

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 อะลูมิเนียม [7]

2.1.1 คุณสมบัติทั่วไปของโลหะอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง แต่มีความเหนียวสูงสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางแทนเหล็ก และทองแดงได้ในหลายๆ ด้านของงานวิศวกรรมและอุตสาหกรรม อะลูมิเนียมมีคุณสมบัติทางด้านหล่อหลอมที่ดี โดยมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ สามารถรวมตัวกับโลหะอื่นๆ เป็นโลหะผสมได้ง่ายมีความสามารถในการไหลอยู่ในเกณฑ์สูง สามารถหล่อหลอมได้ง่าย ข้อเสียของอะลูมิเนียมคือมีขอบเขตการยืดหยุ่นต่ำ ทำให้การใช้งานถูกจำกัดขอบเขตไปมาก

คุณสมบัติทางฟิสิกส์

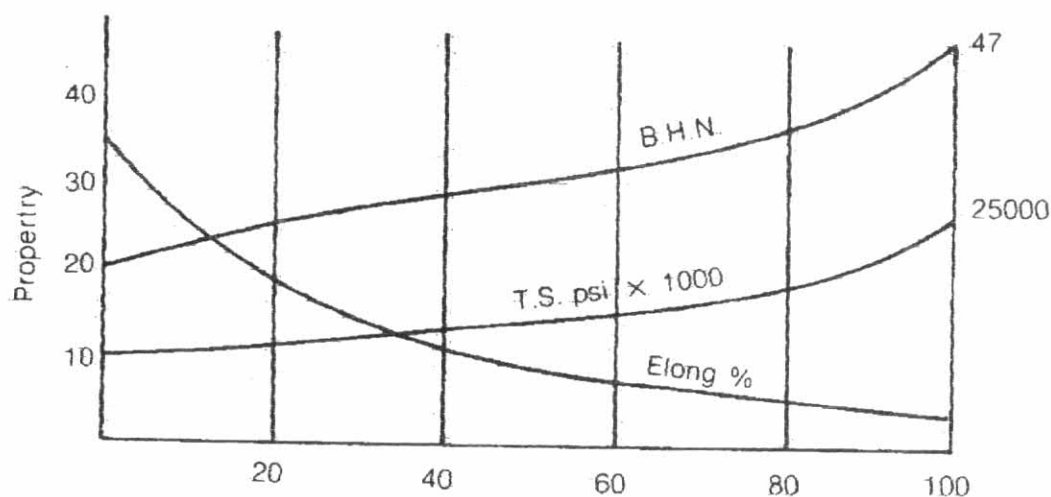
น้ำหนักอะตอม	26.97 g/mol
ระบบผลึก(Crystal Structure)	FCC ($a = b = c = 4.041 \text{ \AA}$)
ความหนาแน่น (20°C)	2.70 g/cm^3
อุณหภูมิหลอมเหลว	658°C
จุดเดือดกลายเป็นไอ (Boiling point)	1800°C
ความร้อนจำเพาะ ($0-100^{\circ}\text{C}$)	$0.2259 \text{ Cal/g}^{\circ}\text{C}$
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	93 Cal/g
อัตราการหดตัวจากสภาพหลอมเหลว (Solidification Shrinkage)	6.6%
สัมประสิทธิ์การขยายตัว(20°C)	$23.8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
ความต้านทานจำเพาะ (20°C)	2.699 microhm.cm
สภาพตัวนำความร้อน (20°C)	$0.52 \text{ Cal.cm/cm}^2.^{\circ}\text{C.sec}$

คุณสมบัติเชิงกล

ความแข็งแรง (Tensile Strength)	8 – 10 kg/mm ²
พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit)	3 kg/mm ²
อัตราการยืดตัว (Percent Elongation)	40 – 45%
ความแข็ง (Hardness)	16 – 20 H _B
โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	7800 kg/mm ²

2.1.2 การใช้งานโลหะอะลูมิเนียม

เนื่องจากโลหะอะลูมิเนียมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อน อันเนื่องมาจาก พิล์มของ Al_2O_3 ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมกับออกซิเจน มีความแน่นที่บ่งชี้ช่วยป้องกันมิให้ออกซิเจนสามารถแทรกซึมลงไปทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมใต้ฟิล์มของ Al_2O_3 ได้ ทำให้โลหะอะลูมิเนียมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ด้วยตัวเอง (Passive state) และคุณสมบัติที่ยืดตัวได้ง่ายของอะลูมิเนียม จึงทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ด้วยการรีดเป็นแผ่น หรืออัดขึ้นรูปให้มีรูปร่างได้สะดวก ทำให้การใช้งานอะลูมิเนียมมีขอบเขตกว้างขวางมาก เช่น ใช้ทำกรอบประตูหน้าต่าง ทำท่อ ทำเป็นเส้นลวดแทนลวดทองแดง เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ปกติอะลูมิเนียมที่ใช้กันถึงแม้จะอยู่ในประเภทบริสุทธิ์ก็ตาม แต่ในทางปฏิบัติจะยอมให้มีโลหะเจือปนได้บ้าง โดยเฉพาะธาตุเหล็ก ซิลิคอน และทองแดงยอมให้มีได้ไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งธาตุเจือปนเหล่านี้มีผลทำให้คุณสมบัติด้านความเหนียวและความต้านทานการกัดกร่อนลดลง การผ่านงานขึ้นรูปเย็นมีผลทำให้ความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นแต่จะทำให้ความเหนียวลดลงมาก ดังปรากฏในภาพที่ 2.1 ซึ่งแสดง ผลของปริมาณการรีดเย็น (% Reduction Cold Rolling) ที่มีต่อความแข็ง, ความแข็งแรง และอัตราการยืดตัว



ภาพที่ 2.1 %Reduction Cold Rolling [7]

2.1.3 การจำแนกประเภทของโลหะผสมอะลูมิเนียม สามารถจำแนกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆคือ

1. โลหะผสมประเภทขึ้นรูปเย็น (Wrought) เป็นโลหะผสมที่จะผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีด การอัดขึ้นรูปออกมาเป็นแผ่น หรือเป็นแท่ง ซึ่งจะมีทั้งที่สามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ (Heat Treatable) และที่อบชุบแข็งไม่ได้ ส่วนใหญ่จะมีทองแดง, ซิลิคอน และแมกนีเซียมเป็นธาตุผสม

2. โลหะผสมประเภทหล่อหลอม (Castable) เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติพิเศษมีความสามารถในการไหลดี ช่วยให้การหล่อเป็นรูปพรรณกระทำได้ง่าย ส่วนใหญ่ของโลหะผสมประเภทนี้สามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ โลหะผสมที่สำคัญได้แก่ ซิลิคอน

2.2 ตัวอย่างอิทธิพลของธาตุผสมต่อคุณสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมผสม [8] เช่น

ทองแดง (Cu) เป็นธาตุที่นิยมผสมในปริมาณ 4 – 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีผลทำให้เพิ่มความแข็งแรงและความแข็งในสภาพหล่อและสภาพการผ่านกระบวนการทางความร้อน แต่ทองแดงจะลดการต้านทานการกัดกร่อน ลดการต้านทาน hot tear และลดคุณสมบัติด้านการหล่อหลอม

แมกนีเซียม (Mg) ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง อีกทั้งยังช่วยให้มีความสามารถในการทำกระบวนการทางความร้อน

ซิลิคอน (Si) อิทธิพลที่เด่นชัดคือการเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อหลอม เพิ่มความสามารถการไหลตัว เพิ่มความต้านทานของการเกิด hot tear ลดอัตราการเย็นตัว และเพิ่มเปอร์เซ็นต์ การแข็งตัวในบริเวณยูเทคติก

สังกะสี (Zn) ไม่มีคุณสมบัติในทางดีอย่างเด่นชัดในด้านคุณสมบัติเชิงกล แต่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในกระบวนการทางความร้อนต่างๆ

ดีบุก (Tin) เพิ่มความแข็งแรงจากกระบวนการ Precipitation hardening และเพิ่มความสามารถในการกลึงไส เป็นต้น

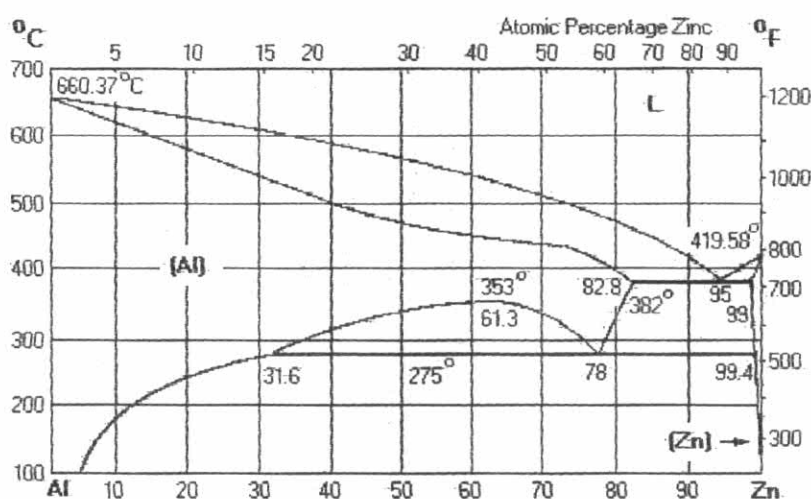
เหล็ก (Fe) ช่วยเพิ่มความต้านทาน hot tear และลดการเหนียวติดกับแบบหล่อในงาน Die Casting แต่การเพิ่มของธาตุเหล็กทำให้ความเหนียวลดลง

แมงกานีส (Mn) โดยปกติแมงกานีสจัดเป็นธาตุมลทินในงานหล่อ แต่ในงานขึ้นรูปเย็นแมงกานีสมีความสำคัญมาก ในเรื่อง Work Hardening

ในปัจจุบันนี้มีความสนใจที่จะพัฒนาโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7xxx ซึ่งเป็นกลุ่มโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง โลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7xxx นี้เป็นกลุ่มที่มีส่วนผสมของหลายธาตุ โดยมีสังกะสีเป็นธาตุหลัก และมีการเติมธาตุแมกนีเซียม และธาตุทองแดงลงไปเล็กน้อยเพื่อผลในการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่มนี้ ซึ่งโลหะผสมอะลูมิเนียมกลุ่ม 7xxx นี้ไม่มีแผนภูมิสมดุลเนื่องจากมีธาตุผสมที่หลากหลาย ดังนั้นจะนำแผนภูมิของธาตุผสมหลักมาแยกพิจารณาโดยจะดูทั้งแผนภูมิสองเฟส (Binary diagram) และแผนภูมิสามเฟส (Ternary diagram) ดังนี้

2.3 แผนภูมิสมดุลสองเฟส และสามเฟสของโลหะผสมอะลูมิเนียม

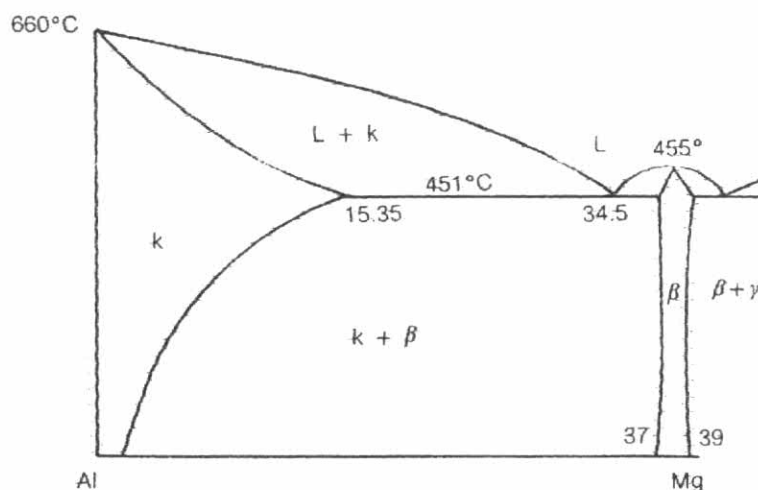
2.3.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม – สังกะสี [5]



ภาพที่ 2.2 แผนภาพสมดุลอะลูมิเนียม – สังกะสี [5]

จากแผนภาพสมดุลโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี (ภาพที่ 2.2) จะพบว่า สังกะสี (Zn) สามารถละลายในอะลูมิเนียม (Al) ได้สูงสุด 82.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 382°C (อุณหภูมิยูเทคติก) แต่เนื่องจากสังกะสีมีระบบผลึก แบบ Hexagonal ซึ่งแตกต่างจากอะลูมิเนียม จึงทำให้ลดสมบัติการละลายในอะลูมิเนียมลงไปเช่นเดียวกับแมกนีเซียม

2.3.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม - แมกนีเซียม [7]



ภาพที่ 2.3 แผนภูมิสมดุลอะลูมิเนียม - แมกนีเซียม [7]

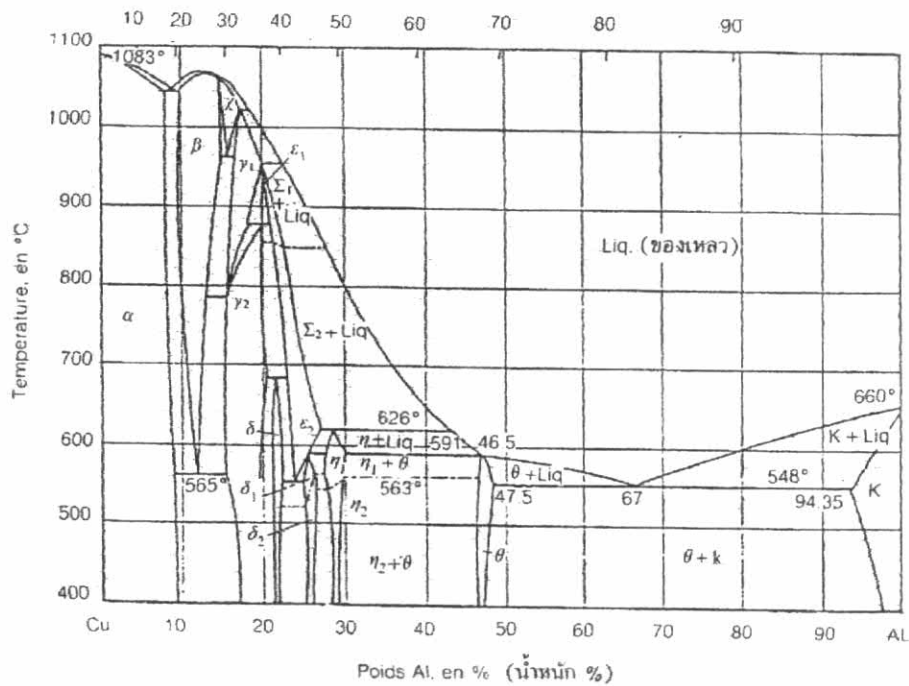
แมกนีเซียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา และมีจุดหลอมเหลวต่ำอยู่ในช่วงเดียวกับอะลูมิเนียม คือมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 651°C แต่เนื่องจากมีระบบผลึกแบบ Hexagonal จึงมีผลทำให้การละลายของแมกนีเซียมในอะลูมิเนียมได้ไม่มากนักโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ คือประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง และได้สูงสุด 15.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 451°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยายูเทคติก โดยมีส่วนผสมยูเทคติกที่ 34.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแมกนีเซียม ปฏิกิริยายูเทคติกจะให้เฟส K (FCC) กับเฟส β ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงโลหะมีสูตร Al_3Mg_2 มีแมกนีเซียม 37 - 39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความแข็งและเปราะ จากแผนภูมิสมดุลอะลูมิเนียม - แมกนีเซียม จะเห็นว่าอัตราการละลายของแมกนีเซียมจะลดลงมากเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ดังนั้นโลหะผสมอะลูมิเนียม - แมกนีเซียม จึงมีแนวโน้มเพิ่มสมบัติความแข็งแรงได้ด้วยการอบชุบความร้อน โดยปรากฏการณ์แบบชุบแข็งตกตะกอน (Precipitation Hardening)

2.3.3 โลหะผสมอะลูมิเนียม - ทองแดง [7]

ทองแดงเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็น FCC เหมือนกับอะลูมิเนียม จึงมีผลให้สามารถละลายได้ดีในอะลูมิเนียม และมีผลให้คุณสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไป ทองแดงเมื่อละลายในอะลูมิเนียมจะให้สารละลายของแข็ง (เฟส K) โดยมีปริมาณทองแดงละลายได้สูงสุด 5.65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 548°C และปริมาณทองแดงจะละลายในเฟส K ได้น้อยลง เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 548°C จะเหลือเพียง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 200°C ที่ปริมาณ 54 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทองแดง ปรากฏว่าอะลูมิเนียมจะรวมกับทองแดงให้

สารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) ซึ่งจะมีสูตร CuAl_2 หรือเรียกว่า เฟส θ มีระบบผลึกเป็นเตตระโกนอลเชิงซ้อน มีความแข็งปานกลางแต่เปราะง่าย

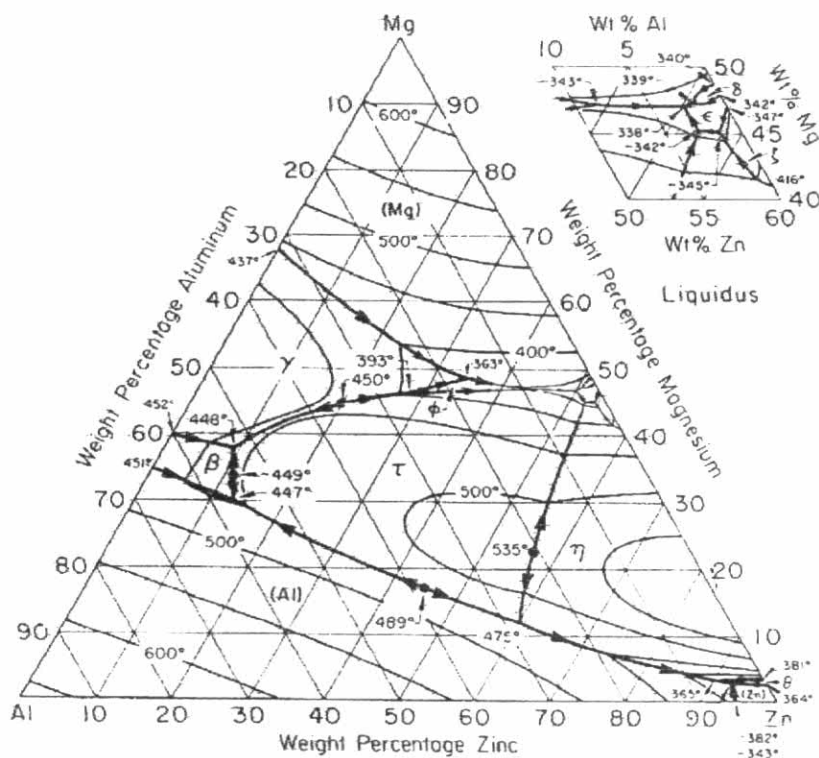
จากแผนภูมิสมมูลจะปรากฏจุดยูเทคติกที่อุณหภูมิ 548°C ส่วนผสม 33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทองแดงโดยโลหะหลอมเหลวอะลูมิเนียมจะแตกตัวให้เฟส K กับเฟส θ



ภาพที่ 2.4 แผนภูมิสมมูลอะลูมิเนียม - ทองแดง [7]

สำหรับโครงสร้างไฮโปยูเทคติก ที่ส่วนผสมน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทองแดง ลักษณะโครงสร้างจะประกอบด้วย เฟส K เป็นโครงสร้างพื้นฐาน อาจจะมีการตกผลึกของเฟส θ อยู่บ้างตามบริเวณขอบเกรน ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกตัวของอะตอมทองแดงมาจับตัวเป็น θ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 548°C ลักษณะที่สำคัญของเฟส K กับเฟส θ มีผลต่อสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมทองแดงเป็นอย่างมาก ตามที่ทราบเฟส K เป็นเฟสที่มีความเหนียวสูง โดยที่เฟส θ มีความแข็งสูงแต่เปราะ ในกรณีเช่นนี้ถ้าเฟส θ แม้จะมีอยู่เพียงเล็กน้อย แต่ถ้าอยู่ในสภาพที่ต่อเนื่อง จะมีผลให้โลหะมีความเหนียวลดลง

2.3.4 โลหะผสมอะลูมิเนียม – แมกนีเซียม – สังกะสี [9]



ภาพที่ 2.5 แผนภูมิสมมูลอะลูมิเนียม – แมกนีเซียม – สังกะสี [9]

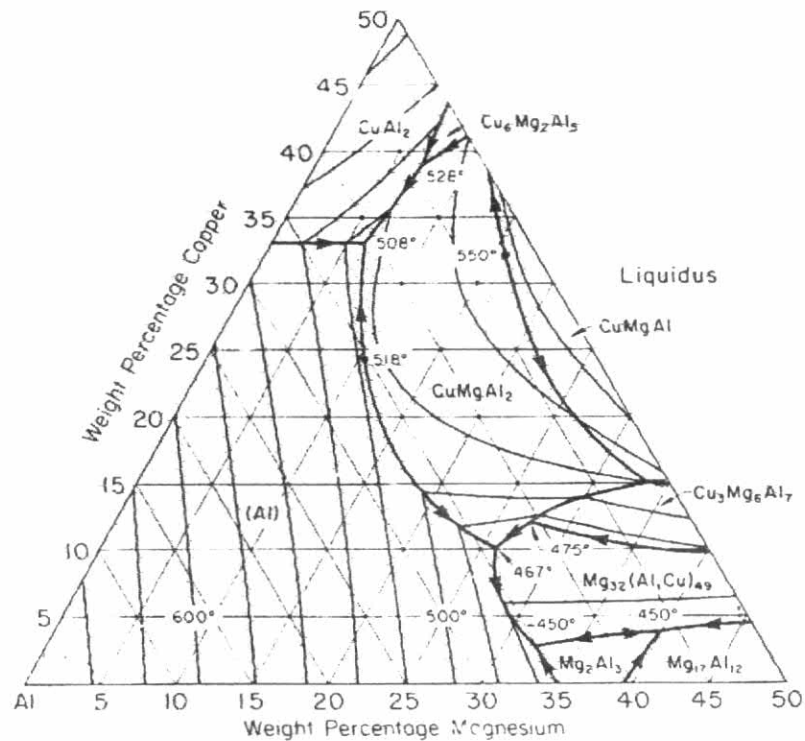
ระบบของโลหะผสมอะลูมิเนียม – แมกนีเซียม – สังกะสีเป็นพื้นฐานของโลหะผสมทางการค้ามากมาย ซึ่งสัญลักษณ์ที่ปรากฏในเฟสไดอะแกรมจะหมายถึงสารประกอบต่างๆ ที่เกิดในระบบนี้และสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงเฟสที่ปรากฏในเฟสไดอะแกรมของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-สังกะสี [9]

Symbol	Formula
β	Mg_2Al_3
β'	$Mg_3Al_4(Mg_{23}Al_{30})$
γ	$Mg_{17}Al_{12}$
δ	Mg_7Zn_3
ϵ	$MgZn$
ζ	Mg_2Zn_3
η	$MgZn_2$
θ	Mg_2Zn_{11}
τ	$Mg_{32}(Zn,Al)_{49}$
ϕ	$Mg_5Zn_2Al_2$

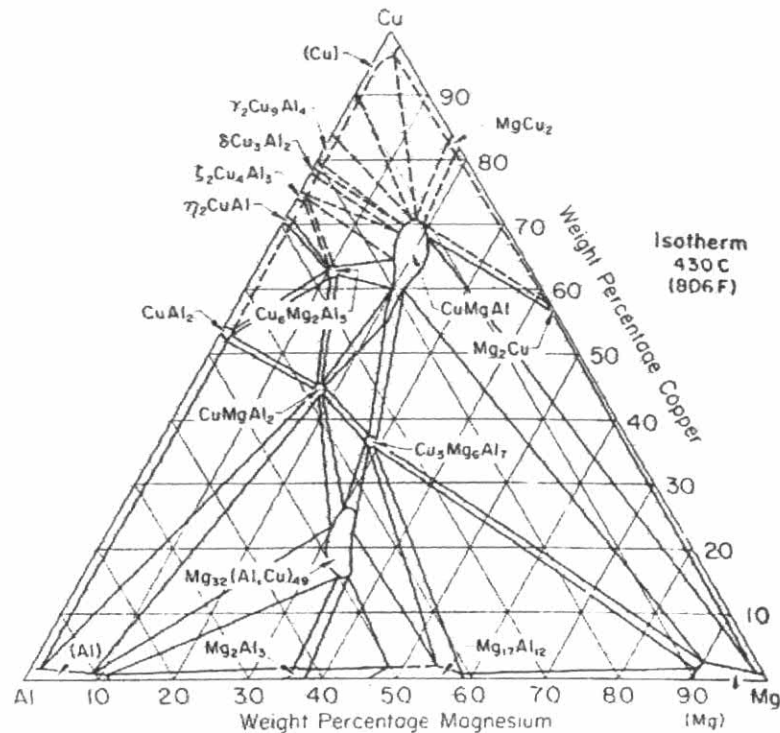
จากเฟสไดอะแกรม จะพบว่า ที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสังกะสี, 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแมกนีเซียม และ 87.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักอะลูมิเนียม พบว่าโครงสร้างอะลูมิเนียมขึ้นมาก่อน เมื่อน้ำโลหะเกิดการเย็นตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 489°C จะเกิด τ เฟส ฟอรัมตัวขึ้นมาจากนั้นเกิดปฏิกิริยาเพอริเทคติกระหว่างโลหะหลอมเหลวกับ τ เฟส ได้ η เฟส ที่อุณหภูมิ 475°C หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 343°C

2.3.5 โลหะผสมอะลูมิเนียม – ทองแดง – แมกนีเซียม [9]



ภาพที่ 2.6 แผนภาพสมดุลอะลูมิเนียม – ทองแดง – แมกนีเซียม [9]

จากเฟสไดอะแกรม จะพบว่า มีจุดยูเทคติกอยู่ 2 จุด คือ ที่ปริมาณ 33.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทองแดง และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแมกนีเซียม ที่อุณหภูมิ 508°C ซึ่งที่จุดนี้จะได้เฟสของ Al, CuMgAl_2 และ CuAl_2 และจุดที่ 2 คือ ที่ปริมาณ 2.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทองแดง และ 32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแมกนีเซียม ที่อุณหภูมิประมาณ 450°C ซึ่งจุดนี้จะได้เฟสของ Al, $\text{Mg}_{32}(\text{Al,Cu})_{49}$ และ Mg_2Al_3



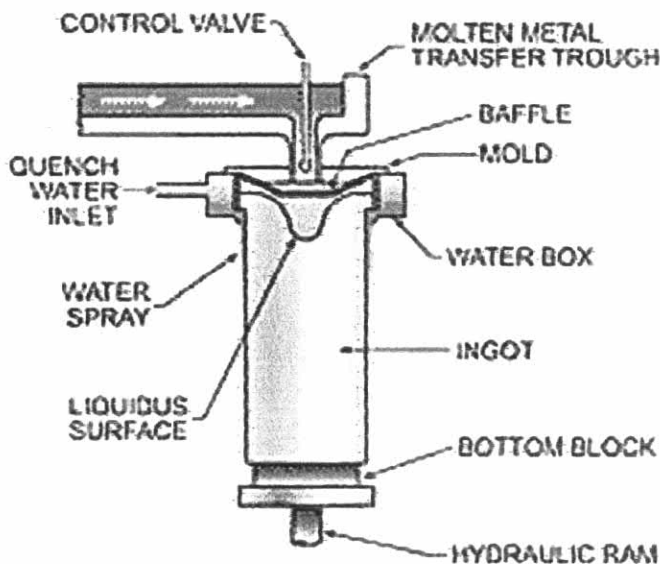
ภาพที่ 2.7 แผนภาพสมดุลอะลูมิเนียม - ทองแดง - แมกนีเซียม [9]

จากภาพที่ 2.7 เป็นการตัดที่อุณหภูมิ 430°C ซึ่งแสดงสารประกอบเชิงโลหะ เป็นข้อมูลจาก Little et al และ Urazov และ Mirgalovskaya จากเฟสไดอะแกรมจะพบว่า CuMgAl และ $Mg_{32}(Al,Cu)_{49}$ จะมีช่วงส่วนผสมที่กว้าง ขณะที่เฟสอื่นๆ มีลักษณะช่วงส่วนผสมที่แคบ เฟสของ CuMgAl จะหลอมแบบ Congruent ที่อุณหภูมิใกล้ 940°C และปรากฏเป็นเฟสแรกของระบบผลึก ซึ่งอยู่ในช่วงส่วนผสมที่กว้าง ในช่วงส่วนผสมของทองแดงและแมกนีเซียม

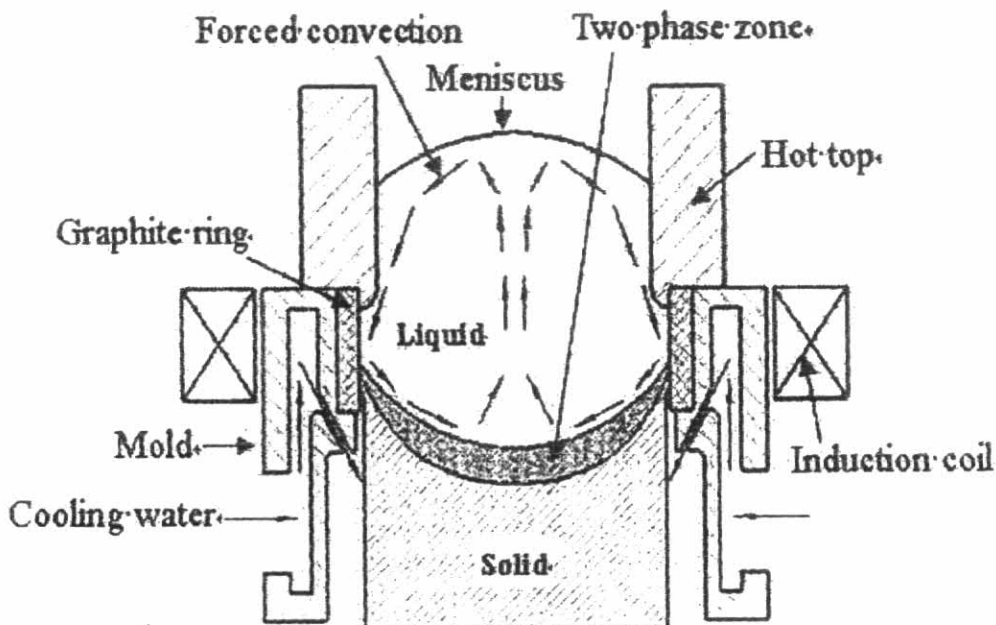
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเกี่ยวกับอุตสาหกรรมด้านอากาศยาน และมีความต้องการวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลดีเยี่ยม เช่น ความแข็งแรงของวัสดุต้องสูงมากเป็นพิเศษ ดังนั้นจึงต้องทำการผสมธาตุต่างๆ ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านความแข็งแรง ซึ่งการผสมธาตุอื่นๆ ลงไปหลายชนิดและปริมาณมากเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวได้ง่ายเมื่อผ่านกรรมวิธีการหล่อแบบ Direct Chill (DC Casting) (ภาพที่ 2.8) [19] ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาปรับปรุงเทคโนโลยีในการหล่อแบบ Direct Chill (DC Casting) โดยการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระหว่างกระบวนการหล่อ (LFEC, Low Frequency Electromagnetic Field) ซึ่งเป็นการติดตั้งขดลวดเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งข้างแบบหล่อแล้วทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดแรงแม่เหล็กกวนน้ำโลหะหลอมเหลวขึ้น ดังภาพที่ 2.9 [14] เพื่อวัตถุประสงค์ในการป้องกันการเกิดรอยร้าวในชิ้นงานหล่อ โดยวิธีการนี้พบว่าส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชิ้นงานลดลง เพิ่มความสม่ำเสมอ

ของการกระจายตัวของธาตุผสมต่างๆ และลดความลึกของ Sump depth (ตำแหน่งการแข็งตัวท้ายสุดที่ใจกลางชิ้นงาน) จนท้ายที่สุดพบว่า ลดค่าความเค้นตกค้างภายใน และป้องกันการเกิดรอยร้าว นอกจากนี้ พบว่าความแข็งแรงของเนื้อวัสดุเพิ่มขึ้น และความต้านทานการแตกร้าวก็เพิ่มขึ้นด้วย ดังจะเห็นได้จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ดังนี้

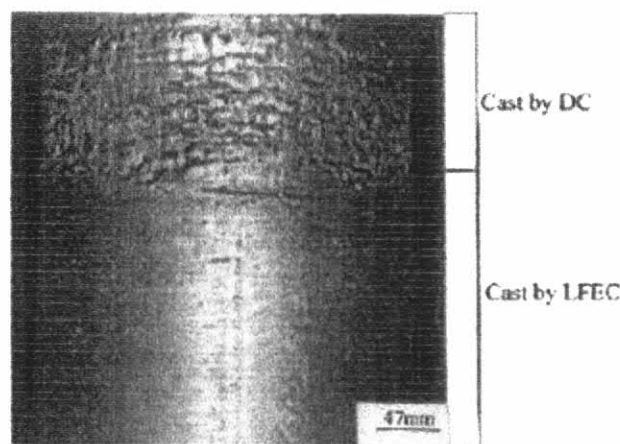


ภาพที่ 2.8 แผนภาพแสดงการหล่อแบบ DC Casting [19]



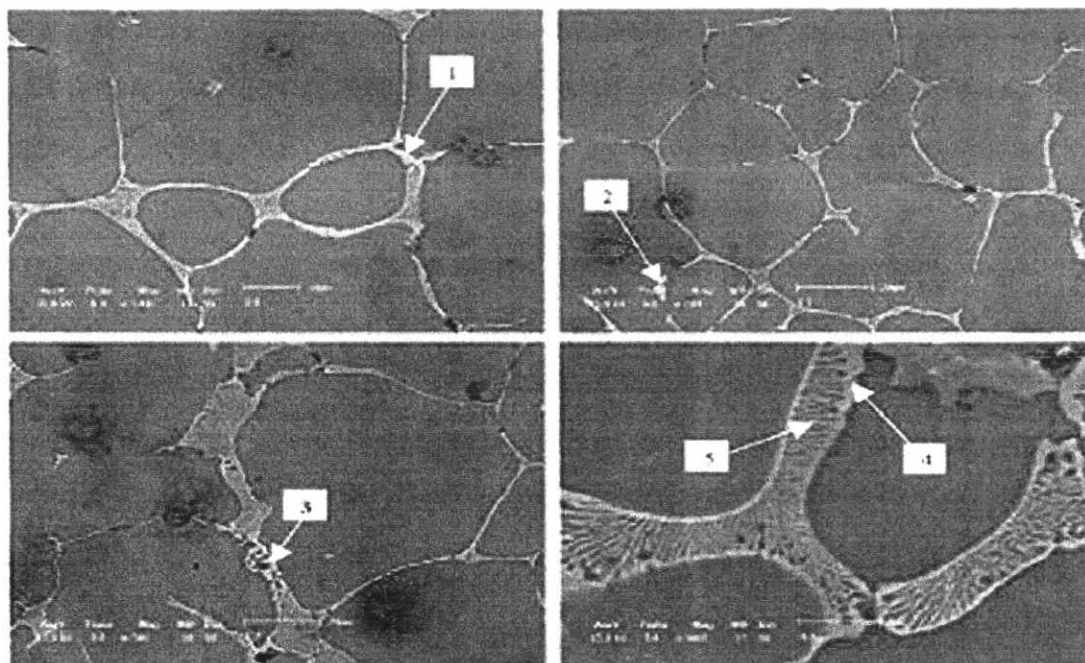
ภาพที่ 2.9 แผนภาพแสดงการหล่อแบบ LFEC [14]

ในปี ค.ศ. 2004 Jie Dong, Jianzhong Cui, Fuxiao Yu, Chunyan Ban และ Zhihao Zhao [10] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของกระบวนการหล่อแบบ Direct Chill (DC casting) และ กระบวนการหล่อที่มีการประยุกต์ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ (LFEC) ต่อสมบัติการหล่อ, โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางแรงดึงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ซึ่งพบว่ากระบวนการ LFEC สามารถลดการเกิด Hot tear และปรับปรุงคุณภาพของผิวชิ้นงานให้ดีขึ้นได้ ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นว่าช่วงที่หล่อแบบ DC ผิวชิ้นงานจะไม่เรียบแต่ช่วงที่มีการประยุกต์ใช้ LFEC ผิวชิ้นงานจะเรียบขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า LFEC สามารถทำให้โครงสร้างจุลภาคมีความละเอียด สม่ำเสมอ และมีลักษณะเป็น Equiaxed มากขึ้น และผลจากการประยุกต์ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ ทำให้ช่วยลดการเกิดการแยกตัวตามบริเวณขอบเกรน และเพิ่ม Fracture Strength และ ความสามารถในการยืดตัวให้สูงขึ้น และจากการศึกษาพบว่า ค่าความถี่ที่เหมาะสมที่สุดคือ 15-25 Hz และ ค่ากระแสที่เหมาะสมคือ 18,000-20,000 A_r



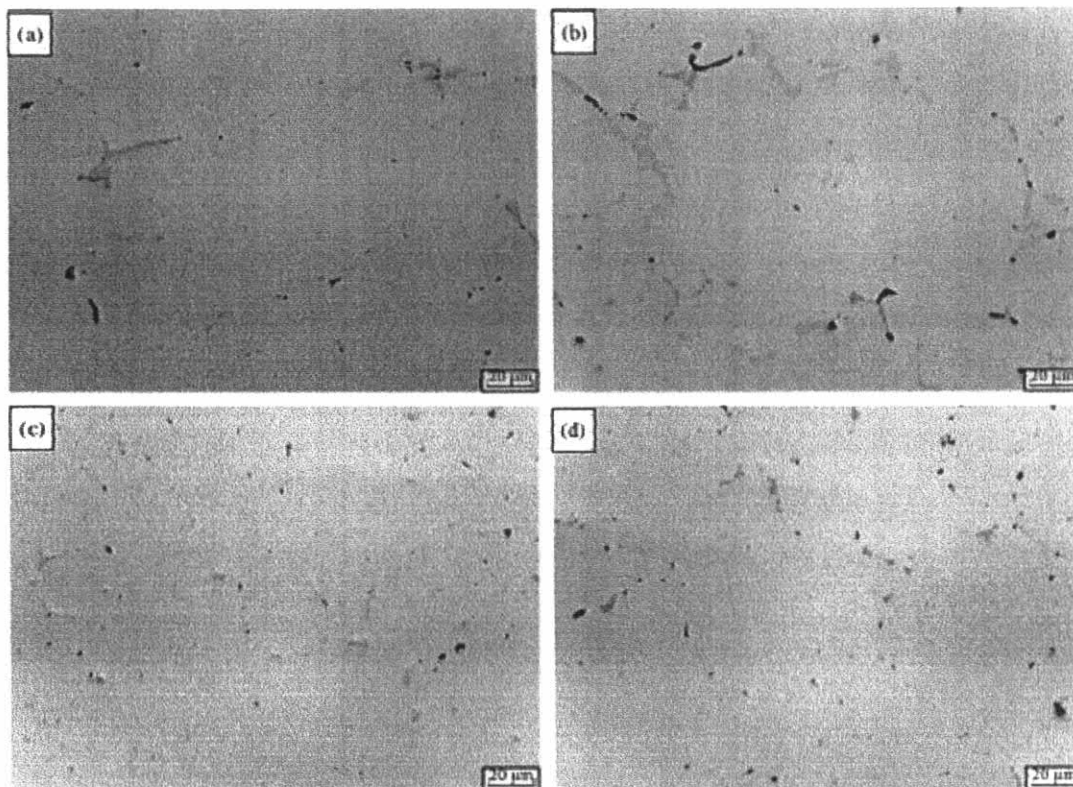
ภาพที่ 2.10 ผิวของชิ้นงานหล่อที่มีการประยุกต์ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ (LFEC) และไม่มี การประยุกต์ใช้แม่เหล็กไฟฟ้า (DC) [10]

ในปี ค.ศ. 2005 (April) Yubo Zuo, Jianzhong Cui, Jie Dong, Fuxiao Yu [11] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของการหล่อแบบ Conventional Direct Chill (DC) และ การหล่อโดยประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ (LFEC) ที่มีต่อสารประกอบในโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ (Al-9.82Zn-2.35Mg-2.29Cu-0.142Zr) ซึ่งศึกษาในสภาพภายหลังจากหล่อ และสภาพภายหลังจากกระบวนการทำ Homogenization ซึ่งผลปรากฏว่า การหล่อแบบ Conventional Direct Chill (DC) และ การหล่อโดยประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำในสภาพภายหลังจากหล่อมีสารประกอบหลักที่เหมือนกันคือจะพบเฟส T(Al-Zn-Mg-Cu), เฟส θ (CuAl_2) และโครงสร้างยูเทคติกที่บริเวณขอบเกรน ดังภาพที่ 2.11 แต่จะพบว่า การหล่อโดยประยุกต์



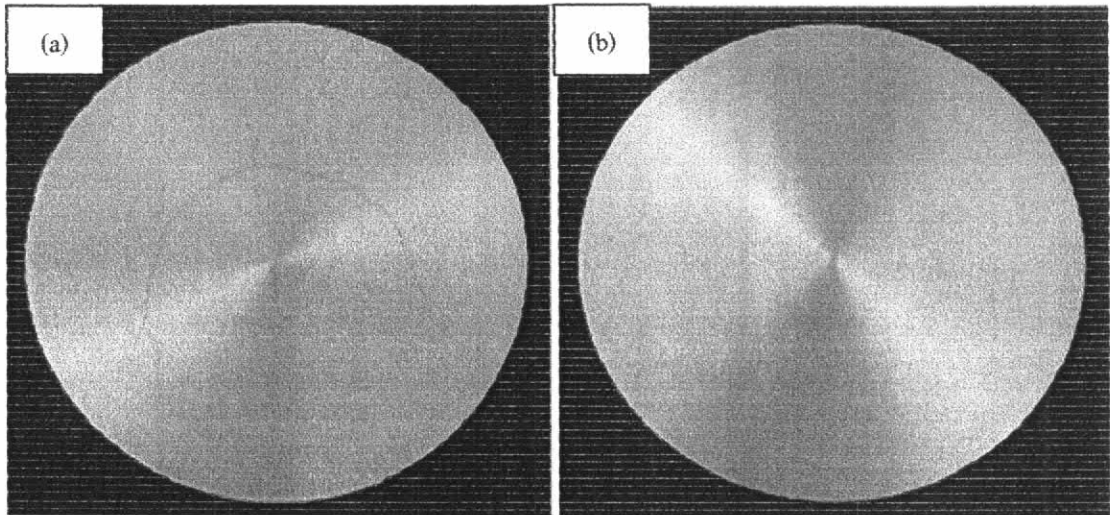
ภาพที่ 2.11 สารประกอบหลักของโลหะผสมอะลูมิเนียม (Al-9.82Zn-2.35Mg-2.29Cu-0.142Zr) เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จุด 1, 2 แสดง T เฟส จุด 3 แสดง θ (CuAl_2) เฟส จุด 4, 5 แสดงโครงสร้างยูเทคติก [11]

ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำจะทำให้สัดส่วนพื้นที่ของสารประกอบต่างๆ และโครงสร้างยูเทคติกที่ขอบเกรนลดลง และทำให้การกระจายตัวของสารประกอบต่างๆ ดีขึ้น และเมื่อนำไปผ่านกระบวนการ Homogenization พบว่าการหล่อโดยประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำทำให้สารประกอบต่างๆ ที่เหลือค้างมีขนาดและปริมาณลดลงกว่าการหล่อแบบ Conventional Direct Chill (DC) ดังภาพที่ 2.12 และยังพบว่าสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อโดยประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ มีความสม่ำเสมอและสูงกว่าการหล่อแบบ Conventional Direct Chill (DC)

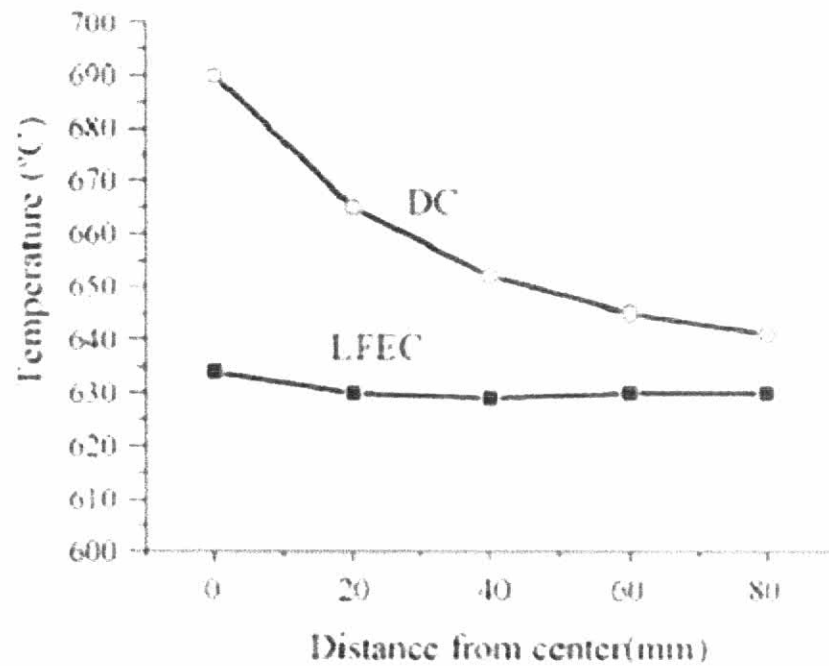


ภาพที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกระบวนการ Homogenization (a) DC ingot border, (b) DC ingot center, (c) LFEC ingot border and (d) LFEC ingot center.[11]

ในปี ค.ศ. 2005 (June) Zuo Yubo , Cui Jianzhong, Zhao Zhihao, Zhang Haitao, Qin Ke [12] ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการหล่อโดยประยุกต์ใช้ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ (LFEC) ที่จะกำจัดการแตกร้าวระหว่างกระบวนการหล่อของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ ($\text{Al-9.82Zn-2.35Mg-2.29Cu-0.142Zr-0.12Fe-0.08Si}$ เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก) ซึ่งพบว่าเกิดรอยแตกร้าวขึ้นบน DC Ingot แต่ LFEC ไม่เกิด ดังภาพที่ 2.13 และเมื่อนำรอยแตกร้าวของ DC Ingot ไปตรวจดูด้วย SEM พบว่ารอยแตกมีต้นกำเนิดมาจากขอบเกรน ซึ่งเป็นบริเวณโครงสร้างยูเทคติกและเป็นการแตกเปราะแบบ Intergranular ทั้งนี้เนื่องจากความเค้นภายในที่เกิดจากกระบวนการหล่อแบบ DC แต่ LFEC นั้นช่วยลดความเค้นภายในได้โดย LFEC นั้นทำให้ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในชิ้นงานหล่อลดลง (ภาพที่ 2.14), การกระจายตัวของธาตุผสมสม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า, ความลึกของ Sump dept ลดลง และช่วยให้เกรนสม่ำเสมอและกลมมากขึ้น (ภาพที่ 2.15) และนอกจากนี้ LFEC ยังช่วยในเรื่องการต้านทานการแตกร้าวด้วย ทั้งนี้เนื่องจากขนาดเกรนและสารประกอบต่างๆ ลดลง รวมทั้ง

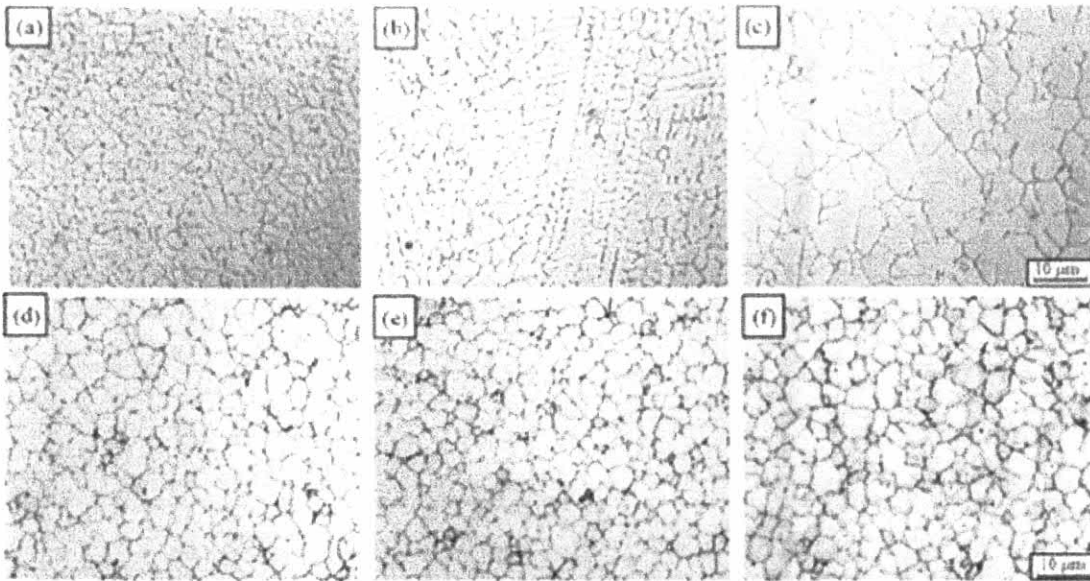


ภาพที่ 2.13 (a) DC cast ingot (b) LFEC ingot [12]



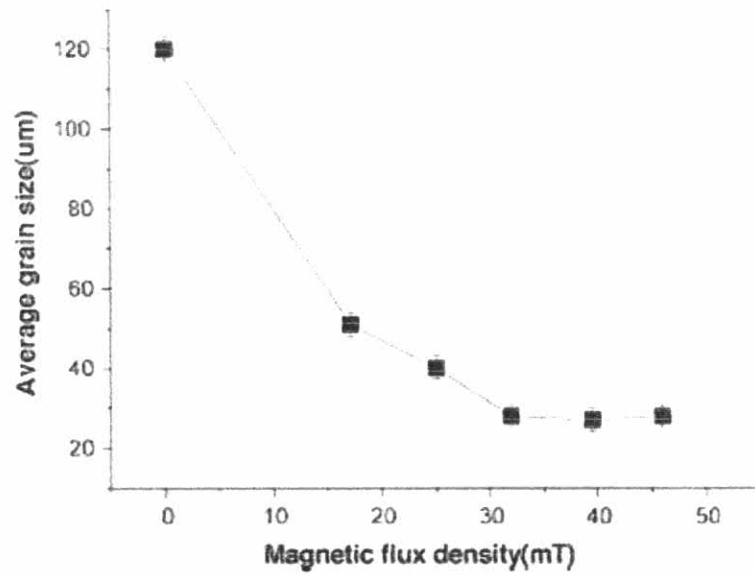
ภาพที่ 2.14 เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชิ้นงานระหว่างกระบวนการ LFEC และ DC Casting [12]

สัดส่วนพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติก ลดลง ทำให้บริเวณที่จะเกิดเป็นของเหลวมีขนาดลดลง และช่วยให้ความสามารถในการแปรรูปแบบถาวรที่อุณหภูมิสูงขึ้น และความแข็งแรงดีขึ้นด้วย ซึ่งจากที่กล่าวมาทำให้เห็นว่ากระบวนการหล่อแบบ LFEC สามารถลดความเค้นภายในและเพิ่มความต้านทานการแตกร้าวได้

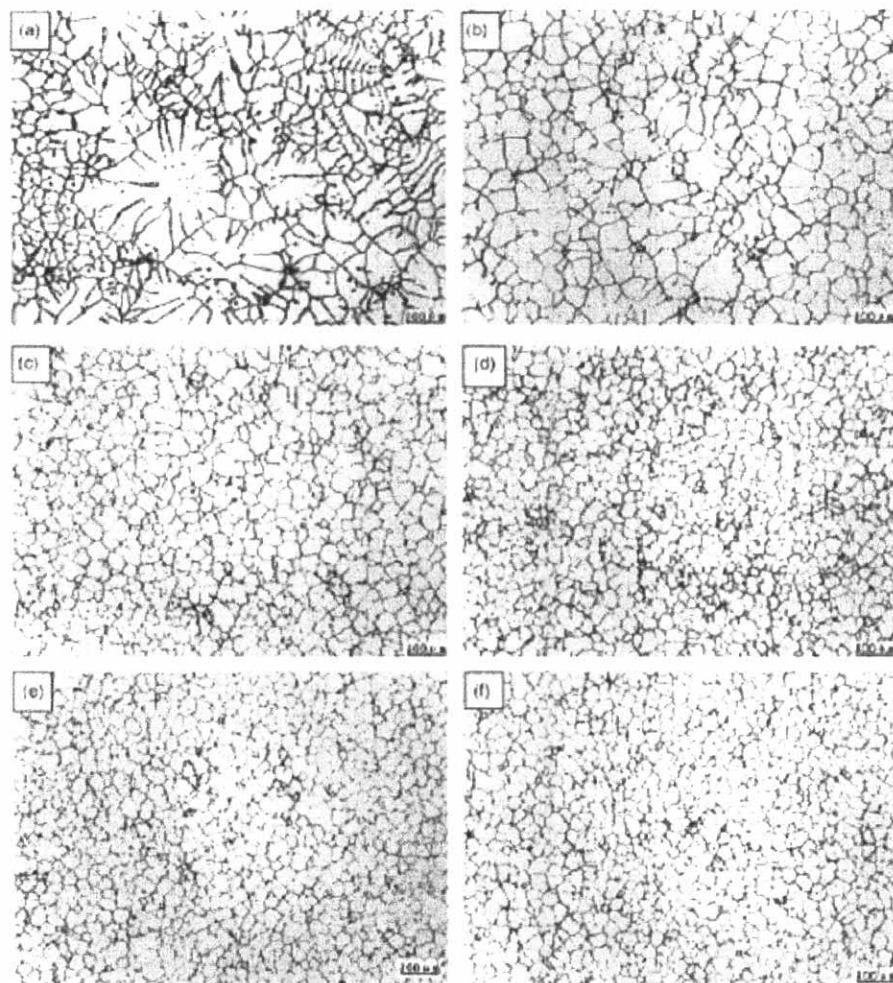


ภาพที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของ DC และ LFEC ingots: (a และ d) edge (3 mm from surface); (b และ e) 1/2 radius; (c และ f) center; (a-c) DC; (d-f) LFEC. [12]

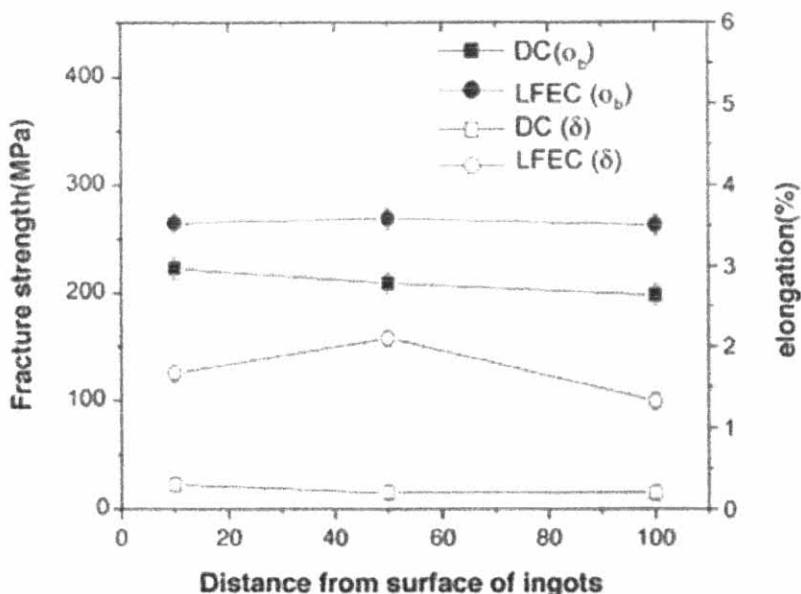
ในปี ค.ศ. 2005 (July) Yubo Zuo, Jianzhong Cui, Jie Dong, Fuxiao Yu [13] ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการหล่อโดยประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ (Al-9.82Zn-2.35Mg-2.29Cu-0.142Zr-0.12Fe-0.08Si) พบว่าภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ (25Hz, 32mT) โครงสร้างจุลภาคของ LFEC Ingot จากขอบถึงใจกลางชิ้นงานมีลักษณะของเกรนที่ละเอียดเป็น Equiaxed และสม่ำเสมอมากกว่า DC Ingot นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่ม Magnetic Flux Density ก็จะทำให้เกรนละเอียดและสม่ำเสมอมากขึ้น และในการทดลองนี้จะได้อ่า Magnetic Flux Density ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 32mT (ดังภาพที่ 2.16, 2.17) และนอกจากนี้ยังพบว่าคุณสมบัติเชิงกลของ LFEC Ingot ดีกว่า DC Ingot ดังภาพที่ 2.18, 2.19



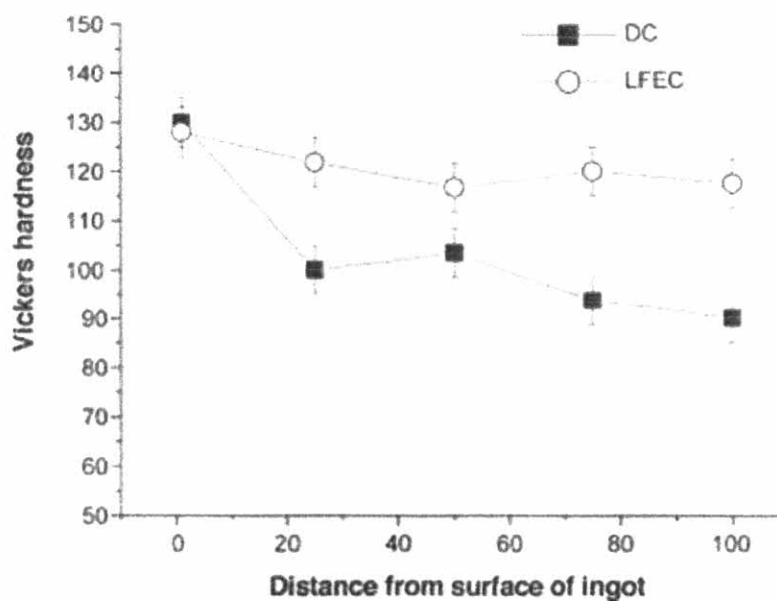
ภาพที่ 2.16 ผลของ Magnetic Flux Density ที่มีต่อขนาดเกรนโดยเฉลี่ย (ที่กลางชิ้นงาน) [13]



ภาพที่ 2.17 โครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากผลของการเพิ่ม Magnetic Flux Density, (a) 0mT; (b) 17.1mT; (c) 25mT; (d) 32mT; (e) 39.5mT; (f) 46mT. [13]



ภาพที่ 2.18 ผลของ LFEC ต่อ Fracture Strength และ %Elongation ของชิ้นงาน [13]

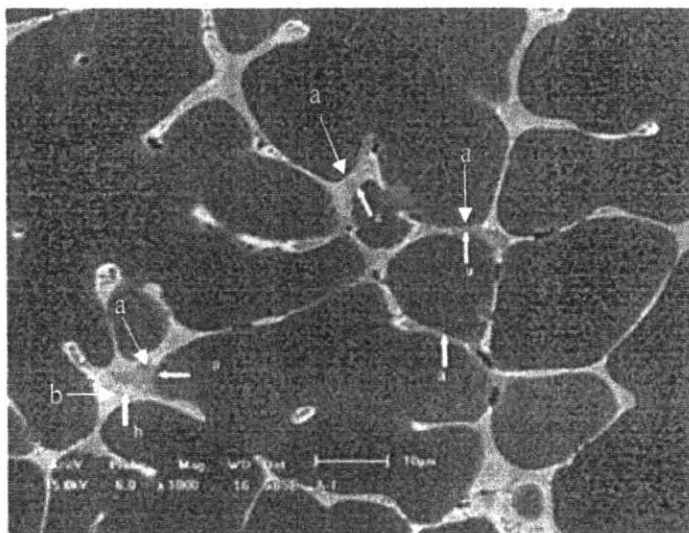


ภาพที่ 2.19 ผลของ LFEC ต่อความแข็ง (Vickers hardness) ของชิ้นงาน [13]

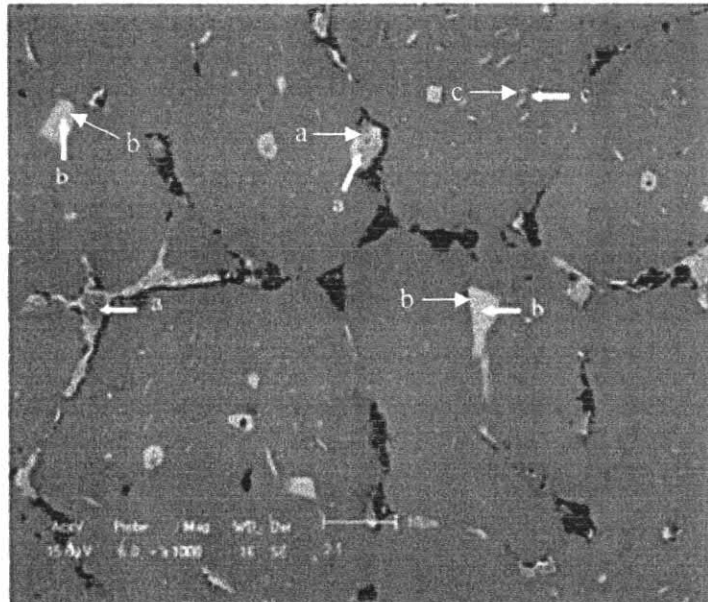
Yubo Zuo, Hiromi Nagaumi, Fuxiao Yu, Jianzhong Cui [14] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ ที่มีผลต่อ Sump dept และอุณหภูมิระหว่างการหล่อแบบ DC casting ของโลหะอะลูมิเนียมผสมความแข็งแรงสูงพิเศษ (Al-Zn-Mg-Cu) ซึ่งทำการทดลองโดยการวัดอุณหภูมิโดย Thermocouple ซึ่งใส่ไว้ในหลอด Stainless Steels แล้วนำไปทำการวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะอะลูมิเนียมภายในแบบหล่อ ซึ่งการวัดความลึกของ Sump จะวัดที่จุดกึ่งกลางของ Billet ซึ่งผลออกมาว่า ความลึกของ Sump ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบ LFEC มาจะตื้นกว่าที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบ DC และการกระจายของอุณหภูมิใน LFEC

Billet ก็จะมีคุณสมบัติเหมาะสมมากกว่าใน DC Billet ด้วย จึงทำให้ช่วยลดความเค้นที่เกิดจากอุณหภูมิ และกำจัดการแตกร้าวที่เกิดในชิ้นงานได้

ในปี ค.ศ. 2005 Yanxia li, Ping Li, Gang Zhao, Xiaotao Liu, Jianzhong Cui [15] ได้ทำการศึกษาสารประกอบที่เกิดในโลหะผสมอะลูมิเนียม (Al-10Zn-2.5Mg-2.5Cu) ภายหลังจากหล่อโดยประยุกต์ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำ, ภายหลังจากทำ Homogenization, ภายหลังจากอัดขึ้นรูป และภายหลังจากการทดสอบแรงดึงซึ่งชิ้นงานที่นำมาทดสอบแรงดึงผ่านการทำ Solution Treatment และ Aging แล้ว ซึ่งพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อมามีสารประกอบอยู่ 2 ชนิดคือ Al-Cu-Fe และ Al-Zn-Mg-Cu ดังภาพที่ 2.20 และเมื่อผ่านกระบวนการทำ Homogenization แล้วปรากฏว่าเกิด Al_7Cu_2Fe และ $Al_{14}Mg_{33}Zn_{37}Cu_{13}$ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเหมือน $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของ $Al_{14}Mg_{33}Zn_{37}Cu_{13}$ มีช่วงที่กว้างมาก และพบว่า Al_7Cu_2Fe ไม่สามารถละลายได้ระหว่างการทำ Homogenization ขณะที่ $Al_{14}Mg_{33}Zn_{37}Cu_{13}$ สามารถละลายได้บางส่วน ดังภาพที่ 2.21

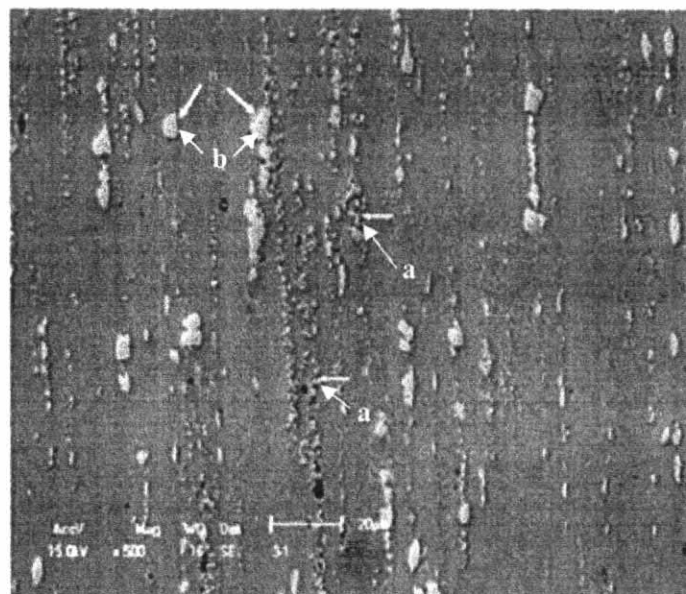


ภาพที่ 2.20 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากหล่อ จุด a คือ Al-Cu-Fe (Deep gray) และจุด b คือ Al-Zn-Mg-Cu (Shallow gray) [15]



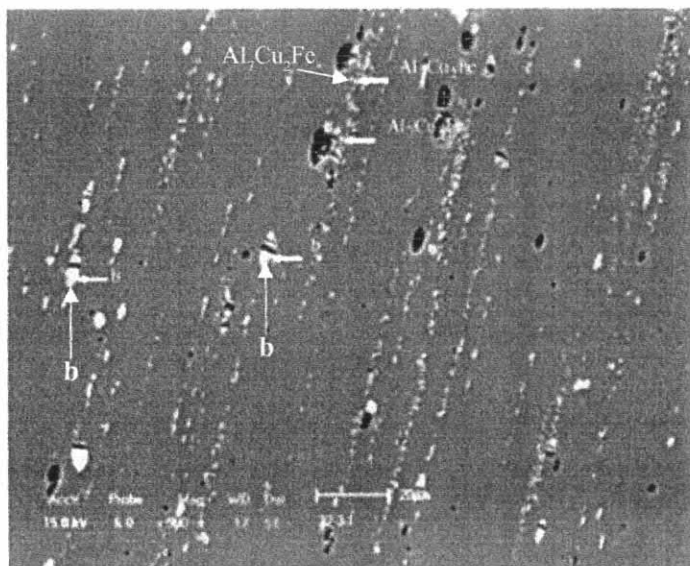
ภาพที่ 2.21 ภาพโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากการทำ Homogenization ซึ่งถ่ายจาก SEM จุด a คือ Al_7Cu_2Fe จุด b คือ Al-Zn-Mg-Cu compounds. [15]

และภายหลังจากการอัดขึ้นรูป พบว่า Al_7Cu_2Fe จะแปรรูปไปตามทิศทางของการอัดขึ้นรูป ขณะที่ $Al_{14}Mg_{33}Zn_{37}Cu_{13}$ จะเกิดการแปรรูปเล็กน้อยและมีขนาดใหญ่ ดังภาพที่ 2.22 และเมื่อผ่าน



ภาพที่ 2.22 ภาพโครงสร้างจุลภาคภายหลังจาก Extrusion ซึ่งถ่ายจาก SEM จุด a คือ Al_7Cu_2Fe จุด b คือ $Al_{14}Mg_{33}Zn_{37}Cu_{13}$ [15]

กระบวนการทางความร้อนแล้วนำมาทำการทดสอบแรงดึงแล้วพบว่า $Al_{14}Mg_{33}Zn_{37}Cu_{13}$ มีแนวโน้มที่จะแตกและกลายมาเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก ดังภาพที่ 2.23

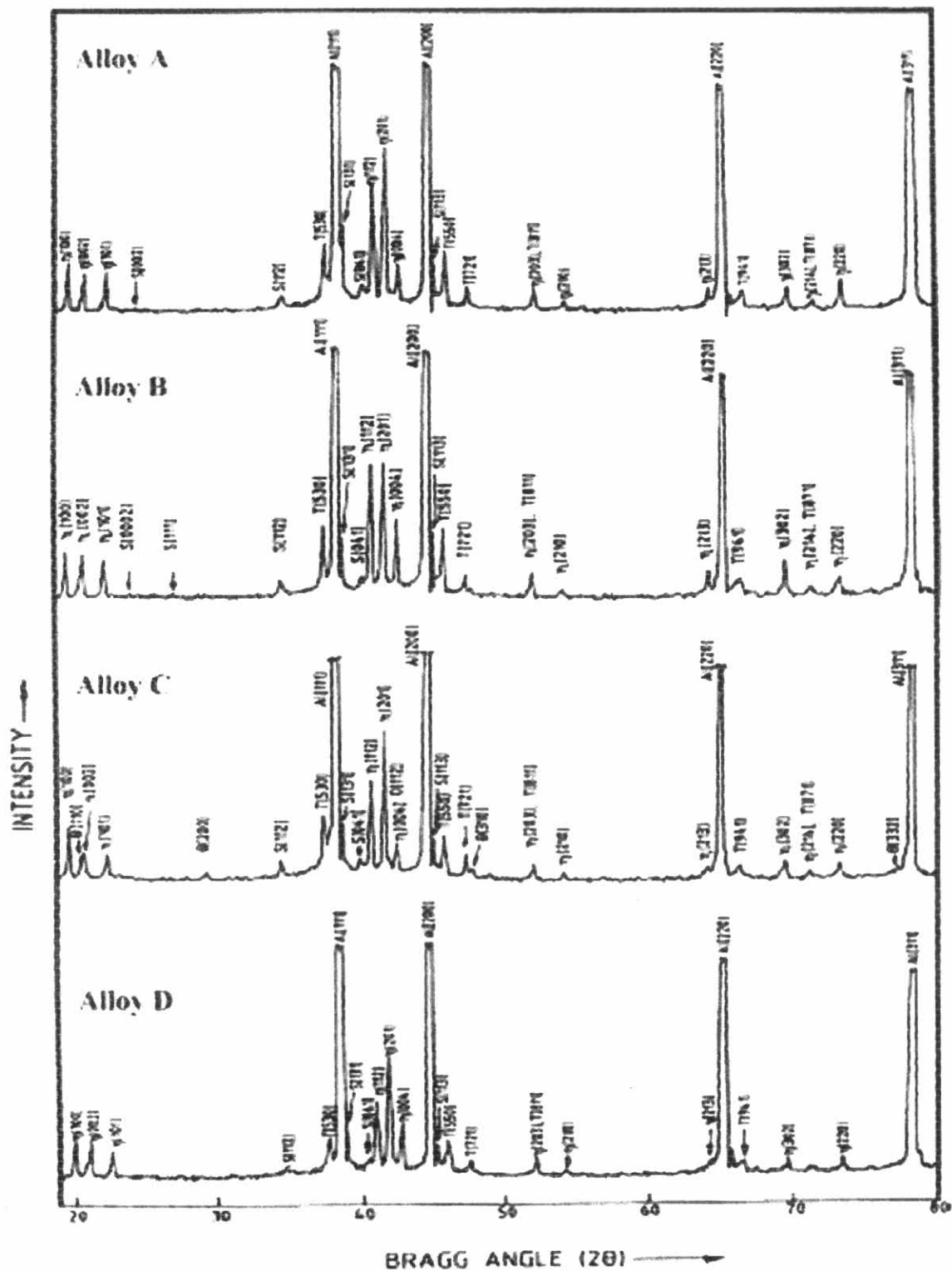


ภาพที่ 2.23 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการทดสอบแรงดึง จุด b คือ $Al_{14}Mg_{33}Zn_{37}Cu_{13}$ [15]

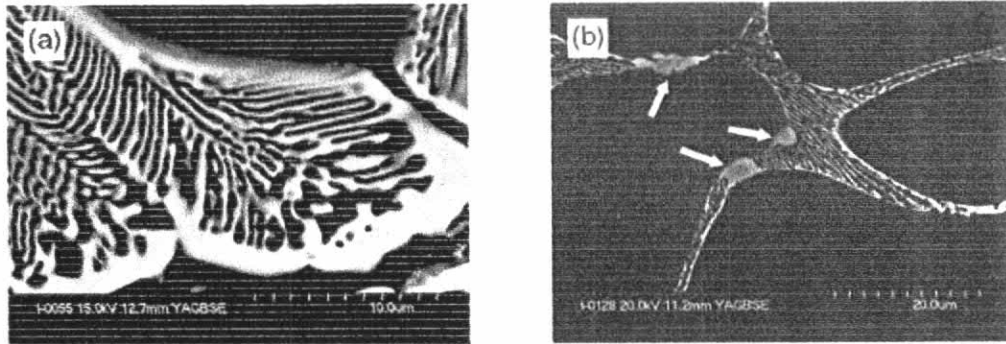
ในปี ค.ศ. 2005, Chandan Mondal and A.K. Mukhopadhyay [21] ได้ทำการศึกษาธรรมชาติของสารประกอบ T ($Al_2Mg_3Zn_3$) และ S (Al_2CuMg) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7055 ในสภาพหล่อและในสภาพอบอ่อน โดยทำการปรับปริมาณของแมกนีเซียมและทองแดง ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างทองแดงและแมกนีเซียมเพิ่มขึ้น ค่า Lattice parameter ของสารประกอบ T ($Al_2Mg_3Zn_3$) จะลดลง เนื่องจากทองแดงมีรัศมีอะตอมที่เล็กกว่าแมกนีเซียม และพบว่าในโครงสร้างสภาพหล่อ สารประกอบหลักที่เกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียม 7055 คือ η ($MgZn_2$), T ($Al_2Mg_3Zn_3$), S (Al_2CuMg) และ θ (Al_2Cu) ดังรูป 2.24 ซึ่งสารประกอบ T ($Al_2Mg_3Zn_3$) นี้ละลายทองแดงได้ในช่วง 27-28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, สารประกอบ S (Al_2CuMg) จะถูกทำให้เกิดโดยสังกะสีซึ่งมีค่าการละลายอยู่ในช่วง 25-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่สารประกอบ θ (Al_2Cu) จะไม่มีสังกะสีหรือแมกนีเซียม ละลายอยู่เลย และพบว่า เมื่อปริมาณของทองแดงและแมกนีเซียมเพิ่มมากขึ้นสารประกอบ S (Al_2CuMg) ก็จะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น และ สารประกอบ θ (Al_2Cu) จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณทองแดงสูงขึ้นแต่ปริมาณแมกนีเซียมลดลง และเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านการอบให้เป็นเนื้อเดียว พบว่า สารประกอบที่ยังคงเหลืออยู่คือ สารประกอบ T ($Al_2Mg_3Zn_3$) ที่มีทองแดงละลายด้วย และ สารประกอบ S

(Al_2CuMg) ที่ไม่มีสังกะสีละลายอยู่ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า สังกะสีนั้นแพร่ออกจากสารประกอบ S (Al_2CuMg) ขณะทำการอบอ่อน

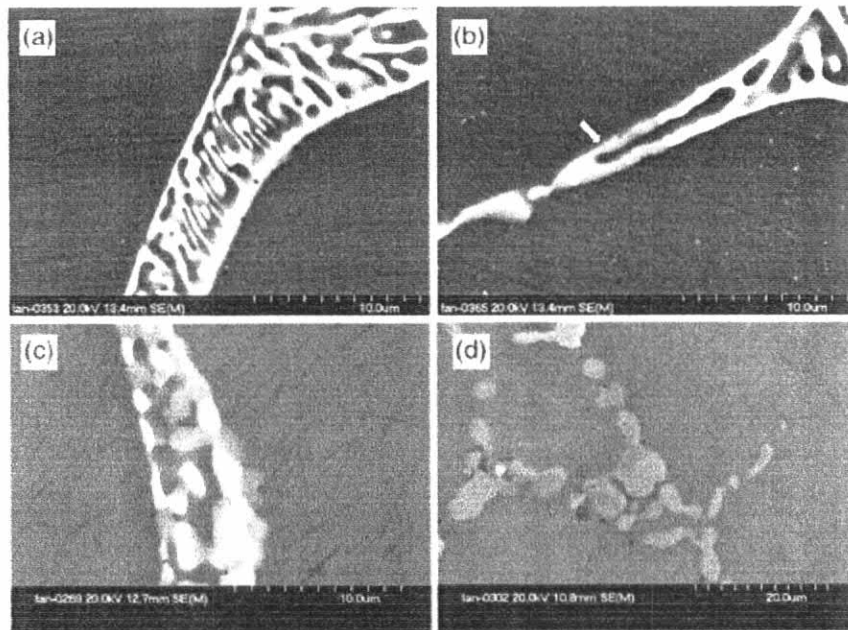
ในปี ค.ศ. 2006, Xigang Fan and etc. [22] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสม $\text{Al-6.31Zn-2.33Mg-1.7Cu-0.12Zr-0.09Fe-0.05Si}$ ระหว่างกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียว โดยทำการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 460°C ที่เวลา 5 นาที, 30 นาที, 6 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง แล้วทำการสังเกตโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น พบว่า ในสภาพหล่อ พบโครงสร้างยูเทคติกประกอบด้วย $\text{Al} + \text{Mg}(\text{Zn}, \text{Cu}, \text{Al})_2$ และสารประกอบ $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ดังภาพ 2.25 (a) และ (b) ซึ่งภาพ (a) แสดงโครงสร้างยูเทคติกแบบลามลาร์ ($\text{MgZn}_2(\text{bright})+\text{Al}(\text{dark})$) และภาพ (b) แสดงสารประกอบ $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ และเมื่อนำชิ้นงานไปทำการอบให้เป็นเนื้อเดียวพบว่า สารประกอบ $\text{Mg}(\text{Zn}, \text{Cu}, \text{Al})_2$ เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงดังภาพ 2.26 (b) คือเมื่อทำการอบเป็นเวลา 30 นาที พบว่าเกิดสารประกอบ Al_2CuMg เกิดขึ้นตามบริเวณขอบระหว่างเนื้อพื้นและ $\text{Mg}(\text{Zn}, \text{Cu}, \text{Al})_2$ และปริมาณจะเริ่มมากขึ้น เมื่อใช้เวลาในการอบมากขึ้น และลักษณะจะเริ่มกลมเนื่องจากปรากฏการณ์ Ripening ทำให้ปริมาณเริ่มลดลง เมื่ออบผ่านไป 24 ชั่วโมง ดังภาพ 2.26 (d) ส่วนสารประกอบ $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในขณะทำการอบให้เป็นเนื้อเดียว



ภาพที่ 2.24 แสดงผลของ XRD ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7055 ที่ส่วนผสมต่างๆ กัน alloy A คือ Al-8Zn-2.3Mg-2.6Cu, alloy B คือ Al-8Zn-2.0Mg-2.3Cu, alloy C คือ Al-8Zn-1.8Mg-2.0Cu และ alloy D คือ Al-8Zn-1.8Mg-2.0Cu [21]



ภาพที่ 2.25 แสดงโครงสร้างในสภาพหล่อ (a) โครงสร้างยูเทคติก (b) สารประกอบ Al_7Cu_2Fe [22]



ภาพที่ 2.26 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบระหว่างการอบให้เป็นเนื้อเดียวที่เวลาต่างๆ กัน (a) 5 นาที, (b) 30 นาที, (c) 6 ชั่วโมง และ (d) 24 ชั่วโมง [22]

ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงพิเศษ (Al-Zn-Mg-Cu-Zr) สามารถผลิตด้วยวิธี Direct Chill Casting ที่มีการถอนของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งทำให้ได้โครงสร้างที่สม่ำเสมอมากขึ้น และลดการแตกร้าวของชิ้นงาน และจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของ Al-10Zn-2.5Mg-2.5Cu พบว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นในสภาพหล่อคือ Al_7Cu_2Fe และ $Al_{14}Mg_{33}Zn_{37}Cu_{13}$ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเหมือน $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ และเมื่อผ่านกระบวนการอบให้เป็นเนื้อเดียวพบว่าสารประกอบ Al_7Cu_2Fe ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนสารประกอบ $Al_{14}Mg_{33}Zn_{37}Cu_{13}$ มีการละลายบางส่วน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีส่วนผสมของสังกะสี 8 และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียมที่สังกะสี 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คือ η ($MgZn_2$),

T ($Al_2Mg_3Zn_3$), S (Al_2CuMg) และ θ (Al_2Cu) ส่วนสารประกอบที่เกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียมที่สังกะสี 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คือพบโครงสร้างยูเทคติกประกอบด้วย $Al + Mg(Zn, Cu, Al)_2$ และสารประกอบ Al_7Cu_2Fe และเมื่อนำไปผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวพบว่าที่สังกะสี 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสารประกอบ $Mg(Zn, Cu, Al)_2$ เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบ Al_2CuMg ซึ่งสรุปได้ว่าโลหะผสม $Al-Zn-Mg-Cu-Zr$ นี้มีสารประกอบหลักคือ $MgZn_2$ และ Al_7Cu_2Fe แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุผสมด้วยซึ่งทำให้มีสารประกอบที่แตกต่างกันไป