

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการหล่อด้วยกระบวนการ LFEC เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเมื่อทำการปรับปริมาณธาตุผสมและโครงสร้างภายหลังผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเมื่อทำการอบที่เวลาต่างๆ กัน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาสารประกอบที่เกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุผสมภายหลังการหล่อ และสารประกอบที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้เวลาในการอบให้เป็นเนื้อเดียวนานขึ้น

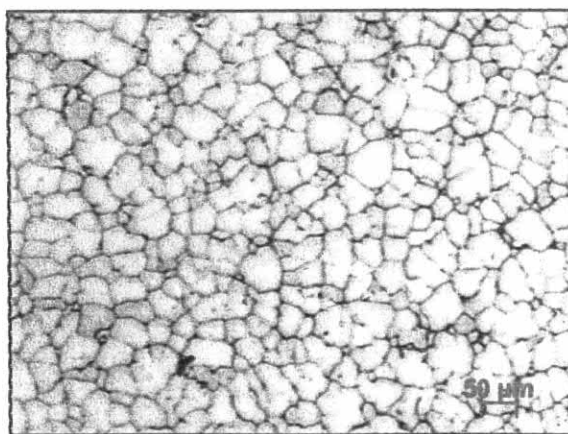
4.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของโครงสร้างจุลภาคภายหลังการหล่อ และโครงสร้างจุลภาคภายหลังผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว

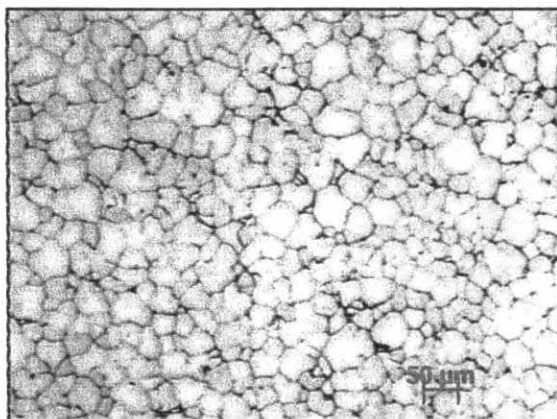
4.1.1 โครงสร้างจุลภาคในสภาพหลังการหล่อ

ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคในสภาพหลังการหล่อ จะทำการศึกษาโครงสร้างโดยรวม คือ ขนาดเกรน ลักษณะของเกรน ปริมาณและลักษณะโครงสร้างยูเทคติก และลักษณะของสารประกอบที่เกิดขึ้น

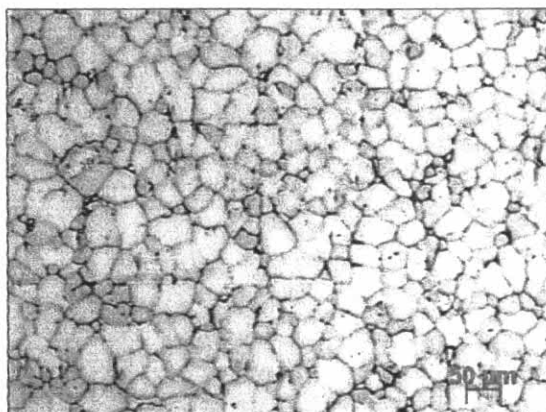
เมื่อทำการเตรียมชิ้นงานสำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาคแล้ว นำชิ้นงานมาทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 50 เท่า เพื่อดูโครงสร้างโดยรวม ดังภาพที่ 4.1 ก) ถึง จ) ซึ่งแต่ละภาพจะเป็นโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษที่มีส่วนผสม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสังกะสี, 0.14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเซอร์โคเนียม, 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเหล็ก และ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซิลิคอน และแต่ละภาพจะทำการปรับปริมาณของธาตุแมกนีเซียม และทองแดง เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเมื่อปริมาณธาตุผสมเปลี่ยนแปลงไป



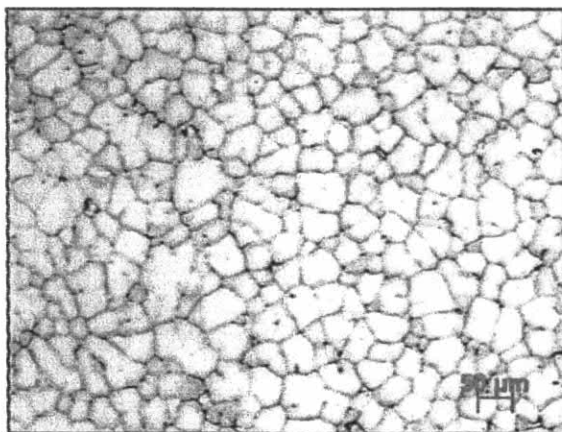
น) 2.5Mg2.3Cu (5x)



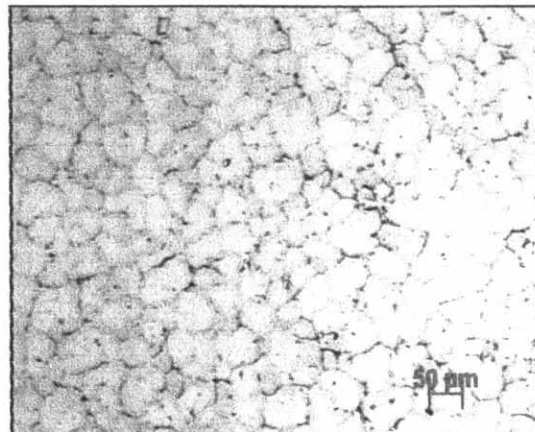
ข) 2.5Mg1.5Cu (5x)



ค) 2.5Mg1.0Cu (5x)



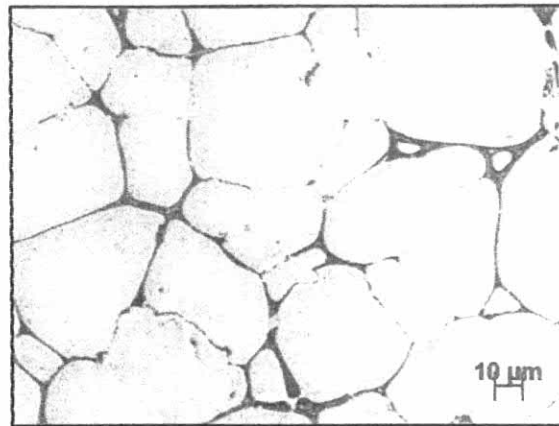
ง) 1.5Mg2.3Cu (5x)



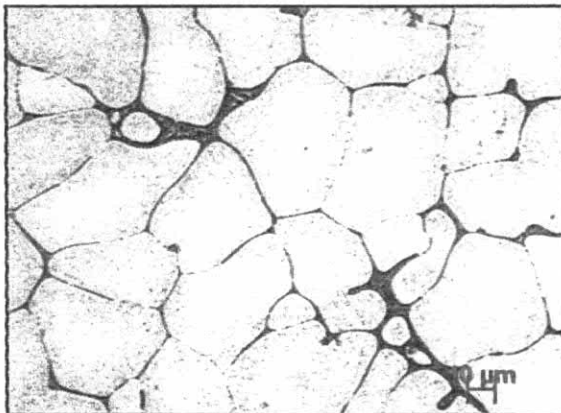
จ) 1.0Mg2.3Cu (5x)

ภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษที่ส่วนผสมต่างๆ กันที่ กำลังขยาย 50 เท่า ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง น) Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ข) Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu ค) Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu ง) Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu จ) Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu

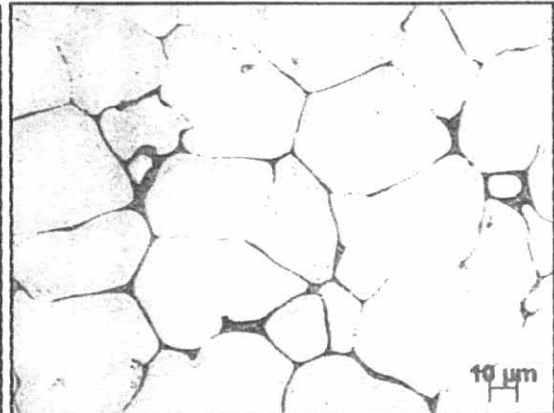
จากนั้นทำการศึกษาลักษณะของโครงสร้างยูเทคติกที่บริเวณขอบเกรนของ ชิ้นงานแต่ละส่วนผสม แสดงดังภาพที่ 4.2 ก) ถึง จ)



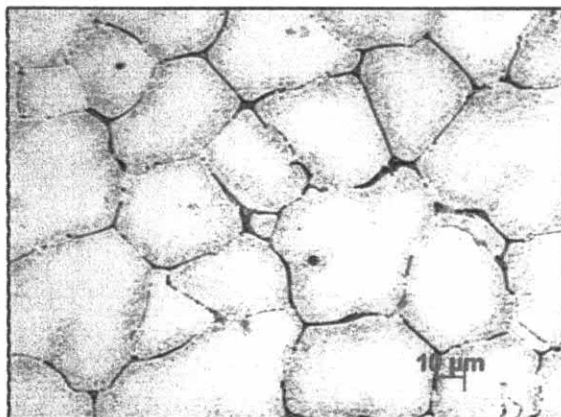
น) 2.5Mg2.3Cu (20x)



ข) 2.5Mg1.5Cu (20x)



ค) 2.5Mg1.0Cu (20x)



ง) 1.5Mg2.3Cu (20x)



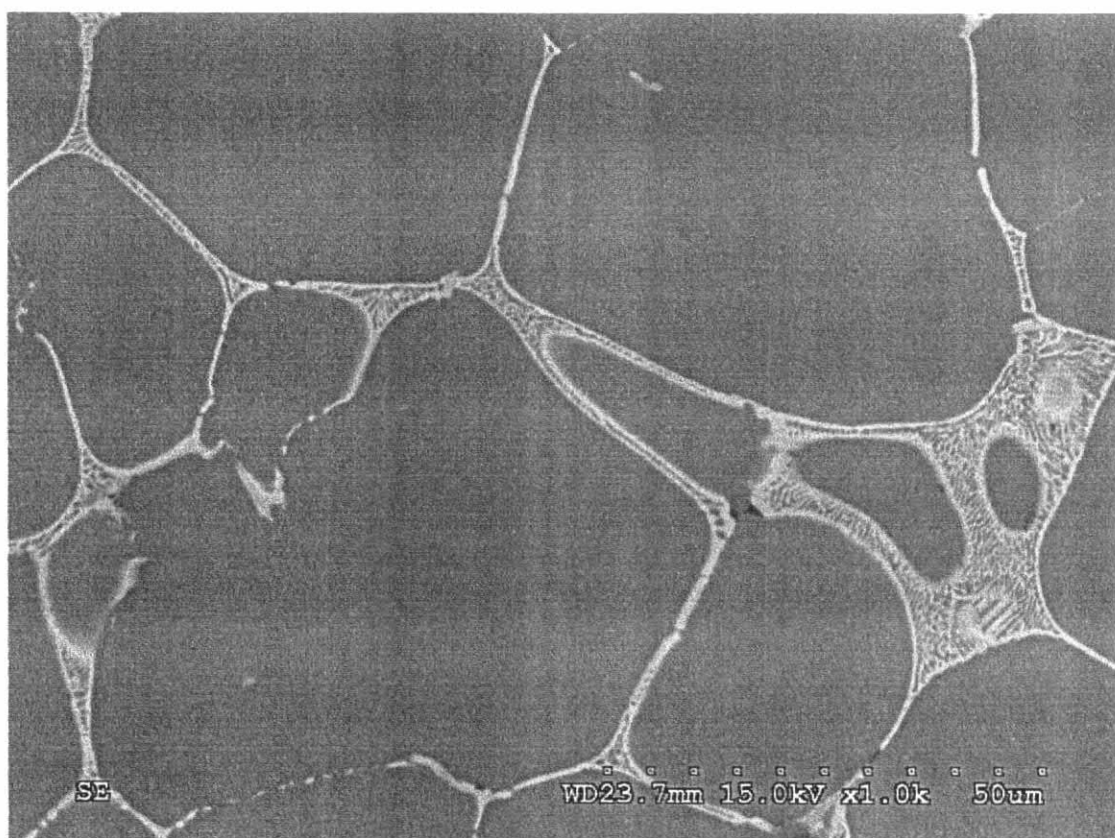
จ) 1.0Mg2.3Cu (20x)

ภาพที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษที่ส่วนผสมต่างๆ กัน ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกำลังขยาย 200 เท่า น) Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ข) Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu ค) Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu ง) Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu จ) Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu

จากภาพที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าที่บริเวณขอบเกรนเกิดโครงสร้างยูเทคติก และมีสารประกอบซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งยาวและเป็นเหลี่ยมสี่เหลี่ยมเกิดพาดตามบริเวณยูเทคติก และจากภาพ 4.1 ก)-จ) จะพบว่าเมื่อปริมาณของทองแดงลดลงโครงสร้างยูเทคติกจะลดลงตามภาพ ก)

2.3Cu ข) 1.5Cu ค) 1.0Cu ตามลำดับ และเมื่อปริมาณแมกนีเซียมลดลงปริมาณยูเทคติกตามบริเวณขอบเกรนก็จะลดลงและโครงสร้างยูเทคติกเริ่มขาดความต่อเนื่องอย่างเห็นได้ชัดตามภาพที่ 4.2 ก) 2.5Mg ง) 1.5Mg จ) 1.0Mg ตามลำดับ

จากนั้นได้ทำการหาปริมาณยูเทคติกโดยวิธี Quantitative analysis แบบ Point counting [23] ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดเพื่อใช้กำลังขยายที่สูงในการวัดหาปริมาณยูเทคติก เนื่องจากโครงสร้างยูเทคติกมีขนาดเล็กมาก ดังภาพที่ 4.3 ซึ่งเป็นภาพที่ถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด จะเห็นว่าขนาดโครงสร้างยูเทคติกมีขนาดเล็กมากดังภาพที่ 4.3 จึงจำเป็นต้องใช้กล้องที่กำลังขยายสูงในการศึกษา



ภาพที่ 4.3 แสดงโครงสร้างยูเทคติกที่ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของโลหะอะลูมิเนียมผสม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ภายหลังจากการหล่อ

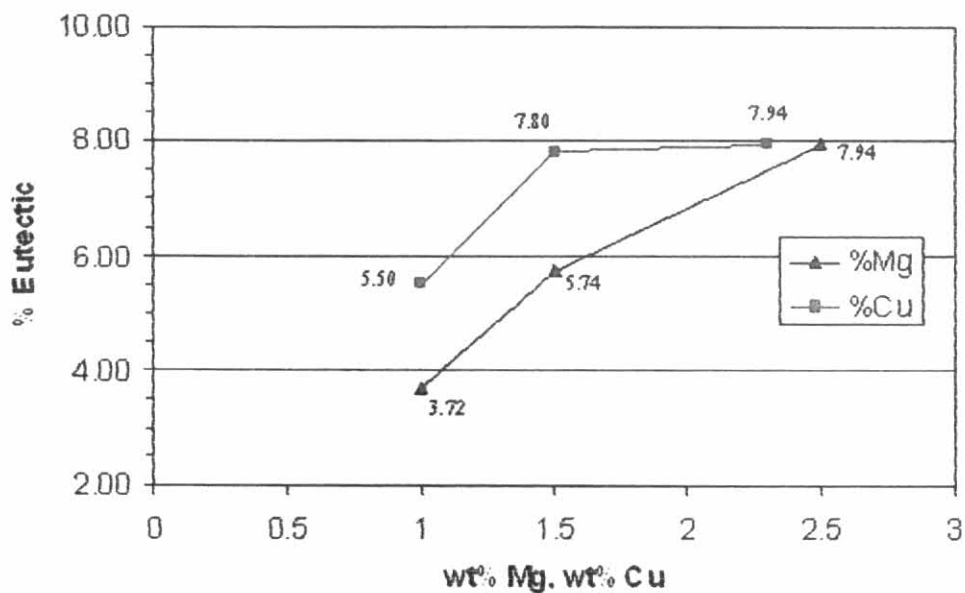
ในการศึกษานี้ใช้กำลังขยาย 1000 เท่า ในการหาปริมาณยูเทคติก จากนั้นทำการสร้างสี่เหลี่ยมขนาด 4 x 4 ซม. จำนวน 3 x 3 ภาพ จะได้ตารางในการหาปริมาณยูเทคติก จากนั้นกำหนดจุดกลางเป็น 1 จุดขอบเป็น 0.5 และ จุดมุมเป็น 0.25 เมื่อโครงสร้างยูเทคติกตกอยู่ที่จุดใด ก็ทำการคูณด้วยค่าของจุดนั้น จากนั้นทำการรวมแล้วหารด้วย 9 (เนื่องจากจุดทั้งหมดเมื่อรวมแล้วจะมีค่าเป็น 9) ในการศึกษาจะใช้วิธีทางสถิติเข้ามาช่วยเพื่อหาจำนวนข้อมูลที่เหมาะสมในการ

กลุ่มตัวอย่าง โดยการหาค่า Standard deviation ซึ่งในการศึกษานี้ แต่ละชิ้นงานจะใช้ภาพตัวอย่าง ประมาณ 120 ภาพตัวอย่าง เพื่อหาค่าปริมาณยูเทคติก ซึ่งจะได้ผลตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1. ตารางเปรียบเทียบปริมาณยูเทคติกของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ ที่ส่วนผสมต่างๆ

Al wt%	Zn wt%	Mg wt%	Cu wt%	%Eutectic
Bal.	10	2.5	2.3	7.94±1.26
Bal.	10	2.5	1.5	7.80±1.13
Bal.	10	2.5	1.0	5.50±1.00
Bal.	10	1.5	2.3	5.74±0.92
Bal.	10	1.0	2.3	3.72±0.82

จากตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณของโครงสร้างยูเทคติกที่ส่วนผสมที่ 2.5Mg2.3Cu มีปริมาณโครงสร้างยูเทคติกที่มากที่สุด และที่ส่วนผสม 1.0Mg2.3Cu มีปริมาณโครงสร้างยูเทคติกที่น้อยที่สุด จากตารางที่ 4.1 จะนำค่าเปอร์เซ็นต์ยูเทคติกมาพล็อตหาความสัมพันธ์กับปริมาณธาตุผสมที่เปลี่ยนไปได้ผลดังภาพที่ 4.4



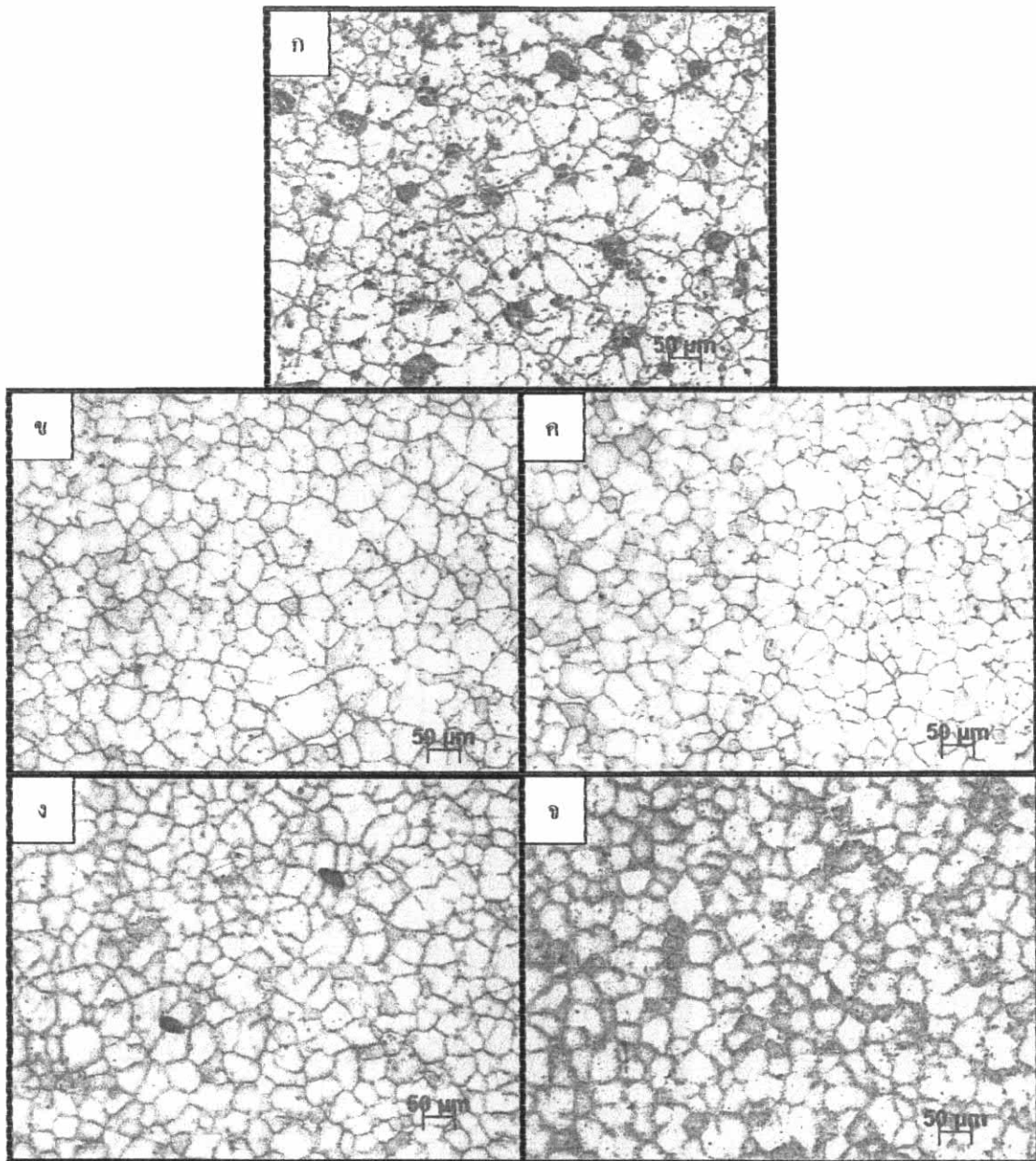
ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณยูเทคติกกับปริมาณของแมกนีเซียมและทองแดง ที่ผสมในโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ

จากภาพที่ 4.4 จะพบว่าเมื่อปริมาณธาตุแมกนีเซียมมีปริมาณลดลงขณะที่ส่วนผสมอื่นคงที่ จะเห็นว่าปริมาณยูเทคติกลดลง

เช่นเดียวกันกับเมื่อลดปริมาณธาตุทองแดงลงขณะที่ส่วนผสมอื่นคงที่จะพบว่า ปริมาณยูเทคติกลดลงเช่นกัน ซึ่งผลที่ได้นั้นตรงกับลักษณะโครงสร้างที่พบซึ่งโครงสร้างที่ $1.0\text{Mg}2.3\text{Cu}$ จะมีโครงสร้างยูเทคติกที่น้อยสุด ซึ่งทั้งนี้เมื่อปริมาณธาตุผสมลดลงส่งผลให้เมื่อโลหะเย็นตัวลงธาตุผสมที่ถูกผลักออกไปที่บริเวณขอบเกรนก็จะลดลง ทำให้ฟอร์มเป็นโครงสร้างยูเทคติกได้น้อยลง

เช่นเดียวกันกับเมื่อปริมาณธาตุทองแดงลดลง ปริมาณโครงสร้างยูเทคติกก็ลดลงเช่นกัน แต่ไม่ลดลงเท่ากับเมื่อปริมาณธาตุแมกนีเซียมลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโครงสร้างยูเทคติกประกอบไปด้วยโครงสร้างที่มีส่วนผสมของธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุทองแดง จึงทำให้เมื่อปริมาณแมกนีเซียมลดลงจึงส่งผลให้โครงสร้างยูเทคติกลดลงอย่างชัดเจน

จากนั้นทำการศึกษาลักษณะและขนาดของเกรนที่ส่วนผสมต่างๆ พบว่าลักษณะของเกรนของทั้ง 5 ส่วนผสมมีลักษณะค่อนข้างกลมและสม่ำเสมอทั้งนี้อาจเป็นเพราะกระบวนการผลิตที่มีการประยุกต์ใช้แรงแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้โครงสร้างมีความสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 4.5 ก) ถึง จ)



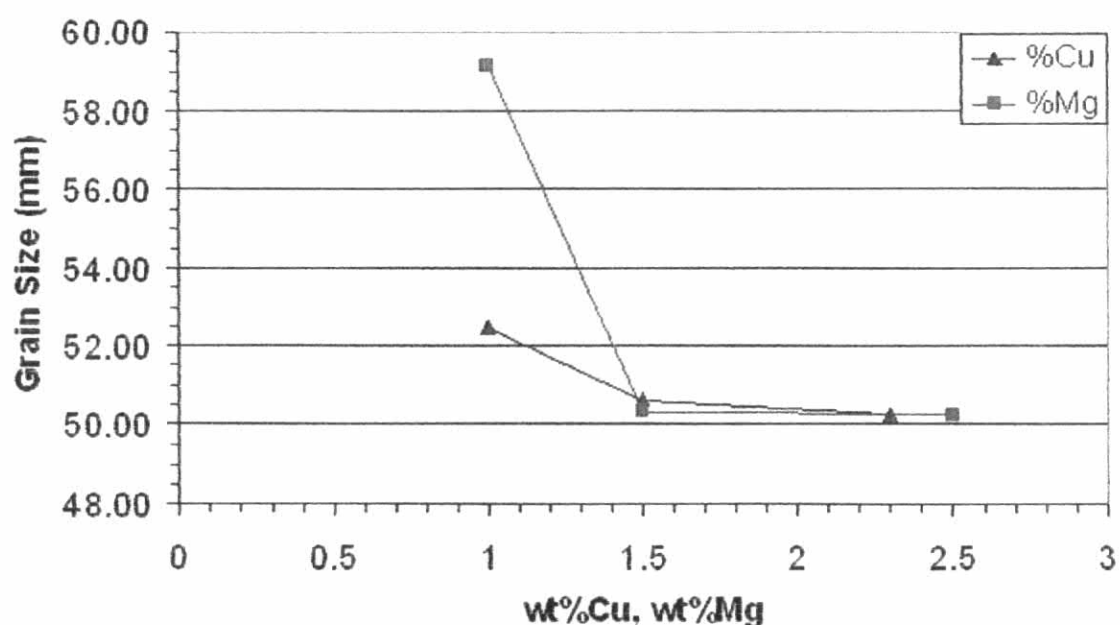
ภาพที่ 4.5 แสดงขนาดเกรนที่ส่วนผสมต่างๆกันของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ ในสภาพหล่อ ก) Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ข) Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu ค) Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu ง) Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu และ จ) Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu

จากภาพที่ 4.5 ก) ถึง จ) พบว่าขนาดของเกรนมีขนาดใกล้เคียงกัน จึงทำการตรวจสอบขนาดเกรนแบบ Line analysis [17][18] พบว่าขนาดเกรนมีขนาดใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 50 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4.2 โดยที่ปริมาณแมกนีเซียมต่ำสุด (Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu) มีขนาดเกรนใหญ่ที่สุด คือ 59.12 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบขนาดเกรนเมื่อปริมาณธาตุผสมเปลี่ยนแปลง

Al wt%	Zn wt%	Mg wt%	Cu wt%	Grain size
Bal.	10	2.5	2.3	50.24
Bal.	10	2.5	1.5	50.62
Bal.	10	2.5	1.0	52.43
Bal.	10	1.5	2.3	50.31
Bal.	10	1.0	2.3	59.12

จากนั้นนำผลที่จากตารางที่ 4.2 มาทำการพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ของขนาดเกรนกับปริมาณของธาตุแมกนีเซียมและทองแดง ที่เปลี่ยนแปลงไปในโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ ดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนกับปริมาณธาตุแมกนีเซียมและทองแดงที่เปลี่ยนแปลง

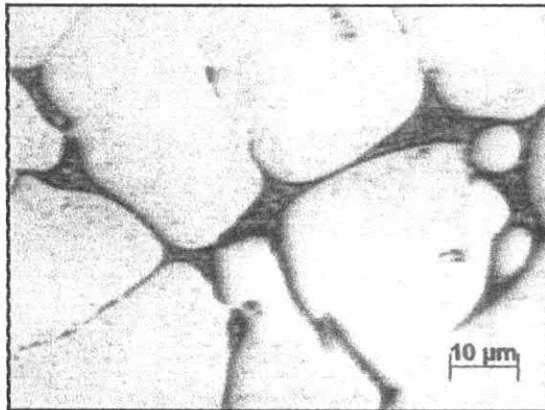
จากภาพที่ 4.6 พบว่าเมื่อปริมาณแมกนีเซียมและปริมาณทองแดงลดลงขนาดเกรนจะใหญ่ขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อปริมาณธาตุผสมลดลงทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นและปริมาณยูเทคติกก็ลดลงเนื่องจากยูเทคติกประกอบไปด้วยธาตุแมกนีเซียมและทองแดง

จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยรวมของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 460°C ที่เวลา 10, 30, 60, 180 และ 600 นาที ในบรรยากาศปกติ เพื่อ

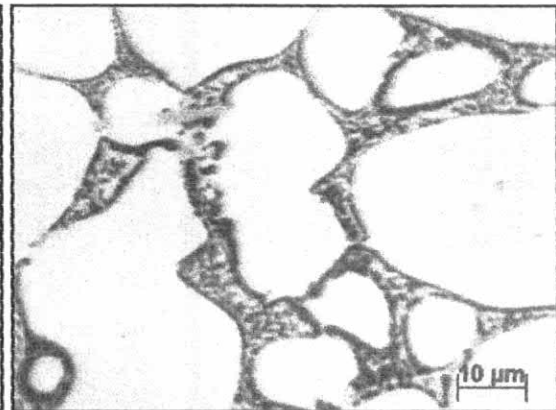
ศึกษาความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่เกิดขึ้น เช่น ลักษณะโครงสร้างยูเทคติก ซึ่งในการศึกษานี้ จะทำการศึกษาเทียบกับชิ้นงานในสภาพหล่อที่ส่วนผสมเดียวกัน

4.1.2 โครงสร้างจุลภาคภายหลังผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียว

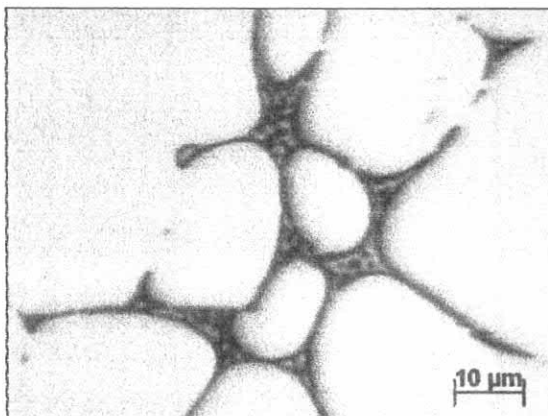
เมื่อทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคแล้วนำชิ้นงานมาศึกษาด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 500 เท่า ดังภาพที่ 4.7 ถึง 4.11



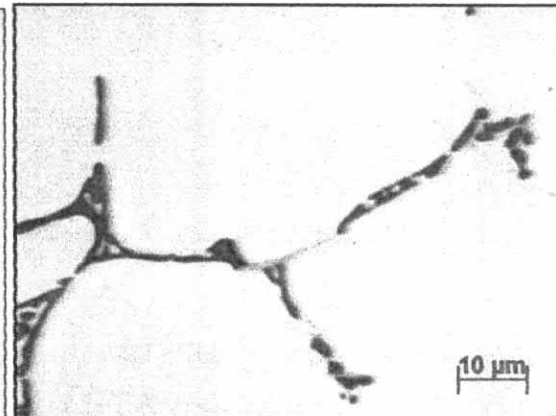
ก) 2.5Mg2.3Cu ในสภาพหลังหล่อ



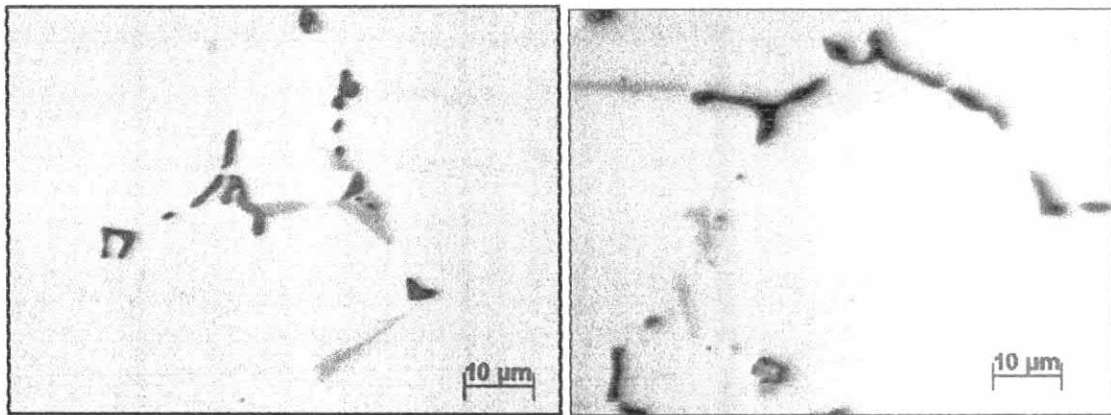
ข) 2.5Mg2.3Cu (อบ 10 นาที)



ค) 2.5Mg2.3Cu (อบ 30 นาที)



ง) 2.5Mg2.3Cu (อบ 60 นาที)

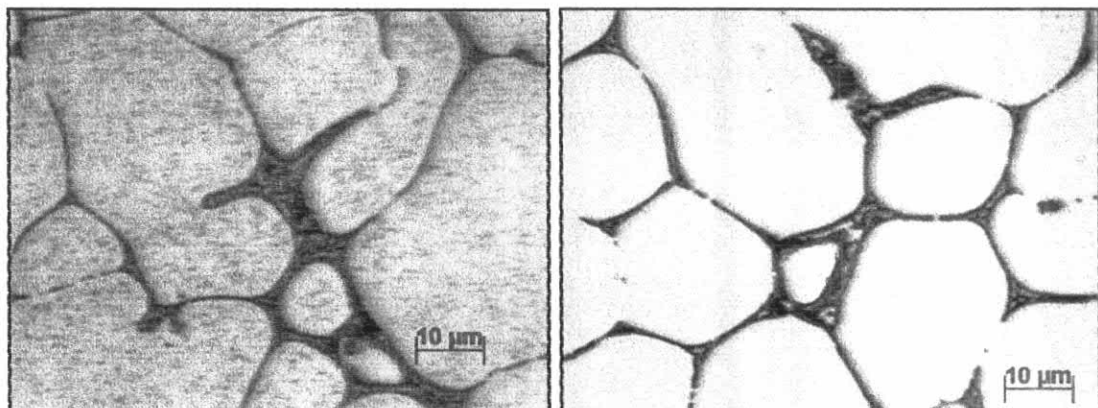


จ) 2.5Mg2.3Cu (อบ 180 นาที)

ข) 2.5Mg2.3Cu (อบ 600 นาที)

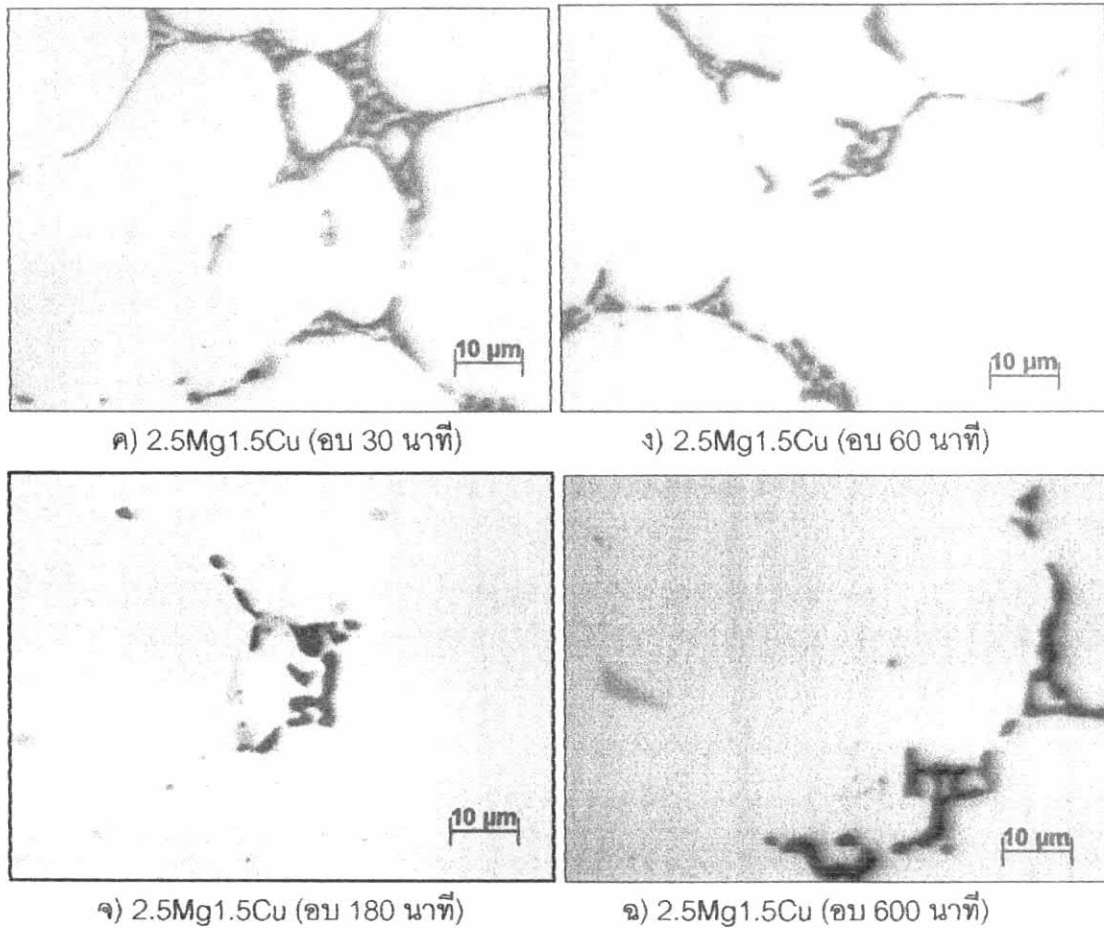
ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของ Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ที่ผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆ กัน ก) สภาพหล่อ, ข) 10 นาที, ค) 30 นาที, ง) 60 นาที, จ) 180 นาที และ ฉ) 600 นาที

จากภาพที่ 4.7 จะพบว่าโครงสร้างยูเทคติกของโลหะอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษที่ส่วนผสม 2.5Mg2.3Cu เกิดการสลายตัวมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการอบขึ้นงานมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากภาพที่ 4.7 ค) เมื่อเวลาในการอบผ่านไป 30 นาที จะเห็นโครงสร้างยูเทคติกเริ่มขาดความต่อเนื่อง และมีรูปร่างลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป คือ มีลักษณะค่อนข้างมน ดังภาพที่ 4.7 จ) และ ฉ) เช่นเดียวกับกับขึ้นงานที่ส่วนผสม 2.5Mg1.5Cu ดังภาพที่ 4.8



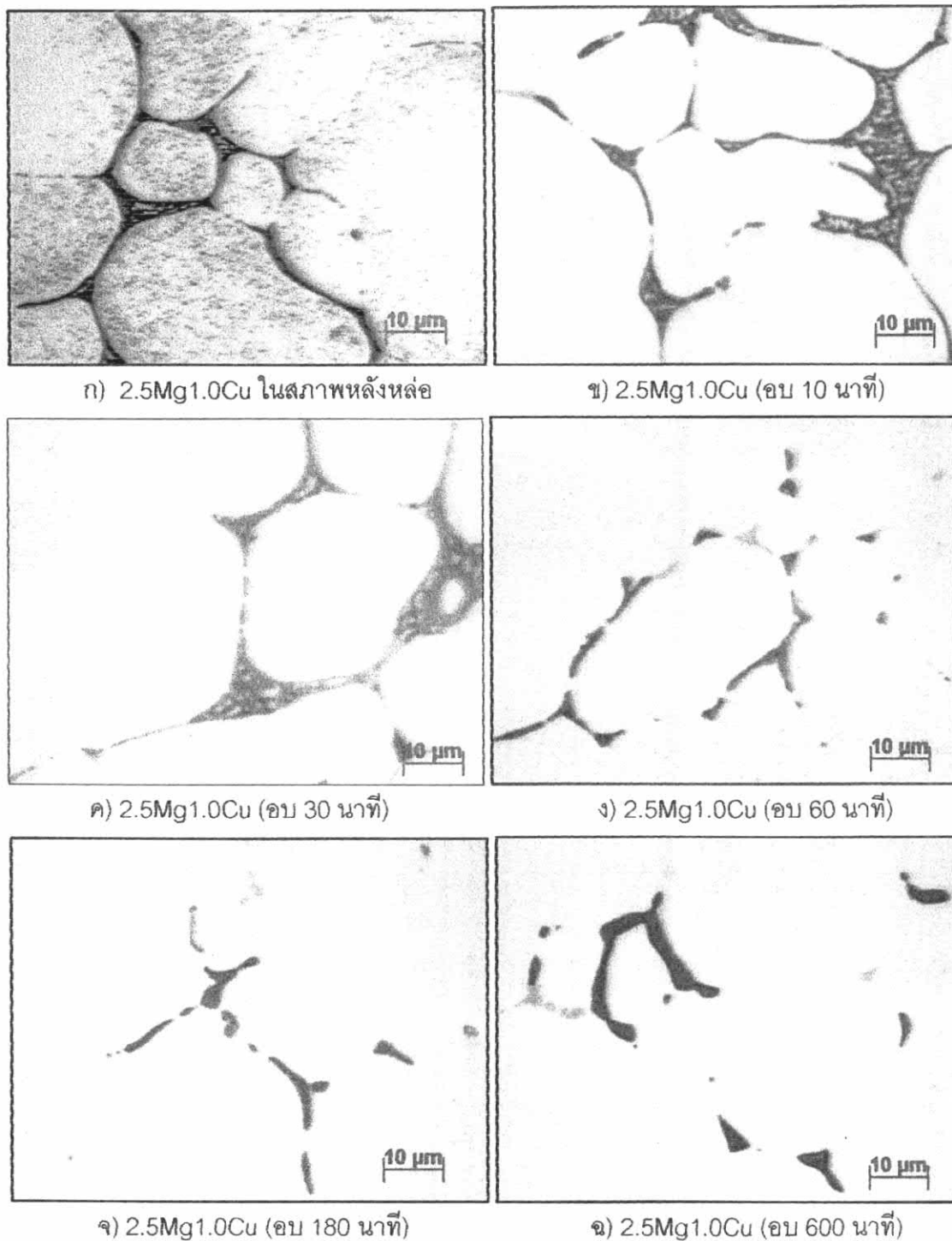
ก) 2.5Mg1.5Cu ในสภาพหล่อ

ข) 2.5Mg1.5Cu (อบ 10 นาที)



ภาพที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของ Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu ที่ผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆกัน ก) สภาพหล่อ, ข) 10 นาที, ค) 30 นาที, ง) 60 นาที, จ) 180 นาที และ ฉ) 600 นาที

จากภาพที่ 4.8 ก) ถึง ฉ) แสดงโครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆกัน ของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษที่ส่วนผสม 2.5Mg1.5Cu ซึ่งจากภาพให้ผลเช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่ส่วนผสม 2.5Mg2.3Cu ซึ่งโครงสร้างยูเทคติกเกิดการสลายตัวและพยายามฟอร์มตัวในลักษณะของทรงมนเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบมากขึ้น เช่นเดียวกับกับภาพที่ 4.9 ที่ชิ้นงานส่วนผสม 2.5Mg1.0Cu

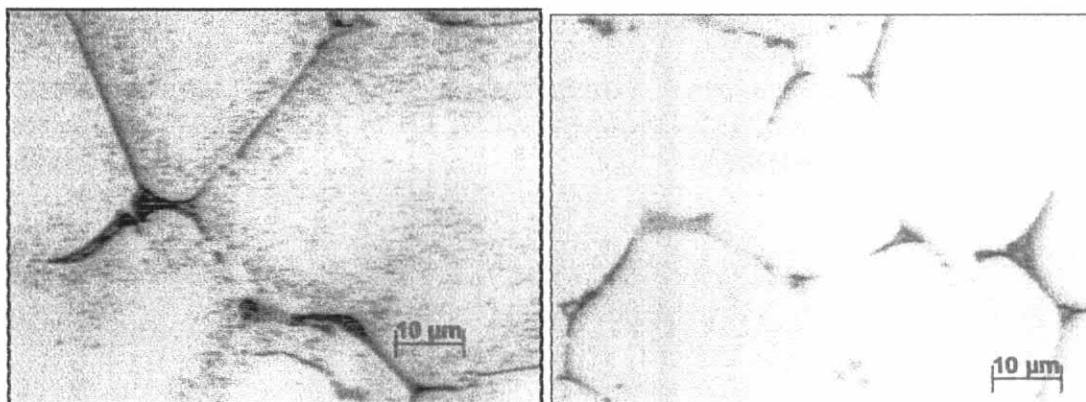


ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของ Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu ที่ผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆกัน ก) สภาพหล่อ, ข) 10 นาที, ค) 30 นาที, ง) 60 นาที, จ) 180 นาที และ ฉ) 600 นาที

จากภาพที่ 4.9 ก) ถึง ฉ) แสดงโครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆกัน ของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษที่ส่วนผสม 2.5Mg1.0Cu ซึ่งจาก

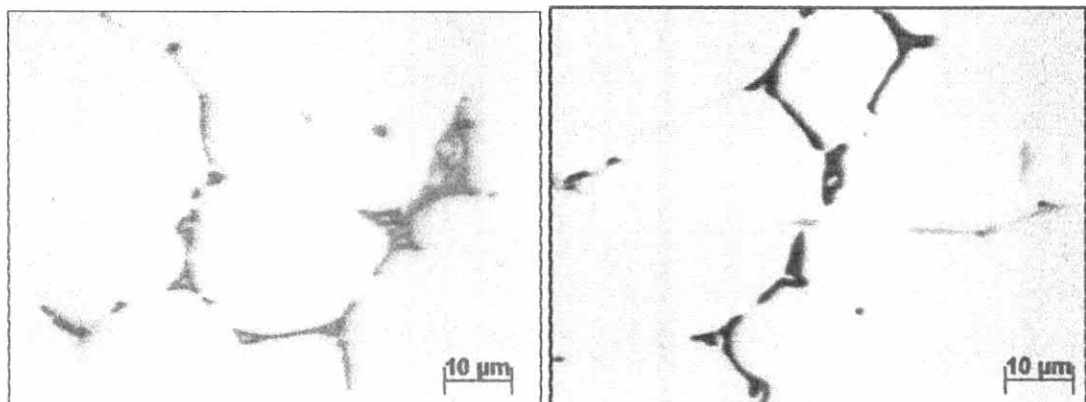
ภาพให้ผลเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ส่วนผสม 2.5Mg2.3Cu ซึ่งโครงสร้างยูเทคติกเกิดการสลายตัว และพยายามฟอร์มตัวในลักษณะของทรงมนเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบมากขึ้น

จากนั้นทำการศึกษาชิ้นงานที่ทำการเปลี่ยนปริมาณธาตุแมกนีเซียมที่ 1.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 4.10 และ 4.11



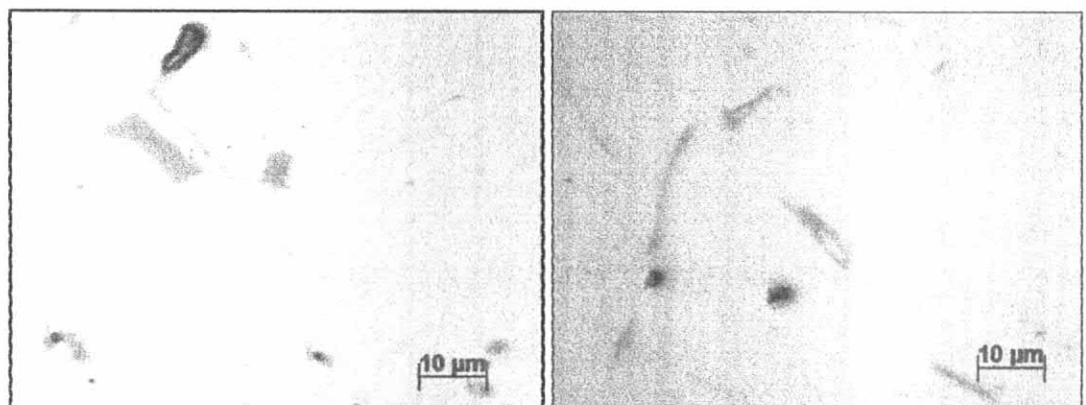
ก) 1.5Mg2.3Cu ในสภาพหลังหล่อ

ข) 1.5Mg2.3Cu (อบ 10 นาที)



ค) 1.5Mg2.3Cu (อบ 30 นาที)

ง) 1.5Mg2.3Cu (อบ 60 นาที)

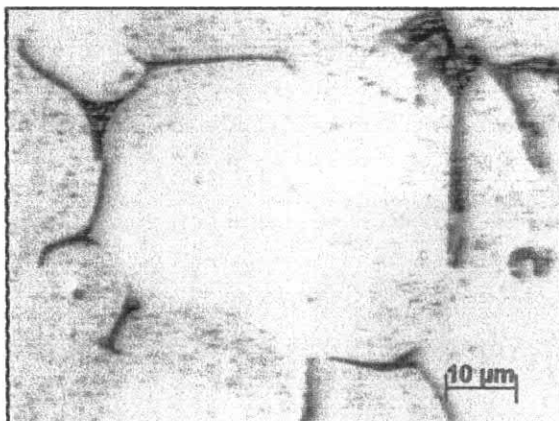


จ) 1.5Mg2.3Cu (อบ 180 นาที)

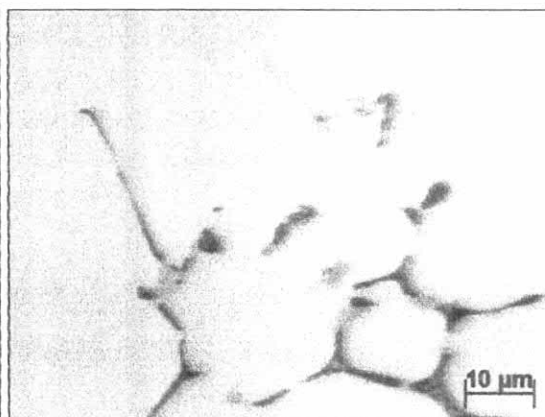
ฉ) 1.5Mg2.3Cu (อบ 600 นาที)

ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของ Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu ที่ผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่าง ๆ กัน ก) สภาพหล่อ, ข) 10 นาที, ค) 30 นาที, ง) 60 นาที, จ) 180 นาที และ ฉ) 600 นาที

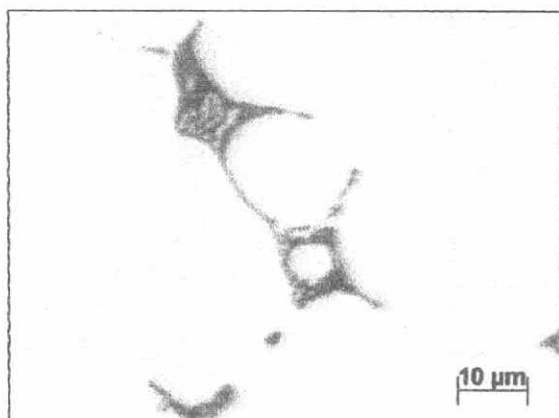
จากภาพที่ 4.10 ก) ถึง จ) แสดงโครงสร้างจุลภาคหลังการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆ กัน ของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษที่ส่วนผสม 1.5Mg2.3Cu ซึ่งจากภาพให้ผลเช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่ส่วนผสม 2.5Mg2.3Cu ซึ่งโครงสร้างยูเทคติกเกิดการสลายตัวและพยายามฟอร์มตัวในลักษณะของทรงมนเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบมากขึ้น



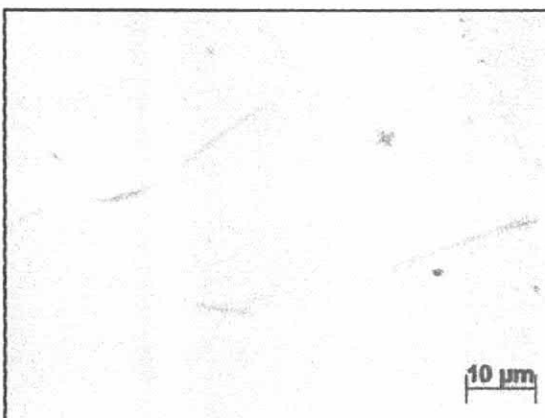
ก) 1.0Mg2.3Cu ในสภาพหลังหล่อ



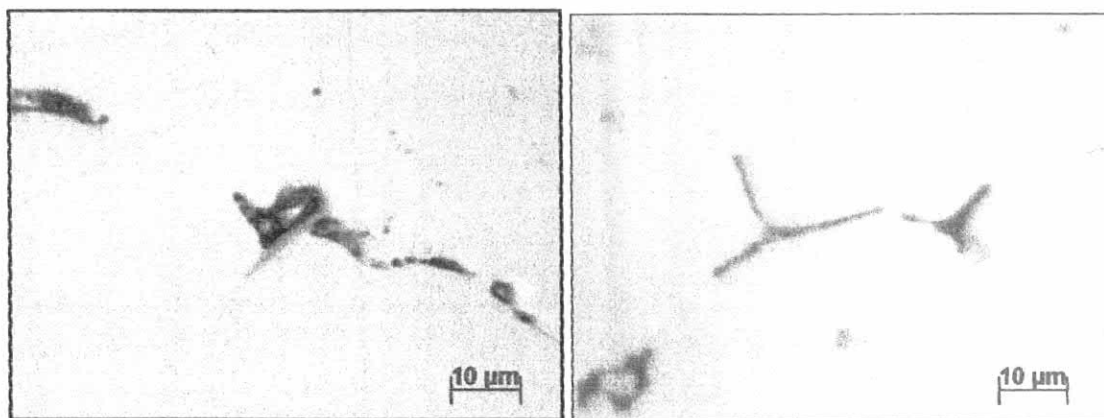
ข) 1.0Mg2.3Cu (อบ 10 นาที)



ค) 1.0Mg2.3Cu (อบ 30 นาที)



ง) 1.0Mg2.3Cu (อบ 60 นาที)



จ) 1.0Mg2.3Cu (อบ 180 นาที)

ฉ) 1.0Mg2.3Cu (อบ 600 นาที)

ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของ Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu ที่ผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆ กัน ก) สภาพหล่อ, ข) 10 นาที, ค) 30 นาที, ง) 60 นาที, จ) 180 นาที และ ฉ) 600 นาที

จากภาพที่ 4.11 ก) ถึง ฉ) แสดงโครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆ กัน ของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษที่ส่วนผสม 1.0Mg2.3Cu ซึ่งจากภาพให้ผลเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ส่วนผสม 2.5Mg2.3Cu ซึ่งโครงสร้างยูเทคติกเกิดการสลายตัวและพยายามฟอร์มตัวในลักษณะของทรงมนเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบมากขึ้น

จากภาพที่ 4.7 ถึง 4.11 จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างยูเทคติกของทั้ง 5 ส่วนผสม มีทิศทางเป็นไปในทางเดียวกัน คือ เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที จะเริ่มเห็นโครงสร้างยูเทคติกเกิดการสลายตัว และรูปร่างจะกลมขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น

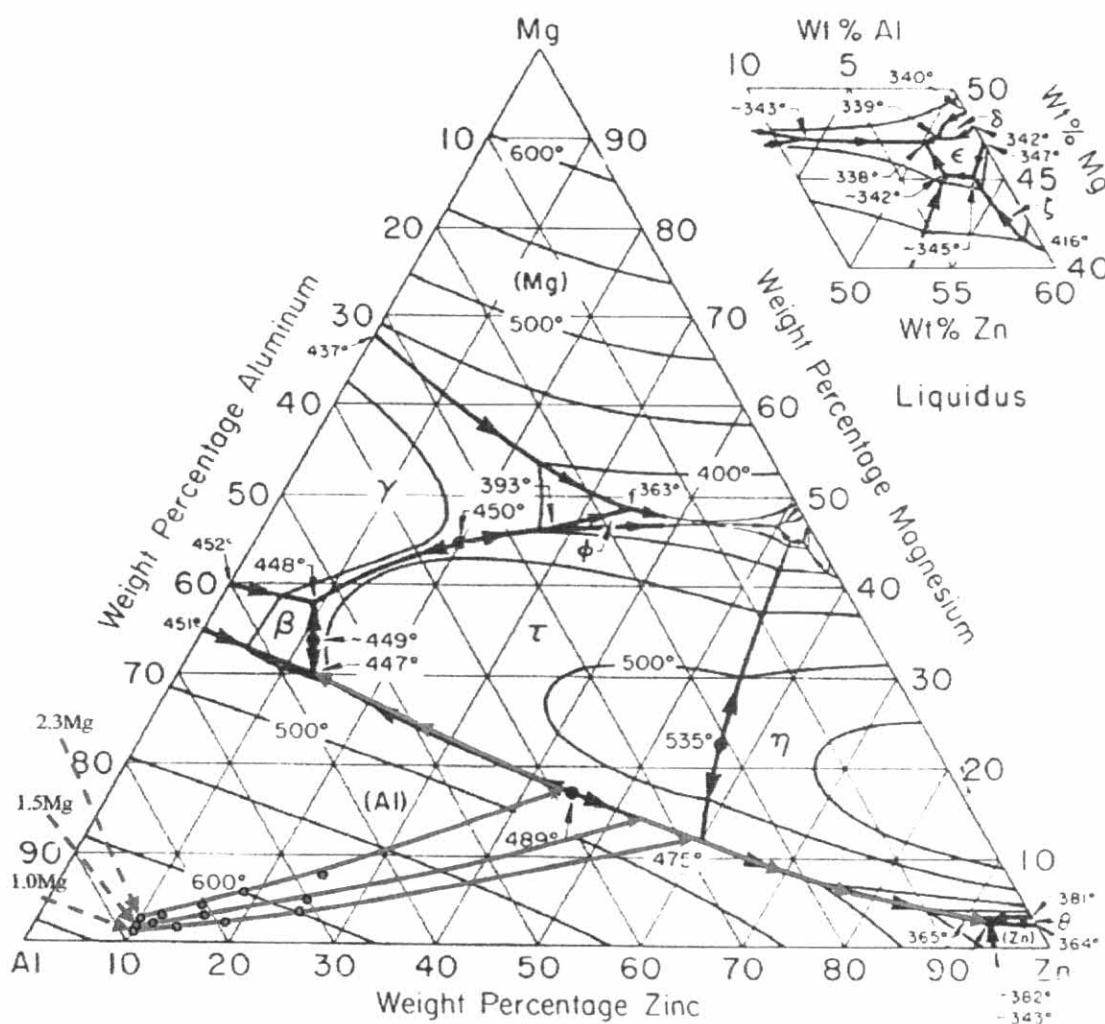
หลังจากศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยรวมของชิ้นงานภายหลังกการหล่อและภายหลังกการอบให้เป็นเนื้อเดียวแล้ว ได้นำชิ้นงานไปทำการศึกษาลักษณะประกอบที่เกิดขึ้นเพื่อดูว่าโครงสร้างที่เห็นนั้นมีสารประกอบหลักใดบ้าง

4.2 การวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบ

เนื่องจากการเกิดสารประกอบต่างๆ ในโครงสร้างจุลภาคขึ้นอยู่กับธาตุผสมที่ผสมเข้าไปในโลหะผสม ซึ่งสารประกอบจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุผสมที่ใส่เข้าไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้เมื่อมีการเปลี่ยนส่วนผสมจึงจำเป็นต้องมีการหาสารประกอบที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนผสม ซึ่งจะแบ่งการศึกษาออกเป็นหลังสภาพหล่อ และ หลังผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียว ดังนี้

4.2.1 สารประกอบในสภาพหล่อ

เนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษนี้มีธาตุผสมเป็นองค์ประกอบหลักมากกว่า 3 ธาตุ จึงไม่มีแผนภูมิสมดุลในการวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นได้แน่นอน จึงจำเป็นต้องศึกษาจากแผนภูมิสมดุลหลายระบบรวมกัน จากภาพที่ 4.12 แสดงทิศทางการเย็นตัวของโลหะผสม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu, Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu และ Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu ในระบบสมดุลสามเฟสของ Al-Zn-Mg ที่ Liquidus Surface (การวิเคราะห์ทิศทางการเย็นตัวนี้ใช้ Scheil's equation ในการคำนวณเนื่องจากการเย็นตัวแบบไม่สมดุล)



ภาพที่ 4.12 แสดงสารประกอบที่เกิดขึ้นขณะเย็นตัวของระบบแผนภูมิสมดุลสามเฟสในส่วนผสม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu, Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu และ Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu (Cooling path คำนวณด้วยสมการ Scheil's equation)

จากภาพ 4.12 จะพบว่าที่ส่วนผสมเริ่มต้น Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu เกิดโครงสร้าง Al ขึ้น หลังจากนั้นเมื่อโลหะหลอมเหลวเย็นตัวลง ส่วนผสมของของเหลวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหาได้จากสมการ Scheil's equation ดังนี้

$$C_L = C_0 (1-f_s)^{k-1} \quad (4-1)$$

เมื่อ C_L คือ ความเข้มข้นของธาตุผสมในโลหะหลอมเหลว, C_0 คือ ความเข้มข้นของธาตุผสมเริ่มต้น, f_s คือ สัดส่วนของของแข็ง และ k คือ Equilibrium partition ratio (หาได้จากแผนภูมิสมดุลสองเฟสระหว่างธาตุผสมกับโลหะพื้นอะลูมิเนียม)

หลังจากนั้นจะทำการกำหนดปริมาณของสัดส่วนของของแข็งที่เกิดขึ้น และนำมาหาความเข้มข้นของธาตุผสม ยกตัวอย่างเช่น ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น Al-10Zn-2.5Mg เมื่อปริมาณของสัดส่วนของของแข็งเท่ากับศูนย์ ความเข้มข้นของธาตุต่างๆ ในโลหะหลอมเหลวจะเท่ากับ 10Zn, 2.5Mg

เมื่อค่า Equilibrium partition ratio ของสังกะสีในโลหะผสมอะลูมิเนียมเท่ากับ 0.6 และ เมื่อปริมาณของสัดส่วนของของแข็งเท่ากับ 0.4 จะได้ความเข้มข้นของสังกะสีในโลหะหลอมเหลวเมื่อเกิดปริมาณของสัดส่วนของของแข็งเท่ากับ 0.4 ดังนี้

$$C_L^{Zn} = C_0^{Zn} (1-f_s)^{k_{Zn}-1}$$

$$C_L^{Zn} = 10 (1-0.4)^{0.6-1}$$

$$C_L^{Zn} = 12.27$$

เช่นเดียวกันกับปริมาณแมกนีเซียมที่เกิดขึ้นในโลหะหลอมเหลวเมื่อเกิดสัดส่วนของของแข็งเท่ากับ 0.4 เมื่อ Equilibrium partition ratio ของแมกนีเซียมในโลหะผสมอะลูมิเนียมเท่ากับ 0.5 จะได้ความเข้มข้นของแมกนีเซียมในโลหะหลอมเหลว ดังนี้

$$C_L^{Mg} = C_0^{Mg} (1-f_s)^{k_{Mg}-1}$$

$$C_L = 2.5 (1-0.4)^{0.5-1}$$

$$C_L = 3.23$$

จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปทำการพล็อตลงในแผนภูมิสมมูลสามเฟสในภาพที่ 4.12 หลังจากนั้นทำการหาความเข้มข้นของธาตุผสมในโลหะหลอมเหลว เมื่อเกิดมวลของแข็งในปริมาณที่มากขึ้นต่อไป ซึ่งจะสรุปได้ออกมาดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของความเข้มข้นของปริมาณแมกนีเซียมและสังกะสีในโลหะหลอมเหลวที่ปริมาณการเกิดสัดส่วนของของแข็งที่เพิ่มมากขึ้นของระบบสมมูล Al-Zn-Mg

f_s	$C_L^{Mg} (C_o=2.5)$	$C_L^{Mg} (C_o=1.5)$	$C_L^{Mg} (C_o=1.0)$	$C_L^{Zn} (C_o=10)$
0	2.5	1.5	1	10
0.1	2.64	1.58	1.05	10.43
0.2	2.80	1.68	1.12	10.93
0.3	2.99	1.79	1.19	11.53
0.4	3.23	1.94	1.29	12.27
0.5	3.54	2.12	1.41	13.19
0.6	3.95	2.37	1.58	14.43
0.7	4.56	2.74	1.83	16.19
0.8	5.59	3.35	2.24	19.04
0.9	7.91	4.74	3.16	25.12

เมื่อนำค่าความเข้มข้นไปพล็อตในแผนภูมิสมมูลแล้วจะเห็นว่าทิศทางการเย็นตัวของน้ำโลหะเป็นดังเส้นที่ส่วนผสมเริ่มต้นของ 2.5Mg, 1.5Mg และ 1.0Mg เมื่อปริมาณสังกะสีเริ่มต้น 10Zn

ซึ่งจะเห็นทิศทางการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวดังภาพที่ 4.12 ที่ปริมาณแมกนีเซียมที่ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะพบโครงสร้างอะลูมิเนียมก่อน ตามด้วยสารประกอบ τ ($Mg_{32}(Zn, Al)_{49}$) และ โครงสร้าง Ternary eutectic ($Al + \tau (Mg_{32}(Zn, Al)_{49}) + \beta$) ตามลำดับ

เมื่อปริมาณแมกนีเซียมลดลงที่ 1.5 และ 1.0 จะพบว่าทิศทางการเย็นตัวจะเกิดโครงสร้างอะลูมิเนียมก่อน จากนั้นจะตามด้วยสารประกอบ τ ($Mg_{32}(Zn, Al)_{49}$), η ($MgZn_2$) และ โครงสร้าง Ternary eutectic ($Al + \eta (MgZn_2) + \theta$) ตามลำดับ

จากนั้นพิจารณาระบบสมมูลสามเฟสของ Al-Mg-Cu ที่ Liquidus Surface จากภาพที่ 4.14 จะสามารถหาปริมาณธาตุผสมในโลหะหลอมเหลวขณะเย็นตัวได้เช่นเดียวกันกับในแผนภูมิสมมูลระบบ Al-Mg-Zn แต่เปลี่ยนจากธาตุสังกะสีเป็นทองแดง ซึ่งค่า Equilibrium

partition ratio ของทองแดงในโลหะผสมอะลูมิเนียมมีค่าประมาณ 0.17 จากนั้นทำการหา ส่วนผสมในโลหะหลอมเหลวโดยสมการ Scheil's equation ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะกำหนดให้ ปริมาณเริ่มต้นของธาตุทองแดงคงที่ 2.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเปลี่ยนปริมาณเริ่มต้นของ ธาตุแมกนีเซียมที่ 2.5, 1.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งจะได้ส่วนผสมของโลหะหลอมเหลว ที่ปริมาณสัดส่วนมวลของแข็งต่างๆ ดังตารางที่ 4.4 จากนั้นนำไปพล็อตลงในแผนภูมิสมดุลของ Al-Cu-Mg ซึ่งจะพบว่าทิศทางการแข็งตัวเมื่อปริมาณธาตุแมกนีเซียมเปลี่ยนแปลงที่ 1.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะพบว่าเกิด Al ขึ้นก่อนจากนั้นจะเกิดสารประกอบ Al_2Cu ตามด้วย โครงสร้าง Ternary eutectic ($Al+Al_2Cu+Al_2CuMg$) ส่วนทิศทางการแข็งตัวเมื่อปริมาณธาตุ แมกนีเซียมเปลี่ยนแปลงที่ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะพบว่าเกิด Al ขึ้นก่อนจากนั้นจะเกิด สารประกอบ Al_2CuMg ตามด้วยโครงสร้าง Ternary eutectic ($Al+Al_2Cu+Al_2CuMg$)

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของความเข้มข้นของปริมาณแมกนีเซียมและทองแดงในโลหะหลอมเหลวที่ ปริมาณการเกิดสัดส่วนของของแข็งที่เพิ่มมากขึ้นของระบบสมดุล Al-Cu-Mg

f_s	$C_L^{Mg} (C_o=2.5)$	$C_L^{Mg} (C_o=1.5)$	$C_L^{Mg} (C_o=1.0)$	$C_L^{Cu} (C_o=2.3)$
0	2.50	1.50	1.00	2.30
0.1	2.64	1.58	1.05	2.51
0.2	2.80	1.68	1.12	2.77
0.3	2.99	1.79	1.20	3.09
0.4	3.23	1.94	1.29	3.51
0.5	3.54	2.12	1.41	4.09
0.6	3.95	2.37	1.58	4.92
0.7	4.56	2.74	1.83	6.25
0.8	5.59	3.35	2.24	8.75
0.9	7.91	4.74	3.16	15.55

ตารางที่ 4.5 แสดงผลของความเข้มข้นของปริมาณสังกะสีและทองแดงในโลหะหลอมเหลวที่ปริมาณการเกิดสัดส่วนของแข็งที่เพิ่มมากขึ้นของระบบสมดุล Al-Zn-Cu

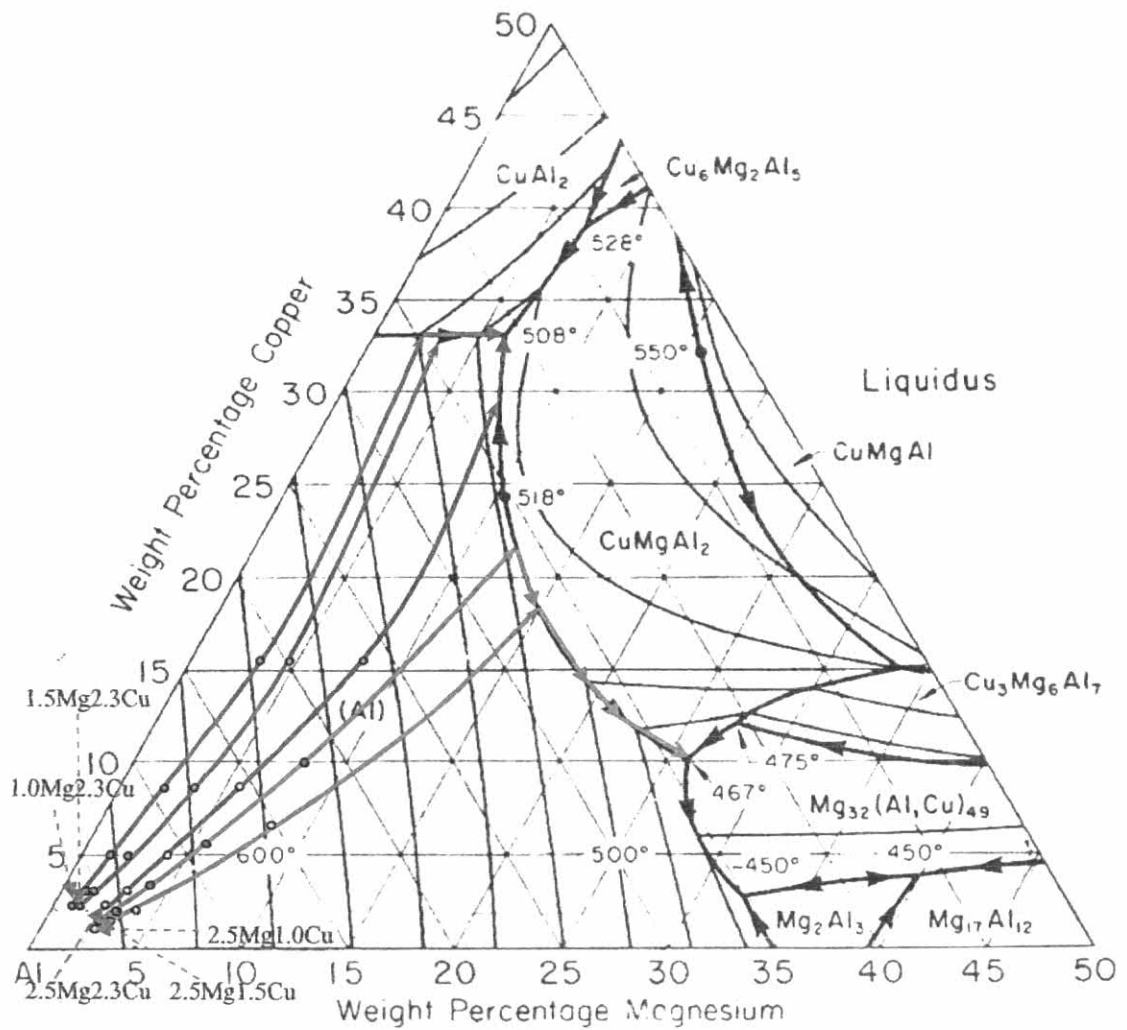
f_s	$C_L^{Cu} (C_o=2.5)$	$C_L^{Cu} (C_o=1.5)$	$C_L^{Cu} (C_o=1.0)$	$C_L^{Zn} (C_o=10)$
0	2.30	1.50	1.00	10.00
0.1	2.51	1.64	1.09	10.43
0.2	2.77	1.81	1.20	10.93
0.3	3.09	2.02	1.34	11.53
0.4	3.51	2.29	1.53	12.27
0.5	4.09	2.67	1.78	13.20
0.6	4.92	3.21	2.14	14.43
0.7	6.25	4.07	2.72	16.19
0.8	8.75	5.70	3.80	19.04
0.9	15.55	10.14	6.76	25.12

จากนั้นพิจารณาการระบบสมดุลของ Al-Mg-Cu จากภาพที่ 4.14 จะพบว่าเมื่อปริมาณธาตุทองแดงเปลี่ยนแปลงคือ 2.3, 1.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยที่ปริมาณเริ่มต้นของแมกนีเซียมคงที่ที่ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าทิศทางการเย็นตัวที่ปริมาณทองแดงเริ่มต้นที่ 1.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเกิด Al ขึ้นก่อน ตามด้วย Al_2CuMg , $Mg_{32}(Al, Cu)_{49}$ ตามด้วยโครงสร้าง Ternary eutectic ($Al + Mg_{32}(Al, Cu)_{49} + Al_3Mg_2$) ตามลำดับ แต่ที่ปริมาณเริ่มต้นของทองแดงที่ 2.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะพบว่าขณะเย็นตัวเกิด Al ขึ้นก่อน จากนั้นจะเกิดสารประกอบ Al_2CuMg ตามด้วยโครงสร้าง Ternary eutectic ($Al + Al_2Cu + Al_2CuMg$) ซึ่งค่าที่นำไปพล็อตหาทิศทางการเย็นตัวนี้แสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งคำนวณมาจากสมการ Scheil's equation เช่นกัน

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของความเข้มข้นของปริมาณแมกนีเซียมและทองแดงในโลหะหลอมเหลวที่ปริมาณการเกิดสัดส่วนของแข็งที่เพิ่มมากขึ้นของระบบสมดุล Al-Mg-Cu

f_s	$C_L^{Cu} (C_o=2.3)$	$C_L^{Cu} (C_o=1.5)$	$C_L^{Cu} (C_o=1.0)$	$C_L^{Mg} (C_o=2.5)$
0	2.30	1.50	1.00	2.50
0.1	2.51	1.64	1.09	2.64
0.2	2.77	1.81	1.20	2.80
0.3	3.09	2.02	1.34	2.99
0.4	3.51	2.29	1.53	3.23
0.5	4.09	2.67	1.78	3.54
0.6	4.92	3.21	2.14	3.95
0.7	6.25	4.07	2.72	4.56
0.8	8.75	5.70	3.80	5.59
0.9	15.55	10.14	6.76	7.91

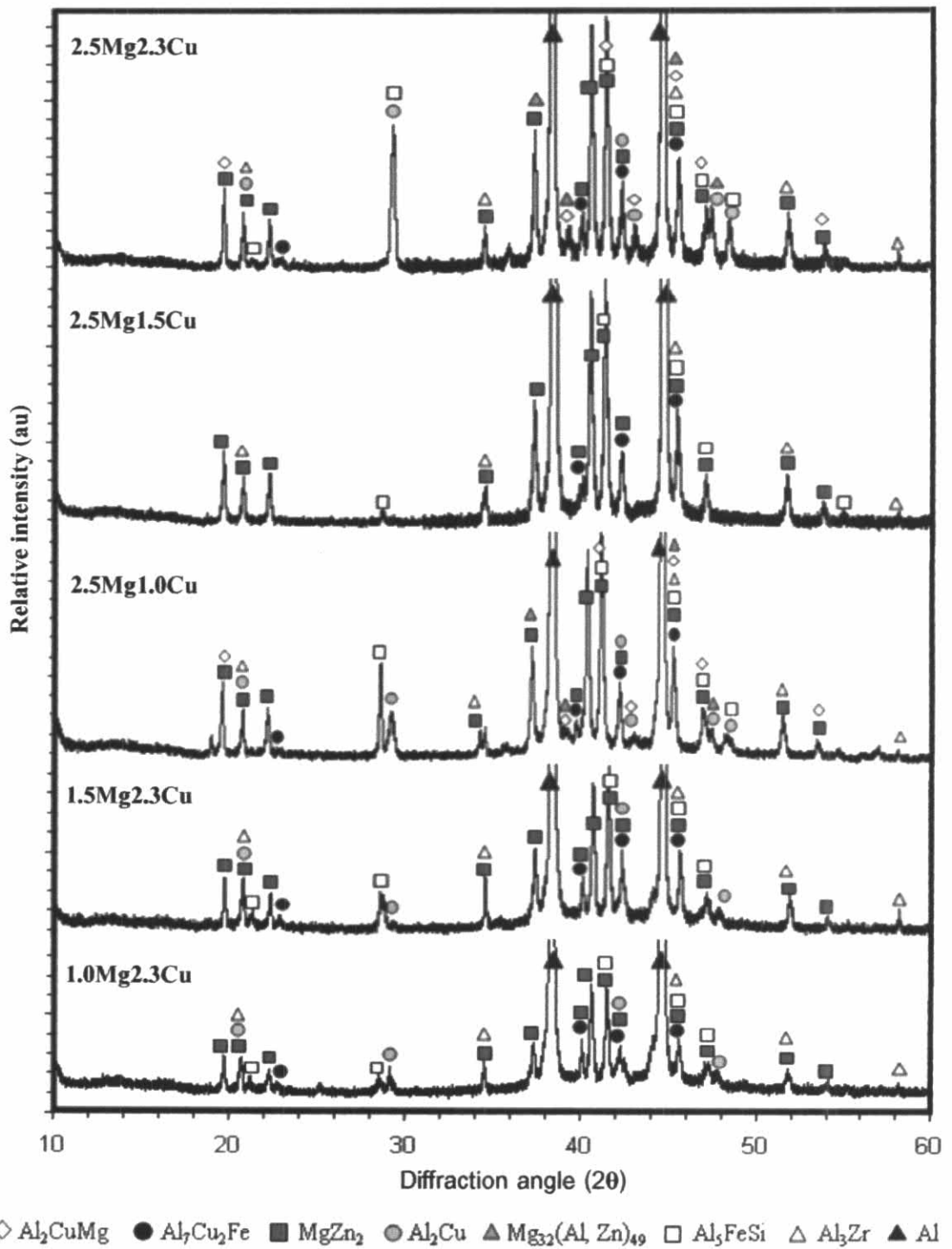
จากที่ได้กล่าวมาจึงพหุคาคเตดสารประกอบที่น่าจะเกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษทั้ง 5 ส่วนผสมนี้ได้ นอกจากนี้ในโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษทั้ง 5 ส่วนผสมยังมีธาตุเหล็ก, ซิลิคอน และ เซอร์โคเนียม เป็นส่วนผสมอีก ซึ่งจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมายังมีสารประกอบที่น่าจะเกิดขึ้นจากสามธาตุผสมนี้คือ Al_7Cu_2Fe , Al_5FeSi , Al_3Zr และ $Al_{13}Fe_4$ ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจากเทคนิค X-Ray Diffraction ต่อไป



ภาพที่ 4.14 แสดงสารประกอบที่เกิดขึ้นขณะเย็นตัวของระบบแผนภูมิสมดุลตามเฟสในส่วนผสม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu, Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu, Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu, Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu และ Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu

หลังจากทราบสารประกอบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในโลหะผสมแล้วจึงนำชิ้นงานไปทดสอบด้วย X-Ray Diffraction เพื่อหาว่าเกิดโครงสร้างผลึกของสารประกอบชนิดใดบ้าง

จากภาพที่ 4.15 แสดงผลของ X-Ray Diffraction ที่เกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ส่วนผสมต่างๆ ซึ่งผลที่ได้นั้นจะบ่งบอกถึงชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในชิ้นงานแต่ละส่วนผสม จากภาพที่ 4.15 เป็นผล X-Ray Diffraction ภายใต้สภาวะ Scan speed 0.2 deg/min และ Sampling wide 0.004 ซึ่งสรุปสารประกอบที่เกิดขึ้นตามตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ที่ส่วนผสมต่างๆ กันของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ โดยใช้ Scan speed 0.2 deg/min และ sampling wide 0.004

จากภาพที่ 4.15 พบว่าสารประกอบหลักที่เกิดขึ้นทุกส่วนผสมคือ η (MgZn_2) และ $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ซึ่งนำมาสรุปในตารางที่ 4.4 เพื่อดูว่าชิ้นงานแต่ละส่วนผสมน่าจะมีสารประกอบใดเกิดขึ้นและหายไปจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction

ตารางที่ 4.7 แสดงสารประกอบที่น่าจะเกิดขึ้นในอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษที่ส่วนผสมต่าง ๆ กันโดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction

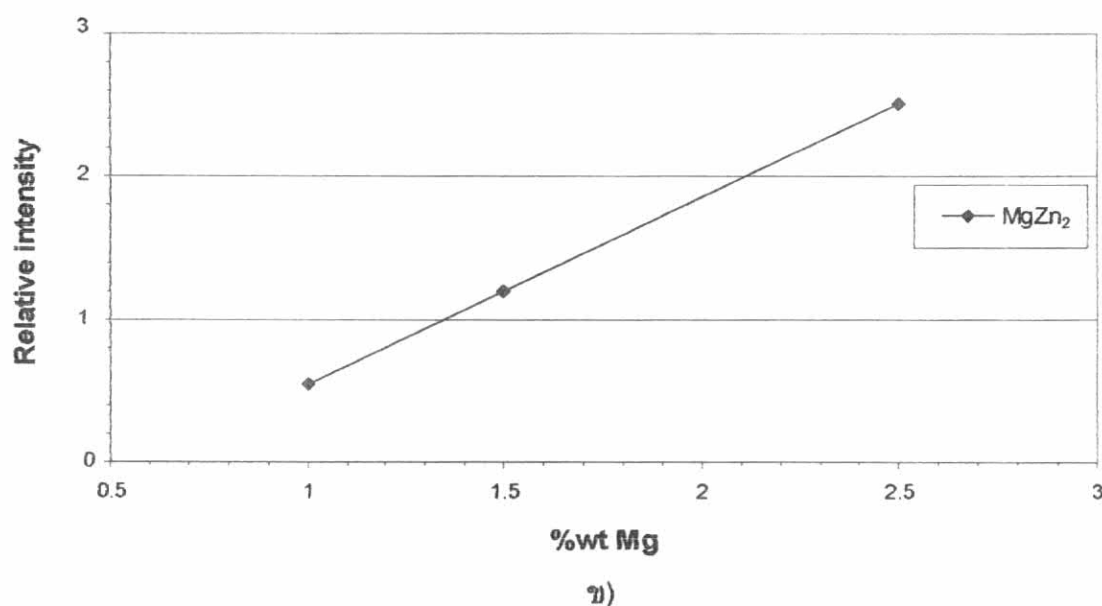
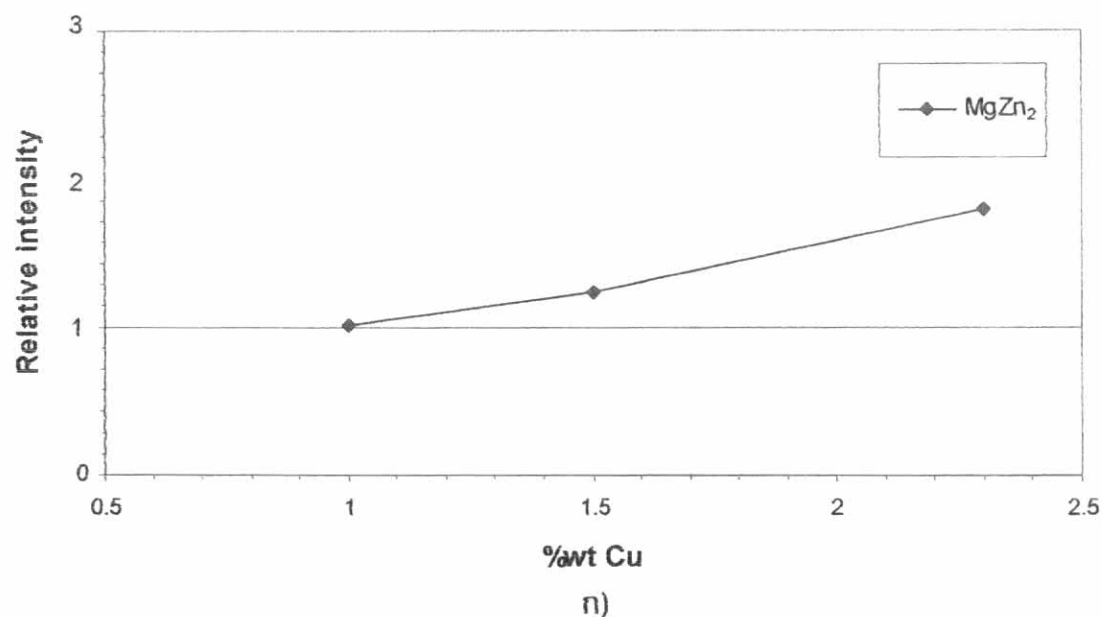
Phases	State	Al	MgZn ₂	Al ₇ Cu ₂ Fe	Al ₂ CuMg	Mg ₃₂ (Al, Zn) ₄₉	Al ₂ Cu	Al ₅ FeSi	Al ₃ Zr
Compositions									
2.5Mg2.3Cu	As-cast	√	√	√	√	√	√	√	√
2.5Mg1.5Cu	As-cast	√	√	√	X	X	X	√	√
2.5Mg1.0Cu	As-cast	√	√	√	√	√	√	√	√
1.5Mg2.3Cu	As-cast	√	√	√	X	X	√	√	√
1.0Mg2.3Cu	As-cast	√	√	√	X	X	√	√	√

√ ตรวจพบ X ตรวจไม่พบ

จากตารางที่ 4.7 จะพบว่าที่ส่วนผสมทองแดง 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทคนิค X-Ray Diffraction ไม่สามารถตรวจพบสารประกอบ Al₂CuMg, Al₂Cu และ Mg₃₂(Al,Zn)₄₉ ได้ ซึ่งอาจเป็นเพราะสารประกอบนี้มีปริมาณที่น้อยจึงไม่สามารถตรวจพบได้ด้วยวิธี X-Ray Diffraction

ที่ส่วนผสมแมกนีเซียม 1.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าไม่สามารถตรวจพบ Al₂CuMg และ Mg₃₂(Al,Zn)₄₉ ได้ซึ่งอาจจะมาจากการที่ปริมาณแมกนีเซียมลดลงจึงทำให้สารประกอบนี้มีปริมาณลดลงตามไปด้วยจึงทำให้ไม่สามารถตรวจพบได้จากเทคนิค X-Ray Diffraction

จากนั้นได้ศึกษาแนวโน้มความเพิ่มขึ้น ลดลงของปริมาณสารประกอบที่เกิดขึ้นในส่วนผสมของแมกนีเซียมและทองแดงที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะแสดงดังภาพที่ 4.16 ก) และ ข)



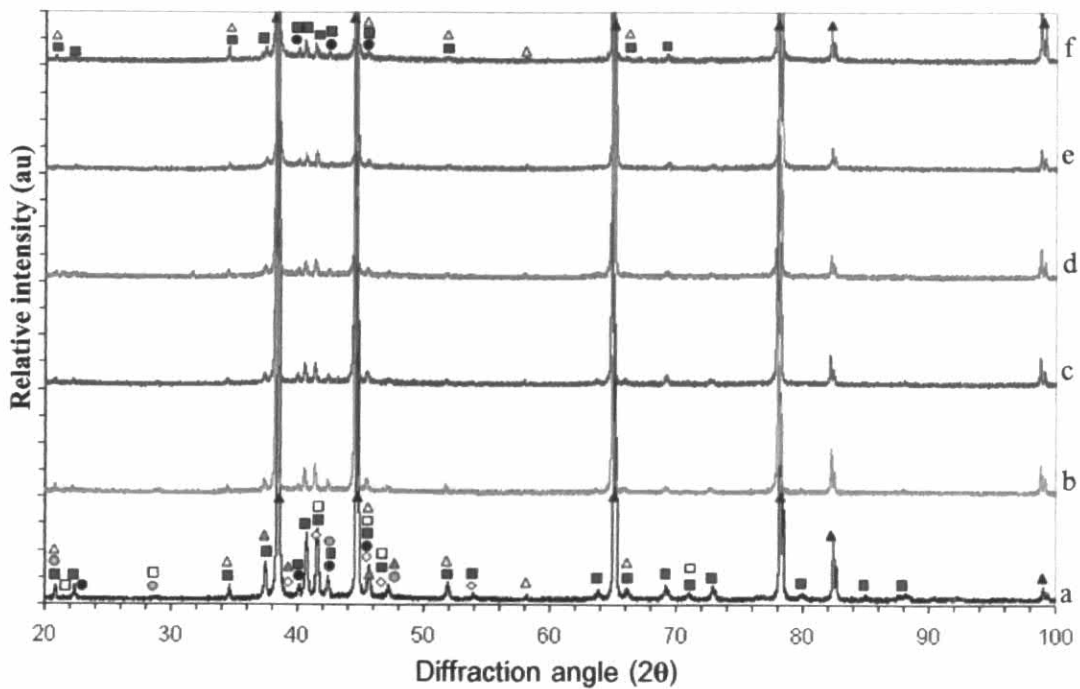
ภาพที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบ Relative intensity ของสารประกอบ $MgZn_2$ ที่เกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษในสภาพหล่อที่ส่วนผสมต่างๆ กัน ก) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณทองแดง ข) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณแมกนีเซียม

จากภาพที่ 4.16 จะเป็นการเปรียบเทียบ Relative intensity ของสารประกอบ η ($MgZn_2$) จะเห็นว่าเป็นสารประกอบหลักในโลหะผสมอะลูมิเนียมทั้ง 5 ส่วนผสม ซึ่งคาดว่าเป็นโครงสร้างยูเทคติกที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุดภาคและผลจากการวิเคราะห์ด้วย EPMA (ซึ่งจะกล่าวต่อไป) ซึ่งจะมีปริมาณธาตุของสังกะสีและแมกนีเซียมสูงที่บริเวณขอบเกรน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Xigang Fan [22] ซึ่งจะพบว่าโครงสร้างยูเทคติกตามบริเวณขอบเกรนมีโครงสร้างของ η ($MgZn_2$) สลับกับโครงสร้างอะลูมิเนียมเป็นโครงสร้างหลัก และจากผลการ

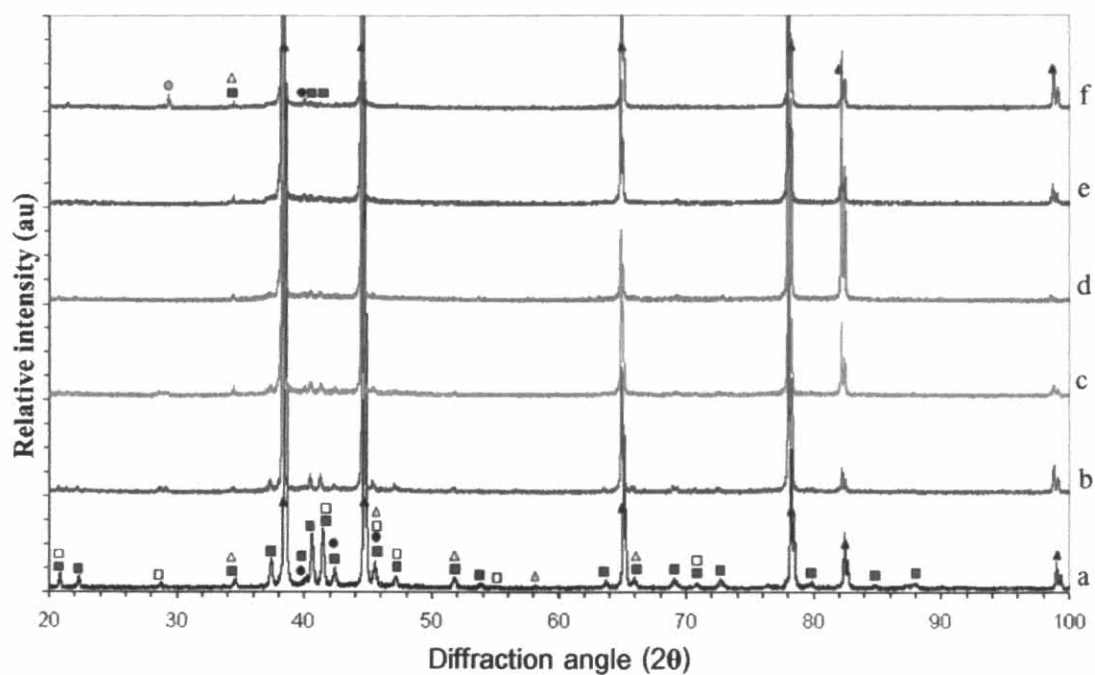
วิเคราะห์ด้วย X-Ray diffraction จะเห็นว่า Relative intensity ที่มุมที่ 17 (MgZn_2) ตกสะท้อนจะมี intensity เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณธาตุทองแดงและแมกนีเซียมเพิ่มมากขึ้น ซึ่ง Relative intensity แปรผันตรงกับ Volume fraction ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า Volume fraction แปรผันตรงกับปริมาณทองแดงและแมกนีเซียม ซึ่งก็คือโครงสร้างยูเทคติกเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของธาตุทองแดงและแมกนีเซียมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งตรงกับการหาปริมาณยูเทคติกที่ผ่านมาซึ่งจะเห็นว่าเมื่อปริมาณธาตุทองแดงและแมกนีเซียมเพิ่ม ปริมาณยูเทคติกจะเพิ่มขึ้นด้วย

4.2.2 สารประกอบในสภาพหลังการอบให้เป็นเนื้อเดียว

หลังจากทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคในสภาพหลังการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆ กันของทั้ง 5 ส่วนผสมแล้ว นำชิ้นงานมาทำการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffraction ภายใต้สภาวะ Scan speed 0.5 deg/min และ Sampling wide 0.004 ซึ่งผลแสดงดังภาพที่ 4.17 ก-จ ซึ่งจะแสดงผลในลักษณะเปรียบเทียบกับชิ้นงานภายหลังหล่อกับชิ้นงานที่ผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลา $10 - 600$ นาที ในโลหะผสมชนิดเดียวกัน

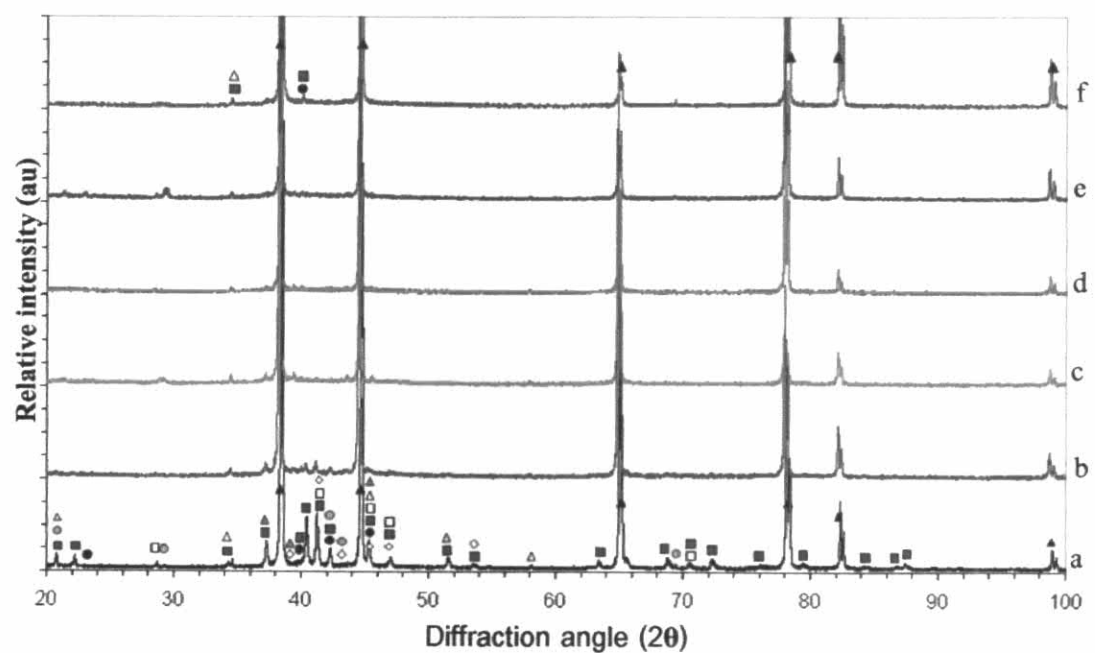


◇ Al_2CuMg ● $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ■ MgZn_2 ● Al_2Cu ▲ $\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$ □ Al_3FeSi △ Al_3Zr ▲ Al
 n) Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu (Scan speed 0.05 deg/min , Sampling wide 0.004)



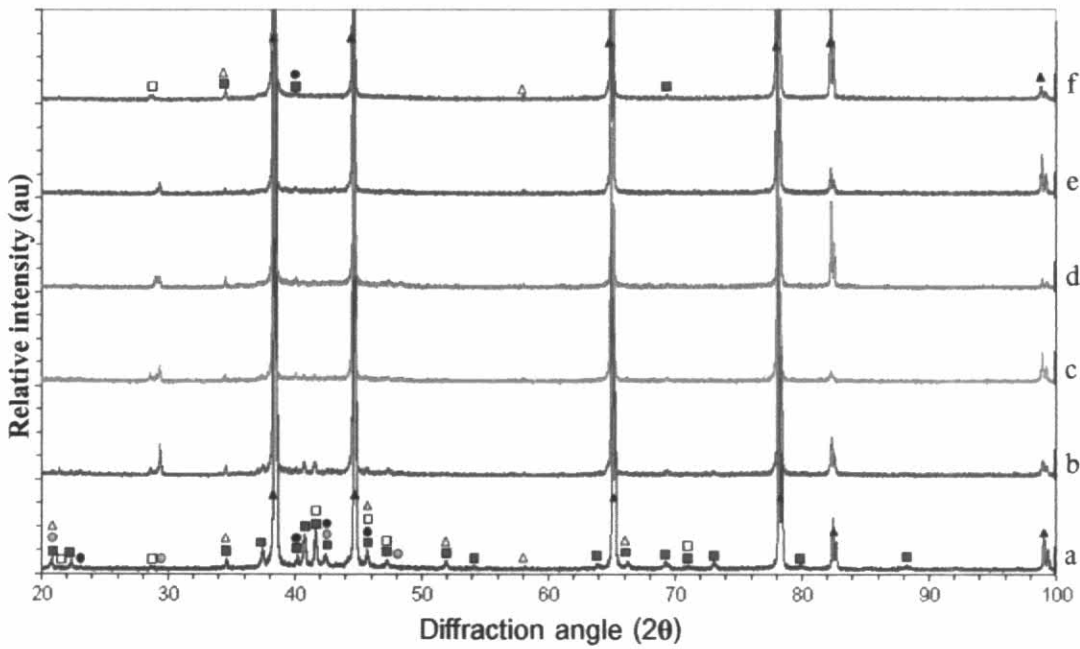
◇ Al_2CuMg ● $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ■ MgZn_2 ● Al_2Cu ▲ $\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$ □ Al_3FeSi △ Al_3Zr ▲ Al

Ⓜ) Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu (Scan speed 0.05 deg/min, Sampling wide 0.004)

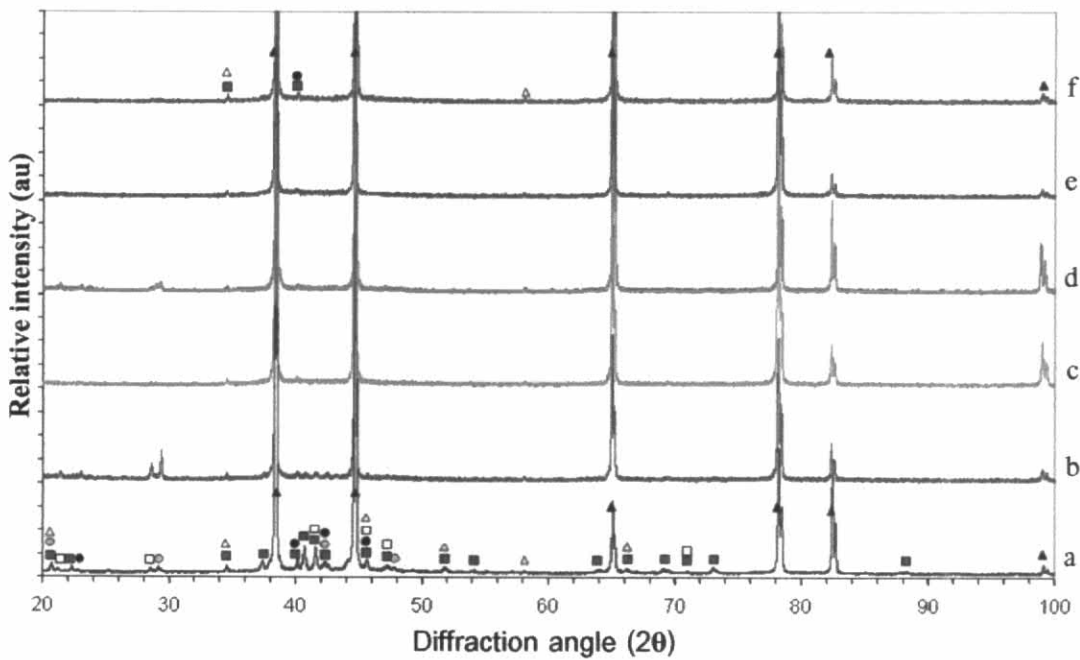


◇ Al_2CuMg ● $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ■ MgZn_2 ● Al_2Cu ▲ $\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$ □ Al_3FeSi △ Al_3Zr ▲ Al

Ⓝ) Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu (Scan speed 0.05 deg/min, Sampling wide 0.004)



◇ Al_2CuMg ● $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ■ MgZn_2 ○ Al_2Cu ▲ $\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$ □ Al_3FeSi △ Al_3Zr ▲ Al
 ง) Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu (Scan speed 0.05 deg/min, Sampling wide 0.004)



◇ Al_2CuMg ● $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ■ MgZn_2 ○ Al_2Cu ▲ $\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$ □ Al_3FeSi △ Al_3Zr ▲ Al
 จ) Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu (Scan speed 0.05 deg/min, Sampling wide 0.004)

ภาพที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์จากเทคนิค X-Ray Diffraction ที่ส่วนผสมต่างๆ กันของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษเมื่อผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 460°C a) สภาพหล่อ, b) 10 นาที, c) 30 นาที, d) 60 นาที, e) 180 นาที และ f) 600 นาที

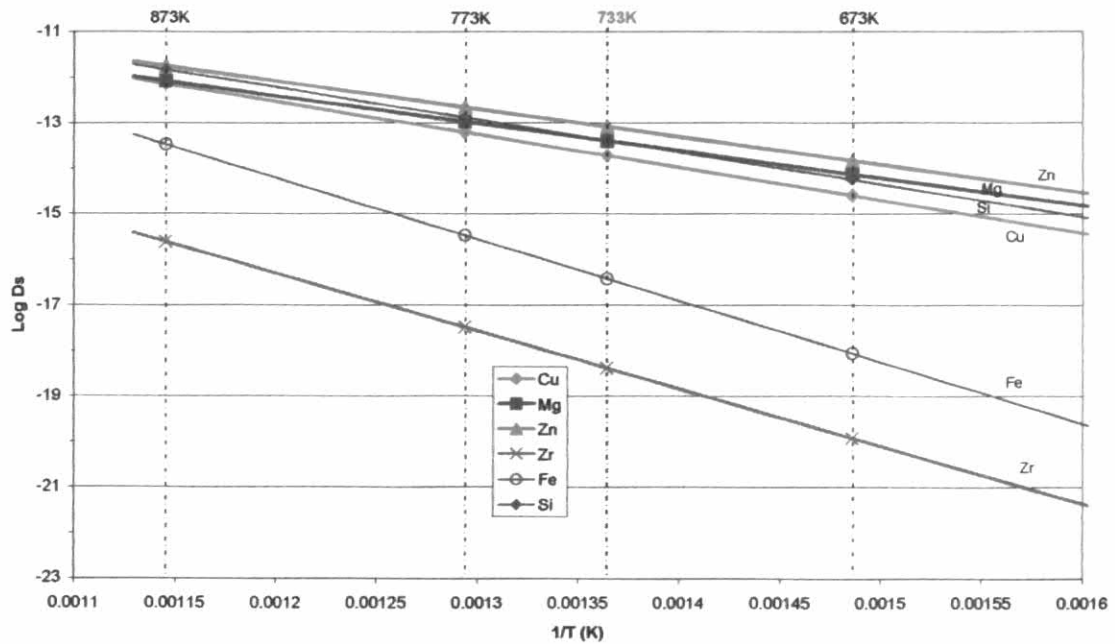
จากภาพที่ 4.17 พบว่าเมื่อทำการอบที่เวลามากขึ้นสารประกอบต่างๆ มีแนวโน้มลดลงและพบว่าโลหะผสมอะลูมิเนียมทุกส่วนผสมยังคงมีสารประกอบ $MgZn_2$ และ Al_7Cu_2Fe ยังคงเหลืออยู่ ซึ่งคาดว่า $MgZn_2$ คือโครงสร้างยูเทคติกซึ่งเกิดการสลายตัวเมื่อใช้เวลาในการอบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากภาพที่ 4.18 แสดงระยะการแพร่ของธาตุต่างๆ ในโลหะพื้นอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งระยะการแพร่ของธาตุผสมต่างๆ ในโลหะอะลูมิเนียมในสภาพของแข็งสามารถหาได้จากสมการที่ 4-2

$$D_s = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (4-2)$$

ซึ่งค่า D_0 และค่า Q จะมีค่าดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.8 แสดงค่า D_0 และค่า Q ของธาตุต่างๆ ในโลหะพื้นอะลูมิเนียม

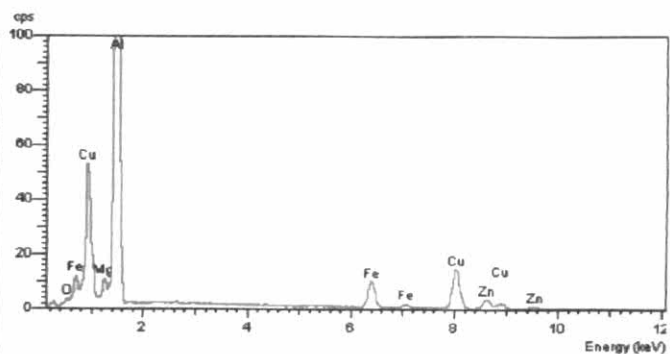
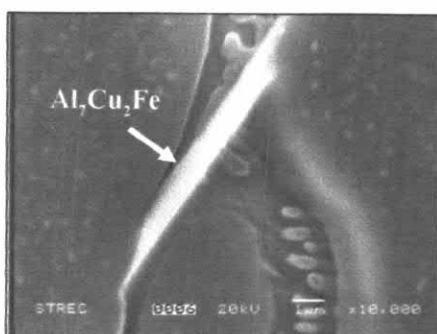
Alloy	D_0 (m^2/s)	Q (kJ/mol)
Cu	1.3×10^{-4}	138
Ag	2.0×10^{-4}	140
Au	2.2×10^{-4}	134
Li	4.5×10^{-4}	139
Mg	6.23×10^{-6}	115
Zn	1.77×10^{-5}	117
Si	2.02×10^{-4}	136
Cr	1.84×10^{-1}	253
Mn	1.04×10^{-2}	211
Fe	9.1×10	258
Zr	7.28×10^{-2}	242



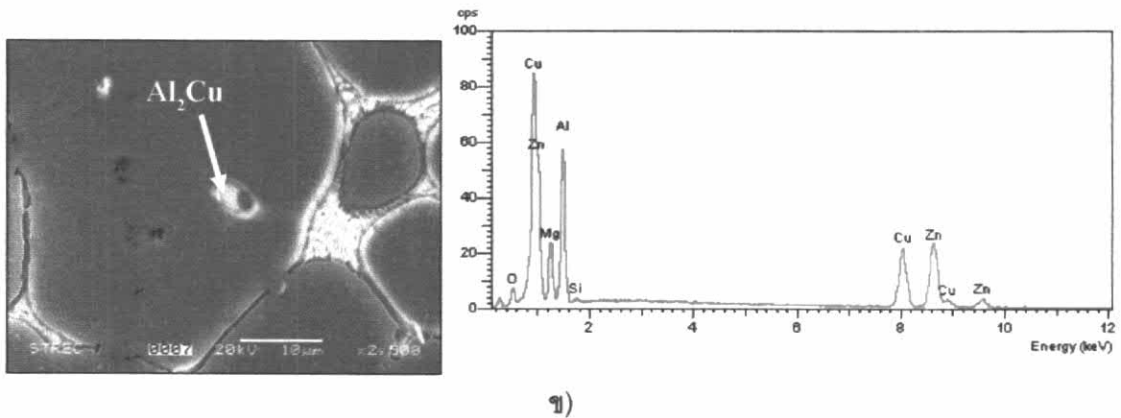
ภาพที่ 4.18 แสดงระยะเวลาการแพร่ของธาตุต่างๆ ในโลหะผสมอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 460°C (733K)

จากภาพที่ 4.18 จะพบว่าที่อุณหภูมิ 460°C ธาตุสังกะสีจะแพร่ได้เร็วที่สุด ตามด้วยธาตุแมกนีเซียม, ซิลิคอน, ทองแดง, เหล็ก และ เซอร์โคเนียม ตามลำดับ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction ที่ผ่านมามีทำให้ทราบว่าเนื่องจากธาตุทองแดง และเหล็ก มีการแพร่ที่ช้าจึงทำให้ยังเหลือสารประกอบ Al_7Cu_2Fe ส่วนธาตุแมกนีเซียมและสังกะสีมีการแพร่ที่เร็วกว่า แต่เนื่องจากมีปริมาณสารประกอบของ $MgZn_2$ ที่สูงในโครงสร้าง จึงน่าจะทำให้ยังคงมีสารประกอบนี้เหลืออยู่เมื่อใช้เวลาในการอบผ่านไป 600 นาที

จากนั้นจึงนำไปศึกษาธาตุประกอบของสารประกอบต่างๆ โดยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray (EDX) ซึ่งจะแสดงผลดังภาพที่ 4.19 ถึง 4.20 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากชิ้นงานในสภาพหลังการหล่อ และภาพที่ 4.21 เป็นผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของชิ้นงานที่ผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียว



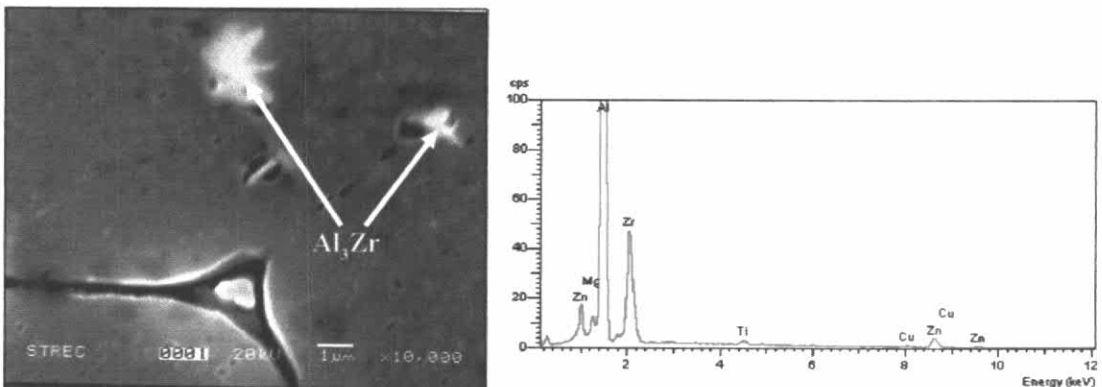
ก)



ข)

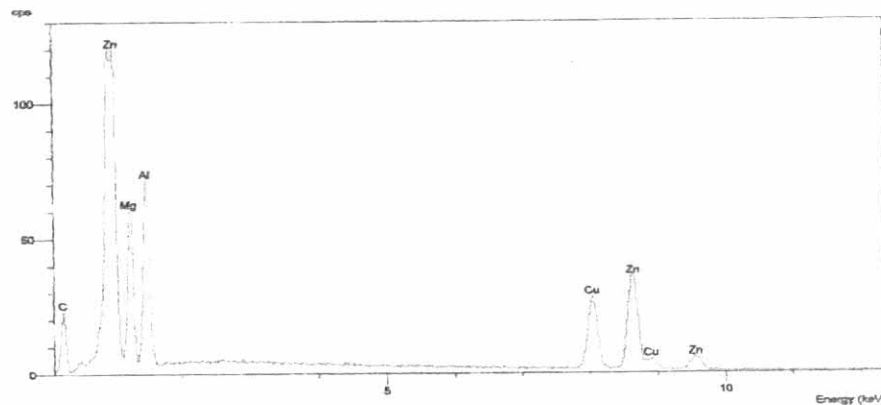
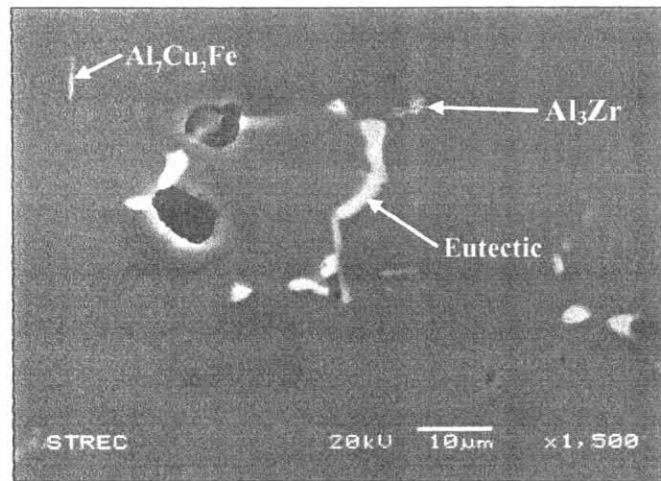
ภาพที่ 4.19 แสดงบริเวณที่ทำการตรวจสอบชนิดของธาตุผสมในโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ในสภาพหล่อโดยเทคนิค EDX ก) สารประกอบ Al_7Cu_2Fe ข) Al_2Cu

จากภาพที่ 4.19 ก) แสดงลักษณะของสารประกอบ Al_7Cu_2Fe ซึ่งมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมีแง่มุมพาดอยู่ตามบริเวณขอบเกรน ส่วนภาพที่ 4.19 ข) แสดงโครงสร้าง Al_2Cu ซึ่งเป็นโครงสร้างยูเทคติกซึ่งแยกออกมาโดยชัดเจน และมีลักษณะค่อนข้างกลมดังแสดงในภาพที่ 4.19 ข)



ภาพที่ 4.20 แสดงบริเวณที่ทำการตรวจสอบชนิดของธาตุผสมในโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu ในสภาพหล่อโดยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray (EDX)

จากภาพที่ 4.20 แสดงรูปร่างของสารประกอบ Al_3Zr ซึ่งมีลักษณะเป็นแจกด้ายดาวดังภาพที่ 4.20

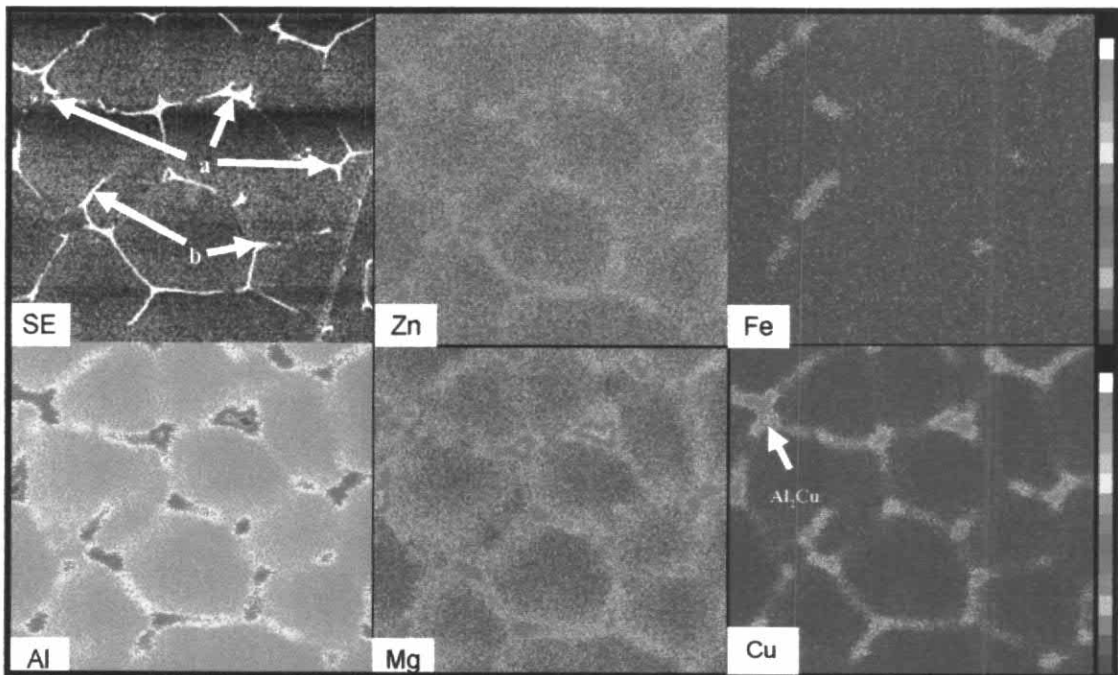


ภาพที่ 4.21 แสดงบริเวณที่ทำการตรวจสอบชนิดของธาตุผสมในโลหะผสมอะลูมิเนียม Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu ภายหลังจากอบให้เป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 460°C เป็นเวลา 600 นาทีโดยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray (EDX)

จากภาพ 4.19 และ 4.20 จะพบว่าลักษณะของสารประกอบ $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ มีลักษณะเหลี่ยมแหลมคล้ายเข็มพาดอยู่ตามยูเทคติกและโครงสร้างของ Al_2Cu มีลักษณะค่อนข้างกลมและแยกออกจากยูเทคติก ส่วน Al_3Zr นั้นจะเจอตตามเนื้อพื้นและมีรูปร่างคล้ายแจกดาว ส่วนโครงสร้างยูเทคติกนั้นประกอบไปด้วยธาตุ Al, Zn, Mg, Cu ซึ่งแยกไม่ชัดเจนว่าเป็นสารประกอบ $\text{MgZn}_2(\text{Cu})$, $\text{Mg}_{32}(\text{Al, Zn})_{49}(\text{Cu})$ หรือ $\text{Al}_2\text{CuMg}(\text{Zn})$ เนื่องจากขนาดยูเทคติกมีขนาดเล็กมากและมีลักษณะเป็นแบบลามেলাจึงทำให้เมื่อยิงหัวโพรบปรากฏพบธาตุข้างเคียงมาด้วย แต่เมื่อพิจารณาผลของการทดสอบด้วย เทคนิค X-Ray diffraction แล้วจะพบว่าโครงสร้างยูเทคติกน่าจะเป็น Al สลับกับ $\text{MgZn}_2(\text{Cu})$ เนื่องจาก MgZn_2 เป็นสารประกอบหลัก เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Xigang Fan [22] และ Chandan Mondal [21] แต่งานวิจัยของ Chandan Mondal [21] ได้กล่าวว่สารประกอบของ $\text{Mg}_{32}(\text{Al, Zn})_{49}$ และ Al_2CuMg เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างยูเทคติกเช่นกัน แต่มีปริมาณน้อยมาก จึงอาจเป็นไปได้ว่าโครงสร้างยูเทคติกน่าจะประกอบไปด้วย

$\text{Al}+\text{MgZn}_2(\text{Cu})+\text{Mg}_{32}(\text{Al,Zn})_{49}(\text{Cu})+\text{Al}_2\text{CuMg}(\text{Zn})$ เนื่องจากเป็นโครงสร้างยูเทคติกที่เกิดจากระบบของธาตุผสมที่มากกว่าสามธาตุขึ้นไป หลังจากนั้นจึงนำไปทำการวิเคราะห์ด้วย Electron probe micro analyzer (EPMA) เพื่อดูการกระจายตัวของธาตุต่อไป

จากภาพที่ 4.21 เป็นชิ้นงานที่ผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวซึ่งพบว่าลักษณะของ $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ และ Al_3Zr มีลักษณะเหมือนเดิมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนโครงสร้างยูเทคติกนั้นมีขนาดเล็กและขาดความต่อเนื่องไม่เป็นตาข่ายและได้ทำการวิเคราะห์ธาตุที่บริเวณยูเทคติกพบธาตุอะลูมิเนียม, สังกะสี, แมกนีเซียม และมีทองแดงรวมอยู่ด้วย จากนั้นนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุผสมด้วยเทคนิค Electron probe micro analyzer (EPMA) ต่อไปดังภาพที่ 4.23

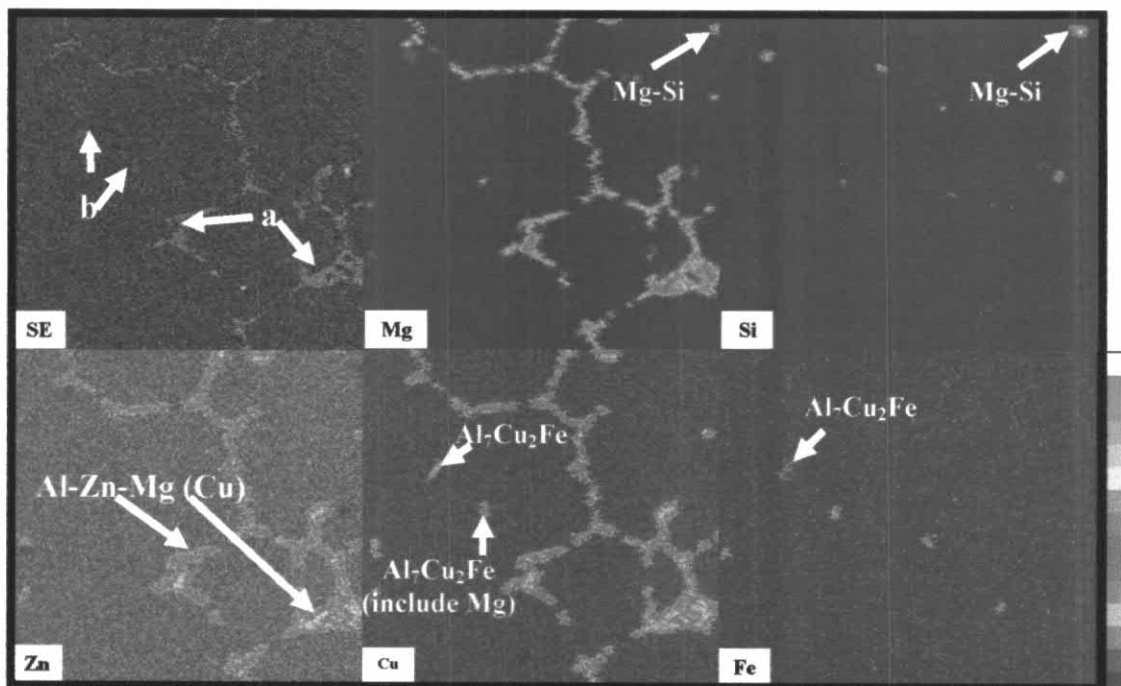


ภาพที่ 4.22 แสดงภาพจากการวิเคราะห์ด้วย Electron probe micro analyzer (EPMA) (สีแดงแทนปริมาณธาตุที่สูงและสีน้ำเงินแทนปริมาณธาตุที่น้อย) ของชิ้นงานในสภาพหล่อของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ ที่ส่วนผสม $\text{Al}-10\text{Zn}-2.5\text{Mg}-2.3\text{Cu}$; ลูกศร a) แสดงโครงสร้างยูเทคติกที่ขอบเกรน ซึ่งน่าจะประกอบด้วย Al สลับกับ $\text{MgZn}_2(\text{Cu})$, T (Al-Zn-Mg-Cu), S ($\text{Al}_2\text{CuMg}(\text{Zn})$) และ Al_2Cu , ลูกศร b) สารประกอบ $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$

จากภาพที่ 4.22 จะเห็นว่าที่บริเวณขอบเกรนจะประกอบด้วยโครงสร้างยูเทคติก ซึ่งจากจุดสีที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าที่ขอบเกรนจะประกอบไปด้วยธาตุอะลูมิเนียม, แมกนีเซียม, สังกะสี และ ทองแดง ในปริมาณสูง ตัวอย่างเช่นที่ ลูกศร a จะเห็นว่าปริมาณของธาตุ

อะลูมิเนียม, แมกนีเซียม, สังกะสี และ ทองแดง ในปริมาณสูง แต่เนื่องด้วยผลจาก X-Ray Diffraction ซึ่งจะแสดงโครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นไม่พบโครงสร้างผลึกใดที่ประกอบด้วย 4 ธาตุนี้ ซึ่งจากผลที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดจาก $MgZn_2$ มีธาตุทองแดงเข้าไปละลายอยู่ $T (Mg_{32}(Al,Zn)_{49})$ มีทองแดงเข้าไปละลายอยู่แบบแทนที่ ส่วน $S (Al_2CuMg)$ น่าจะมีสังกะสีเข้าไปละลายอยู่แบบแทนที่เช่นกัน จึงทำให้พบว่าธาตุที่ปรากฏอยู่นั้นมีทั้ง 4 ธาตุ และเนื่องจากสารประกอบที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมากจึงทำให้เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่าธาตุที่อยู่บริเวณข้างเคียงปรากฏขึ้นมาด้วย ส่วนสารประกอบ Al_2Cu พบว่าแยกตัวเป็นอิสระซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลมและแยกตัวออกมาจากโครงสร้างยูเทคติกแบบตาข่าย

ลูกศร b จะแสดงธาตุอะลูมิเนียม, ทองแดง และ เหล็ก ซึ่งจะพบว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นคือ Al_7Cu_2Fe ซึ่งจะพาดอยู่ตามบริเวณขอบเกรนมีลักษณะเหลี่ยมและมีสีเทาอ่อน ดังภาพที่ 4.19 ก) ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของทั้ง 5 ส่วนผสมพบว่า สารประกอบ Al_7Cu_2Fe เกิดขึ้นทั้ง 5 ส่วนผสมและมีลักษณะใกล้เคียงกัน



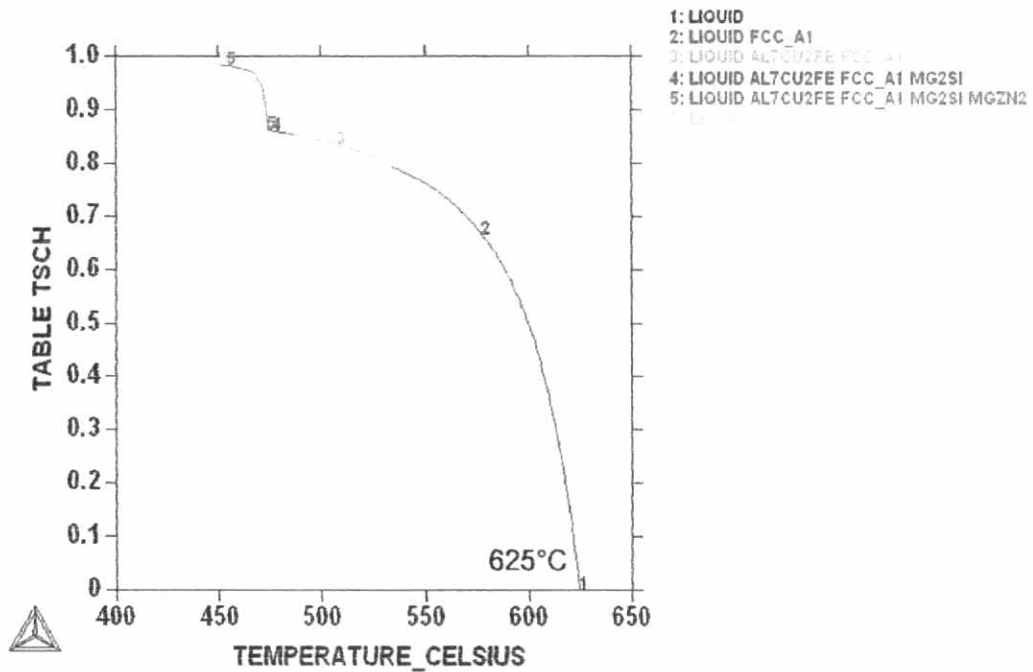
ภาพที่ 4.23 แสดงภาพ EPMA (สีแดงแทนปริมาณธาตุที่สูงและสีน้ำเงินแทนปริมาณธาตุที่น้อย) ของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม $Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu$ ที่ผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ $460^{\circ}C$ ที่เวลา 600 นาที; ลูกศร a คือ โครงสร้างยูเทคติก (น่าจะเป็น Al สลับกับ $MgZn_2$ รวมทั้ง Cu , $T (Mg_{32}(Al,Zn)_{49})$ รวมทั้ง Cu) และ $S (Al_2CuMg$ รวมทั้ง Zn), ลูกศร b คือ สารประกอบ Al_7Cu_2Fe

และเมื่อนำชิ้นงานไปทำการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 460°C เป็นเวลา 600 นาที พบว่าโครงสร้างยูเทคติกที่มีลักษณะเป็นตาข่ายขาดความต่อเนื่อง ซึ่งสังเกตได้จากภาพ EPMA mapping จะเห็นว่าที่บริเวณขอบเกรนมีธาตุผสมที่เหมือนกับขอบเกรนของสภาพหล่อแต่จะมีลักษณะไม่ต่อเนื่องซึ่งน่าจะเกิดจากธาตุผสมเกิดการแพร่เข้าไปในเนื้อพื้นทำให้โครงสร้างยูเทคติกเกิดการสลายตัว หรืออาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Xigang Fan [22] และชิ้นงานที่ผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวยังพบว่าเกิดสารประกอบที่มีส่วนประกอบของธาตุ Mg-Si ซึ่งน่าจะเป็นสารประกอบของ Mg_2Si เกิดขึ้น ส่วนสารประกอบ $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและยังคงมีอยู่ในชิ้นงาน จากนั้นทำการศึกษาการคำนวณลำดับการเกิดสารประกอบขณะเย็นตัวของโลหะผสมที่ส่วนผสมต่างๆ โดยใช้โปรแกรม Thermo-Calc. เพื่อดูความเป็นไปได้ของสารประกอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ

4.3 ลำดับการเกิดเฟสโดยโปรแกรม Thermo-Calc

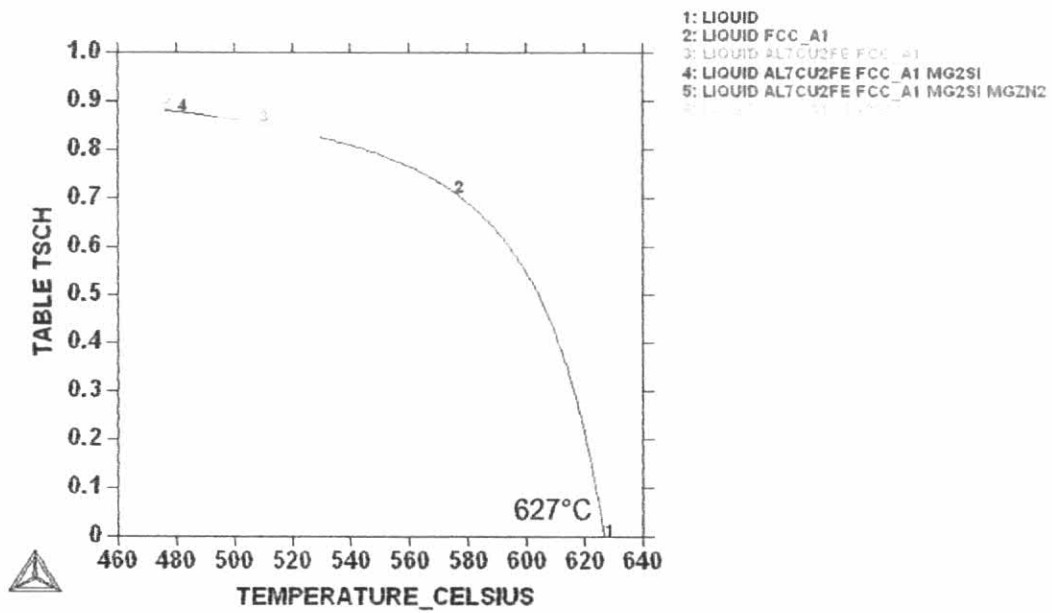
เนื่องจากการทำนายสารประกอบที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะหลอมเหลวเย็นตัวโดยใช้แผนภูมิสมดุลสามเฟส ยังไม่เพียงพอเนื่องจากเป็นเพียงระบบของสามธาตุผสมเท่านั้น ซึ่งในความจริงโลหะผสมที่ศึกษานี้มีส่วนผสมมากกว่าสามธาตุและการเย็นตัวไม่ใช่ระบบสมดุล จึงนำโปรแกรม Thermo-Calc ที่มีการคำนวณการเย็นตัวแบบ Scheil's equation ซึ่งเป็นกรเย็นตัวแบบไม่มีการแพร่ในของแข็งแต่มีการแพร่ในของเหลว เข้ามาช่วยวิเคราะห์เพื่อทำนายสารประกอบที่จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.24 ก-จ

THERMO-CALC (2008.03.20:08.20) : 88 include Fe.Si



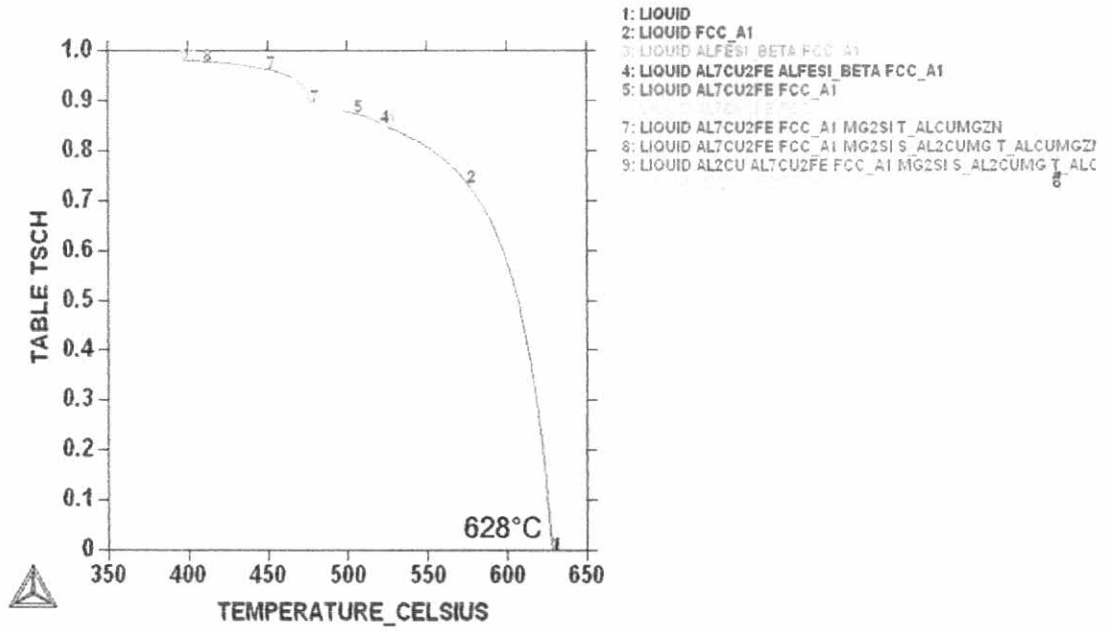
n) Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu-0.14Zr-0.05Fe-0.05Si

THERMO-CALC (2008.03.20:08.21) : 95 include Fe.Si



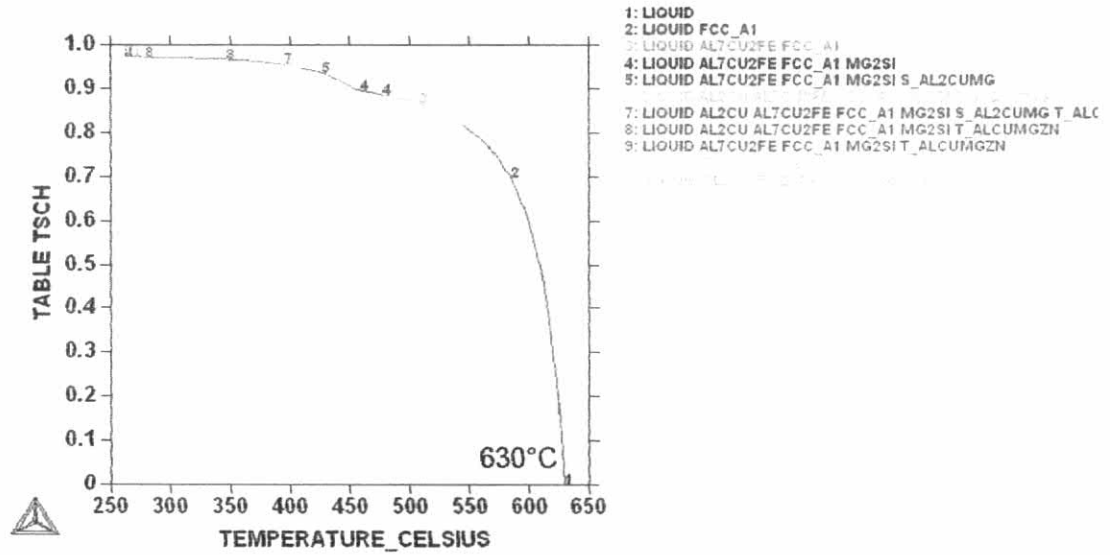
n) Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu-0.14Zr-0.05Fe-0.05Si

THERMO-CALC (2008.03.20:08.22) : 151 include Fe,Si



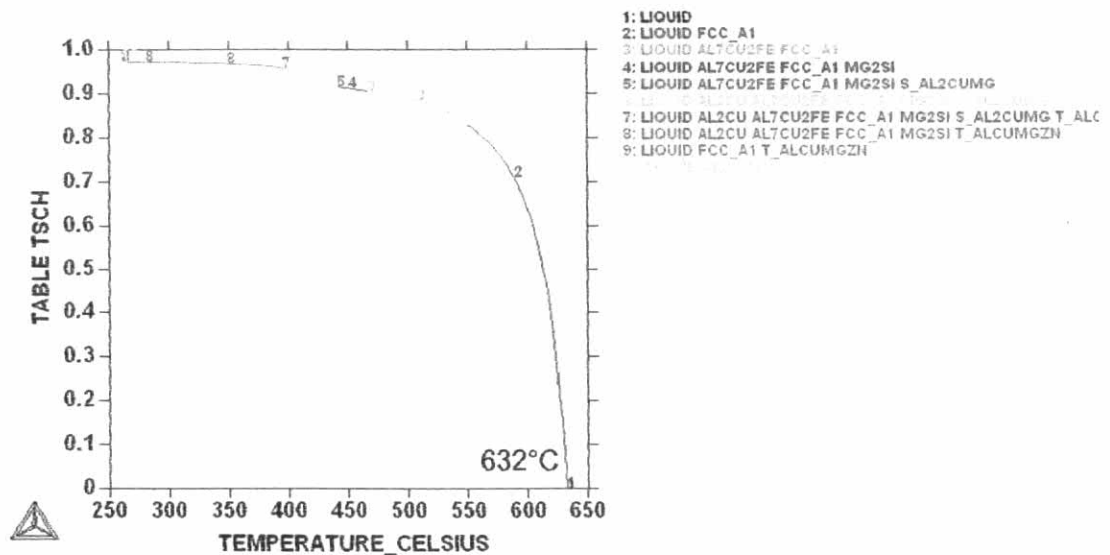
ⓐ) Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu-0.14Zr-0.05Fe-0.05Si

THERMO-CALC (2008.03.20:08.23) : 107 include Fe,Si



ⓑ) Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu-0.14Zr-0.05Fe-0.05Si

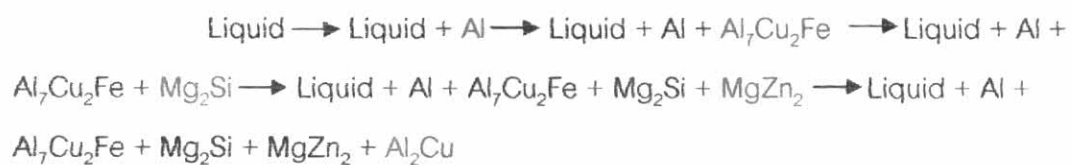
THERMO-CALC (2008.03.20:08.23) : 114 include Fe.Si



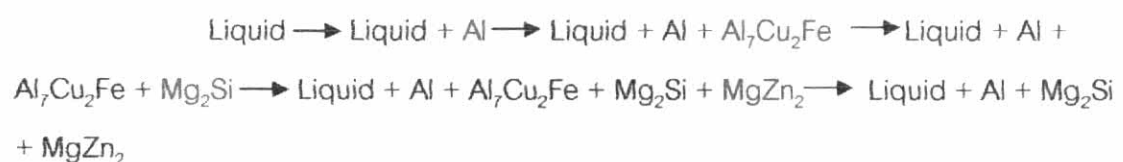
๑) Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu-0.14Zr-0.05Fe-0.05Si

ภาพที่ 4.24 ก)-๑) แสดงลำดับการเกิดสารประกอบของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ส่วนผสมต่างๆ เมื่อโลหะหลอมเหลวเกิดการเย็นตัวโดยการคำนวณโดยโปรแกรม Thermo-Calc.

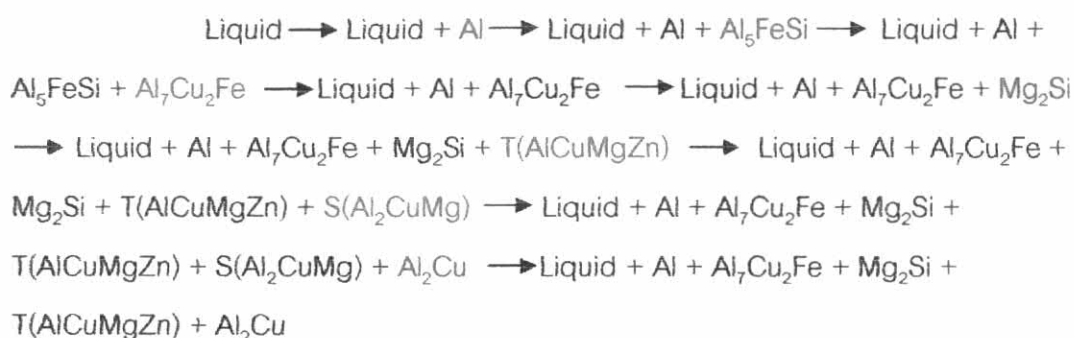
จากภาพที่ 4.24 ก) จากการคำนวณแบบ Scheil's equation จะพบว่าเมื่อโลหะหลอมเหลว (Al-10Zn-2.5Mg-2.3Cu) เริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิประมาณ 625°C จะเริ่มมีเฟสปรากฏขึ้นเป็นลำดับดังนี้



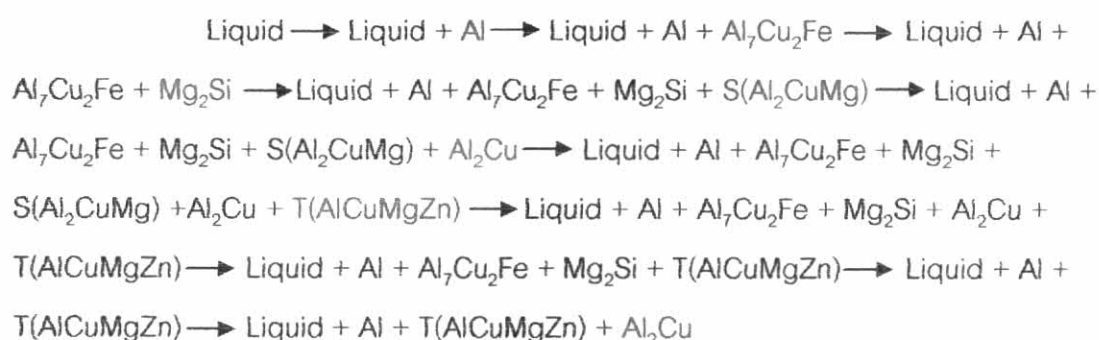
จากภาพที่ 4.24 ข) จากการคำนวณแบบ Scheil's equation จะพบว่าเมื่อโลหะหลอมเหลว (Al-10Zn-2.5Mg-1.5Cu) เริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิประมาณ 627°C จะเริ่มมีเฟสปรากฏขึ้นเป็นลำดับดังนี้



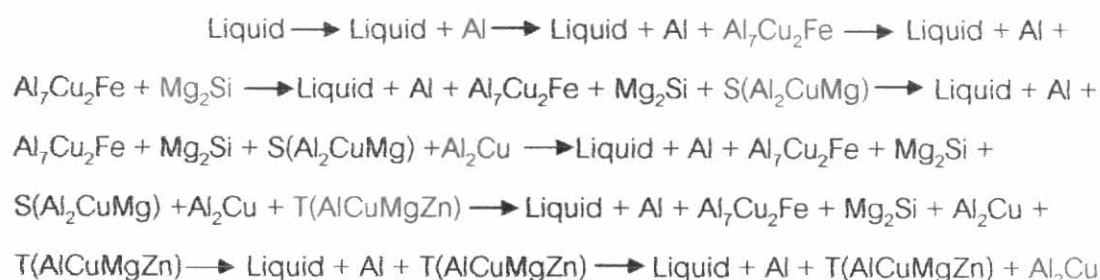
จากภาพที่ 4.24 ค) จากการคำนวณแบบ Scheil's equation จะพบว่าเมื่อโลหะหลอมเหลว (Al-10Zn-2.5Mg-1.0Cu) เริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิประมาณ 628°C จะเริ่มมีเฟสปรากฏขึ้นเป็นลำดับดังนี้



จากภาพที่ 4.24 ง) จากการคำนวณแบบ Scheil's equation จะพบว่าเมื่อโลหะหลอมเหลว (Al-10Zn-1.5Mg-2.3Cu) เริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิประมาณ 630°C จะเริ่มมีเฟสปรากฏขึ้นเป็นลำดับดังนี้



จากภาพที่ 4.24 จ) จากการคำนวณแบบ Scheil's equation จะพบว่าเมื่อโลหะหลอมเหลว (Al-10Zn-1.0Mg-2.3Cu) เริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิประมาณ 632°C จะเริ่มมีเฟสปรากฏขึ้นเป็นลำดับดังนี้



จากภาพที่ 4.24 จะพบว่าโลหะผสมอะลูมิเนียมทุกส่วนผสมจะมีสารประกอบ $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ เป็นสารประกอบแรกที่เกิดขึ้นก่อน ยกเว้นในส่วนผสมที่ 2.5Mg1.0Cu จะมี Al_5FeSi เกิดขึ้นก่อน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในส่วนผสมที่ 2.5Mg1.0Cu มีปริมาณส่วนผสมของทองแดงที่น้อยมากจึงทำให้ความเข้มข้นของทองแดงไม่เพียงพอที่จะเกิด $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ขึ้นมาก่อน แต่เมื่อเกิด Al_5FeSi ไปสักระยะก็จะเกิด $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ตามมา และนอกจากนี้ยังพบว่า ที่ส่วนผสม 2.5Mg1.0Cu, 1.5Mg2.3Cu และ 1.0Mg2.3Cu เกิดสารประกอบ $\text{S(Al}_2\text{CuMg)}$, Al_2Cu และ T(AlCuMgZn) แต่

ในส่วนผสมของ $2.5\text{Mg}2.3\text{Cu}$ และ $2.5\text{Mg}1.5\text{Cu}$ ไม่เกิดสารประกอบ $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$ และ $\text{T}(\text{AlCuMgZn})$ แต่เกิดสารประกอบ MgZn_2

แต่เนื่องจากโปรแกรม Thermo-Calc. ยังมีตัวแปรอีกหลายอย่างที่แตกต่างจากสภาวะขณะหล่อหลอมจริงจึงทำให้เป็นเพียงการศึกษาแนวโน้มการเกิดเฟสเท่านั้น

จากผลการทดลองชิ้นงานในสภาพหล่อที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบว่าเมื่อทำการปรับปริมาณธาตุแมกนีเซียมให้ลดลงพบว่าโครงสร้างยูเทคติกตามบริเวณขอบเกรนมีปริมาณลดลง และเมื่อทำการปรับส่วนผสมของธาตุทองแดงก็เช่นกันจะทำให้ปริมาณโครงสร้างยูเทคติกตามบริเวณขอบเกรนมีปริมาณลดลงเช่นกัน ทั้งนี้เป็นเพราะโครงสร้างยูเทคติกมีสารประกอบที่มีส่วนผสมของธาตุแมกนีเซียมและทองแดง ทำให้เมื่อปริมาณของธาตุผสมทั้งสองนี้ลดลงปริมาณยูเทคติกจึงลดลงด้วย ซึ่งการตรวจสอบพบว่าโครงสร้างยูเทคติกน่าจะประกอบด้วย Al สลับกับ $\text{MgZn}_2(\text{Cu})$ รวมทั้ง $\text{Mg}_{32}(\text{Al,Zn})_{49}(\text{Cu})$ หรือ $\text{Al}_2\text{CuMg}(\text{Zn})$ และ Al_2Cu ซึ่งจะเห็นว่าโครงสร้าง MgZn_2 และ $\text{Mg}_{32}(\text{Al,Zn})_{49}$ มีธาตุทองแดงรวมอยู่ด้วย ทั้งนี้น่าจะเกิดจากธาตุทองแดงเข้าไปละลายในสารประกอบแบบแทนที่หรืออาจเพราะธาตุทองแดงที่ละลายอยู่ตามรอบข้างสารประกอบโดนตรวจพบด้วยจึงทำให้ผลที่วิเคราะห์มีธาตุทองแดงรวมอยู่ด้วย

ชิ้นงานผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียวพบว่าเมื่อใช้เวลาในการอบมากขึ้นจะพบว่าโครงสร้างยูเทคติกสลายไปบางส่วน ส่วนสารประกอบ $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง