



บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

2.1 ข้อมูลพื้นฐานของโลหะอะลูมิเนียม, โลหะอะลูมิเนียมผสม และโลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นในกลุ่ม 7xxx (อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง)

อะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง แต่มีความเหนียวสูงสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางแทนเหล็กและทองแดงได้ในหลายๆ ด้านของงานวิศวกรรมและอุตสาหกรรม อะลูมิเนียมมีคุณสมบัติด้านหล่อหลอมที่ดี โดยมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ สามารถรวมตัวกับโลหะอื่นๆ เป็นโลหะผสมได้ง่าย มีความสามารถในการไหลอยู่ในเกณฑ์สูง สามารถหล่อหลอมได้ง่าย^[1] ซึ่งอาจสรุปสมบัติทางกายภาพของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ดังตารางที่ 2.1^[2] แต่ข้อเสียของอะลูมิเนียมมีอยู่บ้างเหมือนกัน โดยเฉพาะอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงไม่สูงมาก มีขอบเขตการยืดหยุ่น (Elastic limit) ต่ำ ทำให้การใช้งานถูกจำกัดขอบเขตไปมาก

เนื่องจากโลหะอะลูมิเนียมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อน อันเนื่องมาจากฟิล์มของ Al_2O_3 ที่เกิดจากการรวมตัวของอะลูมิเนียมกับออกซิเจน และสมบัติที่ยืดตัวได้ง่ายของอะลูมิเนียมจึงทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยการรีดเป็นแผ่น หรืออัดขึ้นรูปได้สะดวก ทำให้การใช้งานมีขอบเขตกว้างขวางมาก แต่บางครั้งก็มีการตั้งใจผสมธาตุอื่นๆ เพื่อเพิ่มสมบัติในด้านต่างๆ เช่น การเติมซิลิกอน ทองแดง เพื่อให้ความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นแต่ความเหนียวจะลดลง

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

น้ำหนักอะตอม	26.97 g/mole
ระบบผลึก	FCC
ความหนาแน่น	2.70 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	658 °C
ความร้อนจำเพาะ (0-100 °C)	0.2259 Cal/g. °C
ความร้อนแฝงการหลอมเหลว	93 Cal/g
อัตราการหดตัวจากสภาพหลอมเหลว	6.6 %
ความต้านทานจำเพาะ	2.699 μΩ.cm.
สภาพนำความร้อน	0.52 Cal.cm/cm °C.sec

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

ความต้านแรงดึง (Tensile Strength)	8 – 10 kg/mm ²
ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit)	3 kg/mm ²
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent Elongation)	40 – 50 %
ความแข็ง (Hardness)	16 – 20 HB
มอดุลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of elastic)	7800 kg/mm ²

โลหะอะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะอื่นๆ ได้หลายชนิด ซึ่งโลหะผสมแต่ละประเภทจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน โลหะผสมอะลูมิเนียมจำแนกออกได้เป็น สองประเภทที่สำคัญคือ

1. โลหะผสมประเภทขึ้นรูปเย็น (Wrought alloy)
2. โลหะผสมประเภทหล่อหลอม (Cast alloy)

โดยโลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นนั้น มีหลายชนิดแตกต่างกันตามธาตุที่ใช้ผสมอยู่ดัง ตารางที่ 2.3 ซึ่งแต่ละประเภทจะให้สมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันด้วย แล้วแต่เลือกนำไปใช้งานตาม ความเหมาะสม

ตารางที่ 2.3 รหัสธาตุผสมของโลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็น

1xxx	อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (pure Al)
2xxx	อะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al – Cu)
3xxx	อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน (Al – Si, Al – Si -(Mg, Cu))
4xxx	อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน (binary Al – Si)
5xxx	อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (Al – Mg)
6xxx	อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน (Al – Mg-Si)
7xxx	อะลูมิเนียมผสมสังกะสี (Al – Zn, Al – Zn – (Mg, Cu))
8xxx	อะลูมิเนียมผสมดีบุก
9xxx	อะลูมิเนียมผสมธาตุอื่นๆที่จะมีใช้งานในอนาคต

ตัวอย่างอิทธิพลของธาตุผสมต่อสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมผสม^[3] เช่น

ทองแดง (Cu) เป็นธาตุที่นิยมผสมในปริมาณ 4 – 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักมีผลทำให้เพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง แต่จะลดความต้านทานในการต้านทานการกัดกร่อน และ hot tear รวมถึงความสามารถในการหล่อหลอม

แมกนีเซียม (Mg) วัตถุประสงค์หลักของการผสมทองแดง คือ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง เพราะจะทำให้เกิดเฟสที่แข็ง และขจัดการเกิดเฟสที่อ่อนตัว แต่ความต้านทานการกัดกร่อนจะไม่ลดลงด้วยอิทธิพลของแมกนีเซียม

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

สังกะสี (Zn) ไม่มีคุณสมบัติในทางคืออย่างเด่นชัดในด้านสมบัติทางกล แต่ช่วยปรับปรุงสมบัติในกระบวนการทางความร้อนต่างๆ

ดีบุก (Tin) เพิ่มความแข็งแรงจากกระบวนการ Precipitation hardening และเพิ่มความสามารถในการกลึงไส เป็นต้น

นอกเหนือจากการเติมธาตุผสมอื่นๆ แล้ว การปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะอะลูมิเนียมผสมยังสามารถทำได้ในขั้นตอนอื่นๆอีก เช่น ภายหลังจากกระบวนการผลิตที่ได้ชิ้นงานโลหะอะลูมิเนียมผสมมาแล้ว จึงนำไปปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) หรือในขั้นตอนระหว่างกระบวนการผลิต เช่นการนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลวก่อนที่จะเริ่มการหล่อให้แข็งตัว ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้เอง คือที่มาของเรื่องที่จะนำมาทำการวิจัย โดยรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้นี้จะแสดงไว้ในหัวข้อ 2.1 ที่เป็นวรรณกรรมปริทัศน์เกี่ยวกับแนวคิดและการพัฒนากระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องภายใต้การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำ

ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้วเกี่ยวกับความหลากหลายของอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นที่มีหลายชนิดแตกต่างกันตามธาตุที่ใช้ผสมแล้วแต่เลือกนำไปใช้งาน แต่ในงานวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับโลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นที่มุ่งเน้นการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมการขนส่งเช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมอากาศยาน [4, 12] เป็นต้น ซึ่งในกลุ่มอุตสาหกรรมการขนส่งดังกล่าวนี้มีการนำโลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นมาใช้ผลิตเป็นโครงสร้าง และชิ้นส่วนหรืออะไหล่เหล่านั้นเอง เช่นตัวถัง ปีก ใบพัด เป็นต้นโดยที่โลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นที่ถูกเลือกมาใช้ในงานในอุตสาหกรรมการขนส่งนี้คือกลุ่มที่มีธาตุผสมหลักเป็นธาตุสังกะสี (Zn) หรือมีรหัสแสดงกลุ่มคือ 7xxx ซึ่งมีสมบัติทางกลและตัวอย่างความเหมาะสมในการเลือกใช้งานตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 ส่วนชนิดและปริมาณธาตุผสมที่นิยมใช้กับโลหะอะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นที่ถูกเลือกมาใช้งานของกลุ่มคือ 7xxx จะแตกต่างกันหลายแบบและจะมีรหัสระบุชนิดตลอดจนแสดงถึงปริมาณธาตุผสมที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกลและลักษณะการใช้งานของโลหะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 7xxx ที่
นิยมอยู่ในปัจจุบัน

รหัส	ส่วนผสม	สมบัติทางกลในค่าสูงสุด			การใช้งาน
		Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	
7005	4.6Zn-1.4 Mg – 0.5Mn-0.1Cr – 0.1Zr– 0.03Ti	641	483	16	ขอบรางรถไฟ , อุปกรณ์ยึด มุม , ตั๊กคอนเทนเนอร์ , ไม้ เทนนิส , ไม้เบสบอล
7039	4 Zn-2.8 Mg – 0.2Mn-0.2 Cr	450	400	12	ถังบรรจุสารเคมีประเภท สารอินทรีย์, ถังบรรจุอัด ความดัน , อุปกรณ์รถถัง โครงสร้างจรวดมิสไซล์
7049	7.6 Zn-2.5Mg- 1.5Cu-0.15 Cr	538	490	7	โครงสร้างเครื่องบิน, โครงสร้างจรวดมิสไซล์ , เกียร์ใช้ในการลงจอด
7050	6.2 Zn-2.3Mg – 2.3Cu- 0.12Zr	510	496	12	โครงสร้างเครื่องบินที่ผ่าน การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) หรือการ Forgings
7072	1.0 Zn	148	83	20	Fin stock
7075	5.6 Zn-2.5Mg – 1.6Cu -0.23 Cr	703	634	9	โครงสร้างเครื่องบิน
7076	7.5 Zn-1.6Mg – 0.55Mn-0.65 Cu	485	415	14	ใบพัดเครื่องบิน
7175	5.6 Zn-2.5Mg – 1.6Cu-0.23 Cr	593	524	11	โครงสร้างเครื่องบิน
7178	6.8 Zn-2.7Mg – 2.0Cu -0.3 Cr	440	420	15	โครงสร้างและในส่วนของ เครื่องบินหรือยานอวกาศ
7475	5.7 Zn-2.3Mg- 1.5Cu-0.22 Cr	683	600	10	ลำตัวเครื่อง, ปีกและผนัง เครื่องบิน

ตารางที่ 2.5 ปริมาณธาตุผสมของโลหะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 7xxx ที่นิยมอยู่ในปัจจุบัน

รหัส อะลูมิเนียม ผสม ประเภทขึ้น รูปเย็น	ปริมาณธาตุผสมแต่ละชนิด (ร้อยละของน้ำหนักผสม)						
	ซิลิกอน (Si)	เหล็ก (Fe)	ทองแดง (Cu)	แมงกานีส (Mn)	แมกนีเซียม (Mg)	โครเมียม (Cr)	สังกะสี (Zn)
7001	0.35	0.40	1.6-2.6	0.20	2.6-3.4	0.18- 0.35	6.8-8.0
7003	0.30	0.35	0.20	0.30	0.5-1.00	0.20	5.0-6.5
7004	0.25	0.35	0.05	0.20- 0.70	1.0-2.0	0.05	3.8-4.6
7005	0.35	0.40	0.10	0.20- 0.70	1.0-1.8	0.06- 0.20	4.0-5.0
7008	0.10	0.10	0.05	0.05	0.7-1.4	0.12- 0.25	4.5-5.5
7108	0.10	0.10	0.05	0.05	0.7-1.4	-	4.5-5.5
7009	0.20	0.20	0.6-1.3	0.10	2.1-2.9	0.10- 0.25	5.5-5.6
7109	0.10	0.15	0.8-1.3	0.10	2.2-2.7	0.04- 0.08	5.8-6.5
7010	0.12	0.15	1.5-2.0	0.10	2.1-2.6	0.05	5.7-6.7
7011	0.15	0.20	0.05	0.10- 0.30	1.0-1.6	0.05- 0.20	4.0-5.5
7012	0.15	0.25	0.8-1.2	0.08- 0.15	1.8-2.2	0.04	5.8-6.5
7013	0.6	0.7	0.10	1.0-1.5	-	-	1.5-2.0
7014	0.5	0.5	0.30- 0.70	0.30- 0.70	2.2-3.2	-	5.2-6.2
7015	0.20	0.30	0.06- 0.15	0.10	1.3-2.1	0.15	4.6-5.2
7016	0.10	0.12	0.45-1.0	0.03	0.8-1.4	-	4.0-5.0
7116	0.15	0.30	0.5-1.1	0.05	0.8-1.4	-	4.2-5.2
7017	0.35	0.45	0.20	0.50-0.5	2.0-3.0	0.35	4.0-5.2
7018	0.35	0.45	0.20	0.15- 0.50	0.7-1.5	0.20	4.5-5.5
7019	0.35	0.45	0.20	0.15- 0.50	1.5-2.5	0.20	3.5-4.5
7020	0.35	0.40	0.20	0.05-0.5	1.0-1.4	0.10- 0.35	4.0-5.0
7021	0.25	0.40	0.25	0.10	1.2-1.8	0.05	5.0-6.0

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

รหัส อลูมิเนียม ผสมประเภท ขึ้นรูปเย็น	ปริมาณธาตุผสมแต่ละชนิด (ร้อยละของน้ำหนักผสม)						
	ซิลิกอน (Si)	เหล็ก (Fe)	ทองแดง (Cu)	แมงกานีส (Mn)	แมกนีเซียม (Mg)	โครเมียม (Cr)	สังกะสี (Zn)
7022	0.50	0.50	0.5-1.0	0.1-0.4	2.6-3.7	0.1-0.3	4.3-5.2
7023	0.5	0.5	0.5-1.0	0.1-0.6	2.0-3.0	0.05- 0.35	4.0-6.0
7024	0.3	0.4	0.1	0.1-0.6	0.5-1.0	0.05- 0.35	3.0-5.0
7025	0.3	0.4	0.1	0.1-0.6	0.8-1.5	0.05- 0.35	3.0-5.0
7129	0.15	0.3	0.5-0.9	0.10	1.3-2.0	0.10	4.2-5.2
7229	0.06	0.08	0.5-0.9	0.03	1.3-2.0	-	4.2-5.2
7030	0.20	0.30	0.20-0.40	0.05	1.0-1.5	0.04	4.8-5.9
7039	0.30	0.40	0.10	0.1-0.4	2.3-3.3	0.15- 0.25	3.5-4.5
7046	0.2	0.40	0.25	0.30	1.0-1.6	0.2	6.6-7.6
7146	0.2	0.4	-	-	0.1-1.6	-	6.6-7.6
7049	0.25	0.35	1.2-1.9	0.20	2.0-2.9	0.10- 0.22	7.2-8.2
7149	0.15	0.20	1.2-1.9	0.20	2.0-2.9	0.10- 0.22	7.2-8.2
7050	0.12	0.15	2.0-2.6	0.10	1.9-2.6	0.04	5.7-6.7
7150	0.12	0.15	1.9-2.5	0.10	2.0-2.7	0.04	5.9-6.9
7051	0.35	0.45	0.15	0.10- 0.45	1.7-2.5	0.05- 0.25	3.0-4.0
7060	0.15	0.20	1.8-2.6	0.2	1.3-2.1	0.15- 0.25	6.1-7.5
7064	0.12	0.15	1.8-2.4	-	1.9-2.9	0.06- 0.25	6.8-8.0
7072	(Si+Fe ≤ 0.7)		0.1	0.1	0.1	-	0.8-1.3



ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

รหัส อลูมิเนียม ผสมประเภท ขึ้นรูปเย็น	ปริมาณธาตุผสมแต่ละชนิด (ร้อยละของน้ำหนักผสม)						
	ซิลิกอน (Si)	เหล็ก (Fe)	ทองแดง (Cu)	แมงกานีส (Mn)	แมกนีเซียม (Mg)	โครเมียม (Cr)	สังกะสี (Zn)
7278	0.15	0.20	1.6-2.2	0.02	2.5-3.2	0.17- 0.25	6.6- 7.4
7079	0.3	0.4	0.4-0.8	0.1-0.3	2.9-3.7	0.1-0.25	3.8- 4.8
7179	0.15	0.20	0.4-0.8	0.1-0.3	2.9-3.7	0.1-0.25	3.8- 4.8
7090	0.125	0.15	0.6-1.3	-	2.0-3.0	-	7.7- 8.7
7091	0.12	0.15	1.1-1.8	-	2.0-3.0	-	5.8- 7.1
7175	0.15	0.20	1.2-2.0	0.1	2.1-2.9	0.18- 0.28	5.1- 6.1
7475	0.10	0.12	1.2-1.9	0.06	1.9-2.6	0.18- 0.25	5.2- 6.2
7076	0.40	0.6	0.3-1.0	0.3-0.8	1.2-2.0	-	7.0- 8.0
7277	0.5	0.7	0.8-1.7	-	1.7-2.3	0.18- 0.35	3.7- 4.3
7178	0.4	0.5	1.6-2.4	0.3	2.4-3.1	0.18- 0.28	6.3- 7.3
7472	0.25	0.6	0.05	0.05	0.9-1.5	-	1.3- 1.9
7075	0.42	0.50	1.2-2.0	0.3	2.1-2.9	0.18- 0.28	5.1- 6.1

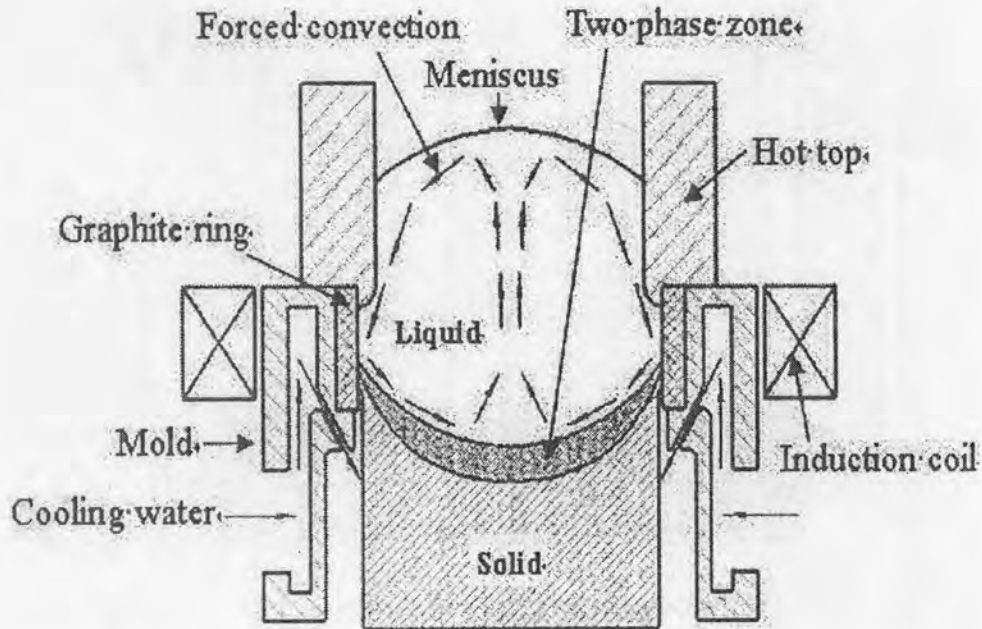
2.2 วรรณกรรมปริทรรศน์

เกี่ยวกับแนวคิดและการพัฒนากระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องภายใต้การ
ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า
(Low frequency electromagnetic field) หรือ LFEC.

ในการใช้งานด้านอุตสาหกรรมการขนส่ง เช่นอุตสาหกรรมยานยนต์ และ
อุตสาหกรรมอากาศยาน นั้น โลหะหรือวัสดุที่นำมาใช้นั้นต้องมีสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม เช่น ความ
แข็งแรงของวัสดุต้องสูงมากเป็นพิเศษ ดังนั้นจึงมีการพยายามปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงาน
อะลูมิเนียม ซึ่งวิธีการที่นิยมเลือกปฏิบัติมากที่สุดก็คือการพยายามปรับปรุงสมบัติทางกลของ
ชิ้นงานอะลูมิเนียมโดยการผสมธาตุต่างๆ ลงไปในกระบวนการหล่อโลหะหลอมเหลว โดยที่โลหะ
อะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นที่ถูกเลือกมาใช้งานในอุตสาหกรรมการขนส่งนี้ ก็คือกลุ่มที่มีธาตุ
ผสมหลักเป็นธาตุสังกะสี (Zn) หรือมีรหัสแสดงกลุ่มคือ 7xxx เพราะต้องการอาศัยประโยชน์ของ
ธาตุสังกะสี (Zn) ที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยวิธีการทางความร้อน
ต่างๆ (Heat Treatment) แต่ธาตุสังกะสี (Zn) เองไม่ได้มีประโยชน์ช่วยโดยตรงอย่างเด่นชัดใน
ด้านสมบัติทางกล ทำให้ต้องอาศัยการเติมธาตุชนิดอื่นๆลงไปในกระบวนการหลอมโลหะอะลูมิเนียมผสม
อีกด้วย และเพราะการผสมธาตุต่างๆ ลงไปหลายชนิดในปริมาณสูงนี้เองที่เป็นสาเหตุหลักอันหนึ่งที่ทำให้
ทำให้เกิดรอยร้าวของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อที่ผลิตด้วยวิธีการหล่อแบบต่อเนื่องแบบDC.^[13]

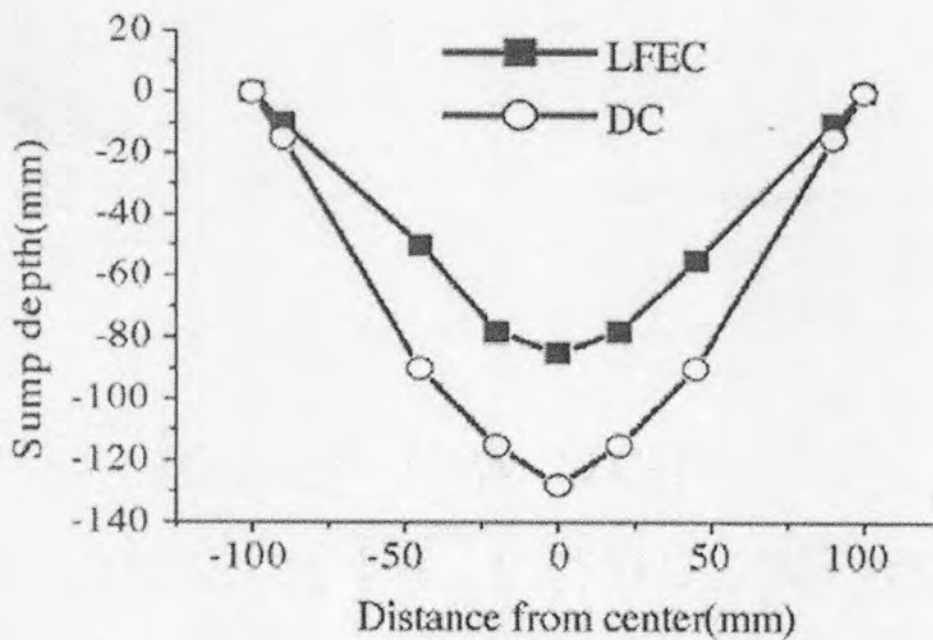
ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงานอะลูมิเนียมด้วยวิธี
อื่นๆ เช่นการนำเทคโนโลยีรูปแบบใหม่ๆมาปรับเปลี่ยนหรือ ประยุกต์ใช้กับกระบวนการหล่ออย่าง
ต่อเนื่องดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้วซึ่งก็คือวิธีการที่เรียกว่า LFEC. (low frequency
electromagnetic field) หรือการนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้ในการสร้าง
สนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลวในระหว่างที่จะเริ่มการหล่อให้แข็งตัวใน
กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC. Casting) ซึ่งการ
ประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยนำเข้ามาเพิ่มระหว่างกระบวนการหล่อดังที่แสดงในภาพที่ 2.1
นั้น เป็นวิธีการใหม่อย่างหนึ่งที่ถูกนำมาศึกษาผลกระทบต่อสมบัติต่างๆของแท่งโลหะหล่ออย่าง
ต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงบ้างแล้วในเบื้องต้นโดยนักวิจัยชาวจีน และ
ญี่ปุ่น เพื่อวัตถุประสงค์ในการหาวิธีที่จะป้องกันการเกิดรอยร้าวในแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่อง
อะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง และทำให้สามารถผลิตแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสม
สังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงที่ให้ความแข็งแรงของวัสดุสูงมากเป็นพิเศษ โดยวิธีการหล่ออย่าง

ต่อเนื่องได้ ซึ่งแต่เดิมนั้นข้อจำกัดของการผลิตด้วยการหล่ออย่างต่อเนื่อง ก็คือขนาดของแท่ง โลหะอะลูมิเนียมผสมนั่นเอง เพราะถ้าต้องการหล่อแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงที่ให้ความแข็งแรงของวัสดุสูงมากเป็นพิเศษ โดยมีขนาดแท่งโลหะใหญ่มาก (เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 150 มิลลิเมตร) ก็จะไม่สามารถหล่อได้เพราะจะเกิดรอยร้าวนั่นเอง



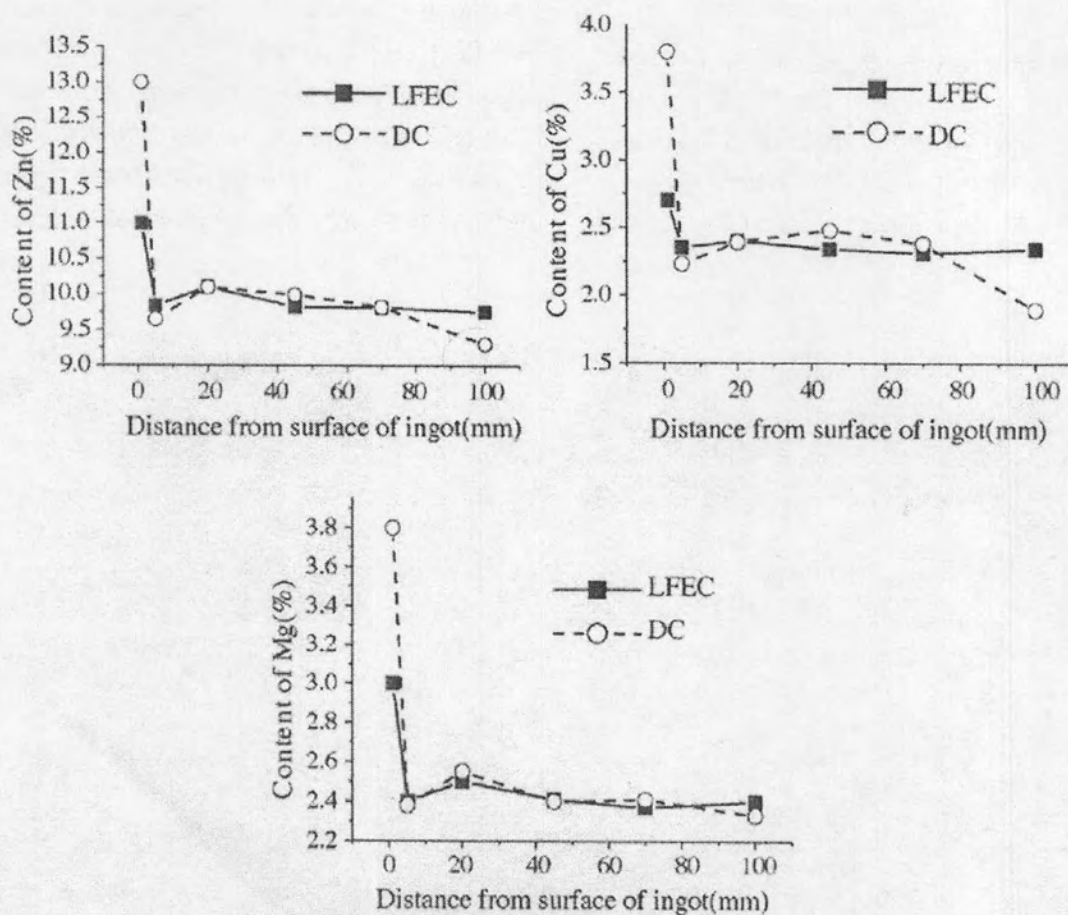
ภาพที่ 2.1 กระบวนการหล่ออย่างต่อเนื่องแบบ Direct Chilled (conventional DC Casting) และมีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลวก่อนที่จะเริ่มการหล่อให้แข็งตัว

โดยวิธีการผลิตแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงที่ให้ความแข็งแรงของวัสดุต้องสูงมากเป็นพิเศษ จากการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลวในระหว่างที่จะเริ่มการหล่อให้แข็งตัวในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท Direct Chilled (conventional DC Casting) นี้ ในเบื้องต้นได้มีการอธิบายผลการศึกษาโดยกลุ่มนักวิจัยชาวจีน และญี่ปุ่น^[5] เกี่ยวกับการที่ค้นพบว่า การนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการผลิตหรือวิธีการที่เรียกว่า LFEC. จะส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในกึ่งกลางกับที่ผิวนอกของน้ำโลหะหลอมเหลวขณะเริ่มการหล่อให้แข็งตัวมีค่าลดลง และลกระดับของ sump depth ของน้ำโลหะหลอมเหลวขณะเริ่มการหล่อให้แข็งตัว ดังที่แสดงในภาพที่ 2.2

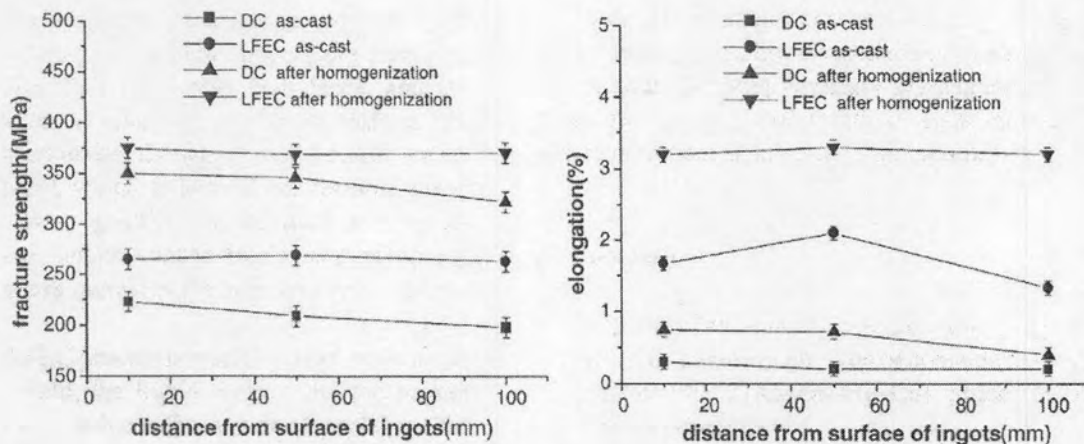


ภาพที่ 2.2 การเปรียบเทียบ Sump depth ระหว่างแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.

แต่กลับเพิ่มความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของธาตุผสมต่างๆ ดังที่แสดงในภาพที่ 2.3 จนท้ายที่สุดได้มีการอธิบายว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นสิ่งที่ส่งผลให้ สามารถลดค่าความเค้นตกค้าง อีกทั้งยังพบว่ามีผลกระทบต่อเนื้อถึงสมบัติทางกลของเนื้อวัสดุของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงที่มีความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย ดังที่แสดงในภาพที่ 2.4 กับตารางที่ 2.6 และส่งผลดีต่อการป้องกันการเกิดรอยร้าวภายในของแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงได้ ซึ่งแสดงว่าความต้านทานการแตกร้าวก็เพิ่มขึ้นด้วย ดังที่แสดงในภาพที่ 2.5 เมื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดกับแท่งโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดงที่หล่อแบบต่อเนื่องแบบ Direct Chilled (conventional DC. Casting) แต่ไม่มีการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปทำการกวนน้ำโลหะหลอมเหลว ก่อนที่จะเริ่มการหล่อให้แข็งตัว

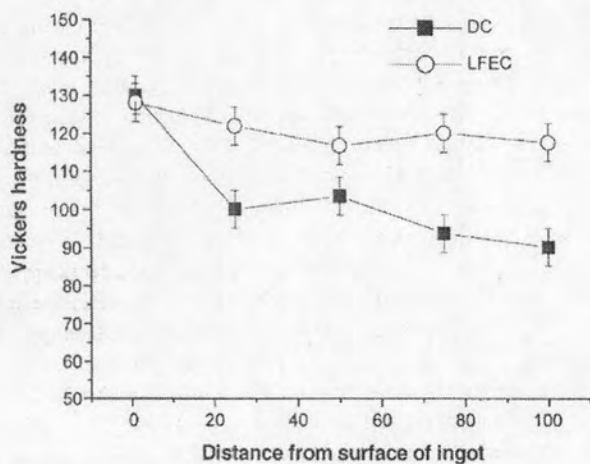


ภาพที่ 2.3 การกระจายตัวของธาตุผสมในแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง เปรียบเทียบกันระหว่างที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.



180

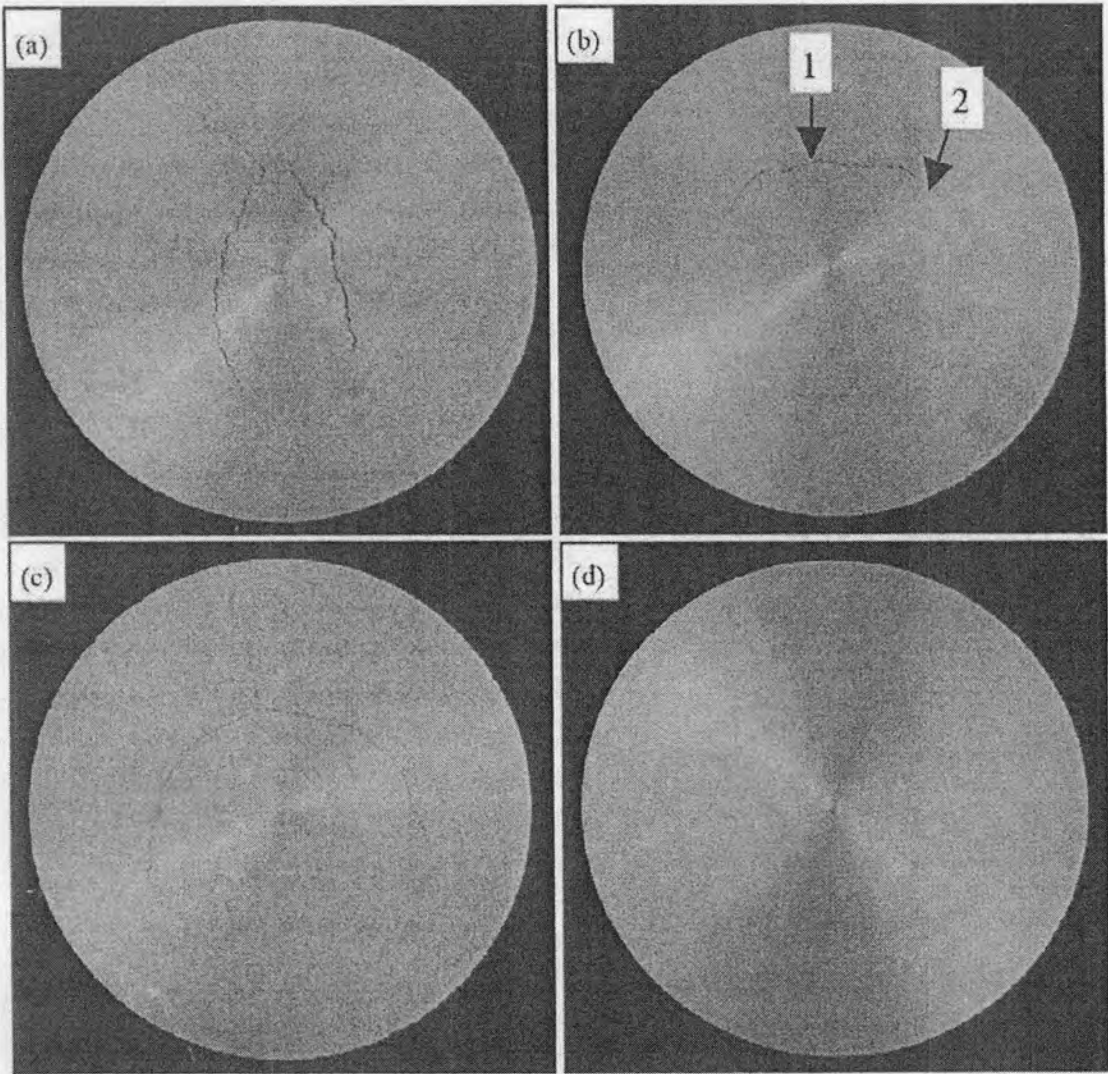
Y. Zuo et al. / Materials Science and



ภาพที่ 2.4 การเปรียบเทียบสมบัติทางกลระหว่างแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื้ออะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกลเปรียบเทียบระหว่างแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื้ออะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท DC. กับ LFEC.

	ความต้านทานแรงดึงสูงสุด	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว
DC	213 MPa	0.2 %
LFEC	265 MPa	1.67 %



ภาพที่ 2.5 เปรียบเทียบการเกิดรอยร้าวภายในแท่งโลหะหล่ออย่างต่อเนื่องอะลูมิเนียมผสมสังกะสี-แมกนีเซียม-ทองแดง ที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท DC. (ภาพ a, b, c พบรอยแตกร้าว โดยตัวเลข 1, 2 ในภาพ b ชี้ระบุตำแหน่งแนวรอยแตกร้าว) กับ LFEC. (ภาพ d ไม่เกิดรอยแตกร้าว)



2.3 แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับรูปแบบและสมการการแข็งตัว

การศึกษาเพื่อที่จะให้เข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรม การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวใดๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะหลอมเหลวที่มีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วยนั้น ยิ่งทำให้การศึกษารูปแบบการแข็งตัวจะมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวนั้นมีหลายปัจจัยด้วยกันเช่น ส่วนผสมทางเคมีเริ่มต้น, อัตราการเย็นตัว, เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว, อัตราการโตของdendrite, สัดส่วนมวลที่แข็งตัวแล้วที่อุณหภูมิใดๆ และการเกิดการแพร่ระหว่างการแข็งตัว เป็นต้น ซึ่งจะพบว่าการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวจึงเป็นเรื่องที่ยาก

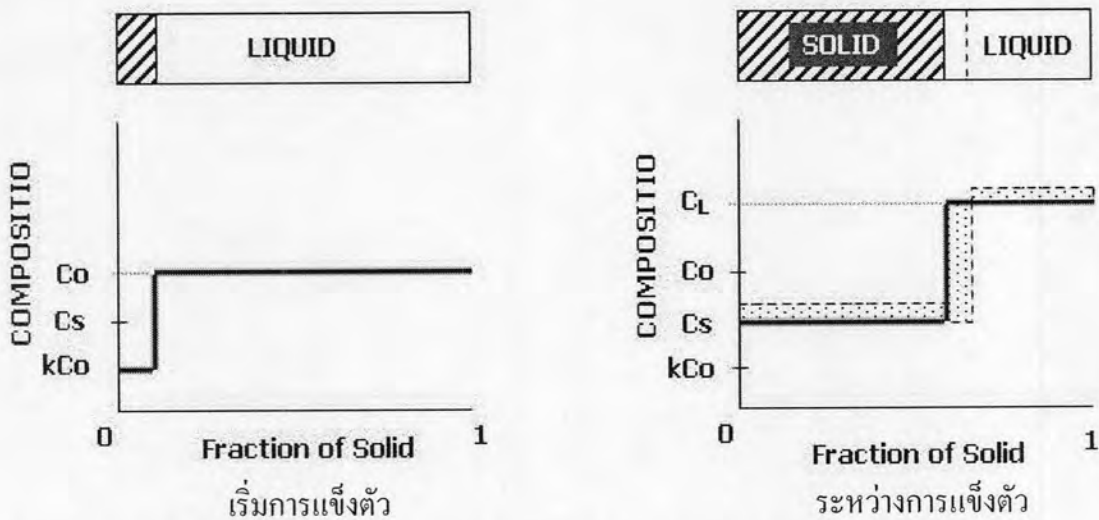
อย่างไรก็ดีเพื่อที่จะใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวนั้นมาช่วยทำความเข้าใจและ ใช้อธิบายเรื่องราวในการทำวิจัยครั้งนี้ที่เกี่ยวกับการพิจารณาการแข็งตัวโดยคำนึงถึง Solute Redistribution จึงได้สรุปแนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับรูปแบบและสมการการแข็งตัวแบ่งตามแบบจำลองดังนี้^[10, 14, 16]

1. รูปแบบ Equilibrium Solidification ที่มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลวกับบางส่วนของที่แข็งตัวแล้ว เนื่องจากการแพร่ที่เกิดขึ้นทั้งในของแข็งและของเหลวเกิดได้เร็วเพียงพอ หรืออีกนัยหนึ่งคือเวลาในการแข็งตัวมีมากพอให้การแพร่ทั้งในของแข็งและของเหลวเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งในกรณีนี้จะไม่เกิดโครงสร้างที่ต่างจากที่ควรจะปรากฏในแผนภูมิสมมูลและไม่เกิด Micro Segregation นั่นเอง ด้วยเหตุนี้การแข็งตัวในรูปแบบจำลองนี้จึงเป็นไปตามแผนภูมิสมมูล และสามารถคำนวณความสัมพันธ์ของส่วนผสมต่างๆ ได้จาก Lever Rule
2. รูปแบบของ Gulliver-Scheil มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลว และในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะไม่มีการแพร่ของธาตุผสมเกิดขึ้นเลย แต่ระหว่างการแข็งตัวจะสมมติให้เกิดสถานะสมมูลที่ผิวรอยต่อระหว่างของแข็งกับของเหลวไว้เสมอ ดังนั้นส่วนที่แข็งตัวก่อนและหลังจะมีความเข้มข้นของธาตุผสมต่างกัน ซึ่งในกรณีนี้อาจจะเกิดโครงสร้างที่ต่างจากที่ควรจะปรากฏในแผนภูมิสมมูลและเกิด Micro Segregation ได้

3. รูปแบบของ Clyne & Kurz มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลวแต่ในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของธาตุผสมที่เกิดจากการแพร่ ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงที่เห็นความแตกต่างชัดเจน แต่อัตราการแพร่ถือว่ายังเกิดช้าอยู่ ซึ่งอาจโครงสร้างที่ต่างจากที่ควรจะปรากฏในแผนภูมิสมดุลหรือที่เรียกว่าการเกิด Micro Segregation นั้นเอง แต่จะไม่รุนแรงเท่ากับที่เกิดในแบบจำลองของ Gulliver-Scheil
4. รูปแบบของ Umeda, Kurz & Himemiya ไม่มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลวและ ในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะไม่มี การแพร่ของธาตุผสมเกิดขึ้นเลย
5. รูปแบบของ Umeda & Himemiya, Nastac & Stefanescu ไม่มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลวและ ในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะมีการแพร่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของธาตุผสมอยู่ตลอดเวลาในระหว่างการแข็งตัว

ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะรูปแบบจำลองการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว 3 รูปแบบแรกคือรูปแบบของ Equilibrium Solidification, รูปแบบของ Gulliver-Scheil และรูปแบบของ Clyne & Kurz ซึ่งมีสมมติฐานและการคำนวณด้วยสมการดังต่อไปนี้

1. รูปแบบของ Equilibrium Solidification ที่มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลวกับบางส่วนที่แข็งตัวแล้ว เนื่องจากการแพร่ที่เกิดขึ้นทั้งในของแข็งและของเหลวเกิดได้เร็วเพียงพอ หรืออีกนัยหนึ่งคือเวลาในการแข็งตัวมีมากพอให้การแพร่ทั้งในของแข็งและของเหลวเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ดังแผนภาพข้างล่างนี้



ภาพที่ 2.6 Solute Redistribution ตามรูปแบบของ Equilibrium Solidification

การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) สำหรับรูปแบบของ Equilibrium Solidification จะมีขั้นตอนดังนี้คือเริ่มที่สมการแสดงความสมดุลของมวลสาร โดยมวลสารที่แพร่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างส่วนที่เป็นของเหลวกับของแข็งจะเท่ากับผลรวมของมวลสารที่แพร่ภายในส่วนที่เป็นของเหลว และมวลสารที่แพร่ภายในส่วนของแข็ง

$$C_s f_s + C_L f_L = C_o \tag{2.1}$$

โดยปรับรูปสมการโดยใช้นิยามของสัดส่วนปริมาณโลหะที่แข็งตัวแล้ว f_s และ k , อัตราส่วนความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวที่สมดุล

$$f_s = \frac{C_L^* - C_O}{C_L^* - C_S^*} \quad (2.2)$$

$$k = \frac{C_S^*}{C_L^*} \quad (2.3)$$

ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) คือ

$$C_s = kC_o / [1 + (k - 1) f_s] \quad (2.4)$$

เมื่อสัญลักษณ์ในสมการเป็นการแทนค่าความหมายของปริมาณต่างๆดังนี้

C_o คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะหลอมเหลว

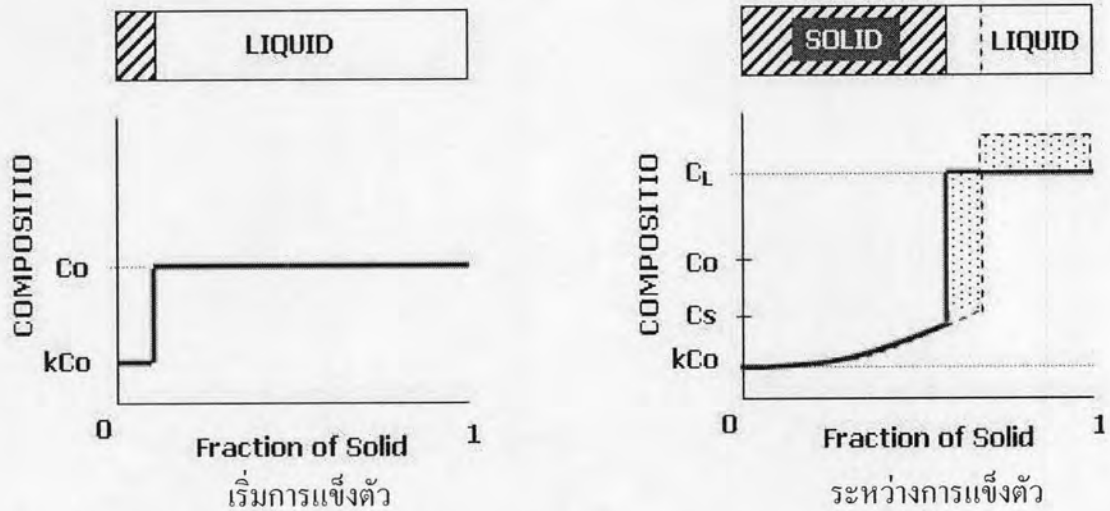
C_s, C_L คือ ความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวตามลำดับ

f_s, f_L คือ สัดส่วนปริมาณโลหะที่แข็งตัวแล้ว และสัดส่วนปริมาณที่หลอมเหลวยู่ตามลำดับ

C_s^*, C_L^* คือ ความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวบริเวณผิวรอยต่อตามลำดับ

k คือ อัตราส่วนความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวที่สมดุล ณ บริเวณผิวรอยต่อระหว่างส่วนที่เป็นของเหลวกับของแข็ง

2. รูปแบบของ Gulliver-Scheil มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลว และในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะไม่มี การแพร่ของธาตุผสมเกิดขึ้นเลย แต่ระหว่างการแข็งตัว จะสมมติให้เกิดสภาวะสมดุลที่ผิวรอยต่อระหว่างของแข็งกับของเหลวไว้เสมอ ดังนั้นส่วนที่แข็งตัวก่อนและหลังจะมีความเข้มข้นของธาตุผสมต่างกัน ดังแผนภาพข้างล่างนี้



ภาพที่ 2.7 Solute Redistribution ตามรูปแบบของ Gulliver-Scheil

การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) สำหรับรูปแบบของ Gulliver-Scheil จะมีขั้นตอนดังนี้ คือเริ่มที่สมการแสดงความสมดุลของมวลสาร โดยมวลสารที่แพร่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างส่วนที่เป็นของเหลวกับของแข็งจะเท่ากับ มวลสารเฉพาะที่แพร่ภายในส่วนที่เป็นของเหลวเท่านั้น เนื่องจากจะไม่มี การแพร่ของธาตุผสมเกิดขึ้นเลยในส่วนของแข็ง

$$(C_L^* - C_S^*)df_s = (1 - f_s)dC_L^* \tag{2.5}$$

ปรับรูปสมการเพื่อใช้ในการปฏิยานุพันธ์

$$\frac{dC_L^*}{(C_L^* - C_S^*)} = \frac{df_s}{(1 - f_s)} \tag{2.6}$$

ปรับรูปสมการโดยใช้นิยามของ k , อัตราส่วนความเข้มข้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่แข็งตัวแล้ว กับที่หลอมเหลวที่สมดุลตามสมการ 2.3

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

และทำการปฏิยานุพันธ์สมการดังนี้

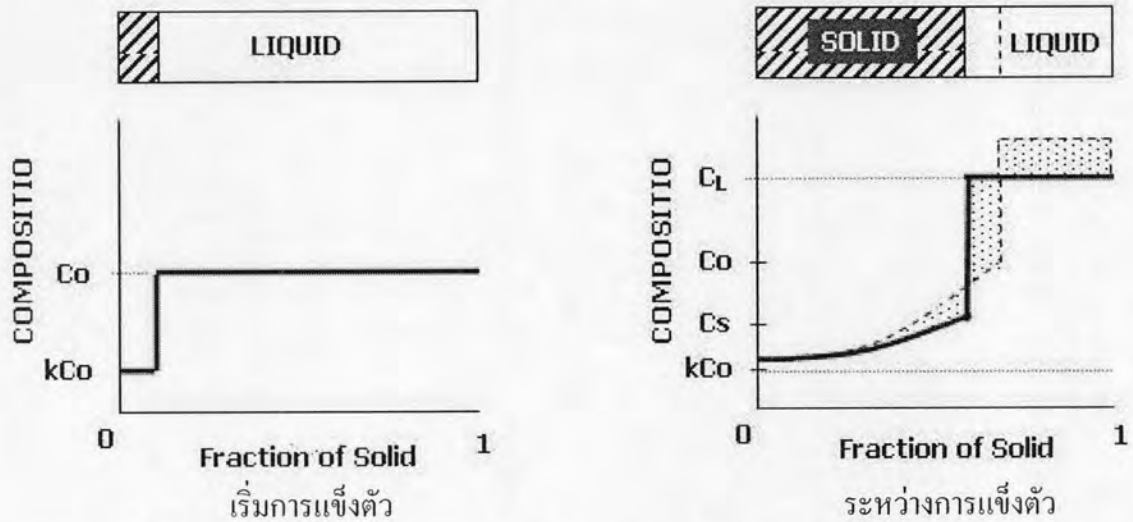
$$\frac{1}{k} \int_{C_o}^{C_s} \frac{dC_s^*}{C_s^*} = \int_{f_s} \frac{df_s}{(1-f_s)} \quad (2.7)$$

ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) ดังนี้

$$C_s^* = kC_o [1 - f_s]^{k-1} \quad (2.8)$$

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานของพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว เป็นรูปแบบและสมการการแข็งตัวแบบของ Gulliver-Scheil ที่มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลว และในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะไม่มี การแพร่ของธาตุผสมเกิดขึ้นเลย แต่ระหว่างการแข็งตัวจะสมมติให้เกิดสภาวะสมดุลที่ผิวรอยต่อระหว่างของแข็งกับของเหลวไว้เสมอ ดังนั้นส่วนที่แข็งตัวก่อนและหลังจะมีความเข้มข้นของธาตุผสมต่างกัน ซึ่งแบบจำลองการแข็งตัวในรูปแบบและสมการการแข็งตัวของ Gulliver-Scheil เป็นการคำนวณวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลที่แข็งตัวแล้ว (f_s) กับอุณหภูมิ (T) หรือความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) หรือความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับอุณหภูมิ (T) ที่ไม่ได้ใช้สมการที่ซับซ้อน เนื่องจากไม่ต้องคำนึงถึงอิทธิพลของสัมประสิทธิ์การแพร่ เพียงแต่คำนวณหาความเข้มข้นในส่วนที่แข็งตัวแล้ว และสามารถนำมาอธิบายพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวในงานวิจัยนี้ได้เหมาะสมและเข้าใจง่าย

3. รูปแบบของ Clyne & Kurz มีความสม่ำเสมอของความเข้มข้นของธาตุผสมในส่วนที่เป็นของเหลวแต่ในส่วนที่แข็งตัวแล้วจะพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของธาตุผสมที่เกิดจากการแพร่ ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงที่เห็นความแตกต่างชัดเจน แต่อัตราการแพร่ถือว่ายังเกิดขึ้นอยู่ ดังแผนภาพข้างล่างนี้



ภาพที่ 2.8 Solute Redistribution ตามรูปแบบของ Clyne & Kurz

ดังนั้นสมการในการแข็งตัวจึงต้องคำนึงถึง ปรากฏการณ์ที่เป็นผลมาจากอิทธิพลของการแพร่ที่เกิดขึ้นส่วนที่เป็นของแข็ง ซึ่งการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) สำหรับรูปแบบของ Clyne & Kurz จะมีขั้นตอนที่เริ่มต้นจากสมการแสดงความสมดุลของมวลสาร โดยมวลสารที่แพร่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างส่วนที่เป็นของเหลวกับของแข็ง จะเท่ากับผลรวมของมวลสารที่แพร่ภายในส่วนที่เป็นของเหลวและมวลสารที่แพร่ภายในส่วนของแข็ง โดยจะใช้ค่า α หรือเวลาในการแข็งตัวแบบไร้หน่วย มาใช้ในการคำนวณร่วมกับสมการ 2.8 ซึ่งจะได้สมการสำหรับคำนวณการแข็งตัวเป็น

$$C_s^* = kC_o \left[1 - (1 - 2\alpha k) f_s \right]^{\frac{k-1}{1-2\alpha k}} \tag{2.9}$$

ซึ่งค่า α หรือเวลาในการแข็งตัวแบบไร้หน่วยนั้นสามารถคำนวณหาโดยคำนวณผ่านสมการการแพร่ และพิจารณาถึงอิทธิพลของสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ค่าต่างๆกันจากสมการ

$$D_s = D_o \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.10)$$

เมื่อสัญลักษณ์ในสมการเป็นการแทนค่าความหมายของปริมาณต่างๆดังนี้

D_s คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ชนิด self-diffusion coefficient หน่วยเป็น m^2/s

D_o คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ที่เรียกว่า frequency factor หน่วยเป็น m^2/s

Q คือ พลังงานในการแพร่ หน่วยเป็น J

R คือ ค่าคงที่ 8.314 หน่วยเป็น J/K

T คือ อุณหภูมิ หน่วยเป็น K

ซึ่งสามารถหาค่า D_o จากตารางที่ 2.7 ได้

เมื่อได้ค่า D_s จากสมการ 2.10 จึงนำไปคำนวณต่อเป็นหาค่า α จากสมการ

$$\alpha = \frac{D_s \cdot t_f}{L^2} \quad (2.11)$$

เมื่อสัญลักษณ์ในสมการเป็นการแทนค่าความหมายของปริมาณต่างๆดังนี้

t_f คือ เวลาในการแข็งตัว หน่วยเป็น s

L คือ ระยะความกว้างครึ่งหนึ่งของขนาด dendrite หน่วยเป็น m

นั่นแสดงว่าจากสมการการแข็งตัวของ Clyne & Kurz ที่ 2.9 ก็สามารถพิจารณาเป็นสมการการแข็งตัวของ Gulliver-Scheil ได้เมื่อไม่คำนึงถึงการแพร่ที่เกิดขึ้นส่วนที่เป็นของแข็ง โดยจะใช้ค่า α เป็น 0 นั่นเอง แต่ในบางครั้งของรูปแบบการแข็งตัวแบบที่มีการแพร่เกิดขึ้นส่วนที่เป็นของแข็ง นั้น อาจมีบางครั้งที่ปัจจัยของปรากฏการณ์การแข็งตัวและการแพร่ส่งผลให้ค่า α มีค่ามาก (สูงเกิน 50) ซึ่งในกรณีนี้ สมการการแข็งตัวของ Clyne & Kurz ที่ 2.9 จะไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการคำนวณโดยการใช้ค่า α ด้วยเหตุนี้ สมการการแข็งตัวของ Clyne & Kurz จึงจำเป็นต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้เวลาในการแข็งตัวแบบไร้หน่วย เป็นค่า Ω และจะหาค่า Ω จากสมการ

$$\Omega = \alpha \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha}\right) \right] - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{1}{2\alpha}\right) \quad (2.12)$$

จึงทำให้ได้สมการการแข็งตัวของ Clyne & Kurz ใหม่ที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับสัดส่วนมวลที่แข็งแล้ว (f_s) ดังนี้

$$C_s^* = [1 - (1 - 2\Omega k) f_s]^{k-1} \quad (2.13)$$

และนำมาพิจารณาร่วมกับสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนผสมของธาตุต่างๆ (% Composition) กับอุณหภูมิ (T) ใดๆ ที่เป็นไปตามสมการ

$$\frac{C_s}{kC_o} = \frac{T_m - T}{T_m - T_L} \quad (2.14)$$

เมื่อสัญลักษณ์ในสมการเป็นการแทนค่าความหมายของปริมาณต่างๆดังนี้

T คือ อุณหภูมิ หน่วยเป็น K

T_M คือ อุณหภูมิหลอมเหลว หน่วยเป็น K

T_L คือ อุณหภูมิของเหลวที่ความเข้มข้นเริ่มแรก หน่วยเป็น K

เมื่อพิจารณาสมการ 2.9 ร่วมกับสมการ 2.13 จะได้สมการ

$$\frac{C_s}{kC_o} = [1 - (1 - 2\Omega k) f_s]^{k-1} \quad (2.15)$$

สุดท้ายเมื่อสร้างความสัมพันธ์ใหม่จากสมการ 2.14 กับสมการ 2.15 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลที่แข็งตัวแล้ว (f_s) กับอุณหภูมิ (T) ของสมการการแข็งตัวของ Clyne & Kurz ดังนี้

$$f_s = \frac{1 - \left[\frac{(T_m - T)}{(T_m - T_L)} \right]^{k-1}}{1 - 2\Omega k} \quad (2.16)$$

ตารางที่ 2.7 ค่า D_0 และ Q ที่มีอิทธิพลมาจากธาตุผสมต่างๆ สำหรับหาค่า D_s ในโลหะผสม อะลูมิเนียม

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