

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติอะลูมิเนียม

โลหะได้มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาของประเทศที่เจริญทางด้านอารยธรรม (civilization) เมื่อก้าวถึงโลหะโดยทั่วไปจะนึกถึงเหล็ก นอกจากเหล็กแล้วยังมีอะลูมิเนียมซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง เนื่องจากมีสมบัติพิเศษ สามารถใช้งานแทน ไม้ ทองแดง เหล็ก และ เหล็กกล้าได้ดี อะลูมิเนียมจัดอยู่ในกลุ่มโลหะนอกกลุ่มเหล็ก และสามารถผสมกับ ทองแดงเป็นโลหะผสมได้ดีราวกับผสมกับ ตะกั่ว ดีบุก และ สังกะสี ในยุคแรกอะลูมิเนียมไม่ได้เป็นที่ยอมรับในทางการค้าจนกระทั่งมาถึงคริสต์วรรษที่ 19 เนื่องจากอะลูมิเนียมอยู่ในรูปของ สารประกอบออกไซด์ซึ่งไม่สามารถแยกออกได้ง่ายด้วยคาร์บอนเช่นเดียวกับเหล็ก

เริ่มแรกได้มีการผลิตอะลูมิเนียมในรูปแบบสะเกลดห้องปฏิบัติการ โดยคุณอออสเตด (Orsted) ประเทศเดนมาร์ก ในปี ค.ศ. 1825 จากนั้นคุณ วัลท์เลอร์ (Woehler) ชาวเยอรมัน พัฒนาการวิธีการถลุงแร่โดยใช้เวลาน้อยลง จากนั้นผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมเริ่มเป็นที่รู้จักกันในด้าน ทางการค้าในปี ค.ศ. 1855 โดยคุณแซนต์-แคร์ (Sainte-Claire) ประเทศฝรั่งเศส โดยใช้เทคนิค ทางด้านเคมีซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่สิ้นเปลืองมาก

ในปี ค.ศ. 1866 เวอร์เนอร์ วอน ซิเมน (Werner von Siemens) ได้ประดิษฐ์ไดนาโมขึ้น ถึงแม้ว่าในความเป็นจริงจะไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับอะลูมิเนียม แต่สิ่งประดิษฐ์ดังกล่าวมีบทบาท สำคัญมากเนื่องจากสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในปริมาณมากสำหรับอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมใน ยุคแรก

ในปี ค.ศ. 1886 คุณ ชาลส์เลต มาร์ติน ฮอลล์ (Charles Martin Hall) ชาวอเมริกัน และ คุณ พอล เฮอรัลด์ (Paul L.T. He'roult) ชาวฝรั่งเศส ได้ค้นพบกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมทางการค้า โดยใช้หลักการอิเล็กโทรไลซิสจากอ่างเกลือหลอมเหลว (fuse salt bath) ซึ่งกรรมวิธีดังกล่าว เป็นพื้นฐานการผลิตอะลูมิเนียม[9]

2.2 อะลูมิเนียมและโลหะผสมของอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมและโลหะผสมของอะลูมิเนียมมีความหนาแน่นต่ำ (2.7 g/cm^3) นำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี ทนการกัดกร่อนดีในสภาวะแวดล้อมบางสภาวะรวมทั้งในบรรยากาศ โลหะอะลูมิเนียมง่ายต่อการขึ้นรูปเนื่องจากมีความเหนียวสูง เช่นอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ได้จากการรีดอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เนื่องจากอะลูมิเนียมมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC จึงมีสมบัติเหนียวแม่ที่อุณหภูมิต่ำ อะลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวต่ำ ($660 \text{ }^\circ\text{C}$, $1220 \text{ }^\circ\text{F}$) ทำให้ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ได้

สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมอาจเพิ่มขึ้นได้โดยการขึ้นรูปเย็นและการเติมธาตุผสม แต่วิธีการดังกล่าวทำให้ สมบัติด้านทานการกัดกร่อนลดลง ธาตุที่นิยมใช้ผสมเป็นหลักคือ ทองแดง แมกนีเซียม ซิลิกอน แมงกานีส และ สังกะสี โลหะผสมที่ไม่สามารถอบชุบได้จะประกอบด้วยเฟสเดียวทำให้การเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการทำให้เป็นสารละลายของแข็งเท่านั้น สำหรับอะลูมิเนียมผสมอื่นๆ สามารถอบชุบได้ (ชุบแข็งแบบตกตะกอน) เพราะธาตุผสมที่เติมลงไปทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสที่สอง ซึ่งอาจไม่ใช่สารประกอบอะลูมิเนียมก็ได้ เช่น MgZn_2

โดยทั่วไปโลหะผสมของอะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะหล่อและโลหะผสมขึ้นรูปทางกล ส่วนผสมทางเคมีทั้ง 2 กลุ่มบอกด้วยตัวเลข 4 หลัก ซึ่งหมายถึงปริมาณสารเจือปน และบางกรณีบ่งชี้ความบริสุทธิ์ สำหรับโลหะหล่อจุดทศนิยมจะอยู่ระหว่างสองหลักสุดท้าย หลังจากเลขสองหลักนี้จะเป็นเครื่องหมายขีดกลางและข้อกำหนดกรรมวิธีทางความร้อน (temper designation) ซึ่งเป็นตัวอักษรหรือเลข 1-3 หลักจะบ่งบอกสมบัติทางกลและกรรมวิธีทางความร้อนใดๆ ต่อ (as-fabricated) H หมายถึงสภาพเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด (strain hardened) และ O หมายถึงสภาพที่ผ่านการอบอ่อน และ T3 หมายถึง โลหะผสมถูกอบละลายเป็นเนื้อเดียว ผ่านการรีดเย็นแล้วการบ่มแข็งธรรมชาติ แต่ถ้าโลหะผสมผ่านการอบละลายเป็นเนื้อเดียวกันและตามด้วยบ่มเร่งจะใช้สัญลักษณ์ T6 ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมทางเคมี คุณสมบัติ และการใช้โลหะผสมของอะลูมิเนียมบางชนิดทั้งกลุ่มโลหะหล่อและโลหะขึ้นรูปทางกล โลหะผสมของอะลูมิเนียมใช้ทำตัวเครื่องบิน อากาศยาน กระป๋องเบียร์ ตัวรถโดยสาร ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น เครื่องยนต์ ลูกสูบ และส่วนนำเชื้อเพลิงหรือท่อก๊าซไอเสีย

ตาราง 2.1 ส่วนผสมทางเคมี สมบัติทางกล และ การใช้ สำหรับโลหะผสมของอะลูมิเนียมหลายชนิด

Aluminium Association Number	UNS Number	Composition (%wt)	Condition (Temper Designation)	Mechanical Properties			Typical Application/ Characteristics
				Tensile Strength [MPa (psi)]	Yield Strength [MPa (psi)]	Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]	
Wrought, Nonheat-treatable Alloys							
1100	A91100	0.12Cu	Annealed (o)	90 (13)	35 (5)	35-45	Food/chemical Handling and storage equipment, heat exchangers, light reflectors
3003	A93003	0.12Cu, 1.2Mn, 0.1 Zn	Annealed (o)	110 (16)	40 (6)	30-40	Cooking utensils, pressure vessels and piping
5052	A95052	2.5 Mg, 0.25Cr	Strain Hardened (H32)	230 (33)	195 (28)	12-18	Aircraft fuel and oil lines, fuel tanks, appliances, rivets and wire
Wrought, Heat-Treatable Alloys							
2024	A92024	4.4Cu, 1.5 Mg, 0.6Mn	Heat treated (T4)	470 (68)	325 (47)	20	Aircraft structures, rivets, truck wheels, screw machine products
6061	A96061	1.0Mg, 0.6Si, 0.3 Cu, 0.2 Cr	Heat treated (T4)	240 (35)	145 (21)	22-25	Trucks, canoes, rail-road cars, furniture, pipelines
7075	A97075	5.6 Zn, 2.5 Mg, 1.6 Cu, 0.23 Cr	Heat treated (T6)	570 (83)	505 (73)	11	Aircraft structural parts and other highly stressed applications
Cast, Heat-Treatable Alloys							
295.0	A02950	4.5Cu, 1.1Si	Heat treated (T4)	221 (32)	110 (16)	8.5	Flywheel and rear-axle housings, bus and aircraft wheels, crankcases
356.0	A0356.0	7.0 Si, 0.3 Mg	Heat treated (T6)	228 (33)	164 (24)	3.5	Aircraft pump parts, automotive transmission cases water-cooled cylinder blocks
Aluminium-Lithium Alloys							
2090	-	2.7Cu, 0.25Mg, 2.25 Li, 0.12Zr	Heat treated, Cold worked (T83)	465 (66)	455 (66)	5	Aircraft structures and cryogenic tankage structures
8090	-	1.3Cu, 0.95Mg, 2.0Li, 0.1 Zr	Heat treated, Cold worked (T651)	465 (67)	360 (52)	-	Aircraft structures that must be highly damage tolerant

^a The balance of the composition is aluminium [1]

ปัจจุบันได้มีการสนใจนำอะลูมิเนียมและโลหะอื่นที่มีความหนาแน่นต่ำ อาทิเช่น แมกนีเซียม และ ไททาเนียม มาประยุกต์ใช้ในการขนส่งเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิง เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีสมบัติที่สำคัญ เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific Strength) หมายถึงอัตราส่วนความแข็งแรงหรือกำลังวัสดุต่อความถ่วงจำเพาะ แม้ว่าโลหะผสมของอะลูมิเนียมอาจมีค่าความแข็งแรงต่ำเมื่อเทียบกับโลหะอื่นที่มีความหนาแน่นสูงกว่า เช่น เหล็ก แต่เมื่อเทียบภาระที่รับได้ต่อหน่วยน้ำหนักแล้วอาจสูงกว่า เพราะว่ามีค่าความแข็งแรงจำเพาะสูง

นอกจากนั้นยังได้พัฒนาโลหะผสมอะลูมิเนียม-ลิเทียม ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องบิน ยานอวกาศ เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ (2.5 และ 2.6 g/cm^3) มีค่ามอดุลัสจำเพาะสูง ทนทานความล้าได้ดีมาก และมีค่าความแกร่งสูงแม้จะใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุบางชนิดยังสามารถชุบแข็งแบบตกตะกอนได้ อย่างไรก็ตามการผลิตโลหะผสมนี้มีราคาแพงกว่าการผลิตโลหะผสมของอะลูมิเนียมทั่วไปเพราะว่าต้องใช้กระบวนการเทคนิคพิเศษเนื่องจากลิเทียมอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ [9]

2.3 อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น และ อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม (Wrought Aluminium and Wrought Aluminium Alloys)

อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น และ อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม (Wrought Aluminium and Wrought Aluminium Alloys) สามารถจำแนกออกโดยใช้ตัวเลข 4 หลัก โดยตัวเลขหลักที่หนึ่งเป็นการแบ่งกลุ่มของอะลูมิเนียมซึ่งสามารถแบ่งได้ 9 กลุ่มดังที่แสดงในตารางที่ 2.2

ตาราง 2.2 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น และ อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม [10]

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1XXX	อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99 เปอร์เซ็นต์
2XXX	ทองแดง (Copper, Cu)
3XXX	แมงกานีส (Manganese, Mn)
4XXX	ซิลิกอน (Silicon, Si)
5XXX	แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)
6XXX	แมกนีเซียมกับซิลิกอน (Magnesium, Mg and Silicon, Si)
7XXX	สังกะสี (Zinc, Zn)
8XXX	ธาตุอื่นๆ (Other Element)
9XXX	ยังไม่มีใช้ (Unused Series)

- อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (อนุกรม 1XXX) ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมจะมีความบริสุทธิ์ของอะลูมิเนียมที่ 99.0 เปอร์เซ็นต์ ถึง 99.9เปอร์เซ็นต์ อะลูมิเนียมในกลุ่มนี้มีความต้านทาน การกัดกร่อนได้ดี สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และยังสามารดสะท้อนแสงได้ดีจึงนิยมใช้ในการผลิตแผงสะท้อนแสงในไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัด เลื่อน และขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่างๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีข้อเสียคือในด้านของความแข็งแรง และคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจืออื่นเพื่อให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็นคือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น (Strain Hardening)
- อะลูมิเนียมเจือทองแดง (อนุกรม 2XXX) เป็นอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง คุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยการวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และ ชุบ (Quenching) จากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการอบบ่ม (Ageing Hardening) ซึ่งภายหลังการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลง และความสามารถในการเชื่อมของอะลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำกว่าชนิดอื่นๆ คือจะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีทางกลคือการย้ำหุ้ม
- อะลูมิเนียมเจือแมงกานีส (อนุกรม 3XXX) เป็นอะลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติ เหมือนกับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้
- อะลูมิเนียมเจือซิลิกอน (อนุกรม 4XXX) อะลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะไหลตัวได้ดีและขณะแข็งตัวจะไม่เกิดการแตกร้าวทั้งในสภาพร้อนและเย็น ดังนั้นอะลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติมสำหรับเชื่อมอะลูมิเนียมเจือและอะลูมิเนียมหล่อ
- อะลูมิเนียมเจือแมกนีเซียม (อนุกรม 5XXX) บางครั้งมีการเติมแมงกานีสลงไปด้วย อะลูมิเนียมเจือชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ นิยมนำไปทำลวดเติมสำหรับเชื่อมเหมือนกับอนุกรม 4XXX นอกจากนี้ยังนิยมนำไปทำเป็นถังหรือขวดบรรจุแก๊ส (Storage Vessels)
- อะลูมิเนียมเจือแมกนีเซียม – ซิลิกอน (อนุกรม 6XXX) อะลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสียคือเมื่อนำอะลูมิเนียมเจือชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วย

กรรมวิธีการให้ความร้อนแบบต่างๆ จะทำให้บริเวณแนวเชื่อมอ่อน

- อะลูมิเนียมเจือสังกะสี - แมกนีเซียม (อนุกรม 7XXX) อะลูมิเนียมชนิดนี้มีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักและแมกนีเซียมเป็นธาตุรองนอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อย อะลูมิเนียมเจือกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อม อะลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาอะลูมิเนียมชนิดนี้โดยการผสมแมกนีเซียมลงไปและกำจัดทองแดงออกไปทำให้ความสามารถในการเชื่อมของอะลูมิเนียมชนิดสูงขึ้น โดยจะไม่เกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อมเพราะบริเวณดังกล่าวได้เกิดการแข็งตัวจากตกตะกอนตามธรรมชาติ

2.3.1 อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิกอน หมายเลข 6063

ตามมาตรฐานของ TIMCO-STANDARD-TANDEM อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิกอนหมายเลข 6063 มีส่วนผสมทางเคมี ตามตารางที่ 2.3 นอกจากนี้ อะลูมิเนียมหมายเลขนี้ยังมีสมบัติทางอุณหภูมิ และ สมบัติเชิงกลที่สำคัญ ตามตารางที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

ตาราง 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนหมายเลข 6063 ตามมาตรฐานของ TIMCO-STANDARD-TANDEM [11]

ธาตุที่ผสม	ปริมาณธาตุที่ผสม (%)	
	6063 Registered by USA	6063A Registered by UK
ซิลิกอน (Si)	0.20-0.60	0.30-0.60
เหล็ก (Fe)	0.35	0.15-0.35
ไททานเนียม (Ti)	0.10	0.10
ทองแดง (Cu)	0.10	0.10
แมกนีเซียม (Mg)	0.45-0.90	0.60-0.90
สังกะสี (Zn)	0.10	0.15
แมงกานีส (Mn)	0.10	0.15
โครเมียม (Cr)	0.10	0.05
อื่นๆ	0.05	0.05

ตาราง 2.4 คุณสมบัติทางอุณหภูมิของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและ ซิลิกอนหมายเลข 6063 [12]

คุณสมบัติทางอุณหภูมิ (Thermal Properties)	
อุณหภูมิลดอมเหลว	655 °C
อุณหภูมิแข็งตัว	615 °C
สัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ 20 °C	23.4 um/m.K
ความร้อนจำเพาะ	900 J/Kg.K
ความหนาแน่น	2.96 g/cm ³

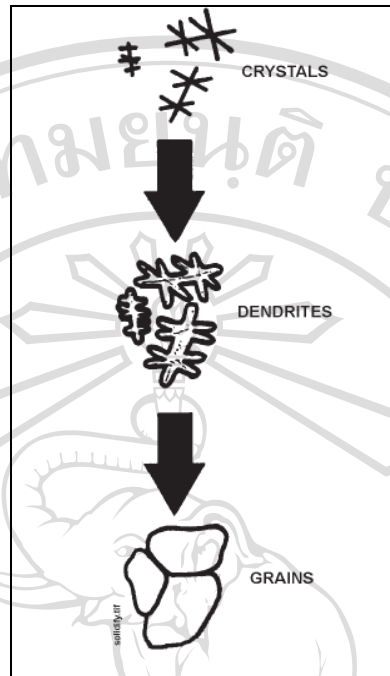
ตาราง 2.5 คุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและ ซิลิกอนหมายเลข 6063 [12]

Temper	Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Elongation (%)	Hardness (HB)	Shear Strength (Mpa)
O	90	48	---	25	69
T1	152	90	20	42	97
T4	172	90	22	---	---
T5	186	145	12	60	117
T8	241	214	12	73	152
T83	255	241	9	82	152
T831	207	186	10	70	124
T832	290	269	12	95	186

2.3.2 การประยุกต์ใช้งานของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน หมายเลข 6063

อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิกอนหมายเลข 6063 ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานหลายด้าน อาทิเช่น ราวรั้ว อานม้า ประตู หน้าต่าง ท่อน้ำ กระจับของรถบรรทุก

2.4 กระบวนการแข็งตัวของอะลูมิเนียมเหลว



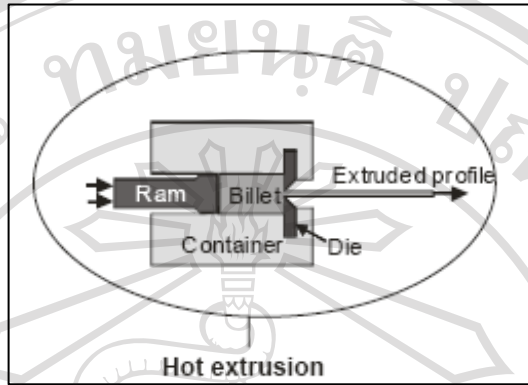
รูป 2.1 กลไกการแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียม [13]

กระบวนการแข็งตัวของอะลูมิเนียมจะเริ่มจากการโตของผลึกนิวเคลียส (nucleus) ซึ่งในกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมแท่งนั้นจะใช้ไททาเนียมโบรอน ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียส เนื่องจากเป็นนิวเคลียสแบบเฮกซะโกนัลที่มีโครงสร้างคล้ายกับอะลูมิเนียม ขนาดของเกรน (grain size) ของอะลูมิเนียมแท่งขึ้นอยู่กับจำนวนนิวเคลียสที่เติมลงไป ถ้ามีจำนวนมากขนาดของเกรนก็จะมีขนาดเล็กลง ซึ่งกลไกการแข็งตัวของอะลูมิเนียมนั้นจะมีลักษณะดังรูป 2.1 เริ่มแรกมีนิวเคลียสหรือผลึกเล็ก ๆ เกิดขึ้น จากนั้นผลึกดังกล่าวจะเริ่มโตขึ้นเรื่อยๆ มีโครงสร้างคล้ายกับกิ่งไม้ เรียกว่าเดนไดรต์ จากนั้นเดนไดรต์แต่ละเดนไดรต์ก็จะโตขึ้น ขยายขนาดเพิ่มขึ้นจนชนกันกลายเป็นขอบเกรน (grain boundary) และธาตุที่เติมลงในอะลูมิเนียมผสม อาทิเช่น แมกนีเซียม ซิลิกอน หรือ สิ่งเจือปนอื่นๆ ที่ผสมในอะลูมิเนียมเหลว จะแทรกตัวอยู่รอบๆแกนของเดนไดรต์หรือ ขอบเกรนเมื่ออะลูมิเนียมแข็งตัวแล้ว เมื่อกระบวนการแข็งตัวสมบูรณ์แล้ว เดนไดรต์ก็จะฟอร์มตัวเป็นเกรน [13]

2.5 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion process)

กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปคือ กรรมวิธีที่แท่งโลหะจะถูกอัดผ่านแม่พิมพ์ด้วยแรงกดที่ส่งผ่านทางหัวกด (ram) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีรูปร่างตามต้องการและพื้นที่หน้าตัดลดลง ตัวอย่าง

ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกดอัดขึ้นรูปได้แก่ ลวด ท่อที่มีรูปหน้าตัดไม่ปกติ ท่อไร้ตะเข็บอาจใช้วิธีอัดรีดขึ้นรูปได้ และ ผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมอัดรีดขึ้นรูปทั่วไป อาทิเช่น กรอบประตูหน้าต่าง โดยปกติ จะใช้อะลูมิเนียมบิลเล็ตซึ่งมีลักษณะทอกลมตันเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิต ดังรูป 2.2



รูป 2.2 แผนภาพกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมหน้าตัดต่างๆ (การอัดรีดขึ้นรูปร้อน) [3]

2.6 กระบวนการโฮโมจีไนซ์

เป็นที่ทราบกันว่าโครงสร้างของโลหะผสมที่ได้จากกระบวนการหล่อนั้นมีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ มีการกระจายตัวของอะตอมแปลกปลอมในโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ การได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่คุณภาพดีนั้นจะต้องมาจากโครงสร้างที่มีขนาดเกรนเล็ก และปราศจากริ้วลาย กระบวนการรีด (rolling) และ อัดรีดขึ้นรูปโลหะผสมนั้นจะให้ความสำคัญกับอุณหภูมิที่ใช้โฮโมจีไนซ์ในช่วงอบแช่ (Soaking temperature) ให้อยู่ในช่วง 550 ถึง 630 °C ก่อนที่โลหะดังกล่าวจะเข้าสู่กระบวนการแปรรูปร้อน (hot working)

ซึ่งกรรมวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ทำให้ธาตุในโครงสร้างของโลหะผสมมีการกระจาย

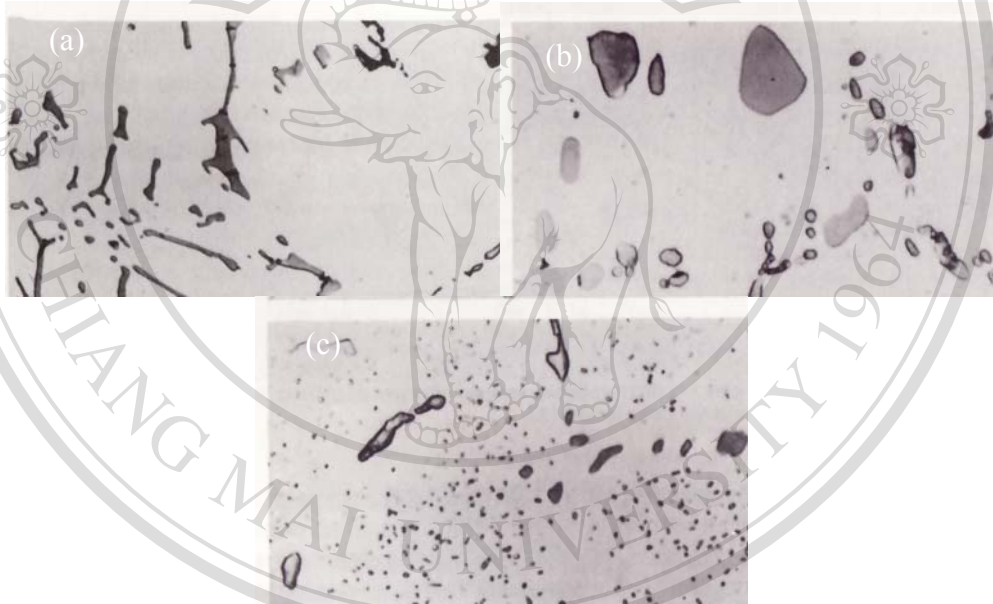
ตัวอย่างสม่ำเสมอ และ สมดุล ตะกอนที่มีอนุภาคขนาดเล็กภายในโครงสร้างก็จะมีรูปร่างที่กลมมน (spheroids) ขึ้น เมื่อโลหะผสมดังกล่าวผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ ซึ่งรูปร่างดังกล่าวมีส่วนช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของการแปรรูปเชิงกลด้วย

ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการโฮโมจีไนซ์ขึ้นอยู่กับขนาดของเกรน และ อัตราการแพร่ของธาตุในสารประกอบ สำหรับโลหะผสมโดยทั่วไป ประเภทของการเย็นตัวหลังจากกระบวนการโฮโมจีไนซ์ก็เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากตะกอนที่ขนาดเล็กละเอียดที่ละลายอยู่ในโครงสร้างอาจตกตะกอนออกมาได้ในขณะที่ผ่านการเย็นตัวนั้น

ถ้าธาตุที่ผสมในโลหะผสม ไม่สามารถละลายในอะลูมิเนียมผสมได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิโฮโมจีไนซ์สูงสุด เมื่ออ้างถึงเฟสไดอะแกรมแล้ว จะมีการก่อตัวกันขึ้นของตะกอนขนาด

เล็กชิ้นรวมตัวกันภายในขอบเกรน

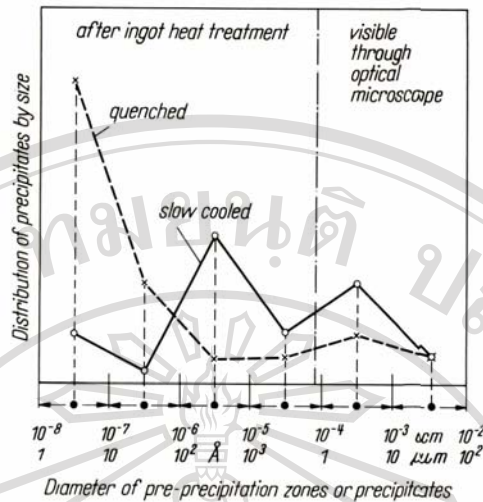
ในกรณี ที่โลหะที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ตัวอย่างเช่นเติมแมงกานีส (Mg) 1 เปอร์เซ็นต์ ในโครงสร้างของอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส ดังรูป 2.3 แสดงถึงโครงสร้างของโลหะผสมดังกล่าวผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง และ โครงสร้างที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน พบว่าในสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดของแมงกานีสในอะลูมิเนียมผสมแมงกานีสนั้นจะสังเกตเห็นโครงสร้างที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ ลักษณะของอินเตอร์เมทัลลิกเฟสที่มีลักษณะหยาบปราศจากความกลมมนซึ่งพบใน โครงสร้างของโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน และ การก่อตัวของอนุภาคที่ตกตะกอนในสารละลายในโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน [9]



รูป 2.3 โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส เกรด AA3003

(1% Mn + 0.67%Fe + 0.16%Si) [9]

- (a) อะลูมิเนียมหล่อที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ ปรากฏเฟสของ อะลูมิเนียม-แมงกานีส-เหล็ก บริเวณขอบเกรน, กำลังขยาย 860 เท่า
- (b) อะลูมิเนียมรีดที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 72 ชั่วโมง ที่ 600 °C จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ปรากฏตะกอนที่มีลักษณะกลมมน, กำลังขยาย 860 เท่า
- (c) อะลูมิเนียมรีดที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 6 ชั่วโมง ที่ 600 °C จากนั้นทิ้งไว้ในเตา 15 ชั่วโมง ที่ 450 °C จะปรากฏตะกอนที่ละเอียดของ อะลูมิเนียม-แมงกานีส-เหล็ก จากการเย็นตัวอย่างช้าๆ ในขณะที่เดียวกันก็เกิดเฟสที่มีลักษณะกลมมนแต่น้อยกว่ารูป (b) เนื่องจากใช้เวลาโฮโมจีไนซ์สั้นกว่า



รูป 2.4 ฟังก์ชันการกระจายตัวของธาตุที่ตกตะกอนในโลหะผสม ตัวอย่างเช่น ตะกอนของแมงกานีส และ เหล็ก ในโลหะผสม อะลูมิเนียมแมงกานีส [9]

จากรูป 2.4 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของอะตอมแปลกปลอมหลังจากที่แท่งโลหะผสมผ่านกระบวนการทางความร้อน จะพบว่าหลังจากที่แท่งโลหะผสมผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง และทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ จะมีตะกอนขนาดเล็กละเอียดเกิดขึ้นในโครงสร้าง ซึ่งส่วนใหญ่แล้วไม่สามารถสังเกตได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

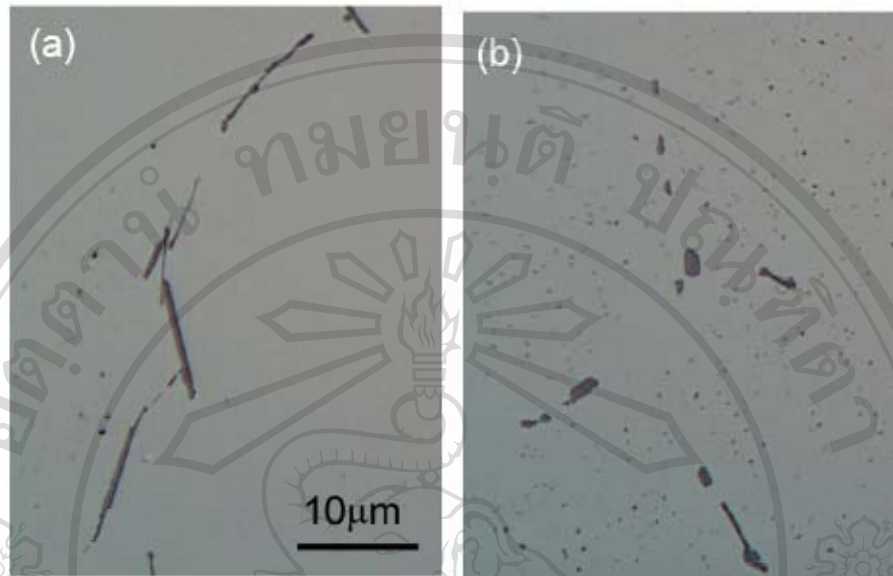
ซึ่งการกระจายและการสะสม หรือ การตกตะกอนของอะตอมแปลกปลอมมีผลต่อการปรับปรุงโครงสร้างและการแปรรูปของโลหะ หรือ โลหะผสม

2.6.1 กระบวนการโฮโมจีไนซ์ของอะลูมิเนียมผสม

สำหรับอะลูมิเนียมผสม กระบวนการอบโฮโมจีไนซ์คือ กรรมวิธีที่หลังจากที่อะลูมิเนียมบิลเลตถูกขึ้นรูปจากการหล่อหลอม (Casting) แล้วถูกนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 530-560 °C นาน 2-3 ชั่วโมง จากนั้นอะลูมิเนียมบิลเลตจะถูกทำให้เย็นตัว ก่อนนำไปเข้าสู่กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปต่อไป ซึ่งกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์นี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสม หรือแท่งบิลเลต ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป (extrudability) และปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์งานอัดรีดขึ้นรูปเมื่อสิ้นสุดกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป

หนึ่งในโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไปในระหว่างกระบวนการอบโฮโมจีไนซ์คือ การเปลี่ยนแปลงอินเทอร์เมทัลลิกเฟสจาก β -AlFeSi ซึ่งมีลักษณะคล้ายแท่งเข็มแหลมคม เป็น α -AlFeSi ซึ่งมีลักษณะคล้ายแท่งกลมมน ซึ่งลักษณะอินเทอร์เมทัลลิกเฟสที่เปลี่ยนแปลงแสดงดังรูป

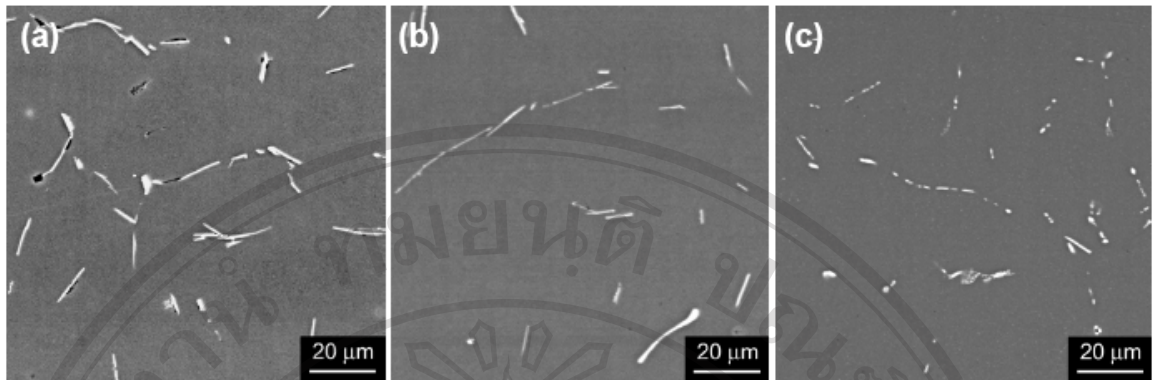
2.5, 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ



รูป 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสอินเทอร์เมทัลลิกเฟส จาก β เป็น α ในอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม ซีลิกอนเกรด 6005A (Al-Mg-Si alloys [AA 6005A series]) โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แสง

(a) แสดงอนุภาคเฟสอินเทอร์เมทัลลิกเฟส β -AlFeSi ในอะลูมิเนียมบิลเลตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ (b) แสดงอนุภาคเฟสอินเทอร์เมทัลลิกเฟส α -AlFeSi ในอะลูมิเนียมบิลเลตที่ผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 540 °C นาน 32 ชั่วโมง [3]

รูป 2.5 (b) แสดงอินเทอร์เมทัลลิกเฟส α -AlFeSi หลังจากผ่านกระบวนการอบไฮโมจีไนซ์ที่ 540 °C นาน 32 ชั่วโมง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเฟสอินเทอร์เมทัลลิกดังกล่าว มีผลดีต่อกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป คือ สามารถปรับปรุงสมบัติเรื่องความอ่อน (ductility) ของเนื้อวัสดุ และปรับปรุงคุณภาพของผิวผลิตภัณฑ์งานอัดรีดขึ้นรูป บ่อยครั้งที่พบว่าเมื่อใช้แท่งอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโมจีไนซ์มาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปจะปรากฏรอยตำหนิที่ผิวชิ้นงาน

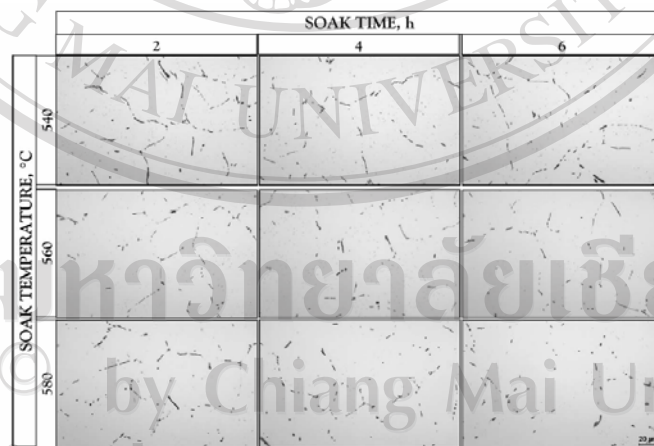


รูป 2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสอินเทอร์เมทัลลิกเฟส จาก β เป็น α ในอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม ซีลิกอนเกรด 6005A (Al-Mg-Si alloys [AA 6005A series]) ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด [3]

(a) แสดงอนุภาคเฟสอินเทอร์เมทัลลิกเฟส β -AlFeSi ในอะลูมิเนียมแท่งที่ไม่ผ่านกระบวนการอบโซลิมิไนซ์

(b) แสดงอนุภาคเฟสอินเทอร์เมทัลลิกเฟส β -AlFeSi และ α -AlFeSi ในอะลูมิเนียมแท่งที่ผ่านกระบวนการโซลิมิไนซ์ที่อุณหภูมิ 540 °C นาน 20 นาที

(c) แสดงอนุภาคเฟสอินเทอร์เมทัลลิกเฟส α -AlFeSi ในอะลูมิเนียมแท่งที่ผ่านกระบวนการอบโซลิมิไนซ์ที่อุณหภูมิ 590 °C นาน 32 ชั่วโมง



รูป 2.7 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม AA6063 ที่ผ่านกระบวนการโซลิมิไนซ์ในช่วงอุณหภูมิ 540 – 580 °C และอบแช่ในช่วง 2-6 ชั่วโมง [14]

2.6.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอินเทอร์เมทัลลิกเฟสต่ออะลูมิเนียมผสม

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอินเทอร์เมทัลลิกเฟสจาก β -AlFeSi เป็น α -AlFeSi มีความสำคัญต่อการปรับปรุงความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป การปรับปรุงความอ่อนในวัสดุ และลดรอยตำหนิในผิวชิ้นงานผลิตภัณฑ์งานอัดรีดขึ้นรูปได้ดังนี้ [3]

1. การปรับปรุงความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอินเทอร์เมทัลลิกเฟสจาก β -AlFeSi เป็น α -AlFeSi (Improvement of extrude ability by the β -to- α transformation) คุณภาพ หรือ ความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปนั้น นิยามได้จาก การใช้ความเร็วในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปสูงสุด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์งานอัดรีดขึ้นรูปจำนวนมาก ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงสมบัติทางกลตามต้องการ คุณภาพของผิวงานอัดรีดขึ้นรูปดี ไม่มีรอยตำหนิ และมีขนาดรูปร่างชิ้นงานแม่นยำตรงตามที่กำหนดไว้ ความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอินเทอร์เมทัลลิกเฟสจาก β เป็น α ดังนั้นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปนั้นคือ ระดับการเปลี่ยนแปลงอินเทอร์เมทัลลิกเฟสจาก β เป็น α ของแท่งบิลเลต หลังจากผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ และ เมื่อนิยามให้ f_α แทนอัตราส่วน ปริมาตรของอินเทอร์เมทัลลิก α ต่อ ปริมาตรของอินเทอร์เมทัลลิกเฟสทั้งหมด ถ้าค่า $f_\alpha = 0.95$ แสดงว่ามีความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูปดีที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์สัดส่วนของเฟส α อินเทอร์เมทัลลิกมีผลต่อการปรับปรุงความอ่อนของวัสดุ และ ความสามารถในการอัดรีดขึ้นรูป อีกทั้งยังแก้ปัญหา รอยตำหนิของผิวผลิตภัณฑ์งานอัดรีดขึ้นรูป

2. การปรับปรุงความอ่อนในวัสดุ (Improvement of ductility)

การปรับปรุงความอ่อนในวัสดุ มีบทความบางบทความ [15, 16] ได้กล่าวไว้ว่า ค่า ductility จะมีความสัมพันธ์กับ การเปลี่ยนแปลงอินเทอร์เมทัลลิกเฟส ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- (1) อัตราส่วนขอบเขตทั้งหมด (Coverage ratio) หมายถึง พื้นที่ของอนุภาค β ตรงบริเวณขอบเกรนหารด้วย พื้นที่ขอบเกรนทั้งหมด ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความอ่อน ในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ดังนั้นทำให้เกิดการปรับปรุงค่าความอ่อน β ที่มีค่าอัตราส่วนขอบเขตทั้งหมด ของเดนไดรต์สูง ก็จะไปบล็อกดิสโลเคชัน (dislocation) แบบโครงข่ายร่างแหภายใน (interconnected network) ทำให้ยากต่อการแปรรูปวัสดุ ในขณะที่อนุภาค α มีขนาดเล็กที่มีลักษณะมนกลม ยอมให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่รอบๆ ทำให้ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ ไม่เพียงแต่ระดับการเปลี่ยนแปลงอินเทอร์เมทัลลิกเฟสจาก β เป็น α เท่านั้นที่มีความจำเป็นต่อการเพิ่มความสามารถการอัดรีดขึ้นรูป แต่ การกระจายของเฟส แมกนีเซียม

ซิลิไซด์ก็มีความจำเป็นด้วย

3. การลดรอยตำหนิที่ผิวผลิตภัณฑ์งานอัดรีดขึ้นรูป (Reduction in surface defects)

พื้นผิวผลิตภัณฑ์งานอัดรีดขึ้นรูปเสียหายอาจเกิดขึ้นในช่วงกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป หนึ่งในงานอัดรีดขึ้นรูปผิวชิ้นงานเสียหายมีประเภทหนึ่งเรียกว่าพิกอัพ (pick up) ในช่วงกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป โดยปกติแล้วอะลูมิเนียมจะติดตรงแบบพิมพ์อัดรีดขึ้นรูป เนื่องจากเกิดการสะสม หรือทับถมของอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้เกิดการจุดขีดผิวชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูปหน้าตัดต่างๆ ได้ จากสมมุติฐานงานวิจัย [3] อธิบายได้ว่ากระบวนการอบสลายโครงสร้างโลหะผสมที่ไม่สมบูรณ์ มีปริมาณอนุภาคของ β จำนวนมาก มีแนวโน้มที่จะเกิด ความเสียหายแบบพิกอัพ มากกว่าโลหะผสมที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่สมบูรณ์ เนื่องจาก

(1) การยึดติดของอนุภาคอินเตอร์เมทัลลิกเฟส β บริเวณเมตริกซ์ของอะลูมิเนียมอ่อนแอ เป็นสาเหตุทำให้อนุภาคอินเตอร์เมทัลลิกเฟส β หลุดออกจากเมตริกซ์ของอะลูมิเนียม ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป เมื่ออนุภาคอินเตอร์เมทัลลิกเฟส β ที่หลุดออกนี้จะไปติดตรงบริเวณผิวของแม่พิมพ์ และ จุดขีดผิวของผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมอัดรีดขึ้นรูป สำหรับการเปลี่ยนแปลงอนุภาคอินเตอร์เมทัลลิกเฟส จาก β เป็น α นั้น อินเตอร์เมทัลลิกเฟส α ถูกสมมุติว่ามีการยึดเกาะได้ดีกว่า ทำให้มีการหลุดออกจากเมตริกซ์ของอะลูมิเนียมได้ต่ำกว่าอินเตอร์เมทัลลิกเฟส β ดังนั้นจึงทำให้เกิดความเสียหายแบบพิกอัพน้อยกว่า

(2) ลักษณะอนุภาค β ที่แหลมคมนั้นก่อให้เกิดรอยร้าวขนาดใหญ่ในขณะที่มีการแปรรูปโลหะ ดังนั้นจึงมีรอยร้าวปรากฏที่ผิวงานอะลูมิเนียมอัดรีดขึ้นรูป เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคอินเตอร์เมทัลลิกเฟส α ที่มีลักษณะกลมมนย่อมก่อให้เกิดรอยร้าวบริเวณผิวชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูปน้อยกว่า [3]

2.6.3 ประเภทของเตาโฮโมจีไนซ์

ในอุตสาหกรรม การผลิตอะลูมิเนียมได้จัดแบ่งเตาโฮโมจีไนซ์ออกเป็น 2 ประเภท คือ เตาโฮโมจีไนซ์แบบธรรมดา (Batch Homogenized Furnace) และ เตาโฮโมจีไนซ์แบบต่อเนื่อง (Continuous Homogenized Furnace)

2.6.3.1 เตาไฮโดรเจนแบบธรรมดา

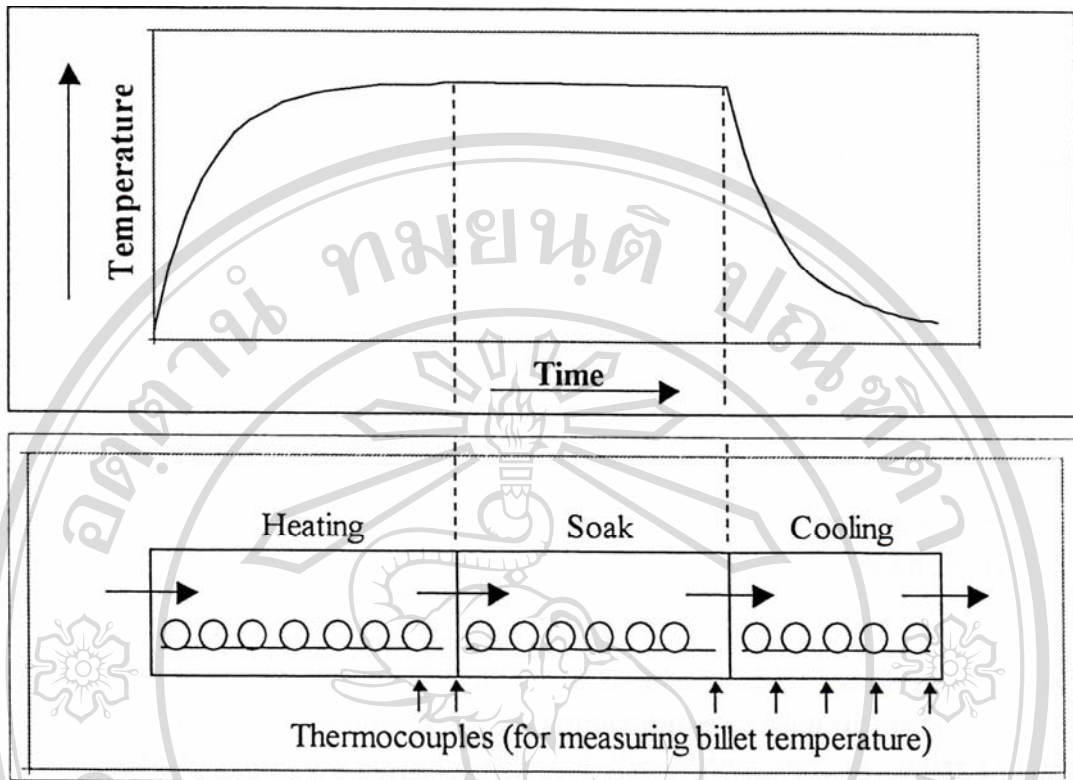


รูป 2.8 เตาไฮโดรเจนแบบธรรมดา [17]

ลักษณะเตาไฮโดรเจนแบบธรรมดาคือเป็นเตาไฮโดรเจนที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากเป็นเตาที่มีราคาถูก โดยมีหลักการทำงานโดยใช้หลักการการไหลของลมร้อนผ่านไปยังแท่งอะลูมิเนียมที่วางซ้อนกันเป็นชั้นๆ หมุนเวียนกันภายในเตาไฮโดรเจน ซึ่งลักษณะเตาแบบนี้มีข้อเสียคือ อุณหภูมิแต่ละตำแหน่งภายในเตาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ทำให้โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเจนไม่สม่ำเสมอ เมื่อเทียบกับเตาไฮโดรเจนแบบต่อเนื่อง

2.6.3.2 เตาไฮโดรเจนแบบต่อเนื่อง

เตาไฮโดรเจนแบบต่อเนื่อง [18] นี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าเตาอบแบบธรรมดา เนื่องจากลักษณะการอบเป็นการลำเลียงแท่งอะลูมิเนียม (บิลเลต) ลำเลียง เข้าเตาทีละแท่ง และแท่งบิลเลตแต่ละแท่งจะถูกเคลื่อนที่ไปยังโซนให้ความร้อนในเตาด้วยระบบวอลคิงบีม ซึ่งภายในเตาจะแบ่งโซนการให้ความร้อนออกเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณให้ความร้อน (Heating Zone) และบริเวณอบแห้ง (Soaking Zone) และ จากนั้นแท่งอะลูมิเนียมจะถูกส่งออกนอกเตาไปยังบริเวณเป่าลมเย็น (Cooling Zone) ดังรูป 2.9 ซึ่งโซนอบแห้งบิลเลตนี้อุณหภูมิค่อนข้างคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูป 2.9 แสดงภาพกระบวนการไฮโมจิไนซ์ด้วยเตาไฮโมจิไนซ์แบบต่อเนื่อง [18]

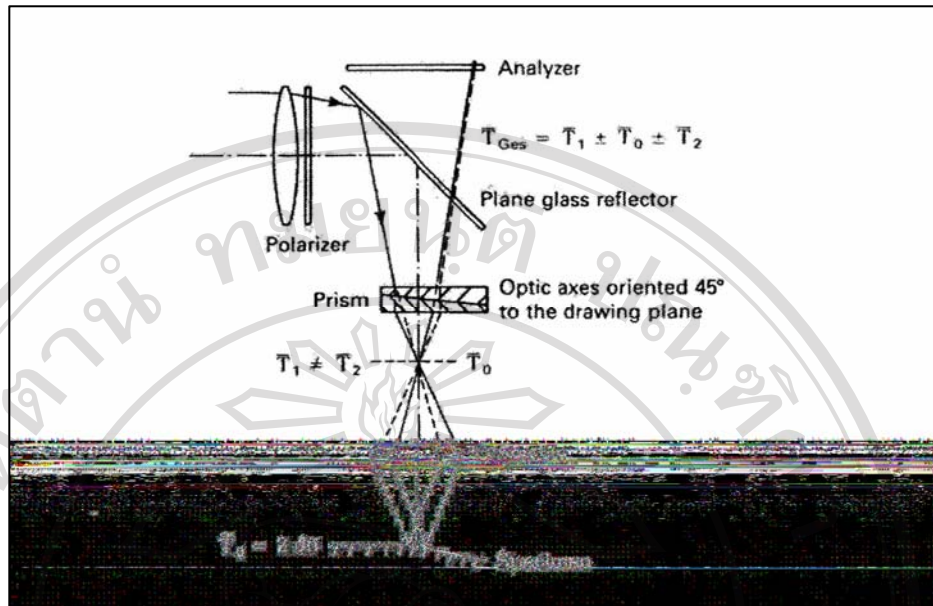
ข้อดีของเตาไฮโมจิไนซ์แบบต่อเนื่อง

1. สามารถควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการไฮโมจิไนซ์ได้อย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี มีโครงสร้างจุลภาคที่สม่ำเสมอ
2. ลดค่าใช้จ่ายในด้านการใช้พลังงานไฟฟ้า และการซ่อมบำรุงเครื่องจักร
3. ลดค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน

2.7 กล้องจุลทรรศน์แสง

กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical microscopy) [19] เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะมาตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นต้นกำเนิดของการพัฒนากล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบต่างๆ โดยตัวอย่างที่จะนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงนั้นจะต้องมีผิวหน้าเรียบมันผ่านการขัดมัน (Polished) มาก่อนเพื่อป้องกันการกระเจิง และการหักเหของแสง เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์แสงมีข้อจำกัดเรื่องอำนาจการแยก (resolution) และความชัดลึก (depth of field) และ จะผ่านกัดด้วยกรด (etched) หรือ ไม่ก็ได้



รูป 2.10 แสดงแผนภาพการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แสง [19]

กล้องจุลทรรศน์แสงมีส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

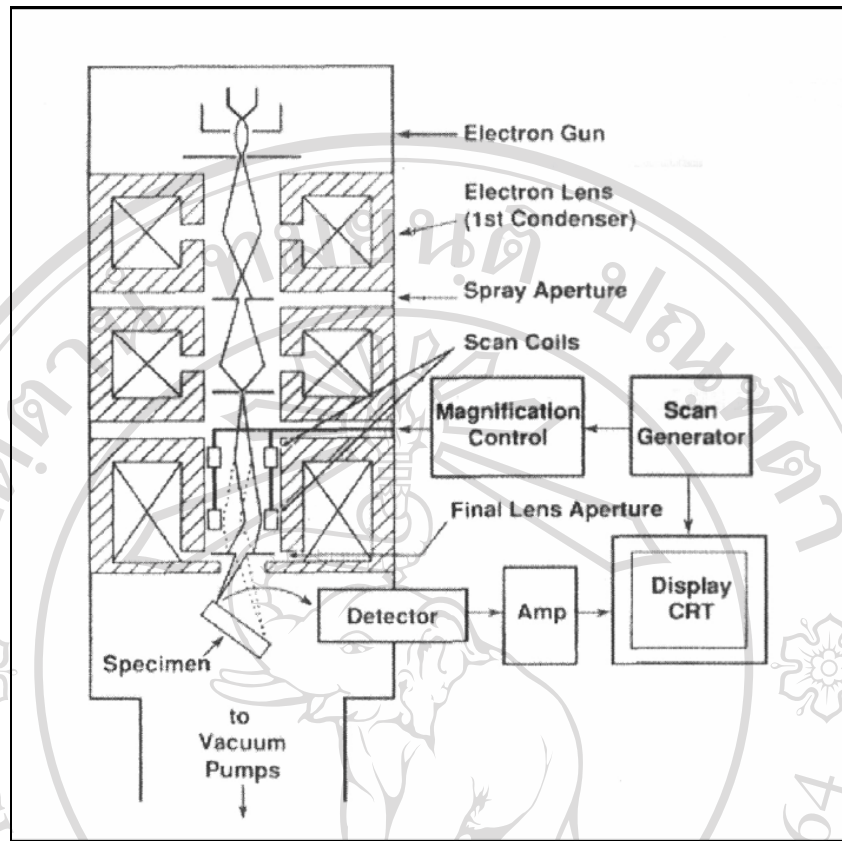
1. ต้นกำเนิดแสง (illumination system) ซึ่งส่วนใหญ่มาจากไส้หลอด ทังสแตน (tungsten filament lamp)
2. เลนคอนเดนเซอร์ (condenser len) เป็นเลนส์ที่ช่วยในการปรับการโฟกัสของแสงให้ไปในทิศทางตามต้องการ
3. ตัวกรองแสงถัดมา (light filter) ซึ่งเป็นตัวบังคับความเข้มของแสงให้มีความเหมาะสมต่อการส่องบนชิ้นงานทดสอบ ทำให้การตรวจสอบดีขึ้น
4. เลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) เป็นเลนส์ตัวแรกที่ทำหน้าที่รับภาพจากผิวชิ้นงาน ดังนั้นจำเป็นต้องปรับชิ้นงานทดสอบให้อยู่ในระยะห่างจากเลนส์ใกล้วัตถุให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจน
5. เลนส์ใกล้ตา (eyepiece) เป็นเลนส์ที่รับภาพจากเลนส์วัตถุเข้าตาเรา

2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเทคนิคเอ็นอีอีดีสเพอร์ซีฟสเปกโตรสโกปี (SEM/EDS)

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคทางแสงนั้นยังมีข้อจำกัดหลายด้านอาทิเช่น สามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่กำลังขยายต่ำ 10-1000 เท่า และข้อจำกัดด้านความชัดลึก (depth of field) ของภาพขยาย กล่าวคือ ยิ่งกำลังขยายมากขึ้น ระยะชัดลึกยิ่งน้อยลง จึงทำให้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [20] แบบส่องกราดเป็นเทคนิคที่นิยมในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคมากกว่าเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แสง เนื่องจากเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่มีจุดเด่น คือ มีระยะชัดลึกมากกว่า และ อำนาจแยกเชิงระยะ (Spatial resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แสง เนื่องจากอุปกรณ์ทั้ง 2 ใช้แหล่งกำเนิดคลื่นที่มีความยาวคลื่นต่างกันในการสร้างภาพ

กล้องจุลทรรศน์แสงจะใช้คลื่นแสง ซึ่งเป็นแสงที่ตามนุษย์มองเห็น และมีความยาวคลื่นสั้นอยู่ในช่วง 400 – 700 นาโนเมตร ทำให้กล้องจุลทรรศน์แสงไม่สามารถขยายวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่า 0.2 ไมครอนได้ ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้คุณสมบัติของคลื่นอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้ มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และ ความสามารถของกล้องที่สามารถบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ จึงทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยังสามารถทำงานร่วมกับเทคนิค เอ็นอีอีดีสเพอร์ซีฟสเปกโตรเมตรี (Dispersive Spectrometry, EDS) และเทคนิค เวฟเลนทึสเพอร์ซีฟสเปกโตรเมตรี (Wavelength Dispersive Spectrometry, WDS) เพื่อใช้วิเคราะห์ข้อมูลด้านส่วนประกอบทางเคมีของตัวอย่างทดสอบ

หลักการงานและส่วนประกอบโดยสังเขปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงได้ดังรูป 2.11 ส่วนบนสุดของรูปเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ที่มีสภาพเป็นสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (accelerating voltage) ในช่วง 0-30 kv ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบางเครื่องอาจใช้ความต่างศักย์เร่งได้สูงถึง 50 kV และทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และ ปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน ตามลักษณะการใช้งาน

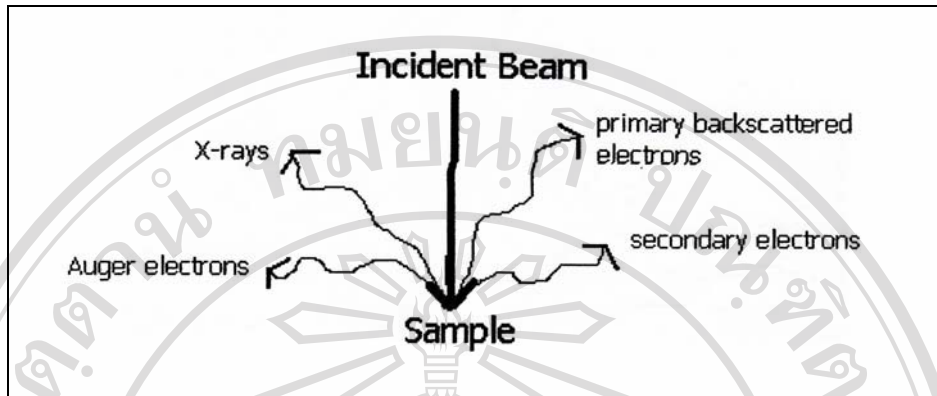


รูป 2.11 ภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [20]

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนให้มีลำอิเล็กตรอนเล็กลง

สำหรับเลนส์วัตถุ (Objective lens) จัดเป็นเลนส์ชุดสุดท้ายทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (electron beam) ให้ไปตกกระทบบนตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ โดยมี สแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนไปบนผิวตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวตัวอย่างที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณ (signal) ต่างๆ ขึ้นหลายชนิดขณะเดียวกัน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดก็จะมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ เหล่านั้น แล้วส่งไปยังหน่วยประมวลผลเป็นภาพแสดงบนหน้าจอต่อไป

2.8.1 สัญญาณต่างๆ (Various types of signal)



รูป 2.12 แผนภาพแสดงสัญญาณแบบต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาระหว่างอะตอมกับสสาร [19]

สัญญาณที่สำคัญ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสสาร และอันตรกิริยาอื่น ได้แก่

1. สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons , SE) ซึ่งสัญญาณชนิดนี้ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง และเป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ซึ่งภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image , SEI)
2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons , BSE) เป็นสัญญาณที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิตัวอย่างทดสอบ

นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-Ray), คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave), ไอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป

2.9 การทดสอบความแข็ง

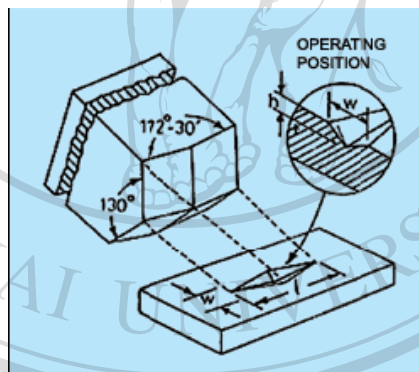
ความแข็ง[10] เป็นคุณสมบัติทางกลของวัสดุอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญ โดยความแข็งของวัสดุเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรง และความสามารถในการต้านทานต่อการสึกหรอของเครื่องมือ (Tools) และชิ้นส่วนในเครื่องจักรกล (Machine Path) โดยปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของวัสดุนั้นมีอยู่ 2 ปัจจัยคือ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยา และส่วนผสมทางเคมีภายในวัสดุ

โดยค่า ความแข็งจะมีผลต่อคุณสมบัติทางกลด้านอื่นด้วยได้แก่ ค่าความต้านแรงดึง ความเหนียว และความต้านทานต่อการชุบกัด โดยการทดสอบความแข็งของวัสดุมีอยู่หลายวิธีที่นิยมใช้ได้แก่

1. การวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Testing)
2. การวัดความแข็งแบบรอกเวลล์ (Rockwell Hardness Testing)
3. การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Testing)
4. การวัดความแข็งแบบนูป (Knoop Hardness Testing)

2.9.1 การวัดความแข็งแบบนูป (Knoop Hardness Test)

วิธีการวัดความแข็งด้วยหัวกดแบบนูปจะคล้ายคลึงกับวิธีวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers) แต่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปร่างปิระมิดที่มีมุมเป็น 130 องศา และ 172 องศา 30 ลิปดา เนื่องจากหัวกดมีลักษณะเรียวยาวจึงสร้างรอยกดที่มีความยาวของเส้นทแยงมุมมากกว่าวิธีการอื่นๆ ถึง 7 เท่า ทำให้สามารถเห็นภาพรอยกดได้อย่างชัดเจนแม้ใช้แรงกดต่ำ เทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับการทดสอบฟิล์มบาง หรือวัสดุที่เปราะแตกง่าย รวมถึงการทดสอบสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง (anisotropy) ได้ ลักษณะของหัวกดแบบนูป (Knoop) แสดงดังรูป 2.13 [21]



รูป 2.13 แสดงลักษณะและหัวกดแบบนูป [21]

2.10 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันหรือ XRD เป็นเครื่องมือเครื่องที่อาศัย หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุ หรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสี สะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ

จากหลักการเบื้องต้นในปี ค.ศ. 1912 นาย W.L.Bragg ได้นำมาทำ การศึกษา รูปแบบโครงสร้างผลึก ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้น เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันขึ้นในปี 1948 และพัฒนาเรื่อยมา จนกระทั่งมีการนำเอาคอมพิวเตอร์ มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงาน และวิเคราะห์

ประมวลผล เพื่อให้เกิดความรวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น

XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่รู้จักกันแพร่หลาย ในกลุ่มนักวัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ สามารถแยกแยะประเภท และชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติ ว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสี ที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ ก็แตกต่างกันไปด้วย ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิด จะมีรูปแบบ (XRD pattern)

เฉพาะตัว เปรียบเช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน

จากหลักการทำงานของ XRD มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน แต่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน ตัวอย่างเช่น เหล็ก สูตรทางเคมีคือ Fe แต่มีโครงสร้างผลึกหลายรูปแบบ เช่น Body center cubic (BCC), Face center cubic (FCC) จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้สามารถบอกได้ว่าเหล็ก ตัวอย่างมีโครงสร้างแบบใด [22]

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2003 Y. Tokit และคณะ [23] ได้ทำงานวิจัยศึกษาผลกระทบของกระบวนการโฮโมจิไนซ์ ต่อ การแปรรูปเย็น (cold deformations) ของโลหะอะลูมิเนียมผสม AA 2014 และ AA 6063 พบว่า กระบวนการโฮโมจิไนซ์ของโลหะมีผลต่อโครงสร้างจุลภาค โดยทั่วไปในโลหะอะลูมิเนียมหล่อปกติ อนุภาคทองแดงอะลูมิเนียม (CuAl_2) และ แมกนีเซียมซิติไซด์ที่ละลายอยู่ในโลหะอะลูมิเนียมเกรด AA 2014 และ AA6063 จะเป็นอินเตอร์เมทัลลิกเฟสที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งกระจายตัวอยู่ตรงบริเวณขอบเกรน ในขณะที่กระบวนการโฮโมจิไนซ์เป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคอินเตอร์เมทัลลิกดังกล่าวมีขนาดเล็ก และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในเกรนของโลหะ จากงานวิจัยนี้เมื่อนำตัวอย่างโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด AA 2014 และ AA6063 มาทดสอบการบิด (torsion test) พบว่า ค่าความเหนียวของโลหะอะลูมิเนียมทั้งสองประเภทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการโฮโมจิไนซ์เพิ่มขึ้น และผลของการทดสอบการบิดนี้ พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมกับโลหะอะลูมิเนียมผสมทั้ง 2 ประเภทต่อการแปรรูปเย็น คือ ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 470 °C นาน 8 ชั่วโมง ยิ่งไปกว่านั้น งานวิจัยนี้เมื่อพิจารณาข้อมูลทาง XRD ยังพบว่า ค่าความแข็ง และความเข้มของเฟสอินเตอร์เมทัลลิกเฟสในโลหะผสมจะลดลง เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการโฮโมจิไนซ์เพิ่มขึ้น ดังนั้นกระบวนการโฮโมจิไนซ์เป็น

กระบวนการที่เป็นประโยชน์ต่อการแปรรูปเย็น

ในปี ค.ศ. 2003 Yucel Birol [14] ได้ศึกษาข้อปฏิบัติของกระบวนการโฮโมจิไนซ์ต่อโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมแท่ง 6063AA โดยศึกษาถึงอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งที่ใช้ในกระบวนการโฮโมจิไนซ์ พบว่า กระบวนการโฮโมจิไนซ์ที่อุณหภูมิ 580 °C นาน 6 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวที่ 250-300 °C ต่อชั่วโมง ได้ผลดีที่สุด คือพบเฟสของ β' Mg₂Si ที่เล็กละเอียด ซึ่งจะละลายหายไปเมื่อเอาแท่งอะลูมิเนียมดังกล่าวไปอบก่อนผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (reheat) ส่งผลให้ผิวงานอัดรีดขึ้นรูป และสมบัติเชิงกลมีคุณภาพดี

ในปี ค.ศ. 2002 Muzaffer Zeren และคณะ [24] ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการตรวจสอบผลของอัตราการผลิตขึ้นรูป (extrusion ratio) ต่อพฤติกรรมสมบัติเชิงกล (mechanical behaviour) ของอะลูมิเนียมผสม 6063 อัดรีดขึ้นรูป พบว่า ผลลัพท์งานอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสม 6063 ที่ผ่านการบ่มแข็ง ที่ใช้วัตถุดิบตั้งต้นมาจากแท่งอะลูมิเนียมผสม 6063 ที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนซ์ มีสมบัติ ด้านค่าความแข็ง ค่าความแรงของโลหะ และ สมบัติการยึดแล้วต่ำกว่า ผลลัพท์งานอัดรีดขึ้นรูปใช้วัตถุดิบตั้งต้นมาจากแท่งอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนซ์

ในปี ค.ศ. 2001 O.R. Myhr และคณะ [25] ได้มีการศึกษาวิจัย พบว่าแท่งอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนซ์จะสามารถอัดรีดขึ้นรูปได้ดีกว่าแท่งอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนซ์ และพบว่าผิวชิ้นงานผลลัพท์งานอัดรีดขึ้นรูป และ สมบัติทางด้านการดึง(tensile) ดีกว่า ผลลัพท์อัดรีดขึ้นรูปมาจากแท่งอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนซ์ เนื่องจากงานอัดรีดขึ้นรูปมาจากแท่งอะลูมิเนียมที่ผ่านการโฮโมจิไนซ์ จะมีโครงสร้างที่มีแมกนีเซียมซิลิไซด์ที่เป็นอินเทอร์เมทัลลิกขนาดเล็ก และ กระจายตัวสม่ำเสมอกว่า แท่งอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนซ์

ในปี ค.ศ. 1999 M.A. Cooksey [18] ได้ใช้เทคนิค SEM/EDS ในการวิเคราะห์และทำนายลักษณะอินเทอร์เมทัลลิกเฟสที่พบในโครงสร้างอะลูมิเนียม 6000 ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนซ์ด้วยเตาโฮโมจิไนซ์แบบต่อเนื่อง พบว่า เตาโฮโมจิไนซ์แบบต่อเนื่องสามารถควบคุมความร้อนที่ใช้ในกระบวนการโฮโมจิไนซ์ และ ผ่านกระบวนการเย็นตัวอย่างมีประสิทธิภาพ และใช้เทคนิค SEM/EDS เป็นเทคนิคที่ใช้ทำนายอินเทอร์เมทัลลิกเฟสที่พบในโครงสร้างได้ดีกว่าการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดา ซึ่งแสดงผลทำนายดังตาราง 2.6

ตาราง 2.6 อัตราส่วนของ Fe และ Si ที่พบในอินเตอร์เมทัลลิกเฟส AlFeSi (Weight%) [18]

Intermetallic	Compound	Fe:Si
α -AlFeSi	Al ₇ Fe ₃ Si	6:1
	Al ₁₂ Fe ₃ Si	6:1
	Al ₈ Fe ₂ Si	4:1
	Al ₁₅ Fe ₃ Si ₂	3:1
β -AlFeSi	Al ₅ FeSi	2:1
π - AlFeSiMg	Al ₇ FeSi ₆ Mg ₃	1:3

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved