บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาของบทนี้ กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผู้วิจัยจำเป็นต้องทำการศึกษาก่อนที่จะดำเนินงานวิจัย เพื่อให้ผลงานวิจัยเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้แก่ ข้อมูลทั่วไป และคุณสมบัติของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด AC4C โลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิกอน อิทธิพลของส่วนประกอบทางเคมีที่มีผลต่ออะลูมิเนียมผสม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงงานนี้

2.1 ข้อมูลทั่วไปของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด JIS AC4C

อะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด JIS AC4C เป็นอะลูมิเนียมผสมที่เรียกชื่อตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS : Japanese Industrial Standard) ซึ่งออกโดย Japanese Standards Association ซึ่งสามารถเทียบเท่าเกรดของอะลูมิเนียมผสมตามมาตรฐานสากลต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2.1 เช่น อะลูมิเนียมผสมเกรด AC4C ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น เป็นอะลูมิเนียมผสมเทียบเท่ากับเกรด A356 ตามมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM) ส่วนผสมทางเคมีของธาตุต่างๆ ที่กำหนดไว้สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด JIS AC4C, AC4CH แสดงในตารางที่ 2.2 สำหรับในประเทศไทย มีการใช้อะลูมิเนียมผสมทั้งสองเกรดในอุตสาหกรรมหล่อชิ้นส่วนรถยนต์จำนวนมาก เป็นเกรดที่ลูกค้าเลือกใช้ในการหล่อล้อจักรยานยนต์ เนื่องจากเป็นอะลูมิเนียมเกรดที่มีคุณสมบัติทางกลดี ซึ่งเหมาะกับการหล่อแบบใช้แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Die Casting) และเป็นอะลูมิเนียมเกรดที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกลด้วยกระบวนการ Precipitation Hardening (T6)

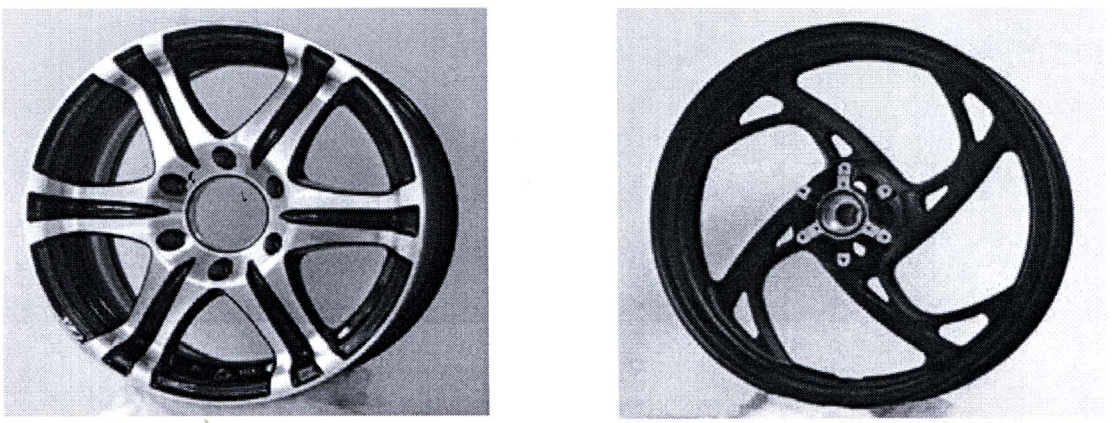
ตารางที่ 2.1 การเทียบเกรดของอะลูมิเนียมผสมตามมาตรฐานสากลต่างๆ [3]

Japan (JIS)	USA (AA/ASTM)	USA (SAE)	U.K.	Germany	France	Australia
AC4C	356, A356	323	LM25	G-AlSi$_7$Mg	A-S7G	AA601

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของธาตุต่างๆ ของอะลูมิเนียมผสมตามมาตรฐาน [4]

Aluminum Alloy Chemical Composition										
Alloy	**Si**	**Fe**	**Cu**	**Mn**	**Mg**	**Ni**	**Zn**	**Sn**	**Ti**	**Pb**
AC4C	6.5-7.5	0.40max	0.25max	0.35max	0.25-0.45	0.10max	0.35max	0.05max	0.20max	0.10max
AC4CH	6.5-7.5	0.17max	0.20max	0.10max	0.30-0.45	0.05max	0.10max	0.05max	0.20max	0.05max

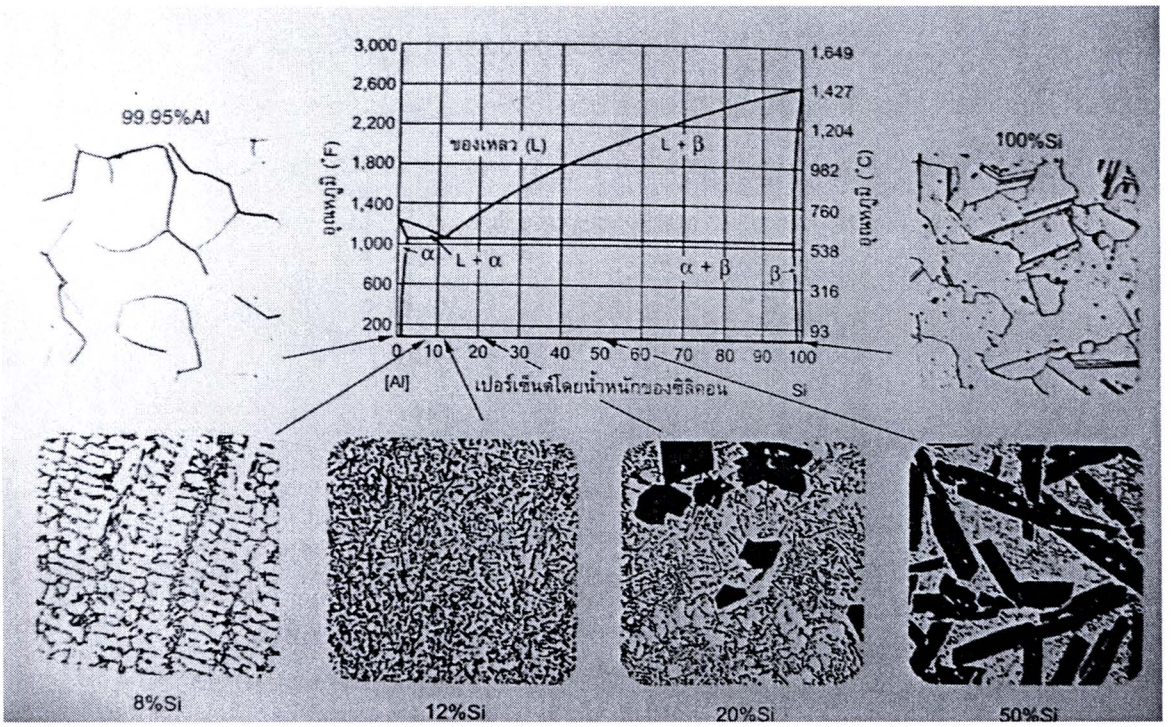
อะลูมิเนียมผสมเกรด JIS AC4CH เป็นอะลูมิเนียมเกรดที่มีความบริสุทธิ์กว่า เนื่องจากมีธาตุผสมที่เป็นกลุ่มธาตุปนเปื้อนน้อยกว่าเกรด AC4C และมีความแข็งแรงสูงกว่าเกรด AC4C เนื่องจากมีการควบคุมค่า Mg ที่แคบ และสูงกว่า อ้างอิงตามมาตรฐานตารางที่ 2.2 อะลูมิเนียมเกรด JIS AC4CH มีคุณลักษณะในการหล่อได้ดี เป็นที่นิยมกันแพร่หลายสำหรับงานหล่อชิ้นงานทั่วๆ ไป ทำการหล่อได้ทั้งแบบหล่อโลหะ แบบหล่อทราย และแบบหล่อเปลือก ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการหล่อด้วยอะลูมิเนียมเกรดนี้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ได้แก่ ล้อรถยนต์ ล้อจักรยานยนต์ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผลิตจากอะลูมิเนียมเกรด JIS AC4CH [5]

2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน

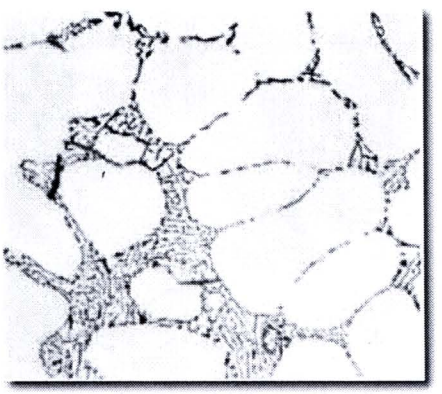
อะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด JIS AC4CH จัดเป็นโลหะผสมที่อยู่ในกลุ่มของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ส่วนใหญ่ มักจะเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ที่เติมธาตุผสมต่างๆ ลงไป เพื่อให้ได้งานที่มีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมต่อการใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น เช่น ทำให้มีความสามารถแปรรูปงานได้ที่ระดับอุณหภูมิต่ำ ช่วยทำให้โลหะผสมมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยกลไกการเพิ่มความแข็งด้วยการทำให้เป็นสารละลายของแข็ง เป็นต้น โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ที่นิยมใช้ทั่วไปมี 3 ประเภท ได้แก่ อะลูมิเนียมผสมโฮโปยูเทคติค (Hypo-Eutectic alloys), อะลูมิเนียมผสมยูเทคติค (Eutectic Alloys) และอะลูมิเนียมผสมไฮเปอร์ยูเทคติค (Hyper-Eutectic Alloys) ดังรูปที่ 2.2 สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด JIS AC4CH จัดเป็นอะลูมิเนียมผสมกลุ่มไฮโปยูเทคติค



รูปที่ 2.2 แผนภาพสมดุลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน [7]

2.2.1 อะลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติค (Hypo Eutectic Alloys)

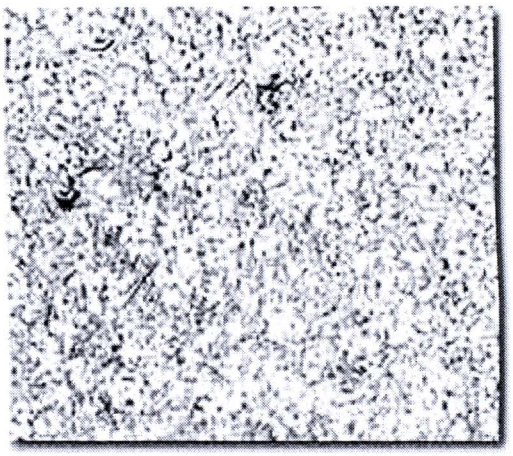
อะลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติค มีซิลิคอนผสมอยู่น้อยกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ ถ้าพิจารณาที่ 7 เปอร์เซ็นต์ Si ดังรูปที่ 2.2 จะพบว่าการเย็นตัวจากของเหลว (T_s) จะเริ่มเกิดเฟส Dendrite ขนาดเล็กจาก α – Al เมื่ออุณหภูมิถึงการแข็งตัว (T_l) และเกิดการแข็งสมบูรณ์ที่เส้นยูเทคติค หากมีส่วนผสมของทองแดง หรือแมกนีเซียม โลหะจะเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอน และเป็นตัวปรับสภาพเกรนละเอียด เนื่องจากโลหะผสมไฮโปยูเทคติคมีช่วงการแข็งตัวกว้าง ปัจจัยควบคุมสมบัติของอะลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติค มี 2 ประการหลัก คือ ขนาดของรูปร่างของเกรน และช่วงห่างระหว่างแขนเดนไดร์ทุติยภูมิ



รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม Hypo-Eutectic [9]

2.2.2 อะลูมิเนียมผสมยูเทคติค (Eutectic Alloys)

อะลูมิเนียมผสมยูเทคติค เป็นอะลูมิเนียมที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกล โดยการทำให้เกรนละเอียดได้ด้วยการเติมธาตุผสม เช่น ทองแดง ธาตุผสมนี้จะช่วยควบคุมอัตราการเติบโต และเกิดใหม่ของเฟสปฐมภูมิ และช่วยทำให้เฟสยูเทคติคละเอียดขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม Eutectic [9]

2.2.3 อะลูมิเนียมไฮเปอร์ยูเทคติค (Hyper Eutectic Alloys)

อะลูมิเนียมไฮเปอร์ยูเทคติค มีซิลิคอนผสมอยู่เกินกว่า 11.7 เปอร์เซ็นต์ เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่ต้องการการขยายตัวจากความร้อนต่ำ และในขณะเดียวกันสามารถทนต่อการเสียดสีได้ดี เป็นกลุ่มโลหะที่นิยมใช้ในการดัดแปลงสภาพเกรนละเอียด เช่น การเติมฟอสฟอรัส (P) และโซเดียม (Na) เพื่อทำให้เฟสของซิลิคอนที่มีเฟสขนาดใหญ่ กระจายตัวออกเป็นเฟสขนาดเล็กสม่ำเสมอ พร้อมทั้งทำให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีผลทำให้เนื้อโลหะมีความละเอียดมากขึ้น

รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม Hyper Eutectic [10]

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนจะแสดงปฏิกิริยาทางกายภาพที่เป็น Simple Eutectic Reaction โดยจุด Eutectic อยู่ที่ 11.7 เปอร์เซ็นต์ Si และ 577°C ซิลิคอนสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกับอะลูมิเนียมในสารละลายของแข็ง α-Phase ได้น้อยมาก แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงซิลิคอนจะแยกตัวออกมาแทรกฝังในเนื้อของ α-Phase เพิ่มมากขึ้นตามระดับอุณหภูมิที่ลดลง โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ในทางปฏิบัติมีคุณสมบัติการหล่อขึ้นรูปได้ดี ทำให้สามารถหล่อเป็นชิ้นงานมีรูปร่างสลับซับซ้อนได้ง่าย มีผิวหน้าที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดี เช่นเดียวกับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เนื่องจาก $SiO_2.xH_2O$ ที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของเนื้อโลหะ โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนแม้ว่าเกิด Eutectic ที่ 13 เปอร์เซ็นต์ Si ก็ตาม ในทางปฏิบัติการผลิตโลหะผสม ที่มีส่วนผสมของซิลิคอนมากกว่าจุด Eutectic ในกรณีที่มีการแข็งตัวและมีอัตราการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ เช่น ในการหล่อด้วยแบบหล่อทราย ซิลิคอนจะเป็นธาตุชนิดแรกของโลหะหลอมเหลว ที่แยกออกจากโลหะหลอมเหลวกลายเป็นของแข็งก่อน ซึ่งลักษณะของซิลิคอน ที่เกิดขึ้นจะมีเฟสขนาดใหญ่ และทำให้เนื้อโลหะมีเกรนหยาบ ซึ่งแยกออกมาอยู่ตามขอบเกรน ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของโลหะลดลง การหล่อที่ได้ผลสูงและมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นอยู่กับปริมาณหรือความเข้มข้นของซิลิคอน และสภาพการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลว โครงสร้างของการหล่อโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยการผสมของเกรนอะลูมิเนียม ผลึกของซิลิคอนและอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่จุด Eutectic ที่อยู่ระหว่างรูปแบบของเฟสอื่นๆ ที่ผสมเติมเข้าไปด้วย เช่น $MgSiCuAl_2$ เกรนอะลูมิเนียมสามารถที่จะโตได้มากภายใต้สภาพการเย็นตัว เช่น ในแบบหล่อทรายหรือแบบที่มีขนาดโตๆ ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้การหล่อและสมบัติทางกลออกมาได้ไม่ดี

2.3 อิทธิพลของส่วนประกอบทางเคมีที่มีต่ออะลูมิเนียมผสม

ในการผลิตชิ้นงานอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีหล่อโลหะ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเติมธาตุผสมต่างๆ ลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้น ซึ่งการเติมธาตุต่างชนิดและปริมาณต่างๆ กัน จะส่งผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงานต่างกัน ธาตุผสมที่ควรทราบ ได้แก่

ซิลิคอน (Si)

อิทธิพลที่สำคัญของซิลิคอนในอะลูมิเนียมผสม คือ การปรับปรุงความสามารถในการหล่อ เช่น ทำให้การไหลตัวของโลหะหลอมเหลวดีขึ้น มีความต้านทานต่อการแตกร้าวที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น ชิ้นงานหล่อทนการเสียดสีดีขึ้น สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนและความถ่วงจำเพาะลดลง

ทองแดง (Cu)

การเติมทองแดงจะทำให้เพิ่มความแข็งและความแข็งแรงของโลหะผสม โดยการเกิดสารละลายของแข็ง และทำให้โลหะผสมสามารถชุบแข็งได้ด้วยกระบวนการตกตะกอน เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ทองแดงจะทำให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนลดลง เนื่องจากการเกิดกัลป์วานิกแซลเฉพาะที่ ความต้านทานต่อการแตกร้าวจะลดลง เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง ความสามารถในการหล่อจะลดลง

แมกนีเซียม (Mg)

เป็นธาตุที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งในอะลูมิเนียมผสม Al-Si โดยกระบวนการตกตะกอน เพื่อเพิ่มความแข็งแรง เช่นเดียวกับทองแดง ถ้าเป็นอะลูมิเนียมผสม Al-Si แมกนีเซียมจะทำให้ผิวของชิ้นงานเป็นเงางาม ทนการกัดกร่อนดี ทำให้ความแข็งโดยการเกิดสารละลายของแข็ง และความเหนียวดีขึ้น

เหล็ก (Fe)

มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากเกิดเฟสต่างๆ ขึ้น เช่น FeAl $FeMnAl_6AlFeSi$ แต่ถ้ามีสัดส่วนของเฟสเหล่านี้มากเกินไป จะทำให้เกิดผลเสียต่อความสามารถในการไหลได้ การเติมเหล็กจะทำให้ความเหนียวชิ้นงานลดลง แต่จะช่วยลดปัญหาชิ้นงานหล่อโลหะติดแบบหล่อ

แมงกานีส (Mn)

ปกติถือว่าเป็นสารมลทินในงานหล่อ จึงต้องควบคุมให้มีปริมาณที่ต่ำ การมีแมงกานิสในอะลูมิเนียมผสมสำหรับงานรีด จะช่วยให้ความแข็งเพิ่มขึ้นจากกลไก Strain Hardening

นิกเกิล (Ni)

ช่วยให้โลหะมีความแข็งเพิ่มขึ้น ด้วยการทำให้เป็นสารละลายของแข็ง เพิ่มคุณสมบัติการต้านทานความคืบเนื่องจากใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้เกิดการลดของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนด้วย

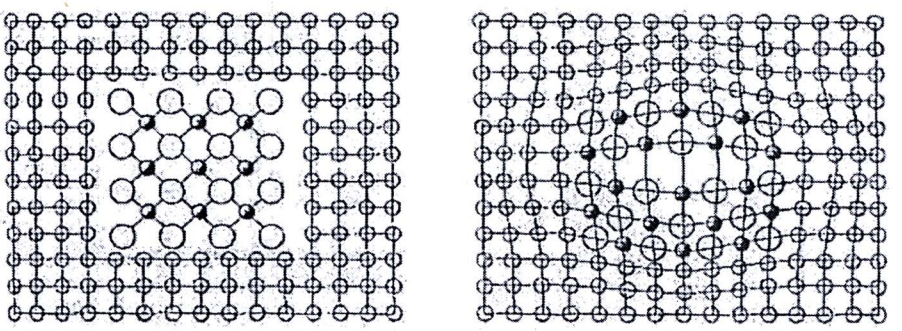
สังกาสี (Zn)

การเติมสังกะสีลงในอะลูมิเนียมไม่มีประโยชน์มากนัก แต่หากเติมสังกะสีพร้อมๆ กับทองแดงหรือแมกนีเซียม สังกะสีจะรวมกับธาตุเหล่านี้ เกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ จะช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน

2.4 Age Hardening หรือ Precipitation Hardening

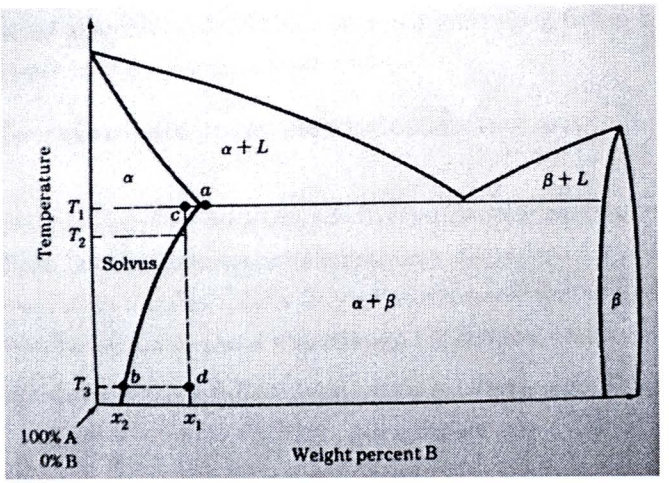
2.4.1 นิยามของ Age Hardening หรือ Precipitation Hardening

Age Hardening หรือ Precipitation Hardening พบครั้งแรกในโลหะผสม Al-Cu เป็นกระบวนการที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงเฟสที่เกิดในสภาวะของแข็ง โดยมีการเกิดเฟสของแข็งที่เป็นอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอนและมีแรงยึดเหนี่ยวกับแมทริกซ์ ที่มีความอ่อนเหนียว ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การตกตะกอนแล้วมีแรงยึดเหนี่ยวหรือที่เรียกว่า Coherent Precipitation จะเพิ่มความแข็งแรงได้ โดยหากพิจารณาที่รูปที่ 2.6 (ก) จะเห็นว่าโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดขึ้นบริเวณศูนย์กลางของโครงสร้างแมทริกซ์เป็นอิสระจากกัน หรือไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างผลึกทั้งสอง ดังนั้น ขณะเกิดการเลื่อนก็จะทำให้ไม่มีแรง หรือระนาบที่ขัดขวางการเกิด Dislocation ทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงน้อย แต่หากแมทริกซ์กับเฟสใหม่ที่เกิดจากการตกผลึก มีแรงยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกัน ดังรูปที่ 2.6 (ข) เมื่อมีแรงมากระทำแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างทั้งสองจะทำหน้าที่ขัดขวางการเกิด Dislocation ส่งผลให้โลหะผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

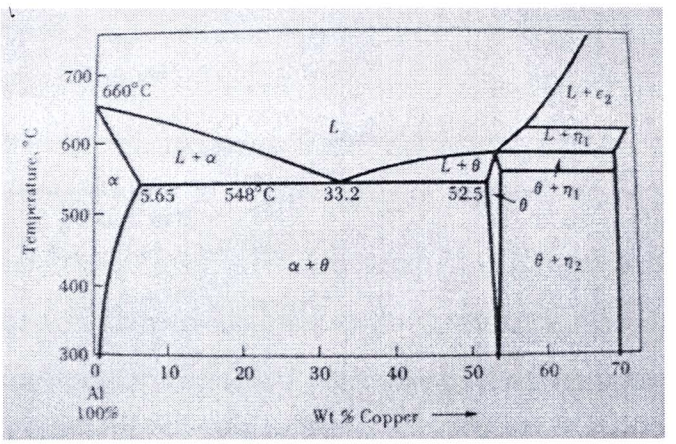


รูปที่ 2.6 ภาพจำลองการตกตะกอนของโลหะผสม
(ก) Non-Coherent Precipitation
(ข) Coherent Precipitation [6]

ดังนั้น โลหะผสมที่จะทำการปรับปรุงหรือเพิ่มคุณภาพได้ด้วยวิธี Precipitation Hardening นี้ จะต้องเป็นโลหะผสมที่มีแผนภูมิเฟส ดังรูปที่ 2.7 กล่าวคือ จะต้องมีเส้น Solvus บอกถึงลักษณะความสามารถในการละลายต่ำที่อุณหภูมิต่ำ และความสามารถในการละลายสูงที่อุณหภูมิสูง นั่นคือ โดยปกติที่อุณหภูมิใช้งานจะอยู่ในสภาวะสองเฟส แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีเฟสเดียว ในอุตสาหกรรมหล่อโลหะจำพวกอะลูมิเนียม จึงพบการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวิธี Precipitation Hardening โดยการเติม Cu เข้าไปเล็กน้อยอย่างแพร่หลาย ดังเฟสไดอะแกรมของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ในรูปที่ 2.8



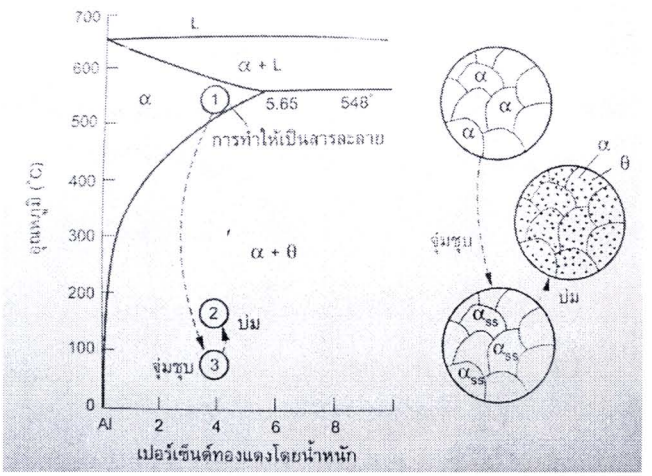
รูปที่ 2.7 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่เหมาะจะทำ Precipitation Hardening [7]



รูปที่ 2.8 เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง [7]

2.4.2 ขั้นตอนการทำ Age Hardening หรือ Precipitation Hardening

การทำ Age Hardening แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.9 โดยมีรายละเอียดดังนี้



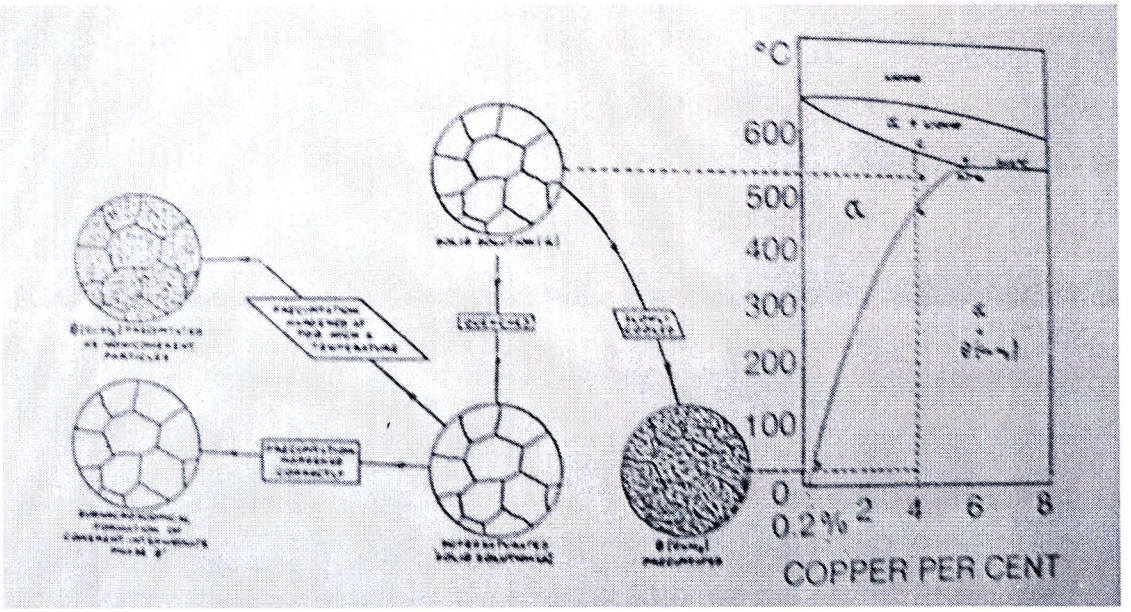
รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการทำ Age Hardening [6]

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 05 มี.ค. 2555
เลขทะเบียน 219120
เลขเรียกหนังสือ

ขั้นตอนที่ 1 การอบชิ้นงานให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Solution Treatment) ขั้นตอนนี้โลหะผสมจะถูกนำไปอบให้ความร้อนจนเลยเส้น Solvus ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูง และอบแช่ไว้ที่อุณหภูมินี้ จนเฟส θ สลายตัวเป็นสารละลายเนื้อเดียวของเฟส α ทั้งหมด ในขั้นตอนนี้การให้ความร้อนต้องเหมาะสม กล่าวคือต้องควบคุมไม่ให้อุณหภูมิใกล้เส้น Solidus มากนัก เพราะอาจเกิดการหลอมละลายบริเวณขอบเกรนขึ้นได้ ขณะเดียวกันก็ไม่ควรต่ำมากเกินไปจนใกล้เส้น Solvus เพราะจะทำให้ θ สลายตัวไม่หมด

ขั้นตอนที่ 2 การจุ่มชุบอย่างรวดเร็ว (Quenching) เพื่อให้โลหะผสมอยู่ในสภาพสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด หลังจากผ่านการทำให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกันแล้ว โลหะผสมที่มีเฟส α จะถูกจุ่มชุบลงในน้ำเพื่อให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้อะตอมไม่มีเวลามากพอที่จะแพร่ออกมารวมตัวกันเป็นนิวเคลียสของเฟส θ ดังนั้นโครงสร้างที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องจึงเป็นเฟส α ที่มีสารละลายเกินจุดอิ่มตัวแบบยิ่งยวด เพราะมีปริมาณทองแดงที่ละลายอยู่สูงกว่าปกติที่ α จะมีทองแดงละลายอยู่ได้น้อยมากที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งในขั้นตอนนี้จะส่งผลทำให้เกิดความเค้นตกค้างอย่างมาก เนื่องจากวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิที่สูงกว่าเส้น Solvus มายังอุณหภูมิห้อง

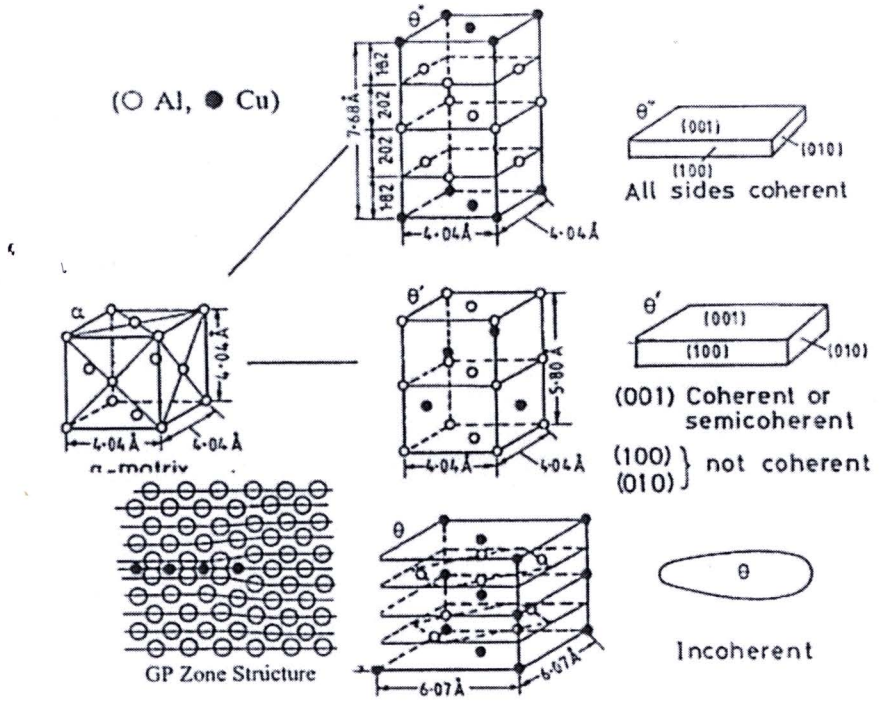
ขั้นตอนที่ 3 การบ่มแข็ง (Ageing) เพื่อให้เกิดการแยกตัวตกตะกอนของเฟสที่สอง (θ'') ขึ้นในแมทริกซ์ที่เป็น α โดยอาศัยการแพร่เฟสที่สองนี้จะเป็นอนุภาคเล็กๆ ที่กระจายตัวอยู่ทั่วไปนี้ จะมีแรงยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันกับแมทริกซ์ที่เป็น α เมื่อมีแรงมากระทำแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างทั้งสองจะทำหน้าที่ขัดขวางการเกิด Dislocation ส่งผลให้โลหะผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.10 เฟสจากการทำ Age Hardening เปรียบเทียบกับการปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ [8]

ลำดับการเกิดเฟสต่างๆ ในการทำ Age Hardening เมื่อเวลาผ่านไป สามารถสรุปได้ดังนี้

$$\alpha_{ss} \longrightarrow \alpha_1 + \text{GP-zones} \longrightarrow \alpha_2 + \theta'' \longrightarrow \alpha_3 + \theta' \longrightarrow \alpha_4 + \theta\,(CuAl_2)$$



รูปที่ 2.11 ลักษณะของเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการทำ Age Hardening

α_n คือ เฟสอะลูมิเนียมที่มีโครงสร้างแบบ fcc ที่เกิดจากการเย็นตัวของชิ้นงานในแต่ละขั้นตอน GP Zones ของกลุ่มอะตอม Al-Cu Alloy นี้ มีการจัดเรียงตัวเป็นแผ่นบางดังรูป หนาประมาณ 4-6 A

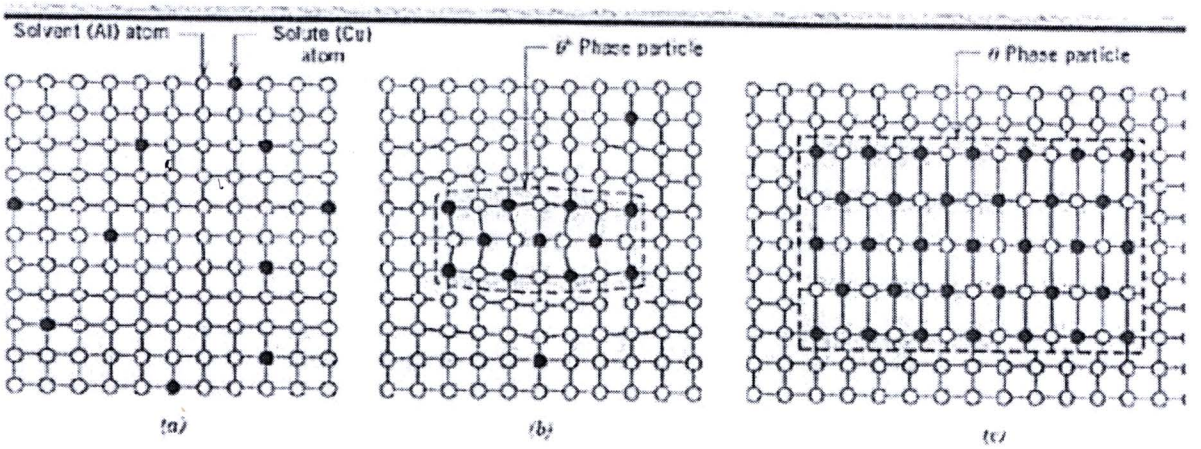
θ'' เป็นเฟสแผ่นบาง การตกตะกอนมีแรงยึดเหนี่ยวกับแมทริกซ์ทุกทิศทาง

θ' เป็นเฟสแผ่นบางหลายชั้นขึ้น การตกตะกอนมีแรงยึดเหนี่ยวกับแมทริกซ์ในบางทิศทาง คือ (001) bct

θ เป็นเฟส $CuAl_2$ ที่มีลักษณะกลมและหนาขึ้น การตกตะกอนไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกับแมทริกซ์

2.4.3 การบ่มแข็งที่อุณหภูมิและระยะเวลาการอบต่างๆ กัน มีผลต่อความแข็งแรงของการทำ Precipitation Hardening อย่างไร

การตั้งอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มแข็งที่เหมาะสม มีความสำคัญต่อความแข็งแรงของชิ้นงานอย่างมาก เนื่องจากหากอบบ่มที่อุณหภูมิสูง และใช้เวลาอบมากเกินไป จะทำให้อนุภาคของ θ ที่เกิดขึ้น ขาดการยึดเหนี่ยวกับแมทริกซ์ ดังรูปที่ 2.12 (c) ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเราเรียกพฤติกรรมแบบนี้ว่า การบ่มเกินขนาด (Over Ageing)

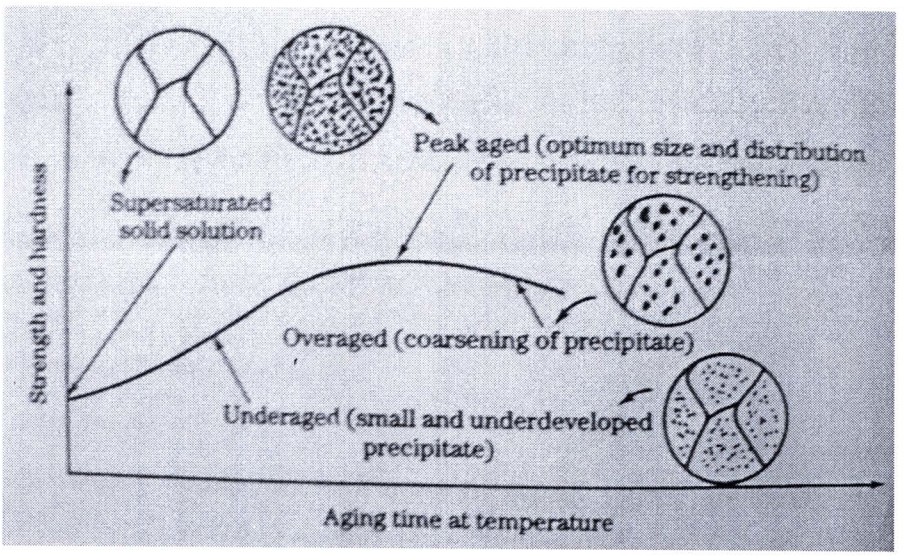


รูปที่ 2.12 ภาพจำลองอนุภาคโลหะผสม

(a) โลหะผสมขณะที่ยังเป็น Super-saturated Solid solution

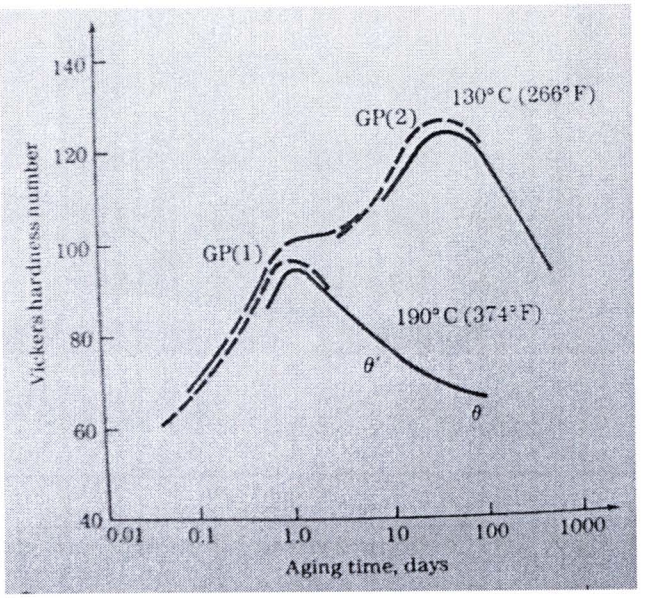
(b) โลหะผสมที่เกิดการตกตะกอนของเฟสที่สอง (θ'') อย่างเหมาะสม

(c) โลหะผสมที่เกิดการตกตะกอนของเฟสที่สอง (θ'') มากเกินไป



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการบ่มแข็งกับความแข็งแรงของชิ้นงาน [7]

จากรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่า การเกิด Over Ageing จะมีเฟสใหม่ที่แยกตัวออกมา มีปริมาณมากขึ้น และจะเริ่มจับตัวกัน เกิดเป็นเฟสที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีขนาดใหญ่ ความแข็งแรงก็จะเริ่มลดลงเรื่อยๆ เฟสที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอนของอุณหภูมิที่อบแข็งต่างๆ กัน แสดงในรูปที่ 2.13



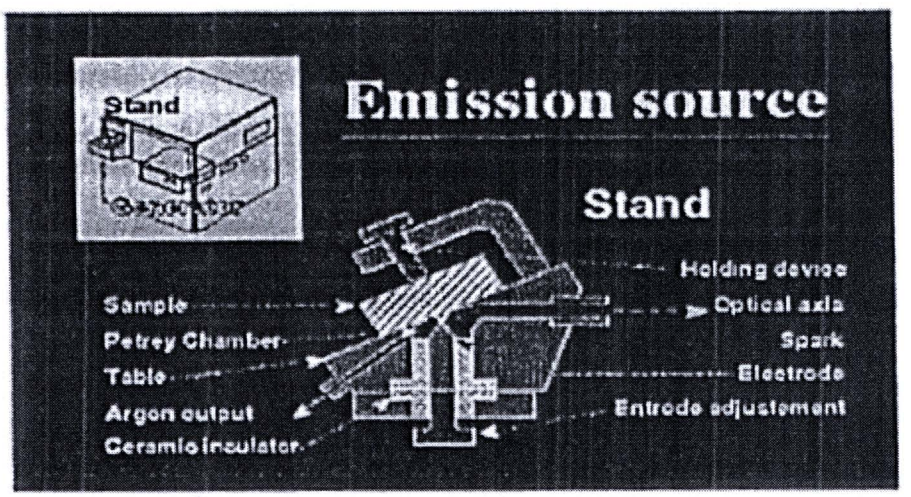
รูปที่ 2.14 อิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มโลหะผสมต่อความแข็งแรง ณ จุดคราก [7]

2.5 หลักการทำงานของเครื่อง Spark Emission Spectrometer

เครื่อง Spark Emission Spectrometer หรือ Arc Emission Spectrometer เป็นเครื่องมือรูปแบบหนึ่งของ Spectrometer ที่ใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของแสง ด้วยการหาส่วนผสมทางเคมีของโลหะ เหมาะในการใช้งานกับชิ้นงานที่เป็นของแข็ง เช่น โลหะอะลูมิเนียม เหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม ทองเหลือง ทองแดง เป็นต้น มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ประเภทหล่อโลหะ เนื่องจากประมวลผลได้รวดเร็ว การเตรียมชิ้นงานไม่ยุ่งยาก และไม่ต้องใช้ตัวอย่างชิ้นงานจำนวนมาก ส่วนประกอบหลักๆ ของเครื่องจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ Spark Generator, Spectrometer (Detector & Analyzer) และ Software (Computer & printer)

รูปที่ 2.15 เครื่อง Spark Emission Spectrometer

หลักการทำงานของเครื่อง Spark Emission Spectrometer จะใช้วิธีการ Spark ชิ้นงาน ออกมาเป็นแสง ในการวิเคราะห์ชิ้นงานจะถูกวางและยึดให้อยู่นิ่งในช่องใส่ตัวอย่าง ที่มีบรรยากาศปกคลุมด้วยก๊าซอาร์กอน ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การวางชิ้นงานในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง Spark Emission Spectrometer

ขั้นตอนต่อไปเครื่องจะทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าเพื่อ Spark ชิ้นงาน เมื่อเกิดสเปกตรัมของแสงจากการ Spark ส่วนของสเปกโตรมิเตอร์ จะทำหน้าที่แยกสเปกตรัมจาก Polychromatic Radiation ให้เป็น Monochromatic Radiation ทำให้เกิดความยาวคลื่นต่างๆ กัน ซึ่งความยาวคลื่นจะถูกวัดความเข้มด้วยการสแกนของตัวรับสัญญาณ สัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและแสดงปริมาณของส่วนผสมในชิ้นงานนั้นๆ