

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 การเตรียมชิ้นงาน

ชิ้นงานที่นำมาศึกษาเป็นชิ้นงานที่ตัดมาจากแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องจากเตาหลอมแบบใช้ขดลวดเหนี่ยวนำให้ความร้อนชนิดความถี่ปานกลาง 500 กิโลวัตต์ ความถี่เตาไฟฟ้า 25 H, กระแสไฟ 120 A, หลอมที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส แล้วทำการขจัด Gas และ Slag แล้วจึงทำการเติมธาตุผสมให้ได้ส่วนผสมในน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมหลอมเหลวตามตารางที่ 3.1 ทำการหล่อด้วยอัตราเร็ว 80 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้สุดท้ายได้แท่งโลหะทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1 ด้านล่าง

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีในน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมหลอมเหลว (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักโลหะผสมทั้งหมด)

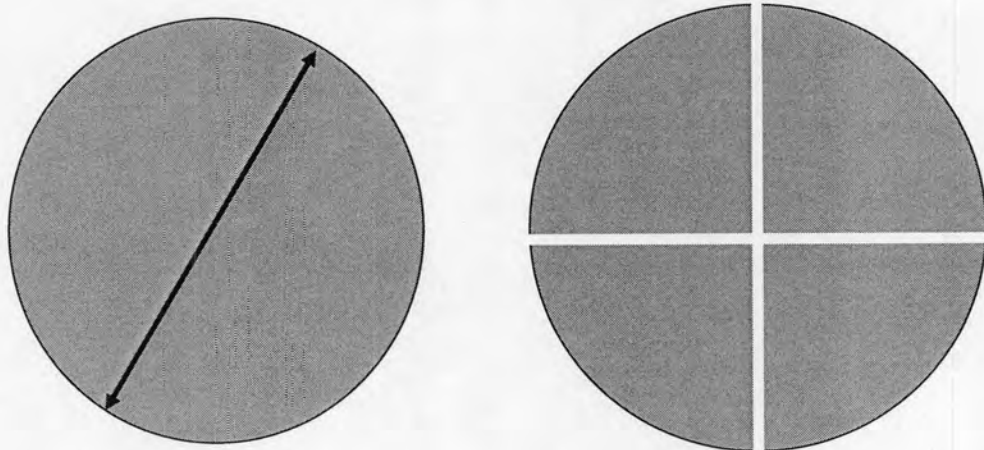
Zn	Mg	Cu	Zr	Fe	Si
9.8	2.5	2.2	0.13	0.12	0.08

3.1.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure)^[7]

- นำชิ้นงานมาตัดแบ่งออกเป็น 4 ส่วนเท่าๆ กัน ดังภาพที่ 3.1
- นำส่วนหนึ่งไปทำการเตรียมผิวด้านบนด้วยการมิลลิ่ง (Milling) ในระดับความละเอียดสูงสุด ($\nabla\nabla\nabla$, สัญลักษณ์ความละเอียดของการกลึงในระดับ 3 ไบมีด)
- เตรียมสารเคมีสำหรับกัดผิวหน้าเพื่อดูโครงสร้าง (Etching) ด้วยส่วนผสมดังนี้ ชนิด (1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 90 มิลลิลิตร (10 g NaOH + 90 ml Water) ชนิด (2) กรดไนตริกเข้มข้น 50% โดยปริมาตร (50% HNO₃ acid)
- นำชิ้นงานที่เตรียมผิวไว้มากัดผิวด้วยสารเคมีชนิด (1) โดยอุ่นให้ร้อนที่อุณหภูมิ 60 – 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-5 นาที แล้วนำออกมาล้างด้วยน้ำจืดเป่าให้แห้งก่อน

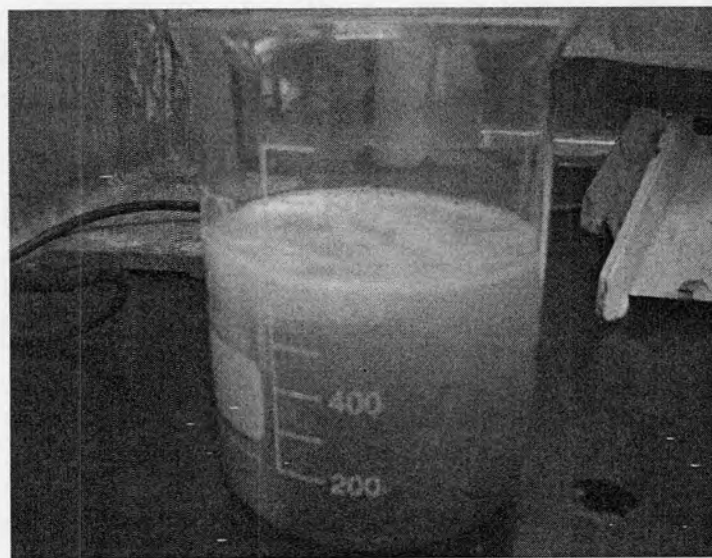
หลังจากนั้นนำผิวหน้าดังกล่าวไปกัดผิวด้วยสารเคมีชนิด (2) เป็นเวลา 2-3 วินาที ดังภาพที่ 3.2 แล้วนำออกมาล้างด้วยน้ำแล้วจึงเป่าให้แห้ง ก็จะได้โครงสร้างมหภาคปรากฏ

5. ถ่ายภาพโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องถ่ายภาพเพื่อเก็บไว้ตรวจสอบผล



Diameter 200mm.

ภาพที่ 3.1 การตัดแบ่งชิ้นงาน

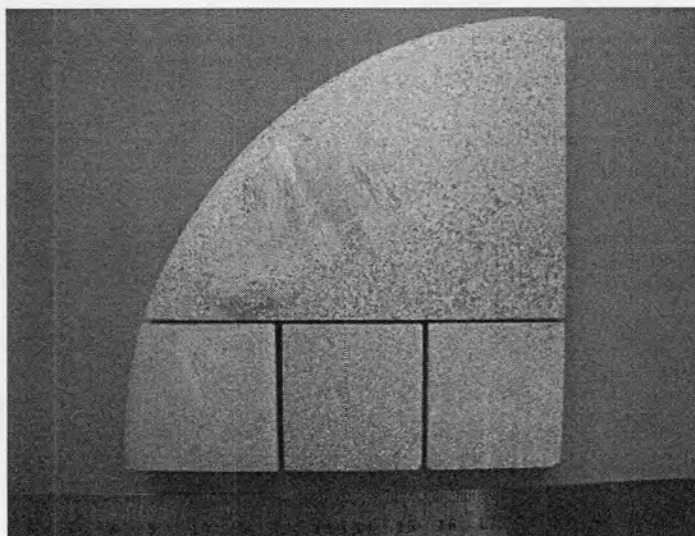


ภาพที่ 3.2 การทำปฏิกิริยาของชิ้นงาน ($Al - 9.8Zn - 2.5Mg - 2.3Cu$) กับกรดโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับน้ำกลั่นกัดผิวหน้าเพื่อดูโครงสร้างมหภาคที่อุณหภูมิ 60 – 70 องศาเซลเซียส

3.1.2 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

1. นำชิ้นงานที่ตัดแล้ว 1 ส่วนจากข้อ 3.1.1. มาตัดเป็น 3 ส่วนไล่ลำดับจากกึ่งกลางชิ้นงานจนมาถึงขอบชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.3
2. นำชิ้นงานที่ตัดแล้วแต่ละส่วนไปตัดย่อให้ได้ขนาดลูกบาศก์ $14 \times 14 \times 14 \text{ mm}^3$
3. ทำการหล่อแบบสำหรับทำเรือนชิ้นงาน (Mounting) ด้วยวิธีการแบบร้อน (Hot mounting) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที ภายใต้ความดันสูญญากาศ 21 MPa และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแบบยึดชิ้นงาน 20 มิลลิเมตร
4. นำชิ้นงานที่หล่อแบบยึดแล้วไปจัดเตรียมผิวด้วยกระดาษทรายน้ำ เบอร์ 1,000, 1,500 และ 2,400 ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำไปขัดละเอียดด้วยผงขัดเพชรขนาด 3 ไมครอน และ 0.25 ไมครอน ตามลำดับ
5. เตรียมสารเคมีสำหรับกัดผิวหน้าเพื่อดูโครงสร้างด้วยส่วนผสมดังนี้ กรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น 40% โดยปริมาตรจำนวน 10 มิลลิลิตร ผสมกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 50% โดยปริมาตรจำนวน 10 มิลลิลิตร ผสมกับกรดไนตริกเข้มข้น 30% โดยปริมาตรจำนวน 25 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร (10ml. HF + 15 ml.HCl + 25 ml.HNO₃ + Water)
6. นำสารเคมีในข้อ 5. ไปเจือจางให้ความเข้มข้นลดลง 10 เท่า ด้วยน้ำกลั่น แล้วจึงนำมากัดผิวหน้าชิ้นงานเป็นเวลา 1-2 วินาที จึงล้างด้วยน้ำเป่าให้แห้ง แล้วนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาค ต่อไป

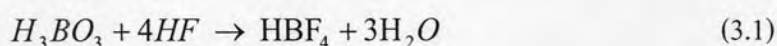




ภาพที่ 3.3 การตัดแบ่งชิ้นงานจากกลางไปถึงผิวชิ้นงาน (จากขวามาซ้ายตามลำดับ)

3.1.3 การเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบเกรนในโครงสร้างจุลภาค

เนื่องจากการใช้สารเคมีในข้อ 3.1.2 สำหรับกัดผิวหน้าเพื่อดูโครงสร้างนั้นสามารถทำให้เห็นโครงสร้างยูเทคติกได้ แต่ในบางบริเวณไม่สามารถทำให้ขอบเกรนปรากฏได้ชัดเจน ทำให้ยากต่อการคำนวณวิเคราะห์หาขนาดเกรนจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนมาใช้สารเคมีชนิดใหม่นั้นก็คือ กรดไฮโดรฟลูออบอริก (HBF_4) ซึ่งได้จากการผสมสารเคมีดังนี้คือ กรดบอริก (H_3BO_3) กับกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 โมล ตามลำดับ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไฮโดรฟลูออบอริก เป็นไปตามสมการดังนี้



นำกรดไฮโดรฟลูออบอริกที่ได้ไปเจือจางลดความเข้มข้นด้วยน้ำกลั่น ในอัตราส่วน 17 : 1,000 มิลลิลิตรตามลำดับ (กรด 17 มิลลิลิตร ต่อน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร) แล้วจึงนำมากัดผิวหน้าชิ้นงานเป็นเวลา 3 นาที จึงล้างด้วยน้ำและเป่าให้แห้ง แล้วนำไปศึกษาหาขนาดของเกรนต่อไป

3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

3.2.1. กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)

ตรวจดูโครงสร้างที่กำลังขยาย 50, 100, 200, 500, 1,000 เท่า

3.2.2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบกวาด(Scanning Electron Microscope, SEM) ตรวจดูโครงสร้างที่กำลังขยายสูงกว่า 1,000 เท่า

3.2.3 การคำนวณขนาดเกรนและศึกษาความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของขนาดเกรนในบริเวณตั้งแต่ผิวจนถึงกลางชิ้นงานจากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

1) นำภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 200 เท่า ที่ใช้ตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกตามวิธีการในข้อ 3.1.3 มาตรวจสอบหาขนาดเกรนด้วยวิธี Quantitative Analysis แบบ Line Measurement^[11] ในบริเวณที่แตกต่างกันอย่างละ 10 ภาพ ทั้งชิ้นงานที่เป็นบริเวณผิว, ระหว่างผิวกับใจกลาง และใจกลางชิ้นงาน

2) กำหนดจุดตรวจสอบบนภาพ แล้วจึงสร้างวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ 8 เซนติเมตร แล้วจึงคำนวณเปรียบเทียบกับขนาดกำลังขยายของภาพ (ได้ 320 ไมครอน) ลากเส้นผ่านศูนย์กลางลงบนภาพถ่ายระบุจุดที่ตัดขอบเกรนที่เส้นผ่านศูนย์กลาง หาขนาดเกรนโดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่คำนวณเปรียบเทียบกับขนาดกำลังขยายของภาพแล้ว หาค่าด้วยจำนวนจุดที่เส้นผ่านศูนย์กลางตัดขอบเกรน จึงจะได้ค่าขนาดของเกรนดังภาพที่ 3.4

3) นำค่าขนาดของเกรนที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตตามสมการ ดังนี้

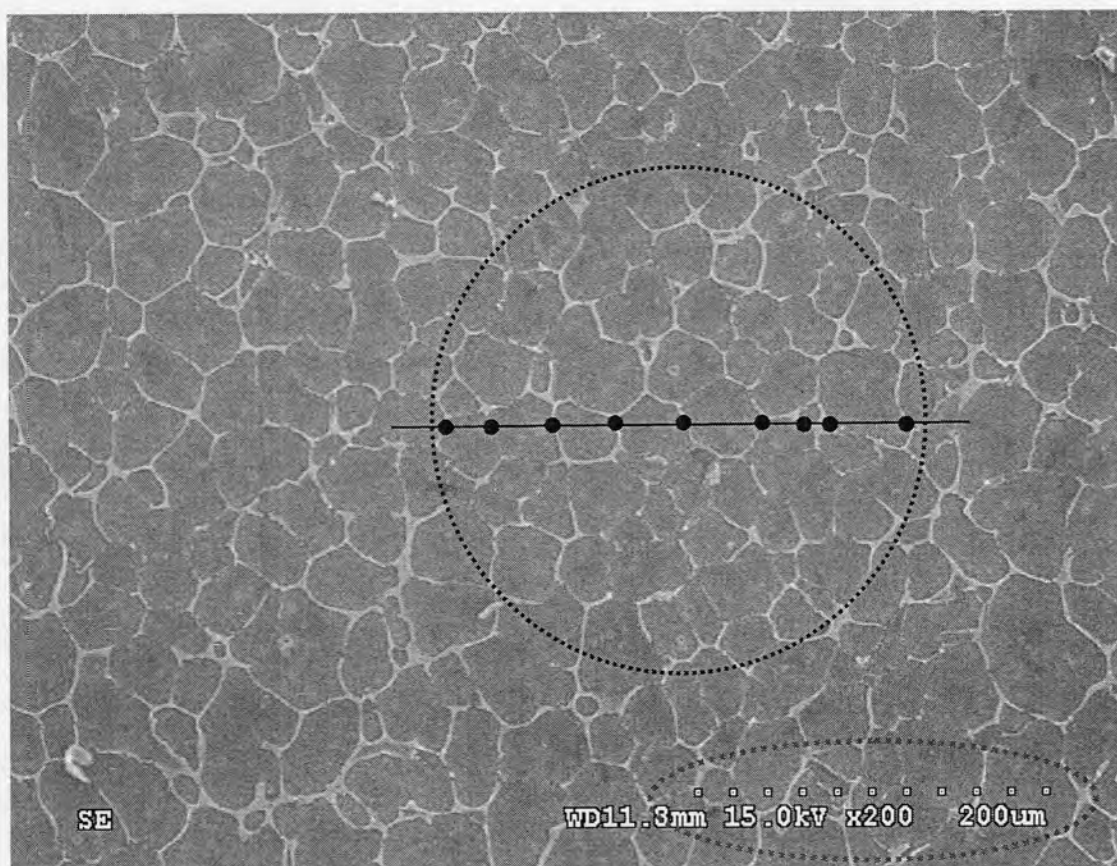
$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (3.2)$$

เมื่อ X_i คือ ขนาดของเกรนที่ตำแหน่งใดๆ
 N คือ จำนวนตำแหน่งที่ทำการวัดทั้งหมด

4) นำค่าขนาดของเกรนที่คำนวณได้ไปหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยใช้สมการทางสถิติ คือ

$$S.D. = \sqrt{\frac{\Sigma(X - \bar{X})^2}{N}} \quad (3.3)$$

โดยเริ่มคำนวณตั้งแต่ 2 ตำแหน่ง และเพิ่มขึ้นทีละตำแหน่งไปจนถึงจำนวนตำแหน่งที่ทำให้การกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ จึงจะทำให้ทราบจำนวนตำแหน่งน้อยที่สุดที่เหมาะสมในการใช้หาค่าเฉลี่ยของขนาดเกรนต่อไป



$$\text{Average grain size} = \frac{\text{Diameter Length}}{\text{Point counting}}$$

ภาพที่ 3.4 วิธีการคำนวณขนาดเกรนของชิ้นงานที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง ประเภท LFEC.

โดยตัวอย่างนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ 8 เซนติเมตรคำนวณเปรียบเทียบกับขนาดกำลังขยายของภาพ ได้คือ 320 ไมครอน หากด้วยจำนวนจุดที่เส้นผ่านศูนย์กลางตัดขอบเกรนคือ 9 ซึ่งจะได้ค่าขนาดของเกรนเป็น 35.56 ไมครอนนั่นเอง

3.2.4. การวิเคราะห์หาขนาดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเท็คติคกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

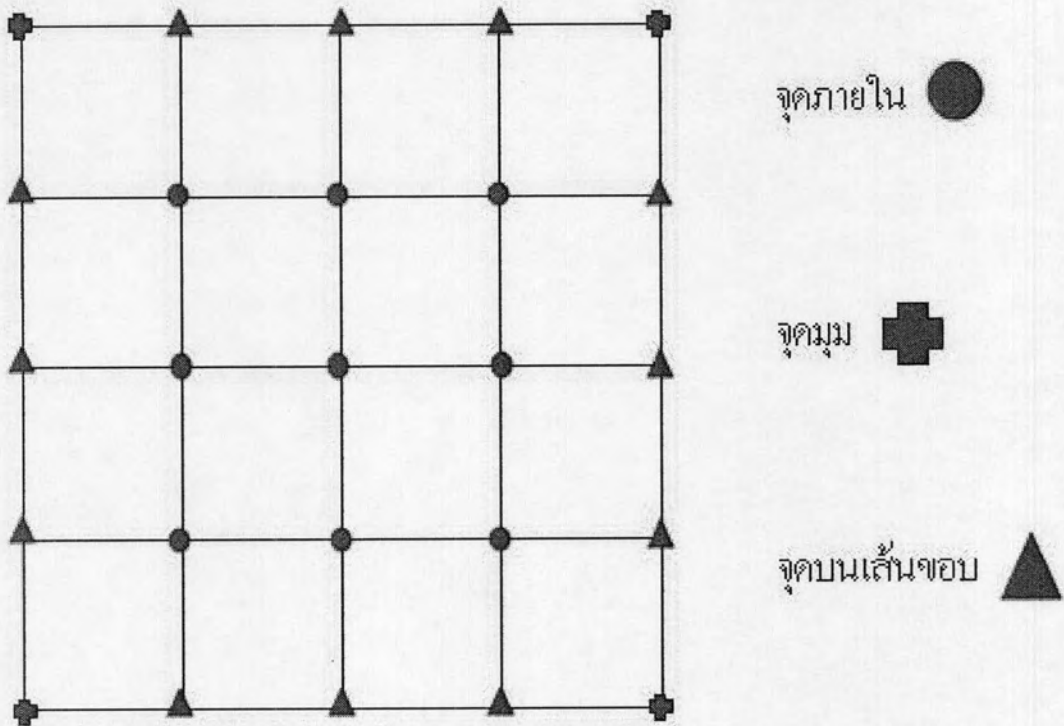
1) นำภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดกำลังขยาย 1000 เท่า ที่ใช้ตรวจสอบชิ้นงานที่ผ่านการกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกตามวิธีการในข้อ 3.1.3 มาตรวจสอบหาขนาดเกรนด้วยวิธี Quantitative Analysis แบบ Point Counting ^[11] ในบริเวณที่แตกต่างกันอย่างละ 100 ภาพ ทั้งชิ้นงานที่เป็นบริเวณผิว, ระหว่างผิวกับใจกลาง และใจกลางชิ้นงาน

2) กำหนดจุดตรวจสอบบนภาพ แล้วสร้างจุดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร และระบุจุดย่อยลงบนภาพภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมโดยแบ่งด้านแต่ละด้านออกเป็น 4 ส่วนเท่าๆกันดังภาพที่ 3.5

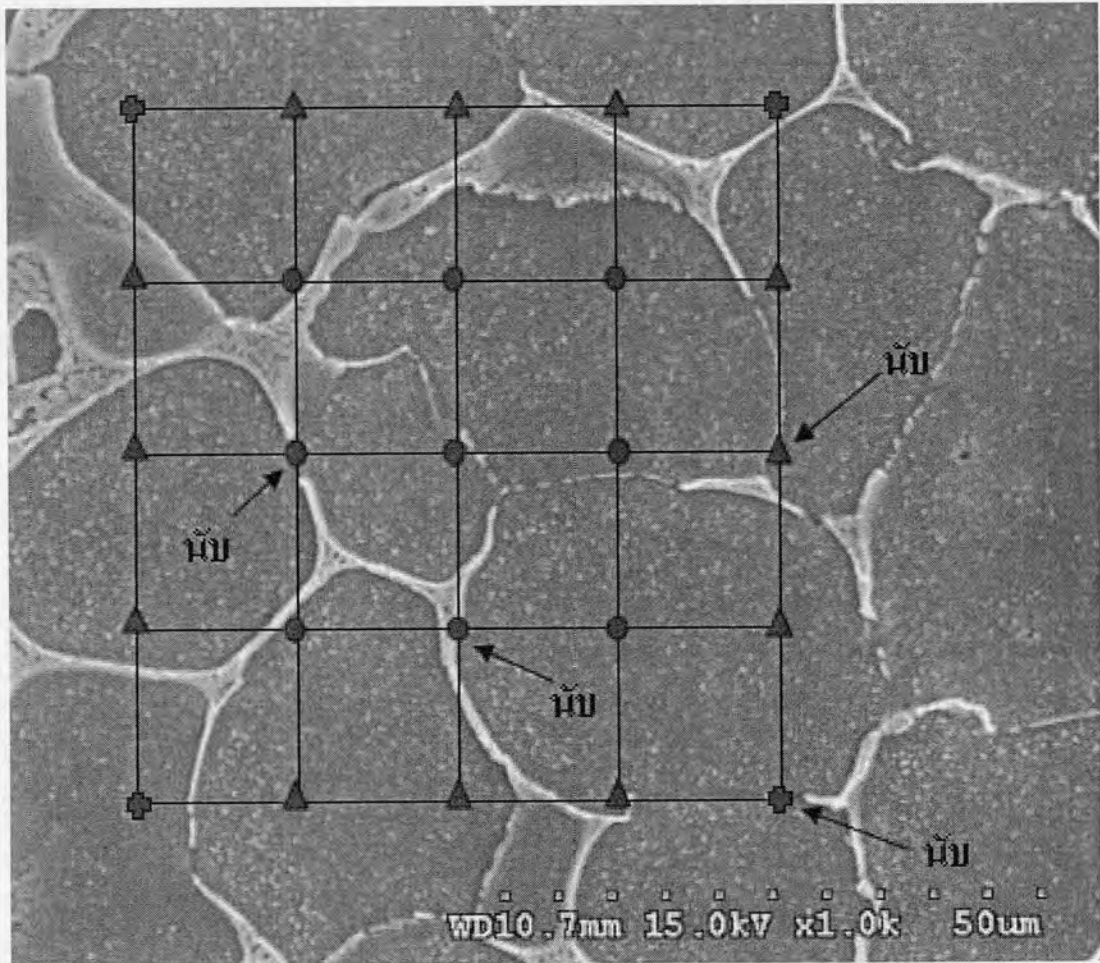
3) กำหนดค่าเฉลี่ยทั้ง 100 ภาพในข้อ 1) เพื่อหาสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเท็คติคกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน โดยนับจำนวนจุดที่ปรากฏในแต่ละพื้นที่ของโครงสร้างที่เป็นยูเท็คติคเปรียบเทียบกับจุดที่ปรากฏในแต่ละพื้นที่ของ พื้นี่โครงสร้างพื้นฐาน โดยมีกฎเกณฑ์ในการนับจุดดังนี้คือ จุดภายใน 9 จุดให้นับจำนวนจุดเป็น 9 จุด (คิดเฉลี่ยโดยน้ำหนักของจุดบนเส้นขอบเป็น 1.00), จุดบนเส้นขอบที่ไม่ใช่จุดมุม รวมทั้งหมด 4 ด้านมี 12 จุดให้นับ 2 จุดคิดเป็นหนึ่งจุด ดังนั้นรวมมีจุดบนเส้นขอบ 6 จุด (คิดเฉลี่ยโดยน้ำหนักของจุดบนเส้นขอบเป็น 0.50), จุดมุมอีก 4 จุดนับ 4 จุดคิดเป็นหนึ่งจุด ดังนั้นรวมมีจุดมุม 1 จุด (คิดเฉลี่ยโดยน้ำหนักของจุดมุมเป็น 0.25) ดังนั้นสำหรับพื้นที่สี่เหลี่ยมนี้คิดให้มีความหนาแน่นของพื้นที่ทั้งหมดเทียบเป็นจุดคือ 16 จุดนั่นเอง ซึ่งจะแสดงการคำนวณสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเท็คติคกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน โดยนับจำนวนจุดที่ปรากฏในภาพที่ 3.6

4) นำค่าเฉลี่ยสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเท็คติคกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานที่คำนวณได้ไปหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยใช้สมการทางสถิติเหมือนกับที่ ทำในขั้นตอนการคำนวณขนาดเกรน

โดยเริ่มคำนวณตั้งแต่ 2 ตำแหน่ง และเพิ่มขึ้นทีละตำแหน่งไปจนถึงจำนวนตำแหน่งที่ทำให้การกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ จึงจะทำให้ทราบจำนวนภาพน้อยที่สุดที่เหมาะสมในการใช้หาค่าเฉลี่ยของสัดส่วนความหนาแน่นของ พื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเท็คติคกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน



ภาพที่ 3.5 การสร้างจุดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้คำนวณสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่
โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน



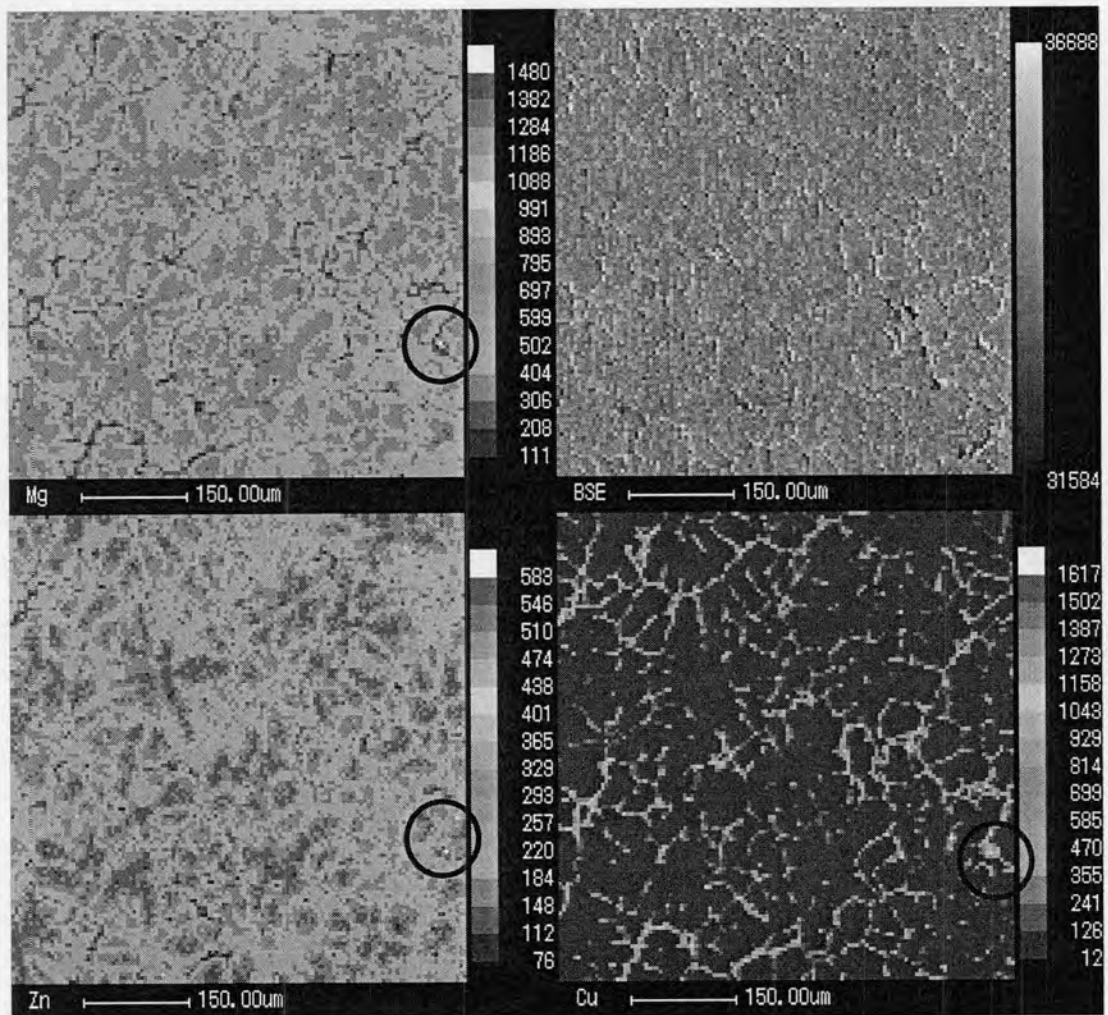
ภาพที่3.6 การคำนวณสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน โดยนับจำนวนจุดที่ปรากฏบนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดกำลังขยาย 1000 เท่า

จากภาพที่3.6 จะสามารถนับจุดที่ตกลงบนบริเวณพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติก โดยคำนวณตามกฎเกณฑ์น้ำหนักของตำแหน่งตามจุดได้คือ จุดภายในนับ $2 \times 1 = 2$ จุด, จุดบนเส้นขอบนับ $1 \times 0.5 = 0.5$ จุด, จุดมุมนับ $1 \times 0.25 = 0.25$ ดังนั้นสำหรับพื้นที่สี่เหลี่ยมที่กำลังตรวจสอบนี้คิดให้พื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกคือ $2 + 0.5 + 0.75 = 2.75$ จุด และคิดความหนาแน่นของพื้นที่ทั้งหมดเทียบเป็นจุดคือ 16 จุด ซึ่งจะคำนวณร้อยละของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานเป็น $(2.75/16) = 17.19\%$ นั่นเอง

4.2.6 เครื่องตรวจสอบแบบ Electron Probe Micro Analyzer, EPMA ตรวจสอบการกระจายตัว และวิเคราะห์ธาตุผสมในเนื้อโครงสร้างและวิเคราะห์ธาตุผสมเพื่อระบุสารประกอบของเฟสต่างๆ ที่ปรากฏ

โดยมีการตั้งค่าความต่างศักย์ของรังสี เป็น 15.0 กิโลโวลต์ และขนาดความกว้างของรังสีเป็น 100 ไมโครเมตร เลือกช่องตรวจสอบธาตุสังกะสีแบบใช้ LIF ตรวจสอบธาตุทองแดงแบบใช้ LIF และตรวจสอบธาตุแมกนีเซียมแบบใช้ RAP แล้วจึงทำการสแกนตรวจสอบเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยกำหนดจุดตรวจสอบย่อยในบริเวณดังกล่าวทั้งหมด 16,000 จุด และมีระยะห่างระหว่างจุดเท่าๆ กัน กำหนดเวลาในการตรวจสอบต่อจุดประมาณ 0.1 วินาที และนำผลที่ได้ที่เป็นจำนวนความถี่ของการตรวจสอบแต่ละจุดย่อยไปคำนวณเป็นค่าส่วนผสมของแต่ละธาตุ โดยเปรียบเทียบผ่านสมการที่อนุมานความสัมพันธ์ว่าเป็นเส้นตรงที่มีความชันเป็นอัตราส่วนของส่วนผสมเฉลี่ยของแต่ละธาตุกับความถี่ในการตรวจสอบที่เป็นจำนวนครั้งเฉลี่ยตามสมการ % Composition = (Slop) (ความถี่ในการนับ) ดังเช่นภาพที่ 3.7 ที่เป็นผลของการตรวจสอบด้วย EPMA

ซึ่งจะแสดงธาตุผสมในเนื้อโครงสร้างจุลภาคได้แก่ ธาตุแมกนีเซียมฝังบนซ้าย, ธาตุสังกะสีฝังล่างซ้าย, ธาตุทองแดงฝังล่างขวาซ้ายและโครงสร้างจุลภาคที่แสดงอยู่ที่ฝังบนขวา โดยจะแสดงผลปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่ผสมเป็นลักษณะของจุดสีที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ที่พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นน้อยสุดคือสีน้ำเงิน ถึงที่พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นมากที่สุดคือสีขาว ตามแถบสีที่อยู่ด้านข้างขวา และตัวเลขที่ระบุคือจำนวนความถี่ (นับเป็นจำนวนครั้ง) ของการตรวจสอบพบปริมาณธาตุในแต่ละจุด ซึ่งในภาพที่ 3.7 นี้บริเวณที่วงกลมไว้เป็นบริเวณที่พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่ผสมได้แก่ธาตุแมกนีเซียม, ธาตุสังกะสีและธาตุทองแดงสูงพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณนี้จะมีเฟสที่มีสารประกอบเป็น อะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง หรือ T(Al-Zn-Mg-Cu) เป็นต้น



ภาพที่3.7 ตัวอย่างผลการตรวจสอบด้วยEPMA

3.3 การคำนวณเส้นทางและลำดับการแข็งตัวของโครงสร้างจุลภาค

1. การประมาณเส้นทางของการแข็งตัวของบนแผนภูมิสมดุล (Phase diagram) ด้วยการคำนวณตามสมการการแข็งตัวแบบGulliver-Scheil's ตามทฤษฎีที่ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่2 หัวข้อย่อย 2.3 ของ

1.1 3 ธาตุ (Al – Zn – Mg)

1.2 2 ธาตุ (Al – Zn, Al – Mg, - Zn – Mg)

ในการหาเส้นทางของการแข็งตัวของโลหะผสม(Al – Zn – Mg) ดังภาพที่ 3.11 นั้นต้องอาศัยสมการที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition, C_L) กับอุณหภูมิ (T) ผ่านอิทธิพลของค่า k ของ 2 ธาตุ(Al – Zn, Al – Mg, - Zn – Mg) จากสมการที่ 3.7 ที่เกิดจากการรวมกันของสมการที่ 3.5 และ 3.6 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้หาเส้นทางของการแข็งตัวของโลหะผสมที่มีจำนวนธาตุผสมหลักสามธาตุโดยประยุกต์มาจากสมการที่ 2.8 คือความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) ในแบบของ Gulliver-Scheil, $C_s^* = kC_o[1 - f_s]^{k-1}$ มาสร้างเป็นสมการที่ 3.5 และ 3.6 โดยจะคำนวณหาค่า k จากสมการ 3.8 และจะได้ค่า k ของ Al – Zn คือ 0.5, ค่า k ของ Al – Mg คือ 0.4 และค่า k ของ Al – Cu คือ 0.15 แล้วแทนค่า k และแทนค่าอุณหภูมิ(T) ลงในสมการที่ 3.4, 3.5 เพื่อให้ได้ค่า f_s แล้วนำค่า f_s ที่ได้ไปคำนวณหา C_L ของธาตุสังกะสีและแมกนีเซียม โดยใช้สมการ 3.7 เพื่อที่จะได้ค่า C_L ของธาตุสังกะสีและแมกนีเซียมกับค่าอุณหภูมิ(T) ไปสร้างเส้นทางของการแข็งตัวของโลหะผสม(Al – Zn – Mg) ซึ่งจะแสดงการคำนวณไว้ในหัวข้อ 4.2.5

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_M - T}{T_M - T_L} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{C_L}{C_O} \right)_{Zn} = (1 - f_s)^{-(1-k_{Al-Zn})} \quad (3.5)$$

$$\left(\frac{C_L}{C_O}\right)_{Mg} = (1 - f_S)^{-(1-k_{Al-Mg})} \quad (3.6)$$

$$\left(\frac{C_L}{C_O}\right)_{Zn} = \left\{1 - \left[1 - \left(\frac{C_L}{C_O}\right)_{Mg}^{\frac{-1}{1-k_{Al-Mg}}}\right]\right\}^{-(1-k_{Al-Zn})} \quad (3.7)$$

และหาค่า k ของ 2 ธาตุ (Al - Zn, Al - Mg, - Zn - Mg) จากแผนภูมิสมมูล 2 เฟสดังภาพที่ 3.8, 3.9, 3.10 ประกอบการคำนวณด้วยสมการ

$$k = \frac{C_S^*}{C_L^*} \quad (3.8)$$

เมื่อสัญลักษณ์ในสมการเป็นการแทนค่าความหมายของปริมาณต่างๆดังนี้

C_O คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะหลอมเหลว

C_S, C_L คือ ความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวตามลำดับ

f_S คือ สัดส่วนปริมาณโลหะที่แข็งตัวแล้ว

C_S^*, C_L^* คือ ความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวบริเวณผิวรอยต่อตามลำดับ

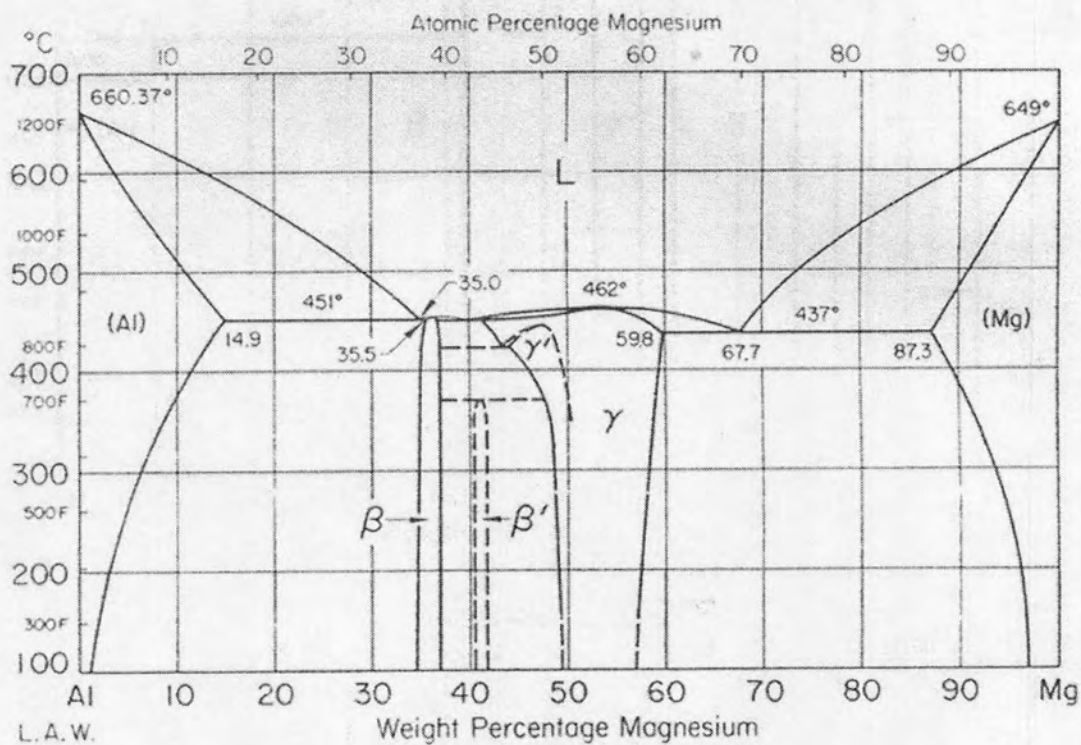
k คือ อัตราส่วนความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวที่สมดุล ณ บริเวณผิวรอยต่อระหว่างส่วนที่เป็นของเหลวกับของแข็ง

T คือ อุณหภูมิ หน่วยเป็น K

T_M คือ อุณหภูมิหลอมเหลว หน่วยเป็น K

T_L คือ อุณหภูมิของเหลวที่ความเข้มข้นเริ่มแรก หน่วยเป็น K

Al-Mg Aluminum-Magnesium



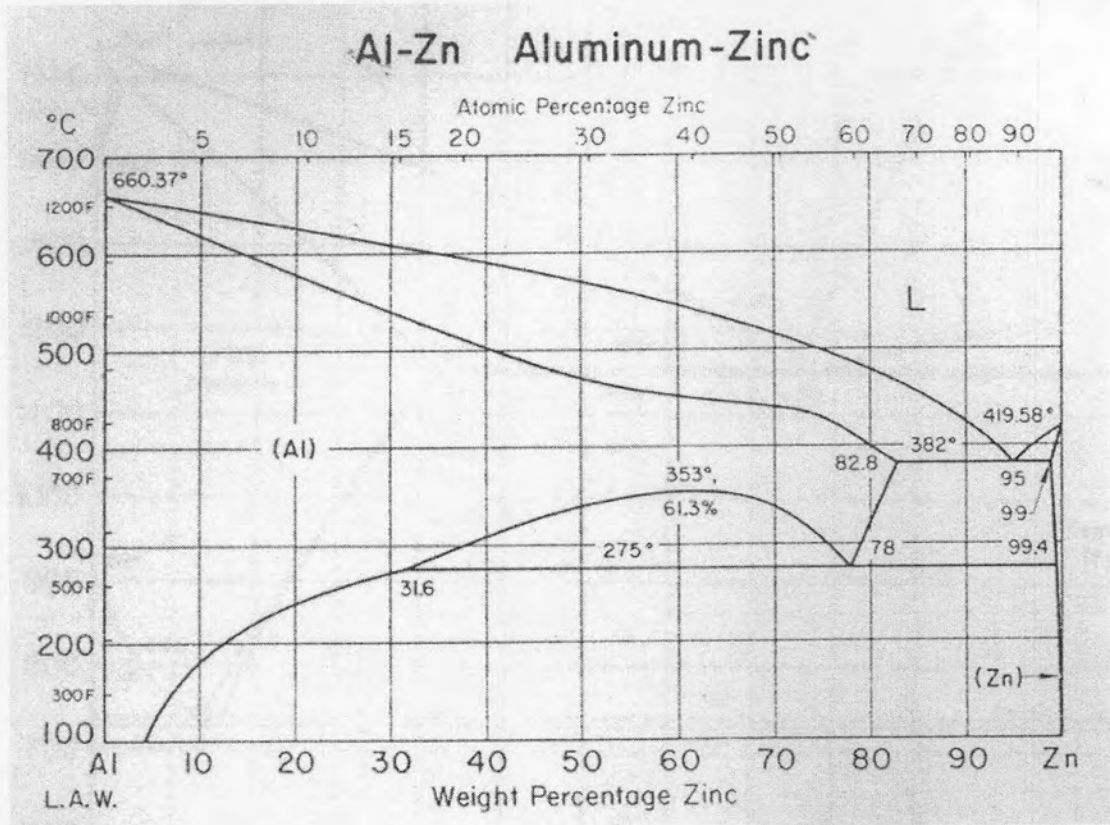
ภาพที่ 3.8 แผนภูมิสมดุล Al-Mg ($k=0.4$) (Al - 9.8Zn - 2.5Mg - 2.3Cu)

จากแผนภูมิสมดุล Al-Mg ที่ตำแหน่ง C_0 2.5%Mg

พบว่าค่า C_s^* เป็น 2.5% และ C_L^* เป็น 6.3%

$$k = \frac{C_s^*}{C_L^*} = \frac{2.5}{6.3}$$

ดังนั้นค่า $k_{Al-Mg} = 0.4$



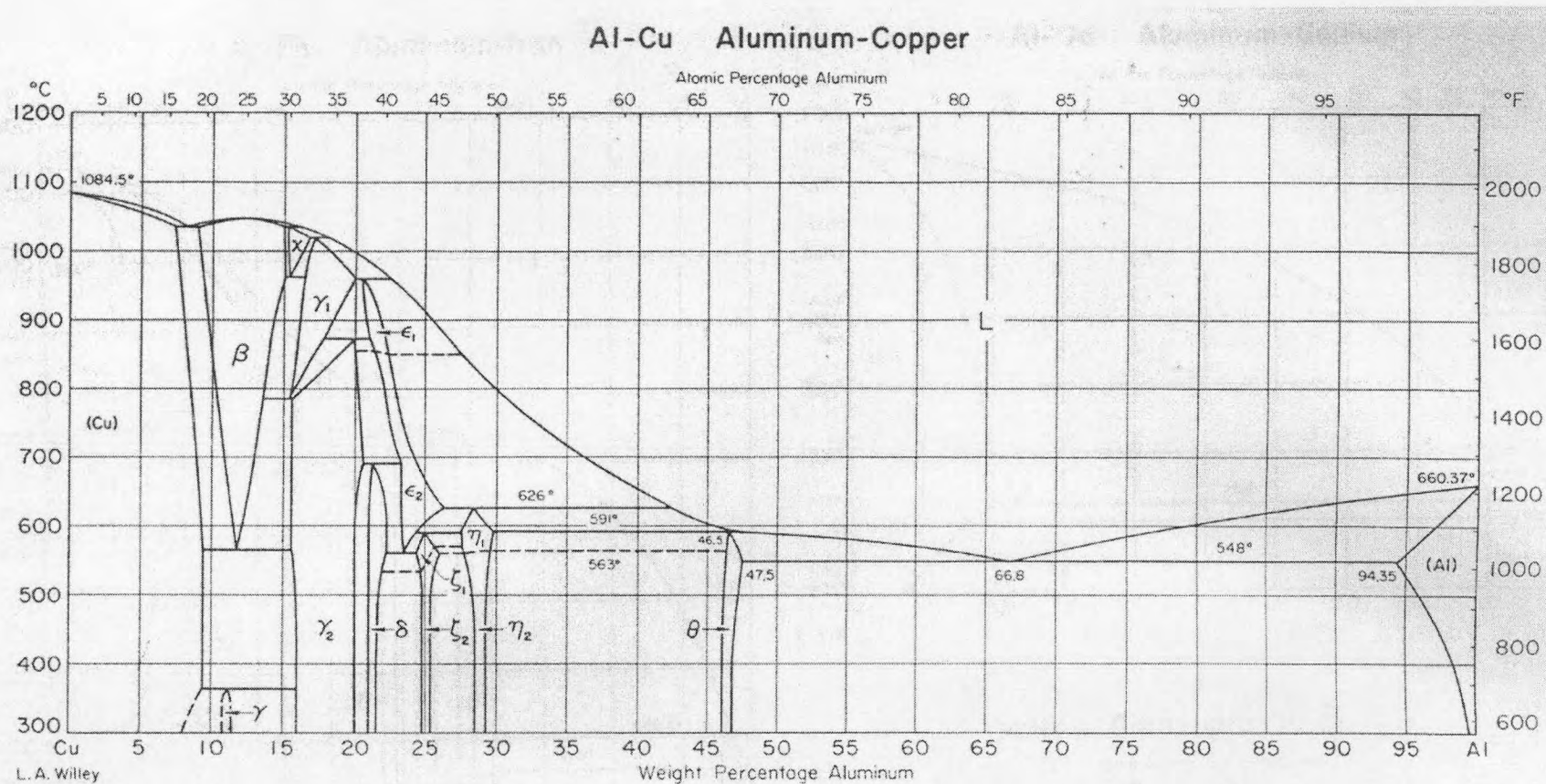
ภาพที่ 3.9 แผนภูมิสมดุล Al-Zn ($k=0.5$) (Al - 9.8Zn - 2.5Mg - 2.3Cu)

จากแผนภูมิสมดุล Al-Mg ที่ตำแหน่ง C_0 9.8%Mg

พบว่าค่า C_s^* เป็น 9.8% และ C_L^* เป็น 19.6%

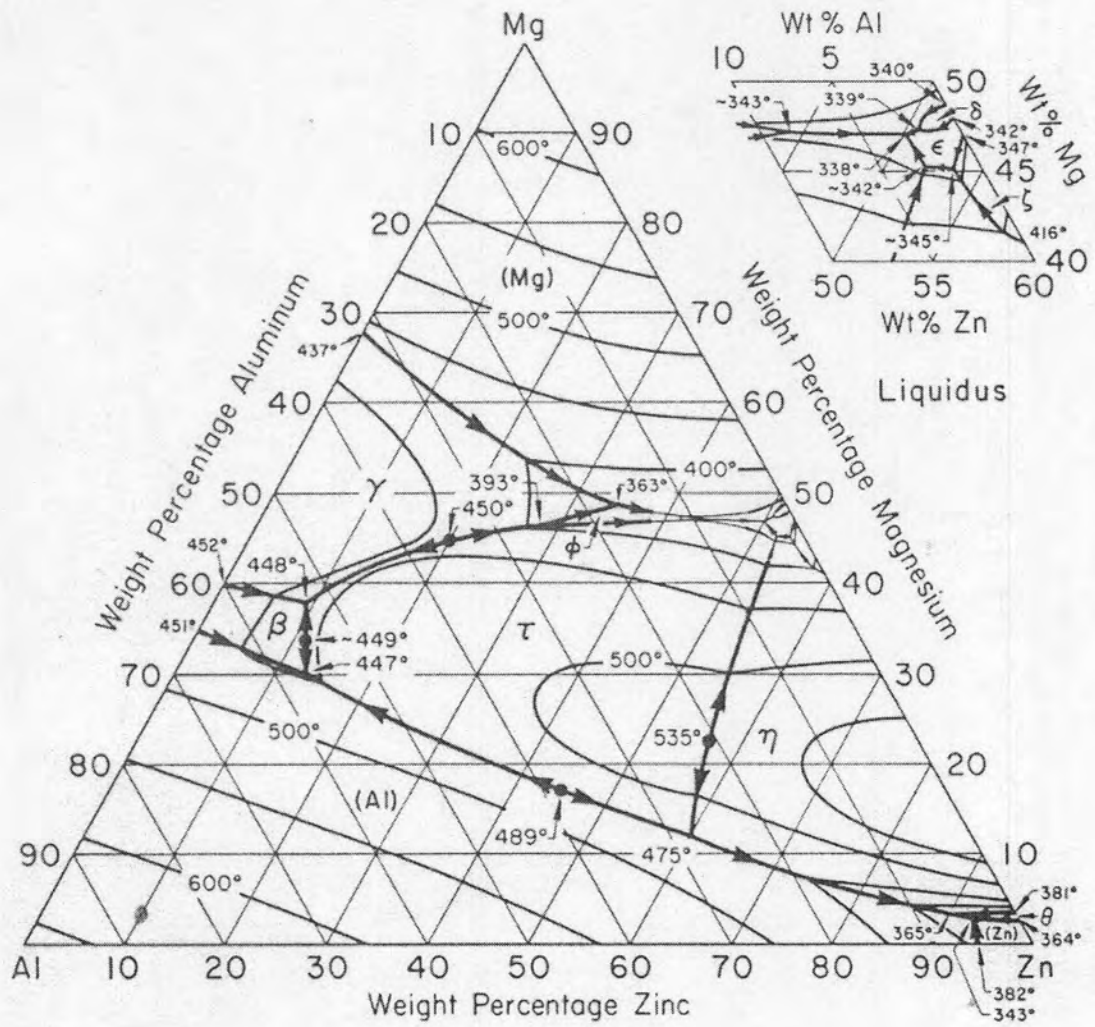
$$k = \frac{C_s^*}{C_L^*} = \frac{9.8}{19.6}$$

ดังนั้นค่า $k_{Al-Zn} = 0.5$



ภาพที่ 3.10 แผนภูมิสมมูล Al-Cu ($k=0.15$) (Al - 9.8Zn - 2.5Mg - 2.3Cu), ที่ตำแหน่ง C_0 2.3%Mg พบว่าค่า C^*_S เป็น 2.3% และ C^*_L เป็น 15.3%

$$\text{ดังนั้นค่า } k_{Al-Cu} = \frac{2.3}{15.3} = 0.15$$



ภาพที่ 3.11 แผนภูมิสมมูล Al-Zn-Mg

การคำนวณด้วยโปรแกรม Thermo – Calc.

โปรแกรม Thermo-Calc for Window (TCW 2) คือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีการพัฒนาและนำมาใช้ตั้งแต่ปีค.ศ.1981 โดยใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ผลหรือทำนายลักษณะการเกิดขึ้นของปฏิกิริยา หรือเหตุการณ์ต่างๆเช่น เส้นทางการแข็งตัวของแท่งโลหะ (Scheil-Gulliver solidification simulations), การวิเคราะห์ปฏิกิริยาของแก๊สผสม (partial pressures in gases), การสร้าง Pourbaix diagrams เป็นต้น

สำหรับการนำโปรแกรม Thermo-Calc มาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อ คาดหวังให้แสดงผลเส้นทางการแข็งตัวของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง โดยใช้หลักการวิเคราะห์จากผลที่มีการคิดค่าพลังงาน Gibb's free energy ที่ให้ค่าต่ำที่สุดของแต่ละข้อมูลพื้นฐานที่จะใช้อ้างอิง หรือ Data Base ของค่าทาง Thermodynamic เช่น ค่า, Entropy, Enthalpy และข้อมูลที่ใช้ในการขนถ่ายมวลสาร หรืออุณหภูมิเช่น สัมประสิทธิ์การแพร่ เป็นต้น ของธาตุและสารประกอบต่างๆ แล้วแต่ที่จะเลือกมาใช้วิเคราะห์แผนภูมิสมดุล ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในระบบที่ซับซ้อน มีธาตุผสมหลายธาตุ ไม่เป็นรูปแบบอุดมคติ มีตัวแปรอิสระหลายค่า ได้ถึง 5 ค่าและยังสามารถเลือกรูปแบบในการแสดงผลได้อีกด้วย โดยการวิจัยในครั้งนี้จะเลือกการแสดงผลในรูปแบบของกราฟความผันแปรระหว่างสัดส่วนมวลที่แข็งตัวแล้ว (f_s) กับอุณหภูมิ (T) โดยมีลำดับในการคำนวณดังนี้

- 1) เลือกระบบที่จะคำนวณ โดยเลือกที่จะคำนวณตามสมการการแข็งตัวแบบ Scheil
- 2) เลือกข้อมูลพื้นฐานที่จะใช้อ้างอิง หรือ Data Base จากกลุ่มข้อมูล A1-v3
- 3) เลือกธาตุผสมหลัก คือ อะลูมิเนียม (Al), สังกะสี (Zn), แมกนีเซียม (Mg) , และทองแดง (Cu)
- 4) เลือกชนิดของเฟสที่คาดว่าจะพบในโครงสร้างจุลภาค ดังนี้ Liquid (α) , Al_2Cu , FCC-Al , $MgZn_2$, $S(Al_2CuMg)$ และ $T(Al-Cu-Mg-Zn)$

- 5) กำหนดค่าส่วนผสมของธาตุผสมตามร้อยละของน้ำหนัก สังกะสี (Zn) เป็น 9.8 , แมกนีเซียม (Mg) เป็น 2.5 และ ทองแดง (Cu) เป็น 2.3

- 6) กำหนดค่าประจำแกน X เป็นค่าอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส และประจำแกน Y เป็นสัดส่วนมวลที่แข็งตัวแล้ว (BS , Mass Fraction of Solid Phase)