู่ในรูปของสารละลาย

ของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturated solid solution) และไม่มีตะกอนขนาดเล็กๆเกิดขึ้นบนบริเวณโครงสร้างพื้นนั้น เป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้เกรนย่อยที่เกิดขึ้นตามแนวเส้นขอบเกรนเดิมในระหว่างกระบวนการอัตรัดร้อนตรงบริเวณก่อนทางออกของแม่พิมพ์ [19] มีการเคลื่อนตัวและขยายตัวโดยอิสระกลายเป็นนิวเคลียสของการเกิดผลึกใหม่ที่มีขนาดโตมากขึ้นเนื่องจากไม่มีอนุภาคของตะกอนขนาดเล็ก (dispersoids) ที่คอยขัดขวางการเคลื่อนที่ของขอบเกรน ส่งผลให้มีการรวมตัวกันกลายเป็นเกรนที่ใหญ่จากแรงขับเคลื่อนของพลังงานความเครียดจากการอัตรัดบริเวณปากแม่พิมพ์

ในส่วนของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิในซ้ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ซึ่งจากผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านมาพบว่าการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก (dispersoids) มีการกระจายตัวที่มีความหนาแน่นสูงมากเกิดขึ้นอยู่บนโครงสร้างพื้น ส่งผลให้ชิ้นงานต่อหลังจากกระบวนการอัตรัดร้อนมีลักษณะการเกิดผลึกใหม่ที่ไม่สมบูรณ์ โดยจะมีผลึกใหม่เกิดขึ้นแค่เป็นบางส่วน (partial recrystallize) และมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณขอบเกรนเดิมส่วนหนึ่งจะถูกขัดขวางการเคลื่อนที่และยับยั้งการเกิดผลึกใหม่ด้วยอนุภาคขนาดเล็กๆที่มีปริมาณความหนาแน่นสูงและมีแรงยึดเหนี่ยวสูงตามกลไก Pining effect หรือ Zener drag [21] ในขณะที่ขอบเกรนอีกส่วนหนึ่งจะเกิดเกรนย่อยที่กลายเป็นนิวเคลียสและนำไปสู่การขยายตัวของเกรนที่มีขนาดแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่ ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้สนับสนุนผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยของ Hsin-Wen Huang และคณะ [19] ที่ได้ศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่ในการอัตรัดขึ้นรูปร้อนของแท่งอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 3003 ที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิในซ้ที่อุณหภูมิ 480°C ทำให้ผลของการเกิดผลึกใหม่ในชิ้นงานเกิดขึ้นแค่เป็นบางส่วน (partial recrystallize) เช่นเดียวกับผลการทดลองนี้

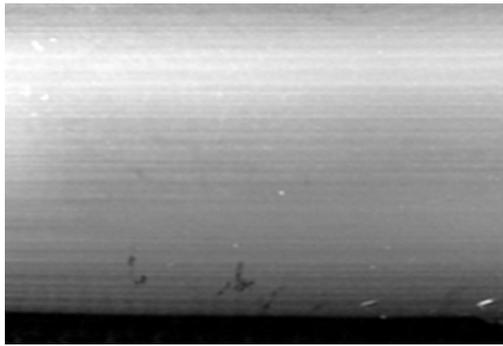
ในส่วนของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิในซ้ที่อุณหภูมิ 585°C, 615°C นาน 4 ชั่วโมง และ 615°C นาน 8 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และชิ้นงานตัวอย่างที่อัตรัดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งจากผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคพบว่ามีปริมาณของอนุภาคตะกอนขนาดเล็กๆในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่มีปริมาณความหนาแน่นที่น้อยกว่าแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิในซ้ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงนั้นเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของอนุภาคขนาดเล็กกับโครงสร้างพื้นและบริเวณขอบเกรนมีค่าที่ต่ำลงตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ เป็นเหตุให้ไม่สามารถยับยั้งการเคลื่อนที่ของขอบเกรนได้ ทำให้มีเกรนย่อยเกิดขึ้นตามแนวเส้นขอบเกรนเดิมเป็นจำนวนมาก แต่เกรนย่อยเหล่านี้จะไม่สามารถเคลื่อนตัวและขยายตัวให้กลายเป็นนิวเคลียสของการเกิดผลึกใหม่ที่มีขนาดใหญ่ได้ เพราะขอบเกรนจะถูกขัดขวาง

และจำกัดการเคลื่อนที่จากอนุภาคตะกอนขนาดเล็กที่ตรงพื้นที่อยู่ ส่งผลให้เกรนที่ได้มีขนาดที่เล็กลง เช่นเดียวกับอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 และ 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง ซึ่งอาจมีพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่จากเกรนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นตามแนวเส้นขอบเกรนในลักษณะเดียวกัน แต่เนื่องจากปริมาณของอนุภาคที่ตกตะกอนที่มีความหนาแน่นมากกว่า จึงทำให้ขอบเกรนถูกขัดขวางและจำกัดการเคลื่อนที่ได้มากกว่า ส่งผลให้มีปริมาณนิวเคลียสที่มากขึ้นและได้เกรนที่มีขนาดเล็กและละเอียดขึ้น

4.4 ผลทดสอบการเกิดปัญหาผิวส้ม (Orange peel surface)

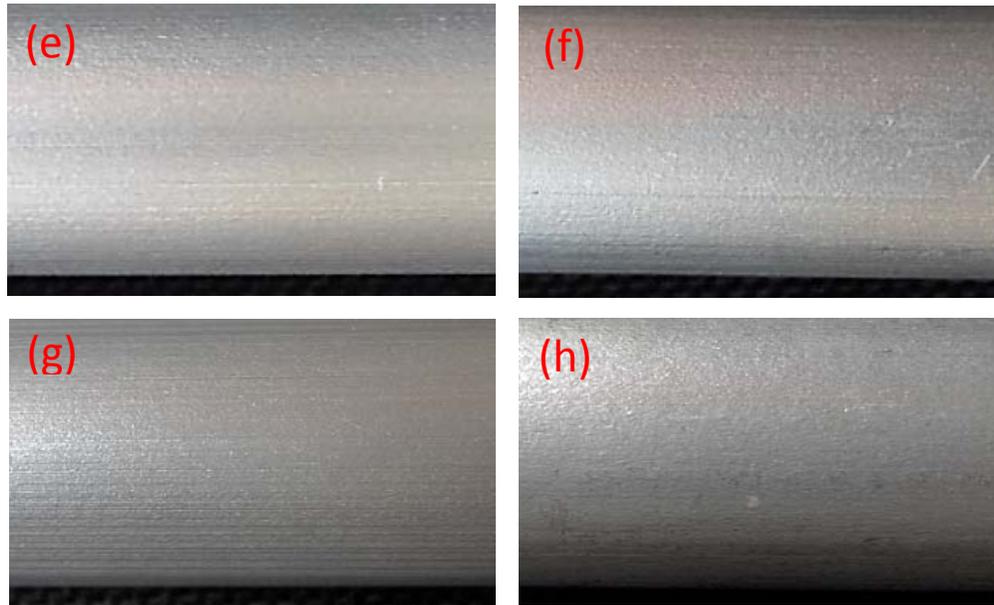
จากการนำเอาชิ้นงานตัวอย่างท่อที่ผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อน (hot extrusion) จากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลททั้งหมดมาทำการทดสอบการเกิดปัญหาผิวส้มโดยการดึงขึ้นรูปเส้นด้วยเครื่องดึง Tensile ในอัตราความเร็วคงที่ 50 มิลลิเมตร/นาทิจากแรงดึงเริ่มต้นจนถึงแรงดึงที่ 6,000 นิวตัน จากนั้นหยุดการดึงและนำชิ้นงานมาตรวจสอบลักษณะการเกิดผิวส้มและตรวจวัดค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ย (Ra) ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.37 และตารางที่ 4.11 พบว่าชิ้นงานท่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์และนำไปทำการดึงขึ้นรูปเส้นจะเกิดลักษณะของผิวเปลือกส้มบนผิวชิ้นงาน (orange peel surface) ที่รุนแรงมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและมีค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยมากที่สุดที่ 8.625 ไมครอน เช่นเดียวกับชิ้นงานท่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศซึ่งมีลักษณะของผิวหยาบที่รุนแรงรองลงมา สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยมีค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 5.129 ไมครอน ส่วนชิ้นงานตัวอย่างท่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C, 615°C นาน 4 ชั่วโมง และ 615°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ พบว่ามีลักษณะของผิวเปลือกส้มเกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานน้อยมากเมื่อมองด้วยสายตา โดยมีค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยจากการวัดอยู่ที่ 2.339, 2.048 และ 2.023 ไมครอนตามลำดับ ซึ่งความหยาบผิวโดยเฉลี่ยที่ได้นี้มีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานตัวอย่างท่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 2.292 ไมครอน และเป็นเกณฑ์ความหยาบผิวในระดับคุณภาพที่ลูกค้ายอมรับได้เพราะเมื่อมองด้วยสายตาปกติแล้วจะไม่เห็นลักษณะความหยาบเป็นผิวเปลือกส้มที่รุนแรง ส่วนชิ้นงานตัวอย่างท่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 และ 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง พบว่ามีความหยาบผิวที่ใกล้เคียงกันและมีความหยาบผิวน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด โดยมีค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยที่ 1.755 และ 1.719 ไมครอน ตามลำดับ

จากผลการตรวจสอบระดับความหยาบผิวของชิ้นงานท่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อนและนำไปดิ่งขึ้นรูปเย็น พบว่าระดับความหยาบของผิวท่อมีความสัมพันธ์และสอดคล้องกับขนาดของเกรนในระดับจุลภาคที่วิเคราะห์ได้ กล่าวคือขนาดของเกรนที่ใหญ่จะส่งผลให้ผิวของชิ้นงานท่อภายหลังการดิ่งขึ้นรูปเย็นจะมีค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยที่สูง มีความหยาบผิวที่รุนแรงและสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าที่ชัดเจนมากกว่าชิ้นงานท่อที่มีขนาดเกรนเล็กกว่าที่มีค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยต่ำและไม่ปรากฏลักษณะความหยาบผิวที่รุนแรงหลังผ่านการดิ่งขึ้นรูปเย็น



รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายบริเวณผิวของผิวชิ้นงานตัวอย่างก่อนนำไปทำการดิ่งขึ้นรูปเย็น



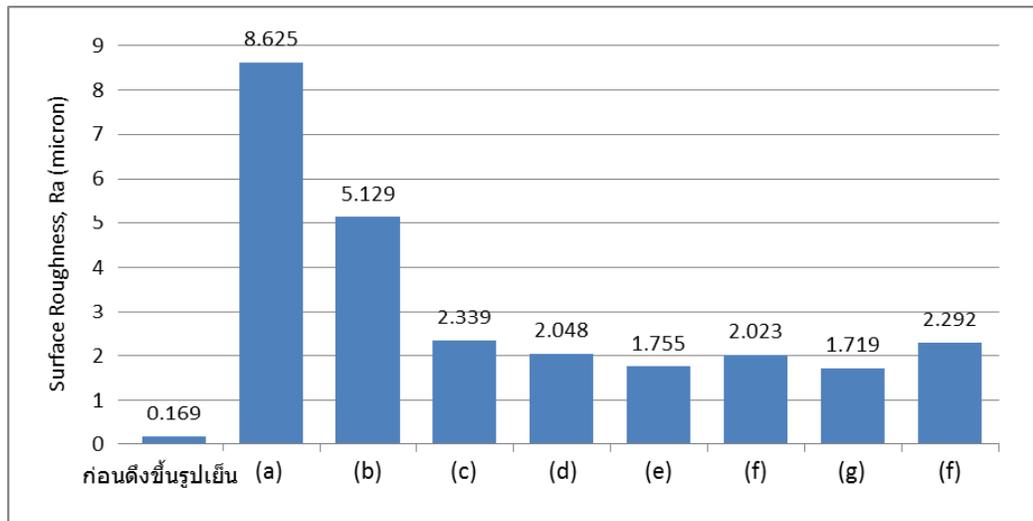


รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายบริเวณผิวของชิ้นงานตัวอย่างต่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลตที่แตกต่างกันและนำไปทำการดึงขึ้นรูปเย็นเมื่อ

- (a) Billet no.1 ที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ (As cast)
- (b) Billet no.2 อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (c) Billet no.3 อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (d) Billet no.4 อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (e) Billet no.5 อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (f) Billet no.6 อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (g) Billet no.7 อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
- (h) Billet no.8 ที่นำเข้าจากต่างประเทศ (ไม่ทราบถึงรูปแบบการผลิต)

ตารางที่ 4.11 ผลการตรวจวัดค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ย (Ra) ของชิ้นงานท่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกันและนำไปดัดขึ้นรูปเย็น

Speciment	รูปแบบการอบไฮโมจิไนซ์	ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ย, Ra (ไมครอน)			ค่าเฉลี่ยรวม
		จุดวัดที่ 1	จุดวัดที่ 2	จุดวัดที่ 3	
ผิวชิ้นงานท่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อนก่อนการดัดขึ้นรูปเย็น		0.156	0.172	0.178	0.169
(a)	บิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ (As cast)	7.781	9.355	8.740	8.625
(b)	อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	5.336	5.241	4.811	5.129
(c)	อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	2.203	2.412	2.401	2.339
(d)	อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	2.005	2.018	2.120	2.048
(e)	อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบ และอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง	1.780	1.880	1.606	1.755
(f)	อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	2.071	1.935	2.064	2.023
(g)	อบไฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบ และอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง	1.670	1.608	1.880	1.719
(h)	บิลเลทนำเข้าจากต่างประเทศ	2.403	2.111	2.363	2.292



รูปที่ 4.38 กราฟแท่งเปรียบเทียบผลการตรวจวัดค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของชิ้นงานต่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกันและนำไปดึงขึ้นรูปเย็น

4.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

จากตารางที่ 4.12 และกราฟแท่งในรูปที่ 4.39 เป็นผลการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.0 มิลลิเมตร ความหนา 1.2 มิลลิเมตร ที่ได้จากการอบร้อนแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกัน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานต่อที่ได้จากการอัดรีดขึ้นรูปร้อนแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรเจนไนซ์ มีค่าความเค้นแรงดึง (tensile strength) และค่าความเค้นพิสูจน์ (proof stress) ที่สูงกว่าชิ้นงานต่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทในรูปแบบอื่นๆ โดยที่ค่าอยู่ที่ 138.18 และ 55.15 Mpa. ตามลำดับ ยกเว้นในกรณีของชิ้นงานต่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรเจนไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง ที่พบว่ามีความเค้นแรงดึงที่สูงใกล้เคียงกันแต่มีค่าความเค้นพิสูจน์ที่ต่ำกว่าเล็กน้อยโดยที่ค่าอยู่ที่ 138.91 และ 53.18 Mpa. ตามลำดับ

ในส่วนของชิ้นงานต่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโดรเจนไนซ์แบบสเตปเดียวที่อุณหภูมิ 585°C, 615°C นาน 4 ชั่วโมง และ 618°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศรวมถึงชิ้นงานต่อที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่นำเข้าจากต่างประเทศ พบว่ามีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าของความเค้นแรงดึง (tensile strength) อยู่ในช่วง 127.07-128.61 Mpa. และมีค่าความเค้นพิสูจน์ (proof stress) อยู่ในช่วง และ 49.07 – 51.35 Mpa.

ในขณะที่ชิ้นงานที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์แบบสองสเตปที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 และ 8 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง พบว่ามีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกันและมีค่าที่สูงกว่าชิ้นงานที่อัดรีดจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์แบบสเตปเดียวเล็กน้อย โดยมีค่าของความเค้นแรงดึง (tensile strength) อยู่ในช่วง 129.93 – 131.51 Mpa. และมีค่าความเค้นพิสูจน์ (proof stress) อยู่ในช่วง และ 52.67 – 54.09 Mpa.

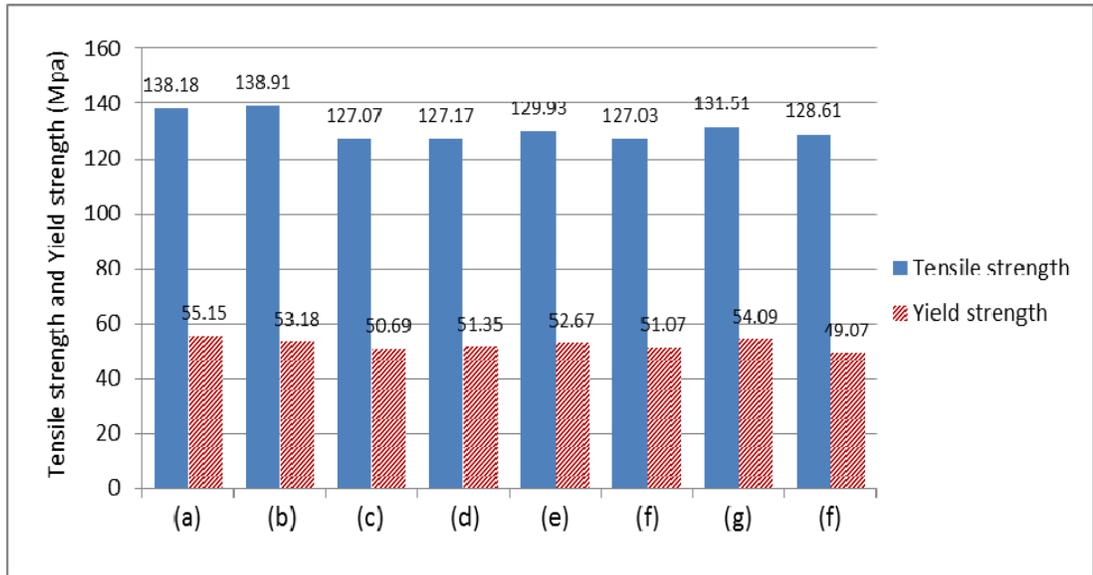
จากผลของสมบัติเชิงกลที่ทดสอบได้ เมื่อนำไปพิจารณาร่วมกับขนาดของเกรนที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานก่อนการดึงขึ้นรูปเย็น พบว่ามีความสอดคล้องกันของชิ้นงานที่อยู่ในกลุ่มที่อบไฮโมจิไนซ์แบบสเตปเดียวที่อุณหภูมิ 585°C , 615°C นาน 4 ชั่วโมง และ 615°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ซึ่งมีขนาดเกรนที่ละเอียดใกล้เคียงกันจะให้ผลของสมบัติเชิงกลที่มีค่าใกล้เคียงกัน และจะมีค่าโดยรวมที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่อัดรีดขึ้นรูปจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์แบบสองสเตปที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 และ 8 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบและอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมงซึ่งมีขนาดเกรนที่ละเอียดมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากขนาดเกรนที่ละเอียดกว่าจะมีจำนวนของขอบเกรนในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (dislocation) ที่มากกว่า ในระหว่างการเสียรูปของชิ้นงาน [1]

สำหรับชิ้นงานที่ที่ได้จากการอัดรีดขึ้นรูปร้อนแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ซึ่งมีขนาดของเกรนที่หยาบมากแต่ให้ผลของสมบัติเชิงกลที่มีค่าสูงนั้น วิเคราะห์ได้ว่าสมบัติเชิงกลที่ได้ อาจเป็นผลมาจากกลไกสารละลายของแข็ง (solid solution strengthening) ของอะตอมธาตุแมงกานีสจำนวนมากที่ละลายแทรกตัวเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของอะลูมิเนียม [1] ทั้งนี้สืบเนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจิไนซ์ตามหัวข้อ 4.2.2 ที่ให้ผลวิเคราะห์ว่าธาตุแมงกานีสส่วนใหญ่จะละลายอยู่ในรูปของสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดในแท่งอะลูมิเนียมบิลเลท เมื่อนำแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทนี้มาทำการอัดรีดขึ้นรูปโดยผ่านกระบวนการทางความร้อนที่เกิดขึ้น $500 - 530^{\circ}\text{C}$ โดยประมาณจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแท่งบิลเลทก่อนการอัดรีดและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการอัดรีด แม้ว่าอุณหภูมินี้เป็นช่วงอุณหภูมิที่ธาตุแมงกานีสสามารถตกตะกอนออกมาจากสารละลายของแข็งได้ [1] แต่เนื่องจากกระบวนการทางความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เป็นเพียงระยะเวลาสั้นๆของกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อน จึงทำให้ธาตุแมงกานีสจำนวนมากยังคงอยู่ในรูปของสารละลายของแข็ง

ในส่วนชิ้นงานท่อที่ได้จากการอัดรีดขึ้นรูปร้อนแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ ที่อุณหภูมิค่า 480°C นาน 8 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ แม้จะมีลักษณะของการเกิดผลึกใหม่ ขึ้นมาเป็นบางส่วน (partial recrystallize) แต่ยังคงมีค่าสมบัติเชิงกลที่สูงอยู่นั้น วิเคราะห์ได้ว่าสมบัติเชิงกล ที่ได้เป็นผลมาจากโครงสร้างเดิมส่วนหนึ่งของแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่เสีรูปร่างจากการอัดรีดและมีลักษณะ เป็นไฟเบอร์ (fibrous structure) ที่มีความเครียดสูงจากการสะสมตัวของดิสโลเคชัน [1]

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM no. B557M ของชิ้นงานท่อหลังผ่าน กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกัน

Speciment	รูปแบบการอบไฮโมจีไนซ์	Tensile strength (Mpa)	Proof stress (Mpa)	Elongation (%)
(a)	บิลเลทที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ (As cast)	138.18	55.15	29.93
(b)	อบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 480°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	138.91	53.18	28.33
(c)	อบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 585°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	127.07	50.69	27.18
(d)	อบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	127.17	51.35	27.58
(e)	อบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบ และอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง	129.93	52.67	26.75
(f)	อบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ	127.03	51.07	28.22
(g)	อบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 615°C นาน 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบ และอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 480°C นาน 4 ชั่วโมง	131.51	54.09	26.12
(h)	บิลเลทนำเข้าจากต่างประเทศ	128.61	49.07	27.51



รูปที่ 4.39 กราฟแท่งเปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานท่อหลังผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อนจากแท่งอะลูมิเนียมบิลเลทที่แตกต่างกัน