



การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิเท และความยาวของรางเทที่ส่งผล
ต่อขนาดของเฟสอัลฟาอะลูมิเนียม

INVESTIGATION OF POURING TEMPERATURE AND PLATE LENGTH EFFECTS
ON GRAIN SIZE OF ALPHA ALUMINUM PHASE BY DESIGN OF EXPERIMENT

นางสาวศิริลักษณ์	โคตะวัน	รหัส 57364969
นางสาวสุธิตา	พรมน้อย	รหัส 57364990
นางสาวสุธิตา	เอี่ยมแก้ว	รหัส 57365003

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2560



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและความยาวของรางที่
ส่งผลต่อขนาดของเฟสอัลฟาอะลูมิเนียม

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวศิริลักษณ์ โคตะวัน รหัส 57364969
นางสาวสุจิตา พรหมน้อย รหัส 57364990
นางสาวสุจิตา เอี่ยมแก้ว รหัส 57365003

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์
ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์กานต์ ศุภจิตกุล

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2560

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....
.....กรรมการ
(ดร. นฤมล สีพลไกร)

.....
.....กรรมการ
(ดร. ชูสิทธิ์ ป่าไร่)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและความยาวของรางเทที่ส่งผลต่อขนาดของเฟสอัลฟาอะลูมิเนียม		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นางสาวศิริลักษณ์	โคตะวัน	รหัส 57364969
	นางสาวสุธิตา	พรมน้อย	รหัส 57364990
	นางสาวสุธิตา	เอี่ยมแก้ว	รหัส 57365003
ที่ปรึกษาโครงการงาน	อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์		
ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์กานต์ ศุภจิตกุล		
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2560		

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและความยาวของรางเทที่ส่งผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม โดยนำอะลูมิเนียมผสม AC2A ที่ผ่านการหล่อด้วยวิธีเทคนิครางเทหล่อเย็น ได้กำหนดปัจจัยอุณหภูมิเท 3 ระดับ คือ 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 2 ระดับ คือ 150 และ 250 มิลลิเมตร เริ่มแรกนำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800 1,000 และ 1,200 จากนั้นนำไปกัดกรดไฮโดรฟลูออริก ดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ และบันทึกรูปภาพ เพื่อนำไปหาขนาดของพื้นที่เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมด้วยโปรแกรม ImageJ หลังจากนั้นนำค่าของข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติ

โดยทดสอบสมมติฐาน แล้วจึงตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล ได้แก่ 1) การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล 2) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล 3) การตรวจสอบความเสถียรความเหมาะสมของข้อมูล พบว่าทุกเงื่อนไขผ่านการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล จึงนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่ามีผลกระทบร่วมกันระหว่างอุณหภูมิและความยาวของรางเทที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แล้วทำการสร้างสมการถดถอย ซึ่งพบว่าสมการถดถอย ได้ค่าสหสัมพันธ์ 0.89 แสดงว่า สมการถดถอยสามารถนำไปใช้ได้ และนำสมการถดถอยที่ได้ไปตรวจสอบความเหมาะสม พบว่าได้ค่า $p\text{-value} = 0.996$ แสดงว่าสมการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสม และสามารถนำไปทำนายค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมได้ และผลการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการหล่อที่อุณหภูมิ 680 และที่ความยาวของรางเท 150 ได้ขนาดของเฟสอัลฟาอะลูมิเนียมน้อยที่สุด

Project title Investigation of pouring temperature and plate length effects on grain size of alpha aluminum phase by design of experiment

Name Ms. Sirilak Khotawan ID. 57364969
Ms. Sutita Promnoy ID. 57364990
Ms. Sutita Aiemkaew ID. 57365003

Project advisor Ms. Krisana Poolsawat

Co-Project advisor Mr. Kan Supajitkool

Major Materials Engineering

Department Industrial Engineering

Academic year 2017

Abstract

This project studied about effects of pouring temperature and plate length on grain size of alpha aluminum phase by design of experiment. AC2A Aluminum alloys were casted by cooling plate technique at three different pouring temperatures of 680, 700 and 720 degrees Celsius and passed onto a Copper alloys plate at 30 degree of slope. Two different plate length of 150 and 250 millimeters were studied. Casted samples were ground, etched, and examined by optical microscopy respectively. After that, microstructure of each conditions were analyzed by ImageJ program, and then data was statically analyzed.

As a result, data that were tested hypothesis, normal distribution, data independence, and variable stability were analyzed by two-way ANOVA. It was found that both pouring temperature and plate length had effect on grain size at 0.05 significant. After that, Regression equation presented the relationship of pouring temperature and plate length on grain size was calculated ($R^2 = 0.89$). Finally, it was predicted grain size. In conclusion, casted sample had the smallest grain size at 680 degree Celsius pouring temperature and 150 millimeters plate length.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ต้องกราบขอบพระคุณอย่างยิ่ง ที่ได้คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ แนวคิด และคำติเตือนต่างๆ จนทำให้ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ มีความสมบูรณ์และถูกต้อง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ และบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และแนะนำการใช้เครื่องมือ และความปลอดภัยในการใช้อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่น้อง และญาติสนิททั้งหลาย ที่คอยดูแล ให้คำแนะนำ เป็นที่ปรึกษาในเรื่องต่างๆ รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอบคุณเพื่อนและรุ่นพี่ที่ช่วยเหลือ คอยให้คำแนะนำในการทำเล่มปริญญาานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงได้



คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นางสาวศิริลักษณ์ โคตะวัน

นางสาวสุธิตา พรหมน้อย

นางสาวสุธิตา เอี่ยมแก้ว

พฤษภาคม 2561

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฎ

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Outputs).....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินงาน.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	3

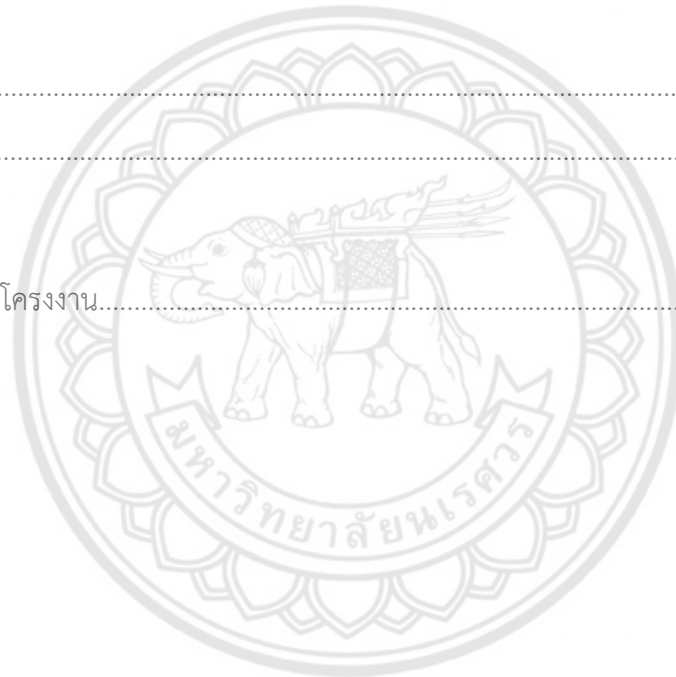
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน.....	4
2.2 กระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็ง (Semi-solid Metal Processing).....	7
2.3 กลไกการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว.....	10
2.4 การออกแบบการทดลอง.....	11
2.5 ขนาดของเกรน (Grain Size).....	23
2.6 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	28
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	29
3.2 การศึกษารวบรวมข้อมูล.....	30
3.3 ทำการทดลองวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม.....	30
3.4 วิเคราะห์ผลเชิงสถิติ.....	31
3.5 สมการถดถอย.....	33
3.6 ทดสอบสมการถดถอย.....	33
3.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง.....	34
3.8 จัดทำรูปเล่ม.....	34
บทที่ 4 ผลการดำเนินโครงการ.....	35
4.1 โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปของอะลูมิเนียมผสม เกรด AC2A ที่ผ่านกระบวนการหล่อ กึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น.....	35
4.2 ขนาดของของเกรน ณ ตำแหน่งต่างๆบนชิ้นงานและขนาดของของเกรนเมื่ออุณหภูมิเท และความยาวรางแตกต่างกัน.....	36
4.3 ผลการทดลอง.....	37
4.4 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ.....	39
4.5 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล.....	54
4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง.....	58
4.7 ผลการสร้างสมการถดถอย.....	61
4.8 ผลการทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย.....	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ การพัฒนา.....	63
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางแก้ไขปัญหา.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก ก.....	66
ภาคผนวก ข.....	72
ประวัติผู้จัดทำโครงการ.....	76



สารบัญญัตราสาร

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน.....	3
2.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม AC2A.....	4
2.2 มาตรฐานอะลูมิเนียม-ซิลิกอนที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะ.....	5
2.3 ตารางการทดลองหาระดับปัจจัยของอุณหภูมิเท.....	13
2.4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง.....	20
3.3 ตารางการบันทึกผล.....	30
4.1 ตารางผลการทดลอง.....	37
4.2 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ตำแหน่งของชิ้นงานที่ต่างกันให้ผลค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมแตกต่างกันหรือไม่.....	40
4.3 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ส่วนชิ้นงานที่ต่างกันให้ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมแตกต่างกันหรือไม่ โดยทดสอบตำแหน่งนอกของชิ้นที่ 1.....	43
4.4 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟส-อัลฟา-อะลูมิเนียม หรือไม่ โดยทดสอบตำแหน่งในของชิ้นที่ 1.....	44
4.5 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ที่ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ โดยทดสอบตำแหน่งนอกของชิ้นที่ 2.....	45
4.6 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ โดยทดสอบตำแหน่งในของชิ้นที่ 2.....	47
4.7 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ โดยทดสอบส่วนที่ 1 และตำแหน่งนอกของชิ้นงาน.....	48
4.8 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ โดยทดสอบส่วนที่ 1 และตำแหน่งในของชิ้นงาน.....	49
4.9 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ โดยทดสอบส่วนที่ 2 และตำแหน่งนอกของชิ้นงาน.....	50

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่โดยทดสอบส่วนที่ 2 และตำแหน่งในของชิ้นงาน.....	51
4.11 ตารางการทดสอบสมมติฐานว่าผลการทดลองที่ปัจจัยและระดับของปัจจัยเดียวกันมีความแตกต่างกันหรือไม่.....	52
4.12 ตารางขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่สามารถนำไปทดสอบสมมติฐาน.....	53
4.13 ตารางสรุปผลการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลทุกระดับอุณหภูมิและทุกระดับความยาวของรางเท.....	58
4.14 ตารางแสดงวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง.....	59
4.15 ตารางแสดงการสร้างสมการถดถอยใหม่.....	62
4.16 ตารางผลการทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย.....	62



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภูมิสมมูลของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน.....	6
2.2 การเปลี่ยนโครงสร้างจากลักษณะเดนไดรต์เป็นลักษณะกลม.....	8
2.3 การหล่อโลหะแบบผ่านรางเทหล่อเย็น.....	9
2.4 ลักษณะของโครงสร้างที่พบการหล่อโลหะแบบผ่านรางเทหล่อเย็น : โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite).....	10
2.5 ลักษณะของโครงสร้างที่พบการหล่อโลหะแบบผ่านรางเทหล่อเย็น : โครงสร้างที่มีลักษณะกลม (Globular).....	10
2.6 ผังการไหลการทดสอบมาตรฐาน.....	15
2.7 ผังการไหลการทดสอบความแปรปรวนแบบสองทาง.....	18
2.8 โปรแกรม Imagej ที่ใช้วิเคราะห์หาขนาดเกรน.....	23
3.1 ผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน.....	28
3.2 รูปชิ้นงานและการตัดชิ้นงาน.....	29
3.3 ตำแหน่งในการหาขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม.....	29
4.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมจากการหล่อประเภทไฮโปยูเทคติก เกรด AC2A ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียสความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร ชั้นที่ 1 ตำแหน่งนอกที่ 2...35	
4.2 ขนาดเกรนเมื่ออุณหภูมิเทมีการเปลี่ยนแปลง โดยข้อมูลจากตารางที่ 4.1.....	36
4.3 กราฟกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส.....	54
4.4 กราฟกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล ที่ความยาวของรางเท 150 มิลลิเมตร.....	55
4.5 กราฟการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส.....	55
4.6 กราฟการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ที่ความยาวของรางเท 150 มิลลิเมตร.....	56
4.7 กราฟการตรวจสอบความเสถียรของข้อมูล ที่ความยาวของรางเท 680 องศาเซลเซียส.....	57
4.8 กราฟตรวจสอบความเสถียรความแปรปรวนของข้อมูล ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร.....	57
4.9 กราฟความสัมพันธ์แสดงผลกระทบร่วมกัน.....	59
4.10 กราฟความสัมพันธ์แสดงผลกระทบหลัก.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ขนาดเกรน เมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยข้อมูลจากตารางที่ 4.12.....	61
ก.1 กราฟกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส.....	67
ก.2 กราฟกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส.....	67
ก.3 กราฟกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล ที่ความยาวของรางเท 250 มิลลิเมตร.....	68
ก.4 กราฟการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส.....	68
ก.5 กราฟการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส.....	69
ก.6 กราฟการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ที่ความยาวของรางเท 250 มิลลิเมตร.....	69
ก.7 กราฟตรวจสอบความเสถียรความแปรปรวนของข้อมูลที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส.....	70
ก.8 กราฟตรวจสอบความเสถียรความแปรปรวนของข้อมูลที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส.....	70
ก.9 กราฟตรวจสอบความเสถียรความแปรปรวนของข้อมูลที่ความยาวรางเท 250 มิลลิเมตร.....	71
ข.1 โปรแกรม ImageJ.....	73
ข.2 ไฟล์ภาพที่ต้องการวิเคราะห์.....	73
ข.3 การปรับค่าของรูปภาพ.....	74
ข.4 บริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม.....	75
ข.5 ค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม ImageJ.....	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการใช้งานอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนมากถึงร้อยละ 75-80 ของโลหะอะลูมิเนียมผสมในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ เนื่องจากมีสมบัติด้านการหล่อ (Castability) ที่ดี เมื่อเทลงสู่แม่พิมพ์จะพบว่าอะลูมิเนียมหลอมเหลวมีการไหลตัวที่ดี สามารถขึ้นรูปขึ้นงานหล่อที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ นอกจากนี้มีสมบัติด้านทานต่อการกัดกร่อนสูง น้ำหนักเบา เนื่องจากน้ำหนักที่เบาจึงทำให้เหมาะต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมการบิน เป็นต้น

โดยโครงการนี้ได้นำขึ้นงานอะลูมิเนียมผสม AC2A ที่ผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็ง โดยวิธีเทคนิค รางเทหล่อเย็น เพื่อศึกษาอุณหภูมิเท และความยาวของรางเทที่ส่งผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม และทำการออกแบบการทดลอง เนื่องจากการออกแบบการทดลองช่วยลดการแปรปรวนได้ เมื่อเทียบกับการทดลองโดยทั่วไป คือ การออกแบบทดลองนั้น เป็นการวางแผนการทดลอง มีการกำหนดตัวแปรต้น ตัวแปรตาม ตั้งสมมติฐาน จึงสามารถลดความแปรปรวนของผลลัพธ์ได้

ดังนั้นในโครงการวิจัยจึงได้ออกแบบการทดลองมาดำเนินการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อควบคุมตัวแปรต้นที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม สามารถแบ่งได้เป็น 4 ข้อ ได้แก่ 1) กำหนดตัวแปรต้นที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม เพื่อให้ผลของตัวแปรตามมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด 2) กำหนดระดับปัจจัยของตัวแปรต้นและขอบเขตที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลง 3) เลือกตัวแปรตามซึ่งจะแสดงผลที่ได้จากการทดลอง 4) ดำเนินการทดลอง วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอุณหภูมิเทที่ส่งผลต่อขนาดของเฟสอัลฟาอะลูมิเนียมผสม AC2A
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความยาวรางเทที่ส่งผลต่อขนาดของเฟสอัลฟาอะลูมิเนียมผสม AC2A
- 1.2.3 เพื่อศึกษาอุณหภูมิเทและความยาวรางเทที่ส่งผลร่วมกันต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมผสม AC2A

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Outputs)

สมการถดถอย เพื่อใช้ทำนายช่วงอุณหภูมิระหว่าง 680-720 องศาเซลเซียส และช่วงความยาวรังสีระหว่าง 150-250 มิลลิเมตรได้

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

ใช้สมการถดถอยหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทช่วง 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส และความยาวรังสี 150 และ 250 มิลลิเมตร โดยความชันรางเท 30 องศา เพื่อทำนายขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมผสม AC2A จากสมการถดถอย

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.5.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1.5.1.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองคือ อะลูมิเนียมผสมเกรด AC2A
- 1.5.1.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)
- 1.5.1.3 โปรแกรม ImageJ ใช้วิเคราะห์ขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม
- 1.5.1.4 โปรแกรม Minitab ใช้คำนวณค่าทางสถิติ

1.5.2 ขั้นตอนดำเนินงาน

- 1.5.2.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการหล่ออุณหภูมิเท 680 700 และ 720 องศาเซลเซียสไปขัดและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
- 1.5.2.2 หาขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมโดยใช้โปรแกรม imageJ
- 1.5.2.3 นำค่าผลการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติ เริ่มจากทดสอบสมมติฐานจากนั้นนำไปตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล แล้ววิเคราะห์หาความแปรปรวนและสร้างสมการถดถอย จากนั้นนำค่าจากผลการทดลองมาแทนค่าในสมการถดถอยที่สร้าง
- 1.5.2.4 ตรวจสอบสมการถดถอย

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

ในโครงการการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและความยาวของรางเท ที่ส่งผลต่อขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม โดยการออกแบบการทดลองทางสถิติ และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาขนาดเกรน โดยความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบกึ่งแข็ง และกลไกการแข็งตัวของโลหะ ประกอบไปด้วยหลักการและทฤษฎีต่าง ดังต่อไปนี้

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนได้รับความนิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะในประเทศไทยและทั่วโลก เนื่องจากมีสมบัติการหล่อที่ดี และทนต่อการเกิดการกัดกร่อน สามารถนำไปผสมกับโลหะอื่นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติโครงสร้าง ปัจจุบันมีการใช้งานอะลูมิเนียมที่มีซิลิกอนผสมเป็นหลักมากถึงร้อยละ 85 ถึง 90 ของอะลูมิเนียมประเภทที่ใช้ในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ บทความนี้จะอธิบายถึงการแบ่งประเภทของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนโดยใช้ส่วนผสมของซิลิกอนเป็นหลัก นอกจากซิลิกอนซึ่งเป็นธาตุผสมหลักในอะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้ยังมีธาตุอื่นๆที่ผสมลงไปประกอบมากกว่า 2 ธาตุ ดังตารางที่ 2.1 เพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นและนำไปใช้งานในการผลิตให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม AC2A

ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (Percent by Weight)
ซิลิกอน (Si)	5.5-6.5
แมกนีเซียม (Mg)	0.10
เหล็ก (Fe)	1.0
แมงกานีส (Mn)	0.5
สังกะสี (Zn)	1.0
ทองแดง (Cu)	3.0-4.0

ที่มา : ประทิน เรืองเวช (2559)

2.1.1 มาตรฐานของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน

มาตรฐานที่นิยมใช้สำหรับการแบ่งชนิดของอะลูมิเนียม สำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะในประเทศไทยคือ มาตรฐานของสหรัฐอเมริกาคือ AA และประเทศญี่ปุ่นคือ JIS ทั้งนี้ได้สรุปอะลูมิเนียมเกรดที่นิยมใช้งาน และส่วนผสมทางเคมีไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานอะลูมิเนียม-ซิลิกอนที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

มาตรฐานAA	มาตรฐานJIS	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Mn
A319.1	AC2A	5.0-7.0	3.0-5.0	0.55	0.90	2.0	0.20-0.65
A332.2	AC8A	10.5-13.5	0.8-1.5	0.9-1.5	0.60	0.35	0.35
A356.0	AC4C	6.5-7.5	0.02	0.30-0.45	0.15	0.07	0.10
380.2	ADC10	8.0-11.0	2.0-4.0	0.15-0.55	0.6-0.11	1.20	0.55
A360.2	AC4A	9.0-11.0	0.03	0.25-0.45	0.40	0.10	0.45
333.1	AC4B	7.5-9.5	2.0-3.5	0.15-0.65	0.7	1.2	0.15-0.65
413.2	AC3A	10.5-13.5	0.03	-	0.40	0.10	0.35

ที่มา : รศ.ดร. เขาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร (ม.ป.ป.)

2.1.2 ประเภทของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน

2.1.2.1 อะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮโปยูเทคติก

อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน ที่มีองค์ประกอบแบบไฮโปยูเทคติกซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกอนต่ำกว่าร้อยละ 12.6 โดยน้ำหนัก จะประกอบไปด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และมีโครงสร้างของยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ที่มีลักษณะเป็นแผ่นแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ เนื่องจากโลหะผสมกลุ่มนี้มีช่วงของการแข็งตัวกว้าง โดยส่วนใหญ่แล้วอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮโปยูเทคติก ไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนักเนื่องจากมีข้อจำกัดด้านสมบัติทางกล ดังนั้น อะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮโปยูเทคติกมักได้รับการผสมทองแดง

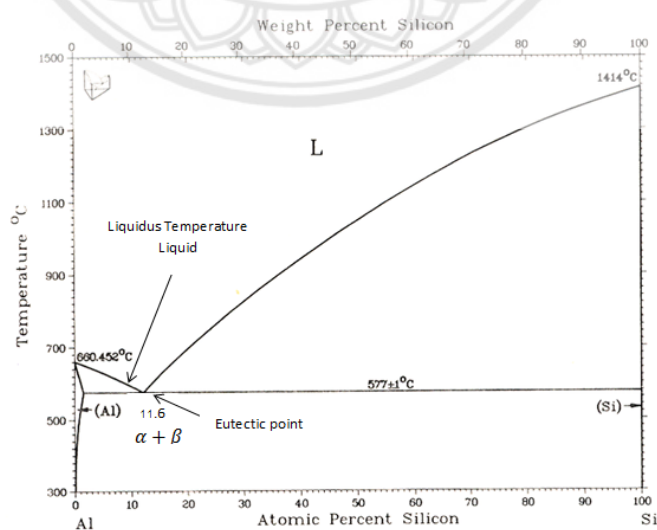
หรือแมกนีเซียม รวมเข้าไปด้วย เช่น ASTM A319 ASTM A355 และ ASTM A356 เพื่อให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการรวมวิธีการตกตะกอนได้

2.1.2.2 อะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮเปอร์ยูเทคติก

อะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic Alloys) จะใช้งานในสภาวะที่ต้องการการขยายตัวจากความร้อนต่ำ และในขณะเดียวกันต้องทนต่อการเสียดสีได้ดี เช่น ลูกสูบในเครื่องยนต์สันดาปภายใน และเสื่อสูบเครื่องยนต์ที่ผลิตด้วยการหล่อในแม่พิมพ์เหล็ก ซึ่งสามารถใช้ได้โดยไม่ต้องมีปลอกสูบเหล็ก อะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮเปอร์ยูเทคติกเหล่านี้ต้องมีการเติมฟอสฟอรัสเพื่อให้เฟสซิลิกอนปฐมภูมิ มีขนาดเล็กและละเอียดสามารถอธิบายได้จากเฟสไดอะแกรมต่อไปนี้ ดังรูปที่ 2.1

2.1.2.3 แผนภาพสมดุลโลหะอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน

มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 660.57 องศาเซลเซียส และซิลิกอนจะมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 1,414 องศาเซลเซียส ซึ่งจะอยู่อีกด้านหนึ่งของกราฟที่ร้อยละ 100 ซิลิกอนสามารถละลายในอะลูมิเนียมสูงสุดที่ร้อยละ 1.65 ที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส และสามารถละลายได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง โดยสามารถดูได้จากแผนภูมิสมดุล ดังรูปที่ 2.1



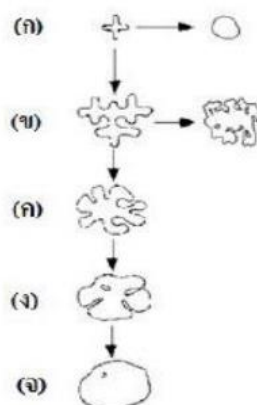
รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน

ที่มา : รศ.ดร. ชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร (ม.ป.ป.)

เมื่อพิจารณาเฟสไดอะแกรมอะลูมิเนียมและซิลิกอน พบว่ามีซิลิกอนละลายเข้าไปในอะลูมิเนียมทำให้จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมผสมอยู่ต่ำสุดที่จุดปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic Reaction) ซึ่งส่วนผสมของซิลิกอนประมาณร้อยละ 11.6 ที่อุณหภูมิประมาณ 577 องศาเซลเซียส โดยเรียกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนที่มีส่วนผสมทางเคมีที่จุดปฏิกิริยายูเทคติกนี้ว่าเป็นอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเกรดยูเทคติก

2.2 กระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็ง (semi-solid Metal Processing)

กรรมวิธีการหล่อโลหะกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Casting; SSM) คือ การหล่อโลหะด้วยส่วนผสมของธาตุที่มีสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว โดยมีเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่ประมาณร้อยละ 30-65 ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะส่วนผสมของธาตุและชิ้นงานที่ต้องการผลิต ทำให้โลหะกึ่งแข็งมีลักษณะทั่วไปที่ใกล้เคียงของแข็ง แต่มีความยืดหยุ่น ใช้แรงทางกลต่ำในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะกึ่งแข็งซึ่งลักษณะเฟสของแข็งที่มาแทนที่เฟสของเหลวเพียงอย่างเดียวจากกระบวนการหล่อแบบดั้งเดิม ทำให้ข้อจำกัดของกรรมวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้น โดยการหล่อกึ่งแข็ง เป็นการหล่อเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยเปลี่ยนโครงสร้างจากเดนไดรต์ (Dendrite Structure) ไปเป็นโครงสร้างกลม (Globular Structure) ทำให้โลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงสามารถขึ้นรูปโดยผ่านกรรมวิธีการหล่อได้โดยไม่จำกัดขนาดของชิ้นงานผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของชนิดของส่วนผสมของธาตุที่นำมาหล่อต้องมีอุณหภูมิในการทำการหล่อที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของแม่พิมพ์ จะได้ชิ้นงานที่มีรูพรุนต่ำ หดตัวน้อย ขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานต้นแบบสูง และยังคงมีโครงสร้างจุลภาคที่เป็นโครงสร้างแบบกลม (Globular Microstructure) ขณะเดียวกันชิ้นงานที่เย็นตัวจะมีโครงสร้างจุลภาคที่มีขนาดเล็กและไม่เกิดโครงสร้างแบบเดนไดรต์ จากอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วขึ้น และมีรูพรุนต่ำเนื่องจากลดการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน จากการเกิดความปั่นป่วนจากการไหลของของไหล ทำให้ชิ้นงานผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงทางกลที่ดีมากขึ้น โดยการเปลี่ยนโครงสร้างจากลักษณะเดนไดรต์ไปเป็นลักษณะกลมสามารถอธิบายได้ดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนโครงสร้างจากลักษณะเดนไดรท์ไปเป็นลักษณะกลม

จากรูปที่ 2.2 จะพบว่าเมื่อเทโลหะหลอมเหลวลงสู่รางเทที่ผนังรางเทจะเกิดนิวเคลียสในช่วงแรกจากนั้นนิวเคลียสโตเป็นโครงสร้างเดนไดรท์เนื่องจากการไหลของโลหะหลอมเหลว โดยโครงสร้างเดนไดรท์จะมีลักษณะแฉกคล้ายดอกกุหลาบโตขึ้นจนเปลี่ยนโครงสร้างเป็นลักษณะกลม

ที่มา : กนกกาญจน์ ศรีม่วง (2553)

2.2.1 กระบวนการติกโซแคสติง (Thixocasting)

กระบวนการติกโซแคสติงเป็นกระบวนการหล่อโลหะหลอมเหลวให้อยู่ในรูปของ Feedstock โดยกวนระบบให้โลหะหลอมเหลวอยู่ในสภาวะกึ่งแข็งก่อนที่จะขึ้นรูปให้เป็น Feedstock ต่อจากนั้นมีการให้ความร้อนซ้ำเพื่อให้ Feedstock อยู่ในช่วงกึ่งแข็งแล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต่อไป ในปัจจุบันกระบวนการติกโซแคสติงถูกนำมาใช้งานด้านอุตสาหกรรมน้อยมากเมื่อเทียบกับกระบวนการรีโอแคสติง เนื่องจากต้นทุนในการเตรียม Feedstock ในขั้นต้นสูงและใช้พลังงานสูงในการให้ความร้อนแก่ Feedstock ในช่วงกึ่งแข็งก่อนนำไปขึ้นรูป

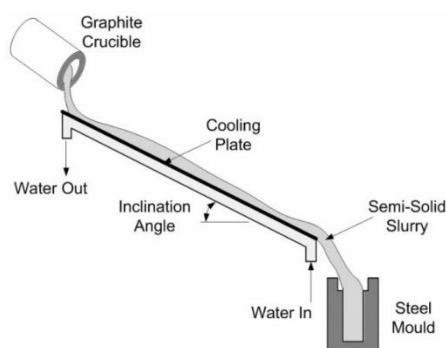
2.2.2 กระบวนการรีโอแคสติง (Rheocasting)

กระบวนการรีโอแคสติง เป็นการเตรียมโลหะในสภาวะกึ่งแข็งจากของเหลวโดยตรง เริ่มจากการหลอมโลหะจากนั้นทำให้เย็นตัวอยู่ในช่วงกึ่งแข็ง โดยมีการกวนของระบบของโลหะ

หลอมเหลวระหว่างการเย็นตัวหรือมีการทำให้แขนของเดนไดรต์เกิดการแตกหัก จะได้โลหะหลอมเหลวที่มีอนุภาคของแข็งผสมอยู่แล้วจึงนำไปขึ้นรูปขึ้นงานและโครงสร้างที่ได้จากกระบวนการนี้มีลักษณะไม่เป็นเดนไดรต์แต่ได้โครงสร้างที่มีลักษณะกลมแทนการเตรียมโลหะในสภาวะกึ่งแข็งในกระบวนการหล่อแบบรีโอแคสติง

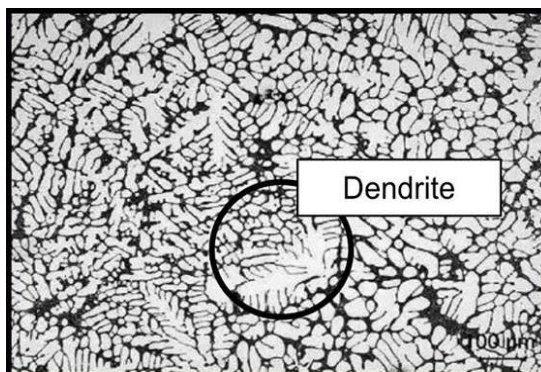
2.2.3 การหล่อแบบกึ่งแข็งโดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็น

การหล่อแบบกึ่งแข็ง คือ การหล่อขึ้นงานในช่วงอุณหภูมิกึ่งแข็งกึ่งเหลว โดยในการหล่อแบบกึ่งแข็งจะทำการหล่อที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้จากงานหล่อแบบกึ่งแข็ง มีผิวเรียบ รูพรุนน้อย และโครงสร้างเริ่มต้นของชิ้นงานมีรูปร่างทรงกลม โดยชิ้นงานที่ได้นี้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อีกทั้งการใช้อุณหภูมิที่ต่ำของการหล่อแบบกึ่งแข็ง ส่งผลให้ประหยัดพลังงานและแม่พิมพ์มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น เมื่อเทียบกับการหล่อแบบดั้งเดิม ในการหล่อแบบกึ่งแข็งมีหลายวิธี ซึ่งการหล่อเทคนิครางเทหล่อเย็นเป็นหนึ่งในกรรมวิธีของการหล่อแบบกึ่งแข็งดังรูป 2.3 โดยเป็นการหล่อโลหะหลอมเหลวไหลผ่านรางเทเข้าสู่แม่พิมพ์ ซึ่งอุณหภูมิที่ตำแหน่งปลายรางเทต้องอยู่ในอุณหภูมิช่วงกึ่งแข็งก่อนไหลลงสู่แม่พิมพ์ โดยในระหว่างที่โลหะหลอมเหลวไหลผ่านรางเทจะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ทำให้เกิดนิวเคลียสบริเวณผิวผนังรางเท โดยระหว่างการไหลของน้ำโลหะทำให้เกิดแรงดันไปกระทำกับโครงสร้างทางจุลภาครูปร่างเดนไดรต์จนเกิดการแตกหักส่งผลให้โครงสร้างทางจุลภาคมีรูปร่างกลมและมีขนาดเล็ก โดยจะกระทำแบบนี้ไปเรื่อยๆจนกว่าโลหะหลอมเหลวจะไหลลงสู่แม่พิมพ์ จนหมดดังรูปที่ 2.3 2.4 และ 2.5

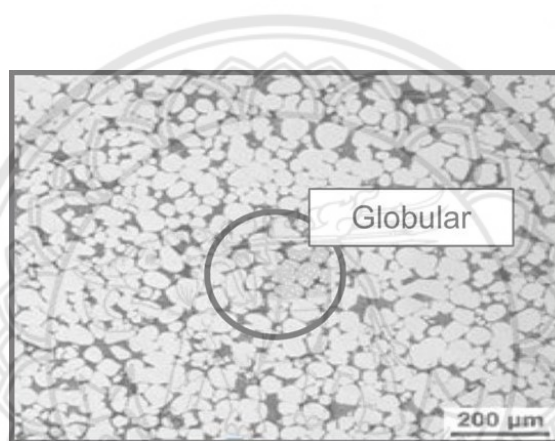


รูปที่ 2.3 การหล่อโลหะแบบผ่านรางเทหล่อเย็น

ที่มา : Motegi, T and Tanabe, F (2004)



รูปที่ 2.4 ลักษณะของโครงสร้างที่พบการหล่อโลหะแบบผ่านรางเทหล่อเย็น : โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite)



รูปที่ 2.5 ลักษณะของโครงสร้างที่พบการหล่อโลหะแบบผ่านรางเทหล่อเย็น : โครงสร้างที่มีลักษณะกลม (Globular)

ที่มา : กมลฤทธิ สมพิมพ์า (2555)

2.3 กลไกการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว

กระบวนการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลว ถ้าอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวมาก คือโลหะหลอมเหลวจะเย็นตัวเร็วปริมาณนิวเคลียสเริ่มต้นมีจำนวนมาก จำนวนเกรนที่เกิดขึ้นก็จะมีจำนวนมากตามไปด้วย ส่งผลให้เกรนที่ได้มีขนาดเล็กละเอียด แต่ถ้าหากอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวต่ำหรือเย็นตัวช้า ปริมาณนิวเคลียสน้อยจำนวนเกรนที่เกิดขึ้นก็น้อยตามไปด้วย ส่งผลให้เกรนที่ได้มีขนาดใหญ่และหยาบ กลไกการเกิดนิวคลีไอของโลหะหลอมเหลวมี 3 กลไกดังนี้ 1). กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation) เกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัวของโลหะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ

จุดเยือกแข็งสมดุล (Equilibrium Freezing Temperature) 2.) กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธ-
พันธ์ (Heterogenous Nucleation) เป็นกระบวนการเกิดนิวเคลียสจากสิ่งเจือปนในโลหะหลอมเหลว
หรือพื้นผิวของแบบหล่อ เป็นตัวช่วยการเกิดนิวเคลียส มักจะเกิดขึ้นบ่อยกับงานหล่อโลหะมากกว่า
การเกิดแบบเอกพันธ์ 3.) กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบสภาวะพลศาสตร์ (Dynamic Nucleation)
เป็นสภาวะการเกิดนิวเคลียสแบบสภาวะพลศาสตร์ โดยอธิบายการเกิดนิวเคลียสแบบพลศาสตร์ได้ 2
กลไก ได้แก่ กลไกระเบิดแบบบิกแบง และกลไกการแตกหักของเดนไดรท์

2.4 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าตัวแปรต้นของกระบวนการ-
การเพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่เราต้องการ ซึ่งข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไป
กับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบ ลองผิดลองถูก
จะให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่ต้องการช้ามาก และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึง
ต้องเก็บข้อมูลมาก โดยในการออกแบบการทดลองประกอบไปด้วย 2 ส่วนได้แก่ ส่วนประกอบในการ
ออกแบบการทดลองและส่วนของขั้นตอนการวางแผนการทดลอง ในโครงการนี้ได้ทำการออกแบบ
การทดลองจาก ปัจจัยและระดับของปัจจัย ตารางบันทึกผล และการตั้งสมมติฐานโดยมีรายละเอียด
ดังนี้

2.4.1 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

2.4.1.1 การกำหนดปัจจัยจากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของ
เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม AC2A มีดังนี้

ก. อุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในลักษณะการแข็งตัวและการถ่ายเทความร้อนออก
จากแม่พิมพ์ซึ่งค่าต่างๆ ส่งผลโดยตรงต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลอีกทั้ง
อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้

ข. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำรางเทซึ่งส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนออกจาก
อะลูมิเนียมหลอมเหลว ซึ่งชนิดของรางเทที่แตกต่างกันทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจาก
อะลูมิเนียมหลอมเหลวที่ต่างกัน โดยปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อลักษณะของรูปร่างและปริมาณของ
ของแข็งที่เข้าสู่แม่พิมพ์ โดยเมื่อรางเทมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงปริมาณเฟสของแข็งที่

เกิดขึ้นก็จะมีปริมาณมากและขนาดเล็กตามไปด้วย ดังนั้น จึงเลือกใช้รางเทที่ทำจากทองแดงแทนรางเทที่ทำจากเหล็ก เนื่องจากรางเทที่ทำจากทองแดงถ่ายเทความร้อน ลดเวลา ลดต้นทุน และลดการใช้พลังงานได้ดีกว่ารางเทที่ทำจากเหล็ก ดังนั้น จึงใช้รางเทที่ทำจากทองแดงในการทดลอง

ค. ความยาวของรางเท ความยาวของรางเทมีผล โดยมีเหตุผลเดียวกับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำรางเทในเรื่องอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยถ้าอะลูมิเนียมหล่อมเหลวอยู่บนรางเทเป็นระยะเวลาสั้นจะทำให้เกิดปริมาณของของแข็งจำนวนมากอีกทั้งความยาวของรางเทเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นจึงเลือกความยาวของรางเทเป็นปัจจัยที่นำมาใช้ในการทดลอง

ง. ความชันของรางเท ความชันของรางเทเป็นการปรับเปลี่ยนความเร็วในการไหลของอะลูมิเนียมหล่อมเหลว โดยระหว่างการไหลของอะลูมิเนียมหล่อมเหลวจะทำให้เกิดแรงเค้นไปกระทำโครงสร้างทางจุลภาคมีรูปร่างเป็นเดนไดรต์จนเกิดการแตกหัก ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างทางจุลภาครูปร่างกลมและมีขนาดเล็ก

2.4.1.2 การกำหนดระดับปัจจัย

ก. ระดับปัจจัยของความยาวของรางเทการกำหนดระดับของความยาวรางเทที่ใช้ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ความยาวรางเท 150 และ 250 มิลลิเมตร

ข. ระดับปัจจัยของอุณหภูมิเทการหาระดับปัจจัยของอุณหภูมิเทได้ออกแบบการทดลองจากข้อกำหนดเบื้องต้น ดังนี้

ข.1 ความยาวของรางเท 150 และ 250 มิลลิเมตร

ข.2 จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมผสม AC2A ที่ 660 องศาเซลเซียส

ข.3 อุณหภูมิปลายรางเทต้องอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่แข็ง (562 - 612 องศาเซลเซียส)

จากข้อกำหนดเบื้องต้นได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับของอุณหภูมิเท ซึ่งเริ่มต้นใช้อุณหภูมิเทจากจุดหลอมเหลวที่ 660 องศาเซลเซียส แล้วปรับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นครั้งละ 20 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิเท 680, 700, 720, ... องศาเซลเซียส ผลการทดลองสรุปได้ ดังตารางที่

ตารางที่ 2.3 ตารางผลการทดลองหาระดับปัจจัยของอุณหภูมิเท

ความยาวของรางเท (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิปลายรางเท (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิช่วงกึ่งแข็ง *(562 - 612 องศาเซลเซียส)
150	660	550	ไม่ผ่าน
	680	573	ผ่าน
	700	582	ผ่าน
	720	598	ผ่าน
	740	620	ไม่ผ่าน
250	660	548	ไม่ผ่าน
	680	571	ผ่าน
	700	579	ผ่าน
	720	592	ผ่าน
	740	613	ไม่ผ่าน

ที่มา : ประทิน เรืองเวช (2559)

2.4.2 ส่วนประกอบในการออกแบบการทดลอง

2.4.2.1 ปัจจัย (Factor) คือ สิ่งส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง หรือตัวแปรตามซึ่งจะนำมาพิจารณาในการทดลอง โดยปัจจัยสามารถจำแนกปัจจัยเป็น 2 ประเภท ดังนี้

ก. ปัจจัยที่ควบคุมได้ คือ ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ข. ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ คือ ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

2.4.2.2 ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) คือ ตัวแปรที่ได้จากการทดลองหรือเรียกอีกชื่อว่า ตัวแปรผลลัพธ์

2.4.2.3 ระดับปัจจัย (Levels of Factor) คือ จำนวนค่าปัจจัยที่เปลี่ยนไปในหนึ่งการทดลอง เช่น อุณหภูมิเทที่ใช้ในการทดลอง คือ 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส เป็นต้น

2.4.2.4 วิธีปฏิบัติ (Treatment) คือ ข้อกำหนดสำหรับปัจจัยที่จะศึกษาในการทดลอง เช่น ถ้าการทดลองมี 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิเทและความยาวของรางเทที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมีระดับปัจจัย 3 และ 2 ตามลำดับดังนั้น จะมีการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 6 วิธี เป็นต้น

2.4.2.5 จำนวนการทดลองซ้ำ (Replication) คือ การกำหนดการทดลองที่จะทำซ้ำกี่ครั้ง เพื่อให้ผลการทดลองมีความถูกต้องมากที่สุด แต่บางครั้งผลลัพธ์ที่ได้จากสมการมากเกินไป จึงทำให้เกิดข้อจำกัดในการทดลอง เช่น ข้อจำกัดต้นทุน ข้อจำกัดเวลา เป็นต้น ด้วยข้อจำกัดนี้ ทำให้บางครั้งในการทดลองไม่ต้องทำตามผลลัพธ์ที่คำนวณออกมาเสมอไป

2.4.2.6 จำนวนครั้งในการทดลอง (Experiment Runs) คือ จำนวนครั้งที่ใช้ในการทดลองโดยจะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของจำนวนวิธีปฏิบัติกับจำนวนครั้งที่ทำการทดลองซ้ำ เช่น วิธีปฏิบัติทั้งหมด 9 วิธี แต่ละวิธีปฏิบัติซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ดังนั้น จำนวนครั้งในการทดลองมีค่าเท่ากับ 27 ครั้ง

2.4.3 ส่วนขั้นตอนในการวางแผนการทดลอง

2.4.3.1 การนิยามของปัญหา คือ การกำหนดสิ่งที่ต้องการได้จากการทดลอง

2.4.3.2 การเลือกปัจจัย ช่วงระดับของปัจจัย และขอบเขตของปัจจัย คือ การเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทำทดลอง พร้อมทั้งกำหนดระดับที่จะทำการทดลอง และกำหนดขอบเขตปัจจัยที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลง

2.4.3.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง คือ การเลือกตัวแปรที่จะแสดงผล ที่ได้จากการทดลอง โดยตัวแปรที่จะตอบสนองนี้สามารถเลือกได้หลายตัวแปรในหนึ่งการทดลอง

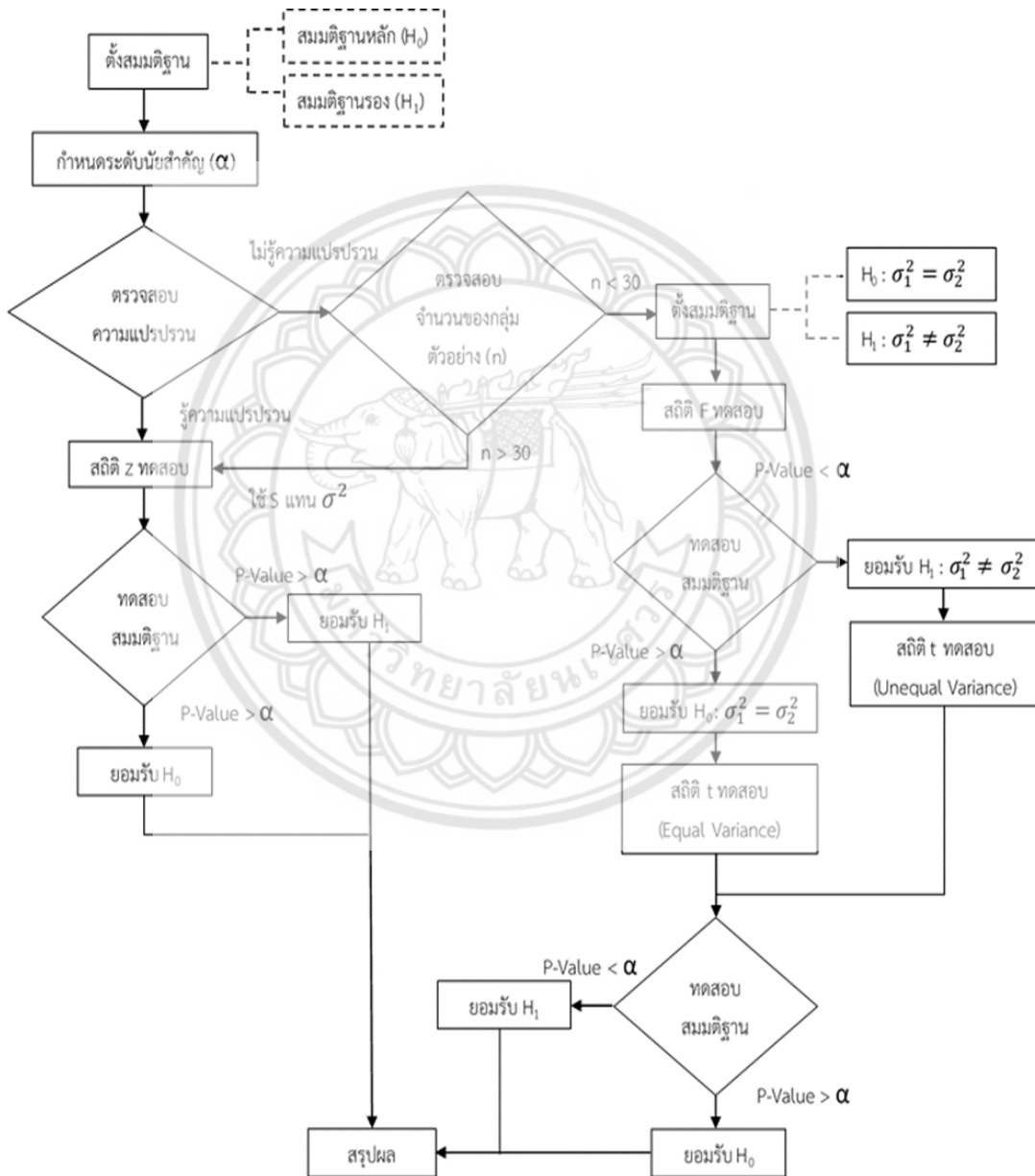
2.4.3.4 การเลือกการออกแบบการทดลอง คือ ในการเลือกการออกแบบการทดลอง ต้องเลือกจากสิ่งที่ต้องการศึกษาจากปัจจัย และระดับของปัจจัยที่เลือกมาใช้ในการทดลอง เช่น ในการทดลองต้องการศึกษาว่าอุณหภูมิและปริมาณของน้ำ มีผลต่อการสุกของข้าวหรือไม่ จะเป็นการศึกษาปัจจัย 2 ปัจจัยร่วมกัน

2.4.3.5 การดำเนินการทดลอง คือ การทำการทดลองตามแบบแผนที่วางไว้ และติดตามดูการทดลองอย่างใกล้ชิดเพื่อให้แน่ใจว่าการทดลองเป็นไปตามแบบแผน

2.4.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล คือ การวิเคราะห์ และสรุปผลรวมทั้งตัดสินความถูกต้องของข้อมูลโดยใช้ความรู้ทางด้านสถิติเพื่อทำให้ข้อมูลนั้นมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

2.4.4 การทดสอบสมมติฐาน (hypothesis Testing)

สมมติฐาน หมายถึง เกณฑ์หรือข้อตกลงที่ตั้งขึ้นเพื่อการพิสูจน์ให้เกิดการยอมรับหรือการปฏิเสธ ซึ่งการยอมรับหรือการปฏิเสธจะเกิดจากผลของการสุ่มตัวอย่างและการทดสอบสมมติฐานตามเกณฑ์ที่ตั้งขึ้นนั้น โดยใช้วิธีเชิงสถิติ เพื่อยืนยันผลสมมติฐานที่ตั้งขึ้น โดยขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานจะแสดงเป็นรูปผังการไหล ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผังการไหลการทดสอบสมมติฐาน

ที่มา : ประทิน เรืองเวช (2559)

จากรูปที่ 2.5 ผังการไหลการทดสอบสมมติฐานในการคำนวณค่าสถิติ Z F และ t สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.1 – 2.6 สามารถอธิบายความหมายของแต่ละตัวแปรและสามารถพิจารณาในการนำไปคำนวณผลการทดลองได้จากการอธิบายดังต่อไปนี้

Z หมายถึง ข้อมูลมี 2 กลุ่ม มีการแจกแจงผลต่างของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง (Z test)

F หมายถึง การวิเคราะห์ความแตกต่างของค่ากระจายของข้อมูล 2 กลุ่ม (F test)

t หมายถึง การทดสอบผลต่างของค่าเฉลี่ย กรณีที่กลุ่มตัวอย่างน้อยกว่า 30 (t test)

Sp หมายถึง การทดสอบผลต่างของค่าเฉลี่ย ($n < 30$) กรณีรู้ค่าความแปรปรวนของทั้งสองกลุ่มเท่ากัน

V หมายถึง การทดสอบผลต่างของค่าเฉลี่ย ($n < 30$) กรณีรู้ค่าความแปรปรวนของทั้งสองกลุ่มไม่เท่ากัน

\bar{x} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง

σ หมายถึง ค่าความแปรปรวน

n หมายถึง จำนวนกลุ่มตัวอย่าง

μ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของกลุ่มประชากร

S หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง

2.4.4.1 กรณีทราบค่าความแปรปรวนใช้สถิติ Z ทดสอบ ดังสมการที่ 2.1

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (u_1 - u_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (2.1)$$

2.4.4.2 กรณีไม่ทราบค่าความแปรปรวนใช้สถิติ Z ทดสอบโดยใช้ค่า S^2 แทน σ^2 ดังสมการที่ 2.2

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (u_1 - u_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (2.2)$$

2.4.4.3 กรณีหาค่าความแปรปรวนใช้สถิติ F ทดสอบ ดังสมการที่ 2.3

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (2.3)$$

2.4.4.4 กรณีทดสอบสถิติ F แล้วมีความแปรปรวนเท่ากันใช้สถิติ t ดังสมการที่ 2.4

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (u_1 - u_2)}{sp \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (2.4)$$

โดย Sp สามารถหาได้ ดังสมการที่ 2.5

$$Sp = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (2.5)$$

โดยที่ ค่าองศาเสรี (v) ดังสมการที่ 2.6

$$v = n_1 + n_2 - 2 \quad (2.6)$$

2.4.4.5 กรณีทดสอบสถิติ F แล้วมีความแปรปรวนไม่เท่ากันใช้สถิติ t ดังสมการที่ 2.7

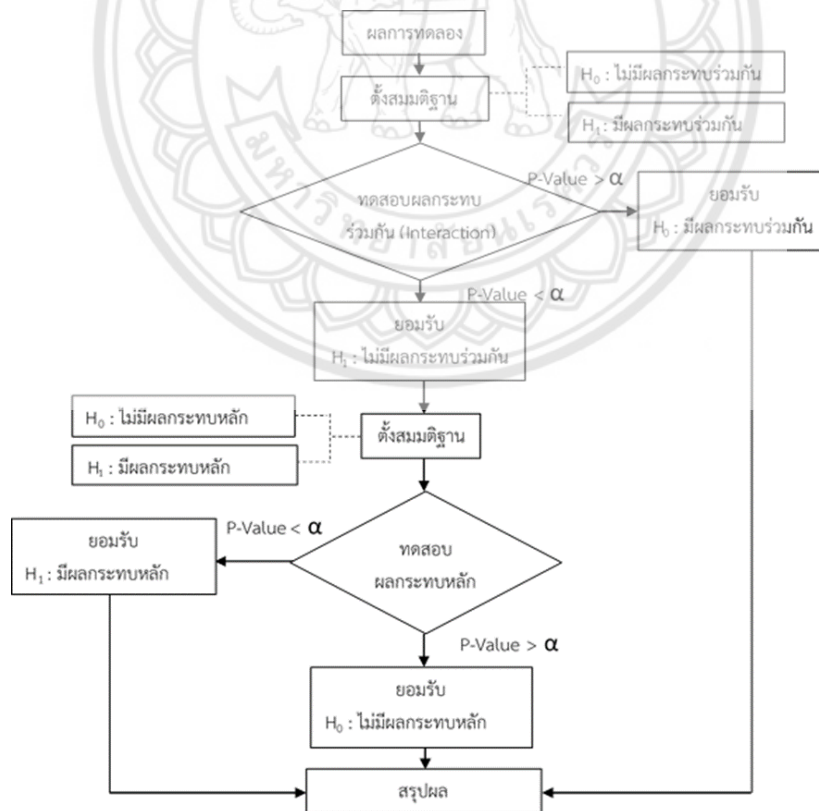
$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (u_1 - u_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (2.7)$$

โดยที่ ค่าองศาเสรี (v) ดังสมการที่ 2.8

$$v = \frac{\left[\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_1} \right]^2}{\frac{\left[\frac{S_1^2}{n_1} \right]^2}{n_1 - 1} + \frac{\left[\frac{S_2^2}{n_1} \right]^2}{n_2 - 1}} \quad (2.8)$$

2.4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way Anova)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง คือ การทดสอบปัจจัย 2 ปัจจัยพร้อมกัน โดยในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางจะตรวจสอบว่าปัจจัยมีผลกระทบร่วมกัน (Interaction) หรือไม่ แล้วถ้าปัจจัยไม่มีผลกระทบร่วมกัน จะนำไปศึกษาปัจจัยต่อว่ามีผลกระทบหลัก (Main Effect) หรือไม่ ถ้าศึกษาแล้วปัจจัยไม่มีผลกระทบหลัก สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยนี้ไม่ส่งผลต่อสมมติฐานที่ตั้งขึ้น โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง สามารถแสดงได้ตามผังการไหลตาม ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผังการไหลการทดสอบความแปรปรวนแบบสองทาง

ที่มา : ประทีน เรืองเวช (2559)

จากรูปที่ 2.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางสามารถคำนวณได้ดัง
สมการที่ 2.9 - 2.14

SS_T คือ ความแปรปรวนรวม (Total Sum of Squares : SS_T)

$$SS_T = \sum_{n=1}^n \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^k y_{ijn}^2 - \frac{y_{...}^2}{N} \quad (2.9)$$

SS_A คือ ผลรวมของค่าสังเกต ค่าในวิธีปฏิบัติที่ i ปัจจัย A

$$SS_A = \sum_{i=1}^k \frac{y_{i..}^2}{ln} - \frac{y_{...}^2}{N} \quad (2.10)$$

SS_B คือ ผลรวมของค่าสังเกต ค่าในวิธีปฏิบัติที่ j ปัจจัย B

$$SS_B = \sum_{j=1}^l \frac{y_{.j.}^2}{kn} - \frac{y_{...}^2}{N} \quad (2.11)$$

$SS_{subtotal}$ คือ ผลรวมของค่าสังเกต ค่าในวิธีปฏิบัติที่ i ปัจจัย A รวมกับค่าในวิธีปฏิบัติที่ j ปัจจัย B

$$SS_{subtotal} = \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^k \frac{y_{ij.}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{N} \quad (2.12)$$

SS_{AB} คือ ค่าผลต่างของ $SS_{subtotal} - SS_A - SS_B$

$$SS_{AB} = SS_{subtotal} - SS_A - SS_B \quad (2.13)$$

SS_{EE} คือ ค่าผลต่างของ $SS_{subtotal} - SS_{AB} - SS_A - SS_B$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad (2.14)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการคำนวณสมการที่ 2.9 – 2.14 มาสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยที่นำมาพิจารณานั้นมีผลกระทบต่อผลการทดลองหรือไม่ โดยบันทึกค่าของ SS_T , SS_A , SS_B , SS_{AB} , SS_E ในช่องของ SS จากนั้นคำนวณหาค่า df , MS , และ F_c ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง

Source	SS	df	MS	F_c
A	SS_A	$k-1$	$SS_A/(k-1)$	MS_A / MS_E^*
B	SS_B	$l-1$	$SS_B/(l-1)$	MS_B / MS_E^{**}
Interaction AB	SS_{AB}	$(k-1)(l-1)$	$SS_{AB}/(k-1)(l-1)$	MS_{AB} / MS_E^{***}
Error	SS_E	$(kl)(n-1)$	$SS_E/(kl)(n-1)$	
Total	SS_T	$N - 1$		

ที่มา : กานต์ ลีวัฒนายิ่งยง (2557)

2.4.6 การวิเคราะห์การถดถอย

2.4.6.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear Regression)

การวิเคราะห์การถดถอย เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Dependent variable) ซึ่งเป็นตัวแปรที่เปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่เรารู้จักว่า ตัวแปรอิสระ (Independent variable)

ในการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระนั้น รูปแบบของความสัมพันธ์นั้นอาจแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ 1.) มีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นเส้นตรง เรียกว่า “การถดถอยเชิงเส้นตรง” และ 2.) มีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นเส้นโค้ง นอกจากนี้การวิเคราะห์การถดถอยยังแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามจำนวนตัวแปรอิสระ คือ

ก. ถ้ามีตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียว เรียกว่า “การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression Analysis)”

ข. ถ้ามีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว เรียกว่า “การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)”

ในทางคณิตศาสตร์ ถ้าเราทราบว่าตัวแปรใดมีความสัมพันธ์กับตัวแปร จะสามารถนำมาเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ได้ การถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่ายก็เช่นเดียวกัน เราสามารถนำมาเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ แต่เนื่องจากทุกจุดบนเส้นตรงที่เป็นตัวแทนระหว่างตัวแปรทั้งสองดังกล่าวเป็นค่าที่ประมาณขึ้นจากสมการเส้นตรง ไม่ใช่ค่าที่ได้จากการสังเกต ดังนั้นสมการเส้นตรงที่เป็นตัวแทนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองจึงเป็น

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (2.15)$$

2.4.6.2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลิโนเมียลที่มีตัวแปรอิสระ 1 ตัว

การวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลิโนเมียลที่มีตัวแปรอิสระ 1 ตัว เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระเป็น x และตัวแปรตามเป็น y แบบพหาลาโบล่าเส้นโค้งโดยสามารถเขียนเป็นสมการถดถอยแบบโพลิโนเมียล ดังสมการที่ 2.16

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 \quad (2.16)$$

โดยที่ Y คือ ตัวแปรตาม

X คือ ตัวแปรอิสระ

β_0 คือ ค่าเฉลี่ยของ Y เมื่อ $X = 0$

β_1 คือ พารามิเตอร์ของอิทธิพลเชิงเส้น (Linear Effect)

β_2 คือ พารามิเตอร์ของอิทธิพลกำลังสอง (Quadratic Effect)

โดยการนำสมการถดถอยแบบโพลิโนเมียลไปทำการพยากรณ์ ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เพื่อนำสมการถดถอยแบบโพลิโนเมียลนี้ สามารถนำไปพยากรณ์ได้

2.4.6.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Sample Correlation Coefficient : r)

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ คือ ค่าที่แสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มข้อมูล โดยที่ค่าอยู่ในช่วงตัวเลขระหว่าง 0 ถึง 1 โดยแสดงรายละเอียด ดังนี้

ถ้าค่า $r = 0$ แสดงว่า ไม่มีความสัมพันธ์กัน

$r < 0.50$ แสดงว่า มีความสัมพันธ์กันต่ำ

$0.50 \leq r \leq 0.80$ แสดงว่า มีความสัมพันธ์กันปานกลาง

$r \geq 0.80$ แสดงว่า มีความสัมพันธ์กันสูง

$r > 0$ แสดงว่า ตัวแปรทั้งสองนั้นมีความสัมพันธ์ผกผันกัน ให้ทดสอบเป็นค่าสัมบูรณ์ สมการถดถอยที่สามารถนำไปใช้งานจะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า 0.8 ขึ้นไป

2.4.7 การทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย (Paired Samples T-test)

การทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยจะใช้สถิติ เพื่อทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยโดยใช้ค่าเฉลี่ยข้อมูล 2 กลุ่ม โดยคำนวณจากผลการทดลองกับค่าพยากรณ์ที่ได้จากสมการถดถอย โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.4.7.1 การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบว่าค่าผลการทดลองกับค่าพยากรณ์จากสมการถดถอยแตกต่างกันหรือไม่

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$ (ค่าผลการทดลองกับค่าพยากรณ์จากสมการถดถอยไม่แตกต่างกัน)

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ (ค่าผลการทดลองกับค่าพยากรณ์สมการถดถอยแตกต่างกัน)

โดย μ_1 คือ ค่าผลการทดลอง

μ_2 คือ ค่าพยากรณ์จากสมการถดถอย

2.4.7.2 การคำนวณค่าสถิติ (Pair Sample T-test)

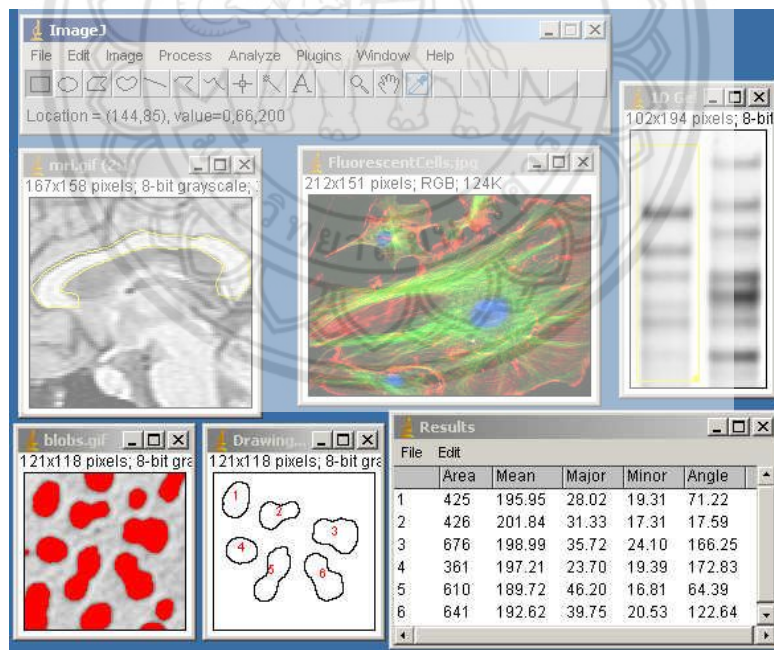
$$t = \frac{\sum D}{\sqrt{\frac{N \sum D^2 - (\sum D)^2}{N-1}}} \quad (2.17)$$

โดยที่ D คือ ได้จากค่าผลการทดลองแต่ละข้อมูล - ค่าพยากรณ์แต่ละข้อมูล

N คือ จำนวนข้อมูล

2.5 ขนาดของเกรน (Grain Size)

การโตของเกรนมีผลต่อขนาดเกรน โดยขนาดเกรนจะขึ้นอยู่กับจำนวนนิวเคลียส ถ้าจำนวนนิวเคลียสมารวมถึงขนาดในการโตของเกรนน้อย จะส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็ก และละเอียด แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าจำนวนนิวเคลียสน้อย ขนาดในการโตของเกรนมาก ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น สุดท้ายเกรนจึงหยาบมากขึ้น อัตราการเย็นตัวมีผลต่อการเกิดนิวเคลียสเช่นกัน ถ้ามีอัตราการเย็นตัวเร็ว นิวเคลียสที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมาก ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กและละเอียด แต่ถ้าอัตราการเย็นตัวช้า นิวเคลียสจึงเกิดขึ้นจำนวนน้อยลง ส่งผลให้มีขนาดใหญ่และหยาบ นอกจากนี้เกรนที่มีขนาดเล็กหรือใหญ่อาจเกิดจากปัจจัยอื่นๆ อีกหลายประการ เช่น การมีธาตุบางธาตุที่เป็นตัวเริ่มต้นของการเกิดนิวเคลียส ตัวอย่างในการผลิตเหล็กกล้า ถ้าธาตุแมกนีเซียมลงไปก่อนโลหะหลอมเหลวจะเกิดการแข็งตัว ธาตุแมกนีเซียมจะทำให้เกิดนิวเคลียสขึ้นเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กและละเอียดขึ้น เพื่อให้ทราบว่าขนาดเกรนส่งผลอย่างไรต่อคุณสมบัติของโลหะ ซึ่งจะใช้โปรแกรม ImageJ ในการหาขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โปรแกรม ImageJ ที่ใช้วิเคราะห์หาขนาดเกรน

ที่มา : Andrew (2004)

การพิจารณาขนาดเกรนนั้นจะพิจารณาจากการแยกตัวทางเคมี (Chemical Segregation) โดยขนาดเกรนที่เล็กจะเกิดจากการเย็นตัวที่เร็วหรือแข็งตัวเร็ว ทำให้เกิดนิวเคลียสจำนวนมากและขนาดเกรนมีขนาดเล็ก ส่งผลให้การกระจายตัวดี และสม่ำเสมอ ส่วนขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้นจะค่อยๆเย็นตัว ทำให้การแข็งตัวภายในโครงสร้างค่อยๆเกิดนิวเคลียสที่มีจำนวนน้อย ขนาดเกรนนั้นจึงมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้การกระจายตัวนั้นไม่สม่ำเสมอ

2.6 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

กล้องจุลทรรศน์แสง คือกล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยแสงใช้ส่องให้เห็นวัตถุขยายใหญ่กว่าเดิมโดยมีหลักการทำงาน คือ เลนส์รวมแสง กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการมองวัตถุที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเครื่องช่วยในการศึกษาลักษณะโครงสร้างของวัตถุให้ละเอียดยิ่งขึ้น ซึ่งกล้องจุลทรรศน์มีความสามารถขยายได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการแจกแจงรายละเอียด นั่นก็คือความสามารถของกล้องจุลทรรศน์ในการแยกจุดสองจุด ซึ่งอยู่ใกล้กันที่สุดที่มองเห็น แยกเป็นสองจุดได้ (Two points of discrimination) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ส่องผ่านเลนส์ ซึ่งถ้าแสงมีความยาวคลื่นที่สั้น จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรวมแสงของเลนส์วัตถุ ยิ่งมากภาพที่ได้ก็จะยิ่งคมชัดมากขึ้นตาม

2.6.1 การตัดชิ้นงาน

ในการตัดชิ้นงานเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างต้องระวังไม่ให้ชิ้นงานร้อน และห้ามตัดด้วยแก๊ส เพราะความร้อนจะเป็นสาเหตุทำให้ลักษณะโครงสร้าง ขนาดของโครงสร้างและผลึกเปลี่ยนแปลงไป การตัดนิยมใช้กันมากคือ เลื่อยมือ เครื่องเลื่อย ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และประหยัดเหมาะสำหรับตัดโลหะที่มีความแข็งต่ำกว่าใบเรื้อย

2.6.2 การขึ้นเรือนชิ้นงาน (Mounting)

การขึ้นเรือนชิ้นงานทดสอบด้วยวัสดุอื่น เช่น สารสังเคราะห์ พลาสติก หรือ เรซิน (Resin) เพื่อให้สามารถจับถือได้สะดวก และขนาดเหมาะสมกับเครื่องมือ เครื่องจักรอุปกรณ์ หรือ กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ตรวจสอบ นอกจากนี้เพื่อให้สามารถทำเครื่องหมายได้ง่าย

2.6.3 การขัดหยาบ (Grinding)

เป็นขั้นตอนในการปรับระนาบผิวให้ได้ระดับ และเป็นการขัดผิวหน้าให้เรียบโดยใช้กระดาษทรายขัดจากเบอร์กระดาษทรายที่มีความละเอียดต่ำไปจนถึงเบอร์กระดาษทรายที่มีความละเอียดสูง คือ เบอร์ 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

2.6.4 การขัดละเอียด (Polishing)

เป็นขั้นตอนในการลดรอยขีดข่วนที่เกิดจากการขัดผิวด้วยกระดาษทราย และทำให้ได้ผิวชิ้นงานที่ดีขึ้น เรียบมันเป็นเงา โดยการขัดมันมี 2 แบบ คือการขัดมันด้วยผงขัดออกไซด์ (Oxide Polishing) เช่น ผงอะลูมินา เป็นต้น และการขัดมันด้วยผงขัดเพชร (Diamond Polishing) ซึ่งการขัดมันด้วยผงขัดเพชรจะมีความสามารถในการขัดสูง และได้ระนาบดีกว่าการขัดมันด้วยผงขัดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากผงขัดมีความแข็งประมาณ 8000 HV สามารถทำให้ขัดวัสดุได้ทุกชนิด

2.6.5 การกัดกรด (Etching)

เป็นขั้นตอนในการนำชิ้นงานไปกัดกรดหรือกัดผิวหน้าด้วยสารเคมีเพื่อทำให้สามารถเห็นโครงสร้างได้เมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้กรดไฮโดรฟลูออริก

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประทีน เรืองเวช และคณะ (2559) ได้ทำการศึกษาในโครงการงานการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและความยาวของรางเทที่มีผลต่อค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสม AC2A โดยได้มีการกำหนดปัจจัยและดับปัจจัยตามลำดับต่อไปนี้ อุณหภูมิเทที่ 680 700 และ 720 องศาเซลเซียสและความยาวของรางเทที่ 150 และ 250 มิลลิเมตร โดยการทดลองได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูล ออกแบบการทดลอง ทำการทดลองและบันทึกผลจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ สร้างสมการถดถอยและทดสอบสมการถดถอย จากนั้นออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมช่วยแสดงผล ทำการสร้างโปรแกรมช่วยแสดงผลและทดสอบโปรแกรมช่วยแสดงผล สรุปการดำเนินโครงการ จากผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าความยาวของรางเทไม่มีผลกระทบบรรยากาศระหว่างอุณหภูมิ-

เทและพบว่าอุณหภูมิเทเท่านั้นที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งของอะลูมิเนียม AC2A ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (P-value=0.013) โดยโครงการนี้ได้เน้นการออกแบบการทดลองโดยประกอบไปด้วย 1.กำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัย 2.จำนวนครั้งในการทดลอง 3.ตารางบันทึกผล 4.การตั้งสมมติฐาน

อดิศร พลอินทร์ และคณะ (2557) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิเทและความยาวของรางเทที่มีผลต่อขนาด รูปร่าง และค่าความแข็งที่มีผลต่ออะลูมิเนียมผสมเกรด A319 โดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็น เพื่อศึกษาอุณหภูมิเทและความยาวรางเทมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค พื้นที่ รูปร่างของเกรนและความแข็งโดยนำชิ้นงานไปศึกษาโครงสร้างจุลภาควิเคราะห์ปัจจัยรูปร่างพื้นที่เกรนและทดสอบความแข็ง ได้ทำการทดลองจะพบว่า ที่ตำแหน่งบริเวณขอบชิ้นงาน ส่งผลให้ตำแหน่งขอบชิ้นงานมีความแข็งแรงมากที่สุดในทุกอุณหภูมิเทและความยาวของรางเทเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเทและความยาวรางเทต่างกันพบว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทมีความยาว 300 มิลลิเมตร และ ที่อุณหภูมิต่างกันที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส จะพบว่ามีรูปร่างเกรนที่มีความกลมมากและมีพื้นที่เกรนน้อยชิ้นงานมีความแข็งแรงมากที่สุด

พงศกร พงษ์พวง และคณะ (2557) ได้ทำการศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อประเภทไฮโปยูเทคติก เกรด เอ 319 ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส และความยาวรางเทเป็น 150 และ 300 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาอุณหภูมิเทและความยาวรางเทที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค พื้นที่ รูปร่างของเกรนและความแข็งของอะลูมิเนียมผสมเกรดเอ 319 จากการนำชิ้นงานไปศึกษาโครงสร้างจุลภาควิเคราะห์ปัจจัยรูปร่าง พื้นที่เกรนและทดสอบความแข็ง จากการทดลองพบว่า พบว่าชิ้นงานมีอุณหภูมิต่างกัน ผิวของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิสูง จะมีความเรียบผิวสูงและมีรูพรุนมาก โครงสร้างที่ได้มีความกลม แต่ที่อุณหภูมิเต่า โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีขนาดเล็กและมีความแข็งมาก เมื่อเทียบกับความยาวรางเทที่ต่างกัน พบว่าผิวของชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่ความยาวน้อย จะมีความเรียบผิวสูงและมีรูพรุนมาก โครงสร้างจุลภาคมีความกลม แต่ที่ความยาวรางเทมาก โครงสร้างที่ได้มีขนาดเล็ก มีความแข็งแรงมาก

กมลฤทธิ สมพิมพ์ และคณะ (2554) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิเทและความชันของรางเทที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ขึ้นรูปผ่านรางเทหล่อเย็น โดยปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลทางด้านความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ผ่านการหล่อแบบหล่อกึ่งแข็ง (Semi-Solid Casting) ด้วยวิธีเทผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Plate Technique) เมื่อรางเทมีความยาว 250 มิลลิเมตร โดยมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเท และความชันของรางเท เป็น 660 และ 680 องศาเซลเซียส และ 50 และ 70 องศาตามลำดับ จากนั้นทำการทดลองโดยกำหนดส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 นำไป

เข้าสู่กระบวนการหล่อโลหะแบบผ่านรางเทหล่อเย็น และ แบบหล่อถาวรตามระดับของปัจจัยที่กำหนดไว้ นำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค วัดขนาด รูปร่างเกรน และทดสอบความแข็งของชิ้นงาน จากการทดลองพบว่า โครงสร้างทางจุลภาคหลังผ่านกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งประกอบด้วย เฟสอะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีลักษณะกลม และมีเฟสของยู-เทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอะลูมิเนียมปฐมภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิเท และความชันของรางเทหล่อเย็น ลดลง จะทำให้เฟสอะลูมิเนียมปฐมภูมิมิขนาดเล็กลง ละเอียด และมีรูปร่างกลม ส่งผลให้สมบัติทางกลทางด้านความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้น

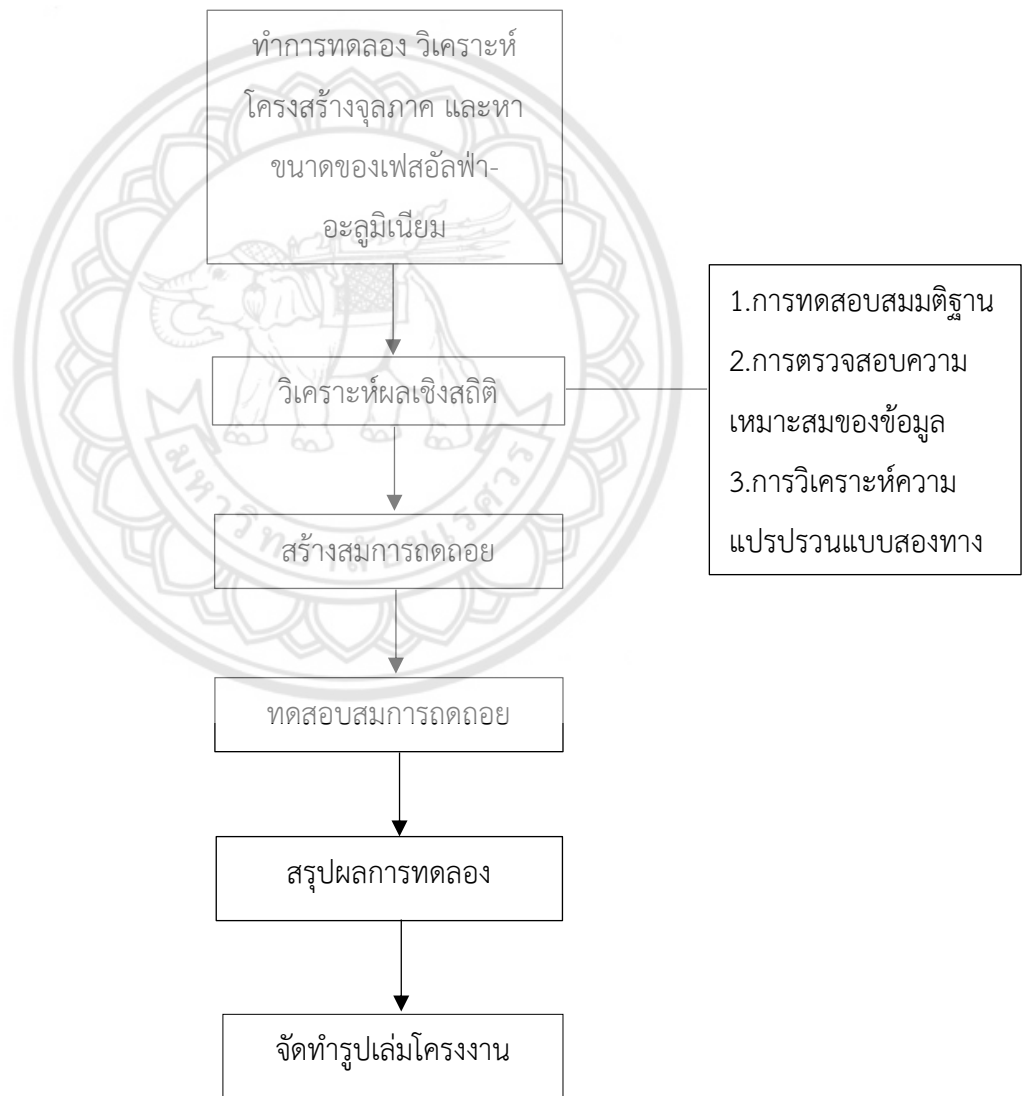
สุทธาทิพย์ ประทุมมาตร และคณะ (2556) ทำการศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อประเภทไฮโปยูเทคติก เกรด เอ 356 หลังผ่านการหล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็ง โดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็น โดยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิเท และความชันของรางเทโลหะหลอมเหลว เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทเป็น 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส และความชันของรางเทเป็น 30, 45 และ 60 องศา โดยนำชิ้นงานไปศึกษาโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ปัจจัยรูปร่าง และขนาดเกรนด้วยโปรแกรม MSQ และความแข็งของวัสดุ ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness) โดยผลการทดลองที่ได้จะพบว่าอุณหภูมิเทและความชันของรางเท ยิ่งอุณหภูมิเทต่ำและความชันรางเทที่มีความชันน้อยจะพบว่าโครงสร้างที่ได้จะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าอุณหภูมิเทที่สูงและความชันรางเทที่มาก

งานวิจัยการทดลองและการเพิ่มประสิทธิภาพของความแข็งในกระบวนการหล่อทรายโดยใช้การออกแบบวิธีการทดลองได้ทำการศึกษาระดับความแข็งที่เหมาะสมจากกระบวนการหล่อทราย โดยใช้วัสดุอะลูมิเนียม 6063 หล่อที่อุณหภูมิ 780 องศาเซลเซียส โดยมีปัจจัยและระดับปัจจัยดังต่อไปนี้ คือ มุมของรูละบาย 45 60 และ 90 องศา และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูละบาย 3, 5, 7 มิลลิเมตร การทดสอบความแข็งของชิ้นงานจะใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Krystal Brinell Hardness จากการทดลองจะพบว่าความแข็งสูงสุดของอะลูมิเนียม 6063 ในกระบวนการหล่อทรายมุมของรูละบายอากาศ 90 องศา และเส้นผ่านศูนย์กลางรูละบายอากาศขนาด 3 มิลลิเมตร คือ พารามิเตอร์และระดับพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดและเส้นผ่านศูนย์กลางรูละบายอากาศมีบทบาทสำคัญในการส่งผลต่อค่าความแข็งของอะลูมิเนียม 6063 ในกระบวนการหล่อทราย

บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงการ

สำหรับวิธีการดำเนินโครงการการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองนี้ เพื่อศึกษาอุณหภูมิ-
เท และความยาวของรางเท ที่ส่งผลต่อขนาดของเฟสอัลฟาอะลูมิเนียม โดยใช้วิธีการใช้เครื่องมือ
วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การวิเคราะห์ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม สามารถแสดงขั้นตอน
ดำเนินโครงการในรูปแบบผังแสดงขั้นตอนการดำเนินโครงการดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผังแสดงขั้นตอนการดำเนินโครงการ

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด AC2A ที่อุณหภูมิเท 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาว 150 และ 250 มิลลิเมตร ที่ตัดมาแล้วมาหาขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่ขอบชิ้นงานและกลางชิ้นงาน

3.1.2 เครื่องขัดโลหะ

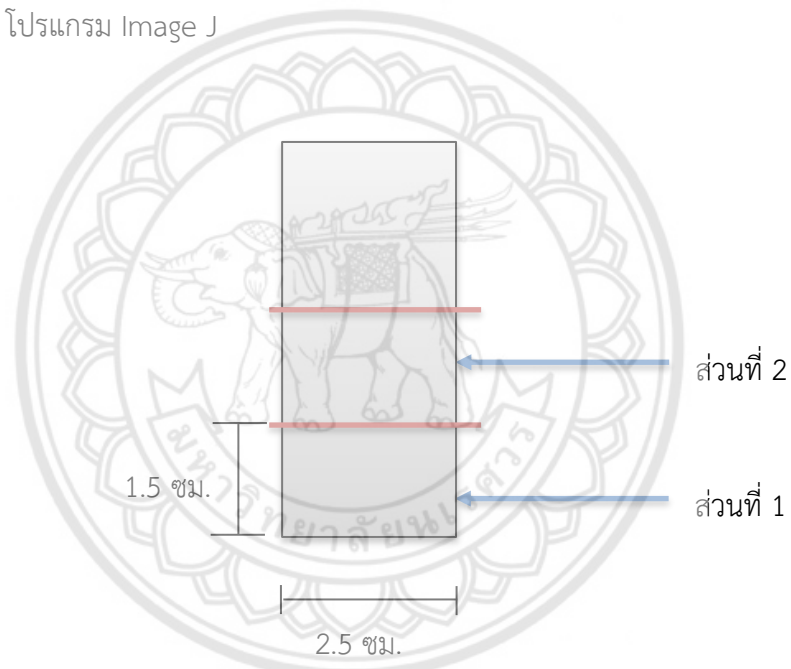
3.1.3 กระดาษทรายเบอร์ 800, 1,000 และ 1,200

3.1.4 ผงขัดอะลูมิเนียม

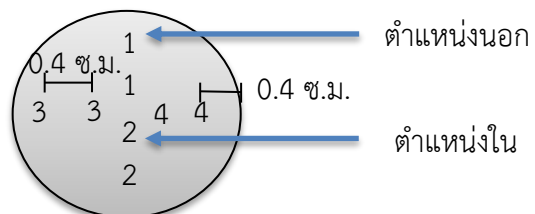
3.1.5 กล้องจุลทรรศน์แสง

3.1.6 กรดไฮโดรฟลูออริก

3.1.7 โปรแกรม Image J



รูปที่ 3.2 รูปชิ้นงานและการตัดชิ้นงาน



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งในการหาขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

ตารางที่ 3.3 (ต่อ) ตารางการบันทึกผล

ความยาวของรางเท (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ชั้น	ส่วน	ตำแหน่งนอก				ตำแหน่งใน				
				1	2	3	4	5	6	7	8	
150	700	1	1									
			2									
150	700	2	1									
			2									
250	700	1	1									
			2									
250	700	2	1									
			2									
150	720	1	1									
			2									
150	720	2	1									
			2									
250	720	1	1									
			2									
250	720	2	1									
			2									

3.4 วิเคราะห์ผลเชิงสถิติ

การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิตินำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

3.4.1 การทดสอบสมมติฐาน

เมื่อได้ผลการทดลองแล้วนำมาทำการทดสอบสมมติฐานในแต่ละเงื่อนไข ถ้าผลการทดสอบสมมติฐานมีความแตกต่างกันไม่สามารถนำผลการทดลองนี้ไปวิเคราะห์ต่อได้ แต่ถ้าไม่มีความแตกต่างกันสามารถนำผลการทดลองนี้ไปวิเคราะห์ต่อได้

โดยการทดสอบสมมติฐานถ้าผลการทดสอบสมมติฐานพบว่าค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จะสรุปได้ว่าปฏิเสธ และยอมรับแต่ถ้าค่า P-Value มากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จะปฏิเสธและยอมรับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานว่า ผลการทดลองที่ปัจจัยและระดับของปัจจัยเดียวกันมีความแตกต่างกันหรือไม่

3.4.4.4 การทดสอบสมมติฐานว่าที่ตำแหน่งของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่

โดยที่ H_0 : ตำแหน่งของชิ้นงานต่างกันไม่มีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

H_1 : ตำแหน่งของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

3.4.1.2 การทดสอบสมมติฐานว่าที่ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่

โดยที่ H_0 : ส่วนของชิ้นงานต่างกันไม่มีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

H_1 : ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

3.4.1.3 การทดสอบสมมติฐานว่าชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่

โดยที่ H_0 : ชิ้นงานต่างกันไม่มีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

H_1 : ชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

3.4.2 การตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล

ในการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล เป็นการตรวจสอบเพื่อดูว่าผลการทดลองที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อได้หรือไม่ และในการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลจะต้องผ่านเงื่อนไขทั้งหมด 3 เงื่อนไข ดังนี้

3.4.2.1 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล โดยในการวิเคราะห์ผลการทดลอง สามารถตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์กราฟการกระจายตัวแบบปกติ

3.4.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล โดยในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

สามารถตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์กราฟความเป็นอิสระของข้อมูล

3.4.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล โดยในการวิเคราะห์ผลการทดลอง สามารถตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์กราฟความเสถียรความแปรปรวนของข้อมูล ซึ่งในการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขทั้ง 3 เงื่อนไข จากนั้นนำข้อมูลผ่านการตรวจสอบแล้ว ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

3.4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ผลการทดลองที่ผ่านการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลแล้ว นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง เพื่อวิเคราะห์ว่าอุณหภูมิและความยาวของรางเท มีผลกระทบร่วมกันต่อขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่

3.4.3.1 ทั้งสองปัจจัยมีผลกระทบร่วมกันจะนำผลจากการวิเคราะห์ ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความยาวของรางเทมีผลต่อขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

3.4.3.2 ทั้งสองปัจจัยไม่มีผลกระทบร่วมกันจะนำแต่ละปัจจัยไปหาผลกระทบหลัก (Main Effect) จากนั้นนำปัจจัยที่มีผลไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กับขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

3.5 สมการถดถอย

นำปัจจัยที่มีผลกระทบร่วมกันต่อขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม มาสร้างเป็นสมการถดถอย

3.6 ทดสอบสมการถดถอย

นำค่าจากผลการทดลองมาแทนในสมการถดถอยที่ได้สร้างไว้

3.7 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็นมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขนาดเกรน ที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิและความยาวของรางเทเปลี่ยนไป และสรุปผลการทดลองว่าสมการถดถอยทำนายได้ว่าอย่างไร

3.8 จัดทำรูปเล่ม

รวบรวมข้อมูลทฤษฎีต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง วิธีดำเนินการทดลอง ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง และ สรุปผลการทดลองจัดทำเป็นรูปเล่ม



บทที่ 4

ผลการดำเนินโครงการ

4.1 โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปของอะลูมิเนียมผสม เกรด AC2A ที่ผ่านกระบวนการหล่อแข็งด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น

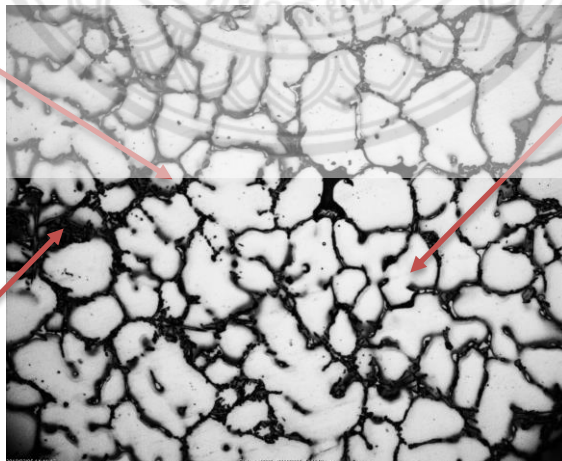
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อประเภทไฮโปยูเทคติก เกรด AC2A ที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็นพบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary - Al) และเฟสอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนยูเทคติก (Al-Si Eutectic) โดยที่เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีลักษณะกลม (Globular) และมีสีขาวกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน เนื่องจากการไหลของโลหะหลอมเหลว ทำให้เกิดความเค้นไปกระทำกับเดนไดรต์เป็นผลทำให้เดนไดรต์เกิดการแตกหักแต่บางส่วนของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ยังเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ จะเห็นโครงสร้างที่มีรูปร่างเป็นแฉก และพบเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ที่มีสีขาวสลับแทรกอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม
ปฐมภูมิที่มีลักษณะกลม

เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม
ปฐมภูมิที่มีลักษณะเป็น
แฉก

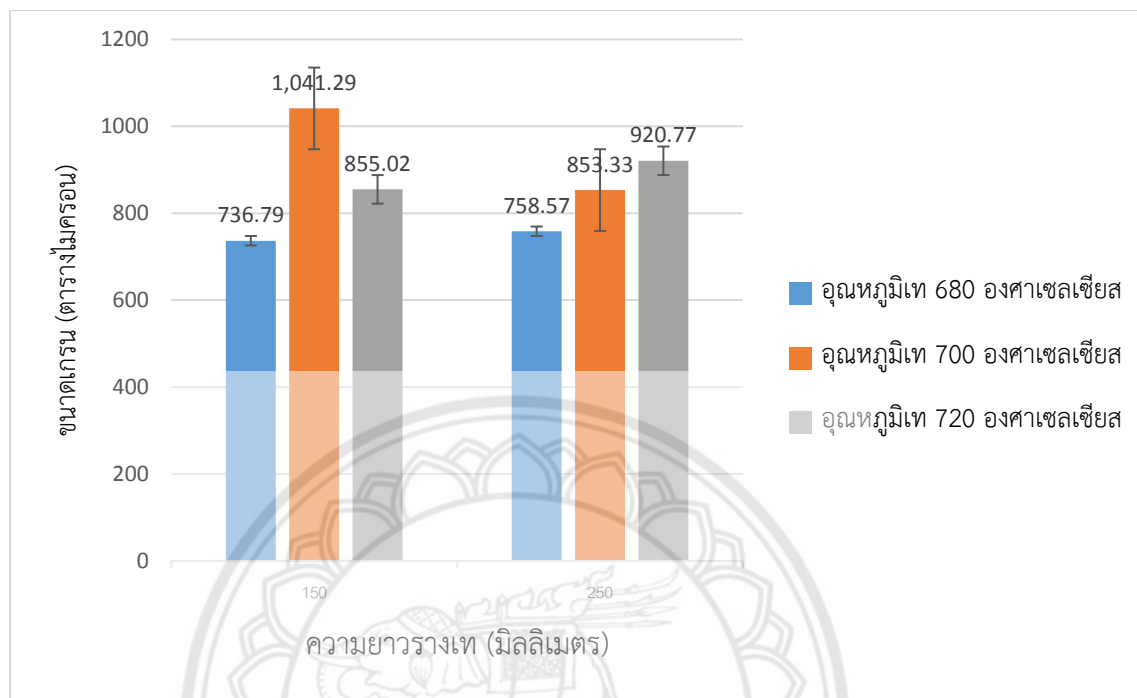
เฟสยูเทคติก

อะลูมิเนียม-ซิลิกอน



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมจากการหล่อประเภทไฮโปยูเทคติกที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร ชั้นที่ 1 ตำแหน่งนอกที่ 2

4.2 ขนาดของเกรน ณ ตำแหน่งต่างๆบนชิ้นงานและขนาดของเกรนเมื่ออุณหภูมิเทและความยาวรางแตกต่างกัน



รูปที่ 4.2 ขนาดเกรน เมื่ออุณหภูมิเทมีการเปลี่ยนแปลง โดยข้อมูลจากตารางที่ 4.1

จากการศึกษาขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม เมื่ออุณหภูมิเทมีการเปลี่ยนแปลง พบว่าจากทฤษฎีเมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงจะได้ขนาดเกรนที่ใหญ่ที่ขึ้น แสดงดังกราฟที่ความยาวรางเท 250 มิลลิเมตร แต่ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตรจะพบว่าขนาดของเกรนไม่เป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการทดลองในการหาขนาดของเฟสอะลูมิเนียม โดยความยาวรางเท 150 และ 250 มิลลิเมตร ค่าที่ได้ของขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากอุณหภูมิเทเป็นผลกระทบหลัก และความยาวรางเทเป็นผลกระทบรอง และทั้งสองส่งผลกระทบร่วมกัน ค่าของขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมจึงไม่สามารถแยกข้อมูลทั้งสองได้ชัดเจน

4.3 ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองและบันทึกผลการทดลอง ดังหัวข้อที่ 3.3 ขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่ได้จากการทดลอง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางผลการทดลอง

ความยาวของรางเท (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ชั้น	ส่วน	พินเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตารางไมครอน)							
				ตำแหน่งนอก				ตำแหน่งใน			
				1	2	3	4	5	6	7	8
150	680	1	1	659.02	629.96	575.85	699.11	806.66	721.49	788.81	726.56
			2	721.82	778.86	550.87	765.62	1,021.40	870.21	751.81	916.31
150	680	2	1	646.76	464.81	701.52	513.17	540.14	391.72	722.23	720.64
			2	892.82	994.68	918.96	816.87	812.64	901.45	856.91	697.72
250	680	1	1	969.81	961.51	974.23	910.99	744.81	894.95	920.54	932.06
			2	474.45	972.50	491.32	485.54	435.43	679.03	749.72	688.47
250	680	2	1	732.97	989.34	645.33	707.84	800.08	662.10	811.07	619.88
			2	853.99	756.10	855.88	758.27	580.76	632.00	705.56	877.78
150	700	1	1	992.99	921.54	831.44	960.08	958.20	926.17	975.59	1,009.03
			2	683.40	632.21	756.61	883.38	790.91	783.23	727.57	943.00
150	700	2	1	1,236.37	1,114.76	1,237.76	1,471.04	1,510.48	936.62	2,116.69	1,086.41
			2	1,204.68	897.30	1,151.15	1,133.59	1,419.39	1,034.79	928.07	1,066.84

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ตารางผลการทดลอง

ความยาวของรางเท (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ชั้น	ส่วน	ขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตารางไมครอน)							
				ตำแหน่งนอก				ตำแหน่งใน			
				1	2	3	4	5	6	7	8
250	700	1	1	670.36	885.32	729.15	729.24	721.23	599.63	772.34	819.66
			2	892.23	634.54	558.44	497.99	628.56	539.21	667.78	548.25
250	700	2	1	889.58	1,038.75	848.19	851.35	842.87	890.02	530.73	772.33
			2	1,051.94	1,218.22	1,867.45	1,141.94	1,222.11	847.32	1,164.88	1,234.79
150	720	1	1	984.97	698.48	790.82	949.79	1,067.79	818.93	816.17	762.05
			2	746.99	806.52	596.67	995.45	1,149.75	901.50	1085.66	901.34
150	720	2	1	642.62	693.06	475.88	504.66	633.87	686.31	591.53	678.13
			2	991.15	954.37	1153.72	1,147.23	1,166.90	822.07	981.27	1,165.05
250	720	1	1	800.30	1,053.14	1,111.60	831.28	1,348.62	981.44	1,119.28	1,683.38
			2	690.06	437.50	628.12	586.64	1,032.28	664.37	823.91	760.31
250	720	2	1	605.16	811.05	713.55	750.65	798.31	723.30	847.53	840.44
			2	1,849.38	885.93	995.33	1,022.43	953.56	1,202.15	956.05	957.54

4.4 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ

4.4.1 ผลการทดสอบสมมติฐาน

4.4.1.1 การทดสอบสมมติฐานว่าผลการทดลองที่ปัจจัยและระดับของปัจจัยเดียวกัน มีความแตกต่างกันหรือไม่

ก. การทดสอบสมมติฐานว่าตำแหน่งของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ ดังตารางที่ 4.2

โดยที่ H_0 : ตำแหน่งของชิ้นงานต่างกันไม่มีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

H_1 : ตำแหน่งของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม



ตารางที่ 4.2 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ตำแหน่งของชิ้นงานที่ต่างกันให้ผลค่า
ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม แตกต่างกันหรือไม่

ความยาวของรางเท (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ชั้น	ส่วน	พื้นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตารางไมครอน)								P-value
				1	2	3	4	5	6	7	8	
150	680	1	1	659.02	629.96	575.85	699.11	806.66	721.49	788.81	726.56	<u>*0.012</u>
			2	721.82	778.86	550.87	765.62	1,021.40	870.21	751.81	916.31	0.052
150	680	2	1	646.76	464.81	701.52	513.17	540.14	391.72	722.23	720.64	0.905
			2	892.82	994.68	918.96	816.87	812.64	901.45	856.91	697.72	0.171
250	680	1	1	969.81	961.51	974.23	910.99	744.81	894.95	920.54	932.06	0.128
			2	474.45	972.50	491.32	485.54	435.43	679.03	749.72	688.47	0.826
250	680	2	1	732.97	989.34	645.33	707.84	800.08	662.10	811.07	619.88	0.630
			2	853.99	756.10	855.88	758.27	580.76	632.00	705.56	877.78	0.181

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ตำแหน่งของชิ้นงานที่ต่างกันให้ผลค่า
ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม แตกต่างกันหรือไม่

ความยาวของรางเท (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ชั้น	ส่วน	พื้นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตารางไมครอน)								P-value
				1	2	3	4	5	6	7	8	
150	700	1	1	992.99	921.54	831.44	960.08	958.20	926.17	975.59	1,009.00	0.336
			2	683.40	632.21	756.61	883.38	790.91	783.23	727.57	943.00	0.351
150	700	2	1	1,236.40	1,114.80	1,237.80	1,471.00	1,510.50	936.62	2,116.70	1,086.40	0.628
			2	1,204.70	897.30	1,151.20	1,133.60	1,419.40	1,034.80	928.07	1,066.80	0.906
250	700	1	1	670.36	885.32	729.15	729.24	721.23	599.63	772.34	819.66	0.715
			2	892.23	634.54	558.44	497.99	628.56	539.21	667.78	548.25	0.608
250	700	2	1	889.58	1,038.80	848.19	851.35	842.87	890.02	530.73	772.33	0.157
			2	1,051.90	1,218.20	1,867.50	1,141.90	1,222.10	847.32	1,164.90	1,234.80	0.365

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ตำแหน่งของชิ้นงานที่ต่างกันให้ผลค่า
ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม แตกต่างกันหรือไม่

ความยาวของรางเท (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ชั้น	ส่วน	พื้นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตารางไมครอน)								P-value
				1	2	3	4	5	6	7	8	
150	720	1	1	984.97	698.48	790.82	949.79	1,067.80	818.93	816.17	762.05	0.919
			2	746.99	806.52	596.67	995.45	1,149.80	901.50	1085.7	901.34	0.076
150	720	2	1	642.62	693.06	475.88	504.66	633.87	686.31	591.53	678.13	0.275
			2	991.15	954.37	1,153.70	1,147.20	1,166.90	822.07	981.27	1,165.10	0.786
250	720	1	1	800.30	1,053.10	1,111.60	831.28	1,348.60	981.44	1,119.30	1,683.40	0.100
			2	690.06	437.50	628.12	586.64	1,032.30	664.37	823.91	760.31	<u>*0.048</u>
250	720	2	1	605.16	811.05	713.55	750.65	798.31	723.30	847.53	840.44	0.163
			2	1,849.40	885.93	995.33	1,022.40	953.56	1,202.20	956.05	957.54	0.512

จากผลการทดสอบสมมติฐานในตาราง พบว่า มีบางเงื่อนไขที่สรุปว่าตำแหน่งชิ้นงานที่ต่างกัน ให้ผลขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่ต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เนื่องจากมีบางค่า (ค่า P-Value*) มีค่าต่ำกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่า ตำแหน่งของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม จึงไม่สามารถนำตำแหน่งนอก และตำแหน่งในมารวมกันได้

ข. การทดสอบสมมติฐานว่าที่ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ ดังตารางที่ 4.3 - 4.6

โดยที่ H_0 : ส่วนของชิ้นงานต่างกันไม่มีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-

อะลูมิเนียม

H_1 : ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-

อะลูมิเนียม

ตารางที่ 4.3 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ส่วนชิ้นงานที่ต่างกันให้ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม แตกต่างกันหรือไม่ โดยทดสอบตำแหน่งนอกของชิ้นที่ 1

ความยาวรางเท	อุณหภูมิเท	ชิ้น	ส่วน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตำแหน่งนอก)				P-value
				1	2	3	4	
150	680	1	1	659.02	629.96	575.85	699.11	0.322
			2	721.82	778.86	550.87	765.62	
250	680	1	1	969.81	961.51	974.23	910.99	0.066
			2	474.45	972.50	491.32	485.54	
150	700	1	1	992.99	921.54	831.44	960.08	<u>*0.027</u>
			2	683.40	632.21	756.61	883.38	

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ส่วนชิ้นงานที่ต่างกันให้ขนาดของ เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม แตกต่างกันหรือไม่ โดยทดสอบตำแหน่งนอกของ ชั้นที่ 1

ความยาวรางเท	อุณหภูมิเท	ชั้น	ส่วน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตำแหน่งนอก)				P-value
				1	2	3	4	
250	700	1	1	670.36	885.32	729.15	729.24	0.315
			2	892.23	634.54	558.44	497.99	
150	720	1	1	984.97	698.48	790.82	949.79	0.358
			2	746.99	806.52	596.67	995.45	
250	720	1	1	800.30	1,053.14	1,111.60	831.28	<u>*0.009</u>
			2	690.06	437.50	628.12	586.64	

จากผลการทดสอบสมมติฐานในตารางที่ 4.3 พบว่า มีบางเงื่อนไขที่สรุปว่าส่วนของชิ้นงานที่ต่างกันให้ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่ต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีบางค่า (ค่า P-Value*) ที่ค่าต่ำกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่า ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม จึงไม่สามารถนำส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 2 มารวมกันได้

ตารางที่ 4.4 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อ ขนาดของเฟส-อัลฟาอะลูมิเนียมหรือไม่ โดยทดสอบตำแหน่งในของชั้นที่ 1

ความยาวรางเท	อุณหภูมิเท	ชั้น	ส่วน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตำแหน่งใน)				P-value
				5	6	7	8	
150	680	1	1	806.66	721.49	788.81	726.56	0.075
			2	1,021.40	870.21	751.81	916.31	
250	680	1	1	744.81	894.95	920.54	932.06	<u>*0.028</u>
			2	435.43	679.03	749.72	688.47	

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟส-อัลฟาอะลูมิเนียมหรือไม่ โดยทดสอบตำแหน่งในของชั้นที่ 1

ความยาวรางเท	อุณหภูมิเท	ชั้น	ส่วน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตำแหน่งใน)				P-value
				5	6	7	8	
150	700	1	1	958.20	926.17	975.59	1,009.03	<u>*0.019</u>
			2	790.91	783.23	727.57	943.00	
250	700	1	1	721.23	599.63	772.34	819.66	0.058
			2	628.56	539.21	667.78	548.25	
150	720	1	1	1,067.79	818.93	816.17	762.05	0.176
			2	1,149.75	901.50	1,085.66	901.34	
250	720	1	1	1,348.62	981.44	1,119.28	1,683.38	<u>*0.036</u>
			2	1,032.28	664.37	823.91	760.31	

จากผลการทดสอบสมมติฐานในตารางที่ 4.4 พบว่า มีบางเงื่อนไขที่สรุปว่าส่วนของชิ้นงานที่ต่างกันให้ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่ต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ค่าส่วนใหญ่ (ค่า P-Value*) มีค่าต่ำกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่า ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม จึงไม่สามารถนำส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 2 มารวมกันได้

ตารางที่ 4.5 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่าที่ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ โดยทดสอบตำแหน่งนอกของชั้นที่ 2

ความยาวรางเท	อุณหภูมิเท	ชั้น	ส่วน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตำแหน่งนอก)				P-value
				5	6	7	8	
150	680	1	1	646.76	464.81	701.52	513.17	<u>*0.003</u>
			2	892.82	994.68	918.96	816.87	

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่าที่ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ โดยทดสอบตำแหน่งนอกของชั้นที่ 2

ความยาวรางเท	อุณหภูมิเท	ชั้น	ส่วน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตำแหน่งนอก)				P-value
				5	6	7	8	
250	680	1	1	732.97	989.34	645.33	707.84	0.662
			2	853.99	756.10	855.8	758.27	
150	700	1	1	1,236.37	1,114.76	1,237.76	1,471.04	0.147
			2	1,204.68	897.30	1,151.15	1,133.59	
250	700	1	1	889.58	1,038.75	848.19	851.35	0.119
			2	1,051.94	1,218.22	1,867.45	1,141.94	
150	720	1	1	642.62	693.06	475.88	504.66	<u>*0.001</u>
			2	991.15	954.37	1,153.72	1,147.23	
250	720	1	1	605.16	811.05	713.55	750.65	0.131
			2	1,849.38	885.93	995.33	1,022.43	

จากผลการทดสอบสมมติฐานในตารางที่ 4.5 พบว่า มีบางเงื่อนไขที่สรุปว่าส่วนของชิ้นงานที่ต่างกันให้ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่ต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 บางค่า (ค่า P-Value*) มีค่าต่ำกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่า ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม จึงไม่สามารถนำส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 2 มารวมกันได้

ตารางที่ 4.6 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ โดยทดสอบตำแหน่งในของชิ้นที่ 2

ความยาวรางเท	อุณหภูมิเท	ชิ้น	ส่วน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตำแหน่งใน)				P-value
				5	6	7	8	
150	680	1	1	540.14	391.72	722.23	720.64	<u>*0.049</u>
			2	812.64	901.45	856.91	697.72	
250	680	1	1	800.08	662.10	811.07	619.88	0.774
			2	580.76	632.00	705.56	877.78	
150	700	1	1	1,510.48	936.62	211.69	1,086.41	0.333
			2	1,419.39	1,034.79	928.07	1,066.84	
250	700	1	1	842.87	890.02	530.73	772.33	<u>*0.025</u>
			2	1,222.11	847.32	1,164.88	1,234.79	
150	720	1	1	633.87	686.31	591.53	678.13	<u>*0.020</u>
			2	1166.90	822.07	981.27	1,165.05	
250	720	1	1	798.31	723.30	847.53	840.44	<u>*0.019</u>
			2	953.56	1,202.15	956.05	957.54	

จากผลการทดสอบสมมติฐานในตารางที่ 4.6 พบว่ามีบางเงื่อนไขที่สรุปว่าส่วนของชิ้นงานที่ต่างกันให้ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่ต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ค่าส่วนใหญ่ (ค่า P-Value*) มีค่าต่ำกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่า ส่วนของชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม จึงไม่สามารถนำส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 2 มารวมกันได้

ค. การทดสอบสมมติฐานว่าชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ ดังตารางที่ 4.7 – 4.10

โดยที่ H_0 : ชิ้นงานต่างกันไม่มีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

H_1 : ชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

ตารางที่ 4.7 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ โดยทดสอบส่วนที่ 1 และตำแหน่งนอกของชิ้นงาน

ความยาวรางเท	อุณหภูมิเท	ชิ้น	ส่วน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตำแหน่งนอก)				P-value
				5	6	7	8	
150	680	1	1	659.02	629.96	575.85	699.11	0.369
			2	646.76	464.81	701.52	513.17	
250	680	1	1	969.81	961.51	974.23	910.99	0.096
			2	732.97	989.34	645.33	707.84	
150	700	1	1	992.99	921.54	831.44	960.08	<u>*0.006</u>
			2	1,236.37	1,114.76	1,237.76	1,471.04	
250	700	1	1	670.36	885.32	729.15	729.24	0.054
			2	889.58	1,038.75	848.19	851.35	
150	720	1	1	984.97	698.48	790.82	949.79	<u>*0.018</u>
			2	642.62	693.06	475.88	504.66	
250	720	1	1	800.30	1,053.14	1,111.60	831.28	<u>*0.043</u>
			2	605.16	811.05	713.55	750.65	

จากผลการทดสอบสมมติฐานในตารางที่ 4.7 พบว่ามีบางเงื่อนไขที่สรุปว่าชิ้นงานที่ต่างกันให้ผลขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ค่าส่วนใหญ่ (ค่า P-Value*) มีค่าต่ำกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่า ชิ้นงานที่ต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม จึงไม่สามารถนำชิ้นงานชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 2 มารวมกันได้

ตารางที่ 4.8 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ โดยทดสอบส่วนที่ 1 และตำแหน่งในของชิ้นงาน

ความยาวรางเท	อุณหภูมิเท	ชั้น	ส่วน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม				P-value
				(ตำแหน่งใน)				
				5	6	7	8	
150	680	1	1	806.66	721.49	788.81	726.56	0.136
			2	540.14	391.72	722.23	720.64	
250	680	1	1	744.81	894.95	920.54	932.06	0.061
			2	800.08	662.10	811.07	619.88	
150	700	1	1	958.20	926.17	975.59	1,009.03	0.191
			2	1,510.48	936.62	2,116.69	1,086.41	
250	700	1	1	721.23	599.63	772.34	819.66	0.752
			2	842.87	890.02	530.73	772.33	
150	720	1	1	1,067.79	818.93	816.17	762.05	0.056
			2	633.87	686.31	591.53	678.13	
250	720	1	1	1,348.62	981.44	1,119.28	1,683.38	0.054
			2	798.31	723.30	847.53	840.44	

จากตารางที่ 4.8 พบว่า ผลการทดสอบสมมติฐานทุกเงื่อนไขของชิ้นงานต่างกันให้ผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมไม่แตกต่างกันระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า (ค่าP-value*) มีค่ามากกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่าตำแหน่งของชิ้นงานต่างกันไม่มีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ดังนั้น สามารถนำค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมของชิ้นงานชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 รวมกันได้

ตารางที่ 4.9 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ โดยทดสอบส่วนที่ 2 และตำแหน่งนอกของชิ้นงาน

ความยาวรางเท	อุณหภูมิเท	ชั้น	ส่วน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตำแหน่งนอก)				P-value
				5	6	7	8	
150	680	1	1	721.82	778.86	550.87	765.62	<u>*0.020</u>
			2	892.82	994.68	918.96	816.87	
250	680	1	1	474.45	972.50	491.32	485.54	0.209
			2	853.99	756.10	855.88	758.27	
150	700	1	1	683.40	632.21	756.61	883.38	<u>*0.006</u>
			2	1,204.68	897.30	1,151.15	1,133.59	
250	700	1	1	892.23	634.54	558.44	497.99	<u>*0.017</u>
			2	1,051.94	1,218.22	1,867.45	1,141.84	
150	720	1	1	746.99	806.52	596.67	995.45	<u>*0.030</u>
			2	991.15	954.37	1,153.72	1,147.23	
250	720	1	1	690.06	437.50	628.12	586.64	0.078
			2	1,849.38	885.93	995.33	1,022.43	

จากผลการทดสอบสมมติฐานในตารางที่ 4.9 พบว่ามีบางเงื่อนไขที่สรุปว่าชิ้นงานที่ต่างกันให้ผลขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ค่าส่วนใหญ่ (ค่า P-Value*) มีค่าต่ำกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่า ชิ้นงานที่ต่างกันไม่มีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม จึงไม่สามารถนำชิ้นงานชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 2 มารวมกันได้

ตารางที่ 4.10 ตารางผลการทดสอบสมมติฐานว่า ชิ้นงานต่างกันมีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่โดยทดสอบส่วนที่ 2 และตำแหน่งในของชิ้นงาน

ความยาวรางเท	อุณหภูมิเท	ชั้น	ส่วน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (ตำแหน่งใน)				P-value
				5	6	7	8	
150	680	1	1	1,021.40	870.21	751.81	916.31	0.0345
			2	812.64	901.45	856.91	697.72	
250	680	1	1	435.43	679.03	749.72	688.47	0.545
			2	580.76	632.00	705.56	877.78	
150	700	1	1	790.91	783.23	727.57	943.00	<u>*0.041</u>
			2	1,419.39	1,034.79	928.07	1,066.84	
250	700	1	1	628.56	539.21	667.78	548.25	<u>*0.002</u>
			2	1,222.11	847.32	1,164.88	1,234.79	
150	720	1	1	1,149.75	901.50	1,085.66	901.34	0.824
			2	1,166.90	822.07	981.27	1,165.05	
250	720	1	1	1,032.28	664.37	823.91	760.31	0.094
			2	953.56	1,202.15	956.05	957.54	

จากผลการทดสอบสมมติฐานในตารางที่ 4.10 พบว่ามีบางเงื่อนไขที่สรุปว่าชิ้นงานที่ต่างกันให้ผลขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 บางค่า (ค่า P-Value*) มีค่าต่ำกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่า ชิ้นงานที่ต่างกันไม่มีผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม จึงไม่สามารถนำชิ้นงานชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 2 มารวมกันได้

ดังนั้น สามารถสรุปการทดสอบสมมติฐานว่าผลการทดลองที่ปัจจัยและระดับของปัจจัยเดียวกันมีความแตกต่างกันหรือไม่ ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ตารางการทดสอบสมมติฐานว่าผลการทดลองที่ปัจจัยและระดับของปัจจัยเดียวกันมีความแตกต่างกันหรือไม่

สมมติฐาน	การทดสอบสมมติฐานจากตาราง	ผลการทดสอบสมมติฐาน
ก	4.2 ตำแหน่งของชิ้นงานที่ต่างกัน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมแตกต่างกัน
ข	4.3 ส่วนชิ้นงานต่างกัน ทดสอบตำแหน่งนอกชั้นที่ 1	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมแตกต่างกัน
	4.4 ส่วนชิ้นงานต่างกัน ทดสอบตำแหน่งในชั้นที่ 1	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมแตกต่างกัน
	4.5 ส่วนชิ้นงานต่างกัน ทดสอบตำแหน่งนอกชั้นที่ 2	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมแตกต่างกัน
	4.6 ส่วนชิ้นงานต่างกัน ทดสอบตำแหน่งนอกชั้นที่ 2	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมแตกต่างกัน
ค	4.7 ชิ้นงานต่างกัน ทดสอบส่วนที่ 1 กับตำแหน่งนอก	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมแตกต่างกัน
	4.8 ชิ้นงานต่างกัน ทดสอบส่วนที่ 1 กับตำแหน่งใน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมไม่แตกต่างกัน
	4.9 ชิ้นงานต่างกัน ทดสอบส่วนที่ 2 กับตำแหน่งนอก	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมแตกต่างกัน
	4.10 ชิ้นงานต่างกัน ทดสอบส่วนที่ 2 กับตำแหน่งใน	ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.11 เป็นการสรุปถึงสมมติฐานทั้งหมดที่ได้ตั้งขึ้นว่าผลการทดลองที่ปัจจัยและระดับของปัจจัยเดียวกันมีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยสรุปได้ว่า สมมติฐาน ค ตารางที่ 4.8 ชั้นงานต่างกันทดสอบส่วนที่ 1 กับตำแหน่งในขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมไม่แตกต่างกัน จึงนำข้อมูลในตารางที่ 4.8 ไปตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลต่อ

ดังนั้น ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่ได้จาก ชั้นงานต่างกัน ทดสอบส่วนที่ 1 กับตำแหน่งในขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมไม่แตกต่างกัน จึงเป็นที่มาข้อมูล ตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ตารางขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่สามารถนำไปทดสอบสมมติฐาน

ความยาวของรางเท (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ชั้น	ส่วน	ขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม			
				ตำแหน่งใน			
				5	6	7	8
150	680	1	1	806.66	721.49	788.81	726.56
		2	1	540.14	391.72	722.23	720.64
250	680	1	1	744.81	894.95	920.54	932.06
		2	1	800.08	662.10	811.07	619.88
150	700	1	1	958.20	926.17	975.59	1,009.03
		2	1	1,510.48	936.62	2,116.69	1,086.41
250	700	1	1	721.23	599.63	772.34	819.66
		2	1	842.87	890.02	530.73	772.33
150	720	1	1	1,067.79	818.93	816.17	762.05
		2	1	633.87	686.31	591.53	678.13
250	720	1	1	1,348.62	981.44	1,119.28	1,683.38
		2	1	798.31	723.30	847.53	840.44

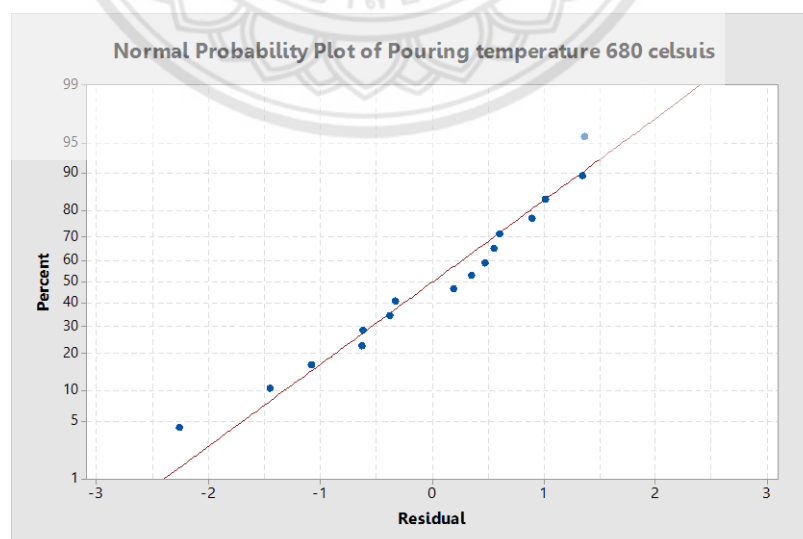
จากการทดสอบสมมติฐานข้างต้นที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าค่าจากตารางที่ 4.12 ขึ้นงานต่างกัน ทดสอบส่วนที่ 1 กับตำแหน่งใน ได้ผลลัพธ์คือขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมไม่แตกต่างกัน สามารถนำไปวิเคราะห์ต่อได้ว่าเหตุใดขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมถึงไม่แตกต่างกัน โดยจะนำไปตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลต่อไป

4.5 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล

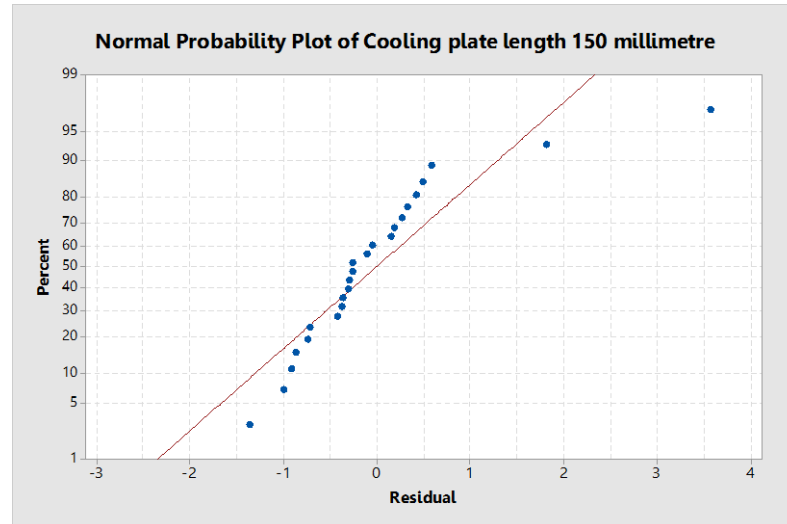
นำผลการทดลองที่ผ่านการทดสอบสมมติฐาน ดังตารางที่ 4.12 นำไปตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล โดยจะตรวจสอบทุกระดับอุณหภูมิเท และความยาวของรางเททุกระดับ โดยแสดงตัวอย่างผลการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส และความยาวรางเทที่ 150 มิลลิเมตร ดังนี้

4.5.1 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส และความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร

การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูลที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.3 และความยาวรางเทที่ 150 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.4 พบว่าค่าตกค้างของข้อมูลขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่แสดงบนกราฟมีลักษณะการเรียงตัวแบบเส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลมีลักษณะการกระจายแบบปกติ



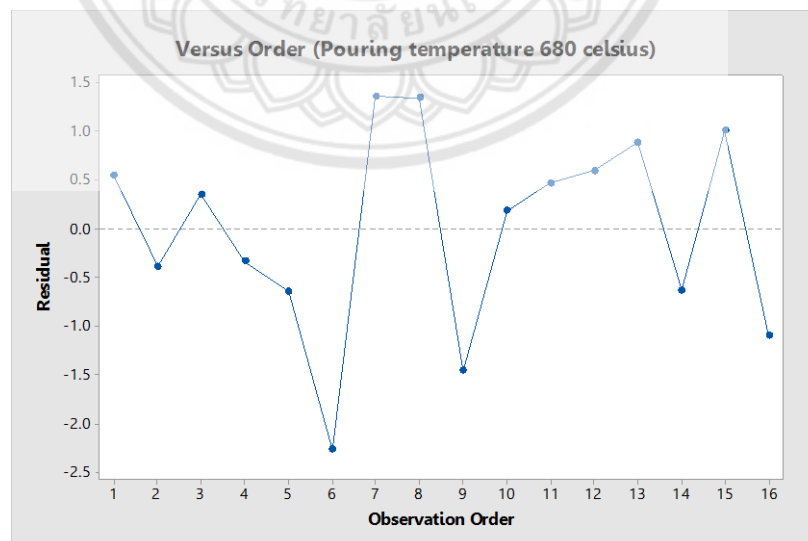
รูปที่ 4.3 กราฟกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 กราฟกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล ที่ความยาวของรางเท 150 มิลลิเมตร

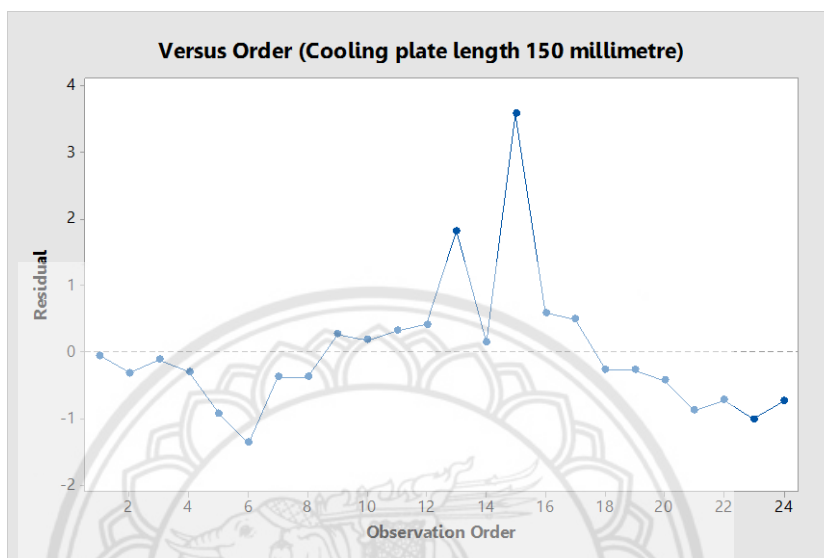
4.5.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียสและความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.5 พบว่า ค่าตกค้างของข้อมูลของค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่แสดงบนกราฟมีลักษณะการกระจายอย่างสม่ำเสมอ และไม่สามารถคาดการณ์แนวโน้มของกราฟ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระของข้อมูล



รูปที่ 4.5 กราฟการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส

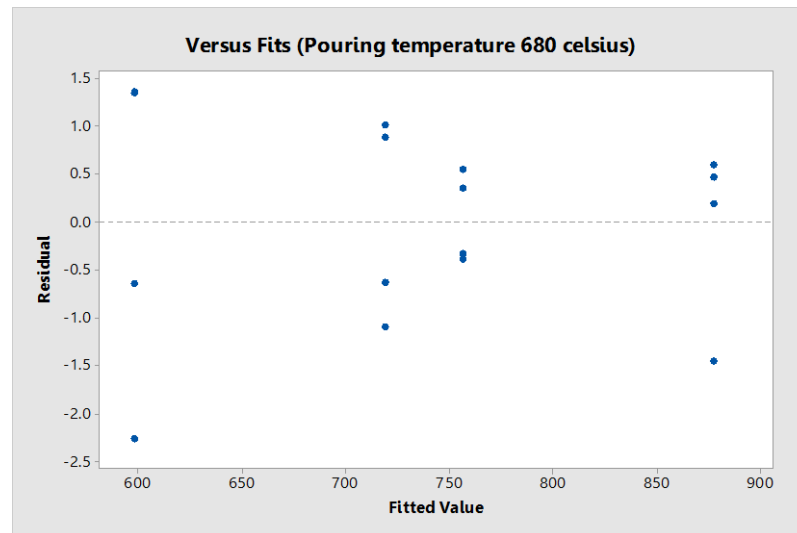
การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลที่มีความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.6 พบว่า ค่าตกค้างของข้อมูลของค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่แสดงบนกราฟมีลักษณะการกระจายอย่างสม่ำเสมอ และไม่สามารถคาดการณ์แนวโน้มของกราฟ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระของข้อมูล



รูปที่ 4.6 กราฟการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ที่ความยาวของรางเท 150 มิลลิเมตร

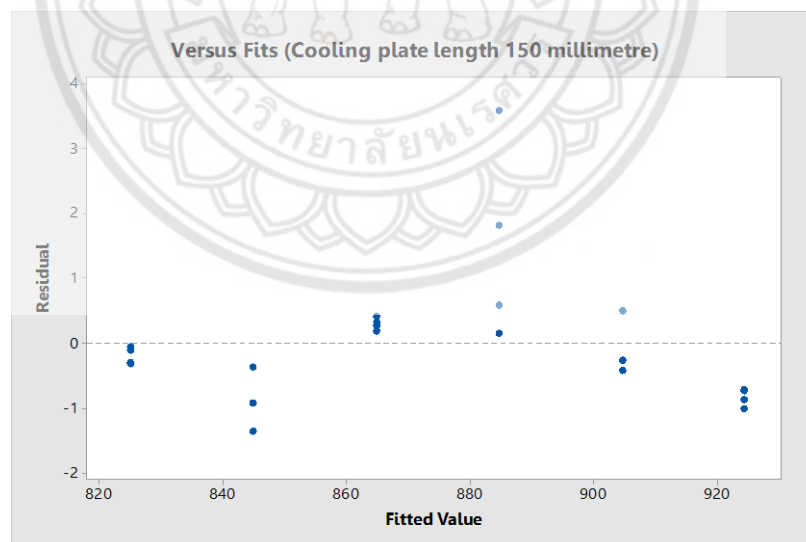
4.5.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียสและความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร

การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูลที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.3 กับ 4.5 พบว่า ค่าตกค้างของข้อมูลของค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ที่แสดงบนกราฟมีลักษณะการกระจายสม่ำเสมอในทางด้านบวกและทางด้านลบ แสดงว่า ข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



รูปที่ 4.7 กราฟการตรวจสอบความเสถียรของข้อมูล ที่ความยาวของรางเท 680 องศาเซลเซียส

การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.4 กับ 4.6 พบว่า ค่าตกค้างของข้อมูลของค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ที่แสดงบนกราฟมีลักษณะการกระจายสม่ำเสมอในทางด้านบวกและทางด้านลบ แสดงว่า ข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



รูปที่ 4.8 กราฟตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร

โดยในโครงการนี้ได้ตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลอุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส และความยาวของรางเท 150 โดยสามารถสรุปผลการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล ดังตารางที่ 4.13 และการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลที่อุณหภูมิเท 700 และ 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 250 มิลลิเมตร แสดงดังภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.13 ตารางสรุปผลการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลทุกระดับอุณหภูมิเท และทุกระดับความยาวของรางเท

การตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล	อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)			ความยาวของ รางเท (มิลลิเมตร)	
	680	700	720	150	250
การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล	✓	✓	✓	✓	✓
การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล	✓	✓	✓	✓	✓
การตรวจสอบความเสถียรความแปรปรวนของข้อมูล	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ ✓ ผ่านการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล

4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง

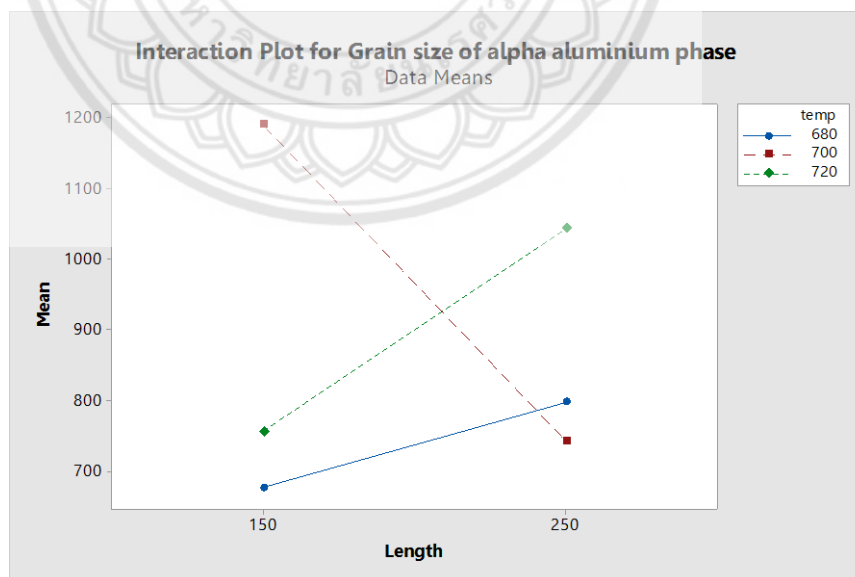
นำผลการทดลองที่ผ่านการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลแล้ว มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง เพื่อวิเคราะห์ว่าอุณหภูมิเทและความยาวของรางเท มีผลกระทบร่วมกันต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมหรือไม่ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ตารางแสดงวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง

แหล่งข้อมูล	df	SS	MS	F	P-Value
อุณหภูมิเท (Temperature)	2	443,730.90	221,865.45	3.74	0.032
ความยาวของรางเท (Length)	1	2,075.33	2,075.33	0.04	0.852
ผลกระทบร่วมกัน (Interaction)	2	1,180,169.31	590,084.66	9.96	0.000
ค่าผิดพลาด (Error)	42	2,489,254.73			
รวมทั้งหมด (Total)	47	4,115,230.27			

จากตารางที่ 4.14 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง สามารถสรุปได้ ดังนี้ จากค่า P-value สามารถบอกได้ว่าอุณหภูมิเทเป็นผลกระทบหลัก และความยาวรางเทเป็นผลกระทบรอง ซึ่งทั้งสองส่งผลกระทบร่วมกัน

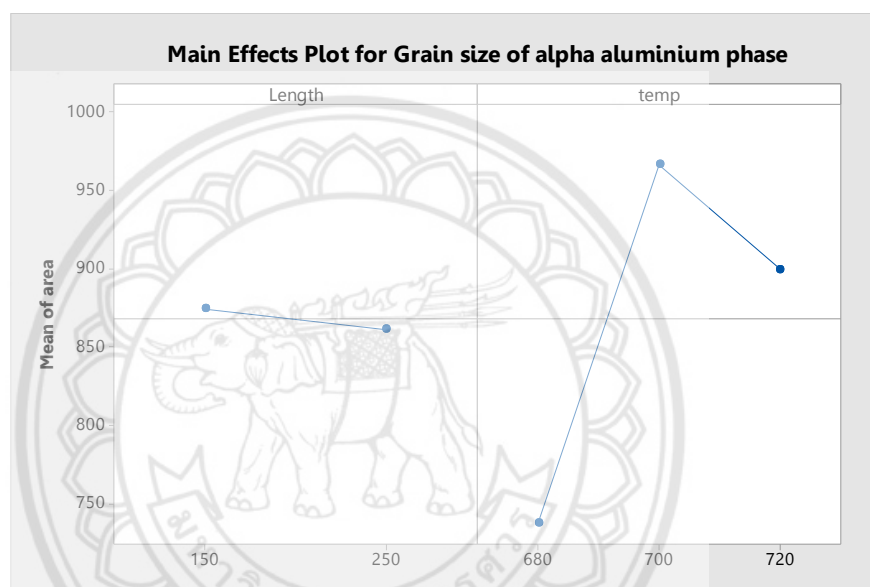
4.6.1 จากผลกระทบร่วมกันระหว่างอุณหภูมิเทและความยาวของรางเทที่มีผลต่อค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม พบว่า อุณหภูมิเทและความยาวของรางเทมีผลกระทบร่วมกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (P-Value = 0.00) ซึ่งสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์แสดงผลกระทบร่วมกัน

จากกราฟแสดงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบร่วมกัน คือเส้นที่เชื่อมระหว่างค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ทั้ง 2 ปัจจัยซึ่งมีจุดตัดกัน จึงส่งผลให้ทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยนำค่า P-value จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางมาเขียนกราฟ แสดงให้เห็นว่าเส้นเชื่อมที่มีจุดตัดกันจะมีผลกระทบร่วมกัน

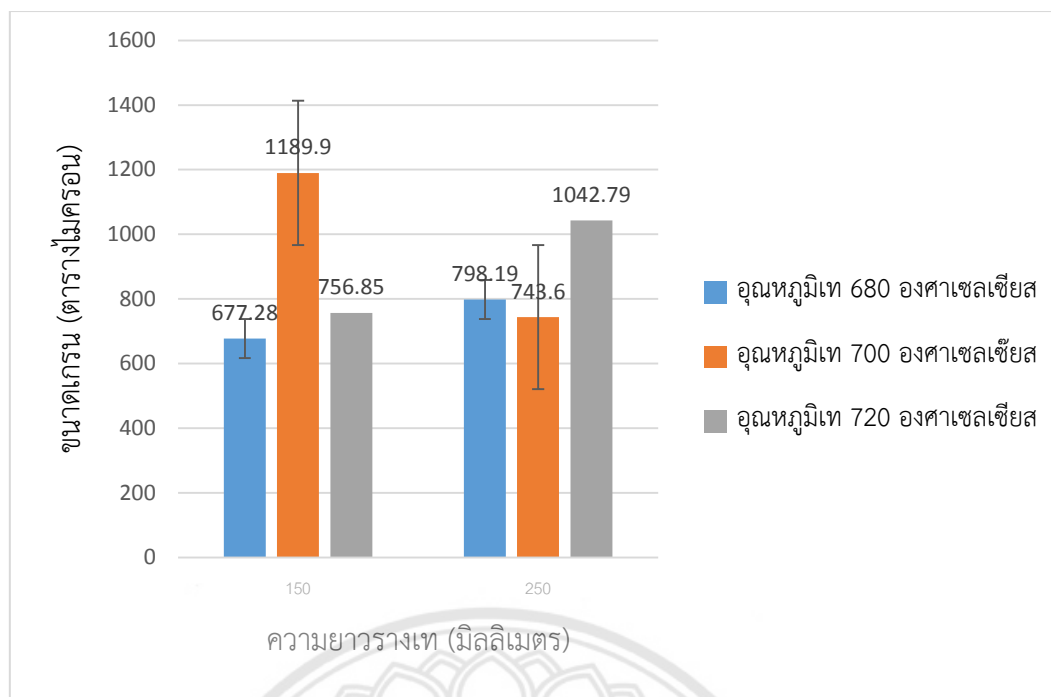
4.6.2 จากผลกระทบหลักอุณหภูมิและความยาวของรางเทที่มีผลต่อค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม พบว่า อุณหภูมิเท่านั้นที่มีผลกระทบต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (P-Value =0.032) ซึ่งสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์แสดงผลกระทบหลัก

จากกราฟแสดงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบหลักกับขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม คือความยาวรางเท และอุณหภูมิ โดยที่ความยาวรางเท 250 มิลลิเมตร และอุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ได้ขนาดของเกรนน้อยที่สุด

จากการที่นำข้อมูลขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมมาวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งได้แก่การทดสอบสมมติฐาน การตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล และการตรวจสอบความแปรปรวนแบบสองทาง สามารถแสดงค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ขนาดเกรน เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง โดยข้อมูลจากตารางที่ 4.12

จากการศึกษาขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ ที่ความยาวรูพรุน 150 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส จากกราฟพบว่ามีขนาดของเกรนน้อยที่สุด ซึ่งเกิดจากนิวเคลียสที่เกิดขึ้นในน้ำโลหะหลอมเหลวที่แข็งตัวเร็ว โครงสร้างที่ได้จึงมีขนาดเกรนที่เล็กละเอียด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วขนาดเกรนที่ยอมรับคือขนาดเกรนเล็ก แต่จะเห็นว่าที่ความยาวรูพรุน 150 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีขนาดของเกรนมากที่สุดแสดงว่า ซึ่งเกิดจากนิวเคลียสที่เกิดขึ้นในน้ำโลหะหลอมเหลวที่แข็งตัวช้า โครงสร้างที่ได้จึงได้เกรนที่มีขนาดใหญ่และหยาบ

4.7 ผลการสร้างสมการถดถอย

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่ามีผลกระทบร่วมกันระหว่างอุณหภูมิและความยาวของรูพรุนที่มีผลต่อค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมซึ่งสามารถสร้างสมการถดถอยได้ 1 สมการ ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ตารางแสดงการสร้างสมการถดถอยใหม่

สมการถดถอย	R-Sq.
ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม = -10.97(ความยาวรางเท)+1.275(อุณหภูมิเท) +0.0155(ความยาวรางเท*อุณหภูมิเท)	0.89

จากตารางที่ 4.15 พบว่า สมการถดถอยมีค่า R-Sq. เท่ากับ 0.89 ซึ่งสามารถนำสมการถดถอยนี้ไปใช้ได้ โดยสมการถดถอยที่ได้ต้องนำไปทำการทดสอบความเหมาะสมในขั้นตอนต่อไป โดยค่า R-Sq. เท่ากับ 0.89 หมายถึง ความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนอง กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้เป็นอย่างดีมีความเหมาะสมกับข้อมูล

4.8 ผลการทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย

การทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย จะทำการทดสอบว่าสมการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยได้ทำการตั้งสมมติฐานทดสอบสมการถดถอย ดังนี้

ค่าผลการทดลอง (ค่าจริง) กับค่าพยากรณ์มีความแตกต่างกันหรือไม่

H_0 : ค่าจริง (ผลการทดลอง) กับค่าพยากรณ์ไม่มีความแตกต่างกัน

H_1 : ค่าจริง (ผลการทดลอง) กับค่าพยากรณ์มีความแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.16 ตารางผลการทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย

ค่าผลการทดลอง	677.28	798.19	1189.9	743.6	756.85	1042.79	P-Value = 0.966
ค่าพยากรณ์	802.50	759.50	874.50	862.50	946.50	965.50	

จากตารางที่ 4.10 สามารถทดสอบความเหมาะสมสมการถดถอย โดยการนำค่าข้อมูลของผลการทดลองเทียบกับค่าพยากรณ์ โดยใช้สถิติ Paired T ซึ่งได้ค่า P-Value = 0.966 ซึ่งมากกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 กล่าวคือ สมการถดถอย ค่าจริง (ผลการทดลอง) กับค่าพยากรณ์ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ดังนั้น สามารถนำสมการไปทำการพยากรณ์ค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมได้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

5.1.1 จากการศึกษาอุณหภูมิเทที่ส่งผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ในโครงการพบว่าอุณหภูมิส่งผลกระทบลึกต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

5.1.2 จากการศึกษาความยาวรางเทที่ส่งผลต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ในโครงการพบว่าความยาวรางเทส่งผลกระทบบรองต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

5.1.3 จากการศึกษาอุณหภูมิเทและความยาวรางเทที่ส่งผลร่วมกันต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ในโครงการพบว่าอุณหภูมิเทและความยาวรางเทส่งผลร่วมกันต่อขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

5.2 ข้อเสนอแนะ การพัฒนา

5.2.1 ควรศึกษาการวิเคราะห์เชิงสถิติให้มากยิ่งขึ้น

5.2.2 ศึกษากระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งโดยเทคนิคอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง

5.2.3 เปลี่ยนการหาตำแหน่งของชิ้นงานเป็นแบบสุ่ม อาจได้ชุดข้อมูลของขนาดเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมชุดใหม่

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางแก้ไขปัญหา

การวิเคราะห์เชิงสถิติเนื่องจากการวิเคราะห์เชิงสถิติมีหลายขั้นตอน มีสูตรตัวแปรที่มากหากไม่ทราบถึงวิธีการคิดแต่ละขั้นตอนที่ถูกต้องอาจทำให้การวิเคราะห์ออกมาเกิดความผิดพลาดได้

เอกสารอ้างอิง

- กนกกาญจน์ ศรีม่วง. (2553). การพัฒนากระบวนการผลิตรีโอโดแคสติงแบบรางเทหล่อเย็น สำหรับอะลูมิเนียมผสม. วศ.ม., มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร
- กมลฤทธิ์ สมพินมา.(พฤษภาคม 2555). ผลของอุณหภูมิและความชันรางเท ที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรดA356 ที่ขึ้นรูปแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น.ENGINEERING STUDENT PROJECT. สืบค้นเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2560, จาก :http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/work/file-2012_05_29_17_41_54.pdf
- กานต์ สี่พัฒนายิ่งยง. (2557). สถิติวิศวกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร สืบค้นเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2560
- ฉลอง สีแก้วสีว.(1 มีนาคม 2552). Design of Experiment คืออะไร.
- ประทีน เรืองเวช และคณะ. (2559). การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและความยาวของรางเท ที่มีผลต่อค่าความแข็ง ของอะลูมิเนียม AC2A โดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็น. ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- ปารเมศ ชุตินา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พงศกร พงษ์พวง และคณะ. (2557). อุณหภูมิและความยาวของรางเท ที่มีผลต่อโครงสร้าง-จุลภาค และความแข็ง.ของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 โดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็น. ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- รศ.ดร. เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร. (ม.ป.ป.). มาตรฐานของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน. โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ. สืบค้นเมื่อ 22 พฤษภาคม 2561, จาก <http://www.cemct.net/web/images/stories/alsi001.pdf>
- สุทธาทิพย์ ประทุมมาตร. (2555). การศึกษาอุณหภูมิและความชันของรางเทที่มีผลต่อความแข็ง และโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด A356 โดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็น.ENGINEERING STUDENT PROJECT. สืบค้นเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2560, จาก :

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/work/file22014_03_11_15_28_39.pdf

Andrew. (2004). Das Tool ImageJ bietet Ihnen zahlreiche Funktionen zum Editieren von Bildern. Durch die Batch-Funktion bearbeiten Sie auch mehrere Bilder gleichzeitig. สืบค้นเมื่อ 6 พฤศจิกายน 2560, จาก :

<https://www.pcwelt.de/downloads/ImageJ>

EvilAum. (13 พฤศจิกายน 2549). Grain Size Effect. สืบค้นเมื่อ 22 พฤษภาคม 2561, จาก

<http://evilaum.blogspot.com/2006/11/grain-size-effect.html>

Motegi, T. and Tanabe, F. (2004). New Semi-Solid Casting of Copper Alloys Using and Inclined Cooling Plate, Processing of Alloy and Composite, Limassol, Cyprus.





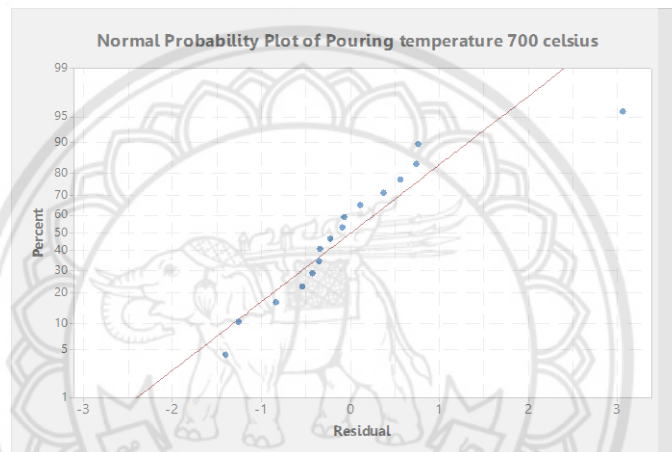
ภาคผนวก ก

การตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล

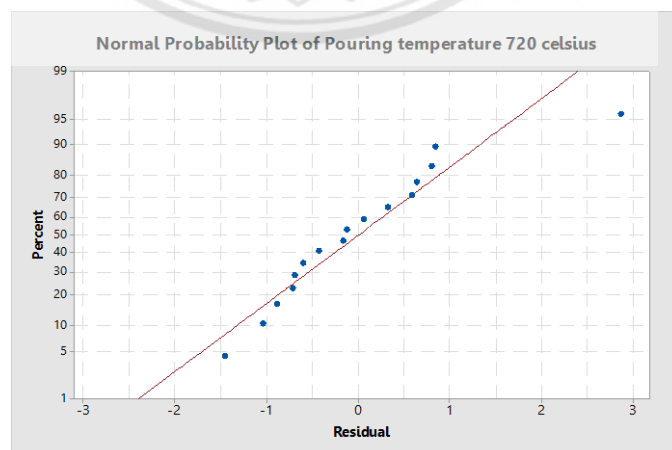
ก. การตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลที่อุณหภูมิเท 700 และ 720 องศาเซลเซียส และความยาวของรางเท 150 และ 250 มิลลิเมตร

ก.1 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูลอุณหภูมิเท 700 และ 720 องศาเซลเซียส และความยาวของรางเท 250 มิลลิเมตร

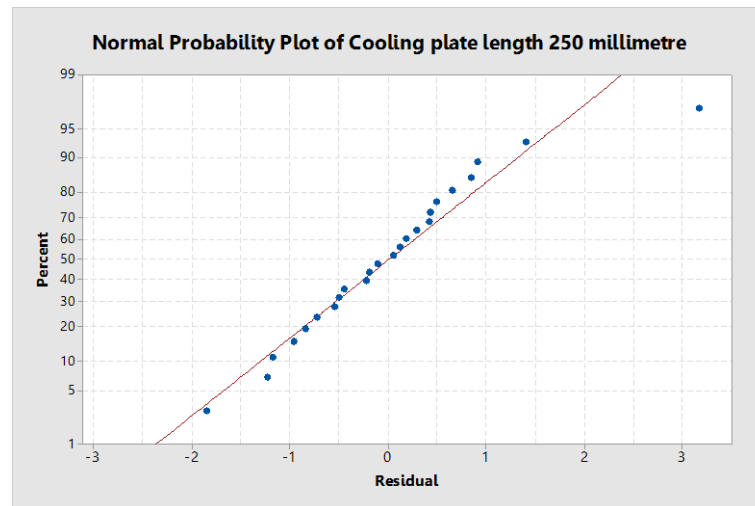
จากการตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล ดังรูป ก.1-ก.3 พบว่า ค่าความผิดพลาดของข้อมูลของค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ที่แสดงบนกราฟมีลักษณะการเรียงตัวแบบเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ



รูปที่ ก.1 กราฟกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส



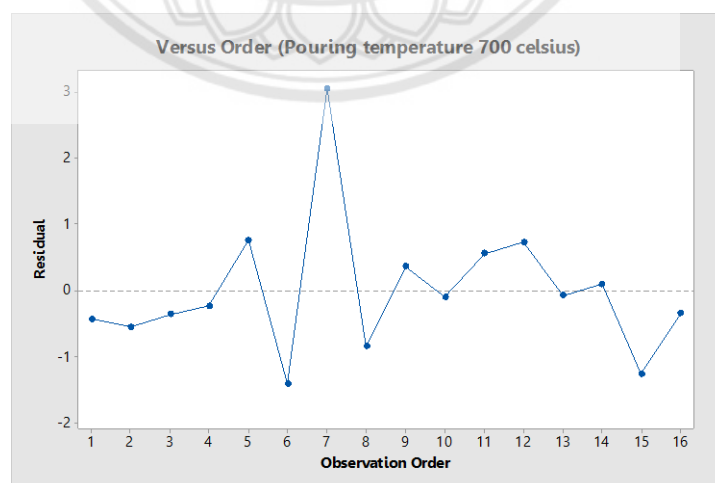
รูปที่ ก.2 กราฟกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส



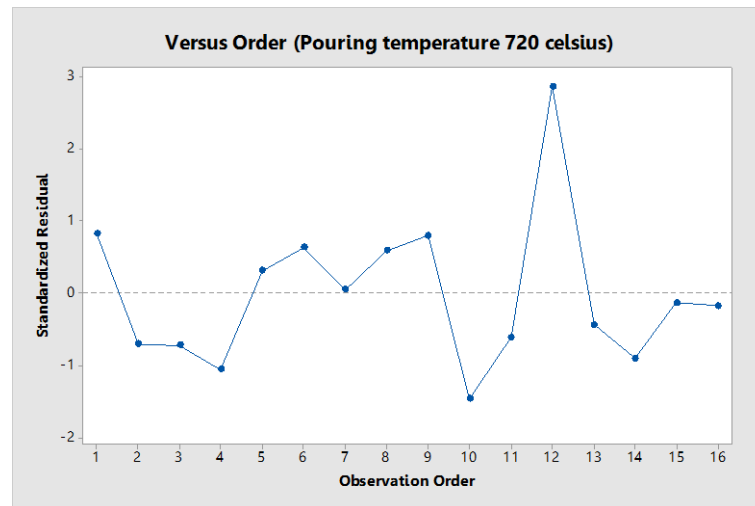
รูปที่ ก.3 กราฟกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล ที่ความยาวของรางเท 250 มิลลิเมตร

ก.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลอุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส และความยาวของรางเท 250 มิลลิเมตร

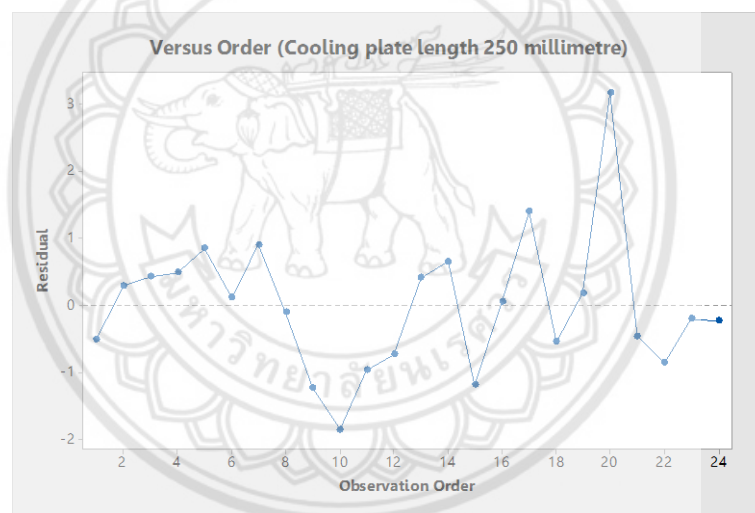
จากการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ดังรูป ก.4-ก.6 พบว่า ค่าความผิดพลาดของข้อมูลของค่าขนาดของเฟลอัลฟา-อะลูมิเนียม ที่แสดงบนกราฟมีลักษณะการกระจายอย่างสม่ำเสมอ และไม่สามารถคาดการณ์แนวโน้มของกราฟได้ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระของข้อมูล



รูป ก.4 กราฟการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส



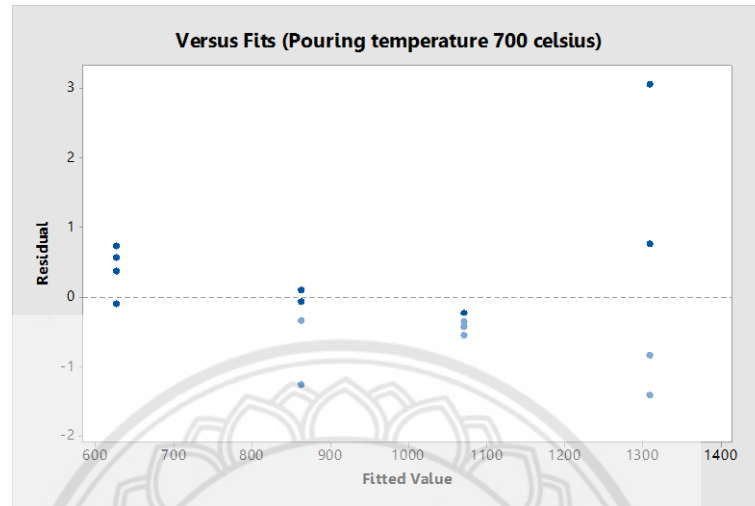
รูป ก.5 กราฟการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส



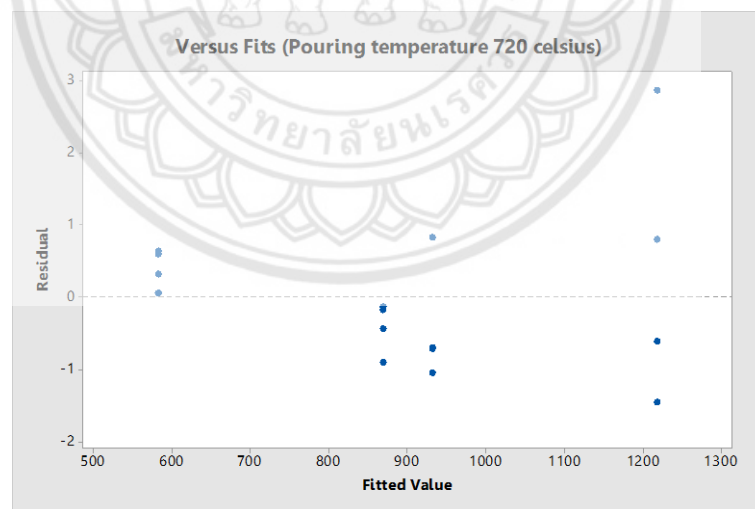
รูป ก.6 กราฟการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ที่ความยาวของรางเท 250 มิลลิเมตร

ก.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล ที่อุณหภูมิเท 700 และ 720 องศาเซลเซียส และความยาวของรางเท 250 มิลลิเมตร

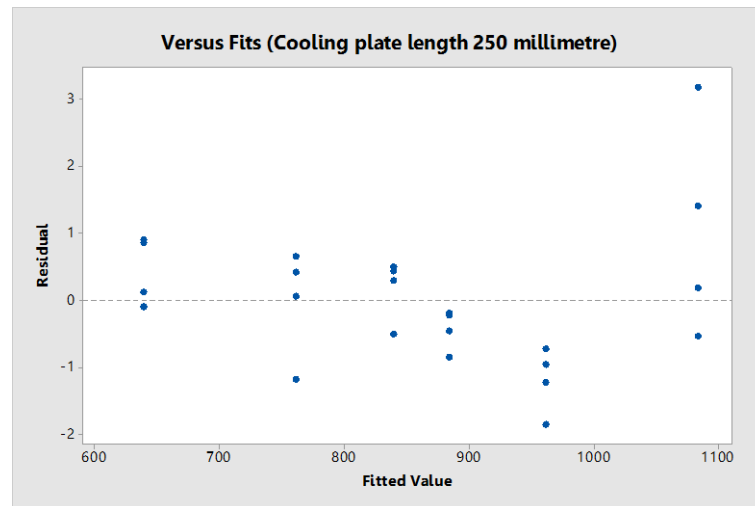
จากการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล ดังรูป ก.7-ก.9 พบว่า ค่าความผิดพลาดของข้อมูลของค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ที่แสดงบนกราฟมีลักษณะการกระจายสม่ำเสมอในทางด้านบวกและทางด้านลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



รูป ก.7 กราฟตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล
ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส



รูป ก.8 กราฟตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล
ที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส



รูป ก.9 กราฟตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล
ที่ความยาวรางเท 250 มิลลิเมตร





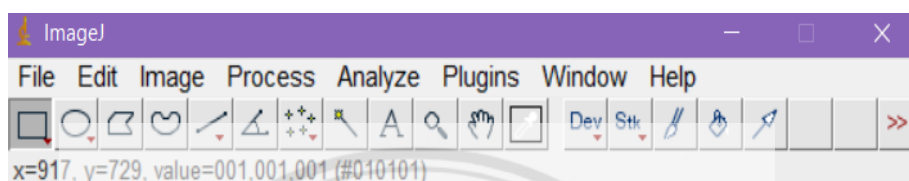
ภาคผนวก ข

การหาขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

ข. การหาขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

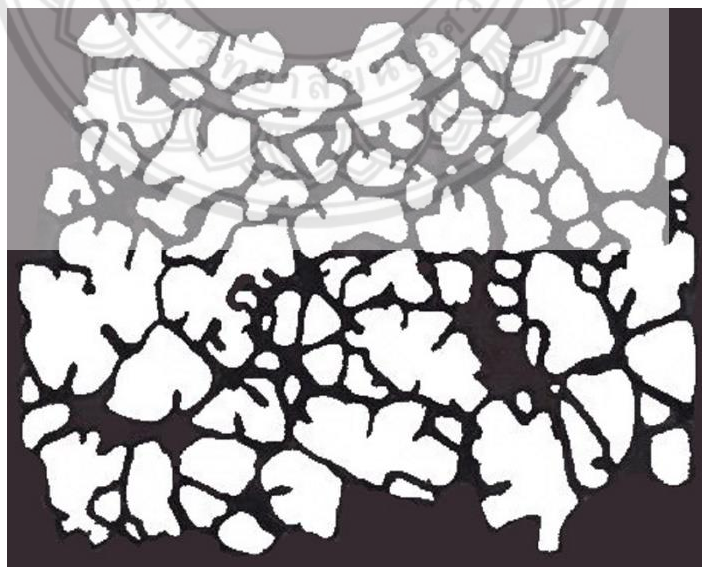
การใช้โปรแกรม ImageJ เพื่อใช้วิเคราะห์หาขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ข.1 เปิดโปรแกรม ImageJ



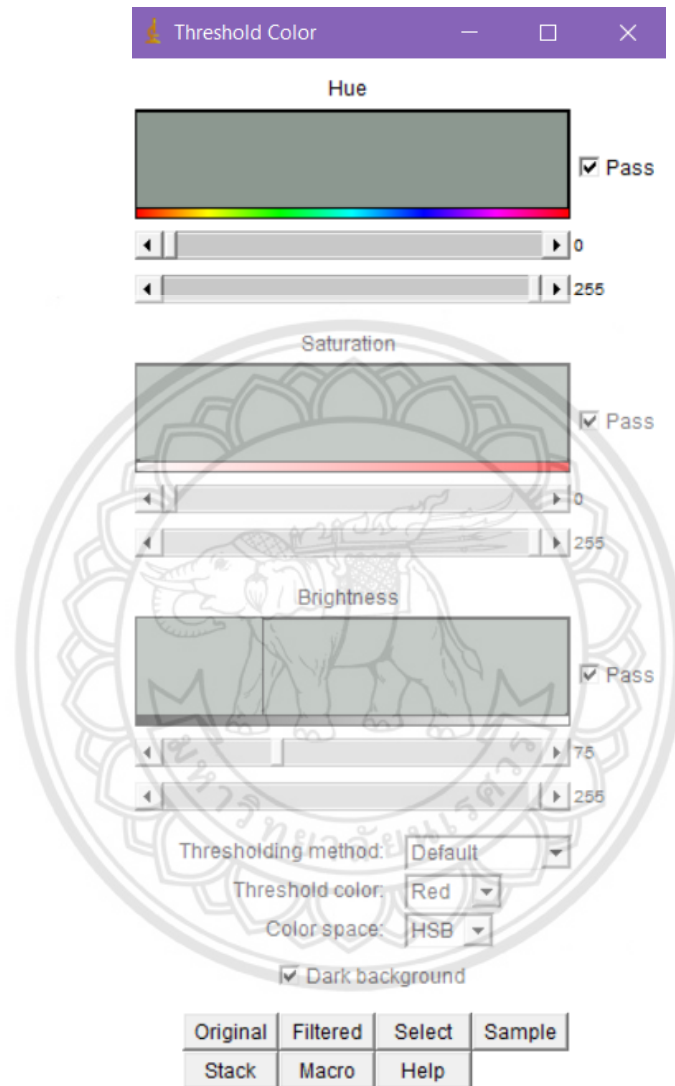
รูปที่ ข.1 โปรแกรม ImageJ

ข.2 เปิดไฟล์ภาพที่ต้องการวิเคราะห์ File > Open มุมบนด้านซ้ายได้ชื่อภาพแสดงขนาดของภาพในหน่วย pixel และโหมดสี



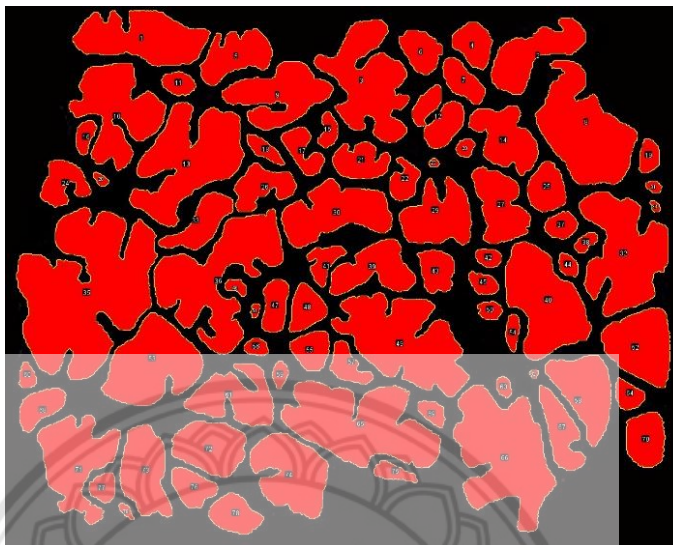
รูปที่ ข.2 ไฟล์ภาพที่ต้องการวิเคราะห์

ข.3 ทำการปรับรูปภาพ เพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์ส่วนที่ต้องคำนวณขนาดของ เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม โดยเลือกไปที่ Image > Adjust > Color Threshold และเลือกการปรับค่า ดังนี้



รูปที่ ข.3 การปรับค่าของรูปภาพ

ซึ่งการปรับค่าจะทำให้ได้บริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ซึ่งเป็นบริเวณสีแดง ดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 บริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม

ข.4 การวิเคราะห์ขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม โดยเลือกไปที่ Analyze > AnalyzeParticles ซึ่งจะทำให้ได้ค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่า SD ของขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม โดยโปรแกรม Excel และทำการเก็บค่าข้อมูลที่ได้

	A	B	C	D
1		Area		um
2	1	18134		1355.844
3	2	11656		871.4966
4	3	21791		1629.271
5	4	4579		342.363
6	5	8737		653.2486
7	6	4616		345.1294
8	7	4004		299.3713
9	8	25601		1914.137
10	9	14559		1088.548
11	10	19334		1445.566
76	75	1876		140.2649
77	76	4281		320.0821
78	77	2131		159.3307
79	78	5210		389.5416
80	79	450		33.64563
81			avg	642.6211
82			sd	743.202

รูปที่ ข.5 ค่าขนาดของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม

ImageJ