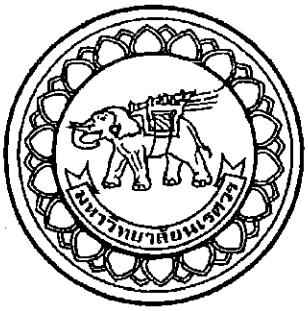


การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่มีผลกระทบต่อความแข็งหลังผ่านการตกผลึกใหม่ของทองเหลือง

APPLICATION OF EXPERIMENTAL DESIGN TO STUDY THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND TIME ON THE HARDNESS OF BRASS WITH RECRYSTALLIZATION

นางสาวรักษิณา พูลทวี รหัส 49361546

นางสาวอรุยา อริยโสภารักษ์ รหัส 49362444

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ...../...../.....
เลขทะเบียน 1506724
เลขเรียกหนังสือ ปร. ส 2552 ก
มหาวิทยาลัยนเรศวร 2552

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2552

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่มีผลกระทบต่อความแข็งหลังผ่านการตกผลึกใหม่ของทองเหลือง
ผู้ดำเนินโครงงาน	นางสาวรักษิณา พูลทวี รหัส 49361546
	นางสาวอรุยา อริยโสภารักษ์ รหัส 49362444
ที่ปรึกษาโครงงาน	อาจารย์กานต์ ลี่วัฒนายิ่งยง
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2552

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

.....ที่ปรึกษาโครงงาน
(อาจารย์กานต์ ลี่วัฒนายิ่งยง)

.....ที่ปรึกษาร่วมโครงงาน
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.อภิชัย ฤตวิรุฬห์)

.....กรรมการ
(ผศ.ศิษฎา ศิมารักษ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์อาภาภรณ์ จันทร์ปีรักษ์)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่มีผลกระทบต่อความแข็งหลังผ่านการตกผลึกใหม่ของทองเหลือง
ผู้ดำเนินโครงงาน	นางสาวรักษิณา พูลทวี รหัส 49361546
	นางสาวอรุยา อริยโสภารักษ์ รหัส 49362444
ที่ปรึกษาโครงงาน	อาจารย์กานต์ ลี่วัฒนายิ่งยง
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนที่มีต่อค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็นที่ 10% และ 20% Cold Work โดยทดสอบชิ้นงานที่เวลา 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 นาที และอุณหภูมิ 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส นำผลที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้องเหมาะสมของข้อมูล โดยตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ ตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อค่าความแข็งของทองเหลือง และหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อค่าความแข็งของทองเหลืองหลังผ่านการตกผลึกใหม่

ผลจากการศึกษาพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ และเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งลดลง โดยในการทำการทดลองของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็นที่ 10% และ 20% Cold Work มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ให้ผลว่าอุณหภูมิและเวลามีผลต่อค่าความแข็งของทองเหลือง และการวิเคราะห์การถดถอย (REGRESSION) จะได้สมการถดถอย ค่าความแข็งพยากรณ์ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อค่าความแข็งของทองเหลือง เมื่อนำข้อมูลมาทดสอบสมมติฐาน (t-test) พบว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนไปมีผลต่อค่าความแข็งของทองเหลืองหลังผ่านการตกผลึกใหม่ และค่าความแข็งพยากรณ์ที่ได้จากสมการถดถอยมีความน่าเชื่อถือ จากการทำโครงงานควรทำการศึกษาข้อมูลต่างๆเพิ่มเติม เช่น การรีดเย็นที่ %Cold Work อื่นๆ ทำการวัดอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ ทำการศึกษาโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ เช่น SPSS, MINITAB และศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของทองเหลือง เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอแสดงความขอบคุณบุคคล หน่วยงาน และสถาบันที่มีส่วนสำคัญที่ทำให้การจัดทำโครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ทำให้ได้มีโอกาสในการดำเนินโครงงานนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์กานต์ ลี่วัฒนายิ่งยง อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ ผศ.ดร.เกตุจันทร์ จำปาไชยศรี และครูช่างทุกท่าน ที่ได้ให้แนวความคิด อธิบาย ให้คำแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินโครงงาน และให้โอกาสที่ดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และเพื่อนๆ ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่คณะผู้ดำเนินโครงงานตลอดมา ผู้ดำเนินโครงงานจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้ดำเนินโครงงานวิศวกรรม
นางสาวรักษิณา พูลทวี
นางสาวอรุยา อริยโสภารักษ์
มีนาคม 2553

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์.....ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....ข
กิตติกรรมประกาศ.....ค
สารบัญ.....ง
สารบัญตาราง.....ฉ
สารบัญรูป.....ช

บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....2
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย.....2
1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย.....2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย.....2
1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน (Gantt Chart).....3

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น.....4
2.1 ทองเหลือง.....4
2.2 การขึ้นรูปแบบเย็น(Cold Working).....6
2.3 การรีดเย็น(Cold Rolling).....7
2.4 การตกผลึกใหม่ของทองเหลือง.....8
2.5 การออกแบบการทดลองแบบสองปัจจัย.....11
2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....13
2.7 การวิเคราะห์การถดถอย.....18
2.8 การทดสอบความแข็งโลหะตามร็อกเวล.....21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล.....25
3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับทองเหลือง.....25
3.2 การออกแบบการทดลอง.....25
3.3 ดำเนินการทดลอง.....29
3.4 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ.....33
3.5 สรุปผลการทดลอง.....33

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....33
4.1 ผลการทดสอบความแข็ง.....33
4.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลา.....35
4.3 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ..... 47

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....49
5.1 สรุปผล.....49
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 50

เอกสารอ้างอิง.....51

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน....3

2.1 จำนวนการทดลองเท่ากับ ab ในแต่ละครั้ง....11

2.2 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลกรณี 2 ตัวแปร....11

2.3 ค่าองศาเสรี....16

2.4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA)....17

3.1 จำนวนชิ้นงานทดสอบสำหรับการรีดที่ 10% Cold Work....27

3.2 จำนวนชิ้นงานทดสอบสำหรับการรีดที่ 20% Cold Work....28

3.3 ตารางบันทึกค่า....31

4.1 ตารางแสดงค่าความแข็งที่ 10% Cold Work....33

4.2 ตารางแสดงค่าความแข็งที่ 20% Cold Work....34

4.3 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น 10% Cold Work....41

4.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น 20% Cold Work....42

4.5 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น10% Cold Work....43

4.6 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น20% Cold Work...46

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 Cu-Zn Phase Diagram....5

2.2 การรีดเย็น (Cold Rolling) 8

2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิอบอ่อนต่อความแข็งแรงสูงสุดและความเหนียวของทองเหลือง และการโตของเกรน....10

2.4 ตัวอย่างการกระจายแบบปกติของข้อมูล....14

2.5 การจัดแบ่ง Regression Analysis ตามชนิดของข้อมูลที่ต้องการจะวิเคราะห์....18

2.6 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ $S_{Y.X}$>0....20

2.7 สภาพผิวชิ้นทดสอบที่กดด้วยบอลเหล็กกล้า (ร็อกเวลสเกล B, E, F, G, H หรือ K) 22

3.1 การกำหนดการกดจุดวัดความแข็ง....26

3.2 หน้าตัดงานทองเหลืองก่อนทำการรีดเย็น....28

3.3 เตรียมชิ้นงานโดยใช้เครื่องไส....29

3.4 ชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น....29

3.5 การตัดชิ้นงาน....29

3.6 การอบชิ้นงาน....30

3.7 การขัดชิ้นงาน....30

3.8 การวัดชิ้นงาน....30

4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 10% Cold Work....35

4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 20% Cold Work....36

4.3 แสดงค่า Normal Probability Plot for Hardness ของชิ้นงานที่ 10% Cold Work....38

4.4 แสดงค่า Normal Probability Plot for Hardness ของชิ้นงานที่ 20% Cold Work....38

4.5 แสดงค่าส่วนตกค้างกับจำนวนข้อมูลของชิ้นงานที่ 10% Cold Work....39

4.6 แสดงค่าส่วนตกค้างกับจำนวนข้อมูลของชิ้นงานที่ 20% Cold Work....39

4.7 แสดงค่าส่วนตกค้างกับค่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ 10% Cold Work 40

4.8 แสดงค่าส่วนตกค้างกับค่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ 20% Cold Work 40

4.9 กราฟแสดงค่าความแข็งจากการพยากรณ์ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น 10% Cold Work....44

4.10 กราฟแสดงค่าความแข็งจากการพยากรณ์ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น 10% Cold Work....47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

ทองเหลืองเป็นโลหะผสมที่มีทองแดงและสังกะสีเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งมีปริมาณของสังกะสีแปรเปลี่ยนไประหว่าง 5 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้ทองเหลืองที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันไป และมีคุณสมบัติในการต้านทานการเกิดสนิมได้ดี

การรีดเย็น เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งโลหะจะมีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ปกติ ดังนั้นจะต้องใช้กำลังในการขึ้นรูปสูงมากเพื่อที่จะทำให้เกิดความเค้นในโลหะเลยจุด Elastic limit หรือ Yield point ถ้าปล่อยหรือลดแรงที่กดออก โลหะก็จะคืนกลับเข้ารูปเดิมโดยไม่เกิดการแปรรูป การรีดเย็นเป็นการรีดเพื่อให้ได้โลหะที่มีขนาดแน่นอนผิวเรียบเป็นมัน การรีดเย็นทำให้ความเครียดของชิ้นงานเพิ่มขึ้น จำนวนของขอบเกรนเพิ่มขึ้น จำนวนของการเกิดตำหนิแบบเส้นเพิ่มขึ้น และผลของการรีดเย็นนี้จะทำให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ซึ่งความแข็งจากการรีดเย็นเรียกว่า ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) โดยความเค้นตกค้างจะส่งผลกระทบต่อการขึ้นรูปหรือการใช้งานในขั้นตอนต่อไป จึงจำเป็นต้องมีการลดความเค้นตกค้างเพื่อเพิ่มความเหนียวมิเช่นนั้นจะทำให้เกิดการแตกแบบเปราะระหว่างการใช้งานและการขึ้นรูป

การลดความเค้นตกค้างสามารถทำได้โดยการอบ (ให้ความร้อน) เรียกว่า Annealing ซึ่งเป็นการอบลดความแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ (Recrystallization Temperature)

การตกผลึกใหม่ (Recrystallization) คือ การเพิ่มอุณหภูมิในช่วงการคืนตัวให้สูงขึ้นโดยจะทำให้เกิดผลึกใหม่และผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นนี้จะมีส่วนผสม โครงสร้างผลึกและแลททิซเหมือนกับผลึกเดิมก่อนการเปลี่ยนรูปผลึกใหม่จะเกิดขึ้นบริเวณที่เกรนถูกกระทำการเปลี่ยนรูปไปมากที่สุด อีกนัยหนึ่งผลึกใหม่จะเกิดบริเวณที่มีความเครียด หรือพลังงานภายในสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งปกติจะเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนและตรงระนาบเลื่อน (Slip Plane) เกรนใหม่จะเกิดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยจะไปแทนที่เกรนเดิมที่มีความเครียดหลังผ่านการเปลี่ยนรูปมา เกรนใหม่ที่เกิดขึ้นมีลักษณะค่อนข้างสมมาตรกัน (หรือเป็นรูปหลายเหลี่ยมที่ค่อนข้างกลม คือ ไม่แบน ลีบยาว) และเป็นเกรนที่ไม่มีความเครียดตกค้างอยู่เลย การตกผลึกใหม่นี้จะสิ้นสุดลงเมื่อโลหะเกิดเกรนใหม่สมบูรณ์แล้ว

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกผลึกใหม่ในโลหะและโลหะผสมคืออุณหภูมิ เวลา ปริมาณเริ่มต้นของการเปลี่ยนรูปของโลหะ และขนาดของเกรนเริ่มต้นและส่วนประกอบของโลหะหรือโลหะผสม ในการเกิดผลึกใหม่นั้นจำเป็นต้องใช้เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยอุณหภูมินี้เรียกว่าอุณหภูมิของการเกิดผลึกใหม่ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่โลหะตกผลึกใหม่หมดภายในเวลาหนึ่งชั่วโมง จะเห็นว่าอุณหภูมิและเวลาเป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อการตกผลึกใหม่ของทองเหลืองและสามารถควบคุมและกำหนดค่าได้ ดังนั้นคณะผู้จัดทำโครงงานจึงได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อการตกผลึกใหม่ของทองเหลือง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการตกผลึกใหม่ของทองเหลือง

1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลา ที่มีผลต่อความแข็งของทองเหลืองหลังผ่านการตกผลึกใหม่

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

ผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อความแข็งของทองเหลืองหลังผ่านการตกผลึกใหม่

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลา ที่มีผลต่อความแข็งของทองเหลืองหลังผ่านการตกผลึกใหม่

1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 การรีดเย็นทำที่ 10% และ 20% Cold Work

1.5.2 อบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส

1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

กรกฎาคม พ.ศ.2552 – มกราคม พ.ศ.2553

1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน (Gantt Chart)

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ลำดับ	การดำเนินงาน	ก.ค.		ส.ค.		ก.ย.		ต.ค.		พ.ย.		ธ.ค.		ม.ค.	
1.	ศึกษาและรวบรวมข้อมูล	■	■	■	■										
2.	ออกแบบการทดลอง					■	■	■							
3.	ดำเนินการทดลอง								■	■	■				
4.	วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ											■	■		
5.	สรุปผล													■	■

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 ทองเหลือง

ทองเหลือง (Brass) เป็นโลหะผสมระหว่างทองแดง (Cu) กับสังกะสี (Zn) เป็นส่วนประกอบหลัก โดยสังกะสีสามารถละลายได้ในทองแดงในรูปของสารละลายของแข็ง(Solid Solution) ความแข็งและความยืดหยุ่นจะเพิ่มตามปริมาณสังกะสี ซึ่งปริมาณของสังกะสีแปรเปลี่ยนไประหว่างร้อยละ 5-45 ทำให้ได้ทองเหลืองที่มีสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันไป ทองเหลืองที่ใช้งานในทางวิศวกรรมจะมีปริมาณสังกะสีไม่เกินร้อยละ 40 เนื่องจากหากมีสังกะสีมากเกินไปจะทำให้ทองเหลืองมีความเปราะมาก ขาดความเหนียว จึงทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ตามความต้องการ

ทองเหลืองแบ่งกลุ่มย่อยออกไปตามลักษณะโครงสร้างจุลภาคเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

ก. ทองเหลืองแอลฟา ผสมสังกะสีสูงถึง ร้อยละ 36 ทองเหลืองประเภทนี้อ่อน สามารถตีแผ่หรือทำเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย เหมาะสำหรับทำภาชนะ และเครื่องใช้ต่างๆ

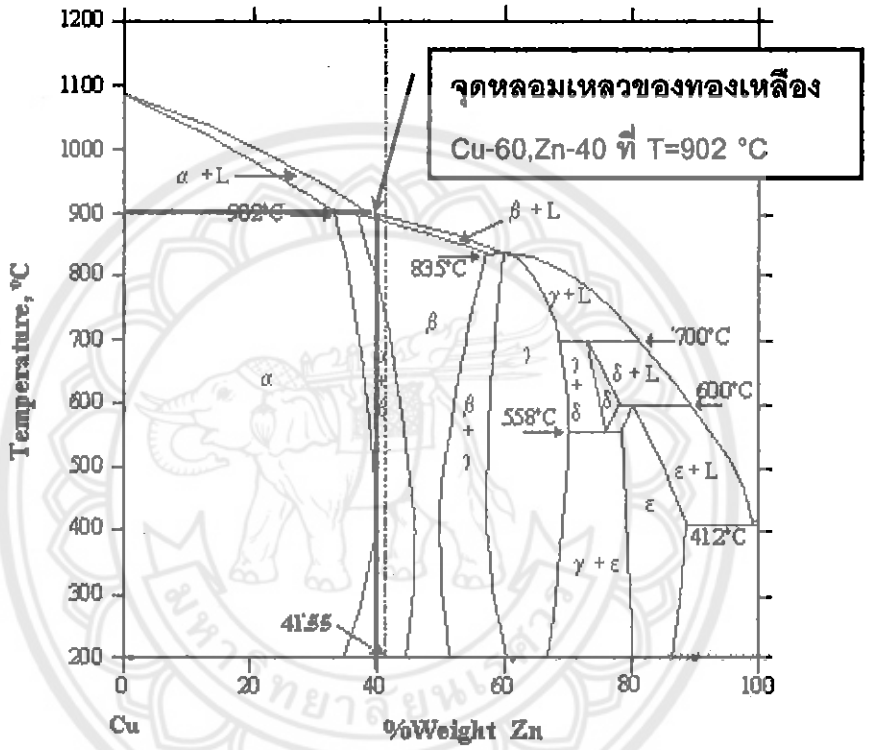
ข. ทองแหลืองแอลฟา-เบต้า ผสมสังกะสี ร้อยละ 38-46 ทองเหลืองประเภทนี้แข็ง และเปราะมากกว่าทองเหลืองแอลฟา ใช้ทำชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบเครื่องจักร

ในอุตสาหกรรมผลิตทองเหลืองทั่วๆ ไป จะแยกมาตรฐานออกไปสองกลุ่ม คือ ประเภทรีดเป็นแท่ง หรือเป็นแผ่น(Wrought copper alloys) กับอีกกลุ่มหนึ่งจะเป็นประเภทหล่อ(Cast copper) จากคู่มือ ASTM หรือ JIS ในการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติเชิงกล มักจะกล่าวถึงชื่อทองเหลืองที่รู้จักและใช้งานกันอยู่เป็นประจำมีอยู่ไม่มากนัก คือ

- ทองเหลืองที่ผสมสังกะสีไม่เกิน ร้อยละ 5 เรียก Gilding metal ใช้ทำเหรียญ
- ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี ร้อยละ 10 เรียก Commercial bronze หรือ บรอซ์น ทางการค้า สมบัติใช้งานคล้ายกับ Gilding metal
- ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี ร้อยละ 12.5 เรียก Jewelry bronze หรือ ทองเหลืองทำเครื่องประดับ
- ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี ร้อยละ 15 เรียก Red Brasses หรือทองเหลืองแดง
- ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี ร้อยละ 30 เรียก Cartridge brass ใช้ทำปลอกกระสุนปืน ทำท่อที่ต้องอาศัยการอัดขึ้นรูป(Extrusion)

- ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี ร้อยละ 35 เรียก Yellow brass มีสีค่อนข้างเหลืองจัด สมบัติและการใช้งานใกล้เคียงกับ Cartrige brass
- ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี ร้อยละ 40 เรียก Munts Metal คำว่า Muntz เป็นชื่อทางการค้า

จุดหลอมเหลวของทองเหลืองที่มีส่วนผสมของทองแดง(Cu) 60% และสังกะสี(Zn) 40% จะมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวประมาณ 902° C ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 Cu-Zn Phase Diagram

ที่มา : http://pwatlas.mt.umist.ac.uk/internetmicroscope/components/plug/wire-fixing-screw/phase.html

2.2 การขึ้นรูปแบบเย็น (Cold Working)

การขึ้นรูปแบบเย็น (Cold Working) เป็นขบวนการรีดขึ้นรูปเพื่อให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชนิดถาวร (Plastic Deformation) ที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนใหญ่จะเป็นการแปรรูปที่อุณหภูมิห้อง หรืออุณหภูมิสูงเล็กน้อยแต่ต่ำกว่าอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นแล้ว จะมีความแข็งแรงสูงขึ้น ความเหนียวลดลง ควบคุมขนาดสุดท้ายได้แน่นอน ผิวของโลหะเรียบสวยงาม

2.2.1 ผลของการขึ้นรูปแบบเย็น

เกิดการเสียรูปถาวร กล่าวคือ

1) ความเครียด (Strain) ของชิ้นงานเพิ่มขึ้น
2) จำนวนของขอบเกรนเพิ่มขึ้น
3) จำนวนของการเกิดตำหนิแบบเส้นเพิ่มขึ้น

ความแข็งที่เพิ่มขึ้นจากการขึ้นรูปแบบเย็น จะเรียกว่าความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ซึ่งจะทำให้การขึ้นรูปขั้นต่อมาทำได้ยากขึ้น และแม้แต่ชิ้นงานที่สำเร็จแล้วก็จำเป็นต้องมีการลดความเค้นตกค้างเพื่อเพิ่มความเหนียว มิเช่นนั้นจะทำให้เกิดการแตกแบบเปราะระหว่างการใช้งาน การลดความเค้นตกค้าง สามารถทำได้โดยการอบ (ให้ความร้อน) เรียกว่า Annealing โดยอบลดความแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของโลหะนั้นๆ

2.2.2 ข้อดีของการขึ้นรูปแบบเย็น

1) ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปแบบร้อนจะถูกนำมาขึ้นรูปแบบเย็นอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ได้ขนาดที่แน่นอน ไม่เกิดออกไซด์ และได้ผิวที่เรียบขึ้น
2) ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการชุบผิว สามารถนำมาขึ้นรูปแบบเย็นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง
3) สามารถขึ้นรูปวัสดุเหนียวและนำไปตกแต่งด้วยเครื่องจักรต่อไป
4) สามารถใช้ในงานรีดแผ่นได้ดี และได้ชิ้นงานที่บางกว่าการรีดร้อน

2.2.3 ข้อเสียของการขึ้นรูปแบบเย็น

1) ต้องใช้เครื่องจักรที่มีกำลังมากกว่าการขึ้นรูปแบบร้อน เพราะต้องทำให้เป็นแผ่นบางๆ หรือเส้นบางๆ

2) เกิดความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) มาก เนื่องจากโครงสร้างอะตอมเปลี่ยนรูปร่างไป

3) การขึ้นรูปแบบเย็นของโลหะที่บางหรือเปราะ ต้องมีการควบคุมกำลังอย่างใกล้ชิด และอาจต้องนำโลหะไปอบก่อนเพื่อเพิ่มความเหนียว

ร้อยละของการขึ้นรูป (Percent of Deformation)

ร้อยละของการขึ้นรูปสามารถคำนวณได้จาก

$$\%CW = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0}\right) \times 100 \qquad \textbf{(2.1)}$$

A_0 = พื้นที่หน้าตัดก่อนการขึ้นรูปแบบเย็น

A_d = พื้นที่หน้าตัดหลังการขึ้นรูปแบบเย็น

2.2.4 ประเภทของการขึ้นรูปแบบเย็น

การขึ้นรูปแบบเย็นมีหลายประเภท ที่สำคัญได้แก่

1) การรีดเย็น (Cold Rolling)
2) การดึงโลหะ (Drawing)
3) การขึ้นรูปพิมพ์ลึก (Deep Drawing)

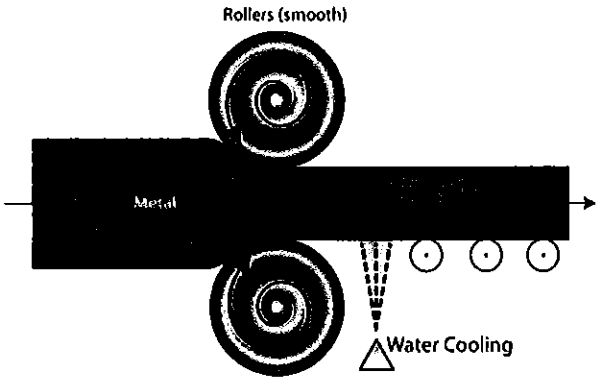
2.3 การรีดเย็น (Cold Rolling)

การรีดเย็น (Cold Rolling) เป็นการรีดในสภาพที่เย็น (อุณหภูมิห้อง) ผิวของงานที่ได้จะเรียบและมีความแข็งแต่ยังอ่อนกว่าเหล็กอาบสังกะสี สามารถนำไปดัดโค้งงอขึ้นรูปได้ง่ายและเป็นที่นิยมใช้ในงานโลหะแผ่นทั่วไป ความเค้นและความเครียดภายในแผ่นของงานรีดเย็นจะมีมากกว่างานชนิดรีดร้อน ใช้สำหรับงานขนาดเล็ก บาง ผิวชิ้นงานจะเรียบสวย มีความเที่ยงตรงสูง

โลหะที่ผ่านการรีดเย็น มักจะนำมาลดความเครียดภายในเนื้อโลหะโดยทำการอบอ่อน โดยอบโลหะให้ร้อนขึ้นถึงอุณหภูมิหนึ่ง โลหะที่ผ่านการอบอ่อน เนื้อของโลหะจะเกิดการอ่อนตัวลงเล็กน้อย

การเปลี่ยนแปลงในระยะแรกจะเกิดการลดความเครียดภายในเนื้อโลหะ โดยรูปลักษณะของเกรนโลหะยังคงเดิม และสภาพนำไฟฟ้าของโลหะจะเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งและความแข็งแรงของโลหะยังคงเดิม การลดความเครียดภายในเนื้อโลหะเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการแตกร้าวของโลหะในขณะใช้งานเนื่องจากเกิด Stress-corrosion นั่นเอง

การเปลี่ยนแปลงในระยะต่อมาเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะพบว่าเกิดผลึกใหม่ซึ่งเติบโตเป็นเกรนขนาดเล็กในช่วงนี้ความแข็งและความแข็งแรงของโลหะจะลดลงอย่างรวดเร็ว การเติบโตของผลึกใหม่ดังกล่าวนี้ เรียกว่า การตกผลึกใหม่ (Recrystallization)



รูปที่ 2.2 การรีดเย็น (Cold Rolling)

ที่มา : http://pirun.ku.ac.th/~b4755160/rolling.html

2.4 การตกผลึกใหม่ของทองเหลือง

การตกผลึกใหม่ (Recrystallization) คือ การที่โลหะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคจากเดิมไปเป็นลักษณะทรงกลมมากขึ้นภายหลังจากที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง

เนื่องจากการเกิดตำหนิแบบเส้น (Dislocation) เป็นข้อบกพร่อง (Defect) ที่ไม่เสถียร ดังนั้น เมื่อโลหะผ่านการอบอ่อน จะทำให้โลหะเกิดการกลับคืนสู่สภาพเดิม คือ

- การคืนตัว (Recovery)
- การตกผลึกใหม่ (Recrystallization)
- การเจริญเติบโตของเกรนที่ตกผลึกใหม่ (Grain Growth)

2.4.1 การคืนตัว (Recovery)

ในระหว่างการคืนตัว พลังงานความเครียดที่สะสมไว้ภายในจะถูกปลดปล่อยโดยเหตุที่การเกิดตำหนิแบบเส้นเคลื่อนที่ (ในสภาวะที่ไม่มีความเค้นจากภายนอก) ซึ่งเป็นผลจากการแพร่ของอะตอมที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น จำนวนของการเกิดตำหนิแบบเส้นจะลดลง และการเกิดตำหนิแบบเส้นปรับตัวเพื่อให้มีพลังงานความเครียดต่ำ นอกจากนี้สมบัติทางกายภาพ เช่น การนำไฟฟ้าและการนำความร้อนจะฟื้นกลับคืนสู่สภาพเดิม

2.4.2 การตกผลึกใหม่ (Recrystallization)

แม้ว่าการคืนตัวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้วก็ตาม เกรนยังคงมีพลังงานความเครียดที่สูงอยู่ การตกผลึกใหม่เป็นการสร้างเกรนที่มีขนาดเท่ากันในทุกทิศทาง(Equiaxed grain) ที่ปราศจากความเครียด(Strain-free) ขึ้นใหม่ ซึ่งมีความหนาแน่นของการเกิดตำหนิแบบเส้นต่ำและมีลักษณะเหมือนกับเกรนในสภาพเดิม แรงกระตุ้นหรือแรงขับเคลื่อนที่ (Driving force) ที่ใช้สร้างเกรนใหม่นี้คือ ความแตกต่างของพลังงานภายในระหว่างเนื้อของวัสดุที่ได้รับความเครียดกับที่ไม่ได้รับความเครียด เกรนใหม่นี้ในตอนแรกนิวเคลียสขนาดเล็กมากและโตขึ้น จนกระทั่งขยายตัวครอบคลุมโครงสร้างวัสดุทั้งหมด กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการแพร่ในระยะสั้น (Short-range diffusion) ดังนั้น การตกผลึกใหม่ของวัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นอาจจะถูกนำไปใช้ในการปรับขนาดโครงสร้างเกรนได้ด้วย

การตกผลึกใหม่เป็นกระบวนการที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา อัตราส่วนหรือระดับการตกผลึกเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาอบนานขึ้น อิทธิพลของอุณหภูมิได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงสูงสุดและความเหนียว ณ อุณหภูมิห้องของโลหะทองเหลืองเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและกำหนดระยะเวลาการอบคงที่นาน 1 ชั่วโมง โครงสร้างเกรนที่เปลี่ยนไปในแต่ละขั้นได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3

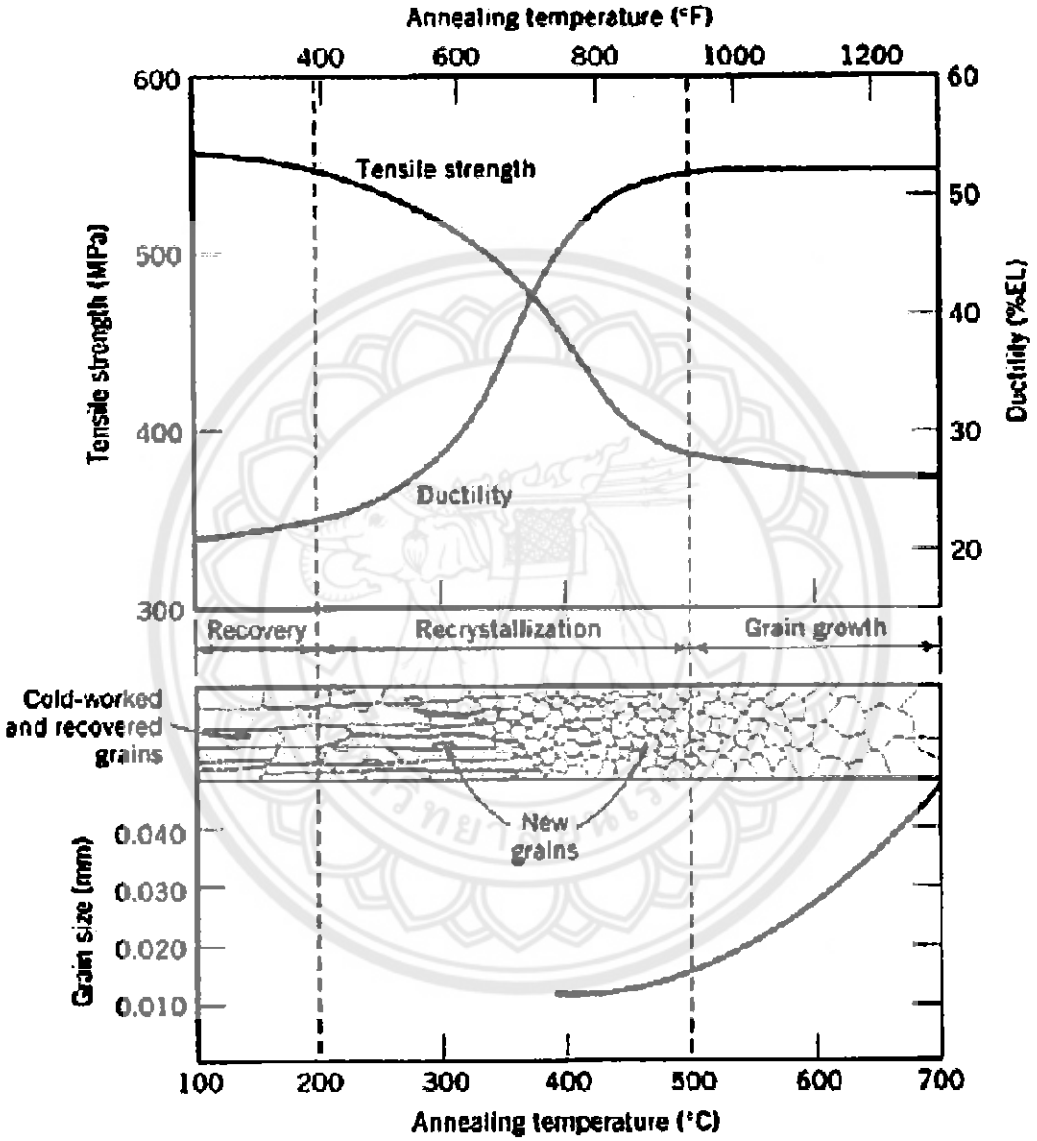
การตกผลึกใหม่จะเกิดได้ง่ายและรวดเร็วมากในโลหะบริสุทธิ์เมื่อเทียบกับโลหะผสม ดังนั้น การเพิ่มธาตุผสมเข้าไปเป็นการเพิ่มอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ให้สูงขึ้น ในโลหะบริสุทธิ์อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่โดยปกติอยู่ที่ $0.3T_m$ โดยที่ T_m คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของจุดหลอมเหลว แต่ในโลหะผสมทางการค้า ค่านี้อาจจะสูงขึ้นถึง $0.7T_m$

2.4.3 อุณหภูมิการตกผลึกใหม่ (Recrystallization Temperature)

การกำหนดอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ จะต้องกำหนดระยะเวลาและร้อยละของการเกิดการตกผลึกใหม่ด้วย อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่จะอยู่ที่ประมาณ 1/2 หรือ 1/3 ของจุดหลอมเหลว เนื่องจากจุดหลอมเหลวของทองเหลือง Cu-60, Zn-40 เท่ากับ 902 องศาเซลเซียส ดังนั้น อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของทองเหลืองร้อยละ 100 จะอยู่ที่ประมาณ 300 ถึง 450 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง (จงกล, 2525)

2.4.4 การเจริญเติบโตของเกรนที่เกิดผลึกใหม่ (Grain Growth)

หลังจากการเกิดผลึกใหม่เสร็จสมบูรณ์แล้ว ถ้าเวลาและอุณหภูมิสูงขึ้นเกรนใหม่ก็จะเจริญเติบโตไปเรื่อยๆ มีขนาดใหญ่ขึ้น กลไกของการเติบโตเกิดจากการแพร่ของอะตอมที่อยู่บริเวณขอบเกรนที่เล็กกว่า แพร่เข้ามาในเกรนที่ใหญ่กว่าทำให้เกรนใหญ่ขึ้น และจำนวนเกรนลดลง



รูปที่ 2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิอบอ่อนต่อความแข็งแรงสูงสุดและความเหนียวของทองเหลืองและการโตของเกรน

ที่มา : http://www.sut.ac.th/Engineering/Metal/pdf/PhyMet_1/7.%20Recovery,%20Recrystallization % 20and%20Grain%20Growth.pdf

2.5 การออกแบบการทดลองแบบสองปัจจัย

การออกแบบการทดลองแบบสองปัจจัยจะประกอบไปด้วย 2 ตัวแปรคือ ตัวแปร A ซึ่งมีอยู่ a ระดับ และเช่นเดียวกันกับตัวแปร B ซึ่งมีอยู่ b ระดับ ดังนั้นในแต่ละครั้งของการทดลองจะมีองค์ประกอบของการทดลอง หรือ วิธีปฏิบัติ (Treatments) อยู่ทั้งสิ้น ab วิธีที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 จำนวนการทดลองเท่ากับ ab ในแต่ละครั้ง

	B_1	B_2	...	B_b
A_1				
A_2				
⋮				
A_a				

ที่มา : พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, การออกแบบการทดลอง, 2546

โดยปกติจะทำการทดลองทั้งหมด n ครั้ง ดังนั้นตารางการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล กรณี 2 ตัวแปร สามารถแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลกรณี 2 ตัวแปร

		ตัวแปร B			
		1	2	...	b
ตัวแปร A	1	$y_{111}, y_{112}, \ldots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \ldots, y_{12n}$		$y_{1b1}, y_{1b2}, \ldots, y_{1bn}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \ldots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \ldots, y_{22n}$		$y_{2b1}, y_{2b2}, \ldots, y_{2bn}$
	⋮				
	A	$y_{a11}, y_{a12}, \ldots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \ldots, y_{a2n}$		$y_{ab1}, y_{ab2}, \ldots, y_{abn}$

ที่มา : พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, การออกแบบการทดลอง, 2546

โดยกำหนดให้

y_{ijk} แทนค่าตอบสนองเมื่อตัวแปร A อยู่ที่ระดับ i

B อยู่ที่ระดับ j ในการทดลองครั้งที่ k

และ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง a

j มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง b

k มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n

และค่าตอบสนองแต่ละตัวได้รับจากการทดลองสุ่ม (Completely Randomised Design, CRD) และสามารถเขียนตัวแบบทางด้านสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) ได้คือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta_{ij}) + \ell_{ijk} \qquad \begin{cases} i = 1,2,3,...,a \\ j = 1,2,3,...,b \\ k = 1,2,3,...,n \end{cases} \qquad \textbf{(2.2)}$$

โดยที่ μ แทน ผลตอบสนองเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

τ_i แทน ผลกระทบอันเกิดจากระดับที่ i ของตัวแปร A

B_j แทน ผลกระทบอันเกิดจากระดับที่ j ของตัวแปร B

$\tau\beta_{ij}$ แทน ผลกระทบจากความสัมพันธ์ระหว่าง τ_i และ β_j

ℓ_{ijk} แทน ค่าความผิดพลาดจากการทดลอง

โดยกำหนดให้ตัวแปร A และ B เป็นตัวแบบผลกระทบคงที่ (Fixed Effect Model) ดังนั้น ผลกระทบจากการทดลองจึงเป็นค่าความแปรเปลี่ยน(Variation) อันสืบเนื่องมาจากค่าผลตอบสนองเฉลี่ยโดยรวม จะได้ว่า $\sum_{i=1}^{a} \tau_i = 0$ และ $\sum_{j=1}^{b} \beta_j = 0$ ทำนองเดียวกัน เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเป็นค่าคงที่ ดังนั้นจะได้ว่า $\sum_{i=1}^{a} (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^{b} (\tau\beta)_{ij} = 0$ และมีจำนวนครั้งในแต่ละการทดลอง n ครั้ง ดังนั้นจำนวนส่วนประกอบของการทดลองทั้งหมดจึงเท่ากับ abn ครั้ง

ในการทดลองแบบแฟคทอเรียล ตัวแปรทั้งสอง (AและB) ถือว่ามีความสำคัญเท่ากัน จึงต้องมีการทดสอบสมมติฐานทั้ง 2 ตัวแปร

กรณีผลกระทบเนื่องจากตัวแปรแถว (ตัวแปร A)

$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = ... = \tau_a = 0$

H_1 : อย่างน้อยที่สุดมีค่าใดค่าหนึ่ง $(\tau_i) \neq 0$

กรณีผลกระทบเนื่องจากตัวแปรคอลัมน์ (ตัวแปร B)

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = ... = \beta_b = 0$

H_1 : อย่างน้อยที่สุดมีค่าใดค่าหนึ่ง $(B_j) \neq 0$

รวมทั้งผลกระทบที่มีความสำคัญอย่างมากอีกอย่างหนึ่งคือ

กรณีผลกระทบเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแถวและตัวแปรคอลัมน์

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$ ทุกๆ ค่า i , j

H_1 : อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า $(\tau\beta)_{ij} \neq 0$

2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

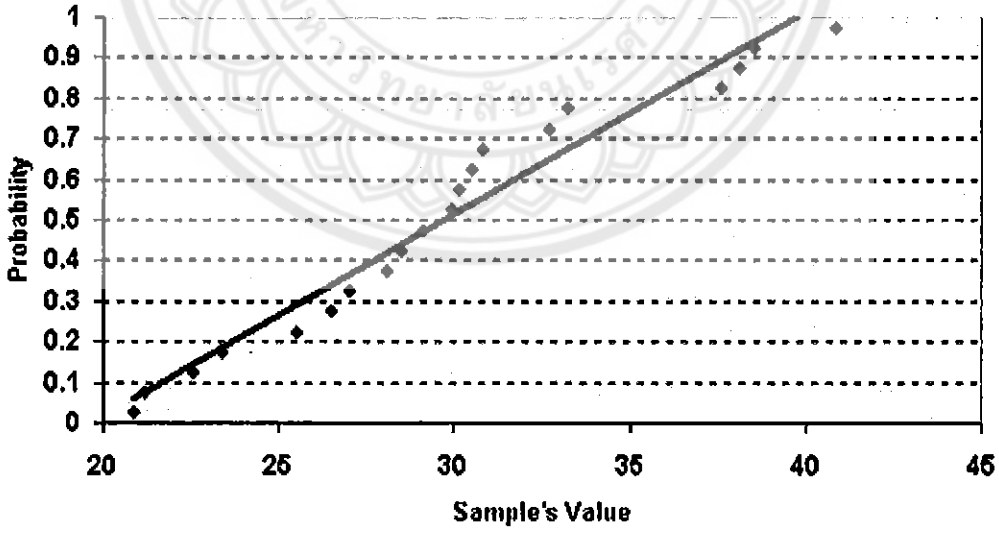
การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง หรือ Two-way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่เป็นสิ่งทดลองจำนวน 2 ตัวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเชิงคุณภาพที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่างๆ ส่วนตัวแปรตามมีลักษณะเชิงปริมาณ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง นอกจากจะสามารถศึกษาผลของตัวแปรทั้งสองตัวไปพร้อมๆ กันแล้ว ยังสามารถศึกษาผลร่วม (Interaction) ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัวด้วยว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวหนึ่งนอกจากจะส่งผลต่อตัวแปรตามแล้วยังส่งผลใดๆ ต่อตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอีกตัวหนึ่งหรือไม่

เงื่อนไขของการวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการทดสอบสมมติฐานการเท่ากันของค่าเฉลี่ยของประชากร จะต้องมีเงื่อนไข คือ ประชากรต้องมีการแจกแจงแบบปกติ

2.6.1 การกระจายแบบปกติ

เมื่อมีการสุ่มตัวอย่างจำนวนหนึ่งออกมาจากประชากรที่มีการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) โดยปกติกลุ่มตัวอย่างดังกล่าวก็จะมีการกระจายเป็นแบบปกติตามประชากรด้วยเช่นกัน แต่นั่นก็ไม่ใช่กฎตายตัว เป็นไปได้ที่ตัวอย่างที่สุ่มออกมาจะมีการกระจายตัวไม่เป็นแบบปกติ (Non-normal distribution) ซึ่งนั่นก็ไม่ใช่ประเด็นปัญหาหากว่าเราไม่ได้นำข้อมูลไปทำการอนุมานกลับไปหาประชากรอีกที เมื่อใดก็ตามที่ต้องการนำข้อมูลของสิ่งตัวอย่างไปทำการอนุมานถึงประชากร เราจะต้องแน่ใจว่าข้อมูลดังกล่าว มีการกระจายตัวเป็นแบบปกติเสมอ หากไม่เช่นนั้นการทดสอบสมมติฐาน หรือการอนุมาน ด้วยเครื่องมือทางสถิติอื่นๆ ก็จะให้ผลคลาดเคลื่อน ตั้งแต่น้อยจนถึงไม่อาจยอมรับได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะความไม่เป็นการกระจายแบบปกติ เมื่อเป็นเช่นนี้การทดสอบว่าข้อมูลของสิ่งตัวอย่างที่ได้มานั้นมีการกระจายแบบปกติหรือไม่

โดยมีหลักว่าถ้าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) แล้ว จุดตัดจะเรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรง และลักษณะการเกิดจุดจะต้องไม่กระจุกเป็นกลุ่มๆ และความห่างระหว่างจุดแต่ละจุดต้องใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ แต่แน่นอนว่าค่าจะมีการอยู่ห่างจากเส้น มากน้อยแตกต่างกันไปบ้าง



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการกระจายแบบปกติของข้อมูล

ที่มา : http://www.statistics.ob.tc/normal_test.htm

2.6.2 การวิเคราะห์สถิติของตัวแบบผลกระทบที่มีค่าคงที่ (Fixed Effect Model)

กำหนดให้ $y_{i...}$ แทน ผลรวมของข้อมูลการทดลองที่ระดับ i ของตัวแปร A

$y_{.j.}$ แทน ผลรวมของข้อมูลการทดลองที่ระดับ j ของตัวแปร B

$y_{ij.}$ แทน ผลรวมของข้อมูลการทดลองใน ij ใดๆ

$y_{...}$ แทน ผลรวมของข้อมูลการทดลองทุกๆ ข้อมูล

และ

$\bar{y}_{i..}$ แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองที่ระดับ i ของตัวแปร A

$\bar{y}_{.j.}$ แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองที่ระดับ j ของตัวแปร B

$\bar{y}_{ij.}$ แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองใน ij ใดๆ

$\bar{y}_{...}$ แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลองทุกๆ ข้อมูล

สามารถเขียนแทนได้โดยตัวแบบคณิตศาสตร์คือ

$$y_{i...} = \sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk} \quad ; \text{ i = 1,2,...,a} \tag{2.3}$$

$$y_{.j.} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk} \quad ; \text{ j = 1,2,...,b} \tag{2.4}$$

$$y_{ij.} = \sum_{k=1}^{n} y_{ijk} \quad ; \text{ i = 1,2,...,a} \tag{2.5}$$

$$y_{...} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk} \quad ; \text{ j = 1,2,...,b} \tag{2.6}$$

และ

$$\bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{bn} \quad ; \text{ i = 1,2,...,a} \tag{2.7}$$

$$\bar{y}_{.j.} = \frac{y_{.j.}}{an} \quad ; \text{ j = 1,2,...,b} \tag{2.8}$$

$$\bar{y}_{ij.} = \frac{y_{...}}{n} \quad ; \text{ i = 1,2,...,a} \tag{2.9}$$

$$\bar{y}_{...} = \frac{y_{...}}{abn} \quad ; \text{ j = 1,2,...,b} \tag{2.10}$$

พิจารณาความผิดพลาดในการได้เป็นส่วนต่างๆ ของดังนี้

$$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n}(y_{ijk}-\bar{y}_{...})^2 = bn\sum_{i=1}^{a}(\bar{y}_{i..}-\bar{y}_{...})^2 + an\sum_{j=1}^{b}(\bar{y}_{.j.}-\bar{y}_{...})^2 +$$

$$n\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}(\bar{y}_{ij.}-\bar{y}_{i..}-\bar{y}_{.j.}-\bar{y}_{...})^2 + \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n}(y_{ijk}-\bar{y}_{ij.})^2 \qquad \textbf{(2.11)}$$

กำหนดให้

SS ของตัวแปรแถวหรือตัวแปร A แทนด้วยสัญลักษณ์ SS_A

SS ของตัวแปรคอลัมภ์หรือตัวแปร B แทนด้วยสัญลักษณ์ SS_B

SS ของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร A และ B แทนด้วยสัญลักษณ์ SS_{AB}

SS ของความผิดพลาด (Error or Residuals) แทนด้วยสัญลักษณ์ SS_E

จากด้านขวามือของสมการ (2.11) สามารถเขียน แทนด้วยสัญลักษณ์ดังต่อไปนี้

$$SS_T = SS_a + SS_B + SS_{AB} + SS_E \qquad \textbf{(2.12)}$$

โดยมีค่าองศาเสรี (Degree of Freedom, df) ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ค่าองศาเสรี

ผลกระทบจากตัวแปรหรือความสัมพันธ์ร่วม	องศาเสรี
A	a-1
B	b-1
AB	(a-1)(b-1)
Error	ab(n-1)
Total	Abn-1

ที่มา : พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, การออกแบบการทดลอง, 2546

และผลรวมกำลังสอง (Sum of Square) สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad \textbf{(2.13)}$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^{a} \frac{y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad \textbf{(2.14)}$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^{b} \frac{y_{.j.}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad \textbf{(2.15)}$$

$$SS_{subtotals} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} \frac{y_{ij.}^{\ 2}}{n} - \frac{y_{...}^{\ 2}}{abn} \quad \textbf{(2.16)}$$

$$SS_{AB} = SS_{subtotals} - SS_A - SS_B \quad \textbf{(2.17)}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad \textbf{(2.18)}$$

และสามารถเขียนตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลกรณี 2 ตัวแปร และเป็นตัวแบบผลกระทบคงที่ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

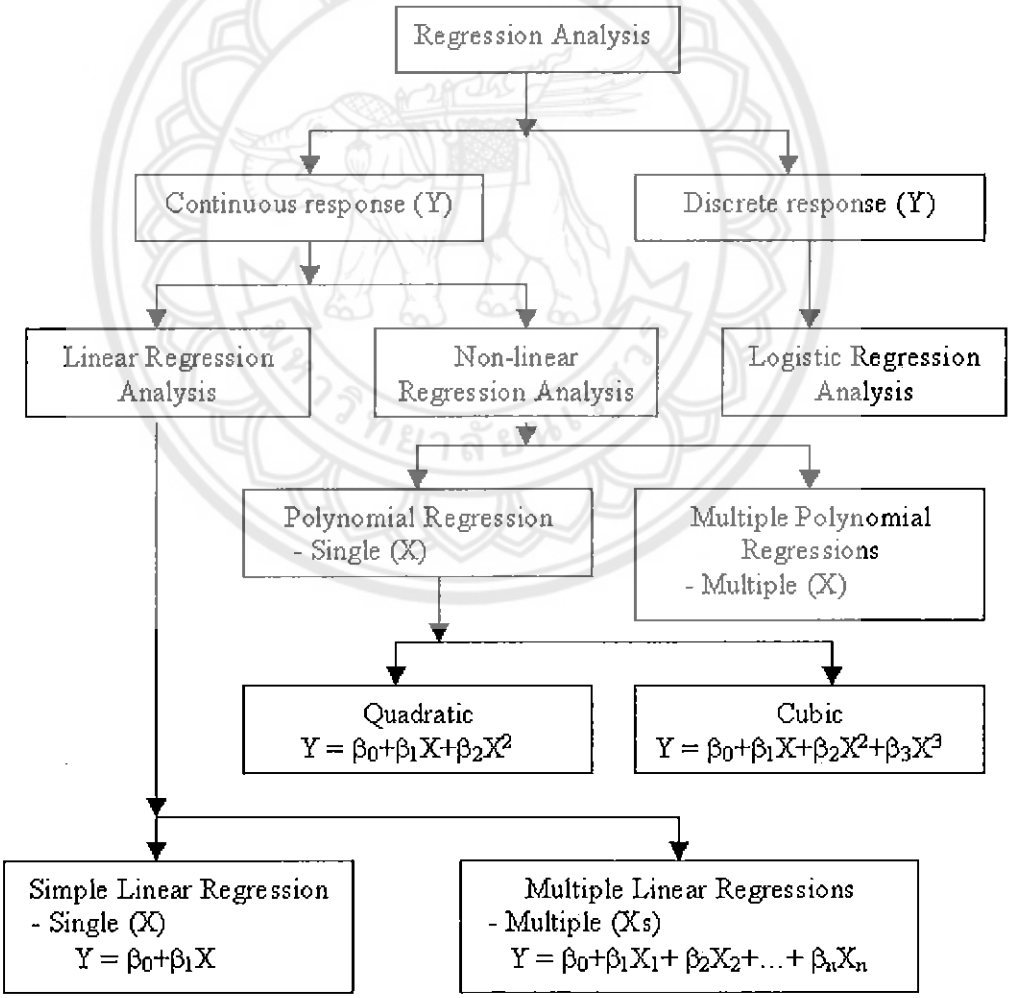
Source of Variation	**SS**	**Degree of Freedom**	**MS**	F_0
A	SS_A	a-1	$\frac{SS_A}{a-1}$	$f_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	b-1	$\frac{SS_B}{b-1}$	$f_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
AB-Interaction	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	$\frac{SS_B}{(a-1)(b-1)}$	$f_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	ab(n-1)	$\frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Total	SS_T	abn-1		

ที่มา : พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, การออกแบบการทดลอง, 2546

2.7 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับประเมินความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นตัวเดียวหรือหลายตัวคือ $X_1, X_2, \ldots, X_k$ กับตัวแปรตามชนิดต่อเนื่องที่มีตัวเดียว Y ใช้มากทั้งในสถานการณ์ที่ไม่สามารถควบคุมตัวแปรต้น และในการทดลองที่สามารถควบคุมตัวแปรต้นได้ ถ้าหากมีตัวแปรต้นตัวเดียวจะเรียกการถดถอยอย่างง่าย หากมีตัวแปรต้น 2 ตัวขึ้นไปจะเรียกการถดถอยพหุคูณ

การวิเคราะห์การถดถอยใช้สำหรับการหารูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรต้น เพื่อใช้ในการทำนายหรือประมาณค่าตัวแปรตามที่สนใจศึกษา เมื่อกำหนดตัวแปรต้นตัวอื่นๆ มาให้ ทางคณะผู้จัดทำโครงงานจึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อค่าความแข็งของทองเหลืองหลังผ่านการตกผลึกใหม่



รูปที่ 2.5 การจัดแบ่ง Regression Analysis ตามชนิดของข้อมูลที่ต้องการจะวิเคราะห์

ที่มา : http://www.geocities.com/chalong_sri/reg1.htm

2.7.1 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression)

ในการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่ายจะเป็นการวิเคราะห์กับตัวแปรตาม(Y) โดยมีตัวแปรต้น (X) เพียงตัวเดียว การใช้ตัวแปรต้นเพียงตัวเดียวจะไม่มีประสิทธิภาพพอที่จะอธิบายตัวแปรตามได้ ในกรณีที่จะพยายามอธิบายสัดส่วนความแปรปรวนของตัวแปรตามได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีตัวแปรต้นมากกว่า 1 ตัว ซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเมื่อมีตัวแปรต้นตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ใช้ในการทำนายตัวแปรตาม ซึ่งโดยปกติตัวแปรต้นจะใช้สัญลักษณ์ X และตัวแปรตามจะใช้สัญลักษณ์ Y

2.7.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอย

1. ตรวจสอบว่าตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นหรือไม่
2. สร้างสมการการพยากรณ์ เพื่อใช้สำหรับการประมาณค่า Y
3. ตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นของตัวแปรทั้งสอง โดยทำการตรวจสอบว่าสมการพยากรณ์มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้มากน้อยเพียงใด ดูจากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (The Coefficient of Determination) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ (Standard Error of the Estimate) และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและการพยากรณ์

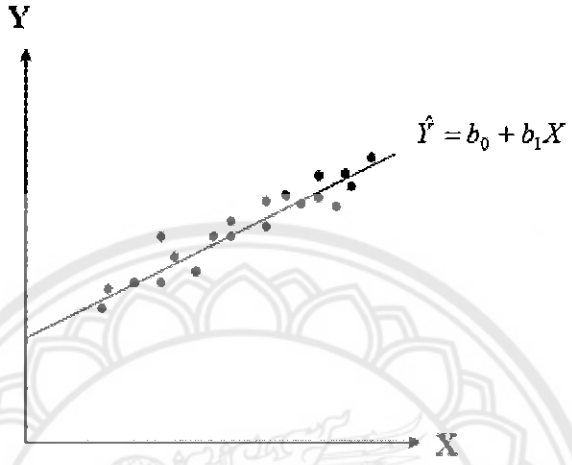
2.7.3 ค่าสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.7.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (The Coefficient of Determination)

- เกิดจากการนำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ยกกำลังสอง
- ใช้แสดงความแปรผันที่เกิดขึ้นกับตัวแปร Y มีผลเนื่องมาจากตัวแปร X คิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์
- ใช้ศึกษาว่าสมการการประมาณค่ามีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้มากหรือน้อย
- ค่าที่คำนวณได้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1
- สัญลักษณ์ที่ใช้คือ R square
- ในกรณีที่ค่า R square มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า ตัวแปร X มีอิทธิพลต่อตัวแปร Y อย่างมาก หมายความว่า สมการการประมาณค่าจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้มาก
- ในกรณีที่ค่า R square มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า ตัวแปร X มีอิทธิพลต่อตัวแปร Y น้อยมาก หมายความว่า สมการการประมาณค่าจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้น้อย

2.7.3.2 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ (Standard Error of the Estimate)

- เป็นค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณค่า Y ด้วย $\hat{Y}$
- สัญลักษณ์ที่ใช้คือ $S_{Y.X}$



รูปที่ 2.6 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ $S_{Y.X}>0$

2.7.4 การวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและการพยากรณ์

สถิติ t-test ใช้ทดสอบความแตกต่างหรือเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม ใช้สำหรับการทดสอบข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

1. ตั้งสมมติฐาน

   H0 : ค่าเฉลี่ยของประชากรของ 2 กลุ่มเท่ากัน คือ $\mu_1 = \mu_2$

   H1 : ค่าเฉลี่ยของประชากรของ 2 กลุ่มแตกต่างกัน คือ $\mu_1 \neq \mu_2$

2. กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ $\alpha = 0.05$

3. เลือกตัวสถิติที่เหมาะสม

   ความแปรปรวนของประชากรเท่ากัน คือ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$

ตัวสถิติ : $$t = \frac{\sum D}{\sqrt{\frac{N\sum D^2 - (\sum D)^2}{N-1}}} \qquad \textbf{(2.19)}$$

เมื่อ t = ความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและการคำนวณ

D = ความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและการคำนวณของแต่ละค่า

$\sum D$ = ผลรวมของความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและการคำนวณของทุกค่า

D^2 = ความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและการคำนวณของแต่ละค่ายกกำลังสอง

$(\sum D)^2$ = ผลรวมของความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและการคำนวณของทุกค่ายกกำลังสอง

$N\sum D^2$ = จำนวนค่าความแข็ง คูณ ผลรวมของความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและการคำนวณของทุกค่ายกกำลังสอง

N-1 = จำนวนค่าความแข็ง ลบ 1

4. สร้างกฎการตัดสินใจ นั่นคือ ปฏิเสธ H_0 ถ้า $t_{(คำนวณ)} > t_{(ตาราง)}$ หรือ $t_{(คำนวณ)} < -t_{(ตาราง)}$

5. คำนวณค่าสถิติ (t) จากกลุ่มตัวอย่าง

6. ตัดสินและตีความ $t_{(คำนวณ)} > t_{(ตาราง)}$ ดังนั้น เราปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 ให้ผลว่าทั้งสองกลุ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หากผลการทดสอบสมมติฐานได้ผลว่าเราไม่ปฏิเสธ H_0 นั่นคือค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างแตกต่างกันแต่ค่าเฉลี่ยของประชากรไม่แตกต่างกัน โดยที่ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่แตกต่างกันเป็นความคลาดเคลื่อน

2.8 การทดสอบความแข็งโลหะตามร็อกเวล (Metallic Materials Rockwell Hardness Test) ตาม ISO 6508-1986 (E)

การทดสอบความแข็งตามร็อกเวลนี้ชาวอเมริกันชื่อ ร็อกเวล (Rockwell) ได้พัฒนาวิธีนี้ขึ้นเมื่อปี ค.ศ.1922 หลักการทั่วไปคือ ให้กดหัวกดทดสอบบนชิ้นทดสอบจนเป็นรอยครากตัว(Plasticity) แต่มีส่วนหนึ่งที่ยืดหยุ่น บริเวณที่เปลี่ยนรูป (Deformed) ครากตัวจะเกิดความเครียดเย็น (Strain hardened) ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนจะเกิดมากกว่าชิ้นทดสอบชุบแข็ง

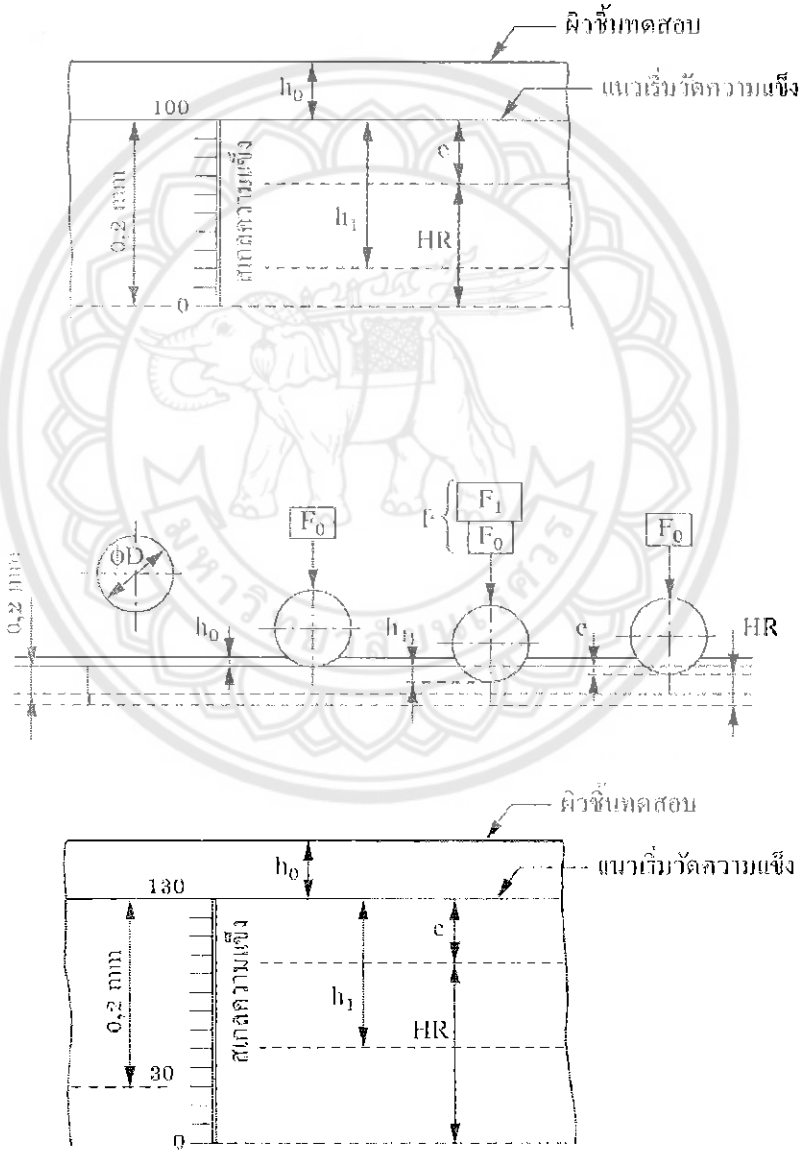
ในการทดสอบความแข็งตามร็อกเวลนี้ จะใช้หัวกดขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการทดสอบความแข็งตามวิธีร็อกเวลสเกล B

2.8.1 หลักการ (Principle) ทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล

เมื่อใช้แรงกดกดหัวกด ถ้าทดสอบวิธีร็อกเวลสเกล B จะใช้บอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D = 1.587 มิลลิเมตร บนชิ้นทดสอบด้วยแรงกดนำ(Preliminary force) และแรงกดเพิ่มเติม (Additional force) เมื่อนำแรงกดเพิ่มเติมออกจะทำให้เกิดระยะกดลึกถาวร e

หน่วยวัด e แต่ละ 1 สเกล คือ 0.002 มิลลิเมตร ค่า e นี้จะแบ่งเป็น 100 สเกล = 0.2 มิลลิเมตร จำนวนสเกลที่อ่านได้ (e) ก็คือค่าความแข็งร็อกเวล

เช่น 70 HRB = ความแข็งร็อกเวลวัดด้วยสเกล B ได้ 70



รูปที่ 2.7 สภาพผิวชิ้นทดสอบที่กดด้วยบอลเหล็กกล้า (ร็อกเวลสเกล) B, E, F, G, H หรือ K

ที่มา : มานพ ตันตระบัณฑิตย์, งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม, 2546

เมื่อ α = มุมของกรวยรูปเพชร

R = รัศมีของปลายเพชรรูปกรวย = 0.2 มิลลิเมตร

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง

F_0 = แรงกดนำ

F_1 = แรงกดเพิ่มเติม

F = แรงกดรวม

h_0 = ความลึกรอยกดจากแรงกดนำ (แต่ยังไม่กดด้วยแรงกดเพิ่มเติม)

h_1 = ความลึกรอยกดเมื่อเพิ่มแรงกดเพิ่มเติม

e = ระยะลึกถาวรของรอยกดเมื่อนำแรงกดเพิ่มเติมออกเหลือแต่แรงกดนำ (1 หน่วยสเกล = 0.002 มิลลิเมตร)

ดังนั้น ความแข็งร็อกเวลสเกล B(HRB)=130-e

สำหรับการทดสอบความแข็งร็อกเวล B จะได้ขั้นตอนเหมือนกัน แต่แรงกดเพิ่มเติม F_1 = 8826 N และใช้หัวกดทดสอบเป็นบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาด ϕD = 1.587 มิลลิเมตร

ขอบเขตการทดสอบความแข็งร็อกเวล B จะให้ทดสอบความแข็งระหว่าง 35 ถึง 100 HRB ใช้ทดสอบวัสดุที่มีความแข็งปานกลาง เช่น เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนต่ำถึงปานกลาง และทองเหลือง

2.8.2 การเตรียมชิ้นทดสอบ

1) ผิวชิ้นทดสอบจะต้องเจียระไนละเอียด ปราศจากออกไซด์ ผิวสะเก็ด (Scale) หรือวัสดุอื่นๆ รวมทั้งสารหล่อลื่น

2) ขนาดความหนาชิ้นทดสอบจะต้องมีขนาด 10 เท่าของระยะกดลึกถาวร e โดยหลังการทดสอบจะต้องไม่มีรอยเสียรูปบนผิวด้านตรงข้ามรอยกด

2.8.3 ขั้นตอนการทดสอบ

1) โดยทั่วไปการทดสอบจะกระทำระหว่าง 10 ถึง 35 องศาเซลเซียส หากต้องการทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมจะกระทำที่ 23 ± 5 องศาเซลเซียส

2) นำชิ้นทดสอบมาวางบนแท่นที่มีความแข็งเพียงพอ

3) นำหัวกดกดบนผิวงานด้วยแรงกดนำ F_0 = 98.07 N โดยมิให้กระแทกหรือมีการสั่นสะเทือนใดๆ

4) ตั้งหน้าปัดให้สเกลชี้ที่เลข 100 (ขณะนี้ระยะกดลึก 0 มิลลิเมตร กำหนดไว้ที่ความแข็งร็อกเวล 100) จากนั้นเพิ่มแรงกดเพิ่มเติมจาก F_0 ไป F ในเวลา 2 วินาทีแต่ไม่เกิน 8 วินาที แรงกดเพิ่มเติม F = 98.07 N สำหรับสเกล B, D และ E

5) เพื่อให้หัวกดแช่ในเนื้อวัสดุจนเกิดสภาพคราก็ตัว (Plasticity) ด้วยแรงกดเพิ่มเติม F จะต้องให้หัวกดแช่ระหว่าง 10 ถึง 15 วินาที

6) ค่าความแข็งร็อกเวลจะหาได้จากระยะกดลึกถาวร e ซึ่งโดยปกติจะสามารถอ่านค่าที่เครื่องทดสอบได้โดยตรง

7) ระยะห่างระหว่างรอยกด(วัดจากศูนย์กลางรอยกด) จะต้องมากกว่า 4 เท่าของรอยกด (แต่ต้องไม่ต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร) สำหรับรอยกดที่อยู่ห่างจากขอบชิ้นงานจะต้องมีระยะห่างอย่างต่ำ 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (ไม่ต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร)

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

I 5067224 e.2
ปร
ส 2561
2552

บทที่ 3
วิธีดำเนินโครงงาน

3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล

3.1.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับทองเหลือง

ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของทองเหลือง อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของทองเหลืองเพื่อใช้ในการหาอุณหภูมิของการตกผลึกใหม่

3.1.2 ศึกษาการออกแบบการทดลอง

ศึกษาการกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลองและหาขนาดการทดลองแบบ Full Factorial Design เพื่อคำนวณหาจำนวนจุดในการวัดความแข็งของชิ้นงานทองเหลืองหลังผ่านการตกผลึกใหม่ โดยใช้การทดสอบความแข็งของโลหะตามร็อกเวล

3.1.3 ศึกษาการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

ศึกษาการวิเคราะห์การถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อนำข้อมูลมาประมวลผลดูว่าอุณหภูมิและเวลามีผลต่อค่าความแข็งของทองเหลืองหลังผ่านการตกผลึกใหม่หรือไม่ และศึกษาความสัมพันธ์อุณหภูมิและเวลา

3.2 การออกแบบการทดลอง

3.2.1 กำหนดปัจจัย

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกผลึกใหม่ในโลหะและโลหะผสมคืออุณหภูมิ เวลา ปริมาณเริ่มต้นของการเปลี่ยนรูปของโลหะ ขนาดของเกรนเริ่มต้น และส่วนประกอบของโลหะหรือโลหะผสม เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาเป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อการตกผลึกใหม่ของทองเหลือง ซึ่งการตกผลึกใหม่เป็นกระบวนการที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา อัตราส่วนหรือระดับการตกผลึกเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและเวลาในการอบนานขึ้น และอุณหภูมิและเวลาสามารถควบคุมและกำหนดค่าได้ (จงกล รัตสุข, 2525) ส่วนปัจจัยอื่นๆ คือ ปริมาณเริ่มต้นของการเปลี่ยนรูปของโลหะ ขนาดของเกรนเริ่มต้น และส่วนประกอบของโลหะหรือโลหะผสม สามารถควบคุมและกำหนดค่าได้ยาก ดังนั้น ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองจึงมีสองปัจจัยคือ อุณหภูมิ และเวลา

3.2.2 ระดับของปัจจัย

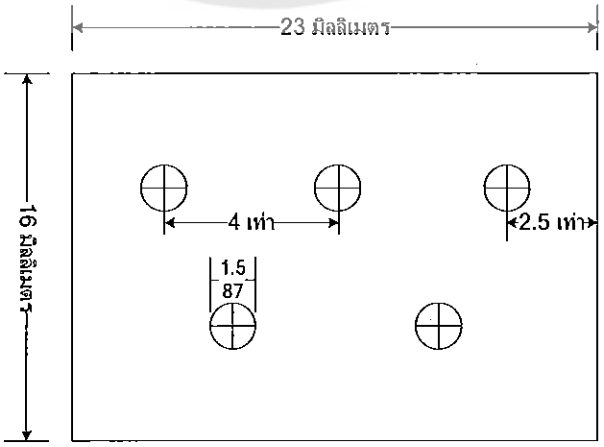
1) อุณหภูมิ ที่ใช้ในการทดลองมี 3 ระดับคือ 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส จากข้อมูลในบทที่ 2 รูปที่ 2.1 Cu-Zn Phase Diagram อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่จะอยู่ที่ประมาณ 1/2 หรือ 1/3 ของจุดหลอมเหลว เนื่องจากจุดหลอมเหลวของทองเหลือง Cu-60, Zn-40 เท่ากับ 902 องศาเซลเซียส ดังนั้น อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของทองเหลืองอยู่ที่ประมาณ 300 ถึง 450 องศาเซลเซียส (จงกล รัตสุข, 2525) ดังนั้นจึงกำหนดค่าที่นำมาทดลอง 3 ค่านี้ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของทองเหลือง

2) เวลา ที่ใช้ในการทดลองมี 7 ระดับคือ 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 นาที เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการตกผลึกใหม่จะอยู่ภายใน 1 ชั่วโมง ดังนั้นในการกำหนดค่าจึงใช้เวลา 7 ค่านี้ เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งของการตกผลึกใหม่เมื่อเวลาน้อยกว่า 1 ชั่วโมงและมากกว่า 1 ชั่วโมง (จงกล รัตสุข, 2525)

3.2.3 ขนาดการทดลอง

ชิ้นงานทดสอบมีขนาดความกว้าง 16 มิลลิเมตร ยาว 23 มิลลิเมตร จะสามารถวัดความแข็งได้ 5 จุดเนื่องจากการทดสอบความแข็งโลหะตามร็อกเวล (Metallic Materials Rockwell hardness Test) ตาม ASTM E18-03 กำหนดให้

1. หัวกดทดสอบเป็นบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาด ϕD = 1.587 มิลลิเมตร
2. ระยะห่างระหว่างรอยกด (วัดจากศูนย์กลางรอยกด) จะต้องมากกว่า 4 เท่าของรอยกด (แต่ต้องไม่ต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร) สำหรับรอยกดที่อยู่ห่างจากขอบชิ้นงานจะต้องมีระยะห่างอย่างต่ำ 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (ไม่ต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.1 การกำหนดการกดจุดวัดความแข็งของชิ้นงาน

3.2.4 สมมติฐานของการทดลอง

ให้ H_0 : อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนชิ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็งของทองเหลือง

H_1 : อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งของทองเหลือง

เมื่อ อุณหภูมิ = 300, 350, 400 องศาเซลเซียส

เวลา = 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 นาที

3.2.5 กำหนดการทดลอง

เนื่องจากกำหนดให้ % Cold Work ของการรีดเป็นตัวแปรควบคุมโดยกำหนดที่ 10% และ 20% Cold Work เพราะต้องการดูค่าอุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของทองเหลือง จากการหาขนาดการทดลองจะกำหนดการทดลองได้ดังนี้

3.2.5.1 สำหรับการรีดที่ 10% Cold Work

ตารางที่ 3.1 จำนวนชิ้นงานทดสอบสำหรับการรีดที่ 10% Cold Work

อุณหภูมิ ($^{\circ}C$) / เวลา (นาที)	จำนวนชิ้นงาน (ชิ้น)		
	300	350	400
30	1	1	1
40	1	1	1
50	1	1	1
60	1	1	1
70	1	1	1
80	1	1	1
90	1	1	1

3.2.5.2 สำหรับการรีดที่ 20% Cold Work

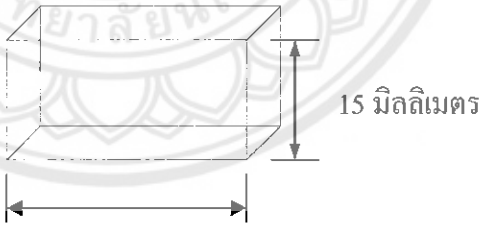
ตารางที่ 3.2 จำนวนชิ้นงานทดสอบสำหรับการรีดที่ 20% Cold Work

อุณหภูมิ ($^{\circ}C$) / เวลา (นาที)	จำนวนชิ้นงาน (ชิ้น)		
	300	350	400
30	1	1	1
40	1	1	1
50	1	1	1
60	1	1	1
70	1	1	1
80	1	1	1
90	1	1	1

3.3 ดำเนินการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

เตรียมชิ้นงานขนาดพื้นที่หน้าตัด 15x19 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2 ทำการรีดเย็นที่ 10% และ 20% Cold Work



รูปที่ 3.2 หน้าตัดชิ้นงานทองเหลืองก่อนทำการรีดเย็น

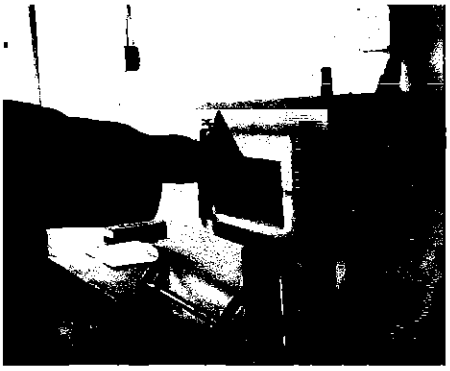
รูปที่ 3.3 เตรียมชิ้นงานโดยใช้เครื่องไส

รูปที่ 3.4 ชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น

3.3.2 ขั้นตอนการทำการทดลอง

- นำชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็นที่ 10% และ 20% Cold Work มาตัดให้มีขนาดกว้าง 16 มิลลิเมตร ยาว 23 มิลลิเมตร จำนวน 42 ชิ้น แล้วนำมาทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.3

รูปที่ 3.5 การตัดชิ้นงาน



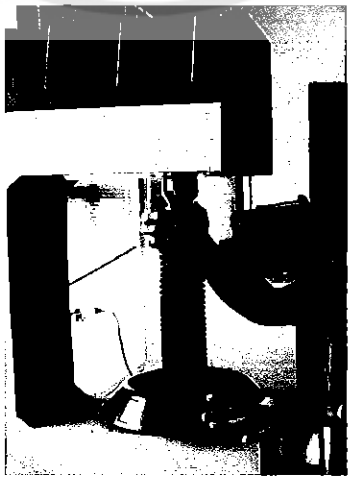
รูปที่ 3.6 การอบชิ้นงาน

- นำชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวมาทดสอบความแข็ง มีขั้นตอนดังนี้

1) นำชิ้นงานทดสอบมาขัดผิวชิ้นงานให้เรียบ โดยนำมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 600, 800 และ 1,200 ตามลำดับ

รูปที่ 3.7 การขัดชิ้นงาน

2) ทำการทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่อง Rockwell Tester scale B จำนวน 5 จุด บันทึกค่าลงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.8 การวัดชิ้นงาน

ตารางที่ 3.3 ตารางบันทึกค่า

%การรีด	เวลาในการตกผลึกใหม่ (min)	อุณหภูมิในการตกผลึกใหม่ (°C)	ค่าความแข็ง (HRB)				
			จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5
10%	30	300					
		350					
		400					
	40	300					
		350					
		400					
	50	300					
		350					
		400					
	60	300					
		350					
		400					
	70	300					
		350					
		400					
	80	300					
		350					
		400					
	90	300					
		350					
		400					
20%	30	300					
		350					
		400					
	40	300					
		350					
		400					
	50	300					
		350					
		400					
	60	300					
		350					
		400					
	70	300					
		350					
		400					
	80	300					
		350					
		400					
	90	300					
		350					
		400					

3.4 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

3.4.1 ตรวจสอบข้อมูลผลการทดลองและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของทองเหลือง

3.4.1.1 การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์ผล โดยการพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างของข้อมูล

3.4.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์ผล โดยการพิจารณาแผนภูมิการกระจายของข้อมูล

3.4.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์ผล โดยการพิจารณาการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

3.4.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลา ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์ผล เพื่อศึกษากราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อความแข็งของทองเหลือง

3.4.3 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์ผล เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อความแข็งของทองเหลืองหลังผ่านการตกผลึกใหม่

3.4.4 วิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์ผล เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อความแข็งของทองเหลืองหลังผ่านการตกผลึกใหม่ และหาสมการถดถอยเพื่อหาค่าความแข็งพยากรณ์เปรียบเทียบกับค่าความแข็งจากการทดลอง

3.5 สรุปผลการทดลอง

นำผลที่ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลามาทำการสรุปผลเปรียบเทียบกับทฤษฎีในบทที่ 2 คือ ทฤษฎีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองปัจจัย และทฤษฎีวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล

pบทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 ผลการทดสอบความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งของทองเหลืองจำนวนทั้งหมด 42 ชิ้น ที่ผ่านรีดเย็นที่ 10% และ 20% Cold Work แล้วผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300, 350 และ400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 นาที แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าความแข็งที่ 10% Cold Work

%การรีด	เวลาในการตกผลึกใหม่ (min)	อุณหภูมิในการตกผลึกใหม่ (°C)	ค่าความแข็ง (HRB)				
			จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5
10%	30	300	78.20	79.00	78.00	78.40	79.00
		350	77.00	77.50	76.80	76.50	76.80
		400	76.80	76.00	75.60	76.00	76.00
	40	300	76.50	77.00	77.50	76.50	76.00
		350	75.50	76.00	75.80	76.20	77.00
		400	74.00	73.80	73.50	74.00	73.50
	50	300	76.00	75.80	75.50	76.00	75.50
		350	74.50	74.80	75.00	74.50	74.60
		400	73.50	73.00	73.80	74.00	73.50
	60	300	76.00	76.50	76.80	75.00	75.00
		350	75.00	75.00	75.50	75.00	74.00
		400	73.00	73.50	73.00	72.50	72.50
	70	300	75.00	76.00	76.00	76.50	76.00
		350	76.00	76.50	75.50	75.20	75.00
		400	74.20	75.00	75.00	74.00	74.20
	80	300	76.00	76.00	77.00	76.00	76.00
		350	74.00	74.50	73.00	74.00	73.00
		400	73.00	72.80	73.00	74.00	74.00
	90	300	76.00	74.00	74.50	74.00	75.00
		350	70.00	71.00	71.00	71.50	71.00
		400	69.00	69.00	69.50	69.00	69.00

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าความแข็งที่ 20% Cold Work

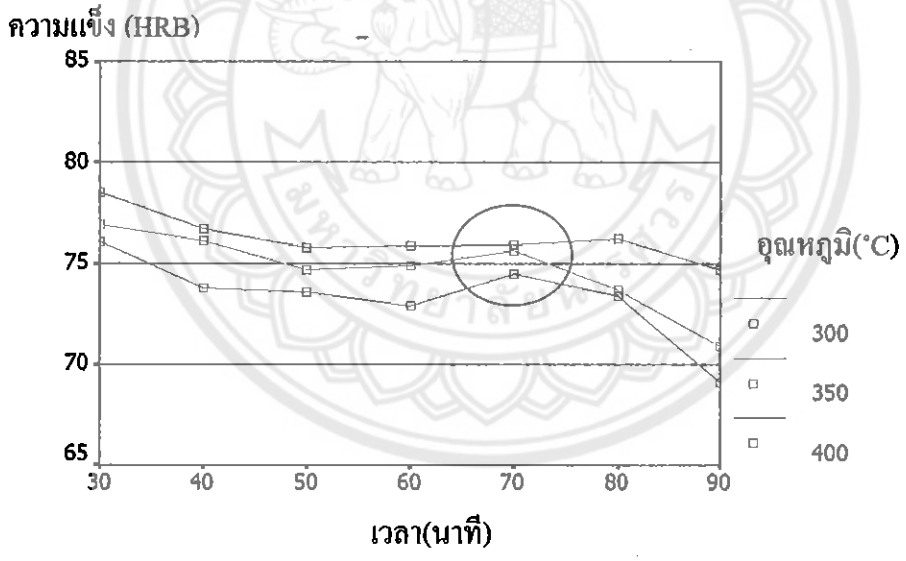
%การรีด	เวลาในการตกผลึกใหม่ (min)	อุณหภูมิในการตกผลึกใหม่ (°C)	ค่าความแข็ง (HRB)				
			จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5
20%	30	300	83.0	84.0	84.0	85.0	84.0
		350	81.0	80.8	81.2	80.0	80.5
		400	78.5	79.0	78.8	79.2	78.6
	40	300	80.0	80.0	80.0	81.5	81.5
		350	79.0	80.0	79.5	80.0	80.0
		400	77.0	77.5	77.0	78.5	78.5
	50	300	79.0	79.8	80.5	80.0	80.5
		350	76.5	75.5	76.0	77.0	77.5
		400	75.0	74.8	74.8	75.5	75.0
	60	300	78.0	78.5	78.5	78.0	77.0
		350	76.0	76.5	77.0	76.5	76.5
		400	76.0	75.5	76.0	76.0	75.5
	70	300	78.2	77.8	77.5	77.5	78.0
		350	76.0	75.8	76.0	75.5	76.0
		400	74.5	74.2	74.0	74.5	74.2
	80	300	77.2	77.4	77.3	77.0	77.4
		350	75.0	75.5	76.0	74.0	75.0
		400	73.2	74.0	74.2	74.2	74.2
	90	300	77.2	77.0	76.8	77.0	77.0
		350	74.0	74.2	74.5	74.0	73.8
		400	73.0	73.0	73.0	74.0	74.0

4.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลา

ผลการทดสอบความแข็งของทองเหลืองจำนวนทั้งหมด 42 ชิ้น ที่ผ่านรีดเย็นที่ 10% และ 20% Cold Work แล้วผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 นาที สามารถแสดงผลการทดลองเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของทองเหลือง ดังนี้

4.2.1 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 10% Cold Work

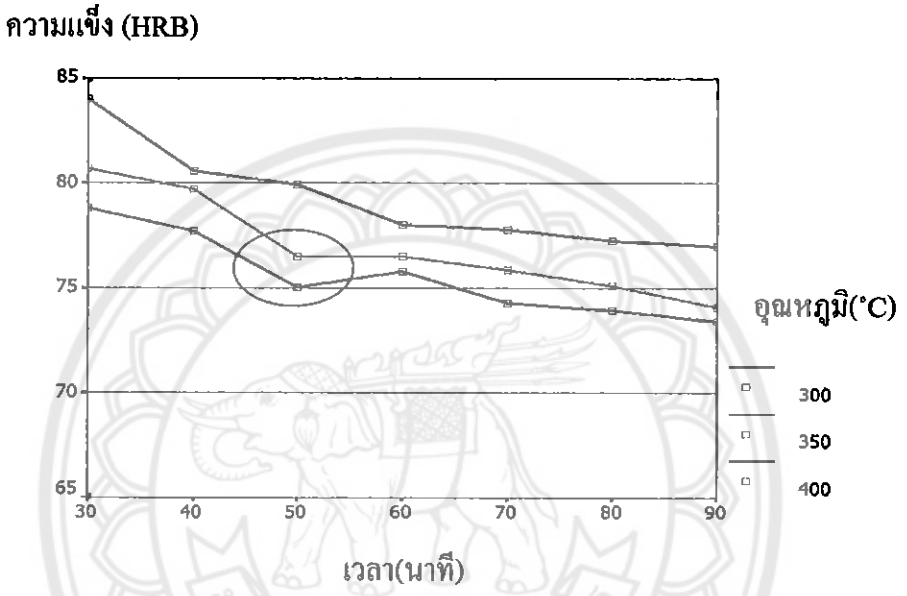
ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อความแข็งของทองเหลือง ซึ่งทำให้ความแข็งของทองเหลืองลดลง เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่เกิดความเบี่ยงเบนในบางจุด ที่เวลา 70 นาที เนื่องจากความผิดพลาดจากปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่ได้นำมาพิจารณา คือ ความคลาดเคลื่อนของเวลาของการอบชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 10% Cold Work

4.2.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 20% Cold Work

ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อความแข็งของทองเหลือง ซึ่งทำให้ความแข็งของทองเหลืองลดลง เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่เกิดความเบี่ยงเบนในบางจุด ที่เวลา 50 นาที เนื่องจากความผิดพลาดจากปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่ได้นำมาพิจารณา คือ ความคลาดเคลื่อนของเวลาของการอบชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 20% Cold Work

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าแนวโน้มของกราฟมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงในลักษณะแปรผกผัน แต่มีจุดที่เกิดความเบี่ยงเบน ทำให้กราฟไม่เป็นเส้นตรงในบางตำแหน่ง จึงทำการนำข้อมูลนำมาทำการตรวจสอบเพื่อดูว่าข้อมูลโดยรวมมีความน่าเชื่อถือพอที่จะนำไปวิเคราะห์เชิงสถิติต่อหรือไม่ จึงทำการตรวจสอบข้อมูลโดยการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ ตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือตามที่กล่าวไว้หรือไม่ ซึ่งรายละเอียดการทดลองแสดงไว้ในหัวข้อ 4.3.1

4.3 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

4.3.1 การตรวจสอบข้อมูลผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของทองเหลือง

ผลการวิจัยข้อมูลต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ผลการศึกษาหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความแข็งของทองเหลืองหลังผ่านการตกผลึกใหม่ พิจารณาตัวแปรปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งของทองเหลืองโดยการทดสอบค่าความแข็ง เมื่อได้ปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยอาศัยการทดลองในการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งอาศัยการออกแบบการทดลองแบบ 2 ปัจจัย โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งเมื่อวัดค่าความแข็งของชิ้นทดสอบตามการออกแบบการทดลองครบทั้ง 42 การทดลอง และนำชิ้นงานทดสอบไปทดสอบค่าความแข็ง

เมื่อได้ค่าความแข็งของทองเหลืองผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อกรองปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของทองเหลืองที่ระดับนัยสำคัญที่เราต้องการนำมาเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีผลต่อความแข็งของทองเหลืองอย่างมีนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

4.3.1.1 การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ

การทดสอบสมมติฐานจากการตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง (Residuals) โดยการพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้างเทียบกับระดับค่าความแข็งของทองเหลือง จะพบว่ากราฟมีการกระจายอย่างอิสระไม่มีลักษณะเป็นลู่เข้าหรือลู่ออก จุดตัดเรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรง ซึ่งส่วนตกค้างในแต่ระดับของผลตอบที่กระจายนั้นมีทั้งในด้านบวกและด้านลบ และมีความสมดุลซึ่งกันและกัน จึงทำให้ประมาณค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง ได้ว่ามีค่าใกล้เคียงหรือเทียบเท่า 0 แสดงว่าปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัย ที่ใช้ในการวัดค่าความแข็งที่ทำให้งานวิจัยนี้มีความถูกต้องเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากทั้ง 2 ปัจจัย มีผลที่เกี่ยวเนื่องซึ่งกันและกัน(Interaction) นั้นคือ ข้อมูลหรือผลตอบที่ได้มีความเชื่อถือได้ ดังนั้นจึงนำค่าความแข็งสร้างแผนภูมิการกระจายแบบแจกแจงปกติ โดยให้แกน X คือส่วนตกค้างของข้อมูล และแกน Y คือร้อยละของความน่าจะเป็นสะสม

การตรวจสอบทำได้โดย นำค่าการทดลอง(Observation) มาหาเฉลี่ย(Fit) แล้วนำค่าการทดลองลบด้วยค่าเฉลี่ยจะได้ค่าส่วนตกค้าง(Residual=Observation-Fit) จากนั้นนำค่าส่วนตกค้างมาหาความถี่ของข้อมูลจะได้เป็นร้อยละของความน่าจะเป็น เช่น ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที พบว่า

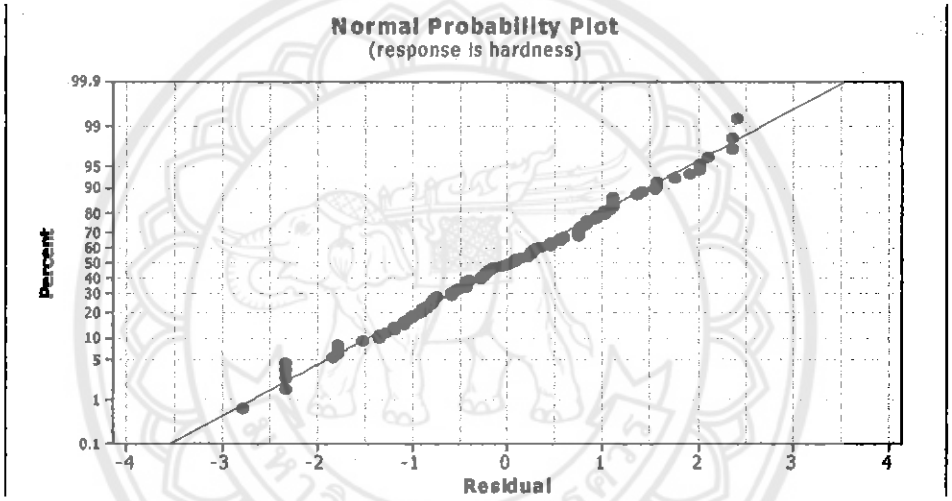
ค่าจากการทดลอง = 78.2, 79.0, 78.0, 78.4 และ 79.0 HRB

ค่าเฉลี่ย = (78.2+79.0+78.0+78.4+79.0)/5 = 78.5 HRB

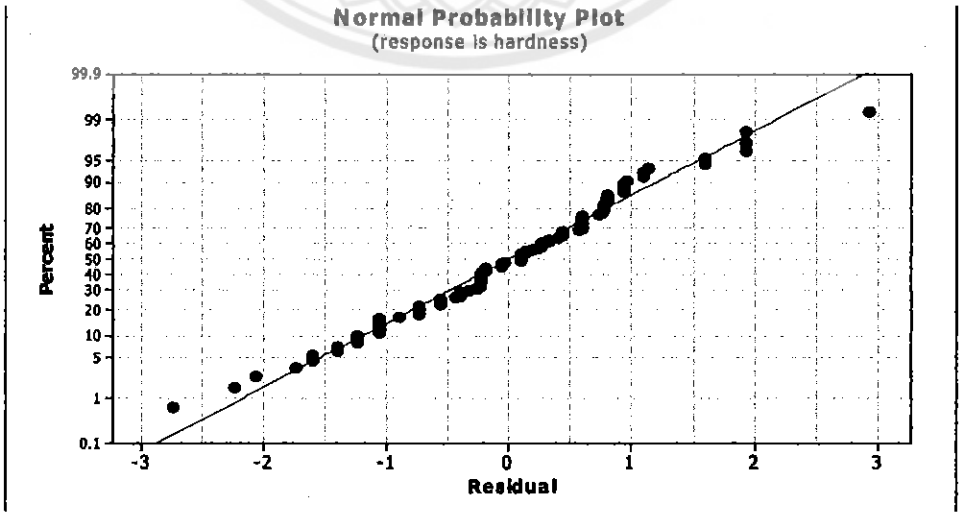
ค่าส่วนตกค้าง : จุดที่ 1 = 78.2-78.5 = -0.3 HRB, จุดที่ 2 = 79-78.5 = 0.5 HRB, จุดที่ 3 = 78-78.5 = -0.5 HRB, จุดที่ 4 = 78.4-78.5 = -0.1 HRB, จุดที่ 5 = 79-78.5 = 0.5 HRB

พบว่าความถี่ของข้อมูลที่ : -0.3=1 จะได้%ความถี่สะสม = 1/100 = 10%, 0.5=2 จะได้%ความถี่สะสม = 2/100 = 20%, -0.5=1 จะได้%ความถี่สะสม = 1/100 = 10%, -0.1=1 จะได้%ความถี่สะสม = 1/100 = 10%

ดังนั้น สามารถนำค่าส่วนตกค้างและร้อยละของความถี่สะสมสร้างแผนภูมิการกระจายแบบแจกแจงปกติดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



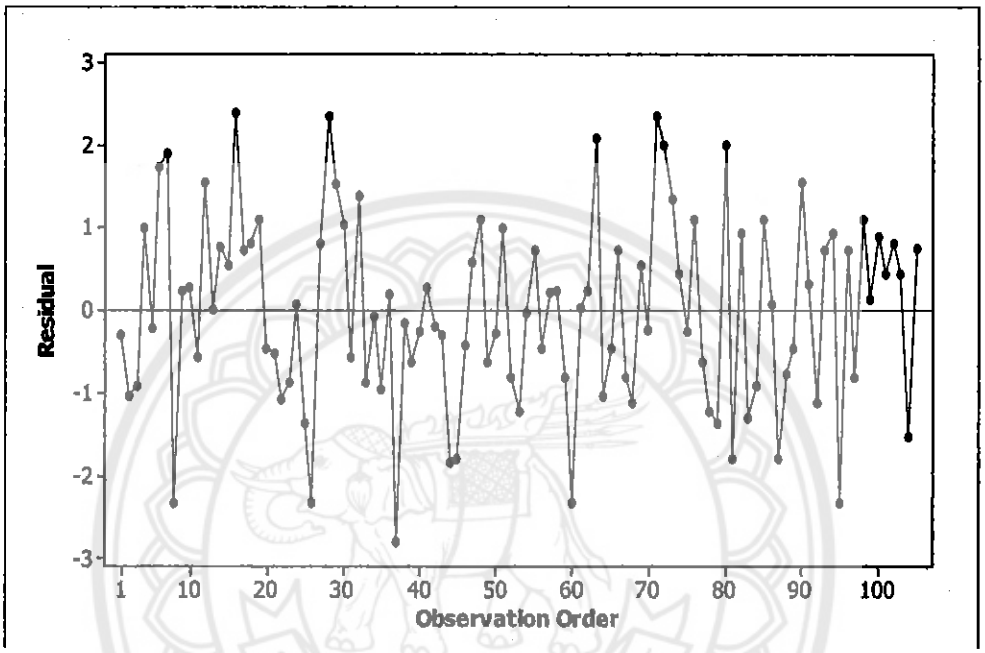
รูปที่ 4.3 แสดงค่า Normal Probability Plot for Hardness ของชิ้นงานที่ 10% Cold Work



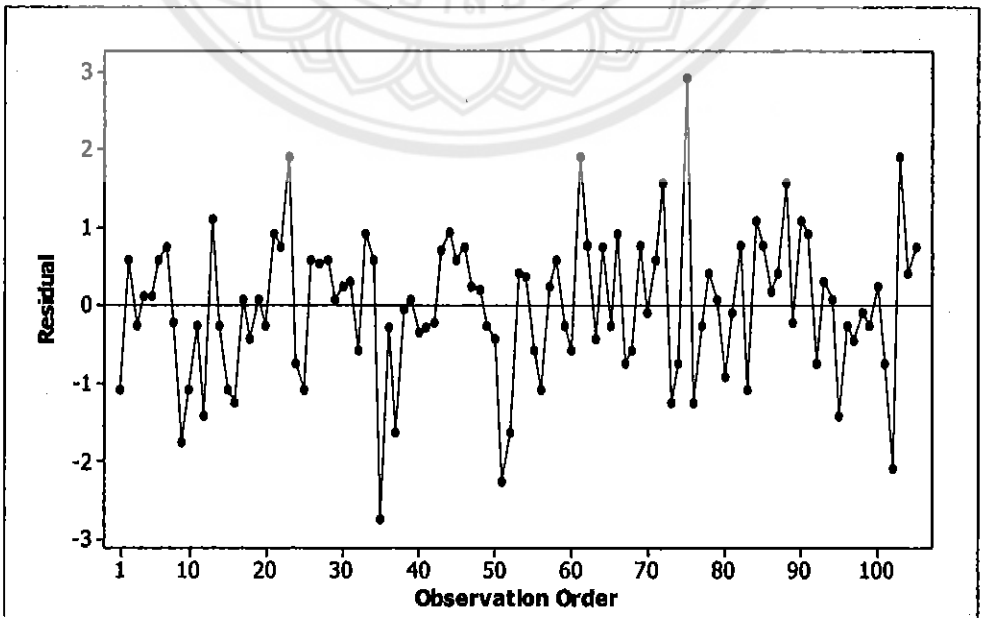
รูปที่ 4.4 แสดงค่า Normal Probability Plot for Hardness ของชิ้นงานที่ 20% Cold Work

4.3.1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

โดยใช้แผนภูมิการกระจายเพื่อสังเกตลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ ว่าเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่ พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลอง มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอแสดงว่าข้อมูลมีความอิสระ ดังนั้นจึงนำข้อมูลค่าความแข็งสร้างแผนภูมิการกระจาย โดยให้แกน X คือลำดับของข้อมูล และแกน Y คือส่วนตกค้างของข้อมูล ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



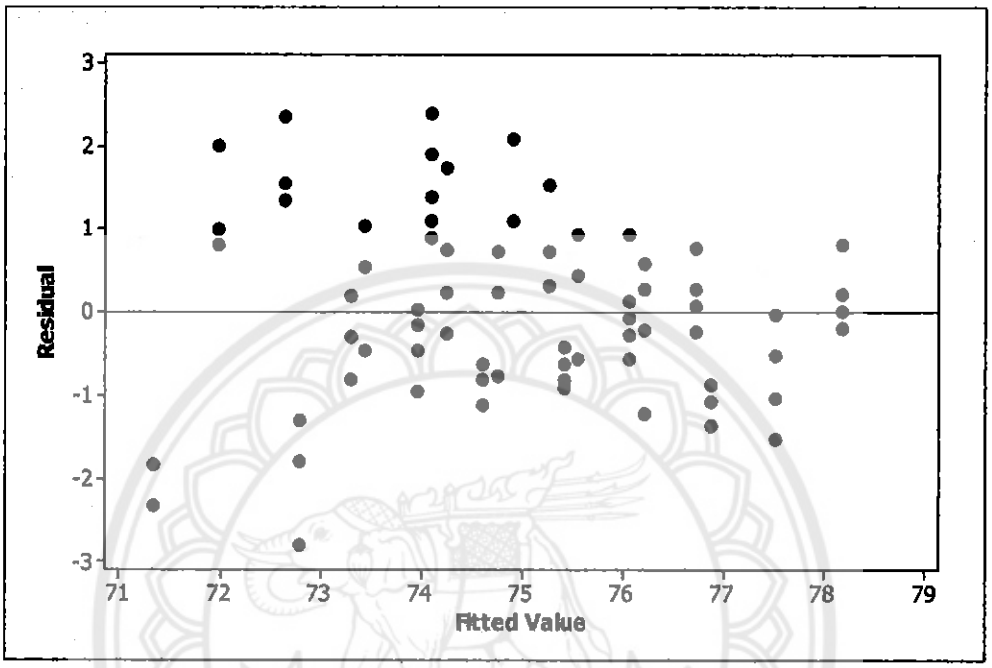
รูปที่ 4.5 แสดงค่าส่วนตกค้างกับจำนวนข้อมูลของชิ้นงานที่ 10% Cold Work



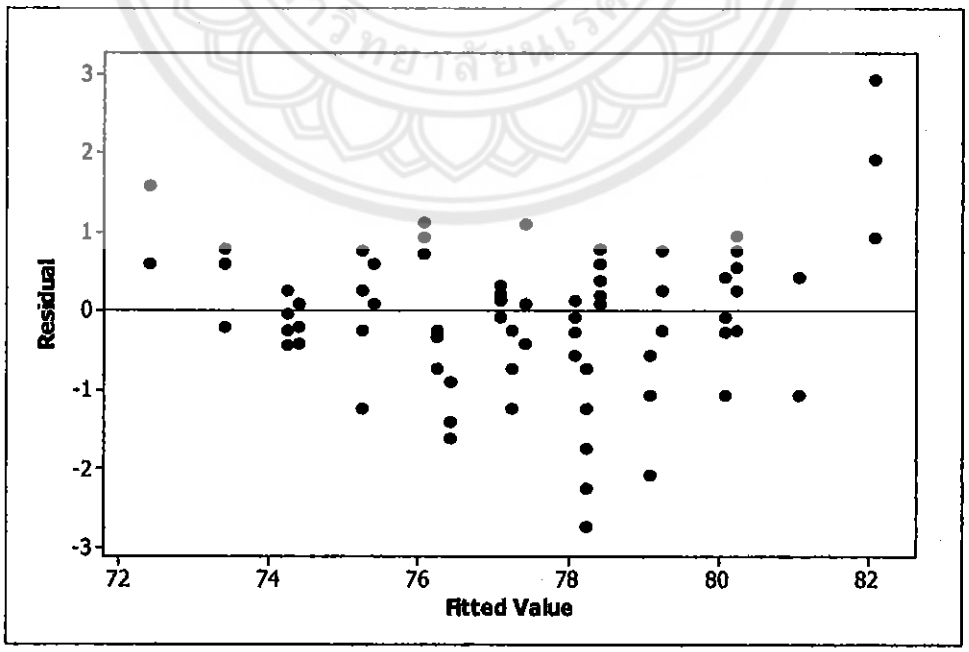
รูปที่ 4.6 แสดงแสดงค่าส่วนตกค้างกับจำนวนข้อมูลของชิ้นงานที่ 20% Cold Work

4.3.1.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

โดยใช้แผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ระดับปัจจัย พบว่าส่วนตกค้างของข้อมูลของผลการทดลองมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 แสดงค่าส่วนตกค้างกับค่าเฉลี่ยค่าความแข็งของชิ้นงานที่ 10% Cold Work



รูปที่ 4.8 แสดงค่าส่วนตกค้างกับค่าเฉลี่ยค่าความแข็งของชิ้นงานที่ 20% Cold Work

4.3.2 การทดสอบความแปรปรวนของข้อมูล

การทดสอบความแปรปรวนของปัจจัย คือ อุณหภูมิและเวลา ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของทองเหลืองหลังผ่านการตกผลึกใหม่ ที่ผ่านการรีดเย็นที่ 10% และ 20% Cold Work โดยทำการพิจารณาค่านัยสำคัญ (Sig.) จะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ถ้าค่านัยสำคัญน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (α=0.05) และยอมรับสมมุติฐานหลัก (H_0) ถ้าค่านัยสำคัญมากกว่าระดับนัยสำคัญ (α=0.05)

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น

10% Cold Work

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F	Sig.
TEMP	51080.816	2	25540.408	123103.547	.000
TIME	88553.819	6	14758.970	71137.530	.000
TEMP * TIME	12354.593	12	1029.549	4962.379	.000
Error	7620.200	36729	.207		
Total	204739549.000	36750			

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 10% Cold Work ที่มีค่านัยสำคัญ (Sig.) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปได้ว่า

1. ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 1 คือ เวลา

H_0 คือ เวลาในการอบให้ความร้อนชิ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็ง

H_1 คือ เวลาในการอบให้ความร้อนชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็ง

ค่านัยสำคัญ $= 0.000 < 0.05$ จึง ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 นั่นคือ ความแปรปรวนของเวลาในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อความแข็งของทองเหลือง ซึ่งทำให้ความแข็งของทองเหลืองเปลี่ยนไป เมื่อเวลาในการอบชิ้นงานเปลี่ยนไป .

2. ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 2 คือ อุณหภูมิ

H_0 คือ อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนชิ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็ง

H_1 คือ อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็ง

ค่านัยสำคัญ $= 0.000 < 0.05$ จึง ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 นั่นคือ ความแปรปรวนของอุณหภูมิในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อความแข็งของทองเหลือง ซึ่งทำให้ความแข็งของทองเหลืองเปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิในการอบชิ้นงานเปลี่ยนไป

3. ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 3 คือ อุณหภูมิและเวลา

H_0 คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนชิ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็ง

H_1 คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็ง

ค่านัยสำคัญ $= 0.000 < 0.05$ จึง ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 คือ ความแปรปรวนของความสัมพันธ์ร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อความแข็งของทองเหลือง ซึ่งทำให้ความแข็งของทองเหลืองเปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบชิ้นงานเปลี่ยนไป

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น

20% Cold Work

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F	Sig.
TEMP	80878.433	2	40439.216	205639.361	.000
TIME	158983.890	6	26497.315	134742.743	.000
TEMP * TIME	7727.110	12	643.926	3274.458	.000
Error	7222.800	36729	.197		
Total	218521571.500	36750			

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 20% Cold Work ที่มีค่านัยสำคัญ (Sig.) ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 สรุปได้ว่า

สมมติฐานคือ

1. ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 1 คือ เวลา

H_0 คือ เวลาในการอบให้ความร้อนชิ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็ง

H_1 คือ เวลาในการอบให้ความร้อนชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็ง

ค่านัยสำคัญ $= 0.000 < 0.05$ จะปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 นั่นคือ ความแปรปรวนของเวลาในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อความแข็งของทองเหลือง ซึ่งทำให้ความแข็งของทองเหลืองเปลี่ยนไป เมื่อเวลาในการอบชิ้นงานเปลี่ยนไป

2. ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 2 คือ อุณหภูมิ

H_0 คือ อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนชิ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็ง

H_1 คือ อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็ง

ค่านัยสำคัญ $= 0.000 < 0.05$ จะปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 นั่นคือ ความแปรปรวนของอุณหภูมิในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อความแข็งของทองเหลือง ซึ่งทำให้ความแข็งของทองเหลืองเปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิในการอบชิ้นงานเปลี่ยนไป

3. ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 3 คือ อุณหภูมิและเวลา

H_0 คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนชิ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็ง

H_1 คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็ง

ค่านัยสำคัญ $= 0.000 < 0.05$ จะปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 นั่นคือ ความแปรปรวนของความสัมพันธ์ร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อความแข็งของทองเหลือง ซึ่งทำให้ความแข็งของทองเหลืองเปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบชิ้นงานเปลี่ยนไป

4.3.3 ตรวจสอบการถดถอยของข้อมูล

4.3.3.1 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 10% Cold Work

เมื่อนำค่าความแข็งวิเคราะห์ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 10% Cold Work

Predictor	Coef.	P - value
Constant	82.505	0.000
temp	-0.0109	0.0206
time	0.04073	0.0396
temp*time	-0.0003036	0.027
Std. Error of the Estimate = 1.13251		
R-Sq = 72.1%		

จากตารางวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 10% Cold Work สรุปได้ว่า

ค่า R Square = 72.1% คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด มีค่าเข้าใกล้ 100% แสดงว่าอุณหภูมิและเวลามีอิทธิพลต่อความแข็ง ดังนั้น สมการถดถอยมีความเหมาะสมที่จะนำไปให้งานได้มาก

ค่า Std. Error of the Estimate = 1.1325 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ตัวแปรผลคือความแข็งด้วยตัวแปรเหตุคืออุณหภูมิและเวลา ค่าของความแข็งจะมีความคลาดเคลื่อนด้วยตัวแปรอิสระอื่นๆ ประมาณ 1.13251 HRB

จากการคำนวณค่าการถดถอยของตัวแปร อุณหภูมิกับเวลา ที่มีผลต่อความแข็ง จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์เป็นสมการถดถอยเชิงพหุที่ระดับนัยสำคัญที่ 95% ดังสมการต่อไปนี้

hardness = 82.505 – 0.0109temp + 0.04073time -0.0003036temp*time

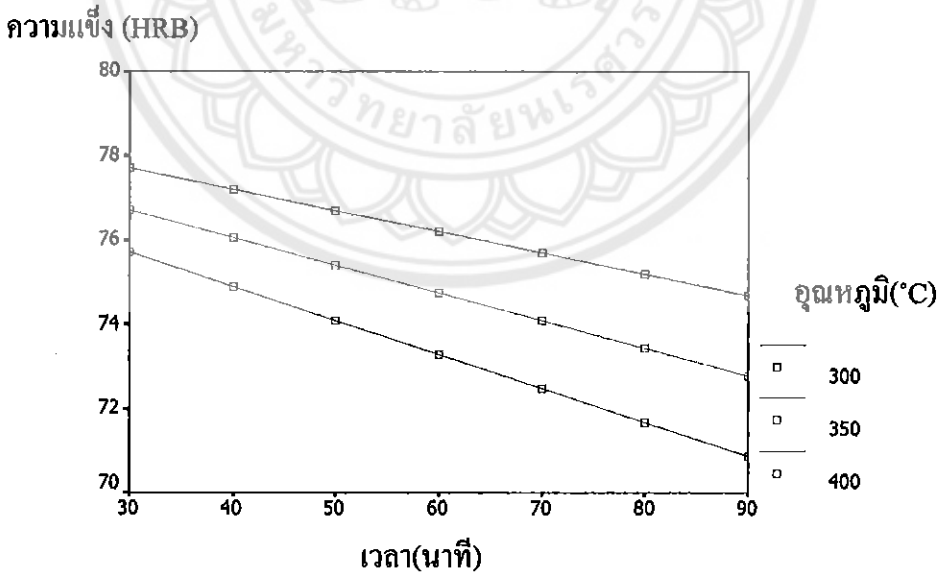
โดยที่ hardness = ค่าความแข็ง (HRB)

temp = ค่าของอุณหภูมิ (°C)

time = ค่าของเวลา (นาที)

เมื่อได้สมการถดถอยมาแล้ว ทำการแทนค่าย้อนกลับของอุณหภูมิและเวลาที่ได้กำหนดไว้ในการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบว่าค่าความแข็งจากการทดลองแตกต่างกันหรือไม่กับค่าความแข็งพยากรณ์ (คำนวณจากสมการถดถอย) จะได้ค่าความแข็งพยากรณ์จำนวน 105 ค่า

จากสมการถดถอย สามารถนำค่าของความแข็งจากการพยากรณ์ (คำนวณจากสมการถดถอย) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความแข็งจากการพยากรณ์ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น 10% Cold Work

ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและค่าความแข็งจากการพยากรณ์ ด้วยวิธี t-test

ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

1. ตั้งสมมติฐาน

H_0: ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งทั้ง 2 กลุ่มไม่แตกต่างกัน คือ $\mu_1 = \mu_2$

H_1 : ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งทั้ง 2 กลุ่มแตกต่างกัน คือ $\mu_1 \neq \mu_2$

2. กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ $\alpha = 0.05$

3. เลือกตัวสถิติที่เหมาะสม

ความแปรปรวนของค่าความแข็งเท่ากัน คือ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$

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

$$t = \frac{0.585}{\sqrt{\frac{(105)(129.5) - 0.342}{105-1}}}$$

$$t = 0.05$$

4. สร้างกฎการตัดสินใจ นั่นคือ ปฏิเสธ H_0 ถ้า $t_{(คำนวณ)} > t\,[0.05,105] \approx 1.983$ หรือ $t_{(คำนวณ)} < -t\,[0.05,105] \approx -1.983$ (ค่าได้จากตาราง t)

5. คำนวณค่าสถิติจากกลุ่มตัวอย่าง ค่า t = 0.05

6. ตัดสินและตีความ $t_{(คำนวณ)}$ คือ 0.05 < $t_{(ตาราง)}$ คือ 1.983 ดังนั้นจึงยอมรับ H_0 และปฏิเสธ H_1 ให้ผลว่า ค่าความแข็งของทั้งสองกลุ่มไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและค่าความแข็งจากการพยากรณ์แล้ว จะเห็นว่าค่าความแข็งทั้งสองกลุ่มไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและข้อมูลจากการพยากรณ์ซึ่งได้จากสมการถดถอยนั้นสอดคล้องกัน และสามารถนำสมการถดถอยนี้มาคำนวณหาค่าความแข็งพยากรณ์ได้

4.3.3.2 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 20% Cold Work

เมื่อนำค่าความแข็งวิเคราะห์ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางคณิตศาสตร์ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 20% Cold Work

Predictor	Coef.	P - value
Constant	100.078	0.000
temp	-0.048114	0.000
time	-0.16693	0.000
temp*time	0.0001914	0.089
Std. Error of the Estimate = 0.932797		
R-Sq = 88.2%		

จากตารางวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 20% Cold Work สรุปได้ว่า

ค่า R Square = 88.2% คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด มีค่าเข้าใกล้ 100% แสดงว่าอุณหภูมิและเวลามีอิทธิพลต่อความแข็ง ดังนั้น สมการถดถอยมีความเหมาะสมที่จะนำไปให้งานได้มาก

ค่า Std. Error of the Estimate คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ตัวแปรผลคือความแข็งด้วยตัวแปรเหตุคืออุณหภูมิและเวลา ค่าของความแข็งจะมีความคลาดเคลื่อนด้วยตัวแปรอิสระอื่นๆ ประมาณ 0.932797 HRB (Error of the Estimate = 0.932797)

จากการคำนวณค่าการถดถอยของตัวแปร อุณหภูมิกับเวลา ที่มีผลต่อความแข็ง จะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์เป็นสมการถดถอยเชิงพหุที่ระดับนัยสำคัญที่ 95% ดังสมการต่อไปนี้

hardness = 100 - 0.0481 temp - 0.167 time + 0.000191 temp*time

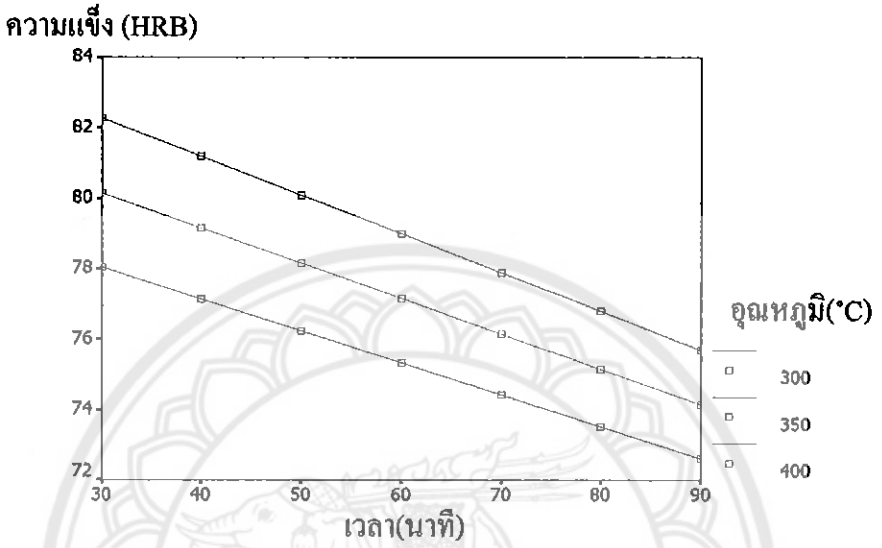
โดยที่ hardness = ค่าความแข็ง (HRB)

temp = ค่าของอุณหภูมิ (°C)

time = ค่าของเวลา (นาที)

เมื่อได้สมการถดถอยมาแล้ว ทำการแทนค่าย้อนกลับของอุณหภูมิและเวลาที่ได้กำหนดไว้ในการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบว่าค่าความแข็งจากการทดลองแตกต่างกันหรือไม่กับค่าความแข็งพยากรณ์ (คำนวณจากสมการถดถอย) จะได้ค่าความแข็งพยากรณ์จำนวน 105 ค่า

จากสมการถดถอย สามารถนำค่าของความแข็งจากการพยากรณ์ (คำนวณจากสมการถดถอย) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความแข็งจากการพยากรณ์ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น 20% Cold Work

ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและค่าความแข็งจากการพยากรณ์ ด้วยวิธี t-test

ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

1. ตั้งสมมติฐาน

   H_0 : ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งทั้ง 2 กลุ่มเท่ากัน คือ $\mu_1 = \mu_2$

   H_1 : ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งทั้ง 2 กลุ่มแตกต่างกัน คือ $\mu_1 \neq \mu_2$

2. กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ $\alpha = 0.05$

3. เลือกตัวสถิติที่เหมาะสม

   ความแปรปรวนของค่าความแข็งเท่ากัน คือ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$

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

$$t = \frac{8.92}{\sqrt{\frac{(105)(88.719) - 79.5664}{105-1}}}$$

$$t = 0.947$$

4. สร้างกฎการตัดสินใจ นั่นคือ ปฏิเสธ H_0 ถ้า $t_{(คำนวณ)} > t\,[0.05,105] \approx 1.983$ หรือ $t_{(คำนวณ)} < -t\,[0.05,105] \approx -1.983$ (ค่าได้จากตาราง t)

5. คำนวณค่าสถิติจากกลุ่มตัวอย่าง ค่า t = 0.947

6. ตัดสินและตีความ $t_{(คำนวณ)}$ คือ 0.947 < $t_{(ตาราง)}$ คือ 1.983 ดังนั้นจึง ยอมรับ H_0 และปฏิเสธ H_1 ให้ผลว่าค่าความแข็งของทั้งสองกลุ่มไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและค่าความแข็งจากการพยากรณ์แล้ว จะเห็นว่าค่าความแข็งทั้งสองกลุ่มไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและข้อมูลจากการพยากรณ์ซึ่งได้จากสมการถดถอยนั้นสอดคล้องกัน และสามารถนำสมการถดถอยนี้มาคำนวณหาค่าความแข็งพยากรณ์ได้

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนที่มีต่อค่าความแข็งของทองเหลืองที่ผ่านการรีดเย็น 10% และ 20% Cold Work สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. เมื่อนำชิ้นงานทองเหลืองที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส และที่เวลา 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 นาที มาแสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลากับค่าความแข็งของทองเหลือง พบว่าลักษณะกราฟที่ได้มีแนวโน้มของความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง แต่ยังมีบางจุดที่อยู่นอกแนวเส้นตรง ซึ่งเป็นจุดที่น่าจะเกิดจากการเบี่ยงเบนในการทดลอง ดังนั้น ก่อนที่จะนำข้อมูลชุดนี้ไปทำการวิเคราะห์เชิงสถิติในขั้นตอนต่อไป จึงมีการนำข้อมูลมาตรวจสอบเพื่อพิจารณาว่าข้อมูลชุดนี้มีความน่าเชื่อถือพอที่จะนำมาทำการวิเคราะห์เชิงสถิติหรือไม่ โดยการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ ตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน ซึ่งผลจากการตรวจสอบให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ ข้อมูลชุดนี้มีความน่าเชื่อถือพอที่จะนำไปวิเคราะห์เชิงสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยกำหนดให้ H_0 คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนชิ้นงานไม่มีผลต่อค่าความแข็งของทองเหลือง ให้ H_1 คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนชิ้นงานมีผลต่อค่าความแข็งของทองเหลือง จากทดสอบได้ค่านัยสำคัญ 0.000 น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 พบว่าอุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของทองเหลือง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หมายความว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบชิ้นงานเปลี่ยนไป จะทำให้ความแข็งของทองเหลืองเปลี่ยนไปด้วย

3. วิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้สมการถดถอย คือ hardness = 82.505 – 0.0109temp + 0.04073time -0.0003036temp*time ซึ่งมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 72.1% แสดงว่าสมการนี้มีความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์อยู่ในระดับค่อนข้างสูง อยู่ในขั้นที่สามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์ความสัมพันธ์ได้ จากนั้นทำการแทนค่าย้อนกลับของอุณหภูมิและเวลาที่ได้กำหนดไว้ในการทดลองลงในสมการ แล้วนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความแข็งจากการทดลองและค่าความแข็งจากการพยากรณ์ด้วยวิธี t-test พบว่าค่าความแข็งทั้งสองกลุ่มไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าสมการถดถอยที่ได้จากโครงงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือพอที่จะนำไปใช้งานในการพยากรณ์ได้ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาการรีดเย็นที่ %Cold Work อื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อศึกษาแนวโน้มของค่าความแข็งของชิ้นงานทองเหลือง

2. ทำการวัดอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ เพื่อควบคุมไม่ให้ชิ้นงานเกิดความแปรปรวนของค่าความแข็งจากการปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง

3. ทำการศึกษาโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ เช่น SPSS, MINITAB เพิ่มเติม เพื่อสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

4. ศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของทองเหลืองเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความรู้เกี่ยวกับค่าความแข็งของทองเหลือง

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน

ชื่อ นางสาวรักษิณา พูลทวี

ภูมิลำเนา 358/1 หมู่ 4 ต. วังทอง อ. วังทอง จ. พิษณุโลก

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพุทธชินราชพิทยา
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: **janrak_1546@hotmail.com**

ชื่อ นางสาวอรุยา อริยโสภารักษ์

ภูมิลำเนา 263 หมู่ 7 ต. นิคมเขาบ่อแก้ว อ. พยุหะคีรี จ. นครสวรรค์

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนลาซาลโชติรวี นครสวรรค์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: **kealjung_34@hotmail.com**

เอกสารอ้างอิง

จงกล. (2525). **โลหะวิทยาเบื้องต้นและวัสดุวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า.

William D. Callister, Jr. (2548). **วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน**. กรุงเทพฯ: บริษัทสำนักพิมพ์ท้อป จำกัด.

รศ.แม้น อมรสิทธิ์,รศ.ดร.สมชัย อัครทิวา,อ.ธรรมนูญ อุดมมั่น. (2551).**วิศวกรรมอุตสาหการ**. กรุงเทพฯ: มหานครสำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล.

ดร.ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา,สาโรช ฐิติเกียรติพงศ์. (2535).**วัสดุในงานวิศวกรรม**.กรุงเทพฯ: บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.

มานพ ตันตระบัณฑิตย์. (2546).**งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม**.กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).

ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2546).เอกสารคำสอนการออกแบบการทดลอง. ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ . มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

American society for testing and materials, 2006, "ASTM B179_96 : Standard specification for aluminum alloys in ingot and molten farms for castings for castings from all casting processes", Annual Book of ASTM standards, Val. 03.01, Philadelphia, ASTM, pp.5.

วิทยา รุ่งเจริญวัฒนา. (2550). **การใช้การออกแบบการทดลองในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียในขบวนการผลิตชิ้นส่วน C/M/CP-CAR**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2552, จาก http://tdc.thailis.or.th/tdc/search_result.php

อังคาร พงษ์ไพบูลย์. (2543). **ผลของปริมาณการรีดเย็น และอุณหภูมิการอบอ่อนต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2552, จาก http://tdc.thailis.or.th/tdc/browse.php?option=show&browse_type=title&titleid=63306&query=recrystallization&s_mode=all&date_field=&date_start=&date_end=&limit_lang=&limited_lang_code=&order=&order_by=&order_type=&result_id=4&maxid=5

ปิยะพร สินสุก. (2549). **ผลกระทบของการรีดคลิสตัลไลเซชันและการขยายขนาดเกรนต่อการเกิดแอนนีลลิงทวินในเหล็กกล้าไร้สนิม 304**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2552, จาก http://tdc.thailis.or.th/tdc/browse.php?option=show&browse_type=title&titleid=62660&query=recrystallization&s_mode=all&date_field=&date_start=&date_end=&limit_lang=&limited_lang_code=&order=&order_by=&order_type=&result_id=1&maxid=5

สืบค้นเมื่อวันที่ 28 มิถุนายน 2552 จาก http://www.pteonline.org/img-lib/staff/file/komson_000199.pdf.

สืบค้นเมื่อวันที่ 28 มิถุนายน 2552 จาก http://boy.techno.skru.ac.th/Manufacturing %20Process /Power%20Point/CH7.pdf

สืบค้นเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน 2552 จาก http://pirun.ku.ac.th/~b4755089/CU.html

สืบค้นเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน 2552 จาก http://app.eng.ubu.ac.th/~edocs/f20090602 sukangkanal18.pdf

สืบค้นเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน 2552 จาก http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/chaptor_6/fabrication.doc

สืบค้นเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน 2552 จาก http://engineeringman.blogspot.com/2008/12/blog-post_17.html

สืบค้นเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน 2552 จาก http://pirun.ku.ac.th/~b4755160/rolling.html

สืบค้นเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน 2552 จาก http://www.sut.ac.th/Engineering/Metal/pdf/PhyMet_1/7.%20Recovery,%20Recrystallization%20and%20Grain%20Growth.pdf

สืบค้นเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน 2552 จาก http://www.sut.ac.th/Engineering/Metal/pdf/PhyMet_1_49/05_Rocovery_Recrystallization_Grain_Growth.pdf