การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อข้อบกพร่อง ในงานหล่อแบบทรายชื้น

DESIGN OF EXPERIMENT TO STUDY FACTOR THE CASTING DEFECT IN THE SAND CASTING

นายกิตติศักดิ์ ชูเขียว รหัส 52360058

นายโกศล พันเทียน รหัส 52360072

บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 24 ก.ค. 2556
เลขทะเบียน 163159
เลขเรียกหนังสือ วร
มหาวิทยาลัยนเรศวร
2556

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2555

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทรายชื้น	
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายกิตติศักดิ์ ชูเขียว	รหัส 52360058
	นายโกศล พันเทียน	รหัส 52360072
ที่ปรึกษาโครงงาน	อาจารย์กานต์ ลี่วัฒนายิ่งยง	
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	
ปีการศึกษา	2555	

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

.....ที่ปรึกษาโครงงาน
(อาจารย์กานต์ ลี่วัฒนายิ่งยง)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร. สมลักษณ์ วรรณฤมล)

.....กรรมการ
(ผศ. ศรีสัจจา วิทยศักดิ์)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทรายชื้น
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายกิตติศักดิ์ ชูเขียว รหัส 52360058
	นายโกศล พันเทียน รหัส 52360072
ที่ปรึกษาโครงงาน	อาจารย์กานต์ ลี่วัฒนายิ่งยง
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทรายที่มีผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทรายชื้น ซึ่งผู้จัดทำโครงงานได้ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล และทำการทดลองแบบสองปัจจัย โดยปัจจัยที่ 1 คือ อุณหภูมิเท ที่ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่ 2 คือ ความแข็งของแบบทราย ที่ 70, 75 และ 80 ผลของการทดสอบความแปรปรวน พบว่า อุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดรูพรุนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วนค่าความแข็งของแบบไม่มีผลต่อการเกิดรูพรุนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เมื่อนำอุณหภูมิเทมาวิเคราะห์การถดถอย ทำให้ได้สมการถดถอยของอุณหภูมิเทที่ผลต่อการเกิดรูพรุน โดยความเหมาะสมในการนำสมการถดถอยไปใช้งานสามารถพิจารณาได้จากค่า R – sq (adj) ซึ่งค่า R – sq (adj) มีค่าเท่ากับ 0.845 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 ทำให้สมการถดถอยที่ได้มีความสัมพันธ์ในระดับที่ดี หรือสามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์ได้ และจากการทดสอบความแปรปรวนของอุณหภูมิเท พบว่าอุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัวที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วนความแข็งของแบบทรายไม่มีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัวที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นผู้จัดทำโครงการได้ทำการวิเคราะห์ถดถอย แต่เมื่อได้สมการถดถอยแล้วเมื่อพิจารณาค่า R – sq (adj) มีความสัมพันธ์กันต่ำ ทำให้ผู้จัดทำโครงงานได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยใหม่ โดยเปลี่ยนจากการถดถอยเชิงเส้นตรงเป็นการถดถอยแบบ Quadratic Model แล้วพิจารณาค่า R – sq (adj) มีค่าเท่ากับ 0.782 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 ทำให้สมการถดถอยที่ได้มีความสัมพันธ์ในระดับที่ดี หรือสามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ของอาจารย์กานต์ ลี่วัฒนายิ่งยง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และวิธีแก้ไขปัญหาต่างๆ ในการทำโครงงานมาโดยตลอด และขอขอบคุณอาจารย์ศรีสัจจา วิทยศักดิ์ อาจารย์สมลักษณ์ วรรณฤมล อาจารย์ทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์ อาจารย์ธณิกานต์ ธงชัย และอาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ ที่ได้ให้ความรู้เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณ อาจารย์ประเทือง โมรารายที่คอยให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และ ช่วยชี้แนะแนวทางที่ถูกต้องพร้อมทั้งชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหาในการทำโครงงาน รวมถึงครูช่างในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และให้ความอนุเคราะห์ในการให้อุปกรณ์เครื่องมือในการดำเนินโครงงานตลอด

ท้ายนี้ ผู้จัดทำโครงงานใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การดูแล และอบรมสั่งสอน และกำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดการดำเนินโครงงานจนสำเร็จการศึกษา

ผู้จัดทำโครงงาน
นายกิตติศักดิ์ ชูเขียว
นายโกศล พันเทียน
มกราคม 2556

สารบัญ

หน้า

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

บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 หลักการและเหตุผล.....1
1.2 วัตถุประสงค์.....1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน.....1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ.....2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงงาน.....2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงงาน.....2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงงาน.....2
1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงงาน.....3

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....4
2.1 การทำแบบหล่อทรายชื้น.....4
2.2 ข้อบกพร่องที่เกิดในชิ้นงาน.....8
2.3 ทรายหล่อ.....10
2.4 การทดสอบหาค่าความแข็งของแบบทราย.....12
2.5 การออกแบบการทดลอง.....13
2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ.....17
2.7 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องของชิ้นงาน.....23
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ....26

3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล....27

3.2 การออกแบบการทดลอง....27

3.3 การทดลองและบันทึกผลการทดลอง....29

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ....35

3.5 สรุปผลการทดลอง....36

3.6 จัดทำรูปเล่มโครงงานฉบับสมบูรณ์....36

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์....37

4.1 ผลการศึกษาและรวบรวมข้อมูล....37

4.2 ผลการออกแบบการทดลอง....37

4.3 ผลการทดลอง....39

4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ....40

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ....51

5.1 สรุปผล....51

5.2 ข้อเสนอแนะ....52

เอกสารอ้างอิง....53

ภาคผนวก....54

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน....60

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 หีบหล่อ....4

2.2 ที่เป่าลม....5

2.3 แปรงขนอ่อน....5

2.4 เหล็กขอตักทราย....5

2.5 ช้อนใบไม้....6

2.6 ตะแกรง....6

2.7 กระสวนรูเท....6

2.8 เกรียง....7

2.9 เหล็กแทงรูไอ....7

2.10 ที่กระทุ้งทรายแบบลิ่ม....7

2.11 แท่งไม้ตรง....8

2.12 เครื่อง Sand Mold Hardness Tester....13

2.13 วิธีปฏิบัติต่างๆ ในการออกแบบการทดลอง....14

2.14 เขตวิกฤตสมมติฐานทางเดียว $H_1: \mu > \mu_0$....16

2.15 เขตวิกฤตสมมติฐานทางเดียว $H_1: \mu < \mu_0$....17

2.16 เขตวิกฤตสมมติฐานสองทาง $H_1: \mu \neq \mu_0$....17

2.17 ตัวอย่างการกระจายแบบปกติของข้อมูล....18

2.18 ตัวอย่างความเป็นอิสระของข้อมูล....18

2.19 ตัวอย่างความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล....19

2.20 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ $S_{YX} > 0$....22

3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินโครงงาน....26

3.2 การนำกระสวนมาวางลงในหีบหล่อ....29

3.3 การนำทรายมาใส่ในหีบหล่อ....29

3.4 การนำทรายมาใส่ในหีบหล่อแล้วกระทุ้งทราย....30

3.5 การปาดทรายที่เกินจากหีบหล่อ....30

3.6 การพลิกหีบหล่อ....30

3.7 การนำทรายละเอียดมาโรยบริเวณผิวแบบ....30

3.8 การสร้างรูเท....31

3.9 การนำทรายมาใส่ลงไปในหีบหล่อ....31

3.10 การปาดทรายที่เกินจากหีบหล่อ....31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.11 การใช้ช้อนรูปใบไม้แต่งรอบๆ รูเท.....32

3.12 การเป่าลมเศษทราย.....32

3.13 การเอากระสวนรูเทออกจากหีบหล่อ.....32

3.14 การพลิกหีบหล่อหงายขึ้น.....32

3.15 การวัดค่าความแข็งของแบบทราย.....33

3.16 การนำกระสวนออกจากแบบทราย.....33

3.17 การแต่งทางเดินของน้ำโลหะ.....33

3.18 การเทน้ำอลูมิเนียมลงในแบบทราย.....34

3.19 การรอให้ชิ้นงานเย็นตัว.....34

3.20 การแกะชิ้นงานออกจากแบบทราย.....34

3.21 ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อแบบทราย.....34

4.1 กราฟการกระจายแบบปกติของข้อมูล.....40

4.2 กราฟความเป็นอิสระของข้อมูล.....41

4.3 กราฟความเสถียรของความแปรปรวน.....41

4.4 แสดงการวิเคราะห์การถดถอย.....46

4.5 กราฟแสดงเกณฑ์การตัดสินใจ.....49

4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย
ที่มีผลต่อการเกิดรูพรุน.....50

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ตารางขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงงาน....3

2.1 ข้อบกพร่องในงานหล่อทรายชื้น....8

2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย....21

3.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง....35

4.1 ตารางแสดงค่าของการเกิดรูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัว....39

4.2 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของรูพรุน....42

4.3 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของโพรงที่เกิดจากการหดตัว....42

4.4 ตารางการวิเคราะห์การถดถอยของโพรงที่เกิดจากการหดตัว....45

4.5 การวิเคราะห์การถดถอยของรูพรุน....47

4.6 ตารางแสดงค่าจากการพยากรณ์....48

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการทำโครงงาน

กระบวนการหล่อด้วยแบบทรายมีความสำคัญเป็นอันดับต้นๆ ในกระบวนการผลิต งานหล่อแบบทรายเป็นงานหล่อใช้ทรายทำแบบ โดยในปัจจุบันงานหล่อแบบทรายเป็นวิธีการที่นิยมใช้ เนื่องจากมีการใช้งานได้ในหลากหลายด้าน สามารถหล่อชิ้นงานได้เกือบทุกชนิด หล่อชิ้นงานที่มีน้ำหนักแตกต่างกันได้ไม่จำกัด ทรายสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และยังสามารถผลิตในปริมาณมากได้ เป็นกรรมวิธีที่มีการผลิตที่มีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงมาก ขั้นตอนในการหล่อไม่ยุ่งยาก แต่ในงานหล่อแบบทรายยังมีข้อบกพร่องอยู่มาก ยกตัวอย่างเช่น การเกิดรูพรุน สาเหตุเกิดจากมีแก๊สปะปนอยู่ในน้ำโลหะมาก และแก๊สก็ระบายออกไม่ทันเพราะว่าทรายที่นำมาทำแบบมีความละเอียดมาก หรือแบบนั้นแน่นเกินไปทำให้แก๊สระบายออกมาไม่ดีพอ รวมถึงอุณหภูมิเทที่ต่ำเกินไป จึงส่งผลทำให้ชิ้นงานนั้นเกิดรูพรุน และข้อบกพร่องอีกอย่างก็คือ โพรงที่เกิดจากการหดตัว สาเหตุหลักๆ เกิดจากการแข็งตัวของน้ำโลหะจะแข็งตัวจากด้านที่บางเมื่อด้านที่บางนั้นแข็งตัวแล้ว ก็จะดึงน้ำโลหะที่หนามาเติมจึงทำให้เกิดเนื้อโลหะของชิ้นงานนั้นหายไป หรืออาจเกิดจากอุณหภูมิเทที่ใช้ต่ำเกินไป ทำให้รูล้นแข็งตัวเร็วจึงป้อนน้ำโลหะได้ยาก จากข้อบกพร่องดังกล่าวนี้หากนำมาวิเคราะห์แล้วจะทำให้เห็นถึงปัจจัยหลักๆ ที่ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องก็คือ อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ซึ่งในแต่ละข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้นก็จะมีค่าของอุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทรายที่ใช้แตกต่างกันออกไป

ด้วยเหตุดังกล่าวข้างต้นนี้ ผู้จัดทำโครงงานจึงเล็งเห็นถึงปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดข้อบกพร่องต่อชิ้นงานในการหล่อแบบทรายคือ อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย เพื่อจะนำมาวิเคราะห์ออกแบบการทดลอง ศึกษาผลของอุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ที่มีต่อข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทราย เพื่อนำไปสู่กระบวนการปรับปรุงชิ้นงานในงานหล่อให้มีข้อบกพร่องน้อยที่สุด และประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

เพื่อศึกษาอุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ที่มีผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทราย

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

ผลของอุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ที่มีผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทราย

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ที่มีผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทราย

1.5 ขอบเขต

1.5.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1.5.1.1 กระบวนการหล่อที่ใช้ คือ การหล่อด้วยวิธีการหล่อแบบทราย

1.5.1.2 อลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง จะใช้อลูมิเนียมร้อยละ 99.99

1.5.1.3 ทรายที่ใช้ในกระบวนการหล่อผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

1.5.2 ปัจจัยที่ใช้ในการทำการทดลอง

1.5.2.1 อุณหภูมิเท คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส

1.5.2.2 ความแข็งของแบบทราย คือ 70, 75 และ 80

1.5.3 ศึกษาลักษณะของชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่อง

1.5.3.1 รูพรุน

1.5.3.2 โพรงที่เกิดจากการหดตัว

1.5.4 กระบวนการหล่อ และการวิเคราะห์ข้อมูล

1.5.4.1 จำนวนการแทงรูไออยู่ที่ 10 - 15 รู ต่อแบบ 1 อัน

1.5.4.2 การวัดความแข็งของแบบทรายจะวัด 12 จุด

1.5.4.3 ความชื้นของแบบทรายที่ร้อยละ 2.8

1.5.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติใช้โปรแกรม MINITAB

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงงาน

อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงงาน

เดือนมิถุนายน 2555 – เดือนมกราคม 2556

1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงงาน

การดำเนินโครงงาน	มิ.ย		ก.ค.		ส.ค		ก.ย.		ต.ค.		พ.ย.		ธ.ค.		ม.ค.	
1.8.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล	◄	►														
1.8.2 กำหนดปัญหาและวิธีแก้ไข			◄	►	►											
1.8.3 ออกแบบการทดลอง					◄	►	►									
1.8.4 ทดลองและเก็บผลการทดลอง							◄	►	►		►					
1.8.5 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ											◄	►	►			
1.8.6 สรุปผลการทดลอง													◄	►	►	
1.8.7 จัดทำรูปเล่มโครงงานฉบับสมบูรณ์															◄	►

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 การทำแบบหล่อทรายชื้น (Green Sand Molding)

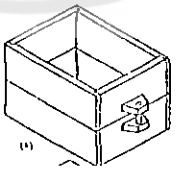
การทำแบบหล่อทรายชื้นเป็นวิธีการหล่อชิ้นงานที่ทำกันมานานแล้ว โดยเป็นกรรมวิธีที่อาศัยความชื้นจากทรายเป็นตัวช่วยที่ทำให้แบบทรายแข็งแรง โดยที่ความชื้นที่มีอยู่ในทรายหล่อ รวมไปถึงแบบทรายที่ยังไม่แข็งหรือไม่แห้ง ทรายหล่อนั้นจะประกอบด้วย ทรายซิลิกาผสมกับดินเหนียว ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน การทำแบบทรายจะอาศัยหีบหล่อช่วยเป็นกรอบเพื่อให้แบบทรายสามารถคงรูปอยู่ได้ ซึ่งหีบหล่ออาจทำมาจากโลหะ หรือไม้ก็ได้ หีบหล่อจะประกอบด้วยหีบบน และหีบล่างสำหรับงานทำแบบทรายหนึ่งชุด การทำแบบทรายโดยวิธีนี้มีทั้งการทำโดยใช้เครื่องจักร และการทำแบบทรายโดยใช้มือ ลักษณะของแบบหล่อทรายชื้นนั้นจะประกอบไปด้วย รูเท ซึ่งจะทำหน้าที่รับโลหะหลอมเหลวจากอ่างเท เพื่อให้เข้าสู่ทางเดินของน้ำโลหะ จากนั้นทางเดินของน้ำโลหะจะทำหน้าที่ในการรับโลหะหลอมเหลวให้เข้าสู่แบบทราย ส่วนรูล้น ทำหน้าที่ในการเติมเต็มโลหะหลอมเหลวให้เต็มแบบทราย เป็นต้น (สุริยา 2553)

2.1.1 อุปกรณ์ในการหล่อแบบทรายชื้น

อุปกรณ์ในการหล่อแบบทรายชื้นเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแบบทราย เพื่อที่จะนำแบบทรายไปใช้ในการหล่อชิ้นงาน ซึ่งอุปกรณ์แต่ละชนิดก็จะทำหน้าที่แตกต่างกัน ดังนี้

2.1.1.1 หีบหล่อ (Flask)

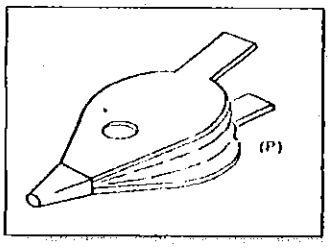
หีบหล่อ เป็นกล่อง หรือภาชนะบรรจุทรายที่ล้อมรอบทรายเอาไว้ ขณะที่ทรายถูกกระทุ้งรอบๆ กระสวน โดยทั่วไปหีบหล่อมีอยู่ 2 ชั้น คือ หีบหล่อบน และหีบหล่อล่าง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หีบหล่อ
ที่มา : บัณฑิต ใจชื่น (2527)

2.1.1.2 ที่เป่าลม (Bellows)

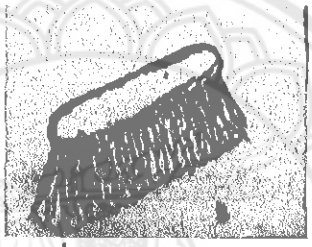
ที่เป่าลมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป่าทราย หรือสิ่งสกปรกออกจากกระสวน และโพรงในแบบทราย ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ที่เป่าลม
ที่มา : บัณฑิต ใจชื่น (2527)

2.1.1.3 แปรงขนอ่อน (Soft Brush)

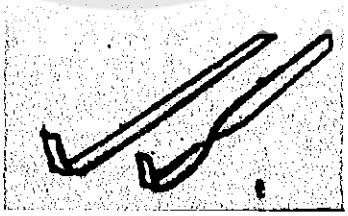
แปรงขนอ่อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปัดสิ่งสกปรกออกจากกระสวน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แปรงขนอ่อน
ที่มา : บัณฑิต ใจชื่น (2527)

2.1.1.4 เหล็กขอตักทราย (Lifter)

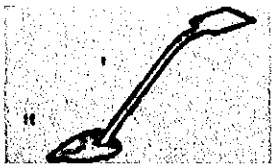
เหล็กขอตักทรายเป็นอุปกรณ์ที่ทำด้วยเหล็กแข็ง มีลักษณะงอปลายเป็นมุมฉาก ใช้ตักเศษทราย หรือสิ่งสกปรกออกจากแบบทราย และใช้ซ่อมผิวหน้าแบบที่เป็นซอกแบบลึก ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เหล็กขอตักทราย
ที่มา : บัณฑิต ใจชื่น (2527)

2.1.1.5 ช้อนใบไม้ (Heart and Square)

ช้อนใบไม้มีลักษณะเป็นรูปช้อนด้านหนึ่งมีลักษณะคล้ายหัวใจ อีกด้านหนึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยม ใช้แต่งผิวแบบทรายหลังจากถอดกระสวนออกแล้ว ดังรูปที่ 2.5

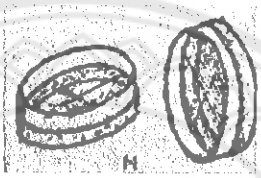


รูปที่ 2.5 ช้อนใบไม้

ที่มา : บัณฑิต ใจชื่น (2527)

2.1.1.6 ตะแกรง (Riddles)

ตะแกรงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ร่อนทราย เพื่อแยกสิ่งสกปรกออก หรือแยกทรายละเอียดออกจากทรายหยาบ ดังรูปที่ 2.6

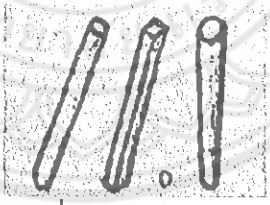


รูปที่ 2.6 ตะแกรง

ที่มา : บัณฑิต ใจชื่น (2527)

2.1.1.7 กระสวนรูเท (Runner Peg)

กระสวนรูเทเป็นแท่งไม้ (ส่วนมากเป็นทรงกลม) ผิวลาดเอียงใช้วางในหีบหล่อชั้นบนแล้วใส่ทรายลงไปรอบๆ เมื่อกระทุ้งได้ที่แล้วดึงแท่งไม้ออกจะได้รูเทตามต้องการ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระสวนรูเท

ที่มา : บัณฑิต ใจชื่น (2527)

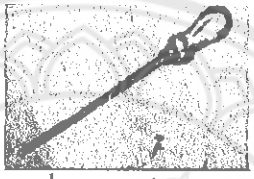
2.1.1.8 เกรียง (Trowels)

เกรียงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตกแต่งผิวหน้าแบบบริเวณกว้างๆ และใช้ตัดทางเดินน้ำ ดังรูปที่ 2.8

รูปที่ 2.8 เกรียง
ที่มา : บัณฑิต ใจชื่น (2527)

2.1.1.9 เหล็กแทงรูไอ (Vent Wire)

เหล็กแทงรูไอมีลักษณะเป็นแท่งกลมยาวแหลม ใช้แทงบนแบบทรายชั้นบนเพื่อระบายแก๊ส ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เหล็กแทงรูไอ
ที่มา : บัณฑิต ใจชื่น (2527)

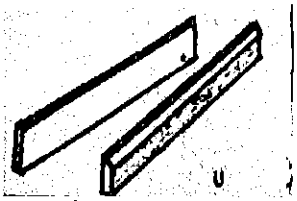
2.1.1.10 ที่กระทุ้งทรายแบบลิ่ม (Wedge Rammer)

ที่กระทุ้งทรายแบบลิ่มเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กระทุ้งทราย เพื่อทำแบบทรายตามซอกมุมเล็ก ดังรูปที่ 2.10

รูปที่ 2.10 ที่กระทุ้งทรายแบบลิ่ม
ที่มา : บัณฑิต ใจชื่น (2527)

2.1.1.11 แท่งไม้ตรง (Straight Edge)

แท่งไม้ตรง ส่วนมากมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าใช้ปาดทรายส่วนที่เกินออกมาจากแบบทรายเพื่อให้ได้ระดับ ดังรูปที่ 2.11



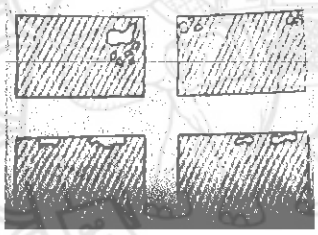
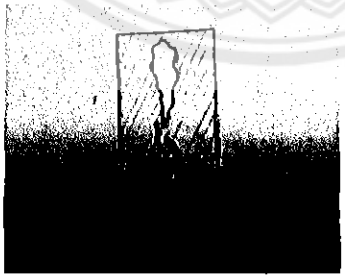
รูปที่ 2.11 แท่งไม้ตรง

ที่มา : บัณฑิต ใจชื่น (2527)

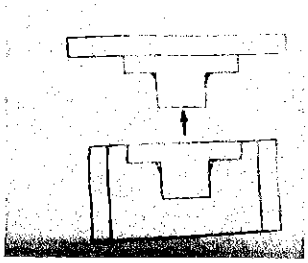
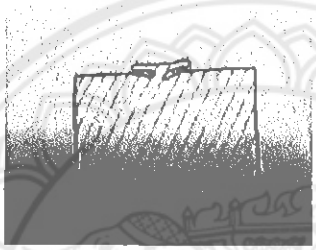
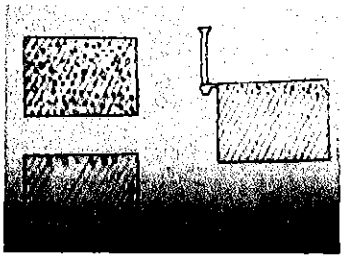
2.2 ข้อบกพร่องที่เกิดในชิ้นงาน

ข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทรายชื้นเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุแสดงดังตารางที่ 2.1 ดังนั้นเพื่อลดข้อบกพร่องจึงต้องหาสาเหตุ และเลือกปัจจัยในการทดลอง เพื่อจะลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน

ตารางที่ 2.1 ข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทรายชื้น

ชื่อข้อบกพร่อง	ลักษณะของข้อบกพร่อง	สาเหตุ	วิธีแก้ไข
1. รูพรุน		1. อุณหภูมิเทต่ำ 2. เทน้ำโลหะช้า 3. ความดันของน้ำโลหะน้อยเกินไป 4. การหลอมเหลวที่มีการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน	1. ในการหลอมโลหะจะต้องให้ได้โลหะหลอมเหลวบริสุทธิ์ 2. จะต้องวางรูเทให้ถูกต้อง และเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิสูงพอดี
2. โพรงที่เกิดจากการหดตัว		1. อุณหภูมิเทต่ำ 2. ความสูงของรูล้นน้อยเกินไป 3. ทำรูล้นออกมาไม่ดี 4. น้ำโลหะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้หดตัวมากเมื่อชิ้นงานแข็งตัว	1. การออกแบบรูล้น ควรวางไว้ตรงส่วนที่โลหะหลอมเต็มแบบหลังสุด 2. การใช้ทุ่นเย็นเพื่อเพิ่มขนาดของทางเดินน้ำโลหะ

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทรายชื้น

ชื่อข้อบกพร่อง	ลักษณะของข้อบกพร่อง	สาเหตุ	วิธีแก้ไข
3. ทรายติด กระสวน		1. กระทุ้งแบบทรายไม่แน่นพอ 2. ทรายละเอียดที่ใช้ในการถอดแบบไม่ดีพอ ทำให้ถอดแบบออกได้ยาก	1. ให้อุณหภูมิของทรายลดลงก่อนเอากระสวนออก 2. กระทุ้งแบบทรายให้แน่น 3. ใช้ทรายละเอียดอย่างดี
4. หางหนู		1. เทน้ำโลหะช้าเกินไป 2. อุณหภูมิเทน้ำโลหะสูงเกินไป 3. ทรายไม่สามารถทนต่อความร้อนได้สูง	1. เวลาเทน้ำโลหะต้องสั้น 2. กระทุ้งแบบทรายให้แน่น
5. รอยแตก		1. ใช้เวลานานในการเทน้ำโลหะมากเกินไป 2. การวางรูเทและรูล้นไม่เหมาะสม 3. อุณหภูมิเทน้ำโลหะต่ำ	1. เวลาเทน้ำโลหะต้องสั้น 2. จะต้องไม่ให้มีมุมแหลมของชิ้นงาน แต่ละมุมต้องมนตามที่กำหนด
6. รูเข็ม		1. อุณหภูมิเทน้ำโลหะต่ำ 2. เทน้ำโลหะช้า 3. ความดันของน้ำโลหะน้อยเกินไป 4. การหลอมเหลวที่มีการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน	1. หลีกเลี่ยงการหลอมโลหะเป็นเวลานานๆ 2. ให้ความร้อนแก่เตาหลอม และเบ้าหลอม

2.3 ทรายหล่อ

ในการหล่อแบบทราย ทรายที่จะนำมาใช้ทำเป็นแบบทรายควรเป็นทรายที่มีสมบัติ ดังนี้

2.3.1 สมบัติที่ดีของทรายหล่อ

2.3.1.1 สมบัติทางด้านความร้อน – กายภาพ (Thermal - Physical) เป็นสมบัติเกี่ยวกับการนำความร้อนหรือการส่งถ่ายความร้อน คือ เมื่อทรายได้รับความร้อนจะทำให้ทรายเกิดการขยายตัว ดังนั้น ทรายหล่อที่ดีต้องถ่ายเทความร้อนได้ดี และขยายตัวน้อยที่สุด

2.3.1.2 ความทนทานต่อความร้อน (Refractoriness) เป็นสมบัติของทรายหล่อที่ทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ โดยที่ทรายจะไม่หลอมละลาย

2.3.1.3 สมบัติของทรายเมื่อได้รับความร้อน (Character in Hot State)

ก. การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน (Hot Expansion) ทรายหล่อจะขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 575 องศาเซลเซียส

ข. ค่าความทนไฟ (Refract Oriness) ความทนไฟของทรายธรรมชาติจะอยู่ระหว่าง 1,000 – 1,250 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิที่ใช้สำหรับเทอลูมิเนียมจะอยู่ระหว่างประมาณ 660 – 1,200 องศาเซลเซียส

2.3.1.4 ความแข็งของแบบทรายที่อุณหภูมิห้อง (Strength at Room Temperature) มีอยู่ 2 แบบ ดังนี้

ก. ความแข็งแรงแบบทรายชื้น (Green Strength) เป็นความแข็งแรงในขณะที่แบบทรายยังมีความชื้นอยู่ ช่วยให้แบบทรายไม่แตกพังได้ง่าย เมื่อเคลื่อนย้ายหรือเทน้ำโลหะลงไป

ข. ความแข็งแรงแบบทรายแห้ง (Dry Strength) เป็นความแข็งแรงในขณะที่แบบทรายไม่มีความชื้นอยู่ เมื่อแบบทรายแห้งแล้วจะต้องมีความแข็งแรงพอที่จะคงรูปอยู่ได้ เมื่อเคลื่อนย้ายหรือเทน้ำโลหะลงไป

2.3.1.5 ความต้านทานต่อการเสียดสี (Wear Resistance) ทรายหล่อที่ดีจะต้องไม่หลุดร่วนหรือผุกร่อนได้ง่ายเมื่อได้รับการเสียดสีจากโลหะที่เทลงในแบบทราย

2.3.1.6 ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง (Strength at Elevated Temperatures) เมื่อเทน้ำโลหะลงไปในแบบทราย ทรายจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำโลหะ ที่สภาวะร้อนจัดนี้ ทรายหล่ออาจจะมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแข็งแรงถ้าความแข็งแรงของทรายหล่อลดลงเมื่อได้รับความร้อน แบบทรายจะพังหรือเสียหายได้

2.3.1.7 ความสามารถเปลี่ยนแปลงในการใช้งาน (Flexibility) ทรายหล่อที่ดีสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะได้ง่ายซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของงาน

2.3.1.8 ความไวต่อการแตกร้าว (Cracking Sensitivity) ทรายหล่อที่ดีจะต้องไม่มีการแตกร้าวเกิดขึ้น ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะใดๆ เช่น ร้อน แห้ง ชื้น ทรายหล่อที่เกิดจากการแตกร้าวง่ายจะทำให้ชิ้นงานเสียหายได้

2.3.1.9 การทำให้เกิดแก๊ส (Gas Formation) เป็นสมบัติที่เกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมีของทราย ตัวประสานและตัวเติมพิเศษที่ผสมในทรายหล่อ แก๊สจะเกิดขึ้นขณะที่ทรายหล่อได้รับความร้อน จึงทำให้ทรายที่เราควรเลือกใช้งานคือ ทรายที่ไม่ก่อให้เกิดแก๊สขึ้นในขณะที่เทโลหะลงไป เพราะถ้ามีแก๊สเกิดขึ้นมากโอกาสที่งานหล่อจะเสียก็มีมากขึ้น

2.3.1.10 อัตราลมผ่าน (Permeability) คือ ความสามารถของทรายหล่อที่ยอมให้แก๊สหรือไอหนีออกจากแบบทรายได้ บางทีเรียกกันว่ารูหายใจของแบบ ดังนั้นแบบทรายที่ดีต้องมีอัตราลมผ่านที่ดี คือ ยินยอมให้แก๊สหรือไอหนีออกจากแบบทรายได้ง่าย

2.3.1.11 ความสามารถทำให้เปียกชื้น (Humidity) คือ ความชื้นที่ผสมกันในทรายหล่อๆ ที่ทำให้ชื้นได้ยากจะเสียเวลาผสมนาน ซึ่งอาจจะทำให้เสียสมบัติด้านอื่นไป ดังนั้นทรายหล่อที่ดีต้องเป็นทรายที่ผสมให้ความเปียกชื้นได้ง่าย และต้องขึ้นอยู่กับตัวประสานด้วย

2.3.1.12 ปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reactivity) คือ ปฏิกิริยาทางเคมีของธาตุบางธาตุที่เกิดจากความร้อนของโลหะเหลวที่เทลงในแบบทราย ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของทรายหล่อลักษณะนี้ไม่ส่งผลดีกับชิ้นงาน ดังนั้นทรายหล่อที่ดีจึงไม่ควรมีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นขณะเทน้ำโลหะลงไปในแบบทราย นอกจากกรรมวิธีทำแบบทรายบางชนิดที่ต้องใช้ตัวประสานชนิดพิเศษ เพื่อทำให้แบบทรายแข็งตัวโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี

2.3.1.13 ความสามารถนำกลับมาใช้งาน (Reproductivity) คือ การนำทรายหล่อกลับมาใช้งานอีกครั้ง โดยเพิ่มสารบางอย่างเข้าไปเพื่อปรับคุณภาพให้ใช้งานได้ดังเดิม แต่บางชนิดถึงแม้จะสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก จะต้องเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าการซื้อทรายใหม่ ดังนั้นทรายหล่อที่ดีควรนำมาใช้งานใหม่ได้ และสามารถปรับปรุงคุณภาพให้ดีได้ดังเดิม

2.3.1.14 ความสามารถในการไหลตัว (Flow Ability) คือ การไหลตัวได้ง่ายของทรายหล่อจะสามารถไหลเข้าซอกมุมเล็กๆของแบบทรายได้ ส่งผลให้แบบทรายที่ได้มีมุมคม และรายละเอียดอย่างชัดเจน

2.3.1.15 ความทนทาน (Durability) ทรายหล่อเมื่อถูกใช้งานมากๆ เม็ดทรายจะเกิดการแตกหักหรือเกิดการหลุดร่อนไปบางเป็นส่วน ทำให้ขนาดทรายเล็กลง ส่งผลให้สมบัติของทรายเปลี่ยนไป ดังนั้นทรายหล่อที่ดีควรรักษาสภาพเดิมไว้ให้นานที่สุด

2.3.1.16 ความสามารถเป่าเข้าแบบทราย (Blow Ability) ทรายหล่อหรือทรายไส้แบบที่ใช้กับเครื่องจักร ควรจะมีความแข็งแรงด้านเฉือนต่ำๆ เพื่อเครื่องจะได้เป่าเข้าแบบทรายได้ง่าย ถ้าทรายมีความต้านทานต่อแรงเฉือนมากๆ จะทำให้เป่าเข้าแบบทรายได้ยาก

2.3.1.17 การติดกับแบบทราย (Adherence to Pattern) ทรายหล่อที่ดีไม่ควรจะติดกับแบบทราย เพราะจะทำให้ผิวแบบทรายไม่เรียบ งานที่ได้ออกมาผิวจะไม่เรียบ

2.3.1.18 สมบัติในการร่วนตัว (Collapsibility) คือ แบบทรายที่มีความแข็งแรงมากเกินไป เมื่อเทน้ำโลหะลงไป และโลหะแข็งตัวแล้วมักจะรื้อแบบทราย หรือทำลายแบบทรายเพื่อแยก

ทรายออกจากชิ้นงานได้ยาก ทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีก เพราะฉะนั้นทรายหล่อที่ดี เมื่องานแข็งตัวแล้วจะต้องร่วน และรื้อจากงานได้ง่าย

2.3.1.19 อันตรายต่อสุขภาพ (Harmful Effect on Health) ทรายหล่อที่ดีต้องไม่เกิดอันตรายต่อสุขภาพไม่ว่าจะด้านใดๆ ซึ่งสมบัติข้อนี้ส่วนมากขึ้นอยู่กับตัวประสานหรือตัวเติมเต็มพิเศษที่เติมลงไปในทราย

2.3.2 องค์ประกอบของทรายหล่อ

2.3.2.1 ทรายซิลิกา (Silica Sand 230 ถึง 350 μm)

2.3.2.2 เบนโทไนท์ (Bentonite) ร้อยละ 4 ถึง 6

2.3.2.3 กาก หรือขี้เลื่อย (Cereal Binder) ร้อยละ 0.375 ถึง 0.5

2.3.2.4 ความชื้นร้อยละ 2.8 ถึง 3.2

2.3.3 การวัดปริมาณความชื้นในทรายหล่อ

ความชื้นที่อยู่ในทรายหล่อ โดยปกติจะมีความชื้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 2.8 เป็นตัวที่ทำให้ตัวประสานเกิดความเหนี่ยวมากขึ้น ความชื้นจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของทรายเป็นอย่างมาก ถ้าทรายมีความชื้นมากไป งานหล่ออาจจะได้ชิ้นงานที่เกิดรูพรุนได้

วิธีทดสอบความชื้นโดยวิธีที่ง่ายที่สุด คือ ใช้วิธีอบไล่ความชื้น มีวิธีดังต่อไปนี้

2.3.3.1 นำทรายที่ผสมเสร็จแล้วมาชั่ง 50 กรัม เพื่อเป็นทรายตัวอย่าง

2.3.3.2 นำทรายตัวอย่าง 50 กรัม อบในเตาอบที่ให้ความร้อนสม่ำเสมอที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็น

2.3.3.3 นำทรายที่อบมาชั่ง

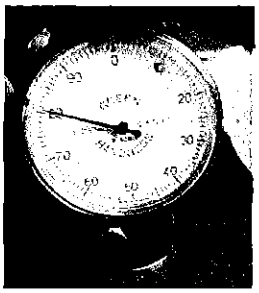
2.3.3.4 นำผลที่ได้จากการชั่งครั้งแรกก่อนอบและหลังอบ นำมาคำนวณหาร้อยละความชื้น ดังสมการที่ 2.1

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ}} \times 100 \qquad (2.1)$$

2.4 การทดสอบหาค่าความแข็งของแบบทราย

แบบทรายที่มีความแข็งของผิวที่ไม่เหมาะสม จะทำให้เกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงาน เช่นแบบทรายที่มีค่าของความแข็งของผิวมากเกินไป เนื่องจากการที่กระทุ้งทรายแน่นเกิน จะทำให้การระบายอากาศไม่ดีส่งผลให้เกิดรูพรุนที่ชิ้นงาน นอกจากนี้เมื่อทรายหล่อได้รับความร้อนจะขยายตัวดันเข้าไปแทรกในเนื้อของชิ้นงาน หรือถ้าแบบทรายที่มีความแข็งน้อยเกินไป โลหะหลอมเหลวก็สามารถที่จะแทรกซึมเข้าไปในทรายหล่อได้เช่นกัน ดังนั้นความแข็งของแบบทรายที่เหมาะสมนั้นควรอยู่ระหว่าง

70 – 85 และในการทดสอบความแข็งของทรายจะทดสอบด้วยเครื่อง Sand Mold Hardness Tester ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เครื่อง Sand Mold Hardness Tester

2.5 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง หมายถึง การเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในการศึกษาระบบที่สนใจ โดยทำการเปลี่ยนแปลงปัจจัย (Factors) ของระบบที่สนใจ เพื่อทำให้สามารถสังเกต และชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองที่ได้ (Outputs or Responses) ของระบบนั้น โดยปัจจัยจะถูกจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Variables) หรือปัจจัยที่สามารถออกแบบได้ (Design Variables) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ปัจจัยที่รบกวน

2.5.1 สิ่งที่ควรทราบในการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองสามารถทำตามขั้นตอนปฏิบัติได้ ดังนี้

2.5.1.1 แบบการทดลอง

การเลือกแบบการทดลองจะขึ้นอยู่กับรายละเอียดของจำนวนปัจจัยที่ใช้ ในกรณีสนใจศึกษาปัจจัยเดียว แบบแผนการทดลองที่ใช้ คือ การจำแนกทางเดียว (One – Way ANOVA) กรณีศึกษาสองปัจจัย แบบแผนการทดลองที่ใช้ คือ การจำแนกสองทาง (Two – Way ANOVA) หรือการออกแบบแบบสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่ม (Complete – Randomized Block Design) กรณีศึกษาสองปัจจัย หรือมากกว่า แบบแผนการทดลองที่ใช้ คือ การทดลองแฟคทอเรียล (Factorial Experiments)

2.5.1.2 ตัวแปรตอบสนอง (Responses)

ตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรผลลัพธ์ คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

2.5.1.3 ปัจจัย (Factors)

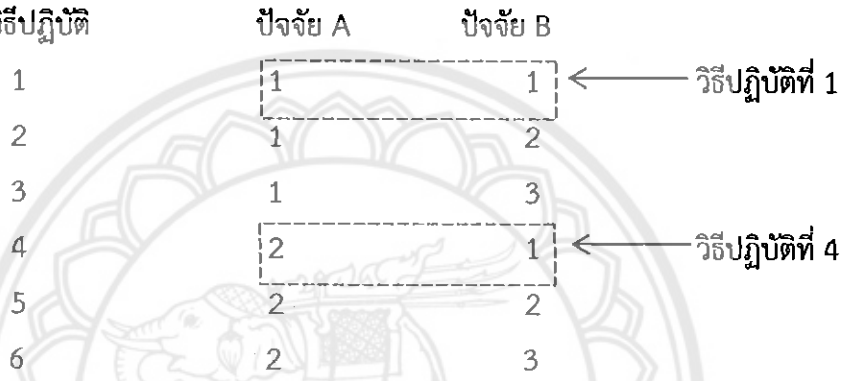
ปัจจัย คือ ตัวแปรนำเข้าที่ใช้ในระบบ หรือกระบวนการ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้ และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

2.5.1.4 ระดับปัจจัย (Levels of Factors)

ระดับปัจจัย คือ จำนวนค่าของปัจจัยที่เปลี่ยนไปในการทดลองหนึ่ง เช่น อุณหภูมิเทน้ำโลหะ คือ 700 องศาเซลเซียส, 800 องศาเซลเซียส และ 900 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิเทน้ำโลหะเป็นปัจจัยที่ทำการศึกษาซึ่งมีจำนวน 3 ระดับปัจจัย

2.5.1.5 วิธีปฏิบัติ (Treatment)

วิธีปฏิบัติ คือ ข้อกำหนดสำหรับทุกปัจจัยที่ศึกษาในการออกแบบการทดลองนั้นๆ เช่น ถ้าในการทดลองทำการศึกษา ปัจจัย A และปัจจัย B ที่ 2 และ 3 ระดับ จะมีวิธีปฏิบัติที่แตกต่างกันเท่ากับ 2 คูณ 3 เท่ากับ 6 วิธี ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วิธีปฏิบัติต่างๆ ในการออกแบบการทดลอง

ที่มา : พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ (2551)

2.5.1.6 จำนวนครั้งการทดลอง (Experimental Runs)

จำนวนครั้งการทดลอง คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ทำต่อหนึ่งแผนการทดลอง จะมีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนวิธีปฏิบัติ กับจำนวนครั้งที่ทำการทดลองซ้ำ

2.5.1.7 ขนาดการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองนั้น ต้องทำการกำหนดว่าวิธีการทดลองแต่ละวิธีควรใช้จำนวนการทดลองซ้ำเท่าใด หรือกำหนดขนาดการทดลองเท่าใด เพื่อให้ผลการทดลองนั้นออกมาชัดเจน และมีความมั่นใจในผลการทดลองที่ออกมา โดยสามารถกำหนดขนาดการทดลองจากสมการการคำนวณหาจำนวนครั้งของการทดลองซ้ำได้ ดังนี้

ก. องค์ประกอบ และสมการการคำนวณจำนวนครั้งของการทดลองซ้ำ แสดงได้ดังสมการที่ 2.2

$$n = \frac{\delta^2}{\Delta^2}(Z_{\alpha/2} + Z_{\beta})^2 \qquad (2.2)$$

ซึ่งจะอธิบายองค์ประกอบต่างๆ ในสมการดังนี้

ก.1 n คือ จำนวนของการทดลองซ้ำ

ก.2 α คือ ระดับความเสี่ยงที่จะสรุปผลการทดลองผิดพลาด โดยได้สรุปว่าข้อมูลของสองประชากรมีความแตกต่างมากกว่าค่าวิกฤต (Critical Difference) ทั้งๆ ที่จริงแล้วไม่ได้มีความต่างกันเลย ซึ่งปกติการใช้ข้อมูลทางสถิติในการพยากรณ์อะไรก็ตาม ย่อมมีความผิดพลาดเสมอ เมื่อเราไม่หลีกเลี่ยงได้ จึงต้องกำจัดความเสี่ยงนี้ให้น้อยที่สุด โดยมาตรฐานแล้วจะอยู่ที่ร้อยละ 5 แต่บางกรณีอาจจะมาก หรือน้อยกว่าก็ได้

ก.3 β คือ ระดับความเสี่ยงที่จะสรุปข้อมูลของสองประชากรไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งๆ ที่จริงแล้วข้อมูลทั้งสองมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งค่าที่ใช้โดยทั่วไปจะอยู่ที่ร้อยละ 5 ถึง 20

ก.4 Δ คือ ระดับความแตกต่าง ที่เราจะถือว่าเริ่มมีนัยสำคัญต่อความแตกต่างโดยปกติแล้วเราทดสอบสมมติฐาน เราจะใช้วิธีดูความแตกต่างของทั้งสองข้อมูลที่นำมาทดสอบสมมติฐาน เช่น ความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ก.5 δ คือ ค่าความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่งได้จากการเก็บประวัติ หรือการประมาณการอย่างมีเหตุผล

ก.6 $Z_{\alpha/2}$ คือ ค่าปกติมาตรฐานที่ $P(Z \geq Z_{\alpha/2}) = \frac{\alpha}{2}$

ก.7 Z_{β} คือ ค่าปกติมาตรฐานที่ $P(Z \geq Z_{\beta}) = \beta$

อย่างไรก็ตามในการกำหนดขนาดการทดลองจากสมการการคำนวณดังกล่าวอาจได้ค่าขนาดการทดลองที่มากเกินไป ซึ่งในความเป็นจริงแล้วในระบบการทดลองยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ดังนี้

ข. ข้อจำกัดของการกำหนดจำนวนครั้งของการทดลองซ้ำที่มากเกินไป

ข.1 ข้อจำกัดด้านต้นทุน เนื่องจากการทดลองบางการทดลองนั้นต้องอาศัยต้นทุนในการทดลองสูง เช่น ต้นทุนวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ต้นทุนการทำการทดลอง

ข.2 ข้อจำกัดด้านเวลา เนื่องจากการทดลองบางการทดลองนั้น ต้องอาศัยระยะเวลานานในการทำการทดลอง เช่น ทดสอบชิ้นงานโดยใช้เครื่องทดสอบ

ข.3 ข้อจำกัดด้านความผิดพลาด เนื่องจากการทดลองบางการทดลองนั้น มีจำนวนการทดลองซ้ำมากไป จะส่งผลเสียต่อการวิเคราะห์ ทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนได้

2.5.2 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

2.5.2.1 การเลือกปัจจัยในการทดลอง

ในการเลือกปัจจัยที่สนใจในการศึกษา ปัจจัยที่เลือกมานั้น ต้องเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ จึงต้องทำการทดสอบว่าปัจจัยที่กำหนดมานั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนองหรือไม่อย่างไร และจะวัดผลของตัวแปรตอบสนองได้อย่างไร

2.5.2.2 การกำหนดระดับปัจจัยในการทดลอง

การกำหนดระดับปัจจัยในการทดลอง เป็นการกำหนดจำนวนค่าที่ปัจจัยจะเปลี่ยนไปในกระบวนการหนึ่งๆ โดยพิจารณาเพื่อให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนไปที่ชัดเจน

2.5.2.3 การทดสอบสมมติฐาน

สมมติฐาน คือ ข้อสันนิษฐาน หรือเกณฑ์ที่ตั้งไว้ สำหรับเป็นพื้นฐานในการหาเหตุผล เป็นสิ่งที่ตั้งขึ้นเพื่อการพิสูจน์ให้เกิดการยอมรับ หรือการปฏิเสธ ซึ่งการยอมรับหรือปฏิเสธจะเกิดจากผลของการสุ่มตัวอย่าง และการทดสอบสมมติฐาน ตามเกณฑ์ที่ตั้งขึ้น โดยการเก็บรวบรวมข้อมูล การทดลอง หรือการวิจัย ซึ่งการทดสอบสมมติฐานจะต้องทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาทดสอบ โดยการเก็บข้อมูลนั้น บางครั้งก็ไม่สามารถเก็บได้เต็มหน่วยของประชากร ทำให้ต้องเก็บในลักษณะแบบสุ่มตัวอย่าง เพื่อนำมาทดสอบสมมติฐาน

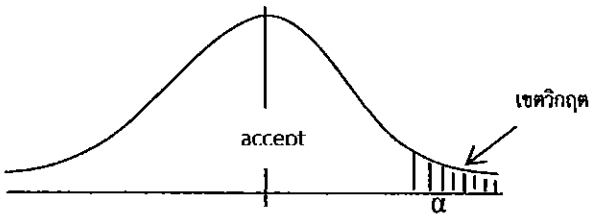
ก. สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis ; H_0) เป็นสมมติฐานที่ทราบค่าแน่นอน มักจะเป็นสมมติฐานที่ตั้งขึ้นเพื่อต้องการการปฏิเสธ หากสิ่งที่สนใจหาคำตอบนั้นไม่ได้ มีการเปลี่ยนแปลงหรือหากไม่มีเหตุผล และหลักการไม่เพียงพอ ก็จะยอมรับสมมติฐานนี้

ข. สมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis ; H_1) เป็นสมมติฐานที่ตั้งขึ้น เพื่อให้ขัดแย้งกับสมมติฐานหลัก มักจะเป็นสมมติฐานที่ตั้งขึ้นเพื่อต้องการการยอมรับ ซึ่งสมมติฐานรองนี้มี 2 ลักษณะ คือ

ข.1 สมมติฐานรองแบบทางเดียว เป็นสมมติฐานที่ตั้งขึ้นโดยกำหนดทิศทาง เช่น $H_1: \mu < 5000$หรือ $H_1: \mu > 5000$

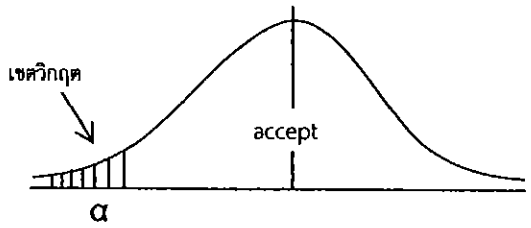
ข.2 สมมติฐานรองแบบสองทาง เป็นสมมติฐานที่ตั้งขึ้นโดยไม่กำหนดทิศทาง เช่น $H_1: \mu \neq 5000$

สำหรับการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานจะยอมรับ H_0 เมื่อค่าตัวอย่างอยู่นอกเขตวิกฤต และจะปฏิเสธ H_0 เมื่อค่าตัวอย่างอยู่ในเขตวิกฤต โดยเขตวิกฤตมีลักษณะดังรูปที่ 2.14 – 2.16

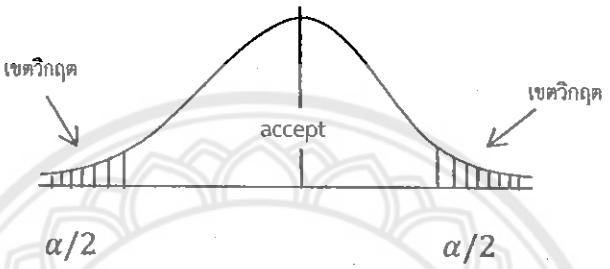


รูปที่ 2.14 เขตวิกฤตสมมติฐานทางเดียว $H_1: \mu > \mu_0$

ที่มา : กานต์ ลี่วัฒนายิ่งยง (2551)



รูปที่ 2.15 เขตวิกฤตสมมติฐานทางเดียว $H_1: \mu < \mu_0$
ที่มา : กานต์ ลี่วัฒนายิ่งยง (2551)



รูปที่ 2.16 เขตวิกฤตสมมติฐานสองทาง $H_1: \mu \neq \mu_0$
ที่มา : กานต์ ลี่วัฒนายิ่งยง (2551)

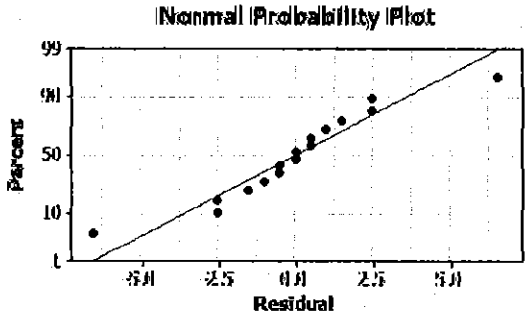
2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ มีขั้นตอนดังนี้

2.6.1 การตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล

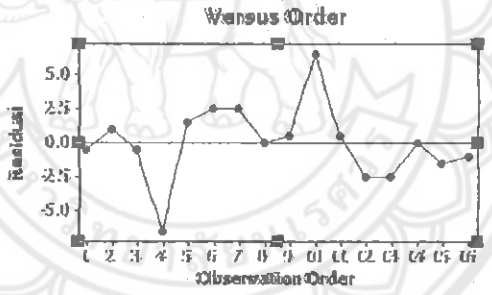
เงื่อนไขของการทดสอบความแปรปรวน ในการทดสอบสมมติฐานการเท่ากันของค่าเฉลี่ยของประชากร จะต้องมีการตรวจสอบเงื่อนไข ดังนี้

2.6.1.1 ตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูลเป็นเงื่อนไขที่ข้อมูลต้องได้รับการตรวจสอบก่อนการทดสอบความแปรปรวน ซึ่งจะต้องแน่ใจว่าข้อมูลดังกล่าว มีการแจกแจงแบบปกติเสมอ หากไม่เช่นนั้นการทดสอบสมมติฐาน ก็จะทำให้ผลการทดสอบคลาดเคลื่อนถ้าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ สามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟการกระจายแบบแจกแจงปกติของข้อมูล ซึ่งทำได้โดยกำหนดให้แกน X คือ ส่วนตกค้างของข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างของข้อมูลหาได้จากการนำค่าการทดลอง (Observation) ลบค่าเฉลี่ย (Fit) และแกน Y คือ ร้อยละของความน่าจะเป็นสะสม หาได้จากนำค่าส่วนตกค้างมาหาความถี่ของข้อมูลจะได้เป็นร้อยละของความน่าจะเป็น จากนั้นทำการสังเกตลักษณะข้อมูลของกราฟ ถ้าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ จุดตัดจะเรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรง และลักษณะการเกิดจุดตัดจะต้องไม่เป็นกระจุกหรือเป็นกลุ่มๆ โดยค่าที่อยู่ห่างระหว่างจุดแต่ละจุดต้องใกล้เคียงกันเป็นส่วนมาก แต่ค่าที่อยู่ห่างเส้นต้องมีค่ามากน้อยต่างกันไป ดังรูปที่ 2.17



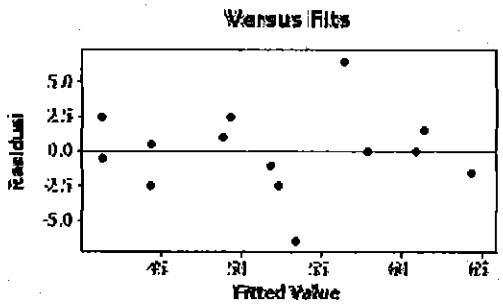
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการกระจายแบบปกติของข้อมูล
ที่มา : พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ (2551)

2.6.1.2 ตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล ทำได้โดยการสร้างกราฟที่กำหนดให้แกน X คือ ลำดับของข้อมูล และแกน Y คือส่วนตกค้างของข้อมูล จากนั้นทำการสังเกตลักษณะการกระจายของข้อมูลบนแผนภูมิ โดยมีหลักฐานว่าถ้าข้อมูลมีความเป็นอิสระของข้อมูล ลักษณะการกระจายของข้อมูลจุดที่แทนข้อมูล จะมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ไม่สามารถคาดเดาค่าในอนาคตได้ ไม่มีแนวโน้มขึ้น หรือลงอย่างเดียว แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างความเป็นอิสระของข้อมูล
ที่มา : พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ (2551)

2.6.1.3 ตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล โดยใช้แผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละปัจจัย พบว่าส่วนตกค้างของข้อมูลของผลการทดลองมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งบวก และทางลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล
ที่มา : พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ (2551)

2.6.2 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs)

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล คือ การออกแบบที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการออกแบบการทดลองที่สนใจจะศึกษาอิทธิพลของปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไปที่ส่งผลต่อกระบวนการทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย

2.6.2.1 การทดลองแฟคทอเรียล แบ่งออกเป็น 2 กรณีหลัก คือ

ก. การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment) หมายถึง การทำการทดลอง และวัดค่าตัวแปรตอบสนองของทุกวิธีปฏิบัติ ซึ่งเหมาะกับการทดลองที่มีขนาดเล็ก และต้องการทราบค่าการทดลองหรือทราบค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด

ข. การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment) หมายถึง การทำการทดลอง และวัดค่าตัวแปรไม่ครบทุกวิธีปฏิบัติ เนื่องจากวิธีปฏิบัติมีมากเกินไป หรือมีข้อจำกัดบางประการ โดยวิธีปฏิบัติที่เลือกมาทำการทดลอง จะเลือกมาจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้อาจจะเกิดความไม่แม่นยำของการสรุปผลการทดลองเมื่อเทียบกับการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป

2.6.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย ซึ่งมีวิธีการคำนวณ ดังนี้

กำหนดให้ SS_T แทน ผลรวมกำลังสองของข้อมูลทั้งหมด

SS_A แทน ผลรวมกำลังสองของปัจจัย A

SS_B แทน ผลรวมกำลังสองของปัจจัย B

SS_{AB} แทน ผลรวมกำลังสองของปัจจัยผลกระทบร่วม

SS_E แทน ผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อน

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

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

$y_{...}$ แทน ผลรวมของข้อมูลการทดลองทุกๆ ข้อมูล

ι_i แทน อิทธิผลเนื่องจากระดับที่ i ของปัจจัย A

β_j แทน อิทธิผลเนื่องจากระดับที่ j ของปัจจัย B

$(\iota\beta)_{ij}$ แทน อิทธิพลของกิริยาร่วมระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B

โดยที่ i=1,2,..., a; เมื่อ a คือ ระดับปัจจัยของ A

j=1,2,..., b; เมื่อ b คือ ระดับปัจจัยของ B

k=1,2,..., n; เมื่อ n คือ จำนวนครั้งการทดลอง

ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้

ก. ตั้งสมมติฐาน

H_0: $\iota_1=\iota_2=...=\iota_a=0$

H_1: $\iota_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

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

H_1: $\beta_j \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

H_0 : $(\iota\beta)_{ij}=0$

H_1: $(\iota\beta)_{ij} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

ข. สมการทดสอบความแปรปรวน

$$SS_T = SS_A+SS_B+SS_{AB}+SS_E \quad (2.3)$$

โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk} - \frac{y^2...}{abn} \quad (2.4)$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^{a} y_{i..}^2 - \frac{y^2...}{abn} \quad (2.5)$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^{b} y_{.j.}^2 - \frac{y^2...}{abn} \quad (2.6)$$

$$SS_{SUBTOTALS} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} \frac{y_{ij.}^2}{n} - \frac{y^2...}{abn} \quad (2.7)$$

$$SS_{AB} = SS_{SUBTOTALS} - SS_A - SS_B \quad (2.8)$$

$$SS_E = SS_T\text{-}SS_{AB} - SS_A\text{-}SS_B \quad (2.9)$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Squares	F
A	SS_A	a-1	SS_A/a-1	MS_A/MS_E
B	SS_B	b-1	SS_B/b-1	MS_B/MS_E
AB – Interaction	SS_{AB}	(a-*1*)(*b*-1)	SS_{AB}/(a-*1*)(*b*-1)	MS_{AB}/MS_E
Error	SS_E	*ab*(*n*-1)	SS_E/*ab*(*n*-1)	
Total	SS_T	abn-1		

ที่มา : พงษ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ (2551)

ซึ่งการสรุปผลว่าปัจจัยแต่ละปัจจัย หรือปัจจัยร่วม มีผลต่อตัวแปรตอบสนองหรือไม่ นั้นสามารถสรุปผลได้โดยการเปรียบเทียบจากค่า F ที่ได้จากการคำนวณ กับค่า F ที่ได้จากการเปิดตาราง เมื่อค่า F ที่ได้จากการคำนวณมากกว่าค่า F ที่ได้จากการเปิดตาราง การสรุปผลจะปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 แต่ถ้าค่า F ที่ได้จากการคำนวณน้อยกว่าค่า F ที่ได้จากการเปิดตาราง การสรุปผลจะยอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1

2.6.3 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Regression)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ใช้ในการทำนายตัวแปรตอบสนอง ซึ่งโดยปกติปัจจัยจะใช้สัญลักษณ์ X และตัวแปรตอบสนองจะใช้สัญลักษณ์ Y

2.6.3.1 ขั้นตอนในการวิเคราะห์การถดถอย

ก. ตรวจสอบว่าตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกัน หรือไม่

ข. สร้างสมการพยากรณ์ เพื่อใช้สำหรับการประมาณค่า Y

ค. ตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นของตัวแปรทั้งสอง โดยทำการตรวจสอบว่า สมการพยากรณ์มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้มากน้อยเพียงใด โดยจะดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (The Coefficient of Determination) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ (Standard Error of the Estimate) และการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าจากการทดลองและการพยากรณ์ ดังจะกล่าวในหัวข้อ 2.6.3.2

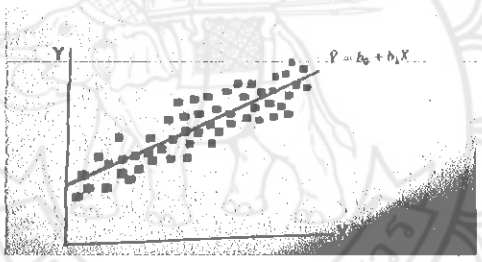
2.6.3.2 ค่าสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์

ค่าสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ สามารถกำหนดได้ ดังนี้

ก. ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (The Coefficient of Determination)

ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดเกิดจากการนำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มายกกำลังสอง ใช้แสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นกับตัวแปร Y มีผลเนื่องมาจากตัวแปร X คิดเป็นร้อยละ ใช้เพื่อศึกษาว่าสมการการพยากรณ์มีค่าความเหมาะสมที่จะนำไปใช้มากน้อยเพียงใด โดยค่าที่คำนวณได้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 และสัญลักษณ์ที่ใช้แทนค่า คือ R ในกรณีที่ R มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแปร X มีอิทธิพลต่อตัวแปร Y อย่างมาก ซึ่งนั่นจะหมายความว่า สมการการพยากรณ์จะมีค่ามีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้มาก ในทางกลับกัน ถ้า R มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าตัวแปร X มีอิทธิพลต่อตัวแปร Y น้อยมากซึ่งหมายถึงสมการการพยากรณ์จะมีค่าความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้น้อย

ข. ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ (Standard Error of the Estimate) เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณค่า Y ด้วย $\hat{Y}$ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ S_{YX} ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ $S_{YX} > 0$

ที่มา : พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ (2551)

2.6.3.3 การวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าจากการทดลองและการพยากรณ์

การวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าจากการทดลอง และค่าจากการพยากรณ์จะใช้ค่าทางสถิติ t – test เพื่อทดสอบความแตกต่างหรือเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มใช้สำหรับการทดสอบข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) โดยมีขั้นตอนของการทดสอบสมมติฐาน ดังนี้

ก. ตั้งสมมติฐาน

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

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

ข. กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ α เท่ากับ 0.05

ค. เลือกตัวสถิติที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าจากการทดลอง และการพยากรณ์ โดยจะได้ตัวสถิติที่เหมาะสม คือ ตัวสถิติ t

$$\text{ตัวสถิติ : } t = \frac{\sum D}{\sqrt{\frac{N\sum D^2-(\sum D)^2}{N-1}}} \qquad (2.10)$$

โดยที่ t คือ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลอง และจากการคำนวณ

D คือ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลอง และจากการคำนวณในแต่ละค่า

$\sum D$ คือ ค่าผลรวมของค่าความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลอง และจากการคำนวณในแต่ละค่า

D^2 คือ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลอง และจากการคำนวณในแต่ละค่ายกกำลังสอง

$(\sum D)^2$ คือ ค่าผลรวมของค่าความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลอง และจากการคำนวณในแต่ละค่า นำผลรวมทั้งหมดยกกำลังสอง

$N\sum D^2$ คือ ค่าจำนวนการทดลองคูณกับค่าผลรวมของค่าแตกต่างระหว่างค่าจากการทดลอง และการคำนวณของแต่ละค่ายกกำลังสอง

$N-1$ คือ ค่าจำนวนการทดลองทั้งหมด ลบ 1

ง. สร้างกฎในการตัดสินใจ นั่นคือ ปฏิเสธ H_0 ถ้า t ที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า t ที่ได้จากตาราง หรือ t ที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า t ที่ได้จากตาราง

จ. คำนวณค่าทางสถิติ t จากกลุ่มตัวอย่าง

ฉ. ตัดสิน และตีความ t ที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า t ที่ได้จากตาราง ดังนั้น ให้ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 ซึ่งจะให้ผลว่าทั้งกลุ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ถ้าหากว่าผลทดสอบสมมติฐานได้ผลว่าเราไม่ปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างแตกต่างกัน แต่ค่าเฉลี่ยของประชากรไม่แตกต่างกัน โดยที่ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่แตกต่างกันเป็นความคลาดเคลื่อน

2.7 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องของชิ้นงาน

2.7.1 การวิเคราะห์รูพรุน มีวิธีการคำนวณดังนี้

2.7.1.1 เตรียมเครื่องชั่งน้ำหนัก และชุดทดสอบ

2.7.1.2 นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อมาทำการวิเคราะห์หารูพรุน โดยการชั่งน้ำหนัก

2.7.1.3 นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อมาชั่งน้ำหนักในน้ำ และบันทึกผล

2.7.1.4 นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อมาชั่งน้ำหนักในอากาศ และบันทึกผล

2.7.1.5 เมื่อได้น้ำหนักที่ได้จากการชั่งทั้งในน้ำ และในอากาศแล้ว ก็หาร้อยละของรูพรุน

โดยใช้สูตร ความหนาแน่น $= \frac{W_{อากาศ}}{W_{อากาศ}-W_{น้ำ}}$ และ ร้อยละของรูพรุน $= (1-\frac{\rho_s}{\rho_o}) \times 100$ (2.11)

โดยที่

$W_{อากาศ}$ = น้ำหนักที่ชั่งในอากาศ

$W_{น้ำ}$ = น้ำหนักที่ชั่งในน้ำ

ρ_s = ความหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบ

ρ_o = ความหนาแน่นที่ได้จากทฤษฎี

2.7.2 การวิเคราะห์โพรงที่เกิดจากการหดตัว มีวิธีการคำนวณดังนี้

2.7.2.1 นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อมาทำการวิเคราะห์โพรงที่เกิดจากการหดตัวของชิ้นงาน

2.7.2.2 ตัดชิ้นงานบริเวณตรงกลางที่เกิดโพรงจากการหดตัว

2.7.2.3 นำแผ่นพลาสติกใสมาตีเป็นช่องสี่เหลี่ยมเล็กๆ เพื่อใช้ในการนับช่องของการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว

2.7.2.4 นำชิ้นงานที่ตัดแล้วมาทำการนับช่องของการเกิดโพรงจากการหดตัว โดยนำแผ่นพลาสติกใสที่ตีเป็นช่องมาทาบกับชิ้นงาน แล้วทำการนับช่องที่หายไปของชิ้นงาน และเก็บค่า

2.7.2.5 นำค่าของการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัวมาคำนวณหาร้อยละของการหดตัว โดย

โดยใช้สูตร ร้อยละของการหดตัว = $(N_S \times 100) / N_o$ (2.11)

โดยที่

N_S คือ จำนวนช่องของชิ้นงานที่หายไป

N_o คือ จำนวนช่องทั้งหมดของชิ้นงาน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 พัชรา และคณะ (2550) ได้ทำการปรับปรุงกระบวนการหล่อแบบทรายชื้นในชิ้นงานอลูมิเนียมบริสุทธิ์เพื่อลดข้อบกพร่องที่มีในชิ้นงานดั้งเดิม โดยข้อบกพร่องที่พบในชิ้นงานดั้งเดิม คือ ความเรียบผิว โพรงที่เกิดจากการหดตัว รูพรุน รอยหางหนู และครีบ เมื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องแล้วพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อข้อบกพร่องมี 3 ข้อ คือ อุณหภูมิเท ขนาดของเม็ดทราย และความแข็งของแบบทราย โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทที่ 680, 700 และ 720 องศาเซลเซียส ขนาด

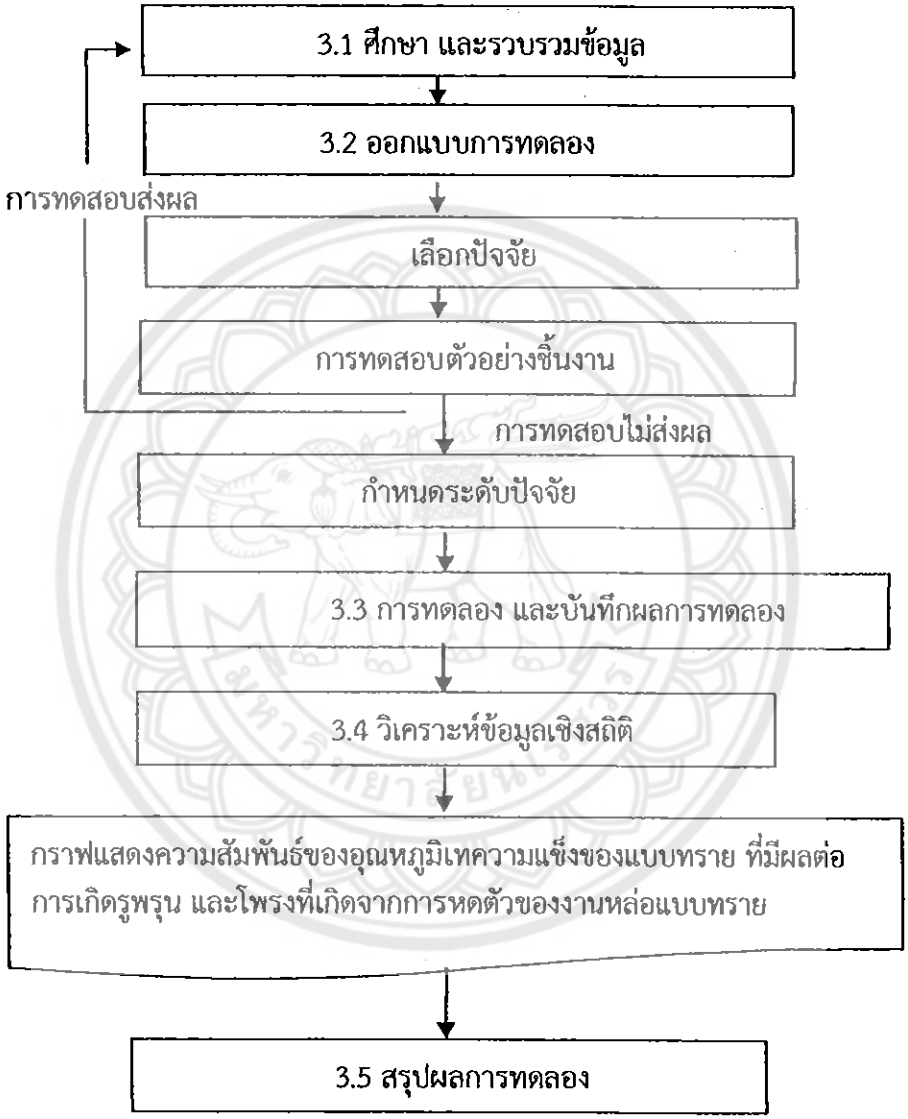
ของเม็ดทราย 60 และ 80 AFS ความแข็งของแบบทราย 70, 75 และ 80 เมื่อนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ข้อบกพร่อง พบว่าชิ้นงานปัจจุบันที่ได้มีการปรับปรุงกระบวนการการหล่อแบบทรายชื้น ความเรียบผิวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส ขนาดของเม็ดทราย 80 AFS และความแข็งของทราย 80 มีความเรียบของผิวมากที่สุด โพรงที่เกิดจากการหดตัวของชิ้นงานลดลง โดยชิ้นงานที่ อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส ขนาดของเม็ดทราย 80 AFS และความแข็งของทราย 70 มีค่าร้อยละของโพรงที่เกิดจากการหดตัวน้อยที่สุด ซึ่งค่าร้อยละของโพรงที่เกิดจากการหดตัวของชิ้นงานปัจจุบันลดลงจากชิ้นงานดั้งเดิม ร้อยละ 15.56 เหลือ ร้อยละ 0.48 รูพรุนในชิ้นงานลดลงโดยชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ขนาดของเม็ดทราย 60 AFS และความแข็งของทราย 70 มีค่าร้อยละของรูพรุนน้อยที่สุด ซึ่งค่าร้อยละของรูพรุนของชิ้นงานปัจจุบันลดลงจากชิ้นงานดั้งเดิม ร้อยละ 4.96 เหลือ ร้อยละ 0.005 รอยหางหนูไม่เกิดในชิ้นงานปัจจุบัน ที่ได้มีการปรับปรุงกระบวนการหล่อแบบทรายชื้น และครีบของชิ้นงานลดลง โดยอุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ขนาดของเม็ดทราย 80 AFS และความแข็งของทราย 80 เกิดครีบในชิ้นงานน้อยที่สุด

2.8.2 สุรเชษฐ์ (2551) ได้ศึกษาการลดข้อบกพร่องประเภทการหดตัวในชิ้นส่วนงานหล่อ ของช่วงล่างรถบรรทุก มีวัตถุประสงค์เพื่อลดสัดส่วนงานซ่อมรวมของงานที่ผลิตทั้งหมดในบริษัท โดยมุ่งเน้นไปที่ชิ้นงาน U - Bolt Plate UT40A ที่มีข้อบกพร่องในการหดตัว จากกระบวนการหล่อขึ้นรูป และเป็นแนวทางในการผลิตชิ้นงานอื่นๆ ขั้นตอนการศึกษาโดยเริ่มจากศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพล ต่อการเกิดการหดตัว สภาพการทำงานจริง ๆ ในการวิเคราะห์สาเหตุและผล และทำการพิสูจน์สาเหตุของการเกิดการหดตัวด้วยความรู้เฉพาะ และการทดลองแบบ One Factor at Time (OFAT) แล้วจึงนำปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวมาศึกษาต่อด้วยการทดลอง โดยใช้แนวทางการออกแบบการทดลองแบบ 22 แฟคทอเรียล เพื่อศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย และหาความสัมพันธ์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการเกิดการหดตัว เพื่อต้องการหาค่าปรับตั้งของปัจจัยในการทำงาน ที่ส่งผลต่อการเกิดการหดตัวน้อยที่สุด จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการหดตัว คือ ขนาดของรูล้น และ อุณหภูมิเท ผลจากการทำการออกแบบการทดลองพบว่า อุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่ 1,600 องศาเซลเซียส และขนาดรูล้นแบบใหม่ที่ปริมาตร 271.3 ลูกบาศก์เซนติเมตร เกิดการหดตัวน้อยที่สุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงงาน

ในการดำเนินโครงงาน ผู้จัดทำโครงงานได้กำหนดขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการดำเนินโครงงาน ดังแผนผังที่แสดงในรูปที่ 3.1 พร้อมทั้งรายละเอียดขั้นตอนในการดำเนินโครงงาน ตามข้อที่ 3.1 - 3.5



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินโครงงาน

3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล

การดำเนินโครงงาน ผู้จัดทำได้ทำการศึกษา และรวบรวมข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน เพื่อให้เกิดความเข้าใจ และมีแนวทางในการดำเนินโครงงาน ซึ่งได้มีการรวบรวมข้อมูลโดยมีรายละเอียดดังนี้

ในการดำเนินโครงงานนั้น ผู้จัดทำโครงงานมีความสนใจที่จะลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหล่อ จึงได้ทำการศึกษาหาสาเหตุ ลักษณะ และวิธีการแก้ไขของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับงานหล่อแบบทราย จากนั้นผู้จัดทำโครงงานได้ทำการทดสอบตัวอย่างชิ้นงานขึ้นมาโดยการหล่ออลูมิเนียม เพื่อทำการศึกษาในส่วนของอุปกรณ์ ขั้นตอนการหล่อ รวมถึงการออกแบบรูล้น รูเท ที่ใช้สำหรับหล่อชิ้นงาน และนอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบหาค่าร้อยละความชื้นของทรายด้วย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทดลอง

3.2 การออกแบบการทดลอง

ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง ผู้จัดทำโครงงานได้ทำการออกแบบการทดลองตามหัวข้อดังนี้

3.2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการออกแบบการทดลอง

ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับงานหล่อแบบทราย ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหล่อ ศึกษาการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ จากหนังสือ และงานวิจัย

3.2.2 การกำหนดปัจจัย

ในขั้นตอนนี้ผู้จัดทำโครงงานได้กำหนดปัจจัยที่สนใจศึกษา โดยที่อ้างอิงจากตารางที่ 2.1 และได้ทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อข้อบกพร่องของชิ้นงาน คือ อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทรายที่มีผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทราย ซึ่งปัจจัยตอบสนอง คือ การลดลงของข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทราย โดยในการทดลองนั้น ผู้จัดทำโครงงานต้องควบคุมปัจจัยที่ควบคุมได้ตัวอื่นๆ ให้เหมือนกันทุกๆ การทดลอง และออกแบบการทดลองให้ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองน้อยที่สุด หรือไม่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองนั้นเลย

3.2.3 การกำหนดระดับปัจจัย

จากปัจจัยในหัวข้อที่ 3.2.2 ผู้จัดทำโครงงานได้ทำการกำหนดปัจจัย ได้ดังนี้

3.2.3.1 ในการกำหนดระดับระบบปัจจัยนั้น ผู้จัดทำโครงงานได้อ้างอิงจากทฤษฎีจากข้อที่ 2.3.1.3 ที่กล่าวว่า อุณหภูมิที่ใช้สำหรับเทอลูมิเนียมในการหล่อจะอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 660 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส จึงได้เลือกอุณหภูมิเทที่ใช้ในการทดลอง 3 ระดับปัจจัย คือ อุณหภูมิเทที่

700 องศาเซลเซียส, 800 องศาเซลเซียส และ 900 องศาเซลเซียสเพื่อให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนต่อการวิเคราะห์

3.2.3.2 ในการกำหนดระดับปัจจัยนั้น ผู้จัดทำโครงงานได้อ้างอิงจากทฤษฎีจากข้อที่ 2.4 ที่กล่าวว่า ความแข็งของแบบทรายที่เหมาะสมในการหล่อจะอยู่ในช่วงระหว่าง 70 - 85 จึงได้เลือกความแข็งของแบบทรายที่ใช้ในการทดลอง 3 ระดับปัจจัย คือ ความแข็งของแบบทรายที่ 70, 75 และ 80 เพื่อให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนต่อการวิเคราะห์

3.2.3.3 ในการกำหนดจำนวนครั้งในการทดลอง ผู้จัดทำโครงงานได้ใช้สมการที่ 2.2 ในการหาจำนวนครั้งในการทดลอง ได้จำนวนครั้งของการทดลองทั้งหมด 18 ครั้ง ซึ่งแสดงการคำนวณไว้ในภาคผนวก แต่จำนวนการทดลองที่หานั้นมีจำนวนมาก หากทำการทดลองทั้งหมด 18 ครั้ง จะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการทดลองสูง และยังต้องใช้เวลาในการทดลองนาน ดังนั้นผู้จัดทำโครงงานได้ทำการทดลองเพียง 3 ครั้ง และจำนวนการทดลอง 3 ครั้ง ก็เป็นการอ้างอิง ซึ่งทำให้ข้อมูลน่าเชื่อถือ และก็เพียงพอต่อการวิเคราะห์ความแปรปรวน

3.2.4 ขนาดของการทดลอง

คำนวณได้จากสมการ 2.2 ได้ดังนี้

$$n = \frac{\delta^2}{\Delta^2}(Z_{\alpha/2} + Z_{\beta})^2$$

$$n = 18 \text{ ครั้ง}$$

ซึ่งคำนวณแล้วได้จำนวนการทดลองซ้ำทั้งหมด 18 ครั้ง แต่เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทดลองนั้นใช้เวลามาก และมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นผู้ดำเนินโครงงานจึงได้ทำการทดลอง และเก็บผลการทดลองเพียง 3 ครั้ง

3.2.5 การกำหนดสมมติฐานการทดลอง

การกำหนดสมมติฐานการทดลองได้ ดังนี้

3.2.5.1 การกำหนดสมมติฐานเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 1 คือ อุณหภูมิเท

H_0 : อุณหภูมิเทไม่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน

H_1 : อุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน

เมื่ออุณหภูมิเท คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส

3.2.5.2 การกำหนดสมมติฐานเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 2 คือ ค่าความแข็งของแบบทราย

H_0 : ความแข็งของแบบทรายไม่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน

H_1 : ความแข็งของแบบทรายมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน

เมื่อความแข็งของทราย คือ ความแข็งของแบบทราย 70, 75 และ 80

3.2.5.3 การกำหนดสมมติฐานเพื่อตรวจสอบผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ 1 และปัจจัยที่ 2 คือ อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย

H_0 : อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ไม่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน

H_1 : อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน

3.3 การทดลองและบันทึกผลการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนในการทำแบบหล่อทรายชื้น

3.3.1.1 นำหีบหล่อข้างหนึ่งมาวางคว่ำลงบนแผ่นกระดาน และนำกระสวนที่ทำความสะอาดโดยใช้แปรงขนอ่อน มาวางลงในหีบหล่อ ดังรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 นำกระสวนมาวางลงในหีบหล่อ

3.3.1.2 นำทรายที่ทำการร่อนจากตะแกรงแล้วมาใส่ลงไปในหีบหล่อให้เต็ม และใช้นิ้วมือช่วยกดให้ทรายไหลลงไปในซอกมุมต่างๆรอบกระสวน และตามแนวขอบของหีบหล่ออย่างทั่วถึง ดังรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 นำทรายมาใส่ในหีบหล่อ

3.3.1.3 เพิ่มทรายเข้าไปจนเต็มหีบหล่อ แล้วกระทุ้งทรายด้วยที่กระทุ้งทรายแบบลิ่ม ให้ระวังปลายที่กระทุ้งทรายแบบลิ่ม อย่ากระทุ้งโดนกระสวนแรงจนเกินไป เพราะอาจทำกระสวนนั้นขยับ ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้ได้งานหล่อที่มีจุดเสียได้ ดังรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.4 นำทรายมาใส่ในหีบหล่อแล้วกระทุ้งทราย

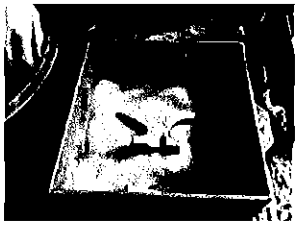
3.3.1.4 อัดทรายให้เต็มหีบหล่อโดยเผื่อให้ทรายที่อัดลงไปนั้นสูงเกินมาเล็กน้อย จากนั้นปาดทรายที่เกินมาด้วยแท่งไม้ตรงปาดให้เรียบเสมอขอบหีบหล่อ ดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 ปาดทรายที่เกินจากหีบหล่อ

3.3.1.5 นำกระดานอีกแผ่นมาประกบพลิกหีบหล่อหงายขึ้น ดังรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.6 พลิกหีบหล่อทราย

3.3.1.6 นำทรายละเอียดมาโรยบางๆบริเวณผิวแบบ เพื่อป้องกันไม่ให้แบบทรายหรือกระสวนติดทราย ดังรูปที่ 3.7

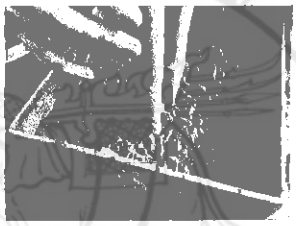


รูปที่ 3.7 นำทรายแห้งมาโรยบริเวณผิวแบบ

3.3.1.7 สร้างรูเทให้น้ำอลูมิเนียมไหลเข้าชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.8

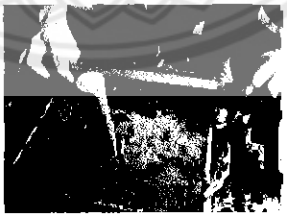
รูปที่ 3.8 สร้างรูเท

3.3.1.8 นำทรายที่ทำการร่อนแล้วมาใส่ลงไปในหีบหล่อให้เต็ม และใช้นิ้วมือช่วยกดให้ทรายไหลลงไปในซอกมุมต่างๆ และใช้ที่กระทุ้งทรายแบบลิ่มกระทุ้งทราย และรอบๆกระสวนรูเทให้แน่น ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 นำทรายมาใส่ลงไปในหีบหล่อ

3.3.1.9 เมื่อใส่ทรายเต็มหีบหล่อแล้ว จากนั้นปาดทรายที่เกินมาด้วย**แท่งไม้ตรงปาดให้เรียบเสมอ**ขอบหีบหล่อ ระวังอย่าให้โดนกระสวนรูเท ดังรูปที่ 3.10

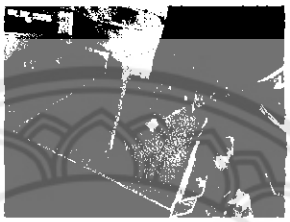


รูปที่ 3.10 ปาดทรายที่เกินจากหีบหล่อ

3.3.1.10 ใช้ช้อนรูปใบไม้แต่งรอบๆ กระสวนรูเทเพื่อที่จะเอากระสวนรูเทออก ดังรูปที่ 3.11

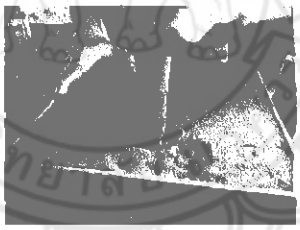
รูปที่ 3.11 ใช้ช้อนรูปใบไม้แต่งรอบๆ รูเท

3.3.1.11 ใช้ที่เป่าลมเป่าเศษทรายที่อยู่รอบๆ ออกให้หมด ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เป่าลมเศษทราย

3.3.1.12 เอากระสวนรูเทออกจากหีบหล่อ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เอากระสวนรูเทออกจากหีบหล่อ

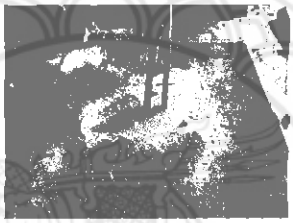
3.3.1.13 เมื่อเอากระสวนรูเทออกจากหีบหล่อแล้ว ก็นำกระดานอีกอันมาประกบแล้วพลิกหีบหล่อหงายขึ้น ดังรูปที่ 3.14

รูปที่ 3.14 พลิกหีบหล่อหงายขึ้น

3.3.1.14 นำเครื่องวัดความแข็งของทรายมาวัดค่าความแข็ง ดังรูปที่ 3.15

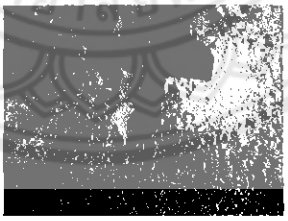
รูปที่ 3.15 วัดค่าความแข็งของทราย

3.3.1.15 นำกระสวนออกจากแบบทรายโดยใช้เหล็กกลม 2 อัน ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 นำกระสวนออกจากแบบทราย

3.3.1.16 ใช้เกรียง และเหล็กขอตักทรายทำทางเดินของน้ำโลหะ ดังรูปที่ 3.17

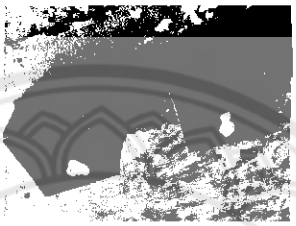


รูปที่ 3.17 แต่งทางเดินของน้ำโลหะ

3.3.1.17 นำน้ำอลูมิเนียมที่หลอมละลายจนได้อุณหภูมิที่ต้องการ เทลงไปในแบบทรายจนเต็ม ดังรูปที่ 3.18

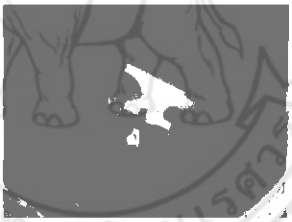
รูปที่ 3.18 เทน้ำอลูมิเนียมลงในแบบทราย

3.3.1.18 รอให้ชิ้นงานเย็นตัวประมาณ 15 นาที ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 รอให้ชิ้นงานเย็นตัว

3.3.1.19 แกะชิ้นงานออกจากแบบทราย ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แกะชิ้นงานออกจากแบบทราย

3.3.1.20 ได้ชิ้นงานที่สำเร็จ ดังรูปที่ 3.21

รูปที่ 3.21 ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อแบบทราย

3.3.2 การวิเคราะห์รูพรุน และการวิเคราะห์โพรงที่เกิดจากการหดตัว

เมื่อทำการทดลองเสร็จแล้ว ผู้ดำเนินโครงงานได้นำชิ้นงานมาวิเคราะห์การเกิดรูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัว ตามหัวข้อที่ 2.7 และนำค่าที่ได้มาบันทึกลงในตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ค่าความแข็งของแบบทราย	ค่าของการเกิดรูพรุน (ร้อยละ)			ค่าการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว (ร้อยละ)		
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3
700	70						
	75						
	80						
800	70						
	75						
	80						
900	70						
	75						
	80						

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

3.4.1 การตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล

ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ผู้จัดทำโครงงานต้องทำการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล โดยนำข้อมูลที่ได้จากการเก็บผลจากการทดลองมาทำการตรวจสอบ ดังนี้

3.4.1.1 การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของข้อมูล โดยใช้โปรแกรม MINITAB ในการวิเคราะห์ผล โดยพิจารณาจากกราฟการแจกแจงของข้อมูล

3.4.1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล โดยใช้โปรแกรม MINITAB ในการวิเคราะห์ผล โดยพิจารณาจากกราฟการกระจายความเป็นอิสระของข้อมูล

3.4.1.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล โดยใช้โปรแกรม MINITAB ในการวิเคราะห์ผล โดยพิจารณาจากกราฟความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล

3.4.2 การทดสอบความแปรปรวน (ANOVA)

โดยใช้การทดสอบความแปรปรวน เพื่อทดสอบผลของอุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ที่มีผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทราย

3.4.3 การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล

โดยใช้โปรแกรม MINITAB ในการวิเคราะห์ผล เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ที่มีผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทราย และหาสมการถดถอยเพื่อหาค่าการพยากรณ์ ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบกับการทดลอง

3.5 สรุปผลการทดลอง

นำผลที่ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทรายที่มีผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทราย มาทำการสรุปผลการทดลองว่าปัจจัยใดมีผลต่อการช่วยลดข้อบกพร่องในการหล่อชิ้นงานแบบทราย

3.6 จัดทำรูปเล่มโครงงานฉบับสมบูรณ์

สรุปผลที่ได้ทั้งหมดจากการดำเนินโครงงาน พร้อมทั้งระบุข้อเสนอแนะ และจัดทำรูปเล่มโครงงานฉบับสมบูรณ์

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากการที่ผู้จัดทำโครงงานได้ดำเนินโครงงานตามหัวข้อที่ 3.1 – 3.5 ได้ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ แสดงได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาและรวบรวมข้อมูล

ผู้จัดทำโครงงานได้ศึกษา และรวบรวมข้อมูลจากหนังสือ งานวิจัย เอกสาร เว็บไซต์ ที่เกี่ยวข้องกับงานหล่อแบบทรายชื้น ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหล่อแบบทราย การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ที่มีผลต่อต่อการเกิดรูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัวของงานหล่อแบบทราย ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 การทำแบบหล่อทรายชื้น

4.1.2 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ

4.1.3 ทรายหล่อ

4.1.4 การทดสอบหาค่าความแข็งของแบบทราย

4.1.5 การออกแบบการทดลอง

4.1.6 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

4.1.7 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องของชิ้นงานหล่อ

นอกจากนี้ผู้จัดทำโครงงานได้ศึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในเรื่องของการปรับปรุงกระบวนการหล่อแบบทรายชื้นในชิ้นงานอลูมิเนียมบริสุทธิ์ เพื่อลดข้อบกพร่องที่มีในชิ้นงาน การวิจัยผลกระทบของสมบัติทรายและอุณหภูมิเท และการลดลงของข้อบกพร่องประเภทการหดตัวในชิ้นงานหล่อ เพื่อนำมาเป็นต้นแบบของการดำเนินโครงงาน ซึ่งในส่วนของรายละเอียดที่กล่าวมานี้ ผู้จัดทำโครงงานได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 2

4.2 ผลการออกแบบการการทดลอง

ในโครงงานนี้ผู้จัดทำโครงงานได้ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองปัจจัย เพื่อจะศึกษาอิทธิพลของปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไปที่ส่งผลต่อกระบวนการทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย โดยในการออกแบบการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ระดับปัจจัย และสมมติฐานที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดปัจจัยในกระบวนการที่จะศึกษาผู้จัดทำโครงงานได้กำหนดปัจจัย 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย โดยมีการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อข้อบกพร่องของชิ้นงานมากที่สุด คือ อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ที่มีผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทราย ซึ่งปัจจัยตอบสนอง คือ การลดลงของการเกิดรูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัวในงานหล่อแบบทราย โดยในการทดลองนั้น ผู้จัดทำโครงงานต้องควบคุมปัจจัยที่ควบคุมได้ตัวอื่นๆ ให้เหมือนกันทุกๆ การทดลอง และออกแบบการทดลองให้ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองน้อยที่สุด หรือไม่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองนั้นเลย

4.2.2 ระดับปัจจัย

จากการกำหนดปัจจัยในหัวข้อที่ 4.2.1 ผู้จัดทำโครงงานได้กำหนดปัจจัยเป็น 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย โดยมีการกำหนดระดับปัจจัยดังนี้

4.2.2.1 อุณหภูมิเท ผู้จัดทำโครงงานได้กำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเป็น 3 ระดับปัจจัย คือ อุณหภูมิเทที่ 700 องศาเซลเซียส, 800 องศาเซลเซียส และ 900 องศาเซลเซียส เพื่อให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนต่อการวิเคราะห์

4.2.2.2 ความแข็งของแบบทราย ผู้จัดทำโครงงานได้กำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเป็น 3 ระดับปัจจัย คือ ความแข็งของแบบทรายที่ 70, 75 และ 80 เพื่อให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนต่อการวิเคราะห์

4.2.3 สมมติฐานที่ใช้ในการทดลอง

ผู้จัดทำโครงงานได้ตั้งสมมติฐานขึ้นเพื่อตรวจสอบปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง และระดับปัจจัยที่กำหนดขึ้นมา คือ อุณหภูมิเทที่ 700 องศาเซลเซียส, 800 องศาเซลเซียส และ 900 องศาเซลเซียส และความแข็งของแบบทรายที่ 70, 75 และ 80 มีผลต่อการเกิดรูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัวของงานหล่อแบบทรายหรือไม่ ซึ่งผู้จัดทำโครงงานได้กำหนดสมมติฐานแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.3.1 การกำหนดสมมติฐานเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 1 คือ อุณหภูมิเท

H_0 : อุณหภูมิเทไม่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน

H_1 : อุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน

เมื่ออุณหภูมิเท คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส

4.2.3.2 การกำหนดสมมติฐานเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ 2 คือ ค่าความแข็งของแบบทราย

H_0 : ความแข็งของแบบทรายไม่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน

H_1 : ความแข็งของแบบทรายมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน

เมื่อความแข็งของทราย คือ ความแข็งของแบบทราย 70, 75 และ 80

4.2.3.3 การกำหนดสมมติฐานเพื่อตรวจสอบผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ 1 และปัจจัยที่ 2 คือ อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย

H_0 : อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ไม่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน

H_1 : อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน

4.3 การทดลองและการบันทึกผลการทดลอง

จากการกำหนดสมมติฐานในหัวข้อที่ 4.2.3 เพื่อตรวจสอบว่าปัจจัย และระดับปัจจัยที่กำหนดขึ้นมานั้นมีผลต่อการเกิดรูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัวของงานหล่อแบบทรายหรือไม่ ผู้จัดทำโครงงานจึงได้ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง โดยใช้ปัจจัย และระดับปัจจัยตามที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 และ 4.2.2 ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าของการเกิดรูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัว

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ค่าความแข็งของแบบทราย	ค่าของการเกิดรูพรุน (ร้อยละ)			ค่าการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว (ร้อยละ)		
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3
700	70	2.29	2.33	2.48	0.92	2.54	2.31
	75	2.3	2.28	2.57	0.92	2.31	3.00
	80	2.73	2.37	2.74	1.15	2.54	3.70
800	70	3.37	3.46	3.91	1.15	0	2.31
	75	3.68	4.50	3.46	0.92	2.08	2.54
	80	4.05	4.01	4.51	1.15	2.77	0
900	70	4.98	5.92	5.88	0.69	2.31	0
	75	6.72	4.85	4.81	1.15	2.77	2.08
	80	6.08	4.73	4.50	0.92	3.47	2.31

4.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

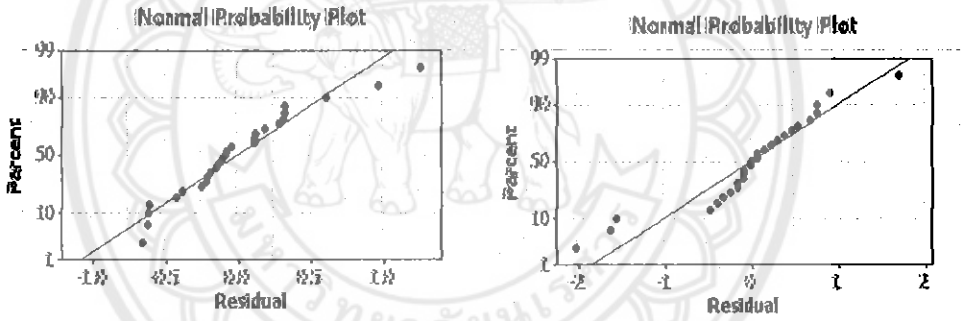
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติได้ดังนี้

4.4.1 ตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล

เมื่อผู้จัดทำโครงงานได้ดำเนินการทดลอง และได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 จากนั้นผู้จัดทำโครงงานจะนำผลการทดลองมาตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล ดังกล่าวในทฤษฎีตามหัวข้อที่ 2.6.1 ซึ่งประกอบด้วยการตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล ซึ่งมีรายละเอียดในการตรวจสอบข้อมูลดังนี้

4.4.1.1 การตรวจสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูล

การตรวจสอบการกระจายของข้อมูลแบบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลสามารถทำได้โดยนำค่าส่วนตกค้าง และร้อยละความน่าจะเป็นของความถี่สะสม มาสร้างกราฟการกระจายแบบแจกแจงปกติของข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.1

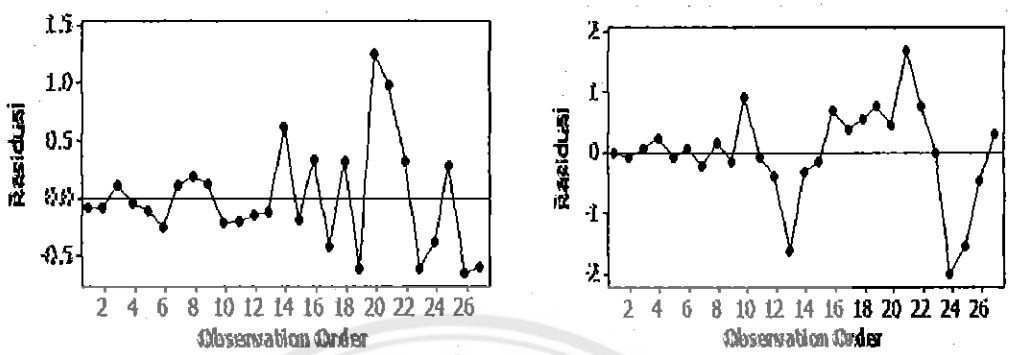


รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายแบบปกติของข้อมูลของการเกิดรูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัว

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่ากราฟมีจุดตัดที่เรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรง ลักษณะการเกิดจุดจะไม่รวมกันเป็นกลุ่มๆ และค่าระยะห่างระหว่างจุดแต่ละจุดจะใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่นอกจากนั้นผู้จัดทำโครงงานได้ทำการพิจารณาค่า P - Value ของค่าสถิติทดสอบ Kolmogorov – Smirnov มีค่าเท่ากับ 0.129 และ 0.092 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบแจงแจกแบบปกติ

4.4.1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

จากการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล สามารถทำได้โดยนำค่าส่วนที่ตกค้าง และลำดับของข้อมูล มาสร้างการตรวจความอิสระของข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.2

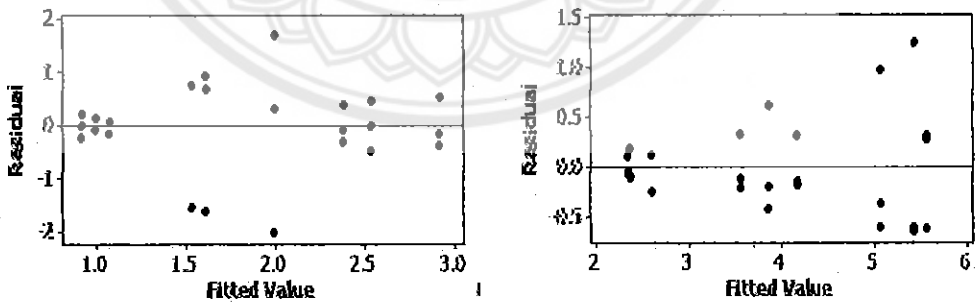


รูปที่ 4.2 กราฟความเป็นอิสระของข้อมูลของการเกิดรูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัว

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่ากราฟมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ไม่สามารถคาดเดาค่าต่อไปได้ ไม่มีแนวโน้มขึ้น หรือว่าลงเพียงอย่างเดียว ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระ

4.4.1.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล

จากการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน สามารถทำได้โดยนำค่าส่วนตกค้าง และค่าของผลการทดลอง มาสร้างกราฟความเสถียรของความแปรปรวน ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูลการเกิดรูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัว

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่ากราฟมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวก และทางลบ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

4.4.2 การทดสอบความแปรปรวนข้อมูล

เมื่อข้อมูลผ่านการตรวจสอบความเหมาะสมตามหัวข้อที่ 4.4.1 ผู้จัดทำโครงงานจึงนำข้อมูลมาทดสอบความแปรปรวนของข้อมูล เพื่อตรวจสอบว่า อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทรายมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานหรือไม่ ซึ่งแสดงผลการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลได้ดังตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองปัจจัยของรูพรุน

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Squares	F	P-Value
อุณหภูมิเท	38.6724	2	19.3362	63.43	0.000
ความแข็งของแบบทราย	0.0673	2	0.0337	0.11	0.896
(อุณหภูมิเท) * (ความแข็งของแบบทราย)	0.9894	4	0.2474	0.81	0.534
Error	5.4873	18	0.3049		
Total	45.2165	26			

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองปัจจัยของโพรงที่เกิดจากการหดตัว

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Squares	F	P-Value
อุณหภูมิเท	8.5804	2	4.2902	4.87	0.02
ความแข็งของแบบทราย	2.3858	2	1.1929	1.35	0.283
(อุณหภูมิเท) * (ความแข็งของแบบทราย)	1.77091	4	0.4427	0.5	0.734
Error	15.8561	18	0.8809		
Total	28.5933	26			

4.4.2.1 จากตารางที่ 4.2 ผู้จัดทำโครงงานจะพิจารณาค่า P - Value กับค่านัยสำคัญ เพื่อตรวจสอบว่า อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีรายละเอียดในการตรวจสอบสมมติฐาน ตามที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.2.4 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

ก. ตรวจสอบสมมติฐานที่ 1 คือ อุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดรูพรุน หรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

H_0 : อุณหภูมิเทไม่มีผลต่อการเกิดรูพรุน

H_1 : อุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดรูพรุน

เมื่ออุณหภูมิเท คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส

ค่าระดับนัยสำคัญที่ได้จากการทดลอง (P - Value) มีค่า เข้าใกล้ 0 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_1 ปฏิเสธ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นั่นคือ อุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดรูพรุน เมื่ออุณหภูมิเท คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข. ตรวจสอบสมมติฐานที่ 2 คือ ค่าความแข็งของแบบทรายมีผลต่อการเกิดรูพรุนหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

H_0 : ความแข็งของแบบทรายไม่มีผลต่อการเกิดรูพรุน

H_1 : ความแข็งของแบบทรายมีผลต่อการเกิดรูพรุน

เมื่อความแข็งของทราย คือ ความแข็งของแบบทราย 70, 75 และ 80

ค่าระดับนัยสำคัญที่ได้จากการทดลอง (P - Value) มีค่า เข้าใกล้ 0 แต่มีค่ามากกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_1 ยอมรับ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นั่นคือ ความแข็งของแบบทราย ไม่มีผลต่อการเกิดรูพรุน เมื่ออุณหภูมิเท คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ค. ตรวจสอบสมมติฐานที่ 3 คือ อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย มีผลต่อการเกิดการเกิดรูพรุน หรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

H_0 : อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ไม่มีผลต่อการเกิดรูพรุน

H_1 : อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย มีผลต่อการเกิดรูพรุน

เมื่ออุณหภูมิเท คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส และความแข็งของทราย คือ ความแข็งของแบบทราย 70, 75 และ 80

ค่าระดับนัยสำคัญที่ได้จากการทดลอง (P - Value) มีค่า เข้าใกล้ 0 แต่มีค่ามากกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_1 ยอมรับ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นั่นคือ อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ไม่มีผลต่อการเกิดรูพรุน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.4.2.4 จากตารางที่ 4.3 ผู้จัดทำโครงงานจะพิจารณาค่า P - Value กับค่านัยสำคัญ เพื่อตรวจสอบว่า อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีรายละเอียดในการตรวจสอบสมมติฐาน ตามที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.2.4 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

ก. ตรวจสอบสมมติฐานที่ 1 คือ อุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว หรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

H_0 : อุณหภูมิเทไม่มีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว

H_1 : อุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว

เมื่ออุณหภูมิเท คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส

ค่าระดับนัยสำคัญที่ได้จากการทดลอง (P - Value) มีค่า เข้าใกล้ 0 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_1 ปฏิเสธ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นั่นคือ อุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว เมื่ออุณหภูมิเท คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข. ตรวจสอบสมมติฐานที่ 2 คือ ค่าความแข็งของแบบทรายมีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว หรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

H_0 : ความแข็งของแบบทรายไม่มีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว

H_1 : ความแข็งของแบบทรายมีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว

เมื่อความแข็งของทราย คือ ความแข็งของแบบทราย 70, 75 และ 80

ค่าระดับนัยสำคัญที่ได้จากการทดลอง (P - Value) มีค่า เข้าใกล้ 0 แต่มีค่ามากกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_1 ยอมรับ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นั่นคือ ความแข็งของแบบทราย ไม่มีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว เมื่ออุณหภูมิเท คือ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ค. ตรวจสอบสมมติฐานที่ 3 คือ อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย มีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว หรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

H_0 : อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ไม่มีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว

H_1 : อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย มีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว

ค่าระดับนัยสำคัญที่ได้จากการทดลอง (P - Value) มีค่า เข้าใกล้ 0 แต่มีค่ามากกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_1 ยอมรับ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นั่นคือ อุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ไม่มีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัว ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.4.3 การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล

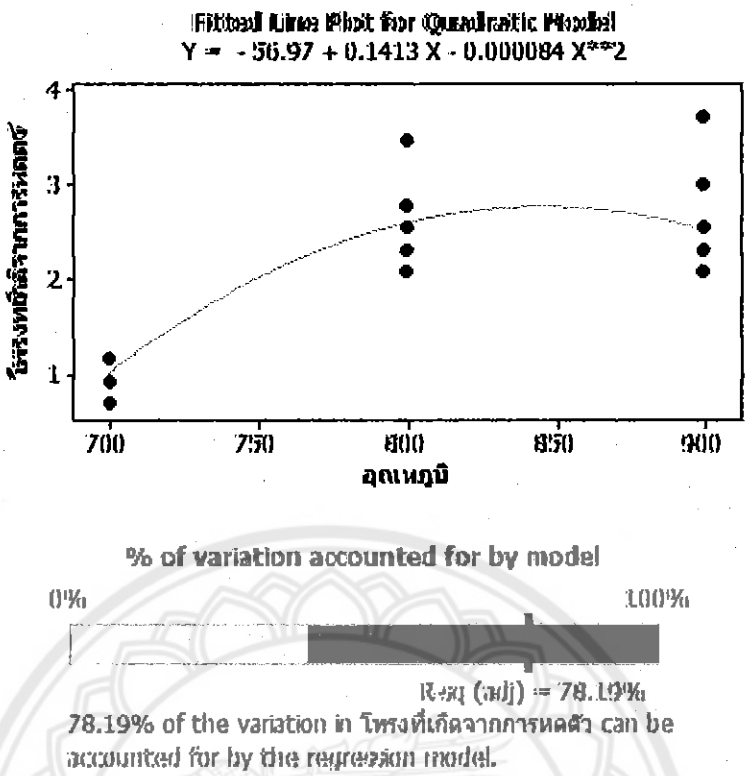
4.4.3.1 การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลของโพรงที่เกิดจากการหดตัว

จากการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลตามหัวข้อที่ 4.4.2 ซึ่งทำให้ทราบว่าปัจจัยและระดับปัจจัยที่กำหนดขึ้นตามหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 มีผลต่อการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัวของชิ้นงานหรือไม่ จากนั้นผู้จัดทำโครงงานจึงได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความถดถอย โดยใช้โปรแกรม MINI TAB เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของปัจจัยในการทดลองว่ามีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงานอย่างไร และมีแนวโน้มทิศทางใด โดยผลการวิเคราะห์ความถดถอยของข้อมูล แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์การถดถอยของโพรงที่เกิดจากการหดตัว

Predictor	Coef.	P - Value
Constant	- 7.157	0.074
อุณหภูมิ	0.005146	0.032
ความแข็งของแบบทราย	0.06431	0.167
Std. Error of Estimate = 0.956691 R - sq (adj) = 0.168		

จากตารางที่ 4.4 ผู้จัดทำโครงงานได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นตรงซึ่งจะได้ค่า R - sq (adj) = 0.168 หมายความว่าปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยที่สนใจศึกษาในกระบวนการการทดลองมีความสัมพันธ์กันต่ำ (R - sq (adj)) ซึ่งทำให้ทราบว่าสมการถดถอยนี้ไม่มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน ดังนั้น ผู้จัดทำโครงงานจึงได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยใหม่โดยเปลี่ยนจากการถดถอยเชิงเส้นตรงเป็นการถดถอยแบบ Quadratic Model ได้ผลดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงการวิเคราะห์การถดถอย

จากรูปที่ 4.4 สามารถสร้างสมการถดถอย ได้ดังนี้

ร้อยละของโพรงที่เกิดจากการหดตัว = -56.97 + 0.1413อุณหภูมิเท – 0.000084**อุณหภูมิเท (4.1)**

โดยความเหมาะสมในการนำสมการถดถอยไปใช้งานนั้น สามารถพิจารณาได้จากค่า R - sq (adj) โดยที่ค่า R - sq (adj) ที่ได้จากรูปที่ 4.4 มีค่าเท่ากับ 0.781 ซึ่งมีค่า**เข้าใกล้ 1 สามารถสรุปได้ว่า**ปัจจัยในสมการถดถอยมีความสัมพันธ์ในระดับดี หรือสมการมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน และจากการวิเคราะห์กราฟจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทในการหล่อชิ้นงาน การเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัวมีแนวโน้มที่ลดลง แต่ผู้ดำเนินโครงงานไม่สามารถหล่อชิ้นงานที่อุณหภูมิเทที่สูงๆ ได้ เนื่องจากขีดความสามรถของอุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อชิ้นงาน

4.4.3.2 การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลของการเกิดรูพรุน

จากการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลตามหัวข้อที่ 4.4.2 ซึ่งทำให้ทราบว่าอุณหภูมิเทที่ 700 องศาเซลเซียส, 800 องศาเซลเซียส และ 900 องศาเซลเซียส มีผลต่อการเกิดรูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัวของชิ้นงาน จากนั้นผู้จัดทำโครงงานจึงได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความถดถอย โดยใช้โปรแกรม MINITAB เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของปัจจัยในการทดลองว่ามีผล

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์การถดถอยของรูพรุน

Predictor	Coef.	P - Value
Constant	- 8.735	0.000
อุณหภูมิ	0.014656	0.000
ความแข็งของแบบทราย	0.001223	0.622
Std. Error of Estimate = 0.51980 R - sq (adj) = 0.845		

จากตารางที่ 4.5 สามารถสร้างสมการถดถอย ได้ดังนี้

รูพรุน = - 8.735 + 0.014656อุณหภูมิ + 0.001223ความแข็งของแบบทราย **(4.2)**

โดยความเหมาะสมในการนำสมการถดถอยไปใช้งานนั้น สามารถพิจารณาได้จากค่า R โดยที่ค่า R - sq (adj) ที่ได้จากตารางที่ 4.5 มีค่าเท่ากับ 0.845 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยในสมการถดถอยมีความสัมพันธ์ในระดับดี หรือสามารถนำไปพยากรณ์ได้ แต่ในการนำสมการถดถอยไปใช้งานนั้นต้องคำนึงถึงค่า P – Value เปรียบเทียบกับค่าระดับนัยสำคัญ ถ้าค่า P - Value มีค่ามากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่าปัจจัยดังกล่าวไม่มีความสัมพันธ์กับสมการถดถอย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความแข็งของแบบทรายไม่มีความสัมพันธ์หรือมีความสัมพันธ์น้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ ดังนั้นสมการถดถอยในการนำไปใช้งาน คือ

รูพรุน = -8.735 + 0.014656อุณหภูมิ **(4.3)**

จากนั้นนำค่าของอุณหภูมิมาทำการแทนค่าย้อนกับไปในสมการที่ 4.3 ซึ่งจะได้ค่าของการเกิดรูพรุนที่ได้จากการพยากรณ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าจากการพยากรณ์

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ค่าความแข็งของแบบทราย	ค่าของการเกิดรูพรุน (ร้อยละ)
700	70	3.38
	75	3.44
	80	3.50
800	70	4.84
	75	4.90
	80	4.96
900	70	6.31
	75	6.37
	80	6.43

4.4.3.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าของรูพรุนจากการทดลอง และค่าของรูพรุนจากการพยากรณ์

ก่อนการนำสมการถดถอยไปใช้งาน ผู้จัดทำโครงงานต้องทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าของรูพรุนจากการทดลอง และค่าของรูพรุนจากการพยากรณ์ ด้วยวิธี t – test เพื่อแสดงให้เห็นว่าค่าของรูพรุนจากการทดลอง และค่าของรูพรุนจากการพยากรณ์ มีความแตกต่างกันหรือไม่ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ก. ตั้งสมมติฐาน

H_0 : ค่าของการเกิดรูพรุนทั้ง 2 ไม่แตกต่างกัน คือ $\mu_1 = \mu_2$

H_1 : ค่าของการเกิดรูพรุนทั้ง 2 แตกต่างกัน คือ $\mu_1 \neq \mu_2$

ข. กำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบ α คือ 0.05

ค. เลือกตัวสถิติที่เหมาะสม

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

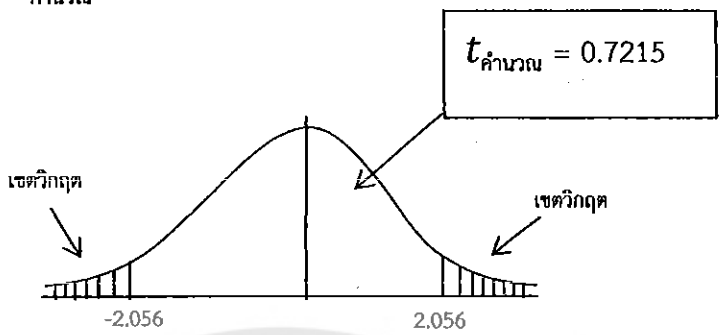
$$t_{\text{คำนวณ}} = \frac{0.6398}{\sqrt{\frac{(27)(0.77237) - 0.6398^2}{26}}}$$

$$t_{\text{คำนวณ}} = 0.7215$$

ง. สร้างเกณฑ์การตัดสินใจ นั่นคือ จะทำการปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 เมื่อ $t_{คำนวน}$ ตกนอกเขตวิกฤต ซึ่งหมายความว่า $t_{คำนวณ} > t_{ตาราง}$ หรือ $t_{คำนวณ} < t_{ตาราง}$

จ. เปิดค่า $t_{ตาราง}$ ได้จาก $t(0.025,26) \approx 2.056$

ฉ. คำนวณค่าสถิติ $t_{คำนวณ} = 0.7215$



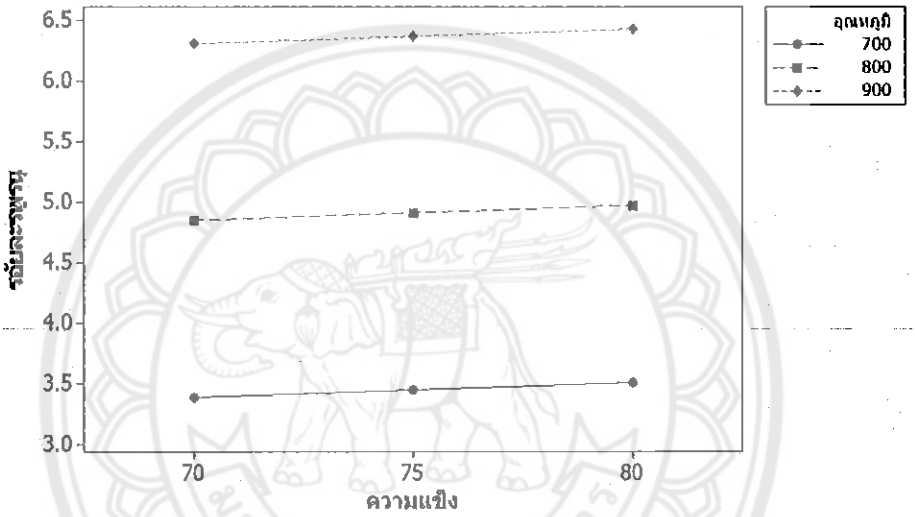
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงเกณฑ์การตัดสินใจ

ช. การตัดสินใจ และตีความ จะเห็นได้ว่าจากรูปที่ 4.5 $t_{คำนวณ}$ ตกอยู่นอกวิกฤตดังนั้นจึงยอมรับ H_0 และปฏิเสธ H_1 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าของอุณหภูมิเทของทั้งสองกลุ่มไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าอุณหภูมิเทจากการทดลอง และค่าอุณหภูมิเทจากการพยากรณ์แล้ว จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิเททั้งสองกลุ่มไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และข้อมูลจากการพยากรณ์ ซึ่งได้จากสมการถดถอยนั้นสอดคล้องกัน และสามารถนำสมการถดถอยมาคำนวณหาค่าอุณหภูมิเทพยากรณ์ได้

4.4.3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์

จากตารางที่ 4.6 ผู้จัดทำโครงงานได้นำข้อมูลมาแทนค่าในสมการ 4.2 เพื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ที่มีผลต่อการเกิดรูพรุน เพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการทดลอง ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่อุณหภูมิเท ช่วงระหว่าง 700 – 900 องศาเซลเซียส และค่าความแข็งของแบบทรายในช่วง 70 – 80 ซึ่งจากกราฟถ้าหากจะหล่อชิ้นงานที่ทำให้เกิดรูพรุนที่น้อย ก็จะใช้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวจะทำให้ลดข้อบกพร่องที่เกิดจากการหล่อแบบทรายประเภทรูพรุนต้องใช้อุณหภูมิเทที่ 700 องศาเซลเซียสความแข็งของแบบทรายที่ 70 ก็จะได้การเกิดรูพรุนที่น้อย โดยแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเท และความแข็งของแบบทราย ที่มีผลต่อการเกิดรูพรุน

จากการวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ เมื่อทำการเพิ่มความแข็งของแบบทราย และอุณหภูมิเทให้มากขึ้น การเกิดรูพรุนก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากแบบมีความแน่นเกินไป และน้ำโลหะที่ใช้ในการหล่อชิ้นงานมีอุณหภูมิที่สูงเมื่อทำการหล่อชิ้นงานแก๊สที่อยู่ในน้ำโลหะไม่สามารถที่จะระบายความร้อนออกจากแบบทรายได้ ดังนั้นจึงทำให้ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อเกิดรูพรุนเพิ่มขึ้น

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อแบบทรายชื้น ทางผู้ดำเนินโครงงานได้สรุปผลของการดำเนินโครงงานโดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงงาน

จากการดำเนินโครงงาน เรื่องการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อข้อบกพร่อง ในงานหล่อแบบทรายชื้น สามารถสรุปผลการดำเนินโครงงานได้ดังนี้

5.1.1 การตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูล

จากการตรวจความเหมาะสมของข้อมูล เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งมีการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติของข้อมูล การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล พบว่าข้อมูลชุดนี้ผ่านเงื่อนไขทั้ง 3 ข้อ ทำการสรุปได้ว่า ข้อมูลชุดนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนได้

5.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

จากการตรวจสอบความแปรปรวนของข้อมูล สามารถสรุปผลได้ว่า อุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดรูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัว ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

5.1.3 การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล

5.1.3.1 จากการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลของโพรงที่เกิดจากการหดตัว พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด ต่ำกว่าที่จะนำมาสร้างความสัมพันธ์ในรูปของสมการถดถอย ผู้จัดทำโครงงานจึงได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยใหม่โดยทำการวิเคราะห์การถดถอยแบบ Quadratic Model ได้ดังนี้

ร้อยละของโพรงที่เกิดจากการหดตัว = -56.97 + 0.1413อุณหภูมิเท – 0.000084อุณหภูมิเท (5.1)

โดยความเหมาะสมในการนำสมการถดถอยไปใช้งานนั้น สามารถพิจารณาได้จากค่า R - sq (adj) โดยที่ค่า R - sq (adj) ที่ได้จากตารางที่ 4.4 มีค่าเท่ากับ 0.781 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยในสมการถดถอยมีความสัมพันธ์ในระดับดี หรือสมการมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้

5.1.3.2 จากการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลของรูพรุน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด อยู่ในช่วงระดับที่ดี จึงสามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังนี้

$$\text{รูพรุน} = -8.735 + 0.014656\text{อุณหภูมิ} \qquad (5.2)$$

โดยความเหมาะสมในการนำสมการถดถอยไปใช้งานนั้น สามารถพิจารณาได้จากค่า R โดยที่ค่า R - sq (adj) ที่ได้จากตารางที่ 4.5 มีค่าเท่ากับ 0.845 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยในสมการถดถอยมีความสัมพันธ์ในระดับดี หรือสมการมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากการดำเนินโครงงาน พบว่า ความแข็งของแบบทรายที่ทำการคัดเลือกมา เมื่อทำการวิเคราะห์ผลออกมาแล้ว ทำให้ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของการเกิดรูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัวที่ชัดเจน ดังนั้นควรปรับค่าความแข็งของแบบทรายให้มีค่าที่แตกต่างกันมากกว่านี้ เพื่อให้เห็นถึงผลของการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนมากขึ้น

5.2.2 จากการดำเนินโครงงานในขั้นตอนการเก็บผล ค่าที่เก็บได้ไม่ค่อยแม่นยำ ถ้าหากผู้ที่สนใจจะศึกษา ควรทำการศึกษาเรื่องการวิเคราะห์รูพรุน และโพรงที่เกิดจากการหดตัว โดยวิธีการอื่นๆ เพื่อให้การวิเคราะห์ผล และเก็บผลการทดลองให้ได้ค่าที่แม่นยำ

5.2.3 ควรจะศึกษาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการหล่อให้ละเอียด เพราะอาจจะส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องที่เกิดต่อชิ้นงานในงานหล่อแบบทรายชื้น

เอกสารอ้างอิง

กานต์ ลี่วัฒนายิ่งยง. (2552). **สถิติวิศวกรรม (Engineering Statistics).** ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.

บัณฑิต ใจชื่น. (2527). **หล่อโลหะ 1.** กรุงเทพฯ: วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษาวิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ.

พงษ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2551). **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiments).** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท้อป.

พัชรา น้อยนคร. (2550). **การปรับปรุงกระบวนการหล่อแบบทรายชื้นในชิ้นงานอลูมิเนียมบริสุทธิ์.** วิทยานิพนธ์ วท.ม., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

สุรเชษฐ์ อัจจิมารังษี. (2551). การลดข้อบกพร่องประเภทการหดตัวในชิ้นส่วนงานหล่อ ของช่วงล่างรถบรรทุก. ใน **บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.** สาขาวิศกรรมการจัดการอุตสาหการ ภาควิชาวิศกรรมอุสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุริยา. **การทำแบบหล่อ.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%97%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%A2&source=web&cd=1&ved=0CDMQFjAA&url=http%3A%2F%2Fapp.eng.ubu.ac.th%2F~edocs%2Ff20060804Suriya2.doc&ei=xlTIUOfVFMjjrAe6u4Ew&usg=AFQjCNGcERFQuqwrg70IsW3x4MivB69rAA&bvm=bv.1354675689,d.bmk&cad=rja (21 กรกฎาคม 2555).

หริส สูตะบุตร. (2543). **หล่อโลหะ.** กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ศูนย์ธนบุรี.

อัมพร อาจใหญ่. (2554). **การออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาผลของความสัมพันธ์จากการผสมอะลูมิเนียมฟอยด์ ในไม้เทียม เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการส่งผ่านความร้อนของไม้เทียม.** ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.

V.D. Tsoukalas. **Optimization of porosity formation in AlSi9Cu3pressure die castings using genetic algorithm analysis.** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : journal homepage: www.elsevier.com/locate/matdes (18 มกราคม 2552).

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาจำนวนครั้งในการทดลอง

การคำนวณหาจำนวนครั้งในการทดลอง

สามารถคำนวณหาได้จากสมการ 2.2 ดังต่อไปนี้

$$n = \frac{\delta^2}{\Delta^2}(Z_{\alpha/2} + Z_{\beta})^2$$

โดยที่

n คือ จำนวนของการทดลองซ้ำ

α คือ ระดับความเสี่ยงที่ 0.05

β คือ ระดับความเสี่ยงที่ 0.1

Δ คือ ระดับความแตกต่างที่ร้อยละ 5 และจากการคำนวณ จะได้ Δ^2 = 0.015061

δ คือ ค่าความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่งได้จากการเก็บประวัติ หรือการประมาณการอย่างมีเหตุผล ดังตารางต่อไปนี้

อุณหภูมิเท (องศาเซลเซียส)	ค่าความแข็งของแบบทราย	ค่าของการเกิดรูพรุน (ร้อยละ)		
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3
700	70	2.29	2.33	2.48
	75	2.3	2.28	2.57
	80	2.73	2.37	2.74
800	70	3.37	3.46	3.91
	75	3.68	4.5	3.46
	80	4.05	4.01	4.51
900	70	4.98	5.92	5.88
	75	6.72	4.85	4.81
	80	6.08	4.73	4.501

จากตารางสามารถคำนวณหาค่าของ δ^2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0269

หาค่า Z จากการเปิดตารางค่าวิกฤติของการแจกแจง t

$Z_{\alpha/2} = Z_{0.05/2} = Z_{0.025} = 1.96$

$Z_{\beta} = Z_{0.1} = 1.282$

ดังนั้น

$$n = \frac{0.0269}{0.015061}(1.96 + 1.282)^2$$

$$n \approx 18 \text{ ครั้ง}$$

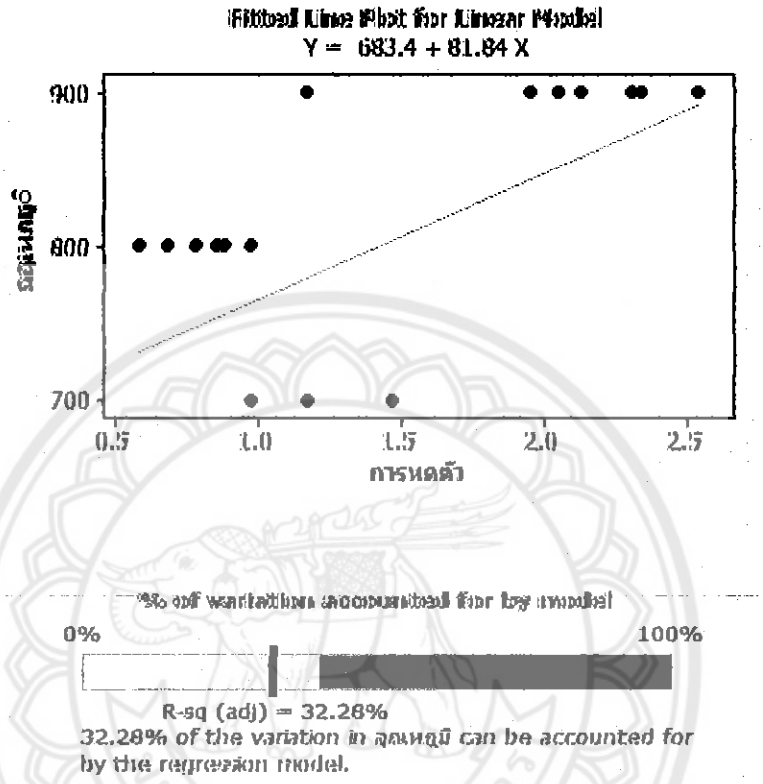
ดังนั้น ต้องทำการทดลองทั้งหมด 18 ครั้ง

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์การถดถอยของโพรงที่เกิดจากการหดตัว

การวิเคราะห์การถดถอยของโพรงที่เกิดจากการหดตัว

1. การวิเคราะห์การถดถอยแบบ Linear Model



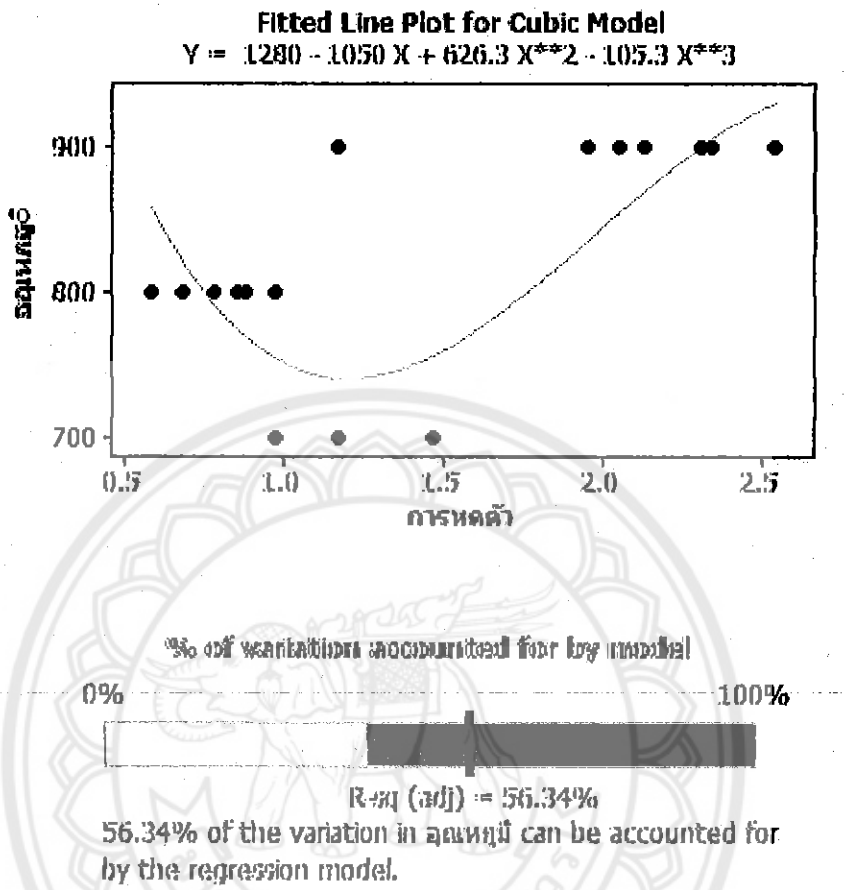
จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบ Linear Model ได้ค่า R – sq (adj) เท่ากับ 0.323 ทำให้ได้สมการถดถอย ดังนี้

$$Y = 683.4 + 81.84x$$

โดยที่ Y คือ ค่าของโพรงที่เกิดจากการหดตัว

X คือ ค่าของอุณหภูมิเท

2. การวิเคราะห์การถดถอยแบบ Cubic Model



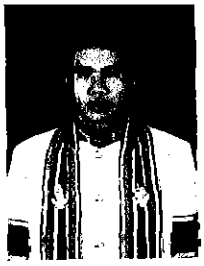
จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบ Cubic Model ได้ค่า R – sq (adj) เท่ากับ 0.563 **ทำให้ได้สมการถดถอย ดังนี้**

$$Y = 1280 - 1050x + 626.3x^2 - 105.3x^3$$

โดยที่ Y คือ ค่าของโพรงที่เกิดจากการหดตัว

X คือ ค่าของอุณหภูมิเท

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน



ชื่อ นายกิตติศักดิ์ ชูเขียว

ภูมิลำเนา 137 หมู่ 2 ต. นครชุม อ. นครไทย จ. พิษณุโลก

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนครชุมพิทยา รัชมังคลาภิเษก จ. พิษณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: c.kittisak_mu5@hotmail.com

ชื่อ นายโกศล พันเทียน

ภูมิลำเนา 33/1 หมู่ 6 ต. ศาลาลัย อ. สามร้อยยอด จ. ประจวบคีรีขันธ์

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสามร้อยยอดวิทยาคม จ. ประจวบคีรีขันธ์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: koson.ph@gmail.com