

**การทดลองเพื่อประเมินอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อ Artificial aging ของโลหะ
ผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061**

นางสาวรัตนภรณ์ วงษ์ทอง

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554**

**AN ASSESSMENT OF FACTORS AFFECTING
ARTIFICIAL AGING OF 6061–ALUMINIUM
ALLOY THROUGH A DESIGN OF
EXPERIMENTS**

Rattanaorn Wongthong

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2011**

การทดลองเพื่อประเมินอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อ Artificial aging ของโลหะผสม
อะลูมิเนียมเกรด 6061

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ขงยุทธ เสริมสุธิ์อนุวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.วีระชัย มโนพิเชษฐวัฒนา)

กรรมการ

(ผศ. ดร.พรวิสา วงศ์ปัญญา)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รศ.ดร.ณัฏฐา วงษ์ทอง : การทดลองเพื่อประเมินอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อ Artificial aging ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 (AN ASSESSMENT OF FACTORS AFFECTING ARTIFICIAL AGING OF 6061-ALUMINIUM ALLOY THROUGH A DESIGN OF EXPERIMENTS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยงยุทธ เสริมสุธีธนวัฒน์, 137 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ประมาณค่าความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยใช้แผนการทดลองเชิงสถิติและมีวัตถุประสงค์รองคือ เพื่อศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคที่มีต่อค่าความแข็งแรงหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึก ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมี 4 ตัวแปร คือ เวลาอบละลาย (solution time), อุณหภูมิอบละลาย (solution temperature), เวลาเอจิง (aging time) และอุณหภูมิเอจิง (aging temperature) โดยที่แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ และพิจารณาตัวแปรตามคือความแข็งแรงเท่านั้น

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ที่มีความสัมพันธ์กันในส่วนแรกใช้แผนการทดลองแบบ 2 แฟกทอเรียล เพื่อประเมินหาช่วงของตัวแปรที่เหมาะสมและเพื่อประมาณความสัมพันธ์ของตัวแปรและส่วนที่สองได้นำผลการทดลองในส่วนแรกมาวิเคราะห์และปรับการทดลองใหม่เป็น 3⁴ แฟกทอเรียล และใช้ระดับตัวแปรเป็นดังนี้ คือ เวลาอบละลาย (ชม.) : 1, 2 และ 3 ; อุณหภูมิอบละลาย (°C) : 520, 540 และ 560 ; เวลาเอจิง (ชม.) : 2, 8 และ 14 ; และอุณหภูมิเอจิง (°C) : 175, 200 และ 225

จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจิง, อุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอจิง และเวลากับอุณหภูมิเอจิงต่างก็มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและค่าความแข็งแรงในเชิงเส้นโค้งด้วยสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 91.7% และ R^2_{adj} เท่ากับ 90.5% แสดงว่าโมเดลนี้มีความเหมาะสมสามารถประมาณค่าความแข็งแรงที่มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ± 7.64 BHN ที่ความเชื่อมั่น 95% และจากการตรวจสอบค่าความผิดพลาด (errors หรือ residuals) พบว่าเป็นไปตามสมมติฐานของการออกแบบการทดลองคือ มีการแจกแจงแบบปกติและมีการกระจายตัวเป็นแบบสุ่มสม่ำเสมอที่แต่ละระดับของปัจจัยหลัก นอกจากนั้นจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังการทดลองพบว่า เป็นไปตามหลักทฤษฎีการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก

RATTANAPORN WONGTHONG : AN ASSESSMENT OF FACTORS
AFFECTING ARTIFICIAL AGING OF 6061-ALUMINIUM ALLOY
THROUGH A DESIGN OF EXPERIMENTS. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. YONGYOOH SERMSUTIANUWAT, Ph.D., 137 PP.

ARTIFICIAL AGING/ALUMINIUM ALLOY 6061/DESIGN OF EXPERIMENT

This thesis describes an experimental investigation into the effects of factors in the artificial aging process on the hardness of 6061 aluminum alloy with a particular interest in deriving mathematical models for predicting the hardness values from statistically planned experiments.

The factors normally involved in an artificial aging include: solution treatment temperature, solution treatment time, aging temperature, and aging time. These factors were first studied by conducting a preliminary experiment using 2^4 factorial design with 2 replications. From the results of the experiments, it was found appropriate to investigate further into a higher order of effects and interactions of factors. A 3^4 factorial design was, therefore, implemented with the following levels of each factor: solution treatment times (in hour), 1, 2, and 3; solution treatment temperatures (in °C), 520, 540, and 560; aging times (in hour), 2, 8, and 14; and, aging temperatures (in °C), 175, 200, and 225; Since the number of experimental units was higher and it had been found, from the results of the previous experiments, that the experimental errors were considerable low, the 3^4 factorial experiment was then carried out without replication. Randomization had been fully implemented to both the arrangement of all experimental units to be tested and the order of the test conditions to be used.

All data were analyzed mainly with Minitab, a statistical analysis package; and, manual analysis of variance had also been carried out alongside. In the analysis of variance, the main and interaction effects of the factors were partitioned into linear and quadratic effects and their interactions. It was found that all linear main effects significantly affected the hardness of the alloy; however, only the solution treatment time did not show any significant effect while the rest did. Many first order and a few second order interaction effects had been shown to have significant effects on the hardness value.

A set of 17 mathematical models derived from the experimental results ranged from those containing selected highly significant terms to those, only significant linear terms. The residuals from each model had been tested for normality, randomness and dependency; the results were found to agree well with the assumptions of the model. The 95% confidence intervals were attached to the estimates obtained from all cases, the more accurate estimates could be expected from the models containing more significant terms.

School of Industrial Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature_____

Advisor' Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดีเนื่องจากได้รับคำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือทั้งด้านวิชาการ ด้านการดำเนินการวิจัยและอนุเคราะห์อุปกรณ์ดำเนินงานวิจัย จากคณาจารย์และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนั้นผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงแก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยงยุทธ เสริมสุขิธอนวัฒน์ กรรมการสอบและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการศึกษา ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ แนวทางการปรับปรุงแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อีกทั้งยังช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้โอกาสในการศึกษาและให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณปราณี กฐินใหม่ เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไปประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่แนะนำขั้นตอนการดำเนินการไปด้วยความเรียบร้อยและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณสถาปัตย์ พิมานแมน และ คุณนภสร อินศิริ ที่ได้ช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท เมืองทองอุตสาหกรรมอาลูมิเนียม จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (F6) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบทุกท่านที่ให้คำแนะนำทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

รัตนภรณ์ วงษ์ทอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม	1
1.2 การทำเอจิงโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	6
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	7
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	7
1.6 สรุป.....	8
2 ปรีทรีตน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 การนำโลหะผสมอะลูมิเนียมมาใช้งาน	9
2.2 การอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกหรือตกตะกอน (precipitation hardening).....	9
2.3 สรุป.....	22
3 การดำเนินการทดลอง	23
3.1 การทดสอบเบื้องต้นก่อนกำหนดแผนการทดลอง	23
3.2 แผนการทดลอง.....	25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	ลำดับการทดลอง.....	27
3.4	การเตรียมการสำหรับการทดลอง	29
3.4.1	เครื่องมือและอุปกรณ์	29
3.4.2	การเตรียมขนาดและผิวชิ้นงาน	30
3.5	อุปกรณ์และการดำเนินการทดลอง	31
3.5.1	เครื่องมือและอุปกรณ์	31
3.5.2	ขั้นตอนการอบชุบชิ้นงาน	32
3.6	การทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness tester).....	35
3.6.1	เครื่องมือและอุปกรณ์	35
3.6.2	วิธีทดสอบความแข็งแบบบริเนล	36
3.7	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	38
3.7.1	เครื่องมือและอุปกรณ์	38
3.7.2	ขั้นตอนเตรียมผิวชิ้นงานและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	39
3.8	สรุป.....	39
4	ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	40
4.1	ผลการทดลอง	40
4.2	วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	41
4.3	วิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็ง.....	59
4.3.1	วิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยหลัก (main effect)	59
4.3.2	วิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (interaction effect).....	61
4.4	แบบจำลองโมเดลประมาณค่าความแข็ง	64
4.4.1	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)	66
4.4.2	การประมาณช่วงของความเชื่อมั่น (confidence intervals).....	67

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5	ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (model adequacy checking)	68
4.5.1	การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution).....	69
4.5.2	การตรวจสอบความแปรปรวน	70
4.5.3	การตรวจสอบความอิสระของข้อมูล (independency)	72
4.6	กราฟโครงร่าง (contour plot).....	74
4.7	แบบจำลองโมเดลประมาณค่าความแข็งแรงแบบอื่น ๆ.....	80
4.8	โครงสร้างจุลภาคหลังการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก	97
4.9	สรุป.....	99
5	สรุปผลการทดลอง.....	100
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	100
5.1.1	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงหลังการอบชุบแข็งด้วย วิธีการตกผลึก.....	100
5.1.2	อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรง หลังการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก.....	101
	รายการอ้างอิง	102
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ลำดับการทดลอง	104
	ภาคผนวก ข. การทดสอบเตา	107
	ภาคผนวก ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ	112
	ภาคผนวก ง. สัมประสิทธิ์คอนแทค	124
	ภาคผนวก จ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	129
	ประวัติผู้เขียน	137

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแบบ 2^3 แฟคทอเรียล21
3.1	แสดงปัจจัยและระดับปัจจัยสำหรับการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล23
3.2	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA).....24
3.3	แสดงรูปแบบทั่วไปของค่าความแข็งแรงจากการออกแบบการทดลองแบบ 3^4 แฟคทอเรียล ...26
3.4	แสดงปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแบบ 3^4 แฟคทอเรียล27
3.5	แสดงเงื่อนไขการทดลองทั้ง 81 เงื่อนไข.....28
3.6	แสดงลำดับการทดลองของแต่ละเงื่อนไข.....29
3.7	แสดงตารางบันทึกผลค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดลอง (BHN)37
4.1	ค่าความแข็งแรงที่ผิวของชิ้นงานทดสอบ.....40
4.2	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3^4 (ANOVA).....58
4.3	แสดงค่าประมาณความแข็งแรงจากโมเดลประมาณค่าความแข็งแรง (BHN)65
4.4	แสดงค่าความผิดพลาดจากการทดลอง (error หรือ residual).....68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แสดงปริมาณการใช้โลหะชนิดต่าง ๆ และพลาสติกทั่วโลก..... 1
1.2	แสดงเฟสไดอะแกรมของ Al-Mg ₂ Si 3
1.3	ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงของการตกตะกอนที่สมดุล..... 4
1.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับเวลาและอุณหภูมิเองจึง..... 5
1.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับเวลาและอุณหภูมิเองจึง..... 5
2.1	แสดงไดอะแกรมขั้นตอนการอบชุบแข็งแบบต่าง ๆ 10
2.2	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของการอบชุบแข็งแบบต่าง ๆ 10
2.3	แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการชุบในตัวกลางที่แตกต่างกัน 11
2.4	แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการเองจึงที่เวลาแตกต่างกัน 12
2.5	แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการเองจึง 13
2.6	แสดงค่าความแข็งแรงกับระยะเวลาที่ทิ้งไว้ก่อนนำไปเองจึง 14
2.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับเวลาเองจึง 14
2.8	ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการทดลอง 15
2.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับเวลาที่ใช้เองจึง 16
2.10	แสดงค่าความแข็งแรงกับตัวกลางที่ใช้ในการเย็นตัวของโลหะผสม 6082..... 17
2.11	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงกับเวลาที่ใช้เองจึงโลหะผสม 6005 และ 6082..... 17
2.12	แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงกับอุณหภูมิอบละลายโลหะผสม 6005..... 17
2.13	แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงกับอุณหภูมิอบละลายโลหะผสม 6082..... 18
2.14	โครงสร้างจุลภาพของการเองจึงที่ 175°C เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง..... 18
2.15	โครงสร้างจุลภาพของการเองจึงที่ 175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง..... 19
2.16	โครงสร้างจุลภาพของการเองจึงที่ 175°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง..... 19
2.17	โครงสร้างจุลภาพของการเองจึงที่ 200°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง..... 20
2.18	แสดงค่าความแข็งแรงของการเองจึงที่อุณหภูมิ 175°C และ 200°C..... 20
3.1	แสดงภาพเครื่องเลื่อยแบบสายพาน 30
3.2	แสดงภาพเครื่องกลึง..... 30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3	แสดงภาพชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง 31
3.4	แสดงภาพเตาเผาไฟฟ้า..... 31
3.5	แสดงภาพเทอร์โมมิเตอร์ รุ่น UN-350A 32
3.6	ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการอบชุบ..... 32
3.7	แสดงการปรับตั้งอุณหภูมิเตาที่ 540°C..... 33
3.8	แสดงวิธีการนำชิ้นงานทดสอบเข้าเตาไฟฟ้า..... 33
3.9	แสดงการนำชิ้นงานทดสอบชุบน้ำ (quenching) 34
3.10	แสดงการปรับตั้งอุณหภูมิเตาที่ 175°C..... 34
3.11	แสดงภาพเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล (brinell) 35
3.12	แสดงภาพไมโครสโคปทูแมคเกอร์ (Tool making microscope)..... 35
3.13	แสดงวิธีการวัดความแข็งแบบบริเนล..... 36
3.14	ชิ้นงานที่ผ่านการวัดความแข็งแบบบริเนล 36
3.15	แสดงการวัดขนาดรอยกดของชิ้นงานทดลอง..... 37
3.16	แสดงภาพเครื่องขัดกระดาษทรายแบบละเอียด 38
3.17	แสดงภาพเครื่องขัดผ้าสักหลาด 38
3.18	แสดงภาพกล้องจุลทรรศน์ อีเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-6400 39
4.1	กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยกับระดับของปัจจัยหลักแต่ละปัจจัย 55
4.2	กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับ เวลาเองจึง..... 56
4.3	กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับ อุณหภูมิเองจึง..... 58
4.4	กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างเวลากับอุณหภูมิเองจึง 59
4.5	กราฟแสดงการกระจายตัวแบบปกติของค่าความผิดพลาด..... 65
4.6	กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดที่แต่ละระดับของเวลาอบละลาย 66
4.7	กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดที่แต่ละระดับของอุณหภูมิอบละลาย 67
4.8	กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดที่แต่ละระดับของเวลาเองจึง..... 67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดที่แต่ละระดับของอุณหภูมิเองจึง 68
4.10	กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดกับค่าประมาณจากโมเดล 69
4.11	กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดกับลำดับการทดลอง 69
4.12	แสดงแผนภาพแบบ 2 มิติ ระหว่างเวลาและอุณหภูมิอบละลาย..... 70
4.13	แสดงแผนภาพแบบ 2 มิติ ระหว่างเวลาอบละลายกับเวลาเองจึง 71
4.14	แสดงแผนภาพแบบ 2 มิติ ระหว่างเวลาอบละลายกับอุณหภูมิเองจึง 72
4.15	แสดงแผนภาพแบบ 2 มิติ ระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเองจึง 73
4.16	แสดงแผนภาพแบบ 2 มิติ ระหว่างอุณหภูมิอบละลายและเองจึง..... 74
4.17	แสดงแผนภาพแบบ 2 มิติ ระหว่างเวลาอบละลายและอุณหภูมิเองจึง 75
4.18	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 1 77
4.19	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 2 78
4.20	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 3 79
4.21	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 4 80
4.22	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 5 81
4.23	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 6 82
4.24	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 7 83
4.25	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 8 84
4.26	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 9 85
4.27	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 10 86
4.28	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 11 87
4.29	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 12 88
4.30	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 13 89
4.31	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 14 90
4.32	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 15 91
4.33	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 16 92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34	กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 17..... 93
4.35	อบละลาย 2 ชั่วโมง ที่ 520°C และเอจิง 2 ชั่วโมง ที่ 175°C, 59.30 BHN..... 93
4.36	อบละลาย 2 ชั่วโมง ที่ 520°C และเอจิง 2 ชั่วโมง ที่ 200°C, 92.00 BHN..... 94
4.37	อบละลาย 2 ชั่วโมง ที่ 520°C และเอจิง 2 ชั่วโมง ที่ 225°C, 84.43 BHN..... 94



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

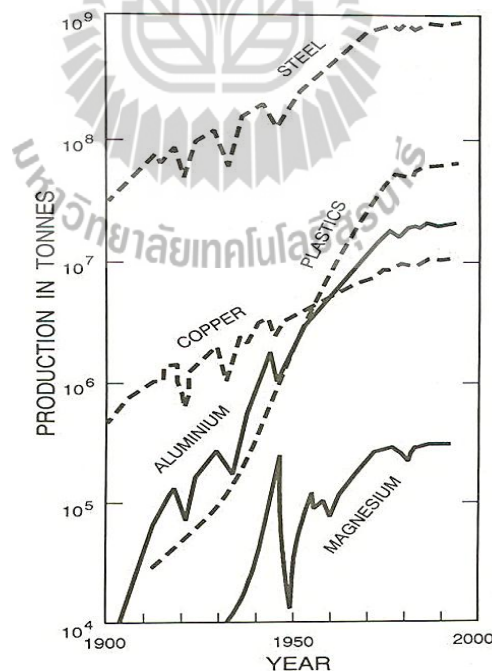
A	=	เวลาอบละลาย
B	=	อุณหภูมิอบละลาย
C	=	เวลาเอจจิง
D	=	อุณหภูมิเอจจิง
$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
hr	=	ชั่วโมง
BHN	=	หน่วยความแข็งแบบบริเนล
c	=	สัมประสิทธิ์คอนแทรสต์
R^2	=	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
R^2_{adj}	=	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแก้
e	=	ค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม
$\hat{\beta}$	=	สัมประสิทธิ์การถดถอย
μ	=	ผลเฉลี่ยทั้งหมด
H_0	=	สมมติฐานหลัก
H_1	=	สมมติฐานรอง
α	=	ระดับนัยสำคัญของการทดสอบ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม

ปัจจุบันปริมาณการใช้อะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องดังในรูปที่ 1.1 (Polmear, 2006) โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายหลังจากปี 1960 มีปริมาณการใช้อะลูมิเนียมสูงกว่าโลหะประเภทอื่น ๆ รองจากเหล็กกล้าเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา, แปรรูปได้ง่าย, มีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง, ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย และราคาไม่สูงมากเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น นอกจากนั้นโลหะผสมอะลูมิเนียมยังมีความสามารถในการต้านทานการเกิดสนิมด้วยตัวเอง (passive state) และมีคุณสมบัติยึดตัวสูงเนื่องจากลักษณะโครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมเป็น FCC ซึ่งทำให้อะตอมสามารถเคลื่อนตัวได้ง่ายทำให้การแปรรูปของโลหะอะลูมิเนียมด้วยการรีดหรืออัดขึ้นรูปเป็นไปได้ง่าย



รูปที่ 1.1 แสดงปริมาณการใช้โลหะชนิดต่าง ๆ และพลาสติกทั่วโลก

จากคุณสมบัติของอะลูมิเนียมที่ดีหลายประการทำให้การประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมเป็นไปในหลากหลายรูปแบบตั้งแต่อุปกรณ์เครื่องใช้ภายในครัว, ภาชนะบรรจุภัณฑ์, เฟอร์นิเจอร์, งานโครงสร้าง จนกระทั่งถึงยานพาหนะ เช่น รถยนต์หรือเครื่องบิน เป็นต้น

โดยทั่วไปโลหะผสมอะลูมิเนียมแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทขึ้นรูปเย็น (wrought) และประเภทหล่อหลอม (castable) ขึ้นกับชนิดและปริมาณธาตุส่วนผสมเนื่องจากอะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะอื่นได้ง่าย เช่น ทองแดง แมกนีเซียมและซิลิกอน จึงทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันได้หลากหลาย

เราสามารถจัดกลุ่มโลหะผสมอะลูมิเนียมได้เป็นสองกลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่สามารถอบชุบเพิ่มความแข็งแรงด้วยความร้อน เช่น โลหะผสมที่มีธาตุผสมหลักเป็นแมกนีเซียม, สังกะสี และทองแดง
2. กลุ่มที่ไม่สามารถอบชุบเพิ่มความแข็งแรงด้วยความร้อน กลุ่มนี้จะเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงโดยการขึ้นรูปเย็น

ในกลุ่มแรกการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงและความแข็งแรงในโลหะผสมอะลูมิเนียมเกิดจากการตกผลึกของเฟสที่สอง (secondy phase) กระจายอย่างสม่ำเสมอในพื้นเนื้อเดิม (matrix) ของโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีทางความร้อนที่เรียกว่า การอบแข็งแบบตกผลึกหรือตกตะกอน หรือเรียกอีกอย่างว่า การบ่มแข็งถ้าปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดที่อุณหภูมิห้องเรียกว่า การบ่มแข็งตามธรรมชาติ (natural aging) แต่ถ้าเกิดขึ้นภายใต้การควบคุมอุณหภูมิในการบ่มเรียกว่าการบ่มเทียม (artificial aging) โลหะอะลูมิเนียมผสมที่มีความสามารถในการอบชุบแข็งด้วยวิธีนี้จะต้องมีส่วนผสมของโลหะบางชนิดที่สามารถละลายได้ในปริมาณสูงที่อุณหภูมิสูง และอัตราการละลายจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิต่ำลงทำให้เกิดการแยกเฟสของสารประกอบเชิงโลหะภายในโครงสร้างพื้นฐานของโลหะผสมอะลูมิเนียม ธาตุโลหะผสมต่างกันในอะลูมิเนียมจะเกิดสารประกอบเชิงโลหะที่แตกต่างกัน เช่น โลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม-ซิลิกอนจะให้สารประกอบเชิงโลหะ Mg_2Si เป็นต้น

1.2 การทำเองจึงโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061

โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 มีธาตุผสมที่สำคัญคือ แมกนีเซียม 0.8-1.2% และซิลิกอน 0.4-0.8% จัดเป็นประเภทที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงได้ทั้งวิธีการขึ้นรูปเย็นและวิธีการอบชุบด้วยความร้อน โลหะผสมชนิดนี้มีความแข็งแรงปานกลาง, ทนการกัดกร่อน, แปรรูปได้ง่าย และมีคุณสมบัติเชื่อมที่ดี (Chandler, 1996) ด้วยเหตุนี้อุตสาหกรรมหลายประเภทจึงมี

การนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์, เรือเดินสมุทร, งานโครงสร้างทั่วไป และเป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตสินค้าอื่น ๆ (secondary industries)

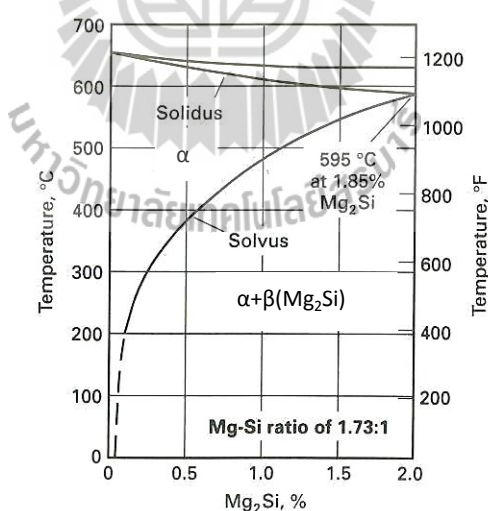
ในส่วนการบ่มแข็งโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 มีขั้นตอนทั่วไป ดังนี้

1) Solution treatment เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนทำให้เฟสของสารละลายของแข็ง (solid solution) ของโลหะผสมกลายเป็นเฟสเดียวหรือเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous) ในสภาพที่เป็นของแข็ง

2) Quenching เป็นขั้นตอนของการนำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย (solution treatment) แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำหรือน้ำมันทำให้ได้โครงสร้างที่มีธาตุผสมละลายอยู่ในปริมาณที่มากกว่าสภาพสมดุล (supersaturated solid solution) และ

3) Age hardening หรืออาจจะเป็นกระบวนการให้ความร้อนกับโลหะชิ้นงานเพื่อทำให้เกิดการตกผลึกของสารประกอบของแข็งของธาตุโลหะผสมกระจายอยู่ในโครงสร้างพื้นฐานของอะลูมิเนียม

ในรูป 1.2 แสดงเฟสไดอะแกรมของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการอบเพื่อให้ของแข็งละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (solid solution) ควรอยู่ในช่วงอุณหภูมิเหนือเส้น solvus และต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติก 595°C



รูปที่ 1.2 แสดงเฟสไดอะแกรมของ Al-Mg₂Si (Chandler, 1996)

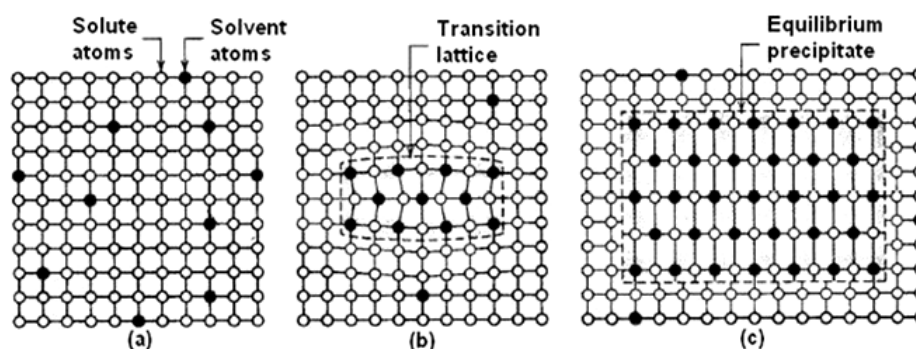
ในช่วงอุณหภูมินี้โลหะผสมจะมีเพียงเฟสเดียวคือ α (homogenous phase) โดยที่เฟส β (Mg₂Si) จะเริ่มละลายเป็นเฟส α ที่อุณหภูมิเหนือเส้น solvus และต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติกแต่

ระยะเวลาที่จะทำให้เฟส β หดไปอย่างสมบูรณ์นั้นจะต้องอาศัยระยะเวลานานเพราะการเคลื่อนที่ของอะตอมจะเป็นไปลักษณะการแพร่ซึม แม้ว่าการใช้อุณหภูมิอบสูงจะสามารถเร่งปฏิกิริยาของการแพร่ได้แต่การอบโดยใช้อุณหภูมิสูงใกล้อุณหภูมิยูเทคติกหรือสูงกว่าจะไม่เป็นผลดีเนื่องจากจะมีสารละลายของเหลวร่วมกับสารละลายของแข็งและผลที่ตามมาก็คือเมื่อเย็นตัวลงจะเกิดเป็นโครงสร้างยูเทคติกอยู่บริเวณขอบเกรนทำให้โลหะผสมเปราะ (brittle) ฉะนั้นในช่วงนี้ควรควบคุมอุณหภูมิและเวลาเพื่อให้ได้เฟส α เพียงเฟสเดียวเท่านั้น

จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยชุบน้ำทำให้โลหะผสมจะมีโครงสร้างไม่สมดุล คือ โครงสร้างสารละลายของแข็งที่มีปริมาณของ Mg_2Si สูงกว่าปริมาณในภาวะสมดุลดังรูปที่ 1.3a เราเรียกโครงสร้างนี้ว่า supersaturated solid solution (SSS) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียรและเมื่อเวลาผ่านไปหรือมีการให้ความร้อนกับโลหะผสมกลุ่มอะตอมของ Mg_2Si ที่ละลายในปริมาณที่มากกว่าสมดุลก็พร้อมที่จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟสที่สมดุล ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า Guinier-Preston (GP-Zone) จะรวมตัวกันเปลี่ยนเป็นเฟส β (Mg_2Si) โดยการเปลี่ยนแปลงจะเกิดตามลำดับดังนี้ $\beta'' \rightarrow \beta' \rightarrow \beta$ (Mg_2Si) จนเข้าสู่ภาวะสมดุลจะได้โครงสร้างสุดท้ายของโลหะผสมเป็น ($\alpha + \beta$ (Mg_2Si)) (Edwards, Stiller, Dunlop and Couper, 1998)

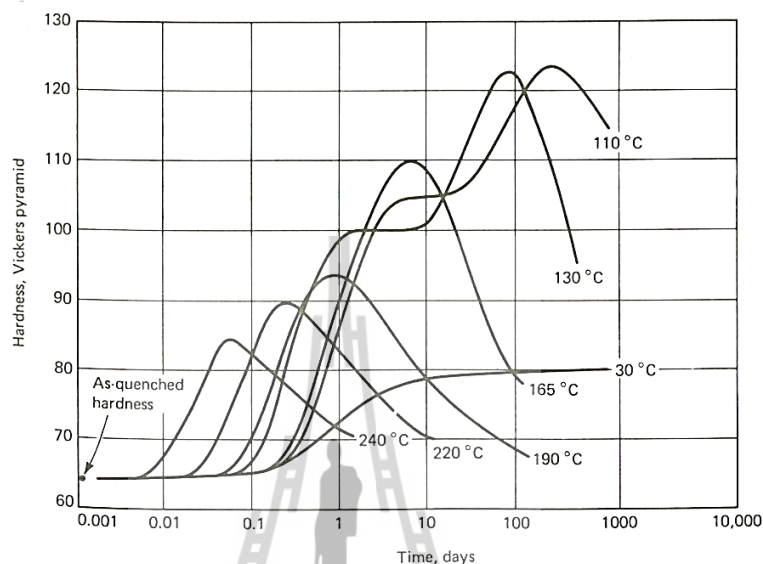
การบ่มตามธรรมชาติ (natural aging) จึงหมายถึงการเกิดเฟส β'' และ β' ที่อุณหภูมิห้องและการบ่มเทียมจึงเป็นการเร่งปฏิกิริยาของการเกิดเฟส β'' และ β' ด้วยความร้อน

เนื่องจากการเกิดนิวเคลียสของเฟส β'' และ β' ในสภาพของแข็งที่อุณหภูมิปกตินั้นเป็นไปได้ในช่วงสั้น ๆ จึงทำให้เกิดนิวเคลียสขนาดเล็กขึ้นเป็นจำนวนมากทำให้มีแรงเชื่อมประสานกับโครงสร้างพื้นฐาน (coherent precipitate) และเกิดการบิดเบี้ยวของแนวอะตอมดังรูปที่ 1.3b ทำให้ยากต่อการเคลื่อนที่ของ slip plane และ dislocation เมื่อมีแรงกระทำจากภายนอกส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลสูงขึ้นโดยเฉพาะความแข็งและความแข็งแรง (มนัส, 2543)

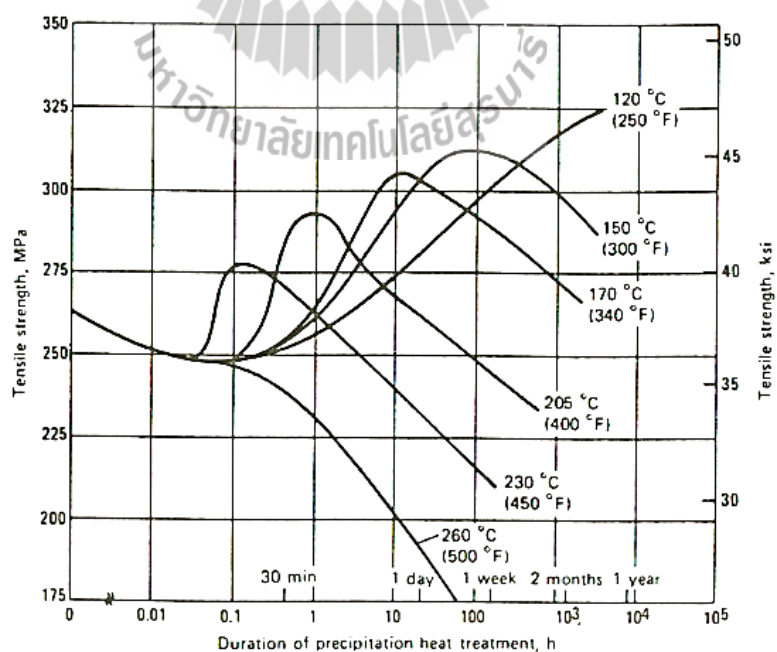


รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงของการตกตะกอนที่สมดุล (สุวันชัย และคณะ, 2547)

ข้อควรระวังในการเอจจึงเพื่อเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงคือ ถ้าใช้อุณหภูมิสูงหรือระยะเวลานานเกินไปเฟส β' จะเปลี่ยนเฟสเป็น β (Mg_2Si) อย่างสมบูรณ์และแรงเชื่อมประสานกับโครงสร้างพื้นฐานหมดไปและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงให้คุณสมบัติเชิงกล ดังรูปที่ 1.3c



รูปที่ 1.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับเวลาและอุณหภูมิเอจจิง (Chandler, 1996)



รูปที่ 1.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับเวลาและอุณหภูมิเอจจิง (Chandler, 1996)

รูปที่ 1.4 และรูปที่ 1.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความแข็งแรงกับเวลาและอุณหภูมิเองจึงของโลหะผสมอะลูมิเนียม จะเห็นว่าการใช้อุณหภูมิในการเองจึงต่ำจะให้ค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงสูงกว่าการเองจึงที่อุณหภูมิสูงแต่การเองจึงเพื่อให้ได้ความแข็งและความแข็งแรงนั้นต้องใช้เวลานานที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเองจึงที่อุณหภูมิต่ำนั้นอะตอมจะเคลื่อนที่ได้ช้า ๆ ในลักษณะของการแพร่เพื่อรวมตัวกันเกิดเป็นนิวเคลียสจึงทำให้การเกิดนิวเคลียสจำนวนมากจึงส่งผลให้ค่าความแข็งและความแข็งแรงสูงกว่าการเองจึงที่อุณหภูมิสูง

จากการศึกษาของ Ozturk, Sisman, Toros, Kilic and Picu (2010) พบว่าการคงที่อุณหภูมิเองจึงไว้ที่ 200°C ค่าความแข็งที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาและให้ความแข็งสูงสุดที่เวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นค่าความแข็งจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาของ Demir and Gündüz (2009) พบว่าการคงที่อุณหภูมิเองจึงไว้ที่ 180°C ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามเวลาและให้ความแข็งสูงสุดที่เวลา 11 ชั่วโมง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าความแข็งจะลดลงเช่นกัน ดังนั้นความแข็งและความแข็งแรงภายหลังการเองจึงนอกจากจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ทำให้เกิด homogenous phase แล้วยังขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาในการเองจึงด้วย

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันมีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกของโลหะอะลูมิเนียมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอบชุบมาากแล้ว แต่การใช้หลักสถิติในการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวอยู่ในวงจำกัดและเท่าที่พบคือ การออกแบบการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล คือพิจารณา 3 ปัจจัย (เวลาอบละลาย, อุณหภูมิ และเวลาในการทำเองจึง) และใช้ระดับการทดลองของแต่ละปัจจัย 2 ระดับ ซึ่งถือว่าอิทธิพลของปัจจัยแต่ละชนิดมีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรง (Mahadevan, Raghukandan, Senthilvelan, Pai and Pillai, 2006) แต่สำหรับงานวิจัยนี้ใช้การทดลองแบบ 3^4 แฟกทอเรียล คือ นอกจากจะพิจารณาอิทธิพลของทั้ง 3 ปัจจัยดังกล่าวแล้วยังพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิอบละลายร่วมกับปัจจัยทั้ง 3 ดังกล่าวและทำการทดลองที่ 3 ระดับของแต่ละปัจจัยซึ่งจะทำให้สามารถประเมินอิทธิพลเชิงเส้นตรงและเส้นโค้งได้

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักคือ เพื่อสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ประมาณค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยใช้แผนการทดลองเชิงสถิติ นอกจากนั้นยังมีวัตถุประสงค์รองคือ เพื่อศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคที่มีต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยประเภททดลอง (experimental study) ดังนั้นจึงต้องกำหนดชนิดและระดับของปัจจัยสำหรับการทดลองซึ่งปัจจัยที่เป็นตัวแปรอิสระ (independent variable) สำหรับการทดลองมี 4 ตัวแปรด้วยกัน คือ เวลาอบละลาย (solution time, hr), อุณหภูมิอบละลาย (solution temperature, °C), เวลาเอจิง (aging time, hr) และ อุณหภูมิเอจิง (aging temperature, °C) ปัจจัยทั้ง 4 นี้ ถือว่าเป็น fixed factors เพราะเลือกกำหนดระดับตามความเหมาะสมของช่วงใช้งานในทางปฏิบัติและแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับดังนี้

- 1.4.1 เวลาที่ใช้ในการอบละลายกำหนดให้ใช้ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง
- 1.4.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลายกำหนดให้ใช้ 520°C, 540°C และ 560°C
- 1.4.3 เวลาที่ใช้ในการทำเอจิงกำหนดให้ใช้ 2, 8 และ 14 ชั่วโมง
- 1.4.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำเอจิงกำหนดให้ใช้ 175°C, 200°C และ 225°C

ส่วนตัวแปรตาม (dependent variable) ที่พิจารณาคือความแข็ง (hardness) ของชิ้นงานทดสอบโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาและกำหนดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็ง
- 1.5.2 ออกแบบแผนการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่สำคัญและระดับปัจจัยที่เหมาะสมกับการทดลอง
- 1.5.3 วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อตัดสินใจเลือกปัจจัยที่สำคัญและระดับปัจจัยที่เหมาะสม
- 1.5.4 ออกแบบการทดลองตามปัจจัยที่สำคัญและระดับปัจจัยที่เหมาะสม
- 1.5.5 ปฏิบัติการทดลองตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้
- 1.5.6 วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
- 1.5.7 สร้างโมเดลประมาณค่าความแข็ง

การวิจัยเริ่มจากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียมหลังการอบชุบจากนั้นออกแบบการทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นจึงตัดสินใจเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการทดลองที่กำหนดขึ้นจากผลการทดลองที่ผ่านมาแล้วจึงนำข้อมูลที่ได้นำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนและสร้างสมการทำนายค่าความแข็ง

1.6 สรุป

โลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 เป็นโลหะผสมที่มี Mg และ Si เป็นธาตุโลหะผสมหลักสามารถเปลี่ยนแปลงความแข็งและความแข็งแรงได้จากการขึ้นรูปเย็นหรือจากการใช้กรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งเรียกว่าการทำให้แข็งด้วยวิธีการตกผลึก (precipitation hardening) ของสารประกอบ Mg_2Si ที่ไม่สมดุล และในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งจากการบ่มเทียมนโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 กับตัวแปรอิสระที่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง คือ เวลาอบละลาย, อุณหภูมิอบละลาย, เวลาและอุณหภูมิเอจิง



บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาคุณสมบัติของโลหะผสมอะลูมิเนียมและการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก (precipitation hardening) ซึ่งสามารถแยกกล่าวได้เป็นหัวข้อ ดังนี้

2.1 การนำโลหะผสมอะลูมิเนียมมาใช้งาน

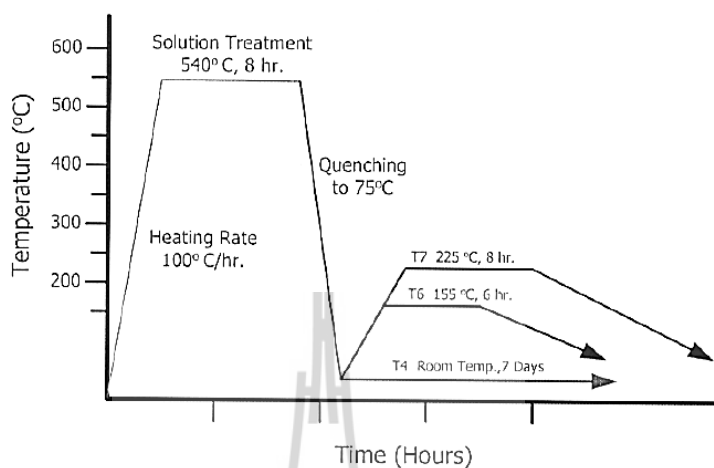
โลหะผสมอะลูมิเนียมถูกนำมาใช้งานกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบินและอุตสาหกรรมรถยนต์โดยเฉพาะอุตสาหกรรมรถยนต์ที่ปัจจุบันจะต้องผลิตให้มีน้ำหนักเบาเพื่อให้สามารถประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงได้มากขึ้น จากการศึกษาของ Cole and Sherman (1995) พบว่าโลหะผสมอะลูมิเนียมถูกนำมาผลิตเป็นส่วนประกอบของรถยนต์ เช่น ล้อ, ประตู และอื่น ๆ ซึ่งนอกจากจะมีน้ำหนักเบาแล้วยังมีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งสูงแล้ว ยังสามารถขึ้นรูปได้ง่ายอีกด้วย และจากการศึกษาของ Remesh, Keshavamurthy, Channabasappa and Pramod (2009) โลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 ยังถูกนำมาผลิตเป็นอุปกรณ์ที่ต้องอยู่ในสภาพที่ต้องทนการกัดกร่อนและง่ายต่อการแปรรูปเช่น ท่อ, ป้อน และอื่น ๆ

นอกจากนั้นอะลูมิเนียมยังนิยมนำมาผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์เครื่องใช้ภายในครัวเรือน และอีกมากมายเนื่องจากคุณสมบัติที่กล่าวมาแล้วประกอบกับสามารถแต่งสีให้กับอะลูมิเนียมเพิ่มความสวยงามได้อีกด้วย

2.2 การอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกหรือตกตะกอน (precipitation hardening)

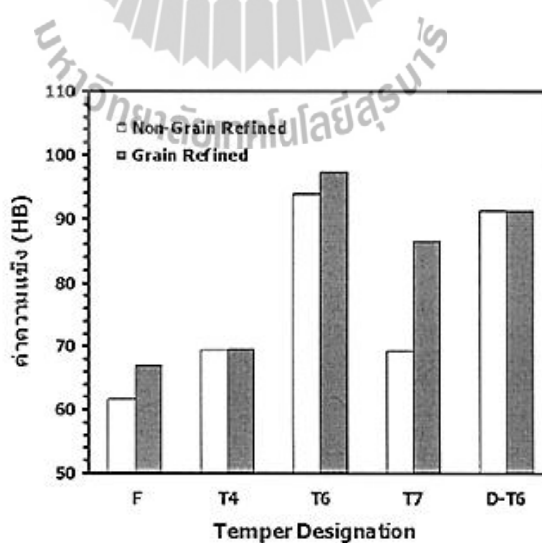
วิทยา, ปวิณ และสุภารัตน์ (2547) ได้ศึกษาความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียมประเภทขึ้นรูปด้วยการหล่อเกรด 356 ในการศึกษาได้แบ่งชิ้นงานทดสอบออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่ไม่เติมโลหะแมงกานีส Al-5Ti-1B และผ่านการเติมโลหะแมงกานีส Al-5Ti-1B เพื่อให้ได้ขนาดเกรนที่ละเอียดแตกต่างกัน จากนั้นนำชิ้นงานทั้งสองชุดไปผ่านกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก (precipitation hardening) โดยอบละลายที่อุณหภูมิ 540°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วชุบในน้ำอย่างรวดเร็วและนำชิ้นงานทดสอบไปเอจที่อุณหภูมิและเวลาแตกต่างกัน คือ เอจแบบ T4 ที่

อุณหภูมิห้องทิ้งไว้ 7 วัน เองจึงแบบ T6 ที่อุณหภูมิ 155°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ
เองจึงแบบ T7 ที่อุณหภูมิ 225°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ดังแสดงขั้นตอนการอบชุบในรูป 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงไดอะแกรมขั้นตอนการอบชุบแข็งแบบต่าง ๆ (วิทยา, ปวีณ และสุดาร์ตน์, 2547)

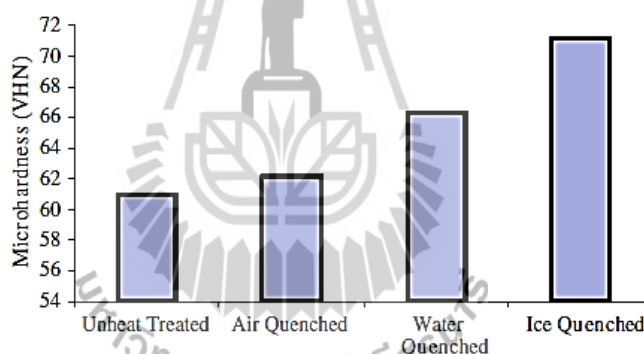
นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบแข็งมาวัดความแข็งแบบบริเนล จากผลการศึกษาพบว่าทั้งชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพเกรนกระบวนการเองจึงแบบ T6 ให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเองจึงแบบ T4 และ T7 ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงค่าความแข็งของการอบชุบแข็งแบบต่าง ๆ (วิทยา, ปวีณ และสุดาร์ตน์, 2547)

จากรูป 2.2 แสดงค่าความแข็งที่ได้จากกระบวนการอบชุบแข็งแบบต่าง ๆ ซึ่งให้ค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบชุบแข็งและการเอจจิงแบบ T6 จะให้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 95 และ 98 HB ตามลำดับ สูงกว่าการเอจจิงแบบ T4 และ T7 ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพเกรน

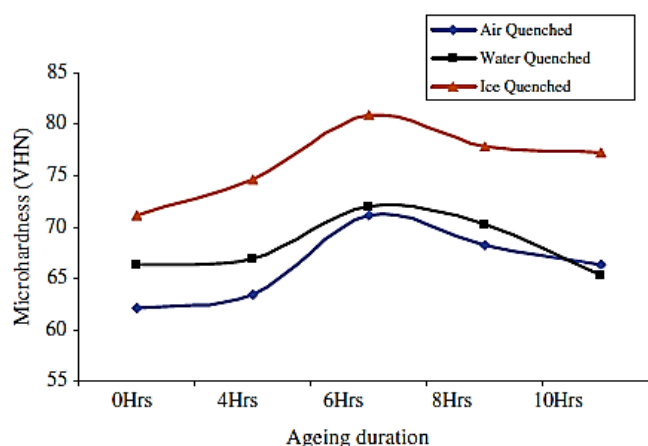
Remesh, Keshavamurthy, Channabasappa and Pramod (2009) ได้ศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยการศึกษาได้อบละลายที่อุณหภูมิ 530°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานทดสอบชุบในตัวกลาง (media) ที่แตกต่างกันคือ น้ำแข็ง, น้ำ, และอากาศ แล้ววัดความแข็งแบบวิกเกอร์โดยไม่ผ่านการทำเอจจิง จากการศึกษาพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบในตัวกลางที่ต่างกันจะให้ค่าความแข็งที่ต่างกัน ดังแสดงในรูป 2.3 โดยการเย็นตัวในน้ำแข็งจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าน้ำและอากาศ ตามลำดับ ซึ่ง Remesh และคณะได้ให้เหตุผลว่าเนื่องจากการเย็นในน้ำแข็งนั้นขนาดของเกรนจะเล็กกว่าการเย็นตัวในน้ำและอากาศ ส่งผลให้ค่าความแข็งของการเย็นตัวในน้ำแข็งสูงกว่าการเย็นตัวในน้ำและอากาศนั่นเอง



รูปที่ 2.3 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการชุบในตัวกลางที่ต่างกัน

(Remesh, Keshavamurthy, Channabasappa and Pramod, 2009)

จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการชุบในตัวกลางที่ต่างกันมาเอจจิงที่อุณหภูมิ 175°C ด้วยเวลาที่แตกต่างกันคือ 4, 6, 8 และ 10 ชั่วโมง และวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ จากการศึกษาพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบในตัวกลางที่ต่างกันเมื่อนำไปผ่านกระบวนการเอจจิงจะให้ค่าความแข็งที่ต่างกันดังแสดงในรูป 2.4 โดยชิ้นงานที่ผ่านการชุบในน้ำแข็งจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการชุบในน้ำและอากาศตามลำดับ โดยที่ค่าความแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้เอจจิงและให้ค่าความแข็งสูงสุดที่เวลาประมาณ 7 ชั่วโมง จากนั้นค่าความแข็งจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.4 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเอจิงที่เวลาแตกต่างกัน

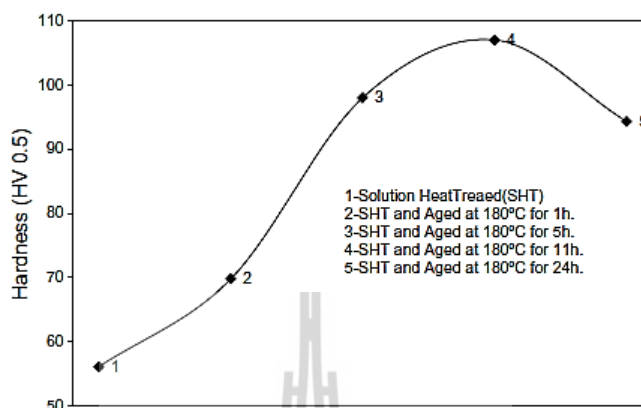
(Remesh, Keshavamurthy, Channabasappa and Pramod, 2009)

Demir and Gündüz (2009) ได้ศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยนำชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้น ไปอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกโดยอบละลายที่อุณหภูมิ 530°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และชุบในน้ำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้องเพื่อป้องกันการเกิดการตกผลึก จากนั้นนำไปเอจิงที่อุณหภูมิ 180°C โดยแต่ละชิ้นใช้เวลาเอจิงที่แตกต่างกันคือ 0, 1, 5, 11 และ 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในอากาศวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ โหลด 500 กรัม กดนาน 15 วินาที จากการศึกษาได้ค่าความแข็งดังรูป 2.5

จากรูปที่ 2.5 พบว่าชิ้นงานชิ้นที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการอบละลาย (solution treatment) แต่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเอจิงจะให้ค่าความแข็ง 56 HV ซึ่งน้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเอจิงทั้ง 4 ชิ้น จากรูปค่าความแข็งที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการเอจิงโดยให้ความแข็งสูงสุดที่เวลา 11 ชั่วโมง และค่าความแข็งจะลดลงเมื่อใช้เวลาเอจิงที่ 24 ชั่วโมง Demir and Gündüz ได้ให้เหตุผลว่าโลหะผสมภายหลังจากการอบละลายแล้วชุบในน้ำอย่างรวดเร็วโลหะผสมจะมีลักษณะอิ่มตัวอย่างยิ่งยวด (supersaturated solid solution) ของสารประกอบเชิงโลหะ Mg_2Si เมื่อนำชิ้นงานทดสอบมาทำเอจิงส่งผลให้เกิดการตกผลึก Mg_2Si ด้วยวิธีการแพร่ของอะตอมและมีลำดับของการเปลี่ยนแปลงดังนี้ supersaturated solid solution (SSS) $\rightarrow$ needle shaped (β'') $\rightarrow$ rod shaped (β') $\rightarrow$ β (Mg_2Si) (Edwards, Stiller, Dunlop and Couper, 1998)

ลักษณะของอะตอมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลนั้นทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของแนวอะตอมส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้นเนื่องจากแนวอะตอมที่บิดเบี้ยวจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของอะตอมให้เคลื่อนที่ได้ยากเมื่อมีแรงมากระทำแต่เมื่อใช้เวลาเอจิงนานมากเกินไปเฟสที่เกิดขึ้น

จะมีขนาดใหญ่มากลักษณะการบิดเบี้ยวของแนวอะตอมหมดไปส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้ลดลง (over aging)

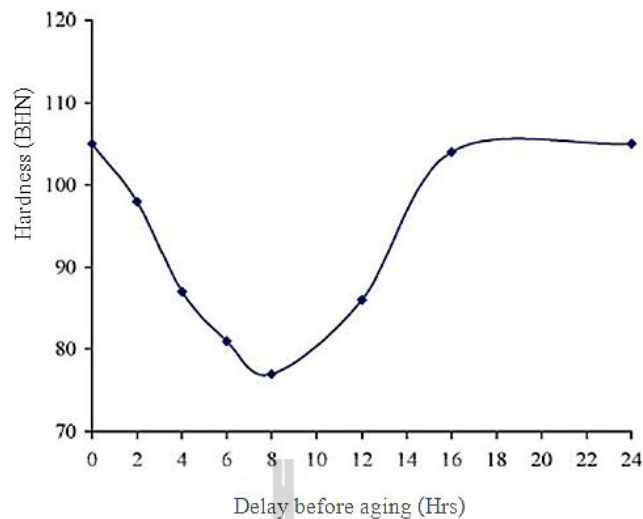


รูปที่ 2.5 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการเอจิง

(Demir and Gündüz, 2009)

Mahadevan, Raghukanda, Senthilvelan, Pai and Pillai (2005) ได้ศึกษาผลของการทิ้งช่วงระยะเวลาของของโลหะผสมอะลูมิเนียม AA6061-SiC_p ก่อนนำไปเอจิง โดยจากการศึกษาได้อบละลายที่อุณหภูมิ 530°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วชุบชิ้นงานทดสอบในน้ำอย่างรวดเร็วและทิ้งชิ้นงานทดสอบไว้ตามเวลาที่กำหนดก่อนนำไปเอจิงคือ 0, 2, 4, 6, 8, 12, 16 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปเอจิงที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในอากาศ

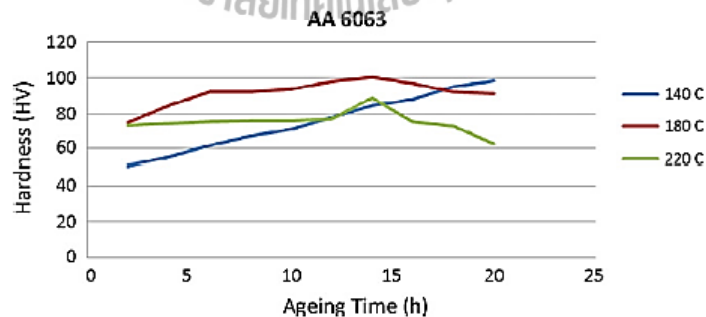
จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งที่ได้จะลดลงตามเวลาที่ทิ้งไว้ก่อนนำชิ้นงานทดสอบไปเอจิงโดยค่าความแข็งลดต่ำสุดเมื่อทิ้งชิ้นงานทดสอบไว้ที่ 8 ชั่วโมง จากนั้นค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและเริ่มคงที่ที่เวลา 16 ถึง 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงค่าความแข็งกับระยะเวลาที่ทิ้งไว้ก่อนนำไปเอจจิง

(Mahadevan, Raghukanda, Senthilvelan, Pai and Pillai, 2005)

Meyveci, Karacan, Çaİlgülü and Durmus (2010) ได้ศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม 6063 ที่ผ่านกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกการศึกษาได้แบ่งชิ้นงานทดสอบออกเป็นสองชุด ชุดแรกใช้อุณหภูมิอบละลายที่ $490 \pm 5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชุดที่สองใช้อุณหภูมิอบละลายที่ $530 \pm 5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งสองชุดใช้อุณหภูมิเอจจิงที่ 140°C , 180°C และ 220°C เป็นเวลา 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 ชั่วโมง

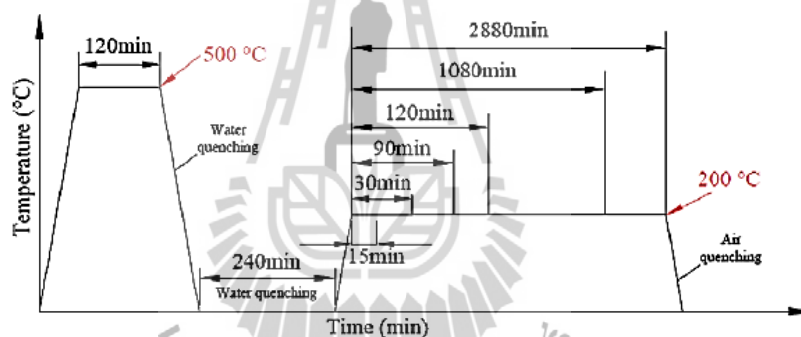


รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับเวลาเอจจิง

(Meyveci, Karacan, Çaİlgülü and Durmus, 2010)

จากการศึกษาพบว่าการใช้อุณหภูมิเอจิงที่ 180°C จะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 140°C และ 220°C โดยค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามเวลาและให้ค่าความแข็งสูงสุด 100 HV ที่ 14 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามการเอจิงที่อุณหภูมิ 140°C พบว่าสามารถให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 180°C ได้แต่การเอจิงนั้นต้องใช้เวลาจนถึง 17 ชั่วโมง ดังแสดงในรูป 2.7 และจากการศึกษายังพบว่านอกจากค่าความแข็งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้เอจิงแล้วยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอบละลายอีกด้วยโดยการอบละลายที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการอบละลายที่อุณหภูมิต่ำ

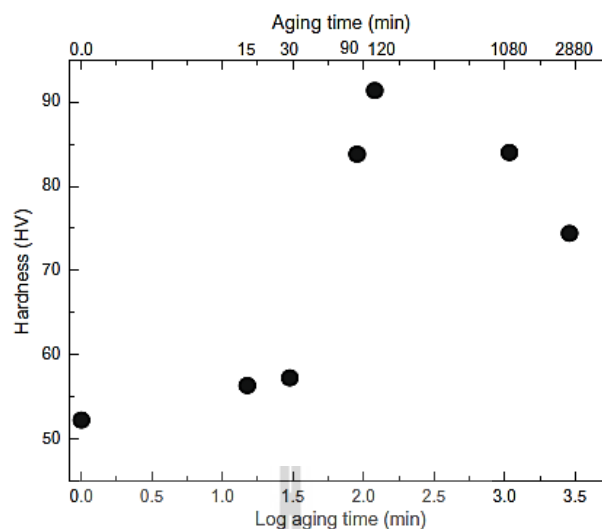
Ozturk, Sisman, Toros, Kilic and Picu (2010) ได้ศึกษาโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยการนำมาอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกที่อุณหภูมิอบละลาย 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และชุบในน้ำอย่างรวดเร็ว จากนั้นนำไปเอจิงที่อุณหภูมิ 200°C ที่เวลาแตกต่างกันคือ 0.5, 1.5, 2, 18 และ 48 ชั่วโมง ดังแสดงขั้นตอนการทดลองในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการทดลอง

(Ozturk, Sisman, Toros, Kilic and Picu, 2010)

จากการศึกษาพบว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 200°C ค่าความแข็งที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้เอจิง โดยให้ค่าความแข็งสูงสุดที่เวลา 2 ชั่วโมง และค่าความแข็งลดลงเมื่อใช้เวลาเอจิง 18 และ 48 ชั่วโมง ดังแสดงในรูป 2.9



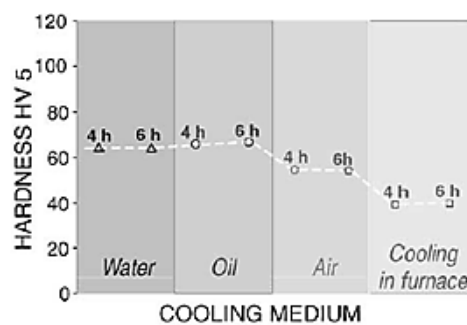
รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับเวลาที่ใช้เองจริง

(Ozturk, Sisman, Toros, Kilic and Picu, 2010)

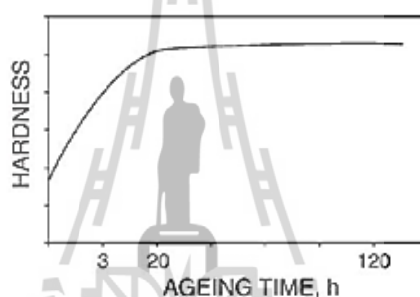
Mrówka-Nowotnik and Sieniawski (2009) ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวกลางที่ใช้ในการชุบ (media) และอุณหภูมิอบละลายของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6082 และ 6005 โดยการศึกษาใช้อุณหภูมิอบละลายที่ 570°C เป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในตัวกลางที่แตกต่างกัน คือ น้ำ, น้ำมัน, อากาศ และในเตา จากการศึกษาพบว่า การเย็นตัวในน้ำและน้ำมันให้ค่าความแข็งสูงสุดและมีค่าใกล้เคียงกันโดยไม่มีความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการอบละลายดังแสดงในรูป 2.10

จากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเย็นตัวในน้ำ (quenching) เกิดการเองจริงโดยธรรมชาติ (natural aging) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 ชั่วโมง และวัดค่าความแข็งแบบบรินเนลจากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง จนถึงชั่วโมงที่ 20 ค่าความแข็งจะเริ่มคงที่ดังรูป 2.11

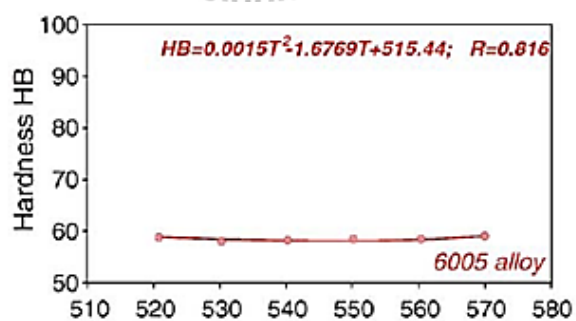
และจากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอบละลายยังพบว่าโลหะผสมอะลูมิเนียม 6082 นอกจากค่าความแข็งจะขึ้นกับเวลาเองจริงแล้วยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้อบละลายอีกด้วย ส่วนโลหะผสมอะลูมิเนียม 6005 พบว่าอุณหภูมิอบละลายไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง ดังรูป 2.12 และ 2.13



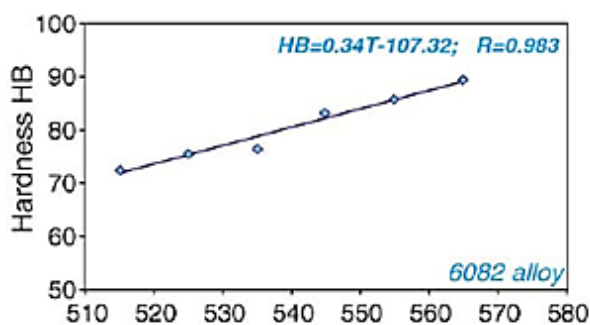
รูปที่ 2.10 แสดงค่าความแข็งกับตัวกลางที่ใช้ในการเย็นตัวของโลหะผสม 6082
(Mrówka-Nowotnik and Sieniawski, 2009)



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงค่าความแข็งกับเวลาที่ใช้เองจึงโลหะผสม 6005 และ 6082
(Mrówka-Nowotnik and Sieniawski, 2009)



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งกับอุณหภูมิอบละลายโลหะผสม 6005
(Mrówka-Nowotnik and Sieniawski, 2009)

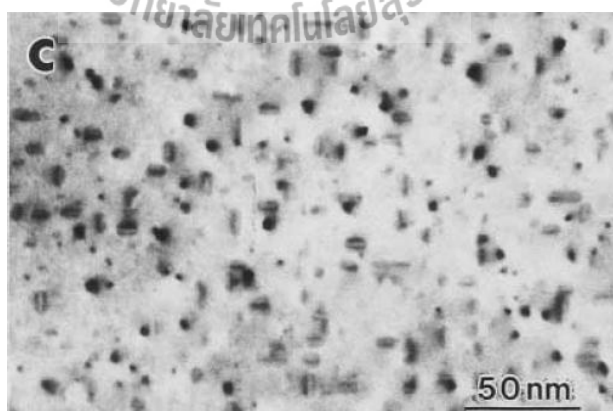


รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งกับอุณหภูมิอบละลายโลหะผสม 6082

(Mrówka-Nowotnik and Sieniawski, 2009)

Edwards, Stiller, Dunlop and Couper (1998) ได้แสดงลำดับการเปลี่ยนแปลงเฟสของ Mg_2Si ของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 ดังนี้ supersaturated solid solution (SSS) $\rightarrow$ needle shaped (β'') $\rightarrow$ rod shaped (β') $\rightarrow$ β (Mg_2Si) และจากการศึกษาโดยการอบละลายที่ $530^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปเอจิงที่อุณหภูมิ $175^\circ C$ และ $200^\circ C$

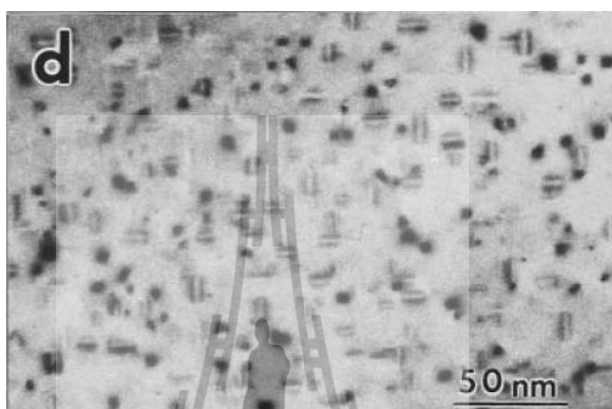
จากการศึกษาพบว่าการเอจิงที่ $175^\circ C$ เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง แล้วตรวจสอบโครงสร้างจุลภาพด้วยเครื่อง Transmission electron microscopy (TEM) พบว่าลักษณะของการตกผลึกของ β'' นั้นยังมีขนาดเล็กมีความยาวประมาณ 7 นาโนเมตร ดังรูป 2.14 ส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้ค่อนข้างต่ำ เรียกการเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า under aged



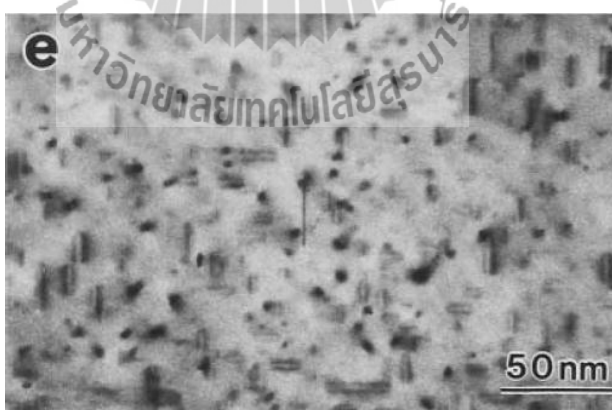
รูปที่ 2.14 โครงสร้างจุลภาคของการเอจิงที่ $175^\circ C$ เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง

(Edwards, Stiller, Dunlop and Couper, 1998)

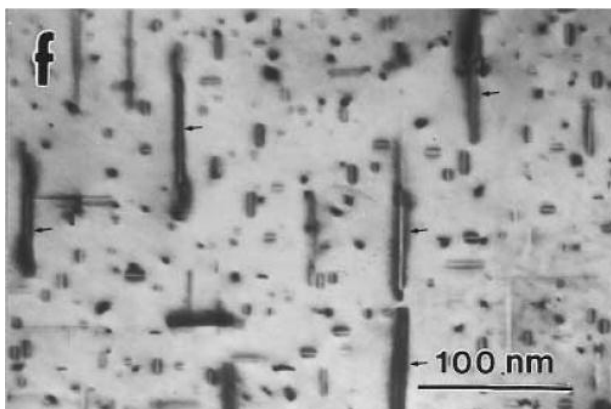
และเมื่อเอจิงที่ 175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าลักษณะของ β'' มีขนาดความยาวเพิ่มขึ้นจากเดิมโดยมีความยาวประมาณ 10-15 นาโนเมตร ดังรูป 2.15 และเมื่อเวลาเอจิงเพิ่มมากขึ้นเป็น 72 ชั่วโมง β'' จะเปลี่ยนเฟสเป็น β' และ β (Mg_2Si) ตามลำดับซึ่งจะส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้ลดลง (over aged) สังเกตว่าการเอจิงที่ 175°C ลักษณะของ β'' ที่เปลี่ยนไปเป็นเฟส β (Mg_2Si) นั้นยังมีการกระจายตัวที่ดีและมีขนาดใกล้เคียงกัน ดังรูป 2.16



รูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของการเอจิงที่ 175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
(Edwards, Stiller, Dunlop and Couper, 1998)



รูปที่ 2.16 โครงสร้างจุลภาคของการเอจิงที่ 175°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง
(Edwards, Stiller, Dunlop and Couper, 1998)

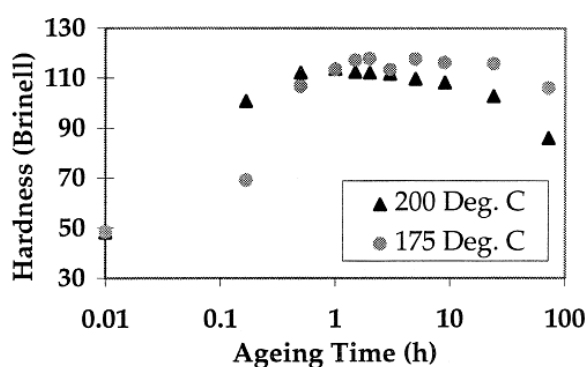


รูปที่ 2.17 โครงสร้างจุลภาคของการเอจิงที่ 200°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

(Edwards, Stiller, Dunlop and Couper, 1998)

รูป 2.17 แสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่เอจิงด้วยอุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง จากรูปแสดงให้เห็นลักษณะของเฟสซึ่งมีการกระจายตัวและมีขนาดใหญ่แสดงให้เห็นว่าการเอจิงที่อุณหภูมิสูงลักษณะการกระจายตัวของผลึกที่เกิดขึ้นจะกระจายตัวต่ำกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิต่ำและมีขนาดของผลึกยาวคล้ายเข็ม (B' lath shaped) ส่งผลให้การเอจิงที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปรากฏการณ์ over aged เร็วกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 200°C จะเกิดปรากฏการณ์นี้ที่เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง

จากการศึกษาได้นำค่าความแข็งที่ได้จากการเอจิงที่อุณหภูมิ 175°C และ 200°C มาพล็อตกราฟค่าความแข็งกับเวลาที่ใช้เอจิง ดังรูป 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงค่าความแข็งที่อุณหภูมิเอจิง 175°C และ 200°C

(Edwards, Stiller, Dunlop and Couper, 1998)

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 175°C ในช่วงแรกของการเอจิงค่าความแข็งที่ได้จะต่ำกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 200°C เมื่อเวลาผ่านไปการเอจิงที่ 175°C จะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 200°C ค่าความแข็งสูงสุด (peak hardness) ของการเอจิงที่อุณหภูมิ 175°C ที่เวลาประมาณ 8 ชั่วโมง จะสูงกว่าค่าความแข็งสูงสุดของการเอจิงที่อุณหภูมิ 200°C นอกจากนี้จากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าการเอจิงที่อุณหภูมิสูงค่าความแข็งที่ได้จะลดลงเร็วกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิต่ำ แม้ว่าการเอจิงที่อุณหภูมิสูงในช่วงแรกจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าอุณหภูมิต่ำก็ตาม

Mahadevan, Raghukandan, Senthilvelan, Pai and Pillai (2006) ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม AA6061-SiC_p โดยการศึกษาได้นำหลักการทางสถิติมาใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ 2³ แฟคทอเรียล โดยมีเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 8 เงื่อนไข แต่ละเงื่อนไขทดลองซ้ำ 2 ครั้ง (2 replicates) โดยปัจจัยและระดับปัจจัยดังแสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแบบ 2³ แฟคทอเรียล

(Mahadevan, Raghukandan, Senthilvelan, Pai and Pillai, 2006)

ปัจจัย	ระดับปัจจัย	
	ต่ำ (-1)	สูง (1)
solution time (h), S _t	1	5
aging time (h), A _t	2	12
aging temperature (°C), A _T	130	220

ในการทดลองใช้อุณหภูมิอบละลายคงที่ที่ 530°C และวัดค่าความแข็งแบบบริเนล (BHN) นำค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนและพบว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยคือ เวลาอบละลาย, อุณหภูมิเอจิง และเวลาเอจิงมีอิทธิพลส่งผลกระทบต่อค่าความแข็ง นอกจากนี้อิทธิพลร่วมสองปัจจัยและสามปัจจัยต่างก็ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งเช่นกัน โดยที่อิทธิพลร่วมสามปัจจัยมีอิทธิพลส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งมากที่สุดและสามารถสร้างโมเดลเพื่อประมาณค่าความแข็งได้โดยเลือกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญมาเป็นตัวแปรอิสระในโมเดลประมาณค่าความแข็งดังนี้

$$Y = 95.72 + 7.906S_t + 10.78A_t + 7.78A_T - 7.63S_tA_T - 3.63A_tA_T + 2.081S_tA_tA_T$$

นอกจากนี้ในการทดลองทำนองเดียวกัน Mahadevan, Raghukandan, Pai and Pillai (2008) ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงต่อความล้า โดยได้กำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยเช่นเดียวกับการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงคือ เวลาอบละลาย, อุณหภูมิเอนจิง และเวลาเอนจิง จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัย คือ เวลาอบละลาย, อุณหภูมิเอนจิง, เวลาเอนจิง และอิทธิพลร่วมสองปัจจัยมีอิทธิพลส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรง โดยเวลาอบละลายมีอิทธิพลส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงมากที่สุดและสามารถสร้างโมเดลประมาณค่าความแข็งแรงดังนี้

$$Y = 6.744 + 4.939S_t + 3.337A_t + 0.866A_i + 4.035S_t A_t + 1.655A_t A_i + 0.90S_t A_i$$

2.3 สรุป

ความแข็งแรงและความแข็งแรงของชิ้นงานทดลองจากการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิอบละลาย (solution temperature), เวลาอบละลาย (solution time), อุณหภูมิเอนจิง (aging temperature), เวลาเอนจิง (aging time), และตัวกลางที่ใช้ชุบในขั้นตอนการทำ quenching ส่วนใหญ่ของงานวิจัยทางด้านโลหะวิทยานี้ใช้วิธีดูผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวที่สนใจเท่านั้นและคงที่ปัจจัยอื่นทุกปัจจัย (one-experiment-at-the-time) และไม่มีการนำแผนการทดลองทางสถิติมาใช้ยกเว้นงานของ Mahadevan และคณะเท่านั้น

ปัจจัยที่มีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งแรงหลังการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกนอกจากจะเป็นอุณหภูมิและเวลาการอบละลายแล้วยังรวมไปถึงอุณหภูมิและเวลาของการอบละลายต่อค่าความแข็งแรงด้วย

บทที่ 3

การดำเนินการทดลอง

3.1 การทดสอบเบื้องต้นก่อนกำหนดแผนการทดลอง

ก่อนกำหนดแผนการทดลองได้มีการทดสอบเบื้องต้น (trial experiments) เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยสำหรับใช้ในงานทดลองจริงเพื่อให้แน่ใจได้ว่าระดับของปัจจัยในการทดลองจริงจะสามารถแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในตัวแปรตามที่น่าสนใจได้และเมื่อนำผลจากการทดสอบดังกล่าวมาพิจารณาพร้อมกับข้อแนะนำทางปฏิบัติของ ASTM (ASTM Standards, 1998) แล้วจึงสรุปได้เป็นตารางที่ 3.1 ซึ่งแสดงระดับสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละปัจจัย

และได้ขยายการทดลองเบื้องต้นออกไปให้ครอบคลุมถึงการตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่เกี่ยวข้องตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องในทางปฏิบัติต่าง ๆ โดยดำเนินการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล

ตารางที่ 3.1 แสดงปัจจัยและระดับปัจจัยสำหรับการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล

ปัจจัย	ระดับปัจจัย	
	ต่ำ (-1)	สูง (1)
solution time (hr), A	1	3
solution temperature (°C), B	500	540
aging time (hr), C	2	14
aging temperature (°C), D	175	225

การทดลองอบชุบเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการตกผลึกโดยทดลองตามเงื่อนไขทั้ง 16 เงื่อนไขจากการออกแบบแผนการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล และทดลองแต่ละเงื่อนไขซ้ำ 1 ครั้ง (รวมเป็น 2 เปรดิกเตด) ตาราง 3.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแท็บ

ตารางที่ 3.2 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F	P-Value
A	1	1.14	1.14	0.1	0.756
B	1	7523.04	7523.04	664.07	0.000*
C	1	1802.55	1802.55	159.11	0.000*
D	1	403.92	403.92	35.65	0.000*
AB	1	57.16	57.16	5.05	0.039
AC	1	41.79	41.79	3.69	0.073
AD	1	0.16	0.16	0.01	0.906
BC	1	662.21	662.21	58.45	0.000*
BD	1	26.44	26.44	2.33	0.146
CD	1	2165.64	2165.64	191.16	0.000*
ABC	1	2.06	2.06	0.18	0.676
ABD	1	4.8	4.8	0.42	0.524
ACD	1	49.28	49.28	4.35	0.053
BCD	1	140.99	140.99	12.45	0.003
ABCD	1	34.22	34.22	3.02	0.101
Error	16	181.26	11.33		
Total	31	13096.67			

หมายเหตุ : * ในตารางแสดงค่า P-Value ที่น้อยกว่า 0.001 เป็นศูนย์

จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าไม่มีเพียงอิทธิพลหลัก (main effects) ของเวลาอบละลาย (solution time, A) เท่านั้นที่ไม่ได้แสดงผลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นส่วนใหญ่ปัจจัยร่วมระดับที่หนึ่ง (first order interactions) ยกเว้นอิทธิพลร่วมระหว่างเวลาอบละลายกับอุณหภูมิเองจึง (AD) ต่างก็แสดงอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรง ซึ่งอันที่จริงการทดลองโดยใช้ระดับปัจจัย 2 ระดับ ที่มีความแตกต่างระหว่างระดับมากเช่นนี้ มีโอกาสที่อิทธิพลของปัจจัยร่วมจะบดบังอิทธิพลของเวลาอบละลาย หรือกล่าวได้ว่าเวลาอบละลายมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรง แต่อิทธิพลของเวลาอบละลายขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นคือ อุณหภูมิอบละลาย (B) และเวลาเองจึง (C)

เพราะฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าอิทธิพลหลักของทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของโลหะผสม อะลูมิเนียม 6061 อย่างมีนัยสำคัญ

ถึงแม้ว่าการออกแบบแผนการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล จะทำให้สามารถพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงและสามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงและปัจจัยที่สนใจในเชิงเส้นตรงได้ แต่เนื่องจากการออกแบบระดับของปัจจัยแตกต่างกันมากจึงทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการบดบังอิทธิพลของปัจจัยที่พิจารณาได้ (รัตนภรณ์ และ ขงยุทธ, 2553)

3.2 แผนการทดลอง

เพื่อขจัดจุดอ่อนของแผนการทดลอง 2^4 ดังได้กล่าวแล้วและจากการพิจารณาเส้นโค้งอิทธิพลของปัจจัยแต่ละปัจจัย (ในรูป 1.4 และ 1.5) ทำให้เห็นว่าควรขยายการทดลองออกไปเป็น 3^4 อย่างเต็มรูปแบบ (full form factorial experiments) โดยไม่มีการทำซ้ำ (no replication) เพราะจากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาให้ค่า error mean square ซึ่งสามารถใช้เป็นค่าเปรียบเทียบได้และคาดว่าค่า error จะไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก และส่วนลำดับของการทดลองทั้งหมดเป็นไปแบบสุ่มบริบูรณ์ (completely randomized design) เพื่อให้ความผิดพลาดของการทดลองที่ไม่สามารถควบคุมได้ (uncontrollable experimental errors) เฉลี่ยให้กับทุกค่าข้อมูล

ตามแผนการทดลองแบบ 3^4 แฟคทอเรียล สามารถเขียนรูปแบบทั่วไปของค่าความแข็งแรงที่ได้ดังในตาราง 3.3 ซึ่งสัญลักษณ์ 0, 1, 2 แทนระดับของปัจจัย เช่น 0000 หมายถึง ปัจจัย A, B, C และ D อยู่ในระดับต่ำ, 0012 หมายถึง ปัจจัย A และ B อยู่ในระดับต่ำ, ปัจจัย C อยู่ในระดับปานกลาง และปัจจัย D อยู่ในระดับสูง แต่ในการออกแบบเชิงปริมาณสัญลักษณ์ของปัจจัยจะแทนระดับต่ำ ปานกลาง และสูงด้วย -1, 0, 1 ซึ่งจะทำให้ง่ายในการสร้างแบบจำลองถดถอยเพื่อประมาณค่าความแข็งแรงที่เกิดจากแต่ละระดับของปัจจัยที่พิจารณาดังแสดงในตาราง 3.3

จากตารางสามารถเขียน โมเดลคณิตศาสตร์ของค่าวัด (response หรือ dependent variable) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติดังนี้

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\tau\delta)_{il} + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\gamma\delta)_{kl} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + (\tau\beta\delta)_{ijl} + (\tau\gamma\delta)_{ikl} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + \varepsilon_{ijkl} \quad (3.1)$$

โดย

μ คือ ผลเฉลี่ยทั้งหมด
 τ_i คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ i ของปัจจัย A, ($i=1, 2, 3$)

β_j	คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ j ของปัจจัย B, ($j=1, 2, 3$)
γ_k	คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ k ของปัจจัย C, ($k=1, 2, 3$)
δ_l	คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ l ของปัจจัย D, ($l=1, 2, 3$)
$(\tau\beta)_{ij}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ β_j
$(\tau\gamma)_{ik}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ γ_k
$(\tau\delta)_{il}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ δ_l
$(\beta\gamma)_{jk}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_j และ γ_k
$(\beta\delta)_{jl}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_j และ δ_l
$(\gamma\delta)_{kl}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง γ_k และ δ_l
$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i, β_j และ γ_k
$(\tau\beta\delta)_{ijl}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i, β_j และ δ_l
$(\tau\gamma\delta)_{ikl}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i, γ_k และ δ_l
$(\beta\gamma\delta)_{jkl}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_j, γ_k และ δ_l
ε_{ijkl}	$\approx (\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl}$

ตารางที่ 3.3 แสดงรูปแบบทั่วไปของค่าความแข็งแกร่งจากการออกแบบการทดลองแบบ 3^4 แฟกทอเรียล

aging time (C)	aging temp (D)	solution treatment time (A)								
		0			1			2		
		solution treatment temp (B)			solution treatment temp (B)			solution treatment temp(B)		
		0	1	2	0	1	2	0	1	2
0	0	Y_{1111}	Y_{1211}	Y_{1311}	Y_{2111}	Y_{2211}	Y_{2311}	Y_{3111}	Y_{3211}	Y_{3311}
	1	Y_{1112}	Y_{1212}	Y_{1312}	Y_{2112}	Y_{2212}	Y_{2312}	Y_{3112}	Y_{3212}	Y_{3312}
	2	Y_{1113}	Y_{1213}	Y_{1313}	Y_{2113}	Y_{2213}	Y_{2313}	Y_{3113}	Y_{3213}	Y_{3313}
1	0	Y_{1121}	Y_{1221}	Y_{1321}	Y_{2121}	Y_{2221}	Y_{2321}	Y_{3121}	Y_{3221}	Y_{3321}
	1	Y_{1122}	Y_{1222}	Y_{1322}	Y_{2122}	Y_{2222}	Y_{2322}	Y_{3122}	Y_{3222}	Y_{3322}
	2	Y_{1123}	Y_{1223}	Y_{1323}	Y_{2123}	Y_{2223}	Y_{2323}	Y_{3123}	Y_{3223}	Y_{3323}
2	0	Y_{1131}	Y_{1231}	Y_{1331}	Y_{2131}	Y_{2231}	Y_{2331}	Y_{3131}	Y_{3231}	Y_{3331}
	1	Y_{1132}	Y_{1232}	Y_{1332}	Y_{2132}	Y_{2232}	Y_{2332}	Y_{3132}	Y_{3232}	Y_{3332}
	2	Y_{1133}	Y_{1233}	Y_{1333}	Y_{2133}	Y_{2233}	Y_{2333}	Y_{3133}	Y_{3233}	Y_{3333}

ตารางที่ 3.4 แสดงปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแบบ 3^4 แฟกทอเรียล

ปัจจัย	ระดับต่ำ (-1)	ระดับปานกลาง (0)	ระดับสูง (+1)
solution time (hr), A	1	2	3
solution temperature ($^{\circ}\text{C}$), B	520	540	560
aging time (hr), C	2	8	14
aging temperature ($^{\circ}\text{C}$), D	175	200	225

ตาราง 3.4 สรุประดับต่าง ๆ ของแต่ละปัจจัยในการทดลอง 3^4 แฟกทอเรียล ซึ่งการทดลองแบบแฟกทอเรียลนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกันทั้งอิทธิพลของปัจจัยหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยหรือที่เรียกว่าอันตรกิริยา (interactions) (ประไพศรี และ พงศ์ชนัน, 2551) เช่น การทดลองนี้เป็นการศึกษา 4 ปัจจัย คือ ปัจจัย A, B, C และ D จึงสามารถจำแนกอิทธิพลที่เกิดขึ้นได้เป็น 4 ประเภท คือ

- 1) อิทธิพลหลักหรืออิทธิพลปัจจัยเดียว (main effects) คือ อิทธิพลที่เกิดจากการพิจารณาครั้งละปัจจัย คือ ปัจจัย A, B, C และ D
- 2) อิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factor หรือ 2-Way Interaction) คือ อิทธิพลที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันครั้งละ 2 ปัจจัย คือ AB, AC, AD, BC, BD และ CD
- 3) อิทธิพลร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย (Three-Factor หรือ 3-Way Interaction) คือ อิทธิพลที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันครั้งละ 3 ปัจจัย คือ ABC, ABD, ACD และ BCD
- 4) อิทธิพลร่วม 4 ปัจจัย (Four-Factor หรือ 4-Way Interaction) คือ อิทธิพลที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกัน 4 ปัจจัย คือ ABCD

ซึ่งการออกแบบแฟกทอเรียลแบบสามระดับนอกจากจะศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงได้แล้วยังสามารถศึกษาความสัมพันธ์เส้นโค้งได้อีกด้วย

3.3 ลำดับการทดลอง

เมื่อกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่ต้องการศึกษาแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 3^4 แล้วสามารถกำหนดเงื่อนไขการทดลองได้ทั้งหมด 81 เงื่อนไข ดังตารางที่ 3.5 โดยตัวเลข 1-81 ที่ปรากฏในตาราง คือ เงื่อนไขการทดลองของชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้น ซึ่งชิ้นงานทดสอบที่นำมากำหนดแต่ละเงื่อนไขทั้ง 81 เงื่อนไขได้มาจากการสุ่มเพื่อให้ชิ้นงานแต่ละชิ้นมีโอกาสที่จะถูกเลือกเท่ากัน

ในการทดลองของแต่ละเงื่อนไขที่ปรากฏในตารางเป็นแบบสุ่มแบบสุ่มบริบูรณ์ (completely randomized design) โดยทำการสุ่มลำดับการทดลอง เช่น ในการสุ่มครั้งที่ 1 ได้เงื่อนไขการทดลองที่ 11 (คือ อบละลายที่ 540°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเอจจิงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) ก็ให้ทดลองเงื่อนไขนี้เป็นลำดับแรก จากนั้นสุ่มการทดลองต่อไปทำเช่นนี้จนครบ 81 เงื่อนไข จะได้ลำดับการทดลองของแต่ละเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 3.6

ซึ่งลำดับการทดลองในตารางที่ 3.6 ตัวเลขในวงกลมแสดงเพียงบางส่วนของลำดับการทดลองที่เป็นไปแบบสุ่ม เช่น เลข 4 ในวงกลมแสดงว่าเงื่อนไขที่ 1 จะถูกทดลองเป็นลำดับที่ 4 เป็นต้น โดยลำดับการทดลองทั้งหมดจะแสดงในตารางที่ ก.2 ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 3.5 แสดงเงื่อนไขการทดลองทั้ง 81 เงื่อนไข

aging time (C)	aging temp (D)	solution treatment time (A)								
		1			2			3		
		solution treatment temp (B)			solution treatment temp (B)			solution treatment temp (B)		
		520	540	560	520	540	560	520	540	560
2	175	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	200	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	225	19	20	21	22	23	24	25	26	27
8	175	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	200	37	38	39	40	41	42	43	44	45
	225	46	47	48	49	50	51	52	53	54
14	175	55	56	57	58	59	60	61	62	63
	200	64	65	66	67	68	69	70	71	72
	225	73	74	75	76	77	78	79	80	81

ตารางที่ 3.6 แสดงลำดับการทดลองของแต่ละเงื่อนไข

aging time (C)	aging temp (D)	solution treatment time (A)								
		1			2			3		
		solution treatment temp (B)			solution treatment temp (B)			solution treatment temp (B)		
		520	540	560	520	540	560	520	540	560
2	175	4	23	41	..	..	..	..	..	..
	200	31	1	..	..	..	..	..	..	..
	225	:	:	..	..	..	..	..	..	..
8	175	:	:	..	..	..	..	..	..	..
	200	:	:	..	..	..	..	..	..	..
	225	:	:	..	..	..	..	..	..	..
14	175	:	:	..	..	..	..	..	..	..
	200	:	:	..	..	..	..	..	..	..
	225	:	:	..	..	..	..	..	..	..

3.4 การเตรียมการสำหรับการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร และความยาวเท่ากับ 25.4 ± 0.01 มิลลิเมตร จำนวน 81 ชิ้น

การเตรียมชิ้นงานเริ่มจากการนำโลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นเส้น (rod) ไปตัดด้วยเครื่องตัดแบบสายพานให้ได้ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองจำนวน 81 ชิ้น แล้วกลึงให้ได้ความยาวตามที่กำหนดและมีผิวหน้าที่เรียบเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดจากขนาดของชิ้นงานและให้สามารถวัดค่าความแข็งได้ทันทีหลังผ่านกระบวนการอบชุบแข็ง เนื่องจากการวัดความแข็งแบบบริเนลชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบต้องได้ระนาบกับพื้นผิวทดสอบและมีผิวเรียบจึงจะสามารถวัดค่าความแข็งได้ รายละเอียดของการเตรียมการเพื่อการทดลองมีดังนี้

3.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องเลื่อยแบบสายพาน
- 2) เครื่องกลึง



รูปที่ 3.1 แสดงภาพเครื่องเลื่อยแบบสายพาน

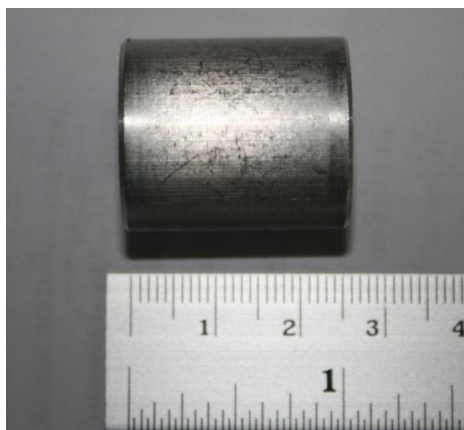


รูปที่ 3.2 แสดงภาพเครื่องกลึง

3.4.2 การเตรียมขนาดและผิวชิ้นงาน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในที่นี่จึงสรุปอีกครั้งหนึ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

- 1) เลื่อยตัดเส้นอะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ยาว 28 มิลลิเมตร จำนวน 81 ชิ้น
- 2) นำชิ้นงานไปกลึงปาดหน้าทั้งสองข้างให้ได้ความยาว 25.4 ± 0.01 มิลลิเมตร และมีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงภาพชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

3.5 อุปกรณ์และการดำเนินการทดลอง

ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองนั้นได้มีการสอบเทียบเตาไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (calibration) ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ (thermometer) เพื่อทดสอบว่าไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิในเตา ถ้าใช้เตาอบชิ้นงานทดสอบในช่วงเวลาที่ต่างกัน และจากการทดสอบพบว่าไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิในเตาถ้าใช้เตาอบชิ้นงานทดสอบในช่วงเวลาต่างกัน ดังแสดงในภาคผนวก ข

3.5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เตาเผาไฟฟ้า
- 2) เทอร์โมมิเตอร์



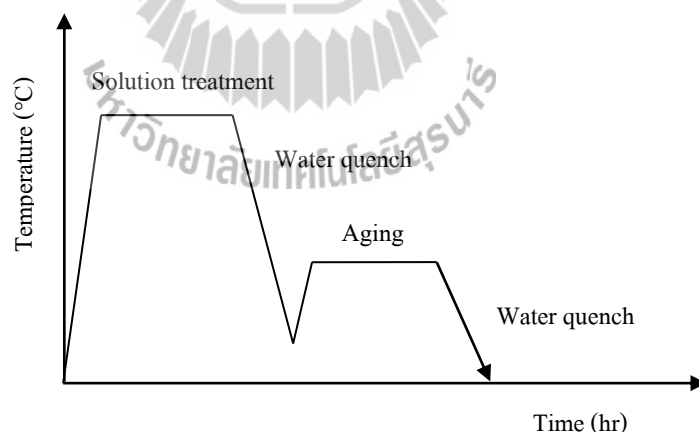
รูปที่ 3.4 แสดงภาพเตาเผาไฟฟ้า



รูปที่ 3.5 แสดงภาพเทอร์โมมิเตอร์ รุ่น UN-350A

3.5.2 ขั้นตอนการอบชุบชิ้นงาน

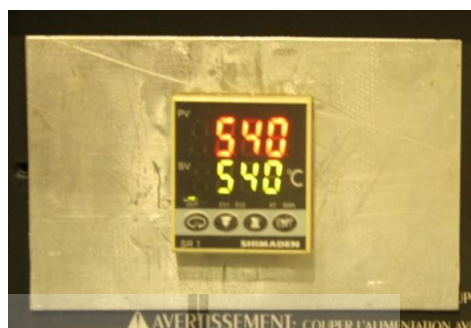
จากรูป 3.6 แสดงขั้นตอนการอบชุบชิ้นงานด้วยวิธีการตกผลึก โดยมีขั้นตอนหลัก ๆ อยู่ 3 ขั้นตอน คือ การอบละลาย (solution treatment), การชุบน้ำ (quenching) และการทำเอจิง (aging) โดยเวลาและอุณหภูมิของการทำอบละลายและเอจิงในการอบชุบแต่ละครั้งนั้นจะกำหนดโดยเงื่อนไขของแต่ละลำดับการทดลองในตาราง 3.6



รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการอบชุบ

และเนื่องจากการทดลองทั้งหมดมีจำนวน 81 เงื่อนไข จึงขอแสดงตัวอย่างขั้นตอนอบชุบชิ้นงานเงื่อนไขที่ 2 คือ อบละลายที่ 540°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเอจิงที่ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งทดลองเป็นลำดับที่ 23 โดยมีขั้นตอน ดังนี้

- 1) ปรับตั้งค่าอุณหภูมิเตาไปที่ 540°C ปล่อยให้อุณหภูมิภายในเตาเท่ากับ 540°C ดังรูป 3.7



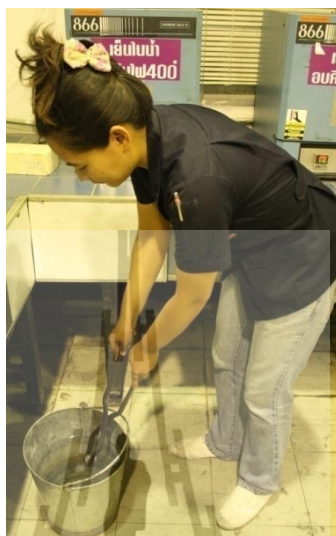
รูปที่ 3.7 แสดงการปรับตั้งอุณหภูมิเตาที่ 540°C

- 2) นำชิ้นงานเข้าเตาเผาไฟฟ้าและจับเวลาที่อุณหภูมิ 540°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เฟสของสารละลายของแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียมกลายเป็นเฟสเดียวหรือเป็นเนื้อเดียวกันในสภาพที่เป็นของแข็ง ดังรูป 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงวิธีการนำชิ้นงานทดสอบเข้าเตาไฟฟ้า

- 3) หลังจากอบละลายที่ 540°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานชุบในน้ำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีธาตุผสมของ Mg_2Si ละลายอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าสภาพสมดุล (supersaturated solid solution) ดังรูป 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงการนำชิ้นงานทดสอบชุบในน้ำ

- 4) นำชิ้นงานเข้าเตาที่ได้ปรับตั้งค่าอุณหภูมิเอาไว้แล้วที่ 175°C อีกครั้ง และเอจเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการตกผลึกของ Mg_2Si ภายในโครงสร้างพื้นฐานดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงการปรับตั้งอุณหภูมิเตาที่ 175°C

- 5) เมื่อเอจิงที่ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วให้นำชิ้นงานทดสอบชุบน้ำทันที เพื่อหยุดกระบวนการตกผลึกและวัดค่าความแข็งแบบบริเนลทันที

3.6 การทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness tester)

หลังจากอบชุบชิ้นงานตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้วให้นำชิ้นงานมาวัดความแข็งแบบบริเนลทันทีเพราะการปล่อยชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องชิ้นงานจะยังคงเกิดการตกผลึก (natural aging)

3.6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล
- 2) ไมโครสโคปทูลเมคเกอร์



รูปที่ 3.11 แสดงภาพเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล



รูปที่ 3.12 แสดงภาพไมโครสโคปทูลเมคเกอร์ (Tool making microscope)

3.6.2 วิธีทดสอบความแข็งแบบบริเนล

- 1) นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบชุบแข็งมาวัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลขนาดหัวกด 10 มิลลิเมตร โหลด 500 kgf กดนาน 30 วินาที โดยแต่ละชิ้นจะกดวัดจำนวน 4 ครั้ง ดังรูป 3.13 และ 3.14

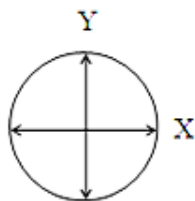


รูปที่ 3.13 แสดงวิธีวัดความแข็งแบบบริเนล



รูปที่ 3.14 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการวัดความแข็งแบบบริเนล

- 2) นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการวัดความแข็งมาวัดขนาดของรอยกดทั้ง 4 จุด ด้วยเครื่องไมโครสโคปทูลเมคเกอร์ โดยการวัดขนาดของรอยกดจะวัดในแนวแกน X และ Y ซึ่งแต่ละจุดจะวัดขนาดแนวแกน X จำนวน 2 ครั้ง และวัดขนาดแนวแกน Y จำนวน 2 ครั้ง ดังรูป 3.15 แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละจุด ดังแสดงในตาราง ค.1 ในภาคผนวก ค



รูปที่ 3.15 แสดงการวัดขนาดรอยกดของชิ้นงานทดสอบ

- 3) นำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการเฉลี่ยแต่ละจุดมาอ่านค่าความแข็งจากตารางแสดงค่าความแข็ง (ASTM, 1998) ในตาราง ค.2 ภาคผนวก ค เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.64 มิลลิเมตร จะสามารถอ่านค่าความแข็งจากตารางได้เท่ากับ 89.70 BHN
- 4) นำค่าความแข็งทั้ง 4 จุด มาเฉลี่ยอีกครั้งเพื่อให้ได้ค่าความแข็งเฉลี่ยของแต่ละชิ้นงานทดสอบแล้วบันทึกผลการทดลองลงในตาราง 3.7

ตารางที่ 3.7 แสดงตารางบันทึกผลค่าความแข็งที่ได้จากการทดลอง (BHN)

aging time (C)	aging temp (D)	solution treatment time (A)								
		1			2			3		
		solution treatment temp (B)			solution treatment temp (B)			solution treatment temp (B)		
		520	540	560	520	540	560	520	540	560
2	175	59.75	91.30	91.85	59.30	84.45	97.98	76.63	87.35	94.95
	200	88.23	98.30	109.50	92.00	106.00	111.25	93.85	104.25	113.75
	225	83.95	104.50	109.75	84.43	99.20	116.50	83.65	102.25	114.00
8	175	92.00	104.00	109.25	96.10	106.75	108.25	93.48	107.75	109.25
	200	92.60	105.5	115.75	90.23	107.00	117.00	94.40	108.00	117.25
	225	80.90	103.63	111.00	87.38	102.75	116.25	85.43	106.75	115.50
14	175	94.23	104.75	113.00	98.00	110.00	113.25	96.50	110.00	113.50
	200	92.40	105.00	115.75	96.30	105.50	116.75	93.48	110.75	119.25
	225	85.88	96.70	111.50	86.05	93.65	103.00	87.88	98.03	112.75

3.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนนั้นต้องเตรียมผิวของชิ้นงานให้เรียบและเงาเพื่อให้สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาค โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

3.7.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) กระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 และเบอร์ 4000
- 2) ผ้าสักหลาด
- 3) เครื่องขัดกระดาษทรายแบบละเอียด
- 4) เครื่องขัดผ้าสักหลาด
- 5) พงขัดอะลูมิเนียมขนาด 0.3 และ 0.05 ไมครอน
- 6) เครื่องเป่าลม
- 7) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)
- 8) Keller's each



รูปที่ 3.16 แสดงภาพเครื่องขัดกระดาษทรายแบบละเอียด



รูปที่ 3.17 แสดงภาพเครื่องขัดผ้าสักหลาด



รูปที่ 3.18 แสดงภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-6400

3.7.2 ขั้นตอนเตรียมผิวชิ้นงานและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

- 1) จัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 และ 4000 ตามลำดับจนผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ
- 2) นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการขัดกระดาษทรายมาขัดด้วยผ้าสักหลาดด้วยผงขัดอะลูมินา 0.3 และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับเพื่อให้ผิวหน้าชิ้นงานเรียบและเงา
- 3) นำชิ้นที่ขัดด้วยผ้าสักหลาดมาล้างด้วยน้ำและแอลกอฮอล์เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลม
- 4) นำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

3.8 สรุป

การทดลองแบบ 3^4 แฟคทอเรียล ได้พัฒนามาจากการทดลองเบื้องต้น 2^4 ทำให้สามารถครอบคลุมอิทธิพลที่นอกเหนือจากอิทธิพลเชิงเส้นตรงของปัจจัยอิสระในการทดลอง ถึงแม้ว่าจำนวน experimental units จะมากกว่าเดิมและจะต้องใช้เวลาในการทดลองมากกว่าเดิมมากและมีความแตกต่างบ้างในสิ่งแวดล้อมตั้งแต่เริ่มทดลองจนถึงสิ้นสุดการทดลองแต่ด้วย randomization ของลำดับการทดลองจะสามารถเฉลี่ยอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมให้สม่ำเสมอกับทุกค่าของข้อมูลได้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 ผลการทดลอง

ตาราง 4.1 เป็นค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่ผิวชิ้นงานทดสอบซึ่งเป็นผลของการดำเนินการทดลองตามขั้นตอนดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยแสดงเป็นค่าความแข็งแรงที่เกิดจากแต่ละเงื่อนไขของการทดลองแบบ 3⁴ แฟกทอเรียล

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงที่ผิวของชิ้นงานทดสอบ

aging time (C)	aging temp (D)	solution treatment time (A)								
		1			2			3		
		solution treatment temp (B)			solution treatment temp (B)			solution treatment temp (B)		
		520	540	560	520	540	560	520	540	560
2	175	59.75	91.30	91.85	59.30	84.45	97.98	76.63	87.35	94.95
	200	88.23	98.30	109.50	92.00	106.00	111.25	93.85	104.25	113.75
	225	83.95	104.50	109.75	84.43	99.20	116.50	83.65	102.25	114.00
8	175	92.00	104.00	109.25	96.10	106.75	108.25	93.48	107.75	109.25
	200	92.60	105.50	115.75	90.23	107.00	117.00	94.40	108.00	117.25
	225	80.90	103.63	111.00	87.38	102.75	116.25	85.43	106.75	115.50
14	175	94.23	104.75	113.00	98.00	110.00	113.25	96.50	110.00	113.50
	200	92.40	105.00	115.75	96.30	105.50	116.75	93.48	110.75	119.25
	225	85.88	96.70	111.50	86.05	93.65	103.00	87.88	98.03	112.75

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองส่วนใหญ่ใช้โปรแกรมมินิแท็บ (Minitab) แต่ในที่นี้ได้แสดงการคำนวณในส่วนของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA-analysis of variance table) ควบคู่ไปกับการใช้มินิแท็บด้วย

โมเดลคณิตศาสตร์ (effect model) ของค่าความแข็งที่ได้จากการทดลอง 3^4 แฟกทอเรียล (สมการ 3.1) โดยไม่มีการทดลองซ้ำ

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\tau\delta)_{il} + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\gamma\delta)_{kl} + \varepsilon_{ijkl}$$

โดย

μ	คือ ผลเฉลี่ยทั้งหมด
τ_i	คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ i ของปัจจัย A, ($i=1, 2, 3$)
β_j	คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ j ของปัจจัย B, ($j=1, 2, 3$)
γ_k	คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ k ของปัจจัย C, ($k=1, 2, 3$)
δ_l	คือ อิทธิพลที่เกิดจากระดับที่ l ของปัจจัย D, ($l=1, 2, 3$)
$(\tau\beta)_{ij}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ β_j
$(\tau\gamma)_{ik}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ γ_k
$(\tau\delta)_{il}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ δ_l
$(\beta\gamma)_{jk}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_j และ γ_k
$(\beta\delta)_{jl}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง β_j และ δ_l
$(\gamma\delta)_{kl}$	คือ อิทธิพลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง γ_k และ δ_l
ε_{ijkl}	$\approx$ ผลรวมของอิทธิพลรวมที่เกิดจาก 3 ปัจจัย $(\tau\beta\gamma)_{ijk}, (\tau\beta\delta)_{ijl}, (\tau\gamma\delta)_{ikl}, (\beta\gamma\delta)_{jkl}, (\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl}$

โดยค่าประมาณความแข็ง (y_{ijkl}) จากสมการได้จากการประมาณค่าที่ปัจจัย A อยู่ในระดับที่ i (1, 2, 3), ปัจจัย B อยู่ในระดับที่ j (1, 2, 3), ปัจจัย C อยู่ในระดับที่ k (1, 2, 3), และปัจจัย D อยู่ในระดับที่ l (1, 2, 3) และจากสมการจะเห็นว่าอิทธิพลรวมที่เกิดจากระดับปัจจัยของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมสองปัจจัยที่เกิดขึ้นจะเท่ากับศูนย์แล้ว $y_{ijkl} = \mu$ แสดงว่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแต่ถ้าปัจจัยเหล่านั้นของปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใดปัจจัยหนึ่งมีค่าไม่เท่ากับศูนย์จะทำให้ค่าความแข็งเบี่ยงเบนออกจากค่าเฉลี่ย ดังนั้น

$$\sum_{i=1}^3 \tau_i = 0, \sum_{j=1}^3 \beta_j = 0, \sum_{k=1}^3 \gamma_k = 0, \sum_{l=1}^3 \delta_l = 0, \sum_{i=1}^3 (\tau\beta)_{ij} = 0, \sum_{i=1}^3 (\tau\gamma)_{ik} = 0, \sum_{i=1}^3 (\tau\delta)_{il} = 0, \sum_{j=1}^3 (\beta\gamma)_{jk} = 0, \sum_{j=1}^3 (\beta\delta)_{jl} = 0 \text{ และ } \sum_{k=1}^3 (\gamma\delta)_{kl} = 0 \quad (4.1)$$

จากสมการ (4.1) สามารถเขียนเป็นสมมติฐานสำหรับการทดสอบทางสถิติเกี่ยวกับอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมต่าง ๆ ได้ดังสมการ (4.2) ถึง (4.11) โดยที่ H_0 คือ สมมติฐานหลัก (null hypothesis) และ H_1 คือสมมติฐานรอง (alternative hypothesis)

$$\begin{aligned} H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0 \\ H_1 : \tau_i \text{ ของปัจจัย A อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0 \\ H_1 : \beta_i \text{ ของปัจจัย B อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0 \\ H_1 : \gamma_i \text{ ของปัจจัย C อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} H_0 : \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0 \\ H_1 : \delta_i \text{ ของปัจจัย D อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \\ H_1 : (\tau\beta)_{ij} \text{ ของปัจจัยร่วม AB อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} H_0 : (\tau\gamma)_{ik} = 0 \\ H_1 : (\tau\gamma)_{ik} \text{ ของปัจจัยร่วม AC อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} H_0 : (\tau\delta)_{il} = 0 \\ H_1 : (\tau\delta)_{il} \text{ ของปัจจัยร่วม AD อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0$$

$$H_1: (\beta\gamma)_{jk} \text{ ของปัจจัยร่วม BC อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \quad (4.9)$$

$$H_0: (\beta\delta)_{jl} = 0$$

$$H_1: (\beta\delta)_{jl} \text{ ของปัจจัยร่วม BD อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \quad (4.10)$$

$$H_0: (\gamma\delta)_{kl} = 0$$

$$H_1: (\gamma\delta)_{kl} \text{ ของปัจจัยร่วม CD อย่างน้อยหนึ่งค่าไม่เท่ากับศูนย์} \quad (4.11)$$

จะสังเกตเห็นได้ว่าการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลักและปัจจัยของการทดลองนี้ พิจารณาอิทธิพลของปัจจัยร่วมสองปัจจัยเท่านั้น เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วปัจจัยร่วมสามปัจจัยหรือมากกว่าจะไม่มีอิทธิพลต่อค่าวัดในการทดลอง (ปรเมศ, 2545) เพราะฉะนั้นอิทธิพลร่วมของปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัย จะรวมกันเป็นค่าประมาณของความผิดพลาดของการทดลอง (errors)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทำได้โดยการหาผลรวมกำลังสองของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม เราสามารถเขียนสมการของผลรวมกำลังสองได้ดังนี้

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_C + SS_D + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{AD} + SS_{BC} + SS_{BD} + SS_{CD} + SS_E \quad (4.12)$$

จากสมการสามารถหาผลรวมกำลังสองของค่าความผิดพลาดได้จาก

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{AD} - SS_{BC} - SS_{BD} - SS_{CD} \quad (4.13)$$

ผลรวมกำลังสองของปัจจัยหลักของแต่ละปัจจัยนั้นสามารถแบ่งออกเป็นผลรวมกำลังสอง ส่วนของเชิงเส้นตรง (linear) และควอดราติก (quadratic) เช่น ปัจจัย A จะแบ่งเป็นเชิงเส้นตรง A_L และควอดราติก A_Q ผลรวมกำลังสองของปัจจัยร่วมสองปัจจัยก็สามารถแบ่งออกเป็นส่วนของเชิงเส้นตรงและควอดราติกเช่นกัน เช่น ปัจจัยร่วมสองปัจจัย AB สามารถแบ่งเป็น $A_L B_L$, $A_L B_Q$, $A_Q B_L$, $A_Q B_Q$

ค่าผลรวมกำลังสองสามารถหาได้โดยการหาค่าประมาณของแต่ละปัจจัยและปัจจัยร่วมจากการคูณสัมประสิทธิ์คอนแทสต์ (orthogonal contrast coefficients) ของระดับปัจจัยทั้งในเชิงเส้นตรง

และควอดราติกคือ -1, 0, 1 และ 1, -2, 1 ตามลำดับกับค่าความแข็งแกร่งของแต่ละการทดลองร่วม ปัจจัยดังแสดงในภาคผนวก ง แล้วนำมาบวกกันทั้ง 81 การทดลองจากสมการ 4.14 และ 4.15 (Hicks and Charles, 1999)

$$c = c_1T_1 + c_2T_2 + c_3T_3 + c_4T_4 \dots \dots + c_{81}T_{81} \quad (4.14)$$

$$SS_c = \frac{c^2}{n \sum c_i^2} \quad (4.15)$$

จากสมการที่ 4.14 และ 4.15 สามารถหาค่าประมาณและค่าผลรวมกำลังสองของปัจจัยและปัจจัยร่วม

โดย c_i คือ สัมประสิทธิ์คอนแทรสต์
 n คือ จำนวนการทดลองซ้ำ

$$\begin{aligned} C_{AL} &= (-1)(59.75) + (-1)(88.23) + (-1)(83.95) + (-1)(92.00) + (-1)(92.60) + \dots + (1)(112.75) \\ &= 79.65 \end{aligned}$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 54, n = 1$$

$$SS_{AL} = \frac{C_{AL}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(79.65)^2}{1(54)} \\ &= 117.48 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{AQ} &= (1)(59.75) + (1)(88.23) + (1)(83.95) + (1)(92.00) + (1)(92.60) + \dots + (1)(112.75) \\ &= 10.95 \end{aligned}$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 162, n = 1$$

$$SS_{A_Q} = \frac{C_{A_Q}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(10.95)^2}{1(162)}$$

$$= 0.740$$

นำค่า SS_{A_L} และ SS_{A_Q} มาบวกกันจะได้ค่ากำลังสองของเวลาอบละลาย (A) มีค่าเท่ากับ 118.224

$$C_{B_L} = (-1)(59.75) + (-1)(88.23) + (-1)(83.95) + (-1)(92.00) + (-1)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 632.80$$

และ $\sum c_i^2 = 54, n = 1$

$$SS_{B_L} = \frac{C_{B_L}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(632.80)^2}{1(54)}$$

$$= 7415.48$$

$$C_{B_Q} = (1)(59.75) + (1)(88.23) + (1)(83.95) + (1)(92.00) + (1)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= -165.45$$

และ $\sum c_i^2 = 162, n = 1$

$$SS_{B_Q} = \frac{C_{B_Q}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(-165.45)^2}{1(162)}$$

$$= 168.973$$

นำค่า SS_{B_L} และ SS_{B_Q} มาบวกกันจะได้ค่ากำลังสองของอุณหภูมิอบละลาย (B) มีค่าเท่ากับ 7584.45

$$C_{C_L} = (-1)(59.75) + (-1)(88.23) + (-1)(83.95) + (0)(92.00) + (0)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 224.925$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 162, n = 1$$

$$SS_{C_L} = \frac{C_{C_L}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(224.925)^2}{1(54)}$$

$$= 936.875$$

$$C_{C_Q} = (1)(59.75) + (1)(88.23) + (1)(83.95) + (-2)(92.00) + (-2)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= -225.525$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 162, n = 1$$

$$SS_{C_Q} = \frac{C_{C_Q}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(-225.525)^2}{1(162)}$$

$$= 313.96$$

นำค่า SS_{C_L} และ SS_{C_Q} มาบวกกันจะได้ค่ากำลังสองของเวลาเองจึง (C) มีค่าเท่ากับ 1250.84

$$C_{D_L} = (-1)(59.75) + (0)(88.23) + (1)(83.95) + (-1)(92.00) + (0)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 59.625$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 54, n = 1$$

$$SS_{D_L} = \frac{C_{D_L}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(59.625)^2}{1(54)}$$

$$= 65.8359$$

$$C_{DQ} = (1)(59.75) + (-2)(88.23) + (1)(83.95) + (1)(92.00) + (-2)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= -333.225$$

และ $\sum c_i^2 = 162, n = 1$

$$SS_{DQ} = \frac{C_{DQ}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(-333.225)^2}{1(162)}$$

$$= 685.425$$

นำค่า SS_{DL} และ SS_{DQ} มาบวกกันจะได้ค่ากำลังสองของอุณหภูมิเองจึง (D) มีค่าเท่ากับ 751.261

$$C_{ALBL} = (1)(59.75) + (1)(88.23) + (1)(83.95) + (1)(92.00) + (1)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= -12.5$$

และ $\sum c_i^2 = 36, n = 1$

$$SS_{ALBL} = \frac{C_{ALBL}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(-12.50)^2}{1(36)}$$

$$= 4.340$$

$$C_{ALBQ} = (-1)(59.75) + (-1)(88.23) + (-1)(83.95) + (-1)(92.00) + (-1)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 15.3$$

และ $\sum c_i^2 = 108, n = 1$

$$SS_{ALBQ} = \frac{C_{ALBQ}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(15.30)^2}{1(108)}$$

$$= 2.168$$

$$C_{AQB_L} = (-1)(59.75) + (-1)(88.23) + (-1)(83.95) + (-1)(92.00) + (-1)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 1.45$$

และ $\sum c_i^2 = 108, n = 1$

$$SS_{AQB_L} = \frac{C_{AQB_L}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(1.45)^2}{1(108)}$$

$$= 0.019$$

$$C_{AQB_Q} = (1)(59.75) + (1)(88.23) + (1)(83.95) + (1)(92.00) + (1)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= -43.65$$

และ $\sum c_i^2 = 324, n = 1$

$$SS_{AQB_Q} = \frac{C_{AQB_Q}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(-43.65)^2}{1(324)}$$

$$= 5.881$$

เมื่อนำค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยร่วมในเชิงเส้นตรงและครอคราติกทั้งหมดคือ $A_L B_L$, $A_L B_Q$, $A_Q B_L$, $A_Q B_Q$ มารวมกันจะได้กำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยร่วม AB เท่ากับ 12.408

$$C_{A_L C_L} = (1)(59.75) + (1)(88.23) + (1)(83.95) + (0)(92.00) + (0)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= -10.625$$

และ $\sum c_i^2 = 36, n = 1$

$$\begin{aligned}
 SS_{A_L C_L} &= \frac{C_{A_L C_L}^2}{n \sum c_i^2} \\
 &= \frac{(-10.625)^2}{1(36)} \\
 &= 3.136
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{A_L C_Q} &= (-1)(59.75) + (-1)(88.23) + (-1)(83.95) + (2)(92.00) + (2)(92.60) + \dots + (1)(112.75) \\
 &= 10.125
 \end{aligned}$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 108, n = 1$$

$$\begin{aligned}
 SS_{A_L C_Q} &= \frac{C_{A_L C_Q}^2}{n \sum c_i^2} \\
 &= \frac{(10.125)^2}{1(108)} \\
 &= 0.949
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{A_Q C_L} &= (-1)(59.75) + (-1)(88.23) + (-1)(83.95) + (0)(92.00) + (0)(92.60) + \dots + (1)(112.75) \\
 &= 10.725
 \end{aligned}$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 108, n = 1$$

$$\begin{aligned}
 SS_{A_Q C_L} &= \frac{C_{A_Q C_L}^2}{n \sum c_i^2} \\
 &= \frac{(10.725)^2}{1(108)} \\
 &= 1.065
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{A_Q C_Q} &= (1)(59.75) + (1)(88.23) + (1)(83.95) + (-2)(92.00) + (-2)(92.60) + \dots + (1)(112.75) \\
 &= 43.875
 \end{aligned}$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 324, n = 1$$

$$SS_{A_Q C_Q} = \frac{C_{A_Q C_Q}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(43.875)^2}{1(324)}$$

$$= 5.941$$

นำค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยร่วมในเชิงเส้นตรงและครอคราติกทั้งหมดคือ $A_L C_L$, $A_L C_Q$, $A_Q C_L$, $A_Q C_Q$ มารวมกันจะได้กำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยร่วม AC เท่ากับ 11.092

$$C_{A_L D_L} = (1)(59.75) + (0)(88.23) + (-1)(83.95) + (1)(92.00) + (0)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= -10.85$$

และ $\sum c_i^2 = 36, n = 1$

$$SS_{A_L D_L} = \frac{C_{A_L D_L}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(-10.85)^2}{1(36)}$$

$$= 3.270$$

$$C_{A_L D_Q} = (-1)(59.75) + (2)(88.23) + (-1)(83.95) + (-1)(92.00) + (2)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= -16.2$$

และ $\sum c_i^2 = 108, n = 1$

$$SS_{A_L D_Q} = \frac{C_{A_L D_Q}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(-16.20)^2}{1(108)}$$

$$= 2.43$$

$$C_{A_Q D_L} = (-1)(59.75) + (0)(88.23) + (1)(83.95) + (-1)(92.00) + (0)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 14.25$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 108, n = 1$$

$$SS_{A_Q D_L} = \frac{C_{A_Q D_L}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(14.25)^2}{1(108)}$$

$$= 1.880$$

$$C_{A_Q D_Q} = (1)(59.75) + (-2)(88.23) + (1)(83.95) + (1)(92.00) + (-2)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 29.10$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 324, n = 1$$

$$SS_{A_Q D_Q} = \frac{C_{A_Q D_Q}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(29.10)^2}{1(324)}$$

$$= 2.614$$

นำค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยร่วมในเชิงเส้นตรงและครอคราติกทั้งหมดคือ $A_L D_L$, $A_L D_Q$, $A_Q D_L$, $A_Q D_Q$ มารวมกันจะได้กำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยร่วม AD เท่ากับ 10.194

$$C_{B_L C_L} = (1)(59.75) + (1)(88.23) + (1)(83.95) + (0)(92.00) + (0)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= -49.7$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 36, n = 1$$

$$SS_{B_L C_L} = \frac{C_{B_L C_L}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(-49.70)^2}{1(36)}$$

$$= 68.614$$

$$C_{B_L C_Q} = (-1)(59.75) + (-1)(88.23) + (-1)(83.95) + (2)(92.00) + (2)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 11.80$$

และ $\sum c_i^2 = 108, n = 1$

$$SS_{B_L C_Q} = \frac{C_{B_L C_Q}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(11.80)^2}{1(108)}$$

$$= 1.289$$

$$C_{B_Q C_L} = (-1)(59.75) + (-1)(88.23) + (-1)(83.95) + (0)(92.00) + (0)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 54.60$$

และ $\sum c_i^2 = 108, n = 1$

$$SS_{B_Q C_L} = \frac{C_{B_Q C_L}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(54.60)^2}{1(108)}$$

$$= 27.60$$

$$C_{B_Q C_Q} = (1)(59.75) + (1)(88.23) + (1)(83.95) + (-2)(92.00) + (-2)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 51.30$$

และ $\sum c_i^2 = 324, n = 1$

$$SS_{B_Q C_Q} = \frac{C_{B_Q C_Q}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(51.30)^2}{1(324)}$$

$$= 8.123$$

นำค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยร่วมในเชิงเส้นตรงและครอคราติกทั้งหมดคือ $B_L C_L$, $B_L C_Q$, $B_Q C_L$, $B_Q C_Q$ มารวมกันจะได้กำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยร่วม BC เท่ากับ 105.629

$$C_{B_L D_L} = (1)(59.75) + (0)(88.23) + (-1)(83.95) + (1)(92.00) + (0)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 59.425$$

และ $\sum c_i^2 = 36, n = 1$

$$SS_{B_L D_L} = \frac{C_{B_L D_L}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(59.425)^2}{1(36)}$$

$$= 98.093$$

$$C_{B_L D_Q} = (-1)(59.75) + (2)(88.23) + (-1)(83.95) + (-1)(92.00) + (2)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 24.475$$

และ $\sum c_i^2 = 108, n = 1$

$$SS_{B_L D_Q} = \frac{C_{B_L D_Q}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(24.475)^2}{1(108)}$$

$$= 5.547$$

$$C_{B_Q D_L} = (-1)(59.75) + (0)(88.23) + (1)(83.95) + (-1)(92.00) + (0)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 56.325$$

และ $\sum c_i^2 = 108, n = 1$

$$SS_{B_Q D_L} = \frac{C_{B_Q D_L}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(56.325)^2}{1(108)} \\ = 29.375$$

$$C_{B_Q D_Q} = (1)(59.75) + (-2)(88.23) + (1)(83.95) + (1)(92.00) + (-2)(92.60) + \dots + (1)(112.75) \\ = -72.825$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 324, n = 1$$

$$SS_{B_Q D_Q} = \frac{C_{B_Q D_Q}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(-72.825)^2}{1(324)} \\ = 16.369$$

นำค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยร่วมในเชิงเส้นตรงและกรอบคราดิกทั้งหมดคือ $B_L D_L$, $B_L D_Q$, $B_Q D_L$, $B_Q D_Q$ มารวมกันจะได้กำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยร่วม BD เท่ากับ 149.383

$$C_{C_L D_L} = (1)(59.75) + (0)(88.23) + (-1)(83.95) + (0)(92.00) + (0)(92.60) + \dots + (1)(112.75) \\ = -232.475$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 36, n = 1$$

$$SS_{C_L D_L} = \frac{C_{C_L D_L}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(-232.475)^2}{1(36)} \\ = 1501.240$$

$$C_{c_L D_Q} = (-1)(59.75) + (2)(88.23) + (-1)(83.95) + (0)(92.00) + (0)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 110.775$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 108, n = 1$$

$$SS_{c_L D_Q} = \frac{C_{c_L D_Q}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(110.775)^2}{1(108)}$$

$$= 113.621$$

$$C_{c_Q D_L} = (-1)(59.75) + (0)(88.23) + (1)(83.95) + (2)(92.00) + (0)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= 111.375$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 108, n = 1$$

$$SS_{c_Q D_L} = \frac{C_{c_Q D_L}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(111.375)^2}{1(108)}$$

$$= 114.855$$

$$C_{c_Q D_Q} = (1)(59.75) + (-2)(88.23) + (1)(83.95) + (-2)(92.00) + (4)(92.60) + \dots + (1)(112.75)$$

$$= -156.075$$

$$\text{และ } \sum c_i^2 = 324, n = 1$$

$$SS_{c_Q D_Q} = \frac{C_{c_Q D_Q}^2}{n \sum c_i^2}$$

$$= \frac{(-156.075)^2}{1(324)}$$

$$= 75.183$$

นำค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยร่วมในเชิงเส้นตรงและครอดราติกทั้งหมดคือ $C_L D_L$, $C_L D_Q$, $C_Q D_L$, $C_Q D_Q$ มารวมกันจะได้กำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยร่วม CD เท่ากับ 1804.900

จากข้อมูลในตาราง 4.1 สามารถหาค่าผลรวมกำลังสองทั้งหมดได้จากสมการ

$$SS_T = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 y_{ijkl}^2 - \frac{y_{...}^2}{81} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} SS_T &= ((59.75)^2 + (88.23)^2 + (83.95)^2 + (92.00)^2 + \dots + (112.75)^2) - \frac{8126.85^2}{81} \\ &= 827779.97 - 815378.90 \\ &= 12401.07 \end{aligned}$$

และจากสมการ 4.13 สามารถหาค่า SS_E ได้จาก

$$\begin{aligned} SS_E &= SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{AD} - SS_{BC} - SS_{BD} - SS_{CD} \\ &= 12401.07 - 118.224 - 7584.452 - 1250.835 - 751.261 - 12.408 - 11.092 - 10.194 - \\ &\quad 105.629 - 149.383 - 1804.900 \\ &= 602.696 \end{aligned}$$

เมื่อนำค่ากำลังสองของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมของปัจจัยมาหารด้วย degrees of freedom ที่มีค่าเท่ากับ 1 จะได้ค่ากำลังสองเฉลี่ยของแต่ละปัจจัย ถ้าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมของปัจจัยใดมีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งแรงค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย (Mean Squares หรือ MS) จะมีค่ามากกว่าค่ากำลังสองเฉลี่ยของค่าความผิดพลาด (MS_E) ซึ่งมีค่าประมาณ σ ถ้าอัตราส่วนมีค่ามากแสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นถ้าต้องการทดสอบว่าปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใดมีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญก็สามารถหารค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยด้วยค่าความผิดพลาด (MS_E) ดังแสดงในตาราง 4.2 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สามารถแสดงให้เห็นว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งแรงด้วยการเปรียบเทียบค่า F_0 ที่เกิดจากการหารค่ากำลังสองเฉลี่ยด้วยค่าความผิดพลาด ($F_0 = MS/MS_E$) กับค่าวิกฤตของการแจกแจงแบบ F ที่มีค่าเท่ากับ F_{α, v_1, v_2} ในการทดลองครั้งนี้กำหนดให้ใช้ $\alpha = 0.05$, v_1 คือ degrees of freedom ของปัจจัย และ v_2 คือ degrees of freedom ของ error

ฉะนั้นค่าวิกฤตของการแจกแจงแบบ F มีค่าเท่ากับ $F_{0.05,1,48} = 4.043$ ถ้าปัจจัยใดมีค่า $F_0 > 4.043$ เราจะปฏิเสธ H_0 นอกจากนั้นยังสามารถตรวจสอบด้วยค่า P-Value ถ้าปัจจัยใดมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยตาราง ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญของการทดสอบสมมุติฐาน 5% ($\alpha = 0.05$) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ 3^4 แฟกทอเรียล ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งแบบในเชิงเส้นตรง (linear) และควอดราติก (quadratic) และสามารถสรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญในเชิงเส้นตรงและควอดราติกได้ดังนี้

1) อิทธิพลของปัจจัยหลัก (main effect)

- เวลาอบละลายมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงในเชิงเส้นตรง
- อุณหภูมิอบละลายมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงทั้งในเชิงเส้นตรงและควอดราติก
- เวลาเอจจึงมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงทั้งในเชิงเส้นตรงและควอดราติก
- อุณหภูมิเอจจึงมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงทั้งในเชิงเส้นตรงและควอดราติก

2) อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (interaction effect)

- อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายในเชิงเส้นตรงมีอิทธิพลร่วมกับเวลาเอจจึงในเชิงเส้นตรง
- อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายในเชิงเส้นตรงมีอิทธิพลร่วมกับอุณหภูมิเอจจึงในเชิงเส้นตรง
- อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาเอจจึงกับอุณหภูมิเอจจึงมีอิทธิพลร่วมกันในเชิงเส้นตรงกับเส้นตรง, เส้นตรงกับควอดราติก, ควอดราติกกับเส้นตรง และควอดราติกกับควอดราติก

จากผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 3^4 แฟกทอเรียล ทำให้เราสามารถศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทั้งในเชิงเส้นตรงและควอดราติกได้ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญทั้งในเชิงเส้นตรงและและควอดราติกยกเว้นเวลาอบละลาย (A) ที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญในเชิงเส้นตรงเท่านั้น ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นโดยการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล พบว่าเวลาอบละลาย (A) ไม่ปรากฏผลในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนว่ามีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการออกแบบการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล ระดับของปัจจัยที่ศึกษามีความแตกต่างกันมากโอกาสที่อิทธิพลร่วมของปัจจัยจะบดบังอิทธิพลของปัจจัยหลัก

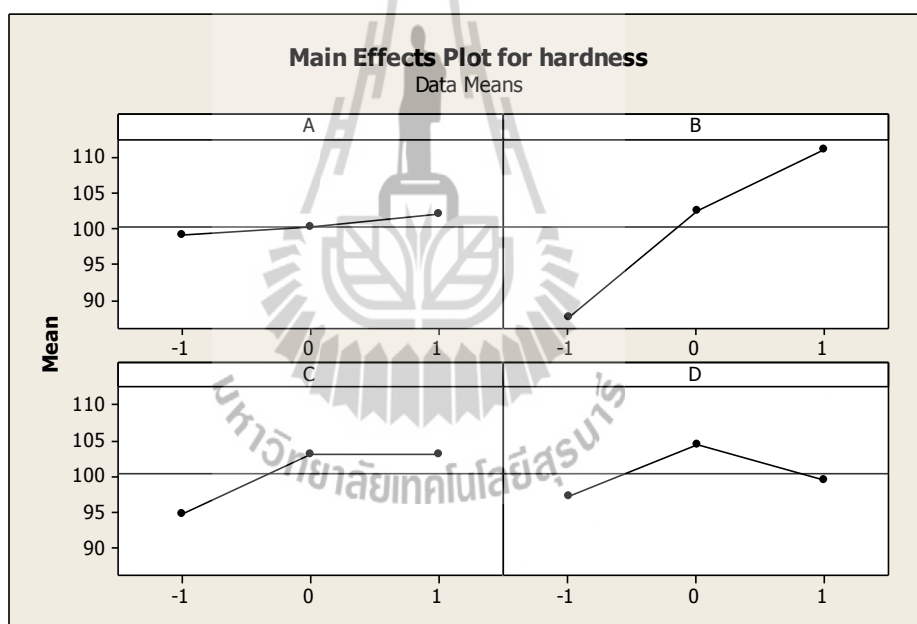
ตารางที่ 4.2 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3^4 (ANOVA)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F_0	P-Value
A	2	118.22	59.11	4.71	0.014
A _L	1	117.48	117.48	9.354	0.004
A _Q	1	0.74	0.74	0.059	0.809
B	2	7584.45	3792.23	302.02	0.000
B _L	1	7415.479	7415.479	590.404	0.000
B _Q	1	168.973	168.973	13.453	0.001
C	2	1250.84	625.42	49.81	0.000
C _L	1	936.875	936.875	74.592	0.000
C _Q	1	313.960	313.960	24.997	0.000
D	2	751.26	375.63	29.92	0.000
D _L	1	65.836	65.836	5.242	0.026
D _Q	1	685.425	685.425	54.572	0.000
AB	4	12.41	3.10	0.25	0.910
A _L B _L	1	4.340	4.340	0.346	0.559
A _L B _Q	1	2.168	2.168	0.173	0.680
A _Q B _L	1	0.019	0.019	0.002	0.969
A _Q B _Q	1	5.881	5.881	0.468	0.497
AC	4	11.09	2.77	0.22	0.926
A _L C _L	1	3.136	3.136	0.250	0.620
A _L C _Q	1	0.949	0.949	0.076	0.785
A _Q C _L	1	1.065	1.065	0.085	0.772
A _Q C _Q	1	5.941	5.941	0.473	0.495
AD	4	10.19	2.55	0.20	0.936
A _L D _L	1	3.270	3.270	0.260	0.612
A _L D _Q	1	2.430	2.430	0.193	0.662
A _Q D _L	1	1.880	1.880	0.150	0.701
A _Q D _Q	1	2.614	2.614	0.208	0.650
BC	4	105.63	26.41	2.10	0.095
B _L C _L	1	68.614	68.614	5.463	0.024
B _L C _Q	1	1.289	1.289	0.103	0.750
B _Q C _L	1	27.603	27.603	2.198	0.145
B _Q C _Q	1	8.122	8.122	0.647	0.425
BD	4	149.38	37.35	2.97	0.028
B _L D _L	1	98.093	98.093	7.810	0.007
B _L D _Q	1	5.547	5.547	0.442	0.510
B _Q D _L	1	29.375	29.375	2.339	0.133
B _Q D _Q	1	16.369	16.369	1.303	0.259
CD	4	1804.90	451.22	35.94	0.000
C _L D _L	1	1501.240	1501.240	119.525	0.000
C _L D _Q	1	113.621	113.621	9.046	0.004
C _Q D _L	1	114.855	114.855	9.145	0.004
C _Q D _Q	1	75.183	75.183	5.986	0.018
error	48	602.69	12.56		
total	80	12401.07			

4.3 วิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็ง

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยตาราง ANOVA แสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยมีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งอีกด้วย คือ อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจิง (BC), อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอจิง (BD) และเวลาเอจิงกับอุณหภูมิเอจิง (CD) เมื่อนำข้อมูลมาพล็อตกราฟระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยกับระดับของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมจะแสดงให้เห็นผลของอิทธิพลปัจจัยในลักษณะเชิงเส้นตรงและครอคราดิกดังแสดงในรูป 4.1-4.4 ซึ่งโดยปกติแล้วถ้าอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจะพิจารณาเพียงผลของปัจจัยร่วมเท่านั้น (ประไพศรี และ พงศ์ชนัน, 2551)

4.3.1 วิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยหลัก (main effect)



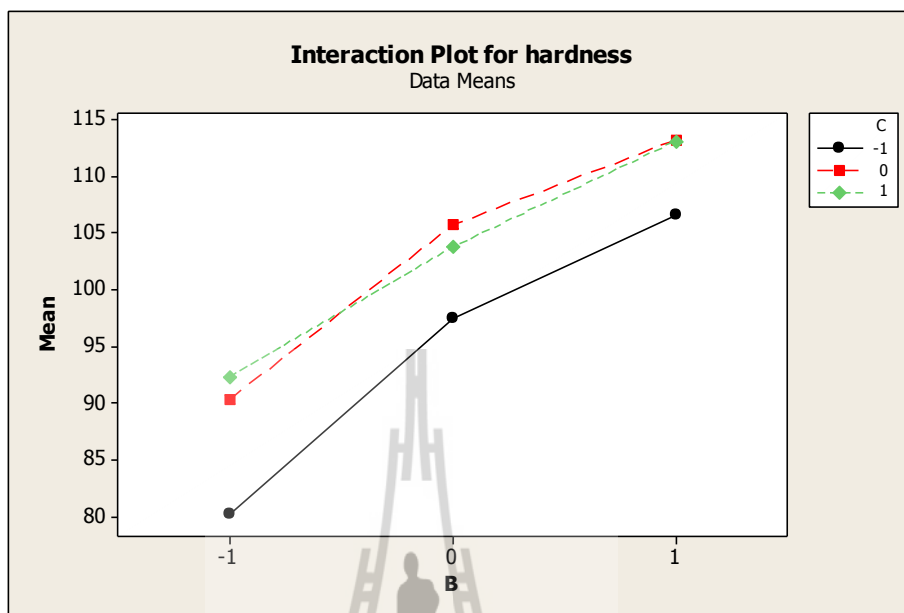
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยกับระดับของปัจจัยหลักแต่ละปัจจัย

พิจารณากราฟระหว่างค่าความแข็งแรงเทียบกับระดับปัจจัยหลักแต่ละปัจจัย ซึ่งกราฟจะแสดงให้เห็นผลของอิทธิพลของเวลาอบละลายในลักษณะเชิงเส้นตรงและผลของอิทธิพลของอุณหภูมิอบละลาย, เวลาเอจิง และอุณหภูมิเอจิงในลักษณะเชิงเส้นตรงและควอดราติก ดังนี้

- 1) เวลาอบละลาย (A) ที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับสูง คือ 3 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งแรงเทียบกับ 101.87 BHN ที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับปานกลางคือ 2 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งแรงเทียบกับ 100.20 BHN และที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับต่ำ คือ 1 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งแรงเทียบกับ 98.92 BHN
- 2) อุณหภูมิอบละลาย (B) ที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับสูงคือ 560°C จะได้ค่าความแข็งแรงเทียบกับ 111.03 BHN ที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับปานกลางคือ 540°C จะได้ค่าความแข็งแรงเทียบกับ 102.37 BHN และที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับต่ำคือ 520°C จะได้ค่าความแข็งแรงเทียบกับ 87.59 BHN
- 3) เวลาเอจิง (C) ที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับสูงคือ 14 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งแรงเทียบกับ 103.11 BHN ที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับปานกลางคือ 8 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งแรงเทียบกับ 103.12 BHN และที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับต่ำคือ 2 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งแรงเทียบกับ 94.77 BHN
- 4) อุณหภูมิเอจิง (D) ที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับสูงคือ 225°C จะได้ค่าความแข็งแรงเทียบกับ 99.38 BHN ที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับปานกลางคือ 200°C จะได้ค่าความแข็งแรงเทียบกับ 104.45 BHN และที่ระดับปัจจัยอยู่ที่ระดับต่ำคือ 175°C จะได้ค่าความแข็งแรงเทียบกับ 97.17 BHN

จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักคือ เวลาอบละลาย, อุณหภูมิอบละลาย, เวลาเอจิง ค่าความแข็งแรงมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาของปัจจัยเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิเอจิงนั้นค่าความแข็งแรงเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากระดับปัจจัยต่ำไประดับปานกลางแต่หลังจากนั้นค่าความแข็งแรงเฉลี่ยจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจากระดับปานกลางไปเป็นระดับสูง

4.3.2 วิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (interaction effect)

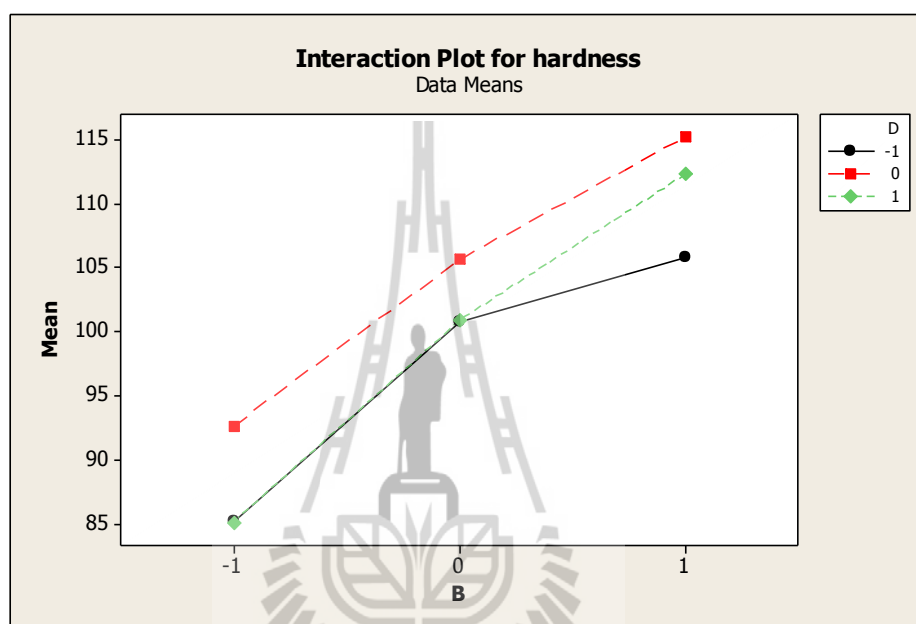


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเองจิ้ง

พิจารณากราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเองจิ้ง ซึ่งจะแสดงให้เห็นผลของอิทธิพลร่วมในเชิงเส้นตรงพบว่า

- 1) การเองจิ้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 520°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 80.18 BHN และค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 97.51 BHN และ 106.61 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 540°C และ 560°C ตามลำดับ
- 2) การเองจิ้งเป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 520°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 90.28 BHN และค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 105.79 BHN และ 113.28 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 540°C และ 560°C ตามลำดับ
- 3) การเองจิ้งเป็นเวลา 14 ชั่วโมง หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 520°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 92.30 BHN และค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 103.82 BHN และ 113.19 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 540°C และ 560°C ตามลำดับ

จะเห็นว่าค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบละลายและเวลาที่ใช้เองจึงในลักษณะเชิงเส้นตรง โดยการอบละลายที่อุณหภูมิสูงและใช้เวลาเองจินานจะทำให้ได้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าการอบละลายด้วยอุณหภูมิต่ำและใช้เวลาเองจिन้อย และจากกราฟจะสังเกตว่าการใช้เวลาเองจิงเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 14 ชั่วโมง หลังจากผ่านการอบละลายจะให้ค่าความแข็งเฉลี่ยใกล้เคียงกัน



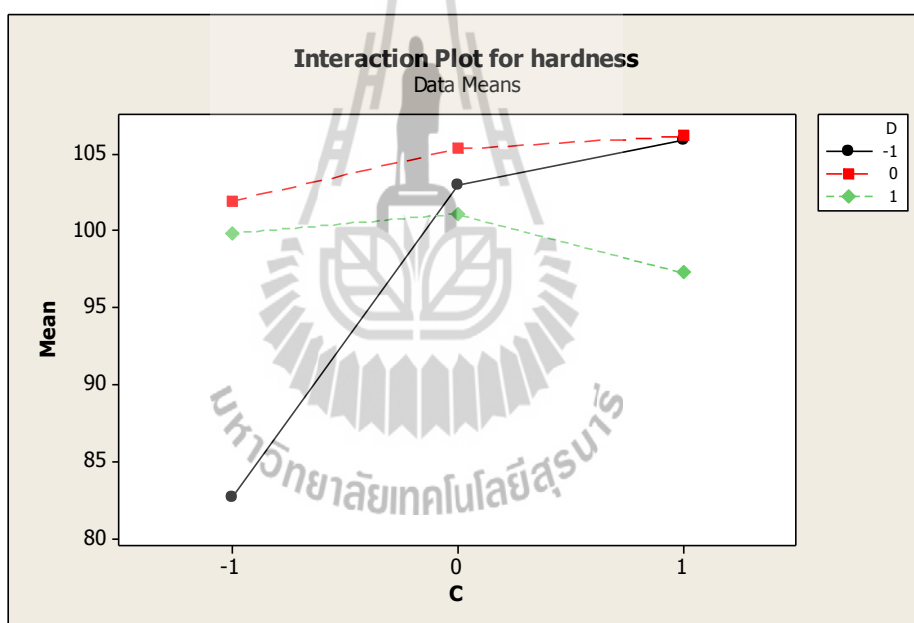
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเองจิง

พิจารณากราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเองจิง ซึ่งจะแสดงให้เห็นผลของอิทธิพลร่วมในเชิงเส้นตรงพบว่า

- 1) การเองจิงด้วยอุณหภูมิ 175°C หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 520°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 85.12 BHN และค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 100.71 BHN และ 105.70 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 540°C และ 560°C ตามลำดับ
- 2) การเองจิงด้วยอุณหภูมิ 200°C หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 520°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 92.61 BHN และค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 105.59 BHN และ 115.14 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 540°C และ 560°C ตามลำดับ

- 3) การเอจิงด้วยอุณหภูมิ 225°C หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 520°C จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 85.06 BHN และค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 100.83 BHN และ 112.25 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิ 540°C และ 560°C ตามลำดับ

จะเห็นว่าค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิที่ใช้เอจิงในลักษณะเชิงเส้นตรง โดยการอบละลายและเอจิงที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ได้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าการอบละลายและเอจิงที่อุณหภูมิต่ำ และจากกราฟจะสังเกตว่าการเอจิงด้วยอุณหภูมิ 175°C และ 225°C หลังจากผ่านกระบวนการอบละลายจะให้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากัน โดยการเอจิงด้วยอุณหภูมิ 200°C ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 175°C และ 225°C ที่ทุกระดับของอุณหภูมิอบละลาย



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างเวลากับอุณหภูมิเอจิง

พิจารณากราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างเวลากับอุณหภูมิเอจิง ซึ่งจะแสดงให้เห็นผลของอิทธิพลร่วมในเชิงเส้นตรงและครอดราดิกพบว่า

- 1) การเอจิงที่อุณหภูมิ 175°C และใช้เวลาเอจิง 2 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 82.62 BHN เมื่อใช้เวลาเอจิงเป็น 8 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็ง

เฉลี่ยเท่ากับ 102.98 BHN และเมื่อใช้เวลาอบจึงเป็น 14 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเท่ากับ 105.91 BHN

- 2) การอบจึงที่อุณหภูมิ 200°C และใช้เวลาอบจึง 2 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเท่ากับ 101.90 BHN เมื่อใช้เวลาอบจึงเป็น 8 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเท่ากับ 105.30 BHN และเมื่อใช้เวลาอบจึงเป็น 14 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเท่ากับ 106.13 BHN
- 3) การอบจึงที่อุณหภูมิ 225°C และใช้เวลาอบจึง 2 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเท่ากับ 99.80 BHN เมื่อใช้เวลาอบจึงเป็น 8 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเท่ากับ 101.06 BHN และเมื่อใช้เวลาอบจึงเป็น 14 ชั่วโมง จะได้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเท่ากับ 97.27 BHN

จะเห็นว่าการอบจึงด้วยอุณหภูมิต่ำ 175°C ต้องใช้ระยะเวลาอบจึงนานกว่าการอบจึงด้วยอุณหภูมิสูงจึงจะส่งผลได้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงถึงแม้ว่าการอบจึงด้วยอุณหภูมิต่ำมีแนวโน้มให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงกว่าการอบจึงด้วยอุณหภูมิ 200°C และ 225°C แต่ต้องใช้เวลาในการอบจึงนาน ในขณะที่เดียวกันการอบจึงด้วยอุณหภูมิสูงคือ 225°C จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่ได้ลดลงเร็วกว่าการอบจึงที่อุณหภูมิต่ำแม้ว่าในช่วง 2 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงก็ตาม และการอบจึงด้วยอุณหภูมิ 200°C จะให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ทุกระดับของเวลาอบจึง

4.4 แบบจำลองโมเดลประมาณค่าความแข็งแรง

จากการทดลองสามารถสร้างแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ (multiple linear regression model) ด้วยสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง (quadratic) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับตัวแปรในลักษณะเชิงเส้น โค้งได้ โดยการพิจารณาเพียงปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญได้ดังนี้

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{34} x_3 x_4 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{44} x_4^2 \quad (4.17)$$

โดย

$\hat{y}$ คือ ค่าประมาณความแข็งแรง (fitted value)

β_0 คือ ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

β คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย

x_1 คือ เวลาอบละลาย (A)

x_2 คือ อุณหภูมิอบละลาย (B)

x_3 คือ เวลาเอจจิง (C)

x_4 คือ อุณหภูมิเอจจิง (D)

จากสมการ 4.17 สามารถสร้างสมการประมาณค่าความแข็งในรูปรหัสระดับปัจจัยคือ -1, 0 และ +1 (coded levels) ของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญดังนี้

$$\hat{y} = 109 + 1.47A + 11.7B + 4.17C + 1.10D - 1.38BC + 1.65BD - 6.46CD - 3.06B^2 - 4.18C^2 - 6.17D^2 \quad (4.18)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการ 4.18 จะได้ค่าความแข็งที่เกิดจากการประมาณค่าจากโมเดลดังแสดงในตาราง 4.3 และจากการตรวจสอบ โมเดลที่พิจารณาเพียงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในตาราง 4.4

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าประมาณความแข็งจากโมเดลประมาณค่าความแข็ง (BHN)

aging time (C)	aging temp (D)	solution treatment time (A)								
		1			2			3		
		solution treatment temp (B)			solution treatment temp (B)			solution treatment temp (B)		
		520	540	560	520	540	560	520	540	560
2	175	71.21	85.72	94.11	72.69	87.20	95.58	74.16	88.67	97.06
	200	83.29	99.46	109.49	84.77	100.93	110.97	86.24	102.41	112.44
	225	83.03	100.85	112.53	84.51	102.32	114.01	85.98	103.80	115.48
8	175	87.39	100.52	107.53	88.87	102.00	109.00	90.34	103.47	110.48
	200	93.01	107.80	116.45	94.49	109.27	117.93	95.96	110.75	119.40
	225	86.30	102.73	113.04	87.77	104.21	114.51	89.25	105.68	115.99
14	175	95.22	106.97	112.59	96.69	108.44	114.07	98.17	109.92	115.54
	200	94.38	107.79	115.06	95.86	109.26	116.54	97.33	110.74	118.01
	225	81.21	96.26	105.19	82.68	97.74	106.66	84.16	99.21	108.14

ซึ่งนอกจากจะแสดงให้เห็นว่าโมเดลประมาณค่าความแข็งแรงที่ออกแบบมีนัยสำคัญ คือ $P\text{-Value} < 0.05$ แล้วยังแสดง Sum of Squares ของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรง (ปรากฏในโมเดล) และ Sum of Squares ของปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรง (ไม่ปรากฏในโมเดล) เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และการประมาณช่วงความเชื่อมั่น (confidence intervals) ของค่าความแข็งแรงที่ได้จากการประมาณได้อีกด้วย

4.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

การทดสอบสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นการตรวจสอบว่าแบบจำลองโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้กี่เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนทั้งหมด ซึ่งค่า R^2 ควรมีค่า $0 \leq R^2 \leq 1$ ถ้า R^2 มีค่ามากหมายความว่าแบบจำลองโมเดลที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมในการประมาณค่าความแข็งแรง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R^2 = SS_{\text{model}}/SS_{\text{Total}} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } SS_{\text{model}} &= SS_A + SS_B + SS_C + SS_D + SS_{BC} + SS_{BD} + SS_{CD} + SS_{B^2} + SS_{C^2} + SS_{D^2} \\ &= 117.5 + 7415.5 + 936.9 + 65.8 + 68.6 + 98.1 + 1501.2 + 169.0 + 314.0 + 685.4 \\ SS_{\text{Total}} &= 12401.1 \\ \text{ดังนั้น } R^2 &= 11372.0/12401.1 \\ &= 0.917 \end{aligned}$$

แต่ค่า R^2 ไม่สามารถแสดงขอบเขตของโมเดลได้ชัดเจนเพราะฉะนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัย ดังนั้นจึงมีการใช้ R^2_{adj} โดยที่

$$R^2_{\text{adj}} = 1 - \frac{SS_E/(n-p)}{SS_T/(n-1)} \quad (4.20)$$

แทนค่าในสมการโดย n คือ จำนวนการทดลองทั้งหมด 81 ครั้ง

p คือ degree of freedom ของโมเดล

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } R^2_{\text{adj}} &= 1 - \frac{1029.1/(81-10)}{12401.1/(81-1)} \\ &= 0.905 \end{aligned}$$

จากการทดสอบสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแบบจำลองโมเดลมีค่าเท่ากับ 91.7% หมายความว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ 91.7% ของความ

แปรปรวนทั้งหมดและ R^2_{adj} เท่ากับ 90.5% ดังนั้นแบบจำลองโมเดลที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมในการประมาณค่าความแข็งแรงหลังการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก

4.4.2 การประมาณช่วงของความเชื่อมั่น (confidence intervals)

การประมาณช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ของค่าความแข็งแรงที่ได้จากการประมาณค่าจากโมเดลสามารถหาได้จากสมการ

$$Y \pm t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{MSE} \quad (4.21)$$

ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha=0.05$), $\alpha/2=0.025$ และค่า MSE หาได้จาก Sum of Squares ของปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญรวมกับ Sum of Squares ของ error แล้วหารด้วย degrees of freedom จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองโมเดลสามารถหาค่า MSE จาก

$$MSE = SS_{\text{residual error}} / df_{\text{error}} \quad (4.22)$$

ค่า $SS_{\text{residual error}}$ หาได้จาก

$$\begin{aligned} SS_{\text{residual error}} &= SS_{\text{Total}} - SS_{\text{model}} \\ &= 12401.1 - 11372.0 \\ &= 1029.087 \end{aligned} \quad (4.23)$$

และค่า degrees of freedom ของปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญมีค่าเท่ากับ 70 แทนค่าในสมการ 4.22 จะได้

$$\begin{aligned} MSE &= SS_{\text{residual error}} / df_{\text{error}} \\ &= 1029.087 / 70 \\ &= 14.701 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น} \quad \sqrt{MSE} &= \sqrt{14.701} \\ &= 3.834 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 70} = 1.994$$

แทนค่าในสมการ 4.21 จะได้ $Y \pm t_{0.025, 70} \sqrt{MSE}$

$$= Y \pm (3.834 \times 1.994)$$

$$= Y \pm 7.64 \text{ BHN}$$

ดังนั้นค่าความแข็งที่ประมาณได้จากโมเดลจะมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 7.64 BHN จากค่าประมาณ

4.5 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (model adequacy checking)

หลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนและสร้างแบบจำลองโมเดลก่อนนำไปใช้งานทุกครั้งต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล ข้อสมมติฐานเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองค่าความผิดพลาด (error หรือ residual) ของแบบจำลองจะต้องมีการแจกแจงปกติ (normal distribution) และมีความเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีค่าความแปรปรวนคงที่

ค่าความผิดพลาด (error หรือ residual) คือ ค่าผลต่างระหว่างข้อมูลที่ได้มาจากการทดลอง (y_{ijkl}) กับค่าประมาณจากโมเดล ($\hat{y}_{ijkl}$) ดังนั้น ($e_{ijkl} = y_{ijkl} - \hat{y}_{ijkl}$) ดังแสดงในตาราง 4.4

โดย e_{ijkl} คือ ค่าความผิดพลาด (residual)

y_{ijkl} คือ ค่าความแข็งที่ได้จากการทดลอง

$\hat{y}_{ijkl}$ คือ ค่าประมาณความแข็งจากโมเดล (fitted value)

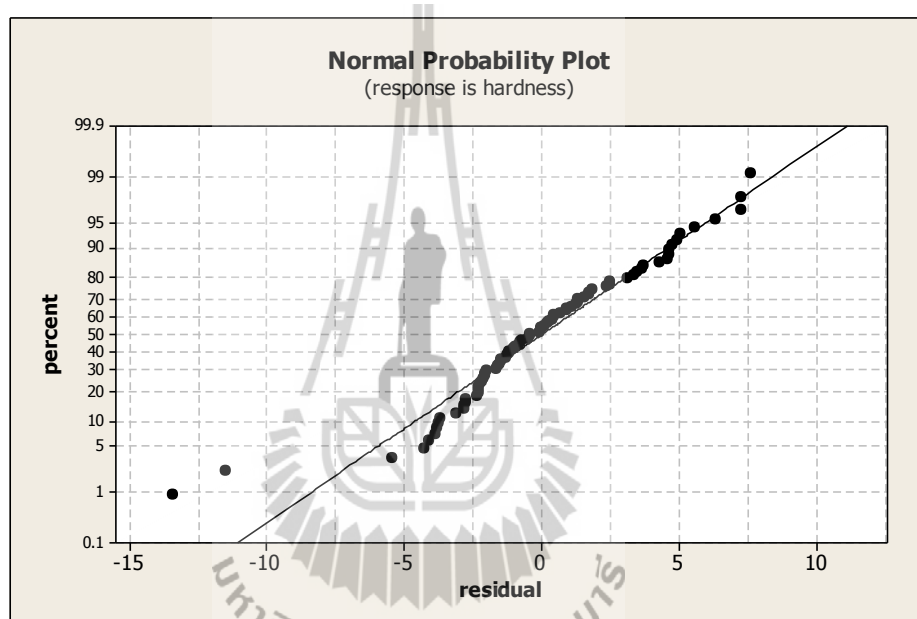
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความผิดพลาดจากการทดลอง (error หรือ residual)

aging time (C)	aging temp (D)	solution treatment time (A)								
		1			2			3		
		solution treatment temp (B)			solution treatment temp (B)			solution treatment temp (B)		
		520	540	560	520	540	560	520	540	560
2	175	-11.46	5.58	-2.26	-13.39	-2.75	2.39	2.46	-1.32	-2.11
	200	4.93	-1.16	0.01	7.23	5.07	0.28	7.61	1.84	1.31
	225	0.92	3.65	-2.78	-0.08	-3.12	2.49	-2.33	-1.55	-1.48
8	175	4.61	3.48	1.72	7.23	4.75	-0.75	3.13	4.28	-1.23
	200	-0.41	-2.30	-0.70	-4.26	-2.27	-0.93	-1.56	-2.75	-2.15
	225	-5.40	0.89	-2.04	-0.40	-1.46	1.74	-3.82	1.07	-0.49
14	175	-0.99	-2.22	0.41	1.31	1.56	-0.82	-1.67	0.08	-2.04
	200	-1.98	-2.79	0.69	0.44	-3.76	0.21	-3.86	0.01	1.24
	225	4.67	0.44	6.31	3.37	-4.09	-3.66	3.72	-1.19	4.61

จากข้อสมมติฐานเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองสามารถนำค่าความผิดพลาด (error หรือ residual) มาตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามสมมติฐานได้ดังนี้

4.5.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution)

สามารถตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติได้โดยการพล็อตค่าความน่าจะเป็นแบบปกติ (normal probability plot) ของค่าความผิดพลาดถ้าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง

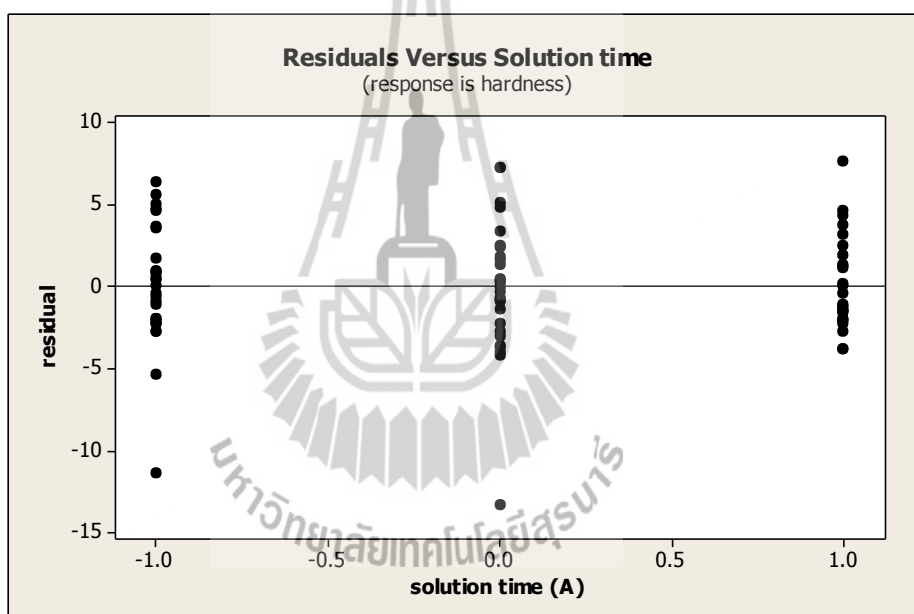


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการกระจายตัวแบบปกติของค่าความผิดพลาด

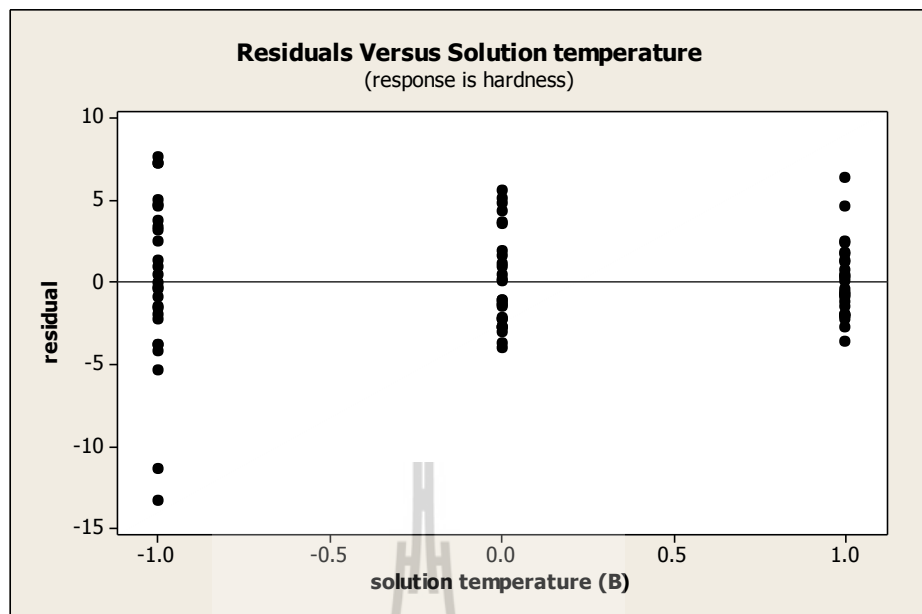
กราฟแสดงการกระจายตัวแบบปกติของค่าความผิดพลาดจะเห็นว่าจุดพล็อตส่วนใหญ่เรียงอยู่ในแนวเส้นตรงแสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) แม้ว่าจะมีค่าความผิดพลาดบางค่าที่มีค่าลบมากอยู่ห่างจากตัวอื่น คือ -11.461 และ -13.386 แต่เมื่อตรวจสอบค่าความผิดพลาดที่ถูกเทียบเป็นค่ามาตรฐาน (standardized residual) แล้วพบว่าไม่มีค่าเท่ากับ -3.32 และ -3.83 ตามลำดับ ซึ่งจากการตรวจสอบข้อมูลไม่พบว่าค่าความผิดพลาดเกิดจากการจดบันทึกหรือการเข้ารหัสแต่ประการใด

4.5.2 การตรวจสอบความแปรปรวน

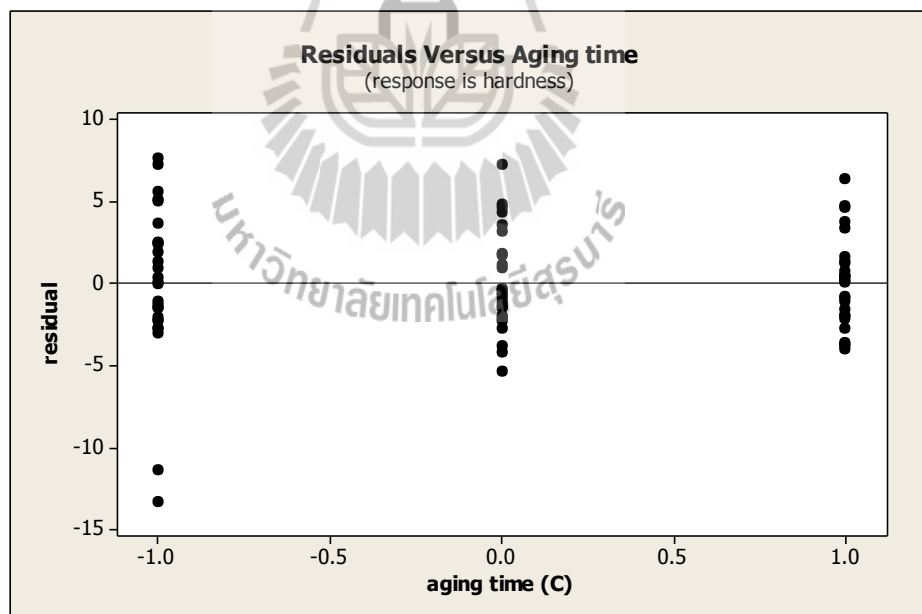
การตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ทำได้โดยการพล็อตกราฟระหว่างค่าความผิดพลาดของข้อมูลกับที่แต่ละระดับของแต่ละปัจจัย รูป 4.6–4.9 แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดที่แต่ละระดับของแต่ละปัจจัยมีการกระจายตัวที่สมดุลกัน แม้ว่าจะมีค่าความผิดพลาดบางค่าที่ทำให้การกระจายตัวต่างกันเล็กน้อย 2 จุด คือ -11.461 และ -13.386 ที่เกิดจากการทดลองร่วมปัจจัยที่อุณหภูมิอบละลาย 520°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วเอจิงด้วยอุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิอบละลายที่ 520°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วเอจิงด้วยอุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระดับปัจจัยของการทดลองร่วมที่ส่งผลให้ได้ค่าความแข็งต่ำหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกดังนั้นควรหลีกเลี่ยงการทดลองร่วมปัจจัยที่ระดับปัจจัยนี้



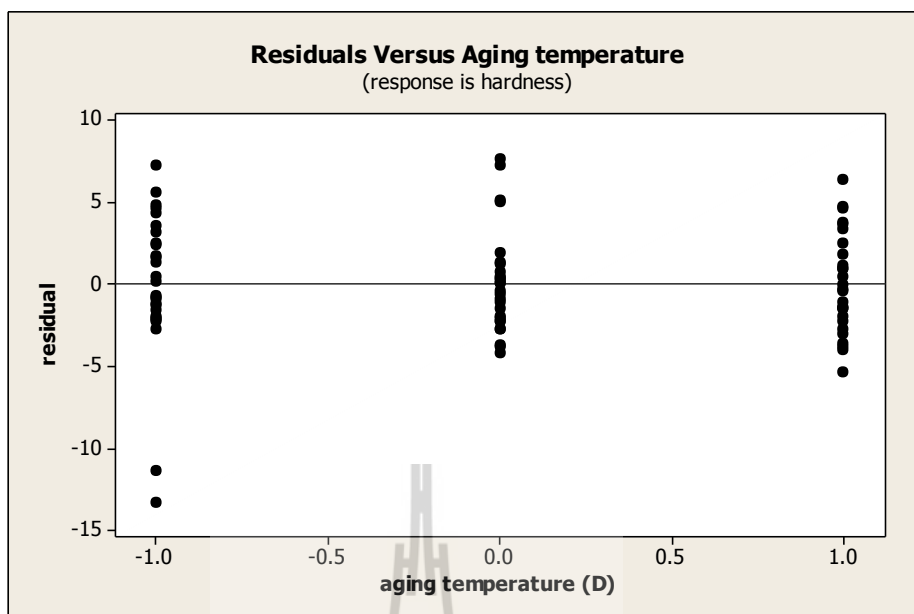
รูปที่ 4.6 กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดที่แต่ละระดับของเวลาอบละลาย



รูปที่ 4.7 กราฟพลีอตรระหว่างค่าความผิดพลาดที่แต่ละระดับของอุณหภูมิอบละลาย



รูปที่ 4.8 กราฟพลีอตรระหว่างค่าความผิดพลาดที่แต่ละระดับของเวลาเอจจิง

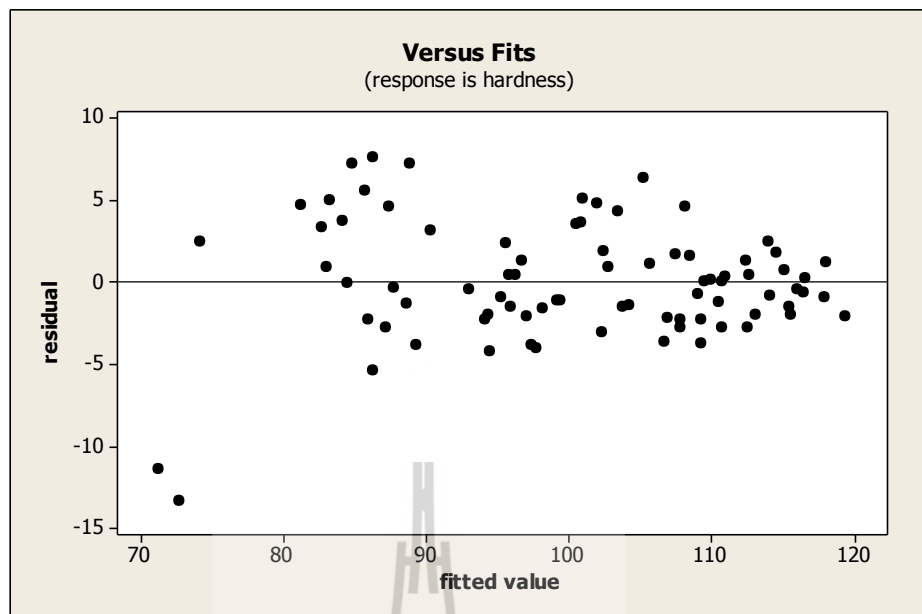


รูปที่ 4.9 กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดที่แต่ละระดับของอุณหภูมิเองจึง

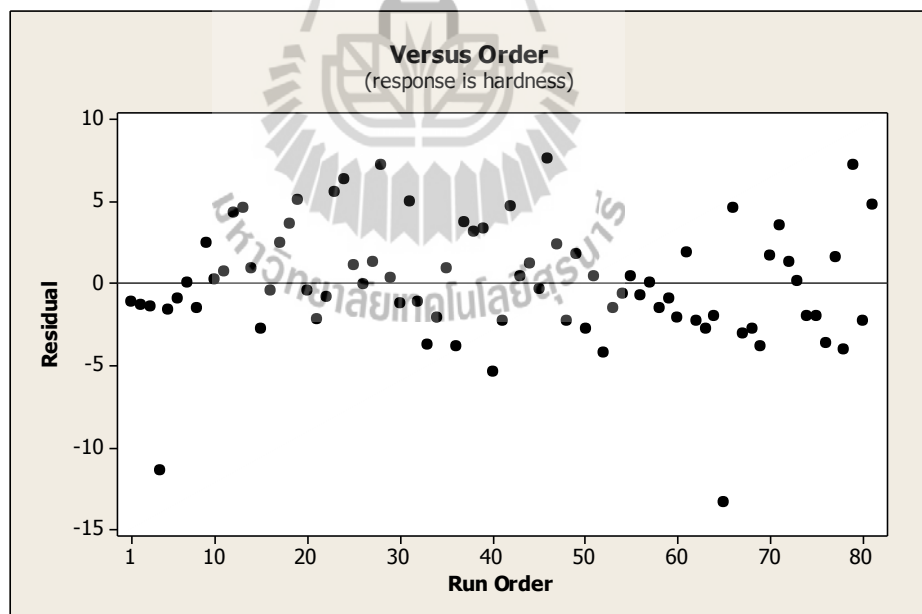
4.5.3 การตรวจสอบความอิสระของข้อมูล (independency)

การตรวจสอบความอิสระของข้อมูลทำได้โดยการพล็อตกราฟ (scatter diagram) ระหว่างค่าความผิดพลาดของข้อมูลกับค่าประมาณความแข็งแรงจากโมเดลและลำดับการทดลอง รูป 4.10 แสดงลักษณะการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดที่เป็นไปแบบสุ่มไม่มีรูปแบบใด ๆ (ปรเมศ, 2545) แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระและค่าประมาณไม่ขึ้นต่อกัน จากรูปยังพบว่าที่ค่าความแข็งแรงต่ำการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดมีค่ามากและค่าความผิดพลาดของข้อมูลจะน้อยลงเมื่อค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการทดลองร่วมปัจจัยใดที่ยังให้ค่าความแข็งแรงสูงก็จะมีค่าความผิดพลาดของข้อมูลน้อยกว่าการทดลองร่วมปัจจัยที่ให้ค่าความแข็งแรงต่ำ

และรูป 4.11 จุดพล็อตของค่าความผิดพลาดเป็นไปแบบสุ่มแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระและค่าความแข็งแรงไม่ขึ้นกับลำดับการทดสอบ



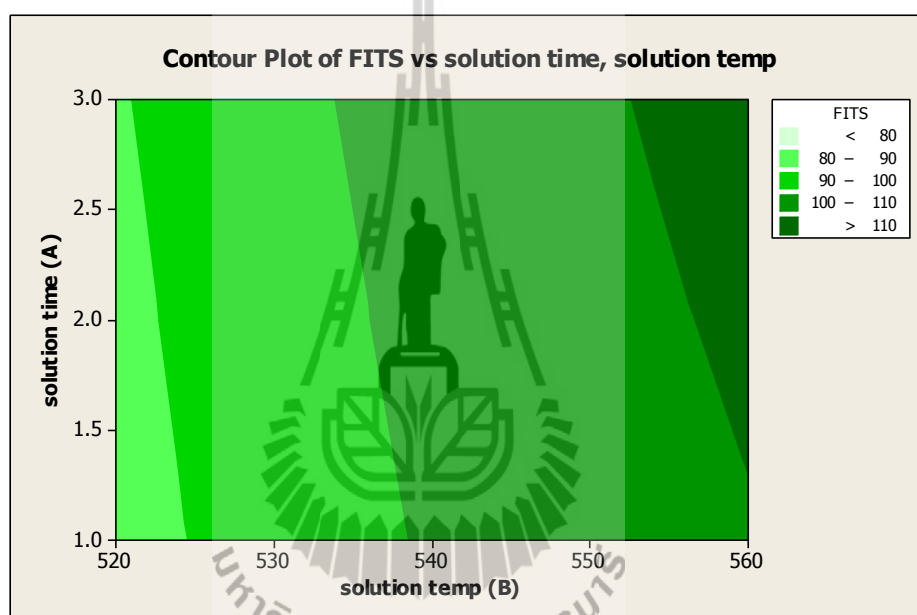
รูปที่ 4.10 กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดกับค่าประมาณจากโมเดล



รูปที่ 4.11 กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดกับลำดับการทดลอง

4.6 กราฟโครงร่าง (contour plot)

กราฟโครงร่างเป็นการสร้างแผนภาพแบบ 2 มิติ ของพื้นผิวตอบสนอง (response surface) เพื่อให้ง่ายในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับระดับของปัจจัยที่พิจารณาทีละ 2 ปัจจัย กราฟโครงร่างนอกจากจะสามารถประมาณค่าความแข็งที่แต่ละระดับของปัจจัยแล้วยังสามารถแสดงแนวโน้มของค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยที่พิจารณา ซึ่งการทดลองครั้งนี้มีปัจจัยหลักทั้งหมด 4 ปัจจัย จึงสามารถสร้างกราฟโครงร่างที่พิจารณาร่วมกันทีละสองปัจจัยได้ทั้งหมด 6 แบบ ดังนี้

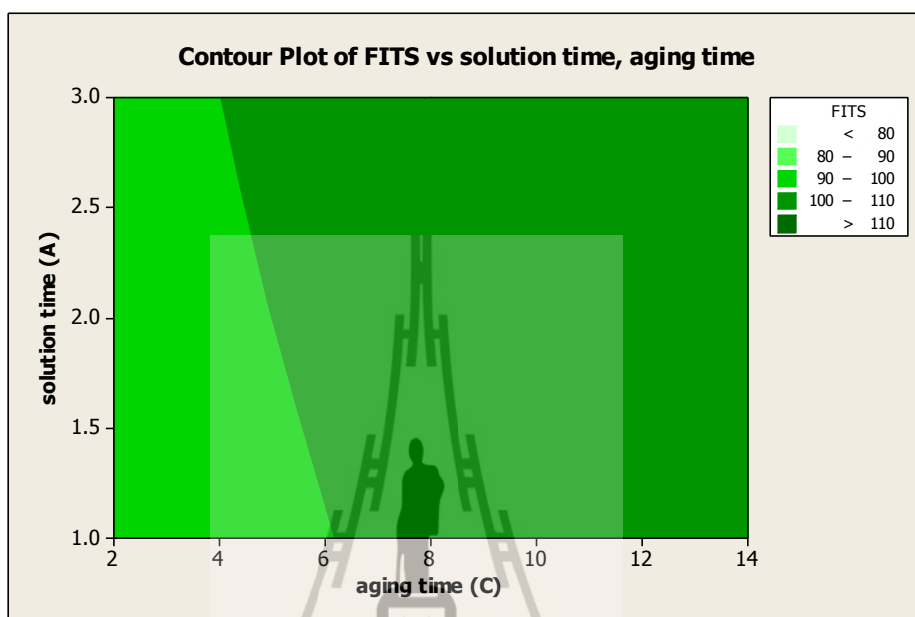


รูปที่ 4.12 แสดงแผนภาพโครงร่างแบบ 2 มิติ ระหว่างเวลากับอุณหภูมิอบละลาย

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งเมื่อระดับปัจจัยของเวลาและอุณหภูมิอบละลายเปลี่ยนไป จากภาพแสดงพื้นผิวตอบสนองแสดงให้เห็นค่าความแข็งที่ต่างกัน 4 ช่วง คือ 80-90 BHN, 90-100 BHN, 100-110 BHN และมากกว่า 110 BHN เมื่อพิจารณากราฟของเวลาอบละลายกับอุณหภูมิอบละลายพบว่า

- 1) การอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับต่ำคือ 520°C และใช้เวลาอบละลายทุกระดับคือ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็ง 80-90 BHN
- 2) การอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับปานกลางคือ 540°C และใช้เวลาอบละลายทุกระดับคือ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN

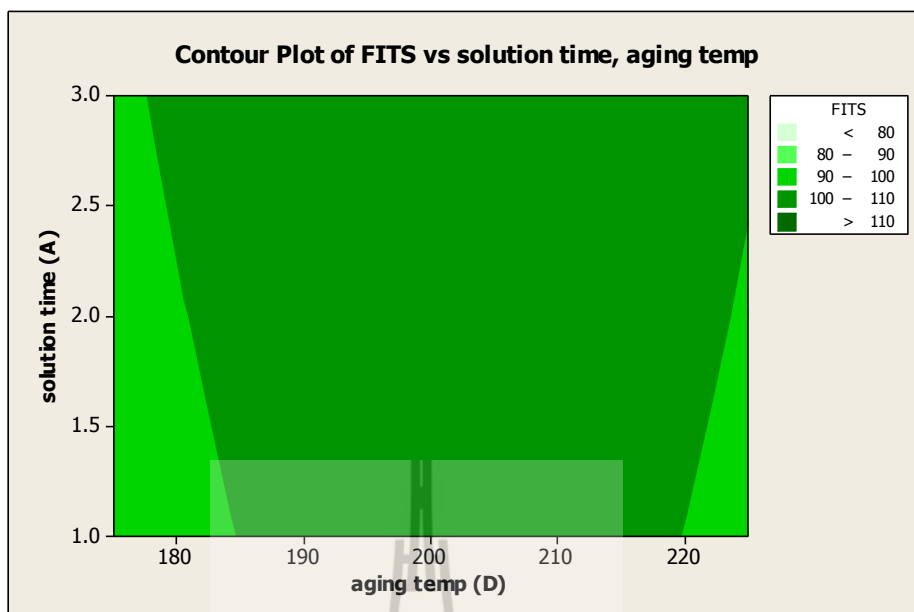
- 3) การอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับสูงคือ 560°C และใช้เวลาอบละลาย 1 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN เมื่อใช้เวลาอบละลาย 2 และ 3 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็งมากกว่า 110 BHN



รูปที่ 4.13 แสดงแผนภาพโครงสร้างแบบ 2 มิติ ระหว่างเวลาอบละลายกับเวลาเอจิง

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งเมื่อระดับปัจจัยของเวลาอบละลายและเวลาเอจิงเปลี่ยนไป จากภาพแสดงพื้นผิวตอบสนองแสดงให้เห็นค่าความแข็งที่ต่างกัน 2 ช่วง คือ 90-100 BHN และ 100-110 BHN เมื่อพิจารณากราฟของเวลาอบละลายกับเวลาเอจิงพบว่า

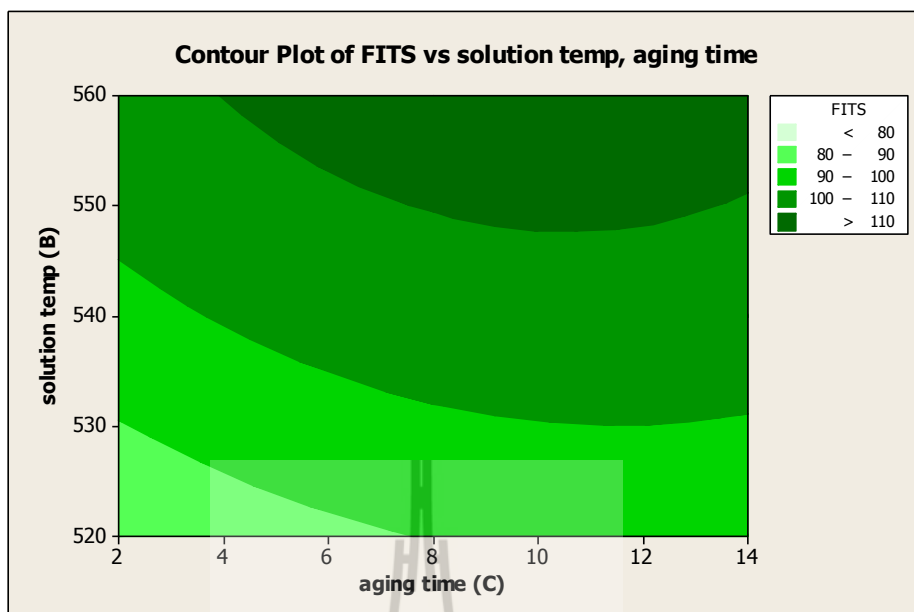
- 1) การเอจิงด้วยเวลาระดับต่ำคือ 2 ชั่วโมง หลังผ่านการอบละลายเป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็ง 90-100 BHN
- 2) การเอจิงด้วยเวลาระดับปานกลางคือ 8 ชั่วโมง หลังผ่านการอบละลายเป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN
- 3) การเอจิงด้วยเวลาระดับสูงคือ 14 ชั่วโมง หลังผ่านการอบละลายเป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN



รูปที่ 4.14 แสดงแผนภาพโครงร่างแบบ 2 มิติ ระหว่างเวลาอบละลายกับอุณหภูมิเอจิง

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งเมื่อระดับปัจจัยของเวลาอบละลายและอุณหภูมิเอจิงเปลี่ยนไป จากภาพแสดงพื้นผิวตอบสนองแสดงให้เห็นค่าความแข็งที่ต่างกัน 2 ช่วง คือ 90-100 BHN และ 100-110 BHN เมื่อพิจารณากราฟของเวลาอบละลายกับอุณหภูมิเอจิงพบว่า

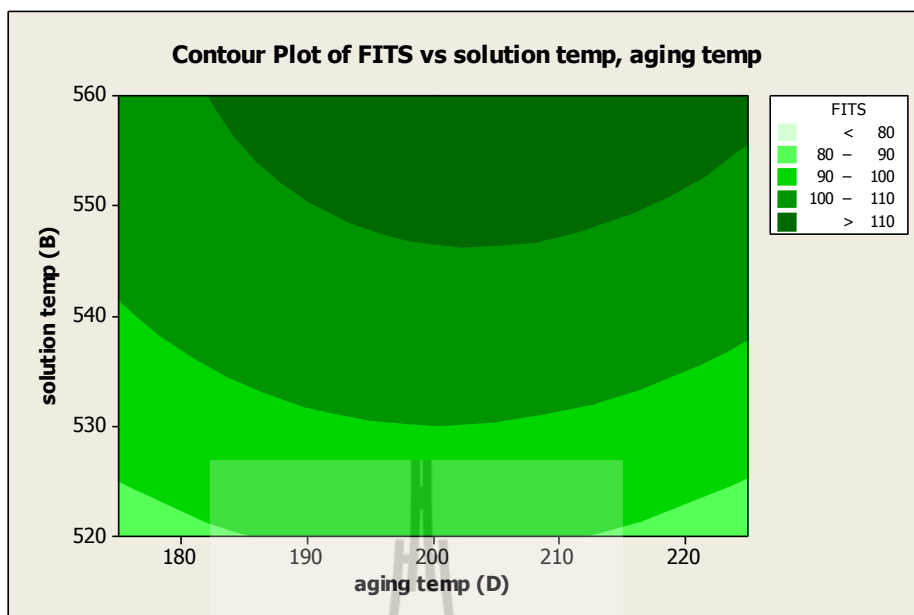
- 1) การเอจิงด้วยอุณหภูมิระดับต่ำคือ 175°C หลังผ่านการอบละลายเป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็ง 90-100 BHN
- 2) การเอจิงด้วยอุณหภูมิระดับปานกลางคือ 200°C หลังผ่านการอบละลายเป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN
- 3) การเอจิงด้วยอุณหภูมิระดับสูงคือ 225°C หลังผ่านการอบละลายเป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็ง 90-100 BHN และให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN หลังผ่านการอบละลายเป็นเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.15 แสดงแผนภาพโครงร่างแบบ 2 มิติ ระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจิง

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งเมื่อระดับปัจจัยของอุณหภูมิอบละลายและเวลาเอจิงเปลี่ยนไป จากภาพแสดงพื้นผิวตอบสนองแสดงให้เห็นค่าความแข็งที่ต่างกัน 4 ช่วง คือ 80-90 BHN, 90-100 BHN, 100-110 BHN และมากกว่า 110 BHN เมื่อพิจารณากราฟของอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจิงพบว่า

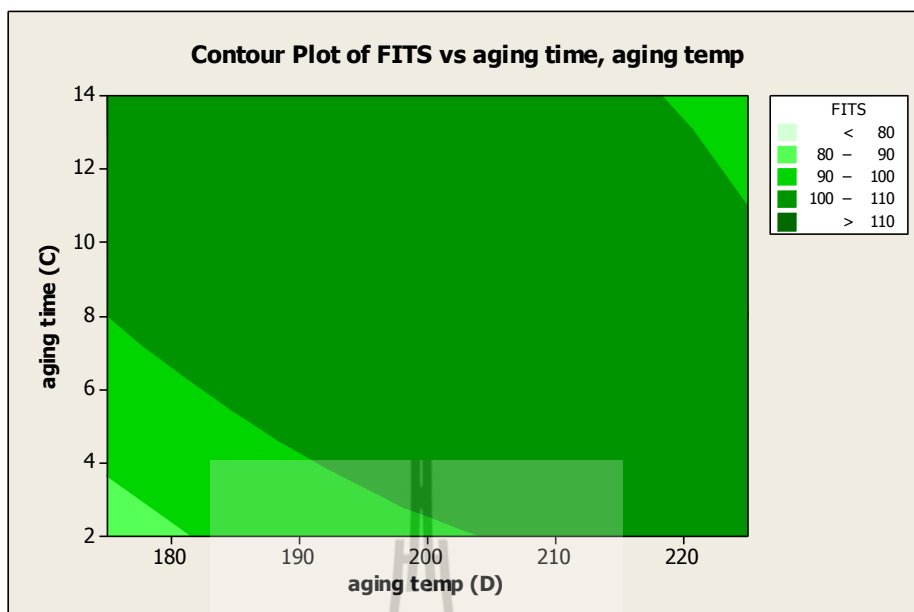
- 1) เมื่อใช้เวลาเอจิงที่ระดับต่ำคือ 2 ชั่วโมง หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับต่ำ 520°C จะให้ค่าความแข็ง 80-90 BHN, ให้ค่าความแข็ง 90-100 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับปานกลาง 540°C และให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับสูง 560°C
- 2) เมื่อใช้เวลาเอจิงที่ระดับปานกลางคือ 8 ชั่วโมง หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับต่ำ 520°C จะให้ค่าความแข็ง 90-100 BHN, ให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับปานกลาง 540°C และให้ค่าความแข็งมากกว่า 110 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับสูง 560°C
- 3) เมื่อใช้เวลาเอจิงที่ระดับสูงคือ 14 ชั่วโมง หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับต่ำ 520°C จะให้ค่าความแข็ง 90-100 BHN, ให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับปานกลาง 540°C และให้ค่าความแข็งมากกว่า 110 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับสูง 560°C



รูปที่ 4.16 แสดงแผนภาพโครงร่างแบบ 2 มิติ ระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอจิง

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งเมื่อระดับปัจจัยของอุณหภูมิอบละลายและเอจิงเปลี่ยนไป จากภาพแสดงพื้นผิวตอบสนองแสดงให้เห็นค่าความแข็งที่ต่างกัน 4 ช่วง คือ 80-90 BHN, 90-100 BHN, 100-110 BHN และมากกว่า 110 BHN เมื่อพิจารณากราฟของอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอจิงพบว่า

- 1) เมื่อเอจิงด้วยอุณหภูมิระดับต่ำคือ 175°C หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับต่ำ 520°C จะให้ค่าความแข็ง 80-90 BHN, ให้ค่าความแข็ง 90-100 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับปานกลาง 540°C และให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับสูง 560°C
- 2) เมื่อเอจิงด้วยอุณหภูมิระดับปานกลางคือ 200°C หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับต่ำ 520°C จะให้ค่าความแข็ง 90-100 BHN, ให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับปานกลาง 540°C และให้ค่าความแข็งมากกว่า 110 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับสูง 560°C
- 3) เมื่อเอจิงด้วยอุณหภูมิระดับสูงคือ 225°C หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับต่ำ 520°C จะให้ค่าความแข็ง 80-90 BHN, ให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับปานกลาง 540°C และให้ค่าความแข็งมากกว่า 110 BHN หลังผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิระดับสูง 560°C



รูปที่ 4.17 แสดงแผนภาพโครงร่างแบบ 2 มิติ ระหว่างเวลาแก๊ซกับอุณหภูมิแก๊ซ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งเมื่อระดับปัจจัยของเวลาและอุณหภูมิแก๊ซเปลี่ยนแปลงไป จากภาพแสดงพื้นผิวตอบสนองแสดงให้เห็นค่าความแข็งที่ต่างกัน 3 ช่วง คือ 80-90 BHN, 90-100 BHN และ 100-110 BHN เมื่อพิจารณากราฟของเวลาและอุณหภูมิแก๊ซพบว่า

- 1) การแก๊ซด้วยอุณหภูมิระดับต่ำคือ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็ง 80-90 BHN, ให้ค่าความแข็ง 90-100 BHN หลังการแก๊ซเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN หลังการแก๊ซเป็นเวลา 14 ชั่วโมง
- 2) การแก๊ซด้วยอุณหภูมิระดับปานกลางคือ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็ง 90-100 BHN, ให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN หลังการแก๊ซเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN หลังการแก๊ซเป็นเวลา 14 ชั่วโมง
- 3) การแก๊ซด้วยอุณหภูมิระดับสูงคือ 225°C เป็นเวลา 2 และ 8 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็ง 100-110 BHN และให้ค่าความแข็ง 90-100 BHN หลังการแก๊ซเป็นเวลา 14 ชั่วโมง

4.7 แบบจำลองโมเดลประมาณค่าความแข็งแรงแบบอื่น ๆ

สมการ 4.18 เป็นแบบจำลองโมเดลที่สร้างขึ้นเพื่อประมาณค่าความแข็งแรงหลังการอบชุบแข็ง ด้วยวิธีการตกผลึกที่พิจารณาเพียงปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลส่งผลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญสูงสุด

นอกจากนั้นยังสามารถสร้างโมเดลประมาณค่าความแข็งแรงแบบต่าง ๆ ได้หลายสมการที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอื่น ๆ หรือเทอมที่สนใจรวมเข้าไว้ในโมเดลซึ่งแต่ละสมการจะให้ค่าประมาณความแข็งแรงและช่วงความเชื่อมั่น 95% ที่ต่างกันในที่นี้จะแสดงสมการเหล่านั้น 17 สมการ ตั้งแต่สมการที่รวมอิทธิพลของเทอมยกกำลังสองจนถึงเทอมของอิทธิพลหลักอย่างเดียวที่มีนัยสำคัญ

สมการที่ 1

$$\hat{y} = 109 + 1.47A + 11.7B + 4.17C + 1.10D - 0.347AB - 0.295AC - 0.301AD - 1.38BC + 1.65BD - 6.46CD + 0.203A^2 - 3.06B^2 - 4.18C^2 - 6.17D^2$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 11383.46 / 12401.07 \\ &= 0.918 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.901$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 90.1% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

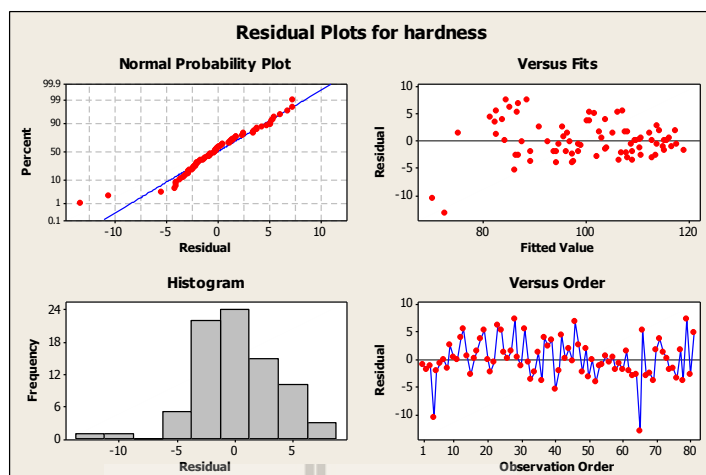
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 1017.60 / 66 \\ &= 15.420 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{15.420} \\ &= 3.927 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 66} = 1.997$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 66} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (3.927 \times 1.997) \\ &= Y \pm 7.842 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 7.842 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 1

สมการที่ 2

$$\hat{y} = 105 + 1.47A + 11.7B + 4.17C + 1.10D - 1.38BC + 1.65BD - 6.46CD - 3.06B^2 - 4.18C^2$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 10686.6 / 12401.1 \\ &= 0.862 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.844$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 84.4% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

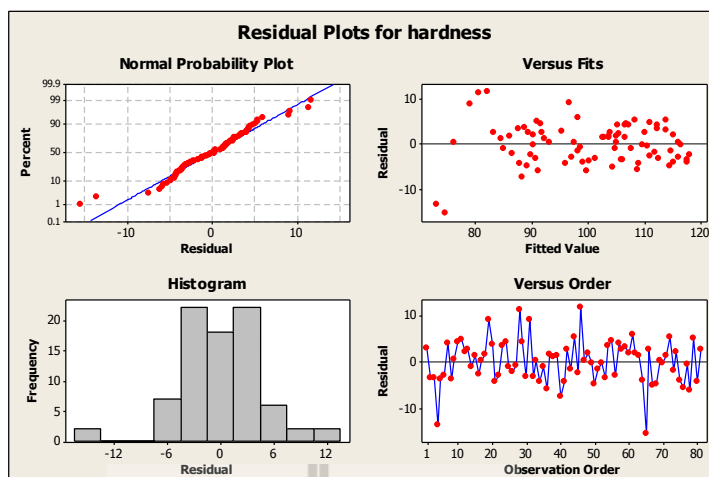
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 1714.5/71 \\ &= 24.10 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{24.10} \\ &= 4.914 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 71} = 1.994$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 71} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (4.914 \times 1.994) \\ &= Y \pm 9.798 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 9.798 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 2

สมการที่ 3

$$\hat{y} = 102 + 1.47A + 11.7B + 4.17C + 1.10D - 1.38BC + 1.65BD - 6.46CD - 3.06B^2$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 10372.6 / 12401.1 \\ &= 0.836 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.818$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 81.8% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

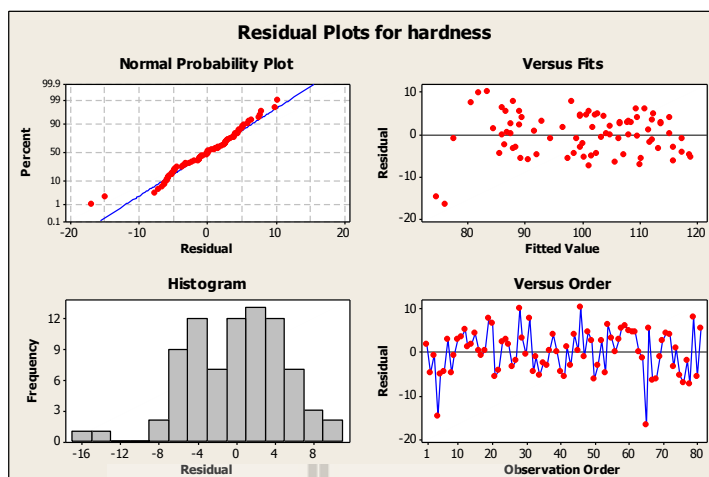
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 2028.5 / 72 \\ &= 28.20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{28.20} \\ &= 5.308 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 72} = 1.993$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 72} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (5.308 \times 1.993) \\ &= Y \pm 10.581 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 10.581 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 3

สมการที่ 4

$$\hat{y} = 103 + 1.47A + 11.7B + 4.17C + 1.10D - 1.38BC + 1.65BD - 6.46CD - 4.18C^2$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 10517.6 / 12401.1 \\ &= 0.848 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.831$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 83.1% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

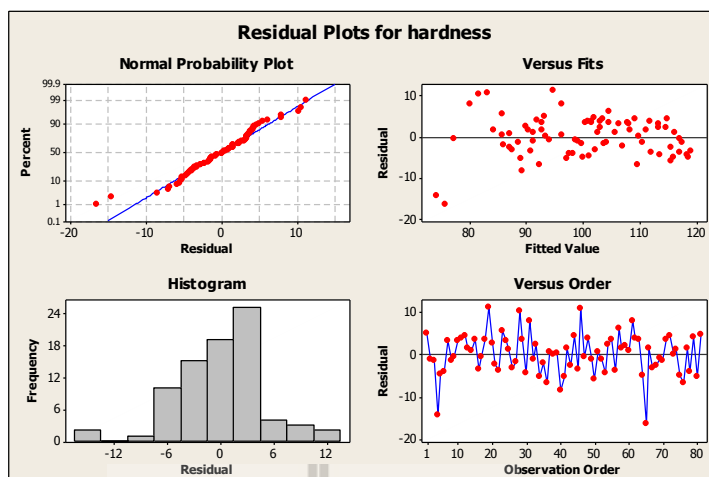
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 1883.5 / 72 \\ &= 26.20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{26.20} \\ &= 5.115 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 72} = 1.993$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 72} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (5.115 \times 1.993) \\ &= Y \pm 10.197 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 10.197 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 4

สมการที่ 5

$$\hat{y} = 104 + 1.47A + 11.7B + 4.17C + 1.10D - 1.38BC + 1.65BD - 6.46CD - 6.17 D^2$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 10889.0 / 12401.1 \\ &= 0.878 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.865$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 86.5% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

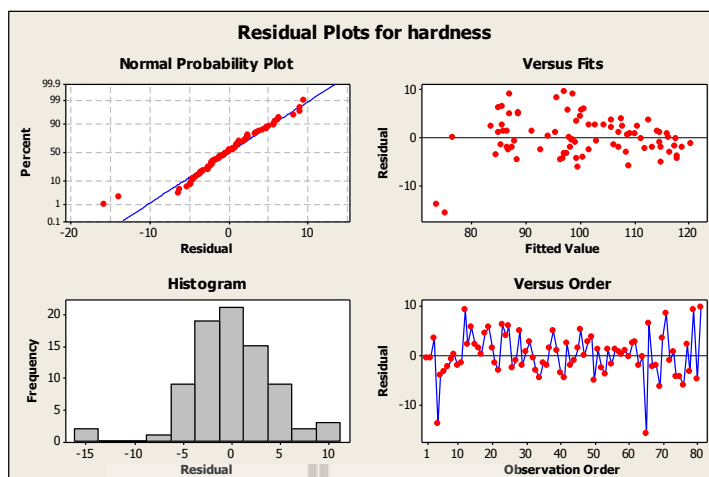
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 1512.0 / 72 \\ &= 21.10 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{21.10} \\ &= 4.583 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 72} = 1.993$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 72} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (4.583 \times 1.993) \\ &= Y \pm 9.136 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 9.136 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.22



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 5

สมการที่ 6

$$\hat{y} = 100 + 1.47A + 11.7B + 4.17C + 1.10D - 1.38BC + 1.65BD - 6.46CD$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 10203.6 / 12401.1 \\ &= 0.823 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.806$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 80.6% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

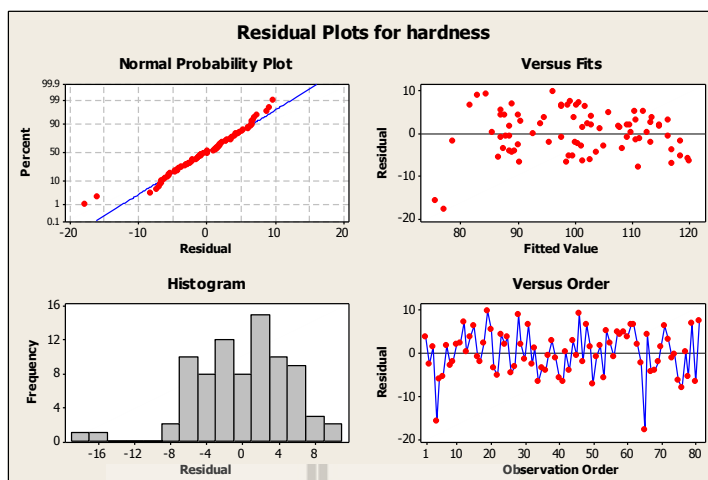
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 2197.4 / 73 \\ &= 30.10 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{30.10} \\ &= 5.487 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 73} = 1.993$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 73} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (5.487 \times 1.993) \\ &= Y \pm 10.936 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 10.936 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.23



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 6

สมการที่ 7

$$\hat{y} = 100 + 1.47A + 11.7B + 4.17C + 1.10D + 1.65BD - 6.46CD$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 10135.0 / 12401.1 \\ &= 0.817 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.802$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 80.2% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

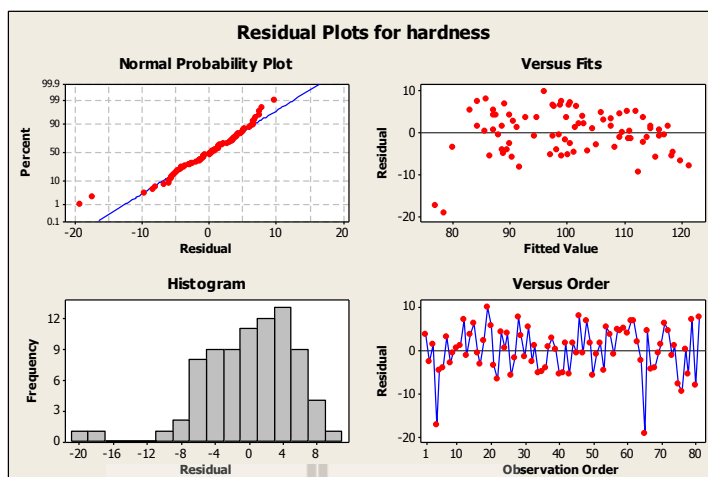
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 2266.1 / 74 \\ &= 30.6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{30.6} \\ &= 5.534 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 74} = 1.9925$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 74} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (5.534 \times 1.9925) \\ &= Y \pm 10.027 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 10.027 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.24



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 7

สมการที่ 8

$$\hat{y} = 100 + 11.7B + 4.17C + 1.10D + 1.65BD - 6.46CD$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 10017.5 / 12401.1 \\ &= 0.808 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.795$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 79.5% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

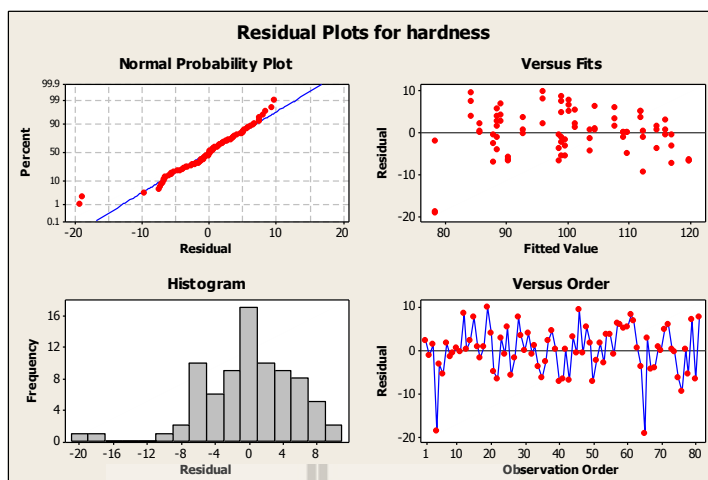
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 2383.5 / 75 \\ &= 31.8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{31.8} \\ &= 5.637 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 75} = 1.992$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 75} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (5.637 \times 1.992) \\ &= Y \pm 11.229 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 11.229 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.25



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 8

สมการที่ 9

$$\hat{y} = 100 + 11.7B + 4.17C + 1.10D - 6.46CD$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 9919.4 / 12401.1 \\ &= 0.800 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.789$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 78.9% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

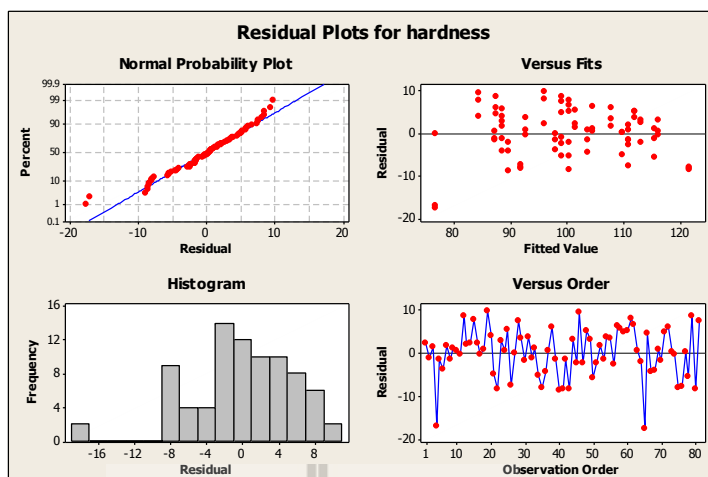
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 2481.6 / 76 \\ &= 32.7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{32.7} \\ &= 5.714 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 76} = 1.992$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 76} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (5.714 \times 1.992) \\ &= Y \pm 11.380 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 11.380 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.26



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 9

สมการที่ 10

$$\hat{y} = 100 + 11.7B + 4.17C - 6.46CD$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 9853.6 / 12401.1 \\ &= 0.795 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.787$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 78.7% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

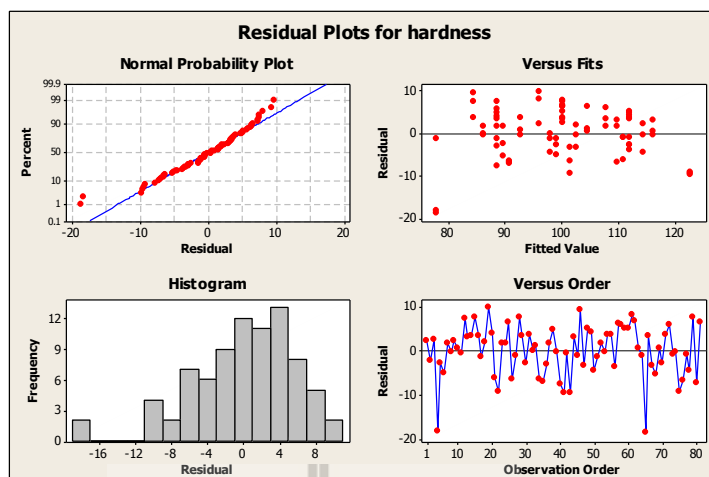
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 2547.5 / 77 \\ &= 33.1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{33.1} \\ &= 5.752 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 77} = 1.991$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 77} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (5.752 \times 1.991) \\ &= Y \pm 11.454 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 11.454 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.27



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 10

สมการที่ 11

$$\hat{y} = 100 + 11.7B + 4.17C + 1.10D - 1.38BC + 1.65BD - 6.46CD$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 10086.1 / 12401.1 \\ &= 0.813 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.798$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 79.8% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

$$MSE = 2314.9/74$$

$$= 31.3$$

ฉะนั้น $\sqrt{MSE} = \sqrt{31.3}$

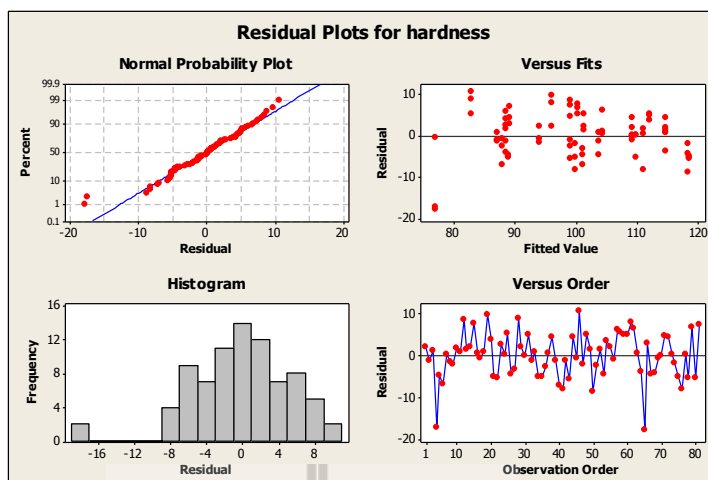
$$= 5.593$$

$$t_{0.025, 74} = 1.993$$

แทนค่า $Y \pm t_{0.025, 74} \sqrt{MSE} = Y \pm (5.593 \times 1.993)$

$$= Y \pm 11.144 \text{ BHN}$$

ดังนั้นค่าความแข็งที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ $\pm 11.144 \text{ BHN}$ จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.28



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 11

สมการที่ 12

$$\hat{y} = 100 + 11.7B + 4.17C - 1.38BC + 1.65BD - 6.46CD$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 10020.3 / 12401.1 \\ &= 0.808 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.795$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 79.5% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

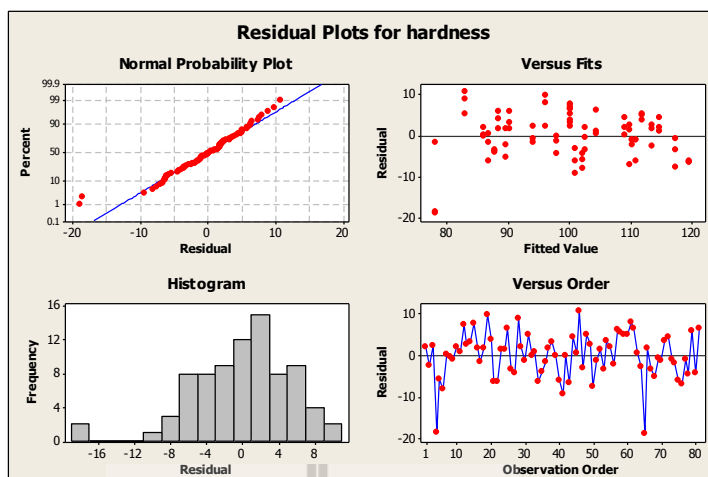
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 2380.8 / 75 \\ &= 31.7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{31.7} \\ &= 5.634 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 75} = 1.992$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 75} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (5.634 \times 1.992) \\ &= Y \pm 11.224 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 11.224 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.29



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 12

สมการที่ 13

$$\hat{y} = 100 + 11.7B + 4.17C + 1.65BD - 6.46CD$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 9951.7 / 12401.1 \\ &= 0.802 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.792$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 79.2% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

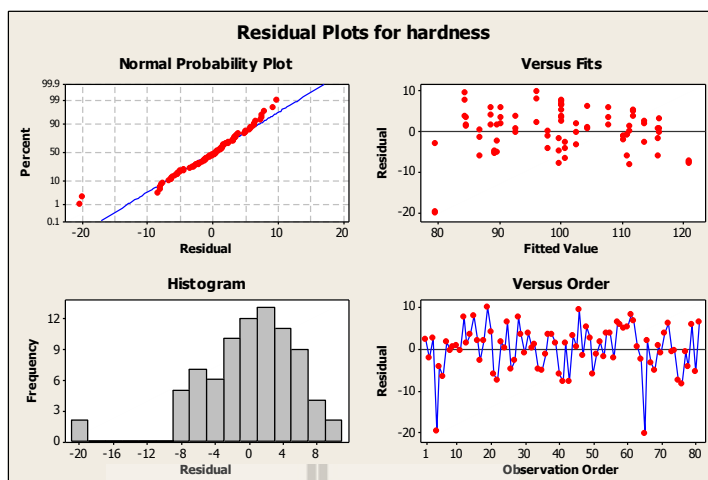
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 2449.4 / 76 \\ &= 32.2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{32.2} \\ &= 5.677 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 76} = 1.992$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 76} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (5.677 \times 1.992) \\ &= Y \pm 11.307 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 11.307 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.30



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 13

สมการที่ 14

$$\hat{y} = 100 + 11.7B + 4.17C + 1.10D - 1.38BC - 6.46CD$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 9988.0 / 12401.1 \\ &= 0.805 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.792$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 79.2% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

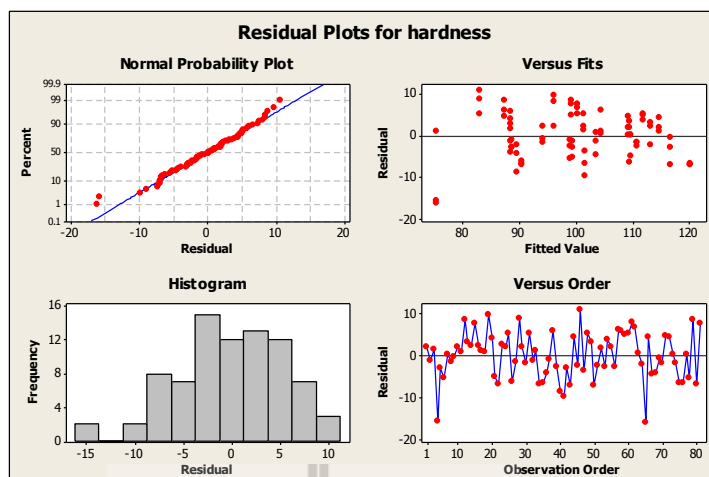
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 2413.0 / 75 \\ &= 32.2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{32.2} \\ &= 5.672 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 75} = 1.992$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 75} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (5.672 \times 1.992) \\ &= Y \pm 11.299 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 11.299 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.31



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 14

สมการที่ 15

$$\hat{y} = 100 + 1.47A + 11.7B + 4.17C + 1.10D - 6.46CD$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 10036.9 / 12401.1 \\ &= 0.809 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.797$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 79.7% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

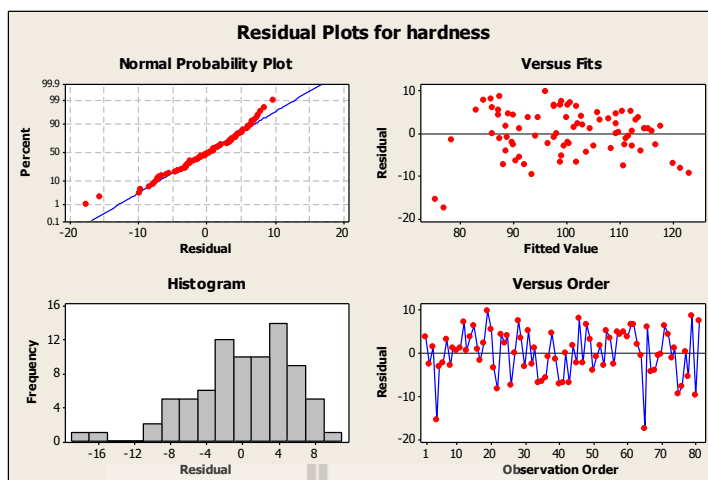
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 2364.2 / 75 \\ &= 31.5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{31.5} \\ &= 5.614 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 75} = 1.992$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 75} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (5.614 \times 1.992) \\ &= Y \pm 11.184 \text{ BHN} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความแข็งที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 11.184 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.32



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 15

สมการที่ 16

$$\hat{y} = 100 + 1.47A + 11.7B + 4.17C + 1.10D$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 8535.7 / 12401.1 \\ &= 0.688 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.672$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 67.2% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

$$MSE = 3865.4 / 76$$

$$= 50.9$$

ฉะนั้น $\sqrt{MSE} = \sqrt{50.9}$

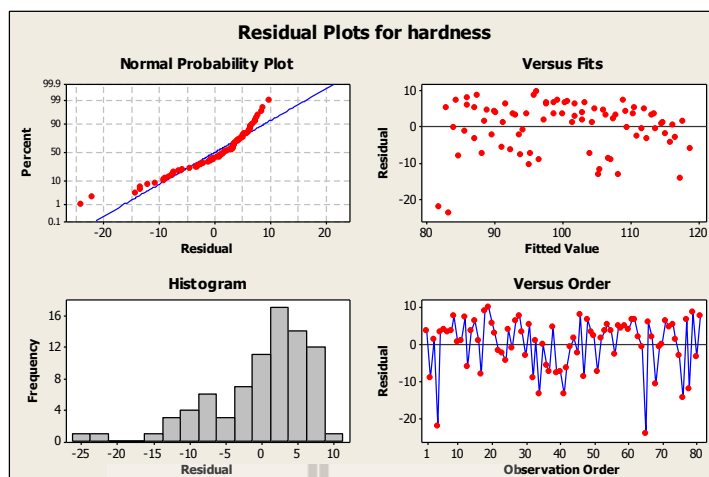
$$= 7.132$$

$$t_{0.025, 76} = 1.992$$

$$\text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 76} \sqrt{MSE} = Y \pm (7.132 \times 1.992)$$

$$= Y \pm 14.205 \text{ BHN}$$

ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 14.205 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.33



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 16

สมการที่ 17

$$\hat{y} = 100 + 11.7B + 4.17C + 1.10D$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$\begin{aligned} R^2 &= SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ &= 8418.2 / 12401.1 \\ &= 0.679 \end{aligned}$$

และ $R^2_{\text{adj}} = 0.666$

แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 66.6% ของความแปรปรวนทั้งหมดและมีช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ

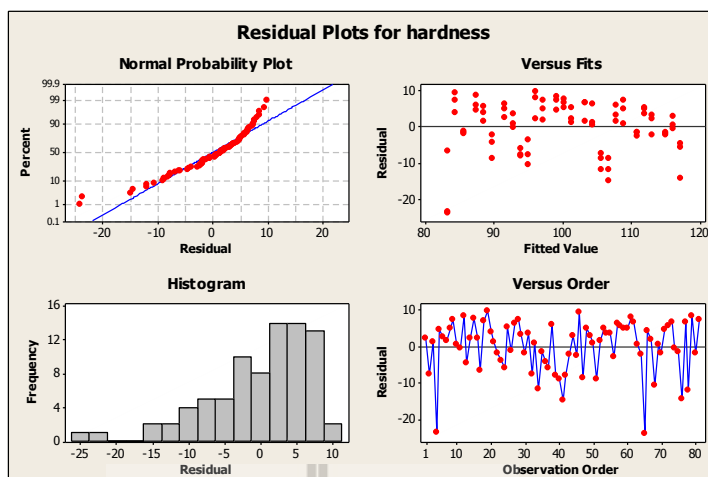
$$\begin{aligned} \text{MSE} &= 3982.9 / 77 \\ &= 51.7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น } \sqrt{\text{MSE}} &= \sqrt{51.7} \\ &= 7.192 \end{aligned}$$

$$t_{0.025, 77} = 1.991$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } Y \pm t_{0.025, 77} \sqrt{\text{MSE}} &= Y \pm (7.192 \times 1.991) \\ &= Y \pm 14.321 \text{ BHN} \end{aligned}$$

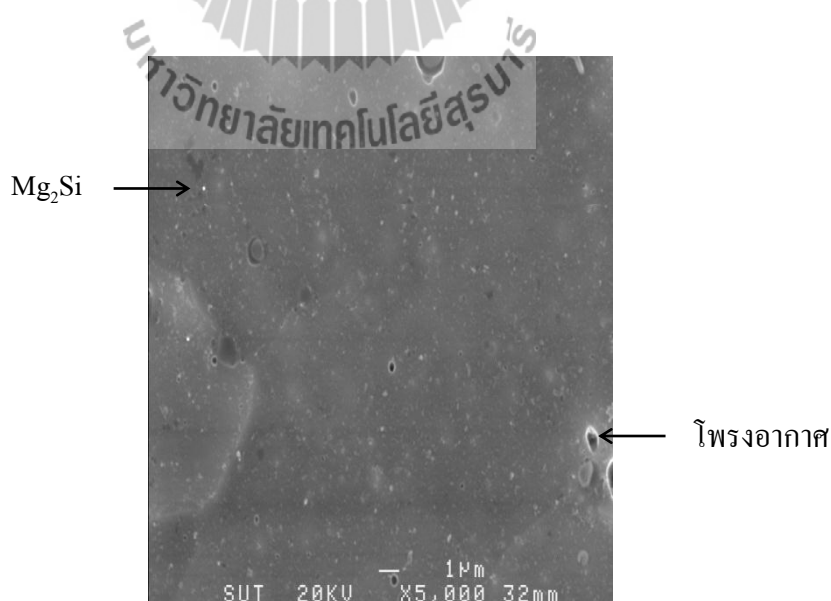
ดังนั้นค่าความแข็งแรงที่ประมาณได้จากโมเดลมีช่วงของความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 14.321 BHN จากค่าประมาณและสามารถตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติดังแสดงในรูป 4.34



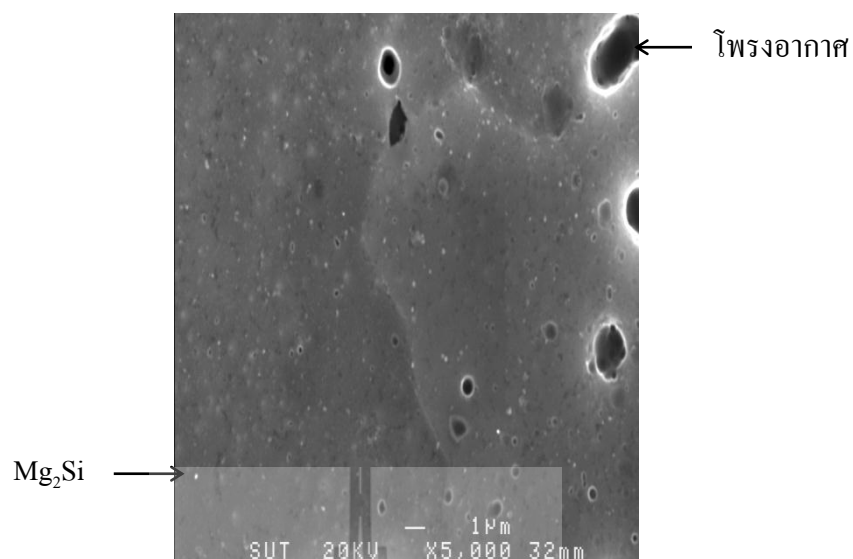
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของสมการที่ 17

4.8 โครงสร้างจุลภาคหลังการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก

รูป 4.35-4.37 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม 6061 หลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในเนื้อโลหะอะลูมิเนียมเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัยเวลาและอุณหภูมิในกระบวนการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.35 อบละลาย 2 ชั่วโมง ที่ $520^{\circ}C$ และเอจิง 2 ชั่วโมง ที่ $175^{\circ}C$, 59.30 BHN



รูปที่ 4.36 อบละลาย 2 ชั่วโมง ที่ 520°C และเอจิง 2 ชั่วโมง ที่ 200°C, 92.00 BHN



รูปที่ 4.37 อบละลาย 2 ชั่วโมง ที่ 520°C และเอจิง 2 ชั่วโมง ที่ 225°C, 84.43 BHN

รูป 4.35-4.37 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการเอจิงด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน คือ 175,°C 200°C และ 225°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากรูปแสดงให้เห็นลักษณะของผลึก Mg_2Si ที่มีขนาดเล็กเนื่องจากโลหะผสมอะลูมิเนียมชนิดนี้มีปริมาณของธาตุผสมแมกนีเซียมและซิลิกอนน้อยและจากภาพยังเห็นลักษณะของโพรงอากาศ (porosity) ในโครงสร้างพื้นฐานอะลูมิเนียม ซึ่ง

โพรงอากาศที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปตามปกติของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยการหล่อหรือการรีดซึ่งในขณะเย็นตัวจะทำได้เกิดลักษณะเป็นโพรงอากาศภายในชิ้นงานได้

จากภาพแสดงให้เห็นว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 175°C ขนาดของผลึก Mg_2Si มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับการเอจิงที่อุณหภูมิ 200°C และ 225°C และการเอจิงที่อุณหภูมิ 200°C และ 225°C ขนาดของผลึก Mg_2Si จะมีขนาดใกล้เคียงกันแต่ที่อุณหภูมิ 200°C จะมีลักษณะการกระจายตัวของผลึก Mg_2Si สม่ำเสมอกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 225°C จึงส่งผลให้ค่าความแข็งของการเอจิงที่อุณหภูมิ 200°C สูงกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 175°C และ 225°C ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเอจิงที่อุณหภูมิสูงการเกิดเคลื่อนที่ของอะตอมแมกนีเซียมและซิลิคอนในลักษณะการแพร่เกิดขึ้นได้เร็วกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิต่ำทำให้สามารถเกิดเป็นนิวเคลียสได้เร็วและมีขนาดของผลึก Mg_2Si โตกว่า และในขณะที่เกิดการตกผลึกจะมีแรงเชื่อมประสานระหว่างโครงสร้างพื้นฐานของอะลูมิเนียมกับผลึก Mg_2Si (coherent precipitate) ทำให้ความแข็งแรงของโลหะผสมเพิ่มขึ้นตามขนาดและลักษณะการกระจายตัว แต่ถ้าเอจิงเป็นเวลานาน โครงสร้างที่มีขนาดผลึกโตจะปรับตัวเข้าสู่สมดุลได้เร็วทำให้แรงเชื่อมประสานที่เกิดขึ้นค่อย ๆ หด (non coherent precipitate) ไปส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง

จากภาพโครงสร้างแสดงให้เห็นว่าการเอจิงด้วยอุณหภูมิต่ำจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเอจิงด้วยอุณหภูมิสูงแต่ต้องใช้เวลาานาน ถึงแม้ว่าการเอจิงด้วยอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกแต่เมื่อเอจิงเป็นเวลานานจะส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงเร็วกว่าการเอจิงด้วยอุณหภูมิต่ำดังแสดงในการวิเคราะห์กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยในรูป 4.4 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Edwards, Stiller, Dunlop and Couper, 1998) นอกจากนั้นผลการพล็อตกราฟในรูป 4.2 และ 4.3 ยังแสดงให้เห็นว่าเอจิงด้วยเวลาอุณหภูมิเท่ากันโลหะผสมที่ผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิสูงจะให้ค่าความแข็งหลังการอบชุบแข็งสูงกว่าโลหะผสมที่ผ่านการอบละลายด้วยอุณหภูมิต่ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงปริมาณการละลายของแมกนีเซียมและซิลิคอนละลายได้มากกว่าสอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Meyveci, Karacan, ÇalIgölü and Durmus, 2010)

4.9 สรุป

จากการทดลองสามารถสร้างสมการเพื่อประมาณค่าความแข็งแรงจากปัจจัยทุกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งที่มีค่าความผิดพลาด ± 7.64 BHN ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับตัวแปรที่สนใจพิจารณาทั้งในเชิงเส้นตรงและเส้นโค้ง โดยโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ 91.7% นอกจากนั้นยังสามารถสร้างสมการเพื่อประมาณค่าความแข็งได้หลายสมการที่ให้ค่าประมาณความแข็งแรงและช่วงของความเชื่อมั่นที่แตกต่างกันขึ้นกับปัจจัยที่พิจารณาในสมการนั้น ๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากข้อมูลอันเป็นผลของการทดลองที่ได้วิเคราะห์เชิงสถิติในบทที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงหลังการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก

จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักทุกมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงหลังการชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกอย่างมีนัยสำคัญทั้งในเชิงเส้นตรง (linear) และควอดราติก (quadratic) ยกเว้นเวลาอบละลายที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงในเชิงเส้นตรงเท่านั้น นอกจากนั้นยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเองจึง, อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเองจึง และอิทธิพลร่วมระหว่างเวลาเองจึงกับอุณหภูมิเองจึง

ดังนั้นสามารถสร้างโมเดลจากปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมสองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญเพื่อทำนายความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงกับตัวแปรที่พิจารณาในเชิงเส้นโค้งได้ดังนี้

$$\hat{y} = 109 + 1.47A + 11.7B + 4.17C + 1.10D - 1.38BC + 1.65BD - 6.46CD - 3.06B^2 - 4.18C^2 - 6.17D^2$$
 โดยโมเดลนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 91.7% และ R^2_{adj} เท่ากับ 90.5% แสดงว่าโมเดลสามารถแทนค่าหรือครอบคลุมข้อมูลจากการทดลองได้ถึง 90.5% สามารถประมาณค่าความแข็งแรงที่มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ± 7.64 BHN ที่ความเชื่อมั่น 95% และจากการตรวจสอบค่าความผิดพลาด (errors หรือ residuals) พบว่าเป็นไปตามสมมติฐานของการออกแบบการทดลองคือ มีการแจกแจงแบบปกติและมีการกระจายตัวเป็นแบบสุ่มสม่ำเสมอที่แต่ละระดับของปัจจัยหลัก

นอกจากนั้นใน 17 โมเดลที่แสดงไว้ในบทที่ 4 สามารถครอบคลุมข้อมูลอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 65% และความเบี่ยงเบนของค่าประมาณไม่เกิน ± 14.321 BHN จากค่าประมาณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเดลที่ง่ายที่สุดคือ มีเฉพาะเทอมที่เป็นอิทธิพลหลักเท่านั้น (สมการที่ 16) ยังให้ค่า R^2_{adj} ประมาณ 67% และค่าเบี่ยงเบนที่ความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ ± 14.2 BHN ซึ่งเบี่ยงเบนประมาณ 14% ของค่าเฉลี่ยของโมเดล

5.1.2 อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งหลังการอบชุบแข็ง ด้วยวิธีการตกผลึก

1) อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายและเวลาเองจึงส่งผลต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบในลักษณะเชิงเส้นตรง โดยการอบละลายด้วยอุณหภูมิสูงและเองจึงเป็นเวลานานจะทำให้ค่าความแข็งสูงกว่าการอบละลายด้วยอุณหภูมิต่ำและใช้เวลาเองจึ้น้อย แต่การเองจึงเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 14 ชั่วโมง จะให้ค่าความแข็งใกล้เคียงกัน เนื่องจากการอบละลายที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้มีปริมาณการละลายของแมกนีเซียมและซิลิคอนในสภาพของแข็งมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำเมื่อผ่านกระบวนการเองจึงด้วยเวลาต่างกัน โดยการเองจึงเป็นเวลานานจะทำให้ผลึกของ Mg_2Si กระจายตัวในโครงสร้างพื้นฐานได้ดีเนื่องจากมีเวลาที่ใช้ในการแพร่ยาวนานกว่านั่นเอง

2) อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิเองจึงส่งผลต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบในลักษณะเชิงเส้นตรง โดยหลังผ่านการอบละลายแล้วนำไปผ่านกระบวนการเองจึงค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้เองจึงในช่วง $175-200^{\circ}C$ และให้ค่าความแข็งสูงสุดที่ $200^{\circ}C$ ที่ทุกระดับอุณหภูมิอบละลาย โดยเองจึงด้วยอุณหภูมิ $225^{\circ}C$ จะให้ค่าความแข็งต่ำกว่าที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิ $175-200^{\circ}C$ การเคลื่อนที่ของอะตอมแมกนีเซียมและซิลิคอนจะเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ในลักษณะการแพร่จึงส่งผลให้มีการรวมตัวกันของผลึกเกิดเป็นนิวเคลียสเป็นจำนวนมากและในขณะที่เกิดการตกผลึกนั้นจะมีแรงเชื่อมประสานระหว่างโครงสร้างพื้นฐานกับผลึก Mg_2Si (coherent precipitate) เพื่อปรับโครงสร้างเข้าสู่สมดุลทำให้ความแข็งของโลหะผสมเพิ่มขึ้น แต่การเองจึงอุณหภูมิ $225^{\circ}C$ การเคลื่อนที่ของอะตอมแมกนีเซียมและซิลิคอนเป็นไปอย่างรวดเร็วทำให้ปริมาณนิวเคลียสเกิดขึ้นน้อยและมีขนาดโตจึงส่งผลให้ได้ค่าความแข็งต่ำ

3) อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาและอุณหภูมิเองจึงส่งผลต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบในลักษณะเชิงเส้นตรงและเส้นโค้ง โดยการเองจึงด้วยอุณหภูมิ $175^{\circ}C$, $200^{\circ}C$ และ $225^{\circ}C$ ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้เองจึง และการเองจึงด้วยอุณหภูมิ $200^{\circ}C$ จะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเองจึงด้วยอุณหภูมิ $175^{\circ}C$ และ $225^{\circ}C$ ที่ทุกระดับของเวลาเองจึง ซึ่งการเองจึงด้วยอุณหภูมิต่ำจะมีแนวโน้มให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเองจึงด้วยอุณหภูมิสูงแต่ต้องใช้เวลานานส่วนการเองจึงด้วยอุณหภูมิ $225^{\circ}C$ ถึงแม้ว่าจะให้ค่าความแข็งสูงในช่วงแรกจะส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงเร็วกว่าการเองจึงด้วยอุณหภูมิ $175^{\circ}C$, $200^{\circ}C$ เนื่องจากหลังการเองจึงด้วยอุณหภูมิสูงนั้นขนาดของผลึก Mg_2Si จะมีขนาดโตจึงทำให้โครงสร้างเข้าสู่สมดุลเร็วกว่านั่นเอง

รายการอ้างอิง

- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- ปารเมศ ชูติมา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มนัส สติรจินดา. (2543). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- รัตนกรณ วังษ์ทอง และ ชงยุทธ เสริมสุธิ์อนันต์. (2553). การประเมินอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการบ่มเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 โดยใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียล 2⁴. การประชุมวิชาการฝ่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 304
- วิทยา เอียดเหตุ, ปวีณ พิไธยสามนต์เขต และ สุภารัตน์ เขียวเถื่อน. (2547). ผลกระทบของขนาดเกรนต่อคุณสมบัติทางกลในกระบวนการ Precipitation Hardening ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน. การประชุมฝ่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 1419-1426.
- วิลเลียมส์, ดี. คาลิสเตอร์, เจอาร์. (2548). วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมพื้นฐาน. แปลจาก Material science and engineering โดย สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์และคนอื่นๆ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- American Society for Testing and Material. (1998). **Annual book of ASTM standards : Aluminum and Magnesium**. Vol 02.02. USA, Easton.
- Cole, G.S., and Sherman, A.M. (1995). Light Materials for Automotive Applications. **Materials Characterization**. pp, 3-9.
- Chandler, H. (1996). **Heat treater's guide : practices and procedures for nonferrous alloys**. 2nd, United States of America, Materials Park.
- Demir, H., and Gündüz, S. (2009). The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy. **Materials & Design**. pp, 1480-1483.
- Edwards, G. A., Stiller, K., Dunlop, G. L., and Couper, M. J. (1998). The precipitation sequence in Al-Mg-Si alloys. **Acta Materialia**. pp, 3893-3904.

- Hicks and Charles, R. (1999). **Fundamental concepts in the design of experiments**. New York, Oxford University Press.
- Mahadevan, K., Raghukandan, K., Pai, B. C., and Pillai, U. T. S. (2008). Influence of precipitation hardening parameters on the fatigue strength of AA 6061-SiCp composite. **Journal of Materials Processing Technology**. pp, 241-247.
- Mahadevan, K., Raghukandan, K., Senthilvelan, T., Pai, B. C., and Pillai, U. T. S. (2005). Studies on the effect of delayed aging on the mechanical behaviour of AA 6061 SiCp composite. **Materials Science and Engineering**. pp, 188-193.
- Mahadevan, K., Raghukandan, K., Senthilvelan, T., Pai, B. C., and Pillai, U. T. S. (2006). Investigation on the influence of heat-treatment parameters on the hardness of AA6061-SiCp composite. **Journal of Materials Processing Technology**. pp, 314-318.
- Meyveci, A., Karacan, I., ÇalIgölü, U., and Durmus, H. (2010). Pin-on-disc characterization of 2xxx and 6xxx aluminium alloys aged by precipitation age hardening. **Journal of Alloys and Compounds**. pp, 278-283.
- Mrówka-Nowotnik, G., and Sieniawski, J. (2005). Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys. **Journal of Materials Processing Technology**. pp, 162-163, 367-372.
- Ozturk, F., Sisman, A., Toros, S., Kilic, S., and Picu, R. C. (2010). Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy. **Materials & Design**. pp, 972-975.
- Polmear, I.J. (2006). **Light alloys : from traditional alloys to nanocrystals**. 4th edition, Oxford, Butterworth-Heinemann.
- Remesh, C.S., Keshavamurthy, R., Channabasappa, B.H. and Pramod, S. (2009). Influence of heat treatment on slurry erosive wear resistance of Al6061 alloy. **Materials & Design**. pp, 3713-3722.



ลำดับการทดลอง

ตาราง ก.1 แสดงเงื่อนไขการทดลองทั้ง 81 เงื่อนไข ที่ออกแบบการทดลองด้วยแผนการทดลองแบบ 3^4 แฟคทอเรียล ซึ่งในการทดลองแต่ละเงื่อนไขที่ปรากฏในตารางนั้น การทดลองทั้งหมดจะต้องเป็นไปตามแบบสุ่มแบบสุ่มบริบูรณ์ (completely randomized design) โดยทำการสุ่มลำดับการทดลอง เช่น ในการสุ่มครั้งที่ 1 ได้เงื่อนไขการทดลองที่ 11 คือ อบละลายที่ 540°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเอจิงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก็ให้ทดลองเงื่อนไขนี้เป็นลำดับแรก จากนั้นก็สุ่มการทดลองเช่นนี้จนครบ 81 เงื่อนไข จะได้ลำดับการทดลองของแต่ละเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.1 แสดงเงื่อนไขการทดลอง

aging time (C)	aging temp (D)	solution treatment time (A)								
		1			2			3		
		solution treatment temp(B)			solution treatment temp(B)			solution treatment temp(B)		
		520	540	560	520	540	560	520	540	560
2	175	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	200	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	225	19	20	21	22	23	24	25	26	27
8	175	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	200	37	38	39	40	41	42	43	44	45
	225	46	47	48	49	50	51	52	53	54
14	175	55	56	57	58	59	60	61	62	63
	200	64	65	66	67	68	69	70	71	72
	225	73	74	75	76	77	78	79	80	81

ตารางที่ ก.2 แสดงลำดับการทดลองของแต่ละเงื่อนไข

aging time (C)	aging temp (D)	solution treatment time (A)								
		1			2			3		
		solution treatment temp(B)			solution treatment temp(B)			solution treatment temp(B)		
		520	540	560	520	540	560	520	540	560
2	175	4	23	41	65	68	47	17	2	34
	200	31	1	7	28	19	29	46	61	72
	225	35	18	50	26	67	9	80	8	53
8	175	66	71	70	79	81	56	38	12	30
	200	20	48	54	52	62	59	58	15	60
	225	40	14	64	45	3	49	36	25	16
14	175	6	21	43	27	77	22	5	73	75
	200	74	63	11	55	33	10	69	57	44
	225	42	51	24	39	78	76	37	32	13



ภาคผนวก ข

การทดสอบเตา

การทดสอบเตา

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเตาที่ใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเตาเมื่อใช้บั้งงานทดสอบแต่ละครั้ง โดยตั้งสมมติฐานในการทดลองดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

กำหนดให้ใช้ $\alpha = 0.05$

ตารางที่ ข.1 แสดงอุณหภูมิในเตาทดลองที่ 1

ครั้งที่	เตา 1			$d1 = X_1 - X_0$	$d2 = X_2 - X_0$
	อุณหภูมิ (°C), X_0	อุณหภูมิที่วัด ได้, X_1	อุณหภูมิที่วัด ได้, X_2		
1	50	49	50	-1	0
2	100	102	100	2	0
3	150	150	150	0	0
4	200	201	200	1	0
5	250	250	250	0	0
6	300	303	300	3	0
7	350	350	352	0	2
8	400	400	401	0	1
9	450	447	450	-3	0
10	500	499	500	-1	0
11	550	550	553	0	3
12	600	603	600	3	0

นำข้อมูลในตารางที่ ข.1 มาทดสอบสมมติฐานโดยหาค่าความแปรปรวนจากสมการ

$$S_d^2 = \sum_{j=1}^n \frac{(d_j - \bar{d})^2}{n-1} \quad (\text{ข1})$$

เมื่อแทนค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเตาที่วัดได้ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ลงในสมการ (ข1)

$$S_{d1}^2 = \sum_{j=1}^n \frac{(d_j - \bar{d})^2}{n-1} = \frac{32.667}{11} \\ = 2.970$$

$$S_{d2}^2 = \sum_{j=1}^n \frac{(d_j - \bar{d})^2}{n-1} = \frac{11.000}{11} \\ = 1.000$$

จะได้ค่าความแปรปรวนของการวัดเตาครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 เท่ากับ 2.970 และ 1.000 ตามลำดับและหาค่าความแปรปรวนรวมจากสมการ

$$S_p^2 = \frac{(n_1-1)s_{d1}^2 + (n_2-1)s_{d2}^2}{n_1+n_2-2} \quad (\text{ข2})$$

แทนค่าความแปรปรวนของการวัดเตาครั้งที่ 1 และ 2 ลงในสมการ (ข2)

$$S_p^2 = \frac{(12-1)s_{d1}^2 + (12-1)s_{d2}^2}{12+12-2} \\ = \frac{(11 \times 2.970) + (11 \times 1.000)}{22} \\ = 1.985$$

ดังนั้น จะได้ค่าความแปรปรวนรวมเท่ากับ 1.985

$$\text{และสถิติที่ใช้ทดสอบคือ } t_0 = \frac{\bar{d}}{S_p^2/\sqrt{12}} \\ = \frac{0.417}{0.573} \\ = 0.73$$

$$t_{0.025,22} = 2.047$$

เนื่องจาก $|t_0| = 0.73 < 2.047$ จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่าไม่มีแตกต่างของอุณหภูมิภายในเตาที่ใช้ในการอบชิ้นงานทดสอบแต่ละครั้ง

ตารางที่ ข.2 แสดงอุณหภูมิในเตาทดลองที่ 2

ครั้งที่	เตา 2			$d1=X_1-X_0$	$d2=X_2-X_0$
	อุณหภูมิ (°C), X_0	อุณหภูมิที่วัด ได้, X_1	อุณหภูมิที่วัด ได้, X_2		
1	50	47	49	-3	-1
2	100	99	100	-1	0
3	150	150	150	0	0
4	200	199	200	-1	0
5	250	249	250	-1	0
6	300	300	299	0	-1
7	350	350	350	0	0
8	400	400	400	0	0
9	450	449	450	-1	0
10	500	500	500	0	0
11	550	550	550	0	0
12	600	600	602	0	2

นำข้อมูลในตารางที่ ข.2 มาทดสอบสมมติฐาน โดยหาค่าความแปรปรวนจากสมการ (ข1) เมื่อแทนค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเตาที่วัดได้ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ลงในสมการจะได้

$$S_{d1}^2 = \sum_{j=1}^n \frac{(d_j - \bar{d})^2}{n-1} = \frac{8.917}{11} = 0.811$$

$$S_{d2}^2 = \sum_{j=1}^n \frac{(d_j - \bar{d})^2}{n-1} = \frac{6.000}{11} = 0.545$$

จะได้ค่าความแปรปรวนของการวัดเตาครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 เท่ากับ 0.811 และ 0.545 ตามลำดับและหาค่าความแปรปรวนรวมจากสมการ (ข2) จะได้

$$S_p^2 = \frac{(12-1)s_{d1}^2 + (12-1)s_{d2}^2}{12+12-2} = \frac{(11 \times 0.811) + (11 \times 0.545)}{22}$$

$$= 0.678$$

ดังนั้น จะได้ค่าความแปรปรวนรวมเท่ากับ 10.678

$$\begin{aligned} \text{และสถิติที่ใช้ทดสอบคือ } t_0 &= \frac{\bar{d}}{s_p^2/\sqrt{12}} \\ &= \frac{-0.292}{0.196} \\ &= -1.490 \end{aligned}$$

$$t_{0.025,22} = 2.047$$

เนื่องจาก $|t_0| = 1.490 < 2.047$ จึงยอมรับ H_0 และสรุปได้ว่าไม่มีแตกต่างของอุณหภูมิภายในเตาที่ใช้ในการอบชิ้นงานทดสอบแต่ละครั้ง



ภาคผนวก ค

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ

ลำดับ	X1	X2	(X1+X2)/2	Y1	Y2	(Y1+Y2)/2	(X+Y)/2	ความ แข็ง	ความ แข็ง เฉลี่ย
1	3.219	3.22	3.2195	3.204	3.203	3.2035	3.21	60.1	59.75
	3.221	3.221	3.221	3.25	3.249	3.2495	3.24	59	
	3.248	3.242	3.245	3.242	3.24	3.241	3.24	59	
	3.199	3.2	3.1995	3.187	3.185	3.186	3.19	60.9	
2	2.684	2.682	2.683	2.605	2.599	2.602	2.64	89.7	91.3
	2.604	2.606	2.605	2.611	2.606	2.6085	2.61	91.8	
	2.608	2.607	2.6075	2.576	2.575	2.5755	2.59	93.3	
	2.618	2.621	2.6195	2.634	2.636	2.635	2.63	90.4	
3	2.612	2.614	2.613	2.614	2.614	2.614	2.61	91.8	91.85
	2.632	2.628	2.63	2.66	2.656	2.658	2.64	89.7	
	2.662	2.667	2.6645	2.589	2.592	2.5905	2.63	90.4	
	2.588	2.593	2.5905	2.534	2.537	2.5355	2.56	95.5	
4	3.237	3.233	3.235	3.227	3.23	3.2285	3.23	59.4	59.3
	3.232	3.227	3.2295	3.222	3.223	3.2225	3.23	59.4	
	3.238	3.238	3.238	3.241	3.238	3.2395	3.24	59	
	3.233	3.229	3.231	3.237	3.24	3.2385	3.23	59.4	
5	2.707	2.706	2.7065	2.7	2.697	2.6985	2.70	85.7	84.45
	2.702	2.708	2.705	2.73	2.726	2.728	2.72	84.4	
	2.688	2.694	2.691	2.693	2.93	2.8115	2.75	82.6	
	2.709	2.704	2.7065	2.723	2.719	2.721	2.71	85.1	
6	2.538	2.54	2.539	2.577	2.572	2.5745	2.56	95.5	97.975
	2.529	2.532	2.5305	2.532	2.536	2.534	2.53	97.8	
	2.549	2.55	2.5495	2.495	2.495	2.495	2.52	98.6	
	2.506	2.506	2.506	2.498	2.495	2.4965	2.50	100	
7	2.869	2.869	2.869	2.864	2.86	2.862	2.87	75.7	76.625
	2.837	2.841	2.839	2.852	2.847	2.8495	2.84	77.3	
	2.835	2.843	2.839	2.832	2.832	2.832	2.84	77.3	
	2.855	2.855	2.855	2.861	2.858	2.8595	2.86	76.2	
8	2.7	2.668	2.684	2.668	2.668	2.668	2.68	87	87.35
	2.648	2.694	2.671	2.694	2.699	2.6965	2.68	87	
	2.699	2.673	2.686	2.673	2.663	2.668	2.68	87	
	2.659	2.665	2.662	2.665	2.663	2.664	2.66	88.4	
9	2.574	2.577	2.5755	2.575	2.571	2.573	2.57	94.8	94.95
	2.577	2.576	2.5765	2.551	2.549	2.55	2.56	95.5	
	2.589	2.591	2.59	2.569	2.573	2.571	2.58	94	
	2.513	2.591	2.552	2.574	2.573	2.5735	2.56	95.5	

ตารางที่ ค.1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ(ต่อ)

ลำดับ	X1	X2	(X1+X2)/2	Y1	Y2	(Y1+Y2)/2	(X+Y)/2	ความ แข็ง	ความแข็ง เฉลี่ย
10	2.669	2.672	2.6705	2.655	2.651	2.653	2.66	88.4	88.225
	2.65	2.653	2.6515	2.676	2.67	2.673	2.66	88.4	
	2.682	2.684	2.683	2.648	2.647	2.6475	2.67	87.7	
	2.649	2.65	2.6495	2.659	2.663	2.661	2.66	88.4	
11	2.521	2.522	2.5215	2.527	2.525	2.526	2.52	98.6	98.3
	2.526	2.532	2.529	2.573	2.567	2.57	2.55	96.3	
	2.528	2.524	2.526	2.442	2.44	2.441	2.48	102	
	2.518	2.521	2.5195	2.573	2.584	2.5785	2.55	96.3	
12	2.379	2.387	2.383	2.365	2.361	2.363	2.37	112	109.5
	2.403	2.401	2.402	2.439	2.445	2.442	2.42	107	
	2.462	2.467	2.4645	2.383	2.383	2.383	2.42	107	
	2.367	2.367	2.367	2.374	2.376	2.375	2.37	112	
13	2.625	2.624	2.6245	2.597	2.601	2.599	2.61	91.8	92
	2.609	2.613	2.611	2.599	2.594	2.5965	2.60	92.6	
	2.619	2.618	2.6185	2.603	2.608	2.6055	2.61	91.8	
	2.617	2.611	2.614	2.603	2.599	2.601	2.61	91.8	
14	2.43	2.427	2.4285	2.431	2.436	2.4335	2.43	106	106
	2.45	2.448	2.449	2.438	2.434	2.436	2.44	105	
	2.436	2.437	2.4365	2.428	2.422	2.425	2.43	106	
	2.416	2.411	2.4135	2.422	2.42	2.421	2.42	107	
15	2.342	2.35	2.346	2.35	2.352	2.351	2.35	114	111.25
	2.38	2.377	2.3785	2.411	2.415	2.413	2.40	109	
	2.393	2.39	2.3915	2.362	2.357	2.3595	2.38	111	
	2.377	2.383	2.38	2.381	2.382	2.3815	2.38	111	
16	2.598	2.598	2.598	2.575	2.576	2.5755	2.59	93.3	93.85
	2.584	2.59	2.587	2.583	2.586	2.5845	2.59	93.3	
	2.579	2.578	2.5785	2.57	2.568	2.569	2.57	94.8	
	2.588	2.578	2.583	2.576	2.577	2.5765	2.58	94	
17	2.43	2.431	2.4305	2.419	2.424	2.4215	2.43	106	104.25
	2.457	2.462	2.4595	2.436	2.434	2.435	2.45	104	
	2.435	2.436	2.4355	2.459	2.459	2.459	2.45	104	
	2.442	2.46	2.451	2.491	2.494	2.4925	2.47	103	
18	2.344	2.344	2.344	2.357	2.357	2.357	2.35	114	113.75
	2.37	2.372	2.371	2.373	2.371	2.372	2.37	112	
	2.333	2.334	2.3335	2.338	2.341	2.3395	2.34	115	
	2.35	2.353	2.3515	2.352	2.351	2.3515	2.35	114	

ตารางที่ ค.1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ(ต่อ)

ลำดับ	X1	X2	(X1+X2)/2	Y1	Y2	(Y1+Y2)/2	(X+Y)/2	ความ แข็ง	ความแข็ง เฉลี่ย
19	2.734	2.735	2.7345	2.71	2.707	2.7085	2.72	84.4	83.95
	2.727	2.724	2.7255	2.715	2.718	2.7165	2.72	84.4	
	2.743	2.749	2.746	2.727	2.727	2.727	2.74	83.2	
	2.72	2.721	2.7205	2.735	2.739	2.737	2.73	83.8	
20	2.461	2.467	2.464	2.463	2.458	2.4605	2.46	104	104.5
	2.455	2.446	2.4505	2.437	2.433	2.435	2.44	105	
	2.43	2.423	2.4265	2.452	2.452	2.452	2.44	105	
	2.453	2.452	2.4525	2.473	2.472	2.4725	2.46	104	
21	2.387	2.39	2.3885	2.397	2.397	2.397	2.39	110	109.75
	2.387	2.384	2.3855	2.395	2.398	2.3965	2.39	110	
	2.395	2.398	2.3965	2.398	2.397	2.3975	2.40	109	
	2.376	2.375	2.3755	2.401	2.404	2.4025	2.39	110	
22	2.733	2.73	2.7315	2.716	2.714	2.715	2.72	84.4	84.425
	2.726	2.724	2.725	2.733	2.735	2.734	2.73	83.8	
	2.712	2.715	2.7135	2.712	2.711	2.7115	2.71	85.1	
	2.706	2.708	2.707	2.723	2.723	2.723	2.72	84.4	
23	2.504	2.505	2.5045	2.511	2.51	2.5105	2.51	99.4	99.2
	2.511	2.51	2.5105	2.525	2.523	2.524	2.52	98.6	
	2.521	2.52	2.5205	2.51	2.508	2.509	2.51	99.4	
	2.512	2.515	2.5135	2.506	2.511	2.5085	2.51	99.4	
24	2.312	2.316	2.314	2.323	2.323	2.323	2.32	117	116.5
	2.332	2.336	2.334	2.327	2.325	2.326	2.33	116	
	2.317	2.319	2.318	2.307	2.307	2.307	2.31	118	
	2.321	2.322	2.3215	2.355	2.357	2.356	2.34	115	
25	2.723	2.724	2.7235	2.739	2.737	2.738	2.73	83.8	83.65
	2.717	2.718	2.7175	2.741	2.743	2.742	2.73	83.8	
	2.742	2.74	2.741	2.728	2.729	2.7285	2.73	83.8	
	2.735	2.735	2.735	2.745	2.746	2.7455	2.74	83.2	
26	2.447	2.452	2.4495	2.409	2.405	2.407	2.43	106	102.25
	2.478	2.476	2.477	2.486	2.483	2.4845	2.48	102	
	2.535	2.534	2.5345	2.474	2.475	2.4745	2.50	100	
	2.459	2.461	2.46	2.528	2.528	2.528	2.49	101	
27	2.353	2.352	2.3525	2.357	2.359	2.358	2.36	113	114
	2.347	2.349	2.348	2.347	2.345	2.346	2.35	114	
	2.328	2.327	2.3275	2.35	2.348	2.349	2.34	115	
	2.338	2.337	2.3375	2.354	2.354	2.354	2.35	114	

ตารางที่ ค.1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความแข็งของชิ้นงานทดสอบ(ต่อ)

ลำดับ	X1	X2	(X1+X2)/2	Y1	Y2	(Y1+Y2)/2	(X+Y)/2	ความ แข็ง	ความแข็ง เฉลี่ย
28	2.595	2.594	2.5945	2.601	2.602	2.6015	2.60	92.6	92
	2.598	2.607	2.6025	2.61	2.607	2.6085	2.61	91.8	
	2.6	2.606	2.603	2.614	2.609	2.6115	2.61	91.8	
	2.618	2.616	2.617	2.598	2.597	2.5975	2.61	91.8	
29	2.433	2.433	2.433	2.435	2.436	2.4355	2.43	106	104
	2.457	2.458	2.4575	2.501	2.498	2.4995	2.48	102	
	2.463	2.467	2.465	2.407	2.413	2.41	2.44	105	
	2.446	2.449	2.4475	2.493	2.493	2.493	2.47	103	
30	2.404	2.395	2.3995	2.374	2.369	2.3715	2.39	110	109.25
	2.385	2.386	2.3855	2.406	2.397	2.4015	2.39	110	
	2.419	2.42	2.4195	2.397	2.401	2.399	2.41	108	
	2.402	2.402	2.402	2.402	2.408	2.405	2.40	109	
31	2.553	2.552	2.5525	2.554	2.553	2.5535	2.55	96.3	96.1
	2.558	2.556	2.557	2.55	2.548	2.549	2.55	96.3	
	2.571	2.573	2.572	2.547	2.549	2.548	2.56	95.5	
	2.556	2.555	2.5555	2.553	2.552	2.5525	2.55	96.3	
32	2.411	2.414	2.4125	2.436	2.43	2.433	2.42	107	106.75
	2.441	2.44	2.4405	2.417	2.41	2.4135	2.43	106	
	2.443	2.444	2.4435	2.426	2.423	2.4245	2.43	106	
	2.423	2.425	2.424	2.4	2.4	2.4	2.41	108	
33	2.426	2.424	2.425	2.408	2.409	2.4085	2.42	107	108.25
	2.404	2.405	2.4045	2.386	2.385	2.3855	2.40	109	
	2.391	2.388	2.3895	2.4	2.401	2.4005	2.40	109	
	2.407	2.405	2.406	2.404	2.407	2.4055	2.41	108	
34	2.603	2.598	2.6005	2.59	2.588	2.589	2.59	93.3	93.475
	2.59	2.593	2.5915	2.576	2.578	2.577	2.58	94	
	2.589	2.589	2.589	2.596	2.596	2.596	2.59	93.3	
	2.592	2.591	2.5915	2.597	2.599	2.598	2.59	93.3	
35	2.434	2.439	2.4365	2.432	2.433	2.4325	2.43	106	107.75
	2.453	2.438	2.4455	2.413	2.41	2.4115	2.43	106	
	2.435	2.438	2.4365	2.439	2.444	2.4415	2.44	105	
	2.427	2.43	2.4285	2.418	2.117	2.2675	2.35	114	
36	2.419	2.417	2.418	2.42	2.421	2.4205	2.42	107	109.25
	2.392	2.392	2.392	2.399	2.398	2.3985	2.40	109	
	2.399	2.398	2.3985	2.355	2.355	2.355	2.38	111	
	2.377	2.377	2.377	2.409	2.409	2.409	2.39	110	

ตารางที่ ค.1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ(ต่อ)

ลำดับ	X1	X2	(X1+X2)/2	Y1	Y2	(Y1+Y2)/2	(X+Y)/2	ความ แข็ง	ความแข็ง เฉลี่ย
37	2.607	2.608	2.6075	2.6	2.597	2.5985	2.60	92.6	92.6
	2.603	2.603	2.603	2.605	2.606	2.6055	2.60	92.6	
	2.603	2.604	2.6035	2.605	2.602	2.6035	2.60	92.6	
	2.597	2.601	2.599	2.609	2.609	2.609	2.60	92.6	
38	2.408	2.408	2.408	2.465	2.464	2.4645	2.44	105	105.5
	2.452	2.451	2.4515	2.416	2.415	2.4155	2.43	106	
	2.462	2.47	2.466	2.406	2.409	2.4075	2.44	105	
	2.439	2.439	2.439	2.413	2.415	2.414	2.43	106	
39	2.362	2.364	2.363	2.329	2.328	2.3285	2.35	114	115.75
	2.318	2.32	2.319	2.332	2.332	2.332	2.33	116	
	2.314	2.316	2.315	2.289	2.389	2.339	2.33	116	
	2.317	2.316	2.3165	2.326	2.33	2.328	2.32	117	
40	2.617	2.619	2.618	2.635	2.633	2.634	2.63	90.4	90.225
	2.644	2.641	2.6425	2.613	2.615	2.614	2.63	90.4	
	2.642	2.644	2.643	2.638	2.638	2.638	2.64	89.7	
	2.626	2.629	2.6275	2.629	2.629	2.629	2.63	90.4	
41	2.411	2.413	2.412	2.419	2.421	2.42	2.42	107	107
	2.427	2.428	2.4275	2.419	2.423	2.421	2.42	107	
	2.424	2.426	2.425	2.42	2.42	2.42	2.42	107	
	2.414	2.416	2.415	2.426	2.439	2.4325	2.42	107	
42	2.326	2.324	2.325	2.337	2.335	2.336	2.33	116	117
	2.342	2.343	2.3425	2.328	2.329	2.3285	2.34	115	
	2.323	2.326	2.3245	2.322	2.326	2.324	2.32	117	
	2.293	2.292	2.2925	2.297	2.293	2.295	2.29	120	
43	2.584	2.588	2.586	2.566	2.564	2.565	2.58	94	94.4
	2.572	2.572	2.572	2.588	2.587	2.5875	2.58	94	
	2.574	2.576	2.575	2.56	2.558	2.559	2.57	94.8	
	2.576	2.575	2.5755	2.573	2.57	2.5715	2.57	94.8	
44	2.42	2.425	2.4225	2.424	2.423	2.4235	2.42	107	108
	2.412	2.413	2.4125	2.417	2.415	2.416	2.41	108	
	2.398	2.398	2.398	2.4	2.4	2.4	2.40	109	
	2.406	2.408	2.407	2.417	2.412	2.4145	2.41	108	
45	2.303	2.299	2.301	2.32	2.32	2.32	2.31	118	117.25
	2.306	2.308	2.307	2.334	2.334	2.334	2.32	117	
	2.34	2.339	2.3395	2.338	2.338	2.338	2.34	115	
	2.294	2.294	2.294	2.297	2.297	2.297	2.30	119	

ตารางที่ ค.1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความแข็งของชิ้นงานทดสอบ(ต่อ)

ลำดับ	X1	X2	(X1+X2)/2	Y1	Y2	(Y1+Y2)/2	(X+Y)/2	ความ แข็ง	ความแข็ง เฉลี่ย
46	2.75	2.772	2.761	2.776	2.776	2.776	2.77	81.3	80.9
	2.781	2.779	2.78	2.795	2.793	2.794	2.79	80.2	
	2.789	2.788	2.7885	2.773	2.769	2.771	2.78	80.8	
	2.77	2.771	2.7705	2.776	2.777	2.7765	2.77	81.3	
47	2.289	2.291	2.29	2.263	2.268	2.2655	2.28	121	103.625
	2.551	2.546	2.5485	2.537	2.537	2.537	2.54	97.1	
	2.527	2.526	2.5265	2.512	2.515	2.5135	2.52	98.6	
	2.521	2.522	2.5215	2.532	2.529	2.5305	2.53	97.8	
48	2.417	2.419	2.418	2.364	2.366	2.365	2.39	110	111
	2.378	2.382	2.38	2.403	2.4	2.4015	2.39	110	
	2.437	2.438	2.4375	2.371	2.367	2.369	2.40	109	
	2.29	2.291	2.2905	2.389	2.386	2.3875	2.34	115	
49	2.691	2.693	2.692	2.675	2.675	2.675	2.68	87	87.375
	2.656	2.658	2.657	2.677	2.674	2.6755	2.67	87.7	
	2.689	2.691	2.69	2.662	2.661	2.6615	2.68	87	
	2.678	2.675	2.6765	2.687	2.69	2.6885	2.68	87.8	
50	2.479	2.481	2.48	2.504	2.505	2.5045	2.49	101	102.75
	2.422	2.424	2.423	2.453	2.452	2.4525	2.44	105	
	2.472	2.476	2.474	2.418	2.419	2.4185	2.45	104	
	2.506	2.504	2.505	2.47	2.47	2.47	2.49	101	
51	2.398	2.392	2.395	2.344	2.343	2.3435	2.37	112	116.25
	2.328	2.326	2.327	2.378	2.375	2.3765	2.35	114	
	2.302	2.302	2.302	2.293	2.294	2.2935	2.30	119	
	2.276	2.276	2.276	2.307	2.305	2.306	2.29	120	
52	2.711	2.714	2.7125	2.7	2.699	2.6995	2.71	85.1	85.425
	2.7	2.702	2.701	2.715	2.71	2.7125	2.71	85.1	
	2.72	2.718	2.719	2.707	2.707	2.707	2.71	85.1	
	2.689	2.687	2.688	2.7	2.7	2.7	2.69	86.4	
53	2.376	2.378	2.377	2.413	2.413	2.413	2.40	109	106.75
	2.419	2.416	2.4175	2.42	2.417	2.4185	2.42	107	
	2.411	2.415	2.413	2.437	2.437	2.437	2.43	106	
	2.453	2.453	2.453	2.428	2.429	2.4285	2.44	105	
54	2.33	2.331	2.3305	2.317	2.316	2.3165	2.32	117	115.5
	2.347	2.349	2.348	2.347	2.343	2.345	2.35	114	
	2.356	2.357	2.3565	2.31	2.31	2.31	2.33	116	
	2.338	2.335	2.3365	2.353	2.351	2.352	2.34	115	

ตารางที่ ค.1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ(ต่อ)

ลำดับ	X1	X2	(X1+X2)/2	Y1	Y2	(Y1+Y2)/2	(X+Y)/2	ความ แข็ง	ความแข็ง เฉลี่ย
55	2.593	2.59	2.5915	2.594	2.593	2.5935	2.59	93.3	94.225
	2.586	2.589	2.5875	2.535	2.534	2.5345	2.56	95.5	
	2.569	2.568	2.5685	2.577	2.578	2.5775	2.57	94.8	
	2.58	2.581	2.5805	2.603	2.602	2.6025	2.59	93.3	
56	2.443	2.441	2.442	2.399	2.397	2.398	2.42	107	104.75
	2.438	2.44	2.439	2.463	2.46	2.4615	2.45	104	
	2.461	2.458	2.4595	2.466	2.464	2.465	2.46	104	
	2.476	2.475	2.4755	2.436	2.438	2.437	2.46	104	
57	2.39	2.391	2.3905	2.368	2.366	2.367	2.38	111	113
	2.359	2.361	2.36	2.349	2.347	2.348	2.35	114	
	2.38	2.377	2.3785	2.361	2.365	2.363	2.37	112	
	2.337	2.339	2.338	2.339	2.339	2.339	2.34	115	
58	2.518	2.517	2.5175	2.539	2.537	2.538	2.53	97.8	98
	2.528	2.53	2.529	2.511	2.509	2.51	2.52	98.6	
	2.531	2.529	2.53	2.53	2.531	2.5305	2.53	97.8	
	2.535	2.53	2.5325	2.53	2.527	2.5285	2.53	97.8	
59	2.395	2.392	2.3935	2.391	2.394	2.3925	2.39	110	110
	2.382	2.379	2.3805	2.381	2.377	2.379	2.38	111	
	2.387	2.387	2.387	2.388	2.388	2.388	2.39	110	
	2.406	2.404	2.405	2.397	2.395	2.396	2.40	109	
60	2.359	2.357	2.358	2.357	2.357	2.357	2.36	113	113.25
	2.351	2.349	2.35	2.353	2.348	2.3505	2.35	114	
	2.363	2.369	2.366	2.337	2.336	2.3365	2.35	114	
	2.37	2.369	2.3695	2.374	2.373	2.3735	2.37	112	
61	2.544	2.55	2.547	2.54	2.537	2.5385	2.54	97.1	96.5
	2.553	2.555	2.554	2.545	2.545	2.545	2.55	96.3	
	2.543	2.543	2.543	2.554	2.551	2.5525	2.55	96.3	
	2.555	2.554	2.5545	2.54	2.541	2.5405	2.55	96.3	
62	2.403	2.401	2.402	2.403	2.402	2.4025	2.40	109	110
	2.389	2.39	2.3895	2.395	2.395	2.395	2.39	110	
	2.41	2.411	2.4105	2.378	2.374	2.376	2.39	110	
	2.362	2.361	2.3615	2.403	2.39	2.3965	2.38	111	
63	2.37	2.373	2.3715	2.355	2.358	2.3565	2.36	113	113.5
	2.354	2.352	2.353	2.35	2.35	2.35	2.35	114	
	2.383	2.384	2.3835	2.331	2.331	2.331	2.36	113	
	2.338	2.337	2.3375	2.355	2.355	2.355	2.35	114	

ตารางที่ ค.1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความแข็งของชิ้นงานทดสอบ(ต่อ)

ลำดับ	X1	X2	(X1+X2)/2	Y1	Y2	(Y1+Y2)/2	(X+Y)/2	ความ แข็ง	ความแข็ง เฉลี่ย
64	2.595	2.592	2.5935	2.603	2.603	2.603	2.60	92.6	92.4
	2.602	2.605	2.6035	2.601	2.603	2.602	2.60	92.6	
	2.623	2.623	2.623	2.601	2.602	2.6015	2.61	91.8	
	2.599	2.599	2.599	2.596	2.597	2.5965	2.60	92.6	
65	2.438	2.433	2.4355	2.448	2.448	2.448	2.44	105	105
	2.455	2.456	2.4555	2.424	2.423	2.4235	2.44	105	
	2.427	2.431	2.429	2.444	2.441	2.4425	2.44	105	
	2.441	2.443	2.442	2.43	2.433	2.4315	2.44	105	
66	2.325	2.323	2.324	2.362	2.362	2.362	2.34	115	115.75
	2.327	2.326	2.3265	2.342	2.342	2.342	2.33	116	
	2.334	2.333	2.3335	2.324	2.32	2.322	2.33	116	
	2.341	2.34	2.3405	2.313	2.317	2.315	2.33	116	
67	2.564	2.561	2.5625	2.555	2.551	2.553	2.56	95.5	96.3
	2.541	2.542	2.5415	2.548	2.55	2.549	2.55	96.3	
	2.545	2.548	2.5465	2.537	2.538	2.5375	2.54	97.1	
	2.537	2.535	2.536	2.562	2.558	2.56	2.55	96.3	
68	2.439	2.436	2.4375	2.434	2.435	2.4345	2.44	105	105.5
	2.446	2.447	2.4465	2.43	2.431	2.4305	2.44	105	
	2.427	2.428	2.4275	2.433	2.436	2.4345	2.43	106	
	2.436	2.438	2.437	2.42	2.423	2.4215	2.43	106	
69	2.301	2.309	2.305	2.293	2.292	2.2925	2.30	119	116.75
	2.303	2.307	2.305	2.333	2.329	2.331	2.32	117	
	2.338	2.335	2.3365	2.328	2.327	2.3275	2.33	116	
	2.342	2.346	2.344	2.332	2.333	2.3325	2.34	115	
70	2.597	2.595	2.596	2.586	2.585	2.5855	2.59	93.3	93.475
	2.586	2.584	2.585	2.585	2.586	2.5855	2.59	93.3	
	2.587	2.589	2.588	2.567	2.567	2.567	2.58	94	
	2.578	2.579	2.5785	2.592	2.592	2.592	2.59	93.3	
71	2.384	2.384	2.384	2.366	2.365	2.3655	2.37	112	110.75
	2.387	2.384	2.3855	2.399	2.399	2.399	2.39	110	
	2.412	2.412	2.412	2.365	2.365	2.365	2.39	110	
	2.377	2.375	2.376	2.393	2.393	2.393	2.38	111	
72	2.316	2.312	2.314	2.308	2.309	2.3085	2.31	118	119.25
	2.246	2.245	2.2455	2.292	2.289	2.2905	2.27	122	
	2.325	2.329	2.327	2.285	2.285	2.285	2.31	118	
	2.313	2.312	2.3125	2.289	2.289	2.289	2.30	119	

ตารางที่ ค.1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความแข็งของชิ้นงานทดสอบ(ต่อ)

ลำดับ	X1	X2	(X1+X2)/2	Y1	Y2	(Y1+Y2)/2	(X+Y)/2	ความ แข็ง	ความแข็ง เฉลี่ย
73	2.696	2.694	2.695	2.704	2.704	2.704	2.70	85.7	85.875
	2.696	2.696	2.696	2.707	2.704	2.7055	2.70	85.7	
	2.695	2.702	2.6985	2.688	2.687	2.6875	2.69	86.4	
	2.697	2.696	2.6965	2.696	2.696	2.696	2.70	85.7	
74	2.587	2.587	2.587	2.501	2.501	2.501	2.54	97.1	96.7
	2.534	2.534	2.534	2.546	2.546	2.546	2.54	97.1	
	2.544	2.542	2.543	2.512	2.512	2.512	2.53	97.8	
	2.559	2.551	2.555	2.581	2.579	2.58	2.57	94.8	
75	2.373	2.374	2.3735	2.357	2.358	2.3575	2.37	112	111.5
	2.375	2.376	2.3755	2.367	2.367	2.367	2.37	112	
	2.396	2.395	2.3955	2.389	2.397	2.393	2.39	110	
	2.358	2.363	2.3605	2.389	2.388	2.3885	2.37	112	
76	2.712	2.704	2.708	2.694	2.695	2.6945	2.70	85.7	86.05
	2.689	2.689	2.689	2.698	2.696	2.697	2.69	86.4	
	2.705	2.707	2.706	2.695	2.694	2.6945	2.70	85.7	
	2.69	2.688	2.689	2.697	2.701	2.699	2.69	86.4	
77	2.592	2.594	2.593	2.579	2.577	2.578	2.59	93.3	93.65
	2.594	2.591	2.5925	2.573	2.57	2.5715	2.58	94	
	2.578	2.581	2.5795	2.572	2.574	2.573	2.58	94	
	2.59	2.592	2.591	2.591	2.591	2.591	2.59	93.3	
78	2.465	2.467	2.466	2.452	2.452	2.452	2.46	104	103
	2.568	2.47	2.519	2.472	2.47	2.471	2.50	100	
	2.449	2.469	2.459	2.469	2.464	2.4665	2.46	104	
	2.467	2.468	2.4675	2.462	2.446	2.454	2.46	104	
79	2.673	2.67	2.6715	2.668	2.667	2.6675	2.67	87.7	87.88
	2.657	2.656	2.6565	2.664	2.664	2.664	2.66	88.4	
	2.676	2.676	2.676	2.658	2.657	2.6575	2.67	87.7	
	2.663	2.664	2.6635	2.667	2.668	2.6675	2.67	87.7	
80	2.53	2.528	2.529	2.522	2.523	2.5225	2.53	97.8	98.03
	2.533	2.533	2.533	2.551	2.549	2.55	2.54	97.1	
	2.524	2.525	2.5245	2.515	2.515	2.515	2.52	98.6	
	2.518	2.518	2.518	2.526	2.528	2.527	2.52	98.6	
81	2.376	2.372	2.374	2.355	2.354	2.3545	2.36	113	112.75
	2.35	2.348	2.349	2.364	2.365	2.3645	2.36	113	
	2.343	2.344	2.3435	2.359	2.353	2.356	2.35	114	
	2.386	2.387	2.3865	2.369	2.368	2.3685	2.38	111	

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าความแข็งแบบบริเนล (ASTM, 1998)

Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number 500-kgf Load	Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number 500-kgf Load	Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number 500-kgf Load
2.00	158	2.36	113	2.68	87.0
2.01	156	2.37	112	2.69	86.4
2.02	154	2.38	111	2.7	85.7
2.03	153	2.39	110	2.71	85.1
2.04	151	2.4	109	2.72	84.4
2.05	150	2.41	108	2.73	83.8
2.06	148	2.42	107	2.74	83.2
2.07	147	2.43	106	2.75	82.6
2.08	146	2.44	105	2.76	81.9
2.09	144	2.45	104	2.77	81.3
2.1	143	2.46	104	2.78	80.8
2.11	141	2.47	103	2.79	80.2
2.12	140	2.48	102	2.8	79.6
2.13	139	2.49	101	2.81	79.0
2.14	137	2.5	100	2.82	78.4
2.15	136	2.51	99.4	2.83	77.9
2.16	135	2.52	98.6	2.84	77.3
2.17	134	2.53	97.8	2.85	76.8
2.18	132	2.54	97.1	2.86	76.2
2.19	131	2.55	96.3	2.87	75.7
2.2	130	2.56	95.5	2.88	75.1
2.21	129	2.57	94.8	2.89	74.6
2.22	128	2.58	94.0	2.9	74.1
2.23	126	2.59	93.3	2.91	73.6
2.24	125	2.6	92.6	2.92	73.0
2.25	124	2.61	91.8	2.93	72.5
2.26	123	2.62	91.1	2.94	72.0
2.27	122	2.63	90.4	2.95	71.5
2.28	121	2.6	92.6	2.96	71.0
2.29	120	2.61	91.8	2.97	70.5
2.3	119	2.62	91.1	2.98	70.1
2.31	118	2.63	90.4	2.99	69.6
2.32	117	2.64	89.7	3.00	69.1
2.33	116	2.65	89.0	3.01	68.6
2.34	115	2.66	88.4	3.02	68.2
2.35	114	2.67	87.7	3.03	67.7

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าความแข็งแบบบริเนล (ASTM, 1998) (ต่อ)

Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number 500-kgf Load	Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number 500-kgf Load	Diameter of Indentation, mm	Brinell Hardness Number 500-kgf Load
3.04	67.3	3.36	54.8	3.68	45.4
3.05	66.8	3.37	54.4	3.69	45.1
3.06	66.4	3.38	54.1	3.7	44.9
3.07	65.9	3.39	53.8	3.71	44.6
3.08	65.5	3.4	53.4	3.72	44.4
3.09	65.0	3.41	53.1	3.73	44.1
3.1	64.6	3.42	52.8	3.74	43.9
3.11	64.2	3.43	52.5	3.75	43.6
3.12	63.8	3.44	52.2	3.76	43.4
3.13	63.3	3.45	51.8	3.77	43.1
3.14	62.9	3.46	51.5	3.78	42.9
3.15	62.5	3.47	51.2	3.79	42.7
3.16	62.1	3.48	50.9	3.8	42.4
3.17	61.7	3.49	50.6	3.81	42.2
3.18	61.3	3.5	50.3	3.82	42.0
3.19	60.9	3.51	50.0	3.83	41.7
3.2	60.5	3.52	49.7	3.84	41.5
3.21	60.1	3.53	49.4	3.85	41.3
3.22	59.8	3.54	49.2	3.86	41.1
3.23	59.4	3.55	48.9	3.87	40.9
3.24	59.0	3.56	48.6	3.88	40.6
3.25	58.6	3.57	48.3	3.89	40.4
3.26	58.3	3.58	48.0	3.9	40.2
3.27	57.9	3.59	47.7	3.91	40.0
3.28	57.5	3.6	47.5	3.92	39.8
3.29	57.2	3.61	47.2	3.93	39.6
3.3	56.8	3.62	46.9	3.94	39.4
3.31	56.5	3.63	46.7	3.95	39.1
3.32	56.1	3.64	46.4	3.96	38.9
3.33	55.8	3.65	46.1	3.97	38.7
3.34	55.4	3.66	45.9	3.98	38.5
3.35	55.1	3.67	45.6	3.99	38.3

ตารางที่ ง.1 แสดงสัมประสิทธิ์คอนแทรสต์

การทดลอง ร่วมปัจจัย	สัมประสิทธิ์คอนแทรสต์ (C _i)																												ความแข็ง (T _i)					
	A _L	A _Q	B _L	B _Q	C _L	C _Q	D _L	D _Q	A _L B _L	A _L B _Q	A _Q B _L	A _Q B _Q	A _L C _L	A _L C _Q	A _Q C _L	A _Q C _Q	A _L D _L	A _L D _Q	A _Q D _L	A _Q D _Q	B _L C _L	B _L C _Q	B _Q C _L	B _Q C _Q	B _L D _L	B _L D _Q	B _Q D _L	B _Q D _Q		C _L D _L	C _L D _Q	C _Q D _L	C _Q D _Q	
0000	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	59.75
0001	-1	1	-1	1	-1	1	0	-2	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0	2	0	-2	1	-1	-1	1	0	2	0	-2	0	2	0	-2	0	88.23
0002	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	83.95	
0010	-1	1	-1	1	0	-2	-1	1	1	-1	-1	1	0	2	0	-2	1	-1	-1	1	0	2	0	-2	1	-1	-1	1	0	0	2	-2	92.00	
0011	-1	1	-1	1	0	-2	0	-2	1	-1	-1	1	0	2	0	-2	0	2	0	-2	0	2	0	-2	0	2	0	-2	0	0	0	4	92.60	
0012	-1	1	-1	1	0	-2	1	1	1	-1	-1	1	0	2	0	-2	-1	-1	1	1	0	2	0	-2	-1	-1	1	1	0	0	-2	-2	80.90	
0020	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	94.23	
0021	-1	1	-1	1	1	1	0	-2	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0	2	0	-2	-1	-1	1	1	0	2	0	-2	0	-2	0	-2	0	92.40
0022	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	85.88	
0100	-1	1	0	-2	-1	1	-1	1	0	2	0	-2	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0	0	2	-2	0	0	2	-2	1	-1	-1	1	91.30	
0101	-1	1	0	-2	-1	1	0	-2	0	2	0	-2	1	-1	-1	1	0	2	0	-2	0	0	2	-2	0	0	0	4	0	2	0	-2	98.30	
0102	-1	1	0	-2	-1	1	1	1	0	2	0	-2	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0	0	2	-2	0	0	-2	-2	-1	-1	1	1	104.50	
0110	-1	1	0	-2	0	-2	-1	1	0	2	0	-2	0	2	0	-2	1	-1	-1	1	0	0	0	4	0	0	2	-2	0	0	2	-2	104.00	
0111	-1	1	0	-2	0	-2	0	-2	0	2	0	-2	0	2	0	-2	0	2	0	-2	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	0	4	105.50	
0112	-1	1	0	-2	0	-2	1	1	0	2	0	-2	0	2	0	-2	-1	-1	1	1	0	0	4	0	0	-2	-2	0	0	-2	-2	103.63		
0120	-1	1	0	-2	1	1	-1	1	0	2	0	-2	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0	0	-2	-2	0	0	2	-2	-1	1	-1	1	104.75	
0121	-1	1	0	-2	1	1	0	-2	0	2	0	-2	-1	-1	1	1	0	2	0	-2	0	0	-2	-2	0	0	0	4	0	-2	0	-2	105.00	
0122	-1	1	0	-2	1	1	1	1	0	2	0	-2	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0	0	-2	-2	0	0	-2	-2	1	1	1	1	96.70	
0200	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	91.85	
0201	-1	1	1	1	-1	1	0	-2	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	0	2	0	-2	-1	1	-1	1	0	-2	0	-2	0	2	0	-2	109.50	
0202	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	109.75	
0210	-1	1	1	1	0	-2	-1	1	-1	-1	1	1	0	2	0	-2	1	-1	-1	1	0	-2	0	-2	-1	1	-1	1	0	0	2	-2	109.25	
0211	-1	1	1	1	0	-2	0	-2	-1	-1	1	1	0	2	0	-2	0	2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	0	0	4	115.75	
0212	-1	1	1	1	0	-2	1	1	-1	-1	1	1	0	2	0	-2	-1	-1	1	1	0	-2	0	-2	1	1	1	1	0	0	-2	-2	111.00	

ตารางที่ ง.1 แสดงสัมประสิทธิ์คอนแทรสต์ (ต่อ)

การทดลอง ร่วมปัจจัย	สัมประสิทธิ์คอนแทรสต์ (C _j)																												ความแข็ง (T _j)						
	A _L	A _Q	B _L	B _Q	C _L	C _Q	D _L	D _Q	A _L B _L	A _L B _Q	A _Q B _L	A _Q B _Q	A _L C _L	A _L C _Q	A _Q C _L	A _Q C _Q	A _L D _L	A _L D _Q	A _Q D _L	A _Q D _Q	B _L C _L	B _L C _Q	B _Q C _L	B _Q C _Q	B _L D _L	B _L D _Q	B _Q D _L	B _Q D _Q		C _L D _L	C _L D _Q	C _Q D _L	C _Q D _Q		
0220	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	113.00	
0221	-1	1	1	1	1	1	0	-2	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0	2	0	-2	1	1	1	1	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	115.75
0222	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	111.50	
1000	0	-2	-1	1	-1	1	-1	1	0	0	2	-2	0	0	2	-2	0	0	2	-2	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	59.30	
1001	0	-2	-1	1	-1	1	0	-2	0	0	2	-2	0	0	2	-2	0	0	0	4	1	-1	-1	1	0	2	0	-2	0	2	0	0	-2	92.00	
1002	0	-2	-1	1	-1	1	1	1	0	0	2	-2	0	0	2	-2	0	0	-2	-2	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	84.43	
1010	0	-2	-1	1	0	-2	-1	1	0	0	2	-2	0	0	0	4	0	0	2	-2	0	2	0	-2	1	-1	-1	1	0	0	2	-2	0	96.10	
1011	0	-2	-1	1	0	-2	0	-2	0	0	2	-2	0	0	0	4	0	0	0	4	0	2	0	-2	0	2	0	-2	0	0	0	0	4	90.23	
1012	0	-2	-1	1	0	-2	1	1	0	0	2	-2	0	0	0	4	0	0	-2	-2	0	2	0	-2	-1	-1	1	1	0	0	-2	-2	0	87.38	
1020	0	-2	-1	1	1	1	-1	1	0	0	2	-2	0	0	-2	-2	0	0	2	-2	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	98.00	
1021	0	-2	-1	1	1	1	0	-2	0	0	2	-2	0	0	-2	-2	0	0	0	4	-1	-1	1	1	0	2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	96.30
1022	0	-2	-1	1	1	1	1	1	0	0	2	-2	0	0	-2	-2	0	0	-2	-2	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	86.05	
1100	0	-2	0	-2	-1	1	-1	1	0	0	0	4	0	0	2	-2	0	0	2	-2	0	0	2	-2	0	0	2	-2	1	-1	-1	1	1	84.45	
1101	0	-2	0	-2	-1	1	0	-2	0	0	0	4	0	0	2	-2	0	0	0	4	0	0	2	-2	0	0	0	4	0	2	0	-2	0	106.00	
1102	0	-2	0	-2	-1	1	1	1	0	0	0	4	0	0	2	-2	0	0	-2	-2	0	0	2	-2	0	0	-2	-2	-1	-1	1	1	1	99.20	
1110	0	-2	0	-2	0	-2	-1	1	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	2	-2	0	0	0	4	0	0	2	-2	0	0	2	-2	0	106.75	
1111	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	0	4	0	4	107.00
1112	0	-2	0	-2	0	-2	1	1	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	-2	-2	0	0	0	4	0	0	-2	-2	0	0	-2	-2	0	102.75	
1120	0	-2	0	-2	1	1	-1	1	0	0	0	4	0	0	-2	-2	0	0	2	-2	0	0	-2	-2	0	0	2	-2	-1	1	-1	1	1	110.00	
1121	0	-2	0	-2	1	1	0	-2	0	0	0	4	0	0	-2	-2	0	0	0	4	0	0	-2	-2	0	0	0	4	0	-2	0	-2	0	105.50	
1122	0	-2	0	-2	1	1	1	1	0	0	0	4	0	0	-2	-2	0	0	-2	-2	0	0	-2	-2	0	0	-2	-2	1	1	1	1	1	93.65	
1200	0	-2	1	1	-1	1	-1	1	0	0	-2	-2	0	0	2	-2	0	0	2	-2	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	97.98	
1201	0	-2	1	1	-1	1	0	-2	0	0	-2	-2	0	0	2	-2	0	0	0	4	-1	1	-1	1	0	-2	0	-2	0	2	0	-2	0	111.25	
1202	0	-2	1	1	-1	1	1	1	0	0	-2	-2	0	0	2	-2	0	0	-2	-2	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	116.50	

ตารางที่ ง.1 แสดงสัมประสิทธิ์คอนแทรสต์ (ต่อ)

การทดลอง ร่วมปัจจัย	สัมประสิทธิ์คอนแทรสต์ (C _j)																												ความแข็ง (T _j)				
	A _L	A _Q	B _L	B _Q	C _L	C _Q	D _L	D _Q	A _L B _L	A _L B _Q	A _Q B _L	A _Q B _Q	A _L C _L	A _L C _Q	A _Q C _L	A _Q C _Q	A _L D _L	A _L D _Q	A _Q D _L	A _Q D _Q	B _L C _L	B _L C _Q	B _Q C _L	B _Q C _Q	B _L D _L	B _L D _Q	B _Q D _L	B _Q D _Q		C _L D _L	C _L D _Q	C _Q D _L	C _Q D _Q
1210	0	-2	1	1	0	-2	-1	1	0	0	-2	-2	0	0	0	4	0	0	2	-2	0	-2	0	-2	-1	1	-1	1	0	0	2	-2	108.25
1211	0	-2	1	1	0	-2	0	-2	0	0	-2	-2	0	0	0	4	0	0	0	4	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	0	0	4	117.00
1212	0	-2	1	1	0	-2	1	1	0	0	-2	-2	0	0	0	4	0	0	-2	-2	0	-2	0	-2	1	1	1	1	0	0	-2	-2	116.25
1220	0	-2	1	1	1	1	-1	1	0	0	-2	-2	0	0	-2	-2	0	0	2	-2	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	113.25
1221	0	-2	1	1	1	1	0	-2	0	0	-2	-2	0	0	-2	-2	0	0	0	4	1	1	1	1	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	116.75
1222	0	-2	1	1	1	1	1	1	0	0	-2	-2	0	0	-2	-2	0	0	-2	-2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	103.00
2000	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	76.63
2001	1	1	-1	1	-1	1	0	-2	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	0	-2	0	-2	1	-1	-1	1	0	2	0	-2	0	2	0	-2	93.85
2002	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	83.65
2010	1	1	-1	1	0	-2	-1	1	-1	1	-1	1	0	-2	0	-2	-1	1	-1	1	0	2	0	-2	1	-1	-1	1	0	0	2	-2	93.48
2011	1	1	-1	1	0	-2	0	-2	-1	1	-1	1	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	2	0	-2	0	2	0	-2	0	0	0	4	94.40
2012	1	1	-1	1	0	-2	1	1	-1	1	-1	1	0	-2	0	-2	1	1	1	1	0	2	0	-2	-1	-1	1	1	0	0	-2	-2	85.43
2020	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	96.50
2021	1	1	-1	1	1	1	0	-2	-1	1	-1	1	1	1	1	1	0	-2	0	-2	-1	-1	1	1	0	2	0	-2	0	-2	0	-2	93.48
2022	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	87.88
2100	1	1	0	-2	-1	1	-1	1	0	-2	0	-2	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	0	0	2	-2	0	0	2	-2	1	-1	-1	1	87.35
2101	1	1	0	-2	-1	1	0	-2	0	-2	0	-2	-1	1	-1	1	0	-2	0	-2	0	0	2	-2	0	0	0	4	0	2	0	-2	104.25
2102	1	1	0	-2	-1	1	1	1	0	-2	0	-2	-1	1	-1	1	1	1	1	1	0	0	2	-2	0	0	-2	-2	-1	-1	1	1	102.25
2110	1	1	0	-2	0	-2	-1	1	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	-1	1	-1	1	0	0	0	4	0	0	2	-2	0	0	2	-2	107.75
2111	1	1	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	0	4	108.00
2112	1	1	0	-2	0	-2	1	1	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	1	1	1	1	0	0	0	4	0	0	-2	-2	0	0	-2	-2	106.75
2120	1	1	0	-2	1	1	-1	1	0	-2	0	-2	1	1	1	1	-1	1	-1	1	0	0	-2	-2	0	0	2	-2	-1	1	-1	1	110.00
2121	1	1	0	-2	1	1	0	-2	0	-2	0	-2	1	1	1	1	0	-2	0	-2	0	0	-2	-2	0	0	0	4	0	-2	0	-2	110.75
2122	1	1	0	-2	1	1	1	1	0	-2	0	-2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	-2	-2	0	0	-2	-2	1	1	1	1	98.03

ตารางที่ ๑.1 แสดงสัมประสิทธิ์คอนแทรสต์ (ต่อ)

การทดลอง ร่วมปัจจัย	สัมประสิทธิ์คอนแทรสต์ (C _i)																												ความแข็ง (T)					
	A _L	A _Q	B _L	B _Q	C _L	C _Q	D _L	D _Q	A _L B _L	A _L B _Q	A _Q B _L	A _Q B _Q	A _L C _L	A _L C _Q	A _Q C _L	A _Q C _Q	A _L D _L	A _L D _Q	A _Q D _L	A _Q D _Q	B _L C _L	B _L C _Q	B _Q C _L	B _Q C _Q	B _L D _L	B _L D _Q	B _Q D _L	B _Q D _Q		C _L D _L	C _L D _Q	C _Q D _L	C _Q D _Q	
2200	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	94.95	
2201	1	1	1	1	-1	1	0	-2	1	1	1	1	-1	1	-1	1	0	-2	0	-2	-1	1	-1	1	0	-2	0	-2	0	2	0	-2	113.75	
2202	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	114.00	
2210	1	1	1	1	0	-2	-1	1	1	1	1	1	0	-2	0	-2	-1	1	-1	1	0	-2	0	-2	-1	1	-1	1	0	0	2	-2	109.25	
2211	1	1	1	1	0	-2	0	-2	1	1	1	1	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	0	0	0	4	117.25
2212	1	1	1	1	0	-2	1	1	1	1	1	1	0	-2	0	-2	1	-1	1	1	0	-2	0	-2	1	1	1	1	0	0	-2	-2	115.50	
2220	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	113.50	
2221	1	1	1	1	1	1	0	-2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	-2	0	-2	1	1	1	1	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	119.25	
2222	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	112.75	



ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รัตนารณ์ วงษ์ทอง และ ขงยุทธ เสริมสุริอโนวัฒน์ (2553). การประเมินอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการป้อนเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 โดยใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียล 2⁴. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, หน้า 304



การประเมินอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการบ่มเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 โดย
การใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียล 2⁴

AN ASSESSMENT OF FACTORS AFFECTING ARTIFICIAL AGING OF 6061 –
ALUMINIUM ALLOY THROUGH 2⁴ FACTORIAL DESIGN

รัตนภรณ์ วงษ์ทอง* ยงยุทธ เสริมสุขธนวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

E-mail: chamada_w@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งหลังจากการบ่มเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยใช้แผนการทดลองทางสถิติแบบแฟคทอเรียล 2⁴ ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองมี 4 อย่าง คือ อุณหภูมิในการอบชุบ (solution treatment temperature), เวลาในการอบชุบ (solution time), อุณหภูมิในการบ่มเทียม (aging temperature) และเวลาในการบ่มเทียม (aging time) โดยที่ปัจจัยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ (fixed levels) ในช่วงของการใช้งานทางปฏิบัติ จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยหลักคืออุณหภูมิในการอบชุบ, อุณหภูมิและเวลาในการบ่มและปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการบ่มต่างก็มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและตัวแปรอื่นๆเป็นสมการเชิงเส้นตรงซึ่งมีประโยชน์ต่อการประมาณค่าความแข็งจากค่าของตัวแปรอิสระในขอบเขตของการทดลองและได้พบว่าโมเดลสามารถให้ค่าประมาณความแข็งที่มีความผิดพลาดไม่เกิน ± 8 BHN ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความผิดพลาด (errors or residuals) เป็นไปตามสมมุติฐานของการแจกแจงแบบปกติและมีการกระจายเป็นแบบเชิงสุ่มสม่ำเสมอทั้งนี้แต่ละระดับของปัจจัยหลัก

คำสำคัญ: บ่มเทียม, โลหะผสมอะลูมิเนียม 6061, ออกแบบการทดลอง

Abstract

The purpose of this experimental research was to investigate into the effects of the factors affecting the hardness of the 6061 aluminium alloy resulting from a process of artificial aging. A statistical design of experiment of the form 2⁴ factorial had been implemented in which the following 4 independent factors were used: temperatures and time durations for solution treatment and for aging. Two fixed levels of each factor were chosen from a recommended practical range. It was found that both the temperature and the time duration for solution treatment and for aging together with some of their interactions had a significant effect on the hardness of the alloy; and, a mathematical model for predicting hardness from the independent variables had been formulated. The model could give ± 8 BHN as 95% confidence limits to be attached to the estimated hardness value. The assumptions of normality and of randomness of the residuals had been tested satisfactorily.

Keywords: Artificial aging, Aluminium alloy 6061, Design of experiment

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการนำโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 มาใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีน้ำหนักเบา, มีความแข็งแรงปานกลาง, ขึ้นรูปได้ง่าย, ราคาไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่น ด้วยเหตุนี้อุตสาหกรรมหลาย

ประเภทจึงมีการนำโลหะผสมอะลูมิเนียมชนิดนี้มาใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เช่น อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เรือเดินสมุทรและเป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตสินค้าอื่นๆ (secondary industries) (Halil and suleyman, 2008)

กระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก (precipitation hardening) เป็นกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงให้กับโลหะผสมโดยเฉพาอย่างยิ่งโลหะผสมอะลูมิเนียมซึ่งกระบวนการอบชุบนี้แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ : อบอุ่นให้อ่อนนุ่ม (solution treatment), ชุบในน้ำ (quenching), และบ่ม (aging) ที่อุณหภูมิที่กำหนด สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ซึ่งมีส่วนผสมของแมกนีเซียมและซิลิคอน มักใช้อุณหภูมิอบก่อนชุบ 530°C (solution treatment temperature) (Harry, 1996) เพื่อทำให้เฟสละลายของแข็งเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous phase) จากนั้นจึงนำไปชุบในน้ำเพื่อให้ธาตุแมกนีเซียมและซิลิคอนตกค้างในสารละลายของแข็งในปริมาณที่มากกว่าจุดอิ่มตัวของอุณหภูมิที่ต่ำกว่าแล้วจึงนำไปอบบ่มเทียม (artificial aging) ให้เกิดการตกผลึก (precipitation) ของสารประกอบ Mg_2Si ในโครงสร้างพื้นฐานของอะลูมิเนียม ผลึกที่เกิดขึ้นนี้จะมีแรงเชื่อมประสานกับโครงสร้างพื้นฐาน (coherent precipitates) ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของแนวอะตอมส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอะตอมเป็นไปได้ยากเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก ผลก็คือ ทำให้คุณสมบัติเชิงกลสูงขึ้นโดยเฉพาะความแข็งแรงและความแข็งแรง

นอกจากความแข็งแรงและความแข็งแรงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอบก่อนชุบแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการบ่ม เพราะการตกผลึกของสารประกอบของแข็งใช้กลไกของการแพร่ (diffusion mechanism) แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไปหรือใช้เวลาบ่มนานเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงลดลงได้เช่นกันเนื่องจากแรงเชื่อมประสานระหว่างผลึกและโครงสร้างพื้นฐานจะหมดไป (non-coherent precipitates) (มนัส , 2543)

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันนี้ผลการศึกษเกี่ยวกับกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกของโลหะอะลูมิเนียมแพร่หลาย แต่ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาโดยใช้การทดลองแบบเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยตัวใดตัวหนึ่ง และคงที่ปัจจัยอื่นๆ (one-factor-at-a-time experiments) ซึ่งเป็นการทดลองที่ต้องทำการทดลองซ้ำจำนวนมากเพื่อความเที่ยงตรง จึงมีประสิทธิภาพต่ำและไม่สามารถประเมินอิทธิพลร่วมกันของปัจจัยหลาย ๆ ชนิดได้ นอกจากนี้การใช้หลักสถิติในการทดลองยังอยู่ในวงจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของการบ่มเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 เท่าที่พบ คืองานวิจัยของ Mahadevan และคณะ (Mahadevan, Raghukandan, Senthilvelan, Pai and Pillai, 2006) ซึ่ง

ใช้การทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล (2^3 factorial design) และพิจารณาปัจจัย 3 ชนิดในการทดลองคือ: เวลาในการอบก่อนชุบ (solution treatment time), อุณหภูมิในการบ่ม (aging temperature) และเวลาในการบ่ม (aging time) โดยคงที่อุณหภูมิก่อนชุบไว้ที่ 530°C และใช้ระดับการทดลองของแต่ละปัจจัย 2 ระดับ

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 เช่นกัน แต่เพิ่มปัจจัยในการทดลองอีก 1 ปัจจัยคือ อุณหภูมิอบก่อนชุบ (solution treatment temperature) ที่สามารถกระทำได้ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 500°C ถึง 595°C (Fathi, 1998) โดยใช้แผนการทดลองทางสถิติแบบ 2^4 แฟกทอเรียล เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงหลังจากการบ่มเทียมและสร้างโมเดลคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงและปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของสมการเชิงเส้นตรง

2. ระดับของปัจจัยและแผนการทดลอง

จากการศึกษาข้อแนะนำทางปฏิบัติของ ASTM (ASTM Standards, 1998) เกี่ยวกับการกำหนดเงื่อนไขปฏิบัติงานในกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก ทำให้สามารถกำหนดระดับการทดลอง 2 ระดับสำหรับแต่ละปัจจัยได้ตามตารางที่ 1 ซึ่งสามารถครอบคลุมค่าที่ ASTM แนะนำให้ใช้ทั้งหมด

ในสัณทียสุดท้ายของตารางได้แสดงสัญลักษณ์ของระดับต่ำและสูงของปัจจัยเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ไว้ด้วย

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		สัญลักษณ์
Solution time, (hr)	ต่ำ	1	1
	สูง	3	a
Solution temp, (°C)	ต่ำ	500	1
	สูง	540	b
Aging time, (hr)	ต่ำ	2	1
	สูง	14	c
Aging temp, (°C)	ต่ำ	175	1
	สูง	225	d

ตารางที่ 2 แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2⁴

aging time (C)	aging temp (D)	solution treatment time (A)							
		1				3			
		solution treatment temp(B)				solution treatment temp(B)			
		500		540		500		540	
		R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
2	175	⑦	..	..	..	②	..	..	..
	225	④	..	..	..	③	..	..	..
14	175	..	..	..	..	..	..	..	..
	225	..	..	..	..	..	..	..	..

ตารางที่ 2 เป็นแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2⁴ ซึ่งแสดงเงื่อนไขของการทดลอง (treatment combinations) ทั้งหมด 16 เงื่อนไข โดยที่แต่ละเงื่อนไขมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง (2 replicates) เพื่อเพิ่มความถูกต้องของค่าสังเกตและลดความผิดพลาดของการทดลอง (experimental errors)

สำหรับการดำเนินการดำเนินการทดลองทั้ง 32 เป็นไปแบบสุ่ม(randomization) เพื่อให้ผลกระทบของตัวแปรรบกวน (noise variable) มีโอกาสเฉลี่ยไปยังทุกค่าของข้อมูล และเพื่อให้ข้อมูลแต่ละค่าไม่ขึ้นต่อกัน (independence) (ปรามเมท, 2545) ตัวเลขในวงกลมที่แสดงเพียงบางส่วนในตารางคือ ลำดับการทดลอง เช่น การทดลองลำดับที่ 2 คือ ใช้อุณหภูมิอบก่อนชุบ 500°C, 3 ชั่วโมง และอบที่ 175°C, 2 ชั่วโมง เป็นต้น

ขั้นตอนของการทดลองสรุปได้ย่อดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานทดลอง (specimen) โดยการกลึงให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ยาว 25.4±0.01 มิลลิเมตร
2. อบชิ้นงานตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดและชุบในน้ำที่อุณหภูมิห้อง
3. บ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนดของแต่ละเงื่อนไขการทดลองแล้วชุบน้ำเพื่อหยุดกระบวนการตกผลึก
4. วัดค่าความแข็งด้วย Brinell ขนาดหัวกดลูกบอล 10 มิลลิเมตร โหลด 500 kgf

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในตารางที่ 3 แสดงค่าวัดความแข็งจากการทดลองทั้งหมด 32 ค่า ในสัณภูมิแรกแสดงเงื่อนไขของการทดสอบแต่ละครั้ง

ตารางที่ 3 ผลการทดลอง

Treatment combination	Replication 1 (BHN)	Replication 2 (BHN)
1	42.2	41.25
a	44.63	44.88
b	92.03	89.9
ab	85.25	88.9
c	91.45	84.25
ac	92.35	83.95
bc	106.5	108.25
abc	107.5	106.5
d	70.78	69.73
ad	73.15	77.6
bd	102.5	107.25
abd	106.5	110
cd	70.88	80.93
acd	78.43	74.85
bcd	104.75	107
abcd	91.3	97.83

การวิเคราะห์ข้อมูล ใช้โปรแกรม Minitab ประกอบในการวิเคราะห์และแสดงผล และตารางที่ 4 แสดงผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ 4 ตาราง ANOVA สำหรับการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2⁴

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F	P-Value
A	1	1.14	1.14	0.10	0.756
B	1	7523.04	7523.04	664.07	0.000*
C	1	1802.55	1802.55	158.11	0.000*
D	1	403.92	403.92	35.65	0.000*
AB	1	57.16	57.16	5.05	0.039
AC	1	41.78	41.78	3.69	0.073
AD	1	0.16	0.16	0.01	0.906
BC	1	662.21	662.21	58.45	0.000*
BD	1	26.44	26.44	2.33	0.146
CD	1	2165.64	2165.64	191.16	0.000*
ABC	1	2.06	2.06	0.18	0.676
ABD	1	4.80	4.80	0.42	0.524
ACD	1	49.28	49.28	4.35	0.053
BCD	1	140.99	140.99	12.45	0.003
ABCD	1	34.22	34.22	3.02	0.101
Error	16	181.26	11.33		
Total	31	13096.67			

หมายเหตุ: *ในตารางแสดงค่า P-Value ที่น้อยกว่า 0.001 เป็นศูนย์

เมื่อพิจารณาค่า P-Value ในคอลัมน์สุดท้ายในตารางที่ 4 แล้ว จะเห็นได้ว่ามีเพียงอิทธิพลหลัก หรือ main effect

ของปัจจัย A (solution treatment time) เท่านั้นที่ไม่ได้แสดงผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นส่วนใหญ่ปัจจัยร่วมระดับที่หนึ่ง (first order Interactions) ยกเว้น AD ต่างก็แสดงอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็ง ซึ่งอันที่จริงการทดลองโดยโดยใช้ระดับ 2 ระดับที่มีความแตกต่างระหว่างระดับมากเช่นนี้ มีโอกาสที่อิทธิพลของปัจจัยร่วมจะบดบังอิทธิพลของปัจจัยหลัก A หรือกล่าวได้ว่า ปัจจัย A มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง แต่อิทธิพลของ A ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น (คือ B และ C) เช่นกัน

สำหรับปัจจัยร่วมระดับที่สอง (second order interactions) มีถึง 2 ใน 4 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ระดับน้อยกว่า 10% ส่วนปัจจัยร่วมระดับ 3 แม้ว่าจะไม่มีนัยสำคัญอย่างเด่นชัดแต่ก็ใกล้เคียงกับ 10%

เพราะฉะนั้น จึงกล่าวได้ว่าอิทธิพลหลักของทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 อย่างมีนัยสำคัญ และอิทธิพลจะขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่นด้วย

เมื่อนำปัจจัยหลัก, ปัจจัยร่วมที่มีนัยสำคัญน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5% และปัจจัย A (เพื่อความสมบูรณ์ของปัจจัยหลัก) มาอยู่ในโมเดลประมาณค่าความแข็งจากการบ่มเทียม จะได้สมการของค่าประมาณความแข็ง (Y) ในรูปรหัสระดับคือ -1 และ +1 (coded levels) ดังนี้:-

$$Y = 85.4 - 0.188^*A + 15.3^*B + 7.51^*C + 3.55^*D - 1.34^*A^*B - 4.55^*B^*C - 8.23^*C^*D + 2.10^*B^*C^*D$$

และ สามารถคำนวณค่าสถิติ R^2 จากโมเดลได้เป็น

$$R^2 = SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} = 12755.5 / 13096.70 = 0.974$$

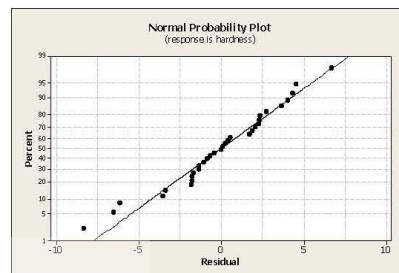
$$\text{และ } R^2_{\text{adj}} = 0.965$$

แต่ถ้าไม่รวมเทอม A อยู่ในโมเดล $R^2 = 0.974$ และ $R^2_{\text{adj}} = 0.966$ ซึ่งถือว่า ไม่แตกต่างจากโมเดลข้างบนอย่างเด่นชัดแต่อย่างใด ดังนั้นในที่นี้จึงใช้โมเดลที่มีเทอมของปัจจัยหลักอยู่ครบทุกปัจจัย

จะเห็นได้ว่าโมเดลจากผลของการทดลองนี้ สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 97.4% ของความแปรปรวนทั้งหมด

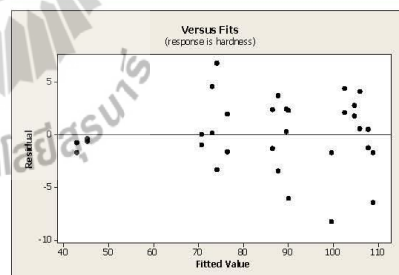
ในรูปที่ 1 แสดงการพล็อตค่าความผิดพลาดหรือ errors ของผลลัพธ์จากการทดลองด้วยวิธี Normal probability plot จะเห็นได้ว่าจุดพล็อตส่วนใหญ่เรียงอยู่ใน

แนวเส้นตรงแสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution)



รูปที่ 1 กราฟการกระจายตัวแบบปกติของค่าความผิดพลาด

ในรูปที่ 2 เป็น scatter diagram จากการพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาด (error หรือ residual) ของข้อมูลกับค่าประมาณความแข็งตามโมเดล เพื่อยืนยันความไม่ขึ้นต่อกันของค่าประมาณ ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่แล้วความผิดพลาดของค่าประมาณจะเป็นแบบสุ่มในช่วงไม่เกิน 10 BHN และจะมีเพียงที่ค่าประมาณความแข็งต่ำเท่านั้นที่ความผิดพลาดมีการกระจายน้อยกว่าที่ค่าประมาณความแข็งสูงๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่า coefficient of variation (CV) จะพบว่ามีความสูงที่สุดประมาณ 9% ที่ค่าประมาณต่ำสุด



รูปที่ 2 กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดกับค่าประมาณจากโมเดล (fitted value)

ส่วนรูปที่ 3 ถึง 6 แสดงการกระจายตัวของ errors ที่แต่ละระดับของแต่ละปัจจัย ซึ่งแม้ว่าจะแตกต่างกันบ้างที่แต่

ระดับของปัจจัย แต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้สำหรับการใช้ F-test

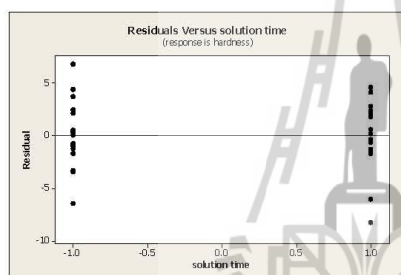
สำหรับรูปที่ 7 แสดงการกระจายตัวของ errors กับลำดับการทดลอง ซึ่งจุดพล็อตส่วนใหญ่จะเป็นไปแบบสุ่ม แสดงให้เห็นว่าค่าความแปรปรวนขึ้นอยู่กับลำดับการทดสอบ

การคำนวณช่วงความเชื่อมั่น 95% ของค่าประมาณความแปรปรวนใช้:

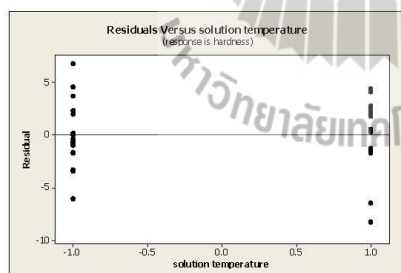
$$Y \pm t_{0.025,23} \sqrt{MSE}$$

ซึ่ง MSE ในที่นี้คำนวณจากการนำเอาผลรวม sum of square (SS) ของปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ (หรือไม่ปรากฏในโมเดล) กับ SS ของ error มาหารด้วย degree of freedom ซึ่งจะได้ช่วงความเชื่อมั่นเป็น:

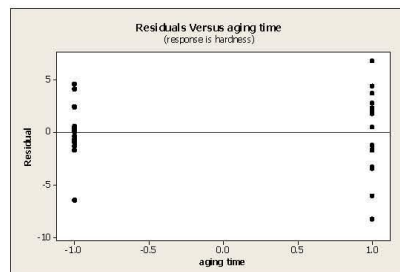
$$Y \pm 7.95 \approx Y \pm 8 \text{ BHN}$$



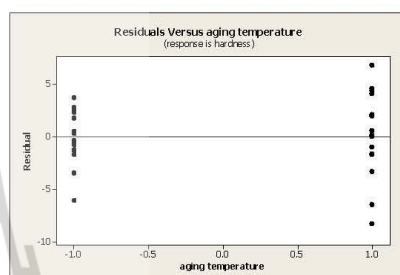
รูปที่ 3 กราฟระหว่างค่าความผิดพลาดกับเวลาอบชุบ



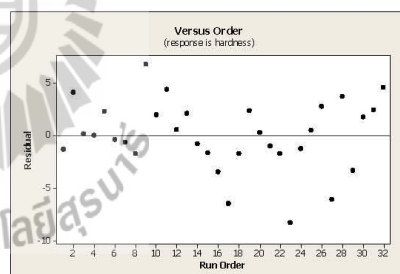
รูปที่ 4 กราฟระหว่างค่าความผิดพลาดกับอุณหภูมิอบชุบ



รูปที่ 5 กราฟระหว่างค่าความผิดพลาดกับเวลาบ่มเทียม



รูปที่ 6 กราฟระหว่างค่าความผิดพลาดกับอุณหภูมิบ่มเทียม



รูปที่ 7 กราฟค่าความผิดพลาดกับลำดับการทดลอง

6. สรุป

จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่พิจารณาทุกปัจจัยมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงของการบ่มเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 และแม้ว่าเวลาในการอบก่อนชุบ (solution treatment time) จะไม่แสดงอิทธิพลหลัก (main effect) อย่างเด่นชัด แต่ก็แสดงอิทธิพลร่วมอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิอบก่อนชุบ (solution treatment temperature) และ เวลาในการบ่ม (aging time)

เนื่องจากมีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยและ 3 ปัจจัยที่แสดงนัยสำคัญ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับปัจจัยทั้งหลาย จึงต้องมีตัวแปรที่เป็นปัจจัยร่วมอยู่ด้วย ซึ่งโมเดลคณิตศาสตร์ที่ได้จากแผนการทดลองนี้ สามารถทำนายค่าความแข็งแรงหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกด้วยความผิดพลาด ± 8 BHN ที่ความเชื่อมั่นที่ 95 %

บทความนี้เป็นารายงานผลของการทดลองเบื้องต้น (preliminary experiments) ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ และเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการทดลอง factorial experiment อย่างเต็มรูปแบบต่อไป

นิตินกรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัทเมืองทองอุตสาหกรรม อะลูมิเนียม จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์โดยการบริจาค โลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 สำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มนัส สกักรจินดา. 2543. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- American Society for Testing and Material. 1998. **Annual book of ASTM standards Vol 02.02.** Philadelphia. PA : ASTM.
- Fathi Habashi. 1998. **Alloys : preparation, properties, applications.** New York : Wiley-VCH.
- Halil Demir and suleyman Gunduz. 2008. **The effects aging on machinability of 6061 aluminium alloy.** Materials & Design. Volume 30. pp. 1480-1483.
- Harry Chandler. 1996. **Heat treater's guide : practices and procedures for nonferrous alloys.** OH: ASM International.

K. Mahadevan, K. Raghukandan, T. Senthilvelan, B.C.

Pai and U.T.S. Pillai. 2006. **Investigation on the influence of heat-treatment parameters on the hardness of AA6061-SiC_p composite.** Journal of Materials Processing Technology. Volume 171. pp. 314-318.

การประเมินอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการบ่มเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 โดย
การใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4

AN ASSESSMENT OF FACTORS AFFECTING ARTIFICIAL AGING OF 6061 –
ALUMINIUM ALLOY THROUGH 2^4 FACTORIAL DESIGN

รัตนภรณ์ วงษ์ทอง* ยงยุทธ เสริมสุขธนวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

E-mail: chamada_w@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งหลังจากการบ่มเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยใช้แผนการทดลองทางสถิติแบบแฟคทอเรียล 2^4 ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองมี 4 อย่าง คือ อุณหภูมิในการอบชุบ (solution treatment temperature), เวลาในการอบชุบ (solution time), อุณหภูมิในการบ่มเทียม (aging temperature) และเวลาในการบ่มเทียม (aging time) โดยที่ปัจจัยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ (fixed levels) ในช่วงของการใช้งานทางปฏิบัติ จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยหลักคืออุณหภูมิในการอบชุบ, อุณหภูมิและเวลาในการบ่มและปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการบ่มต่างก็มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและตัวแปรอื่นๆเป็นสมการเชิงเส้นตรงซึ่งมีประโยชน์ต่อการประมาณค่าความแข็งจากค่าของตัวแปรอิสระในขอบเขตของการทดลองและได้พบว่าโมเดลสามารถให้ค่าประมาณความแข็งที่มีความผิดพลาดไม่เกิน ± 8 BHN ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความผิดพลาด (errors or residuals) เป็นไปตามสมมุติฐานของการแจกแจงแบบปกติและมีการกระจายเป็นแบบเชิงสุ่มสม่ำเสมอในแต่ละระดับของปัจจัยหลัก

คำสำคัญ: บ่มเทียม, โลหะผสมอะลูมิเนียม 6061, ออกแบบการทดลอง

Abstract

The purpose of this experimental research was to investigate into the effects of the factors affecting the hardness of the 6061 aluminium alloy resulting from a process of artificial aging. A statistical design of experiment of the form 2^4 factorial had been implemented in which the following 4 independent factors were used: temperatures and time durations for solution treatment and for aging. Two fixed levels of each factor were chosen from a recommended practical range. It was found that both the temperature and the time duration for solution treatment and for aging together with some of their interactions had a significant effect on the hardness of the alloy; and, a mathematical model for predicting hardness from the independent variables had been formulated. The model could give ± 8 BHN as 95% confidence limits to be attached to the estimated hardness value. The assumptions of normality and of randomness of the residuals had been tested satisfactorily.

Keywords: Artificial aging, Aluminium alloy 6061, Design of experiment

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการนำโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 มาใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีน้ำหนักเบา, มีความแข็งแรงปานกลาง, ขึ้นรูปได้ง่าย, ราคาไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่น ด้วยเหตุนี้อุตสาหกรรมหลาย

ประเภทจึงมีการนำโลหะผสมอะลูมิเนียมชนิดนี้มาใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เช่น อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เรือเดินสมุทรและเป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตสินค้าอื่นๆ (secondary industries) (Halil and suleyman, 2008)

กระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก (precipitation hardening) เป็นกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงให้กับโลหะผสมโดยเฉพาอย่างยิ่งโลหะผสมอะลูมิเนียมซึ่งกระบวนการอบชุบนี้แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ : อบอุ่นให้อุณหภูมิอบ (solution treatment), ชุบในน้ำ (quenching), และบ่ม (aging) ที่อุณหภูมิที่กำหนด สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ซึ่งมีส่วนผสมของแมกนีเซียมและซิลิคอน มักใช้อุณหภูมิอบก่อนชุบ 530°C (solution treatment temperature) (Harry, 1996) เพื่อทำให้เฟสสารละลายของแข็งเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous phase) จากนั้นจึงนำไปชุบในน้ำเพื่อให้ธาตุแมกนีเซียมและซิลิคอนตกค้างในสารละลายของแข็งในปริมาณที่มากกว่าจุดอิ่มตัวของอุณหภูมิต่ำกว่าแล้วจึงนำไปอบบ่มเทียม (artificial aging) ให้เกิดการตกผลึก (precipitation) ของสารประกอบ Mg_2Si ในโครงสร้างพื้นฐานของอะลูมิเนียม ผลึกที่เกิดขึ้นนี้จะมีแรงเชื่อมประสานกับโครงสร้างพื้นฐาน (coherent precipitates) ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของแนวอะตอมส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอะตอมเป็นไปได้ยากเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก ผลก็คือ ทำให้คุณสมบัติเชิงกลสูงขึ้นโดยเฉพาะความแข็งแรงและความแข็งแรง

นอกจากความแข็งแรงและความแข็งแรงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอบก่อนชุบแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการบ่ม เพราะการตกผลึกของสารประกอบของแข็งใช้กลไกของการแพร่ (diffusion mechanism) แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไปหรือใช้เวลาบ่มนานเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงลดลงได้เช่นกันเนื่องจากแรงเชื่อมประสานระหว่างผลึกและโครงสร้างพื้นฐานจะหมดไป (non-coherent precipitates) (มนัส , 2543)

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันนี้ผลการศึกษเกี่ยวกับกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึกของโลหะอะลูมิเนียมแพร่หลาย แต่ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาโดยใช้การทดลองแบบเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยตัวใดตัวหนึ่งและคงที่ปัจจัยอื่นๆ (one-factor-at-a-time experiments) ซึ่งเป็นการทดลองที่ต้องทำการทดลองซ้ำจำนวนมากเพื่อความเที่ยงตรง จึงมีประสิทธิภาพต่ำและไม่สามารถประเมินอิทธิพลร่วมกันของปัจจัยหลาย ๆ ชนิดได้ นอกจากนี้การใช้หลักสถิติในการทดลองยังอยู่ในวงจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของการบ่มเทียมโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 เท่าที่พบ คืองานวิจัยของ Mahadevan และคณะ (Mahadevan, Raghukandan, Senthilvelan, Pai and Pillai, 2006) ซึ่ง

ใช้การทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล (2^3 factorial design) และพิจารณาปัจจัย 3 ชนิดในการทดลองคือ: เวลาในการอบก่อนชุบ (solution treatment time), อุณหภูมิในการบ่ม (aging temperature) และเวลาในการบ่ม (aging time) โดยคงที่อุณหภูมิก่อนชุบไว้ที่ 530°C และใช้ระดับการทดลองของแต่ละปัจจัย 2 ระดับ

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 เช่นกัน แต่เพิ่มปัจจัยในการทดลองอีก 1 ปัจจัยคือ อุณหภูมิอบก่อนชุบ (solution treatment temperature) ที่สามารถกระทำได้ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 500°C ถึง 595°C (Fathi, 1998) โดยใช้แผนการทดลองทางสถิติแบบ 2^4 แฟกทอเรียล เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงหลังจากการบ่มเทียมและสร้างโมเดลคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงและปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของสมการเชิงเส้นตรง

2. ระดับของปัจจัยและแผนการทดลอง

จากการศึกษาข้อแนะนำทางปฏิบัติของ ASTM (ASTM Standards, 1998) เกี่ยวกับการกำหนดเงื่อนไขปฏิบัติงานในกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก ทำให้สามารถกำหนดระดับการทดลอง 2 ระดับสำหรับแต่ละปัจจัยได้ตามตารางที่ 1 ซึ่งสามารถครอบคลุมค่าที่ ASTM แนะนำให้ใช้ทั้งหมด

ในสัณทียสุดท้ายของตารางได้แสดงสัญลักษณ์ของระดับต่ำและสูงของปัจจัยเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ไว้ด้วย

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		สัญลักษณ์
Solution time, (hr)	ต่ำ	1	1
	สูง	3	a
Solution temp, ($^{\circ}\text{C}$)	ต่ำ	500	1
	สูง	540	b
Aging time, (hr)	ต่ำ	2	1
	สูง	14	c
Aging temp, ($^{\circ}\text{C}$)	ต่ำ	175	1
	สูง	225	d

ตารางที่ 2 แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2⁴

aging time (C)	aging temp (D)	solution treatment time (A)							
		1				3			
		solution treatment temp(B)				solution treatment temp(B)			
		500		540		500		540	
		R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
2	175	⑦	..	..	..	②	..	..	..
	225	④	..	..	..	③	..	..	..
14	175	..	..	..	..	..	..	..	..
	225	..	..	..	..	..	..	..	..

ตารางที่ 2 เป็นแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2⁴ ซึ่งแสดงเงื่อนไขของการทดลอง (treatment combinations) ทั้งหมด 16 เงื่อนไข โดยที่แต่ละเงื่อนไขมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง (2 replicates) เพื่อเพิ่มความถูกต้องของค่าสังเกตและลดความผิดพลาดของการทดลอง (experimental errors)

สำหรับลำดับการดำเนินการทดลองทั้ง 32 เป็นไปแบบสุ่ม(randomization) เพื่อให้ผลกระทบของตัวแปรรบกวน (noise variable) มีโอกาสเฉลี่ยไปยังทุกค่าของข้อมูล และเพื่อให้ข้อมูลแต่ละค่าไม่ขึ้นต่อกัน (independence) (ปรามิต, 2545) ตัวเลขในวงกลมที่แสดงเพียงบางส่วนในตารางคือ ลำดับการทดลอง เช่น การทดลองลำดับที่ 2 คือ ใช้อุณหภูมิอบก่อนชุบ 500°C, 3 ชั่วโมง และอบที่ 175°C, 2 ชั่วโมง เป็นต้น

ขั้นตอนของการทดลองสรุปได้ย่อๆดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานทดลอง (specimen) โดยการกลึงให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ยาว 25.4±0.01 มิลลิเมตร
2. อบชิ้นงานตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดและชุบในน้ำที่อุณหภูมิห้อง
3. บ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนดของแต่ละเงื่อนไขการทดลองแล้วชุบน้ำเพื่อหยุดกระบวนการตกผลึก
4. วัดค่าความแข็งด้วย Brinell ขนาดหัวกดลูกบอล 10 มิลลิเมตร โหลด 500 kgf

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในตารางที่ 3 แสดงค่าวัดความแข็งจากการทดลองทั้งหมด 32 ค่า ในสัณภูมิแรกแสดงเงื่อนไขของการทดสอบแต่ละครั้ง

ตารางที่ 3 ผลการทดลอง

Treatment combination	Replication 1 (BHN)	Replication 2 (BHN)
1	42.2	41.25
a	44.63	44.88
b	92.03	89.9
ab	85.25	88.9
c	91.45	84.25
ac	92.35	83.95
bc	106.5	108.25
abc	107.5	106.5
d	70.78	69.73
ad	73.15	77.6
bd	102.5	107.25
abd	106.5	110
cd	70.88	80.93
acd	78.43	74.85
bcd	104.75	107
abcd	91.3	97.83

การวิเคราะห์ข้อมูล ใช้โปรแกรม Minitab ประกอบในการวิเคราะห์และแสดงผล และตารางที่ 4 แสดงผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ 4 ตาราง ANOVA สำหรับการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2⁴

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F	P-Value
A	1	1.14	1.14	0.10	0.756
B	1	7523.04	7523.04	664.07	0.000*
C	1	1802.55	1802.55	158.11	0.000*
D	1	403.92	403.92	35.65	0.000*
AB	1	57.16	57.16	5.05	0.039
AC	1	41.78	41.78	3.69	0.073
AD	1	0.16	0.16	0.01	0.906
BC	1	662.21	662.21	58.45	0.000*
BD	1	26.44	26.44	2.33	0.146
CD	1	2165.64	2165.64	191.16	0.000*
ABC	1	2.06	2.06	0.18	0.676
ABD	1	4.80	4.80	0.42	0.524
ACD	1	49.28	49.28	4.35	0.053
BCD	1	140.99	140.99	12.45	0.003
ABCD	1	34.22	34.22	3.02	0.101
Error	16	181.26	11.33		
Total	31	13096.67			

หมายเหตุ: *ในตารางแสดงค่า P-Value ที่น้อยกว่า 0.001 เป็นศูนย์

เมื่อพิจารณาค่า P-Value ในคอลัมน์สุดท้ายในตารางที่ 4 แล้ว จะเห็นได้ว่ามีเพียงอิทธิพลหลัก หรือ main effect

ของปัจจัย A (solution treatment time) เท่านั้นที่ไม่ได้แสดงผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นส่วนใหญ่ปัจจัยร่วมระดับที่หนึ่ง (first order Interactions) ยกเว้น AD ต่างก็แสดงอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็ง ซึ่งอันที่จริงการทดลองโดยโดยใช้ระดับ 2 ระดับที่มีความแตกต่างระหว่างระดับมากเช่นนี้ มีโอกาสที่อิทธิพลของปัจจัยร่วมจะบดบังอิทธิพลของปัจจัยหลัก A หรือกล่าวได้ว่า ปัจจัย A มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง แต่อิทธิพลของ A ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น (คือ B และ C) เช่นกัน

สำหรับปัจจัยร่วมระดับที่สอง(second order interactions) มีถึง 2 ใน 4 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ระดับน้อยกว่า 10% ส่วนปัจจัยร่วมระดับ 3 แม้ว่าจะไม่มีนัยสำคัญอย่างเด่นชัดแต่ก็ใกล้เคียงกับ 10%

เพราะฉะนั้น จึงกล่าวได้ว่าอิทธิพลหลักของทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 อย่างมีนัยสำคัญ และอิทธิพลจะขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่นด้วย

เมื่อนำปัจจัยหลัก, ปัจจัยร่วมที่มีนัยสำคัญน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5% และปัจจัย A (เพื่อความสมบูรณ์ของปัจจัยหลัก) มาอยู่ในโมเดลประมาณค่าความแข็งจากการบ่มเทียมน จะได้สมการของค่าประมาณความแข็ง (Y) ในรูปรหัสระดับคือ -1 และ +1 (coded levels) ดังนี้:-

$$Y = 85.4 - 0.188^{\circ}A + 15.3^{\circ}B + 7.51^{\circ}C + 3.55^{\circ}D - 1.34^{\circ}A^{\circ}B - 4.55^{\circ}B^{\circ}C - 8.23^{\circ}C^{\circ}D + 2.10^{\circ}B^{\circ}C^{\circ}D$$

และ สามารถคำนวณค่าสถิติ R^2 จากโมเดลได้เป็น

$$R^2 = SS_{\text{model}} / SS_{\text{Total}} \\ = 12755.5 / 13096.70 = 0.974$$

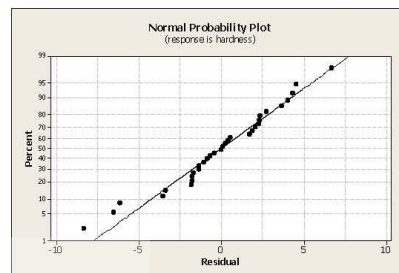
$$\text{และ } R^2_{\text{adj}} = 0.965$$

แต่ถ้าไม่รวมเทอม A อยู่ในโมเดล $R^2 = 0.974$ และ $R^2_{\text{adj}} = 0.966$ ซึ่งถือว่า ไม่แตกต่างจากโมเดลข้างบนอย่างเด่นชัดแต่อย่างใด ดังนั้นในที่นี้จึงใช้โมเดลที่มีเทอมของปัจจัยหลักอยู่ครบทุกปัจจัย

จะเห็นได้ว่าโมเดลจากผลของการทดลองนี้ สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 97.4% ของความแปรปรวนทั้งหมด

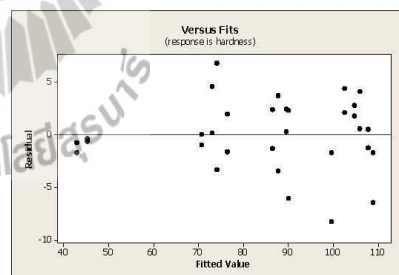
ในรูปที่ 1 แสดงการพล็อตค่าความผิดพลาดหรือ errors ของผลลัพธ์จากการทดลองด้วยวิธี Normal probability plot จะเห็นได้ว่าจุดพล็อตส่วนใหญ่เรียงอยู่ใน

แนวเส้นตรงแสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution)



รูปที่ 1 กราฟการกระจายตัวแบบปกติของค่าความผิดพลาด

ในรูปที่ 2 เป็น scatter diagram จากการพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาด (error หรือ residual) ของข้อมูลกับค่าประมาณความแข็งตามโมเดล เพื่อยืนยันความไม่ขึ้นต่อกันของค่าประมาณ ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่แล้วความผิดพลาดของค่าประมาณจะเป็นแบบสุ่มในช่วงไม่เกิน 10 BHN และจะมีเพียงที่ค่าประมาณความแข็งต่ำเท่านั้นที่ความผิดพลาดมีการกระจายน้อยกว่าที่ค่าประมาณความแข็งสูงๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่า coefficient of variation (CV) จะพบว่ามีความสูงที่สุดประมาณ 9% ที่ค่าประมาณต่ำสุด



รูปที่ 2 กราฟพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาดกับค่าประมาณจากโมเดล (fitted value)

ส่วนรูปที่ 3 ถึง 6 แสดงการกระจายตัวของ errors ที่แต่ละระดับของแต่ละปัจจัย ซึ่งแม้ว่าจะแตกต่างกันบ้างที่แต่

ระดับของปัจจัย แต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้สำหรับการใช้ F-test

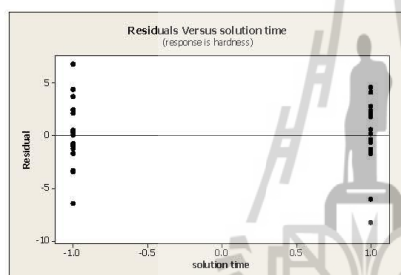
สำหรับรูปที่ 7 แสดงการกระจายตัวของ errors กับลำดับการทดลอง ซึ่งจุดพล็อตส่วนใหญ่จะเป็นไปแบบสุ่ม แสดงให้เห็นว่าค่าความแปรปรวนขึ้นอยู่กับลำดับการทดสอบ

การคำนวณช่วงความเชื่อมั่น 95% ของค่าประมาณความแปรปรวนใช้:

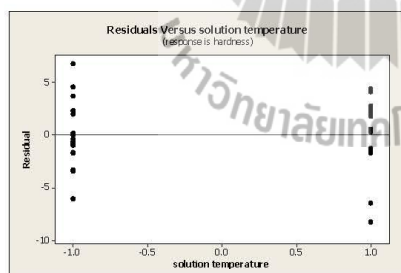
$$\bar{Y} \pm t_{0.025,23} \sqrt{MSE}$$

ซึ่ง MSE ในที่นี้คำนวณจากการนำเอาผลรวม sum of square (SS) ของปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ (หรือไม่ปรากฏในโมเดล) กับ SS ของ error มาหารด้วย degree of freedom ซึ่งจะได้ช่วงความเชื่อมั่นเป็น:

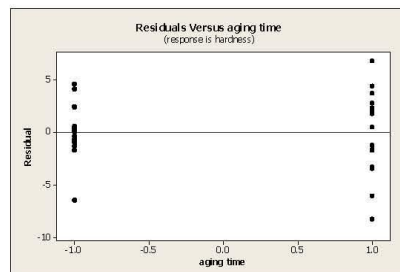
$$\bar{Y} \pm 7.95 \approx \bar{Y} \pm 8 \text{ BHN}$$



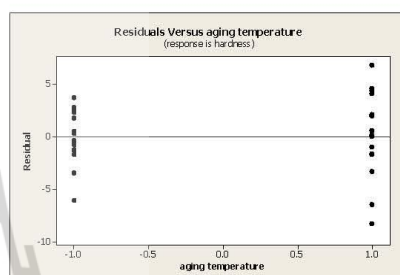
รูปที่ 3 กราฟระหว่างค่าความผิดพลาดกับเวลาอบชุบ



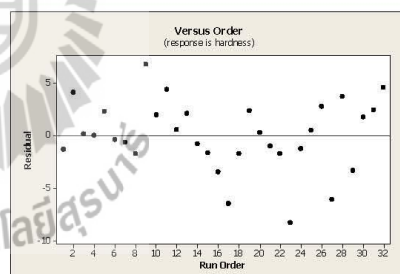
รูปที่ 4 กราฟระหว่างค่าความผิดพลาดกับอุณหภูมิอบชุบ



รูปที่ 5 กราฟระหว่างค่าความผิดพลาดกับเวลาบ่มเทียม



รูปที่ 6 กราฟระหว่างค่าความผิดพลาดกับอุณหภูมิบ่มเทียม



รูปที่ 7 กราฟค่าความผิดพลาดกับลำดับการทดลอง

6. สรุป

จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่พิจารณาทุกปัจจัยมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงของการบ่มเทียมนโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 และแม้ว่าเวลาในการอบก่อนชุบ (solution treatment time) จะไม่แสดงอิทธิพลหลัก (main effect) อย่างเด่นชัด แต่ก็แสดงอิทธิพลร่วมอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิอบก่อนชุบ (solution treatment temperature) และ เวลาในการบ่ม (aging time)

เนื่องจากมีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยและ 3 ปัจจัยที่แสดงนัยสำคัญ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับปัจจัยทั้งหลาย จึงต้องมีตัวแปรที่เป็นปัจจัยร่วมอยู่ด้วย ซึ่งโมเดลคณิตศาสตร์ที่ได้จากแผนการทดลองนี้ สามารถทำนายค่าความแข็งแรงหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกด้วยความผิดพลาด ± 8 BHN ที่ความเชื่อมั่นที่ 95 %

บทความนี้เป็นารายงานผลของการทดลองเบื้องต้น (preliminary experiments) ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ และเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการทดลอง factorial experiment อย่างเต็มรูปแบบต่อไป

นิตินกรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัทเมืองทองอุตสาหกรรม อะลูมิเนียม จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์โดยการบริจาค โลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 สำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มนัส สกักรจินดา. 2543. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- American Society for Testing and Material. 1998. **Annual book of ASTM standards Vol 02.02.** Philadelphia. PA : ASTM.
- Fathi Habashi. 1998. **Alloys : preparation, properties, applications.** New York : Wiley-VCH.
- Halil Demir and suleyman Gunduz. 2008. **The effects aging on machinability of 6061 aluminium alloy.** Materials & Design. Volume 30. pp. 1480-1483.
- Harry Chandler. 1996. **Heat treater's guide : practices and procedures for nonferrous alloys.** OH: ASM International.

K. Mahadevan, K. Raghukandan, T. Senthilvelan, B.C.

Pai and U.T.S. Pillai. 2006. **Investigation on the influence of heat-treatment parameters on the hardness of AA6061-SiC_p composite.** Journal of Materials Processing Technology. Volume 171. pp. 314-318.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวรัตนภรณ์ วงษ์ทอง เกิดเมื่อวันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2527 ที่บ้านเพ็ญ จังหวัดอุดรธานี เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านเพ็ญ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนยางทองพิทยาคม จังหวัดอุดรธานี เมื่อปี พ.ศ. 2544 ภายหลังได้ศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปีการศึกษา พ.ศ. 2545 ในสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2549 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานตำแหน่งวิศวกรประกันคุณภาพ บริษัท ไทยอีททริทเม้นท์ จังหวัดสมุทรปราการ โดยรับผิดชอบการประกันคุณภาพในกระบวนการชุบแข็ง

ปี พ.ศ. 2550 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้นำเสนอบทความทางวิชาการ เรื่องการประเมินอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการบ่มเทียมนโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 โดยใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4 ในปี พ.ศ. 2553 ที่มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

