



การกำหนดสัดส่วนวัตถุดิบในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียมเพื่อลดต้นทุน
โดยใช้แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น

นายพงศ์พล สनเทศ

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

การกำหนดสัดส่วนวัตถุดิบในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียมเพื่อลดต้นทุน
โดยใช้แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น

นายพงศ์พล สันทะ วศ.บ. (วิศวกรรมอุตสาหการ)

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ

..... ประธานกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ
(ดร.ศุภฤกษ์ บุญเกียรติ)

..... กรรมการ และอาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ
(รศ. ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร)

..... กรรมการ
(ผศ.พจมาน เดียวพันธุ์ธนาธิกุล)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อการค้นคว้าอิสระ	การกำหนดสัดส่วนวัตถุดิบในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียมเพื่อลดต้นทุนโดยใช้แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นายพงศ์พล สนั่นเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นคำนวณหาสัดส่วนวัตถุดิบ เพื่อใช้ในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม เพื่อให้ได้ต้นทุนของวัตถุดิบต่ำที่สุด ซึ่งในกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมประกอบด้วยวัตถุดิบคือ แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Primary aluminium Ingot) มาสเตอร์อัลลอยด์ และเศษโลหะซึ่งมาจาก 3 แหล่งคือ เศษโลหะภายในบริษัท เศษโลหะภายในประเทศ และเศษโลหะจากต่างประเทศ วัตถุดิบหลักในการผลิตคือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งมีราคาแพง ดังนั้นจึงต้องลดปริมาณการใช้แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ลง และใช้เศษโลหะในการผลิตมากขึ้น เพราะเศษโลหะมีราคาที่ถูกลงและมีปริมาณมาก แต่ส่งผลให้ควบคุมส่วนผสมทางเคมีของผลิตภัณฑ์ได้ยาก เพราะเศษโลหะมีแหล่งที่มาและเกรดหลากหลาย งานวิจัยนี้จึงได้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อหาค่าเฉลี่ยส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะ และนำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างเป็นแบบจำลองโดยใช้ทฤษฎีกำหนดการเชิงเส้น ที่มีอยู่ในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft Excel) ช่วยในการคำนวณหาปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตโดยกำหนดให้ได้ต้นทุนของวัตถุดิบต่ำสุด และสามารถควบคุมส่วนผสมทางเคมีให้ได้ใกล้เคียงกับมาตรฐานบิลเลทอะลูมิเนียมในการป้อนน้ำอะลูมิเนียมครั้งแรก สรุปผลการทดลองสามารถลดต้นทุนของวัตถุดิบลงได้ประมาณ 5% จากการลดปริมาณการใช้แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีราคาแพง ลดเวลาตรวจสอบและปรุงส่วนผสมทางเคมีของผลิตภัณฑ์ เพราะสามารถป้อนน้ำอะลูมิเนียมได้ใกล้เคียงมาตรฐานตั้งแต่การผสมครั้งแรก รอบเวลาในการผลิตจึงลดลงด้วย และหากจำเป็นสามารถคำนวณวัตถุดิบ เพื่อใช้ในการปรับแต่งส่วนผสมทางเคมีได้แม่นยำและง่ายขึ้น

คำสำคัญ : อะลูมิเนียม / กำหนดการเชิงเส้น / ลดต้นทุนของวัตถุดิบ

Independent Study Title	Raw Material Ratio Specification for Cost Reduction in Aluminium Billet Process by using Linear Programming.
Credits	6
Candidate	Mr. Pongpon Sontes
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chaowalit Limmaneevichitr
Program	Master of Engineering
Field of Study	Metallurgical Engineering
Department	Production Engineering
Faculty	Engineering
Academic Year	2013

Abstract

The purpose of this research is to design and create a module based on linear programming in Microsoft Excel to calculate optimal raw material ratio in aluminium billet production. Raw materials used in the production process are primary aluminium ingot, master alloy and scraps from different sources, i.e. returned scrap, domestic scrap, and import scrap. Major material is primary aluminium ingot which is high in price. In order to reduce production cost, we need to reduce the amount of ingot and increase the amount of scrap addition. However, the result of increasing the scrap ratio is that it is more difficult to control chemical compositions of the product because scraps are from various sources in different grades. The data were collected and analyzed to find out average of chemical compositions and used in Microsoft Excel based on the linear programming method. The program is used for calculation the amount of raw material, while maintaining minimal raw material cost and controlling the chemical compositions to be within the corresponding specifications. We found that raw material cost was reduced by 5% by reducing the amount of ingot in production process and also from reducing the inspection time and adjusting chemical component because the target composition could be reached at the first time. The method can also be used to calculate the amount of materials used in modifying chemical composition accurately and conveniently if needed.

Keywords : Aluminium / Linear Programming / Material Cost Reduction

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย (ITAP) ของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ได้กรุณามอบทุนวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ คุณสุพัฒน์ รตนศิริวิสัย (กรรมการผู้จัดการบริษัทไทยเม็ททอล จำกัด) ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ วัดดุจิบ และเวลาในการทำการทดลอง ตลอดจนให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีเสมอมา และขอขอบพระคุณเป็นพิเศษสำหรับความห่วงใยและกำลังใจจากครอบครัวที่คอยห่วงใย สนับสนุนการศึกษา เพื่อรอความสำเร็จของผู้วิจัย และเป็นแรงใจสำคัญจนทำให้การค้นคว้าอิสระในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

การค้นคว้าอิสระนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รศ.ดร. เขาวลิต ถัมมณีวิจิตร ที่ให้คำปรึกษา และข้อชี้แนะ จนกระทั่งการดำเนินการจัดทำการค้นคว้าอิสระนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งและถือเป็นพระคุณอย่างยิ่ง ขอขอบคุณ ดร.ศุภฤกษ์ บุญเทียร ประธานกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ ผศ.พจมาน เตยวัฒนรัฐติกาล กรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องในการทำการค้นคว้าอิสระ และคณะกรรมการในคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้ความรู้และให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฅ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	3
1.3 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ประวัติอะลูมิเนียม	5
2.2 อะลูมิเนียมและโลหะผสมของอะลูมิเนียม	5
2.3 การกำหนดสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมผสม	6
2.4 ชนิดของโลหะอะลูมิเนียมผสม	9
2.5 อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิกอน หมายเลข 6063	11
2.6 ความสะอาดของอะลูมิเนียมหลอมเหลวสำหรับการหล่อโลหะ	13
2.7 ตัวแบบการจัดสรรทรัพยากร	19
2.8 การโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming)	22
2.9 ตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming Model)	25
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 การดำเนินการวิจัย	31
3.1 ศึกษาข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม	31
3.2 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
3.3 การรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อการผลิต	38
3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล	38
3.3.2 การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล	38
3.4 สร้างตัวแบบจำลอง	40
3.5 ทดสอบและยืนยันผลการประยุกต์ใช้ตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	40
3.6 สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย	40
4 ผลการทดลอง	41
4.1 การคำนวณเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยส่วนผสมทางเคมี	41
4.2 เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด	41
4.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด	45
4.4 สัมประสิทธิ์การแปรผันของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด	47
4.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Linear Programming)	50
4.6 รอบเวลา (Cycle Time) และพลังงานที่ใช้ในการผลิต	52
5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ	54
เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก Aluminium Alloy Castings	58
ภาคผนวก ข แบบฟอร์มการเก็บข้อมูล	85
ภาคผนวก ค ข้อมูลมาตรฐานส่วนผสมทางเคมีของบิลเลทอะลูมิเนียมเกรดต่างๆ	89
ภาคผนวก ง วิธีการใช้งานโปรแกรมคำนวณ	92
ประวัติผู้วิจัย	99

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	สรุปปริมาณการใช้อะลูมิเนียมบริสุทธิ์	2
2.1	สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม	10
2.2	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิกอนหมายเลข 6063 ตามมาตรฐานของ TIMCO-STANDARD-TANDEM	12
2.3	สมบัติทางความร้อนของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิกอนหมายเลข 6063	12
2.4	สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิกอนหมายเลข 6063	12
2.5	ความถ่วงจำเพาะ ขนาด และลักษณะของสิ่งปนเปื้อนชนิดต่างๆ	15
4.1	เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด	42
4.2	เรียงลำดับค่าเฉลี่ยส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด	44
4.3	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด	45
4.4	เรียงลำดับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีเศษโลหะแต่ละชนิด	47
4.5	สัมประสิทธิ์ของการแปรผันของส่วนผสมทางเคมีเศษโลหะแต่ละชนิด	48
4.6	การเปรียบเทียบเวลาในการผลิตและจำนวนการผลิตเตาต่อวันของก่อนและหลังการทดลอง	52
ก.1	Nominal composition and composition limits of aluminium alloy castings	63
ก.2	Cross reference for older casting alloy designations and frequently used specifications	67
ข.1	ตรวจสอบปริมาณและชนิดของน้ำอะลูมิเนียม	86
ข.2	ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีก่อนการเติมเศษโลหะ	87
ข.3	ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังการเติมเศษโลหะ	87
ข.4	เวลาการทำงานของขั้นตอนในกระบวนการผลิต	88
ค.1	ค่ามาตรฐานต่ำสุด – สูงสุดส่วนผสมทางเคมีของบิลเลทอะลูมิเนียม	90
ค.2	ค่ามาตรฐานส่วนผสมทางเคมีของบิลเลทอะลูมิเนียม	91
ค.3	ค่ามาตรฐานส่วนผสมทางเคมีของแท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Ingot)	91

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	โครงสร้างทางจุลภาคที่ตรวจพบบริเวณส่วนกลางของแท่งอะลูมิเนียม	14
2.2	ความสัมพันธ์ของร้อยละของของเสียต่อจำนวนอนุภาคของสิ่งปนเปื้อนที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือเท่ากับ 20 ไมครอน	17
2.3	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอะลูมิเนียมหลอมเหลวต่อค่า Sludge Factor ต่อโอกาสการเกิดตะกอน	18
2.4	แนวทางในการป้องกันการเกิดตะกอนโดยใช้แผนภูมิ	19
3.1	แผนภูมิแสดงลำดับขั้นตอนของการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม	32
3.2	เศษโลหะอะลูมิเนียมภายในโรงงาน	33
3.3	เศษโลหะอะลูมิเนียมภายในประเทศ	33
3.4	เศษโลหะอะลูมิเนียมต่างประเทศ	34
3.5	แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์	34
3.6	บิลเลทอะลูมิเนียม	35
3.7	เตาหลอมโลหะขนาด 15 ตัน	35
3.8	เตาหลอมขนาด 6 ตัน	36
3.9	เตาไล่แก๊ส	37
3.10	แบบสำหรับการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม	37
3.11	ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	40
4.1	กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด	42
4.2	กราฟแสดงการเปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด	45
4.3	กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแปรผันของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด	48
4.4	ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	51

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
ก.1	Example of one of the many highway railing post designs utilizing aluminium castings that have been developed	78
ก.2	Die cast alloy 380.0 transmission case	79
ก.3	Die cast alloy 380.0 rear axle housing	80
ก.4	Alloy A356.0 trailer suspension saddle	80
ก.5	Alloy C355.0 fuel pump housing	81
ง.1	เปิดโปรแกรมไมโครซอฟท์ เอ็กเซล	93
ง.2	การเลือกเกรดบิลเลทอะลูมิเนียม	93
ง.3	การเลือกมาสเตอร์อัลลอยด์	94
ง.4	การเลือกสเปรตชีท	94
ง.5	การเลือกแท็บ	95
ง.6	การตั้งค่าและการเริ่มคำนวณ	95
ง.7	ผลค่าประมาณของส่วนผสมทางเคมีและต้นทุนการผลิตจากการคำนวณ	96
ง.8	การเลือกสเปรตชีทและคำนวณ	96
ง.9	ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตและการต้นทุนการผลิต	97
ง.10	การเลือกเพื่อพิมพ์	97
ง.11	ผลการพิมพ์ข้อมูลการผลิต	98

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในสภาวะการดำเนินธุรกิจที่มีการแข่งขันสูงในปัจจุบัน ประกอบกับเศรษฐกิจของโลกที่มีการชะลอตัว ด้านพลังงานที่มีราคาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ด้านวัตถุดิบที่ขาดแคลนและราคาสูงขึ้น ด้านกำลังซื้อของผู้บริโภคที่ลดลง อีกทั้งด้านตลาดแรงงานที่ขาดทักษะแต่ค่าแรงงานกลับสูงขึ้น ทุกองค์กรไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการผลิตขนาดใหญ่หรือผู้ประกอบการรายย่อยต่างแสวงหาวิธีที่ทำให้ธุรกิจอยู่รอด มีการปรับกลยุทธ์ในการดำเนินธุรกิจ เพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยกลยุทธ์ที่แต่ละองค์กรเลือกใช้นั้นมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มผลกำไรให้กับองค์กรทั้งสิ้น แต่อย่างไรก็ตามในสภาวะการแข่งขันทางธุรกิจที่รุนแรงนี้ ทุกองค์กรไม่สามารถเพิ่มผลกำไรโดยการเพิ่มราคาสินค้าได้ ดังนั้นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้ธุรกิจอยู่รอด หรือทำให้ธุรกิจมีความสามารถในการแข่งขันสูงขึ้น คือ การลดต้นทุนในการผลิต (Cost Reduction) แต่ไม่ผลกระทบต่อคุณภาพสินค้าและบริการที่มีผลต่อความพึงพอใจของลูกค้า ซึ่งการลดต้นทุนการผลิตสามารถทำได้ในหลายด้าน ทั้งในด้านคนหรือแรงงาน ด้านอุปกรณ์และเครื่องจักร ด้านวัตถุดิบในการผลิต และด้านการปฏิบัติงาน เป็นต้น ซึ่งต้องอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์และการแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบและต่อเนื่อง การตัดสินใจว่าจะเลือกการลดต้นทุนการผลิตในด้านไหนนั้น ควรพิจารณาเลือกให้มีความสอดคล้องกับกลยุทธ์ในการดำเนินธุรกิจขององค์กรด้วย และที่สำคัญต้องใช้ความร่วมมือจากทุกฝ่ายในองค์กร เพื่อทำงานร่วมกัน จึงจะนำมาซึ่งการเพิ่มผลผลิตที่เหมาะสมและเกิดประสิทธิผลต่อองค์กรนั้นๆ ต่อไป

ในอุตสาหกรรมโลหะ อะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะที่มีการใช้งานมากเป็นอันดับที่สองรองจากเหล็ก โลหะอะลูมิเนียม หรืออะลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloys) เป็นวัสดุโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น มีความหนาแน่นต่ำประมาณ 2.7 g/cm^3 เมื่อเทียบกับเหล็กซึ่งมีความหนาแน่น 7.9 g/cm^3 นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีในสภาวะแวดล้อมบางสภาวะ รวมทั้งในอากาศ มีค่าความเหนียวสูง (High Ductility) ซึ่งง่ายต่อการขึ้นรูป ในขณะที่เดียวกันก็ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติมธาตุบางตัว หรือปรับปรุงคุณสมบัติได้ด้วยความร้อน (Heat Treatment) เพื่อให้โลหะอะลูมิเนียม หรืออะลูมิเนียมผสมนั้นมีสมบัติเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งาน [1]

เนื่องจากโลหะอะลูมิเนียมมีสมบัติพิเศษหลายประการ มนุษย์จึงนำเอาโลหะอะลูมิเนียมมาประยุกต์ใช้งานมากมาย อาทิเช่น อุตสาหกรรมการบิน อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องครัว โครงสร้างอาคาร งานทางด้านสถาปัตยกรรมและเครื่องประดับตกแต่ง โดยเลือกใช้อะลูมิเนียมผสมให้เหมาะกับ

การใช้งานในแต่ละด้าน เช่น งานทางด้านโครงสร้างอาคาร และสถาปัตยกรรม เช่น กรอบประตู หน้าต่าง ฝ้าเพดาน บันได ตู้ เตียง ฯลฯ จะนิยมใช้อะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปทางกล เกรด 6063 (Wrought Aluminium Alloys Series 6063) มาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิต

ซึ่งการได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์จากอะลูมิเนียมนั้นมีการบวนการต่างๆ มากมายกว่าจะได้ผลิตภัณฑ์จากอะลูมิเนียมที่ต้องการ โดยเริ่มตั้งแต่ การถลุงแร่บ็อกไซต์, การผลิตแท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Ingot) การผลิตบิลเลต (Billet) การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) การกลึง (Machining) อโนไดซ์ (Anodizing) และอื่นๆ ในกระบวนการต่างๆ เกี่ยวกับอะลูมิเนียมที่มีอยู่มากมาย งานวิจัยนี้ขอ ยกตัวอย่างกระบวนการผลิตบิลเลตอะลูมิเนียม (Aluminium Billet) โดยเน้นที่กระบวนการปรับ ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมให้ได้ตามมาตรฐานเกรดอะลูมิเนียม เพื่อนำไปใช้ในการผลิตต่อไป

จากการศึกษากระบวนการผลิตบิลเลตอะลูมิเนียมของบริษัทตัวอย่างพบว่าปริมาณการใช้แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีปริมาณการใช้ที่ไม่คงที่ ดังตารางที่ 1.1 และวัตถุดิบในกระบวนการผลิตบิลเลตอะลูมิเนียม มีความแตกต่างกันมากในแต่ละเตาหลอมของการผลิต บางเตาหลอมมีปริมาณการใช้แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์น้อย บางเตามีปริมาณการใช้แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มาก รวมถึงการใช้วัตถุดิบที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละลอตของการผลิต ซึ่งส่งผลถึงต้นทุนการผลิตของบริษัท จากการศึกษาพบว่าวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตบิลเลตอะลูมิเนียมของบริษัทประกอบด้วย

- 1) แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Ingot) : อะลูมิเนียมที่ผลิตจากอะลูมิเนียมปฐมภูมิไม่มีธาตุเจืออื่น (Primary Aluminium)
- 2) เศษโลหะภายในโรงงาน : เป็นเศษโลหะจากบริษัท ไทยเม็ททอล จำกัด และบริษัท ในเครือ
- 3) เศษโลหะจากภายในประเทศ : เป็นเศษโลหะจากภายในประเทศที่ผ่านการแปลงสภาพมาแล้ว
- 4) เศษโลหะจากต่างประเทศ : เป็นเศษโลหะจากต่างประเทศมีธาตุเจือปนอยู่ไม่ได้แยกชนิด มีอยู่มากในโรงงาน

ตารางที่ 1.1 สรุปปริมาณการใช้แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

ปริมาณการใช้แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (เปอร์เซ็นต์/วัน)	กรกฎาคม 2553	สิงหาคม 2553	กันยายน 2553
มากที่สุด	56.18 %	41.65 %	47.49 %
น้อยสุด	18.58 %	18.48 %	24.75 %
ค่าเฉลี่ย	30.24 %	30.71 %	38.23 %
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	9.22	6.10	6.62

จะพบว่าแท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เป็นส่วนผสมที่มีราคาแพงที่สุด ถ้าหากลดปริมาณการใช้แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ได้ย่อมหมายถึงต้นทุนการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียมลดลงด้วย และนำเศษโลหะมาใช้ในการผลิตเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลให้ควบคุมส่วนผสมทางเคมีของผลิตภัณฑ์ได้ยาก ดังนั้นงานวิจัยจึงทำการเก็บข้อมูลเพื่อหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะ และปริมาณการใช้วัตถุดิบชนิดอื่นๆ เพื่อนำมาสร้างโปรแกรมคำนวณสัดส่วนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ช่วยในการกำหนดปริมาณวัตถุดิบชนิดต่างๆ และควบคุมต้นทุนของวัตถุดิบในการผลิตให้มีค่าต่ำที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อให้ได้เครื่องมือช่วยในการคำนวณสัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้หลอม โดยส่วนผสมทางเคมีของบิลเลทอะลูมิเนียมมีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐาน ในครั้งแรกของการป้อนน้ำอะลูมิเนียม
- 1.2.2 เพื่อลดต้นทุนจากวัตถุดิบของการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม
- 1.2.3 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการวางแผนการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม

1.3 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.3.1 รอบเวลา (Cycle Time) ในการผลิตต่อรอบลดลง เนื่องจากสามารถกำหนดสัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมทำให้ได้ส่วนผสมทางเคมีของบิลเลทอะลูมิเนียมใกล้เคียงกับมาตรฐาน ในครั้งแรกของการป้อนน้ำอะลูมิเนียม
- 1.3.2 พลังงานที่ใช้ในการผลิตลดลง
- 1.3.3 ตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น สามารถนำไปใช้งานได้จริง ทำให้การวางแผนการผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสม

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตและต้นทุนการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม ในบริษัทตัวอย่าง โดยสนใจการป้อนน้ำอะลูมิเนียมครั้งแรกในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม ให้ได้ส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงมาตรฐาน โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft Excel) เวอร์ชัน 2010 กำหนดระยะเวลาการเก็บข้อมูลตั้งแต่มีนาคม 2011 ถึง พฤษภาคม 2012

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 รวบรวมข้อมูลมาตรฐานต่างๆ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหล่อบิลเลทอะลูมิเนียม
- 1.5.2 วิจัย ศึกษาและทดลองถึงปัจจัยด้านปริมาณและส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบที่มีผลต่อการหล่อบิลเลทอะลูมิเนียม
- 1.5.3 เก็บข้อมูลปัจจัยที่มีผลต่อการหล่อบิลเลทอะลูมิเนียมในด้านปริมาณและส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบ
- 1.5.4 วิเคราะห์ผลและนำผลที่ได้มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อคำนวณสัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้หลอม และต้นทุนของวัตถุดิบในการผลิต
- 1.5.5 นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทดลองปฏิบัติงานจริง ศึกษาผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้งาน และปรับปรุงแบบจำลองให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานจริง
- 1.5.6 สรุปผลและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติอะลูมิเนียม

โลหะได้มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาของประเทศที่เจริญทางด้านอารยธรรม (civilization) เมื่อกล่าวถึงโลหะโดยทั่วไปจะนึกถึงเหล็ก นอกจากเหล็กแล้วยังมีอะลูมิเนียมซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง เนื่องจากมีสมบัติพิเศษ สามารถใช้งานแทน ไม้ ทองแดง เหล็ก และเหล็กกล้าได้ดี อะลูมิเนียมจัดอยู่ในกลุ่มโลหะนอกกลุ่มเหล็ก และสามารถผสมกับทองแดงเป็นโลหะผสมได้ดีราวกับผสมกับตะกั่ว ดีบุก และสังกะสี ในยุคแรกอะลูมิเนียมไม่ได้เป็นที่ยอมรับในทางการค้าจนกระทั่งมาถึงคริสต์ศตวรรษที่ 19 เนื่องจากอะลูมิเนียมอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ซึ่งไม่สามารถแยกออกได้ง่ายด้วยคาร์บอนเช่นเดียวกับเหล็ก

เริ่มแรกได้มีการผลิตอะลูมิเนียมในรูปแบบสเกลห้องปฏิบัติการ โดยคุณออสเตด (Orsted) ประเทศเดนมาร์ก ในปี ค.ศ. 1825 จากนั้นคุณ วอลท์เลอร์ (Woehler) ชาวเยอรมัน พัฒนาการรวมวิธีการถลุงแร่ โดยใช้เวลาน้อยลง จากนั้นผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมเริ่มเป็นที่รู้จักกันในทางการค้าในปี ค.ศ. 1855 โดยคุณแซนต์-แคร์ (Sainte-Claire) ประเทศฝรั่งเศส โดยใช้เทคนิคทางด้านเคมีซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่สิ้นเปลืองมาก

ในปี ค.ศ. 1866 เวอร์เนอร์ วอน ซิเมน (Werner von Siemens) ได้ประดิษฐ์ไดนาโมขึ้นถึงแม้ว่าในความเป็นจริงจะไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับอะลูมิเนียม แต่สิ่งประดิษฐ์ดังกล่าวมีบทบาทสำคัญมากเนื่องจากสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในปริมาณมากสำหรับอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมในยุคแรก

ในปี ค.ศ. 1886 คุณ ชาลส์เลต มาร์ติน ฮอลล์ (Charles Martin Hall) ชาวอเมริกัน และ คุณพอล เฮอร์โลต (Paul L.T. He'roult) ชาวฝรั่งเศส ได้ค้นพบกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมทางการค้าโดยใช้หลักการอิเล็กโทรไลซิสจากอ่างเกลือหลอมเหลว (fuse salt bath) ซึ่งกรรมวิธีดังกล่าวเป็นพื้นฐานการผลิตอะลูมิเนียม [2]

2.2 อะลูมิเนียมและโลหะผสมของอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมและโลหะผสมของอะลูมิเนียมมีความหนาแน่นต่ำ (2.7 g/cm^3) นำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี ทนการกัดกร่อนดีในสภาวะแวดล้อมบางสภาวะรวมทั้งในบรรยากาศ โลหะอะลูมิเนียมง่ายต่อการขึ้นรูปเนื่องจากมีความเหนียวสูง เช่น อะลูมิเนียมฟอยล์ที่ได้จากการรีดแท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

เนื่องจากอะลูมิเนียมมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC จึงมีสมบัติเหนียวแม้ที่อุณหภูมิต่ำ อะลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวต่ำ (660°C , 1220°F) ทำให้ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ได้

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

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

นอกจากนี้ยังได้พัฒนาโลหะผสมอะลูมิเนียม - ลิเทียม ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องบิน ยานอวกาศ เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ (2.5 และ 2.6 g/cm^3) มีค่ามอดูลัสจำเพาะสูง ทนทานความล้าได้ดีมาก และมีค่าความแกร่งสูง แม้จะใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุบางชนิดยังสามารถชุบแข็งแบบตกตะกอนได้ อย่างไรก็ตามการผลิตโลหะผสมนี้มีราคาแพงกว่าการผลิตโลหะผสมของอะลูมิเนียมทั่วไป เพราะต้องใช้กระบวนการเทคนิคพิเศษเนื่องจากลิเทียมอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ [2]

2.3 การกำหนดสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloys Designation System)

สมาคมอะลูมิเนียมแห่งอเมริกา (The Aluminium Association of America) ได้กำหนดสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมผสมขึ้น โดยสามารถแยกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภทคือ [3]

- 2.3.1 การกำหนดสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมผสมขึ้นรูป (Designation for Wrought Aluminium Alloys) สำหรับการกำหนดสัญลักษณ์ เพื่อจัดกลุ่มของอะลูมิเนียมผสมขึ้นรูป หรืออะลูมิเนียมผสมรีด โดยใช้ระบบตัวเลข 4 หลัก กำกับซึ่งมีความหมายดังนี้ เลขหลักที่หนึ่ง แสดงกลุ่มของโลหะอะลูมิเนียมซึ่งมีอยู่ 8 กลุ่ม

เลขหลักที่สอง แสดงส่วนผสมอื่นที่เพิ่มเติมเข้าไปโดยใช้ตัวเลข 1-9 แต่ถ้าเป็นเลขศูนย์ (0) แสดงว่าเป็นโลหะเดิม เช่น 2024 (4.5 Cu, 1.5 Mg, 0.5 Si, 0.1 Cr) เทียบกับ 2218 (4.0 Cu, 2.0 Ni, 1.5 Mg, 0.2 Si) จะเห็นว่าโลหะ 2218 มีนิกเกิลผสมเพิ่มเติมเข้าไป เลขหลักที่สามและหลักที่สี่ แสดงถึงส่วนผสมที่แตกต่างกันของโลหะผสมชนิดย่อยๆ ที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน เช่น อะลูมิเนียม ในกลุ่ม 1xxx นั้นตัวเลขหลักที่สามและหลักที่สี่ จะแสดงปริมาณของอะลูมิเนียมที่จุดตกตะกอน 2 ตำแหน่ง หลังเลขที่บอกความบริสุทธิ์ของ อะลูมิเนียม 99% เช่น 1060 และ 1080 หมายถึงอะลูมิเนียมขึ้นรูป ที่มีอะลูมิเนียมผสมอยู่ 99.60% และ 99.80% ตามลำดับ

2.3.2 การกำหนดสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อ (Designation for Cast Aluminium Alloys) บริษัทอะลูมิเนียมแห่งอเมริกา (Alcoa : Aluminium Co. of America) ซึ่งเป็นบริษัทผลิตอะลูมิเนียมที่ใหญ่ของอเมริกาและมีอิทธิพลในวงการค้ามากได้กำหนดสัญลักษณ์อะลูมิเนียมผสมหล่อ โดยใช้ระบบตัวเลข 2 หลักหรือ 3 หลัก กำกับซึ่งมีความหมายดังนี้

ตัวเลข 2 หลัก ใช้แทนโลหะอะลูมิเนียมผสมที่มีซิลิคอนผสมเป็นธาตุหลัก

ตัวเลข 3 หลัก ตัวเลขหลักแรกใช้แทนกลุ่มที่มีธาตุๆ หนึ่งเป็นธาตุผสมหลักซึ่งมีสัญลักษณ์แทนที่ นอกจากนี้ถ้าจะมีตัวอักษรภาษาอังกฤษนำหน้าตัวเลข ซึ่งเขียนเป็นสัญลักษณ์เพื่อแสดงถึงส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงไป และบอกถึงกรรมวิธีการหล่อ เช่น 214 (3.8% แมกนีเซียม) เหมาะสำหรับหล่อลงในแบบทราย

การกำกับภาวะประสงค์สำหรับโลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม (Temper Designation for Aluminium and Aluminium alloys)

ในปี ค.ศ. 1948 สมาคมอะลูมิเนียมแห่งอเมริกา ได้ตั้งระบบการให้สัญลักษณ์ตามสภาพของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตต่างๆ จนแสดงคุณสมบัติทางกายภาพของทางกลตามความต้องการของผู้ใช้ โดยใช้สัญลักษณ์เป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษได้แก่ F, O, H, W และ T เขียนตามหลังสัญลักษณ์ของโลหะผสมโดยมีจุดนำหน้า แล้วอาจจะมีตัวเลข 1 หรือ 2 ตัวตามหลังด้วย เช่น A 132-T 65 เป็นต้น สำหรับความหมายของสัญลักษณ์ต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้คือ [3]

F คือ สภาพเดิม (Fabricated) หมายถึงสภาพของโลหะที่ได้จากการผลิตธรรมดาโดยไม่มีกรรมวิธีการทางกล หรือกรรมวิธีทางความร้อนเข้ามาช่วยเป็นชิ้นงานสภาพเดิม

O คือ สภาพอบอ่อน (Annealed) หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีการอบอ่อน เพื่อให้โลหะมีความอ่อนและเหนียวเพิ่มขึ้น

H คือ สภาพแข็งโดยการทำงาน (Work-Hardened) หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านกระบวนการทำงานทางกล เพื่อให้มีความแข็งแรงสูงเพิ่มขึ้น อาจจะเป็นกรรมวิธีการทำงานแบบร้อนหรือแบบเย็นก็ได้

H1 คือ ทำให้แข็งโดยความเครียดอย่างเดียว (Strain-Hardened Only) หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านการทำให้แข็งด้วยความเครียดอย่างเดียว และจะมีตัวเลขหลักที่สองกำกับอยู่ด้วยเพื่อแสดงปริมาณการถูกทำให้แข็ง เช่น

H12 หมายถึง Quarter hard โลหะจะถูกแปรรูป 20%

H14 หมายถึง Half hard โลหะจะถูกแปรรูป 40 %

H18 หมายถึง Full hard โลหะจะถูกแปรรูป 80%

H19 หมายถึง Extra hard โลหะจะถูกแปรรูป 90%

H2 คือ ทำให้แข็งและอบอ่อนบางส่วน (Strain – Hardened and Partial Annealed) หมายถึง สภาพของโลหะที่ถูกทำให้แข็งด้วยความเครียด แล้วนำไปอบอ่อนบางส่วน เพื่อให้โลหะเหนียวขึ้นแต่ความแข็งแรงยังเหมือนกับโลหะที่ใช้สัญลักษณ์ H1

H3 คือ ทำให้แข็งและคงรูป (Strain-Hardened and Then Stabilizing) หมายถึง สภาพของโลหะที่ถูกทำให้แข็งและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยผ่านกระบวนการแปรรูปเย็นและก็คงคุณสมบัติไว้แล้ว นำโลหะไปทำกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งความร้อนนี้ยังไม่สูงพอที่จะทำให้ความเครียดทั้งหมดไป สภาพของโลหะแบบนี้ส่วนมากใช้กับโลหะพวก อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม W คือ การอบละลาย (Solution-Heat Treatment) หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อให้เกิดการละลายของธาตุผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยอาจปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ โลหะก็จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดการแยกตัวแข็งโดยอายุ (Natural Aging) ดังนั้นการกำกับสัญลักษณ์ก็ต้องบอกถึงระยะเวลาที่ทิ้งไว้ด้วย จะเห็นว่าสภาพดังกล่าวนี้จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของโลหะผสมที่สามารถเกิดการแยกตัวแข็ง (Precipitation Hardening) ได้เองและไม่เกิดขึ้นกับโลหะทั่วไป เช่น โลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดงที่มีสัญลักษณ์ 2024-W (1/2 hr) หมายความว่า โลหะนี้ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน จนทำให้ทองแดงละลายเข้าไปในอะลูมิเนียมจนหมด แล้วปล่อยให้เย็นอย่างรวดเร็วในอากาศ เป็นเวลานานครึ่งชั่วโมง

T คือ อบด้วยความร้อน (Thermally treated) หมายถึงสภาพของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งอาจจะทำร่วมกับกระบวนการทำงานทางกลหรือไม่รวมก็ได้และตามหลังอักษร T จะมีตัวเลข 2 ถึง 10 กำกับไว้เพื่อบอกความแตกต่างดังต่อไปนี้

T2 คือ อบอ่อน (Annealed) หมายถึง สภาพอบอ่อนซึ่งใช้เฉพาะสำหรับงานหล่อเท่านั้น

T3 คือ อบละลายและกรรมวิธีการทำงานแบบเย็น (Solution Heat Treated and Then Cold Worked) หมายถึงสภาพของโลหะที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปแปรรูปเย็นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง

T4 คือ การอบละลายแล้วแยกตัวแข็งโดยอายุ (Solution Treated and Naturally Aged) หมายถึงสภาพของโลหะที่ผ่านการอบละลายแล้วปล่อยให้เกิดการแยกตัวแข็งโดยธรรมชาติ และมีระยะเวลา หรืออายุด้วย

T6 คือ การอบละลายแล้วแยกตัวแข็ง (Solution Treated and Aged at Slightly Temperature) หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านการอบละลาย แล้วไปอบทางความร้อนต่อ เพื่อให้เกิดการแยกตัวแข็ง

T7 คือ อบละลายแล้วทำให้คงสภาพ หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านการอบละลายโดยการควบคุมทั้งอุณหภูมิและเวลาเพื่อควบคุมการเติบโตของเกรนหรือเพื่อควบคุมความเค้นที่ตกค้างภายในโลหะ หรือเพื่อควบคุมทั้งสองอย่าง

T8 คือ อบละลายแล้วแปรรูปแบบเย็น แล้วอบแยกตัวแข็งหมายถึงสภาพของโลหะที่ผ่านการอบละลาย แล้วนำไปแปรรูปแบบเย็นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงต่อจากนั้นจึงนำไปอบแยกตัวแข็ง

T9 คือ อบละลายแล้วอบแยกตัวแข็งและแปรรูปแบบเย็น หมายถึงสภาพของโลหะที่ผ่านการอบละลาย แล้วอบแยกตัวแข็ง หลังจากนั้นจึงนำไปแปรรูปเย็น เพื่อเพิ่มความแข็งแรง

T10 คือ อบแยกแข็งแล้วแปรรูปเย็น หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อให้เกิดการแยกตัวแข็ง จากนั้นนำไปแปรรูปเย็นอีกเพื่อเพิ่มความแข็งแรง

2.4 ชนิดของโลหะอะลูมิเนียมผสม

โลหะอะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะอื่นๆ ได้หลายชนิด เช่น ทองแดง ซิลิกอน แมกนีเซียม สังกะสี ซึ่งโลหะผสมแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป สามารถเลือกใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โลหะอะลูมิเนียมผสมสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้ [3]

2.4.1 โลหะผสมประเภทขึ้นรูปเย็น (Wrought Alloys) เป็นโลหะผสมที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีด การอัดขึ้นรูปออกมาแบบแผ่น หรือเป็นแท่ง ซึ่งจะมีทั้งที่สามารถอบชุบแข็งตัวด้วยความร้อนได้ (heat treatable) และที่อบชุบไม่ได้ ส่วนใหญ่โลหะที่นำมาผสมด้วยจะประกอบไปด้วย ทองแดง ซิลิกอน และแมกนีเซียม

2.4.2 โลหะผสมประเภทหล่อ (Cast Alloys) เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติพิเศษ มีความสามารถในการไหลที่ดี ช่วยในการหล่อขึ้นรูปได้ง่าย อยู่ในรูปของแท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ หรือแท่งเกรดต่างๆ ส่วนใหญ่โลหะชนิดนี้สามารถอบชุบแข็งตัวด้วยความร้อนได้ โลหะผสมที่สำคัญได้แก่ ซิลิกอน

การแบ่งกลุ่มของอะลูมิเนียมสามารถแบ่งได้ 8 กลุ่มดังที่แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม [2]

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1xxx	อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99%
2xxx	ทองแดง (Copper, Cu)
3xxx	แมงกานีส (Manganese, Mn)
4xxx	ซิลิคอน (Silicon, Si)
5xxx	แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)
6xxx	แมกนีเซียมกับซิลิคอน (Magnesium, Mg and Silicon, Si)
7xxx	สังกะสี (Zinc, Zn)
8xxx	ธาตุอื่นๆ (Other Element)

- 1) อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (อนุกรม 1xxx) ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมจะมีความบริสุทธิ์ของอะลูมิเนียมที่ 99.0 เปอร์เซ็นต์ ถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์ อะลูมิเนียมในกลุ่มนี้มีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และยังสามารถสะท้อนแสงได้ดี จึงนิยมใช้ในการผลิตแผงสะท้อนแสงในไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย ทั้งการตัด เชื่อมและขึ้นรูปขึ้นด้วยกระบวนการต่างๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่อะลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีข้อเสียคือ ในด้านของความแข็งแรง และคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจืออื่นเพื่อให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็น คือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น (Strain Hardening)
- 2) อะลูมิเนียมเจือทองแดง (อนุกรม 2xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง คุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และ ชุบ (Quenching) จากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการอบบ่ม (Ageing Hardening) ซึ่งภายหลังการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลง และความสามารถในการเชื่อมของอะลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำกว่าชนิดอื่นๆ คือจะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีทางกลคือการย้ำหมุด
- 3) อะลูมิเนียมเจือแมงกานีส (อนุกรม 3xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติ เหมือนกับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้

- 4) อะลูมิเนียมเจือซิลิคอน (อนุกรม 4xxx) อะลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะไหลตัวได้ดี และขณะแข็งตัวจะไม่เกิดการแตกร้าวทั้งในสภาพร้อนและเย็น ดังนั้นอะลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติมสำหรับเชื่อมอะลูมิเนียมเจือและอะลูมิเนียมหล่อ
- 5) อะลูมิเนียมเจือแมกนีเซียม (อนุกรม 5xxx) บางครั้งมีการเติมแมงกานีสลงไปด้วยอะลูมิเนียมเจือชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ นิยมนำไปทำลวดเติมสำหรับเชื่อมเหมือนกับอนุกรม 4xxx นอกจากนั้นยังนิยมนำไปทำเป็นถังหรือขวดบรรจุแก๊ส (Storage Vessels)
- 6) อะลูมิเนียมเจือแมกนีเซียม – ซิลิคอน (อนุกรม 6xxx) อะลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสียคือ เมื่อนำอะลูมิเนียมเจือชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการให้ความร้อนแบบต่างๆ จะทำให้บริเวณแนวเชื่อมอ่อน
- 7) อะลูมิเนียมเจือสังกะสี - แมกนีเซียม (อนุกรม 7xxx) อะลูมิเนียมชนิดนี้มีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักและและแมงกานีสเป็นธาตุรอง นอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อยอะลูมิเนียมเจือกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อม อะลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาอะลูมิเนียมชนิดนี้โดยการผสมแมกนีเซียมลงไปและกำจัดทองแดงออกไปทำให้ความสามารถในการเชื่อมของอะลูมิเนียมชนิดสูงขึ้น โดยจะไม่เกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อมเพราะบริเวณดังกล่าวได้เกิดการแข็งตัวจากตกตะกอนตามธรรมชาติ

2.5 อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิคอน หมายเลข 6063

ตามมาตรฐานของ TIMCO-STANDARD-TANDEM อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิคอน หมายเลข 6063 มีส่วนผสมทางเคมี ตามตารางที่ 2.2 นอกจากนี้อะลูมิเนียมหมายเลขนี้ยังมีสมบัติทางอุณหภูมิ และสมบัติเชิงกลที่สำคัญ ตามตารางที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิกอนหมายเลข 6063 ตามมาตรฐานของ TIMCO-STANDARD-TANDEM [2]

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

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางความร้อนของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิกอนหมายเลข 6063 [2]

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

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิกอนหมายเลข 6063 [2]

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	72	152
T83	255	241	9	82	152
T831	207	186	10	70	124
T832	290	269	12	95	186

การประยุกต์ใช้งานของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิโคน หมายเลข 6063

อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิโคนหมายเลข 6063 ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานหลายด้าน อาทิเช่น ราวรั้ว อานม้า ประตู หน้าต่าง ท่อน้ำ กระบะของรถบรรทุก

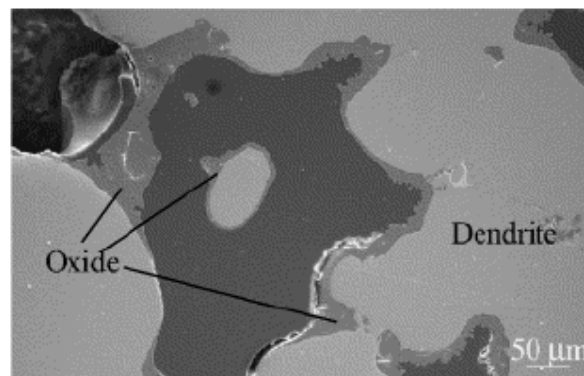
2.6 ความสะอาดของอะลูมิเนียมหลอมเหลวสำหรับการหล่อโลหะ

อะลูมิเนียมหลอมเหลวมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนเกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ นอกจากนั้นการมีธาตุผสมต่างๆ ล้วนทำให้มีโอกาสเกิดเป็นสารประกอบอื่นๆ ปนเปื้อนในอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ การที่อะลูมิเนียมหลอมเหลวมีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำ ทำให้ออกไซด์และสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับอะลูมิเนียมหลอมเหลว มีโอกาสปนเปื้อนอยู่ภายในอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ เพราะจำกัดออกยาก ส่วนสิ่งปนเปื้อนที่มีความหนาแน่นมากซึ่งมักจะจมอยู่ด้านล่างก็ก่อให้เกิดปัญหาเช่นเดียวกัน ซึ่งบทความนี้อธิบายถึงผลของความสะอาดต่อคุณภาพในงานหล่ออะลูมิเนียม และอธิบายถึงสิ่งปนเปื้อนประเภทตะกอน (Sludge) ว่าสามารถเกิดขึ้นและป้องกันได้อย่างไร

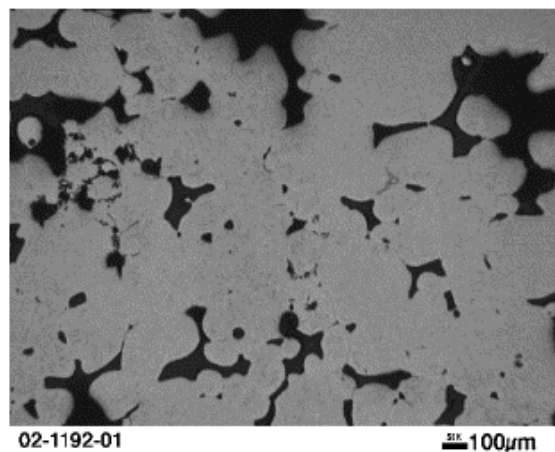
ความสะอาดของอะลูมิเนียมหลอมเหลว มักนิยามจากการที่ไม่มีสิ่งปนเปื้อน (Inclusion) เจือปนอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวน้อย สิ่งปนเปื้อนโดยส่วนใหญ่มักเป็นกลุ่มออกไซด์ เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และอื่นๆ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออะลูมิเนียมหลอมเหลวสัมผัสกับความชื้น และออกซิเจนในอากาศ ในทางปฏิบัติสำหรับงานหล่อในอุตสาหกรรมจึงเป็นไปได้ที่จะควบคุมไม่ให้เกิดมีออกไซด์ปนเปื้อนในอะลูมิเนียมหลอมเหลว

แหล่งที่มาของสิ่งปนเปื้อนเกิดขึ้นได้จากหลายแหล่ง เช่น จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของอะลูมิเนียมหลอมเหลว การมีสิ่งสกปรกอยู่ในวัสดุบรรจุเตา วัสดุทนไฟ หรือแม้แต่วัสดุบรรจุเตาที่ตั้งใจใส่ลงไปในอะลูมิเนียมหลอมเหลวเพื่อจุดมุ่งหมายต่างๆ เช่น ฟลักซ์ และสารปรับสภาพเกรนให้ละเอียด เป็นต้น แต่การใช้ในปริมาณมากเกินไปหรือใช้งานที่อุณหภูมิไม่เหมาะสม นอกจากนั้นแล้วเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมอะลูมิเนียมหลอมเหลว เช่น ที่กวาดครอส ที่จุ่มกดฟลักซ์ ซึ่งในโรงงานโดยทั่วไปมักทำจากวัสดุจำพวกเหล็ก และหากไม่มีการทาสารทนไฟไว้ที่ผิวก็มักทำให้เหล็กปนเปื้อนเข้าไปในอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้เป็นอย่างมาก และแม้ว่าเป็นเครื่องมือที่ทำมาจากวัสดุอย่างดี แต่หากมีการนำไปใช้โดยมีการสัมผัสกับอะลูมิเนียมหลอมเหลวในลักษณะเอาเข้า เอาออกระหว่างภายในอะลูมิเนียมหลอมเหลวกับบรรยากาศ จะส่งผลทำให้เกิดการปนเปื้อนของออกไซด์ได้มากขึ้น

แท่งอะลูมิเนียม (Ingot) ที่ใช้หลอมย่อมมีผิวที่มีอะลูมิเนียมออกไซด์อยู่ในระดับเล็กน้อยขึ้นกับเทคนิคการผลิต ซึ่งเป็นการยากที่จะกำจัดอะลูมิเนียมออกไซด์เหล่านี้ออกไปได้ ดังนั้นจึงพบว่าโรงงานผลิตแท่งอะลูมิเนียมที่ทันสมัยในต่างประเทศ ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีการหล่อแท่งอะลูมิเนียมแบบต่อเนื่องมาใช้งาน เช่น เทคนิคการหล่อแบบต่อเนื่องของ Properzi เป็นต้น เพื่อจุดมุ่งหมายในการลดปริมาณการเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์และปนเปื้อนเข้าไปในอะลูมิเนียมหลอมเหลว อย่างไรก็ตามยังมีการวิจัยที่แสดงถึงการเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์ว่าไม่ได้ขึ้นอยู่กับผิวหน้าของแท่งอะลูมิเนียมเท่านั้น แต่สามารถฝังอยู่ภายในแท่งอะลูมิเนียมได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1



(a)



(b)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางจุลภาคที่ตรวจพบบริเวณส่วนกลางของแท่งอะลูมิเนียม (a) เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงไม่พบสิ่งผิดปกติแต่อย่างใด และ (b) ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถตรวจพบผิวของออกไซด์ที่บริเวณแกนของเดนไดรต์ [4]

นอกจากนั้นแล้วสิ่งปนเปื้อนอาจเกิดขึ้นเอง ในกรณีที่มีธาตุผสมในอะลูมิเนียมบางธาตุเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นสารประกอบชนิดใหม่ในอะลูมิเนียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมี เหล็ก แมงกานีส และโครเมียม อยู่ในปริมาณมาก และได้เป็นสิ่งปนเปื้อนที่เป็นตะกอนจมอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลว

ประเภทของสิ่งปนเปื้อนสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวมีอยู่มากมายหลายประเภท ซึ่งมีความแตกต่างกันในแง่ของความหนาแน่นขนาด และลักษณะของเกิดขึ้นว่าเป็นฟิล์ม เป็นอนุภาคขนาดเล็ก หรือเป็นอนุภาคที่มีการเกาะกันเป็นกลุ่ม ซึ่งสามารถสรุปไว้ในตารางที่ 2.5

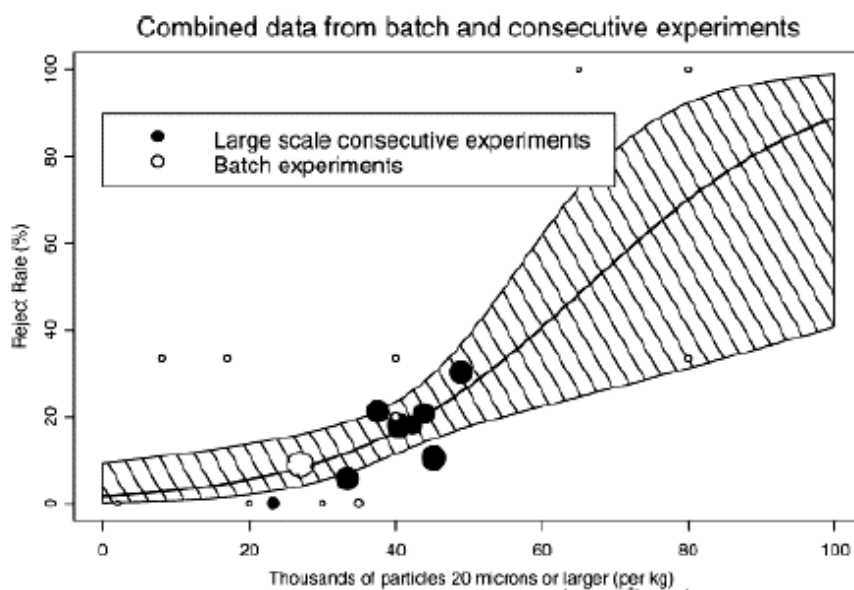
ตารางที่ 2.5 ความถ่วงจำเพาะ ขนาด และลักษณะของสิ่งปนเปื้อนชนิดต่างๆ [4]

ประเภทของสิ่งปนเปื้อน	สูตรเคมี	ลักษณะ	ความหนาแน่น (g/cc)	ขนาด (Micron)
ออกไซด์ (Oxide)	Al_2O_3	อนุภาค	3.97	0.2 – 30
		ฟิล์ม		10 – 5000
	MgO	อนุภาค	3.58	0.1 – 5
		ฟิล์ม		10 – 5000
	$MgAl_2O_4$	อนุภาค	3.6	0.1 – 5
		ฟิล์ม		10 – 5000
	SiO_2	อนุภาค	2.66	0.5 – 5
ฟลักซ์ (Flux)	คลอไรด์	อนุภาค	1.98 – 2.16	0.1 – 5
	ฟลูออไรด์			
คาร์ไบด์ (Carbide)	Al_4C_3	อนุภาค	2.36	0.5 – 25
	SiC	อนุภาค	3.22	
ไนไตรด์ (Nitride)	AlN	อนุภาค	3.26	10 – 50
		ฟิล์ม		
โบไรด์ (Boride)	TiB_2	อนุภาค	4.5	1 – 30
		กลุ่มของอนุภาค		
	AlB_2	อนุภาค	3.19	0.1 – 3
ตะกอน (Sludge)	$Al(FeMnCr)Si$	อนุภาค	>4.0	

ที่มา: NADCA, Metal Melting & Handling (In-Plant Study Short Course)

สิ่งปนเปื้อนที่พบมากที่สุดมักเป็นประเภทออกไซด์ นอกจากนั้นธาตุบางอย่างที่ละลายอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวยังมีโอกาสที่ทำให้เกิดเป็นออกไซด์เชิงซ้อน เช่น การเกิดออกไซด์ของทั้งอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม หรือที่เรียกว่า สปินเนล (Spinel) ดังนั้นการหลอมอะลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียมอยู่ในปริมาณมาก มักพบว่ามียอดออกไซด์มากกว่าการหลอมอะลูมิเนียมกลุ่มอื่น ส่วนสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ ที่มักพบอาจมาจากแร่ วัสดุทนไฟ เช่น การมีซิลิโคนคาร์ไบด์หลุดออกจากแร่เข้าไปสู่อะลูมิเนียมหลอมเหลว ส่วนการใช้ฟลักซ์ในปริมาณมากเกินไป หรือมีเทคนิคการเดิมที่ไม่ถูกต้องเหมาะสม และฟลักซ์เหล่านั้นสามารถเข้าไปปนเปื้อนกับทั้งออกไซด์ต่างๆ และครอสมีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับอะลูมิเนียมหลอมเหลว ทำให้เป็นการยากที่จะกำจัดออกภายหลัง ผลกระทบจากการมีสิ่งปนเปื้อน การมีสิ่งปนเปื้อนในอะลูมิเนียมหลอมเหลวมักเป็นต้นเหตุของปัญหาด้านต่างๆ เมื่อนำอะลูมิเนียมหลอมเหลวเหล่านั้นไปใช้ในกระบวนการหล่อ ซึ่งสามารถสรุปไว้ได้ดังนี้

- สิ่งปนเปื้อนทำให้ความสามารถในการไหลตัวของอะลูมิเนียมหลอมเหลวลดต่ำลง ทำให้มีโอกาสเกิดการไหลไม่เต็มแบบ หรืออาจต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าที่ควรจำเป็น และอาจส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดจุดเสียประเภทอื่นๆ ได้
- สิ่งปนเปื้อนทำให้สมบัติทางกลแย่ลงกว่าเดิม เช่น ความแข็งแรง ความสามารถในการยืดตัว (Elongation) ความต้านทานแรงกระแทก (Impact Resistance)
- สิ่งปนเปื้อนหลายประเภทมีความแข็งแรงมาก จะทำให้ความสามารถในการกลึงตัด (Machinability) ลดต่ำลง นอกจากนั้นอาจปรากฏเป็นร่องรอยอยู่ที่ผิวของชิ้นงานหลังจากการชุบผิว การทาสี และกระบวนการอะโนไดซ์ เป็นต้น
- สิ่งปนเปื้อนมักเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดรูพรุนจากก๊าซในชิ้นงานหล่อ ทั้งนี้เพราะในสิ่งปนเปื้อนมักมีช่องว่างของอากาศอยู่ภายในซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มของนิวเคลียสได้เป็นอย่างดี ดังนั้นเมื่อใช้อะลูมิเนียมหลอมเหลวในกระบวนการหล่อโลหะ จะทำให้มีโอกาสเกิดจุดเสียประเภทรูพรุนของก๊าซสูงขึ้นมาก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลงานวิจัยในกระบวนการหล่อแบบฉีด



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของร้อยละของเสียต่อจำนวนอนุภาคของสิ่งปนเปื้อนที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือเท่ากับ 20 ไมครอน [4]

ตะกอน (Sludge)

ตะกอนเกิดขึ้นจากสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) อยู่ในอะลูมิเนียมหล่อเหลว เนื่องจากมีความหนาแน่นที่สูงดังนั้นจึงจมอยู่ที่ก้นของเบ้า โดยส่วนมากสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นมักมีส่วนผสมทางเคมีของ เหล็ก แมงกานีส และโครเมียม อนุภาคของตะกอนเหล่านี้มักมีความแข็งแรงมากจนอาจทำให้เกิดความเสียหายของเครื่องมือระหว่างกระบวนการกลึงตัด

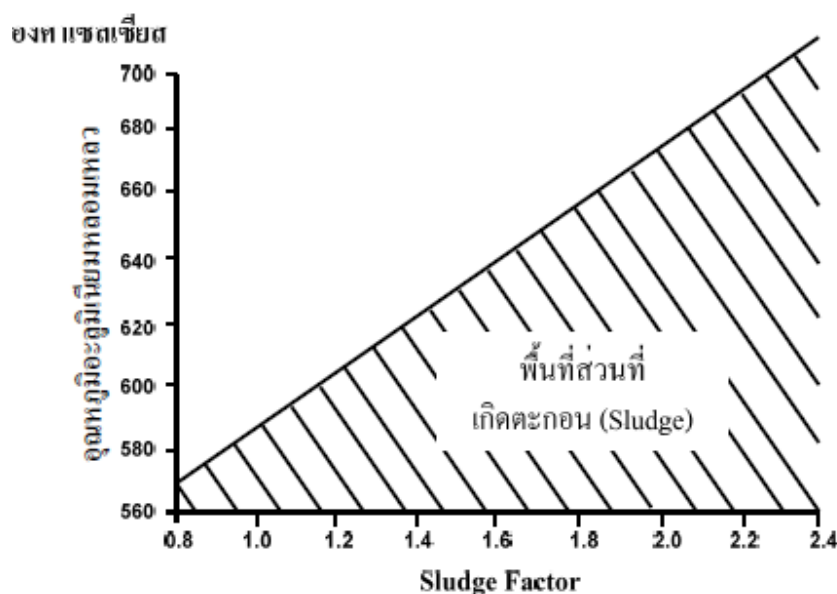
ตะกอนเหล่านี้มักเกิดในอะลูมิเนียมผสมเกรดที่ใช้กับกระบวนการหล่อแบบฉีด (Die Casting Process) ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมเกรดเหล่านี้มีเหล็กในปริมาณสูงถึง 0.8 – 1.1 % ทั้งนี้เพราะเหล็กสามารถป้องกันการเกิดการเชื่อมติดกับแม่พิมพ์ฉีด อย่างไรก็ตามเหล็กมักส่งผลร้ายต่อสมบัติทางกล เพราะมีอนุภาคที่แข็งแรงอยู่ในโครงสร้างแม้ว่าอัตราการเย็นตัวของอะลูมิเนียมในกระบวนการหล่อแบบฉีดจะสูงและช่วยลดผลเสียจากการมีเหล็กละลายอยู่มาก อย่างไรก็ตามยังทำให้มีโอกาสที่จะได้เฟสที่แหลมคมทำให้ความสามารถในการยึดตัวลดต่ำลง

การเติมแมงกานีสลงในอะลูมิเนียมผสมสามารถช่วยให้ได้โครงสร้างประกอบของเหล็กมีสภาพที่เหมาะสมขึ้น กล่าวคือเฟสของเหล็กจะมีโครงสร้างที่โค้งมนขึ้น ส่วนโครเมียมมีผลต่อการเกิดเฟสที่ส่งผลเสียต่อสมบัติทางกลเช่นเดียวกับเหล็ก ในกรณีที่โรงงานใช้เศษอะลูมิเนียมกลับมาหลอมซ้ำทำให้มีการสะสมของทั้งเหล็ก แมงกานีส และโครเมียมในปริมาณที่มากขึ้นเรื่อยๆ

โอกาสของการเกิดตะกอนการมีเหล็กเจือปนอยู่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวสามารถหลีกเลี่ยงได้ในบางกรณี อย่างไรก็ตามเหล็กเป็นธาตุที่มีความสำคัญในการป้องกันการติดกับแม่พิมพ์ การมีแมงกานีสและโครเมียมยิ่งช่วยให้ทำให้มีโอกาสเกิดตะกอนมากขึ้น ทั้งนี้โอกาสของการเกิดตะกอนสามารถคำนวณได้ออกมาในรูปของ Sludge Factor ดังสมการที่ 2.1

$$\text{Sludge Factor} = \%Fe + 2x\%Mn + 3x\%Cr \quad (2.1)$$

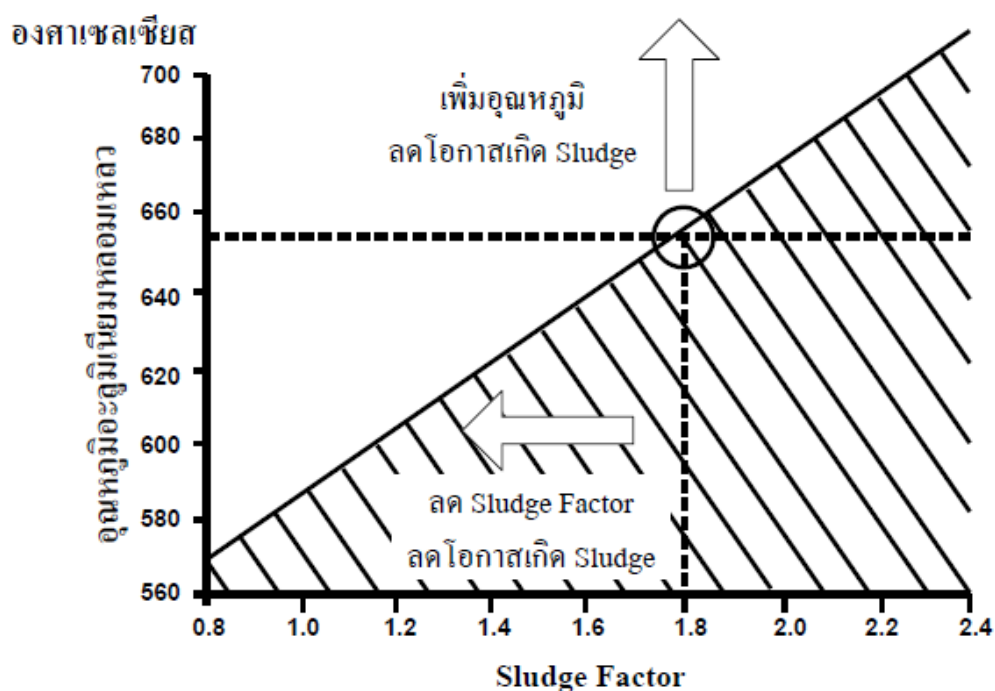
โดยทั่วไปยิ่ง Sludge Factor มีค่าสูงมากขึ้น ทำให้มีโอกาสในการเกิดตะกอนสูงมากขึ้นด้วย และโดยทั่วไปควรจำกัดไม่ให้สูงเกินกว่า 1.8% นอกจากนั้นแนวโน้มของการเกิดตะกอนยังขึ้นกับอุณหภูมิของอะลูมิเนียมหลอมเหลวทั้งในขณะที่อยู่ในขั้นตอนการหลอม หรือการค้ำอะลูมิเนียมหลอมเหลวไว้ในเตาอีกด้วย ในการทำนายโอกาสของการเกิดตะกอนของ $Al(FeMnCr)Si$ สามารถทำได้โดยใช้แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างค่า Sludge Factor ที่ได้จากการคำนวณจากส่วนผสมทางเคมี ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอะลูมิเนียมหลอมเหลวต่อค่า Sludge Factor ต่อโอกาสการเกิดตะกอน

ในการใช้แผนภูมิในรูปที่ 2.3 สามารถพิจารณาโดยใช้จุดตัดของแกน Y ซึ่งก็คืออุณหภูมิของอะลูมิเนียมหลอมเหลว กับแกน X คือค่า Sludge Factor มีค่าอยู่ในบริเวณรอยต่อของพื้นที่ที่แรเงาไว้แสดงว่าอะลูมิเนียมหลอมเหลวนี้มีโอกาสเกิดตะกอนของ $Al(FeMnCr)Si$ ขึ้นได้ทุกขณะ เพราะอยู่ที่จุดสมดุลพอดี เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงว่าหากมีค่า Sludge Factor ที่สูงก็ควรควบคุมให้อุณหภูมิของอะลูมิเนียมหลอมเหลวสูงพอที่จะทำให้จุดตัดอยู่นอกพื้นที่แรเงา ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 อย่างไรก็ตามการควบคุมอุณหภูมิไว้สูงเกินไปก็จะทำให้เกิดปัญหาอย่างอื่นตามมา เช่น

การมีไฮโดรเจนละลายอยู่มากเกินไป การมีโครสเกิดขึ้นในปริมาณมาก เป็นต้น ทางออกที่ดีกว่าจึงควรเป็นการควบคุมไม่ให้ Sludge Factor มีค่าสูงเกินไป หลักการเดียวกันนี้ยังสามารถใช้อธิบายการเกิดตะกอนของ Al(FeMnCr)Si ภายในเบ้าเท หรือในระหว่างการฉีดอะลูมิเนียมหลอมเหลวเข้าไปในแบบอีกด้วย เมื่ออุณหภูมิของ Al(FeMnCr)Si เกิดขึ้นก็จะเกิดอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงและจมลงในกันเบ้า เมื่อมีการกวนน้ำโลหะก็จะทำให้อนุภาคเหล่านี้มีโอกาสปนเปื้อนออกมากับอะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ เมื่ออุณหภูมิของเบ้าสูงมากพอ จะทำให้ตะกอนที่เดิมจมอยู่ที่ก้นเบ้านั้นละลายออกมาได้บางส่วน จึงไม่น่าประหลาดใจที่พบว่าบ่อยครั้งที่ส่วนผสมทางเคมีโดยเฉพาะเหล็กนั้นมีการเพิ่มขึ้นและลดลงในระหว่างกระบวนการผลิตเมื่อตัดตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์และหาปริมาณธาตุของโลหะและอโลหะที่เป็นของแข็ง (Emission Spectrometer) แม้ว่าไม่ได้มีการปรับส่วนผสมทางเคมีในอะลูมิเนียมหลอมเหลวก็ตาม



รูปที่ 2.4 แนวทางในการป้องกันการเกิดตะกอนโดยใช้แผนภูมิ

2.7 ตัวแบบการจัดสรรทรัพยากร

ทรัพยากร หมายถึง สิ่งที่มีไว้ใช้งานในองค์กรหรือบริษัท เพื่อเพิ่มผลผลิตหรือผลประโยชน์ให้แก่องค์กร ซึ่งทรัพยากรรวมถึง โรงงาน พนักงาน วัตถุดิบและทรัพย์สินต่างๆ โดยทั่วไปทรัพยากรมักมีอยู่อย่างจำกัด เช่น จำนวนพนักงาน จำนวนรถบรรทุกที่มีไว้ขนส่งสินค้า จำนวนเงินหมุนเวียน จำนวนรอบของการขนส่ง เป็นต้น โดยทั่วไปทรัพยากรนี้มักมีอยู่อย่างจำกัด องค์กรต้องมีการใช้หรือ การจัดสรร

ทรัพยากรเหล่านี้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด หรือกำไรสูงสุด ซึ่งประสิทธิภาพในการจัดสรรทรัพยากร อาจวัดอยู่ในรูปของปริมาณการผลิตสูงสุดหรือกำไรสูงสุด วิธีการจัดการทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด การสร้างตัวแบบเพื่อการตัดสินใจ (Decision model) ของปัญหาปัจจุบัน ผลของตัวแบบเป็นการประเมินผลโดยในเชิงตัวเลข โดยไม่มีอคติของผู้ตัดสินใจ หรืออารมณ์ของผู้ตัดสินใจ เราเรียกตัวแบบประเภทนี้ว่า ตัวแบบคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ที่แสดงความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ ของสิ่งต่างๆที่เราสนใจหรือเงื่อนไขต่างๆที่จำเป็นต้องคำนึงถึง ในสถานการณ์ของปัญหานั้น ซึ่งการใช้ตัวแบบคณิตศาสตร์เพื่อการตัดสินใจทำให้การตัดสินใจของผู้บริหารดีขึ้น หรือเพื่อให้เข้าในสถานการณ์ปัจจุบันดีขึ้น ตัวแบบคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดนี้เรียกว่าตัวแบบการจัดสรรทรัพยากร (Resource allocation model) โดยทั่วไปปัญหามักมีความซับซ้อนและอาจมีความขัดแย้งกับนโยบาย หรือความรู้สึกของคนเป้าหมายของการนำตัวแบบจัดสรรทรัพยากรไปใช้กับปัญหาจริงจะต้อง

- ระบุวัตถุประสงค์ของการตัดสินใจที่ต้องการทำ
- ตั้งเกณฑ์ที่จะใช้วัดความประสิทธิผลของทางเลือกต่างๆ
- กำหนดข้อจำกัดหรือเงื่อนไขที่ผู้ตัดสินใจจะต้องเผชิญ

เป้าหมายที่สำคัญที่สุดของการใช้ตัวแบบจัดสรรทรัพยากรคือ เพื่อช่วยองค์กรและผู้บริหารให้สามารถตัดสินใจได้ดีขึ้น [5]

2.7.1 องค์ประกอบของตัวแบบการจัดสรรทรัพยากร

ตัวแบบการจัดสรรทรัพยากรมีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วนคือ

- (1) ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables) ตัวแปรที่แทนกิจกรรมต่างๆ ของปัญหาที่เราสนใจ การหาค่าของตัวแปรที่ตัดสินใจ เป็นการหาว่าควรกระทำกิจกรรมมากน้อยในระดับใด เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น เช่นการผลิตสินค้าในโรงงานแห่งหนึ่ง มีผู้รับผิดชอบในเรื่องการวางแผนการผลิตต้องทราบว่าควรผลิตสินค้าแต่ละชนิดจำนวนเท่าใดในแต่ละสัปดาห์ สำหรับการแก้ปัญหาการขนส่งสินค้าจากโรงงานไปยังลูกค้าผู้รับผิดชอบต้องการทราบว่าส่งสินค้าไปตามเส้นทางใด จำนวนเท่าใด เป็นต้น
- (2) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ในการตัดสินใจแก้ปัญหาหนึ่งๆ เราอาจมีผลเฉลย (Solution) ของปัญหาได้หลายผลเฉลย ผู้ตัดสินใจต้องการเลือกผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเกณฑ์ในการเลือกผลเฉลยนี้จะสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการจัดสรรทรัพยากร ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัดสินใจต่างๆกับวัตถุประสงค์ของปัญหา ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะสะท้อนว่าผลเฉลยนั้นมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการจัดสรรทรัพยากรมากน้อยเพียงใด สำหรับการหาผลเฉลยที่ทำให้ผลรวม

ของผลตอบแทนรายปีมีค่าสูงสุด ดังนั้นเราเรียกทิศทางของฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้ ว่าเป็นค่าสูงสุด (Maximization) เป็นต้น ในทางกลับกันปัญหาการขนส่งสินค้าจากโรงงานหนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เพื่อให้ผลรวมค่าขนส่งต่ำสุด ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็นฟังก์ชันที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าขนส่งสินค้ากับปริมาณขนส่งในแต่ละเส้นทาง ผลเฉลยเหมาะสมที่สุดจะเลือกจากผลเฉลยที่ให้ผลรวมของค่าขนส่งที่ต่ำสุด เราเรียกทิศทางของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในลักษณะนี้ว่า ค่าต่ำสุด (Minimization)

- (3) ข้อจำกัด (Constraints) เงื่อนไขข้อจำกัดหรือของปัญหา บอกให้ผู้วิเคราะห์ทราบว่าทำอะไรได้บ้างไม่ได้บ้าง เช่น ในการวางแผนการผลิตสินค้า อาจมีข้อจำกัดด้านแรงงานที่ใช้ในการผลิตในแต่ละสัปดาห์หรือปริมาณความต้องการสูงสุดของสินค้าแต่ละชนิด ในตัวอย่างการลงทุน อาจมีนโยบายการลงทุนว่า การลงทุนในธุรกิจประเภทที่ 2 มีความเสี่ยงสูงผู้บริหารอาจไม่ต้องการที่จะลงทุนมาก จึงกำหนดนโยบายว่าการลงทุนประเภทที่ 2 จะไม่เกิน 1 ล้านบาท เป็นต้น

2.7.2 ประเภทของตัวแบบ

การแบ่งประเภทของตัวแบบการจัดสรรทรัพยากรนั้นมีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับเกณฑ์ในการแบ่งตัวแบบได้เสนอการออกแบบตัวแบบโดยเกณฑ์ต่างๆ ดังนี้

- (1) ตัวแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น จะเห็นว่าตัวแปรตัดสินใจแต่ละตัวแปรมักจะคูณด้วยค่าคงที่แล้วนำมาบวกกันเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หรือ สมการหรืออสมการของข้อจำกัด มีความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ตัวแบบนี้เรียกว่า ตัวแบบเชิงเส้น (Linear model) ถ้าตัวแบบที่มีความสัมพันธ์กันไม่เป็นเชิงเส้น เรียกว่า ตัวแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear model)
- (2) ตัวแบบเชิงจำนวนเต็มและไม่เป็นจำนวนเต็ม ตัวแบบที่พัฒนาขึ้นมาอาจจำเป็นต้องระบุให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าตัวเลขจำนวนเต็มเท่านั้น เช่น ในการศึกษาที่ตั้งคลังสินค้าเพื่อกระจายสินค้าสู่จังหวัดต่างๆ ในประเทศไทย อาจกำหนดตัวแปร X_i แทน การตั้งคลังสินค้าที่บริเวณ I หรือไม่ ถ้า $X_2 = 1$ แสดงว่า ควรตั้งคลังสินค้าบริเวณที่ 2 ถ้า $X_2 = 0$ แสดงว่าไม่ควรตั้งคลังสินค้าในบริเวณ 2 เราเรียกตัวแบบที่มีตัวแปรตัดสินใจต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มนี้ว่า ตัวแบบเชิงจำนวนเต็ม(Integer model) หากตัวแบบไม่มีข้อจำกัดเรื่องค่าของตัวแปรตัดสินใจต้องเป็นจำนวนเต็ม ตัวแบบนี้จะเป็น ตัวแบบไม่เป็นจำนวนเต็ม (Noninteger model)
- (3) ตัวแบบเชิงกำหนด และตัวแบบความน่าจะเป็น ตัวแบบเชิงกำหนด (Deterministic model) เป็นตัวแบบที่ประกอบด้วยค่าข้อมูลนำเข้าเป็นค่าคงที่ที่เราทราบค่าแน่นอน ดังนั้นการใช้ตัวแบบเชิงกำหนดจะมีสมมติฐานว่าข้อมูลนำเข้าที่ต้องการหรือค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบต้องมีค่าคงที่และสามารถทราบค่าที่แท้จริงนี้ได้ สำหรับตัวแบบความน่าจะเป็น (Stochastic

model) เป็นตัวแบบที่มีค่าข้อมูลนำเข้านั้นไม่ทราบค่าแต่มีอยู่ในรูปแบบของความสัมพันธ์ของปัจจัยอื่น หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าของพารามิเตอร์จะมีการแจกแจงอย่างใดอย่างหนึ่ง

ตัวแบบเชิงสถิติและตัวแบบเชิงพลวัต ตัวแบบเชิงสถิติ (Static model) เป็นตัวแปรที่มีตัวแปรตัดสินใจ ที่ตัวแปรตัดสินใจไม่มีความเกี่ยวข้องกับลำดับของการตัดสินใจที่มีหลายช่วงเวลา ในทางกลับกัน ตัวแปรเชิงพลวัต (Dynamic model) ที่ตัวแปรตัดสินใจมีความเกี่ยวข้องกันกับลำดับของการตัดสินใจที่มีหลายช่วงเวลาตัวแบบเชิงสถิติจะใช้สำหรับปัญหาที่มีการตัดสินใจขึ้นเดียว เช่น บริษัทต้องการทราบปริมาณการผลิตต่อปีในปีหน้า เป็นต้น แต่ตัวแปรเชิงพลวัตจะใช้ในปัญหาหลายชั้น เช่น การหาว่าบริษัทควรผลิตสินค้าในแต่ละเดือนในอีกสี่เดือนข้างหน้า ในกรณีที่ปริมาณการผลิตสินค้าในเดือนที่หนึ่ง อาจจะสูงส่งผลให้มีสินค้าเหลือในคลังและจำนวนสินค้านี้ส่งผลต่อการตัดสินใจผลิตในเดือนถัดๆไป

2.8 การโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming)

2.8.1 ความหมายและความสำคัญของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง

การหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) สามารถทำได้หลายวิธี โดยการใช้เครื่องมือที่เรียกว่า การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) ซึ่งเป็นวิธีที่รู้จักกันดีในชุดเครื่องมือในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่เรียกว่าการโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical Programming) โดยสามารถนำการโปรแกรมเชิงเส้นมาใช้งานร่วมกับระบบสนับสนุนการตัดสินใจได้ ในหลายๆ หน่วยงานได้ประยุกต์ใช้วิธีการทางโปรแกรมเชิงเส้นตรง ในการแก้ปัญหาทางการจัดสรรปัจจัยหรือทรัพยากร (Allocating Resource) ปัจจัยและทรัพยากรมีความหมายรวมถึงวัตถุดิบ กำลังคน เครื่องจักร เวลา สถานที่ เงินตรา หรือความรู้ความสามารถต่างๆ ปัญหาในการจัดสรรปัจจัยและทรัพยากรเกิดขึ้น เมื่อเราต้องการจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่จำกัดทั้งขนาด ปริมาณ และขอบเขตการใช้งาน เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อองค์กร การจัดสรรปัจจัยให้เกิดผลการดังกล่าวอาจทำได้หลายทางและหลายรูปแบบซึ่งมักจะให้ผลลัพธ์ออกมาเหมือนกัน

การโปรแกรมเชิงเส้นหรือกำหนดการเชิงเส้น เป็นเทคนิคเชิงปริมาณอย่างหนึ่งที่เป็นที่นิยมนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในการดำเนินงานของธุรกิจปัจจุบันกำหนดการเชิงเส้นเป็นตัวแทนทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นแทนปัญหาที่เกิดขึ้นในองค์กรเพื่อหาแนวทางในการแก้ปัญหาที่ดีที่สุดตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ และสอดคล้องกับเงื่อนไขที่มีอยู่ในการแก้ปัญหานั้นๆ โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในเป้าหมายและเงื่อนไขของปัญหาจะอยู่ในรูปเส้นตรง กำหนดการเชิงเส้นมีแนวความคิดริเริ่มมาจากนักคณิตศาสตร์และนักวิทยาศาสตร์หลายท่านเริ่มจาก ในปี ค.ศ. 1945 ได้มีการกำหนดการเชิงเส้นไปใช้แก้ปัญหาในด้านโภชนาการ ในปี ค.ศ. 1982 ฟอน นิวแมน (Von Neuman) ใช้ทฤษฎีการหาค่า

ต่ำสุด-สูงสุด และได้มีการพัฒนาเรื่อยมาจนกระทั่งในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 กองทัพอากาศของสหรัฐอเมริกาได้นำไปใช้แก้ปัญหาด้านการขนส่ง ปรากฏว่าประสบความสำเร็จอย่างมาก จึงได้มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในวงการทหาร อย่างไรก็ตามก็สิ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้กำหนดการเชิงเส้นเป็นที่แพร่หลายในวงการธุรกิจคือ การที่ จอร์จ แดนต์ซิก (George B. Dantzig) ได้พัฒนาวิธีการคำนวณเพื่อใช้แก้ปัญหาการกำหนดการเชิงเส้นที่เรียกว่า วิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex Method) ขึ้นในปี ค.ศ. 1947 ทำให้การแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำและใช้แก้ปัญหาได้อย่างกว้างขวาง [5]

การโปรแกรมเชิงเส้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาในอุตสาหกรรม การธนาคาร การศึกษา การขนส่ง การเกษตร และการปิโตรเลียม การวางแผนการจัดสรรทรัพยากรโดยนำปัญหามาเขียนในรูปของตัวแบบคณิตศาสตร์จะเรียกว่า การโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical Programming) โดยคำว่า การโปรแกรม (Programming) ในที่นี้หมายถึง การวางแผน (Planning) ส่วนคำว่า คณิตศาสตร์ (Mathematical) หมายถึงตัวแบบคณิตศาสตร์ของปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนั้น การโปรแกรมเชิงเส้น จึงเป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการวางแผนเพื่อจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุดตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยทั่วไปการโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ประกอบด้วย ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) ซึ่งแทนปริมาณของกิจกรรมต่างๆที่พิจารณาข้อจำกัด (Constraints) เป็นเงื่อนไขที่ระบุว่าปัญหานี้จะทำอะไรได้บ้าง หรือทำกิจกรรมอะไรไม่ได้บ้าง ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับข้อจำกัดของทรัพยากรที่มีอยู่ (Resource Constraints) ซึ่งเขียนในรูปความสัมพันธ์ของอัตราการใช้ทรัพยากรของแต่ละกิจกรรมและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) แสดงถึงประสิทธิผลของการใช้ทรัพยากรเพื่อทำกิจกรรมเหล่านี้ ในกรณีที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรตัดสินใจในข้อจำกัดและฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นแบบเชิงเส้นตรง จะเรียกการโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์นี้ว่า การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) [6]

2.8.2 รูปแบบแทนระบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง

รูปแบบแทนระบบทางคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นตรงมีโครงสร้าง ดังนี้ [5]

- (1) มีสมการกำหนดเป้าหมาย (Objective Function) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ของต้นทุนกำไรหรืออื่นๆเพื่อให้กำหนดเป้าหมายสูงสุดหรือต่ำสุด (Maximize, Minimize)
- (2) มีสมการแสดงขอบข่าย (Constraints) แสดงความจำกัดของปัจจัยหรือทรัพยากร ในรูปสมการหรืออสมการ (Inequality)
- (3) ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการต่างๆของรูปแบบแทนระบบ ต้องมีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรง (Linear Form) คือตัวแปรทุกตัวในสมการเป้าหมายและสมการหรืออสมการของขอบข่ายจะต้องมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเป็นกำลังเดียวกัน (โดยมากเป็นกำลังหนึ่ง)

(4) ตัวแปรทุกตัวต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ (All Positive Value) โดยในการนำตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นมาใช้ในการแก้ปัญหาจำเป็นต้องศึกษาส่วนประกอบโครงสร้างต่างๆของตัวแบบและสร้างตัวแบบแทนปัญหาที่เกิดขึ้นจริง โดยให้มีโครงสร้างของปัญหาครบถ้วน ในการสร้างตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นจะต้องประกอบด้วยโครงสร้างต่อไปนี้

- ตัวแปรที่ต้องตัดสินใจ (Decision Variable)
- ตัวแปรที่ต้องตัดสินใจได้แก่สิ่งที่ต้องการหาผลลัพธ์มักนิยามกำหนดให้เป็นตัวอักษร เช่น $X_1, X_2, \dots, X_n$ เป็นต้น
- ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

วัตถุประสงค์ของกำหนดการเชิงเส้นจะมีวัตถุประสงค์เดียว ซึ่งอยู่ในรูปของเป้าหมายการหาค่าสูงสุด (Maximize) หรือต่ำสุด (Minimize) เช่นการหากำไรให้สูงที่สุด ยอดขายให้สูงที่สุด ต้นทุนต่ำที่สุด เป็นต้น ในกรณีที่วัตถุประสงค์เกิดหนึ่งวัตถุประสงค์ ต้องเลือกวัตถุประสงค์ที่สำคัญที่สุดเขียนเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ มีความสัมพันธ์ของตัวแปรเป็นเส้นตรง ส่วนวัตถุประสงค์อื่นๆ จะตัดแปลงเป็นเงื่อนไขบังคับ

รูปแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ได้แก่

$$\text{Minimize } Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots C_nX_n$$

โดยให้

$$Z = \text{ผลรวมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์}$$

$$C_n = \text{สัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ } n \text{ ซึ่งอาจหมายถึงกำไรต่อหน่วย หรือต้นทุนต่อหน่วย}$$

เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

เงื่อนไขบังคับ คือสมการหรืออสมการที่แสดงถึงขีดจำกัดในด้านทรัพยากรความต้องการ หรือเงื่อนไขต่างๆของปัญหาโดยมีความสัมพันธ์เป็นตัวแปรต่างๆ ในเงื่อนไขบังคับแต่ละข้อเป็นเส้นตรง จำนวนเงื่อนไขบังคับจะขึ้นอยู่กับสภาพของปัญหาว่ายุ่งยากและซับซ้อนเพียงใด

รูปแบบของเงื่อนไขบังคับ

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots a_{1n}X_n (\leq \text{หรือ} \geq) b_1$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots a_{2n}X_n (\leq \text{หรือ} \geq) b_2$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots a_{mn}X_n (\leq \text{หรือ} \geq) b_m$$

โดยที่

a_{mn} = สัมประสิทธิ์ของตัวแปรตัวที่ m ในเงื่อนไขบังคับข้อที่ n

b_m = ค่าทางขวามือของเงื่อนไขบังคับข้อที่ m

ค่า a_{mn} จะเป็นค่าคงที่ ที่แสดงอัตราการใช้ทรัพยากร ในขณะที่ค่า b_m จะเป็นค่าคงที่ที่แสดงจำนวนทรัพยากรที่มีอยู่ ประการสำคัญคือค่า a_{mn} และ b_m ต้องมีหน่วยเหมือนกันเช่น นาฬิกา ชั่วโมง กิโลกรัม กรัม หน่วย โหล ฟุต นิ้ว เป็นต้น เครื่องหมาย ของเงื่อนไขบังคับสามารถแสดงในรูป $\leq$ หรือ $\geq$ หรือ $=$ โดยเลือกใช้ให้เหมาะสมกับเงื่อนไขบังคับนั้นๆ

ข้อจำกัด (Constrain or Restriction)

ข้อจำกัด แสดงถึงเงื่อนไขของผลลัพธ์ที่ได้ว่าค่าตัวแปรที่ต้องตัดสินใจ (Decision variables) ทุกตัวจะต้องมีค่าไม่ติดลบหรือ $X_j \geq 0$ ($j = 1, 2, \dots, n$) ดังนั้นสรุปรูปแบบของกำหนดการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\text{Minimize } Z(\text{Maximize } Z) = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots C_nX_n$$

หรือ

$$\text{Minimize } Z(\text{Maximize } Z) = \sum_{j=1}^n C_jX_j$$

$$\text{Subject to : } a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots a_{1n}X_n (\leq \text{ หรือ } \geq =) b_1$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots a_{2n}X_n (\leq \text{ หรือ } \geq =) b_2$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots a_{mn}X_n (\leq \text{ หรือ } \geq =) b_m$$

$$X_1, X_2, \dots, X_n \geq 0$$

โดยให้

X_j = ตัวแปรที่ต้องตัดสินใจ

C_j = สัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ j ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยที่ $j = 1, 2, \dots, n$

a_{ij} = อัตราการใช้ทรัพยากรในเงื่อนไขบังคับที่ ij

b_i = จำนวนทรัพยากรที่มีอยู่ของเงื่อนไขบังคับที่ โดยที่ $i = 1, 2, \dots, m$

2.9 ตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming Model)

เนื่องจากปัญหาการจัดสรรทรัพยากรที่พบเห็นกันทั่วไปบางปัญหาต้องกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจเป็นจำนวนเต็ม เช่น ปัญหาการลงทุนซื้ออุปกรณ์หรือเครื่องจักรเข้ามาใช้ในการทำงาน เราต้องการทราบจำนวนอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่ต้องการซื้อ สำหรับปัญหาการเดินทางของรถยนต์จะกำหนดว่าถ้าเลือกเส้นทางใดแล้วจะให้ตัวแปรแทนการขนส่งผ่านเส้นทางนั้นมีค่าเป็น 1 หากไม่ขนส่งผ่านเส้นทางดังกล่าวตัวแปรนี้จะมีค่าเป็น 0 เป็นต้น ปัญหาในลักษณะนี้เราไม่สามารถกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นเศษส่วนหรือจำนวนที่มีทศนิยมได้ แต่จะกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นจำนวน

เต็มเท่านั้น ลักษณะตัวแบบของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแตกต่างจากการโปรแกรมเชิงเส้นในแง่ที่ตัวแปรตัดสินใจทุกตัวต้องเป็นจำนวนเต็มเท่านั้น ซึ่งจะเป็นปัญหาการโปรแกรมนี้ว่า การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ [6]

1) การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแท้จริง (Pure Integer Linear Programming)

ซึ่งปัญหาประเภทนี้ ตัวแปรตัดสินใจทุกตัวต้องเป็นจำนวนเต็มเท่านั้น โดยตัวแปรอาจเป็นจำนวนเต็มแบบทวิภาค (Binary integer) ที่มีค่าได้เพียง 2 ค่าเท่านั้น เช่น 0 หรือ 1 เป็นต้น ซึ่งปัญหาอาจมีทั้งตัวแปรจำนวนเต็มและตัวแปรจำนวนเต็มแบบทวิภาคอยู่ในปัญหาเดียวกันได้

2) การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม (Mixer Integer Linear Programming ; MIP)

ซึ่งปัญหาประเภทนี้ ตัวแปรตัดสินใจบางตัวเป็นจำนวนเต็ม ขณะที่ตัวแปรที่เหลือไม่เป็นจำนวนเต็ม ดังนั้นจากที่กล่าวข้างต้นการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มสามารถนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาในทางธุรกิจและอุตสาหกรรมได้มากมาย

การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มสามารถนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาในทางธุรกิจและอุตสาหกรรมได้มากมาย เช่น [5]

- ปัญหาการเลือกโครงการลงทุน
- ปัญหาการเดินทางและการขนส่ง
- ปัญหาการเลือกรูปแบบในการทำงานหรือการผลิต
- ปัญหาการจัดตารางการทำงานของพนักงาน
- การนำไปประยุกต์ใช้ในสายการผลิต

• ปัญหาการเลือกโครงการลงทุน

ในธุรกิจหรืออุตสาหกรรมมีการเลือกเพื่อจะลงทุนในโครงการต่างๆเพื่อให้ได้ผลตอบแทนสูงที่สุด โดยมีเงื่อนไขในการลงทุนตามที่บริษัทหรือผู้ถือหุ้นกำหนด หรืออาจมีกฎหมายหรือนโยบายภาครัฐมาเป็นข้อจำกัดในการพิจารณาการลงทุนอีกด้วย โดยการใช้ตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาจำนวนและเลือกตำแหน่งของศูนย์บริการหรือที่ตั้งของอุปกรณ์อำนวยความสะดวก เพื่อให้บริการได้ครอบคลุมพื้นที่บริการ

• ปัญหาการเลือกเส้นทางและการขนส่ง

เป็นปัญหาการเลือกเส้นทางหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการขนส่ง เช่น การเลือกว่าควรส่งสินค้าในเส้นทางใดบ้างและไม่ส่งสินค้าในเส้นทางใดบ้างหรือควรใช้รถบรรทุกคันใดในการขนส่ง โดยอาจพิจารณาจากต้นทุนค่าขนส่งที่ต่ำที่สุด

- ปัญหาในการเลือกรูปแบบในการทำงานและการผลิต

การเลือกรูปแบบการตัดวัตถุดิบที่มีขนาดคงที่ ซึ่งอาจอยู่ในรูปมิติเดียวกันเช่น ม้วนกระดาษม้วนผ้า ลำไม้ไผ่ เป็นต้น วัตถุดิบบางชนิดอาจต้องพิจารณาในสองมิติ คือทั้งความกว้างและความยาว เช่น ไม้อัดแผ่น ผ้าผืน เป็นต้น รูปแบบการตัดอาจทำได้หลายรูปแบบ ปัญหาในลักษณะนี้มักให้ตัวแปรตัดสินใจแทนจำนวนการตัดด้วยรูปแบบแต่ละอย่าง ซึ่งวัตถุประสงค์การเลือกรูปแบบที่เหมาะสมมักจะพยายามให้เหลือเศษน้อยที่สุด เพราะเศษที่เหลือเหล่านี้ไม่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้อีกต่อไป

- ปัญหาการจัดตารางการทำงานของพนักงาน

ปัญหาการวางแผนกำลังคนเป็นการวางแผนเพื่อจัดสรรให้พนักงานทำงานให้สอดคล้องกับความต้องการพนักงาน ซึ่งผลของการวางแผนจะได้ตารางปฏิบัติงานของพนักงาน เพื่อให้พนักงานมาทำงานตามเวลาที่กำหนดปัญหาการวางแผนการปฏิบัติงานเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นใน 3 ลักษณะคือ

- (1) ปัญหาการกำหนดว่าในแต่ละวันควรมีพนักงานกี่กลุ่มที่เข้าทำงานในช่วงเวลาต่างๆ ตามความต้องการแรงงานที่กำหนด ซึ่งเรียกว่าการทำงานกะ
- (2) ปัญหาการกำหนดจำนวนและตารางการทำงานของพนักงาน เพื่อให้ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในการจ้างงานต่ำสุด ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าพนักงานแต่ละคนจะมีจำนวนวันหยุดในแต่ละสัปดาห์ตามกำหนดซึ่งเรียกว่าการทำงานรอบ
- (3) ปัญหาการจัดตารางงานของพนักงานนำเที่ยวและการผสมผสานปัญหาในข้อ 1 และ 2 เพื่อให้สามารถจัดสรรงานในพนักงานแต่ละคน

- การนำไปประยุกต์ใช้ในสายการผลิต

ในสายการประกอบเพื่อผลิตสินค้าต่างๆ เช่น โทรศัพท์ วิทยุ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น การประกอบสินค้าเหล่านี้ ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ มากมาย ขั้นตอนหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งขั้นตอนจะถูกดำเนินการโดยสถานีการทำงานเดียวกัน โดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานตามที่กำหนดไว้หรือที่เรียกว่าความสัมพันธ์ก่อน – หลัง ซึ่งจะระบุว่างานใดต้องทำให้เสร็จก่อนจึงจะดำเนินการในขั้นตอนหรืองานนี้ได้ โยปกติแล้วบริษัทจะกำหนดเวลาในการผลิตสินค้าของแต่ละสถานีการทำงาน ซึ่งเราเรียกว่า รอบระยะเวลาการผลิต เป็นค่าคงค่าหนึ่ง เพื่อให้บริษัทสามารถผลิตสินค้าให้ได้ปริมาณตามที่ต้องการ

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ณรงค์ ศิริเลิศวรกุล และคณะ [8] ปัจจัยพื้นฐานสำคัญในการผลิตชิ้นส่วนงานหล่อเพื่อให้ได้คุณภาพดีทั้งทางกายภาพและทางวิศวกรรมโดยมีราคาคำนึง มี 2 ประการ ประการแรกชิ้นส่วนต้องได้รับการออกแบบเพื่อใช้งานหล่อตั้งแต่เริ่มต้น ประการที่สอง ต้องมีการเลือกใช้วัสดุและเทคนิคการผลิตที่

เหมาะสม ปัจจัยทั้ง 2 นี้ มีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด ทั้งนี้เพราะการออกแบบชิ้นส่วนงานหล่อให้ได้ดี ขึ้นกับความรู้ในเรื่องวัสดุและขบวนการหล่อที่เลือกใช้ด้วย โดยทั่วไปผู้ออกแบบมักจะมีความรู้เบื้องต้นในเทคโนโลยีการหล่อเท่านั้น ซึ่งทำให้ไม่สามารถออกแบบชิ้นส่วนงานหล่อโดยปราศจากคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญในงานหล่อ หรืออ้างอิงงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องข้อมูลอย่างละเอียดครบถ้วนสำหรับงานหล่อก็ยากแก่การค้นหาเพราะความชำนาญหลายๆ อย่างซึ่งได้จากการสั่งสมประสบการณ์การปฏิบัติอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ไม่ได้มีการจดบันทึกเป็นงานวิชาการ โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมฐานความรู้สำหรับการเลือกอะลูมิเนียมผสมสำหรับงานหล่อเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบและผลิตชิ้นส่วนงานหล่อ

กอบสิน ทวีสิน และคณะ [9] โลหะผสมอะลูมิเนียมมีบทบาทในการใช้งานมากขึ้นในทางวิศวกรรม เนื่องจากคุณสมบัติหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา การนำความร้อนสูง สามารถขึ้นรูปและหล่อได้ดี และทนต่อการกัดกร่อน เป็นต้น การที่อะลูมิเนียมมีอัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงจึงมีการใช้งานในทางวิศวกรรมโดยนำมาทดแทนโลหะส่วนใหญ่ที่หนักกว่า เช่น เหล็กกล้า ซึ่งยังผลให้ประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องมือ เครื่องจักรกล หรือแม้แต่ยานยนต์ประหยัดน้ำหนักมากขึ้น การถลุงอะลูมิเนียมจากสินแร่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นอย่างมาก จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง และยังทำให้อะลูมิเนียมมีราคาแพงเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น การนำอะลูมิเนียมมาหลอมใช้ใหม่เป็นสิ่งที่ทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงได้ ถ้าหากมีเทคโนโลยีการนำกลับมาใช้ใหม่ที่เหมาะสมในประเทศไทย โรงหล่อโดยส่วนใหญ่ต้องการนำเศษอะลูมิเนียมที่มีการปนเปื้อนสูงมาหลอมใหม่ เช่น กระจังเครื่องดับ ฝาเครื่องคีมที่มีชิ้นส่วนของพลาสติก เศษจี้กลึง และเศษจากการตัดอะลูมิเนียมดังกล่าวมาหลอมใหม่โดยไม่มีเทคนิคการเตรียมอย่างเหมาะสมส่งผลให้ประสบปัญหาหลักสองด้าน คือ ปัญหาด้านมลพิษจากควันเมื่อเกิดการเผาไหม้สารปนเปื้อนต่างๆ โดยไม่มีการควบคุมและบำบัด และปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ปริมาณอะลูมิเนียมที่ได้กลับมาจากการนำเศษมาหลอมใหม่เมื่อใช้เศษอะลูมิเนียม ที่ปนเปื้อนแทนที่จะถูกเตรียมมาอย่างเหมาะสม หรือที่สะอาดหลังจากการใช้งาน เมื่อมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่ได้จากการวิจัยระยะสุดท้ายคาดว่าจะมี มลพิษที่ปล่อยออกมาน้อยกว่าเมื่อนำเอาเศษอะลูมิเนียมไปหลอม และปริมาณการได้กลับมาของเนื้ออะลูมิเนียมเมื่อหล่อออกเป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีมากขึ้น งานวิจัยที่สมบูรณ์ซึ่งจะดำเนินการต่อไปในอนาคต ได้แก่การออกแบบและสร้างเครื่องมืออัดกระป๋องที่ใช้แล้วให้กับหมู่บ้าน เครื่องย่อยกระป๋องให้ได้ขนาดที่เหมาะสม เครื่องแยกวัสดุอื่นๆ ออกจากอะลูมิเนียม ระบบกำจัดผิวเคลือบและสี เตาหลอมแบบต่อเนื่อง เป็นต้น หลังจากทำงานวิจัยนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์ งานวิจัยคาดว่าจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษอะลูมิเนียม มีเทคโนโลยีการหล่อหลอมเศษอะลูมิเนียมมาใช้ใหม่โดยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม น้อยที่สุด สามารถผลิตอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีคุณภาพเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตอื่นๆ

ให้กับอุตสาหกรรมที่ต้องการอะลูมิเนียมในประเทศไทยและทดแทนการนำเข้าได้ และเป็นการลดความต้องการใช้พลังงานได้ดีกว่าการถลุงอะลูมิเนียมจากสินแร่

เชาวลิต ลีมนฉวีจิตร และคณะ [10] การปรับสภาพเกรนละเอียดเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากในกระบวนการหล่ออะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมผสม เพราะทำให้งานหล่อดีขึ้น และลดการเกิดข้อบกพร่อง (casting defects) ในงานหล่อ ทั้งนี้การปรับสภาพเกรนละเอียดโดยใช้โลหะแม่ (master alloy) ที่มีส่วนผสมหลักของอะลูมิเนียม-ไทเทเนียม-โบรอน เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด จุดมุ่งหมายงานวิจัยคือการประเมินประสิทธิภาพของโลหะแม่ในการปรับสภาพเกรนละเอียดสำหรับอะลูมิเนียม-ซิลิกอนผสมหล่อเกรด ASTM 356 โดยพิจารณาถึงปริมาณการเติมโลหะแม่ และการค้ำน้ำโลหะหลังจากเติมโลหะแม่ พบว่าปริมาณการเติมโลหะแม่ที่มากขึ้นช่วยในการปรับสภาพเกรนให้ละเอียดขึ้นได้ ส่วนระยะเวลาหลังจากการเติมโลหะแม่มีความเหมาะสมในการปรับสภาพเกรนละเอียดหลังจากการเติมโลหะแม่อยู่ในช่วงตั้งแต่ 20 นาที แต่ไม่เกิน 60 นาที เพราะหากเวลาน้อยเกินไปทำให้ประสิทธิภาพในการลดขนาดเกรนยังไม่ถึงจุดสูงสุด แต่หากเวลาในการค้ำน้ำโลหะนานกว่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพของโลหะแม่ต่อการปรับสภาพเกรนละเอียดลดลง ซึ่งมีผลทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายกลไกการเสื่อมประสิทธิภาพของโลหะแม่โดยทดลองค้ำน้ำโลหะไว้ในเบ้าเหล็กเป็นเวลานานต่างกัน แล้วปล่อยให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งพบว่าการตกตะกอนของอนุภาค $TiAl_3$ และ TiB_2 เป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมประสิทธิภาพของโลหะแม่ อย่างไรก็ตามการกวนเพื่อให้อนุภาคที่เกิดการตกตะกอนกลับมามีการกระจายอยู่ในชิ้นงานช่วยให้การปรับสภาพเกรนละเอียดกลับดีขึ้นในระดับหนึ่ง

ศศิธร พัทธัญญาปนพงษ์ [11] งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่มีผลต่อกระบวนการหล่อ โดยใช้การทำจำลอง อุณหภูมิของน้ำโลหะที่ใช้ศึกษา อยู่ในช่วง $620-740^{\circ}C$ โดยจำลองการหล่อขึ้นงานชิ้นส่วนยานยนต์ ระบบจ่ายน้ำโลหะที่เลือกใช้ ประกอบด้วย sprue, gate และ riser ที่มุมการเท ที่ 45° ในช่วงของอุณหภูมิที่เลือกใช้ พบว่าน้ำโลหะสามารถเติมเต็มแบบหล่อได้ดี ข้อบกพร่องที่พบคือการยุบตัว เกิดขึ้นที่ riser โดยที่อุณหภูมิสูงมีการยุบตัวมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า และการเกิด Misrun คือการที่น้ำโลหะเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะเติมเต็มแบบหล่อ สามารถพบได้ในกรณีการหล่อ 2 ชิ้นงาน ที่ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ในกระบวนการผลิตจริง

ปรีชา หล้ากัน [12] การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น ในการหาสัดส่วนของวัตถุดิบในการหลอมอะลูมิเนียม โดยศึกษาอะลูมิเนียมเกรด Al.6063L, Al.6063M, Al.6063H, Al.6061 และ Al.6082 เพื่อให้ได้ต้นทุนต่ำสุด กรณีศึกษาบริษัท ยูไนเต็ด อะลูมิเนียม อินดัสตรี จำกัด ขั้นตอนในการเก็บรวบรวมข้อมูลประกอบด้วย (1) การศึกษาวัตถุดิบที่ใช้ในการ

หลออม (2) การศึกษาค่าส่วนผสมทางเคมีที่ถูกค้ำกำหนด (3) การศึกษารูปแบบทั่วไปในการคำนวณค่า ส่วนผสมทางเคมีของการหลออมอะลูมิเนียม (4) การศึกษาโครงสร้างมาตรฐานของโปรแกรมเชิงเส้น และ (5) สร้างแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นในการหลออมอะลูมิเนียม ซึ่งประกอบด้วย กำหนดข้อจำกัด ต่างๆ ในกระบวนการหลออมอะลูมิเนียม การตั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ การสร้างฟังก์ชันข้อจำกัด การแก้ สมการเพื่อให้ได้แบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น และการนำแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นดังกล่าวไป ประยุกต์หาคำตอบ เพื่อให้ได้ต้นทุนวัตถุดิบต่ำสุด ผลการวิจัยพบว่าอะลูมิเนียมเกรด Al.6063L สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบได้ร้อยละ 1.85, อะลูมิเนียมเกรด Al.6063M สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบได้ ร้อยละ 1.77, อะลูมิเนียมเกรด Al.6063Hสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบได้ร้อยละ 1.57, อะลูมิเนียมเกรด Al.6061 สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบได้ร้อยละ 8.36, อะลูมิเนียมเกรด Al.6082 สามารถลดต้นทุน วัตถุดิบได้ร้อยละ 0.22 ต้นทุนวัตถุดิบรวมทั้งหมดที่ลดลงได้คิดเป็น 285,392 บาท จากการศึกษา งานวิจัยของปรีชา หล้ากัน พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการคำนวณ นั้นเป็นค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน แต่ในงานวิจัยนี้เปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ ในการคำนวณเป็นค่าที่เก็บข้อมูลจากการทดลองจริง โดยจากการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์ของ ส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบจะแปรเปลี่ยนไปตามฤดูกาล ซึ่งอาจส่งผลต่อการคำนวณผลลัพธ์ที่ได้ นอกจากนี้งานวิจัยของปรีชา หล้ากัน ได้ใช้โปรแกรม Lindo ในการคำนวณ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ ค่อนข้างเฉพาะ ทำให้ผู้ใช้งานจริงในหน่วยงานแก้ไขโปรแกรมเองได้ยาก หากมีการเปลี่ยนแปลงข้อมูล ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ

บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการคำนวณสัดส่วนวัตถุดิบเพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม โดยงานวิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามลำดับขั้นตอน ดังนี้

3.1 ศึกษาข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม

บริษัท ไทยเม็ททอล จำกัด ตั้งอยู่ 205 หมู่ 2 ถนนบางปิ้ง – แพรกษา (พุทธรักษา) ตำบลท้ายบ้าน อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ ประกอบกิจการผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมเพื่อป้อนสู่ตลาดอสังหาริมทรัพย์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกมากมาย

ปัจจุบันนอกเหนือจากการขายสินค้าแล้ว เรายังให้คำแนะนำลูกค้าในการใช้งานอะลูมิเนียมอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตสำหรับลูกค้า หรือแม้แต่การนำเสนอการบริการงานเพิ่มมูลค่าอย่างอื่นให้อะลูมิเนียม ได้แก่ บริการเจาะ บีม มิลลิ่ง รวมถึงการประกอบชิ้นงานอื่นร่วมกับอะลูมิเนียมให้เป็นชิ้นงานสำเร็จรูป เพื่อเพิ่มความสะดวกและลดต้นทุนให้แก่ลูกค้าให้นำไปใช้งานได้ทันที

ประเภทผลิตภัณฑ์

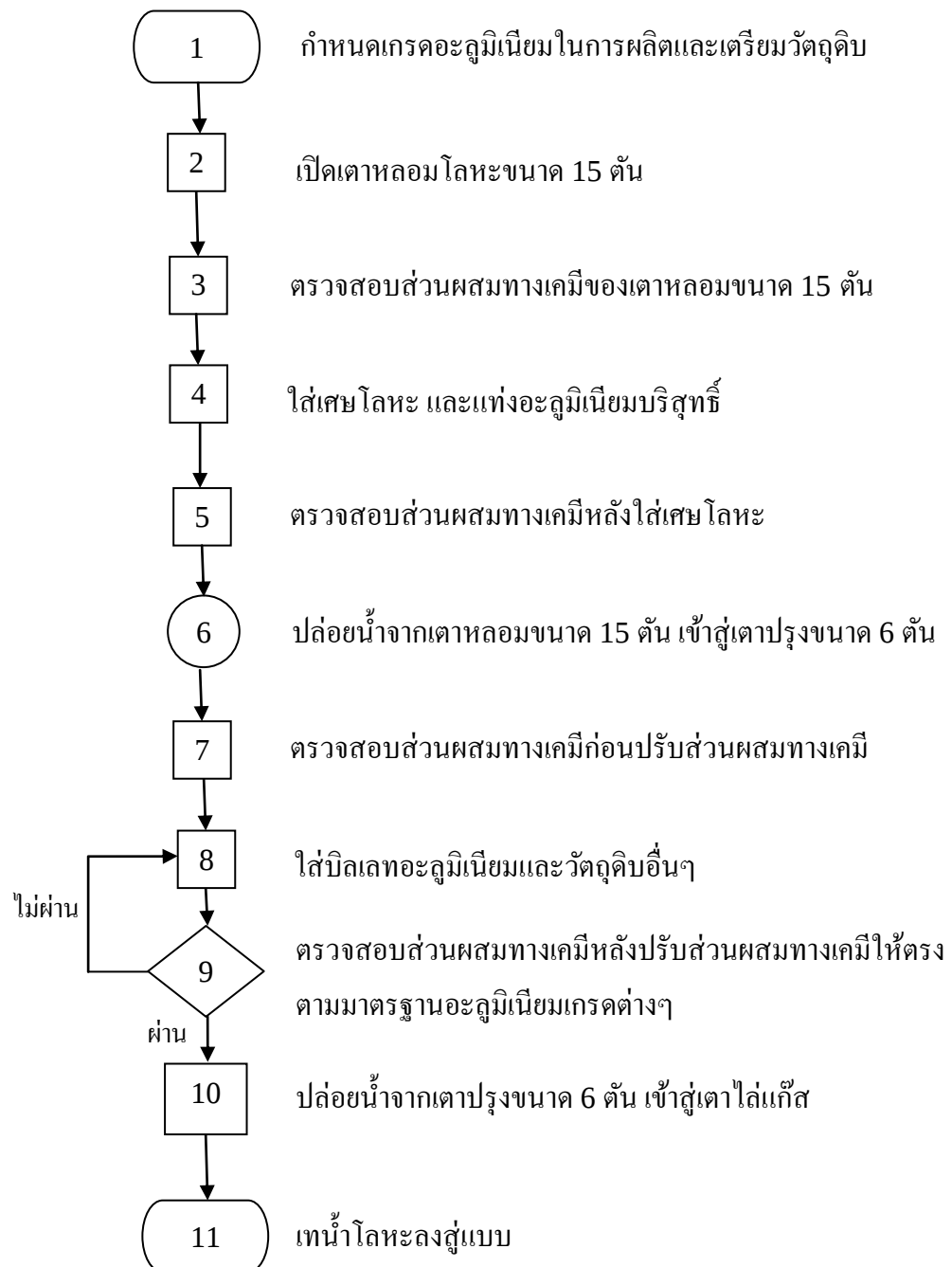
ไทยเม็ททอลมีอะลูมิเนียมเส้นหน้าตัดมาตรฐานแบ่งเป็น 11 กลุ่ม แต่ละกลุ่มมีขนาดต่างๆ ได้แก่

- 1) แป๊ปกลมตัน
- 2) เพลากเหลี่ยมตัน
- 3) แป๊ปเหลี่ยมตัน
- 4) แผ่นแบน
- 5) ฉากด้านเท่า
- 6) ฉากด้านไม่เท่า
- 7) ตัวยูด้านเท่า
- 8) ตัวยูด้านไม่เท่า
- 9) แป๊ปเหลี่ยมจตุรัส
- 10) แป๊ปเหลี่ยมผืนผ้า
- 11) แป๊ปกลม

นอกจากสินค้าเส้นหน้าตัดตามสั่งแล้ว ยังมีบริการให้คำปรึกษาและงานบริการด้านอะลูมิเนียมที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม

การผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม ประกอบด้วยกระบวนการผลิต ดังแสดงตามรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นแผนผังแสดงลำดับขั้นตอนของการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงลำดับขั้นตอนของการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม

จากแผนภูมิการไหล มีรายละเอียดของการทำงานของแต่ละส่วนในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียมดังนี้

1) กำหนดเกรดอะลูมิเนียมในการผลิตและเตรียมวัตถุดิบ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมีดังนี้

1.1 เศษโลหะอะลูมิเนียมภายในโรงงาน (TMC Scrap) เป็นเศษโลหะหรือของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตต่างๆ ภายในโรงงาน ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ทราบเกรดของอะลูมิเนียมชัดเจน ทำให้สามารถคำนวณส่วนผสมทางเคมีได้แม่นยำ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เศษโลหะอะลูมิเนียมภายในโรงงาน

1.2 เศษโลหะอะลูมิเนียมภายในประเทศ (Domestic Scrap) เป็นเศษโลหะอะลูมิเนียมจากโรงงานอื่นๆ ภายในประเทศไทย ที่ทางโรงงานจัดซื้อเข้ามาเพื่อนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สามารถตรวจสอบเกรดของอะลูมิเนียมได้จากโรงงานต้นทาง แต่เนื่องจากวัตถุดิบมาจากหลายแหล่งทำให้หาส่วนผสมทางเคมีที่แน่นอนได้ยาก ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เศษโลหะอะลูมิเนียมภายในประเทศ

1.3 เศษโลหะอะลูมิเนียมต่างประเทศ (Import Scrap) เป็นเศษโลหะอะลูมิเนียมที่ทางโรงงานนำเข้าจากต่างประเทศเพื่อนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ไม่ทราบเกรด ทำให้คำนวณส่วนผสมทางเคมีได้ยาก แต่มีราคาถูก และมีปริมาณมาก ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เศษโลหะอะลูมิเนียมต่างประเทศ

1.4 แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Ingot) เป็นแท่งอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญมาก ส่วนผสมทางเคมีของแท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีอะลูมิเนียมอยู่ประมาณ 99% ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

1.5 บิลเลทอะลูมิเนียม (Master Alloy) เป็นวัตถุดิบที่ช่วยในการปรุงส่วนผสมทางเคมีให้ได้ตามมาตรฐานซึ่งบิลเลทอะลูมิเนียม ที่ทางบริษัทตัวอย่างใช้อยู่มีหลายชนิดด้วยกันดังนี้

- อะลูมิเนียมเจือซิลิกอน (Al-Si)
- อะลูมิเนียมเจือแมกนีเซียม (Al-Mg)
- อะลูมิเนียมเจือเหล็ก (Al-Fe)
- อะลูมิเนียมเจือโครเมียม (Al-Cr)
- อะลูมิเนียมเจือแมงกานีส (Al-Mn)
- อะลูมิเนียมเจือทองแดง (Al-Cu)



รูปที่ 3.6 บิลเลทอะลูมิเนียม

2) เปิดเตาหลอมโลหะขนาด 15 ตัน ดังรูปที่ 3.7 เป็นเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ ทางผู้ผลิตจะทำการเปิดเครื่องเพื่อหลอมโลหะที่ค้างอยู่ภายในเตา และเตรียมรับการผลิตต่อไป ซึ่งเตาหลอมขนาด 15 ตันนี้มีหน้าที่ในการหลอมเศษโลหะ



รูปที่ 3.7 เตาหลอมโลหะขนาด 15 ตัน

- 3) ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเตาหลอมขนาด 15 ตัน และบันทึกผล
- 4) ใส่เศษโลหะและแท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยการใส่เศษโลหะเพื่อนำไปหลอมนี้จะใส่เศษโลหะ 3 ชนิด คือ เศษโลหะอะลูมิเนียมภายในโรงงาน เศษโลหะอะลูมิเนียมภายในประเทศ และเศษโลหะอะลูมิเนียมจากต่างประเทศ
- 5) ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังใส่เศษโลหะ และบันทึกผล
- 6) ปล่อน้ำจากเตาหลอมขนาด 15 ตัน เข้าสู่เตาปรุงขนาด 6 ตัน ตามรางท่อเชื่อมต่อระหว่างเตาหลอมทั้งสอง โดยเตาปรุงขนาด 6 ตันมีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะและทำการปรุงส่วนผสมทางเคมี ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เตาปรุงขนาด 6 ตัน

- 7) ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีก่อนปรับส่วนผสมทางเคมี เพื่อเป็นการทวนสอบว่าส่วนผสมทางเคมีได้มีการสูญเสียหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างทางหรือไม่ และมีค่าใกล้เคียงกันกับเตาหลอมขนาด 15 ตัน และเตรียมการปรับส่วนผสมทางเคมีต่อไป
- 8) ใส่บิลเลทอะลูมิเนียมเพื่อปรุงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมบิลเลทให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดของอะลูมิเนียมในแต่ละเกรด
- 9) ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังปรับส่วนผสมทางเคมี เพื่อให้ตรงตามมาตรฐานของอะลูมิเนียมผสมในแต่ละเกรด ถ้าส่วนผสมทางเคมีอยู่ในค่ามาตรฐานสามารถเข้าสู่ขั้นตอนต่อไปในการผลิตได้ แต่ถ้าหากส่วนผสมทางเคมีไม่อยู่ในค่ามาตรฐานต้องทำการปรับส่วนผสมใหม่ โดยการเติมวัตถุดิบต่างๆ ลงไปจนส่วนผสมทางเคมีตรงตามมาตรฐานของอะลูมิเนียมผสมในแต่ละเกรด

- 10) ปล่อยน้ำจากเตาปรุขนาด 6 ตัน เข้าสู่เตาไล่แก๊ส ตามรางท่อเชื่อมต่อระหว่างเตาหลอม ซึ่งเตาหลอมนี้ มีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิและกำจัดสิ่งสกปรกและแก๊สก่อนการเทน้ำอะลูมิเนียม



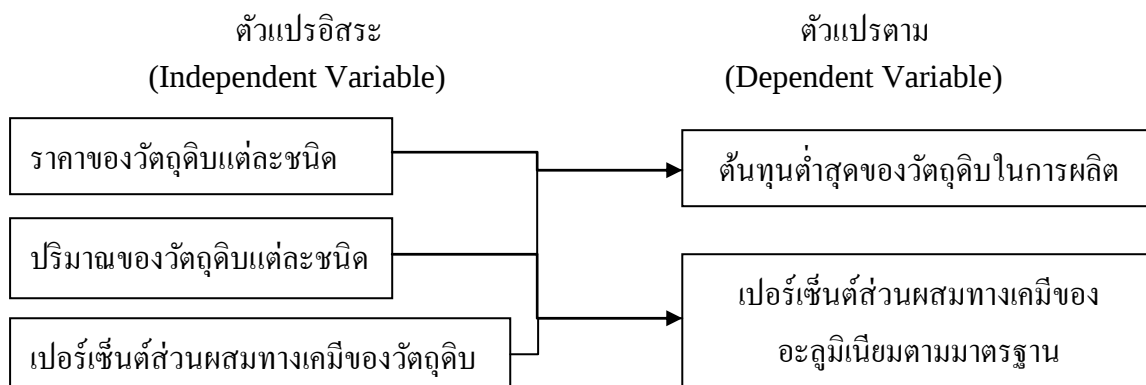
รูปที่ 3.9 เตาไล่แก๊ส

- 11) เทน้ำโลหะลงสู่แบบสำหรับการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบสำหรับการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม

ตัวแปรในการวิจัย



3.2 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม เพื่อนำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ดังที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2

3.3 การรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อการผลิต

3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล

หลังจากทำการศึกษาทฤษฎี งานวิจัย และมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องงาน วิจัยนี้ได้กำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตและทำการเก็บข้อมูล โดยการเก็บข้อมูลทางงานวิจัยได้ทำการกำหนดแบบฟอร์มการเก็บข้อมูล ดังภาคผนวก ข

ข้อมูลในการศึกษานี้มีอยู่ 2 ประเภทดังนี้

1. ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data) โดยทำการแจกแบบฟอร์มการเก็บข้อมูล ให้กับผู้ที่เกี่ยวข้องในการผลิต รวมทั้งงานวิจัยได้เข้าไปทำการเก็บข้อมูลที่หน้างานด้วยตนเอง
2. ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) รวบรวมจากรายงานของบริษัท หนังสือ งานวิจัย บทความและเอกสารอ้างอิงจากสถาบันอุดมศึกษาที่เกี่ยวข้อง

3.3.2 การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากทำการศึกษาทฤษฎี งานวิจัย และมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ จึงได้กำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตและดำเนินการวิจัยดังนี้

1. เก็บข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะอะลูมิเนียมในขั้นตอนต่างๆ ดังนี้
 - 1.1 เก็บข้อมูลส่วนผสมทางเคมีในเตาหลอมขนาด 15 ตัน หลังจากเปิดเตาและยังไม่ได้ใส่วัตถุดิบลงไปเพิ่มเติม ในขั้นตอนที่ 3 ของกระบวนการผลิต เพื่อตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีก่อนเริ่มการผลิต
 - 1.2 เก็บข้อมูลส่วนผสมทางเคมีในเตาหลอมขนาด 15 ตัน หลังจากใส่เศษโลหะลงไป ในขั้นตอนที่ 5 ของกระบวนการผลิต ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำการเก็บข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด เพื่อตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด โดยมีขั้นตอนการเก็บดังนี้
 - 1.2.1 หลังจากตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีในเตาหลอมขนาด 15 ตัน ให้ทำการแยกใส่เศษโลหะแต่ละชนิดลงไป
 - 1.2.2 ครั้งที่ 1 เลือกใส่เศษโลหะจากในโรงงานและแท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยไม่ใส่เศษโลหะชนิดอื่นลงไป หลังจากหลอมละลายแล้ว จึงทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะแล้วบันทึกผล จากนั้นจึงสามารถทำการใส่เศษโลหะชนิดอื่นเพิ่มเติมได้และดำเนินการผลิตตามขั้นตอนต่อไป
 - 1.2.3 ครั้งที่ 2 เลือกใส่เศษโลหะจากในประเทศและแท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยไม่ใส่เศษโลหะชนิดอื่นลงไป หลังจากหลอมละลายแล้ว จึงทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะแล้วบันทึกผล จากนั้นจึงสามารถทำการใส่เศษโลหะชนิดอื่นเพิ่มเติมได้และดำเนินการผลิตตามขั้นตอนต่อไป
 - 1.2.4 ครั้งที่ 3 เลือกใส่เศษโลหะจากต่างประเทศและแท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยไม่ใส่เศษโลหะชนิดอื่นลงไป หลังจากหลอมละลายแล้ว จึงทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะแล้วบันทึกผล จากนั้นจึงสามารถทำการใส่เศษโลหะชนิดอื่นเพิ่มเติมได้และดำเนินการผลิตตามขั้นตอนต่อไป
 - 1.2.5 งานวิจัยนี้ได้ทำการวนรอบเก็บข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิดไปเรื่อยๆ โดยทำการเก็บข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิดประมาณ 20 – 30 ครั้งต่อชนิด
2. เก็บข้อมูลปริมาณของน้ำโลหะในเตาหลอมขนาด 15 ตันทั้งก่อนและหลังการใส่เศษโลหะ
3. เก็บข้อมูลเวลาในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม
4. ตรวจสอบความปกติของข้อมูลส่วนผสมทางเคมีที่ทำการเก็บมา
5. หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีเศษโลหะชนิดต่างๆ
6. นำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปสร้างโปรแกรมคำนวณจากไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft Excel) เพื่อคำนวณหาปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

3.4 สร้างตัวแบบจำลอง

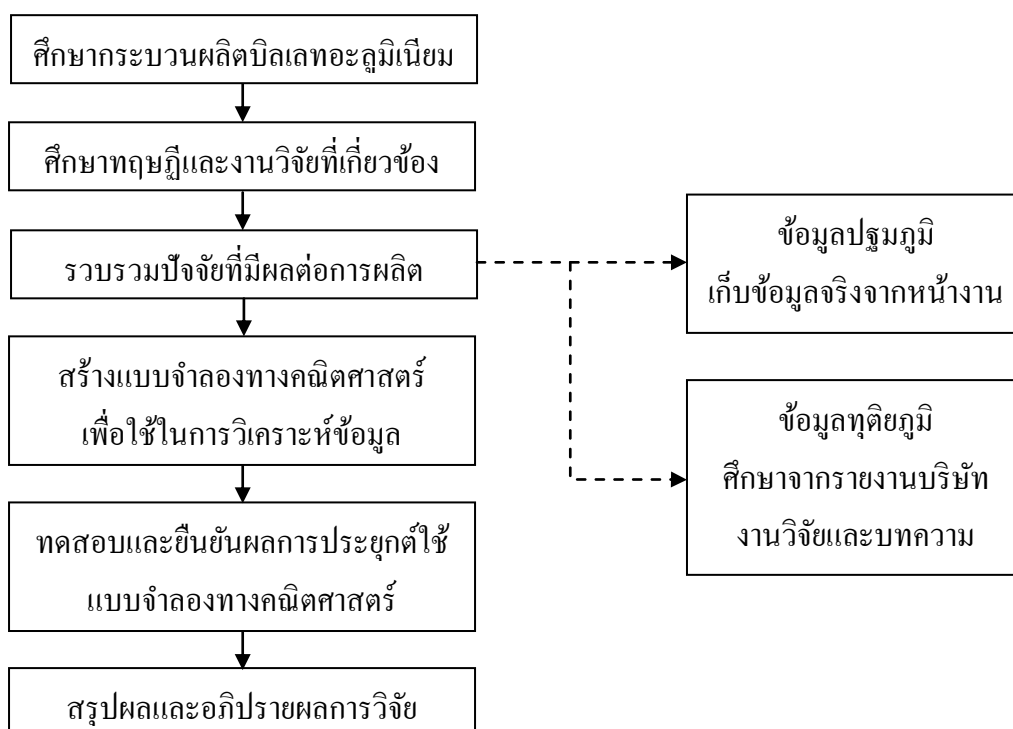
สร้างตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Linear Programming) เพื่อสร้างแผนการผลิตจากปัจจัยทั้งหมดที่ได้ศึกษา โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft Excel) โดยกำหนดตัวแปรต่างๆ เงื่อนไขและข้อจำกัด เพื่อคำนวณหาต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด ซึ่งต้นทุนการผลิตจะได้จากปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ทั้งหมดคูณกับต้นทุนต่อหน่วยของวัตถุดิบชนิดนั้นๆ

3.5 ทดสอบและยืนยันผลการประยุกต์ใช้ตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

นำโปรแกรมทดลองไปประยุกต์ใช้กับการทำงานจริง โดยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องประเมินผลการประยุกต์ใช้โปรแกรม จากนั้นนำเสนอผลการวิจัยกับผู้บริหาร และสอบถามความคิดเห็นที่มีต่อผลงานวิจัย และความเป็นไปได้ของการนำโปรแกรมไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต

3.6 สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย

สรุปผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิต และสรุปผลการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากโปรแกรม โดยเปรียบเทียบกับการผลิตแบบเดิม พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางต่างๆ ที่จะทำให้แบบจำลองมีความถูกต้อง แม่นยำ และเพื่อปรับปรุงให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง จากขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย สามารถสรุปขั้นตอนการทำงานวิจัยได้ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 การคำนวณเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของส่วนผสมทางเคมี

จากตารางการเก็บข้อมูลในภาคผนวก ข เมื่อได้รวบรวมข้อมูลดังกล่าวแล้ว งานวิจัยได้นำข้อมูลนั้นมาคำนวณเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของส่วนผสมทางเคมีตามสูตรดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมี} = \frac{(A \times B) - (C \times D) - (E \times F)}{G}$$

โดยกำหนดให้

- A : Total Qty (Cal) คือปริมาณน้ำโลหะในเตาหลังจากใส่เศษโลหะ โดยการคำนวณ (ตารางที่ ข.1)
- B : Composition (After charge) คือ เปอร์เซ็นต์ธาตุแต่ละชนิดหลังเติมเศษโลหะ (ตารางที่ ข.3)
- C : Ingot คือปริมาณอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่ใส่ในเตาหลอม (ตารางที่ ข.1)
- D : Composition Ingot STD คือ เปอร์เซ็นต์ธาตุแต่ละชนิดของแท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มาตรฐาน (ตารางที่ ข.3)
- E : Qty before คือปริมาณน้ำโลหะในเตาก่อนใส่เศษโลหะ (ตารางที่ ข.1)
- F : Composition (Before charge) คือ เปอร์เซ็นต์ธาตุแต่ละชนิดก่อนเติมเศษโลหะ (ตารางที่ ข.3)
- G : ปริมาณเศษโลหะที่เดิม แยกเป็นแต่ละชนิด คือเศษในโรงงาน, เศษในประเทศ และเศษจากต่างประเทศ (ตารางที่ ข.1)

หลังจากได้เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีแต่ละธาตุ นำเปอร์เซ็นต์ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเศษโลหะแต่ละชนิด

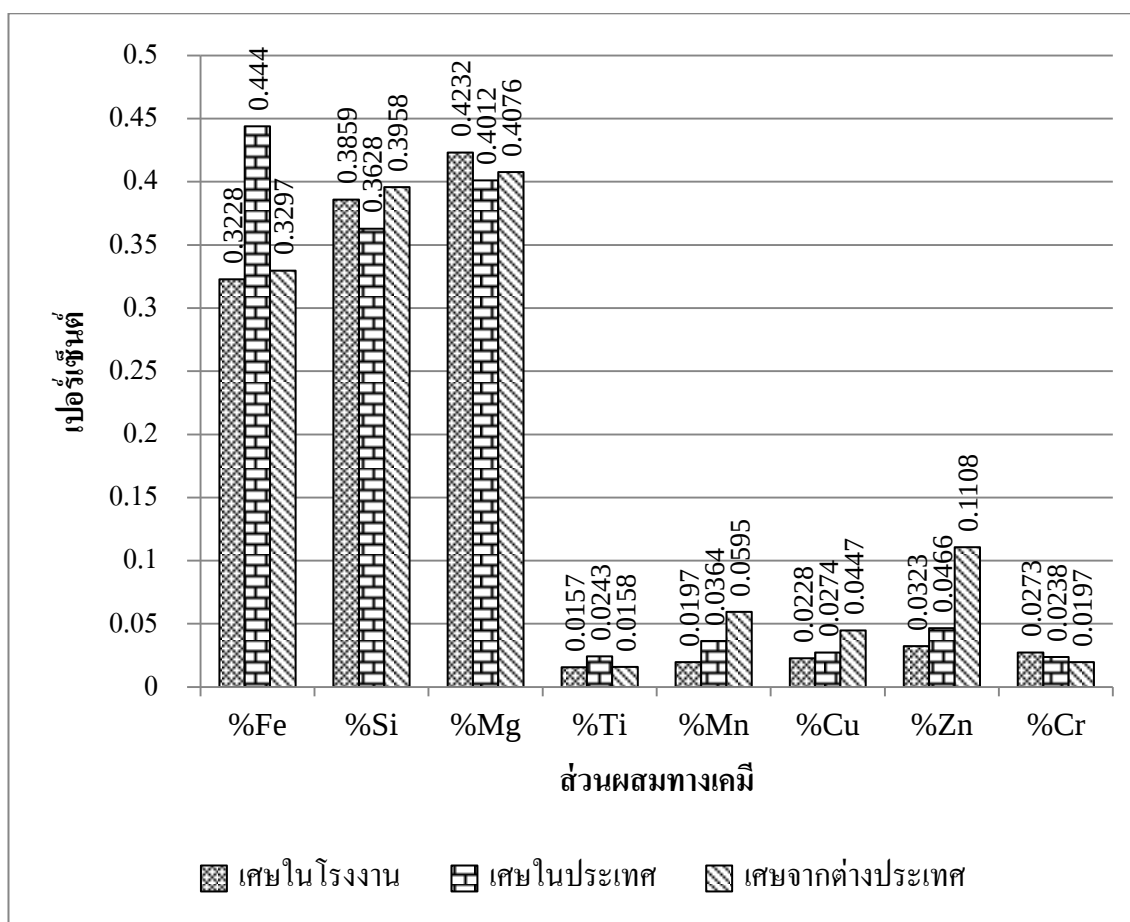
4.2 เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด

จากการเก็บข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะทั้ง 3 ชนิด สามารถสรุปเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของส่วนผสมทางเคมีแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซนต์เฉลี่ยส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด

ส่วนผสมทางเคมี	เปอร์เซนต์เฉลี่ยของส่วนผสมทางเคมี		
	เศษในโรงงาน	เศษในประเทศ	เศษจากต่างประเทศ
%Fe	0.3228	0.4440	0.3297
%Si	0.3859	0.3628	0.3958
%Mg	0.4232	0.4012	0.4076
%Ti	0.0157	0.0243	0.0158
%Mn	0.0197	0.0364	0.0595
%Cu	0.0228	0.0274	0.0447
%Zn	0.0323	0.0466	0.1108
%Cr	0.0273	0.0238	0.0197

จากข้อมูลเปอร์เซนต์เฉลี่ยของส่วนผสมทางเคมีสามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อพิจารณาการนำไปใช้ในการผลิต โดยสามารถดูผลการเปรียบเทียบได้จากรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซนต์เฉลี่ยของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด

จากรูปที่ 4.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. % เหล็ก (Fe) จากกราฟแสดงส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิดพบว่าเศษโลหะภายในประเทศมีเปอร์เซ็นต์เหล็ก ปนอยู่มากที่สุดเมื่อเทียบกับเศษโลหะอีก 2 ชนิดที่เหลือ ซึ่งหากเราเลือกใช้เศษในประเทศในการผลิตในระยะสั้นอาจไม่ส่งผลกระทบ แต่ในระยะยาวอาจจะพบว่าบางเตาของการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม จะมีค่าเหล็กเกินมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเหล็กที่ตกตะกอนจากการผลิตแต่ละครั้งสะสมอยู่กันเตา ข้อเสนอแนะ : ควรมีการหาอัตราการเพิ่มขึ้นของเหล็กต่อจำนวนเตาการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม เพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดการที่เปอร์เซ็นต์เหล็กสูงกว่าปกติในการผลิต
2. % ซิลิกอน (Si) จากกราฟแสดงส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิดพบว่าเปอร์เซ็นต์ซิลิกอนของเศษโลหะใกล้เคียงกันทั้ง 3 ชนิด แต่ในเศษจากต่างประเทศจะมี เปอร์เซ็นต์ซิลิกอนอยู่สูงที่สุด
3. % แมกนีเซียม (Mg) จากกราฟแสดงส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิดพบว่า เปอร์เซ็นต์แมกนีเซียมใกล้เคียงกันทั้ง 3 ชนิด แต่ในเศษในโรงงานจะมีเปอร์เซ็นต์แมกนีเซียมอยู่สูงที่สุด
4. % ไททาเนียม (Ti) จากกราฟแสดงส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิดพบว่า เปอร์เซ็นต์ไททาเนียม ใกล้เคียงกันทั้ง 3 ชนิด แต่ในเศษโลหะในประเทศจะมีเปอร์เซ็นต์ไททาเนียม อยู่สูงที่สุด
5. % แมงกานีส (Mn) จากกราฟแสดงส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิดพบว่า เศษจากต่างประเทศมีเปอร์เซ็นต์แมงกานีสสูงที่สุด รองลงมาคือเศษโลหะในประเทศ และเศษในโรงงาน ตามลำดับ ข้อเสนอแนะ : สามารถใช้เศษจากต่างประเทศในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม 3003 ได้ เพื่อลดการเติมอะลูมิเนียมบิลเลทเจือแมงกานีส เนื่องจากมีราคาแพงกว่าเศษจากต่างประเทศมาก
6. % ทองแดง (Cu) จากกราฟแสดงส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิดพบว่า เศษจากต่างประเทศมีเปอร์เซ็นต์ทองแดงสูงที่สุด ข้อเสนอแนะ : ไม่ควรใช้เศษจากต่างประเทศในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียมเกรด 6063, 6005SF, 6060SF และ 6082 เนื่องจากบิลเลทอะลูมิเนียมดังกล่าวมีการควบคุมค่าเปอร์เซ็นต์ทองแดงไม่เกิน 0.01% ควรใช้เศษโลหะอื่นเป็นหลักในการผลิตแทน
7. % สังกะสี (Zn) จากกราฟแสดงส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิดพบว่า เศษจากต่างประเทศมีเปอร์เซ็นต์สังกะสีสูงที่สุด ข้อเสนอแนะ : อ้างอิงจากมาตรฐานบิลเลทอะลูมิเนียมส่วนใหญ่มีการควบคุมสังกะสีไว้ทั้งหมดยกเว้นบิลเลทอะลูมิเนียมเกรด 6082 และ 3003 ที่ยอมให้มีสังกะสีได้ไม่เกิน 0.1 %

8. % โครเมียม (Cr) จากกราฟแสดงส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิดพบว่าเปอร์เซ็นต์โครเมียมใกล้เคียงกันทั้ง 3 ชนิด แต่ในเศษในโรงงานจะมีเปอร์เซ็นต์โครเมียมอยู่สูงที่สุด

หลังจากได้ทราบส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิดแล้ว ถ้าหากเราต้องการเลือก เศษโลหะที่จะนำมาผลิตบิลเลทอะลูมิเนียม สามารถดูเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของส่วนผสมที่มีอยู่ในเศษโลหะแต่ละชนิดว่าบิลเลทอะลูมิเนียมชนิดไหนเหมาะจะใช้เศษโลหะชนิดใดเป็นหลัก โดยเพิ่มข้อจำกัดลงไปใน โปรแกรมการคำนวณเพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตที่ลดลง

จากค่าเฉลี่ยส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการทดลองทางงานวิจัยได้ทำการสรุปออกมาเป็นตารางแสดงลำดับความน้อยของเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เรียงลำดับค่าเฉลี่ยส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด

ส่วนผสมทางเคมี	เรียงลำดับค่าเฉลี่ยส่วนผสมทางเคมี			หมายเหตุ
	เศษในโรงงาน	เศษในประเทศ	เศษจากต่างประเทศ	
%Fe	3 rd	1 st	2 nd	1 st = มี %ส่วนผสมทางเคมีสูงที่สุด
%Si	2 nd	3 rd	1 st	2 nd = มี %ส่วนผสมทางเคมีเป็นลำดับที่ 2
%Mg	1 st	3 rd	2 nd	3 rd = มี %ส่วนผสมทางเคมีเป็นลำดับที่ 3
%Ti	3 rd	1 st	2 nd	
%Mn	3 rd	2 nd	1 st	
%Cu	3 rd	2 nd	1 st	
%Zn	3 rd	2 nd	1 st	
%Cr	1 st	2 nd	3 rd	

จากตารางที่ 4.2 สรุปได้ว่าซิลิคอน (Si), แมงกานีส (Mn), ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) มีเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยส่วนผสมทางเคมีมากที่สุดในเศษจากต่างประเทศ เหล็ก (Fe) และไททานเนียม (Ti) มีเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยส่วนผสมทางเคมีมากที่สุดในเศษในประเทศ แมกนีเซียม (Mg) และโครเมียม (Cr) มีเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยส่วนผสมทางเคมีมากที่สุดในเศษในโรงงาน

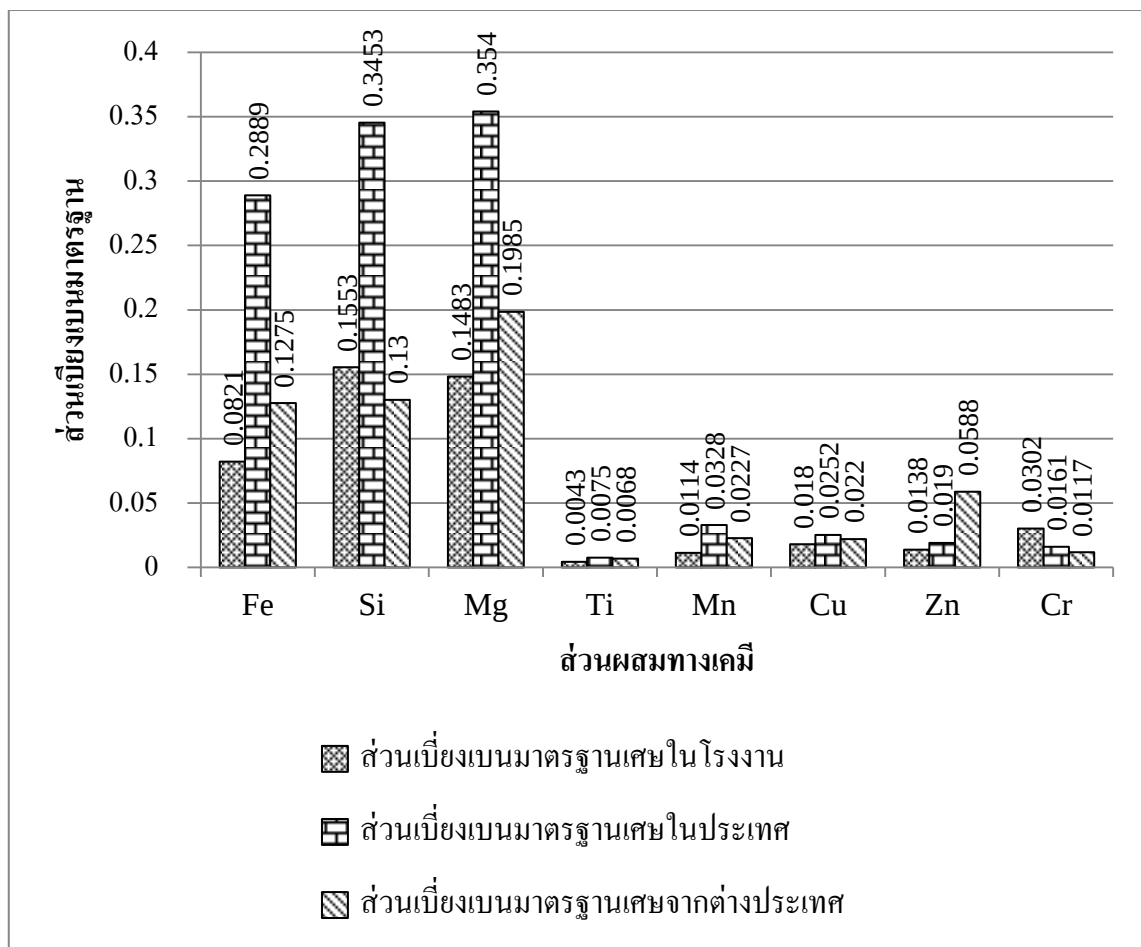
4.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด

จากการเก็บข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะทั้ง 3 ชนิด สามารถสรุปส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด

ส่วนผสมทางเคมี	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	เศษในโรงงาน	เศษในประเทศ	เศษจากต่างประเทศ
Fe	0.0821	0.2889	0.1275
Si	0.1553	0.3453	0.1300
Mg	0.1483	0.3540	0.1985
Ti	0.0043	0.0075	0.0068
Mn	0.0114	0.0328	0.0227
Cu	0.0180	0.0252	0.0220
Zn	0.0138	0.0190	0.0588
Cr	0.0302	0.0161	0.0117

จากข้อมูลส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีสามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อพิจารณาการนำไปใช้ในการผลิต โดยสามารถดูผลการเปรียบเทียบได้จากรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด

จากรูปที่ 4.2 แสดงกราฟเปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด สามารถอธิบายได้ดังนี้ได้ดังนี้

1. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเหล็ก (Fe) พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุดคือ เศษในโรงงานมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0821 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดคือ เศษในประเทศมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.2889
2. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของซิลิคอน (Si) พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุดคือ เศษจากต่างประเทศมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.13 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดคือ เศษในประเทศมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.3453
3. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแมกนีเซียม (Mg) พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุดคือ เศษในโรงงานมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1483 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดคือ เศษในประเทศมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.354
4. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของไททาเนียม (Ti) พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุดคือ เศษในโรงงานมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0043 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดคือ เศษในประเทศมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0075
5. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแมงกานีส (Mn) พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุดคือ เศษในโรงงานมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0114 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดคือ เศษในประเทศมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0328
6. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทองแดง (Cu) พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุดคือ เศษในโรงงานมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.018 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดคือ เศษในประเทศมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0252
7. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสังกะสี (Zn) พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุดคือ เศษในโรงงานมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0138 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดคือ เศษจากต่างประเทศมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0588
8. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของโครเมียม (Cr) พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุดคือ เศษจากต่างประเทศมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0117 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดคือ เศษในโรงงานมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0302

สรุปค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเหล็ก, ซิลิคอน, แมกนีเซียม, ไททาเนียม, แมงกานีส, ทองแดง และสังกะสี มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุดในเศษในโรงงาน ยกเว้นโครเมียม มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุดคือ เศษจากต่างประเทศ

จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการทดลองทางงานวิจัยได้ทำการสรุปออกมาเป็นตารางแสดงลำดับมากน้อยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด เพื่อให้เข้าใจได้โดยง่ายดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เรียงลำดับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีเศษโลหะแต่ละชนิด

ส่วนผสมทางเคมี	เรียงลำดับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมี			หมายเหตุ
	เศษในโรงงาน	เศษในประเทศ	เศษจากต่างประเทศ	
Fe	1 st	3 rd	2 nd	1 st = มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด
Si	2 nd	3 rd	1 st	2 nd = มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นลำดับที่ 2
Mg	1 st	3 rd	2 nd	
Ti	1 st	3 rd	2 nd	3 rd = มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นลำดับที่ 3
Mn	1 st	3 rd	2 nd	
Cu	1 st	3 rd	2 nd	
Zn	1 st	2 nd	3 rd	
Cr	3 rd	2 nd	1 st	

จากตารางที่ 4.4 สรุปได้ว่าเศษในโรงงานมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีน้อยที่สุด รองลงมาคือเศษจากต่างประเทศ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีสูงที่สุด คือเศษในประเทศ

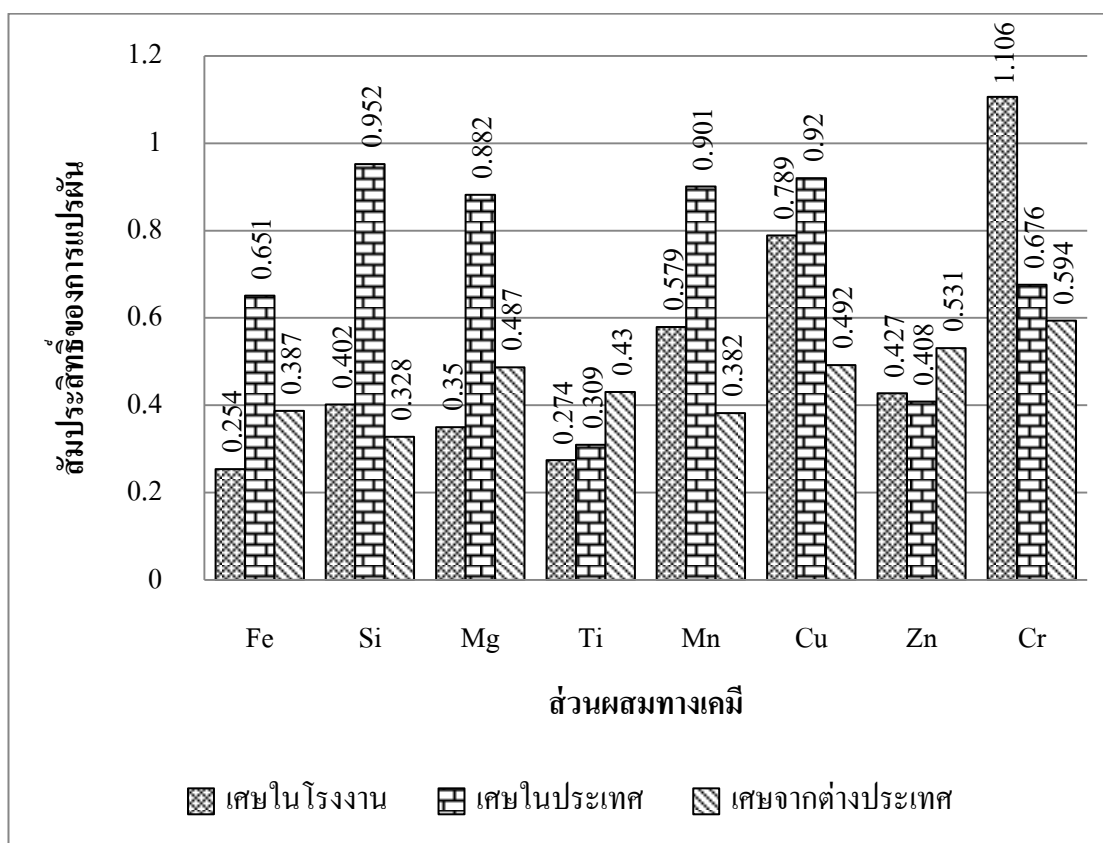
4.4 สัมประสิทธิ์การแปรผันของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด

จากค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีโลหะแต่ละชนิด นำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของการแปรผัน เพื่อพิจารณาการกระจายตัวของเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมทางเคมีที่มีอยู่ในเศษโลหะแต่ละชนิด ได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์ของการแปรผันของส่วนผสมทางเคมีโลหะแต่ละชนิด

ส่วนผสมทางเคมี	สัมประสิทธิ์ของการแปรผัน		
	เศษในโรงงาน	เศษในประเทศ	เศษจากต่างประเทศ
Fe	0.254	0.651	0.387
Si	0.402	0.952	0.328
Mg	0.350	0.882	0.487
Ti	0.274	0.309	0.430
Mn	0.579	0.901	0.382
Cu	0.789	0.920	0.492
Zn	0.427	0.408	0.531
Cr	1.106	0.676	0.594

จากข้อมูลสัมประสิทธิ์ของการแปรผันของส่วนผสมทางเคมีสามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อพิจารณาการนำไปใช้ในการผลิต โดยสามารถดูผลการเปรียบเทียบได้จากรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแปรผันของส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด

จากรูปที่ 4.3 แสดงกราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแปรผันของส่วนผสมทางเคมีโลหะแต่ละชนิด สามารถอธิบายได้ดังนี้ได้ดังนี้

1. สัมประสิทธิ์การแปรผันของเหล็ก (Fe) พบว่าเศษในโรงงานมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีน้อยที่สุด รองลงมาคือเศษจากต่างประเทศ และเศษในประเทศมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีมากที่สุด
2. สัมประสิทธิ์การแปรผันของซิลิคอน (Si) พบว่าเศษจากต่างประเทศมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีน้อยที่สุด รองลงมาคือเศษในโรงงาน และเศษในประเทศมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีมากที่สุด
3. สัมประสิทธิ์การแปรผันของแมกนีเซียม (Mg) พบว่า เศษในโรงงานมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีน้อยที่สุด รองลงมาคือเศษจากต่างประเทศ และเศษในประเทศมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีมากที่สุด
4. สัมประสิทธิ์การแปรผันของไททาเนียม (Ti) พบว่า เศษในโรงงานมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีน้อยที่สุด รองลงมาคือเศษในประเทศ และเศษจากต่างประเทศมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีมากที่สุด
5. สัมประสิทธิ์การแปรผันของแมงกานีส (Mn)) พบว่าเศษจากต่างประเทศมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีน้อยที่สุด รองลงมาคือเศษในโรงงาน และเศษในประเทศมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีมากที่สุด
6. สัมประสิทธิ์การแปรผันของทองแดง (Cu)) พบว่าเศษจากต่างประเทศมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีน้อยที่สุด รองลงมาคือเศษในโรงงาน และเศษในประเทศมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีมากที่สุด
7. สัมประสิทธิ์การแปรผันของสังกะสี (Zn)) พบว่าเศษในประเทศมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีน้อยที่สุด รองลงมาคือเศษในโรงงาน และเศษจากต่างประเทศมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีมากที่สุด
8. สัมประสิทธิ์การแปรผันของโครเมียม (Cr) พบว่าเศษจากต่างประเทศมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีน้อยที่สุด รองลงมาคือเศษในประเทศ และเศษในโรงงานมีการกระจายของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีมากที่สุด

สรุปค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของเศษในโรงงานมีการกระจายตัวของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมค่อนข้างน้อย เมื่อนำไปผลิตจะทำให้สามารถควบคุมส่วนผสมทางเคมีได้ง่าย รองลงมาคือเศษจากต่างประเทศ

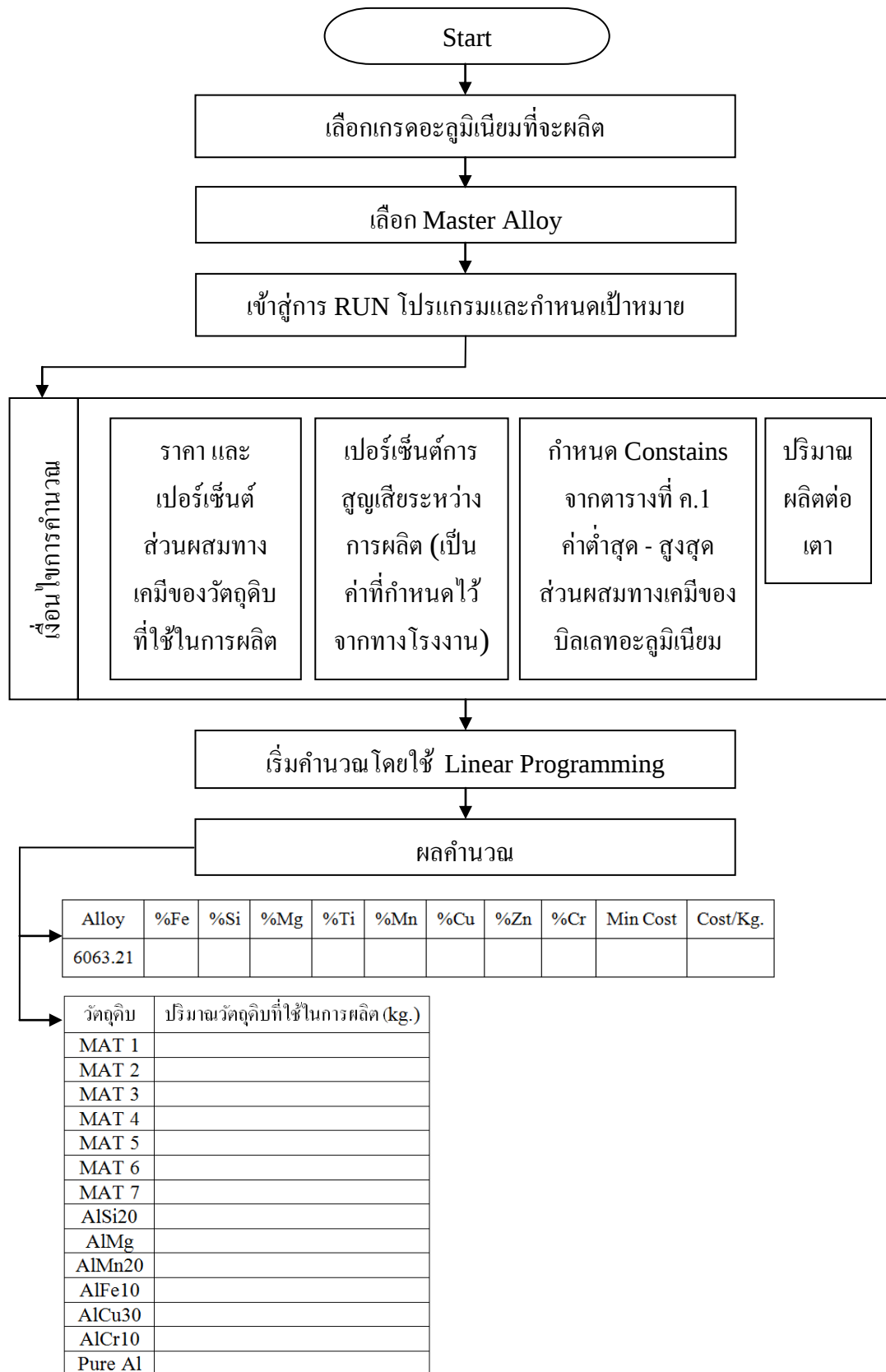
4.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Linear Programming)

สร้างตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Linear Programming) เพื่อสร้างแผนการผลิตจากปัจจัยทั้งหมดที่ได้ศึกษา โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft Excel) เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่คนส่วนมากรู้จัก ใช้งานได้ง่าย พนักงานหน้างานสามารถศึกษาและใช้งานได้

ในการคำนวณเพื่อหาคำหนดต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด งานวิจัยได้กำหนดตัวแปรต่างๆ เงื่อนไขและข้อจำกัด ไว้ดังนี้

1. ราคาของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต คือ แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เศษโลหะ และมอเตอร์อัลลอยด์ชนิดต่างๆ
2. เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต
 - แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ จากตารางที่ ค.3 ค่ามาตรฐานส่วนผสมทางเคมีของแท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์
 - เศษโลหะ จากตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด
 - มอเตอร์อัลลอยด์ชนิดต่างๆ จากตารางที่ ค.2 ค่ามาตรฐานส่วนผสมทางเคมีของบิลเลทอะลูมิเนียมผสม
3. เปอร์เซ็นต์การสูญเสียระหว่างการผลิต (เป็นค่าที่กำหนดไว้จากทางโรงงาน)
 - แท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ กำหนดไว้ที่ 0.5%
 - เศษในโรงงาน กำหนดไว้ที่ 1.0%
 - เศษในประเทศกำหนดไว้ที่ 3.0%
 - เศษจากต่างประเทศ กำหนดไว้ที่ 5.0%
4. ส่วนผสมทางเคมีของบิลเลทอะลูมิเนียมเกรดต่างๆ ที่ทำการผลิต จากตารางที่ ค.1 ค่าต่ำสุด – สูงสุดส่วนผสมทางเคมีของบิลเลทอะลูมิเนียม
5. ปริมาณการผลิตต่อเตา

จากข้อกำหนดดังกล่าว งานวิจัยได้นำสร้างโปรแกรมคำนวณ โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังรูปที่ 4.4 และขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมคำนวณไมโครซอฟท์ เอ็กเซล (Microsoft Excel) สามารถดูได้จากภาคผนวก ง.



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.6 รอบเวลา (Cycle Time) และพลังงานที่ใช้ในการผลิต

จากผลการทำวิจัยเรื่องการคำนวณสัดส่วนวัตถุดิบเพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตบิลเลทอะลูมิเนียมพบว่าเวลาที่ใช้ในการผลิตต่อเตาลดลง เพราะมีการลดขั้นตอนการทำงาน และลดเวลาในการทำงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบเวลาในการผลิตและจำนวนการผลิตเตาต่อวันของก่อนและหลังการทดลอง

ตารางเปรียบเทียบเวลาการผลิต		เวลาการทำงาน (นาที)	
ขั้นตอน ที่	กิจกรรม	ก่อนการ ทดลอง	หลังการ ทดลอง
1	นำเศษโลหะใส่เข้าเตาหลอมโลหะขนาด 15 ตัน	10	10
2	เศษโลหะหลอมละลายในเตาหลอม	35	35
3	ลำเลียงน้ำอะลูมิเนียมจากเตาหลอม 15 ตัน ไปสู่เตาหลอมขนาด 6 ตันเพื่อปรับส่วนผสมทางเคมี	10	10
4	ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีก่อนการปรงน้ำอะลูมิเนียมให้ได้ตามมาตรฐาน (x ครั้ง)	10x	0
5	ใส่ไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียม	6	6
6	ทำการปรงส่วนผสมทางเคมี	15	10
7	ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของน้ำอะลูมิเนียมให้ได้ตามมาตรฐาน	10	10
8	ลำเลียงน้ำอะลูมิเนียมจากเตาหลอม 6 ตัน ไปสู่เตาไล่แก๊สเพื่อเตรียมเทเข้าสู่แบบ	5	5
9	เทน้ำอะลูมิเนียมลงในแบบที่เตรียมไว้	20	20
10	แกะแท่งอะลูมิเนียมออกจากแบบ	10	10
เวลารวมของกระบวนการผลิต		121+10x	116
จำนวนผลิต (เตา / วัน)		10.99*	12.41

* หมายถึง ค่าจำนวนจากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีซ้ำ 1 รอบ

หมายเหตุ : ในกรณีที่ไม่มีผลผลิตเรื่องส่วนผสมเกินมาตรฐาน ถ้าพบว่ามีส่วนผสมทางเคมีเกินมาตรฐานจะต้องมีการปฏิบัติดังนี้

1. ทิ้งแ่งอะลูมิเนียมของเตานั้น
2. ปรับไปผลิตแ่งอะลูมิเนียมชนิดอื่นแทน
3. ทำการเติมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ถ้าส่วนผสมทางเคมีเกินมาตรฐาน
4. ทำการเติมอะลูมิเนียมผสม ถ้าส่วนผสมต่ำกว่ามาตรฐาน

ในด้านของพลังงานที่ใช้ในการผลิตนั้น เมื่อเวลาในการทำงานของเตาหลอมลดพลังงานที่ใช้ก็จะลดลงด้วย

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยเรื่องการคำนวณสัดส่วนวัตถุดิบเพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตอะลูมิเนียมบิลเลท สรุปผลได้ดังนี้

1. จากค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะอะลูมิเนียมพบว่า
 - 1.1 เศษในโรงงาน มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีต่ำที่สุด การนำไปผลิตบิลเลทต้องใช้ในปริมาณมาก เพื่อให้ได้ส่วนผสมทางเคมีที่ต้องการ แต่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำ ทำให้สามารถควบคุมเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีได้ง่าย
 - 1.2 เศษในประเทศ มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีอยู่ในระดับกลาง และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง การนำไปผลิตบิลเลทใช้ในปริมาณที่ไม่มาก แต่การควบคุมเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีทำได้ยาก
 - 1.3 เศษจากต่างประเทศ มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีมากที่สุด การนำไปผลิตบิลเลทใช้ในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับเศษโลหะชนิดอื่น และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในระดับกลาง การควบคุมเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมีอาจได้ยากกว่าเศษในโรงงาน แต่ทางบริษัทนิยมใช้งานเศษจากต่างประเทศ เนื่องจากมีราคาที่ถูก
2. จากการนำโปรแกรมการคำนวณมาใช้งาน พบว่าลดต้นทุนได้ประมาณ 5% จากการลดปริมาณการใช้อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ แล้วนำเศษโลหะที่มีราคาถูกกว่ามาใช้ในการผลิตมากขึ้น
3. ลดเวลาตรวจสอบและปรุงส่วนผสมทางเคมีของผลิตภัณฑ์ เพราะสามารถปรุงน้ำอะลูมิเนียมได้ใกล้เคียงมาตรฐานตั้งแต่การผสมครั้งแรก ทำให้รอบเวลาในการผลิตลดลง และส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการผลิตลดลงด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการวิจัยในครั้งนี้มีระยะเวลาในการเก็บข้อมูลจำกัด ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองจึงเป็นข้อมูลระยะสั้น ดังนั้นเพื่อให้ข้อมูลที่น่าไปใช้ในการคำนวณมีความเที่ยงตรงมากขึ้น จึงควรทำการเก็บข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะชนิดต่างๆ เพิ่มเติมและต่อเนื่องไปในระยะยาว ซึ่งทำให้โปรแกรมสามารถคำนวณผลลัพธ์ได้แม่นยำและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น
2. ทำการเก็บข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะชนิดต่างๆ อย่างต่อเนื่อง และนำมาสร้างกราฟ $\bar{x}$ -bar R-chart เพื่อคำนวณหาค่า Control Limit เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในการผลิต และควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบ

3. ทำการเก็บข้อมูลส่วนผสมทางเคมี เพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อนส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมบิลเลทที่ทำการผลิต ระหว่างค่าส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปกับค่าจริงที่วัดได้ในการผลิต

ข้อจำกัดในงานวิจัย

1. การจัดเก็บเศษโลหะทั้ง 3 ชนิด มีการจัดเก็บปนกัน ทำให้มีโอกาที่เศษโลหะในลอตที่นำเข้ามาทำการผลิตปะปนกัน ซึ่งส่งผลต่อการเก็บข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะแต่ละชนิด ดังนั้นทางบริษัทควรแยกจัดเก็บเศษโลหะแต่ละชนิดออกจากกัน
2. กระบวนการหมุนเวียนวัตถุดิบมาก่อน – ออกก่อน (FIFO) ของเศษโลหะ ทางบริษัทยังไม่มี การจัดการที่ชัดเจน ทำให้มีโอกาที่จะใช้เศษโลหะต่างลอตกัน ในการผลิตอะลูมิเนียมแต่ละรอบ ซึ่งอาจส่งผลต่อการเก็บข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของเศษโลหะ
3. ทางบริษัทตัวอย่างไม่สามารถนำเศษโลหะแต่ละชนิดมาหลอมทีละชนิดเพื่อหาส่วนผสมทางเคมีได้ เนื่องจากกระทบกับยอดการผลิตจริงในแต่ละวัน

เอกสารอ้างอิง

- 1 สิริินทร์ ต้นตรงวงศ์, 2553, การลดต้นทุนการผลิตโดยวิธีโปรแกรมเชิงเส้น กรณีศึกษา บริษัทผู้ผลิตกระดาษแห่งหนึ่ง, การค้นคว้าอิสระวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การบริหารเทคโนโลยี) สาขาวิชาการบริหารเทคโนโลยี วิทยาลัยนวัตกรรม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, หน้า 11.
- 2 กนกวรรณ อุตระศักดิ์, 2551, ผลของกระบวนการไฮโมจีไนซ์ ต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของแท่งอะลูมิเนียมผสม 6063, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 1-2, 6-11.
- 3 ณรงค์ฤทธิ์ โสตะ, 2557, โลหะอะลูมิเนียมผสม **Aluminium Alloys**, [Online], Available: <http://www.scribd.com/doc/99310474/โลหะอะลูมิเนียมผสม-Aluminuim-Alloys>, [19 กุมภาพันธ์ 2557].
- 4 เขวลิต ลีมนิวิจิตร, 2546, “ความสะอาดของอะลูมิเนียมหลอมเหลวสำหรับการหล่อโลหะ”, วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี, 30(172), 130-134.
- 5 พัทธกร เนียมมณี, 2552, ตัวแบบการจัดการทรัพยากร, โครงการส่งเสริมและพัฒนาเอกสารวิชาการ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, หน้า 1-4, 18-20.
- 6 ณัฐติฐากร ชูก้าน, 2545, การออกแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการประเมินบริษัทขนส่งโดยใช้ตัวแบบขนส่ง **Multicommodity, AHP และ LP**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- 7 วิภาวรรณ สิงห์พริ้ง, 2545, การวิจัยและการดำเนินงาน, เล่ม1, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.

- 8 ณรงค์ ศิริเลิศวรกุล, วุฒิพงษ์ รั้งยี่สันติวานนท์ และบัญชา ธนบุญสมบัติ, 2540, การพัฒนาโปรแกรมฐานความรู้ในการเลือกอะลูมิเนียมผสมสำหรับงานหล่อ, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- 9 กอบสิน ทวีสิน, สมบุญ เจริญวิไลศิริ, นุชธนา พูลทอง, เขวลิต ลีम्मณีวิจิตร และสาริต จันทนปุม, 2544, การพัฒนากระบวนการหลอมเศษอะลูมิเนียมที่ใช้แล้วมาใช้ใหม่อย่างมีประสิทธิภาพ ระยะที่ 1: ศึกษาความเป็นไปได้, โครงการวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- 10 เขวลิต ลีम्मณีวิจิตร และวิทยา เอียดเหตุ, 2545, “ประสิทธิภาพและกลไกการเสื่อมสภาพของการใช้โลหะแม่ชนิด Al-Ti-B ในอะลูมิเนียมชนิดอลูมิเนียมผสมหล่อเกรด 356 ในการปรับสภาพเกรนละเอียด”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.,ปีที่ 25, ฉบับที่ 4, หน้า 359.
- 11 ศศิธร พิทักษ์ฐานพงษ์, 2549, การศึกษาพฤติกรรมของโลหะอะลูมิเนียมในกระบวนการหล่อ เพื่อพัฒนาคุณภาพชิ้นงานหล่อ, โครงการวิจัยประยุกต์สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมการวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- 12 ปรีชา หล้ากัน, 2550, การสร้างแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาดัชนีต้นทุนต่ำสุดในการหลอมอะลูมิเนียม : กรณีศึกษา บริษัท ยูไนเต็ด อะลูมิเนียม อินดัสตรี จำกัด, วิทยานิพนธ์ปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.
- 13 Gilbert, J. and Elwin, L., 2004, **Aluminium Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications**, [Online], Available: https://metronynj.asminternationalorg/content/ASM/StoreFiles/05114G_Frontmatter.pdf, [2013, October 10].

ภาคผนวก ก.

Aluminium Alloy Castings

CHAPTER 2[13]

Aluminium Casting Alloys

n.1 General

Aluminium casting alloy compositions parallel wrought alloy compositions in many respects. Hardening and desired properties are achieved through the addition of alloying elements and through heat treatment. Since work hardening plays no significant role in the development of casting properties, the use and purposes of some alloying elements differ in casting and wrought alloys.

The most important consideration in differentiating wrought and casting alloy compositions is castability. While wrought products are typically produced in simple round and rectangular cross sections by casting processes that minimize the depth and maximize the uniformity of the solidification front, solidification in engineered castings with complex shapes and variable rates of solidification present different demands on alloy solidification behavior. Cracking during and after solidification and internal shrinkage dictate alloys for shape casting that minimize these tendencies.

The term *castability* is not precisely defined. It is used to estimate the suitability of a composition for solidification in a specific process to produce defect-free, sound castings. For gravity casting, the components of castability are generally considered to be fluidity as the measure of mold-filling capability, resistance to hot cracking during and after solidification, and feeding characteristics that promote the flow of metal during solidification to avoid or minimize the formation of shrinkage voids. For pressure die castings, the criteria of castability are resistance to hot cracking, fluidity, die soldering and surface finish.

Fluidity is a complex function that can be quantified and mathematically defined. Fluidity is most strongly affected by temperature above the liquidus or degree of superheat. More fluid compositions at conventional pouring temperatures are those of eutectic or near-eutectic composition.

Improved feeding characteristics are usually associated with narrow solidus-liquidus ranges and in greater percent liquid at the eutectic temperature.

The tendency for solidification and postsolidification cracking is dominated by element effects on elevated-temperature strength and on solidification rate.

Die soldering is most strongly influenced by metal chemistry, but die condition and other process parameters are also important.

The most commonly used castability ratings were developed by consensus estimates based on practical experience. Castability ratings from A to F or from 1 to 10 imply excellent to poor casting characteristics, respectively. Castability and other fabricating and finishing ratings are summarized in Table 8.1 in Chapter 8.

The casting alloys used in the greatest volumes contain silicon in excess of that of most wrought alloys. Solidification results in shaped casting are improved by fluidity, elevated-temperature resistance to cracking, and feeding characteristics that sufficient amounts of silicon impart.

The optimal concentration of silicon depends in part on the casting process. Processes characterized by higher heat flux use alloys with higher silicon contents since fluidity is improved. Feeding, the compensation for internal shrinkage, also varies as a result of gradients in the solidification zone that are process controlled. In general, castability, is associated with alloys of reduced solidification range.

There are nevertheless many common foundry alloys that do not rely on silicon for casting performance.

The recyclability of aluminium is a principal material advantage, and a number of casting alloys have been developed specifically for production from remelted scrap. These “secondary” compositions specify broader impurity ranges and include additional elements as impurities to reflect variations in raw materials. By contrast, primary alloys that are produced from smelted aluminium, metallurgical metals, and master alloys display more restrictive and more limited, element-specific impurity limits.

n.2 Specifications

Aluminium castings are the subject of numerous specifications and standards. Within the United States, alloy chemistry and thermal practices are registered with the Aluminium Section 2.3.1 of this chapter). Procurement specifications and standards are developed and maintained by, among others, ASTM and Military and Federal agencies. Procedural methods and standards are often referenced. These pertain to radiographic and penetrant inspection, test procedures for determination of chemical, mechanical, and physical properties, and other required procedures. In many cases, specifications are written for specific parts or classes of parts by the purchaser. All specifications are subject to negotiation and exceptions to be agreed upon by the casting producer and the customer as part of the purchasing process.

Specifications for aluminium alloy chemistries include the effects of major, minor, and impurity elements:

- Major alloying elements define the ranges of elements that control castability and property development.
- Minor alloying elements control solidification behavior, modify eutectic structure, refine primary phases, refine grain size and form, promote or suppress phase formation, and reduce oxidation.
- Impurity elements influence castability and the form of insoluble phases that at times limit or promote desired properties.

Preferred major, minor, and impurity element concentrations and relationships may not be defined by alloy specifications. Optimal results are not implied by nominal chemistries. The addition of structure-controlling elements or combinations of elements can be contained within chemistry limits when not otherwise specified under “Other Elements Each.”

Stoichiometric ratios for favored phase formation can be specified, but also may not be controlled or defined.

Concentration limits allow biasing of composition for castability and property development. For maximum strength, the concentration of elements that form hardening phases can be maximized. Improved ductility results from finer structures, restricting insoluble- element concentrations, and by controlling the concentrations of impurities in ratios that favor the formation of the least detrimental intermetallic constituents. Composition biasing can be specified in ingot procurement or can result from alloying adjustments in the foundry.

n.3 Alloy Designations

Designation systems and alloy nomenclature for aluminium casting alloys are not internationally standardized. Many nations have developed and published their own standards. Individual firms have also promoted alloys by proprietary designations. In North America, the most commonly used system is that developed and maintained by the Aluminium Association. General procurement specifications issued through government agencies and technical associations and societies typically reference this nomenclature.

n.3.1 The Aluminium Association (AA) Casting Alloy Designation System

The most widely used casting alloy designation system in the United States is the Aluminium Association (AA) alloy and temper systems (Ref 1), which are described below. Regrettably, the AA system is not universally used, and some of its earlier modifications are still widely quoted. Therefore, subsequent sections discuss the earlier variations as well as other rather widely used designations. In the AA alloy designation, there are four numeric digits, with

a period between the third and fourth. The meanings of the four digits are:

- First digit: Principal alloying constituent(s)
- Second and third digits: Specific alloy designation (number has no significance but is unique)
- Fourth digit: Casting (0) or ingot (1, 2) designation

Variations in the composition limits that are too small to require a change in numeric designation are indicated by a preceding letter (A, B, C, etc).

The first version of an alloy, say 356.0, contains no letter prefix; the first variation has an A, e.g., A356.0, the second a B, for example, B356.0, and so forth. The first digit defines the major alloying constituent or constituents, with the following categories being defined:

- 1xx.x, pure aluminium (99.00% or greater)
- 2xx.x, aluminium-copper alloys
- 3xx.x, aluminium-silicon _ copper and/or magnesium
- 4xx.x, aluminium-silicon
- 5xx.x, aluminium-magnesium
- 7xx.x, aluminium-zinc
- 8xx.x, aluminium-tin
- 9xx.x, aluminium _ other elements
- 6xx.x, unused series

In designations of the 1xx.x type, the second and third digits indicate minimum aluminium content (99.00% or greater); these digits are the same as the two to the right of the decimal point in the minimum aluminium percentage expressed to the nearest 0.01%. For example, alloy 170.0 contains a minimum of 99.70% Al.

In 2xx.x through 8xx.x designations for aluminium alloys, the second and third digits have no numerical significance, but only arbitrarily identify individual alloys in the group.

In all casting alloy designations, the fourth digit, that to the right of the decimal point, indicates product form:

- 0 denotes castings
- 1 denotes standard ingot
- 2 denotes ingot having composition ranges narrower than but within those of standard ingot

Designations in the form xxx.1 and xxx.2 include the composition of specific alloys in remelt ingot form suitable for foundry use. Designations in the form xxx.0 in all cases define composition limits applicable to castings. Further variations in specified compositions are denoted by prefix letters used primarily to define differences in impurity limits. Accordingly, one of the most common gravity cast alloys, 356, has variations A356, B356, and C356; each of these alloys has identical major alloy contents, but has decreasing specification limits applicable to impurities, especially iron content.

Alloying-element and impurity limits for ingot are usually the same as those for castings of the same alloy. When the ingot is remelted, iron and silicon contents tend to increase and magnesium content decreases. For these reasons, ingot chemistry for some alloys may be somewhat different from those specified for castings.

Despite the broad acceptance of the AA casting alloy designation system, including recognition by the American National Standards Institute (ANSI), it remains relatively common to see the alloys listed with only the first three digits of the alloy designation, for example, for 356.0, one may see simply 356 (see Section 2.3.3 in this chapter). Technically, this is obsolete usage of the designation system, and for cast components the “.0” should always be utilized. The nominal compositions and composition limits of aluminium alloys in commercial use today are presented in ตารางที่ ก.1.

ตารางที่ ก.1 Nominal composition and composition limits of aluminium alloy castings
Based on industry handbooks, notably Aluminium Association Standards for Sand and Permanent Mold Castings, and the Aluminium Association Registration Sheets for Alloys in the Form of Castings and Ingot

Alloy	Type(s)	Composition, wt%										Others		Al
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	Each(b)	Total(b)	
100.1	Nominal	...	0.7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	0.15	0.6–0.8	0.10	(c)	...	(c)	...	0.05	(c)	...	0.03	0.10	bal
150.1	Nominal	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	(d)	(d)	0.05	(c)	...	(c)	...	0.05	(c)	...	0.03	0.10	bal
170.1	Nominal	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	(e)	(e)	...	(c)	...	(c)	...	0.05	(c)	...	0.03	0.10	bal
201.0(f)	Nominal	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	0.10	0.15	4.0–5.2	0.20–0.50	0.15–0.55	...	...	...	0.15–0.35	...	0.05	0.10	bal
203.0	Nominal	...	...	5.0	0.25	...	...	1.5	...	0.20	...	...	...	...
	Limits(g)	0.30	0.50	4.5–5.5	0.20–0.30	0.10	...	1.3–1.7	0.10	0.15–0.25	...	0.05	0.20	bal
204.0	Nominal	...	...	...	...	0.25	...	...	...	0.22	...	...	...	...
	Limits	0.20	0.35	4.2–5.0	0.10	0.15	...	0.05	0.10	0.15–0.30	0.05	0.05	0.15	bal
A206.0	Nominal	...	...	4.6	0.35	0.25	...	...	...	0.22	...	...	...	...
	Limits	0.05	0.10	4.2–5.0	0.20–0.50	0.15–0.35	...	0.05	0.10	0.15–0.30	0.05	0.05	0.15	bal
208.0(h)	Nominal	3.0	...	4.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	2.5–3.5	1.2	3.5–4.5	0.50	0.10	...	0.35	1.0	0.25	...	...	0.50	bal
222.0(h)	Nominal	...	...	10.0	...	0.25	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	2.0	1.5	9.2–10.7	0.50	0.15–0.35	...	0.50	0.8	0.25	...	...	0.35	bal
224.0(h)	Nominal	...	...	5.0	0.35	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits(i)	0.06	0.10	4.5–5.5	0.20–0.50	...	...	...	...	0.35	...	0.03	0.10	bal
240.0	Nominal	...	...	8.0	0.5	6.0	...	0.5	...	...	...	...	...	...
	Limits	0.50	0.50	7.0–9.0	0.30–0.7	5.5–6.5	...	0.30–0.7	0.10	0.20	...	0.05	0.15	bal
242.0	Nominal	...	...	4.0	...	1.5	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	0.7	1.0	3.5–4.5	0.35	1.2–1.8	0.25	1.7–2.3	0.35	0.25	...	0.05	0.15	bal
A242.0	Nominal	...	...	4.1	...	1.4	0.20	...	...	0.14	...	...	...	...
	Limits	0.6	0.8	3.7–4.5	0.10	1.2–1.7	0.15–0.25	1.8–2.3	0.10	0.07–0.20	...	0.05	0.15	bal
249.0(h)	Nominal	...	...	4.2	0.38	0.38	...	...	3.0	0.18	...	...	...	...
	Limits	0.05	0.10	3.8–4.6	0.25–0.50	0.25–0.50	...	...	2.5–3.5	0.02–0.35	...	0.03	0.10	bal
295.0	Nominal	1.1	...	4.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	0.7–1.5	1.0	4.0–5.0	0.35	0.03	...	...	0.35	0.25	...	0.05	0.15	bal
308.0	Nominal	...	...	4.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	5.0–6.0	1.0	4.0–5.0	0.50	0.10	...	...	1.0	0.25	...	...	0.50	bal
319.0	Nominal	6.0	...	3.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	5.5–6.5	1.0	3.0–4.0	0.50	0.10	...	0.35	1.0	0.25	...	...	0.50	bal
328.0(h)	Nominal	8.0	...	1.5	0.40	0.40	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	7.5–8.5	1.0	1.0–2.0	0.20–0.6	0.20–0.6	0.35	0.25	1.5	0.25	...	...	0.50	bal
332.0	Nominal	9.5	...	3.0	...	1.0	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	8.5–10.5	1.2	2.0–4.0	0.50	0.50–1.5	...	0.50	1.0	0.25	...	...	0.50	bal
333.0	Nominal	9.0	...	3.5	...	0.28	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	8.0–10.0	1.0	3.0–4.0	0.50	0.05–0.50	...	0.50	1.0	0.25	...	...	0.50	bal
336.0	Nominal	12.0	...	1.0	...	1.0	...	2.5	...	...	...	...	...	...
	Limits	11.0–13.0	1.2	0.50–1.5	0.35	0.7–1.3	...	2.0–3.0	0.35	0.25	...	0.05	...	bal
354.0	Nominal	9.0	...	1.8	...	0.5	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	8.6–9.4	0.20	1.6–2.0	0.10	0.40–0.6	...	...	0.10	0.20	...	0.05	0.15	bal
355.0	Nominal	5.0	...	1.25	...	0.5	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	4.5–5.5	0.6	1.0–1.5	0.50	0.40–0.6	0.25	...	0.35	0.25	...	0.05	0.15	bal
C355.0	Nominal	5.0	...	1.25	...	0.5	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	4.5–5.5	0.20	1.0–1.5	0.10	0.40–0.6	...	...	0.10	0.20	...	0.05	0.15	bal
356.0	Nominal	7.0	...	...	...	0.32	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	6.5–7.5	0.6	0.25	0.35	0.20–0.45	...	...	0.35	0.25	...	0.05	0.15	bal
A356.0	Nominal	7.0	...	...	...	0.35	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	6.5–7.5	0.20	0.20	0.10	0.25–0.45	...	...	0.10	0.20	...	0.05	0.15	bal
357.0	Nominal	7.0	...	...	...	0.52	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	6.5–7.5	0.15	0.05	0.03	0.45–0.6	...	...	0.05	0.20	...	0.05	0.15	bal
A357.0(j)	Nominal	7.0	...	...	...	0.55	...	...	...	0.12	...	...	...	...
	Limits	6.5–7.5	0.20	0.20	0.10	0.40–0.7	...	...	0.10	0.04–0.20	...	0.05	0.15	bal
D357.0(j)	Nominal	7.0	...	...	...	0.58	...	...	...	0.15	...	...	...	...
	Limits	6.5–7.5	0.20	...	0.10	0.55–0.6	...	...	...	0.10–0.20	...	0.05	0.15	bal
359.0	Nominal	9.0	...	...	...	0.6	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	8.5–9.5	0.20	0.20	0.10	0.50–0.7	...	...	0.10	0.20	...	0.05	0.15	bal
360.0	Nominal	9.5	...	...	...	0.5	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	9.0–10.0	2.0	0.6	0.35	0.40–0.6	...	0.50	0.50	...	0.15	...	0.25	bal
A360.0	Nominal	9.5	...	...	...	0.5	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	9.0–10.0	1.3	0.6	0.35	0.40–0.6	...	0.50	0.50	...	0.15	...	0.25	bal

(continued)

(a) Both nominal compositions and composition limits are shown. Nominal values are midrange of limits for elements for which a composition range is specified. Limits are maximum unless a range is shown. (b) Maximum for “each” and “total” of elements not shown and present at 0.010% or more each, when expressed to the second decimal. (c) Ingot; 0.025% max Mn _ Cr _ Ti _ V. (d) Ingot; 2.0 min Fe/Si ratio. (e) Ingot; 1.5 min Fe/Si ratio. (f) Also contains 0.40–1.0% (0.7% nominal) Ag. (g) Also contains 0.20–0.30% Sb (0.25% nominal), 0.20–0.30% Co (0.25% nominal), and 0.10–0.30% Zr, Ti _ Zr contents _ 0.50% max. (h) Alloy has been designated “Inactive” by the Aluminium Association, but still occurs in some publications. (i) Also contains 0.05–0.15V and 0.10–0.25 Zr. (j) Also contains 0.04–0.07% (0.055% nominal) Be. (k) Also contains 0.03–0.015 (0.010% nominal) Sr and a maximum 0.001% P. (l) If iron exceeds 0.45%, manganese content shall not be less than one-half iron content. (m) Also contains 0.0003–0.007% (0.005% nominal) Be and 0.005% maximum B.

ตารางที่ ก.1 Nominal composition and composition limits of aluminium alloy castings
(ต่อ)

Alloy	Type(a)	Composition, wt%										Others		
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	Each(b)	Total(b)	Al
		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
365.0	Nominal	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits(k)	9.5–11.5	0.15	0.03	0.50–0.8	0.10–0.50	...	...	0.07	0.04–0.15	0.03	0.03	0.10	bal
380.0	Nominal	8.5	...	3.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	7.5–9.5	2.0	3.0–4.0	0.50	0.10	...	0.50	3.0	...	0.35	...	0.50	bal
A380.0	Nominal	8.5	...	3.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	7.5–9.5	1.3	3.0–4.0	0.50	0.10	...	0.50	3.0	...	0.35	...	0.50	bal
383.0	Nominal	10.5	...	2.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	9.5–11.5	1.3	2.0–3.0	0.50	0.10	...	0.30	3.0	...	0.15	...	0.50	bal
384.0	Nominal	11.2	...	3.8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	10.5–12.0	1.3	3.0–4.5	0.50	0.10	...	0.50	3.0	...	0.35	...	0.50	bal
B390.0	Nominal	17.0	...	4.5	...	0.55	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	16.0–18.0	1.3	4.0–5.0	0.50	0.45–0.65	...	0.10	1.5	0.20	...	0.10	0.20	bal
391.0	Nominal	19.0	...	...	...	0.58	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	18.0–20.0	1.2	0.20	0.30	0.45–0.7	...	...	0.10	0.20	...	0.10	0.20	bal
A391.0	Nominal	19.0	...	...	...	0.58	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits(l)	18.0–20.0	0.6	0.20	0.30	0.45–0.7	...	...	0.10	0.20	...	0.10	0.20	bal
B391.0	Nominal	19.0	...	...	...	0.58	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	18.0–20.0	0.15	0.20	0.30	0.45–0.7	...	...	0.10	0.20	...	0.10	0.20	bal
413.0	Nominal	12.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	11.0–13.0	2.0	1.0	0.35	0.10	...	0.50	0.50	...	0.15	...	0.25	bal
A413.0	Nominal	12.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	11.0–13.0	1.3	1.0	0.35	0.10	...	0.50	0.50	...	0.15	...	0.25	bal
443.0	Nominal	5.2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	4.5–6.0	0.8	0.6	0.50	0.05	0.25	...	0.50	0.25	...	...	0.35	bal
B443.0	Nominal	5.2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	4.5–6.0	0.8	0.15	0.35	0.05	...	...	0.35	0.25	...	0.05	0.15	bal
C443.0	Nominal	5.2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	4.5–6.0	2.0	0.6	0.35	0.10	...	0.50	0.50	...	0.15	...	0.25	bal
A444.0	Nominal	7.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	6.5–7.5	0.20	0.10	0.10	0.05	...	...	0.10	0.20	...	0.05	0.15	bal
512.0	Nominal	1.8	...	...	...	4.0	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	1.4–2.2	0.6	0.35	0.8	3.5–4.5	0.25	...	0.35	0.25	...	0.05	0.15	bal
513.0	Nominal	...	...	...	...	4.0	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	0.30	0.40	0.10	0.30	3.5–4.5	...	...	1.4–2.2	0.20	...	0.05	0.15	bal
514.0	Nominal	...	...	...	...	4.0	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	0.35	0.50	0.15	0.35	3.5–4.5	...	...	0.15	0.25	...	0.05	0.15	bal
518.0	Nominal	...	...	...	...	8.0	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	0.35	1.8	0.25	0.35	7.5–8.5	...	0.15	0.15	...	0.15	...	0.25	bal
520.0	Nominal	...	...	...	...	10.0	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	0.25	0.30	0.25	0.15	9.5–10.6	...	...	0.15	0.25	...	0.05	0.15	bal
535.0(m)	Nominal	...	...	...	0.18	6.8	...	...	...	0.18	...	...	...	...
	Limits	0.15	0.15	0.05	0.10–0.25	6.2–7.5	...	...	...	0.10–0.25	...	0.05	0.15	bal
705.0	Nominal	...	...	...	0.5	1.6	0.30	...	3.0	...	...	...	...	...
	Limits	0.20	0.8	0.20	0.40–0.6	1.4–1.8	0.20–0.40	...	2.7–3.3	0.25	...	0.05	0.15	bal
707.0	Nominal	...	...	...	0.50	2.1	0.30	...	4.2	...	...	...	...	...
	Limits	0.20	0.8	0.20	0.40–0.6	1.8–2.4	0.20–0.40	...	4.0–4.5	0.25	...	0.05	0.15	bal
710.0	Nominal	...	...	0.50	...	0.7	...	...	6.5	...	...	...	...	...
	Limits	0.15	0.50	0.35–0.65	0.05	0.6–0.8	...	...	6.0–7.0	0.25	...	0.05	0.15	bal
711.0	Nominal	...	1.0	0.50	...	0.35	...	...	6.5	...	...	...	...	...
	Limits	0.30	0.7–1.4	0.35–0.65	0.05	0.25–0.45	...	...	6.0–7.0	0.20	...	0.05	0.15	bal
712.0	Nominal	...	...	...	...	0.58	0.50	...	6.0	0.20	...	...	...	...
	Limits	0.30	0.50	0.25	0.10	0.50–0.65	0.40–0.6	...	5.0–6.5	0.15–0.25	...	0.05	0.20	bal
713.0	Nominal	...	...	0.7	...	0.35	...	...	7.5	...	...	...	...	...
	Limits	0.25	1.1	0.40–1.0	0.6	0.20–0.50	0.35	0.15	7.0–8.0	0.25	...	0.10	0.25	bal
771.0	Nominal	...	...	...	...	0.9	0.40	...	7.0	0.15	...	...	...	...
	Limits	0.15	0.15	0.10	0.10	0.8–1.0	0.06–0.20	...	6.5–7.5	0.10–0.20	...	0.05	0.15	bal
850.0	Nominal	...	...	1.0	...	...	...	1.0	...	...	6.2	...	...	...
	Limits	0.7	0.7	0.7–1.3	0.10	0.10	...	0.7–1.3	...	0.20	5.5–7.0	...	0.30	bal
851.0	Nominal	2.5	...	1.0	...	...	...	0.50	...	...	6.2	...	...	...
	Limits	2.0–3.0	0.7	0.7–1.3	0.10	0.10	...	0.30–0.7	...	0.20	5.5–7.0	...	0.30	bal
852.0	Nominal	...	...	2.0	...	0.75	...	1.2	...	...	6.2	...	...	...
	Limits	0.40	0.7	1.7–2.3	0.10	0.6–0.9	...	0.9–1.5	...	0.20	5.5–7.0	...	0.30	bal

(a) Both nominal compositions and composition limits are shown. Nominal values are midrange of limits for elements for which a composition range is specified. Limits are maximum unless a range is shown. (b) Maximum for “each” and “total” of elements not shown and present at 0.010% or more each, when expressed to the second decimal. (c) Ingot; 0.025% max Mn _ Cr _ Ti _ V. (d) Ingot; 2.0 min Fe/Si ratio. (e) Ingot; 1.5 min Fe/Si ratio. (f) Also contains 0.40–1.0% (0.7% nominal) Ag. (g) Also contains 0.20–0.30% Sb (0.25% nominal), 0.20–0.30% Co (0.25% nominal), and 0.10–0.30% Zr, Ti _ Zr contents _ 0.50% max. (h) Alloy has been designated “Inactive” by the Aluminium Association, but still occurs in some publications. (i) Also contains 0.05–0.15V and 0.10–0.25 Zr. (j) Also contains 0.04–0.07% (0.055% nominal) Be. (k) Also contains 0.03–0.015 (0.010% nominal) Sr and a maximum 0.001% P. (l) If iron exceeds 0.45%, manganese content shall not be less than one-half iron content. (m) Also contains 0.0003–0.007% (0.005% nominal) Be and 0.005% maximum B.

๓.3.2 Aluminium Association Casting Temper Designation System

The Aluminium Association Casting Temper Designation System uses letters and numbers to indicate the major types of thermal treatments applicable to engineered castings:

- F, as-cast
- O, annealed
- T4, solution treated and aged
- T5, precipitation hardened
- T6, solution heat treated, quenched, and precipitation hardened
- T7, solution heat treated, quenched, and overaged

Temper designation is presented immediately following the alloy designation. Thus, for a 356.0 alloy casting that has been solution heat treated, quenched, and artificially aged, the full alloy and temper designation would be shown as 356.0-T6. Examples of registered temper variations are A357.0-T61, 242.0-T571, and 355.0-T71.

Other variations of temper designations are permitted by the Aluminium Association Temper Designation System, the most common being the use of “P” added to a standard temper designation (e.g., T6P) indicating a producer variation of the standard processing treatment. There is further discussion of temper designations in Chapter 7, “Heat Treatment of Aluminium Castings.”

2.3.3 Evolution of Designation System; Cross-Reference to Older Designations

As noted previously, over the years there have been several evolutionary steps in the development of the Aluminium Association casting alloy designation system, with the result that it is not uncommon to find variations of the current designations appearing on drawings and in publications from not too many years ago, and in some cases even in current publications. To assist in dealing with such variations, ตารางที่ ๓.2 illustrates a number of the variations in casting alloy designations over the past 50 years.

The overall most common variation is clearly the omission of the decimal point and the fourth digit, always a .0 for a foundry product. While inconsistent with current Aluminium Association standards, this variation is not usually a problem resulting in confusion, as for example it is relatively clear that an alloy designated 354 may safely be assumed to be 354.0 by today’s standard system.

While the most common variation is the omission of the decimal point and the fourth digit in the designation, there are two other types of variations reflected in ตารางที่ ๓.2 that are also seen frequently and can be more confusing. One variation is simply a proprietary designation that has become rather widely known in the past, for example, Hiduminium, Frontier 40E, Precedent 71, and

Almag 35. These designations originated before the alloy compositions were registered with the Aluminium Association and had no formal basis. They cause confusion because there is no obvious link to the current system if one does not have a conversion guide such as ตารางที่ ๓.2.

The other fairly often seen variation is the result of the significant revision of the Aluminium Association system in around 1990, when the guidelines for registering the alloys including copper and magnesium were changed. The result was that some alloys

shifted classification; for example, alloy 195.0 became 295.0 and alloy 214.0 became 514.0.

ก.3.4 The UNS Alloy Designation System

Another rather widely known alloy classification system is the Unified Numbering System (UNS). The UNS system has the advantage of covering all metallic alloy systems.

For aluminium alloys, as illustrated in ตารางที่ ก.2, this system is essentially an adaptation of the Aluminium Association alloy designation system to fit the UNS format. UNS numbers are obtained by taking the three digits to the left of the decimal point in the Aluminium Association system and adding A9 (meaning aluminium alloys) and a digit reflecting the letter prefix to the alloy designation.

For alloys with no letter prefix, the next numeric digit after A9 is a 0; for those with A, the next digit is 1, for B, it is 2, and so forth.

Thus, in the UNS system, 356.0 becomes A90356, A356.0 becomes A91356, C356.0 becomes A93356; and so forth.

The UNS system is not as widely used for aluminium alloys as for certain other classes of alloys. An example would be copper alloys, for which the UNS designations have been selected as the U.S. standards.

ตารางที่ ก.2 Cross reference for older casting alloy designations and frequently used specifications

Current Aluminum Association designation	Former Aluminum Association designation	Former proprietary company names	Unified Numbering System (UNS) designation	Former Federal specification designation	Former ASTM specification designation	Former SAE specification designation	Former military specification designation	Current ISO specification designation	Current Euronorm specification designation
150.0	150	...	A01500	...	...	...	...	Al-99.5	...
201.0	201	K01	A02010	...	CQ51A	382	...	...	...
203.0	203	Hiduminium 350	A02030	...	...	...	...	...	...
204.0	204	A-U5GT	A02040	...	...	...	...	...	...
208.0	108	...	A02080	108	CS43A	...	...	...	...
213.0	C113	...	A02130	113	CS74A	33	...	...	...
222.0	122	...	A02130	122	CG100A	34	...	Al-Cu10Si2Mg	...
224.0	224	...	A02240	224	...	...	...	...	...
240.0	A140, A240	...	A02400	140	...	...	...	...	...
242.0	142	...	A02220	142	CN42A	39	4222	...	...
249.0	149	...	A02490	149	...	...	...	...	...
295.0	195	...	A02950	195	C4A	38	4231	...	...
296.0	B295	...	A02960	B195	...	380	...	...	...
308.0	A108	...	A03080	A108	...	...	...	Al-Si6Cu4	45000
319.0	319	Allicast	A03190	319	SC64D	326	...	Al-Si5Cu3	45200
328.0	328	Red X-8	A03280	...	SC82A	327	...	...	...
332.0	F332	...	A03320	F132	SC103A	332	...	Al-Si9Cu3Mg	...
333.0	333	...	A03330	333	...	...	...	...	...
336.0	A332	...	A03360	A132	SN122A	321	...	Al-Si12Cu	48000
354.0	354	...	A03540	...	...	...	C354	...	...
355.0	355	...	A03550	355	SC51A	322	4210	Al-Si5Cu1Mg	45300
C355.0	C355	...	A33550	C355	SC51B	355	C355	...	...
356.0	356	...	A03560	356	SG70A	323	...	...	...
A356.0	A356	...	A33560	A356	SG70B	336	A356	Al-Si7Mg	42000
357.0	357	...	A03570	357	...	...	4241	...	...
A357.0	A357	...	A33570	...	...	...	A357	...	...
358.0	B358	Tens-50	A03580	...	...	...	...	...	...
359.0	359	...	A03590	...	...	...	359	...	...
360.0	360	...	A03600	...	SG100B	...	...	...	...
A360.0	A360	...	A13600	...	SG100A	309	...	Al-Si10Mg	43100
365.0	...	Silafont-36	A03650	...	...	...	...	...	...
380.0	380	...	A03800	...	SC84B	308	...	...	...
A380	A380	...	A13800	...	SC84A	306	...	Al-Si8Cu3Fe	46500
383.0	383	...	A03830	...	SC102	383	...	...	...
384.0	384	...	A03840	...	SC114A	303	...	Al-Si10Cu2Fe	46100
A384.0	A384	...	A143840	...	...	...	...	...	...
390.0	390	...	A03080	...	SC174B	...	...	Al-Si17Cu4Mg	...
A390.0	...	...	A13900	...	...	...	...	...	...
B390.0	...	...	A23900	...	SC174B	...	...	...	...
391.0	...	Mercosil	A03910	...	...	...	...	...	...
A391.0	...	Mercosil	A13910	...	...	...	...	...	...
B391.0	...	Mercosil	A23910	...	...	...	...	...	...
393.0	393	Vanasil	A03930	...	...	...	...	...	...
413.0	13	...	A04130	...	...	...	...	...	...
A413.0	A13	...	A14130	...	...	305	...	Al-Si12Cu	44100
B443.0	43 (high purity)	...	A24430	43	S5A	...	...	...	...
C443.0	43	...	A34430	43	S5C	304	...	...	...
A444.0	A344	...	A14440	...	...	...	...	...	...
511.0	F514	...	A05110	F214	...	...	...	...	...
512.0	B514	...	A25120	B214	GS42A	...	...	...	...
513.0	A514	...	A05130	A214	GZ42A	...	...	...	...
514.0	214	...	A05140	214	G4A	320	...	Al-Mg5Si1	51300
518.0	218	...	A05180	...	...	...	...	...	...
520.0	220	...	A05200	220	G10A	324	4240	...	...
535.0	535	Almag 35	A05350	Almag 35	GM70B	...	4238	...	...
A535.0	A218	...	A15350	A218	...	...	...	...	...
705.0	603	Ternalloy 5	A07050	Ternalloy 5	ZG32A	311	...	...	...
707.0	607	Ternalloy 7	A07070	Ternalloy 7	ZG42A	312	...	...	...
710.0	A712	...	A07100	A612	ZG61B	313	...	...	...
711.0	C712	...	A07110	...	ZC60A	314	...	...	...
712.0	D712	Frontier 40E	A07120	40E	ZG61A	310	...	Al-Zn5Mg	71000
A712.0	A712	...	A17120	...	...	...	...	...	...
C712.0	C612	...	...	...	...	...	...	...	...
713.0	613	Tenzaloy	A07130	Tenzaloy	ZC81A	315	...	...	...
771.0	...	Precedent 71A	A07710	Precedent 71A	...	...	...	...	...
772.0	B771	Precedent 71B	A07720	Precedent 71B	...	...	...	...	...
850.0	750	...	A08500	750	...	...	...	...	...
851.0	A850	...	A08510	A750	...	...	...	...	...
852.0	B850	...	A08520	B750	...	...	...	...	...

n.3.5 International Casting Alloy Designations

Unlike the case for wrought aluminium alloys, there is no international accord on casting alloy designations, and other systems are rather universally used overseas (Ref 3). Most systems employ some system based on identifying the major alloying elements, but regrettably there are many variations of these.

One of the mostly widely used international systems is the Euronorm designation, and so, where applicable, designations of that type have been included in Table 2.2. There are no comparable Euronorm designations for about half of the alloys registered in the United States, nor is there any simple guide to generate them.

n.3.6 Nomenclature System for Aluminium Metal-Matrix Composites

Aluminium casting alloys are now regularly used as the matrix material in metal-matrix composites (MMC). The Aluminium Association, Inc, and ANSI H35.5 (Ref 4) have published a standard nomenclature system for such composites that builds on the standard casting alloy designation system as outlined below. Although this standard nomenclature has been established, some MMC suppliers have preferred their own designations. One reason is that matrix alloys may not coincide exactly with Aluminium Association ranges.

The designation system for aluminium metal-matrix composites consists of four parts:

- The matrix alloy designation employs the Aluminium Association alloy designation as described in Section 2.1 in this chapter. It is immediately followed by a slash that separates it from the rest of the composite designation.
- The composition of the reinforcement is shown immediately after the slash, using the appropriate chemical designation, with the exception that no subscripts or superscripts are used. Some common examples cited in the standard are: C for graphite, SiC for silicon carbide, and Al₂O₃ for aluminium oxide (alumina). This reinforcement designation is also followed without space by a slash.
- The volume percent of the reinforcement is shown immediately after the second slash. It is always presented as two digits, for example, 05 for 5%, 10 for 10%, 20 for 20%, and so forth.
- Immediately following the percentage is a single lower-case letter for the type of reinforcement: c for cut or chopped fibers, filaments, or monofilaments; f for continuous fibers, filaments, or monofilaments; p for particles (particulate); and w for whiskers. Some common illustrations of cast aluminium metal-matrix composites designations are:
 - A356.0/Al₂O₃/05f: Alloy A356.0 reinforced with 5% aluminium filaments
 - 360.0/C/20c: Alloy 360.0 reinforced with 20% chopped fibers
 - 380.0/SiC/10p: Alloy 380.0 reinforcement 10% silicon carbide particulate

n.4 Composition Groupings

Although a large number of aluminium casting alloys have been developed, there are seven basic families:

- Aluminium-copper (2xx)
- Aluminium-silicon-copper (3xx)
- Aluminium-silicon (4xx)
- Aluminium-silicon-magnesium (3xx)
- Aluminium-magnesium (5xx)
- Aluminium-zinc-magnesium (7xx)
- Aluminium-tin (8xx)

n.4.1 Aluminium-Copper

Aluminium-copper alloys have been used extensively in cast and wrought form where strength and toughness are required. These alloys exhibit high strength and hardness at room and elevated temperatures.

The first significant aluminium casting alloys contained copper at concentrations up to 10%. With no understanding of heat treatment, these alloys displayed significantly improved strengths and hardnesses in the as-cast state.

Many alloys containing 4 to 5% Cu have been developed, usually with varying amounts of magnesium. Silver accelerates aging response and reduces the risk of stress corrosion. These heat treatable compositions represent the highest-strength capabilities of any commercial casting alloys. With controlled impurities, excellent ductilities are also achieved. The combination of tensile properties and ductility provide exceptional toughness.

Alloys of this type are susceptible to solidification cracking and to interdendritic shrinkage. Exact foundry techniques are required to avoid these conditions. In permanent mold or other rigid mold casting methods, excellent grain refinement and selective chilling are essential.

Copper-containing aluminium alloys are less resistant to corrosion, and certain compositions and material conditions may be susceptible to stress corrosion. Copper is typically the alloy basis for improved mechanical properties at elevated temperature, often with nickel additions.

n.4.2 Aluminium-Silicon-Copper

Among the most widely used aluminium casting alloys are those that contain silicon and copper. The amounts of both additions vary widely, so that copper predominates in some alloys and silicon in others. Copper contributes to strengthening and machinability, and silicon improves castability and reduces hot shortness. Alloys containing higher hypoeutectic concentrations of silicon are normally better suited for more complex castings and for permanent mold and die casting processes.

Aluminium-silicon-copper alloys with less than 5.6% Cu are heat treatable, but the more important alloys of this family are those also containing magnesium. Heat treatment response is enhanced, leading to a very attractive range of properties including premium strength capabilities.

Many hypereutectic silicon alloys (12 to 30% Si) also contain copper. The primary silicon phase imparts excellent wear resistance, and copper contributes to matrix hardening and elevated temperature strength.

n.4.3 Aluminium-Silicon

Binary aluminium-silicon alloys exhibit excellent fluidity, castability, and corrosion resistance. These alloys display low strength and poor machinability. Ductility, which can be exceptional, is a function of low impurity concentrations and microstructural features.

The strength, ductility, and castability of hypoeutectic aluminium-silicon alloys can be further improved by modification of the aluminium-silicon eutectic. Modification is particularly advantageous in sand castings and can be effectively achieved through the controlled addition of sodium and/or strontium. Calcium is a weak eutectic modifier and a more lamellar eutectic can be achieved with antimony. Higher solidification rates also promote a finer unmodified eutectic microstructure.

Aluminium-silicon alloys exhibit low specific gravity and coefficients of thermal expansion.

In hypereutectic aluminium-silicon alloys, refinement of the proeutectic silicon phase by phosphorus additions is essential for casting and product performance.

n.4.4 Aluminium-Silicon-Magnesium

The addition of magnesium to aluminium-silicon alloys forms the basis for an extremely important and useful family of compositions that combines outstanding casting characteristics with excellent properties after heat treatment. Corrosion resistance is also excellent, and a low level of thermal expansion is retained.

While not as strong as high-strength Al-Cu and Al-Si-Cu alloys, the mechanical properties of several Al-Si-Mg alloys provide mechanical properties in the premium-strength range. Beryllium additions improve strength and ductility by affecting the morphology and chemistry of the iron-containing intermetallic.

Eutectic modification remains important as a means of improving strength, substantially increasing elongation, and improving casting results.

n.4.5 Aluminium-Magnesium

These are essentially single-phase binary alloys with moderate to high strength and toughness. Their most important characteristic is corrosion resistance, including exposure to seawater and marine atmospheres. This characteristic is also the basis for extensive use in food and beverage processing. Aluminium-magnesium alloys offer excellent weldability and are often used in architectural and other decorative applications. Aluminium-magnesium alloys have good machinability, weldability, and an attractive appearance whether as-cast, machined, polished, or anodized.

In comparison with aluminium-silicon alloys, all aluminium-magnesium alloys require more care in gating, larger risers, and greater control of temperature gradients.

Magnesium in aluminium alloys increases oxidation rates. In the molten state, magnesium losses can be significant and oxides of aluminium and magnesium can affect casting quality. Spinels of aluminium and magnesium oxides form with unprotected exposure at high molten metal temperatures. The potential for inclusions is especially important because many applications involve polishing and/or fine surface finishing.

Alloys containing >7.0% Mg are heat treatable, although thermal treatments are more typically used to stabilize properties that could otherwise change, in some compositions, over long periods of time.

n.4.6 Aluminium-Zinc-Magnesium

Many alloys of this type naturally age, achieving full strength within 20 to 30 days at room temperature after casting. Solution heat treatment is not typically necessary for property development. Rapid solidification in these alloys can result in microsegregation of magnesium-zinc phases that reduces hardening potential. Conventional solution heat treatments can be used when adequate property development does not occur through natural aging.

Since high-temperature solution heat treatment and quench are not normally required, the cost of heat treatment, high residual stress levels and distortion are avoided.

Artificial aging treatments can be used to accelerate the hardening process, and annealing treatments accomplish the same purpose with improved dimensional and structural stability.

These alloys typically display moderate to good tensile properties in the as-cast condition. The melting temperatures of alloys of this group are high, an advantage in castings that are to be brazed. Machinability and resistance to general corrosion is usually good. The chemistry of most alloys is controlled to minimize stresscorrosion susceptibility.

The castability of Al-Zn-Mg alloys is poor, and good foundry practices are required to minimize hot tearing and shrinkage defects.

n.4.7 Aluminium-Tin

Tin is the major alloying element in compositions developed for bearing applications. It has also been employed with bismuth, lead, and cadmium at lower concentrations to provide free-machining properties. The 850-series alloys can often be substituted for 660 or similar bronzes. Their light weight minimizes loads in reciprocating applications, and heat dissipation improves bearing life.

Alloys containing 5.0 to 7.0% Sn are broadly used in bearings and bushings in which low friction, compressive strength, fatigue strength, and resistance to corrosion are important criteria. Additions of copper, nickel, and magnesium contribute to hardness and strength, and silicon is added to improve castability, reduce hot shortness, and increase compressive yield strength.

Most bearings are produced by the permanent mold process. Higher-solidification rates promote the finer, more uniform dispersion of tin. Larger, special-design, and low-volume bearings are nevertheless cast successfully in sand molds. Because most bearings are simple hollow or solid cylinders, the direct chill (DC) casting process has also been used for production.

Aluminium-tin alloys are unique among significant compositions. Aluminium and tin are essentially immiscible. Before and after solidification, tin is present in dispersed form. Mechanical agitation is required initially to achieve suspension of tin, and, because of density differences, gravity segregation may occur over time in the molten state.

Aluminium-tin alloys containing copper are conventionally precipitation hardened and may be fully heat treated. Because most bearings are cast in simple solid or hollow cylindrical shapes, parts may be plastically cold worked to improve compressive yield strength. Solidification and thermal stresses are also relieved by axial compression resulting in 4% permanent deformation.

n.5 Effects of Alloying Elements

n.5.1 Antimony

At concentration levels equal to or greater than 0.10%, antimony refines the aluminium-silicon eutectic. The effect is essentially that of modification, but a distinctly lamellar eutectic rather than a fine fibrous form results. The effectiveness of antimony in altering the eutectic structure depends on an absence of phosphorus and on an adequately rapid rate of solidification. Antimony also reacts with either sodium or strontium to form coarse intermetallics with adverse effects on castability and metallurgical structure.

Antimony is classified as a heavy metal with potential toxicity and hygiene implications, especially associated with stibine gas (SbH_3) formation and the effects of human exposure to other antimony compounds.

n.5.2 Beryllium

Additions of a few parts per million beryllium can be effective in reducing oxidation losses and associated inclusions in magnesium-containing compositions.

At higher concentrations ($>0.04\%$), beryllium affects the form and composition of iron-containing intermetallics, markedly improving strength and ductility. In addition to changing the morphology of the insoluble phase from script or plate to nodular form, beryllium changes its composition, rejecting magnesium from the Al-Fe-Si complex and thus permitting its full use for hardening purposes.

Beryllium-containing compounds are, however, known carcinogens that require specific precautions in melting, molten metal handling, gross handling, gross disposition, and welding.

n.5.3 Bismuth

Bismuth additions improve the machinability of cast aluminium alloys at concentrations greater than 0.1%.

n.5.4 Boron

Boron combines with other metals to form borides, such as AlB_2 and TiB_2 . Titanium boride forms stable nucleation sites that interact with active grain-refining phases such as $TiAl_3$ for grain refinement.

Metallic borides reduce tool life in machining operations and form coarse or agglomerated inclusions with detrimental effects on mechanical properties and ductility. Borides also contribute to sludging, the precipitation of intermetallics from liquid solution in furnaces and troughing.

Boron treatment of aluminium-containing peritectic elements such as titanium, zirconium, and vanadium is practiced to improve purity and conductivity in electrical applications. Rotor alloys may specify boron to exceed titanium and vanadium contents to ensure either the complexing or precipitation of these elements for improved electrical performance.

2.5.5 Cadmium

In concentrations exceeding 0.1%, cadmium improves machinability. Precautions that acknowledge volatilization of cadmium at 1413 °F (767 °C) are essential.

2.5.6 Calcium

Calcium is a weak aluminium-silicon eutectic modifier. It increases hydrogen solubility and is often responsible for casting porosity at trace concentration levels. Calcium greater than approximately 0.005% also adversely affects ductility in aluminiummagnesium alloys.

2.5.7 Chromium

Additions of chromium are commonly made in low concentrations to room-temperature aging and thermally unstable compositions in which germination and grain growth are known to occur.

Chromium typically forms the compound $CrAl_7$, which displays extremely limited solid-state solubility and is therefore useful in suppressing grain-growth tendencies. Sludge that contains iron, manganese, and chromium is sometimes encountered in die casting compositions, but it is rarely encountered in gravity casting alloys.

Chromium improves corrosion resistance in certain alloys and increases quench sensitivity at higher concentrations.

n.5.8 Copper

Copper substantially improves strength and hardness in the ascast and heat treated conditions. Alloys containing 4 to 5.5% Cu respond most strongly to thermal treatment and display relatively improved casting properties. Copper generally reduces resistance

to general corrosion and in specific compositions and material conditions increases stress-corrosion susceptibility. Conversely, low concentrations of copper in aluminium-zinc alloys inhibit stress corrosion. Copper reduces hot tear resistance and increases the potential for interdendritic shrinkage.

2.5.9 Iron

Iron improves hot-tear resistance and decreases the tendency for die sticking or soldering in die casting. Increases in iron content are accompanied by substantially decreased ductility. Iron reacts to form a number of intermetallic phases, the most common of which are FeAl_3 , FeMnAl_6 , and AlFeSi . These essentially insoluble phases are responsible for improvements in strength, especially at elevated temperature, but also the embrittlement of the microstructure.

As the fraction of insoluble phases increases with increased iron content, casting considerations such as feeding characteristics are adversely affected. Iron participates in the formation of sludging phases with manganese, chromium, and other elements.

2.5.10 Lead

Lead is used at concentrations greater than 0.1% to improve machinability.

2.5.11 Magnesium

Magnesium is the basis for strength and hardness development in heat treated aluminium-silicon alloys and is commonly used in more complex aluminium-silicon alloys containing copper, nickel, and other elements for the same purpose. The hardening-phase Mg_2Si displays a useful solubility limit corresponding to approximately 0.70% Mg, beyond which either no further strengthening occurs or matrix softening takes place.

Common high-strength aluminium-silicon compositions specify magnesium in the range of 0.40 to 0.070%.

Binary aluminium-magnesium alloys are widely used in applications requiring a bright surface finish, excellent response to chemical finishing, corrosion resistance, and attractive combinations of strength and ductility. Common compositions range from 4 to 10% Mg, and compositions containing more than 7% Mg are heat treatable. Instability and long-term room-temperature aging at higher magnesium concentrations can be avoided by heat treatment.

2.5.12 Manganese

Normally considered an impurity in casting compositions, manganese is controlled to low levels in most gravity cast compositions.

Manganese is an important element in work-hardened wrought alloys through which secondary foundry compositions may contain higher manganese levels. In the absence of work hardening, manganese offers no significant benefits in cast aluminium alloys. Some evidence exists, however, that a high-volume fraction of MnAl_6 in alloys containing more than 0.5% Mn may beneficially influence internal soundness (Ref 5). Manganese can also be employed to alter response in chemical finishing and anodizing.

Iron and manganese may be considered isomorphous, and alloy chemistry may reflect stoichiometries favoring the least detrimental insoluble Al-Fe-Mn phases.

n.5.13 Mercury

Compositions containing mercury were developed as sacrificial anodes for cathodic protection systems, especially in marine environments.

The use of these optimally electronegative alloys, which do not passivate in seawater, was severely restricted for environmental reasons.

n.5.14 Nickel

Nickel is commonly used with copper to enhance elevated temperature properties. It also reduces coefficient of thermal expansion.

n.5.15 Phosphorus

As AlP₃, phosphorus nucleates and refines primary silicon-phase formation in hypereutectic aluminium-silicon alloys. At parts per million concentrations, phosphorus coarsens the eutectic structure in hypoeutectic aluminium-silicon alloys and diminishes the effectiveness of common eutectic modifiers, sodium and strontium.

n.5.16 Silicon

The outstanding effect of silicon in aluminium alloys is the improvement of casting characteristics. Additions of silicon dramatically improve fluidity, hot tear resistance, and feeding characteristics.

The most prominently used compositions in all aluminium casting processes are those in which silicon plays a major role. Commercial alloys span the hypoeutectic and hypereutectic ranges up to about 30% Si.

Increasing silicon content improves fluidity for filling thin walls and for reproducing more intricate designs and details. Aluminium-silicon alloys are typically more resistant to solidification cracking and display excellent castability and feeding characteristics.

Percent liquid in the solidification range is dictated by the initial composition and by the degree of nonequilibrium cooling. For higher-solidification-rate processes such as pressure die and permanent mold casting and for thinner sections in which more rapid solidification takes place, shrinkage porosity is strongly affected by the temperature at which mass feeding from liquid to partially solidified structures no longer occurs. Feeding to minimize shrinkage porosity improves as the volume fraction solidified is increased at the temperature at which mass feeding ceases. For this reason, the most desirable silicon content of aluminium-silicon alloys corresponds to the characteristic process solidification rate. For slow cooling rate processes such as plaster, investment, and sand, the preferred range is 5 to 7%, for permanent mold 7 to 9%, and for die casting 8 to 12%. The bases for these recommendations are the relationship between cooling rate and fluidity and the effect of percentage of eutectic on feeding as

solidification progresses. Silicon combines with magnesium to form Mg_2Si in heat treatable alloys. It combines with iron and other elements to form complex insoluble phases. Silicon also reduces specific gravity and coefficient of thermal expansion.

n.5.17 Silver

Used in only a limited range of aluminium-copper premium strength alloys at concentrations of 0.5 to 1.0%. Silver contributes to precipitation hardening and stress-corrosion resistance.

n.5.18 Sodium

Sodium modifies the aluminium-silicon eutectic. In the absence of phosphorus, recovered concentrations of 0.01% are effective. Sodium interacts with phosphorus to reduce its effectiveness in modifying the eutectic and that of phosphorus in the refinement of the primary silicon phase. Sodium at less than 0.005% is embrittling in aluminium-magnesium alloys.

Sodium is rapidly lost in molten aluminium through its high vapor pressure so that modifying effects are transient. Periodic additions are required to maintain modification levels. Sodium increases surface tension and through addition methods can increase hydrogen content. Overmodification increases misrun tendencies in gravity casting. Unlike some other modifiers, sodium provides effective aluminium-silicon eutectic modification under all solidification conditions.

n.5.19 Strontium

Strontium modifies the aluminium-silicon eutectic. Effective modification can be achieved at very low addition levels, but a range of recovered strontium of 0.008 to 0.04% is commonly used.

Lower concentrations are effective with higher solidification rates. Higher addition levels are associated with casting porosity. Degassing efficiency may also be adversely affected at higher strontium levels. Strontium has been regarded as ineffective as a modifier at slow solidification rates, but some investigators report beneficial effects in AFS Level 4 and 5 structures in 319.0 and 356.0 alloys when >200 ppm Sr is present.

n.5.20 Tin

Tin is effective in improving antifriction characteristics and is therefore useful in bearing applications. Casting alloys may contain up to 25% Sn. Additions of tin also improve machinability.

n.5.21 Titanium

Titanium is extensively used to refine the grain structure of aluminium casting alloys, often in combination with smaller amounts of boron. The operable phase is $TiAl_3$ with lattice spacing closely matched to that of aluminium. Titanium in excess of the stoichiometry of TiB_2 is necessary for effective grain refinement.

Titanium is often employed at concentrations greater than those required for grain refinement to reduce cracking tendencies in hot-short compositions.

n.5.22 Zinc

Zinc offers no significant benefits in aluminium casting. Accompanied by the addition of copper and/or magnesium, however, zinc results in attractive heat treatable or naturally aging compositions. A number of such compositions are in common use. Zinc is also commonly found in secondary gravity and die casting compositions.

In these alloys, tolerance for up to 3% Zn allows the use of lower-grade and wrought alloy scrap.

n.6 Alloy Groupings by Application or Major Characteristic

n.6.1 General-Purpose Alloys

Alloys with silicon as the major alloying constituent are the most important commercial casting alloys, primarily because of their superior casting characteristics. The large number of alloys of this type that have been developed displays a broad range of properties.

Binary aluminium-silicon alloys (443.0, 444.0, 413.0, and A413.0) are low-density, weldable, and resistant to corrosion. Although castings of these alloys are somewhat difficult to machine, good results are obtained with cutting fluids, sintered carbide tools, and chip breakers. Alloy 443.0 is used with all casting processes for parts in which strength is less important than ductility, resistance to corrosion, and pressure tightness. Permanent mold alloys 444.0 and A444.0 display high ductility and are used where impact resistance is a primary consideration.

Alloys 413.0 and A413.0 are close to the eutectic composition and, as a result, have very high fluidity.

They are useful in die casting and where large-area, thin-walled parts with cast-in lettering or other high-definition details are required.

Representative applications for these alloys are:

- Architectural panels and spandrels
- Outdoor lamp housings
- Lawn mower decks
- Outdoor grills
- Marine components
- Cooking utensils
- Parts used in food, dairy, and beverage processing
- Medical and dental equipment
- Electronic cabinet frames and components
- Tire molds
- Escalator and moving sidewalk tread plates and parts
- Highway railing posts (รูปที่ n.1); alloy A444.0 being the standard for this application

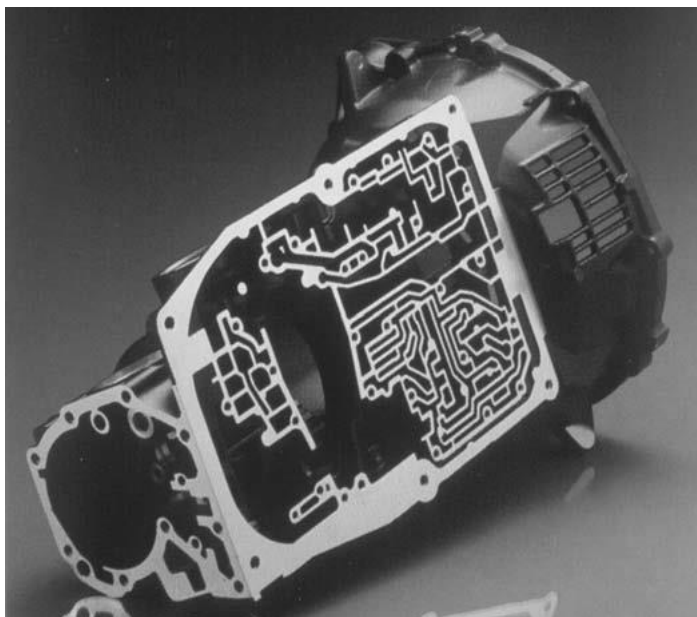


รูปที่ ก.1 Example of one of the many highway railing post designs utilizing aluminium castings that have been developed. The alloy is A444.0- T4 with minimum elongation in permanent mold castings of 20% in front flanges for maximum energy absorption during impact.

Aluminium-silicon-copper alloys such as 308.0, 319.0, 360.0, 380.0, and 384.0 offer good casting characteristics, higher strength and hardness, and improved machinability with reduced ductility and lower resistance to corrosion. These and similar generalpurpose alloys are often produced in the as-cast condition.

Artificial aging can improve hardness, stability, and machinability. Typical applications include:

- Machinery
- Transmission cases (รูปที่ ก.2)
- Engine blocks
- Gas meters and regulators
- Gear blocks
- Gear cases
- Fuel pumps
- Impellers
- Instrument cases
- Lawnmower decks
- Intake manifolds
- Cylinder heads
- Clutch housings
- Oil pans
- Outboard motor propellers, motor parts and housings



រូប​ភ័​ ៣.២ Die cast alloy 380.0 transmission case

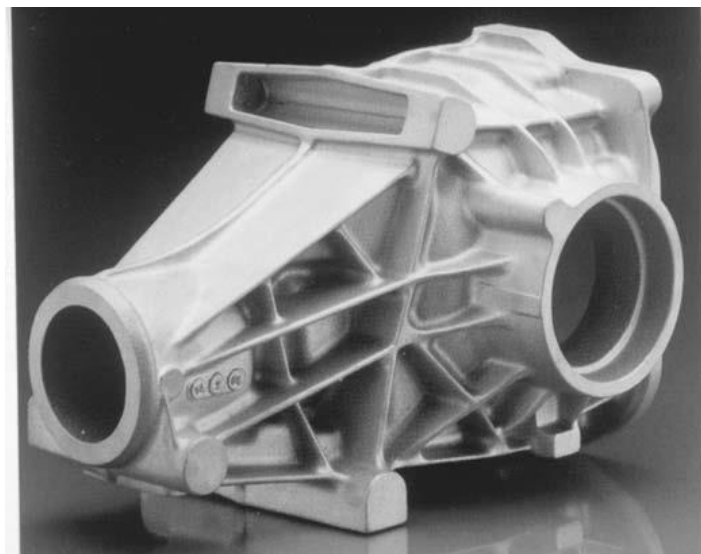
Aluminium-silicon-magnesium alloys including 356.0 and A356.0 have excellent casting characteristics and resistance to corrosion. Heat treatment provides combinations of tensile and physical properties that make them attractive for many applications including machinery, automotive, military, and aerospace parts.

Higher tensile properties are obtained with 357.0, A357.0, 358.0, and 359.0 alloys. The high properties of these alloys, attained by heat treatment to the fully hardened condition, are of special interest in structural applications. Developments in high-integrity die casting have resulted in low-iron, manganese-containing Al-Si-Mg alloys such as 365.0 and AlMg3Mn. Some typical uses include:

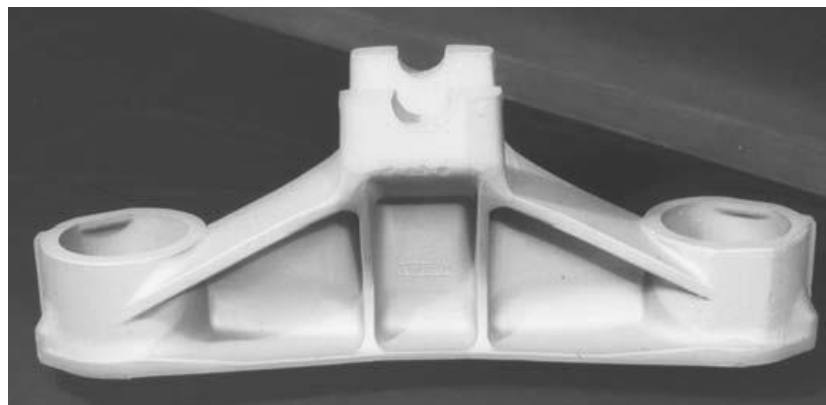
- Automotive space frames
- Automotive wheels
- Truck wheels
- Axle and differential housings (រូបភ័​ ៣.៣)
- Pump bodies
- Meter bodies
- Compressor bodies
- Intake manifolds
- Cylinder heads
- Dies for plastic injection molding
- Machine parts
- Truck and bus frames and chassis components
- Suspension saddles (រូបភ័​ ៣.៤)
- Aircraft pylons, canopies, flaps, speed-brakes hatch covers, and other fittings
- Impellers
- Wave guides
- Electronic cases
- Fuel pumps

- Missile bodies, fins, and other structural parts Industrial beam heads
- Brake cylinders
- Automobile cross members and suspension components

Aluminium-silicon-copper-magnesium alloys such as 328.0, 333.0, 354.0, 355.0, and C355.0 offer excellent strength and hardness with some sacrifice in ductility and corrosion resistance. Casting characteristics are good, but inferior to those displayed by copper-free aluminium-silicon alloys. Properties in the as-cast condition can be acceptable for some applications, but these alloys are typically heat treated for optimal properties. Alloy C355.0 with low iron is a higher-strength version of 355.0. When premium-strength casting processes are used, even higher tensile properties can be obtained with heat treated Alloy 354.0. Alloys of this type are routinely cast in sand and permanent mold.



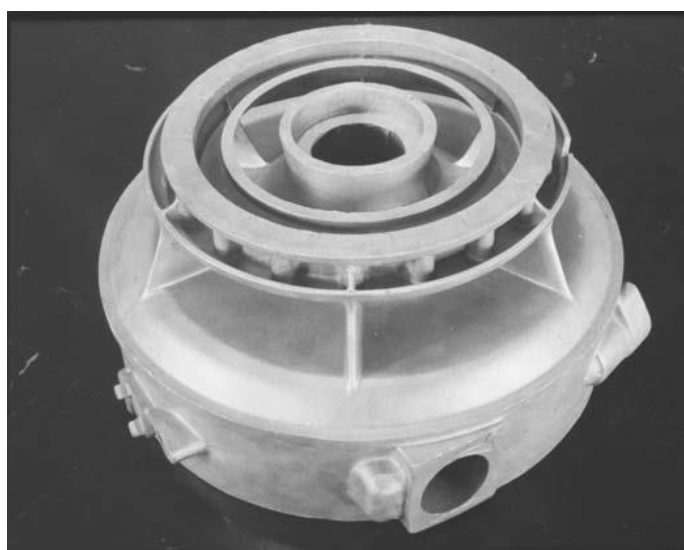
រូបទី ៣.៣ Die cast alloy 380.0 rear axle housing



រូបទី ៣.៤ Alloy A356.0 trailer suspension saddle

Applications include:

- Engine cooling fans
- Clutch housings
- Crankcases
- High-speed rotating parts such as fans and impellers
- Structural aerospace components
- Air compressor pistons
- Fuel pumps (รูปที่ ๓.5)
- Compressor cases
- Rocker arms
- Timing gears
- Machine parts



รูปที่ ๓.5 Alloy C355.0 fuel pump housing

๓.6.2 Elevated-Temperature Alloys

Many aluminium alloys have been developed to provide strength, wear resistance, and hardness at elevated temperatures. The retention of these properties as temperature increases is an advantage in many applications.

Cast aluminium alloy pistons featuring low specific gravity, low thermal expansion, elevated-temperature strength, wear resistance, and high thermal conductivity are the international standard for internal combustion engines. Lower inertial forces permit higher engine speeds, reduced bearing requirements, and lighter, simpler crankshaft designs.

Aluminium pistons are usually permanent mold castings. Wrist pin bore struts and compression ring-groove inserts can be cast-in; in large diesel engine pistons, integral cooling passages can be incorporated through copper coils or coring methods.

The alloy most commonly used for pistons in passenger cars, sports-utility vehicles, and light trucks, 332.0-T5, demonstrates a desirable combination of foundry, mechanical, and physical characteristics, including low thermal expansion. Precipitation hardening

from air or water quenching from the mold improves hardness for improved machinability and eliminates or reduces changes in dimensions from residual growth at operating temperatures.

More complex aluminium-silicon alloys have been developed to meet the demands of high specific output, fuel-efficient engines that operate at higher temperatures. Some of these alloys retain yield strengths over 10 ksi (70 MPa) at temperatures exceeding 500 °F (260 °C). Piston alloys for heavy-duty and diesel engines include lowexpansion alloys 332.0-T5 and 336.0-T551. Alloy 242.0-T571 offers higher thermal conductivity and superior properties at elevated temperatures.

Other applications of aluminium alloys for elevated-temperature use include air-cooled cylinder heads for aircraft and motorcycles. Alloy 220.0-T61 was once used extensively for this purpose, but has been largely replaced by more castable 242.0 and 243.0 alloys with superior elevated-temperature properties. Alloys 295.0, 355.0, and C355.0 have been extensively used in applications requiring strength and hardness at temperatures up to 350 °F (175 °C). They include aircraft motor and gear housings. Alloy A201.0 and 204.0/206.0 type alloys have also been used in this temperature range when the combination of high strength at room temperatures and elevated temperatures is required.

Applications include:

- Cylinder heads
- Motorcycle engine parts
- Gear housings
- Pistons
- Structural parts exposed to elevated temperatures

n.6.3 Wear Resistant Alloys

Alloys containing greater-than-eutectic silicon concentrations display low specific gravity and elevated-temperature strength and are often used in applications requiring a high degree of wear resistance. While wear resistance is usually associated with surface hardness resulting from matrix properties or anodized coatings, wear resistance in these alloys results from the presence of a large volume fraction of hard primary silicon particles in the microstructure. Growth in the popularity of these alloys has accelerated in recent years. Alloys include 390.0, 392.0, and 393.0.

Hypereutectic aluminium-silicon alloys are relatively more difficult to cast and machine, but are used in all casting processes. Matrix-hardening alloys also provide improved wear resistance. Alloys of the 2xx.0 and 355.0 family are considered wear resistant.

Applications include:

- Brake rotors
- Cylinder blocks
- Cylinder liners
- Marine engines
- Pistons

n.6.4 Moderate-Strength Alloys with Low Residual Stresses

A number of casting compositions have been developed to provide strength and hardness without heat treatment through natural aging. These alloys offer dimensional stability that reduces distortions. The cost of heat treatment is avoided or reduced and postweld heat treatment is typically not required.

In many cases, properties in the as-cast condition approach those of higher-strength heat treated alloys. Castability is distinctly inferior, and full properties may not be realized for days, weeks, or longer periods of room-temperature hardening. Stability can be an issue addressed by artificial aging or heat treatment without quenching.

Alloys of this type include selected Al-Mg, Al-Zn-Mg, and Al-Zn-Mg-Cu alloys such as 535.0, 712.0, 771.0, and 772.0.

Typical applications include:

- Tooling plate
- Complex thin-walled shapes such as impellers and cooling fans
- Explosion-proof enclosures
- Electrical fittings
- Brazed parts
- Machinery
- Instrument cases
- Marine components
- Pistol frames
- Food and beverage processing
- Decorative parts
- Reflectors
- Optical systems

n.6.5 Bearings

Aluminium-tin alloys 850.0, 851.0, 852.0, and 853.0 are specialized compositions displaying excellent bearing characteristics under moderate loads and with effective lubrication. Castability, hardness, compressive yield strength, and other properties are influenced by alloy variations involving silicon and copper additions.

The principal applications for these alloys are bushings and bearings. 2.6.6 High-Strength Alloys High-strength alloys include compositions designed to provide high strength and ductility and in the case of premium engineered castings also imply high levels of internal soundness and microstructural refinement. Alloys considered premium strength by definition and specification (AMS-A-21180) are A201.0, A206.0, 224.0, 249.0, 354.0, A through D356.0, A through D357.0, 358.0, and 359.0. Other alloys displaying high strength are 204.0, 206.0, C355.0, and metal-matrix composite compositions.

Applications include:

- Missile bodies
- Missile fins
- Aircraft pylons

- Aircraft canopies
- Wing flaps
- Speed brakes
- Hatch covers
- Hydraulic pumps
- Automotive suspension systems and cross-members
- Fuel pumps
- Brake valves
- Armored cupolas
- Aerospace structural parts

ภาคผนวก ข.
แบบฟอร์มการเก็บข้อมูล

ตารางที่ ข.1 ตรวจสอบปริมาณและชนิดของน้ำอะลูมิเนียม

1	2	3	4	5	6	7	8
Cast No.	TM	Dom	Import	Ingot	Qty before	Total Qty(Cal)	Total Qty Act

1. Cast No. : หมายเลขเตาที่ทำการทดลอง
2. TM : ปริมาณเศษในโรงงานที่ใส่ในเตาหลอมขนาด 15 ตัน (Kg.)
3. Dom : ปริมาณเศษในประเทศที่ใส่ในเตาหลอมขนาด 15 ตัน (Kg.)
4. Import : ปริมาณเศษจากต่างประเทศที่ใส่ในเตาหลอมขนาด 15 ตัน (Kg.)
5. Ingot : ปริมาณอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่ใส่ในเตาหลอมขนาด 15 ตัน (Kg.)
6. Qty before : ปริมาณน้ำโลหะในเตาก่อนใส่เศษโลหะ (Kg.)
7. Total Qty(Cal): ปริมาณน้ำโลหะในเตาหลังจากใส่เศษโลหะ โดยคำนวณจาก
ปริมาณอะลูมิเนียมบริสุทธิ์รวมกับปริมาณเศษโลหะ (Kg.)
8. Total Qty Act : ปริมาณน้ำโลหะในเตาหลังจากใส่เศษโลหะจากการวัดจริง (Kg.)

ตารางที่ ข.2 ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีก่อนการเติมเศษโลหะ

ชนิดของเศษโลหะ.....

Composition (Before charge)	%Fe	%Si	%Mg	%Ti	%Mn	%Cu	%Zn	%Cr
Ingot STD	0.0778	0.0345	0.0014	0.0039	0.0011	0.0009	0.0020	0.0009

ตารางที่ ข.3 ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังการเติมเศษโลหะ

ชนิดของเศษโลหะ.....

Composition (After charge)	%Fe	%Si	%Mg	%Ti	%Mn	%Cu	%Zn	%Cr
Ingot STD	0.0778	0.0345	0.0014	0.0039	0.0011	0.0009	0.0020	0.0009

ตารางที่ ข.4 เวลาการทำงานของขั้นตอนในกระบวนการผลิต

ตารางเก็บข้อมูลเวลาของขั้นตอนในกระบวนการผลิต		เวลาการทำงาน (นาที)	
ขั้นตอนที่	กิจกรรม	วันที่..... เวลา.....	วันที่..... เวลา.....
1	นำเศษโลหะใส่เข้าเตาหลอมโลหะขนาด 15 ตัน		
2	เศษโลหะหลอมละลายในเตาหลอม		
3	ลำเลียงน้ำอะลูมิเนียมจากเตาหลอม 15 ตัน ไปสู่เตาหลอมขนาด 6 ตันเพื่อปรับส่วนผสมทางเคมี		
4	ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีก่อนการป้อนน้ำอะลูมิเนียมให้ได้ตามมาตรฐาน (x ครั้ง)		
5	ใส่ไฮโดรเจนในน้ำอะลูมิเนียม		
6	ทำการป้อนส่วนผสมทางเคมี		
7	ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของน้ำอะลูมิเนียมให้ได้ตามมาตรฐาน		
8	ลำเลียงน้ำอะลูมิเนียมจากเตาหลอม 6 ตัน ไปสู่เตาไล่แก๊ส เพื่อเตรียมเทเข้าสู่แบบ		
9	เทน้ำอะลูมิเนียมลงในแบบที่เตรียมไว้		
10	แกะแท่งอะลูมิเนียมออกจากแบบ		
เวลารวมของกระบวนการผลิต			
จำนวนผลิต (เตา / วัน)			

ภาคผนวก ค

ข้อมูลมาตรฐานส่วนผสมทางเคมีของบิลเลทอะลูมิเนียมเกรดต่างๆ

ตารางที่ ค.1 ค่ามาตรฐานต่ำสุด - สูงสุดส่วนผสมทางเคมีของบิลเลทอะลูมิเนียม

รหัส บิลเลท	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Cr	% Zn	% Ti	% Each	% Total
1050	0.25 Max	0.30 Max	0.03 Max	0.05 Max	0.10 Max	0.03 Max	0.05 Max	0.03 Max	0.05 Max	0.15 Max
6018	0.30- 0.35	0.22 Max	0.04 Max	0.05 Max	0.25- 0.30	0.03 Max	0.03 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6060.20	0.39- 0.42	0.22 Max	0.03 Max	0.05 Max	0.44- 0.47	0.03 Max	0.03 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6063.20	0.41- 0.47	0.22 Max	0.02 Max	0.05 Max	0.44- 0.50	0.03 Max	0.03 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6063.21	0.41- 0.47	0.23 Max	0.05 Max	0.05 Max	0.50- 0.56	0.03 Max	0.03 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6063.22	0.47- 0.55	0.23 Max	0.05 Max	0.05 Max	0.44- 0.50	0.03 Max	0.03 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6063.25	0.41- 0.47	0.25 Max	0.05 Max	0.05 Max	0.44- 0.50	0.03 Max	0.03 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6063.40	0.40- 0.55	0.60 Max	0.18 Max	0.15 Max	0.44- 0.60	0.15 Max	0.15 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6063ES	0.63- 0.68	0.25 Max	0.03 Max	0.04- 0.08	0.46- 0.52	0.03 Max	0.03 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6063.91	0.41- 0.47	0.28 Max	0.05 Max	0.05 Max	0.46- 0.52	0.05 Max	0.05 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6063.92	0.41- 0.47	0.30 Max	0.05 Max	0.05 Max	0.44- 0.50	0.05 Max	0.05 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6063.93	0.42- 0.48	0.31 Max	0.05 Max	0.05 Max	0.44- 0.50	0.05 Max	0.05 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6063.94	0.42- 0.48	0.32 Max	0.05 Max	0.05 Max	0.49- 0.56	0.05 Max	0.05 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6060ES	0.50- 0.55	0.22 Max	0.03 Max	0.04- 0.08	0.36- 0.42	0.03 Max	0.03 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6005A.01	0.72- 0.80	0.26 Max	0.03 Max	0.08- 0.12	0.55- 0.62	0.03 Max	0.03 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6061	0.65- 0.75	0.22 Max	0.18- 0.25	0.07 Max	0.80- 0.90	0.07- 0.12	0.03 Max	0.008- 0.02	0.05 Max	0.15 Max
6082	0.80- 1.10	0.30 Max	0.10 Max	0.45- 0.85	0.70- 0.85	0.15 Max	0.10 Max	0.05 Max	0.05 Max	0.15 Max
3003	0.38- 0.45	0.25 Max	0.05- 0.20	1.00- 1.10	0.05 Max	0.05 Max	0.10 Max	0.01 Max	0.05 Max	0.15 Max
6063	0.40- 0.46	0.15- 0.19	0.01 Max	0.02- 0.04	0.45- 0.51	0.01 Max	0.01 Max	0.003- 0.01	0.01 Max	0.10 Max
6063 (65047)	0.40- 0.46	0.15- 0.19	0.01 Max	0.02- 0.04	0.45- 0.51	0.01 Max	0.01 Max	0.014 Max	0.01 Max	0.10 Max
6063 (65048)	0.41- 0.46	0.15- 0.19	0.02 Max	0.02 Max	0.48- 0.52	0.02 Max	0.02 Max	0.02 Max	0.02 Max	0.10 Max
6005A (65342)	0.67- 0.73	0.18- 0.22	0.07- 0.13	0.20- 0.28	0.47- 0.53	0.007 Max	0.007 Max	0.02 Max	0.03 Max	0.10 Max
6005A (66341)	0.75- 0.85	0.15- 0.19	0.03 Max	0.15- 0.19	0.47- 0.53	0.03 Max	0.03 Max	0.03 Max	0.03 Max	0.10 Max
6061 (69240)	0.55- 0.65	0.16- 0.20	0.20- 0.30	0.03 Max	0.90- 1.00	0.05- 0.11	0.03 Max	0.03 Max	0.03 Max	0.10 Max
6060 (64041)	0.42- 0.48	0.15- 0.19	0.02 Max	0.02- 0.04	0.37- 0.43	0.02 Max	0.02 Max	0.03 Max	0.03 Max	0.10 Max
6063 (65041)	0.35- 0.45	0.14- 0.20	0.02 Max	0.02 Max	0.45- 0.55	0.02 Max	0.02 Max	0.03 Max	0.03 Max	0.10 Max
6005 SF	0.60- 0.90	0.35 Max	0.10 Max	0.10 Max	0.40- 0.60	0.10 Max	0.10 Max	0.10 Max	0.05 Max	0.15 Max
6060 SF	0.30- 0.60	0.10- 0.30	0.10 Max	0.10 Max	0.35- 0.60	0.05 Max	0.15 Max	0.10 Max	0.05 Max	0.15 Max

ตารางที่ ค.2 ค่ามาตรฐานส่วนผสมทางเคมีของบิลเลทอะลูมิเนียมผสม

MASTER ALLOY											
Master Alloy	%Si ซิลิคอน	%Fe เหล็ก	%Cu ทองแดง	%Mn แมงกานีส	%Mg แมกนีเซียม	%Cr โครเมียม	%Zn สังกะสี	%Ti ไทเทเนียม	%Other Each	% Other Total	Aluminum
AlSi20	20.00	0.70	0.20	0.40	0.50	0.10	0.20	0.10	0.05	0.15	Remainder
AlSi30	30.00	0.50	0.50	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	0.05	0.50	Remainder
AlSi50	50.00	0.35	0.20	0.40	0.50	0.10	0.20	0.10	0.04	0.10	Remainder
AlFe10	0.50	10.00	0.20	0.40	0.50	0.10	0.20	0.10	0.05	0.15	Remainder
AlCr10	0.30	0.30	0.05	0.05	0.05	10.00	0.05	0.10	0.04	0.01	Remainder
AlMn20	0.30	0.25	0.01	20.00	0.05	0.01	0.05	0.02	0.01	0.00	Remainder
AlCu15	0.50	0.50	15.00	0.30	0.08	0.15	0.10	0.10	0.05	0.15	Remainder
AlCu30	0.15	0.30	30.00	0.10	0.50	0.00	0.10	0.00	0.04	0.10	Remainder
AlCu50	0.50	0.70	50.00	0.40	0.50	0.10	0.20	0.10	0.05	0.15	Remainder
AlMg	0.03	0.02	0.00	0.03	99.90	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	Remainder

ตารางที่ ค.3 ค่ามาตรฐานส่วนผสมทางเคมีของแท่งอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Ingot)

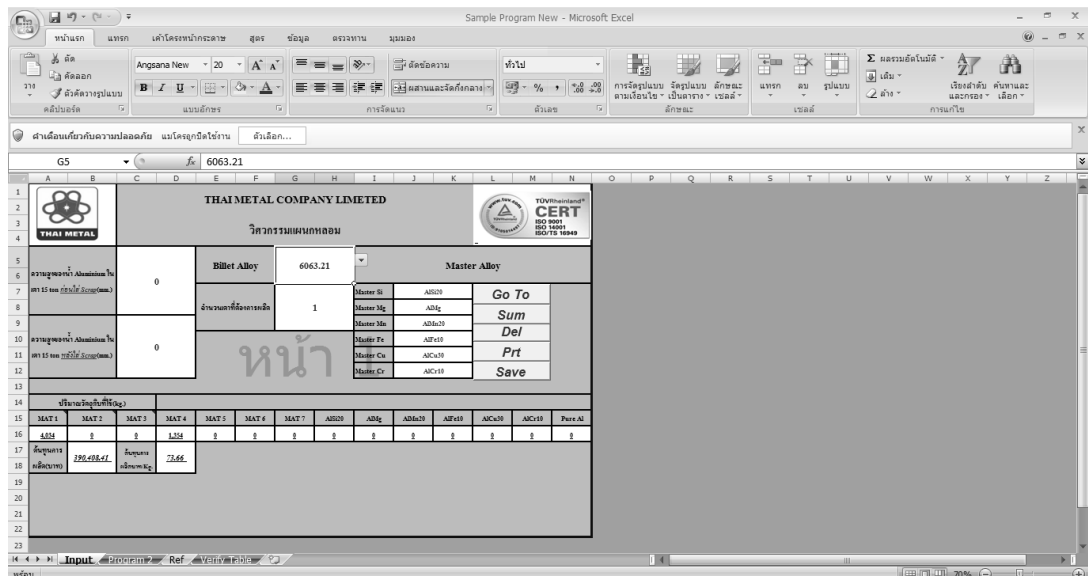
%	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Cr	% Zn	% Ti
Ingot Standard	0.0345	0.0778	0.0009	0.0011	0.0014	0.0009	0.0020	0.0039

ภาคผนวก ง

วิธีการใช้งานโปรแกรมคำนวณ

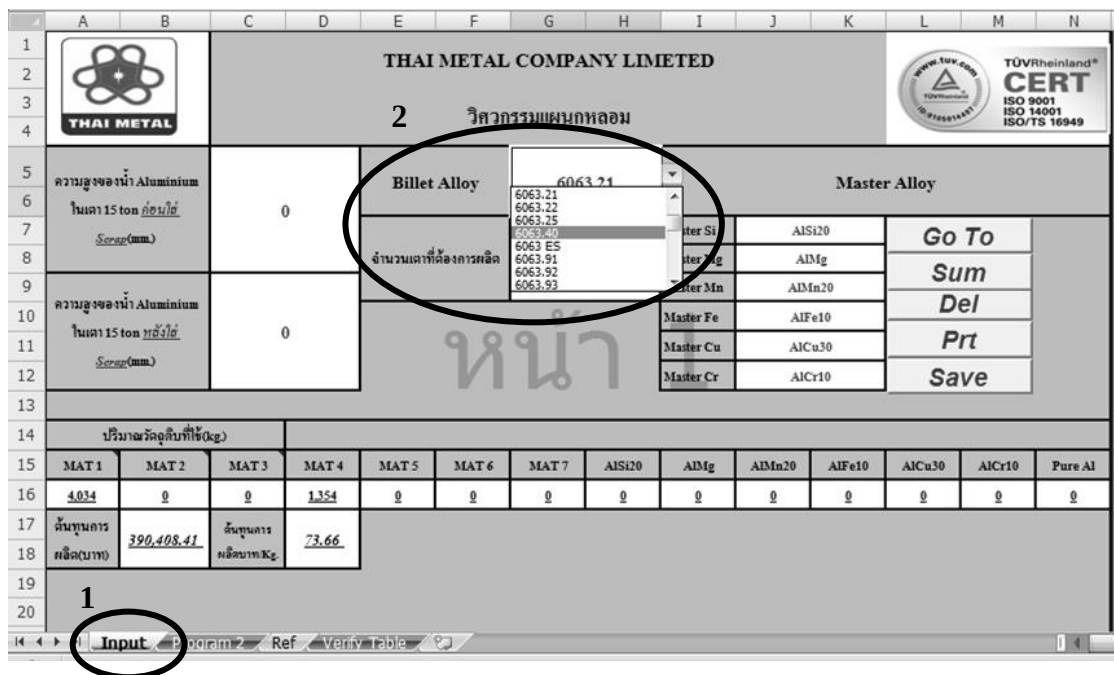
ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมคำนวณไมโครซอฟต์แวร์ เอ็กเซล (Microsoft Excel)

1. เปิดโปรแกรมไมโครซอฟต์แวร์ เอ็กเซล (Microsoft Excel)



รูปที่ ง.1 เปิดโปรแกรมไมโครซอฟต์แวร์ เอ็กเซล

2. เลือกเกรดอะลูมิเนียมบิลเลทอัลลอยด์ (Billet Alloy) ที่ต้องการผลิต จากสเปรดชีต (Spreadsheets) ที่หน้า Input



รูปที่ ง.2 การเลือกเกรดอะลูมิเนียมบิลเลทอัลลอยด์

3. เลือกเกรดมาสเตอร์อัลลอยด์ (Master Alloy)

THAI METAL COMPANY LIMITED													
วิศวกรรมแผนกหลอม													
													
ความสูงของน้ำ Aluminium ในเตา 15 ton <i>ก่อนใช้</i> Scrap(mm.)		0		Billet Alloy		6063.21		Master Alloy					
ความสูงของน้ำ Aluminium ในเตา 15 ton <i>หลังใช้</i> Scrap(mm.)		0		จำนวนครั้งที่ต้องการผลิต		1		Master Si AISi20 Master Mg AISi30 Master Mn AISi50 Master Fe AlFe10 Master Cu AlCu30 Master Cr AlCr10		Go To Sum Del Prt Save			
ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้(kg.)													
MAT 1	MAT 2	MAT 3	MAT 4	MAT 5	MAT 6	MAT 7	AISI20	AlMg	AlMn20	AlFe10	AlCu30	AlCr10	Pure Al
4.034	0	0	1.354	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ต้นทุนการผลิต(บาท)		390,408.41		ต้นทุนการผลิต(kg.)		73.66							

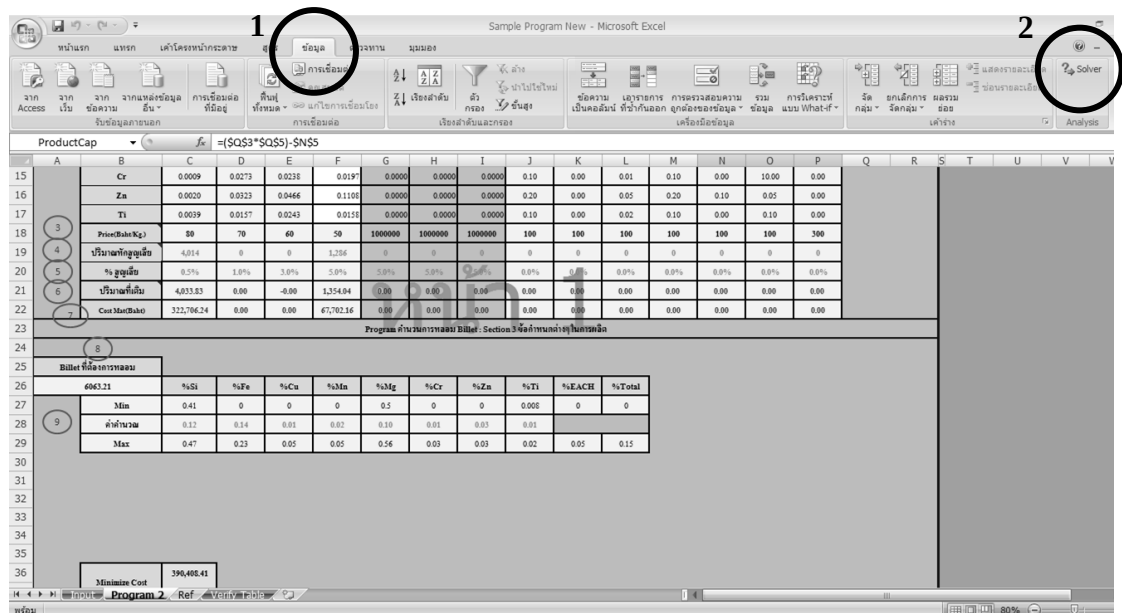
รูปที่ ง.3 การเลือกมาสเตอร์อัลลอยด์

4. เลือกสเปรดชีต (Spreadsheets) ที่หน้า Program 2

Program 2: เลือกสเปรดชีต													
เลือกสเปรดชีตที่ต้องการใช้													
6063.21													
6063.21													
Back To													
Program 2: เลือกสเปรดชีต													
Input Scrap TMC Scrap TMC Scrap TMC Scrap TMC Scrap TMC Scrap TMC Scrap TMC Scrap TMC Scrap TMC Scrap TMC Scrap TMC Scrap TMC Scrap TMC Scrap TMC													
Alloy MAT 1 MAT 2 MAT 3 MAT 4 MAT 5 MAT 6 MAT 7 AISI20 AlMg AlMn20 AlFe10 AlCu30 AlCr10 Pure Al													
Si 0.0340 0.0319 0.0420 0.0390 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00													
Fe 0.0775 0.0220 0.0440 0.0220 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00													
Cu 0.0000 0.0220 0.0274 0.0040 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00													
Mn 0.0011 0.0197 0.0264 0.0290 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00													
Mg 0.0014 0.0212 0.0012 0.0074 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00													
Cr 0.0000 0.0270 0.0220 0.0190 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00													
Zn 0.0000 0.0220 0.0440 0.0110 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00													
Ti 0.0000 0.0157 0.0240 0.0150 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00													
Total Scrap(kg) 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00													
ปริมาณที่สูญเสีย 0.00% 0.00% 0.00% 0.00% 0.00% 0.00% 0.00% 0.00% 0.00% 0.00% 0.00% 0.00% 0.00%													
ปริมาณที่เก็บ 0.0000 0.00 -0.00 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00													
Cost(kg) 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00													
Program 2: เลือกสเปรดชีต													
เลือกสเปรดชีตที่ต้องการใช้													
6063.21													
6063.21													
Back To													

รูปที่ ง.4 การเลือกสเปรดชีต

5. เลือกแท็บ (Tab) ข้อมูล (Data) > Solver

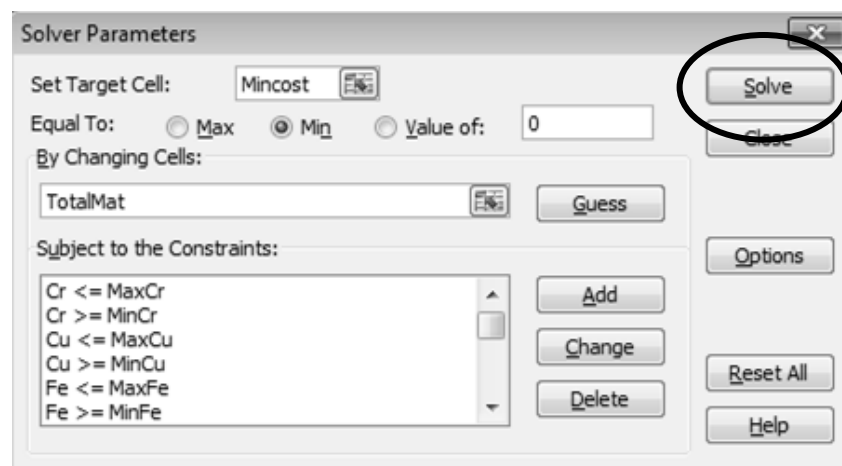


รูปที่ ๖.5 แสดงการเลือกแท็บ

6. ในหน้าต่าง Solver Parameters จะแสดงข้อมูลดังนี้

- Set Target Cell : เลือก Mincost เพราะต้องการคำนวณต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด
- Subject to the Constraints : ข้อกำหนดต่างๆ ในการคำนวณ

จากนั้นกด Solve เพื่อเริ่มการคำนวณ



รูปที่ ๖.6 การตั้งค่าและการเริ่มคำนวณ

7. ผลลัพธ์ที่ได้จากการ Solver จะแสดงผลค่าประมาณของส่วนผสมทางเคมีจากการคำนวณในสเปรดชีต (Spreadsheets) ที่หน้า Program 2 เปรียบเทียบกับค่าสูงสุด (Max) และค่าต่ำสุด (Min) ตามมาตรฐานของเกรดอะลูมิเนียมอื่นๆ และแสดงต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดจากการคำนวณ

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
24												
25		Billet ที่ต้องการหล่อ										
26		6063.21	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Zn	%Ti	%EACH	%Total
27		Min	0.41	0	0	0	0.5	0	0	0.008	0	0
28		ค่าคำนวณ	0.41	0.16	0.01	0.02	0.42	0.01	0.03	0.01		
29		Max	0.47	0.23	0.05	0.05	0.56	0.03	0.03	0.02	0.05	0.15
30												
31												
32												
33												
34												
35												
36		Minimize Cost	478,317.82									
37												
38		Cost/Kg.	90.32									
39												
40												
41												

รูปที่ ๗.7 ผลค่าประมาณของส่วนผสมทางเคมีและต้นทุนการผลิตจากการคำนวณ

8. เลือกสเปรดชีต (Spreadsheets) ที่หน้า Input กด Sum

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														

รูปที่ ๗.8 การเลือกสเปรดชีตและคำนวณ

9. ผลลัพธ์ที่ได้จากการ Sum โปรแกรมจะแสดงปริมาณวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ใช้ในการผลิต รวมทั้งต้นทุนการผลิตทั้งหมดและต้นทุนการผลิตต่อกิโลกรัม

</

รูปที่ ง.9 ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตและการต้นทุนการผลิต

10. เลือกสเปรดชีท (Spreadsheets) ที่หน้า Input กด Prt เพื่อทำการพิมพ์ข้อมูลการผลิต

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1			THAI METAL COMPANY LIMITED											
2														
3	วิศวกรรมแผนกหลอม													
4														
5	ความสูงของน้ำ Aluminium		0	Billet Alloy	6063.21		Master Alloy							
6	ในเตา 15 ton <i>ก้อนน้ำ</i>			จำนวนเตาที่ต้องการผลิต	1	Master SiAlSi20Go To Master MgAlMgSum Master MnAlMn20Del Master FeAlFe10Prt Master CuAlCu30Save Master CrAlCr10								
7	<i>Scrap(mm.)</i>													
8														
9	ความสูงของน้ำ Aluminium		0	หน้า		Master FeAlFe10 Master CuAlCu30 Master CrAlCr10								
10	ในเตา 15 ton <i>ก้อนน้ำ</i>													
11	<i>Scrap(mm.)</i>													
12														
13														
14	ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้(kg.)													
15	MAT 1	MAT 2	MAT 3	MAT 4	MAT 5	MAT 6	MAT 7	AlSi20	AlMg	AlMn20	AlFe10	AlCu30	AlCr10	Pure Al
16	4.034	0	0	1.354	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	ต้นทุนการผลิต(บาท)	478,317.82	ต้นทุนการผลิตบาท/kg.	90.32										
18														
19														

รูปที่ ง.10 การเลือกเพื่อพิมพ์

11. ผลลัพธ์ที่ได้จากการพิมพ์

		THAI METAL COMPANY LIMTED											
วิศวกรรมแผนกหลอม													
ความสูงของน้ำ Aluminium ในเตา 15 ton ที่ขึ้นได้ Scrap(mm.)	0	Billet Alloy	1050		Master Alloy								
ความสูงของน้ำ Aluminium ในเตา 15 ton ที่ขึ้นได้ Scrap(mm.)	0	จำนวนครั้งที่ต้องการผลิต	1	Master Si	AlSi20								
				Master Mg	AlMg								
				Master Mn	AlMn20								
				Master Fe	AlFe10								
				Master Cu	AlCu30								
				Master Cr	AlCr10								
ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้(kg.)													
MAT1	MAT2	MAT3	MAT4	MAT5	MAT6	MAT7	AlSi20	AlMg	AlMn20	AlFe10	AlCu30	AlCr10	Pure Al
4.034	0	0	1.354	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ต้นทุนค่า ผลิต(บาท)	390,408.41	ต้นทุนค่า ผลิต(บาท) K _g	73.66										

รูปที่ ง.11 ผลการพิมพ์ข้อมูลการผลิต

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - สกุล	นายพงศ์พล สันทะ
วัน เดือน ปีเกิด	1 มีนาคม พ.ศ. 2530
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพรหมานุสรณ์จังหวัดเพชรบุรี พ.ศ. 2547
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2551
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2556
ทุนการศึกษา	ทุนวิจัย ITAP
ประวัติการทำงาน	QA Engineer Thai Metal Company พ.ศ. 2552-2554 Senior Supplier Quality Engineer Dana Spicer (Thailand) Latkrabang Plant พ.ศ.2554-มกราคม 2557 Supplier Quality Development Engineer Nissan Motor (Thailand) มกราคม 2557-มิถุนายน 2557 Senior Supplier Development Engineer Dana Spicer (Thailand) Latkrabang Plant กรกฎาคม 2557-ปัจจุบัน