

การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์ โดยการออกแบบการทดลอง



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม

มิถุนายน 2555

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์ โดยการออกแบบการทดลอง



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม
มิถุนายน 2555

อาทิตย์ นุ่มพันธ์. (2555). การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์ โดยการออกแบบการทดลอง. ปรินซ์นิพนธ์ วิศวกรรม (การจัดการทางวิศวกรรม). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทศพล เกียรติเจริญผล, อาจารย์สิริเดช ชาดินิยม.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ คือเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความกลมของผลิตภัณฑ์กระบอกเลนส์กล้องถ่ายรูป รุ่น PT422-20 พร้อมทั้งหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อลดปริมาณของเสียของผลิตภัณฑ์

การดำเนินการวิจัยได้ใช้วิธีการกำหนดปัจจัยโดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผลในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่เกี่ยวข้องและใช้การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ในการวิเคราะห์กำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อค่าความ ผลการวิเคราะห์พบปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพล 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิการอบชิ้นงาน เวลาการอบชิ้นงานและขนาดอุปกรณ์จับยึด

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับโดยวิธีเพิ่มจุดกึ่งกลาง (2^k with center point) โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิการอบชิ้นงาน เวลาการอบชิ้นงาน และขนาดอุปกรณ์จับยึด ซึ่งพบว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความกลมและพบว่าผลการทดลองมีลักษณะของส่วนโค้ง (Curvature) จึงต้องทำการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design

เทคนิคพื้นผิวตอบสนองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design ถูกนำมาใช้เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์ โดยกำหนดปัจจัยการทดลองทั้งหมด 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิการอบชิ้นงานและเวลาการอบชิ้นงาน ซึ่งการทดลองจะกำหนดขนาดอุปกรณ์จับยึดคงที่เท่ากับ 62.48 มิลลิเมตร เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องจักรทำให้ไม่สามารถปรับระดับปัจจัยได้ จากการทดลองพบว่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์คือ อุณหภูมิการอบอยู่ที่ระดับ 273 – 287 องศาเซลเซียสและเวลาการอบชิ้นงานอยู่ที่ระดับ 8.0 - 8.2 ชั่วโมง

การหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม (Response Optimizer) ถูกนำมาใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระบอกเลนส์พบว่าปัจจัยอุณหภูมิการอบชิ้นงานที่เหมาะสมคือ 279.6 องศาเซลเซียสและปัจจัยเวลาการอบชิ้นงานที่เหมาะสมคือ 8 ชั่วโมง

การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองพบดัชนีศักยภาพความสามารถของกระบวนการ (Potential Process Capability Index; C_p) มีค่าเท่ากับ 2.88 และดัชนีความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Index; C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 1.96 และจากการนำผลลัพธ์ของสภาวะที่ดีที่สุดไปใช้ในกระบวนการผลิตพบว่า จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดลงจาก 4,333 ชิ้น หรือ 22 % เหลือจำนวน 22 ชิ้น หรือ 0.18 % จากข้อมูลเบื้องต้นที่ได้กล่าวมาส่งผลให้สามารถลดมูลค่าของเสียลงได้เท่ากับ 1,651,584 บาทต่อปี

A STUDY OF OPTIMAL CONDITIONS OF LENS TUBE PRODUCTION BY
EXPERIMENTAL DESIGN



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Engineering Management
at Srinakharinwirot University

June 2012

Artid Numahun. (2012). *A Study of Optimal Conditions of Lens Tube Production By Experimental Design*. Master thesis, M.Eng. (Engineering Management). Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst. Prof. Tossapol Kiatcharoenpol, Dr. Siradej Chartniyom.

The objective of this research is to study factors that have effects to roundness of the lens tube of camera model PT422-20 and to determine the suitable condition to the reduction defective of products. The problem was analyzed with Cause and Effect Diagram which could link to risk priority number resulted from Failure Mode and Effect Analysis in Process. The results indicated that annealing time, annealing temperature and diameter of jig fixture has effect to roundness of product.

The factorial design with center point is used to study three factors which are annealing time, annealing temperature and diameter of jig fixture. Roundness of product as response is tested. The statistical analysis shows that the annealing time, annealing temperature and diameter of jig fixture has effect on the result of roundness and found curvature.

By using Central Composite Design experiment, experiment data of two main factors, annealing time and annealing temperature by fix diameter of jig fixture at 62.48 millimeter, were analyzed. The results indicated that the suitable is annealing temperature of 273-287 Celsius and annealing time of 8.0-8.2 hour

Response optimizer with regards of roundness of product was carried out to find the value of process parameters. The suitable is annealing temperature of 279.6 Celsius and annealing time of 8 hour at the diameter of jig fixture of 62.48 millimeter.

Verify of the optimal conditions results is Potential Process Capability Index (C_p) equal to 2.88 and Process Capability Index (C_{pk}) equal to 1.96, it was found that the defective of products wear reduced from 4,333 pieces or 22% to 22 pieces or 0.18% according to reduced the defective value of 1,651,584 baht per year.

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล ที่เสียสละเวลาให้คำปรึกษาแนะนำ ให้ความช่วยเหลือและแก้ไขข้อบกพร่องทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ไปด้วยดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ จนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์

หากวิทยานิพนธ์นี้มีส่วนที่ดีอยู่ ขอมอบความดีทั้งหมดให้แก่ บิดา มารดา ครูอาจารย์ ที่ได้อบรมสั่งสอนมา และผู้มีพระคุณทุกท่าน

อาทิตย์ นุ่มหันต์



สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
การออกแบบการทดลอง.....	3
การวิเคราะห์ระบบการวัด.....	20
กรรมวิธีการผลิตแบบมีเศษ.....	23
ทฤษฎีทางโลหะวิทยา.....	26
ความกลม.....	29
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	40
สำรวจสภาพการดำเนินงานและสภาพปัจจุบัน.....	41
ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา.....	46
แผนการออกแบบการทดลอง.....	47
4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	52
การวิเคราะห์แผนภาพเหตุและผล.....	52
การวิเคราะห์ศึกษาระบบวัด.....	56
ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับโดยวิธีเพิ่มจุดกึ่งกลาง.....	63
ผลการทดลองแบบ Central Composite Design.....	67
การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	76
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	77
สรุปผลและอภิปรายผล.....	77

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 (ต่อ)	
ปัญหาและอุปสรรคในงานวิจัย.....	79
ข้อเสนอแนะ.....	79
บรรณานุกรม	80
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก.	83
ภาคผนวก ข.....	85
ภาคผนวก ค.	88
ภาคผนวก ง	90
ภาคผนวก จ	93
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	103

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงรูปแบบและลักษณะการทดลอง	7
2 แสดงเกณฑ์การประเมินหัวข้อความรุนแรงจากข้อบกพร่อง.....	16
3 เกณฑ์การประเมินในหัวข้อโอกาสในการเกิดขึ้น.....	17
4 เกณฑ์การประเมินหัวข้อลักษณะการตรวจจับ.....	18
5 แสดงลักษณะความบกพร่องที่ผิดรูปแบบจากความกลม.....	30
6 แสดงระดับของพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษา.....	47
7 แสดงการทดลองแบบ 2^3 Factorial โดยเพิ่มจุดกึ่งกลาง.....	48
8 แสดงระดับของพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษา.....	49
9 แสดงการทดลองแบบ Central Composite Design.....	50
10 แสดงข้อมูลของผู้วิเคราะห์.....	52
11 การวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการ.....	54
12 แสดงผลการวัดค่าความกลมของพนักงาน.....	57
13 บันทึกผลการทดลองเบื้องต้น.....	61
14 แสดงปัจจัยคำตความหมายมีอิทธิพลต่อค่าความกลม.....	62
15 แสดงผลลัพธ์การคำนวณสิ่งตัวอย่าง.....	63
16 แสดงผลการทดลองแบบสองระดับโดยเพิ่มจุดกึ่งกลาง.....	64
17 แสดงค่า P value ของปัจจัยต่างๆตามผลทดสอบ.....	66
18 แสดงผลการทดลองแบบ Central Composite Design.....	68
19 แสดงการวิเคราะห์ผลการทดลองหาพื้นที่ผิวตอบสนอง.....	71
20 แสดงผลทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง.....	74
21 แสดงจำนวนของเสียจากกระบวนการผลิตหลังปรับปรุง.....	76
22 ข้อมูลของเสียแยกตามประเภทอาการของโมเดล PT422-20.....	84
23 ข้อมูลค่าความกลมก่อนการปรับปรุง.....	86
24 ข้อมูลค่าความกลมหลังการปรับปรุง.....	87
25 บันทึกการสำรวจความถี่ในการเกิดสาเหตุของลักษณะบกพร่อง.....	94
26 แสดงผลการทดลองแบบสองระดับโดยเพิ่มจุดกึ่งกลาง.....	95
27 แสดงผลการทดลองแบบ Central Composite Design.....	96
28 แสดงผลการวิเคราะห์ระบบการวัด.....	97
29 แสดงการประมวลผล 2^k แฟคทอเรียล โดยวิธีเพิ่มจุดกึ่งกลาง.....	99
30 แสดงการประมวลผล Central Composite Design.....	100

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ.....	3
2 ตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม.....	8
3 จุดของการออกแบบชนิด 2^2 Factorial Design.....	10
4 แสดง Central Composite Design สำหรับ $k = 2$	11
5 ผังแสดงเหตุและผล.....	14
6 แสดงการวัดแบบ Least Squares Circle.....	34
7 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	41
8 อะลูมิเนียมหล่อขึ้นรูป (ADC12).....	42
9 ชิ้นงานจากกระบวนการผลิต.....	42
10 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตชิ้นส่วนโมเดล PT422-20.....	43
11 กระบวนการกลึงหยาดด้านนอก.....	43
12 กระบวนการกลึงหยาดด้านใน.....	44
13 กระบวนการกลึงละเอียดด้านนอก.....	44
14 กระบวนการกลึงละเอียดด้านใน.....	44
15 กระบวนการเจาะรูและกัดร่อง.....	45
16 ผลิตภัณฑ์บัพพร้อมที่รองรับผู้ขายชิ้นส่วนแยกตามรุ่นของชิ้นส่วน	45
17 กราฟแสดงอาการงานเสียผลิตภัณฑ์รุ่น PT422-20.....	46
18 แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล.....	48
19 แผนการทดลองแบบ Central Composite Design.....	50
20 แผนภาพแสดงสาเหตุและผลของปัญหา.....	53
21 แผนภาพพาเรโตแสดงปัจจัยของปัญหา.....	56
22 กราฟแสดงการวิเคราะห์ระบบการวัด.....	58
23 แสดงการวิเคราะห์ระบบการวัด	59
24 แผนผังแสดงการทดลอง.....	60
25 ผลลัพธ์การทดสอบสมมติฐานการกระจายแบบปกติ.....	65
26 ผลลัพธ์การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของข้อมูล.....	65
27 ผลลัพธ์การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล.....	66
28 กราฟแสดงอิทธิพลของ 3 ปัจจัย	67
29 ผลลัพธ์การทดสอบสมมติฐานการกระจายแบบปกติ.....	69

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
30 ผลลัพธ์การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของข้อมูล.....	70
31 ผลลัพธ์การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล.....	70
32 โครงร่างระหว่างปัจจัยอุณหภูมิการอบชิ้นงานและเวลาในการอบชิ้นงาน.....	72
33 พื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยอุณหภูมิการอบชิ้นงานและเวลาการอบชิ้นงาน.....	72
34 แสดงปัจจัยที่เหมาะสม.....	73
35 กราฟแสดงความสามารถของกระบวนการก่อนปรับปรุง.....	75
36 กราฟแสดงความสามารถของกระบวนการหลังปรับปรุง.....	75
37 แสดงผลการวัดค่าความกลม.....	89
38 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน.....	91
39 ตู้อบชิ้นงาน.....	91
40 เครื่องวัดค่าความกลม.....	92
41 แสดงผลการวิเคราะห์ระบบการวัด.....	98
42 แสดงผลกราฟโครงร่าง (Contour plot).....	101
43 แสดงผลพื้นผิวตอบสนอง.....	101
44 แสดงผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม.....	102

บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการแข่งขันกันค่อนข้างสูงดังนั้นผู้ผลิตจึงต้องมีแนวทางในการแข่งขันกับคู่แข่งทางการค้าทั้งทางด้านราคาและบริการอีกประการหนึ่งที่สำคัญคือด้านคุณภาพของสินค้าเป็นประเด็นที่ลูกค้าให้ความสำคัญเป็นลำดับแรกและเป็นปัจจัยในการตัดสินใจสั่งซื้อสินค้าจากผู้ผลิตที่สามารถผลิตสินค้าได้ตรงตามความต้องการอย่างเคร่งครัด การสร้างคุณภาพสินค้าจำเป็นที่จะต้องเริ่มตั้งแต่กระบวนการออกแบบไปจนถึงกระบวนการผลิตจากปัจจัยข้างต้นจึงต้องเพิ่มปริมาณการวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทางด้านการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ช่วยให้ผู้ผลิตสามารถลดต้นทุนการผลิต

อุตสาหกรรมในปัจจุบันมีการสั่งซื้อชิ้นส่วนจากผู้ขายชิ้นส่วน (Vendor) เพิ่มสูงขึ้นจุดประสงค์เพื่อลดต้นทุนการผลิตในด้านแรงงานและวัตถุดิบ อีกทั้งยังเป็นการสร้างพันธมิตรทางการค้า แต่การสั่งซื้อชิ้นส่วนจากผู้ขายชิ้นส่วนก็ยังมีจุดบกพร่องที่อาจทำให้เกิดผลเสียต่อการผลิตซึ่งจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตคือหากผู้ขายชิ้นส่วนมีกระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพที่ไม่ดีส่งผลให้ผู้ผลิตที่ผลิตออกมานั้นคุณภาพไม่ตรงตามความต้องการของลูกค้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตของผู้ผลิต

ดังนั้นการศึกษานี้มาศึกษาและวิจัยพบว่าในปัจจุบันกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์ของกล้องถ่ายรูปมีของเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าความกลมไม่เป็นไปตามข้อกำหนดจำนวน 4,333 ชิ้นจากการผลิตช่วงระยะเวลา 3 เดือนจำนวน 19,695 ชิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 22% ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความกลมของชิ้นงานนั้นมีอยู่หลายปัจจัยเช่น อายุการใช้งานของอุปกรณ์ตัดชิ้นงาน การขนส่งชิ้นงานและการเลือกสภาวะการอบชิ้นงาน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สามารถส่งผลให้เกิดงานเสียได้ ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาปัจจัยต่างๆเพื่อให้สามารถทราบถึงปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อค่าความกลม

จากการศึกษาสามารถคาดหมายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดของเสียคือ อุณหภูมิการอบชิ้นงาน เวลาการอบชิ้นงานและอุปกรณ์การจับยึดชิ้นงานซึ่งข้อกำหนดของสินค้ากำหนดค่าความกลมของผลิตภัณฑ์ต้องไม่เกิน 30 ไมครอนจึงจะถือว่าผลิตภัณฑ์นั้นผ่านมาตรฐานคุณภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความกลมของชิ้นงานในกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์พร้อมทั้งหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ส่งผลให้ค่าความกลมของชิ้นงานเป็นไปตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ การศึกษาดังกล่าวจะประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง เทคนิคที่เลือกใช้คือการทดลอง 2^k แฟกทอเรียลแบบเพิ่มจุดกึ่งกลาง เนื่องจากพื้นฐานของการทดลองแบบแฟกทอเรียลมีจำนวนการทดลองที่ไม่มาก จากนั้นจะหาระดับของปัจจัยโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Surface Response Methodology) และใช้การหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม (Response Optimizer) ในการหาเงื่อนไขของสภาวะที่เหมาะสม

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียเนื่องจากค่าความกลมของผลิตภัณฑ์ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด พร้อมทั้งหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดของเสียน้อยที่สุด เพื่อลดปริมาณของเสียและปรับปรุงคุณภาพชิ้นงาน โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง

3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 3.1 สามารถลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่บกพร่องในกระบวนการผลิตของผู้ผลิตชิ้นส่วน
- 3.2 สามารถลดต้นทุนในกระบวนการผลิตของผู้ผลิตชิ้นส่วน

4. ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาเฉพาะผลิตภัณฑ์กระบอกเลนส์ของกล้องถ่ายรูป (Lens Tube) โมเดล PT422-20 ในกระบวนการผลิตของผู้ขายชิ้นส่วน



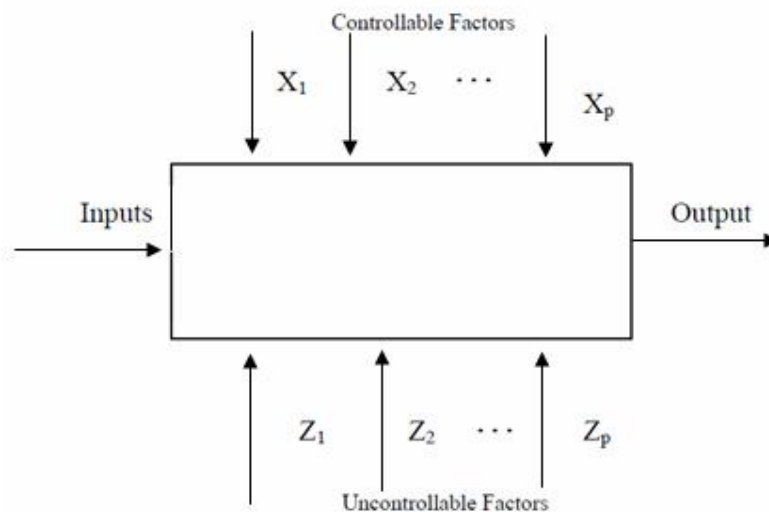
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การทดลอง (Experiment) คือการจำลองสภาพความเป็นจริงให้มาอยู่ในสภาพที่สามารถควบคุมได้ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อเท็จจริงอันเป็นผลจากการปฏิบัติในการศึกษาทดลองโดยที่การทดลองจะแบ่งเป็นการทดลองเบื้องต้นคือการทดลองเพื่อให้ทราบผลอย่างกว้างๆ ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป และการทดลองขั้นตัดสินใจ เป็นขั้นตอนการนำสิ่งที่คัดเลือกได้จากการทดลองเบื้องต้นมาทำการทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบหรือหาสิ่งที่ดีที่สุดในกลุ่ม โดยจะมีการใช้แผนการทดลองแบบต่างๆ การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องจะต้องมีความเข้าใจล่วงหน้าว่ากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร

มอนโกเมอรี (Montgomery, 1997) ได้กล่าวไว้ว่า วัตถุประสงค์ของการทดลองคือ เพื่อที่จะศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งกระบวนการและระบบจะแสดงดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ (Montgomery, 1997)

จากภาพสามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการคือ การรวมกันของเครื่องจักร วิธีการ คน และ ทรัพยากรอื่น เข้าด้วยกันเพื่อเปลี่ยน Input ให้เป็น Output ที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่า โดยที่ตัวแปรของกระบวนการบางตัว ($x_1, x_2, \dots, x_p$) เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ในขณะที่ตัวแปรอื่น ($z_1, z_2, \dots, z_q$) เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นในการออกแบบทดลองจึงมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. หาตัวแปรที่มีผลต่อ Y มากที่สุด
2. หาวิธีการตั้งค่าที่มีผลต่อ Y ที่ทำให้ได้ค่า Y ตามต้องการ
3. หาวิธีการตั้งค่า X ที่มีผลต่อ Y ที่ทำให้ได้ค่า Y มีความแปรปรวนน้อยที่สุด
4. หาวิธีการตั้งค่า X ที่มีผลต่อ Y ทำให้ผลของตัวแปรไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

การออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiment : DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่เราต้องการ ซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบ ลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time) โดยทั่วไปแล้วการออกแบบการทดลองแบบ One Factor at a Time จะให้ผลตอบแทนเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่ต้องการได้ช้ามาก และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมาก และยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีผลของความสัมพันธ์ร่วม (Interaction Effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยกันเอง

1.1 หลักการพื้นฐานสำหรับการออกแบบการทดลอง

1.1.1 จำนวนซ้ำ (Replication) เป็นการทดลองซ้ำๆ โดยมีคุณสมบัติสองประการคือ ทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลองแล้วทดลองซ้ำ จะสามารถทำให้ผู้ทดลองหาค่าประมาณที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

1.1.2 การจัดแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่ทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองเป็นแบบสุ่ม วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริง นอกจากนี้การใช้วิธีการสุ่ม (Random) ทำให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

1.1.3 บล็อกกิง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลองบล็อกอีกหนึ่งอาจหมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมด

1.2 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

1.2.1 กำหนดและทำความเข้าใจปัญหา คือการศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการหรือระบบเพื่อกำหนดปัญหาในการออกแบบการทดลองให้แน่ชัด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดลองบางคนอาจคิดว่าขั้นตอนนี้ง่ายและตรงไปตรงมา แต่ในขั้นตอนนี้อาจจะต้องพยายาม

พัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบ่อยครั้งที่จะต้องหาข้อมูล สำหรับป้อนเข้าจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนกวิศวกรรม แผนกประกันคุณภาพ แผนกผลิต แผนกการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้าและแผนกบุคคลถ่ายแกลงของปัญหาที่มีความชัดเจนจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์ และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้น ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบการทดลองทุกครั้งควรมี การทำงานเป็นทีมซึ่งจะเห็นได้ว่า “ประสบการณ์ขององค์กร (Wisdom of Organization)” นั้นเป็นองค์ประกอบหนึ่งของการออกแบบการทดลองเพราะเป็นจุดเริ่มต้นของการดำเนินงาน คือการใช้ประสบการณ์คาดคะเนว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อปัญหาที่สนใจซึ่งถ้าหากไม่มีในส่วนขอประสบการณ์องค์กรเข้ามาเกี่ยวข้องเลย (เช่น ทีมงานเป็นพนักงานใหม่ทั้งหมด)การออกแบบการทดลองก็ยังคงดำเนินต่อไป แต่จะใช้เวลานานขึ้นเพราะต้องเสียเวลาในการตรวจสอบทุกปัจจัยที่มีอยู่ทั้งหมด

1.2.2 เลือกปัจจัยและกำหนดค่าของปัจจัยที่จะนำทำการทดลอง คือการเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง การกำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงและกำหนดระดับที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดได้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมากซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบดูว่าปัจจัยที่กำหนดขึ้นมานี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Factor screening) เราควรจะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อย การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยควรเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้าง และเมื่อได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและที่ระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด อาจจะลดขอบเขตให้แคบลงได้

1.2.3 เลือกตัวแปรตอบสนอง เป็นตัวแปรที่ใช้ในการวัดผลของกระบวนการ โดยจะเลือกตัวแปรตอบสนองที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรตอบสนอง เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจมีตัวแปรตอบสนองหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรตอบสนอง และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

1.2.4 เลือกการออกแบบการทดลอง ในการเลือกการออกแบบการทดลองนั้น จะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองเสมอโดยจะพิจารณาจำนวนซ้ำขนาดตัวอย่าง (Replicate) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่ใช้ในการเก็บข้อมูลและการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีการจัดกลุ่ม (Blocking) หรือการจัดแบบสุ่ม (Randomization) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ถ้ากิจกรรมการ

วางแผนก่อนการทดลองทำได้ถูกต้องขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับการพิจารณาจำนวนซ้ำขนาดของตัวอย่าง (Replicate) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีการจัดกลุ่ม (Block) หรือการจัดแบบสุ่ม (Randomizations) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบเราจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อค่าตอบสนองที่เกิดขึ้นดังนั้นจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

1.2.5 ทำการทดลองตามวิธีการที่ได้ออกแบบการทดลองไว้แล้ว เมื่อทำการทดลองจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผนถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

1.2.6 วิเคราะห์ผลโดยใช้หลักการทางสถิติ คือการนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ทำการทดลองไว้ เพื่อช่วยในการหาข้อสรุปที่เกิดขึ้นว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่ ควรจะเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดีและถ้าทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติ คือทำให้ผู้มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพและถ้านำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ และสามัญสำนึก จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

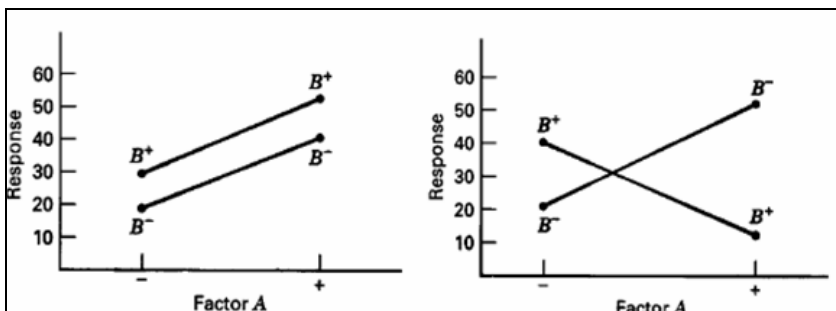
1.2.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการสรุปผลของกระบวนการที่ทำการทดลองซึ่งอาจแสดงในรูปของตาราง กราฟ หรือแผนภูมิเมื่อได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้จะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการนำเสนอผลงานให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation testing) ควรจะทำขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

ตาราง 1 แสดงรูปแบบและลักษณะการทดลอง

รูปแบบการทดลอง	ลักษณะการทดลอง	เวลาในการวิเคราะห์	ความถูกต้อง	งบประมาณ
Single Factor	การทดลองสำหรับหนึ่งปัจจัย โดยปัจจัยดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญที่คาดว่าจะมีผลกระทบสูงสุดต่อปัญหา	รวดเร็ว	ปานกลาง	น้อย
Factorial Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยและเป็นการทดลองเต็มรูปแบบ	ใช้เวลานาน	มากที่สุด	มาก
2^k Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยและเป็นการทดลองเต็มรูปแบบแต่กำหนดระดับของแต่ละปัจจัย อยู่ที่ปัจจัยละ 2 ระดับเท่านั้น	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
2^{k-p} Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยแต่ไม่ทำการทดลองแบบเต็มรูปแบบทั้งหมด (ลดรูป)	รวดเร็ว	น้อย	น้อย

2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Designs)

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งต้องการที่จะศึกษาถึงผลรวมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลหมายถึงการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป เรียกว่า Treatment Combination ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ซึ่งเป็นการทดลองที่มีหลายปัจจัย (Multiple Factor Experiment) และเนื่องจากมีปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้ด้วยการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ และเป็น การออกแบบที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัย ยิ่งกว่านั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลยังเป็นสิ่งจำเป็นเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้นอกจากนั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล ทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ ทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้อิทธิพลของปัจจัยร่วม คือผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้อิทธิพล (Effect) ของปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วมหรือปฏิสัมพันธ์แสดงดังรูป ซึ่งเมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพ และเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพโดย A และ B คือ ปัจจัย 2 ปัจจัย



ภาพประกอบ 2 ตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Montgomery, 1997)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลจะมีรูปแบบทั่วไป คือในกรณีที่ปัจจัย A มีระดับเท่ากับ a ปัจจัย B มีจำนวนระดับเท่ากับ b ปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c ต่อไปเช่นนี้เรื่อย ๆ และทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในลักษณะของการทดลองเชิงแฟคทอเรียล ซึ่งจะมีจำนวนข้อมูลที่ได้ทั้งหมดในการทดลองเท่ากับ $abc\dots n$ และจะต้องมีจำนวนซ้ำอย่างน้อย 2 ซ้ำ (2 Replicate) เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ถ้าอันตรกิริยาที่เป็นไปได้ทั้งหมดถูกนำเข้าไปพิจารณาในแบบจำลองรูปแบบจำลอง รูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่สำคัญได้แก่

1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k จะใช้กับการทดลองหลายปัจจัยที่กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับ เท่านั้น ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับ ที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยเหล่านั้นใน 1 ซ้ำ (1 Replicate) ที่ปริภูมิสำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2 ระดับ มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิด ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการออกแบบการทดลองชนิดนี้ จะทำให้สามารถรองรับปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลงได้สำหรับการเลือกใช้ 2^k แฟคทอเรียลกับ 3^k แฟคทอเรียล จะพิจารณารูปแบบความเป็นเส้นตรง (Linearity) ของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองโดยจะใช้ 2^k แฟคทอเรียลเมื่อรูปแบบของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองมีความเป็นเส้นตรง ซึ่งจะทำให้ความถูกต้องในการตีความมากกว่า ดังนั้นหากว่าอิทธิพลของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนอง มีความเป็นเส้นตรงไม่ดีแล้วจะหันมาใช้แบบ 3^k แฟคทอเรียลแทนจะเหมาะสมกว่า

2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^k หมายถึง การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ประกอบด้วยทรีตเมนต์หรือปัจจัยทั้งหมด k ตัว ซึ่งแต่ละทรีตเมนต์แบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับสูง กลาง ต่ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะแทนด้วยตัวเลข 0, 1 และ 2 ตามลำดับ สำหรับแต่ละทรีต

เมนต์ในการทดลอง 3^k จะถูกแทนด้วยเลข k โดยที่ตัวแรกจะบ่งบอกถึงระดับของตัวแปร A ตัวที่สองจะบ่งบอกถึงระดับของตัวแปร B ,..., และตัว k จะบ่งบอกถึงระดับของตัวแปร K เช่น ในการออกแบบ 3^2 ตัวเลข 00 แสดงให้เห็นว่าเป็นการทดลองตัวแปร A และ B ที่ระดับต่ำและตัวเลข 01 เป็นการทดลองตัวแปร A ที่ระดับต่ำและตัวแปร B ที่ระดับกลาง เป็นต้นในการออกแบบ 3^k นั้น ถ้าตัวแปรที่มีลักษณะเป็นปริมาณ (Quantitative) เราแทนสัมประสิทธิ์ความแตกต่าง Orthogonal Contrast Coefficient เชิงเส้นตรงด้วยตัวเลข -1, 0 และ +1 ตามลำดับซึ่งทำให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลองการถดถอยของผลลัพธ์ที่เกิดจากแต่ละระดับของปัจจัย นอกจากนี้การออกแบบ 3^k ยังสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์และการออกแบบตัวแปรในรูปแบบสมการกำลังสอง (Quadratic) และแทนสัมประสิทธิ์ความแตกต่าง Orthogonal รูปสมการนี้ด้วยเลข +1, -2, -1 ตามลำดับ การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ขึ้นไปในกรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design)จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลองจำนวน 1 ซ้ำ (1 Replicate) จะประกอบด้วยการทดลอง ทั้งหมด ab การทดลองและเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล จะกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลทั่วไป มีรูปแบบทั่วไป คือ $A*B*C*...แฟคทอเรียล$

2.1 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ (Hypothesis Testing) จากที่กล่าวมาแล้วในลำดับขั้นตอนการออกแบบการทดลอง ว่าในการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีทางสถิตินั้นจะมีความเสี่ยงเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่เสมอ ดังนั้นการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลจึงต้องอยู่ภายใต้ความเสี่ยงดังกล่าวการตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบจะตั้งสมมติฐานใน 2 ทางเลือก คือ

H_0 : ระดับของปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการผลิต

H_1 : ระดับของปัจจัยมีผลต่อกระบวนการผลิต

ทั้งนี้ภายใต้ความเสี่ยง 2 ตัว คือ α และ β

α คือ ความเสี่ยงในการที่จะไม่ยอมรับสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ทั้งที่สมมติฐานหลักเป็นจริง หมายถึง ความเสี่ยงในการยอมรับสมมติฐานหลักทั้งที่สมมติฐานหลักไม่เป็นจริงจากความเสี่ยงของทั้ง 2 แบบนี้เอง จึงต้องมีการกำหนดจำนวนซ้ำที่ใช้ในการทดลองเพื่อให้มีความเชื่อมั่น หรือมีความเสี่ยงตามที่กำหนดไว้ และในการทำการวิเคราะห์ก็มักจะให้ค่าของ α คงที่และให้ค่า β น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้การตั้งสมมติฐานจะเป็นการตั้งด้วยความหวังที่จะปฏิเสธ ดังนั้นในการทำการทดสอบสมมติฐานย่อมมีความเสี่ยงที่จะเกิดความผิดพลาดแบบที่ 1 หากจะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ในทางปฏิบัติจะเริ่มจากการตั้งสมมติฐานออกแบบการทดลอง ดำเนินการสุ่มตัวอย่างแล้วทำการวิเคราะห์เพื่อหาความเชื่อมั่นที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลักนั้นๆในทางปฏิบัติเมื่อ

ตั้งสมมติฐานได้แล้วจะทำการออกแบบการทดลองตามความเหมาะสมโดยอาศัยหลักการของ Design of Experiment (DOE) ซึ่งจะกล่าวในขั้นตอนต่อไป

3. การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design)

การออกแบบส่วนประสมกลางเป็นการออกแบบการทดลองที่เป็นส่วนหนึ่งของ Response Surface Methodology ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองสำหรับพิตแบบจำลองกำลังสอง (Second Order Model) และนำไปสู่การแปรผลพื้นผิวผลตอบที่ต้องการศึกษา หลักการนี้นิยมกันอย่างยิ่งทางด้านวิศวกรรม โดยหลักการออกแบบส่วนประสมกลางมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการดังนี้

1. สามารถประมาณการค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในแบบจำลองทำให้ทราบสมการทำนายของแบบจำลองได้

2. จำนวน Run ของแบบจำลองไม่มาก ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลอง

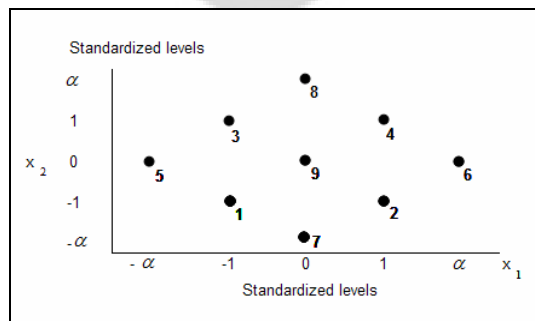
3. สามารถตรวจสอบ Lack of Fit ว่าข้อมูลมีการฟิตในแบบจำลองอย่างไร

4. ยอมให้มีการบล็อกการทดลองเพื่อลดความแปรปรวนของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

5. การคำนวณพารามิเตอร์ในแบบจำลองทำได้ง่ายไม่ซับซ้อนมาก

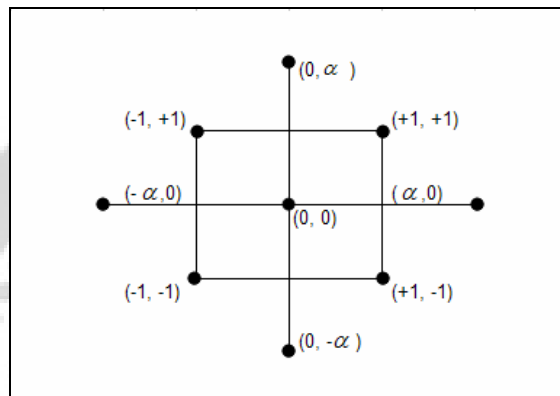
6. ระดับของปัจจัยที่กำหนดปกติอยู่ที่ 2 ระดับจึงทำให้แปรผลตัวแปรอิสระได้ง่าย

หลักการพื้นฐานของการออกแบบส่วนประสมกลางเป็นการขยายการออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial Design แสดงตามภาพประกอบ 3 ซึ่งในรูปนี้เป็นชนิด 2^2 Factorial Design ที่ประกอบด้วย $2k$ หรือจุดที่ 1-4 และเพิ่มจำนวน Runs ที่จุดศูนย์กลางที่เรียกว่า Center runs ในรูปคือจุดที่ 9 กับ Axial Point ที่เรียกว่า Star Runs ซึ่งกำหนดให้เป็นค่า α ในรูปคือจุด 5-8 ค่า α นี้จะเป็นตัวบอกให้ทราบถึงระยะปลายสุดของระดับของปัจจัยที่สนใจศึกษาทั้งทางด้านต่ำและด้านสูง ทั้งนี้เพื่อให้สามารถพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณตามระยะทางจากจุดกึ่งกลางของการออกแบบ ซึ่งคุณสมบัตินี้เรียกว่า Rotatable Design นั่นคือค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าคงตัวบนรูปทรงกลมซึ่งเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่ใช้ในแบบจำลองกำลังสองเพื่อหาพื้นผิวผลตอบ



ภาพประกอบ 3 จุดของการออกแบบชนิด 2^2 Factorial Design (ไพโรจน์ วิริยจารี. 2544)

การออกแบบส่วนประสมกลางมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือเป็นการออกแบบ Orthogonal และ Rotatable ใช้สำหรับพีตแบบจำลองกำลังสองโดยปกติการออกแบบส่วนประสมกลางประกอบด้วย 2^k Factorial ที่มี n_f Runs, $2k$ Axial หรือ Star Runs และ n_c Center Run เพื่อยอมให้ประมาณการความโค้งของผิวตอบ พารามิเตอร์ที่สำคัญคือ α และ n_c โดยปกติค่า α จะขึ้นอยู่กับบริเวณปฏิบัติการทดลองและมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง $\sqrt{k}$ ส่วน n_c ปกติอยู่ระหว่าง $3 \leq n_c \leq 5$ ถ้าระยะทางจากศูนย์กลางของจุดการออกแบบของ Factorial มีค่า ± 1 หน่วยในแต่ละปัจจัยแล้วระยะทางจากจุดศูนย์กลางของ Star Point คือ $\pm \alpha$ ด้วย $|\alpha| > 1$



ภาพประกอบ 4 แสดง Central Composite Design (Myer and Montgomery. 1995)

4. วิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เป็นการรวบรวมเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆตัวและต้องการที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลการตอบสนองเหล่านี้ ตัวอย่างเช่น สมมุติว่ามีวิศวกรเคมีคนหนึ่ง มีความต้องการที่จะหาระดับของอุณหภูมิ(x_1)และความดัน(x_2)ที่จะส่งผลให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุดซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับอุณหภูมิและความดัน ดังสมการ

$$Y = f(x_1, x_2) + \epsilon \quad (1)$$

โดยที่ ϵ คือค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง y ที่เป็นผลจากการทดลองถ้ากำหนดให้

$$E(y) = f(x_1, x_2) = \eta \quad (2)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการของพื้นผิวดังสมการ

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (3)$$

ซึ่งเรียกว่าพื้นผิวดตอบสนอง (Response Surface) โดยมากแล้ว จะทำการแสดงพื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟ โดยที่ η จะถูก Plot กับระดับ x_1 และ x_2 เพื่อให้เราสามารถมองรูปร่างพื้นผิวดตอบสนองได้ดียิ่งขึ้นส่วนใหญ่แล้วจะทำการพล็อต (Plot) เป็นเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวดตอบสนอง ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้ เส้นที่มีค่าผลตอบสนองคงที่จะถูกวาดกับระดับ x_1 และ x_2 ซึ่งเส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวดตอบสนองที่เท่ากันอยู่ค่าหนึ่ง ในปัญหาต่างๆที่เกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนอง ส่วนมากจะไม่ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง และตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นตอนแรกก็คือ จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และตัวแปรอิสระซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามกำลังต่ำๆที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือแบบจำลองกำลังหนึ่งดังสมการ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (4)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่นพหุนามกำลังสองดังสมการ

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_j x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_i \quad (5)$$

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวดตอบสนองส่วนใหญ่จะใช้แบบจำลองหนึ่งในสองแบบที่กล่าวมาข้างต้นแน่นอนว่าแบบจำลองพหุนามดังกล่าวเหล่านี้ จะไม่สามารถใช้ประมาณค่าความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่ว่าพื้นผิวที่สนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กแล้ว แบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวดตอบสนองจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบได้ดีเพียงพอ ดังนั้นการวิเคราะห์พื้นผิวที่สร้างขึ้นมานี้ จะสามารถประมาณค่าได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริงพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองสามารถที่จะถูกประมาณค่าได้เป็นอย่างดี ถ้าเราทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะ

เก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design)

การวิเคราะห์พื้นผิวเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่เรายู่ที่จุดบนพื้นผิวผลตอบที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น ที่เงื่อนไขการทำงานปัจจุบันซึ่งพบว่าผลตอบของระบบนี้ไม่ค่อยเป็นส่วนโค้ง และแบบจำลองกำลังหนึ่งก็พอเพียงในการสร้างแบบจำลองแล้ว วัตถุประสงค์คือ การนำการทดลองไปตามแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุดและอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อที่จะได้ไปใกล้จุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุดและเมื่อค้นพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว จะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้น เช่น แบบจำลองกำลังสอง เป็นต้น เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อให้สามารถหาจุดที่ดีที่สุด จะพบว่าการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบเปรียบเสมือนการปีนภูเขา ซึ่งยอดของภูเขามักจะเป็นจุดที่มีผลตอบสูงสุดหรือถ้าค่าที่ดีที่สุดคือค่าต่ำที่สุด ในที่นี้จะคิดเสมือนว่า กำลังเคลื่อนที่ลงหุบเขา จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบก็คือ การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุด สำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดการทำงานที่น่าพอใจที่สุดเมื่อผู้ทำการทดลองอยู่ใกล้เคียงกับจุดที่ดีที่สุดแล้ว แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งจะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าของผลตอบสนอง ส่วนใหญ่แบบจำลองกำลังสองจะมีรูปแบบดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_j x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_i \quad (6)$$

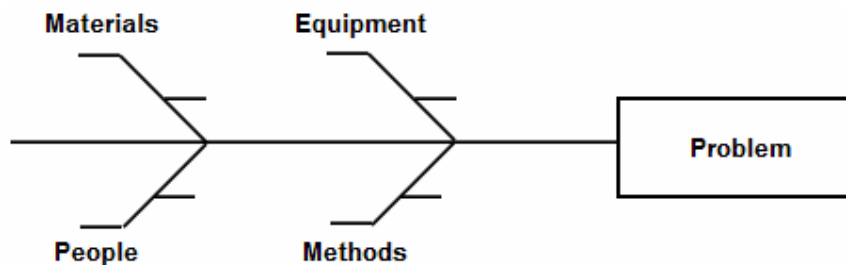
จากตัวแบบข้างต้นผู้วิจัยสามารถหาแบบจำลองกำลังสองเพื่อที่จะนำไปสู่การหาเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดต่อไป ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบนี้ ต้องมีระดับที่ 3 ของปัจจัย ซึ่งนอกจากอาศัยการออกแบบ 3^k Factorial Design แล้วยังมีการออกแบบเพื่อวิเคราะห์เพื่อหาพื้นผิวผลตอบสนอง อีกหลายชนิด เช่น การออกแบบส่วนประสมกลางหรือ Central Composite Design การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design การออกแบบที่เรียกว่า Face-Centered Central Composite หรือ Face Central Cube ซึ่งการออกแบบการทดลองเหล่านี้จะทำให้สามารถลดเวลา ค่าใช้จ่ายหรือลดการทดลองที่ไม่สามารถดำเนินการได้เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านกายภาพของกระบวนการ แต่ยังคงสามารถวิเคราะห์สรุปผลภายใต้เงื่อนไขการทดสอบทางสถิติ

5. เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ปัจจัย

5.1 ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

วีระพงษ์ เณลิมจิระรัตน์ (2542) ผังแสดงเหตุและผล คือ ผังที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางคุณภาพกับปัจจัยต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง กล่าวคือคุณลักษณะทางคุณภาพคือผลที่เกิดขึ้นจากเหตุคือปัจจัยต่างๆ ที่เป็นต้นตอของคุณลักษณะอันนั้น การสร้างผังแสดงเหตุและผลที่จะเอื้อประโยชน์ต่อการแก้ปัญหาได้จริง ไม่ใช่เรื่องง่ายผู้ที่สามารถสร้างผังแสดงเหตุและผลได้

ถูกต้อง คือผู้ที่มีโอกาสจะแก้ปัญหาทางคุณภาพได้ถูกต้องเช่นเดียวกัน ข้อสังเกตเกี่ยวกับกับผังแสดงเหตุและผลจะต้องทำการแยกแยะและเลือกสรร เพื่อหาปัจจัยอันเป็นสาเหตุแห่งปัญหานั้นควรใช้การปรึกษาหารือในกลุ่มคนหลายความคิดมาร่วมกันเพราะการละเว้น หรือมองข้ามปัจจัยบางอย่างจะส่งผลเสียในภายหลังได้



ภาพประกอบ 5 ผังแสดงสาเหตุและผล

ข้อดีของการระดมความคิดแบบเหตุและผล

1. ไม่ต้องเสียเวลามาแยกความคิดต่างๆ ที่กระจัดกระจายเหมือนการระดมความคิดแบบธรรมดา เพราะผังแสดงเหตุและผลจะเป็นตัวกำหนดแยกความคิดพวกเดียวกันไว้ด้วยกัน
2. ได้ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่ละเอียดกว่าการระดมความคิดแบบธรรมดา เพราะทราบสาเหตุใหญ่แล้วยังทราบสาเหตุย่อยๆ อีก ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์ในการแก้ปัญหา เพราะทำให้ทราบสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา

ข้อเสียของการระดมความคิดแบบเหตุและผล

1. ความคิดไม่ค่อยเป็นอิสระมากเพราะมีก้างใหญ่เป็นตัวกำหนดให้ค่อยๆ คิดไปที่ละก้าง ซึ่งผิดกับการระดมความคิดแบบธรรมดาที่คิดอย่างอิสระมากกว่า
2. ต้องอาศัยความสามารถสูง จึงจะใช้ก้างปลาระดมความคิดให้ได้ผลอย่างดี เช่นต้องสามารถเขียนก้างใหญ่หรือสาเหตุใหญ่ของปัญหาได้ก่อนจึงจะสามารถคิดก้างย่อยได้

5.2 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ

การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ หรือ FMEA นั้นเป็นวิธีการกำหนดแนวโน้มที่จะเกิดสภาพความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ เป็นการประเมินความเสี่ยงร่วมกับความล้มเหลวแบบต่างๆ ลำดับความสำคัญของสภาพความล้มเหลวขึ้นอยู่กับความเร่งด่วนหรือสภาพความล้มเหลวนั้น

ชนิดของการวิเคราะห์ความผิดพลาดและผลกระทบของการวิเคราะห์นั้น เป็นวิธีการวิเคราะห์ปัญหาหรือความล้มเหลวอย่างมีระบบและขั้นตอน สำหรับการค้นหาสาเหตุและความผิดพลาดก่อนที่จะเกิดขึ้นจริง เพื่อเป็นการป้องกันก่อนที่จะเกิดปัญหาร้ายแรงขึ้นมาภายหลังและเป็นการลดความเสี่ยงของการเกิดปัญหา โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งตามวิธีการใช้งานได้ดังนี้

1. System FMEA จะใช้สำหรับการออกแบบหรือปรับปรุงระบบการทำงานในการใช้งานมักจะรวมอยู่ในขั้นตอนของ FMEA ชนิดอื่นๆ ได้แก่ การสร้างแนวความคิดในการออกแบบและกำหนดรายละเอียดของระบบงาน การออกแบบ การพัฒนา การทดสอบและการประเมินผลระบบ

2. Design FMEA ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลและแก้ไขงานที่มีการทดลองหรือปฏิบัติเป็นครั้งแรกมักจะพิจารณาเกี่ยวข้องกับกลุ่มของการรวมส่วนประกอบต่างๆ และส่วนของผลิตภัณฑ์ว่ามีหน้าที่การใช้งานตามที่ออกแบบเหมาะสมแล้วหรือไม่

3. Process FMEA ใช้สำหรับกระบวนการผลิตที่มีลักษณะเหมือนกับ Design FMEA แต่จะทำการพิจารณาเกี่ยวกับปัจจัยการผลิตที่สำคัญ คือ พนักงาน เครื่องจักร วัสดุ วิธีการ ระบบการวัดและสภาพแวดล้อม

4. Service FMEA เกี่ยวข้องกับการให้บริการเป็นหลัก โดยให้คนเป็นปัจจัยหลัก

5. Machinery FMEA ใช้สำหรับการวิเคราะห์เครื่องจักรอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ โดยแบ่งเป็นส่วนประกอบต่างๆ เช่น โครงสร้างเครื่องจักร เครื่องมือส่วนทำความเย็น ส่วนส่งกำลัง ส่วนหล่อลื่น ชุดเกียร์ ดับบลิวบี เป็นต้น

การประเมินค่า RPN (Risk Priority Number) หรือดัชนีความเสี่ยงซึ่งนำ สามารถประเมินได้จากสูตร

$$RPN = S \times O \times D$$

โดยที่

RPN = เลขกำหนดลำดับก่อนหลังของความเสี่ยง (Risk Priority)

S = ความรุนแรงของผลจากข้อบกพร่อง (Severity)

O = ความถี่ของข้อบกพร่อง (Occurrence)

D = ความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่อง (Detection)

ตาราง 2 แสดงเกณฑ์การประเมินหัวข้อความรุนแรงจากข้อบกพร่อง (Severity: S)

ผลกระทบ จาก ข้อบกพร่อง	เกณฑ์การประเมินความรุนแรงของผลกระทบ	คะแนน
อันตรายมาก โดยไม่มีการ เตือน	อาจจะทำให้เกิดอันตรายกับเครื่องจักรอื่นหรือผู้ปฏิบัติงานอย่างสูง	10
อันตรายมาก โดยมีการ เตือน	อาจจะทำให้เกิดอันตรายกับเครื่องจักรอื่นหรือผู้ปฏิบัติงาน	9
ผลกระทบสูง มาก	ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดอาจต้องถูกทำลายหรือส่งเข้าซ่อมแซมในแผนกซ่อมบำรุงโดยใช้เวลามากกว่า 1 ชั่วโมง	8
ผลกระทบสูง	อาจมีการตรวจสอบผลิตภัณฑ์แบบคัดเลือก (Sorting) และผลิตภัณฑ์บางส่วนอาจถูกทำลายหรือถูกซ่อมแซมในแผนกซ่อมบำรุงโดยใช้เวลาระหว่างครึ่งถึงหนึ่งชั่วโมง	7
ผลกระทบ ปานกลาง	ผลิตภัณฑ์บางส่วนอาจถูกทำลายหรือถูกซ่อมแซมในแผนกซ่อมบำรุงใช้เวลาต่ำกว่าครึ่งชั่วโมง	6
ผลกระทบต่ำ	ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดอาจได้รับการ Rework หรือได้รับการซ่อมแซมนอกสายการผลิตที่ฝ่ายผลิต	5
ผลกระทบต่ำ มาก	ผลิตภัณฑ์อาจได้รับการตรวจสอบแบบคัดเลือก โดยไม่มีผลิตภัณฑ์ที่ต้องถูกทำลายแต่อาจมีผลิตภัณฑ์บางส่วนได้รับการ Rework	4
ผลกระทบ เล็กน้อย	มีผลิตภัณฑ์บางส่วนอาจได้รับการ Rework ในสายการผลิตแต่ต้องทำนอกบริเวณจุดปฏิบัติงานที่ต้องถูกทำลาย	3
เกือบไม่มี ผลกระทบ	มีผลิตภัณฑ์บางส่วนที่มีจำนวนต่ำกว่า 100% อาจได้รับการ Rework ในสายการผลิตที่จุดปฏิบัติงานโดยไม่ถูกทำลาย	2
ไม่มี ผลกระทบ	อาจมีความไม่สะดวกสบายเล็กน้อยต่อการปฏิบัติงานหรือตัวพนักงานหรือไม่มีผลกระทบใดๆ	1

ตาราง 3 เกณฑ์การประเมินในหัวข้อโอกาสในการเกิดขึ้น

โอกาสในการเกิดขึ้นของสาเหตุหนึ่งๆ	อัตราข้อบกพร่องที่เป็นไปได้ (PPM)	Ppk	คะแนน
สูงมาก: เกิดข้อบกพร่องเป็นประจำ	$\geq 100,000$ (หรือ 10%)	< 0.55	10
	50,000 (หรือ 5%)	≥ 0.55	9
สูง: เกิดข้อบกพร่องบ่อย	20,000 (หรือ 2%)	≥ 0.78	8
	10,000 (หรือ 1%)	≥ 0.86	7
ปานกลาง: เกิดข้อบกพร่องเป็นครั้งคราว	5,000 (หรือ 0.5%)	≥ 0.94	6
	2,000 (หรือ 0.2%)	≥ 1.00	5
	1,000 (หรือ 0.1%)	≥ 1.10	4
ต่ำ: เกิดข้อบกพร่องค่อนข้างน้อย	500	≥ 1.20	3
	100	≥ 1.30	2
ห่างไกล: เกือบไม่มีโอกาสเกิดข้อบกพร่อง	≤ 10	≥ 1.67	1

ตาราง 4 เกณฑ์การประเมินหัวข้อลักษณะการตรวจจับ

ลักษณะการตรวจจับ	เกณฑ์	ประเภทการตรวจจับ			ขอบเขตวิธีการตรวจจับ	คะแนน
		A	B	C		
เกือบเป็นไปไม่ได้	ไม่มีระบบการตรวจจับใดๆ			x	ไม่สามารถตรวจสอบหรือตรวจจับได้	10
ห่างไกลมาก	มีระบบควบคุมแต่ไม่สามารถตรวจจับข้อบกพร่องได้			x	การควบคุมกระทำได้เพียงการสุ่มตรวจเท่านั้น	9
ห่างไกล	มีระบบควบคุมแต่มีโอกาสน้อยมากที่จะตรวจจับข้อบกพร่องได้			x	การควบคุมกระทำได้ด้วยการตรวจสอบด้วยตาเปล่าเท่านั้น	8
น้อยมาก	มีระบบควบคุมแต่มีโอกาสน้อยมากที่จะตรวจจับข้อบกพร่องได้			x	การควบคุมกระทำได้ด้วยการตรวจสอบด้วยตาเปล่าสองครั้งเท่านั้น	7
น้อย	มีระบบควบคุมและอาจจะตรวจจับข้อบกพร่องได้		x	x	การควบคุมกระทำได้ด้วยแผนภูมิ SPC	6
ปานกลาง	มีระบบควบคุมและอาจจะตรวจจับข้อบกพร่องได้		x		มีการควบคุมโดยใช้เครื่องมือวัดวัดชิ้นงานก่อนออกจากจุดปฏิบัติงานหรืออาจใช้เกจแบบ Go/NoGo	5
ปานกลางค่อนข้างสูง	มีระบบควบคุมและมีโอกาสสูงที่จะตรวจจับข้อบกพร่องได้	x	x		มีการตรวจสอบจับความผิดพลาดในกระบวนการถัดไปหรือมีการใช้เครื่องมือวัดงานชิ้นแรกในขั้นตอนปรับตั้ง	4

ตาราง 4 (ต่อ)

ลักษณะการ ตรวจจับ	เกณฑ์	ประเภท การตรวจจับ			ขอบเขตวิธีการ ตรวจจับ	คะแนน
		A	B	C		
ค่อนข้างสูง	มีระบบควบคุมและมี โอกาสสูงที่จะตรวจจับ ข้อบกพร่องได้	x	x		มีการตรวจจับความ ผิดพลาดที่จุด ปฏิบัติงานหรือมีการ ตรวจจับความ ผิดพลาดโดยการ ตรวจสอบเพื่อการ ยอมรับ	3
สูง	มีระบบควบคุมและ เกือบจะมั่นใจได้ว่า สามารถตรวจจับ ข้อบกพร่อง	x	x		มีการตรวจจับความ ผิดพลาดที่จุด ปฏิบัติงานหรือด้วย เครื่องมืออัตโนมัติ ซึ่งงานบกพร่องไม่ สามารถผ่านไปได้	2
สูงมาก	มีระบบควบคุมและ มั่นใจได้ที่สามารถ ตรวจจับข้อบกพร่อง	x			ไม่มีโอกาสเกิด ผลิตภัณฑ์บกพร่อง เพราะใช้ Poka Yoke ในขั้นตอนการ ออกแบบผลิตภัณฑ์ และกระบวนการ	1

6. การวิเคราะห์ระบบการวัด

ในการควบคุมคุณภาพมีความจำเป็นต้องดำเนินการวัดค่าที่แสดงถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เพื่อพิจารณาว่าผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีพารามิเตอร์ตรงตามข้อกำหนดหรือไม่ นอกจากนี้แล้วยังแสดงถึงความผันแปรของผลิตภัณฑ์ที่พิจารณาด้วยว่ามาจากระบบการผลิตมากน้อยเพียงไร จึงอาจกล่าวได้ว่าหากไม่สามารถวัดผลของงานได้ก็จะไม่เข้าใจสภาพของงาน และไม่สามารถเข้าใจสภาพของงานได้ เราก็ไม่สามารถจัดการใดๆ ได้ทั้งกระบวนการและผลิตภัณฑ์ ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าระบบการวัดจะมีความสำคัญอย่างยิ่งทั้งต่อการควบคุมและการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการ

นิยามการวัดคือ การกำหนดตัวเลขให้กับสิ่งที่สนใจ

นิยามระบบการวัดคือ องค์ประกอบร่วมของบุคลากร เครื่องมือ วิธีการทำสิ่งที่สนใจให้เป็นตัวเลขเพื่อแสดงถึงคุณสมบัติของสิ่งดังกล่าว

เอแอก (AIAG. 2002) ได้ให้ความหมายของระบบการวัดว่าหมายถึง สิ่งที่รวบรวมไว้ซึ่งอุปกรณ์วัดคุมหรือเกจวัด มาตรฐาน การปฏิบัติงาน วิธีการ อุปกรณ์จับยึด ซอฟต์แวร์ บุคลากร สิ่งแวดล้อมและข้อสมมุติต่างๆที่ใช้ในการกำหนดปริมาณของหน่วยวัดหรือประเมินคุณลักษณะที่ได้รับการวัด หรืออาจกล่าวง่ายๆว่าคือ กระบวนการอย่างสมบูรณ์ที่ใช้ในการวัด

ระบบการวัดที่ดีจะทำให้ได้ข้อมูลจากการวัดที่สามารถอธิบายความผันแปรของสิ่งที่ทำการวัดได้ ซึ่งคุณสมบัติที่ดีของระบบการวัดมี 4 ประการดังนี้

1. มีความไว (Sensitivity) และความสามารถในการแยกความแตกต่าง(Discrimination) อย่างเพียงพอ กล่าวคือ ระบบการวัดควรมีความละเอียดอย่างเพียงพอในการตรวจจับความผันแปรที่เล็กกว่าระหว่างความผันแปรของกระบวนการและช่วงพิสัยของข้อกำหนดเฉพาะ
2. ระบบการวัดควรจะสามารถอยู่ภายใต้การควบคุมเชิงสถิติ คือ จะต้องดำเนินการภายใต้เงื่อนไขที่สามารถทำได้ (Repeatable Conditions) โดยความผันแปรที่เกิดขึ้นควรจะมาจากสาเหตุโดยธรรมชาติที่มีคุณสมบัติในการคาดการณ์ได้
3. ในการควบคุมผลิตภัณฑ์ ความผันแปรจากระบบการวัดต้องมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงพิสัยของข้อกำหนดเฉพาะโดยจะทำการประเมินความผันแปรของระบบการวัดเทียบกับความคลาดเคลื่อนอนุโลม (Tolerance) ของข้อกำหนดเฉพาะ
4. ในการควบคุมกระบวนการความผันแปรจากระบบการวัดต้องสามารถแยกความแตกต่างได้โดยจะต้องมีขนาดเล็กอย่างเพียงพอเมื่อเปรียบเทียบกับความผันแปรของกระบวนการผลิต โดยจะทำการประเมินความผันแปรของระบบการวัดเทียบกับความผันแปรโดยธรรมชาติหรือความสามารถของกระบวนการผลิต

ความผันแปรในระบบการวัด

สิ่งที่ได้รับการวัด (Measurand) ค่าหนึ่งทีถือเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าเมื่อนำมาผ่านกระบวนการวัดจะทำให้เกิดการผันแปรของค่าการวัด โดยค่าความผันแปรนี้มีสาเหตุมาจากปัจจัยต่างๆ อาทิ พนักงานวัด วิธีการวัด เครื่องมือวัด ตลอดจนสิ่งแวดล้อมในการวัด ฯลฯ ความผันแปรในระบบการวัดนี้จะสามารถคาดการณ์ได้ ถ้าหากกระบวนการวัดอยู่ภายใต้การควบคุม หมายความว่าค่าวัดจะมีความผันแปรจากสาเหตุโดยธรรมชาติ (Common cause) แต่ถ้าหากมีสิ่งที่มีผลกระทบเกิดขึ้นในขณะที่ทำการวัดจะทำให้ค่าวัดมีความผันแปรจากสาเหตุความผิดพลาด (Special cause) ที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ ด้วยความผันแปรจากสาเหตุโดยธรรมชาติของค่าวัด จะมีผลทำให้ค่าวัดที่ได้เบี่ยงเบนไปจากค่าจริงของสิ่งที่ได้รับการวัดเสมอ ดังนั้น ถ้าให้ X หมายถึง ค่าวัดที่ได้และ μ หมายถึง ค่าจริงของสิ่งที่ได้กับการวัดแล้วจะได้ว่า

$$X_i = \mu + \varepsilon_i \quad (7)$$

โดยจะเรียก ε นี้ว่าเป็นความคลาดเคลื่อนของค่าวัด (Measurement Error) โดยทั่วไปแล้ว อาจจะจำแนกประเภทของความคลาดเคลื่อนของค่าวัดออกเป็น 3 ประเภท คือ ความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาด (Gross Error) ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Error) และความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random Error)

ความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาด เป็นความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสาเหตุที่ผิดพลาดของระบบการวัด และสามารถกำจัดทิ้งได้ด้วยการทำระบบการวัดให้เป็นมาตรฐาน ตลอดจนการควบคุมกระบวนการวัดโดยอาศัยหลักการควบคุมกระบวนการโดยอาศัยสถิติ

ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ หมายถึง ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าไบอัส (Bias) โดยที่นิยามค่าไบอัสว่าเป็นความเบี่ยงเบนของค่าที่ควรจะเป็น (Expected value) จากค่าจริงของสิ่งที่ได้รับการวัด คือ

$$\text{ค่าไบอัส} = \overline{X_i} - \text{ค่าจริง} \quad (8)$$

โดยค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบนี้ จะมีสาเหตุโดยส่วนใหญ่มาจากโครงสร้างของเครื่องมือวัด ตลอดจนปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อค่าวัด หรือปริมาณที่มีผลต่อค่าวัด (Influence quantity) ซึ่งหมายถึง ปริมาณที่มีใช้ปริมาณของสิ่งที่ได้รับการวัดแต่มีผลต่อค่าวัด เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในขณะที่ใช้ไมโครมิเตอร์วัดความยาว ความถี่ในการวัดขนาดของความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าสลับ เป็นต้น และค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบนี้จะแสดงถึงคุณสมบัติค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบการวัด ซึ่งสามารถกำจัดได้ด้วยการสอบเทียบ (Calibration)

ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม หมายถึง ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าวัดอิสระแต่ละค่าของค่าวัดที่ควรจะเป็น โดยความคลาดเคลื่อนแบบนี้มีสาเหตุจากธรรมชาติของระบบการวัดที่ไม่สามารถกำจัดทิ้งได้แต่สามารถลดปริมาณของความคลาดเคลื่อนลงได้ด้วยการปรับปรุงระบบการวัด อาทิ การใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานขณะทำการวัด

$$\text{ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม} = X_i - \bar{X} \quad (9)$$

ประเภทของความผันแปรของระบบการวัด

การวิเคราะห์ถึงความผันแปรของระบบการวัด สามารถจำแนกประเภทของความผันแปรออกเป็น 5 ประเภทด้วยกันคือ ไบอัส (Bias) ความมีเสถียรภาพ (Stability) คุณสมบัติเชิงเส้นตรง (Linearity) รีพีทะบิลิตี้ (Repeatability) และรีโพรดูซิบิลิตี้ (Reproducibility)

ไบอัส (Bias) คือความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าเฉลี่ยของค่าวัดที่วัดได้บนคุณลักษณะและชิ้นงานวัดเดียวกัน ซึ่งคุณสมบัติด้านไบอัสจะแสดงถึงความคลาดเคลื่อนเชิงระบบของระบบการวัดที่ได้มาจากการออกแบบระบบการวัด

ความมีเสถียรภาพ (Stability) คือ ความผันแปรทั้งหมดในการวัดที่ได้จากระบบการวัดหนึ่งบนค่ามาตรฐานเดียวกัน หรือชิ้นงานที่ทำการวัดคุณลักษณะประการหนึ่งตลอดช่วงระยะที่ยาวขึ้น โดยคุณสมบัติด้านความมีเสถียรภาพนี้แสดงถึงสาเหตุจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ทั้งภายในและภายนอกกระบวนการ เช่น การเกิดสนิม การสึกหรอของอุปกรณ์ ความล้าของพนักงาน สภาวะแวดล้อมที่แปรเปลี่ยนไป จึงมีความจำเป็นต้องกำหนดช่วงเวลาในการสอบเทียบและปรับเทียบเครื่องมือ

คุณสมบัติเชิงเส้นตรง (Linearity) คือ ความแตกต่างของค่าไบอัสตลอดช่วงการใช้งานของอุปกรณ์วัดและคุณสมบัติด้านเชิงเส้นตรงที่ไม่สามารถยอมรับได้นี้จะมีค่าไบอัสที่ไม่คงที่

รีพีทะบิลิตี้ (Repeatability) คือ ความผันแปรของค่าวัดรอบค่าที่ควรจะเป็น (Expected value) ของระบบการวัดที่ได้มาจากการวัดงานชิ้นเดียวกัน พนักงานคนเดียวกัน อุปกรณ์วัดงานเดียวกัน แล้วทำการวัดแบบซ้ำๆ ซึ่งจะสามารถลดความผันแปรนี้ได้ด้วยการปรับวิธีการวัดใหม่ หรือทำการลดความผันแปรภายในตัวพนักงาน เช่น ความล้า หรือจากปัจจัยแวดล้อมในช่วงสั้นๆ ของการวัด

รีโพรดูซิบิลิตี้ (Reproducibility) คือ ความผันแปรของค่าเฉลี่ยจากการวัดที่เกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการวัดชิ้นงานเดียวกัน ซึ่งโดยทั่วไปมักเกิดจากการเปลี่ยนพนักงานวัดและในบางครั้งอาจจะมาจากการเปลี่ยนปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่ใช่พนักงานวัด อาทิ การเปลี่ยนกะงาน การเปลี่ยนอุปกรณ์วัด ซึ่งสามารถลดความผันแปรประเภทนี้ได้ด้วยการควบคุมการตั้งของเครื่องมือวัด รวมถึงการปรับวิธีการทำงานให้ความผันแปรระหว่างพนักงานลดลงโดยอาศัยอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

7. กรรมวิธีการผลิตแบบมีเศษ

กรรมวิธีการผลิตแบบมีเศษ เป็นการผลิตชิ้นงานทางกลที่จะมีเศษโลหะเกิดขึ้นจากการผลิตได้แก่ การเจาะ การกลึง การกัด และการบ่มขึ้นรูป เศษโลหะนี้ถือว่าเป็นต้นทุนที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น แต่กรรมวิธีการผลิตแบบนี้ก็ไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้

การกลึง (Lathe)

การกลึงคือ การตัดปอกโลหะบนแท่นกลึงหรือเครื่องกลึง โดยการให้ชิ้นงานหมุนตัดกับมีดกลึงที่เคลื่อนที่เชิงเส้นเข้าหาชิ้นงาน การกลึงมี 2 ลักษณะได้แก่ การกลึงปาดหน้า คือการตัดโลหะโดยให้มีดกลึงตัดเฉือนชิ้นงานตามแนวขวาง และการกลึงปอก คือการตัดโลหะโดยให้มีดกลึงเคลื่อนที่ตัดเฉือนชิ้นงานขนานกับแนวแกนของชิ้นงาน

การกลึงให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญได้แก่ อัตราความเร็วในการตัด ความลึกของการป้อนมีดกลึง ความคมของมีดกลึง และชิ้นงานที่จะทำการกลึงตัดเฉือน เมื่อมีปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ครบถ้วนจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดและผิวราบเรียบตามความต้องการและการสึกหรอของมีดกลึงช้าลง

มีดกลึงคือ เครื่องมือตัดที่ใช้ในการตัดเฉือนชิ้นงานในงานกลึง มีดกลึงต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญได้แก่ มีความเหนียว มีความแข็งแรงและยังคงความแข็งแรงเมื่อมีอุณหภูมิสูง มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ และต้านทานต่อการเสียดสีได้ดี มีดกลึงจะต้องมีการลับมุมต่างๆ ให้ถูกต้อง เพื่อให้การกลึงมีประสิทธิภาพ และงานกลึงมีคุณภาพ

วัสดุทำมีดกลึงมีหลายชนิดดังต่อไปนี้

1. เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel ; HCS) เป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอน 0.8– 1.2 % จึงสามารถทำการชุบแข็งได้ดี มีความเหนียว และสามารถเพิ่มความแข็งแรงจนมีค่าใกล้เคียงกับเหล็กกล้ารอบสูงอย่างไรก็ตาม เหล็กกล้าชนิดนี้จะสูญเสียความแข็งแรงที่อุณหภูมิประมาณ 300 °C มีความสามารถในการชุบแข็งซึ่มลึกต่ำ จึงถูกจำกัดการใช้งานเฉพาะงานตัดขนาดเล็ก และไม่เหมาะในการตัดด้วยความเร็วสูงหรือในงานหนัก

2. เหล็กกล้ารอบสูง (High Speed Steel; HSS) เป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงซึ่มลึก คงความแข็งแรงแม้จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และมีการต้านทานต่อการสึกหรอและการขัดถูสูง เหล็กกล้าเครื่องมือชนิด M (ผสมโมลิบดีนัม (Molybdenum) เป็นหลัก) จะมีโมลิบดีนัมสูง และมีโครเมียมหรือวาเดเนียม เหล็กกล้าเครื่องมือชนิด M ผสมทังสเตน (Tungsten) เป็นหลัก จะมีทังสเตนผสมสูง รวมทั้งโครเมียมและวาเดเนียม และบางกรณีจะมีโคบอลต์ผสมสูงด้วย ใช้ทำตัวโยนศูนย์เครื่องกลึง แม่พิมพ์งานร้อน มีดกลึง ดอกสว่าน และตัวตัดเกลียวใน ซึ่งส่วนมากใช้ทำเครื่องมือตัด เหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูงชนิด M จะมีโมลิบดีนัม 4-8.5%, โครเมียม 4%, ทังสเตน 1.5-6% และวาเดเนียม 2% เหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูงชนิด T จะมีคาร์บอนสูง ซึ่งจะต้านทานการสึกหรอสูงและมีความแข็งแรงมาก มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในเหล็กกล้าเครื่องมือ ถ้ามีทังสเตนเพิ่มขึ้นความเหนียวจะลดลง

โครเมียม 4% จะควบคุมความสามารถในความแข็ง ถ้าโครเมียมลดลงเหล็กกล้าจะสูญเสียคุณภาพในการเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือรอบสูง วาเนเดียมจะเพิ่มคุณภาพในการตัดของเหล็กกล้ารอบสูงและต้านทานการขัดถู

3. คาร์ไบด์ (Carbide) เป็นวัสดุที่มีความแข็งสูงมากกว่าเหล็กกล้ารอบสูง มีความเปราะและมีราคาแพงกว่าเหล็กกล้ารอบสูงมาก คาร์ไบด์หรือนิยมเรียกกันว่า มิดเล็บ ผลิตโดยการรวมวิธีทางโลหะกรรมผง โดยการผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ 94% และโคบอลต์ 6% แล้วกดอัดในแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างตามที่ได้ออกแบบไว้ แล้วนำไปอบในเตาอบ เหมาะสำหรับการกลึงเหล็กหล่อ มิดตัดคาร์ไบด์ที่เหมาะสมสำหรับเหล็กกล้าจะผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ 82%, ไททาเนียมคาร์ไบด์ 10% และโคบอลต์ 8% ส่วนผสมนี้จะมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ทำให้มีการสึกหรอหรือความเป็นแอ่งลดน้อยลง ตัวมิดกลึงจะยึดติดกับฐานโดยใช้สกรูยึดหรือการบัดกรีแข็ง

4. เพชร (Diamond) เพชรเป็นวัสดุที่แข็งที่สุดในโลก แต่มีความเปราะสูงมากเพชรใช้ในการตัดวัสดุที่มีความแข็งมาก ๆ จนยากต่อการทำงานด้วยมิดตัดชนิดอื่น ๆ ทั้งยังต้องการความแม่นยำและผิวงานที่ดีและใช้ในการตัดที่มีอัตราความเร็วสูงสำหรับวัสดุอ่อน เช่น การตัดพลาสติกยางแข็ง แท่งคาร์บอนและอลูมิเนียมที่อัตราเร็วตัด 5-25 เมตรต่อวินาที รวมทั้งสามารถใช้ในการตกแต่งล้อหินเจียรไน และแม่พิมพ์ดิ่งลวดขนาดเล็ก

5. เซรามิก (Ceramic) เซรามิกมีความแข็งสูง แต่มีความเปราะเช่นเดียวกับคาร์ไบด์และเพชร ได้แก่ โบรอนไนเตรด ตัวมิดกลึงจะยึดติดกับฐานโดยใช้สกรูยึดหรือการอึดพอกซี มิดตัดซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon Nitride) จะใช้ในการกลึงปาดเหล็กหล่อ มิดตัดเซรามิกชนิดนี้มีอายุการใช้งานนานกว่ามิดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์ถึง 6 เท่า

การกัด (Milling)

เครื่องกัดเป็นเครื่องจักรชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถทำงานได้กว้างขวางกว่าเครื่องกลึง ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการกัดเฉือนจากเครื่องกัดนี้จะมีคุณภาพสูงกว่างานเจาะ งานกลึงและงานไส เนื่องจากระยะการป้อนตัดของคมมีดกัดสามารถทำได้ดีกว่า ตลอดจนระบบกลไกต่างๆภายในเครื่องกัดจะทำให้ชิ้นงานมีความละเอียดและมีความประณีตสูง นอกจากนี้ตัวมิดกัดยังมีคมมีดที่มีรูปร่างแตกต่างกันไปตามลักษณะของงานกัด ตลอดจนมีอุปกรณ์กลไกที่ช่วยทำให้การทำงานของเครื่องกัดสามารถทำได้กว้างขวางมากกว่าเครื่องจักรชนิดอื่นๆ

ตัวมิดกัดจะมีฟันอยู่รอบๆมิดกัดจะติดตั้งอยู่กับเพลารหรือแกนหมุน เมื่อเพลารหมุนเคลื่อนที่ไปตามจุดต่างๆของชิ้นงาน มิดกัดจะหมุนตัดเฉือนชิ้นงานให้ได้รูปร่างและขนาดตามต้องการ โดยคุณภาพของชิ้นงานในการกัดจะขึ้นอยู่กับขนาดความโตของมิดกัด ชนิดของมิดกัด รูปร่างของมิดกัด ชนิดของวัสดุของชิ้นงานและความเร็วของเพลารและการป้อนกัด

ชนิดของเครื่องกัดแบ่งออกตามการจัดวางแกนหมุนและการใช้งานได้ดังนี้

1. เครื่องกัดแบบแกนราบหรือแกนนอน(Horizontal Milling Machine) เครื่องกัดแบบนี้ มีดกัดจะติดตั้งอยู่กับแกนหมุนในแนวราบ แทนจับชิ้นงานจะอยู่ในแนวแกน $x - y$ ข้อดีของเครื่องกัดแบบนี้คือ สามารถติดตั้งมีดที่กัดได้ทั้งด้านข้างและด้านหน้าเพราะว่ามีดกัดสามารถติดตั้งได้แนวนานบนแกนหมุน จึงกัดงานหนักได้ดี กัดได้รวดเร็ว ใช้กัดงานเป็นช่องหรือเป็นร่องและอาจจะติดตั้งมีดกัดได้หลาย ๆ ตัวบนแกนหมุนพร้อมกัน ซึ่งสามารถกัดชิ้นงานได้หลายรูปแบบในคราวเดียวกัน

2. เครื่องกัดแบบแกนตั้ง (Vertical Milling Machine) เครื่องกัดแบบนี้แกนหมุนจะอยู่ในแนวตั้ง มีดกัดจะติดตั้งอยู่แนวเดียวกับแกนหมุน แกนหมุนสามารถที่จะยืดเข้าไปหาชิ้นงานที่ติดตั้งอยู่บนแท่นจับชิ้นงานได้เพื่อกัดหรือเจาะชิ้นงานเหมาะสำหรับการติดตั้งมีดกัดแบบ End mill

3. เครื่องกัดแบบยูนิเวอร์แซล (Universal Milling Machine) เครื่องกัดแบบนี้สามารถทำงานได้อย่างกว้างขวางมาก แท่นจับชิ้นงานจะติดตั้งกับฐานที่สามารถหมุนเป็นวงกลมได้และแท่นจับชิ้นงานสามารถเอียงได้ถึง 45° และแท่นจับชิ้นงานสามารถหมุนรอบแกนตั้งได้ ดังนั้นเครื่องกัดแบบยูนิเวอร์แซลจึงสามารถหมุนได้ 3 ทิศทาง โดยเครื่องกัดแบบยูนิเวอร์แซลใช้ผลิตเฟืองฟันตรงเฟืองฟันเฉียงและอื่นๆ

ชนิดของมีดกัดสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. มีดกัดชิ้นงานผิวราบเรียบ มีดกัดชนิดนี้จะมีหน้ากว้างและมีคมตัดเฉพาะด้านหน้าด้านเดียว

2. มีดกัดคมตัดข้างเรียบและคมตัดหน้า มีดกัดชนิดนี้มีคมตัด 3 ด้านคือ คมตัดด้านข้างตรงทั้งสองด้านและคมตัดด้านหน้าอีกหนึ่งด้าน รวมแล้วมีคมตัดอยู่ 3 ด้าน ทำให้การกัดร่องจะมีเศษโลหะอัดในร่องอัด เนื่องจากคมตัดด้านข้างจะตัดเศษเหล็กออกไป

3. มีดกัดแบบ Involute Gear เป็นมีดกัดขึ้นรูปฟันเฟืองแบบโค้ง(Involute) ลักษณะของคมมีดนี้จะไม่มีขอบคม แต่จะขึ้นเป็นรูปร่างเท่านั้น สามารถประกอบเข้ากับเพลามีดกัดได้ทั้งเพลากัดแกนตั้งและเพลากัดแกนนอน

4. ดอกกัดตั้ง (Vertical Milling Cutter) มีรูปร่างหลายแบบหลายลักษณะตามความต้องการใช้งานรวมถึงลักษณะของก้านจับและคมตัดที่มีรูปทรงใช้เฉพาะงานนั้นๆ โดยดอกกัดตั้งมีหลายแบบได้แก่ ดอกกัดชิ้นงานเหลี่ยม ดอกกัดชิ้นงานกลม ดอกกัดชิ้นงานพื้นผิวเอียง ดอกกัดชิ้นงานรูเรียบ ดอกกัดบ่าฉาก ดอกกัดบ่าโค้ง ดอกกัดขึ้นบ่าเฉียง ดอกกัดมุมเอียง ดอกกัดมุมเอียงร่องหางเยี่ยว

5. ดอกกัด Woodruff Key เป็นดอกกัดที่มีคมอยู่รอบๆตัวและด้านหน้าจะเว้าลึกลงไป ดอกกัดนี้สามารถกัดได้ในแนวตั้งและแนวนอน ดอกกัดนี้ส่วนมากจะใช้กัดร่องลิ้นตามขนาดของดอกกัด ซึ่งดอกกัดจะมีความโตของเส้นผ่านศูนย์กลางหลายขนาด ร่องลิ้นที่เกิดจากการกัดนี้เรียกว่าร่องลิ้นพระจันทร์เพราะมีลักษณะเป็นโค้งของวงกลมตามโค้งของขนาดของดอกกัด นอกจากการกัดร่องลิ้นแล้วยังสามารถกัดงานที่มีรูปร่างต่างๆได้ตามความต้องการ

6. มีดกัดแบบ Hobbing เป็นมีดกัดที่ขึ้นรูปฟันเฟืองแบบหลายๆฟันพร้อมกัน

7. มีดกัดติดคาร์ไบด์ (Indexable Carbide Insert) เป็นมีดกัดสมัยใหม่สำหรับสายการผลิตเล็กหรือการผลิตปริมาณมากที่มีการทำงานหลายรูปแบบ พื้นฐานการออกแบบอยู่ที่การทำงานปาดผิวที่มีคุณภาพสูงและตอบสนองการทำงานที่เข้าถึงได้ยากทั้งยังเหมาะสำหรับงานกัดหยาบจนถึงงานกัดละเอียด

8. ทฤษฎีทางโลหะวิทยา

งานเย็น (Cold Work) คือ การกระทำกับชิ้นงานโลหะ ณ อุณหภูมิที่ไม่เกินอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization Temperature) และกระทำจนเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) โลหะเหนียว (Ductile Metal) นั้นมีช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรที่ยาว ดังนั้นสภาพงานเย็นที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียวก็จะมีอัตราเพิ่มขึ้นตามอัตราการเปลี่ยนรูปพลาสติกและขนาดของแรงที่กระทำ สำหรับโลหะเปราะมักจะเปลี่ยนรูปได้น้อย เนื่องจากช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรสั้นมักจะแตกหักเมื่อมีแรงมากระทำมากจึงมักไม่มีงานเย็นเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อย สภาพของงานเย็นที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียวเป็นสภาพที่ทำให้โลหะมีความแข็งเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงสูงขึ้น แต่ความเหนียวลดลง

เมื่อโลหะเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) ปริมาณของการเกิดการเปลี่ยนตำแหน่ง (Dislocation) มีมากตามปริมาณงานเย็นที่เกิดขึ้น เนื่องจากเนื้อโลหะเกิดความเครียดเพิ่มมากขึ้น และมีผลก่อให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งเพิ่มขึ้นมากอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.3 เป็นกราฟแสดงความหนาแน่นของการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดเพิ่มมากขึ้นถึงหมื่นล้าน เมื่อโลหะเกิดความเครียดที่คิดเป็นร้อยละเพิ่มขึ้นเพียงแค่อ้อยละ 20

การเปลี่ยนตำแหน่งคือสิ่งสำคัญที่มีผลต่อโลหะเมื่อเกิดงานเย็นเป็นอย่างมาก เนื่องจากถ้าเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งปริมาณมาก การเปลี่ยนตำแหน่งจะเป็นตัวขัดขวางการเปลี่ยนรูปให้กระทำไต่ยากขึ้น ดังนั้นหมายความว่าต้องออกแรงมากขึ้นเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปมากขึ้น ซึ่งก็คือการทนต่อความเค้นเพิ่มมากขึ้น เนื้อโลหะที่มีความหนาแน่นของการเปลี่ยนตำแหน่งมาก การจะเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งเพิ่มขึ้นอีกก็จะยากขึ้นตามปริมาณงานเย็นที่เกิดขึ้นก็คือความแข็งแรงของโลหะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการยืดตัวกลับลดลงก็เพราะการเปลี่ยนตำแหน่งปริมาณมากจะเป็นตัวอุปสรรคที่ทำให้การยืดตัวทำได้ยากขึ้น แต่กลับเป็นตัวที่ทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่ายมากขึ้น เนื่องจากมีความเปราะมากขึ้นความเหนียวลดลง นอกจากนั้นการเปลี่ยนตำแหน่งเป็นจุดบกพร่องอย่างหนึ่งที่ทำให้ผลึกไม่สมบูรณ์

การอบคืนสภาพ (Annealing) การอบคืนสภาพคือกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างแลทธิที่ผ่านการทำงานเย็นมาแล้วเกิดเปลี่ยนกลับสู่สภาพเดิมเหมือนก่อนที่จะถูกทำงานเย็น การทำงานเย็นจะส่งผลทำให้คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของโลหะเปลี่ยนแปลงไปกล่าวคือขณะที่โลหะถูกกระทำโดยแรงจากภายนอกส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านขนาดและรูปทรง เกรนมีลักษณะแบนและยาวขึ้น โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนไป ทางโลหะวิทยาเรียกว่า การเสียรูป (Deformation) ดังนั้นเมื่อให้พลังงานภายในสูงขึ้นโดยใช้พลังงานความร้อนจะทำให้โลหะคายพลังงานภายในออกมา

ทำให้โครงสร้างภายในที่มีความเครียดสูงเปลี่ยนแปลงกลับสู่ความเครียดต่ำตามสภาพเดิมเรียกว่า การคืนสภาพ

การอบคืนสภาพ (Annealing) มีด้วยกัน 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การคืนตัว (Recovery) เมื่อพลังงานภายในเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดโลหะจะเกิดการคืนตัวก่อน ซึ่งเป็นขั้นแรกของการคืนสภาพ การคืนตัวจะเกิดขึ้นไม่นาน หลักการของการคืนตัวคือ เมื่อให้พลังงานหรือความร้อนโลหะจะเกิดการคลายความเครียดภายในแลทธิซออกมา โดยที่ยังไม่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคผลที่ตามมาของการคืนตัวจะมีผลให้โลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงดังนี้

1.1 พลังงานภายในเริ่มถูกปล่อยออก เมื่อเพิ่มอัตราคืนตัว

1.2 ความเค้นตกค้างภายในแลทธิซ (Residual Stress) ที่เกิดจากการทำงานเย็น จะถูกปล่อยหรือคายออกมา

1.3 ความเครียดภายในแลทธิซเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการคืนตัว และความเครียดจะหมดไปเมื่อเวลานานมากยิ่งขึ้น

1.4 ปริมาณของการลดความเค้นตกค้างภายใน (Residual Stress) จะเร็วหรือช้า ขึ้นกับอุณหภูมิที่ให้การคืนตัว กล่าวคือยิ่งใช้อุณหภูมิสูงมากขึ้นการลดความเค้นตกค้างจะใช้เวลา น้อยลงหรือปริมาณความเค้นตกค้างลดลงในปริมาณที่มากกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ

1.5 การให้ความร้อนที่ไม่สูงเพื่อให้เกิดการคืนตัวนั้น สามารถนำมาใช้ในการลดความเค้นตกค้างของโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้ว ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การอบคลายความเค้นตกค้าง (Residual Stress Relief Annealing) เพื่อป้องกันการเกิดการแตกหรือการกัดกร่อนเนื่องจากความเค้นตกค้าง (Stress Corrosion)

1.6 สภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นของการเปลี่ยนตำแหน่งในผลึกโลหะเริ่มรวมตัวกัน

1.7 คุณสมบัติทางกลที่สำคัญของโลหะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงช่วงของการคืนตัว

2. การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เมื่ออุณหภูมิในช่วงการคืนตัวให้เพิ่มสูงขึ้นจะเกิดผลึกใหม่เกิดขึ้นผลึกใหม่จะมีส่วนผสมของโครงสร้างผลึกและแลทธิซเหมือนกับผลึกเดิมก่อน การเกิดงานเย็น ผลึกใหม่จะเกิดขึ้นบริเวณที่เกรนถูกเปลี่ยนรูปร่างอย่างรุนแรงหรือจะเกิดบริเวณที่มีความเครียดหรือพลังงานภายในสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งโดยปกติจะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบเกรนและตรงระนาบเลื่อน (Slip Plane) การเกิดผลึกใหม่จำเป็นต้องใช้เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงจะเกิดผลึกใหม่อุณหภูมินี้เรียกว่า อุณหภูมิของการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization Temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่โลหะเกิดผลึกใหม่ภายในเวลาหนึ่งชั่วโมง ดังนั้นอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ในโลหะแต่ละชนิดจะแตกต่างกันขึ้นกับขนาดและโครงสร้างผลึกธาตุที่ผสมรวมทั้งอุณหภูมิของการหลอมละลายธาตุ การเกิดผลึกใหม่ของธาตุหรือโลหะบริสุทธิ์จะใช้อุณหภูมิต่ำกว่าโลหะผสมมาก เช่น ในโลหะบริสุทธิ์มีอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่เท่ากับ 365 องศาเซลเซียส แต่พอลิเมอร์คาร์บอนเพิ่มเล็กน้อย กลายเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่จะเพิ่มขึ้นเป็น 525 องศาเซลเซียส

การเกิดผลึกใหม่ของโลหะจะขึ้นกับเวลาในการคืนสภาพและอุณหภูมิที่ทำการคืนสภาพ หากเพิ่มเวลาในการคืนสภาพสามารถใช้อุณหภูมิที่ต่ำลงได้หรือหากเพิ่มอุณหภูมิของการเกิดผลึกใหม่ให้สูงขึ้นจะใช้เวลาน้อยลง แต่อัตราการเพิ่มและเวลาไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรง ดังนั้นจะเห็นว่าการเกิดผลึกใหม่จะเปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นกับการเปลี่ยนอุณหภูมิมากกว่าการเปลี่ยนเวลา ซึ่งมักจะใช้การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิเป็นตัวแปรในการคืนสภาพ การเกิดผลึกใหม่ทำให้เปลี่ยนแปลงดังนี้

1. คุณสมบัติทางกลเริ่มเปลี่ยนแปลงคือ ความแข็งและความแข็งแรงเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วแต่ความเหนียวเริ่มเพิ่มมากขึ้น

2. เริ่มเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยโครงสร้างผลึกมีการเปลี่ยนแปลงไปจากโครงสร้างที่ผ่านการทำงานเย็น ผลึกเริ่มมีแรงขับหรือ Driving Force ซึ่งเกิดจากพลังงานที่สะสมอยู่ในโลหะเมื่อผ่านการทำงานเย็นแรงขับในผลึกจะทำให้การเปลี่ยนตำแหน่งเกิดการเคลื่อนเข้ามารวมกัน

3. การเปลี่ยนตำแหน่ง (Dislocation) ในผลึกโลหะเริ่มมีความหนาแน่นลดลงและเคลื่อนเข้ามารวมกันในช่วงต้นของการเกิดผลึกใหม่และเกิดการจัดเรียงตัวของการเปลี่ยนตำแหน่งใหม่เป็นรูปหลายเหลี่ยมหรือเรียกว่า Polygonization ขึ้นซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวของการเปลี่ยนตำแหน่งใหม่ทำให้เกิดเกรนย่อย Subgrain

4. คุณสมบัติทางกายภาพเริ่มเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะเกรนของโลหะจะเริ่มเกิด Subgrain ขึ้นบริเวณที่เกิดความหนาแน่นของการเปลี่ยนตำแหน่งมาก เช่น บริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างรุนแรงหรือบริเวณที่มีความเครียดมาก ซึ่งมักเป็นบริเวณขอบเกรน

5. เกรนที่เกิดใหม่จะเพิ่มขึ้นจนไปแทนที่เกรนเดิมที่มีความเครียดอยู่ที่ผ่านงานเย็นมา เกรนที่เกิดใหม่จะมีลักษณะค่อนข้างสมมาตรกันและเป็นเกรนที่ไม่มีความเครียดตกค้าง

6. การเกิดผลึกใหม่จะสิ้นสุดเมื่อโลหะใหม่เกิดเกรนสมบูรณ์แล้ว

3. การโตของผลึก (Grain Grow) เมื่อโลหะใหม่เกิดขึ้นทั่วทั้งโลหะแล้ว หากเราเพิ่มความร้อนเพิ่มมากขึ้นอีกเกรนที่เกิดใหม่ก็จะเริ่มโตขึ้นเรื่อยๆ การโตของเกรนในการคืนสภาพนี้ไม่เหมือนการโตของเกรนเนื่องจากการแข็งตัวจากโลหะเหลว กล่าวคือการโตของเกรนในการคืนสภาพจะเหมือนการที่เกรนเล็กๆ ที่เกิดใหม่มารวมตัวกัน เนื่องจากขอบของแต่ละเกรนเล็กๆ มารวมกันเป็นขอบเกรนใหม่หรือบางครั้งขอบเกรนเล็กๆ นั้นหายไปแล้วเกิดการรวมตัวกัน เนื่องจากในเกรนใหญ่จะมีพลังงานอิสระน้อยกว่าเกรนเล็กทำให้พลังงานอิสระดังกล่าวทำให้เกิดแรงขับผลักดันให้ขอบเกรนลดจำนวนลง แรงขับจะมีตรงข้ามกับความแข็งหรือคงรูปของแลตทิส (Rigidity of the Lattice) ดังนั้นการให้พลังงานความร้อนหรือเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นแก่โลหะในช่วงนี้ความแข็งหรือคงรูปของแลตทิสในเกรนเล็กจะลดลงในขณะที่อัตราการโตของเกรนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เกรนที่ได้มีขนาดโตขึ้น ดังนั้นในเรื่องการโตของเกรนสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เกรนจะมีขนาดใหญ่มากน้อยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ได้รับขณะคืนสภาพคือ การเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้นมีผลทำให้เกรนมีขนาดใหญ่

2. เกรนจะโตขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับโลหะมีการต่อต้านการเคลื่อนของขอบเกรน

3. เกรนที่โตขึ้นจะไม่มี ความเครียดและคุณสมบัติทางกลของโลหะเช่น ความแข็งแรง ความเหนียวและความแข็งแรงจะเหมือนเดิมก่อนที่โลหะนั้นจะเกิดงานเย็น

4. หากต้องการเกรนที่มีขนาดที่เหมาะสมจะต้องใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงเกินกว่าอุณหภูมิ การเกิดผลึกใหม่มากนักและต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนให้เหมาะสม

9. ความกลม

9.1 รูปร่างความกลม

ความกลมคือรูปร่างทางเลขาคณิตแบบ 3 มิติ ส่วนรูปร่างวงกลมคือ เส้นรอบวง บางส่วนหรือทั้งหมดของรูปในระนาบ ในทางปฏิบัติแล้ววิธีที่ใช้ในการวัดรูปร่างทั้งสองชนิดนี้จะใกล้เคียงกันมาก การวัดจะประกอบไปด้วยการหาความกลมของรูปร่างของวัตถุที่มีหน้าตัดกลม

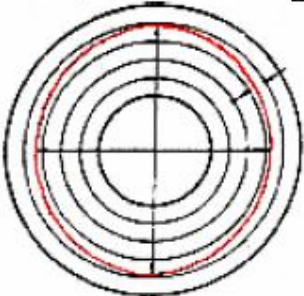
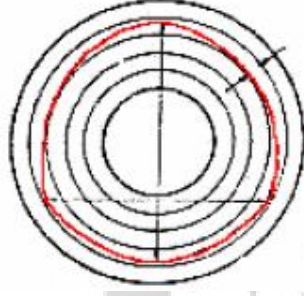
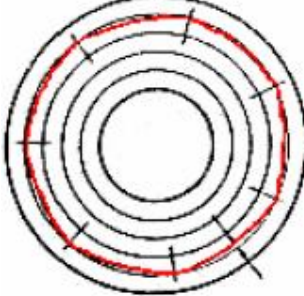
1. หลักการวัดความกลม ความกลมไม่สามารถที่จะวัดออกมาจริงๆได้ การวัดความกลมจึงเป็นการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าเบี่ยงเบนจากวงกลมในอุดมคติ ค่าเบี่ยงเบนนี้ไม่สามารถกำหนดเป็นมาตรฐานและไม่สามารถกำหนดเป็นรูปแบบเปรียบเทียบสำหรับวัดความกลม โดยหลักการแล้วสามารถจะอธิบายได้ว่าชิ้นส่วนที่มีลักษณะกลมจะมีจุดต่างๆบนเส้นรอบรูปจะมีระยะทางห่างจากแกนกลางเป็นระยะเท่าๆกันหรืออธิบายได้ว่า หน้าตัดรูปวงกลมของชิ้นส่วนในทางอุดมคติจะเป็นระนาบที่ตั้งฉากกับแกนกลางของมัน เรียกว่า วงกลมสมบูรณ์

2. ลักษณะที่บกพร่องของความกลม เนื่องจากความแตกต่างกันในวิธีการผลิต เครื่องมือและเงื่อนไขในการผลิตชิ้นส่วนวงกลมทำให้มีโอกาสที่ทำให้เกิดความบกพร่องเกี่ยวกับความกลมของชิ้นงานในแบบต่างๆโดยส่วนใหญ่มีลักษณะบกพร่องดังตาราง 5

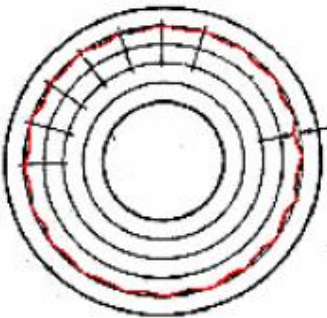
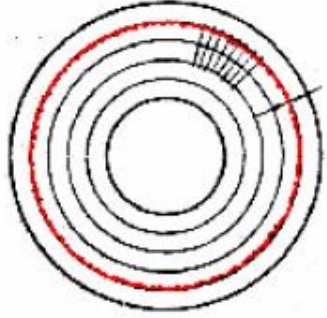
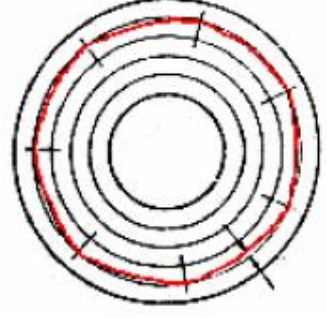
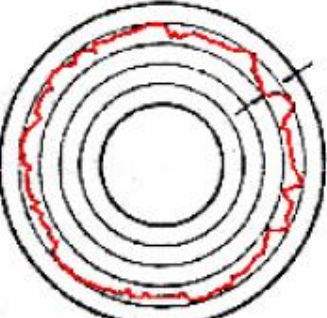
3. วัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ความผิดพลาดของความกลม เพื่อหาลักษณะของความเบี่ยงเบนจากความกลมสมบูรณ์ เมื่อชิ้นงานนั้นผ่านกระบวนการผลิตโดยทั่วไปแล้วจะแสดง ส่วนที่แตกต่างออกไปจากเดิม วิธีการวัดที่ใช้วิเคราะห์อยู่ในปัจจุบันนี้จะแตกต่างกันตรงที่ความสามารถในการแยกแยะความเบี่ยงเบนออกจากความกลมสมบูรณ์ โดยที่ผลการวัดความเบี่ยงเบนกับความกลมขึ้นอยู่กับความต้องการระดับความแม่นยำของการวัดหรือวิธีทดสอบ ซึ่งการวิเคราะห์นี้เป็นเพียงการคาดหวังเกี่ยวกับความบกพร่องของความกลมซึ่งมีประโยชน์สำหรับการเลือกวิธีการวัดและเครื่องมือวัด

ลักษณะที่แน่นอนของชนิดของความผิดพลาดของวงกลมจะรวมถึงสภาพของชิ้นงานและกระบวนการผลิตชิ้นงาน ส่วนเส้นรอบรูปของชิ้นงานสำเร็จเมื่อเปรียบเทียบกับวงกลมสมบูรณ์จะแตกต่างกันหลายประการ ประการแรกจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตชิ้นงาน แม้ว่าไม่มีวิธีการใด ๆ ที่จะแยกแยะความบกพร่องของความกลม แต่ลักษณะความเด่นชัดของการเบี่ยงเบนจากรูปแบบความกลมก็ยังเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา

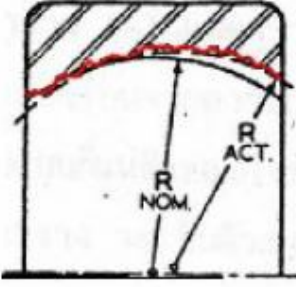
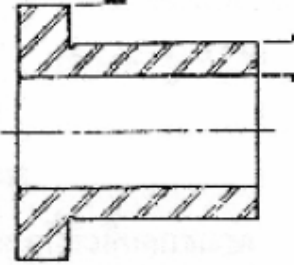
ตาราง 5 แสดงลักษณะความบกพร่องที่ผิดรูปแบบจากความกลม

รูปร่างหน้าตัด	ลักษณะที่บกพร่อง	สาเหตุ
	เป็นรูปวงรีหรือรูปไข่แกนไม่เท่ากันแต่ตั้งฉากกันและได้สัดส่วน	จุดศูนย์กลางของเครื่องมือไม่อยู่ในแนวเดียวกัน ลักษณะที่สำคัญก็คือ ความแตกต่างของระหว่างแกนยาวและแกนสั้น
	เป็นรูปไข่หรือวงรีที่แกนสั้นและแกนยาวไม่ได้สัดส่วนกัน	จุดศูนย์กลางผิดพลาดและผลที่จะตามมาจะทำให้เกิดความแตกต่างกันของรัศมีวงกลมที่ล้อมรอบ วงกลมรอบๆจะรวมศูนย์กันและประกอบตัวรอยขีดซึ่งแสดงส่วนของแนวเส้นในเพลนที่กำหนด
	มีลักษณะเป็นคลื่นหรือเป็นช่องๆ ที่คล้ายกันเป็นจำนวนมากขึ้นได้เป็นเลขคู่	ศูนย์กลางของเครื่องมือวัดไม่สามารถควบคุมได้เพียงพอ มีแนวโน้มที่จะแสดงลักษณะที่แตกต่างไปจากวงกลมอุดมคติ ความผิดปกตินี้จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งสามารถลดลงได้โดยใช้แท่งตัววี (V-block)

ตาราง 5 (ต่อ)

รูปร่างหน้าตัด	ลักษณะที่บกพร่อง	สาเหตุ
	เส้นรอบวงมีลักษณะเป็นคลื่น ความแตกต่างหรือการแยกออกไปจากวงกลมพื้นฐาน	เกิดจากการสั่นสะเทือนของเครื่องมือหรือจับชิ้นงานไม่แน่นพอ การวัดที่ได้โดยวัดขนาดของรัศมีที่แตกต่างไปจากวงกลมพื้นฐานหรือใช้เครื่องมือวัดการสั่น ความถี่ของจำนวนคลื่นเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญ
	ลักษณะคลื่นเป็นความถี่สูง (รวมทั้งความหยาบของผิว) ความแตกต่างของรัศมีมีน้อยมาก การวัดทำได้โดยใช้อุปกรณ์วัดที่มีความละเอียดสูง	โดยปกติแล้วจะเกิดจากกระบวนการผลิต
	แบ่งเป็นมุมขนาดใหญ่ๆ โดยพื้นฐานแล้วลักษณะเส้นรอบรูปที่แบ่งเป็นมุมจะไม่เป็นเส้นเรียบๆ แต่จะมีลักษณะเป็นคลื่นด้วย	เป็นความผิดร่วมกัน 2 แบบ แต่ละแบบจะให้ผลออกมาแยกกัน การวิเคราะห์อย่างถูกต้องต้องพิจารณาแยกกันอย่างละเอียด
	ความผิดปกติเป็นแบบไม่มีรูปแบบ ความแตกต่างของรัศมีวงกลมเปรียบเทียบกับเส้นรอบรูปไม่มีระยะทางที่แน่นอน	เกิดจากความผิดปกติหลายอย่าง เช่น การเจียรไนไม่เหมาะสม การจับงานไม่ถูกตำแหน่ง การวิเคราะห์ทำได้โดยใช้วงกลมเปรียบเทียบกับเส้นรอบรูปบนแผนภูมิที่สร้างจากเครื่องมือที่มีความไวสูง

ตาราง 5 (ต่อ)

รูปร่างหน้าตัด	ลักษณะที่บกพร่อง	สาเหตุ
	ความผิดปกติเนื่องจากส่วนของผิวงานหรือส่วนของเส้นรอบรูปแตกต่างกันไปจากวงกลมเปรียบเทียบ	ความแตกต่างของเส้นรอบรูปที่แตกต่างกันจากวงกลมเปรียบเทียบแยกได้เป็น 2 ชนิด คือ ความแตกต่างเนื่องจากผิวกลม เนื่องจากจุดศูนย์กลางของส่วนโค้งซึ่งเป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดความกลมของส่วนโค้งในระนาบ
	ความบกพร่องเนื่องจากการไม่ร่วมศูนย์กลางของวงกลม	ความเบี่ยงเบนของแกนจากเส้นอ้างอิงระหว่างกระบวนการผลิตจะเป็นผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการร่วมแกนกันเนื่องจากความบกพร่องของแต่ละผิว การวัดจะเทียบกับแกนอ้างอิงที่ถูกต้อง

9.2 การวัดความกลม

ระบบที่ใช้ในการวัดความกลมแบ่งตามลักษณะการวัดสามารถแบ่งออกได้ 2 วิธี ซึ่งแตกต่างกันไปตามลักษณะและวิธีการของการวัด

1. ระบบที่ 1 เป็นระบบที่ใช้ในการวัดทั่วไป โดยชิ้นงานจะวางไว้บนจุดที่เตรียมไว้ อาจจะเป็นพื้นราบ แท่นตัววัดหรือยันศูนย์และผิวที่จะวัดความกลมจะถูกสัมผัสด้วยหัววัด (Probe) โดยมีตัวชี้บอกขนาด (Indicator) ติดต่อยู่โดยมีค่าความไว (Sensitivity) ที่เหมาะสม เมื่อหมุนชิ้นงานไปแต่ยังคงให้อยู่ตำแหน่งเดิมบนฐานรอง การเปลี่ยนแปลงขนาดก็จะปรากฏที่ตัวชี้บอกขนาด ขนาดที่เปลี่ยนไปก็จะแสดงความกลมของชิ้นงานโดยทางอ้อม ในการวัดแบบนี้สามารถทำได้หลายวิธี แต่จะมีหลักการที่เหมือนกัน จุดอ้างอิงบนผิวชิ้นงานที่ต้องการวัดสามารถมี 1 จุดหรือหลายๆจุดก็ได้ การวัดในระบบนี้เรียกว่า การวัดความกลมโดยใช้เนื้อชิ้นงานเป็นจุดเริ่มอ้างอิง (Roundness Measurement with Intrinsic Datum)

2. ระบบที่ 2 เป็นระบบที่ใช้ด้านใดด้านหนึ่งของชิ้นงานเป็นจุดเริ่มอ้างอิง (Datum) การอ้างอิงความกลมจะใช้เพลลาที่มีความกลมในการหมุนในแบร์ริงที่สมบูรณ์ไม่มีความผิดพลาดของการหมุน (Run out) ซึ่งเรียกว่า การวัดความกลมโดยใช้จุดเริ่มอ้างอิงจากภายนอกชิ้นงาน (Roundness Measurement with Extrinsic Datum) ระบบนี้อาจจะเป็นชิ้นงานอยู่กับที่โดยที่หัววัดหมุนรอบชิ้นงานหรือชิ้นงานหมุนบนแท่นโดยหัววัดอยู่กับที่

การวัดความกลมโดยเปรียบเทียบวงกลมอ้างอิง การวัดความกลมวิธีนี้เป็นวิธีการวัดแบบที่ 2 ของระบบการวัดความกลมโดยมีรายละเอียดดังนี้

1. กรรมวิธีการลากเส้นเป็นวงกลม ความกลมของชิ้นงานของแข็งจะพิจารณาถึงรูปร่างพื้นผิวกลมตลอดพื้นที่หน้าตัดตั้งฉากกับแกนของชิ้นงาน สำหรับการวัดความกลมของขอบวิธีการเปรียบเทียบอาจจะใช้หลักการเหมือนกับหลักการการวัดความตรงของพื้นผิว โดยจะทำการต่อเนื่องกันโดยจะขึ้นค่าหรือบันทึกค่าของแต่ละผิวไว้ว่าเบี่ยงเบนจากรูปร่างในอุดมคติอย่างไร การวัดความกลมจะนำค่าออกมาโดยการวัดปลายแหลมซึ่งต่อกับหัววัดไปบนผิวของชิ้นงานรอบๆ ชิ้นงานตามแนววงกลม เรียกวิธีนี้ว่า การลากเส้นเป็นวงกลม

2. หลักการทำงานของเครื่องลากเส้นเป็นวงกลม หลักการทำงานของเครื่องวัดความกลมโดยวิธีลากเส้นเป็นวงกลมทั้ง 2 ระบบ สิ่งที่สำคัญของทั้ง 2 ระบบ คือ ความเที่ยงตรงของเพลลาหมุนที่มีความถูกต้องสูงมาก เพลลาหมุนจะรองรับหัววัดซึ่งหมุนไปรอบๆ ชิ้นงานหรือรองรับชิ้นงานให้หมุนสัมผัสกับหัววัดปลายแหลม ปลายแหลมของหัววัดจะสัมผัสกับผิวชิ้นงาน แล้วส่งสัญญาณไปยังหัววัดเพื่อแสดงผลและสามารถกำหนดตำแหน่งที่เริ่มได้ โดยเริ่มจากจุดใดก็ได้เป็นตำแหน่งอ้างอิงเพื่อกำหนดเป็นตำแหน่งเริ่มต้น แล้วเริ่มหมุนเครื่องมือให้ปลายแหลมสัมผัสกับชิ้นงานทดสอบตลอดเวลา การสัมผัสจุดสัมผัสมากจะสามารถวัดความกลมที่มีความถูกต้องมากและ ระยะห่างระหว่างปลายกับแกนของการหมุน ถ้ามากอาจเกิดค่าการเบี่ยงเบนได้จะทำให้ค่าวัดออกมาผิดพลาด ระยะห่างระหว่างแกนหมุนกับจุดสัมผัสบนชิ้นงานจะเป็นรัศมีของการหมุนและความแตกต่างของรัศมีจะเป็นความแตกต่างของความกลมที่วัด

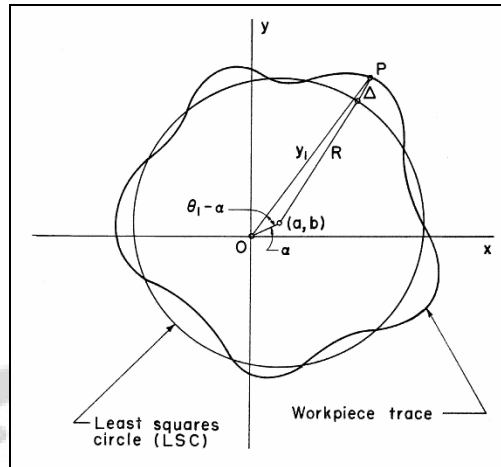
ตามหลักการทั่วไปของเครื่องมือวัดความกลมจะต้องหมุนหัววัดหรือชิ้นงานเพื่อสามารถที่จะวัดค่าความกลมได้ การหมุนนี้จะแบ่งออกเป็นการหมุนอย่างน้อย 3 รอบ ดังนี้

1. รอบที่ 1 เพื่อหาจุดศูนย์กลางของชิ้นงาน
2. รอบที่ 2 เพื่อหาขนาดของรัศมีแล้วนำไปหาเส้นรอบวงเฉลี่ยของชิ้นงานเพื่อใช้ในการอ้างอิงในการวัดความกลม
3. รอบที่ 3 เพื่อหาความเบี่ยงเบนของผิวชิ้นงาน ตามองศาต่างๆ ของการหมุนโดยอ้างอิงกับเส้นรอบวงเฉลี่ยที่สร้างขึ้น

9.3 ค่าความกลม

รูปแบบการวัดความกลมสามารถจำแนกแบ่งออกตามประเภทได้ 5 แบบ ดังต่อไปนี้

1. ค่าความเบี่ยงเบน ในการวัดค่าความเบี่ยงเบนของชิ้นงาน สามารถหาได้จากการใช้วิธี LSC (Least Squares Circle) แสดงดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 แสดงการวัดแบบ Least Squares Circle
(Charles P. Reeve. 1979)

2. ค่าความกลมแบบเฉลี่ย (Average Roundness: MLA) ค่าความกลมแบบนี้สามารถพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟที่เบี่ยงเบนจากเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยหรืออาจกล่าวได้ว่าทำการอินทิเกรต (Integrate) ค่าความเบี่ยงเบน ผลที่ได้จะเป็นค่าความกลมแบบเฉลี่ย

3. ค่าขนาดชิ้นงานที่สูงที่สุด (Peak Height: P) ค่าความกลมแบบนี้มีลักษณะของการหาค่าความแตกต่างของการเบี่ยงเบนออกจากเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของผิวชิ้นงานมากที่สุดในด้านบวก โดยหาได้จากค่าขนาดของชิ้นงานโตที่สุดลบด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย

4. ค่าขนาดชิ้นงานต่ำที่สุด (Valley Height: V) ค่าความกลมแบบนี้มีลักษณะการหาค่าความแตกต่างของการเบี่ยงเบนออกจากเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของผิวชิ้นงานมากที่สุดในด้านลบหาได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยลบด้วยค่าชิ้นงานที่เล็กที่สุด

5. ค่าความกลมแบบพีคทูพีค (Peak to Peak: P-P) ค่าความกลมแบบนี้มีลักษณะของการหาค่าความแตกต่างของขนาดผิวชิ้นงานที่เบี่ยงเบนออกไปจากเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยมากที่สุด ค่าความกลมแบบนี้จะบ่งชี้ถึงความสามารถในการสวมประกอบระหว่างรูเจาะและเพลลา เมื่อค่าความกลมแบบพีคทูพีคนั้นมีค่ามากอาจแสดงให้เห็นว่า รูเจาะและเพลลาอาจเกิดการเสียดสีขึ้นได้ ซึ่งค่าความกลมแบบนี้ สามารถหาได้จากค่าขนาดของชิ้นงานโตที่สุดลบด้วยค่าขนาดของชิ้นงานที่เล็กที่สุด

10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธีรเดช เรืองศรี (2550) ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนากระบวนการควบคุมการพิมพ์กล่องบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากกระบวนการควบคุมการพิมพ์เดิมไม่มีการกำหนดระดับปัจจัยอย่างชัดเจน คือน้ำยาฟาว์เทนมีค่า pH ระหว่าง 4.5 ถึง 5.5 ปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำยาฟาว์เทนระหว่าง 15% ถึง 25% และระยะห่างโมระหว่าง 0.05 ถึง 0.1 มิลลิเมตรส่งผลให้เกิดปริมาณของเสียเป็นจำนวนมากจึงนำหลักการควบคุมคุณภาพ และการออกแบบการทดลองมาใช้ในการพัฒนากระบวนการควบคุมการพิมพ์การดำเนินงานวิจัย ในส่วนแรกเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการควบคุมการพิมพ์เพื่อลดจำนวนของเสีย โดยจัดทำใบตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบและความพร้อมพิมพ์ แบบฟอร์มการบำรุงรักษาเครื่องจักรและจัดทำขั้นตอนการปฏิบัติงาน ส่วนที่สองเป็นการลดความสูญเปล่าโดยพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการพิมพ์โดยการออกแบบการทดลอง ซึ่งประยุกต์ใช้การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับเพื่อกรองปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัย คือจำนวนกระดาษซ้อนสีก่อนพิมพ์ ค่า pH น้ำยาฟาว์เทน ปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำยาฟาว์เทน ระยะห่างโมและความเร็วการพิมพ์ จากการศึกษาเหลือปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพิมพ์อยู่ 3 ปัจจัย คือค่า pH น้ำยาฟาว์เทน ปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำยาฟาว์เทนและระยะห่างโม จากนั้นนำปัจจัยทั้ง 3 มาวิเคราะห์เชิงแฟคทอเรียลแบบเพิ่มจุดศูนย์กลางของปัจจัยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยผลที่ได้ คือน้ำยาฟาว์เทน มีค่า pH เท่ากับ 4.5 ปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำยาฟาว์เทนเท่ากับ 25% และระยะห่างโมเท่ากับ 0.075 มิลลิเมตร

โสภิตา ท่วมมี (2550) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่นำจะมีผลต่อการเกิดเม็ดฟิวซีที่ไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ เพื่อทำการกรอง ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดจุดบกพร่องประเภทเม็ดฟิวซีที่ไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์หลังจากนั้นได้ทำการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ด้วยวิธีการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคผิวตอบสนอง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ที่อุณหภูมิในการหลอม PVC Compound ที่ Mixing Roll ควรอยู่ที่ระดับ 180 องศาเซลเซียสและปริมาณเศษฟิวซีที่นำกลับมาหลอมใหม่ที่ Mixing Roll อยู่ที่ระดับ 30 กิโลกรัม/Batch จะทำให้ค่าคำนวณจุดบกพร่องประเภทเม็ดฟิวซีที่ไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ 1 ตารางเมตรอยู่ในช่วงที่ต้องการ คือไม่เกิน 10 จุดต่อตารางเมตร ซึ่งทำให้ตารางลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบประเภทเม็ดฟิวซีที่ไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ลงได้ 80%

ชุตินา ราชพิทักษ์ (2551) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการลดปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแบบแมชชีนนิ่งโดยมีเป้าหมาย คือ การลดอัตราของเสียที่เกิดขึ้นลง 60 เปอร์เซ็นต์ การดำเนินงานจะเริ่มจากการสำรวจปัญหาที่เกิดขึ้นพบว่า การเกิดรอยขีดข่วนบนชิ้นงานเป็นสาเหตุทำให้เกิดของเสียมากที่สุดจึงนำปัญหานี้มาทำการแก้ไข และนำปัญหาที่ได้ตั้งกล่าวมาวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหารอยขีดข่วนบนชิ้นงาน จากนั้นจึงทำการเลือกตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์

และรวบรวมข้อมูลในกระบวนการผลิตมาทำการกรองปัจจัยเพื่อหาปัจจัยหลักที่มีผลต่อจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยใช้การออกแบบการทดลอง 2k ซึ่งผลจากการกรองปัจจัยพบว่า วิธีการส่งชิ้นงานระหว่างกระบวนการ เวลาในการเป่าเศษกลึง และปริมาณน้ำยาหล่อเย็นมีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนชิ้นงาน จึงทำการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial พบว่า วิธีการส่งชิ้นงานระหว่างกระบวนการ เวลาในการเป่าเศษกลึง และปริมาณน้ำยาหล่อเย็นมีผลต่อการเกิดรอยขีดข่วนบนชิ้นงาน เมื่อนำมาหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อให้จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดน้อยลงควรกำหนดระดับปัจจัยคือ วิธีการส่งชิ้นงานให้กระบวนการถัดไปอยู่ในระดับที่ 1 คือวิธีการวางชิ้นงานแบบใหม่ เวลาในการเป่าเศษกลึงอยู่ที่ระดับ 15 วินาที และปริมาณน้ำยาหล่อเย็นอยู่ที่ระดับ 160 ลิตร จะทำให้จำนวนของเสียเกิดขึ้นเพียง 4 ชิ้นจากการผลิต 100 ชิ้น

วันวิสา ต่วนตระกูลศิลป์ (2552) ศึกษาเกี่ยวกับการใช้การออกแบบการทดลองในอุตสาหกรรมพลาสติกวัตถุประสงค์เพื่อที่จะลดปริมาณความสูญเสียของ Scrap Purge โดยแนวทางในการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากกำหนดขอบเขตของปัญหาและทำการวิเคราะห์สาเหตุที่เกิดขึ้นโดยการใช้แผนภาพสาเหตุและผล จากนั้นทำการแก้ปัญหาเบื้องต้นทำให้พบว่า Scrap Purge สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ผู้วิจัยจึงทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2 ระดับ เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมและอุณหภูมิในการฉีดพลาสติก (ส่วนปลาย) ที่มีอิทธิพลต่อค่าของแรงกระแทก และจากผลการทดลองที่ได้พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม คือ เม็ดพลาสติกใหม่ 3 ส่วน และ Scrap Purge 1 ส่วน (3:1) โดยที่อุณหภูมิในการฉีดพลาสติกเท่ากับ 290 องศาเซลเซียส หลังจากปรับปรุงวิธีการดำเนินงานพบว่า สามารถลดปริมาณ Scrap Purge ได้ถึง 70.4 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็นมูลค่าความสูญเสียเท่ากับ 98,046 บาทต่อเดือน

ชัยรัช ไหมเจริญ (2546) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์น้ำมันที่สกัดได้ และเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้น รวมทั้งหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในขั้นตอนการเตรียมรำข้าว โดยที่ได้เปอร์เซ็นต์น้ำมันสกัดได้มากที่สุด ให้ได้เปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุดใน การศึกษานี้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับผลการวิจัยพบว่า อุณหภูมิในการอบรำข้าวและความชื้นของรำข้าว เป็นปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระและเปอร์เซ็นต์น้ำมันที่สกัดได้ สามารถกำหนดค่าที่เหมาะสมทั้งสองปัจจัยได้ดังนี้คือ อุณหภูมิในการอบรำข้าวอยู่ที่ 114-116 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์ความชื้นของรำข้าวอยู่ที่ 5-7 เปอร์เซ็นต์

ชัยรัตน์ แจ่มเจนรบ (2545) กล่าวถึงการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประกอบของชุดหัวอ่านเขียนข้อมูลฮาร์ดดิสก์ โดยอาศัยกรรมวิธีการออกแบบการทดลองงานวิจัยนี้ ได้ให้ความสำคัญกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณการที่ติดอยู่ระหว่าง Flex และ Suspension จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบได้ว่ามี 6 ปัจจัย ที่มีผลกระทบบกับปริมาณการที่ติดอยู่ระหว่าง Flex และ Suspension ปัจจัยเหล่านี้ประกอบไปด้วย ขนาดของหยดกาว ความสูงของการหยดกาวที่จุดตัวเรือน ระยะของการหยดกาวที่จุดคอชิ้นงาน ความสูงของการหยดกาวที่จุดคอชิ้นงาน ระยะเวลาของการหยดกาวที่จุด Gimbal ของชิ้นงานและความสูงของการหยดกาวที่จุด Gimbal ของชิ้นงาน โดยที่ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ One-half Fractional

Factorial Design เพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณการขาดการหล่อลื่นที่มีเพียงปัจจัย 2 ชนิด เท่านั้น ที่มีผลต่อปริมาณการขาดการหล่อลื่น กล่าวคือ ระยะเวลาของการหยุดการที่จุด Gimbal ของชิ้นงาน และความสูงของการหยุดการที่ Gimbal ของชิ้นงาน หลังจากนั้นจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยอาศัยการออกแบบการทดลองแบบ 3^k Factorial Design โดยอาศัยการทดลองแสดงว่าสภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ปริมาณการขาดการหล่อลื่นได้ตามค่าเป้าหมายได้ คือระยะเวลาของการหยุดการที่จุด Gimbal ของชิ้นงานที่ระดับ 350 มิลลิวินาที และความสูงของการหยุดการที่ Gimbal ของชิ้นงานที่ระดับ 0.35 มิลลิเมตร หลังจากนั้นได้จุดที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมกระบวนการจึงนำผลดังกล่าวไปใช้ในการผลิตจริงปรากฏว่า ปริมาณของเสียดังกล่าวได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือ ก่อนทำการปรับปรุงมีปริมาณของเสียอยู่ที่ระดับ 1.74% และภายหลังจากการปรับปรุงมีปริมาณของเสียเหลือเพียง 1.01% ซึ่งมีผลทำให้ทางบริษัทสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้เป็นจำนวนเงิน 1,300,000 บาทต่อเดือน

ยุง กวาง ยาง (Yung-Kuang Yang. 2008) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของเครื่อง CNC ในกระบวนการกัดแกลไฟต์ที่มีความบริสุทธิ์สูงภายใต้การกัดในสภาวะแห้ง โดยตัวแปรตอบสนองที่ศึกษาคือ ความแตกต่างของขนาดร่องกัดและค่าความเรียบผิวในร่องที่ทำการกัด การวางแผนการทดลองจะทดลองบนพื้นฐานของทากูชิ (Taguchi) อาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการกัดและวิเคราะห์โดยใช้สมการถดถอยในการสร้างแบบจำลองเพื่อคาดการณ์ความแตกต่างของขนาดร่องกัดและความเรียบผิวร่องกัด โดยกำหนดปัจจัย 3 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบการกัด อัตราการกัดชิ้นงาน ระยะความลึกในการกัด จากการศึกษาพบว่า อัตราการกัดชิ้นงาน มีอิทธิพลต่อความแตกต่างของขนาดร่องกัดและความเรียบผิวในร่องกัด

วาย. ซาฮิน (Y. Sahin. 2007) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเงื่อนไขในการตัดชิ้นงานเพื่อปรับปรุงค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน เช่น ความเร็วรอบการ อัตราการป้อนชิ้นงานและระยะความลึกของการตัด โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง การทดสอบการใช้วัสดุ คือ เหล็กชุบแข็ง AISI 1050 และใช้ใบมีดตัดชนิด Cubic Boron Nitride (CBN) โดยทดลองในเงื่อนไขสภาวะแตกต่างกัน ตัวแปรตอบสนองคือ ค่าความเรียบผิว R_a , R_z และ R_{max} จากการศึกษาพบว่าอัตราการป้อนชิ้นงานมีอิทธิพลต่อค่าความเรียบผิวของชิ้นงานมากที่สุด แต่ค่าความเรียบผิวจะลดลงเมื่อลดความเร็วรอบการตัด อัตราการป้อนและระยะความลึกของการตัดของเครื่องจักร ค่าความเรียบผิว R_a ที่ทำการผลิตโดยใช้ใบมีดตัดชนิด Cubic Boron Nitride (CBN) เท่ากับ 0.823 แต่เมื่อทำการลดค่าความเร็วรอบการตัด อัตราการป้อนและระยะความลึกค่าความเรียบผิว R_a ลดลงเท่ากับ 0.55 ไมครอน ซึ่งในแง่ของการทดลองจะต่างจากการผลิตในสถานการณ์จริงเพราะมีด้านต้นทุนมาเกี่ยวข้อง

มาร์, ฮู, นอร์วูด และนีย (Ma, Hu, Northwood and Nie. 2007) ได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการออกซิเดชันเกี่ยวกับการแยกของเหลว โดยใช้กระแสไฟฟ้าสำหรับการป้องกันการกร่อนของโลหะผสมแมกนีเซียม AM50 และใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองด้วยทากูชิ ซึ่งการออกแบบการทดลองประกอบด้วยปัจจัย 4 ปัจจัย ได้แก่ เวลา ความหนาแน่น

กระแสไฟฟ้าความเข้มข้นของ KOH และความเข้มข้นของ NaAlO_2 โดยแต่ละปัจจัยมีทั้งสิ้น 3 ระดับ และจากการทดลองพบว่า จุดที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการเคลือบผิวสำหรับการขัดขวางการกร่อนคือ เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานเท่ากับ 12 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 12 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร ความเข้มข้นของ KOH เท่ากับ 0.9 กรัม/ลิตร และความเข้มข้นของ NaAlO_2 เท่ากับ 15.0 กรัม/ลิตร ซึ่งผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ความเข้มข้น KOH เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญ และมีอิทธิพลต่อการขัดขวางการกร่อนของการเคลือบผิว

ฮูซ (Hsu. 2003) ได้ทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำ ความเข้มข้นของเกลือและอุณหภูมิของน้ำ โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของ Electrolyzed Oxidizing Water Generator จากการศึกษพบว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ปัจจัยทั้ง 3 ไม่มีอิทธิพลต่อ Electrolyzed Oxidizing Water Generator แต่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับ Electric Current จึงต้องประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง พบว่าค่า Electric Current เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของน้ำและอัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพของ Electric Current จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำและความเข้มข้นของเกลือ

โรเบอร์ต (Roberto. 2003) ทำการปรับปรุงการไหลของพลังงาน (Proteomic Exchange Membrane: PEM) โดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ ความดันไฮโดรเจน (H_2) ความดันออกซิเจน (O_2) อัตราการไหลของไฮโดรเจน (H_2) และอัตราการไหลของออกซิเจน (O_2) ซึ่งใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเศษส่วน ผลการศึกษพบว่า มีอิทธิพลร่วมระหว่างความดันไฮโดรเจน (H_2) และอัตราการไหลของไฮโดรเจน (H_2) ส่งผลให้อัตราการไหลของพลังงาน PEM ซ้ำกว่าปกติ ส่วนเงื่อนไขที่มีความเหมาะสม คือ ปรับความดันไฮโดรเจนที่ 69.0 kPa ส่วนความดันของออกซิเจนควรอยู่ที่ระดับ 138.0 kPa ในขณะที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนอยู่ที่ 4.1×10^{-5} ลูกบาศก์เมตร/วินาที และปรับอัตราการไหลของออกซิเจนที่ 1.2×10^{-4} ลูกบาศก์เมตร/วินาที

โรคก เอท อัล (Rocak et al. 2002) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของส่วนผสมต่างๆ ในเซรามิกที่ใช้สำหรับหล่อเทปในการผลิตชิพที่มีต่อลักษณะของเทป โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลในการหาส่วนผสมที่มีความเหมาะสม ได้แก่ ออกไซด์ และตัวทำละลาย เช่นน้ำ ตัวประสาน และสารที่ใช้ทำพลาสติกต่างๆ ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่าย และเพิ่มความแม่นยำสูง นอกจากนี้มีการตรวจสอบอิทธิพลของแต่ละปัจจัย และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย ซึ่งเป็น การแสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการผลิตได้เป็นอย่างดี

11. บทสรุป

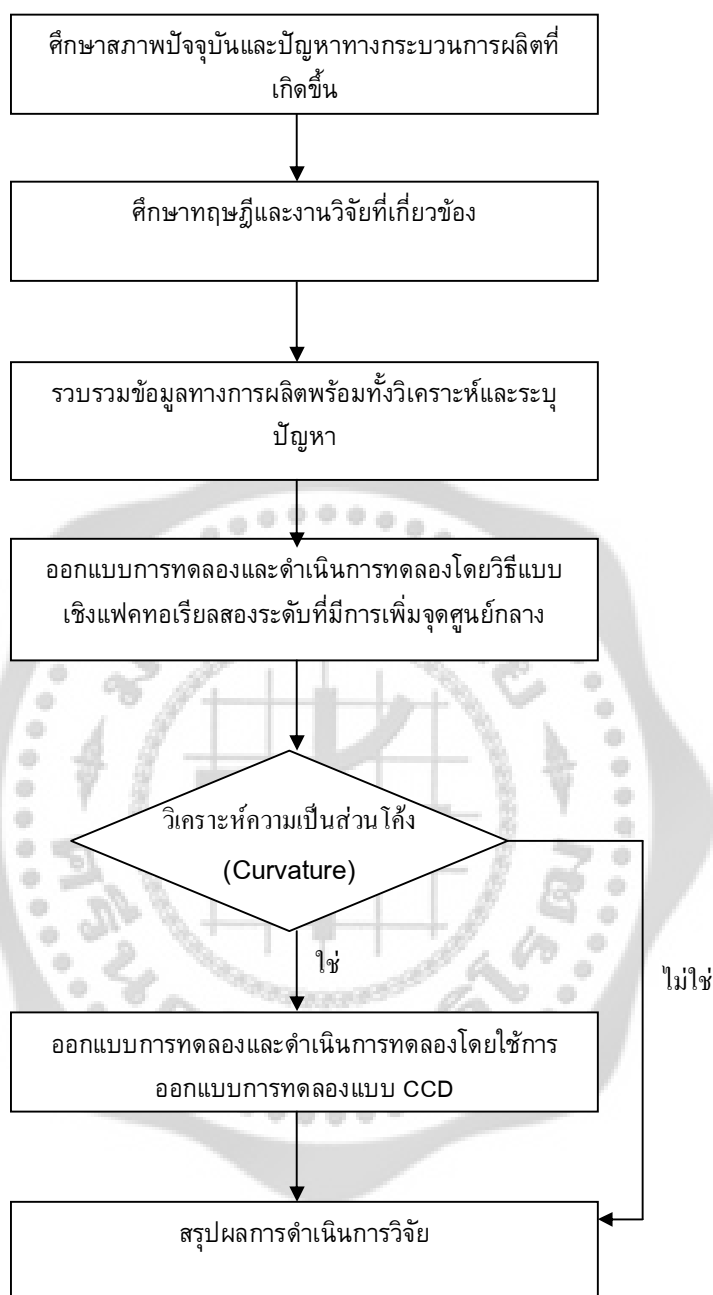
จากข้อมูลที่กำลังมาข้างหน้าแสดงให้เห็นว่าวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับตั้งค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่ต้องการ ซึ่งจะแตกต่างจากวิธีการโดยทั่วไปคือวิธีการทั่วไปจะเป็นการลองผิดลองถูกหรือใช้การทดลองปรับตั้งค่าทีละค่า ส่งผลให้สิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์และไม่เหมาะสมกับกระบวนการที่มีผลความสัมพันธ์ร่วม (Interaction Effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการ แต่การแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการออกแบบการทดลองสามารถดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหาได้อย่างรวดเร็วและสามารถให้ผลความแม่นยำในการวิเคราะห์สูง โดยสามารถระบุค่าออกมาเป็นตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำหลักการการออกแบบการทดลองและเครื่องมือทางสถิติมาแก้ไขปัญหาค่าความกลมของกระบอกเลนส์ โดยเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลโดยเพิ่มจุดกึ่งกลาง (2^k with center point) ในการค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความกลม นอกจากนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง จากการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อค้นหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ทฤษฎีบทที่ 2 สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ วิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียเนื่องจากค่าความกลมของผลิตภัณฑ์ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด พร้อมทั้งหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดของเสียน้อยที่สุด บทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการวิจัยมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้ซึ่งมีขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการใช้แผนผังแสดงเหตุและผลร่วมกับการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในกระบวนการเพื่อคาดหมายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดของเสียจากการวิเคราะห์สามารถกำหนดปัจจัยได้คือ อุณหภูมิ การอบชิ้นงาน เวลาการอบชิ้นงานและอุปกรณ์การจับยึดชิ้นงานประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง เทคนิคที่เลือกใช้คือ การทดลอง 2^k แฟคทอเรียลแบบเพิ่มจุดกึ่งกลาง เนื่องจากพื้นฐานของการทดลองแบบแฟคทอเรียล มีจำนวนการทดลองที่ไม่มาก สามารถสรุปผลการศึกษาด้วยนัยสำคัญทางสถิติและง่ายต่อความเข้าใจเพื่อนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติ จากนั้นจะหาระดับของปัจจัยโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Surface Response Methodology) และใช้การหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม (Response Optimizer) ในการหาเงื่อนไขของสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษาสภาพปัจจุบันและปัญหาทางกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้น
2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. รวบรวมข้อมูลทางการผลิตพร้อมทั้งวิเคราะห์และระบุปัญหา
4. ออกแบบการทดลองและดำเนินการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียลสองระดับที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
6. ออกแบบการทดลองและดำเนินการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design)
7. วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองหรือวิธีกราฟแสดงโครงร่าง (Contour plot)
8. สรุปผลการดำเนินการวิจัยและเสนอผลงานวิจัย ดังแสดงในภาพประกอบ



ภาพประกอบ 7 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. สำนวรสภาพการดำเนินงานและปัญหาปัจจุบัน

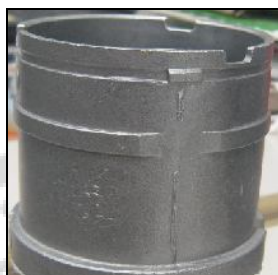
1.1 ข้อมูลเบื้องต้นของบริษัท

บริษัทผลิตชิ้นส่วนกระบอกเลนส์ที่ทำการศึกษา เป็นบริษัทที่มีประสบการณ์ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะผลิตด้วยกระบวนการ

กลึงขึ้นรูปและกัดร่อง โดยใช้เครื่องจักรซีเอ็นซีในการผลิต จากนั้นจะจัดส่งให้ลูกค้าเพื่อนำไปผลิต เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ตามกระบวนการแต่ละอุตสาหกรรม

1.2 ลักษณะและรายละเอียดของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษาของโรงงานแห่งนี้จะเป็นการผลิตชิ้นส่วนกระบอกเลนส์ซึ่งกรรมวิธีในการผลิตจะใช้เครื่องจักรซีเอ็นซีเป็นอุปกรณ์ในการผลิต วัตถุดิบที่ใช้เป็นอะลูมิเนียมหล่อขึ้นรูป (ADC12) ดังภาพประกอบ



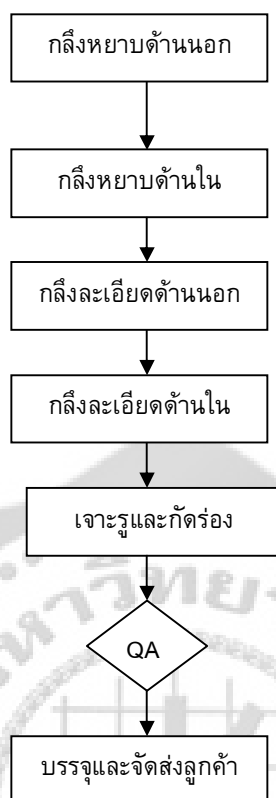
ภาพประกอบ 8 อะลูมิเนียมหล่อขึ้นรูป



ภาพประกอบ 9 ชิ้นงานจากกระบวนการผลิต

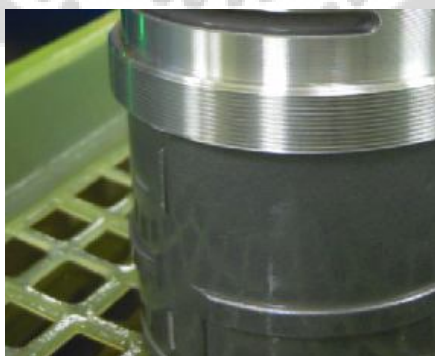
1.3 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์โมเดล PT422-20

1. กระบวนการที่ 1 คือ กระบวนการอบชิ้นงาน
2. กระบวนการที่ 2 คือ กระบวนการกลึงเกลียวและกลึงผิวด้านนอกแบบปอกหยาบ
3. กระบวนการที่ 3 คือ กระบวนการกลึงเกลียวและกลึงผิวด้านในแบบปอกหยาบ
4. กระบวนการที่ 4 คือ กระบวนการกลึงแบบปอกละเอียดด้านนอก
5. กระบวนการที่ 5 คือ กระบวนการกลึงแบบปอกละเอียดด้านใน
6. กระบวนการที่ 6 คือ กระบวนการเจาะรูและกระบวนการกัดร่อง
7. กระบวนการที่ 7 คือ กระบวนการตรวจสอบชิ้นงานก่อนส่งให้ลูกค้า



ภาพประกอบ 10 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตชิ้นส่วนโมเดล PT422-20

จากภาพประกอบ 10 แสดงกระบวนการผลิตชิ้นส่วนโมเดล PT422-20 สามารถอธิบายกระบวนการต่างๆ ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 11 กระบวนการกิ่งหยาบด้านนอก



ภาพประกอบ 12 กระบวนการกลึงหยาดด้านใน



ภาพประกอบ 13 กระบวนการกลึงละเอียดด้านนอก



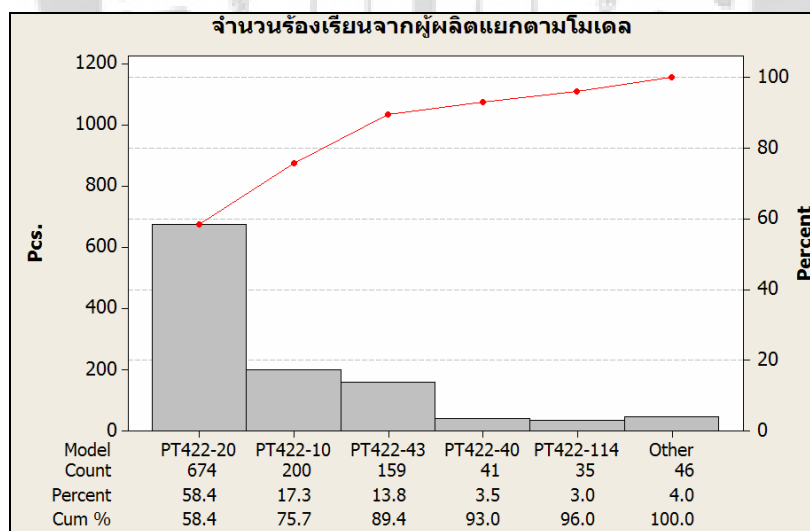
ภาพประกอบ 14 กระบวนการกลึงละเอียดด้านใน



ภาพประกอบ 15 กระบวนการเจาะรูและกัดร่อง

1.4 สภาพปัญหาที่เกิดขึ้น

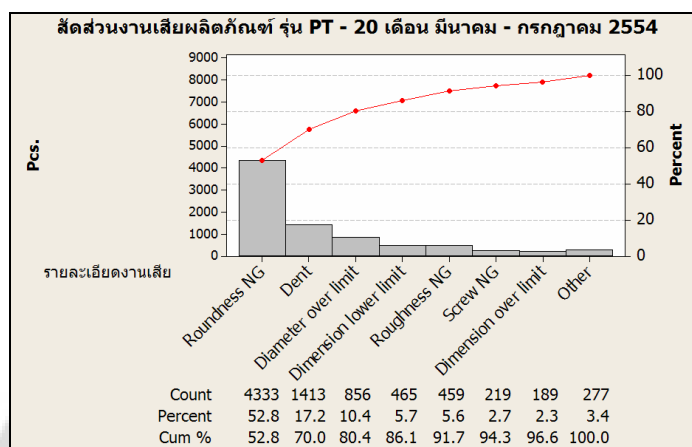
ข้อมูลการร้องเรียนเกี่ยวกับปัญหาผลิตภัณฑ์แยกประเภทโมเดลพบว่าโมเดล PT422-20 มีปัญหาร้องเรียนคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 58.4 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมากกว่าโมเดลอื่นๆ ดังนั้นจึงเลือกโมเดล PT422-20 มาทำการทดลองและวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต



ภาพประกอบ16 ผลิตภัณฑ์บกพร่องที่ร้องเรียนผู้ขายชิ้นส่วนแยกตามรุ่นของชิ้นส่วน

จากข้อมูลในกระบวนการผลิตของผู้ขายชิ้นส่วนในช่วงเดือน มี.ค. – ก.ค. ปี 2554 พบว่ามีของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตจำนวน 19,695 ชิ้นโดยเมื่อแยกตามอาการแล้วพบว่าของเสีย

เนื่องจากอาการชิ้นงานค่าความกลม (Roundness) ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดจำนวน 4,333 ชิ้น คิดเป็น 22 % ของงานเสียทั้งหมด (ข้อกำหนดค่าความกลม (Roundness) ของผู้ผลิตคือ 30 ไมครอน จากข้อมูลจึงควรที่จะลดของเสียอาการค่าความกลม (Roundness) ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดที่เกิดจากกระบวนการผลิตของผู้ขายชิ้นส่วนให้มีปริมาณของเสียลดลง เพื่อลดต้นทุนการผลิตของผู้ขายชิ้นส่วนและลดความเสี่ยงงานเสียหลุดการตรวจสอบจนถึงลูกค้า



ภาพประกอบ 17 กราฟแสดงอาการงานเสียผลิตภัณฑ์รุ่น PT422-20

1.5 เป้าหมายการดำเนินงานวิจัย

เป้าหมายของโครงการงานวิจัยนี้ คือ การลดอัตราของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของผู้ขายชิ้นส่วนประมาณ 70% ของของเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองหรือกราฟแสดงโครงร่าง (Contour plot)

2. วิธีการดำเนินงานวิจัยขั้นตอนการศึกษาผลงานวิจัยแลทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

ในการศึกษางานวิจัยครั้งนี้จะเน้นให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์และแก้ปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงเน้นศึกษาเกี่ยวกับการนำหลักการทางสถิติมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมคุณภาพและแก้ปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตโดยอาศัยการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติและการออกแบบการทดลอง

3. ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ในขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ค่าความกลมของชิ้นงานไม่เป็นไปตามข้อกำหนด โดยขั้นตอนนี้จะเป็นการระดมความคิดของทีมงานที่เกี่ยวข้องของแต่ละส่วน

การผลิต จากนั้นจะนำเครื่องมือทางสถิติเรียกว่า แผนผังก้างปลาหรือแผนผังเหตุและผลเข้ามาช่วยวิเคราะห์หาสาเหตุ จากนั้นจะนำเครื่องมือที่เรียกว่า การวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการ (FMEA Process) จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ถึงความผิดพลาดของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นมา โดยจะทำการคิดอย่างเป็นระบบและคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ ดังนั้นสาเหตุที่มีในแผนภาพแสดงสาเหตุและผลจะถูกนำมาทำการวิเคราะห์ต่อการวิเคราะห์ผลกระทบ อันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการ เพื่อสามารถค้นหาสาเหตุที่น่าจะมีผลกระทบต่อปัญหามากที่สุด

4. แผนการออกแบบการทดลอง

4.1 การกำหนดปัจจัย

ระดับปัจจัยหรือพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยและสมมุติฐาน มีดังนี้

1. เวลาการอบชิ้นงาน
2. อุณหภูมิการอบชิ้นงาน
3. ขนาดของอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

4.2 ระดับของปัจจัยหรือพารามิเตอร์ที่ใช้

จากสมมุติฐานในการออกแบบการทดลอง และข้อมูลจากการผลิต ซึ่งสภาวะการดำเนินการผลิตในปัจจุบันจะกำหนดระดับของพารามิเตอร์ในการทดลองได้ดังตาราง 6

ตาราง 6 แสดงระดับของพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษา

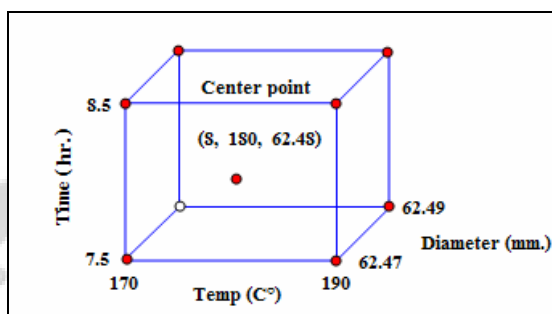
ปัจจัย	ระดับ		หน่วย
	ต่ำ (-)	สูง (+)	
เวลาการอบชิ้นงาน	7.5	8.5	ชั่วโมง
อุณหภูมิการอบชิ้นงาน	270	290	องศาเซลเซียส
ขนาดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	62.470	62.490	มิลลิเมตร

4.3 ค่าตอบสนองที่เลือกใช้

ค่าความกลมของชิ้นงาน (Roundness) ที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง CMM ซึ่งข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ คือค่าความกลมของชิ้นงาน ≤ 0.03 มิลลิเมตร

4.4 กำหนดการทดลองเบื้องต้น

จากการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 Factorial จะได้จำนวนการทดลอง (Runs) ทั้งหมด 9 สภาวะการทดลอง และจากการหาขนาดตัวอย่างในการทดลอง (Sample Size) หรือ เรพลีเคต (Replicate) ได้เท่ากับ 4 Replicates โดยกำหนดลำดับขั้นการทดลองเป็นแบบสุ่ม (Randomization) เพื่อเฉลี่ยผลของตัวแปรบกวนที่ควบคุมไม่ได้ แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับโดยเพิ่มจุดกึ่งกลางแสดงดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 18 แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล

ตาราง 7 แสดงการทดลองแบบ 2^3 Factorial โดยเพิ่มจุดกึ่งกลาง

ผลิต ครั้งที่	ปัจจัยนำเข้า			ค่าความกลม (Roundness)			
	เวลาการ อบ	อุณหภูมิ การอบ	ขนาด อุปกรณ์ จับยึด	จำนวน ซ้ำ 1	จำนวน ซ้ำ 2	จำนวน ซ้ำ 3	จำนวน ซ้ำ 4
1	7.5	270	62.470				
2	8.5	270	62.470				
3	7.5	290	62.470				
4	8.5	290	62.470				
5	7.5	270	62.490				
6	8.5	270	62.490				
7	7.5	290	62.490				
8	8.5	290	62.490				
9	8	280	62.480				

4.5 วิธีการดำเนินงานในขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้น

เมื่อได้ผลการทดลองครบถ้วนแล้วนำผลการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์และสรุปผลโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลการดำเนินการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ ซึ่งอาศัยโปรแกรม Minitab มาวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

1. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง
2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความกลมไม่เป็นไปตามข้อกำหนด
3. ปัจจัยหลัก (Main Effect) ได้แก่ เวลาการอบชิ้นงาน, อุณหภูมิการอบชิ้นงานและขนาดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ต่อ ค่าความกลมของชิ้นงานไม่เป็นไปตามข้อกำหนด
4. ปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้แก่ เวลาการอบชิ้นงาน, อุณหภูมิการอบชิ้นงานและขนาดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ต่อ ค่าความกลมของชิ้นงานไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

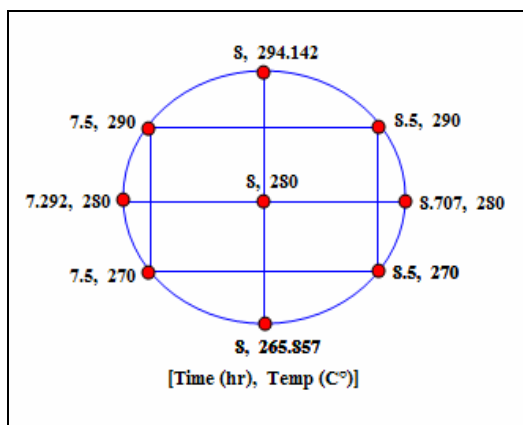
4.6 การกำหนดการทดลองแบบ Central Composite Design

เมื่อได้อิทธิพลของปัจจัยแล้วจึงวางแผนการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อหาพื้นผิวตอบสนองโดยกำหนดปัจจัย 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิการอบและเวลาการอบ โดยกำหนดปัจจัยขนาดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานคงที่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องจักรจึงไม่สามารถปรับเปลี่ยนระดับของปัจจัยให้ละเอียดได้อีก

ตาราง 8 แสดงระดับของพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษา

ปัจจัย	ระดับ			หน่วย
	ต่ำ	กลาง	สูง	
เวลาการอบชิ้นงาน	7.5	8	8.5	ชั่วโมง
อุณหภูมิการอบชิ้นงาน	270	280	290	องศาเซลเซียส
ขนาดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	62.480	62.480	62.480	มิลลิเมตร

จากการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design จะได้จำนวนการทดลอง (Runs) ทั้งหมด 52 การทดลอง และจากการหาขนาดตัวอย่างในการทดลอง (Sample Size) หรือ เรพลีเคต (Replicate) ได้เท่ากับ 4 Replicates โดยกำหนดลำดับขั้นการทดลองเป็นแบบสุ่ม (Randomization) เพื่อเฉลี่ยผลของตัวแปรปรวนที่ควบคุมไม่ได้ แผนการทดลองแบบ Central Composite Design แสดงดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 19 แผนการทดลองแบบ Central Composite Design

ตาราง 9 แสดงการทดลองแบบ Central Composite Design

ผลิต ครั้งที่	ปัจจัยนำเข้า		ค่าความกลม (Roundness)			
	เวลาการ อบชิ้นงาน	อุณหภูมิ การอบ ชิ้นงาน	จำนวนซ้ำ 1	จำนวนซ้ำ 2	จำนวนซ้ำ 3	จำนวนซ้ำ 4
1	7.5	270				
2	8.5	270				
3	7.5	290				
4	8.5	290				
5	7.292	280				
6	8.707	280				
7	8	265.857				
8	8	294.142				
9	8	280				
10	8	280				
11	8	280				
12	8	280				
13	8	280				

4.7 วิธีการดำเนินงานในขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

เมื่อได้ผลการทดลองครบถ้วนแล้วนำผลการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์และสรุปผล โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลการดำเนินการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ ซึ่งอาศัยโปรแกรม Minitab มาวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

1. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง
2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความกลมไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

จากการวิเคราะห์จะทำให้ทราบถึงปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความกลมของชิ้นงานไม่เป็นไปตามข้อกำหนดและสามารถแสดงเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนองจากอิทธิพลปัจจัยร่วม 2 ระดับ เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

จากกราฟ Surface Plot หรือ Contour Plot สามารถระบุปัจจัยที่เหมาะสมต่อผลตอบสนองของค่าความกลมของกระบอกเลนส์ได้แค่เป็นช่วง ดังนั้นการกำหนดค่าปัจจัยที่ชัดเจนต้องอาศัยการวิเคราะห์ด้วย Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม



บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

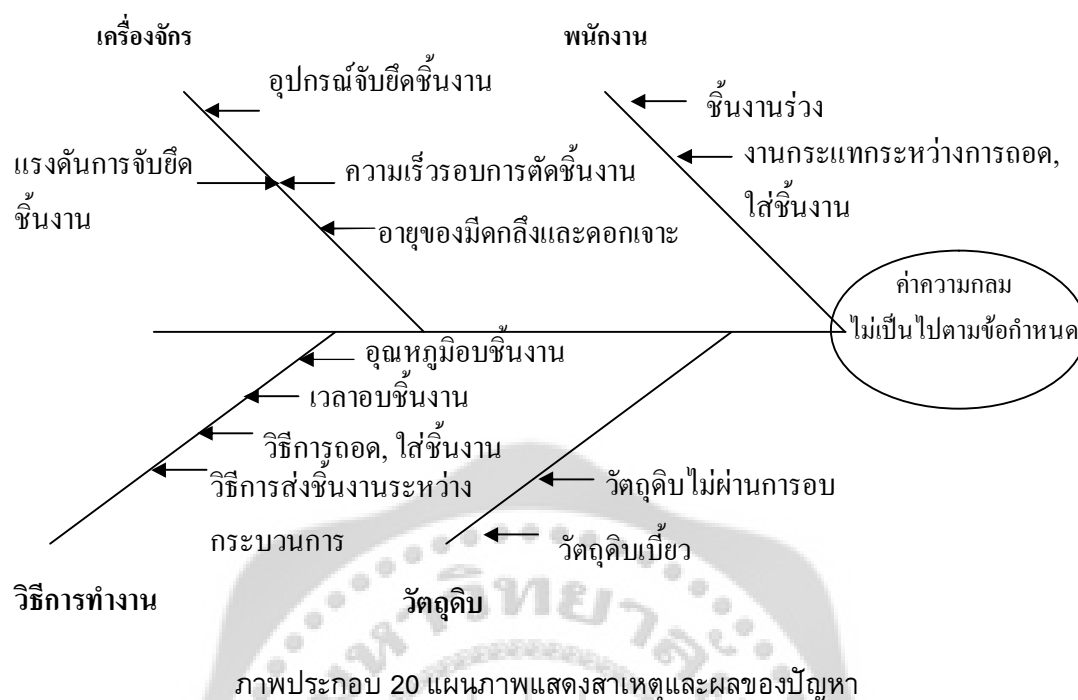
สำหรับในบทนี้จะแสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินงานตามขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในบทที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดในการดำเนินงานวิจัยและผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

เมื่อทำการศึกษาระบบการโดยครบถ้วนแล้ว จะพอทำให้ทราบว่าตัวแปรเข้าที่สำคัญของกระบวนการมีอะไรบ้าง ต่อมาจึงมีความจำเป็นต้องทำการระดมสมอง เพื่อทำการค้นหาสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยขั้นตอนนี้จะให้ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องร่วมกันแสดงความคิดเห็นผู้ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ปัจจัยผู้ทำการวิเคราะห์จะประกอบไปด้วยผู้เชี่ยวชาญของแต่ละฝ่าย ซึ่งจะแสดงผู้ทำการวิเคราะห์ตามตำแหน่งของแต่ละฝ่าย ดังนี้

ตาราง 10 แสดงข้อมูลของผู้วิเคราะห์

หน่วยงาน	ตำแหน่ง	จำนวนคน
ฝ่ายผลิต	ผู้จัดการส่วนผลิต	1
	วิศวกรอาวุโส	1
	วิศวกร	1
ฝ่ายประกันคุณภาพ	วิศวกรอาวุโส	1
	วิศวกร	1
ฝ่ายวิศวกรรม	วิศวกรอาวุโส	1
	วิศวกร	1
ฝ่ายควบคุมคุณภาพ	วิศวกร	1
ฝ่ายจัดซื้อ	หัวหน้าแผนก	1



2. การวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการ

การศึกษาและวิเคราะห์ถึงความผิดพลาดของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นมา โดยจะทำการคิดอย่างเป็นระบบและคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ ดังนั้นสาเหตุที่มีในแผนภาพแสดงสาเหตุและผลจะถูกนำมาทำการวิเคราะห์เพื่อค้นหาสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ซึ่ง FMEA จะเป็นการวางระบบเตือนภัยล่วงหน้าและเป็นเทคนิคการป้องกันปัญหาชนิดหนึ่ง ซึ่งมีส่วนช่วยในการศึกษาสาเหตุและผลกระทบต่างๆ ก่อนที่การออกแบบหรือกระบวนการผลิตจะสรุปผลขั้นสุดท้าย ปัญหาทุกส่วนที่เกี่ยวข้องที่มีการวิเคราะห์ร่วมกันจะถูกบันทึกลงในแบบฟอร์มมาตรฐาน เริ่มต้นจากหน้าที่ย่อยๆ ใดอย่างหนึ่งของกระบวนการผลิตจะถูกนำมาพิจารณาอย่างละเอียดว่ามีชนิดหรือรูปแบบของปัญหาและความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นหรือเคยเกิดขึ้นแล้วมีอะไรบ้าง มีสาเหตุมาจากเรื่องใดและจะมีผลกระทบอย่างไร จากนั้นจะมีการประมาณตัวเลขค่าคะแนนความเสี่ยงขึ้นหรือที่เรียกกันว่าค่า RPN ซึ่งมาจากคำว่า Risk Priority Number ให้กับแต่ละปัญหา ซึ่งจากการวิเคราะห์ปัจจัยหลักนำเข้าของกระบวนการทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพแสดงเหตุและผล สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดของกระบวนการดังตาราง

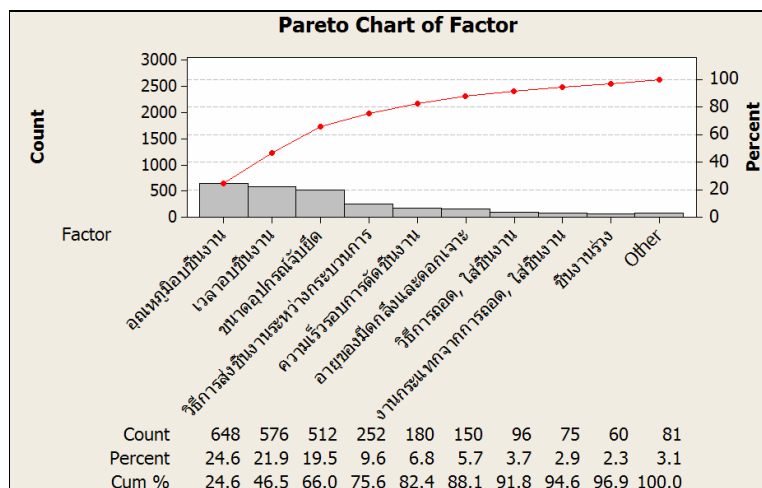
ตาราง 11 การวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการ

ปัจจัย นำเข้า หลักของ กระบวนการ	ความผิดพลาด ที่ อาจเกิดขึ้นได้	ผลกระทบจาก ความผิดพลาด	SEV	สาเหตุที่ทำให้ เกิดความ ผิดพลาด	OCC	การควบคุม ในปัจจุบัน	DET	RPN
อุณหภูมิ อบชิ้นงาน	ค่าความกลบไม่ ผ่านข้อกำหนด	ทำให้งานหลัง กลึงและกัดเบี้ยว	8	อบชิ้นงานด้วย อุณหภูมิต่ำ หรือสูงเกินไป	9	เพิ่มหรือลด อุณหภูมิการอบ	9	648
เวลาอบ ชิ้นงาน	ค่าความกลบไม่ ผ่านข้อกำหนด	ทำให้งานหลัง กลึงและกัดเบี้ยว	8	อบชิ้นงานด้วย เวลาที่ต่ำหรือ สูงเกินไป	9	เพิ่มเวลาการอบ	8	576
ขนาดของ อุปกรณ์จับ ยึด	ค่าความกลบไม่ ผ่านข้อกำหนด	ทำให้ชิ้นงาน เสียรูป	8	ขนาดอุปกรณ์ จับยึดใหญ่หรือ เล็กเกินไป	8	ออกแบบอุปกรณ์ จับยึดให้เหมาะสม	8	512
วิธีการส่ง ชิ้น งาน ระหว่าง กระบวนการ	ค่าความกลบไม่ ผ่านข้อกำหนด	ทำให้ชิ้นงาน เบี้ยว	7	ชิ้นงานเกิด กระแทกกัน ระหว่างขนส่ง	6	จัดเรียงชิ้นงานโดย มีอุปกรณ์กัน	6	252
ความเร็ว รอบ การตัด ชิ้นงาน	ค่าความกลบไม่ ผ่านข้อกำหนด	ทำให้ชิ้นงาน เบี้ยว	6	ความเร็วรอบ การตัดมาก เกินไป	5	กำหนดความเร็ว รอบการตัดชิ้นงาน ที่ เหมาะสม	6	180
อายุของ มีดกลึง และดอก เจาะ	ค่าความกลบไม่ ผ่านข้อกำหนด	ทำให้ชิ้นงาน เบี้ยว	6	ใบมีดดัดเสีย	5	กำหนดรอบการ เปลี่ยนให้ เหมาะสม	5	150

ตาราง 11 (ต่อ)

ปัจจัยนำเข้า หลักของ กระบวนการ	ความผิดพลาด ที่ อาจเกิดขึ้นได้	ผลกระทบจากความ ผิดพลาด	SEV	สาเหตุที่ทำให้ เกิดความ ผิดพลาด	OCC	การควบคุม ในปัจจุบัน	DET	RPN
การถอด, ใส่ ชิ้นงาน	ค่าความกลมไม่ ผ่านข้อกำหนด	ทำให้ชิ้นงานเบี้ยว	5	งานกระแทก กับอุปกรณ์ จับยึด	5	อบรม เกี่ยวกับ วิธีการและ กำหนด มาตรฐาน การทำงาน	3	75
ชิ้นงานร่ว	ค่าความกลมไม่ ผ่านข้อกำหนด	ทำให้ชิ้นงานเสียรูป	5	งานกระแทก กับพื้น	4	อบรม เกี่ยวกับ มาตรฐาน คุณภาพ	3	60
วัตถุดิบไม่ได้ อบ	ค่าความกลมไม่ ผ่านข้อกำหนด	ทำให้ชิ้นงานเสียรูป หรือแตก	5	ชิ้นงาน เปราะ	3	กำหนด มาตรฐานการ อบวัตถุดิบ ก่อน กระบวนการ	3	45
วัตถุดิบเบี้ยว	ค่าความกลมไม่ ผ่านข้อกำหนด	ทำให้ชิ้นงานเสียรูป	4	วัตถุดิบเสีย รูปส่งผลต่อ ชิ้นงานเบี้ยว	3	แยกวัตถุดิบที่ เสียรูป	3	36

จากค่าตัวเลขระดับความเสี่ยง (RPN) ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการ สามารถนำมาสร้างแผนภาพพาเรโตเพื่อคัดเลือกสาเหตุปัญหาที่จะนำมาวิเคราะห์ในกระบวนการออกแบบการทดลองโดยจะเลือกปัญหาที่มีค่าตัวเลขระดับความเสี่ยง (RPN) สูงสุดและถัดมาตามลำดับ ซึ่งปัจจัยที่มีค่าตัวเลขระดับความเสี่ยงสูงหมายความว่าโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในกระบวนการย่อมมีมากตามไปด้วย



ภาพประกอบ 21 แผนภาพพาเรโตแสดงปัจจัยของปัญหา

จากแผนภาพพาเรโตจึงเลือกปัจจัยของปัญหาคือ อุณหภูมิการอบขี้เถ้าจำนวนเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 24.64% เวลาการอบขี้เถ้าจำนวนเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 21.90% ขนาดอุปกรณ์วัดขี้เถ้าจำนวนเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 19.47% ผลรวมปัจจัยนำเข้าเท่ากับ 66.01%

3. การวิเคราะห์ศึกษาระบบวัด (Measurement system analysis)

การศึกษาระบบการวัดเพื่อเป็นการสร้างความน่าเชื่อถือของค่าวัดที่อ่านได้ และเป็นการลดความผันแปรในค่าวัดซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดๆไปมีความถูกต้องมากขึ้น การวิเคราะห์ระบบการวัดที่มีความถูกต้องและแม่นยำหรือไม่ โดยตรวจสอบซ้ำจากแหล่งข้อมูล เช่น ตรวจสอบอาการผลิตภัณฑ์บกพร่องโดยเปรียบเทียบจากพนักงาน 2 คนและทำการตรวจสอบซ้ำ 2 ครั้ง จากกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 10 ตัว ซึ่งเรียกการวิเคราะห์ระบบการวัดนี้ว่า Gage Repeatability and Reproducibility, GR&R ระบบการวัดที่ใช้ในการวัดผลิตภัณฑ์บกพร่องเนื่องจากอาการค่าความกลมไม่ได้ตามข้อกำหนดคือ Roundness Measuring Machine ดังนั้นความแม่นยำและถูกต้องในการตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธในการตรวจสอบขึ้นอยู่กับความแม่นยำและถูกต้องของเครื่อง Roundness Measuring Machine นอกจากเครื่อง Roundness Measuring Machine แล้วพนักงานตรวจสอบก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบด้วย ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้แบ่งการวิเคราะห์ระบบการวัดเป็น 2 หัวข้อ คือ

1. การสอบเทียบเครื่อง Roundness Measuring Machine (Calibration)

เครื่อง CMM ต้องผ่านการสอบเทียบและมีความถี่ในการสอบเทียบ 1 ครั้ง/ปี

2. ทดสอบความแปรปรวนของเครื่องมือให้มีเสถียรภาพที่ดีจากการวัดซ้ำๆโดยผู้วัด

คนเดิมหรือระหว่างผู้คนแต่ละคน โดยปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

ก) เลือกตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากกระบวนการผลิตจำนวน 10 ตัว

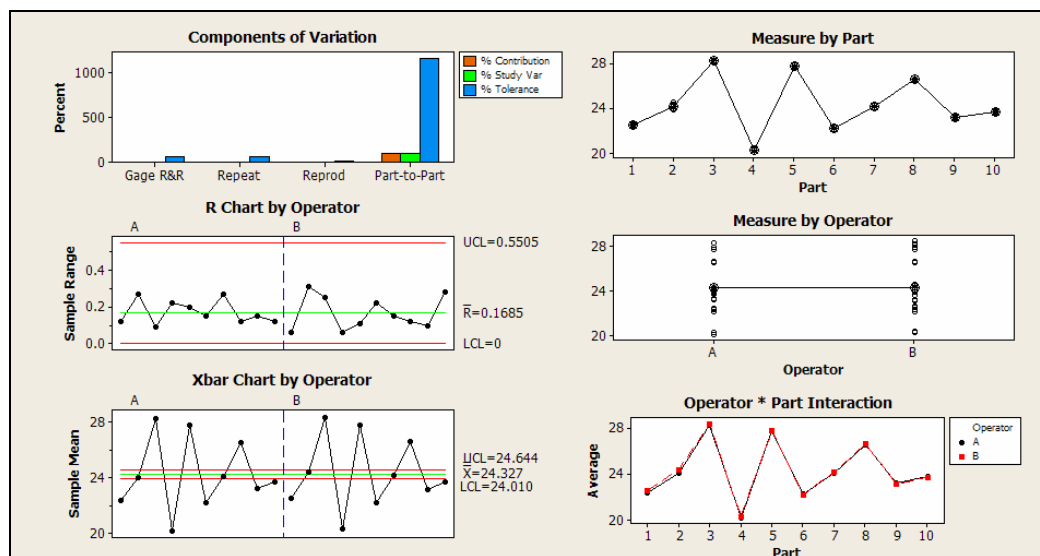
ข) เลือกพนักงานตรวจสอบ 2 คน ซึ่งมีประสบการณ์ในการตรวจสอบด้วยเครื่อง Roundness Measuring Machine อย่างน้อย 6 เดือน

ค) พนักงาน 2 คน ทำการตรวจสอบ 10 ตัวอย่าง คนละ 2 รอบ
นำข้อมูลของพนักงานตรวจสอบทั้ง 2 คน ทำการวิเคราะห์เพื่อดูความถูกต้องในการตรวจซ้ำของพนักงานแต่ละคนและเปรียบเทียบความแม่นยำและถูกต้องในการตรวจสอบพนักงาน 2 คน

ตาราง 12 แสดงผลการวัดค่าความกลม

พนักงาน	A			B		
หมายเลขสิ่ง ตัวอย่าง	ครั้งที่1	ครั้งที่2	พิสัย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	พิสัย
1	22.49	22.37	0.12	22.56	22.62	0.06
2	23.96	24.23	0.27	24.58	24.27	0.31
3	28.36	28.27	0.09	28.50	28.25	0.25
4	20.34	20.12	0.22	20.37	20.31	0.06
5	27.72	27.92	0.20	27.88	27.77	0.11
6	22.35	22.20	0.15	22.34	22.12	0.22
7	24.02	24.29	0.27	24.15	24.30	0.15
8	26.64	26.52	0.12	26.58	26.70	0.12
9	23.21	23.36	0.15	23.23	23.13	0.10
10	23.72	23.84	0.12	23.89	23.61	0.27
ผลรวม	242.81	243.12	1.71	244.08	243.08	1.65

หลังจากที่ได้ผลการทดลองแล้ว นำมาวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Minitab ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพประกอบ 22 กราฟแสดงการวิเคราะห์ระบบการวัด

การแปลความหมายของกราฟจะต้องพิจารณาดังนี้ R chart แสดงว่า ระบบการวัดของเรา นั้นมีความสามารถในการวัดละเอียดเพียงพอ และเหมาะสมในการใช้งาน โดยการพิจารณาผ่านเกณฑ์คือจุดที่พลอตทุกจุดในกราฟต้องอยู่ภายในเส้นควบคุมและจุดที่พลอตในกราฟต้องสามารถแบ่งระดับได้อย่างน้อย 4 ระดับซึ่งจากกราฟผ่านทั้ง 2 เกณฑ์

X bar chart แสดงว่า งานที่เรานำมาวัดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แผนภาพแสดงอิทธิพลร่วมระหว่างพนักงานและชิ้นงาน แสดงว่า พนักงานวัดไม่มีอิทธิพลร่วมกับชิ้นงาน กราฟที่พลอตระหว่างชิ้นงานแสดงว่า ชิ้นงานที่นำมาทดลองเป็นไปอย่างสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน และกราฟที่พลอตระหว่างพนักงานที่ทดลอง แสดงว่าพนักงานทั้งสองคนไม่แตกต่างกัน

Gage R&R				
Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)		
Total Gage R&R	0.01748	0.27		
Repeatability	0.01641	0.25		
Reproducibility	0.00107	0.02		
Operator	0.00107	0.02		
Part-To-Part	6.55754	99.73		
Total Variation	6.57502	100.00		

Source	StdDev (SD)	Study Var (4.56 * SD)	%Study Var (%SU)	%Tolerance (SU/Toler)
Total Gage R&R	0.13222	0.6029	5.16	60.29
Repeatability	0.12810	0.5842	5.00	58.42
Reproducibility	0.03272	0.1492	1.28	14.92
Operator	0.03272	0.1492	1.28	14.92
Part-To-Part	2.56077	11.6771	99.87	1167.71
Total Variation	2.56418	11.6927	100.00	1169.27

Number of Distinct Categories = 27

ภาพประกอบ 23 แสดงการวิเคราะห์ระบบการวัด

3.1 การแปลความหมายจากผลการวิเคราะห์

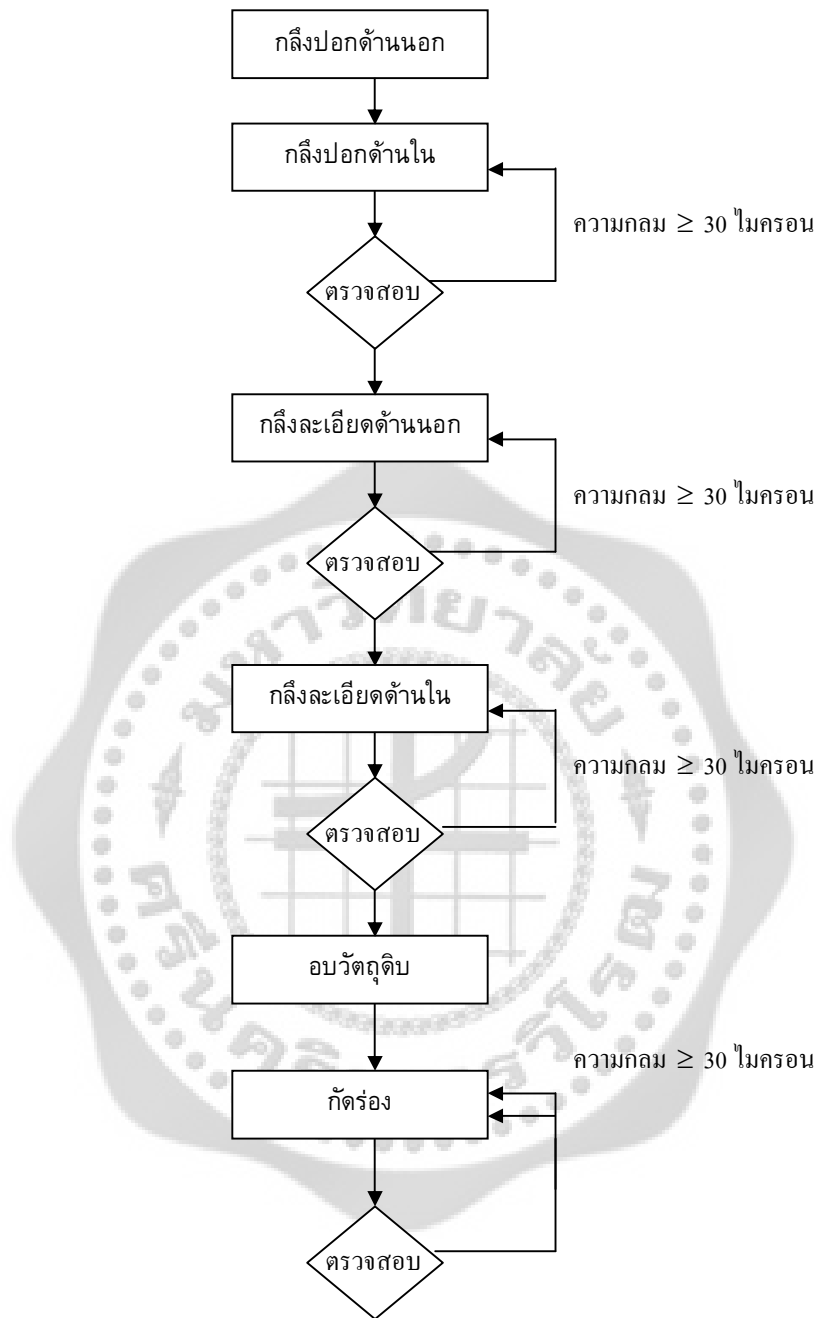
Number of Distinct Categories เท่ากับ 27 หมายความว่า เครื่องมือสามารถแยกข้อมูลของชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบออกได้ 27 ประเภท ซึ่งแสดงว่าระบบการวัดของเครื่อง Roundness Measuring Machine สามารถใช้ตรวจจับความผันแปรภายในกระบวนการได้ดีค่า % contribution เท่ากับ 0.25 หมายความว่า ค่าที่อ่านได้จากเครื่อง Roundness Measuring Machine มีความผันแปรเนื่องจากการเครื่องมือวัดเพียง 0.25% ซึ่งโดยทั่วไปเกณฑ์ในการยอมรับอยู่ที่น้อยกว่า 2% ดังนั้นแสดงว่าเครื่อง Roundness Measuring Machine อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4. การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของแต่ละกระบวนการที่มีต่อค่าความกลม

1. นำวัตถุดิบอะลูมิเนียมหล่อขึ้นรูปจำนวน 5 ชิ้น ผ่านกระบวนการผลิตโดยกำหนดให้หลังจากผ่านกระบวนการผลิตแต่ละขั้นตอนต้องนำชิ้นงานมาตรวจสอบค่าความกลมจึงจะสามารถส่งเข้ากระบวนการถัดไป

2. บันทึกข้อมูลค่าความกลมของแต่ละกระบวนการ

3. วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อค้นหากระบวนการที่มีอิทธิพลต่อค่าความกลมของผลิตภัณฑ์



ภาพประกอบ 24 แผนผังแสดงการทดลอง

ตาราง 13 บันทึกผลการทดลองเบื้องต้น

กระบวนการ	ค่าความกลม				
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5
กลิ้งปลอก	19.02	8.67	11.46	10.78	8.27
กลิ้งละเอียดด้านนอก	13.86	14.35	13.22	10.19	9.73
กลิ้งละเอียดด้านใน	12.47	18.09	14.36	13.48	13.67
กั้ตรอง	30.97	46.01	46.16	32.28	37.19

4.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากข้อมูลการทดลองพบว่ากระบวนการกลิ้งปลอก กระบวนการกลิ้งละเอียดด้านนอก และกระบวนการกลิ้งละเอียดด้านในมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกลมอยู่ในระดับปกติซึ่งหมายความว่ามียุทธิพลต่อค่าความกลมเพียงเล็กน้อยแต่กระบวนการกั้ตรองมีการเปลี่ยนแปลงค่าความกลมในระดับสูงแสดงว่ามีอิทธิพลต่อค่าความกลมมาก ดังนั้นจึงเลือกกระบวนการกั้ตรองและกระบวนการอบ มาทำการวิเคราะห์ปัจจัยและออกแบบการทดลอง

5. การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัย

5.1 วิเคราะห์เวลาการอบชิ้นงาน

การผลิตชิ้นงานโดยกระบวนการกลิ้งขึ้นรูปที่มีวัตถุดิบเป็นโลหะประเภท เหล็ก อะลูมิเนียม นั้นจำเป็นจะต้องมีกระบวนการอบชิ้นงานก่อนเข้ากระบวนการ เพื่อให้โครงสร้างของเม็ดเกรนมีการจัดเรียงตัวที่ดีขึ้นและลดความเค้นและความเครียดของวัตถุดิบโดยจะกำหนดเวลาอยู่ที่ 6.5 ชั่วโมงถึง 9.5 ชั่วโมง ซึ่งเวลาที่ใช้จะขึ้นอยู่กับปริมาณการผลิตหากปริมาณการผลิตสูงจะใช้เวลาการอบชิ้นงาน 6.5 ชั่วโมง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเวลาการอบชิ้นงานมาเป็นปัจจัยในการวิเคราะห์และทดสอบสมมุติฐานว่าเวลาการอบชิ้นงานส่งผลกระทบท่องานเสีย

5.2 วิเคราะห์อุณหภูมิการอบชิ้นงาน

กระบวนการอบชิ้นงานก่อนเข้ากระบวนการผลิตนั้นอุณหภูมิการอบจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิต ซึ่งหากกำหนดอุณหภูมิการอบไม่สอดคล้องกับชนิดของวัตถุดิบและกระบวนการผลิตแล้วอาจส่งผลกระทบท่อกระบวนการผลิต ซึ่งอุณหภูมิที่กำหนดจะอยู่ที่ 260 องศาเซลเซียส ถึง 290 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้จะแปรผันกับเวลาที่ใช้อบชิ้นงาน หากเวลาในการอบน้อยจะใช้อุณหภูมิสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำอุณหภูมิการอบชิ้นงานมาเป็นปัจจัยในการวิเคราะห์และทดสอบสมมุติฐานว่าอุณหภูมิการอบชิ้นงานส่งผลกระทบท่องานเสีย

5.3 วิเคราะห์ขนาดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

กระบวนการผลิตด้วยกระบวนการกลึงชิ้นรูปนั้นจะมีส่วนประกอบทางกลอยู่ 2 ส่วนคือ อุปกรณ์จับยึดและมีดกลึง (Cutting Tool) สำหรับตัดชิ้นงาน ซึ่งส่วนประกอบทั้งสองส่วนหากเลือกใช้ไม่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตก็จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานมาพิจารณาพบว่าอุปกรณ์มีอยู่ 2 ขนาด คือ ขนาด 62.470 มิลลิเมตร และ ขนาด 62.490 มิลลิเมตร ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานมาเป็นปัจจัยในการวิเคราะห์และทดสอบสมมุติฐานว่าอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานส่งผลกระทบต่องานเสีย

ตาราง 14 แสดงปัจจัยคาดหมายมีอิทธิพลต่อค่าความกลม

ปัจจัย	ระดับ		หน่วย
	1	2	
เวลาการรอบชิ้นงาน	7.5	8.5	ชั่วโมง
อุณหภูมิการรอบชิ้นงาน	270	290	องศาเซลเซียส
ขนาดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	62.470	62.490	มิลลิเมตร

5.4 ตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนองที่เลือกใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ คือจำนวนของเสียที่เกิดจากค่าความกลมไม่ได้ตามข้อกำหนด โดยใช้เครื่องมือ Roundness Measuring Machine ในการตรวจสอบค่าความกลม ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดไว้และยอมรับได้คือ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 ไมครอน

5.5 การคำนวณสิ่งตัวอย่าง

การคำนวณสิ่งตัวอย่างจะกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้

1. ระดับนัยสำคัญ (α) มีค่าเท่ากับ 0.05
2. ความน่าจะเป็นในการยอมรับสมมุติฐาน (β) มีค่าเท่ากับ 0.05
3. ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) มีค่าเท่ากับ 3.96
4. ค่า Corner Point เท่ากับ 8 จุด

ตาราง 15 แสดงผลลัพธ์การคำนวณสิ่งตัวอย่าง

Power and Sample Size					
2-Level Factorial Design					
Alpha = 0.05 Assumed standard deviation = 3.96					
Factor: 3 Base Design: 3, 8					
Block: None					
Including a term for center point in model.					
Center Point	Effect	Reps	Total Runs	Target Power	Actual Power
4	10	2	20	0.85	0.995523
4	10	2	20	0.90	0.995523
4	10	2	20	0.95	0.995523

จากตาราง สรุปได้ว่าจำนวนสิ่งตัวอย่างสำหรับการทดลองหรือจำนวนซ้ำ (Replicate) ที่จะใช้ในการทดลองอย่างน้อยต้องมีค่าเท่ากับ 2 ซ้ำ (2 Replicate) ดังนั้นเพื่อการลดอคติในการทดลอง จึงกำหนดการทดลองซ้ำในแต่ละระดับของปัจจัยเท่ากับ 4 ซ้ำ (4 Replicate)

6. ผลการทดลอง

ในการทดลองเบื้องต้นนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับโดยวิธีเพิ่มจุดกึ่งกลาง (2^k with center point) โดยซึ่งจะมีระดับของปัจจัย 2 ระดับ คือระดับสูงและระดับต่ำเพื่อกรองปัจจัยหลัก (Screening Factor) ที่ไม่มีอิทธิพลต่อจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นจากค่าความกลมไม่เป็นไปตามข้อกำหนดหรือปัจจัยหลักที่ไม่มีนัยสำคัญออก และนำปัจจัยหลักที่เหลืออยู่ไปศึกษาต่อเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในส่วนต่อไป ผู้วิจัยจะต้องทำการทดลองทั้งหมด 36 การทดลอง และได้กำหนดค่า α ไว้ที่ระดับ 0.05

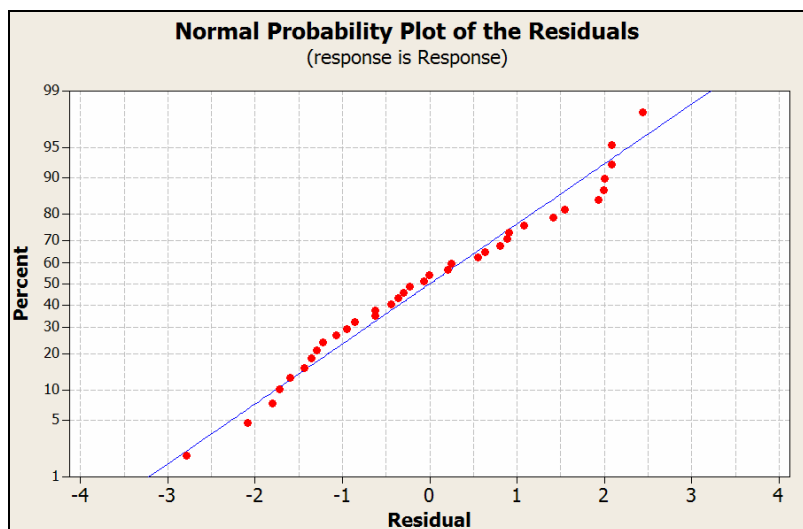
ตาราง 16 แสดงผลการทดลองแบบสองระดับโดยเพิ่มจุดกึ่งกลาง

ผลิต ครั้งที่	ปัจจัยนำเข้า			ค่าความกลม			
	เวลาการ	อุณหภูมิ	ขนาด	จำนวนซ้ำ	จำนวนซ้ำ	จำนวนซ้ำ	จำนวนซ้ำ
	อบ ชิ้นงาน	การอบ ชิ้นงาน	อุปกรณ์ จับยึด ชิ้นงาน	1	2	3	4
1	7.5	270	62.47	31.63	32.48	30.12	33.47
2	8.5	270	62.47	30.02	29.14	29.02	32.18
3	7.5	290	62.47	28.58	27.21	28.18	31.25
4	8.5	290	62.47	28.53	26.16	25.73	29.39
5	7.5	270	62.49	32.94	33.75	30.16	34.94
6	8.5	270	62.49	31.43	30.37	29.87	33.23
7	7.5	290	62.49	31.21	30.52	29.73	32.37
8	8.5	290	62.49	30.19	28.93	27.47	31.64
9	8	280	62.48	20.46	21.54	22.81	22.79

6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking)

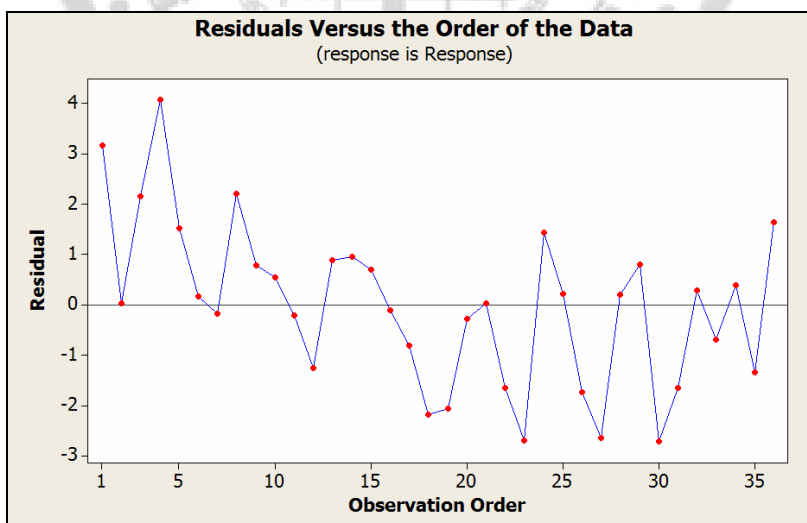
เป็นการตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องของข้อมูลว่าเป็นไปตามเงื่อนไขที่สำคัญคือ NID (0, σ^2) หรือไม่ โดยลักษณะการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบนั้น ประกอบด้วยการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของการทดลองภายใต้เงื่อนไข 3 ประการ ด้วยกันโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) จากการพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ซึ่งใช้การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) โดยนำข้อมูลในตาราง มาสร้างเป็นแผนภูมิพบว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีการแจกแจงแบบปกติ



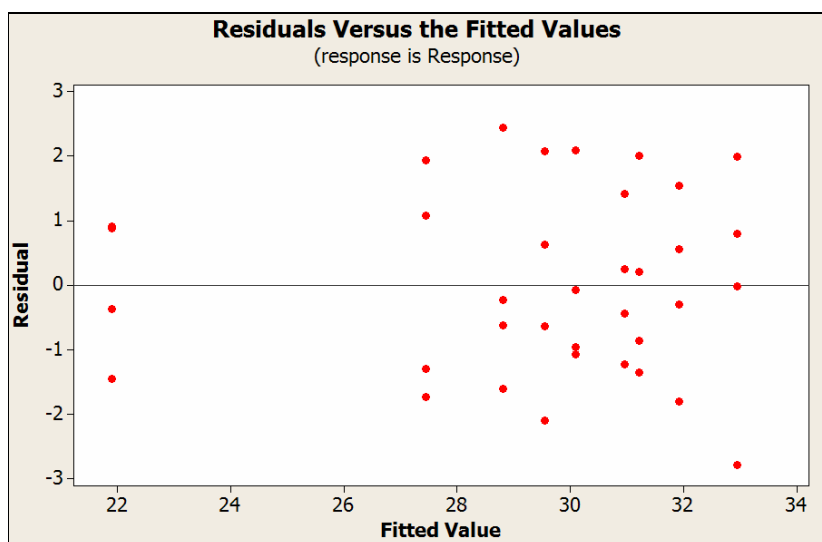
ภาพประกอบ 25 ผลลัพธ์การทดสอบสมมติฐานการกระจายแบบปกติ

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) สามารถพิจารณาจากการนำข้อมูลในตาราง 10 มาสร้างเป็นแผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ดังภาพประกอบ 24 เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูลบนแผนภูมิพบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent)



ภาพประกอบ 26 ผลลัพธ์การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของข้อมูล

3. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล



ภาพประกอบ 27 ผลลัพธ์การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล

จากค่าตอบสนองจำนวนงานเสียในกระบวนการ มีรูปแบบการกระจายที่ไม่แน่นอนไม่สามารถทำนายรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงว่าค่า Residual มีเสถียรภาพของความแปรปรวน

ตาราง 17 แสดงค่า P value ของปัจจัยต่างๆตามผลทดสอบ

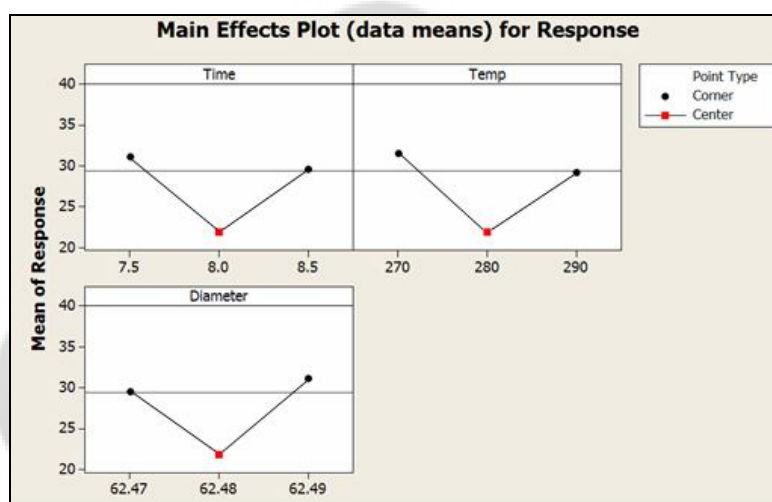
Factorial Fit: Response versus Time, Temp, Diameter					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		30.370	0.2786	109.01	0.000*
Time	-1.577	-0.789	0.2786	-2.83	0.009*
Temp	-2.354	-1.177	0.2786	-4.22	0.000*
Diameter	1.604	0.802	0.2786	2.88	0.008
Time*Temp	0.201	0.101	0.2786	0.36	0.721
Time*Diameter	0.016	0.008	0.2786	0.03	0.977
Temp*Diameter	0.525	0.262	0.2786	0.94	0.354
Time*Temp*Diameter	-0.040	-0.020	0.2786	-0.07	0.943
Ct Pt		-8.470	0.8358	-10.13	0.000*

S = 1.59747 R-Sq = 80.15% R-Sq(adj) = 74.27%

6.2 สรุปผลการทดลองแบบ 2^3 แฟคทอเรียล โดยวิธีเพิ่มจุดกึ่งกลาง

6.2.1 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า เวลาการอบชิ้นงาน (Time) กับ อุณหภูมิการอบชิ้นงาน (Temp) และขนาดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Diameter) แต่ละปัจจัยมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าปัจจัยทั้งสามข้างต้นมีผลต่อค่าความกลมของชิ้นงานไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับโดยวิธีเพิ่มจุดกึ่งกลางสามารถแสดงเป็นแผนภาพของอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อค่าความกลมของชิ้นงานไม่เป็นไปตามข้อกำหนด ดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงอิทธิพลของ 3 ปัจจัย

การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับโดยวิธีเพิ่มจุดกึ่งกลางมีผลความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design จะช่วยสร้างความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรง ทำให้หาสภาวะที่เหมาะสมได้ ซึ่งจะนำไปศึกษาต่อเพื่อที่จะหาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์เพื่อให้จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการมีจำนวนน้อยที่สุด โดยการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design

6.3 การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design

การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design คือวิธีการทดลองที่ผู้ทำการทดลองจะต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย และจะต้องวิเคราะห์ผลกระทบท่อตัวแปรตอบสนองทุกกรณี เนื่องจากการทดลองนี้มีระดับปัจจัยที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องนำปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิการอบและเวลาการอบ โดยกำหนดปัจจัยขนาดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานคงที่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องจักรจึงไม่

สามารถปรับเปลี่ยนระดับของปัจจัยให้ละเอียดได้อีกโดยจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละเงื่อนไขหรือทำซ้ำ 4 (4 replicates) ดังนั้นจำนวนการทดลองทั้งหมด 52 สภาวะการทดลอง

6.3.1 ระดับปัจจัยและคุณลักษณะป้อนเข้าสำหรับการทดลองแบบ Central Composite Design ปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการศึกษาในขั้นตอนนี้ จะได้มาจากการกรองปัจจัยเบื้องต้นด้วยการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับโดยวิธีเพิ่มจุดกึ่งกลาง มาทำการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์ ด้วยวิธีการทดลองแบบ Central Composite Design ดังตาราง 18

ตาราง 18 แสดงผลการทดลองแบบ Central Composite Design

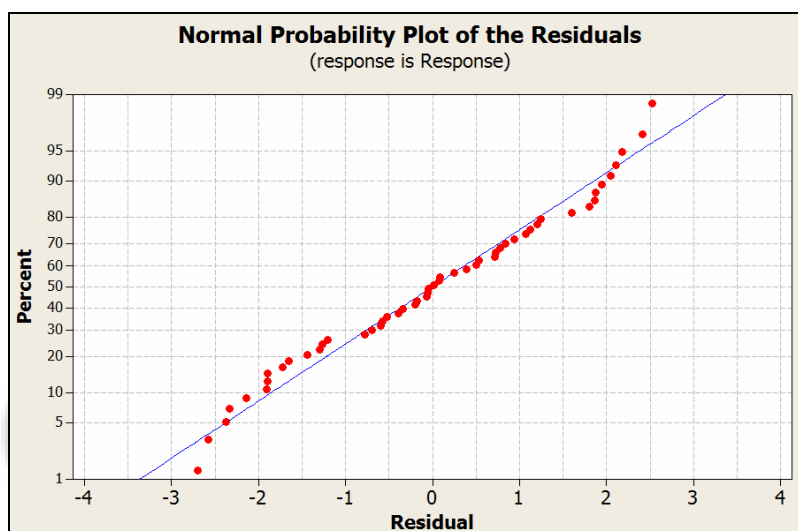
ผลิต ครั้งที่	ปัจจัยนำเข้า		ค่าความกลม (Roundness)			
	เวลาการอบ ชิ้นงาน	อุณหภูมิการ อบชิ้นงาน	Replicate 1	Replicate 2	Replicate 3	Replicate 4
1	7.5	270	31.82	30.75	31.34	29.18
2	8.5	270	30.71	29.62	28.27	31.02
3	7.5	290	28.78	27.23	29.46	26.67
4	8.5	290	25.69	27.49	24.16	26.39
5	7.292	280	29.24	30.82	29.53	28.48
6	8.707	280	25.59	23.08	22.91	22.45
7	8	265.857	34.82	32.83	30.29	31.22
8	8	294.142	31.37	30.64	29.17	30.51
9	8	280	22.58	19.75	20.01	21.25
10	8	280	19.23	22.41	18.63	20.54
11	8	280	21.06	18.19	20.92	22.64
12	8	280	18.15	21.73	19.83	20.35
13	8	280	20.46	23.06	19.32	20.47

6.3.2 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งผลการตรวจสอบสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 4-10 ถึงภาพประกอบ 4-15 โดยมีสมมติฐานว่า รูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองต้องเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ คือ ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

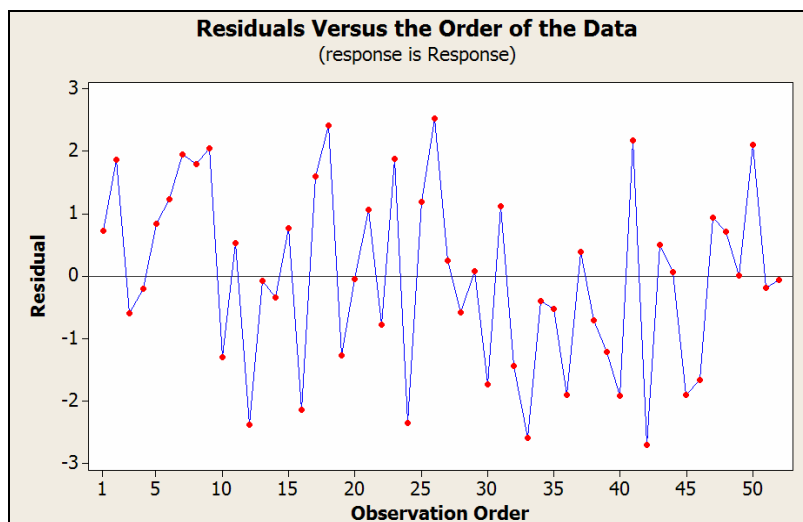
และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และ σ^2 มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ การตรวจสอบ ε_{ij} มี 4 ขั้นตอน

6.3.3 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) จากการพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ซึ่งใช้การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) โดยนำข้อมูลในตารางที่ 12 มาสร้างเป็นแผนภูมิดังภาพประกอบ 29 พบว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีการแจกแจงแบบปกติ



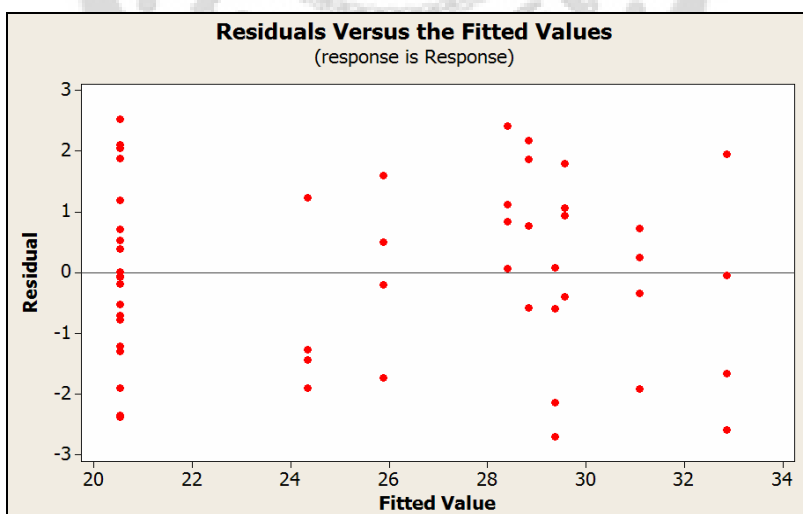
ภาพประกอบ 29 ผลลัพธ์การทดสอบสมมติฐานการกระจายแบบปกติ

6.3.4 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) สามารถพิจารณาจากการนำข้อมูลจากในตารางที่ 4-5 มาสร้างเป็นแผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ดังภาพประกอบ 29 เมื่อพิจารณาจากการกระจายของข้อมูลบนแผนภูมิพบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent)



ภาพประกอบ 30 ผลลัพธ์การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของข้อมูล

6.3.5 การตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 (Variance Stability) สามารถพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายดังภาพประกอบ 4-15 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Fitted Value พบว่า σ^2 ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่งและไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใดจึงสรุปว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



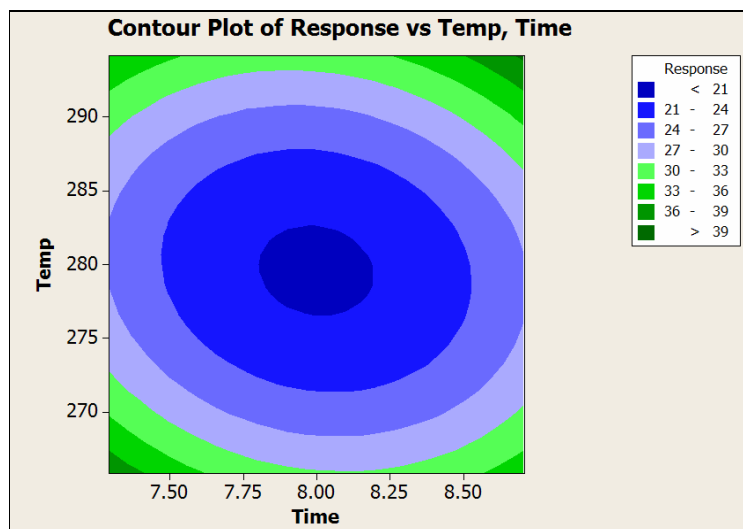
ภาพประกอบ 31 ผลลัพธ์การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล

ตาราง 19 แสดงการวิเคราะห์ผลการทดลองหาพื้นผิวตอบสนอง

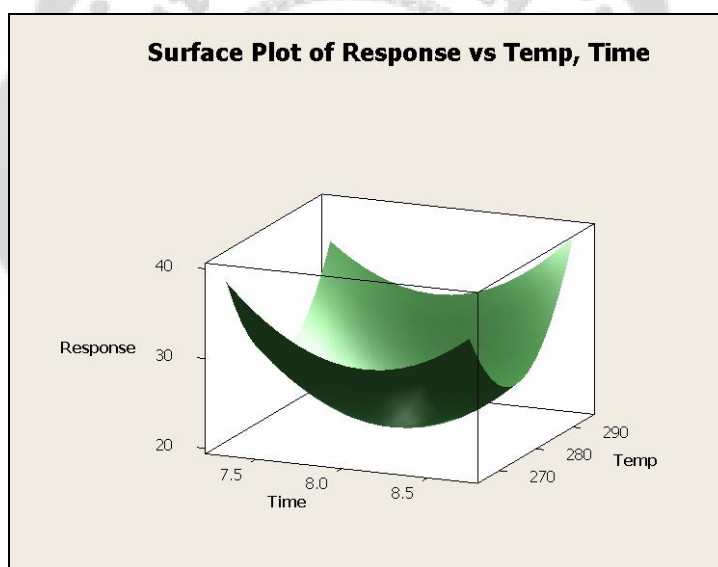
Response Surface Regression: Response versus Time, Temp						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	5258.52	280.734	18.731	0.000		
Time	-249.03	26.391	-9.436	0.000*		
Temp	-30.34	1.616	-18.775	0.000*		
Time*Time	12.55	1.080	11.624	0.000		
Temp*Temp	0.05	0.003	19.182	0.000		
Time*Temp	0.17	0.071	2.419	0.020*		
S = 1.424 R-Sq = 90.9% R-Sq(adj) = 89.9%						
Analysis of Variance for Response						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	935.15	935.15	187.031	92.20	0.000
Linear	2	5.19	734.96	367.478	181.15	0.000
Square	2	918.10	918.10	459.048	226.29	0.000
Interaction	1	11.87	11.87	11.868	5.85	0.020
Residual Error	46	93.32	93.32	2.029		
Lack-of-Fit	3	12.63	12.63	4.210	2.24	0.097
Pure Error	43	80.68	80.68	1.876		
Total	51	1028.47				

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

เมื่อใช้การประมวลผลในลักษณะของวิธีการปีนขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent) จะแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นโครงร่างและพื้นผิวตอบสนอง ดังภาพประกอบ 32 ถึง 33 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



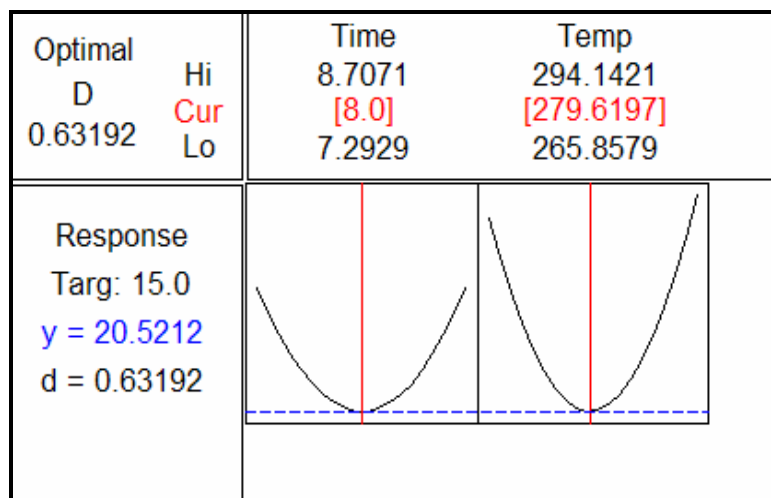
ภาพประกอบ 32 โครงร่างระหว่างปัจจัยอุณหภูมิการอบชิ้นงานและเวลาในการอบชิ้นงาน



ภาพประกอบ 33 พื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยอุณหภูมิการอบชิ้นงานและเวลาการอบชิ้นงาน

จากภาพประกอบ 32 และ 33 เป็นกราฟแสดงโครงร่าง และพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยอุณหภูมิการอบชิ้นงานและเวลาการอบชิ้นงานโดยคงที่อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานไว้ที่ระดับกลางคือ 62.48 มิลลิเมตร พบว่าค่าความกลมของชิ้นงานลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบชิ้นงานแวนอนสูงขึ้น ถ้าลดระดับอุณหภูมิการอบชิ้นงาน แวนอนต่ำลงค่าความกลมของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นและค่าความกลมจะลดลงเมื่อเพิ่มระดับปัจจัยเวลาการอบชิ้นงานอยู่ที่ระดับ 8 ชั่วโมง จากกราฟสรุปได้ว่าปัจจัย

อุณหภูมิการอบชิ้นงานควรอยู่ที่ระดับประมาณ 273-287 องศาเซลเซียส และปัจจัยเวลาการอบชิ้นงานควรอยู่ที่ระดับประมาณ 8.0-8.2 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 34 แสดงปัจจัยที่เหมาะสม

จากภาพประกอบ 34 พบว่า เพื่อให้ได้ค่าความกลมของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมที่สุด จะต้องกำหนดควบคุมปัจจัยในการผลิต คือ อุณหภูมิการอบชิ้นงานเท่ากับ 279.61 องศาเซลเซียส และเวลาการอบชิ้นงานเท่ากับ 8 ชั่วโมง

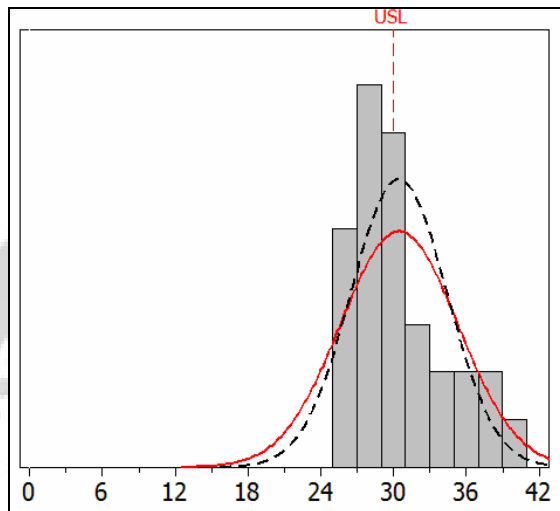
7. การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการผลิตกระบอกเลนส์ต้องกำหนดระดับปัจจัยการผลิตคือ อุณหภูมิการอบชิ้นงานเท่ากับ 279.61 องศาเซลเซียส และเวลาการอบชิ้นงานเท่ากับ 8 ชั่วโมง ผู้วิจัยจึงกำหนดระดับของปัจจัยตามผลการวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์เพื่อทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยทำการผลิตชิ้นงานทั้งหมด 30 ชิ้น จากนั้นนำมาวัดค่าความกลมโดยใช้เครื่อง Roundness Measuring Machine ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น RA-10

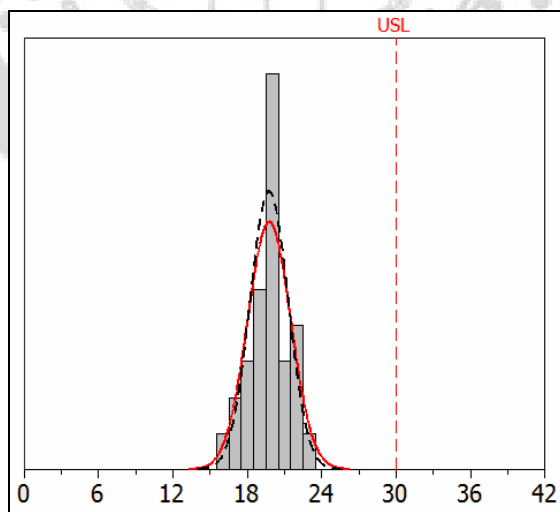
ตาราง 20 แสดงผลทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

ลำดับ ชั้นที่	ปัจจัยนำเข้า		ค่าความกลม (Roundness)
	เวลาการอบชิ้นงาน	อุณหภูมิการอบชิ้นงาน	
1	8	280	17.28
2	8	280	20.15
3	8	280	19.79
4	8	280	21.36
5	8	280	18.47
6	8	280	22.52
7	8	280	20.25
8	8	280	19.61
9	8	280	21.68
10	8	280	16.32
11	8	280	18.04
12	8	280	19.83
13	8	280	17.27
14	8	280	20.44
15	8	280	20.96
16	8	280	22.09
17	8	280	19.16
18	8	280	21.83
19	8	280	18.59
20	8	280	20.18
21	8	280	22.04
22	8	280	19.57
23	8	280	17.92
24	8	280	20.15
25	8	280	19.73
26	8	280	20.24
27	8	280	18.95
28	8	280	19.47
29	8	280	18.86
30	8	280	20.78

จากการทดสอบยืนยันผลการทดลองพบว่า ดัชนีศักยภาพความสามารถของกระบวนการ (Potential Process Capability Index; C_p) มีค่าเท่ากับ 2.88 และดัชนีความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Index; C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 1.96 แสดงว่าดัชนีความสามารถอยู่ในเกณฑ์ดีมาก ซึ่งข้อมูลก่อนการปรับปรุงดัชนีศักยภาพความสามารถของกระบวนการ (C_p) มีค่าเท่ากับ 1.03 และดัชนีความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ -0.03 ดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงความสามารถของกระบวนการก่อนปรับปรุง



ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงความสามารถของกระบวนการหลังปรับปรุง

8. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

จากข้อมูลการผลิตช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนกรกฎาคม พบของเสียจากการผลิตจำนวน 4,333 ชิ้น จากการผลิตทั้งหมด 19,695 ชิ้น คิดเป็น 22 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นมูลค่าการสูญเสียเท่ากับ 694,033 บาท ซึ่งคิดเป็นมูลค่าการสูญเสียเท่ากับ 138,806 บาทต่อเดือน

ภายหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิตในช่วงเดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคม 2554 สามารถแสดงข้อมูลการผลิตชิ้นงาน PT422-20 ในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2554 ถึง มกราคม 2555 ดังตาราง

ตาราง 21 แสดงจำนวนของเสียจากกระบวนการผลิตหลังปรับปรุง

เดือน	จำนวนที่ผลิต	จำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพ ประเภทค่าความกลม	เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้ คุณภาพ
พ.ย. 2554	4,013	7	0.17
ธ.ค. 2554	3,817	10	0.26
ม.ค. 2555	4,145	5	0.12

จากตาราง 21 พบว่า จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการจำนวน 22 ชิ้น จากการผลิตทั้งหมด 11,975 ชิ้น คิดเป็น 0.18 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นมูลค่าการสูญเสียเท่ากับ 3,523 บาท หรือคิดเป็นมูลค่าการสูญเสียเท่ากับ 1,174 บาทต่อเดือน

จากข้อมูลเบื้องต้นที่ได้กล่าวมา ส่งผลให้สามารถลดจำนวนของเสียลงได้ถึง 99.36% ของจำนวนของเสียทั้งหมด หรือลดมูลค่าของเสียลงได้เท่ากับ 137,632 บาทต่อเดือน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียเนื่องจากค่าความกลมของผลิตภัณฑ์ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด พร้อมทั้งหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดของเสียน้อยที่สุด เพื่อลดปริมาณของเสียและปรับปรุงคุณภาพชิ้นงาน โดยการประยุกต์ใช้หลักการและเทคนิคการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง ในการศึกษาถึงอิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อค่าความกลมของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์

ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานจากการวิเคราะห์ปัจจัยโดยการประยุกต์ใช้แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ได้ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อค่าความกลมทั้งหมด 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิการอบชิ้นงาน เวลาการอบชิ้นงานและขนาดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ซึ่งแต่ละปัจจัยอาจมีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์มากน้อยแตกต่างกัน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลโดยวิธีเพิ่มจุดกึ่งกลาง (2^k with center point) พร้อมดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองโดยกำหนดสภาวะการทดลองทั้งหมด 36 สภาวะการทดลอง ซึ่งผลการทดลองพบว่าปัจจัยทั้ง 3 คือ อุณหภูมิการอบ เวลาการอบ และขนาดอุปกรณ์จับยึดมีอิทธิพลต่อค่าความกลมและเมื่อพิจารณาส่วนโค้ง (Curvature) พบว่ามีลักษณะของส่วนโค้งจึงต้องดำเนินการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design เข้ามาวิเคราะห์หาระดับของปัจจัย

ประยุกต์ใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง จากการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์ โดยการทดลองจะกำหนดขนาดอุปกรณ์จับยึดคงที่เท่ากับ 62.48 มิลลิเมตร เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องจักรทำให้ไม่สามารถปรับระดับปัจจัยได้อีก จากการทดลองพบว่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์คือ อุณหภูมิการอบอยู่ที่ระดับ 273 – 287 องศาเซลเซียสและเวลาการอบชิ้นงานอยู่ที่ระดับ 8.0 - 8.2 ชั่วโมง เมื่อทราบระดับของปัจจัยที่เหมาะสมแล้วจึงใช้ Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าของสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์

จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียเนื่องจากค่าความกลมของผลิตภัณฑ์ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด คือ อุณหภูมิการอบชิ้นงาน เวลาการอบชิ้นงาน ซึ่งหลังจากการวิเคราะห์ถึงปัจจัยของสาเหตุและใช้ Response Optimizer ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระบอกเลนส์พบว่าปัจจัยอุณหภูมิการอบชิ้นงานที่เหมาะสมคือ 279.6 องศาเซลเซียสและปัจจัยเวลาการอบชิ้นงานที่เหมาะสมคือ 8 ชั่วโมง โดยกำหนดขนาดอุปกรณ์จับยึด (Jig Fixture) เท่ากับ 62.48 มิลลิเมตร

การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองจำนวน 30 ชิ้นพบค่าความกลมของชิ้นงานค่าน้อยที่สุดคือ 16.32 ไมครอน และค่าความกลมของชิ้นงานมากที่สุดคือ 22.52 ไมครอน และดัชนีศักยภาพความสามารถของกระบวนการ (Potential Process Capability Index; C_p) มีค่าเท่ากับ 2.88 และดัชนีความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Index; C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 1.96 แสดงว่าดัชนีความสามารถอยู่ในเกณฑ์ดีมาก ซึ่งข้อมูลก่อนการปรับปรุงดัชนีศักยภาพความสามารถของกระบวนการ (C_p) มีค่าเท่ากับ 1.03 และดัชนีความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ -0.03

จากข้อมูลการผลิตช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนกรกฎาคม พบของเสียจากการผลิตจำนวน 4,333 ชิ้น จากการผลิตทั้งหมด 19,695 ชิ้น คิดเป็น 22 เปอร์เซ็นต์ และหากคิดเป็นมูลค่าความสูญเสียเท่ากับ 694,033 บาท ซึ่งคิดเป็นมูลค่าการสูญเสียเท่ากับ 138,806 บาทต่อเดือนและภายหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิตในช่วงเดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคม 2554 ส่งผลให้จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการมีจำนวน 22 ชิ้น จากการผลิตทั้งหมด 11,975 ชิ้น คิดเป็น 0.18 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นมูลค่าการสูญเสียเท่ากับ 3,523 บาท หรือคิดเป็นมูลค่าการสูญเสียเท่ากับ 1,174 บาทต่อเดือน จากข้อมูลเบื้องต้นที่ได้กล่าวมาส่งผลให้สามารถลดจำนวนของเสียลงได้ถึง 99.36% ของจำนวนของเสียทั้งหมด หรือลดมูลค่าของเสียลงได้เท่ากับ 137,632 บาทต่อเดือน

2. ข้อดีและข้อเสียในการดำเนินงานแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง

2.1 ข้อดี

1. การออกแบบการทดลองเป็นการหาข้อสรุปของปัญหาอย่างสมเหตุสมผล
2. การออกแบบการทดลองให้ผลของความแม่นยำ และความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการ
3. การออกแบบการทดลอง สามารถที่จะประมาณอิทธิพลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของหลายปัจจัยพร้อมกันได้
4. การออกแบบการทดลอง ทำให้เกิดความรวดเร็วในการดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหา

2.2 ข้อเสีย

1. เนื่องจากการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง จำเป็นต้องใช้หลักการทางสถิติ ดังนั้นในการนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้จึงเหมาะสำหรับองค์กรที่บุคลากรมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทางสถิติเบื้องต้น เพื่อที่จะสามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

3. ปัญหาและอุปสรรคในงานวิจัย

3.1 การทดลองมีต้นทุนค่อนข้างสูง

3.2 เครื่องมือวัดไม่เพียงพอต่อการทดลองทำให้การทดลองล่าช้า

4. ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้

การกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลอง จะกำหนดเพียง 2 ระดับ ในการเริ่มต้นวิจัย เนื่องจากหากมีการกำหนดระดับปัจจัยหลายๆ ระดับในการทดลองจะเกิดความยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายในการทดลองค่อนข้างสูง เพราะในการเปลี่ยนระดับปัจจัยในการทดลองแต่ละครั้งต้องเสียเวลาและอาจมีผลกระทบต่อกระบวนการอื่นๆ ของโรงงานกรณีศึกษา

5. ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะกระบวนการผลิตกระบอกเลนส์ซึ่งเป็นกระบวนการกลึงขึ้นรูป แต่ทางโรงงานที่ทำการศึกษายังมีผลิตภัณฑ์อื่นๆ อีก เช่น ผลิตภัณฑ์ฉีดพลาสติก ผลิตภัณฑ์พ่นสี เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ยังคงมีของเสียเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน ดังนั้นควรที่จะขยายผลการวิจัยไปยังผลิตภัณฑ์เหล่านี้ด้วย



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- ปารเมศ ชูติมา. (2545). *การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มานพ ตันตระกูล. (2537). *วัสดุวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- วิวัฒน์ มณีกองกล้า. (2552). *การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดความกลมแบบกึ่งอัตโนมัติโดยการประยุกต์จากเครื่องมือวัดโดยใช้ลม*. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมการผลิต). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ถ่ายเอกสาร.
- ชูติมา ราชพิทักษ์. (2552). *การลดของเสียจากกระบวนการผลิตแบบแมชชีนนิ่งโดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองกรณีศึกษาอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์*. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ถ่ายเอกสาร.
- โสภิตา ท้วมมี. (2551). *การลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองกรณีศึกษาในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก*. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ถ่ายเอกสาร.
- Montgomery, D.C. (2004). *Design and analysis of experiments*, John Wiley & Sons, INC., The United State of America
- S.Y.Hsu. (2003). *Effect of water flow rate, salt concentration and water temperature on efficiency of an electrolyzed oxidizing water generator*, Journal of Food Engineering.
- YueYu Ma, Henry Hu; et al. (2007). *Optimization of the electrolytic plasma oxidation processes for corrosion protection of magnesium alloy AM50 using the Taguchi method*, Journal of Materials Processing Technology.
- Yung-Kuang Yang. (2008). *Optimization of dry machining parameters for high-purity graphite in end milling process via design of experiments methods*, Journal of Materials Processing Technology.
- Y. Sahin. (2008). *Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool*, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials.





ตาราง 22 ข้อมูลของเสียแยกตามประเภทอาการของโมเดล PT422-20

ปัญหา	มี.ค. 2554	เม.ย. 2554	พ.ค. 2554	มิ.ย. 2554	ก.ค. 2554	รวม
Roundness NG	584	902	623	605	1,619	4,333
Dent		553	22	1	837	1,413
Diameter over limit	386	60	82	16	312	856
Dimension lower limit	40		104	16	305	465
Roughness NG		40	64	17	338	459
Screw NG	189	28	2			212
Dimension over limit	20	20	4	23	122	189
Run out over limit		40		49	36	125
Burr			16	11	61	88
Diameter lower limit				64		64
รวม	1,219	1,643	917	802	3,630	8,211



ตาราง 23 ข้อมูลค่าความกลมก่อนการปรับปรุง

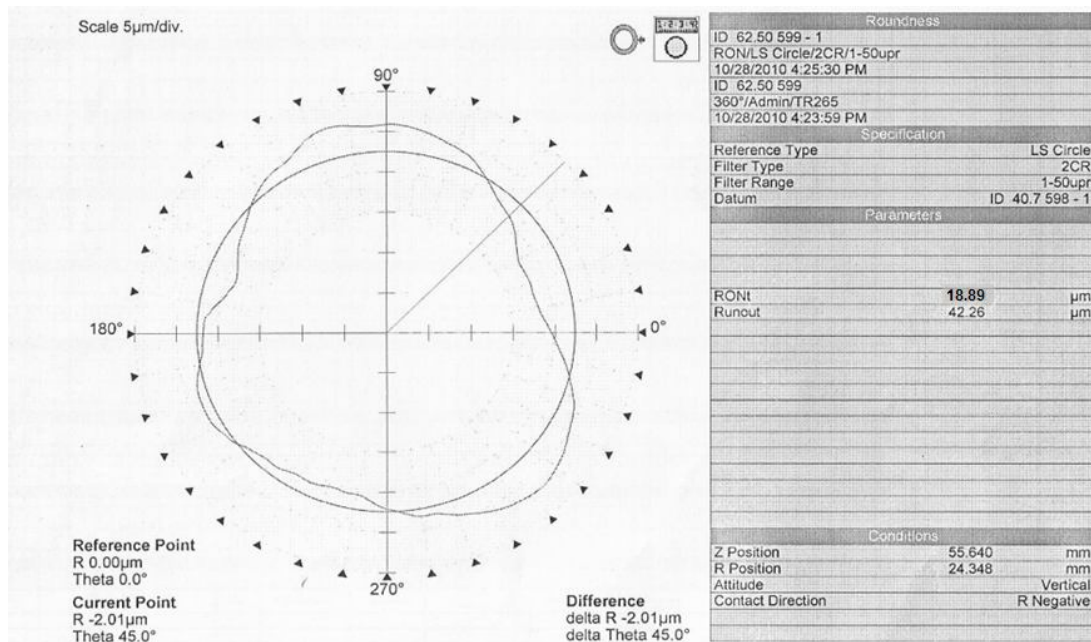
ชั้นงานที่	ค่าความกลม	วันที่ตรวจวัด	ผู้ตรวจวัด
1	29.56	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
2	34.50	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
3	27.78	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
4	40.26	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
5	28.17	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
6	29.09	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
7	38.72	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
8	27.89	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
9	29.58	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
10	36.61	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
11	29.23	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
12	27.04	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
13	26.80	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
14	31.22	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
15	28.26	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
16	26.33	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
17	29.37	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
18	35.34	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
19	28.15	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
20	33.88	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
21	26.80	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
22	28.98	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
23	32.02	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
24	29.19	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
25	25.84	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
26	37.81	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
27	26.89	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
28	31.52	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
29	27.87	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์
30	29.33	5 มี.ค. 2554	อาทิตย์

ตาราง 24 ข้อมูลค่าความกลมหลังการปรับปรุง

ชั้นงานที่	ค่าความกลม	วันที่ตรวจวัด	ผู้ตรวจวัด
1	17.28	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
2	20.15	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
3	19.79	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
4	21.36	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
5	18.47	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
6	22.52	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
7	20.25	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
8	19.61	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
9	21.68	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
10	16.32	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
11	18.04	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
12	19.83	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
13	17.27	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
14	20.44	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
15	20.96	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
16	22.09	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
17	19.16	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
18	21.83	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
19	18.59	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
20	20.18	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
21	22.04	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
22	19.57	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
23	17.92	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
24	20.15	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
25	19.73	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
26	20.24	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
27	18.95	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
28	19.47	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
29	18.86	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์
30	20.78	28 ก.ย. 2554	อาทิตย์



ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการแสดงผลการวัดค่าความกลม

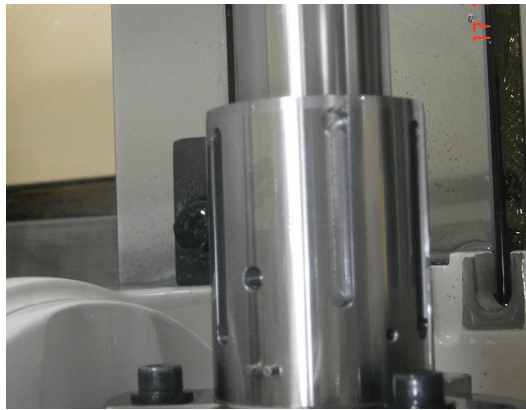


ภาพประกอบ 37 แสดงผลการวัดค่าความกลม



ภาคผนวก ก

ภาพเครื่องมือและอุปกรณ์



ภาพประกอบ 38 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน



ภาพประกอบ 39 ตู้ปฏิบัติงาน



ภาพประกอบ 40 เครื่องวัดค่าความกลม



ภาคผนวก จ

ข้อมูลการประมวลผลจากการทดลอง

ตาราง 25 บันทึกการสำรวจความถี่ในการเกิดสาเหตุของลักษณะบกพร่อง

ลำดับ ที่	รายละเอียดข้อผิดพลาด	จำนวนครั้งที่ทำ การทดสอบ	จำนวนครั้งที่เกิด ข้อบกพร่อง
1	อบชิ้นงานด้วยอุณหภูมิต่ำหรือสูงเกินไป	30 ชิ้น	9 ชิ้น
2	อบชิ้นงานด้วยเวลาที่ต่ำหรือสูงเกินไป	30 ชิ้น	7 ชิ้น
3	ขนาดอุปกรณ์จับยึดใหญ่หรือเล็กเกินไป	30 ชิ้น	6 ชิ้น
4	ชิ้นงานเกิดกระแทกกันระหว่างขนส่ง	467 ชิ้น	1 ชิ้น
5	ความเร็วรอบการตัดมากเกินไป	30 ชิ้น	1 ชิ้น
6	ใบมีดตัดสึก	30 ชิ้น	1 ชิ้น
7	การถอดใส่ชิ้นงาน	467 ชิ้น	1 ชิ้น
8	ชิ้นงานร่วน	467 ชิ้น	0 ชิ้น
9	วัตถุดิบไม่ได้อบ	30 ชิ้น	ผลิตภัณฑ์แตก
10	วัตถุดิบเปียก	30 ชิ้น	ผลิตภัณฑ์เข้า อุปกรณ์จับยึด ไม่ได้

ตาราง 26 แสดงผลการทดลองแบบสองระดับโดยเพิ่มจุดกึ่งกลาง

ผลิต ครั้งที่	ปัจจัยนำเข้า			ค่าความกลม			
	เวลาการ อบ ชิ้นงาน	อุณหภูมิ การอบ ชิ้นงาน	ขนาด อุปกรณ์ จับยึด ชิ้นงาน	Replicate 1	Replicate 2	Replicate 3	Replicate 4
1	7.5	270	62.47	31.63	32.48	30.12	33.47
2	8.5	270	62.47	30.02	29.14	29.02	32.18
3	7.5	290	62.47	28.58	27.21	28.18	31.25
4	8.5	290	62.47	28.53	26.16	25.73	29.39
5	7.5	270	62.49	32.94	33.75	30.16	34.94
6	8.5	270	62.49	31.43	30.37	29.87	33.23
7	7.5	290	62.49	31.21	30.52	29.73	32.37
8	8.5	290	62.49	30.19	28.93	27.47	31.64
9	8	280	62.48	20.46	21.54	22.81	22.79

ตาราง 27 แสดงผลการทดลองแบบ Central Composite Design

ผลิต ครั้งที่	ปัจจัยนำเข้า		ค่าความกลม (Roundness)			
	เวลาการอบ ชิ้นงาน	อุณหภูมิการ อบชิ้นงาน	Replicate 1	Replicate 2	Replicate 3	Replicate 4
1	7.5	270	31.82	30.75	31.34	29.18
2	8.5	270	30.71	29.62	28.27	31.02
3	7.5	290	28.78	27.23	29.46	26.67
4	8.5	290	25.69	27.49	24.16	26.39
5	7.292	280	29.24	30.82	29.53	28.48
6	8.707	280	25.59	23.08	22.91	22.45
7	8	265.857	34.82	32.83	30.29	31.22
8	8	294.142	31.37	30.64	29.17	30.51
9	8	280	22.58	19.75	20.01	21.25
10	8	280	19.23	22.41	18.63	20.54
11	8	280	21.06	18.19	20.92	22.64
12	8	280	18.15	21.73	19.83	20.35
13	8	280	20.46	23.06	19.32	20.47

ตาราง 28 แสดงผลการวิเคราะห์ระบบการวัด

Gage R&R Study - ANOVA Method**Two-Way ANOVA Table With Interaction**

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	236.219	26.2466	1751.68	0.000
Operator	1	0.038	0.0378	2.52	0.147
Part * Operator	9	0.135	0.0150	0.88	0.559
Repeatability	20	0.341	0.0171		
Total	39	236.733			

Two-Way ANOVA Table Without Interaction

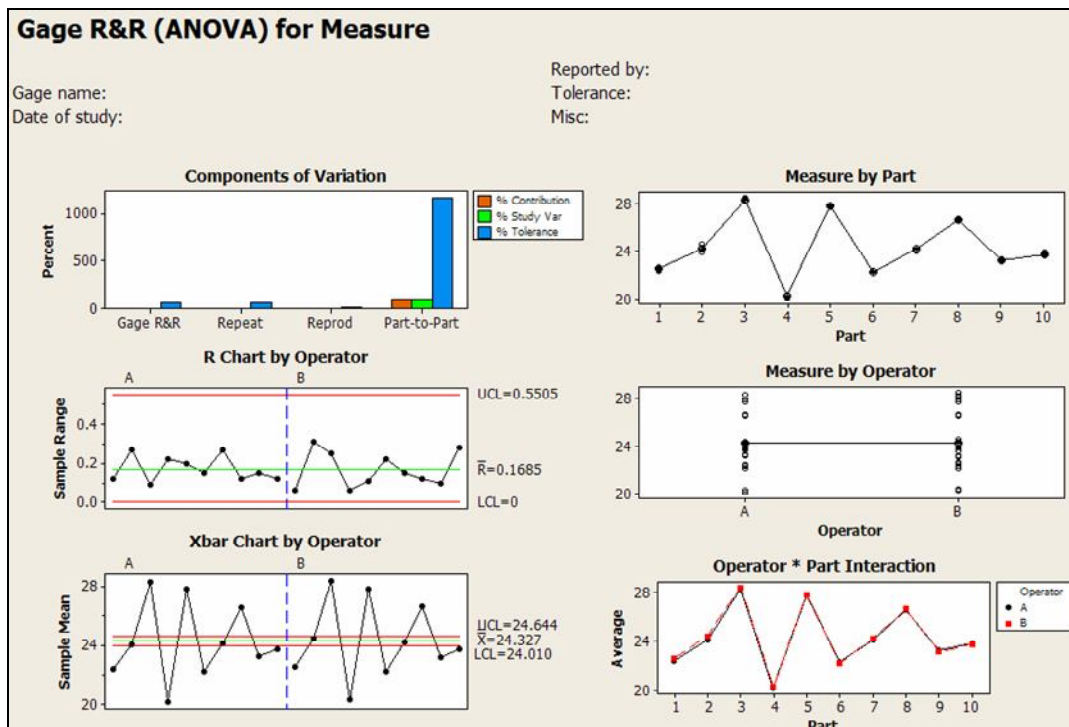
Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	236.219	26.2466	1599.38	0.000
Operator	1	0.038	0.0378	2.30	0.140
Repeatability	29	0.476	0.0164		
Total	39	236.733			

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.01748	0.27
Repeatability	0.01641	0.25
Reproducibility	0.00107	0.02
Operator	0.00107	0.02
Part-To-Part	6.55754	99.73
Total Variation	6.57502	100.00

Source	StdDev (SD)	Study Var (4.56 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0.13222	0.6029	5.16	60.29
Repeatability	0.12810	0.5842	5.00	58.42
Reproducibility	0.03272	0.1492	1.28	14.92
Operator	0.03272	0.1492	1.28	14.92
Part-To-Part	2.56077	11.6771	99.87	1167.71
Total Variation	2.56418	11.6927	100.00	1169.27

Number of Distinct Categories = 27



ภาพประกอบ 41 แสดงผลการวิเคราะห์ระบบการวัด

ตาราง 29 แสดงการประมวลผล 2^k แฟคทอเรียล โดยวิธีเพิ่มจุดกึ่งกลาง

Full Factorial Design

Factors: 3 Base Design: 3, 8
 Runs: 36 Replicates: 4
 Blocks: 1 Center pts (total): 4

All terms are free from aliasing.

Factorial Fit: Response versus Time, Temp, Diameter

Estimated Effects and Coefficients for Response (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		28.093	0.2824	99.48	0.000
Time	2.075	1.038	0.2824	3.67	0.001
Temp	1.771	0.886	0.2824	3.14	0.004
Diameter	-1.634	-0.817	0.2824	-2.89	0.007
Time*Temp	1.645	0.823	0.2824	2.91	0.007
Time*Diameter	0.150	0.075	0.2824	0.27	0.793
Temp*Diameter	-0.704	-0.352	0.2824	-1.25	0.223
Time*Temp*Diameter	0.120	0.060	0.2824	0.21	0.833
Ct Pt		-6.943	0.8472	-8.20	0.000

S = 1.59747 R-Sq = 80.15% R-Sq(adj) = 74.27%

Analysis of Variance for Response (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	80.897	80.897	26.966	10.57	0.000
2-Way Interactions	3	25.790	25.790	8.597	3.37	0.033
3-Way Interactions	1	0.115	0.115	0.115	0.05	0.833
Curvature	1	171.403	171.403	171.403	67.17	0.000
Residual Error	27	68.902	68.902	2.552		
Pure Error	27	68.902	68.902	2.552		
Total	35	347.107				

ตาราง 31 แสดงการประมวลผล Central Composite Design

Central Composite Design

Factors: 2 Replicates: 4
 Base runs: 13 Total runs: 52
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Two-level factorial: Full factorial

Cube points: 16
 Center points in cube: 20
 Axial points: 16
 Center points in axial: 0

Alpha: 1.41421

Response Surface Regression: Response versus Time, Temp

The analysis was done using uncoded units.

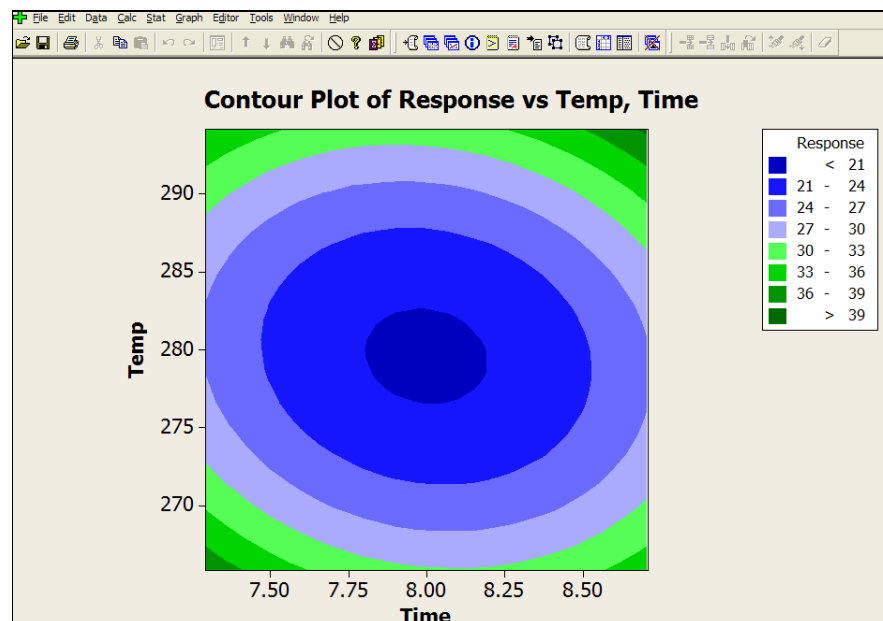
Estimated Regression Coefficients for Response

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	5258.52	280.734	18.731	0.000
Time	-249.03	26.391	-9.436	0.000
Temp	-30.34	1.616	-18.775	0.000
Time*Time	12.55	1.080	11.624	0.000
Temp*Temp	0.05	0.003	19.182	0.000
Time*Temp	0.17	0.071	2.419	0.020

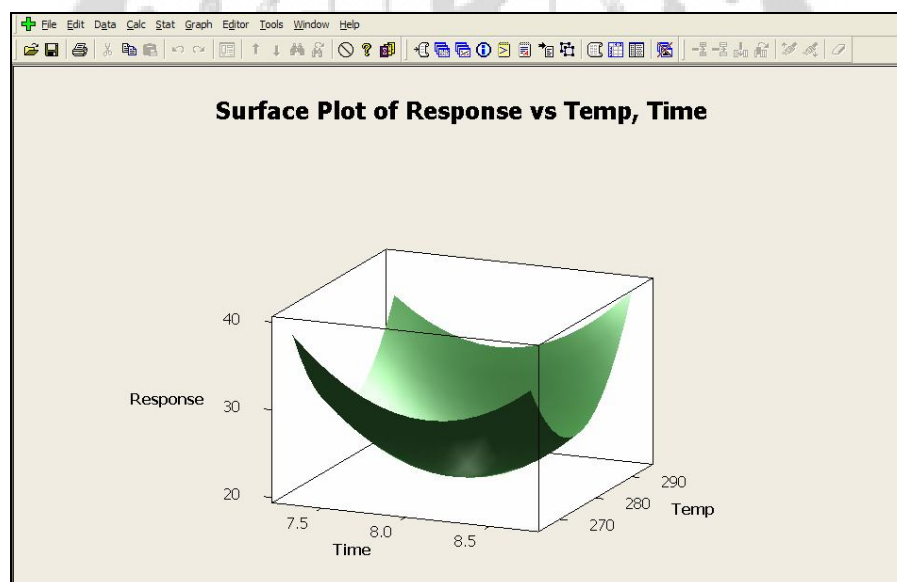
S = 1.424 R-Sq = 90.9% R-Sq(adj) = 89.9%

Analysis of Variance for Response

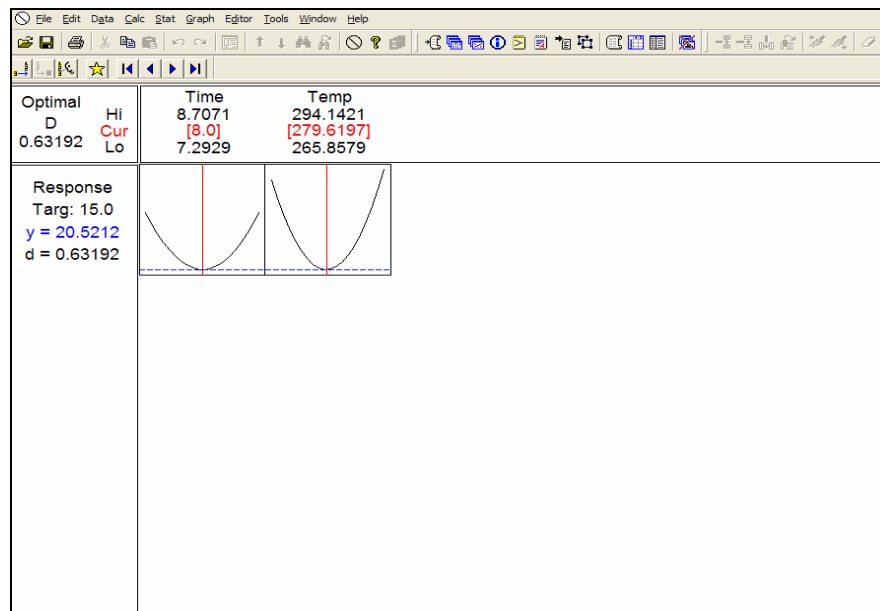
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	935.15	935.15	187.031	92.20	0.000
Linear	2	5.19	734.96	367.478	181.15	0.000
Square	2	918.10	918.10	459.048	226.29	0.000
Interaction	1	11.87	11.87	11.868	5.85	0.020
Residual Error	46	93.32	93.32	2.029		
Lack-of-Fit	3	12.63	12.63	4.210	2.24	0.097
Pure Error	43	80.68	80.68	1.876		
Total	51	1028.47				



ภาพประกอบ 42 แสดงผลกราฟโครงร่าง (Contour plot)



ภาพประกอบ 43 แสดงผลพื้นผิวตอบสนอง



ภาพประกอบ 44 แสดงผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม



ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นาย อาทิตย์ นุ่มหันธ์
วันเดือนปีเกิด	5 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2527
สถานที่เกิด	สุพรรณบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	68 ม.1 ต.หนองสาหร่าย อ.ดอนเจดีย์ จ.สุพรรณบุรี 72170
ตำแหน่งหน้าที่การงานในปัจจุบัน	วิศวกรแผนกประกันคุณภาพ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท นิคอน ประเทศไทย จำกัด
ประวัติการศึกษา	

พ.ศ.2546

มัธยมศึกษาตอนปลาย

จาก โรงเรียนบรรหารแจ่มใสวิทยา 1

พ.ศ.2550

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

จาก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ.2555

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการทางวิศวกรรม

จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

