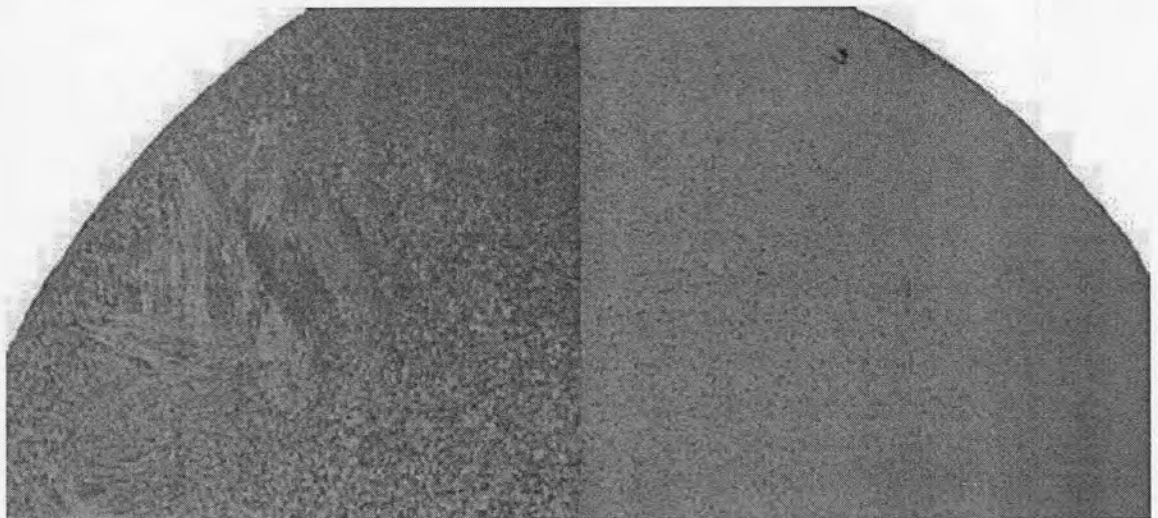


บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

พบความแตกต่างอย่างชัดเจนเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างและ ขนาดรูปร่างของเกรนบน ชิ้นงาน โลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วย กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่ไม่มีการ ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) กับชิ้นงาน โลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อ แบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการประยุกต์ใช้ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field)



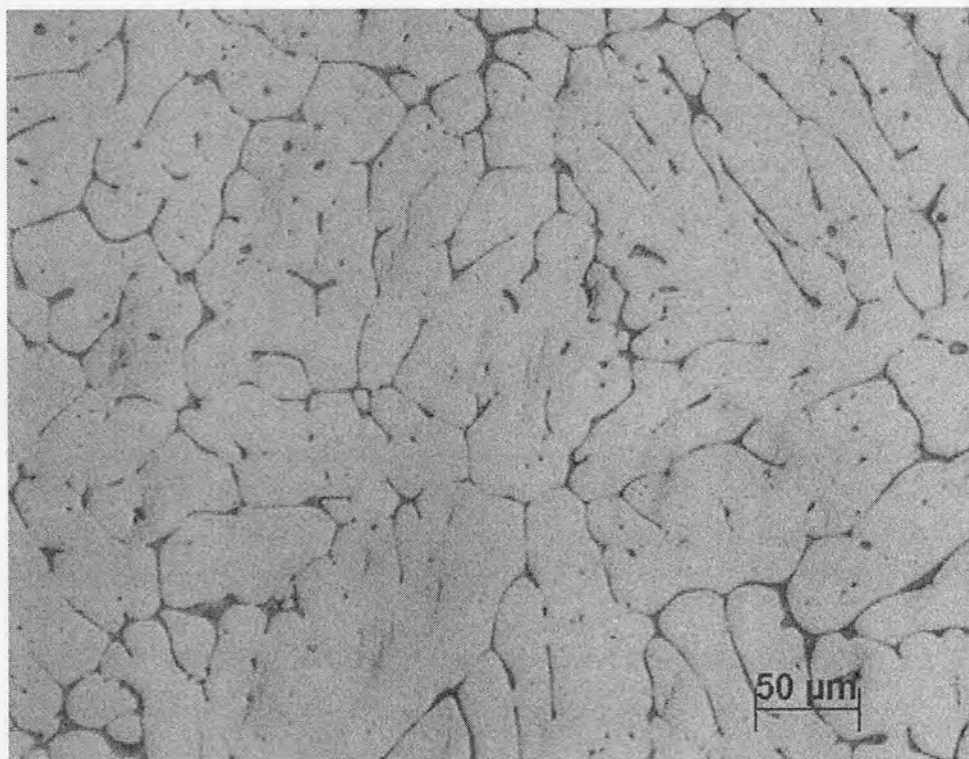
ภาพที่ 4.1 ผลเปรียบเทียบ โครงสร้างมหภาคของ DC(ซ้าย), LFEC(ขวา)

ชิ้นงาน โลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วย กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการ ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) จะมีขนาด

โครงสร้างมหภาคที่ละเอียดและสม่ำเสมอ แสดงขนาดเกรนที่มีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานโลหะหล่อที่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

4.2.1 ความแตกต่างขนาดรูปร่างของเกรนบนชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) กับ ที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

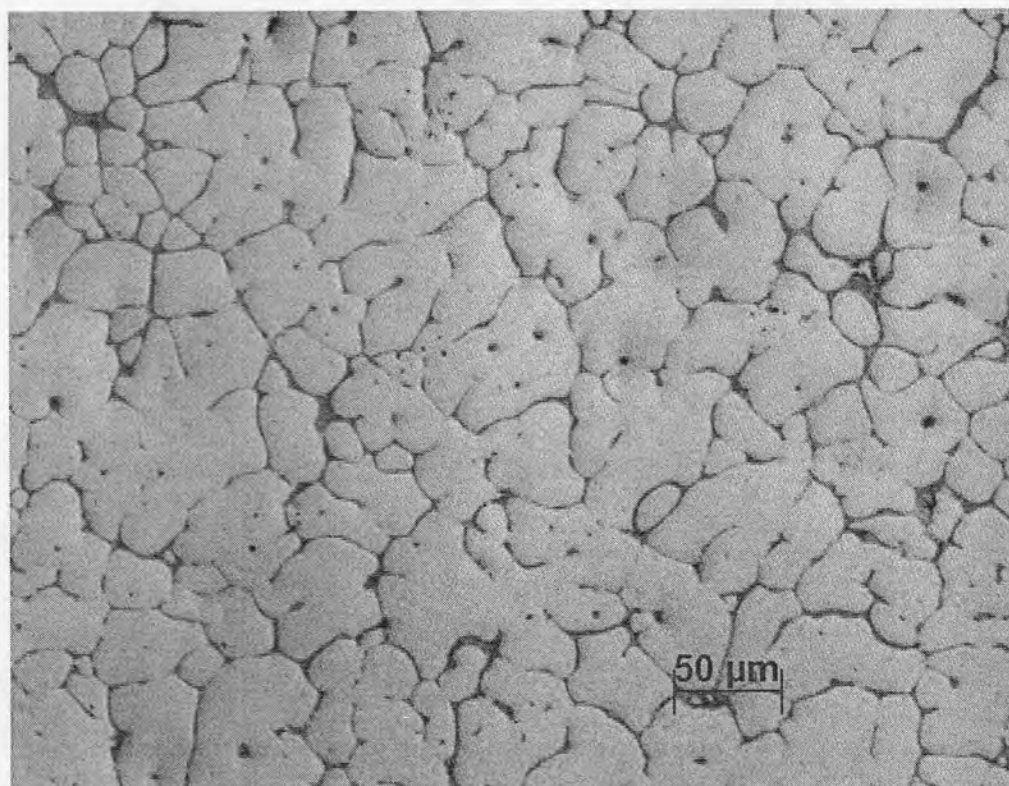


ภาพที่ 4.2 ผลโครงสร้างจุลภาคของ DC

เกรนที่มองเห็นชัดว่าเป็นเกรนสมบูรณ์แล้วของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) ดังภาพที่ 4.3

จะมีขนาดโครงสร้างจุลภาคที่ละเอียดและสม่ำเสมอ และมีขนาดเกรนที่มีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานโลหะหล่อ ที่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังภาพที่4.2

ซึ่งรูปร่างของเกรนของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีลักษณะค่อนข้างเป็นวงกลมมากกว่ารูปร่างของเกรนของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่4.3 ผลโครงสร้างจุลภาคของLFEC

โดยสาเหตุที่ทำให้เกรนของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) จะมีขนาดโครงสร้างจุลภาคที่ละเอียดและสม่ำเสมอ และมีขนาดเกรนที่มีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานโลหะหล่อ ที่ไม่มีการ

ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า
กระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก

เนื่องจากผลของแรงที่เกิดขึ้น โดยการเหนี่ยวนำของ
และแรงที่เกิดขึ้นมานี้จะทำหน้าที่กวนน้ำโลหะหลอมเหลวอยู่

ตลอดเวลาในขณะที่ทำการหล่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งน้ำโลหะบริเวณติดกับผิวขอบแบบหล่อจะเริ่มมีการแข็งตัว ดังนั้นการที่มีแรงมากวนน้ำโลหะนั้น จะส่งผลทำให้บางส่วนของน้ำโลหะบริเวณขอบที่เริ่มมีการแข็งตัวแล้วเกิดการแตกตัวออกเป็นอนุภาคของแข็งเล็กๆ แล้วกระจายตัวไปอยู่ในทุกๆ บริเวณหรือทุกๆ ส่วนของน้ำโลหะหลอมเหลว หลังจากนั้นการแข็งตัวก็เกิดขึ้นต่อไปจากอนุภาคของแข็งเล็กๆ ที่กระจายอยู่ จนการแข็งตัวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์โดยที่ทุกๆ บริเวณของน้ำโลหะหลอมเหลวจะมีลักษณะการแข็งตัวและทิศทางการแข็งตัวเกิดขึ้นภายในเวลา, พื้นที่และพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ได้ลักษณะของเกรนที่เกิดขึ้นเป็นไปตามผลการตรวจสอบข้างต้น

อย่างไรก็ตาม การสรุปลักษณะความแตกต่างข้างต้น ถือว่ายังไม่เหมาะสมนักให้ทางวิศวกรรมศาสตร์ที่ควรสรุปความแตกต่างโดยระบุให้ชัดเจนเป็นปริมาณหรือตัวเลขที่สามารถวัดค่าได้ ดังนั้นการหาขนาดเกรนจึงต้องทำการศึกษาต่อ และจะแสดงผลของการตรวจสอบในหัวข้อต่อไปคือ การคำนวณขนาดเกรนและศึกษาความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของขนาดเกรนในบริเวณตั้งแต่ผิวจนถึงกลางชิ้นงานจากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค



4.2.2 การกำหนดขนาดเกรนและศึกษาความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของขนาดเกรนในบริเวณตั้งแต่ผิวจนถึงกลางชิ้นงานจากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

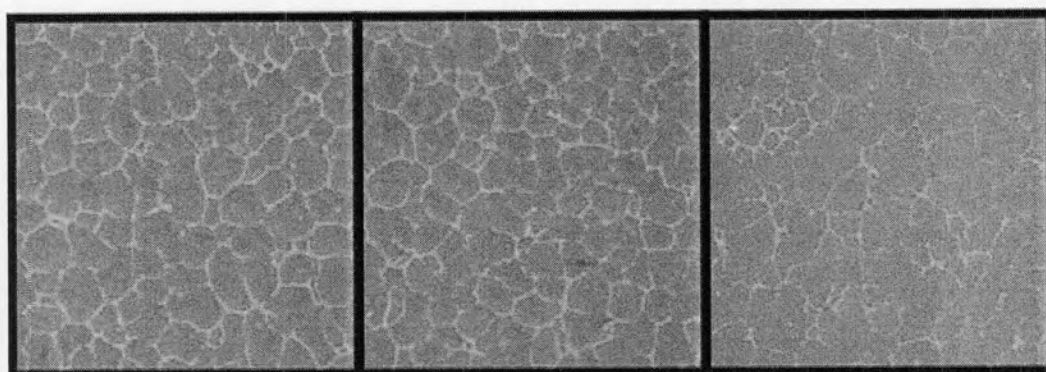
นำค่าขนาดของเกรนที่วัดได้ไปหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต และหาค่าจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมในการวัดครั้งต่อไปจากการวัดการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งจากผลการวัดการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทดลองพบว่า จำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมที่น้อยที่สุดที่ทำให้การกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอจนเกือบคงที่ หรือไม่มีความผันผวนมากนักซึ่งในทางสถิติถือว่าเป็นปริมาณหรือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่มากและเหมาะสมเพียงพอในการนำมาคำนวณค่าอื่นๆทางสถิติต่อไป ซึ่งในกรณีของการวัดขนาดของเกรนในการวิจัยนี้คือ จำนวนการตรวจสอบกลุ่มตัวอย่างจำนวนตั้งแต่ 30 ข้อมูลขึ้นไป(ดังผลที่แสดงในภาพที่ 4.6) โดยที่ขนาดของเกรนชิ้นงาน โลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง ประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะมีค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนของแต่ละตำแหน่ง โดยเริ่มตรวจวัดจากผิวชิ้นงานเข้ามาถึงกึ่งกลางชิ้นงานและแบ่งตรวจสอบเพิ่มตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างผิวชิ้นงานกับ ใจกลางชิ้นงานหรือที่ระยะครึ่งหนึ่งของรัศมี โดยในการหาค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนที่แต่ละตำแหน่งนั้นจะใช้วิธีทางสถิติโดยใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 พื้นที่ตรวจสอบและแสดงผลผ่านแผนภาพฮิสโทแกรมดังตัวอย่างในภาพที่ 4.7 และค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนที่แต่ละตำแหน่งจะได้ค่าดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดเกรนของโครงสร้างจุลภาคของ LFEC บริเวณต่างๆ

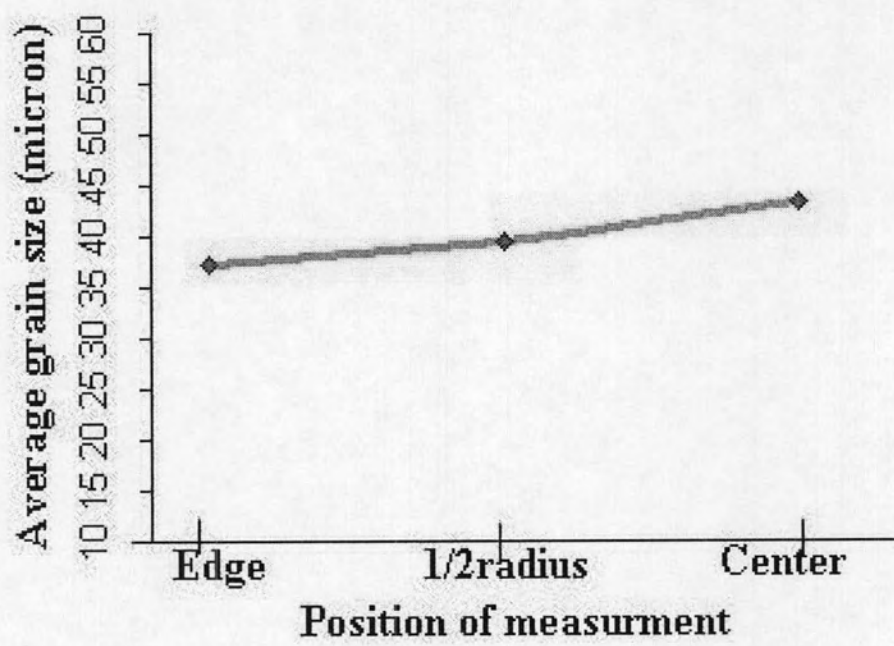
Grain Size (Micron)		
Center	Half of Radius	Edge
43.4	39.5	37.1

และมีลักษณะของโครงสร้างจุลภาคแสดงไว้ในภาพที่ 4.4, 4.5 ซึ่งจะพบว่าที่ผิวชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนน้อยที่สุดคือประมาณ 37.1 ไมครอน และขนาดเกรนจะโตขึ้นเมื่อตรวจสอบไล่เข้ามาถึงที่ระยะครึ่งหนึ่งของรัศมี และมีแนวโน้มที่โตมากขึ้นจนถึงกึ่งกลางชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ย

ขนาดของเกรนมากที่สุดคือประมาณ 43.4 ไมครอน แต่การกระจายตัวของขนาดเกรนในตำแหน่งต่างๆ ถือว่าไม่แตกต่างกันมาก หรือสรุปได้ว่ามีความสม่ำเสมอมากนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่ ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) ที่สรุปโดยนักวิจัยชาวจีน^[9] ที่มีค่าประมาณ 80 – 200 ไมครอนจากบริเวณผิวถึงกึ่งกลางตามลำดับ

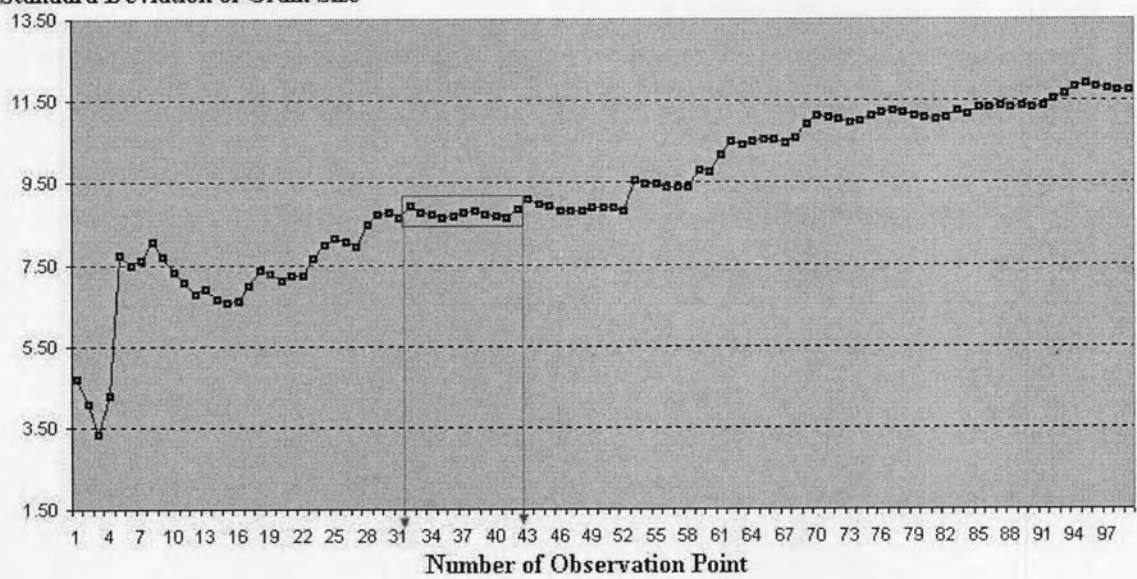


ภาพที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของ LFEC บริเวณต่างๆ โดยเริ่มจากซ้ายสุดคือผิวชิ้นงาน

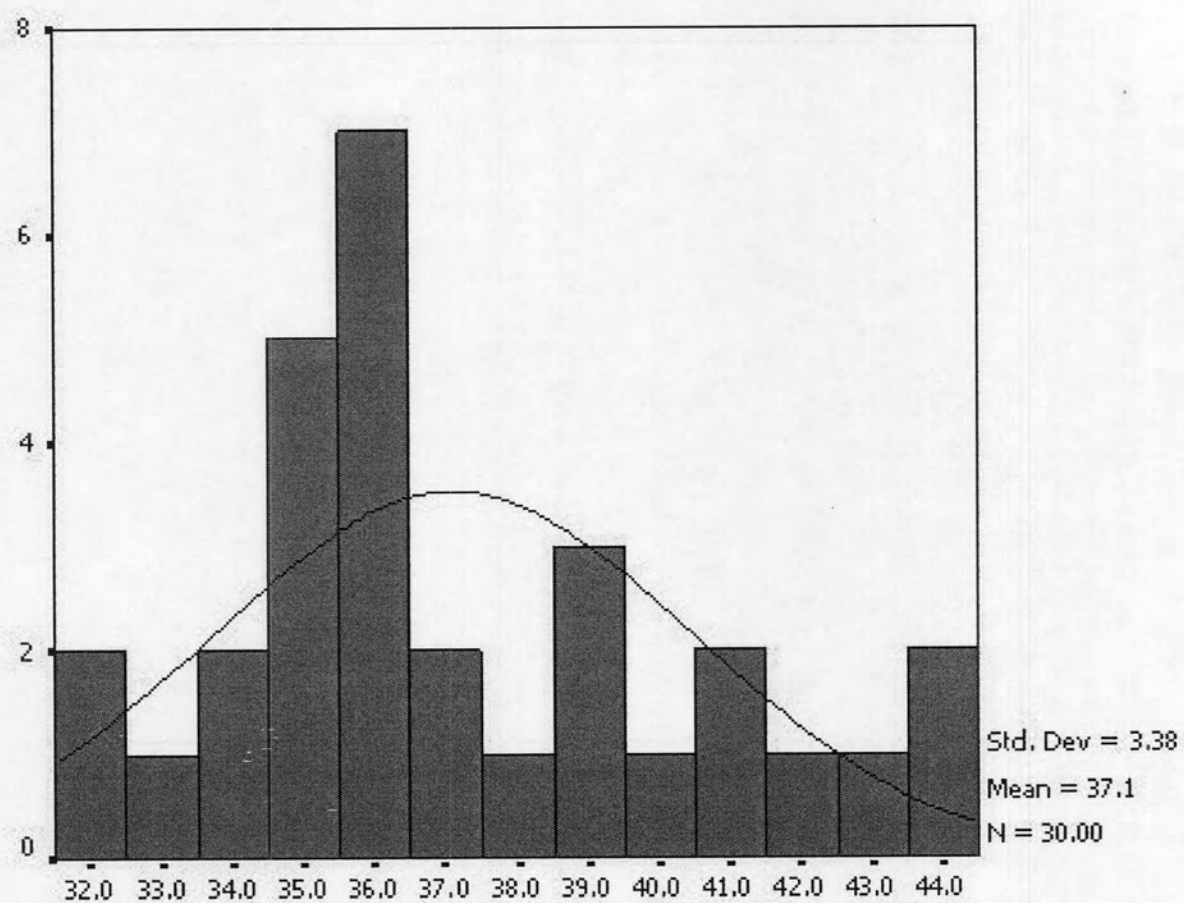


ภาพที่ 4.5 กราฟขนาดเกรนของโครงสร้างจุลภาคของLFECบริเวณต่างๆ

Standard Deviation of Grain Size



ภาพที่ 4.6 กราฟการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเกรน โครงสร้าง
จุดภาคของLFEC



ภาพที่ 4.7 กราฟฮิสโทแกรมของขนาดแกนโครงสร้างจุดภาคของLFEC

4.2.3 การคำนวณขนาดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

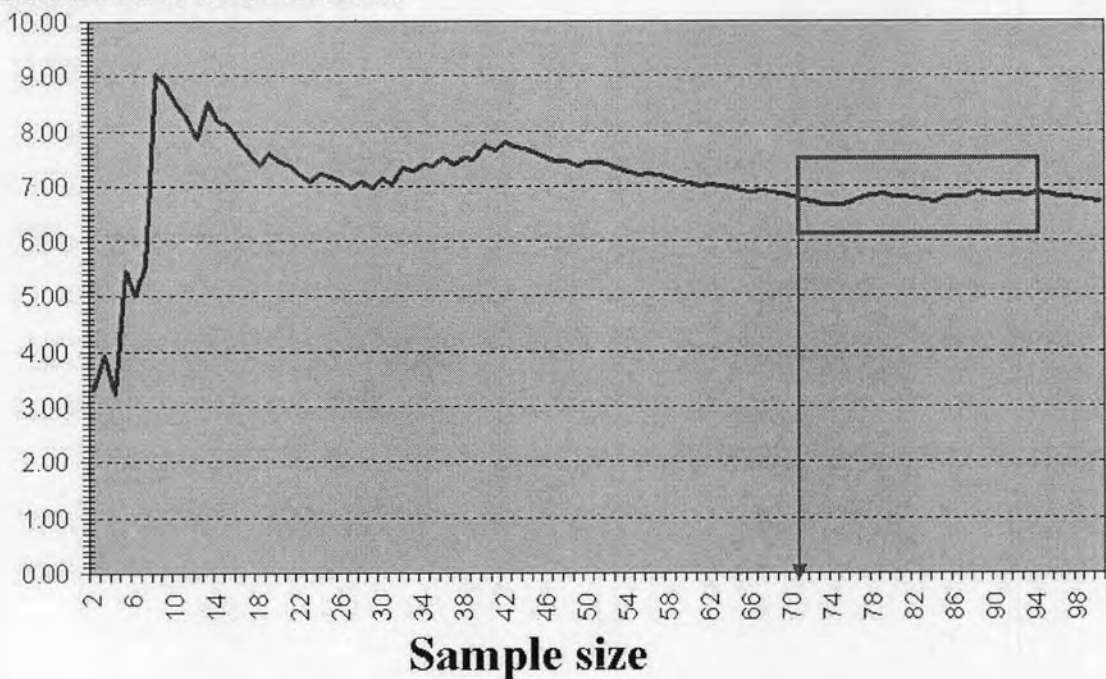
นำค่าสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็น ยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน จากผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคที่วัดได้ไปหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต และหาค่าจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมในการวัดครั้งต่อไปจากการ วัดการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งจากผลการวัดการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทดลองพบว่า จำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมที่น้อยที่สุดที่ทำให้การกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ จนเกือบคงที่ หรือไม่มีความผันผวนมากนักซึ่งในทางสถิติถือว่าเป็นปริมาณหรือจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่มากและเหมาะสมเพียงพอในการนำมาคำนวณค่าอื่นๆทางสถิติต่อไป ซึ่งในกรณีของการวัดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในการวิจัยนี้คือจำนวนการตรวจสอบกลุ่มตัวอย่างจำนวนตั้งแต่ 70 ข้อมูลขึ้นไป(ดังผลที่แสดงในภาพที่4.8) โดยที่สัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานของชิ้นงาน โลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า นั้นจะมีค่าเฉลี่ยสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่ โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน ของแต่ละตำแหน่งโดยเริ่มตรวจวัดจากผิวชิ้นงานเข้ามาถึงกึ่งกลางชิ้นงาน และแบ่งตรวจสอบเพิ่มตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่าง ผิวชิ้นงานกับใจกลางชิ้นงานหรือที่ระยะครึ่งหนึ่งของรัศมี โดยในการหาค่าเฉลี่ยขนาดของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน ที่แต่ละตำแหน่งนั้นจะใช้วิธีทางสถิติโดยใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 101 พื้นที่ตรวจสอบ และค่าเฉลี่ยขนาดของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานที่แต่ละตำแหน่งจะได้ค่าดังตารางที่4.2 ซึ่งจะพบว่าที่ผิวชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยขนาดของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่ โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานมากที่สุดคือประมาณ 11.90% และขนาดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานจะลดลง เมื่อตรวจสอบไล่เข้ามาถึงที่ระยะครึ่งหนึ่งของรัศมี และมีแนวโน้มที่ลดลงมากขึ้นจนถึงกึ่งกลางชิ้นงานที่มีค่าเฉลี่ยขนาดของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่ โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่ โครงสร้างพื้นฐานน้อยที่สุดคือประมาณ 9.59% ซึ่งโดยรวมแล้วถือว่าสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานของชิ้นงาน โลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มี การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

นั้นจะมีขนาดเล็กมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยขนาดของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่
 โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานของชิ้นงาน โลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียม
 ผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่ไม่มีการ
 ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) ที่สรุปโดย
 นักวิจัยชาวจีน^[8] ที่มีค่าประมาณมากกว่า 12%

ตารางที่ 4.2 ขนาดสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่
 โครงสร้างพื้นฐานของโครงสร้างจุลภาคของ LFEC บริเวณต่างๆ

EDGE (%)	Half Radius (%)	CENTER (%)
11.90	10.43	9.59

Standard Deviation



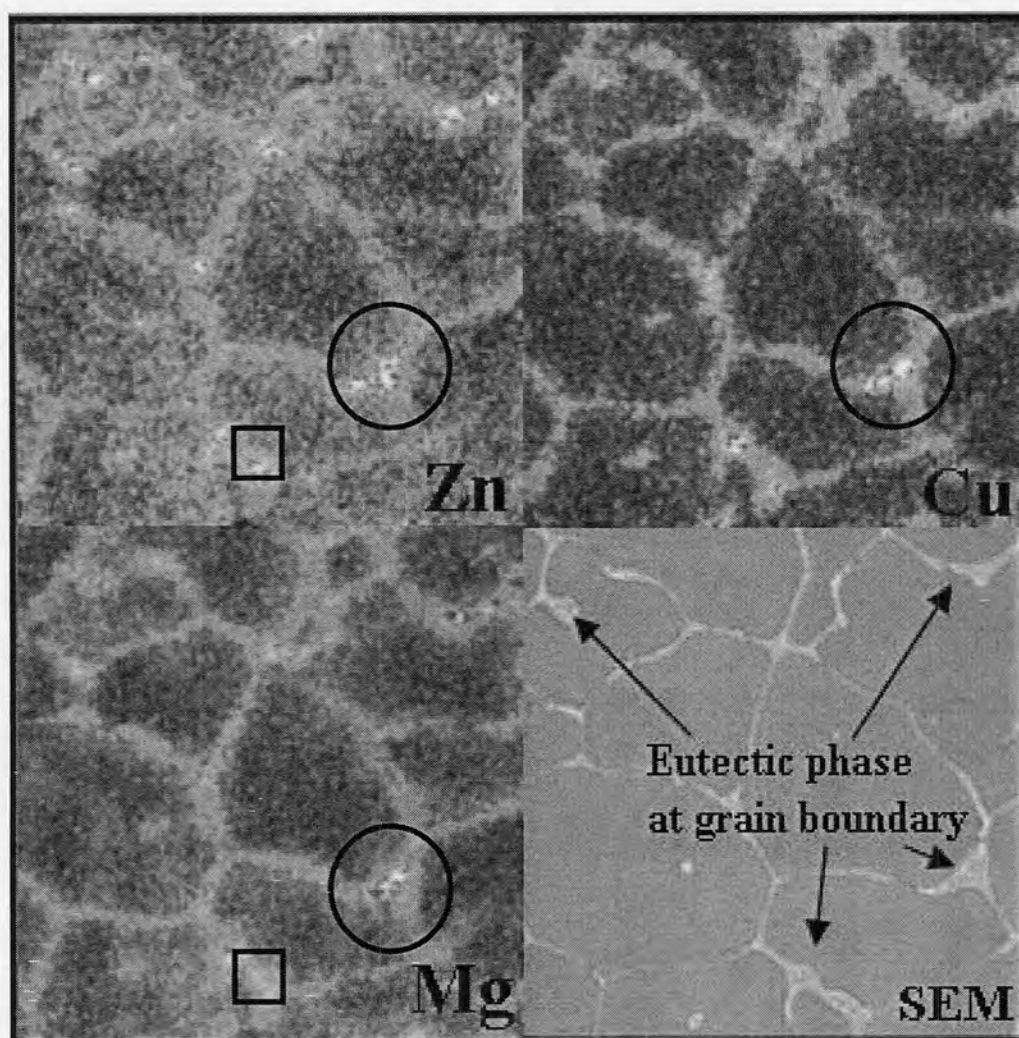
ภาพที่ 4.8 กราฟการกระจายตัวของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดสัดส่วนความหนาแน่น
 ของพื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่โครงสร้างพื้นฐานของโครงสร้างจุลภาคของ
 LFEC

โดยสาเหตุที่ทำให้ค่าสัดส่วนความหนาแน่นของ พื้นที่โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่ โครงสร้างพื้นฐานของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม- ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า นั้นจะมีขนาดเล็กมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยขนาดของสัดส่วนความหนาแน่นของพื้นที่ โครงสร้างที่เป็นยูเทคติกกับพื้นที่ โครงสร้างพื้นฐานของชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียม ผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่ไม่มีการ ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (LFEC, low frequency electromagnetic field) เนื่องจาก ผลของแรงที่เกิดขึ้นโดยการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก และแรงที่เกิดขึ้นมานี้จะ ทำหน้าที่กวนน้ำโลหะหลอมเหลวอยู่ตลอดเวลาในขณะที่ทำการหล่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งน้ำโลหะ บริเวณติดกับผิวขอบแบบหล่อจะเริ่มมีการแข็งตัว ดังนั้นการที่มีแรงมากวนน้ำโลหะนั้น จะส่งผล ทำให้บางส่วนของน้ำโลหะบริเวณขอบที่เริ่มมีการแข็งตัวแล้ว เกิดการแตกตัวออกเป็นอนุภาค ของแข็งเล็กๆ แล้วกระจายตัวไปอยู่ในทุกๆ บริเวณหรือทุกๆ ส่วนของน้ำโลหะหลอมเหลว หลังจากนั้นการแข็งตัวก็เกิดขึ้นต่อไปจากอนุภาคของแข็งเล็กๆที่กระจายอยู่ จนการแข็งตัวเกิดขึ้น อย่างสมบูรณ์โดยที่ทุกๆบริเวณของน้ำโลหะหลอมเหลว จะมีลักษณะการแข็งตัวและทิศทางการ แข็งตัวเกิดขึ้นภายในเวลา, พื้นที่และพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ได้ลักษณะของเกรนที่มี ขนาดเล็กและรูปร่างกลม กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ตลอดจนขนาดความหนาแน่นของพื้นที่บริเวณขอบ เกรนก็มีค่าน้อย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ชิ้นงานโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี- แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทที่มีการประยุกต์ใช้ สนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นได้ผลเป็นไปตามการตรวจสอบข้างต้น

4.2.4 ผลการใช้เครื่อง EPMA ตรวจสอบการกระจายตัว และวิเคราะห์ธาตุผสมในเนื้อ โครงสร้างและวิเคราะห์ธาตุผสมเพื่อระบุสารประกอบของเฟสต่างๆ ที่ปรากฏ

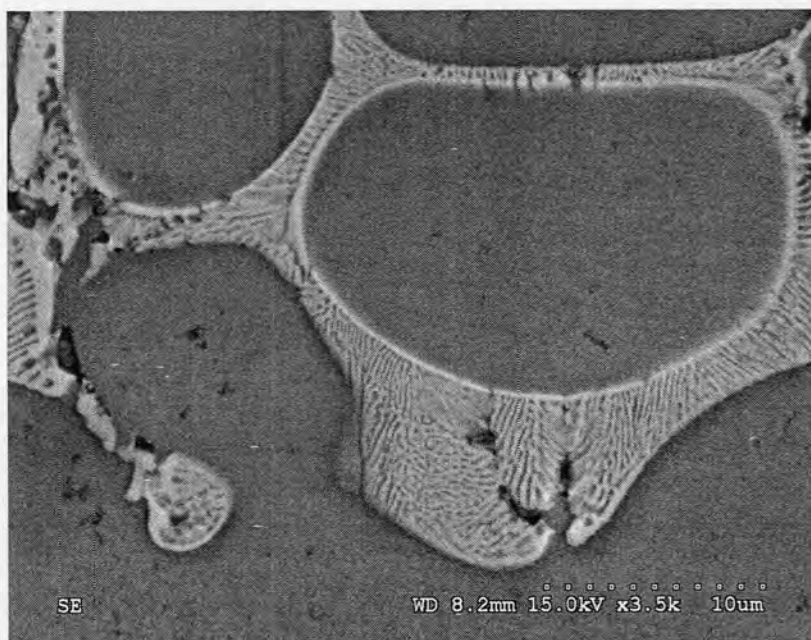
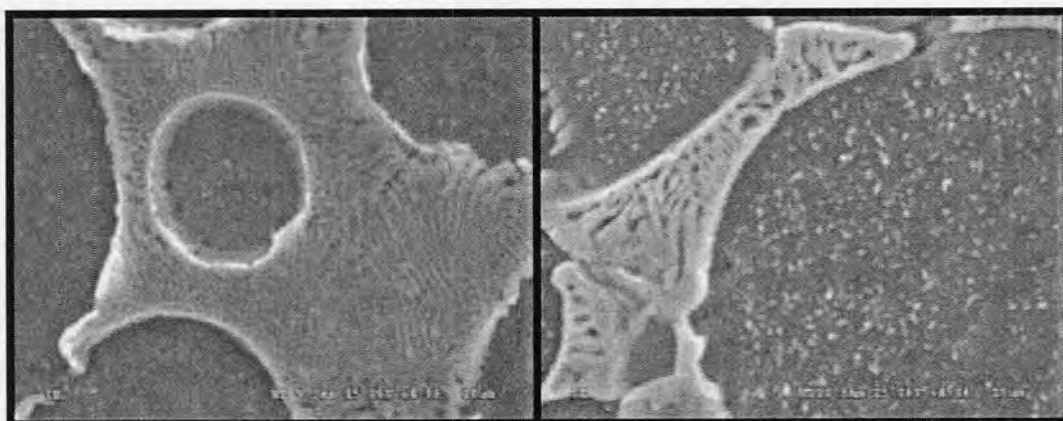
การวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุผสมหลัก ที่กระจายอยู่แต่ละตำแหน่งของการตรวจสอบเป็นพื้นที่กว้างที่เรียกว่าการทำ Mapping ซึ่งจะนำผลดังกล่าวไปวิเคราะห์หาชนิดของโครงสร้างยูเทคติก เปรียบเทียบกับผลการคำนวณจาก Thermo Calc ต่อไป

โดยผลของค่าที่อ่านได้จากภาพที่ 4.9 คือปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งจะทำให้ระบุได้ว่าโครงสร้างยูเทคติกเป็นสารประกอบของธาตุใดบ้างยกตัวอย่างเช่น บริเวณในพื้นที่วงกลม



ภาพที่ 4.9 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของ LFEC ด้วย EPMA

คือบริเวณที่พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่ผสมได้แก่ธาตุแมกนีเซียม, ธาตุสังกะสีและธาตุทองแดงสูงพร้อมๆกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณนี้จะเป็นโครงสร้างยูเทคติกเฟสที่มีสารประกอบเป็น อะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง หรือ T(Al-Zn-Mg-Cu) โดยมีลักษณะเป็นแถบสีขาวสลับอยู่บนพื้นโครงสร้างของ α Al และมีพื้นที่ขนาดใหญ่ กับส่วนบริเวณในพื้นที่สีเหลี่ยมคือบริเวณที่พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่ผสมได้แก่ธาตุแมกนีเซียม, ธาตุสังกะสีสูงพร้อมๆกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณนี้จะเป็นโครงสร้างยูเทคติกเฟสที่มีสารประกอบเป็น อะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม หรือ η (MgZn₂), โดยมีลักษณะเป็นแถบสีขาวสลับอยู่บนพื้นโครงสร้างของ α Al เช่นกันแต่มีพื้นที่ขนาดเล็กเรียวยาว ซึ่งโครงสร้างยูเทคติกทั้ง 2 แบบนี้เป็นโครงสร้างยูเทคติกที่พบมากที่สุดตามผลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของ ด้วย EPMA และภาพขยายโครงสร้างยูเทคติกทั้ง 2 แบบนี้ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ภาคโครงสร้างยูเทคติกในโครงสร้างจุลภาคของ LFEC ที่กำลังขยายสูง

4.2.5 ผลการอ่านแผนภูมิสมมูล ด้วยการคำนวณตามแบบสมการ Scheil's equation และผลการคำนวณลำดับการเย็นตัวด้วย Thermo Calc.

จากการคำนวณตามสมการที่กำหนดไว้ในบทที่ 3 ในหัวข้อที่ 3.3 การคำนวณทิศทางและลำดับการแข็งตัวของโครงสร้างจุลภาคด้วยการคำนวณตามแบบสมการ Scheil's equation ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการคำนวณได้ดังนี้

1) เลือกอุณหภูมิในการคำนวณที่ 600 °C ของ Al-Zn เพื่อหาค่า f_s จากสมการ 3.4

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

$$f_s = 1 - \left(\frac{660 - 600}{660 - 630} \right)^{\frac{1}{0.5-1}}$$

ได้ค่า f_s เป็น 0.75

2) นำค่า f_s ไปแทนในสมการที่ 3.5 เพื่อหาค่า C_L ของ Zn

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

$$\left(\frac{C_L}{9.8} \right) = (1 - 0.75)^{-(1-0.5)}$$

ได้ค่า C_L ของ Zn เป็น 20%

3) นำค่า C_L ของ Zn ไปแทนในสมการที่ 3.7 เพื่อหาค่า C_L ของ Mg

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

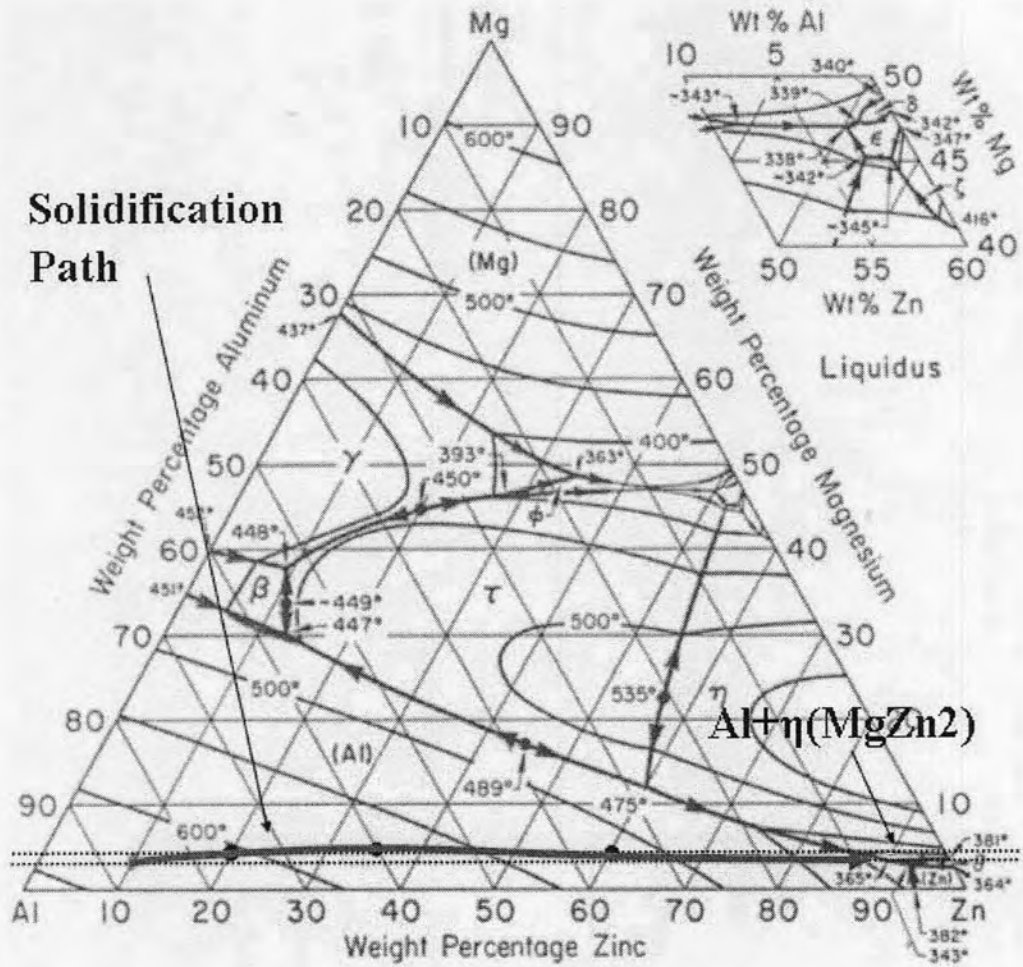
$$\left(\frac{20}{9.8}\right) = \left\{1 - \left[1 - \left(\frac{C_L}{2.5}\right)^{\frac{-1}{1-0.4}}\right]\right\}^{-(1-0.5)}$$

ได้ค่า C_L ของ Mg เป็น 2.75%

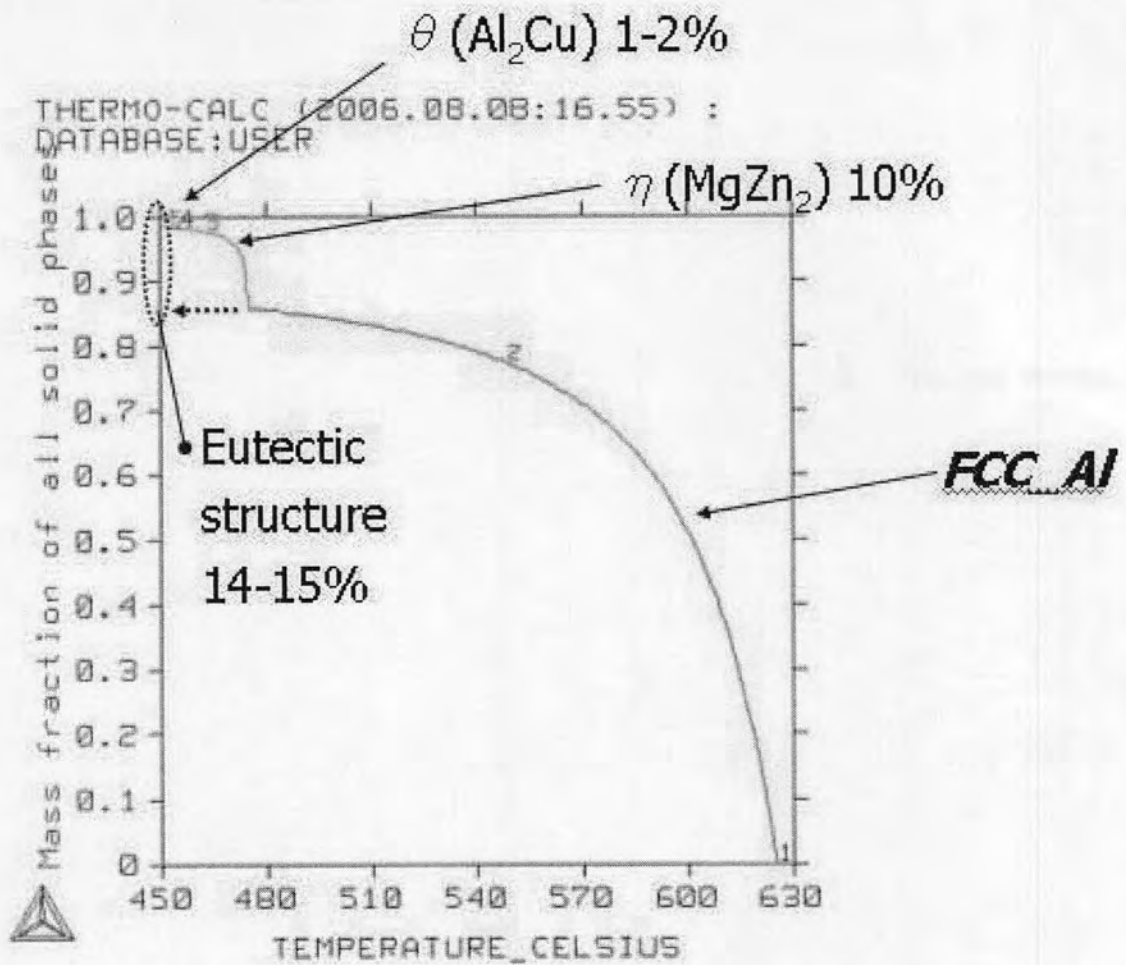
ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเข้มข้นคิดตามร้อยละของน้ำหนักของธาตุผสมตามตารางที่ 4.3 แล้วนำมาเขียนกราฟเส้นทางการเย็นตัวลงบนแผนภูมิสมดุลดังภาพที่ 4.11 ซึ่งทำให้ทราบลำดับการแข็งตัว และเฟสโครงสร้างยูเทคติกแรกคาดว่าเป็น $Al+\eta(MgZn_2)$ ซึ่งตรงกับผลการคำนวณด้วย Thermo Calc ดังภาพที่ 4.12

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุสังกะสี-แมกนีเซียม (% Composition) กับอุณหภูมิ (T)

Temp(C°)	%Zn	%Mg
600	20	2.75
580	26	2.61
560	33	2.56
540	40	2.54
520	46	2.52
500	53	2.51
480	60	2.51



ภาพที่ 4.11 ผลเส้นทางการเย็นตัวบนแผนภูมิสมดุล Al-Zn-Mg จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุสังกะสี-แมกนีเซียม (% Composition) กับ อุณหภูมิ (T) ตามแบบสมการ Gulliver-Scheil's equation



ภาพที่ 4.12 ผลการคำนวณด้วย Thermal-Calc. Al-Zn-Mg-Cu

จากผลเส้นทางการแข็งตัวของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงจากการคำนวณด้วย Thermal-Calc. Al-Zn-Mg-Cu ตามระบบสมการ Gulliver-Scheil's equation ดังภาพที่ 4.12 นั้นแสดงให้เห็นว่าการแข็งตัวเริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 620 °C และผลเส้นทางการแข็งตัวมีลำดับดังนี้

1. LIQUID
2. LIQUID FCC_Al
3. LIQUID FCC_Al MgZn₂
4. LIQUID FCC_Al MgZn₂ S(Al_2CuMg)
5. LIQUID Al_2Cu FCC_Al MgZn₂ S(Al_2CuMg)
6. LIQUID Al_2Cu FCC_Al MgZn₂

โครงสร้างที่แข็งตัวในลำดับแรกคือโครงสร้างพื้น α Al ส่วนโครงสร้างยูเทคติกจะเริ่มเกิดการแข็งตัวที่อุณหภูมิประมาณ $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยลำดับแรกคือโครงสร้างยูเทคติกที่มีสารประกอบเป็น อะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม หรือ $\eta(\text{MgZn}_2)$ ตามลำดับแสดงผลในลำดับที่ 3 และหลังจากนั้น โครงสร้างยูเทคติกอื่นๆจะเริ่มเกิดการแข็งตัวเป็นลำดับในลำดับที่ 4, 5, 6 และรวมกันจะมีการเกิด โครงสร้างยูเทคติก คิดเป็นประมาณร้อยละ 15 ของสัดส่วนของแข็งภายหลังการแข็งตัวเสร็จสิ้น ซึ่ง โครงสร้างยูเทคติกที่เกิดเป็นโครงสร้างแรกที่ได้จากการคำนวณด้วย Thermal-Calc. Al-Zn-Mg-Cu นี้จะต่างกับที่ได้จากการวิเคราะห์ชิ้นงานจริงที่ผลของการเกิดโครงสร้างยูเทคติกคิดเป็นแค่ ประมาณร้อยละ 9-11 ของสัดส่วนของแข็งภายหลังการแข็งตัวเสร็จสิ้น

4.2.6 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs)

นำข้อมูลปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่ตำแหน่งต่างๆที่กระจายอยู่แต่ละตำแหน่งของการตรวจสอบเป็นพื้นที่กว้างที่เรียกว่าการทำ Mapping จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs) ทำให้ทราบลักษณะและปริมาณการเกิดโครงสร้างยูเทคติกดังภาพที่ 4.13 โดยประมาณจากกราฟได้ว่าการเกิดโครงสร้างยูเทคติกคิดเป็นแค่ประมาณร้อยละ 10 ของสัดส่วนของแข็งภายหลังการแข็งตัวเสร็จสิ้น และรูปแบบการแข็งตัวไม่ตรงกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs) แบบ Gulliver-Scheil ซึ่งแสดงว่าค่า α ไม่เป็น 0 ซึ่งแสดงว่ามีการแพร่ความเข้มข้นของธาตุผสมระหว่างการแข็งตัวจากบริเวณที่แข็งตัวแล้ว

ดังนั้นการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับรูปแบบการแข็งตัวของชิ้นงานโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง (Al – 9.8Zn – 2.5Mg – 2.3Cu) ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ที่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (low frequency electromagnetic field) ในงานวิจัยนี้ คาดว่าจะมีรูปแบบการแข็งตัวในแบบของ Clyne & Kurz มีความสมดุลของความเข้มข้นในส่วนที่เป็นของเหลวแต่บางส่วนที่แข็งตัวแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและมีการแพร่เกิดขึ้นส่วนที่เป็นของแข็ง ซึ่งจะสามารถคำนวณค่า α ที่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวในครั้งนี้ได้จากวิธีการดังนี้

1) คำนวณค่า D_s

โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการ 2.7 และเลือกใช้ค่า D_0 คือ $1.77 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ และ Q คือ 117 kJ/mol จากตารางที่ 2.7 ซึ่งพิจารณาว่าธาตุสังกะสี (Zn) เป็นธาตุผสมหลักของโลหะผสมอะลูมิเนียมในงานวิจัยนี้ และใช้ค่าอุณหภูมิที่เริ่มการแข็งตัวคือ 630°C หรือ 903 K

$$D_s = 1.77 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{117 \times 10^3}{8.314 \times 630}\right)$$

ได้ค่า D_s เป็น $3.018 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

2) คำนวณค่า L

โดยใช้ค่าครึ่งหนึ่งของขนาดเกรนที่คำนวณได้ในหัวข้อที่ 4.2.2 ซึ่งจะได้ค่า L เป็น 20×10^{-6} m

3) คำนวณค่า t_f

โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการการหาอัตราเร็วในการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรงคือ

$$v = \frac{S}{t} \quad (4.1)$$

เมื่อสัญลักษณ์ในสมการเป็นการแทนค่าความหมายของปริมาณต่างๆดังนี้

v คือ อัตราเร็วซึ่งในที่นี้ใช้แทนด้วยอัตราเร็วของการหล่อคือ 80 mm/min

S คือ ระยะทางซึ่งในที่นี้ใช้แทนด้วยระยะความลึกที่แตกต่างกันของแอ่งกลางน้ำโลหะหลอมเหลว หรือ sump depth ของการผลิตแบบ DC. และแบบ LFEC. ขณะทำการหล่อจากภาพที่ 2.2 คือ 50 mm

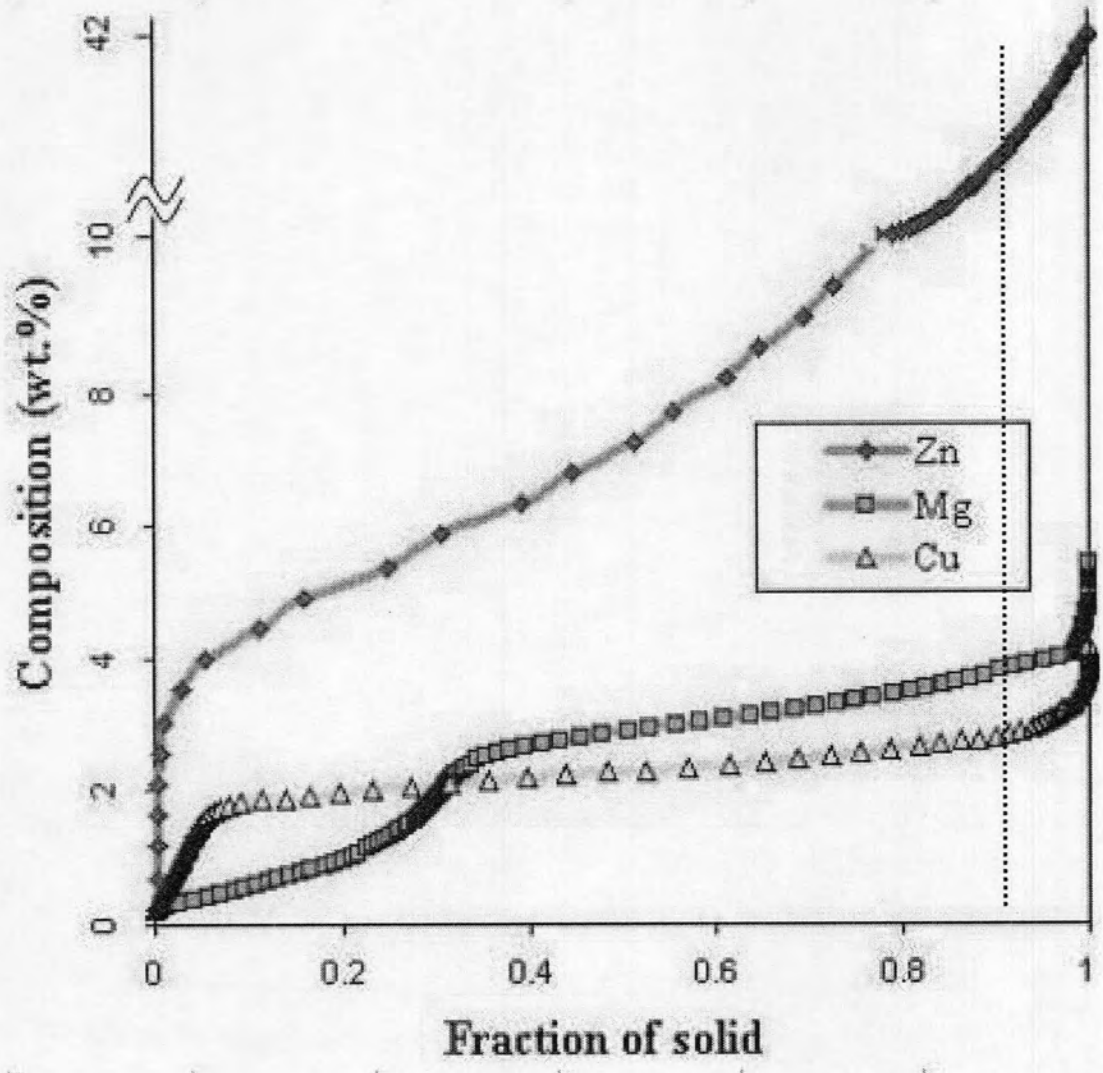
t คือ เวลาซึ่งในที่นี้ใช้แทนด้วย t_f หน่วยเป็น s

ได้ค่า t_f เป็น 37.5 s

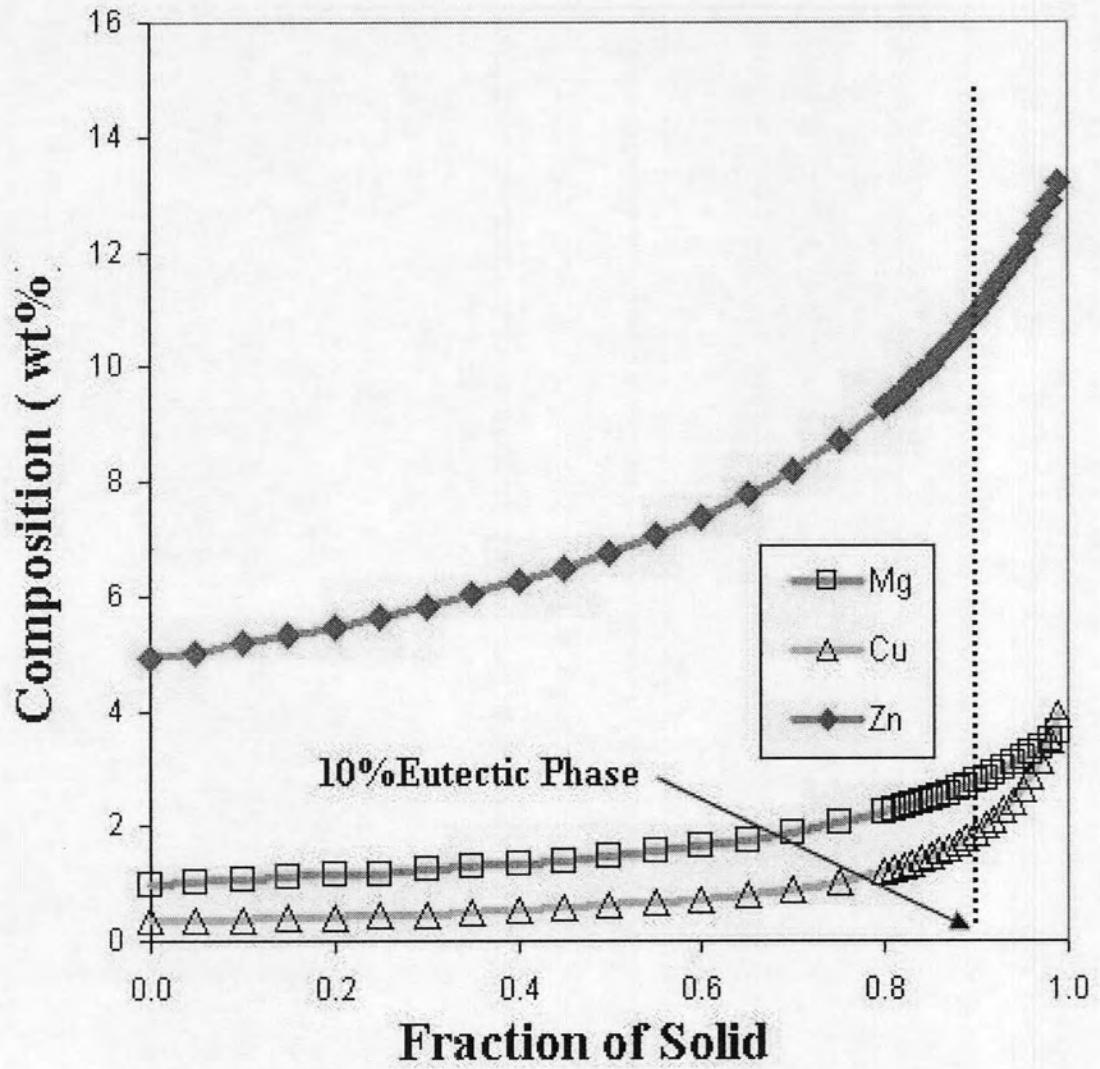
และสามารถคำนวณได้ค่า α โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการ 2.10 เมื่อใช้ข้อมูลของค่า D_s เป็น 3.018×10^{-12} m²/s, L เป็น 20×10^{-6} m, t_f ระหว่าง 37.5 s

$$\alpha = \frac{D_s \cdot t_f}{L^2} = \frac{3.018 \times 10^{-12} \times 37.5}{(20 \times 10^{-6})^2}$$

คำนวณได้ค่า α คือประมาณ 0.3 และนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs) ดังภาพที่ 4.14 ซึ่งให้ผลคล้ายภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (fs) จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA



ภาพที่ 4.14 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) ที่ α คิดเป็นค่าประมาณคือ 0.3