

บทที่ 4

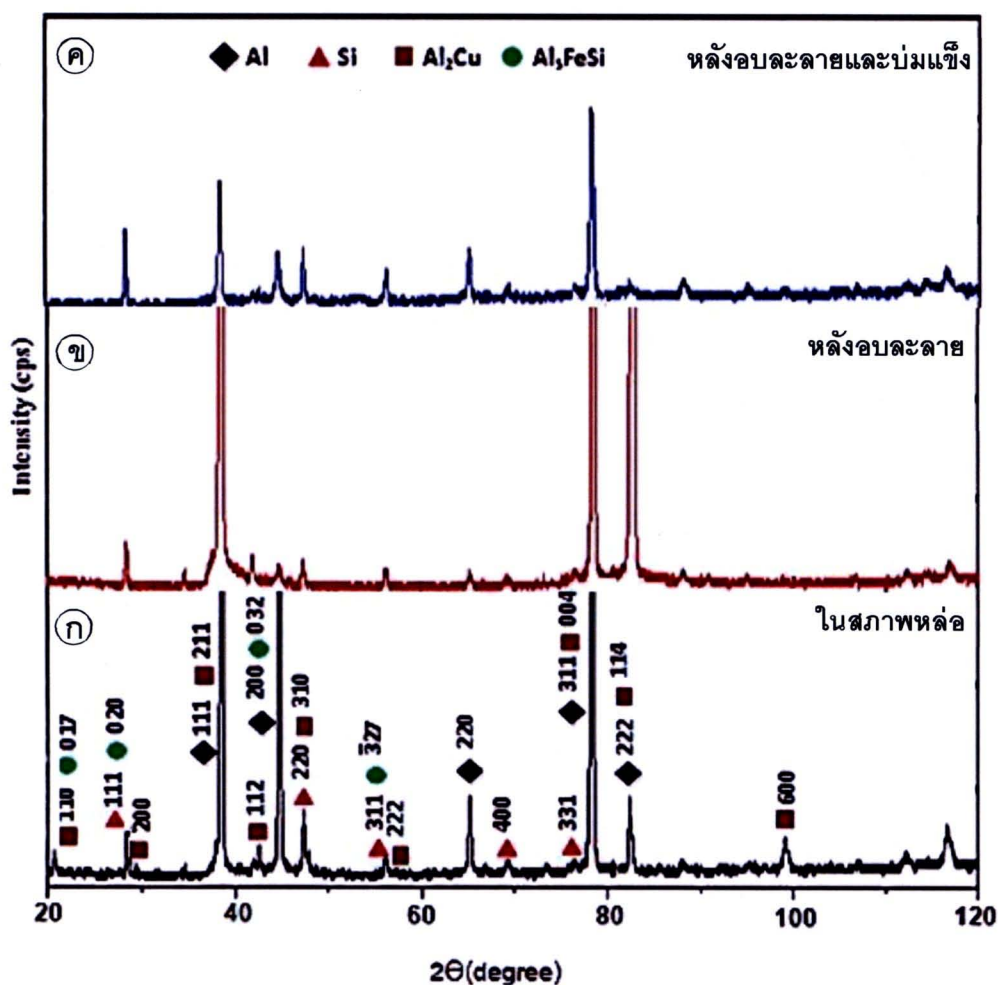
ผลการวิจัย

การศึกษานิตเฟสและโครงสร้างจุลภาค

1. การศึกษานิตเฟส

จากการศึกษานิตเฟสที่เกิดขึ้นในสภาพหล่อและหลังการปรับสภาพด้วยความร้อน ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าในสภาพหล่อประกอบด้วยเฟส Al, เฟส Al_2Cu , เฟส Al_5FeSi และเฟส Si หลังการการอบละลายและหลังการอบละลายแล้วตามด้วยการบ่มแข็ง ประกอบด้วยเฟสเช่นเดียวกับในสภาพหล่อ อย่างไรก็ตามพบว่าเฟส Al_2Cu และ เฟส Al_5FeSi มีปริมาณลดลง เนื่องจากการละลายลงสู่เมทริกซ์ในระหว่างการอบละลายและบ่มแข็ง จากการวิจัยของ Yang, B., et al. (2003) พบว่าเฟสของ Al_5FeSi เกิดจากการเติมธาตุ Fe ในโลหะผสมปริมาณ 0.2-1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภาพ 42 แสดงตัวอย่างแบบรูปการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ เอ319 ในสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง





ภาพ 42 แบบรูปการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงเฟสที่เกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียม
 เอ319 (ก) ในสภาพหล่อ (ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503
 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ
 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170
 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

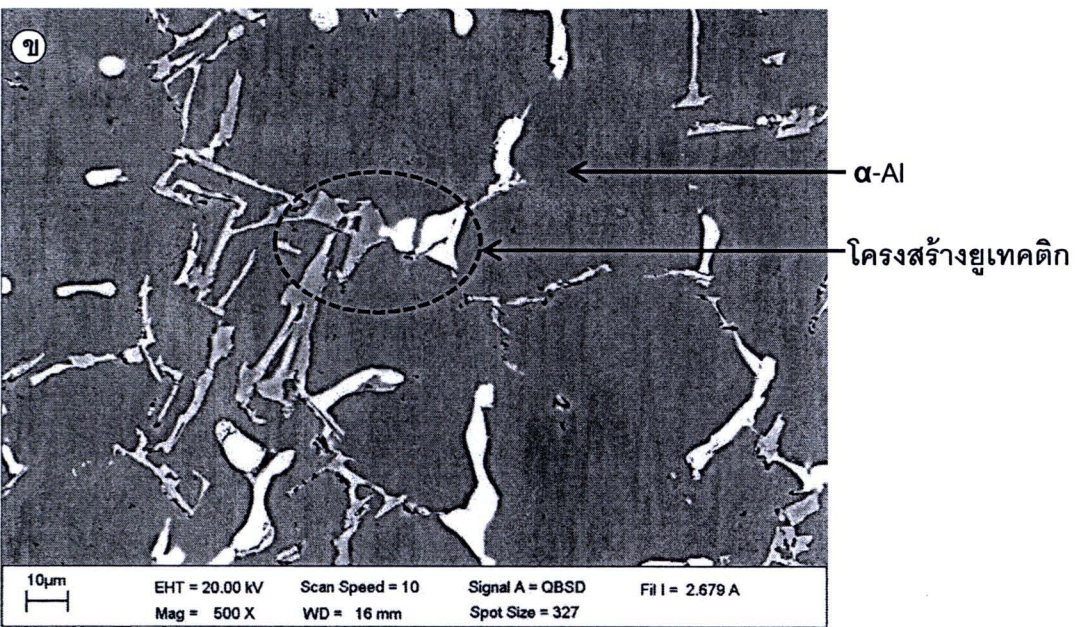
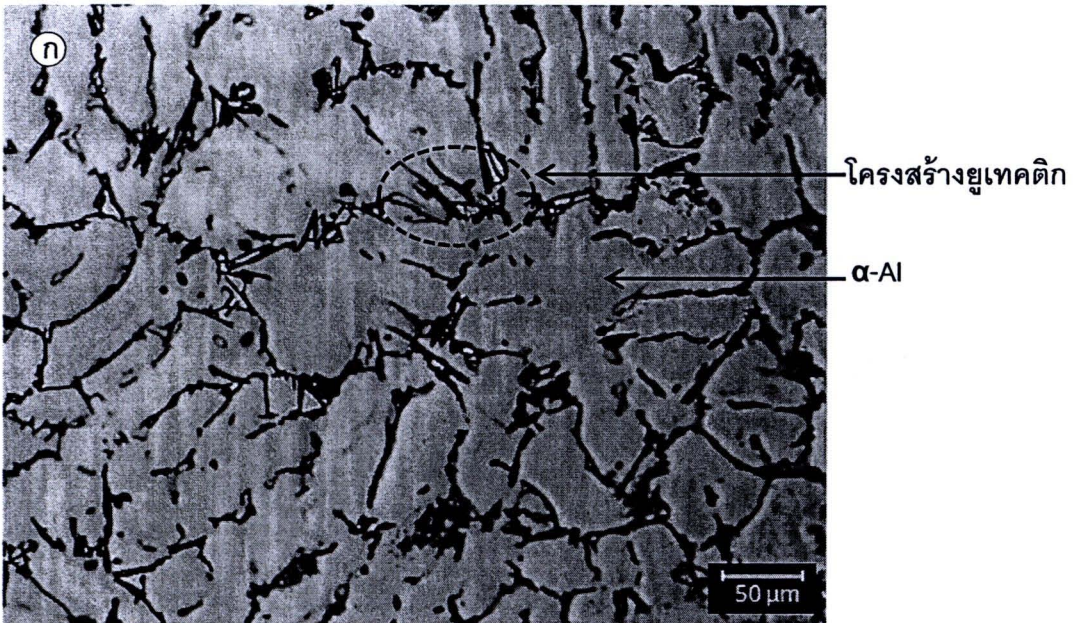
2. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยรวม

2.1 โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อ

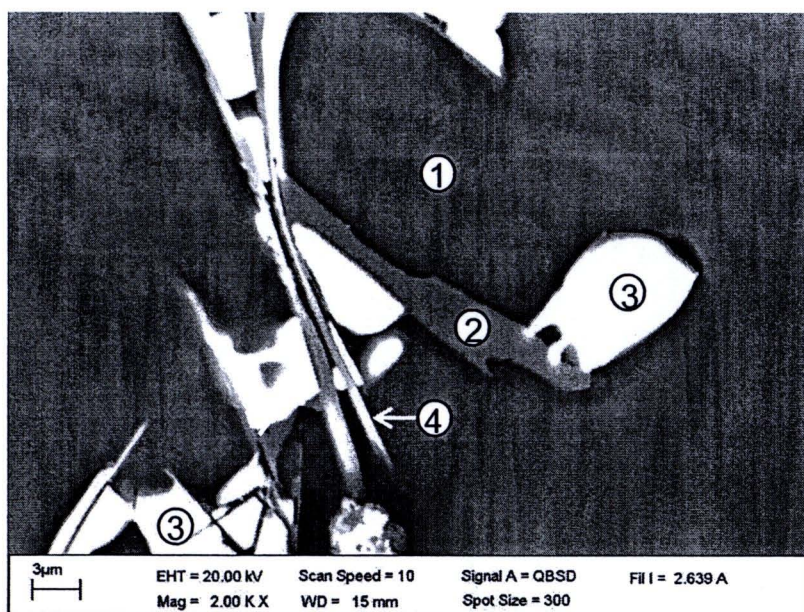
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม เอ319 ในสภาพหล่อ ประกอบด้วยเดนไดรท์ของ α -Al ล้อมรอบด้วยโครงสร้างยูเทคติกที่ประกอบด้วย 3 เฟสที่มีลักษณะแตกต่างกัน คือ เฟสที่มีรูปร่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ เฟสที่มีรูปร่างกลมมนสีขาว และเฟสที่มีรูปร่างเป็นเส้นยาว ดังแสดงในภาพ 43

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วย EDS แบบ Point Analysis และ X-ray Mapping ดังภาพ 44 และ 45 ตามลำดับ พบว่าในเมทริกซ์มี Al ในปริมาณมาก และ Cu ละลายอยู่เล็กน้อย ส่วนในเฟสที่มีรูปร่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ประกอบด้วยธาตุ Si, Al และ Cu สำหรับเฟสที่มีรูปร่างกลมมนสีขาวประกอบด้วยธาตุ Al, Cu, Si และ Fe ส่วนเฟสที่มีรูปร่างเป็นเส้นยาวประกอบด้วยธาตุ Al, Si และ Fe เมื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุในเฟสต่างๆ จะเห็นว่าในเมทริกซ์จะมี Al ปริมาณมากกว่าเฟสอื่นๆ ส่วนเฟสที่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมมีธาตุ Si ปริมาณสูง ส่วนเฟสที่มีรูปร่างกลมมนจะมี Cu ละลายอยู่มาก ในขณะที่เฟสที่เป็นเส้นยาวจะมีธาตุ Fe ในปริมาณสูง จากการศึกษาของ Bäckerud, L., et al. (1990), Rincón, E., et al. (2009) และ Li, Z., et al. (2003) รายงานว่าเฟสที่เป็นแผ่นคือเฟสซิลิกอนยูเทคติก ส่วนเฟสที่มีรูปร่างกลมมนคือเฟส Al_2Cu และเฟสที่มีรูปร่างเป็นเส้นยาวคือเฟส Al_5FeSi

นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบโลหะของเฟส Al_2Cu มีลักษณะแตกต่างกัน คือ บางบริเวณอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม บางบริเวณแยกตัวกันอยู่ หรือรวมอยู่กับเฟส Al_5FeSi ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Djurdjevic, M. B., et al. (2001) และ Li, Z., et al. (2003) ที่กล่าวว่าเฟส Al_2Cu อาจจะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนหรืออาจจะแยกตัวอยู่ นอกจากนี้ยังพบบริเวณส่วนปลายของเฟส Al_5FeSi หรือบนเฟสซิลิกอนยูเทคติก ดังภาพ 44



ภาพ 43 โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อ (ก) ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แสง
(ข) ภาพถ่าย BEI จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



① Element	Wt%	At%
Al	94.23	96.91
Si	00.94	00.93
Mn	00.35	00.18
Fe	00.42	00.21
Cu	04.06	01.77

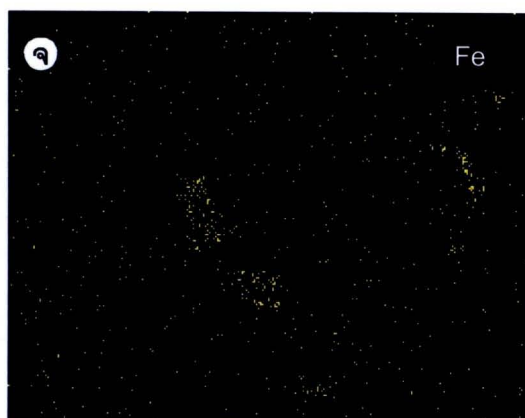
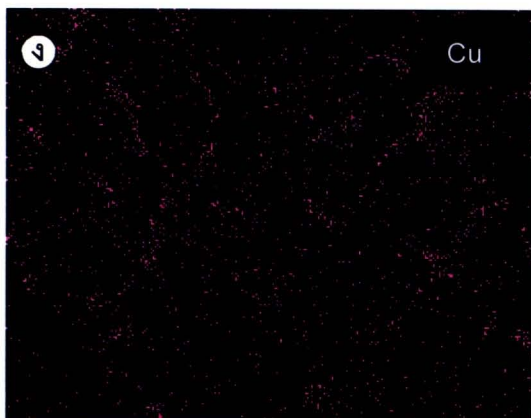
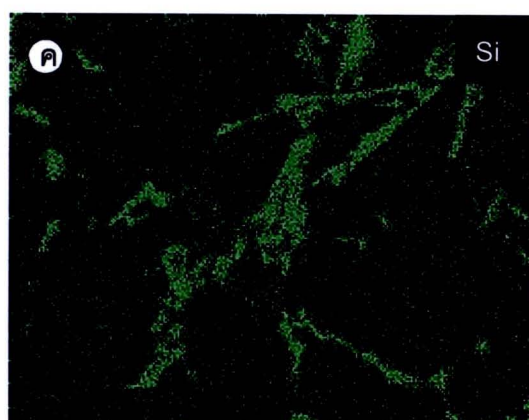
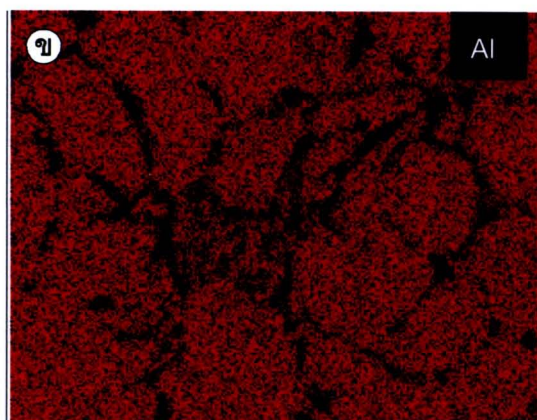
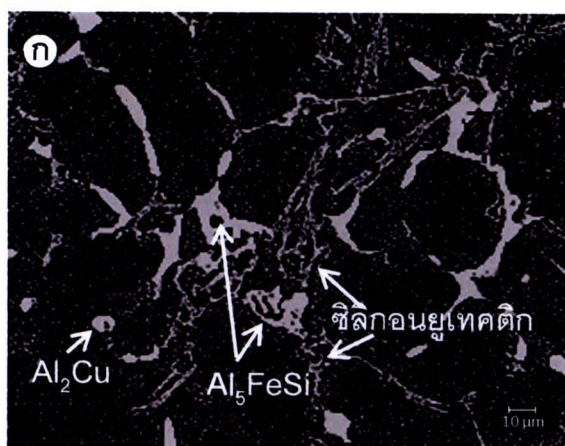
② Element	Wt%	At%
Al	15.59	16.32
Si	82.19	82.65
Mn	00.41	00.21
Fe	00.35	00.18
Cu	01.45	00.64

③ Element	Wt%	At%
Al	76.85	86.71
Si	03.48	03.78
Mn	00.29	00.16
Fe	01.01	00.55
Cu	18.37	08.80

④ Element	Wt%	At%
Al	77.65	83.73
Si	09.24	09.58
Mn	01.55	00.82
Fe	09.19	04.79
Cu	02.35	01.08

โดย 1 = บริเวณเมทริกซ์, 2 = โครงสร้างยูเทคติกของเฟสที่มีรูปร่างเป็นแผ่นสีเทา,
3 = เฟสที่มีรูปร่างกลมมนสีขาว, 4 = เฟสที่มีรูปร่างเป็นเส้นยาวสีขาว

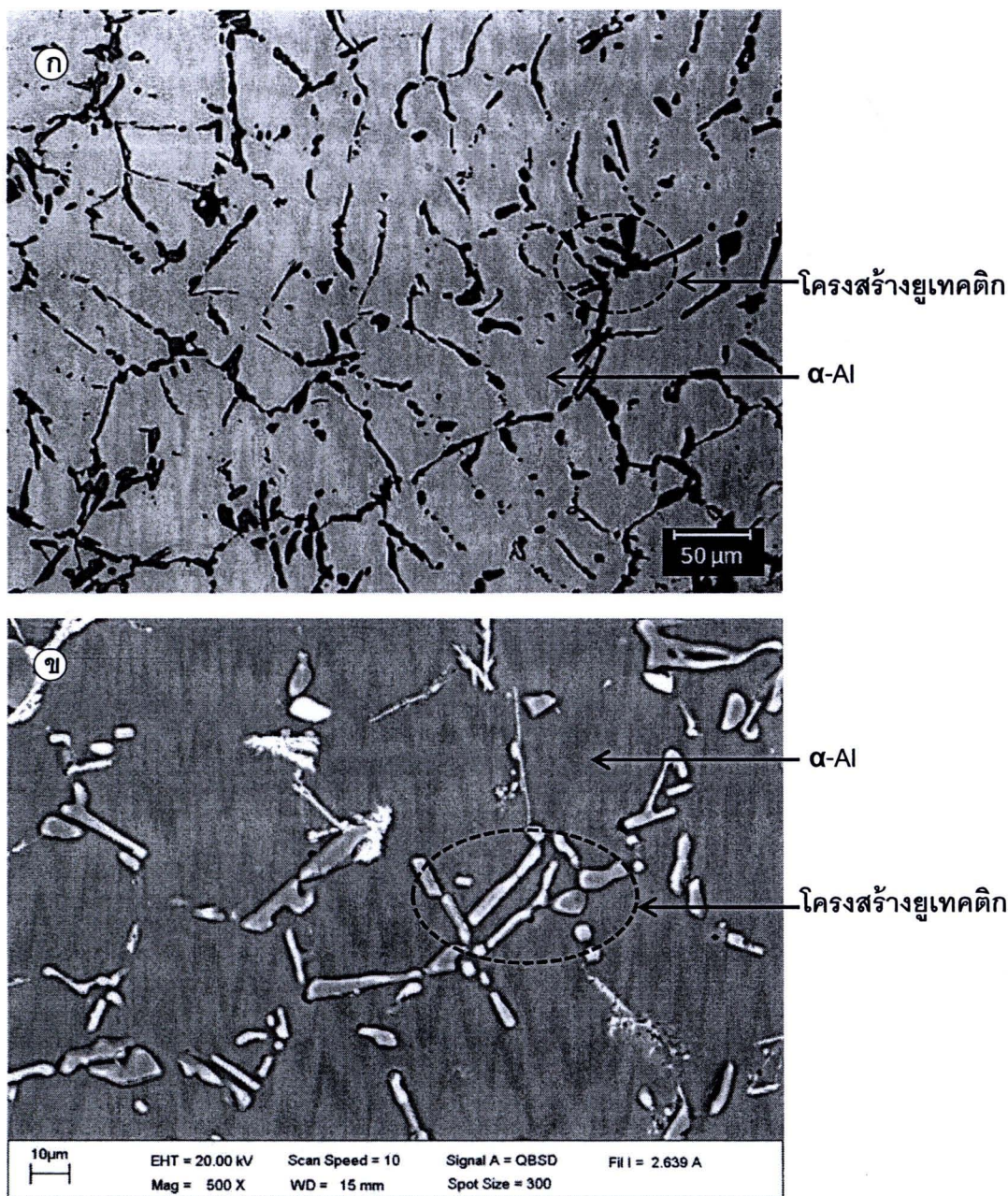
ภาพ 44 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงโครงสร้างจุลภาค
ในสภาพหล่อ และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDS แบบ Point Analysis



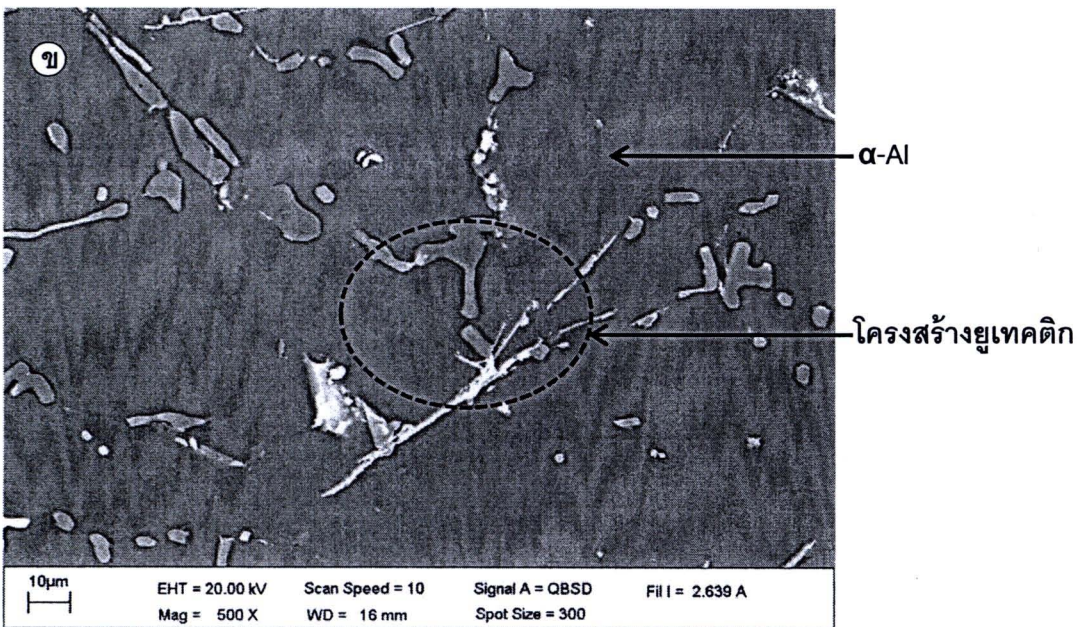
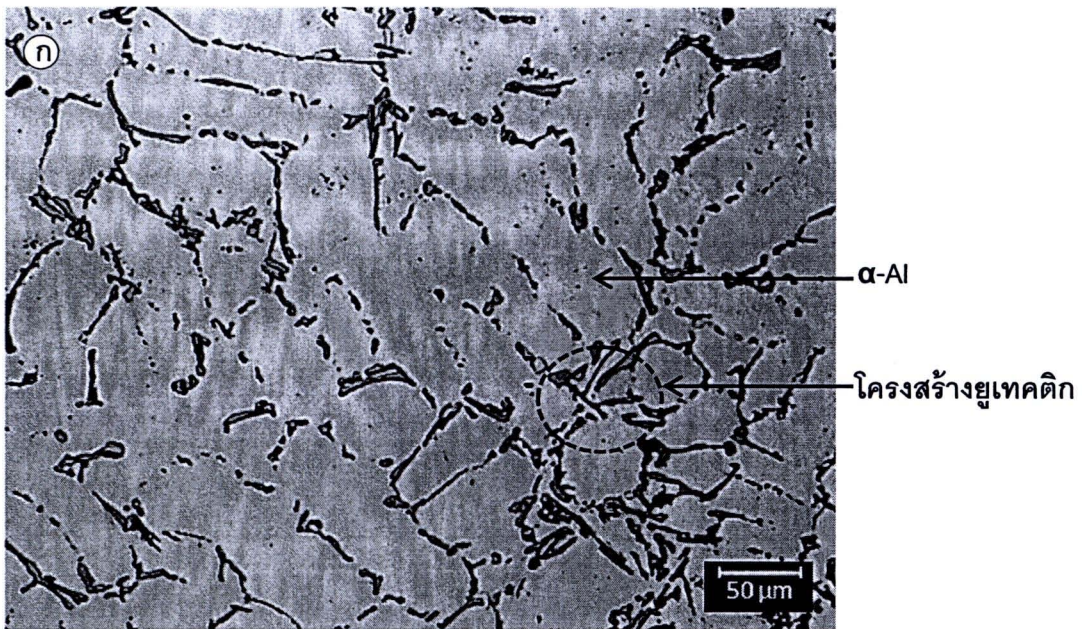
ภาพ 45 (ก) ภาพถ่าย BEI จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ (ข-จ) X-ray Mapping แสดงการกระจายตัวของธาตุ Al, Si, Cu และ Fe ตามลำดับ

2.2 โครงสร้างจุลภาคหลังการปรับสภาพด้วยความร้อน

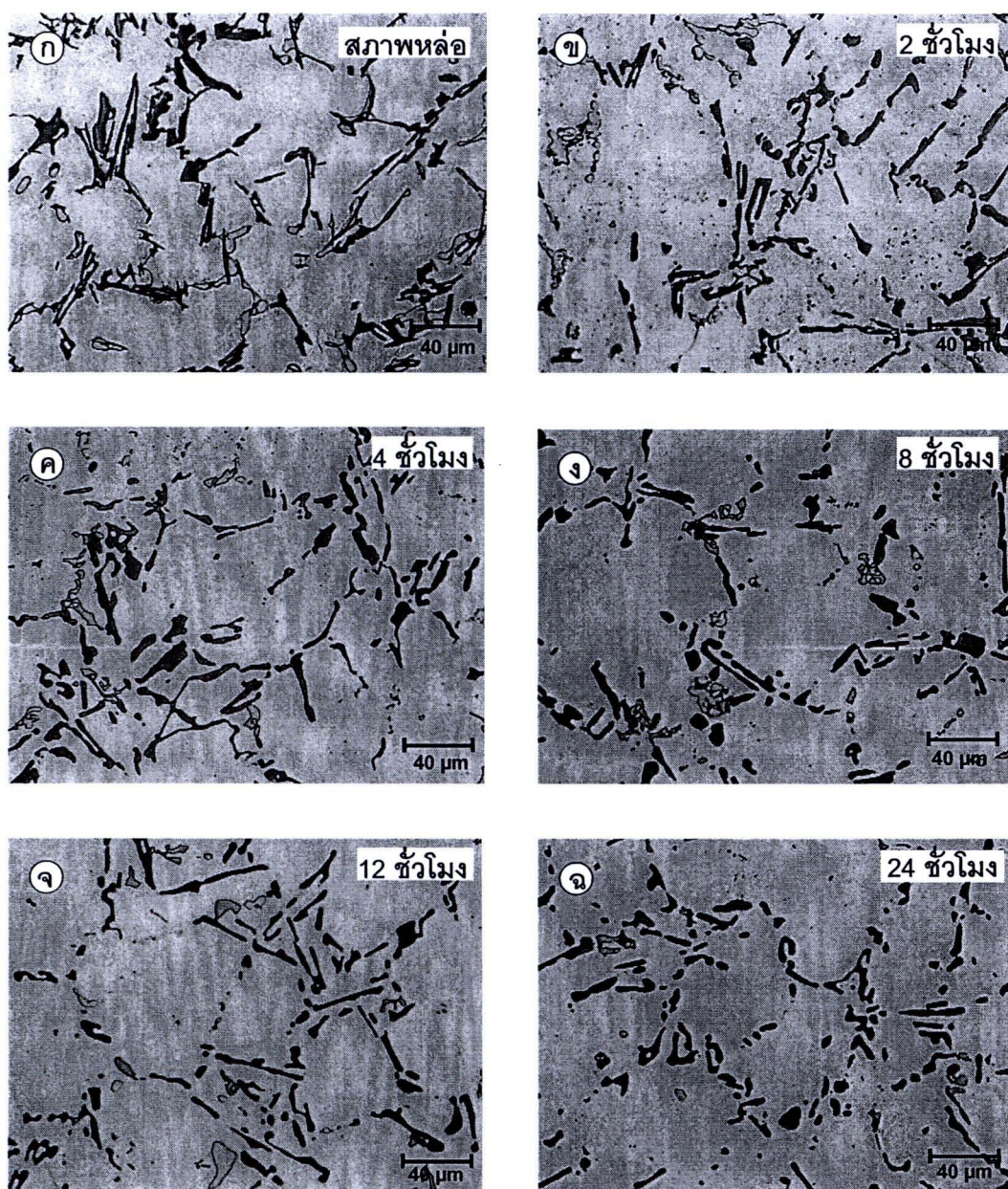
ภาพ 46 และ 47 แสดงโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างจุลภาคโดยรวมของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็งไม่ต่างกันจากในสภาพหล่อ ซึ่งประกอบด้วยเดนไดรต์ของ α -Al ล้อมรอบด้วยโครงสร้างยูเทคติกของซิลิกอนยูเทคติกและสารประกอบโลหะของเฟส Al_2Cu และเฟส Al_5FeSi อย่างไรก็ตามโครงสร้างยูเทคติกที่มีลักษณะกลมมนขึ้น โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Haro, S., et al. (2009) และ Sjölander, E., et al. (2010) ซึ่งพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายหรือการบ่มแข็งจะทำให้ซิลิกอนยูเทคติกมีลักษณะกลมมนขึ้น นอกจากนี้เมื่อเวลาที่ใช้ในการอบละลายหรือบ่มแข็งเพิ่มขึ้นจะทำให้โครงสร้างยูเทคติกมีลักษณะกลมมนมากขึ้น มีขนาดและปริมาณลดลง ดังภาพ 48 และ 49 จากการศึกษาของ Sokolowski, J. H., et al. (1995) และ Kaufman, J. G., et al. (2004) พบว่าระหว่างการอบละลายเฟสยูเทคติกต่างๆ จะมีการสลายตัว อย่างไรก็ตามเฟส Al_2Cu ที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มจะมีการสลายตัวน้อยกว่าที่แยกตัวอิสระ เนื่องจากจะต้องใช้เวลานานเพื่อให้อะตอมของ Cu แพร่ลงสู่เมทริกซ์ ดังนั้นชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มจะไม่แยกออกจากกัน แต่จะมีลักษณะกลมมนมากขึ้นเท่านั้น



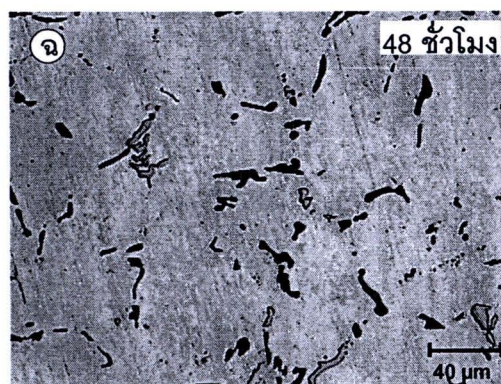
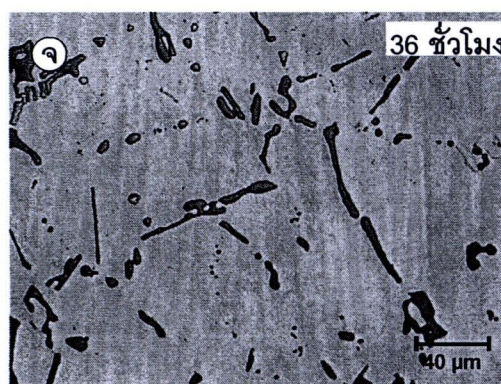
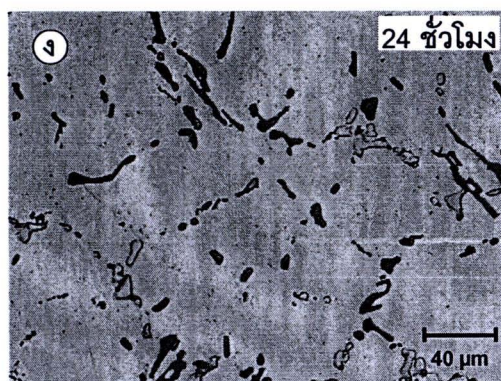
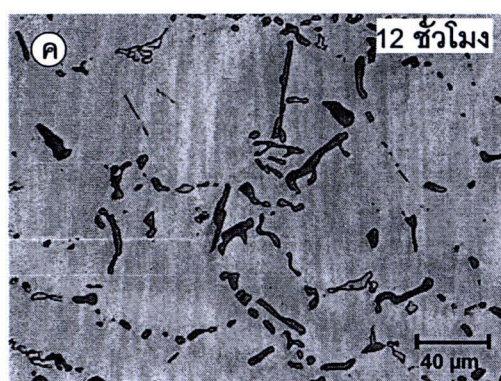
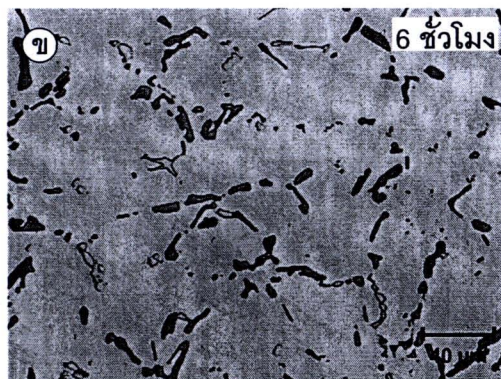
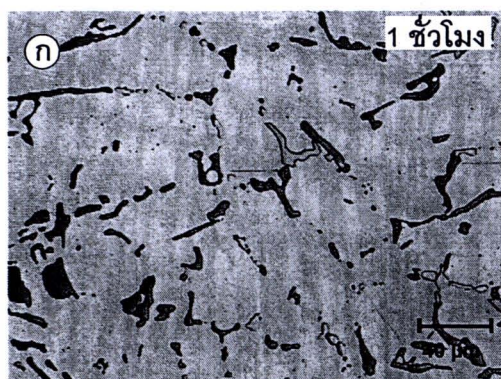
ภาพ 46 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง (ข) ภาพถ่าย BEI จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพ 47 โครงสร้งจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง (ข) ภาพถ่าย BEI จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



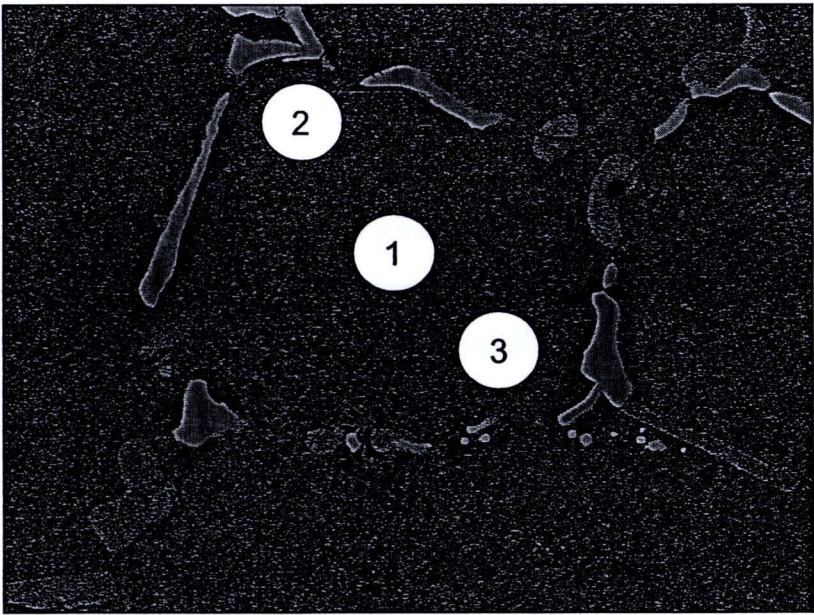
ภาพ 48 ผลของเวลาในการบดละลายต่อโครงสร้างยูเทคติก (ก) ในสภาพหล่อ (ข-ฉ) ชิ้นงานที่ผ่านการบดละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ



ภาพ 49 ผลของเวลาในการบ่มแข็งต่อโครงสร้างยูเทคติก (ก-จ) ชิ้นงานที่ผ่านการ
 อบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วย
 การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 6, 12, 24, 36 และ
 48 ชั่วโมง ตามลำดับ



จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุต่างๆ ในเมทริกซ์ด้วยเทคนิค EDS แบบ Point Analysis ของชิ้นงานในสภาพหล่อ ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็ง ดังภาพ 50 โดยทำการวิเคราะห์ 3 บริเวณ จากจุดกึ่งกลางและบริเวณขอบของเดนไดรต์ ผลการทดลองแสดงดังตาราง 9 พบว่าในสภาพหล่มีปริมาณของ Al บริเวณกลางของเดนไดรต์มากกว่าขอบเกรน ส่วนธาตุ Si, Cu, Fe, Mn และ Mg จะมีปริมาณมากบริเวณขอบเกรน ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย และชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็ง พบว่ามีการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ภายในเมทริกซ์สม่ำเสมอมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของธาตุ Cu และ Fe บริเวณกลางเกรนเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาค และผลการศึกษาชนิดเฟสด้วย XRD ที่พบว่าโครงสร้างยูเทคติกมีการละลายลงสู่เมทริกซ์ หลังการอบละลายและการบ่มแข็ง ทำให้มีขนาดและปริมาณลดลง โดยเฉพาะปริมาณของเฟส Al_2Cu และ Al_5FeSi จึงมีการแพร่ของธาตุจากขอบเกรนเข้ามาในเกรนมากขึ้น จากงานวิจัยของ Sjölander, E. and Seifeddine, S. (2010) พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายทำให้มีการกระจายของธาตุต่างๆ ในเมทริกซ์สม่ำเสมอมากขึ้น



ภาพ 50 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (BEI) แสดงบริเวณของ
เดนไดรต์ที่ทำการวัดปริมาณธาตุ

ตาราง 9 การกระจายตัวของธาตุในเมทริกซ์

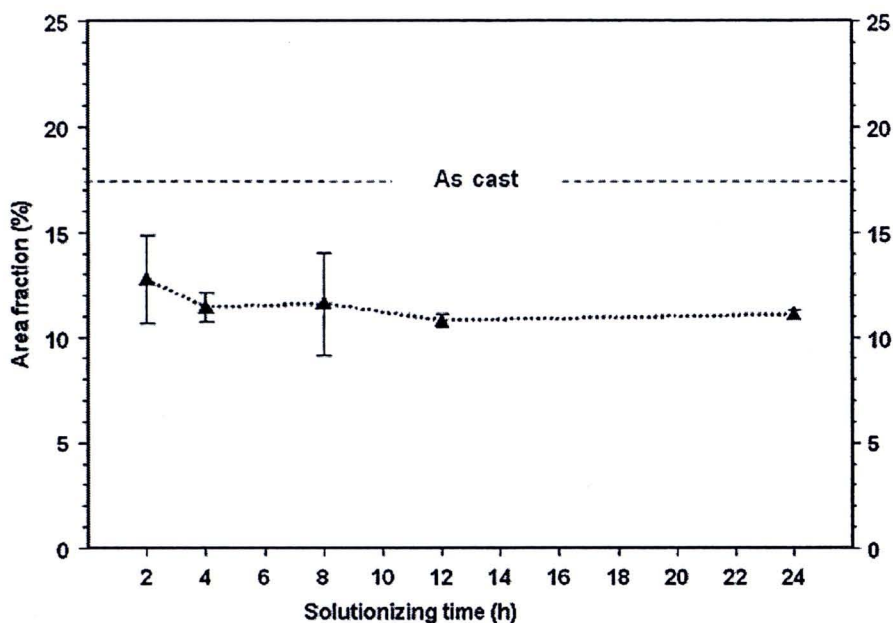
ชิ้นงาน	ตำแหน่ง	ปริมาณธาตุ (Wt%)					
		Al	Si	Cu	Fe	Mg	Mn
ในสภาพหล่อ	1	97.46	1.20	0.38	0.09	0.74	0.13
	2	93.64	2.69	2.22	0.29	1.01	0.15
	3	96.14	1.75	1.09	0.00	1.02	0.00
หลังอบละลายที่อุณหภูมิ	1	93.71	1.22	3.47	0.22	1.21	0.20
503 องศาเซลเซียส	2	92.40	1.71	4.06	0.64	0.99	0.18
เป็นเวลา 8 ชั่วโมง	3	93.07	1.05	4.09	0.32	1.11	0.36
หลังอบละลายและบ่มแข็งที่	1	93.14	0.52	4.58	0.38	1.07	0.31
อุณหภูมิ170 องศาเซลเซียส	2	93.48	1.03	3.78	0.45	1.02	0.23
เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	3	92.62	0.68	4.67	0.45	1.01	0.57

3. การหาสัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติก

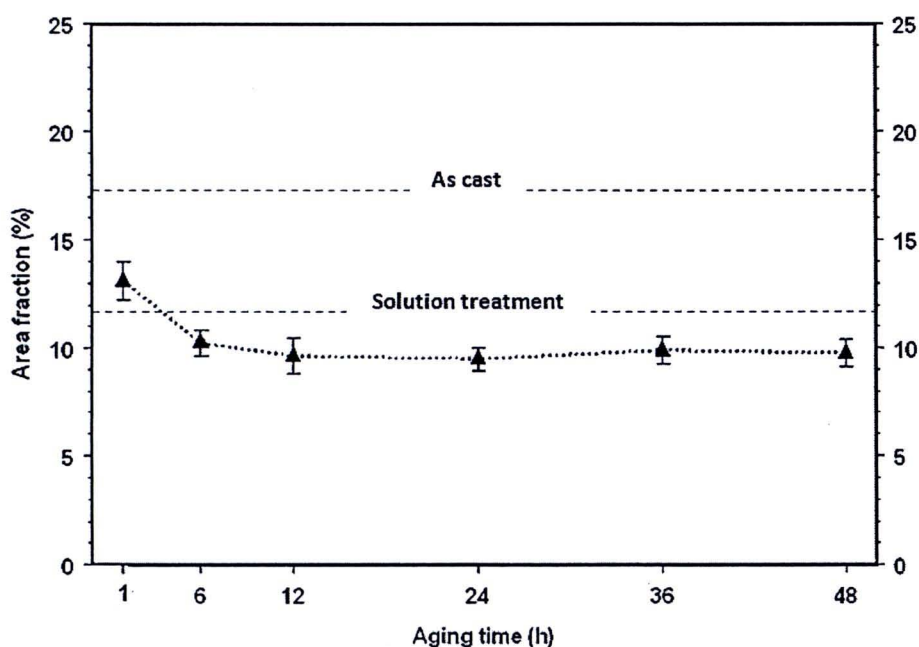
จากการหาสัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติก ซึ่งประกอบด้วยซิลิกอนยูเทคติก และสารประกอบโลหะของเฟส Al_2Cu และเฟส Al_5FeSi พบว่าในสภาพหล่อมีสัดส่วนโดยพื้นที่ของ โครงสร้างยูเทคติกเท่ากับ 17.25 % ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 2, 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง สัดส่วนโดยพื้นที่ลดลงเป็น 12.75 %, 11.50 %, 11.70 %, 10.75 % และ 11.05 % ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเวลาในการอบละลายนานขึ้น สัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกมีแนวโน้มคงที่ แสดงดังภาพ 51

ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 6, 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง พบว่าสัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกมีค่าเท่ากับ 11.25 %, 10.35 %, 9.70 %, 9.50 %, 9.90 % และ 9.85 % ตามลำดับ ดังภาพ 52 จากผลการทดลองจะพบว่าการบ่มแข็งจะทำให้ สัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติก มีค่าลดลง ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่มีค่า 11.70 % และเมื่อเวลานานขึ้นทำให้สัดส่วนโดยพื้นที่ของ โครงสร้างยูเทคติกมีค่าคงที่

Sjölander, E. and Seifeddine, S. (2010) พบว่าการอบละลายและการบ่มแข็งทำให้ สัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกลดลง เนื่องจากการสลายของสารประกอบต่างๆ ใน เมทริกซ์ อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาในการอบละลายหรือบ่มแข็งนานขึ้น สัดส่วนโดยพื้นที่ของ โครงสร้างยูเทคติกจะคงที่ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความสามารถในการละลายของธาตุต่างๆ ใน เมทริกซ์ลดลงหรือเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว นอกจากนี้จะเห็นว่าผลของสัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้าง ยูเทคติกลดลง ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างยูเทคติก ดังแสดงในภาพ 48 และ 49



ภาพ 51 สัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติก ในสภาพหล่อ และหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ

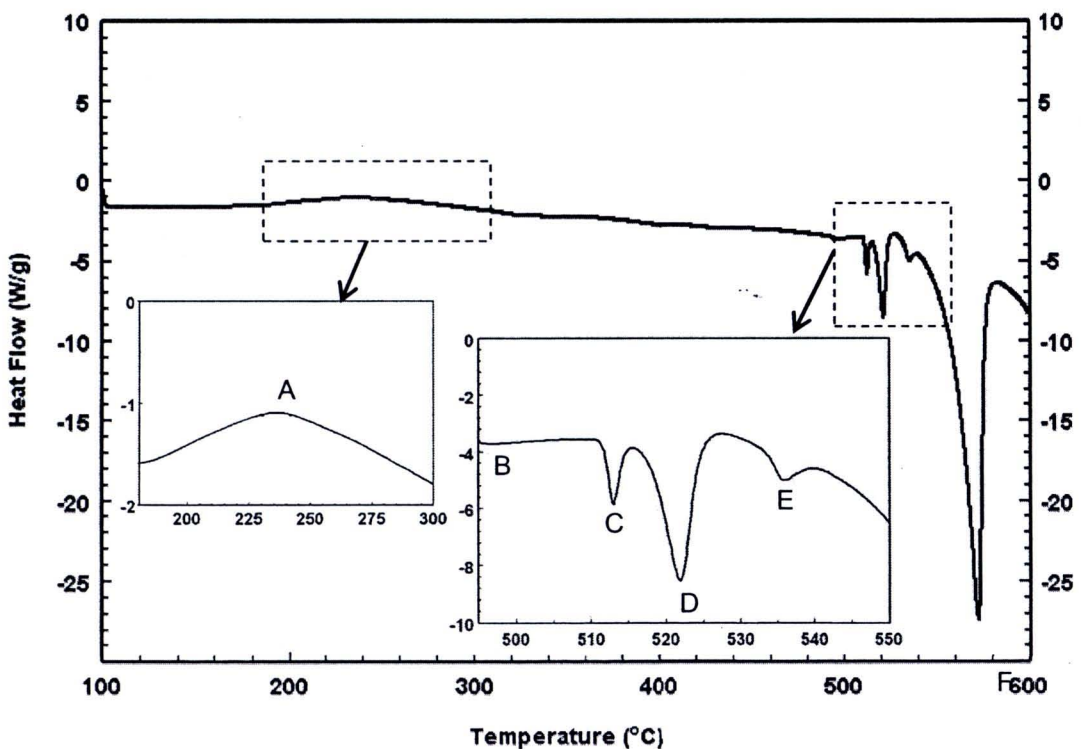


ภาพ 52 สัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกในสภาพหล่อ หลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ

4. การวิเคราะห์การเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่างๆ

การวิเคราะห์การเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิ 100-600 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง DSC ของชิ้นงานในสภาพหล่อ พบว่ามีการเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ที่จุด A อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ส่วนปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic) จำนวน 5 จุด ประกอบด้วย จุด B, C, D, E และ F ที่อุณหภูมิ 496, 513, 521, 535 และ 571 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงดังภาพ 53 ในตาราง 10 และ 11 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีกับผลการวิจัยที่ผ่านมาตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ovono, D. O., Guillot, I. and Massinon, D. (2006) รายงานว่าปฏิกิริยาที่จุด A เป็นการเปลี่ยนเฟส θ' เป็น θ และปฏิกิริยาที่จุด B, C, D, E และ F เป็นการสลายของเฟส $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_6$, เฟส Al_2Cu , เฟส $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}$, เฟส Al_5FeSi และเฟสซิลิกอนยูเทคติก ตามลำดับ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเฟส Al_2Cu จะสลายที่อุณหภูมิประมาณ 513 องศาเซลเซียส ดังนั้นการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส จึงส่งผลให้เฟส Al_2Cu สลายลงสู่เมทริกซ์ และโครงสร้างยูเทคติกมีปริมาณลดลง และปริมาณธาตุ Cu ใน $\alpha\text{-Al}$ เพิ่มขึ้น



ภาพ 53 กราฟ DSC แสดงการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่างๆ ของโลหะผสมในสภาพหล่อ

ตาราง 10 การเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่างๆ ของชิ้นงานในสภาพหล่อ เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

จุด	งานวิจัย นี้	Bäckerud, L., et al. (1990)	Samuel, F. H., et al. (1996)	Ovono, D. O., et al. (2006)	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น
A	235 °C	-	-	243 °C	เปลี่ยนเฟส $\theta' \rightarrow \theta$
B	496 °C	507 °C	490 °C	507 °C	การสลายตัวของเฟส $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_6$
C	513 °C	525 °C	510 °C	519 °C	การสลายตัวของเฟส Al_2Cu
D	521 °C	590 °C	554 °C	537 °C	การสลายตัวของเฟส $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}$
E	535 °C	>590 °C	-	548 °C	การสลายตัวของเฟส Al_5FeSi
F	571 °C	575 °C	562 °C	573 °C	การสลายตัวของ เฟสซิลิกอนยูเทคติก

ตาราง 11 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมที่ใช้ในงานวิจัยต่างๆ

	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Al
Bäckerud, L., et al. (1990)	5.70	3.40	0.62	0.10	0.36	Bal.
Samuel, F. H., et al. (1996)	6.23	3.80	0.46	0.06	0.14	Bal.
Ovono, D. O., et al. (2006)	7.00	3.00	0.10	0.30	0.10	Bal.
ในงานวิจัยนี้	4.93	3.47	0.29	0.19	0.04	Bal.

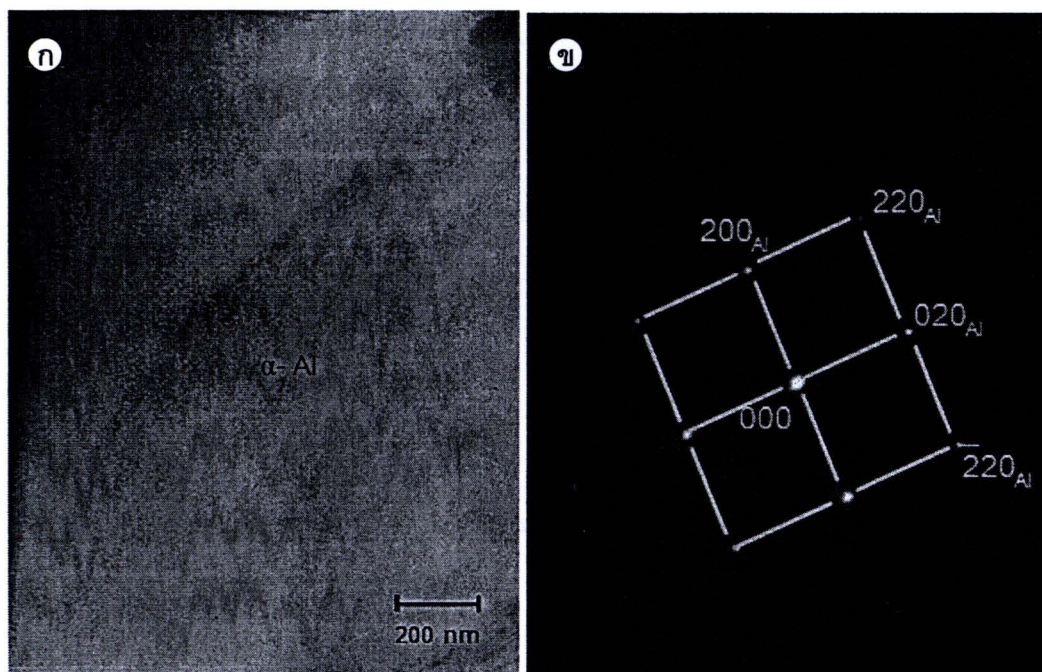
5. การศึกษาอนุภาคที่ตกตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูง ชนิดเฟสและโครงสร้างผลึกของเมทริกซ์และตะกอนในเมทริกซ์หลังการบ่มแข็ง ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน โดยการเลือกสภาวะจากผลการทดสอบความแข็ง ซึ่งประกอบด้วย 4 สภาวะ ได้แก่

1. ชิ้นงานในสภาพหล่อ
2. ชิ้นงาน Under-aged (ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง)
3. ชิ้นงาน Peak-aged (ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง)
4. ชิ้นงาน Over-aged (ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง)

5.1 ชิ้นงานในสภาพหล่อ

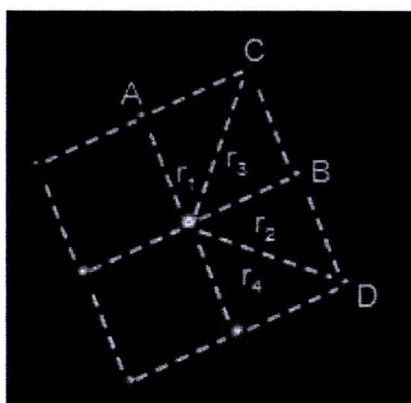
ภาพ 54(ก) แสดงโครงสร้างเมทริกซ์ในสภาพหล่อ จากการวิเคราะห์แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอน (Electron Diffraction Pattern) ดังภาพ 54(ข) สามารถยืนยันได้ว่าเมทริกซ์เป็นเฟส α -Al และมีโครงสร้างผลึกแบบ Face Center Cubic (FCC) โดยมีค่าคงที่โครงผลึก $a = 0.404$ นาโนเมตร ทั้งนี้ไม่ปรากฏตะกอนภายในเมทริกซ์ของ α -Al



ภาพ 54 (ก) ภาพ Bright-field TEM แสดงโครงสร้างเมทริกซ์ของ α -Al ในสภาพหล่อ
(ข) แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนยืนยันโครงสร้างผลึกแบบ FCC ของ
เฟส α -Al (แกนโซน $[001]_{Al}$)

ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนในภาพ 54(ข) มีดังนี้

1. วัดระยะห่าง r_1, r_2, r_3, r_4 บนฟิล์ม ดังภาพ



จะได้

$$r_1 = 12.5 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$r_2 = 12.5 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$r_3 = 18.0 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$r_4 = 18.0 \text{ มิลลิเมตร}$$

2. คำนวณหาค่า d_1, d_2, d_3, d_4 โดยใช้สมการที่ 2 และเปรียบเทียบความเป็นไปได้ของระนาบ

hkl จากฐานข้อมูล

$$d_i = \frac{\lambda_{\text{average}}}{r_i} = \frac{24.9630}{r_i} \text{ \AA}$$

จะได้ $d_1 = 1.99704 \text{ \AA}$ สอดคล้องกับระนาบ (200)

$d_2 = 1.99704 \text{ \AA}$ สอดคล้องกับระนาบ (200)

$d_3 = 1.38683 \text{ \AA}$ สอดคล้องกับระนาบ (220)

$d_4 = 1.38683 \text{ \AA}$ สอดคล้องกับระนาบ (220)

3. ตรวจสอบความเป็นไปได้ของค่าดัชนี hkl ต่างๆ เพื่อหาระนาบเลี้ยวเบน A, B, C, D โดยการบวกเวกเตอร์ ดังสมการต่อไปนี้

$$A + B = C$$

$$\bar{A} + B = D$$

แทนค่า $200 + 020 = 220$

$$\bar{2}00 + 020 = \bar{2}20$$

จะได้ว่า $A = 200, B = 020, C = 220, D = \bar{2}20$



4. ตรวจสอบความเป็นไปได้ของค่ามุมระหว่างระนาบอะตอมที่วัดได้โดยตรงจากฟิล์ม กับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการ

$$\cos \phi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{[(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2)]}}$$

จะได้ว่า $\phi_{AC} = 45 \text{ องศา}$

$$\phi_{CB} = 45 \text{ องศา}$$

$$\phi_{BD} = 45 \text{ องศา}$$

$$\phi_{DA} = 45 \text{ องศา}$$

5. หาทิศ uvw ที่ลำอิเล็กตรอนทะลุผ่านชิ้นงานหรือแกนโซน (Zone Axis) โดยวิธี Cross Multiplying โดยเลือก (200) กับ (220)

$$\begin{array}{c}
 2 \quad \left| \quad \begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 2 & 0 \end{array} \quad \begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \end{array} \quad \begin{array}{cc} 2 & 0 \\ 2 & 2 \end{array} \quad \begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \right. \\
 \\
 = (0-0), (0-0), (4-0) = [004] = [001]
 \end{array}$$

6. ตรวจสอบผลการวิเคราะห์ด้วย Weiss Zone Law;

$$h \cdot u + k \cdot v + l \cdot w = 0$$

โดยที่ $[uvw] = [001]$

และ $(hkl) = (200), (020), (220), (\bar{2}20)$

จะได้ว่า $(2 \cdot 0) + (0 \cdot 0) + (0 \cdot 1) = 0$

$$(0 \cdot 0) + (2 \cdot 0) + (0 \cdot 1) = 0$$

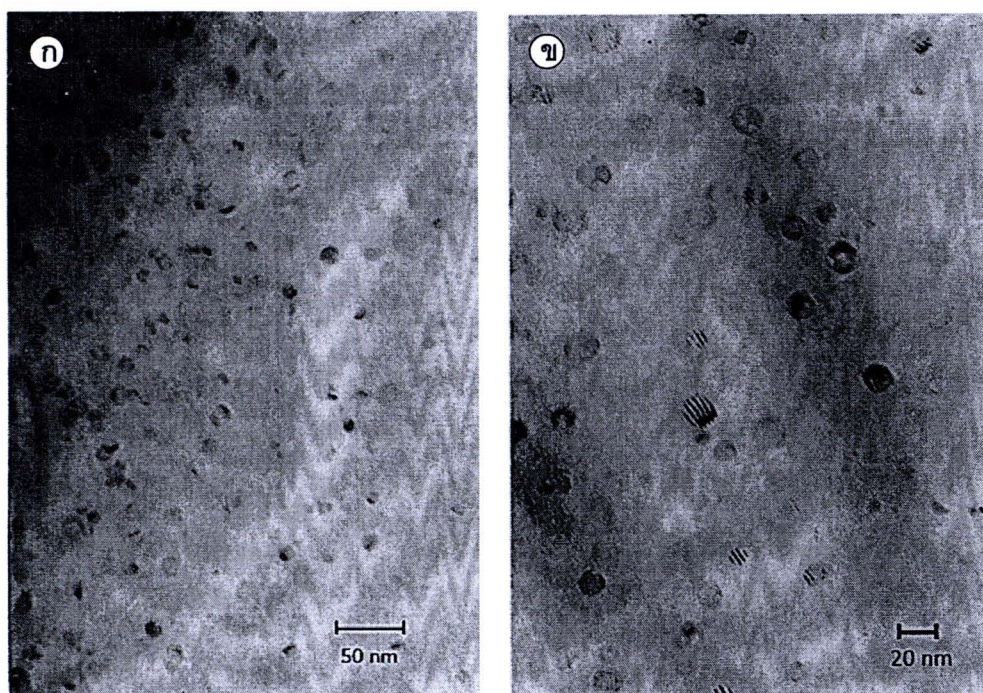
$$(2 \cdot 0) + (2 \cdot 0) + (0 \cdot 1) = 0$$

$$(\bar{2} \cdot 0) + (2 \cdot 0) + (0 \cdot 1) = 0$$

$\therefore$ จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบรูปการเลี้ยวเบนนี้สอดคล้องกับเฟส Al ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC

5.2 ชิ้นงานผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (Under-aged)

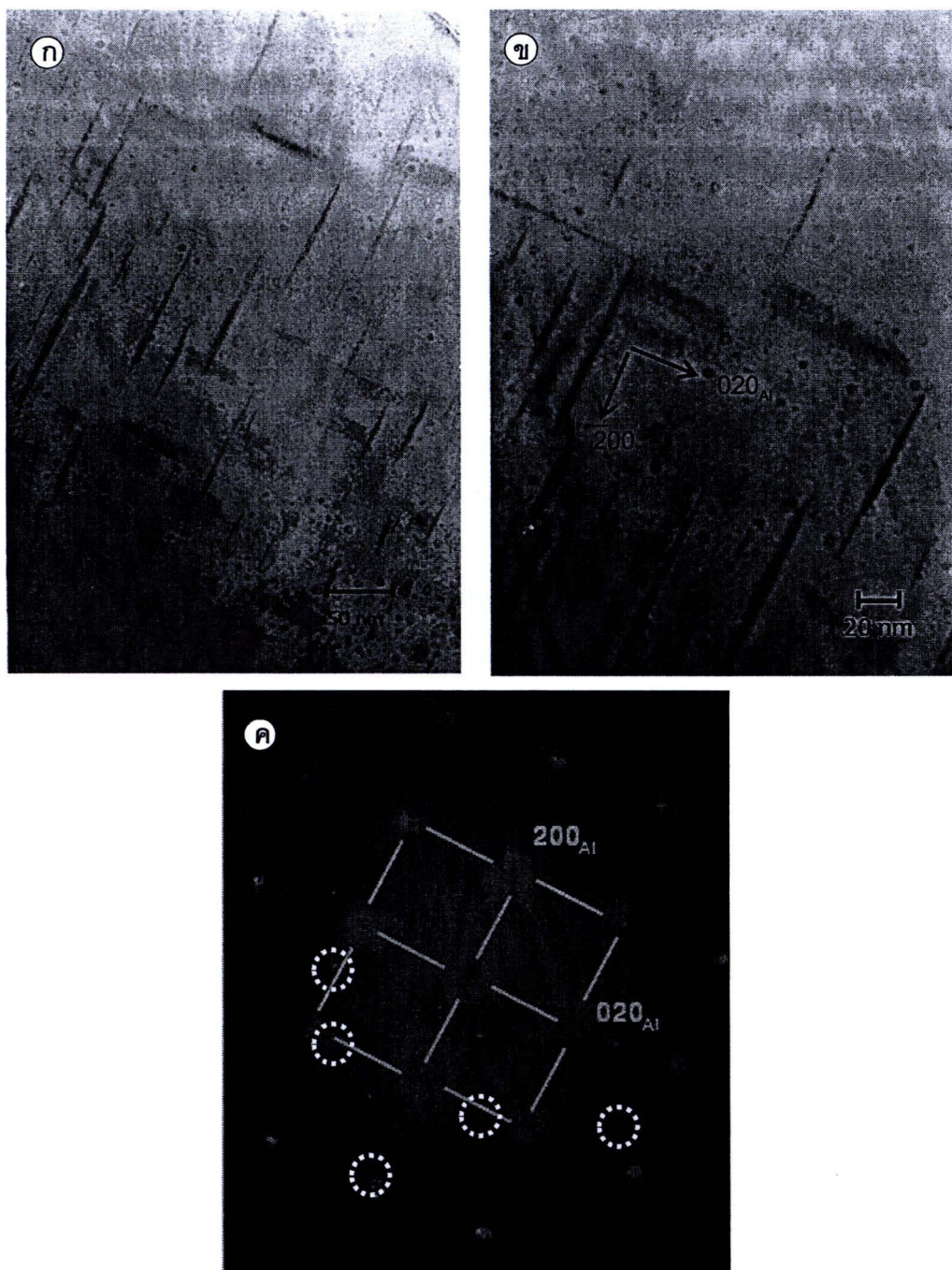
ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะ Under-aged พบว่ามีการตกตะกอนของอนุภาคที่มีลักษณะกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7-20 นาโนเมตร ดังภาพ 55 โดยตะกอนที่พบอาจเป็นตะกอนของโซน GP[1] โดย Smallman, R. E. and Ngan, A. H. W. (2007) รายงานว่าตะกอนที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการบ่มแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง เกิดจากการรวมตัวของ Cu บนระนาบ {100} ในเมทริกซ์ของ α -Al มีความหนาเท่ากับระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม นอกจากนี้จะพบตะกอนที่มีเส้นมืด-สว่างสลับกัน มีขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร และในบางบริเวณจะเกิดความเครียดขึ้นรอบๆ โซน GP[1] ทำให้ความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพ 55 (ก) ภาพ Bright-field TEM แสดงลักษณะของอนุภาคที่ตกตะกอนในเมทริกซ์ของ α -Al อะลูมิเนียมในช่วง Under-aged ที่กำลังขยาย 120,000 เท่า
(ข) กำลังขยาย 200,000 เท่า

5.3 ชิ้นงานผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Peak-aged)

ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะ Peak-aged ที่มีความแข็งและความแข็งแรงสูงสุด พบว่าเกิดการตกตะกอนในเฟส α -Al ที่มีรูปร่างเป็นแผ่น มีความหนาประมาณ 3-10 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 15-120 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังพบตะกอนมีการวางตัวในแนวตั้งฉากกัน ในทิศ [200] และ [020] ของ α -Al เมทริกซ์ นอกจากนี้ยังพบลักษณะภาคตัดขวางของตะกอน ดังภาพ 56(ก-ข) จากแบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอน ดังภาพ 56(ค) สามารถยืนยันโครงสร้างผลึกในเมทริกซ์เป็นเฟส α -Al เช่นเดียวกับในสภาพหล่อ นอกจากนี้ จะพบจุดเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจากตกตะกอนในเมทริกซ์ ซึ่งมีความเข้มต่ำและสามารถมองเห็นเฉพาะบางจุดเท่านั้น เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็ก ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ชนิดและโครงสร้างผลึกได้ อย่างไรก็ตามอนุภาคน่าจะเป็นชนิด θ'' - Al_2Cu หรือ θ' - Al_2Cu ซึ่งเป็นเฟสแบบ Coherent และ Semi-coherent ตามลำดับ โดยจะทำให้ได้ความแข็งและความแข็งแรงสูงสุด โดย Smallman, R. E. and Ngan, A. H. W. (2007) รายงานว่าในโลหะผสมที่ผสมทองแดงมากกว่า หรือเท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าความแข็งสูงสุดในช่วงการเปลี่ยนจากโซน GP[2] หรือเฟส θ'' - Al_2Cu เป็นเฟส θ' - Al_2Cu แต่ในโลหะผสมที่ผสมทองแดงน้อยกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าความแข็งสูงสุดในช่วงของการเกิดเฟส θ' - Al_2Cu โดยตะกอน θ'' - Al_2Cu ซึ่งอยู่ในสภาวะ Coherency จะมีความหนาสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่า 150 นาโนเมตร มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล มีทิศการโตขนานกับระนาบ {100} ของอะลูมิเนียม จากงานวิจัยของ Mitlin, D., Radmilovic, V. and Morris, J. W. (1999) พบว่าในโลหะผสม Al-Cu ตะกอนเป็นเฟส θ' - Al_2Cu ส่วนในโลหะผสม Al-Cu-Si จะพบตะกอนของเฟส θ' - Al_2Cu และเฟส Si โดยอนุภาคในโลหะผสม Al-Cu-Si จะมีขนาดเล็กกว่าในโลหะผสม Al-Cu อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ไม่พบการตกตะกอนของเฟส Si



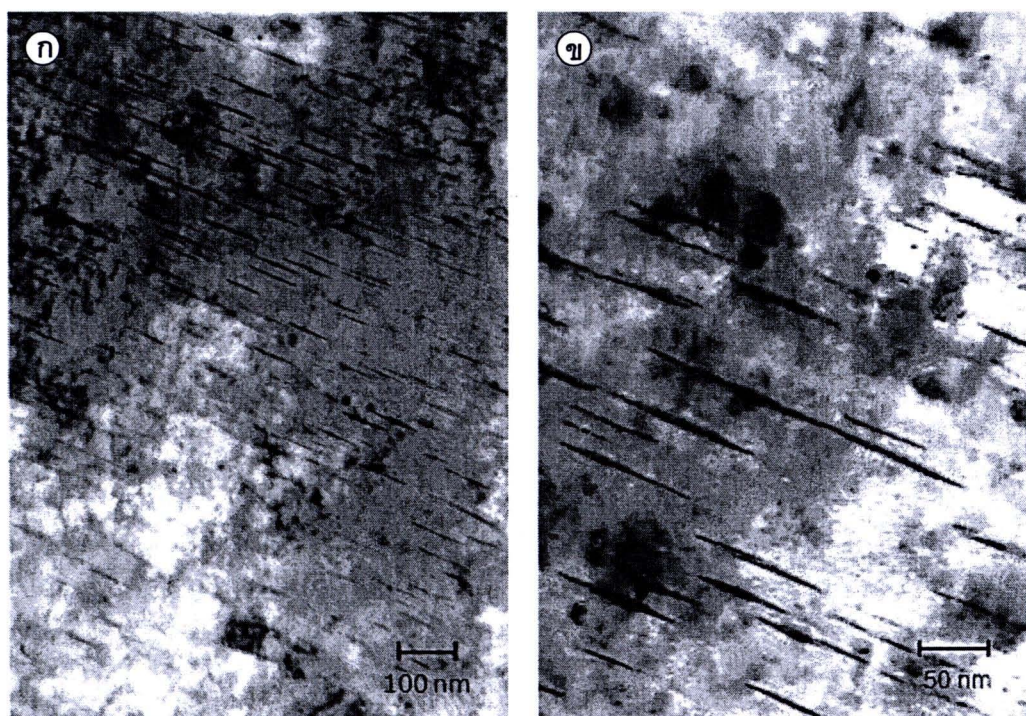
โดย  แสดงจุดเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจากตะกอน

ภาพ 56 (ก) ภาพ Bright-field TEM แสดงลักษณะของอนุภาคที่ตกตะกอนในช่วง Peak-aged ที่กำลังขยาย 120,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 200,000 เท่า (ค) แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจาก α -Al เมทริกซ์ และตะกอนใน แกนโซน $[001]_{Al}$

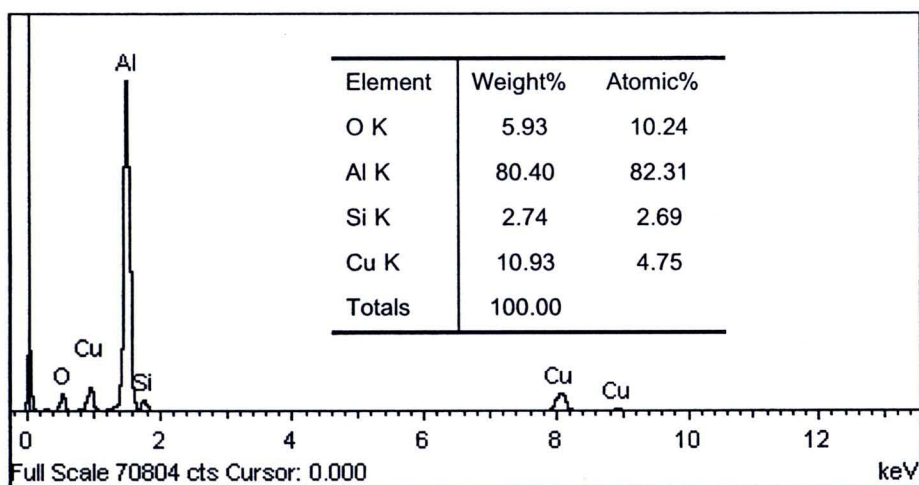
5.4 ชิ้นงานผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (Over-aged)

ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะ Over-aged พบว่าตะกอนในเฟส α -Al มีรูปร่างเป็นแผ่น เช่นเดียวกับในสภาวะ Peak-aged แต่จะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีความหนาประมาณ 3-15 นาโนเมตร และความยาวประมาณ 30-200 นาโนเมตร ดังภาพ 57 โดยตะกอนที่พบอาจเป็นตะกอนของเฟส θ' โดย Smallman, R. E. and Ngan, A. H. W. (2007) รายงานว่าตะกอนที่เกิดขึ้นในช่วงที่สามของการบ่มแข็งที่เวลานานขึ้นของโลหะผสม Al-Cu เป็นเฟส θ' ที่มีขนาดใหญ่ มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล มีทิศการโตตามแนวระนาบ $\langle 100 \rangle_{Al}$ ซึ่งอยู่ในสภาวะ Semi-coherency

ภาพ 57 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDS แบบ Point Analysis บริเวณตะกอนที่มีรูปร่างเป็นแผ่น พบว่าตะกอนประกอบด้วยธาตุหลัก คือ Al และ Cu ดังนั้นจึงสามารถยืนยันผลการทดลองได้ว่าตะกอนที่มีรูปร่างเป็นแผ่นน่าจะเป็นเฟส θ' -Al₂Cu



ภาพ 57 (ก) ภาพ Bright-field TEM แสดงลักษณะของอนุภาคที่ตกตะกอนใน α -Al ในช่วง Over-aged ที่กำลังขยาย 80,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 120,000 เท่า



ภาพ 58 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDS แบบ Point Analysis ของตกตะกอนใน α -Al เมทริกซ์



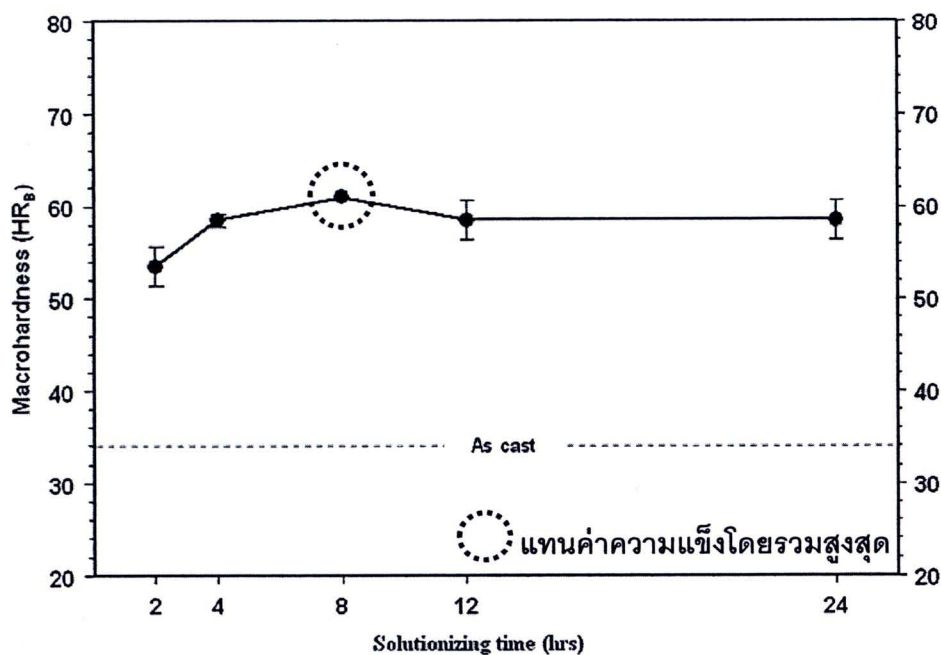
การทดสอบสมบัติเชิงกล

1. การทดสอบความแข็ง

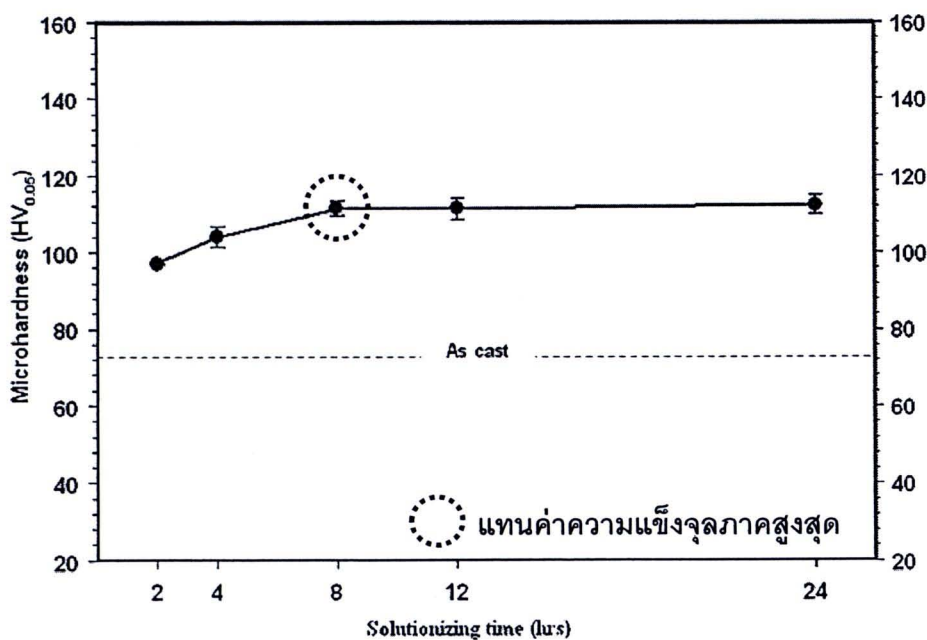
ผลการทดสอบความแข็งโดยรวมและความแข็งจุลภาคภายในเดนไดรต์ชิ้นงานในสภาพหล่อและชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย แสดงดังภาพ 59 และ 60 และตาราง ในภาคผนวก ก พบว่าในสภาพหล่อมีความแข็งโดยรวมและความแข็งจุลภาคภายในเดนไดรต์เท่ากับ 34 HR_B และ $73 \text{ HV}_{0.05}$ ตามลำดับ ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง ความแข็งโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นจากในสภาพหล่อเป็น 55 HR_B , 58 HR_B , 61 HR_B , 59 HR_B และ 59 HR_B ตามลำดับ และความแข็งจุลภาคภายในเดนไดรต์เพิ่มขึ้นเป็น $102 \text{ HV}_{0.05}$, $107 \text{ HV}_{0.05}$, $116 \text{ HV}_{0.05}$, $115 \text{ HV}_{0.05}$ และ $115 \text{ HV}_{0.05}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นว่าการอบละลายทำให้ความแข็งมีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงสุดที่เวลา 8 ชั่วโมง เนื่องจากการสลายตัวของโครงสร้างยูเทคติกในเมทริกซ์ของ $\alpha\text{-Al}$ ทำให้โครงสร้างบิดเบี้ยวไม่เป็นระเบียบและเกิดความเครียดขึ้น แต่เมื่อเวลานานขึ้นทำให้ความแข็งมีแนวโน้มคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างยูเทคติกมีการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้เลือกอุณหภูมิในการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ในการศึกษาผลของการบ่มแข็งในขั้นตอนต่อไป

ผลการวัดความแข็งโดยรวมและความแข็งจุลภาคภายในเดนไดรต์ของเฟส $\alpha\text{-Al}$ ในสภาพหล่อและชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งอุณหภูมิ 150, 170, 200 และ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 3, 6, 9, 12, 15, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง แสดงดังภาพ 61 และ 62 และตาราง 14-17 ในภาคผนวก ก ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็งทุกอุณหภูมิ ความแข็งโดยรวมและความแข็งจุลภาคมีค่าเพิ่มขึ้นจากสภาพหล่อ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการบ่มแข็งสูงขึ้นจาก 150 เป็น 230 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการบ่มแข็งเพื่อให้ได้ความแข็งโดยรวมและความแข็งจุลภาคภายในเดนไดรต์สูงสุดจะใช้ระยะเวลาในการบ่มแข็งสั้นลง โดยการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความแข็งโดยรวมและความแข็งจุลภาคภายในเดนไดรต์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 72 HR_B และ $124 \text{ HV}_{0.05}$ ตามลำดับ เมื่ออบเป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุดเท่ากับ 75 HR_B และ $139 \text{ HV}_{0.05}$ ตามลำดับ เมื่ออบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่ออบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุดเท่ากับ 69 HR_B และ $119 \text{ HV}_{0.05}$ ตามลำดับ ที่เวลา 12 ชั่วโมง ในขณะที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุดเท่ากับ 67 HR_B และ $119 \text{ HV}_{0.05}$ ตามลำดับ ที่เวลา 3 ชั่วโมง

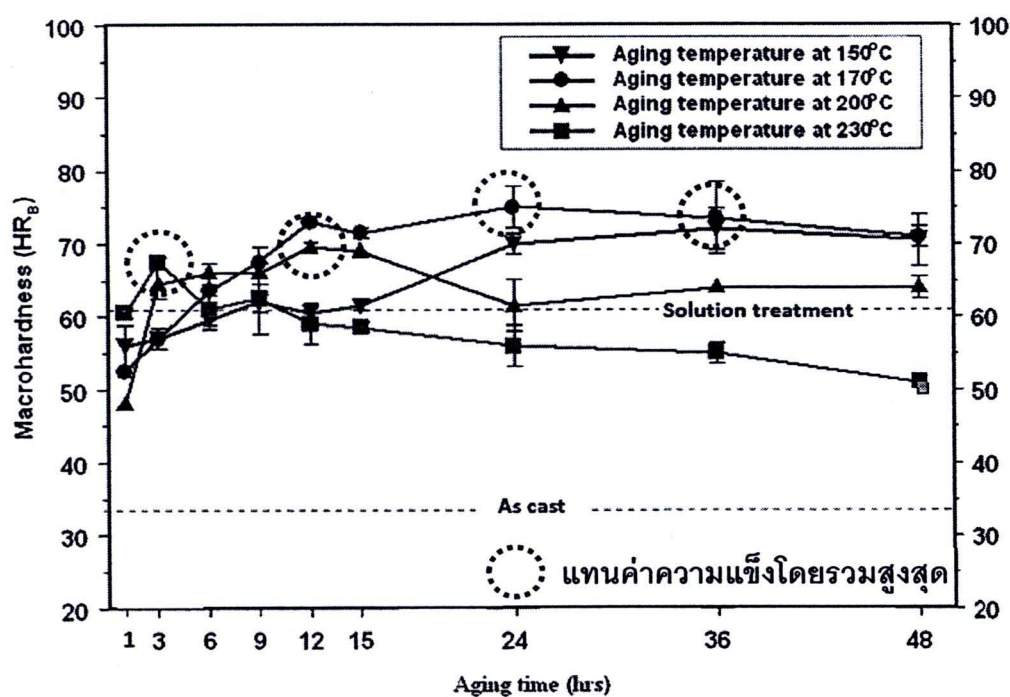
จากกราฟความเข้มในภาพ 61 และ 62 สามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง โดยช่วงแรกของการบ่มแข็ง ค่าความเข้มจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดและลดลงในช่วงสุดท้าย โดยช่วงแรกของการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำหรือเวลาน้อยเกินไปซึ่งเรียกว่าสภาวะ Under-aged ความเข้มจะมีค่าต่ำเนื่องจากกระบวนการตกตะกอนยังไม่สมบูรณ์ ส่วนในช่วงที่ให้ค่าความเข้มสูงสุดเรียกว่า Optimum-aged หรือ Peak-aged โดยตะกอนจะมีขนาดที่เหมาะสม และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดความเครียดรอบๆ ตะกอน ซึ่งเป็นตะกอนแบบ Coherency ทำให้โลหะผสมมีความเข้มสูงสุด โดยในการทดลองครั้งนี้พบว่า การอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะมีค่าความเข้มโดยรวมและความเข้มจุลภาคภายในเดนไดรต์สูงสุด โดยตะกอนควรมีความหนาประมาณ 3-10 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 15-120 นาโนเมตร แต่เมื่ออุณหภูมิสูงหรือเวลานานเกินไป เรียกว่าสภาวะ Over-aging ความเข้มจะลดลงจากจุดสูงสุดอีกครั้ง เนื่องจากอนุภาคที่ตกตะกอนจะมีขนาดใหญ่เกินไป และมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ พลังงานความเครียดรอบๆ ตะกอนจะถูกปลดปล่อย ซึ่งเป็นตะกอนแบบ Semi-coherency ทำให้โลหะผสมจะมีความเข้มลดลง



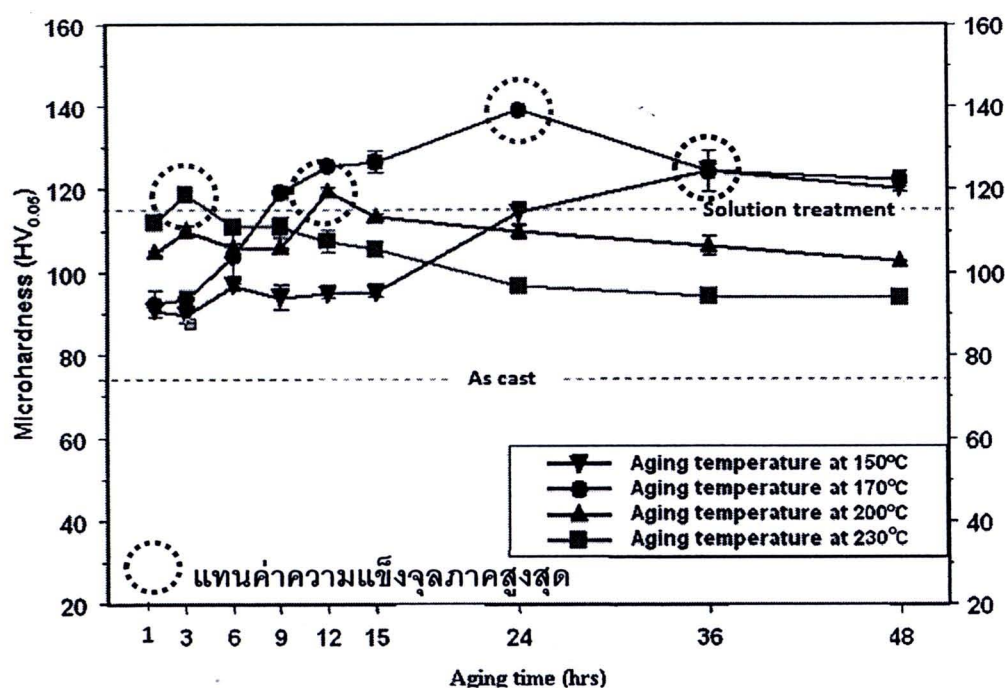
ภาพ 59 ผลของเวลาในการอบละลายต่อความแข็งโดยรวม เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส



ภาพ 60 ผลของเวลาในการอบละลายต่อความแข็งจุลภาคภายในเดนไดรท์ เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส



ภาพ 61 ผลของเวลาในการบ่มแข็งต่อความแข็งโดยรวม เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ/เวลาต่างๆ

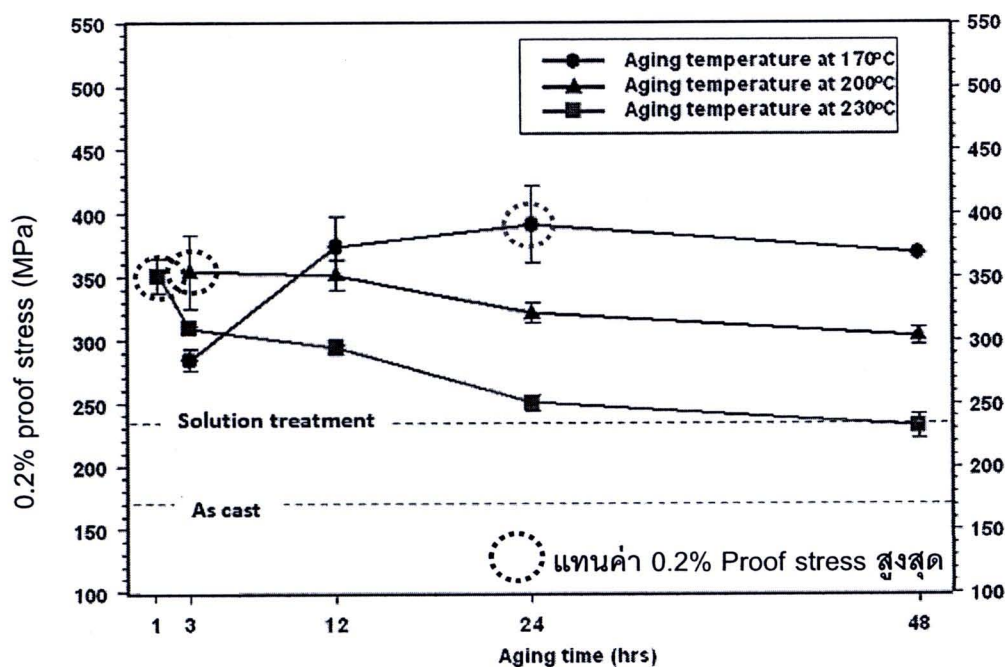


ภาพ 62 ผลของเวลาในการบ่มแข็งต่อความแข็งจุลภาค เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ/เวลาต่างๆ

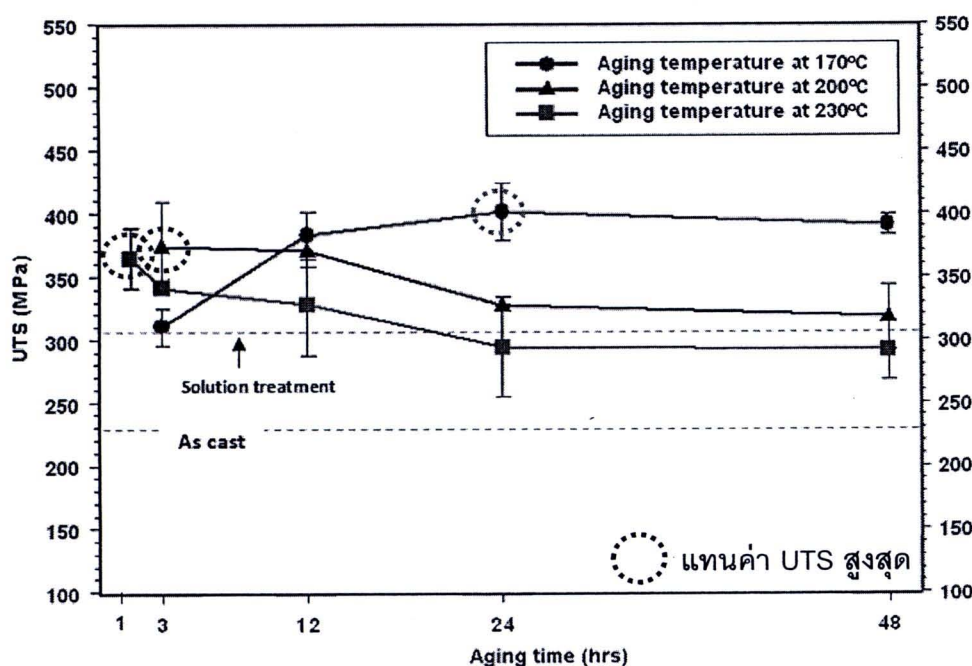
2. การทดสอบแรงดึง

ภาพ 63-65 แสดงผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ซึ่งประกอบด้วย ค่า 0.2% ความเค้นพิสูจน์ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายและการบ่มแข็งค่า 0.2% ความเค้นพิสูจน์ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจากสภาพหล่อ จนมีค่าสูงสุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลานานขึ้น ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะลดลงจากสภาพหล่อ ตาราง 12 แสดงค่าสมบัติเชิงกลสูงสุดที่ได้จากการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170, 200 และ 230 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ค่า 0.2% ความเค้นพิสูจน์ และค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่ามากที่สุด ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าสูงสุดหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

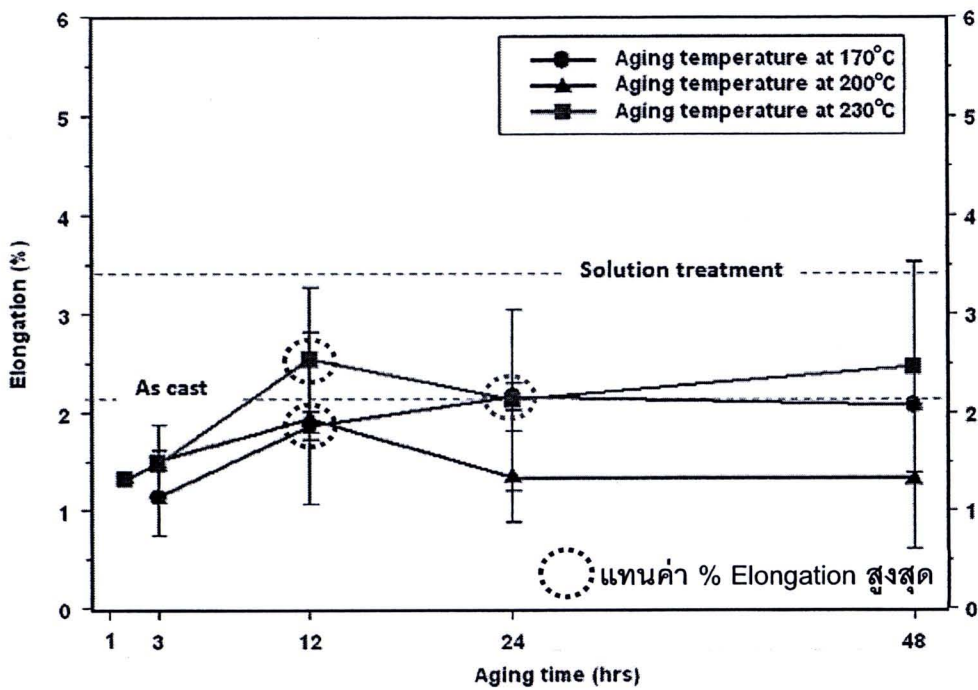
จากกราฟค่า 0.2% ความเค้นพิสูจน์ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว สามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง โดยช่วงแรกของการบ่มแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด เนื่องจากตะกอนมีขนาดเล็กและมีสนามความเครียด มีลักษณะเป็น Coherent Forms จึงทำให้ดิสโลเคชันจะต้องใช้พลังงานสูงในการเคลื่อนที่ ทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และความแข็งแรงดึงจะลดลงในช่วงสุดท้าย เนื่องจากตะกอนมีขนาดใหญ่เกินไปและสนามความเครียดของตะกอนลดลง ซึ่งดิสโลเคชันสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย นอกจากนี้การบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงเกินไป คือ 200 และ 230 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง เนื่องจากตกตะกอนมีขนาดใหญ่และสนามความเครียดของตะกอนลดลง ซึ่งอยู่ในสภาวะ Non-coherent



ภาพ 63 ผลของการบ่มแข็งต่อค่า 0.2% ความเค้นพิสูจน์ เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ/เวลาต่างๆ



ภาพ 64 ผลของการบ่มแข็งต่อค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ/เวลาต่างๆ



ภาพ 65 ผลของการบ่มแข็งต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ/เวลาต่างๆ

ตาราง 12 สมบัติเชิงกลหลังการปรับสภาพด้วยความร้อน

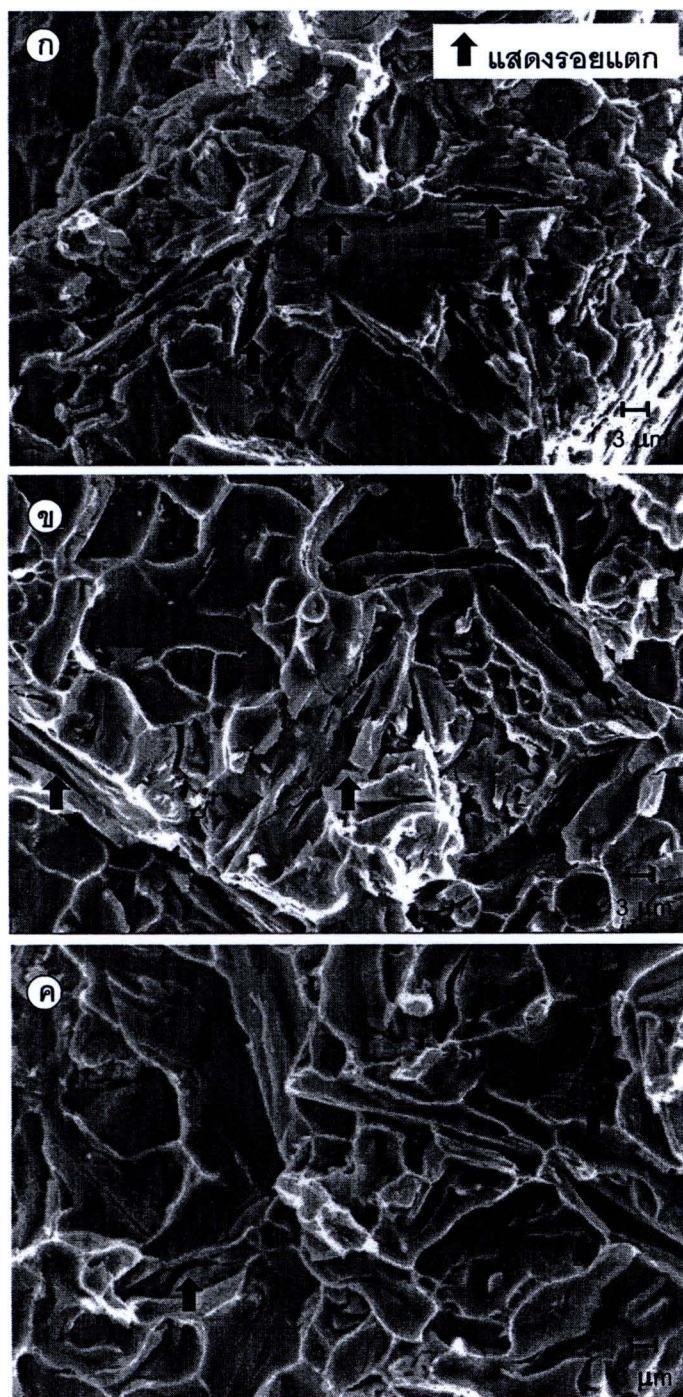
ชิ้นงาน	ค่าสูงสุด		
	0.2% Proof Stress (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
ST + Aging	389	400	2.0
170 °C	(Aging for 24 hrs)	(Aging for 24 hrs)	(Aging for 24, 48 hrs)
ST + Aging	354	377	1.9
200 °C	(Aging for 3 hrs)	(Aging for 3 hrs)	(Aging for 12 hrs)
ST + Aging	350	366	2.7
230 °C	(Aging for 3 hrs)	(Aging for 3 hrs)	(Aging for 12 hrs)

หมายเหตุ: ST คือ ชิ้นงานหลังอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
ST + Aging คือ ชิ้นงานหลังอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ...องศาเซลเซียส เป็นเวลา...ชั่วโมง

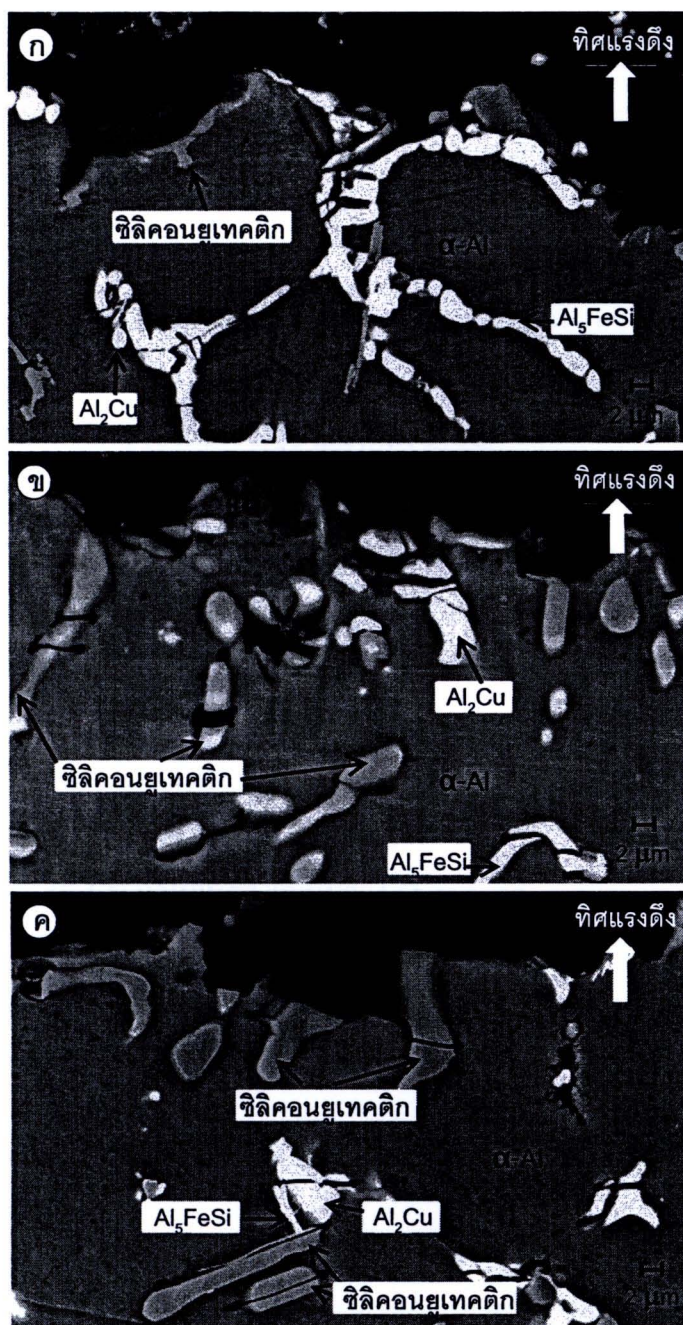
การศึกษารอยแตกของชิ้นงานหลังการทดสอบแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยได้ศึกษาบริเวณผิวหน้าและภาคตัดขวางของชิ้นงานใน 3 สภาวะ คือ 1) ชิ้นงานในสภาพหล่อ 2) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 3) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานทั้ง 3 สภาวะ มีการแตกแบบเปราะและพบรอยแตกภายในโครงสร้าง ซึ่งเป็นจุดกำเนิดของการแตกหัก ดังภาพ 66

จากภาพถ่ายภาคตัดขวางที่ความลึกประมาณ 20 ไมครอน จากผิวรอยแตก แสดงดังภาพ 67 พบว่าการแตกเกิดขึ้นตามรอยต่อของเมทริกซ์กับโครงสร้างยูเทคติก และยังพบการแตกหักของเฟสซิลิกอนยูเทคติก เฟส Al_2Cu และเฟส Al_5FeSi ในแนวตั้งฉากกับทิศของแรงดึง นอกจากนี้จะเห็นการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) ของโครงสร้างยูเทคติก เมื่อเปรียบเทียบการแตกหักและการเปลี่ยนรูปแบบถาวรในสภาพหล่อ พบว่าหลังการปรับสภาพด้วยความร้อนจะมีการแตกหักลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงดึง ที่พบว่าหลังการปรับสภาพด้วยความร้อนทำให้ความแข็งแรงดึงจะเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยของ Elsebaie, Q., et al. (2011) รายงานว่าโครงสร้างยูเทคติกของเฟสซิลิกอนยูเทคติกและสารประกอบโลหะเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก เนื่องจากมีความเปราะสูง และจากงานวิจัยของ Ouellet, P. และ Samuel, F. H. (1999) ได้อธิบายว่าการแตกหักหลังการทดสอบแรงดึงจะมีการแตกผ่านเฟสยูเทคติกของสารประกอบที่มีส่วนผสมของธาตุ Si, Cu และ Fe ที่มีความเปราะสูง โดยอาจเริ่มที่รูพรุนขนาดเล็กระหว่างเฟสยูเทคติก



ภาพ 66 ภาพ BEI เปรียบเทียบลักษณะการแตกของผิวหน้าหลังการทดสอบแรงดึง
 (ก) ในสภาพหล่อ (ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส
 เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็งที่
 อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพ 67 ภาพ BEI เปรียบเทียบลักษณะการแตกของภาคตัดขวางหลังการทดสอบแรงดึง (ก) ในสภาพหล่อ (ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) ชิ้นงานหลังการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง