

การออกแบบกระบวนการขึ้นรูปเย็นสำหรับท่อแรงดันสูง



นางสาวสาวิตรี ผาบัจันดา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COLD FORMING PROCESS DESIGN FOR HIGH PRESSURE TUBES

Miss Sawitri Phabjanda



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบกระบวนการขึ้นรูปเยื่อสำหรับท่อแรงดันสูง

โดย

นางสาวสาวิตรี ผาบจันดา

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพ็ชร์)

5670974721 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: FLOW FORMING / SIX SIGMA / HIGH PRESSURE TUBES

SAWITRI PHABJANDA: COLD FORMING PROCESS DESIGN FOR HIGH PRESSURE TUBES. ADVISOR: ASST. PROF. SOMCHAI PUAJINDANETR, Ph.D., 140 pp.

The objective of this research is to study parameters of the flow forming process such as spindle speed of mandrel, feed rate of roller, and die distance. Higher precision of these parameters at the final pass are investigated since they directly affect the quality of a high pressure tube production. The acceptable dimensions are a 120.65 ± 0.25 mm of outside tube diameter and a 2.75 ± 0.2 mm of thickness. Firstly, the AISI4130 steel tube starts with 145 ± 1 mm of outside diameter and 115.1 ± 0.1 mm of internal diameter. After the second pass of the flow forming process, the tube dimension reduces to 125.60 ± 0.1 mm while keeping the internal diameter fixed. Furthermore, the flow forming process parameters are examined by varying spindle speed (using 60, 90, 120, and 130 rpm), feed rate (using 30, 40, 60, 80, and 90 mm/min.), and die distance (among 1.7, 1.85, and 2 mm). Lastly, the final product dimension without any defect is measured and analyzed.

When spinning more than 120 rpm, the mandrel is vibrating and causes a wave-like pattern on product surface. The diametral growth is occurred when the feed rate is lower than 40 mm/min. For the feed rate of values higher than 80 mm/min, the tube surface results in wave-like defects or unevenness. The experimental and analytical results indicate that the optimum process parameters producing acceptable dimension characteristics and surface quality are a 120 rpm of spindle speed, a 63 mm/min of feed rate, and 1.75 mm of die distance. As a result, the process capability of an outside diameter is improved with increasing C_p values from 0.57 to 2.44 and C_{pk} values from 0.36 to 2.31. The process capability of thickness show similar improvement when C_p and C_{pk} values increase from 0.74 to 3.36 and from 0.61 to 3.11, respectively.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก รศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ซึ่งเป็นผู้ที่กรุณาให้คำปรึกษาตลอดเวลาที่ข้าพเจ้าทำการวิจัย ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกๆ ท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำข้อคิดเห็นในการทำวิจัย ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของเนื้อหาการวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ ฟังจินตนา และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาการศึกษาในที่แห่งนี้

ขอขอบคุณบริษัท น.ท.สีธา สายดาราสุมุทร ร.น. และเพื่อนๆ พี่ น้อง ๆ ทุกคนทั้งในบริษัท และส่วนงานวิศวกรรมโลหการและวัสดุ สำหรับความห่วงใย กำลังใจและการให้ความสนับสนุนตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาและการทำงานวิทยานิพนธ์ในระดับบัณฑิตศึกษา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ตลอดจนกระทั่งข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษาด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	12
สารบัญรูป.....	14
บทที่ 1.....	18
บทนำ.....	18
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	18
1.2 กระบวนการผลิต.....	19
1.3 การศึกษาสภาพปัญหาในปัจจุบัน.....	22
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	24
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	24
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	24
1.7 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	25
บทที่ 2.....	26
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
2.1 การขึ้นรูปวัสดุ.....	26
2.1.1 ประเภทของการขึ้นรูปโลหะ.....	26
2.1.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุ.....	28
2.1.3 การเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากความเครียด (Strain Hardening).....	29
2.2 การขึ้นรูปท่อแรงดันสูงด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น.....	31

2.2.1 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปท่อแรงดันสูง	32
2.2.2 การขึ้นรูปด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น	33
2.2.3 เครื่องมือเครื่องจักร	35
2.2.4 การเตรียมชิ้นงานก่อนกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น (Preform)	36
2.3 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ	38
2.3.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)	38
2.3.2 ขั้นตอนสำหรับการออกแบบการทดลอง	38
2.3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA).....	39
2.3.4 ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ	42
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
2.4.1 ผลกระทบจากกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment).....	44
2.4.2 ผลกระทบจากปัจจัยควบคุมของกระบวนการ.....	44
บทที่ 3	47
การนิยามปัญหา	47
3.1 นิยามศัพท์	47
3.2 การกำหนดทีมงานดำเนินงาน	48
3.3 การคัดเลือกปัจจัยและระดับที่จะทำการศึกษา.....	48
3.3.1 การคัดเลือกปัจจัย (Factor)	48
3.3.2 การเลือกระดับ (Level).....	58
3.3.3 การกำหนดปัจจัยสำหรับการรีดขึ้นงานในรอบที่ 1 และ 2.....	60
บทที่ 4	63
วิธีดำเนินการทดลอง	63
4.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	63

4.1.1 ขนาดชิ้นงานหลังผ่านการรีดรอบที่ 2.....	63
4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	63
4.2 วิธีการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน.....	65
4.2.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	65
4.2.2 การวัดค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงาน.....	65
4.2.3 การวัดความหนาของชิ้นงาน.....	65
4.2.4 การหาค่าการขยายตัวของวัสดุ (Spring back; Sb).....	65
4.3 วิธีการทดลอง.....	66
4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ.....	66
4.4.1 การประเมินความสามารถของกระบวนการ.....	68
4.4.2 การเลือกขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม (Sample size) หรือจำนวนทำซ้ำ (Replicates).....	69
4.4.3 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ.....	71
4.4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	71
4.4.5 การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการด้วยเทคนิคขั้นสูงและมีความซับซ้อน (Response Surface Methodology: RSM).....	72
การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการด้วยเทคนิคขั้นสูงและมีความซับซ้อน.....	72
4.4.6 การทดสอบยืนยันผล และติดตามควบคุม.....	72
4.4.7 แผนการออกแบบการทดลอง.....	72
บทที่ 5.....	74
การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	74
5.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคก่อนการรีด.....	74
5.2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของท่อก่อนปรับปรุง.....	74
5.2.1 วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุง.....	74

5.2.2 วิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพความหนาต่อก่อนปรับปรุง	77
ตารางที่ 16 ผลการทดลองรีดเพื่อศึกษาผลกระทบจากปัจจัยศึกษา.....	77
5.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกก่อนปรับปรุง	84
5.3.1 วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุง.....	84
5.3.2 วิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อก่อนปรับปรุง.....	86
5.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระยะขยายของวัสดุหลังรีด	92
5.4.1 ระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อระยะขยายตัวของวัสดุหลังรีด.....	92
5.5 การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการรีดขึ้นรอบที่ 3	98
5.5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	100
5.6 การตรวจสอบระยะขยายของวัสดุในแต่ละรอบการรีด (Spring back).....	113
5.8 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกล.....	115
บทที่ 6	117
การทดสอบยืนยันผล และการตรวจติดตามควบคุม.....	117
6.1 การทดสอบยืนยันผล.....	117
6.1.1 ขั้นตอนในการทดลอง	117
6.2 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	118
6.3 แผนการควบคุมกระบวนการรีดขึ้นรูปเย็น	121
6.3.1 มาตรฐานการทำงานสำหรับการรีดขึ้นรูปเย็นท่อแรงดันสูง	121
6.3.2 การตรวจเช็คขนาดของท่อหลังจากจบกระบวนการรีดแต่ละรอบ	123
6.3.3 การปรับเทียบเครื่องจักร.....	124
บทที่ 7	126
บทสรุปและข้อเสนอแนะ	126

7.1 สรุปผลการทดลอง	126
7.2 ข้อเสนอแนะ	127
7.3 ข้อจำกัดของการทดลอง.....	128
รายการอ้างอิง	129
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	140



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	ข้อบกพร่องที่เกิดระหว่างการผลิตในปี 2557 (จำนวนข้อบกพร่อง $n = 8$).....	23
ตารางที่ 2	คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้กับอากาศยาน.....	32
ตารางที่ 3	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 4130 (ASTM International, 2012).....	33
ตารางที่ 4	คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า AISI 4130.....	33
ตารางที่ 5	แนวทางการควบคุมปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องในการทดลอง.....	51
ตารางที่ 6	ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง.....	55
ตารางที่ 7	ผลความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผลของข้อบกพร่องในแต่ละรอบการรีด.....	56
ตารางที่ 8	การควบคุมข้อบกพร่องในการรีดท่อแรงดันสูงแต่ละรอบการรีด.....	57
ตารางที่ 9	ผลการทดสอบหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการรีดรอบที่ 1.....	61
ตารางที่ 10	ผลการวัดค่าชิ้นงานหลังจบกระบวนการรีดท่อรอบที่ 1.....	61
ตารางที่ 11	ผลการทดสอบหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการรีดรอบที่ 2.....	62
ตารางที่ 12	การออกแบบโปรแกรมการรีดในแต่ละรอบของการทดลอง.....	62
ตารางที่ 13	วิธีการทดลองปัจจัยที่เหมาะสมต่อขนาดของชิ้นงานหลังจบการรีดรอบที่ 3.....	66
ตารางที่ 14	กรอบโต้ตอบของการหาจำนวนซ้ำของการทดลอง.....	70
ตารางที่ 15	ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงในส่วนของความหนา.....	75
ตารางที่ 16	ผลการทดลองรีดเพื่อศึกษาผลกระทบจากปัจจัยศึกษา.....	77
ตารางที่ 17	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของความแปรปรวนขั้นต้นของความหนาท่อ.....	79
ตารางที่ 18	ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงเส้นผ่าศูนย์กลางท่อด้านนอก.....	84
ตารางที่ 19	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของความแปรปรวนขั้นต้นของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ.....	87
ตารางที่ 20	ผลการวิเคราะห์ ANOVA หาความแปรปรวนขั้นต้นของค่า Spring back.....	93
ตารางที่ 21	รายละเอียดการออกแบบโดยใช้โปรแกรมมินิแท็บ.....	99

ตารางที่ 22 ลำดับการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน	99
ตารางที่ 23 ลำดับการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (ต่อ)	100
ตารางที่ 24 การวิเคราะห์ ANOVA หาผล Response surface regression ของ เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ.....	106
ตารางที่ 25 การวิเคราะห์ ANOVA หาสมการตัวแบบถดถอยของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ	107
ตารางที่ 26 การวิเคราะห์ ANOVA หาผล Response surface regression ของความหนาท่อ	108
ตารางที่ 27 การวิเคราะห์ ANOVA หาสมการตัวแบบถดถอยของความหนาท่อ	109
ตารางที่ 28 การวิเคราะห์ ANOVA หาผล Response surface regression ของระยะขยายของ วัสดุ.....	110
ตารางที่ 29 การวิเคราะห์ ANOVA หาสมการตัวแบบถดถอยของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ	111
ตารางที่ 30 ผลการหาค่าตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimization)	112
ตารางที่ 31 ข้อมูลเปรียบเทียบระยะขยายของวัสดุแต่ละรอบการรีด	113
ตารางที่ 32 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของท่อหลังจบการรีดแต่ละรอบ	115
ตารางที่ 33 ระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่จะทำการปรับปรุง	117
ตารางที่ 34 การออกแบบโปรแกรมการรีดในแต่ละรอบของการทดลอง.....	118
ตารางที่ 35 ความสามารถของกระบวนการหลังปรับปรุงในส่วนของความหนา	118
ตารางที่ 36 ความสามารถของกระบวนการหลังปรับปรุงในส่วนของความหนา	120
ตารางที่ 37 มาตรฐานการทำงานสำหรับการรีดขึ้นรูปเย็นท่อแรงดันสูง.....	122
ตารางที่ 38 ค่าสำหรับการตรวจสอบท่อหลังจากรีดจบในแต่ละรอบการรีด.....	123
ตารางที่ 39 ใบตรวจสอบชิ้นงานหลังการรีดจบแต่ละรอบ	123
ตารางที่ 40 ใบตรวจสอบสำหรับเครื่อง Flow forming	125

สารบัญรูป

รูปที่ 1	กระบวนการผลิตท่อแรงดันสูง.....	19
รูปที่ 2	กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง Flow forming.....	21
รูปที่ 3	ตัวอย่างข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปด้วยวิธี Flow forming	22
รูปที่ 4	แผนภาพพาเรโตของข้อบกพร่องที่เกิดระหว่างการผลิตในปี 2557	23
รูปที่ 5	แผนภูมิความเค้น-ความเครียด	27
รูปที่ 6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด.....	27
รูปที่ 7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรง ณ จุดครากและความต้านทานแรงดึง	30
รูปที่ 8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กกล้า.....	31
รูปที่ 9	วิธีการรีดแบบ Forward flow forming และ Backward flow forming	35
รูปที่ 10	กระบวนการ Shear Forming	35
รูปที่ 11	ส่วนประกอบหลักของเครื่อง Flow forming	36
รูปที่ 12	ขนาดชิ้นงานเริ่มต้น (preform)	37
รูปที่ 13	การเตรียมชิ้นงาน (Pre-form) แบบต่างๆ	38
รูปที่ 14	นิยามศัพท์ที่ใช้ในกระบวนการรีด	47
รูปที่ 15	แผนผังก้างปลาสาเหตุของข้อบกพร่องเนื่องจากขนาดของท่อไม่ได้ขนาด	49
รูปที่ 16	แผนผังก้างปลาสาเหตุของข้อบกพร่องเนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อไม่ได้ขนาด.....	50
รูปที่ 17	แผนผังก้างปลาสาเหตุของข้อบกพร่องเนื่องจากเกิดรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ.....	50
รูปที่ 18	กราฟจำนวนข้อบกพร่องชิ้นงานที่พบในแต่ละรีดการรอบ	54
รูปที่ 19	กราฟชนิดของปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่อง.....	55

รูปที่ 20	ข้อบกพร่องแบบแตกและมีลักษณะเป็นสะเก็ดเหล็กหรือเกล็ดปลา.....	60
รูปที่ 21	ผิวของชิ้นงานที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอหรือเป็นคลื่น	60
รูปที่ 22	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบบริดชิ้นงานในรอบที่ 1 และ 2.....	60
รูปที่ 23	ขนาดชิ้นงานหลังจบการรีดรอบที่ 2	63
รูปที่ 24	กล้องจุลทรรศน์แบบแสงแบบแสงสะท้อน	63
รูปที่ 25	เครื่อง Flow forming.....	64
รูปที่ 26	เครื่องวัดความหนา Wall thickness gauge ECHOMETER 1076 Basic	64
รูปที่ 27	เครื่องวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของชิ้นงาน	64
รูปที่ 28	กรอบโต้ตอบของโปรแกรมสำหรับหาขนาดตัวอย่าง	69
รูปที่ 29	กราฟหาค่า Power Curve for 2-Level Factorial Design	70
รูปที่ 30	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ AISI 4130 ที่ใช้ขึ้นรูปท่อ.....	74
รูปที่ 31	กราฟวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการขึ้นรูปสำหรับการกำหนดขนาดความหนา ของท่อก่อนศึกษา.....	76
รูปที่ 32	กราฟค่าเศษเหลือ (Residual Plot) ของความหนาท่อ	78
รูปที่ 33	ระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนาท่อ	81
รูปที่ 34	กราฟ Main Effects Plot แสดงผลกระทบจากปัจจัยต่อขนาดความหนาของท่อ	82
รูปที่ 35	กราฟ Interaction Plot แสดงอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนาท่อ.....	83
รูปที่ 36	กราฟวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการขึ้นรูปท่อ	85
รูปที่ 37	กราฟค่าเศษเหลือ (Residual Plot) ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ	86
รูปที่ 38	ระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกท่อ (O.D).....	89
รูปที่ 39	กราฟ Main Effects Plotแสดงผลกระทบจากปัจจัยต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ.....	90
รูปที่ 40	กราฟ Interaction Plot แสดงอิทธิพลร่วม.....	91
รูปที่ 41	กราฟค่าเศษเหลือ (Residual Plot) ของ Spring back	92
รูปที่ 42	ระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อระยะขยายตัว	94

รูปที่ 43 กราฟ Main Effects Plot แสดงผลกระทบจากปัจจัยต่อระยะขยายตัวของวัสดุ.....	96
รูปที่ 44 กราฟ Interaction Plot แสดงอิทธิพลร่วม.....	97
รูปที่ 45 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ	101
รูปที่ 46 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติของขนาดความหนาของท่อ.....	102
รูปที่ 47 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติของระยะขยายของวัสดุหลังรีด.....	102
รูปที่ 48 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของค่าเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก	103
รูปที่ 49 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของขนาดความหนาของท่อ	103
รูปที่ 50 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของระยะขยายตัวของวัสดุ	104
รูปที่ 51 แผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตของขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ	104
รูปที่ 52 แผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตของความหนา	105
รูปที่ 53 แผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตของระยะการ ขยายตัวของวัสดุ	105
รูปที่ 54 Optimization plot จากโปรแกรมมินิแทบ	112
รูปที่ 55 กราฟระยะการขยายตัวของวัสดุในแต่ละรอบการรีด	113
รูปที่ 56 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังรีดรอบที่ 3.....	114
รูปที่ 57 กราฟค่าความแข็งของท่อแรงดันสูงหลังจากจบการรีดในแต่ละรอบ	115
รูปที่ 58 กราฟค่าความแข็งแรงของท่อแรงดันสูงหลังจากจบการรีดในแต่ละรอบ	116
รูปที่ 59 กราฟวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการขึ้นรูปสำหรับการกำหนดขนาดความหนา ของท่อหลังปรับปรุง	119
รูปที่ 60 กราฟวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการขึ้นรูปสำหรับการกำหนดขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อหลังปรับปรุง	121
รูปที่ 61 ระยะ X หรือระยะช่องว่างแม่พิมพ์สำหรับปรับเทียบค่ากด.....	124
รูปที่ 62 วิธีการตรวจวัดระยะช่องว่างแม่พิมพ์โดยใช้เกจบล็อก.....	124
รูปที่ 63 กรอบโต้ตอบ Define Custom Factorial Design.....	135

รูปที่ 64 กรอบโต้ตอบ Analyze Factorial Design.....	135
รูปที่ 65 กรอบโต้ตอบ Analyze Factorial Design-Term.....	136
รูปที่ 66 การสร้างกราฟ Main Effects Plot และ Interaction Plot.....	137
รูปที่ 67 ขั้นตอนการหาขนาดตัวอย่าง.....	138
รูปที่ 68 ขั้นตอนการหาขนาดตัวอย่าง.....	138
รูปที่ 69 การกำหนดระดับให้กับปัจจัย.....	139



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการขึ้นรูปโลหะมีอยู่หลายวิธี เช่น การหล่อ การกลึง การเชื่อม การตี การฉีต ฯลฯ ซึ่งการผลิตแต่ละกระบวนการล้วนมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับประเภทของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสำหรับการผลิตท่อแรงดันสูงนั้นได้มีคุณลักษณะเฉพาะที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาในการเลือกวิธีหรือเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปคือ ต้องมีความแข็งแรงสูงมากพอเพื่อสามารถรองรับแรงดันที่จะเกิดกับผนังท่อได้ สามารถขึ้นรูปขึ้นงานให้มีความบางมากๆ และมีน้ำหนักเบาได้ นอกจากนี้การทำให้ท่อมีรอยต่อน้อยหรือไม่มีรอยต่อเลย เช่น รอยเชื่อม เป็นต้น ย่อมช่วยลดความเสี่ยงของความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น ดังนั้นการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น นั้น จึงได้รับความนิยมน้อยกว่าหลายในการทำภาชนะที่รับแรงดันสูงๆ เช่น ท่อแรงดันสูง, ถังก๊าซ, ชิ้นส่วนทางด้านยานยนต์ ตลอดจนยุทโธปกรณ์ทางทหารเช่น ชิ้นส่วนของจรวด เป็นต้น เพราะนอกจากเพิ่มความแข็งแรงให้กับท่อแล้ว ยังสามารถขึ้นรูปท่อโดยไม่ทำให้เกิดตะเข็บและไม่มีเศษโลหะ (Chip) ขณะทำการขึ้นรูปด้วยเพราะเป็นการขึ้นรูปด้วยวิธีการรีดความหนาของชิ้นงานให้ลดลงจนได้ขนาดตามที่กำหนด

สำหรับกระบวนการรีดขึ้นรูปท่อด้วยเครื่อง Flow forming หลังจากได้ชิ้นงาน Preform ที่ได้ขนาดตามกำหนดเรียบร้อยแล้ว จะนำชิ้นงานไปสวมเข้ากับแกนแกนหมุน (Mandrel) ของเครื่อง Flow forming จากนั้นจึงทำการควบคุมเครื่องจักรให้ทำการขึ้นรูปตามโปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปเช่น ความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate), ความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed), ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ (Die distance) เป็นต้น ซึ่งการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่อง Flow forming นั้น จะมีลักษณะการขึ้นรูปโดยการใช้ลูกรีด (Roller) กดลงบนเนื้อวัสดุ ทำให้เนื้อวัสดุที่ถูกรีดมีความบางลงและมีขนาดที่ยาวขึ้น สำหรับการออกแบบจำนวนรอบของการขึ้นรูปแต่ละครั้งจะทำการรีดมากกว่า 1 รอบ เพื่อให้ได้ความหนาตามที่กำหนดไว้ ทั้งนี้การรีดขึ้นงานจากความหนาที่มีความหนามากๆ เพื่อให้ชิ้นงานที่มีขนาดบางลงในครั้งเดียวนั้น จะทำให้เกิดความเค้น (Stress) ที่เนื้อวัสดุมาก ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องที่เนื้อวัสดุและขึ้นงานได้ง่าย

บริษัทกรณศึกษา เป็นบริษัทที่ทำงานด้านการวิจัยและพัฒนา ภายใต้การดูแลของภาครัฐ มีหน้าที่ดำเนินการวิจัยต้นแบบยุทโธปกรณ์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ท่อแรงดันสูง

(High pressure vessel) ที่เป็นส่วนประกอบหนึ่งของงานวิจัยทางทหาร ที่ทำการผลิตด้วยเครื่อง Horizontal Flow Forming ซึ่งเป็นเครื่องจักรนำเข้าเครื่องแรกของประเทศไทย ทั้งนี้ได้มีการติดตั้งและเริ่มทำการทดลองผลิตตั้งแต่เดือน มีนาคม 2557 โดยตัวแทนจากบริษัทผู้ผลิต เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีใหม่ทำให้พบปัญหาเกี่ยวกับทีมผู้วิจัยคือองค์ความรู้ในการออกแบบกระบวนการขึ้นรูปท่อด้วยเครื่อง Flow forming ไม่เพียงพอ ซึ่งการศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับการออกแบบการขึ้นรูปดังกล่าวตั้งแต่ระดับขั้นพื้นฐานจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ช่วยให้รู้ถึงปัจจัย (Parameter) ต่างๆ ที่ส่งผลต่อข้อกำหนดทางวิศวกรรม (Specification) อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการกำหนดปัจจัยให้เหมาะสม (Optimization) ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่จะต้องศึกษาเพื่อให้สามารถผลิตท่อแรงดันสูงได้ขนาดตามที่กำหนด

1.2 กระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ท่อแรงดันสูง เริ่มจากนำวัตถุดิบผ่านกรรมวิธีทางความร้อนด้วยการอบคลายความเครียดให้กับวัตถุดิบ จากนั้นนำวัตถุดิบที่ได้มาทำการกลึงขึ้นรูปให้ได้ขนาดทั้งด้านในและด้านนอกของท่อตามที่กำหนด และทำการขัดรูในอีกครั้งเพื่อให้ผิวด้านในให้เรียบจนได้ขนาดตามกำหนด ซึ่งหลังจากนี้จะเรียกชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวมาแล้วว่า ชิ้นงาน Preform โดยการออกแบบชิ้นงาน Preform ต้องทำการคำนวณแล้วว่าหลังจากกรีดชิ้นงานเสร็จจะได้ขนาดชิ้นงานสุดท้ายตามที่กำหนด เมื่อได้ชิ้นงาน Preform แล้วก็จะเข้าสู่กระบวนการรีดท่อด้วยเครื่อง Flow forming จนสิ้นสุดกระบวนการ ซึ่งสามารถสรุปกระบวนการผลิตดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตท่อแรงดันสูง

สำหรับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ท่อแรงดันสูง มีกระบวนการผลิตหลัก 3 ส่วน ได้แก่ กระบวนการเตรียมชิ้นงาน Preform, กระบวนการรีดขึ้นรูปท่อด้วยเครื่อง Flow forming และ กระบวนการตกแต่งชิ้นงานหลังรีด โดยมีรายละเอียดกระบวนการผลิตโดยสรุปดังนี้

1.2.1 กระบวนการเตรียมชิ้นงาน Preform มีกระบวนการผลิต 5 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดการผลิตของแต่ละกระบวนการดังนี้

1) การตรวจรับท่อวัตถุดิบ

การตรวจรับท่อวัตถุดิบ เป็นการตรวจสอบชิ้นงานที่จะนำมาใช้ในที่นี้จะดำเนินการตรวจสอบจาก ใบรับรองคุณภาพวัตถุดิบ (Certificated of Materials) โดยดูจาก ส่วนผสมทางเคมี เป็นต้น เพื่อดูว่าวัตถุดิบที่นำมาส่งเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่

2) กระบวนการกลึงผิวชิ้นงานด้านนอก

ทำการกลึงผิววัตถุดิบด้านนอก จะดำเนินการโดยใช้เครื่องกลึง เพื่อปอกผิวชิ้นงานด้านนอกให้มีรูปร่างและขนาดของชิ้นงานตามที่กำหนด

3) กระบวนการขัดผิวชิ้นงานด้านใน

การขัดผิวชิ้นงานด้านใน เป็นการใช้น้ำขัด ๆ ภายในตัวท่อของชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีผิวเรียบและมีขนาดตามที่กำหนด เพื่อให้เวลาสวมชิ้นงานเข้ากับแกนหมุน (Mandrel) แล้วจะไม่เสียดสีกับแกนหมุน (Mandrel) จนส่งผลให้แกนหมุน (Mandrel) เป็นรอย และชิ้นงานอาจจะเกิดข้อบกพร่องหรือเสียหายได้หากชิ้นงานติดกับแกนหมุนมากเกินไป

4) การทดสอบขนาดของชิ้นงาน

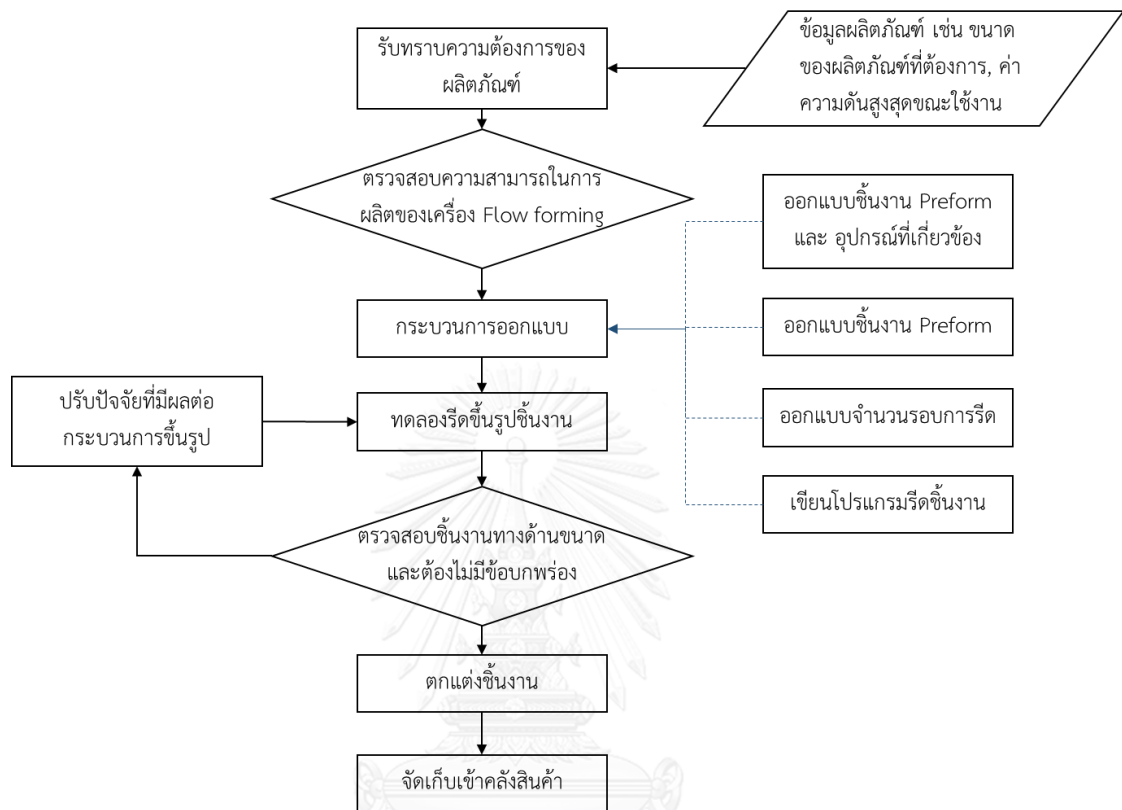
การตรวจสอบขนาดของชิ้นงาน เป็นการตรวจสอบขนาดและรูปร่างด้วยเครื่องมือวัดที่เหมาะสม โดยหลักๆ จะทำการวัดขนาดความยาวท่อ, เส้นผ่าศูนย์กลางด้านในและนอกของชิ้นงาน ความหนาและความแข็ง เป็นต้น

5) การทดสอบข้อบกพร่องในเนื้อวัสดุ (Non-Destructive Test)

การทดสอบด้วยอนุภาคแม่เหล็ก เป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาความไม่ต่อเนื่องและรอยข้อบกพร่องที่อยู่บนผิวและใต้ผิวตื้นๆ ของชิ้นงานประมาณ 2-3 มม. โดยอาศัยการเหนี่ยวนำบริเวณที่จะทดสอบให้เป็นแม่เหล็ก และทำการโรยผงเหล็กลงบริเวณที่ทดสอบ หากมีรอยแตกร้าวบนผิวงานจะมีสนามแม่เหล็กรั่วในบริเวณดังกล่าวและดึงดูดผงเหล็กให้เกาะกันเป็นแนวเส้นที่เห็นได้อย่างเด่นชัด ทั้งเพื่อป้องกันการแตกร้าวของชิ้นงานขณะทำการรีด

1.2.2 กระบวนการรีดขึ้นรูปท่อด้วยเครื่อง Flow forming หลังจากได้ชิ้นงาน Preform ที่ได้ขนาดตามกำหนดเรียบร้อยแล้ว จะนำชิ้นงานไปสวมเข้ากับแกนหมุน (Mandrel) ของเครื่อง Flow forming จากนั้นจึงทำการควบคุมเครื่องจักรให้ทำการขึ้นรูปตามโปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ ดัง

รูปที่ 2 โดยทั่วไปจะทำการรีดมากกว่า 1 รอบ ซึ่งจะทำการรีดชิ้นงานซ้ำแนวเดิม จนได้ความหนาของชิ้นงานตามที่กำหนดไว้



รูปที่ 2 กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง Flow forming

1.2.3 กระบวนการตักแต่งชิ้นงานหลังรีด จะดำเนินการหลังจากชิ้นงานผ่านการรีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Flow forming แล้ว เพื่อทำการตัดความยาวของท่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

1) การตัดหัว-ท้าย ท่อให้ได้ขนาด

การตัดหัวและท้ายของท่อที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Flow forming แล้วจะนำมาตัดเบื้องต้นด้วยเครื่องเลื่อยไฟฟ้าเพื่อให้ความยาวของท่อมีค่าใกล้เคียงกับความยาวที่ต้องการ จากนั้นจึงนำมาทำการกลึงเก็บความยาวให้ได้ตามที่กำหนดและทำการลบคมขอบของท่อให้เรียบร้อย

2) การตรวจสอบขนาดของชิ้นงาน

การตรวจสอบขนาดของชิ้นงาน เป็นการตรวจสอบขนาดและรูปร่างด้วยเครื่องมือวัดที่เหมาะสม โดยหลักๆ จะทำการวัดขนาดความยาวท่อ, เส้นผ่าศูนย์กลางด้านในและนอกของชิ้นงาน ความหนาและความแข็ง เป็นต้น

1.3 การศึกษาสภาพปัญหาในปัจจุบัน

ปัจจัยที่สำคัญซึ่งจะทำให้ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธี Flow forming มีขนาดคุณสมบัติ และความแข็งแรงตามต้องการ คือ การเลือกใช้วัสดุที่มีความเหมาะสม การเตรียมชิ้นงานก่อนกระบวนการรีด (Preform) ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment process) ปัจจัยที่ใช้ในการขึ้นรูป เช่น ความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate) ความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed of mandrel) รูปแบบของลูกรีด (Geometry Roller) เป็นต้น

ซึ่งการกำหนดปัจจัยขั้นต้นที่ไม่เหมาะสมส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องขึ้นกับชิ้นงาน เช่น เกิดปลายหัวท่อฉีกแตก เกิดสะเก็ดเหล็กแบบเกล็ดปลาที่ผิวของชิ้นงาน รูปที่ 3 และเนื่องจากต้นทุนการผลิตท่อที่สูง โดยวัตถุดิบสำหรับการผลิตท่อจะประมาณ 80,000 บาทต่อท่อสำหรับท่อเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกขนาด 302 มม. และ ประมาณ 20,000 บาทต่อท่อ สำหรับท่อเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกขนาด 122 มม. ทำให้การเกิดข้อบกพร่องที่นำมาสู่การไม่ยอมรับชิ้นงาน (Reject) ควรเกิดขึ้นให้น้อยที่สุด ซึ่งในปี 2557 ได้ทำการทดลองผลิตท่อ โดยสามารถสรุปเปอร์เซ็นต์ผลการรีดท่อแรงดันสูงได้ว่าจากการทดลองผลิตทั้งหมดไม่สามารถยอมรับชิ้นงานเป็นจำนวน 60% และสามารถยอมรับชิ้นงานได้เพียง 40% จากจำนวนการรีดท่อทั้งหมด 48 ท่อ (N)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 ตัวอย่างข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปด้วยวิธี Flow forming

(ก) ข้อบกพร่องแบบบรอยร้าวและแตกด้านนอกท่อ (ข) ข้อบกพร่องแบบสะเก็ดเหล็กแบบเกล็ดปลา

เมื่อพิจารณาของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตในปี 2557 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิต โดยสามารถจำแนกได้เป็น 8 ข้อบกพร่อง ดังตารางที่ 1 จากจำนวนข้อบกพร่องดังกล่าวสามารถสรุปเป็นแผนภาพพาเรโต ดังรูปที่ 4

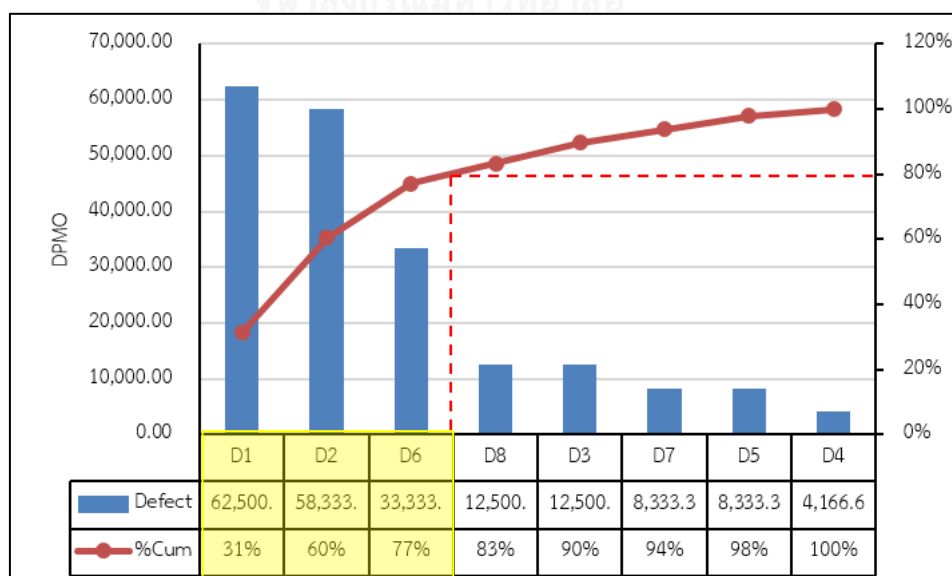
ตารางที่ 1 ข้อบกพร่องที่เกิดระหว่างการผลิตในปี 2557 (จำนวนข้อบกพร่อง n = 8)

ที่	ลักษณะข้อบกพร่อง		ความถี่ (1)	DPU* (2)=(1)/30	DPO** (3)=(2)/8	DPMO*** (4) = (3)×10 ⁶
1	ความยาวของท่อไม่ได้ขนาด	D1	15	0.50	0.063	62,500.00
2	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของท่อไม่ได้ขนาด	D2	14	0.47	0.058	58,333.33
3	ผิวชิ้นงานมีรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ	D6	8	0.27	0.033	33,333.33
4	ผิวท่อมีความหนาชิ้นงานไม่คงที่หรือเป็นคลื่น	D8	3	0.10	0.013	12,500.00
5	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในขยาย	D3	3	0.10	0.013	12,500.00
6	รอยร้าวและแตกด้านในท่อ	D7	2	0.07	0.008	8,333.33
7	การพับของเนื้อเหล็ก	D5	2	0.07	0.008	8,333.33
8	ปลายหัวท่อฉีกแตก	D4	1	0.03	0.004	4,166.67

หมายเหตุ : *(2) DPU = Defect per unit

** (3) DPO = Defect per opportunity

*** (4) DPMO = Defect per million opportunity



รูปที่ 4 แผนภาพพาราเรโตของข้อบกพร่องที่เกิดระหว่างการผลิตในปี 2557

ข้อมูลที่ได้จากแผนภาพพาเรโตนั้น จะเห็นได้ว่าข้อบกพร่องที่พบมากที่สุดคือ (D1) ความยาวของท่อไม่ได้ขนาด (D2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของท่อไม่ได้ขนาด (D6) ผิวชิ้นงานมีรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ ตามลำดับ

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อกำหนดตัวแปรควบคุมการขึ้นรูปท่อแรงดันสูง ให้ได้ความหนาที่ต้องการ เช่น ความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate), ความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed), ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ (Die distance)

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate), ความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed), ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ (Die distance) สำหรับการขึ้นรูปเป็นท่อแรงดันสูงด้วยเครื่อง Flow forming

1.5.2 การตรวจวัดคุณสมบัติในระหว่างการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1.5.2.1 สมบัติเชิงกล ที่ศึกษาเป็นหลักคือ ความแข็งแรงของชิ้นงาน

1.5.2.2 สมบัติเชิงกายภาพ เช่น ความหนา และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของชิ้นงาน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทราบระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมต่อการรีดชิ้นงานในแต่ละรอบด้วยรีดขึ้นรูปแบบเย็น

1.6.2 ทราบค่าของความเร็วป้อนของลูกรีดและความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed) ที่เหมาะสมต่อการผลิตท่อแรงดันสูง โดยพิจารณาจากมิติของท่อหลังการขึ้นรูป

1.6.3 จัดทำเป็นขั้นตอนมาตรฐานในการปฏิบัติงาน

1.7 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ระยะ ดังนี้

1.7.1 ระยะเตรียมการวิจัย

- ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการขึ้นรูปเย็นด้วยเครื่อง Flow forming
- กำหนดวัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัย

1.7.2 ระยะการทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการ โดยศึกษาตัวแปรควบคุมของเครื่อง Flow forming เพื่อให้ได้คุณลักษณะของชิ้นงานตามต้องการ

1.7.3 ระยะการประยุกต์ใช้วิธีการทำงานและตัวแปรที่เหมาะสม โดยนำวิธีการที่ได้และตัวแปรที่ถูกเลือกนำมาใช้ทดสอบขึ้นรูปท่อนด้วยวิธี Flow forming จากนั้นตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานตามสมบัติเชิงกายภาพ เช่น ความหนา และเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกของชิ้นงาน รวมไปถึงสมบัติเชิงกล คือ ความแข็งแรงและความแข็ง

1.7.4 ระยะสรุปผลการดำเนินงาน ทั้งนี้จะทำการประมวลผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อจัดทำสรุปผล และข้อเสนอแนะ ตลอดจนจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง คือ การขึ้นรูปวัสดุ และการขึ้นรูปท่อแรงดันสูง ด้วยกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น โดยรายละเอียดมีดังนี้

2.1 การขึ้นรูปวัสดุ

2.1.1 ประเภทของการขึ้นรูปโลหะ

การขึ้นรูปโลหะ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.1.1.1. การขึ้นรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation)

การขึ้นรูปแบบยืดหยุ่น เป็นการขึ้นรูปแบบชั่วคราว นั่นก็คือหากแรงที่กระทำถูกปล่อยออกไป วัสดุจะมีรูปร่างกลับไปเป็นเหมือนเดิมทุกประการ ซึ่งการแปรรูปของโลหะที่ถูกกระทำด้วยแรงดึงที่ไม่มากนัก ตามกฎของฮุก (Hooke's law) ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงซึ่งกันและกันตามความสัมพันธ์

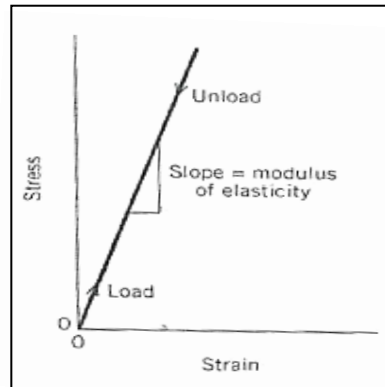
$$\sigma = E\varepsilon$$

โดยที่ E คือ ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) หรือ มอดูลัสของยัง (Young's modulus) มีหน่วยเป็น GPa หรือ psi.

σ คือ ค่าความเค้น

ε คือ ค่าความเครียด

ซึ่งเมื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (แกนนอน) และความเครียด (แกนตั้ง) จะได้เส้นกราฟเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 5 โดยค่าความชันที่ได้จากกราฟนี้คือ มอดูลัสความยืดหยุ่น (E) และค่านี้อาจถูกพิจารณาเป็นค่าที่ใช้บอกความแข็งตึง (stiffness) ของวัสดุในการต้านทานต่อการผิดรูป ยิ่งค่ามอดูลัสนี้มากเท่าไร นั่นหมายถึงว่าวัสดุมีการผิดรูปน้อยลงเท่านั้น หรือจะเกิดความเครียดแบบยืดหยุ่นที่ต่ำกว่าภายใต้แรงกระทำที่กำหนด

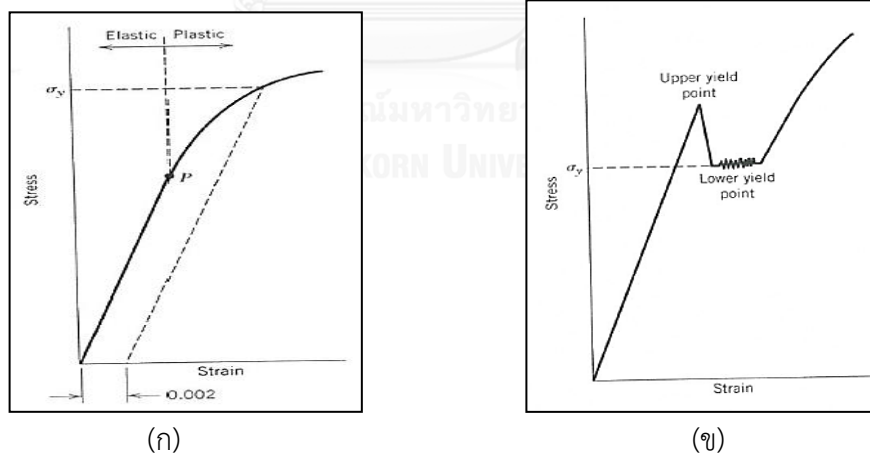


รูปที่ 5 แผนภูมิความเค้น-ความเครียด

ชนิดที่การขึ้นรูปแบบยืดหยุ่นเป็นแบบเส้นตรง โดยแสดงพฤติกรรมขณะให้แรงกระทำ (loading) และปลดแรงกระทำออก (unloading) (วิลเลียมส์ ทิม คาลิสเตอร์. เจ อาร์., 2548)

2.1.1.2. การขึ้นรูปแบบถาวร (Plastic Deformation)

การขึ้นรูปแบบถาวร เป็นการขึ้นรูปแบบถาวร นั่นก็คือแรงกระทำหรือความเค้นถูกปล่อยออกไป จะทำให้วัสดุไม่สามารถกลับมารูปร่างเดิมได้ ซึ่งค่าความเค้นจะไม่แปรผันตรงต่อความเครียด ส่งผลให้กฎของฮุก (Hooke's law) ไม่สามารถใช้ได้กับการแปรรูปแบบนี้ และเมื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จะได้เส้นกราฟเป็นเส้นตรงแล้วเบี่ยงเบนกลายเป็นเส้นโค้ง ยิ่งถ้าความเค้นสูงขึ้นก็ยิ่งเบี่ยงเบนออกไปมากขึ้นดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดในโลหะทั่วไป ในรูปแสดงถึงขอบเขตของการขึ้นรูปแบบยืดหยุ่นและการขึ้นรูปแบบถาวร ชิดจำกัดการแปรผันตรง (จุด P) และความเค้นจุดคราก σ_y ซึ่งจากความเครียด 0.002 offset (ข) พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าโดยมาก ซึ่งจะปรากฏการณ์จุดครากให้เห็นอย่างชัดเจน (วิลเลียมส์ ทิม คาลิสเตอร์. เจ อาร์., 2548)

2.1.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุ

กระบวนการขึ้นรูปวัสดุ สามารถแบ่งตามอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป ดังนี้

2.1.2.1 การขึ้นรูปร้อน (Hot working) เป็นกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะเพื่อให้วัสดุหรือโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ที่อุณหภูมิประมาณหรือมากกว่า $0.5T_m$ (ซึ่ง $0.5T_m$ เป็นอุณหภูมิที่วัสดุมีการจัดเรียงตัวใหม่, Recrystallization temperature) แต่จะต้องต่ำหรือน้อยกว่าอุณหภูมิในการทำให้เกิดการหลอม (Melting Point) ของโลหะหรือวัสดุนั้นๆ สำหรับกระบวนการขึ้นรูปร้อนของโลหะ มีดังนี้

- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1. การตีขึ้นรูป (Forging) | 2. การรีดร้อน (Hot rolling) |
| 3. การดึงและกดขึ้นรูป (Drawing & cupping) | 4. การเชื่อมต่อท่อ (Pipe welding) |
| 5. การแทงขึ้นรูป (Piercing) | 6. การเคลื่อนไหลขึ้นรูป (Extruding) |
| 7. การหมุนขึ้นรูป (Spinning) | |

โดยที่ T_m คือ จุดหลอมเหลวของวัสดุ

ข้อดีของกระบวนการขึ้นรูปร้อน

1. มีการกระจายตัวของสารมลทิน (Impurity) ในโลหะ
2. มีการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลในระหว่างกระบวนการ เช่น Strength, Formability, Rigidity, Toughness, Durability
3. กำจัดรูพรุน (Porosity) ในเนื้อโลหะได้ดี
4. ทำให้เนื้อโลหะมีเกรนที่ละเอียดมากขึ้น

ข้อเสียของกระบวนการขึ้นรูปร้อน

1. ควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ยาก สาเหตุจากการหดและขยายตัวของโลหะเมื่อได้รับความร้อน
2. ที่ผิวของชิ้นงานเกิดออกไซด์
3. ผิวของชิ้นงานไม่สวย เนื่องจากเกิดสะเก็ดที่ผิวชิ้นงาน จากความร้อน
4. ค่าใช้จ่ายในการขึ้นรูป การบำรุงรักษา ราคาแพง

2.1.2.2 การขึ้นรูปเย็น (Cold working) เป็นกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะเพื่อให้วัสดุหรือโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ที่อุณหภูมิต่ำหรือต่ำกว่า $0.5T_m$ ซึ่งโลหะจะมีความแข็งแรงปกติ ในกระบวนการขึ้นรูปจำเป็นต้องใช้กำลังสูง เพื่อให้เกิดความเค้น (stress) ในโลหะจนเลยจุด

(Elastic limit หรือ Yield point) ไม่เช่นนั้นโลหะจะคืนรูปเดิมหรือไม่เกิดการแปรรูป ถ้ากำลังที่ใช้ในการขึ้นรูปไม่เลยจุดดังกล่าว สำหรับกระบวนการขึ้นรูปเย็นของโลหะมีดังนี้

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1. การดัดงอ (Bending) | 2. การรีดเย็น (Cold rolling) |
| 3. การอัดรีด (Extruding) | 4. การบีบงอ (Squeezing) |
| 5. การรีดขึ้นรูป (Shear spinning) | 6. การตัดยืด (Stretching) |
| 7. การงอตรง (Straight bending) | 8. การตีขึ้นรูป (Shot peening) |
| 9. การขึ้นรูปพิมพ์ลึก (Deep Drawing) | 10. การกระแทกขึ้นรูป (Forging) |
| 11. การแทงขึ้นรูป (Hobbing) | |

ข้อดีของกระบวนการขึ้นรูปเย็น

1. ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปน้อย ประมาณ 20-25°C
2. ผิวของชิ้นงานเรียบ มีความสวย และไม่มีสิ่งเจือปน
3. มีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิม
4. ไม่ใช้พลังงานมากในการให้ความร้อน
5. สามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ ทำให้ชิ้นงานมีความเที่ยงตรง
6. ใช้ในการผลิตชิ้นงานจำนวนมาก
7. อายุการใช้งานของเครื่องมือยาวนาน

ข้อเสียของกระบวนการขึ้นรูปเย็น

1. เกิดความเค้น (stress) และความเครียด (strain) กับเนื้อโลหะมาก
2. เกรนของโลหะเกิดการแตกหักได้ง่าย
3. ความเหนียวของเนื้อโลหะลดลง
4. อาจจะต้องปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุด้วยกระบวนการทางความร้อน เช่น

Annealing process (เพื่อปรับปรุงความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ (ductility))

5. ความเค้นตกค้างแบบดึง (tensile residual stress) ที่หลงเหลือในเนื้อโลหะ ซึ่งทำให้อายุการใช้งานของเนื้อโลหะลดน้อยลง

2.1.3 การเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากความเครียด (Strain Hardening)

(ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549) การเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากความเครียด มีลักษณะการขึ้นรูปโลหะอย่างถาวร (Plastic deformation) ทำให้วัสดุหรือเนื้อโลหะมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยจะพบพฤติกรรมแบบนี้ได้ในโลหะเหนียว ซึ่งบางครั้งจะเรียกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการขึ้นรูปประเภทนี้ว่า การเพิ่มความแข็งแรงด้วยการขึ้นรูป (Work hardening) หรือเรียกว่าเป็น การขึ้น

รูปแบบเย็น (Cold working) เนื่องจากการเปลี่ยนรูปในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดผลึกใหม่ของวัสดุหรือโลหะนั้นๆ

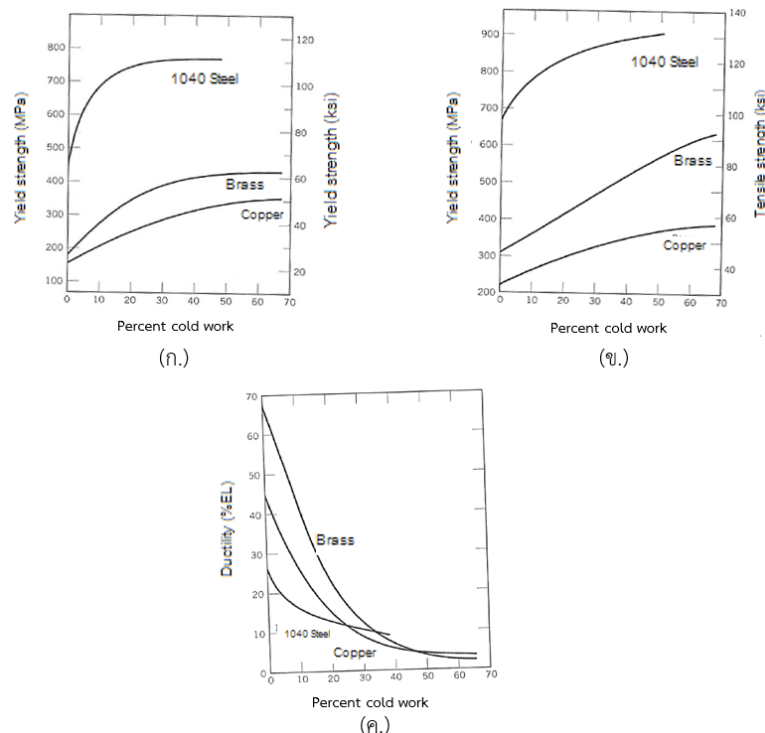
ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ เปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น (Percent cold work; %CW) สำหรับการระดับของการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของโลหะ ได้จากสูตร

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

เมื่อ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุหรือโลหะก่อนการเปลี่ยนรูป

A_d คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุหรือโลหะหลังการเปลี่ยนรูป

ทั้งนี้ค่าเปอร์เซ็นต์ขึ้นรูปเย็นจากสมการดังกล่าว ยังสามารถใช้หาสมบัติทางกลของโลหะหรือโลหะผสมได้ เช่น ความแข็งแรงของส่วนประกอบของชิ้นงานควรมีค่าเท่าไร ส่งผลให้สามารถใช้ค่าดังกล่าวนำไปออกแบบกระบวนการผลิตชิ้นงานได้อย่างเหมาะสม ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ขึ้นรูปเย็นที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรง ณ จุดครากและความต้านทานแรงดึงของวัสดุหรือโลหะเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 7 (ก.) (ข.) ในทางกลับกันก็ส่งผลให้ค่าความเหนียวของวัสดุลดลง ดังรูปที่ 7 (ค.)

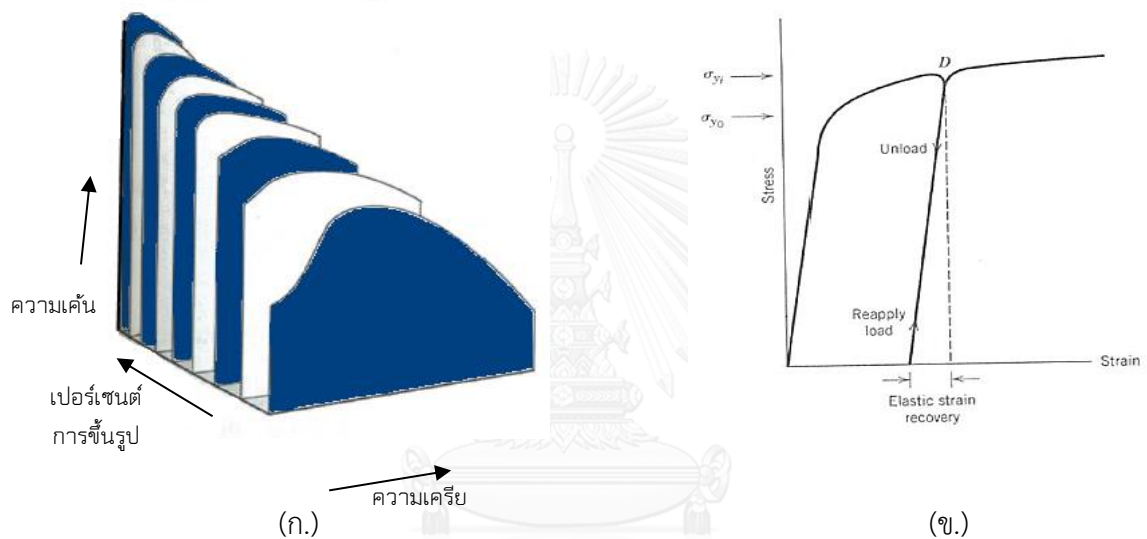


รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรง ณ จุดครากและความต้านทานแรงดึง

(ก.) ความแข็งแรง ณ จุดคราก (ข.) ความต้านทานแรงดึง (ค.) ความเหนียวกับเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูป

เย็นของเหล็กกล้า ทองเหลือง และทองแดง (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549)

โดยพฤติกรรมของความเค้นและความเครียดของเหล็กกล้าที่ได้รับอิทธิพลจากการขึ้นรูปเย็น นั้น สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังรูปที่ 8 (ก.) และความสัมพันธ์ของการเกิดความแข็ง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากความเครียด ดังรูปที่ 8 (ข.) ที่ได้จากการพล็อตกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด จะพบว่าในช่วงต้นของกราฟที่มีการให้แรงกระทำกับโลหะจนมีความแข็งแรง ณ จุดคราก คือ σ_{yo} โลหะมีการเปลี่ยนรูปแบบถาวรจนถึงจุด D และเมื่อความเค้นลดลงจนหมดแล้ว ได้ให้แรงกระทำขึ้นใหม่ทำให้เกิดจุดครากใหม่ที่มีค่ามากขึ้นกว่าเดิม นั่นคือ σ_{yi} ส่งผลให้โลหะมีความแข็งแรงมากขึ้นหลังเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากค่าความเค้น ณ จุดครากเปลี่ยนจาก σ_{yo} ไปเป็น σ_{yi} นั่นเอง



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กกล้า

(ก.) อิทธิพลของการขึ้นรูปเย็นที่มีต่อพฤติกรรมของความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (ข.) กราฟความเค้น-ความเครียดแสดงให้เห็นการเกิดความแข็งเนื่องจากความเครียดโดยการเปลี่ยนความเค้นที่จุดครากจาก σ_{yo} ไปเป็น σ_{yi} ที่จุด D (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549)

2.2 การขึ้นรูปท่อแรงดันสูงด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น

การผลิตท่อแรงดันสูง ที่ใช้สำหรับบรรจุเชื้อเพลิงและมีการเผาไหม้ภายในท่อนี้ ซึ่งก่อให้เกิดแรงดันภายในท่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ดังนั้นตัวท่อจำเป็นต้องมีความสามารถในการทนแรงเสียดสีจากอากาศภายนอกขณะเคลื่อนที่ได้ เพราะฉะนั้นวัตถุดิบที่นำมาใช้นั้นควรที่จะมีความแข็งแรง และ Strength ที่สูงในระดับหนึ่ง

2.2.1 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปท่อแรงดันสูง

วัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตท่อพิเศษนี้นิยมใช้อยู่ 3 ชนิด คือ

- 1) เหล็กกล้า (Steel)
- 2) ไทเทเนียม (Titanium)
- 3) อลูมิเนียม อัลลอยด์ (Aluminum Alloy)

ซึ่งทั้ง 3 ชนิดนี้ มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน และมีขั้นตอนในการที่จะนำไปขึ้นรูปตัวท่อต่างกันด้วย โดยมีรายละเอียดตาม ตารางที่ 2 ซึ่งโดยปรกตินิยมใช้เหล็กกล้า (Steel) มาขึ้นรูปเนื่องจากมีความแข็งแรง, รับแรง Strength ได้สูง, ง่ายในท้องตลาด และมีราคาที่เหมาะสม

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้กับอากาศยาน

(National aeronautics and space administration NASA, 1970)

Material	Design yield strength, ksi	Modulus of elasticity, 1000 ksi	Density, lb/in.	Heat treatment	Remarks
Hy Steel: HY-80 HY-130/150	80 130-150	29.5 29.5	0.285 0.285	Quench and temper	No heat treatment required after welding
Low allow Steel: 4130 4335V D6aC	150-180 180-200 180-240	29.0 29.0 29.0	0.283 0.283 0.283	Quench and temper	Heat treatment required after welding
Maraging Steel: Grade 200 Grade 250 Grade 300	200 240 280	27.5 27.5 27.5	0.289 0.289 0.289	Solution anneal and age	Age only after welding
HP Steel: 9 Ni-4 Co-0.250 9 Ni-4 Co-0.450	180-220 260-300	28.5 28.5	0.28 0.28	Quench and temper	Heat treatment required after welding for 0.450 alloy
Titanium Ti-6Al-4V	150	16.0	0.167	Solution anneal and age	Age before weld: stress-relief after weld
Aluminum Alloys: 2000 Series 5000 Series 6000 Series 7000 Series	35-65 30-40 37-47 60-68	10.3 10.3 10.3 10.3	0.10 0.10 0.10 0.10	Solution heat treatment and age No heat treatment Solution heat treatment and age Solution heat treatment and age	Heat treatment required after welding Heat treatment required after welding Resistance welding only

สำหรับกระบวนการผลิตท่อแรงดันสูงนี้ จะใช้เหล็กกล้าเจือโมลิบดีนัมและโครเมียม (AISI 4130) จัดเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ประเภทโครเมียม-โมลิบดีนัม โดยมีส่วนผสมทางเคมีดัง ตารางที่ 3 ที่มีความแข็งแรงสูงมาก เหมาะสำหรับการทำอุปกรณ์เครื่องจักรกลต่างๆ ที่มีการใช้งานหนัก และต่อเนื่อง เพราะนอกจากจะมีความแข็งแรงสูงและความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ดีแล้ว เหล็กกล้าผสมชนิดนี้ยังมีความเหนียวที่ดีอีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า AISI 4130 (ASTM International, 2012)

Carbon	0.28-0.33	Sulfur	0.025 max.	Molybdenum	0.15-0.25
Manganese	0.40-0.60	Silicon	0.15-0.35	Nickel	0.25 max.
Phosphorus	0.025 max.	Chromium	0.80-1.10	Copper	0.35 max.

ตารางที่ 4 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า AISI 4130

Material	Condition	Tensile Strength [psi. (MPa)]	Yield Strength [psi. (MPa)]	Elongation in 2" [%]	Hardness (Rockwell)
4130	Cold drawn- normalized	85,000-110,000 psi (590-760 MPa)	70,000-85,000 psi (480-590 MPa)	20-30	B 90-96 C 11-20

2.2.2 การขึ้นรูปด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น

การขึ้นรูปด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น จัดเป็นกรรมวิธีขึ้นรูปแบบเย็น (Cold working) ที่ได้รับการพัฒนาการขึ้นรูปด้วยวิธีการกลึง (Metal Spinning) ซึ่งประโยชน์ในการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้คือ

1. สร้างท่อขึ้นงานแบบไม่มีรอยต่อหรือเกิดตะเข็บ
2. ได้ชิ้นงานที่ขนาดเที่ยงตรงและแม่นยำ
3. ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูง
4. ไม่มีเศษโลหะเกิดขึ้นในระหว่างการผลิต
5. ชิ้นงานมีน้ำหนักเบา

กระบวนการขึ้นรูปโดยวิธีการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น สามารถอธิบายได้โดยเริ่มต้นจากชิ้นงานรูปทรงกระบอกที่ผ่านการเตรียมชิ้นงานมาแล้วจะถูกนำมาสวมเข้ากับแกน Mandrel ทำการหมุนด้วยความเร็วรอบที่เหมาะสม แล้วรีดความหนาของชิ้นงานให้บางลงในขณะที่ชิ้นงานมีการหมุน โดยลูกรีด (Roller) เป็นตัวขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิกส์หรือมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีกำลังสูง กระบวนการแปรรูปจะเกิดขึ้นในสถานะที่วัสดุเป็นของแข็ง และถูกอัดให้มีความเค้นมากกว่าจุดคราก (Yield strength)

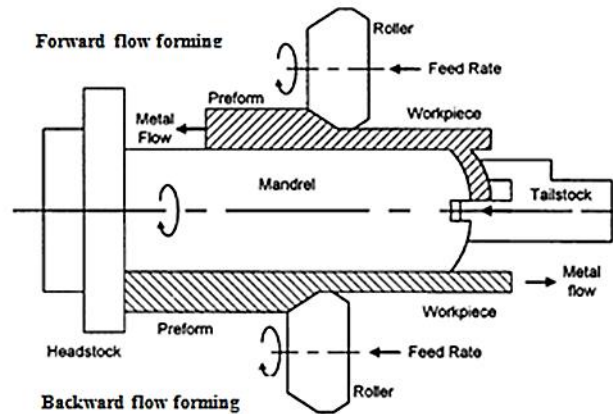
และเกิดการไหลของเนื้อวัสดุ เป็นการแปรรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) นั่นคือ ชิ้นงานไม่สามารถคืนรูปได้อีก

รูปแบบการรีดด้วยวิธีนี้ จะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของชิ้นงานลดลงในขณะที่ด้านในถูกบังคับให้คงที่ด้วยแกน Mandrel ความหนาของชิ้นงานที่ได้จึงบางลง ความหนาที่ได้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแกน Mandrel กับลูกรีด การรีดชิ้นงานสามารถกระทำได้โดยการรีดเพียงรอบเดียวหรือหลายๆ ขึ้นอยู่กับการออกแบบการรีดชิ้นงานนั้นๆ ซึ่งระบบการทำงานของเครื่องจักรจะถูกควบคุมโดยระบบ CNC

ปัจจุบันเทคโนโลยีในการขึ้นรูปด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น สามารถรีดชิ้นงานให้มีความหนาลดลงมากกว่า 90% สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ การเตรียมชิ้นงานต้องมีความเหมาะสมโดยอาศัยหลักการปริมาตรคงที่ หรือปริมาตรก่อนและหลังจากการขึ้นรูปจะมีขนาดที่เท่ากัน เนื่องจากกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น เป็นกระบวนการขึ้นรูปเย็น จึงจำเป็นต้องมีการรักษาอุณหภูมิของชิ้นงานไม่ให้สูงเกินกว่าจุดที่จะมีการเปลี่ยนโครงสร้างของผลึก (Recrystallization Point) โดยใช้ระบบของเหลวในการหล่อเย็นทั้งในส่วนของชิ้นงาน แกนแม่พิมพ์และลูกรีดการขึ้นรูปโดยวิธีการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น สามารถกระทำได้ 2 วิธี ได้แก่

1. การรีดแบบไปข้างหน้า (Forward Flow Forming) วิธีการรีดแบบนี้นิยมใช้กับชิ้นงานทรงกระบอกที่มีปลายเปิดด้านเดียว เมื่อสวมชิ้นงานเข้ากับ Mandrel ชิ้นงานจะถูกยึดให้ติดอยู่ที่ปลายของ Mandrel แล้วรีดชิ้นงานให้บางและยาวออกไปในทิศทางตรงกันข้ามกับปลายปิด ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของชุดลูกรีด ความยาวของชิ้นงานในการรีดด้วยวิธีนี้จะมีข้อจำกัดอยู่ที่ความยาวของ Mandrel คือไม่สามารถรีดชิ้นงานให้ยาวเกินกว่าความยาวของ Mandrel ได้ ดังแสดงวิธีการรีดใน รูปที่ 9

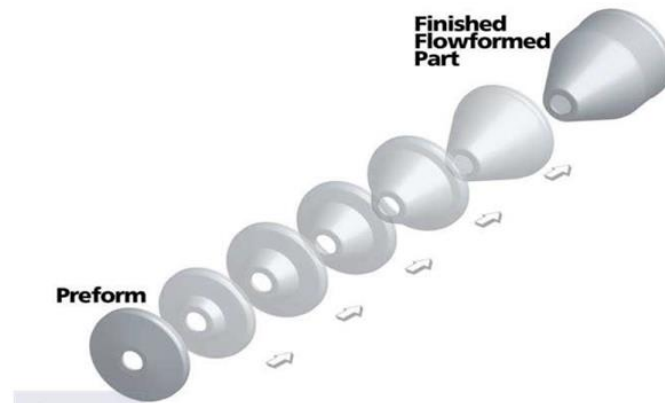
2. การรีดแบบไปข้างหลัง (Reverse Flow Forming) วิธีการรีดแบบนี้นิยมใช้กับชิ้นงานทรงกระบอกที่มีปลายเปิดทั้งสองด้าน ชิ้นงานจะถูกสวมเข้ากับ mandrel จนสุดแล้วรีดให้ชิ้นงานยืดออกไปในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของชุดลูกรีด การขึ้นรูปวิธีนี้สามารถรีดชิ้นงานได้ยาวเกินความยาวของ Mandrel และยาวกว่าการรีดแบบไปข้างหน้า (Forward Flow Forming) ดังแสดงวิธีการรีดในรูปที่ 9



รูปที่ 9 วิธีการรีดแบบ Forward flow forming และ Backward flow forming

(Hamid R. Molladavoudi & Djavanroodi, 2011)

นอกจากนั้นแล้วยังมีการขึ้นรูปแบบ Shear Forming ซึ่งใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นโคนหรือกรวย โดยอาศัยรูปร่างของ Mandrel เป็นตัวกำหนดรูปทรง หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเป็นการผสมผสานระหว่างการขึ้นรูปแบบ Forward flow forming กับ Spinning เข้าด้วยกัน ตัวอย่างกระบวนการ Shear Forming สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10



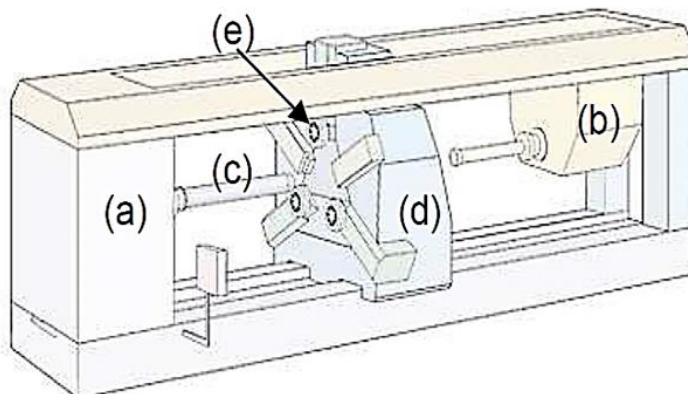
รูปที่ 10 กระบวนการ Shear Forming

(M.Sivanandini, S.S.Dhami, & B.S.Pabla, 2012)

2.2.3 เครื่องมือเครื่องจักร

เครื่องจักรที่ใช้ในการกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น มีส่วนประกอบพื้นฐานคล้ายกับเครื่องกลึงแนวอน เนื่องจากใช้การจับยึดและหมุนชิ้นงานเหมือนกัน แต่มีโครงสร้างที่ใหญ่กว่าและแข็งแรงกว่าเพราะต้องรับแรงบิดและแรงสั่นสะเทือนที่สูง ประกอบกับต้องการความละเอียดสูง จึงต้องมีชิ้นส่วนที่ซับซ้อนและระบบควบคุมที่แม่นยำ ระบบกำลังขับของเครื่องจะใช้ในการเคลื่อนที่ของชุดบังคับลูกกริด (Carriage) และลูกกริด (Rollers) อาจจะใช้ระบบ Hydraulic หรือ Servo Motor

ขึ้นอยู่กับการออกแบบของผู้ผลิต ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป เครื่องจักร Flow forming มีรูปร่างและส่วนประกอบหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง Flow forming

(a) Head stock (b) Tail stock (c) Mandrel (d) Carriage (e) Rollers

2.2.4 การเตรียมชิ้นงานก่อนกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น (Preform)

ในกระบวนการขึ้นรูปแบบไหลนั้น การเตรียมชิ้นงานก่อนการเข้ากระบวนการถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพและขนาด, รูปร่าง, รวมถึงความเที่ยงตรงของชิ้นงานสุดท้าย (Final Product) เป็นอย่างมาก หากต้องการชิ้นส่วนสุดท้ายที่มีค่าผิดพลาดหรือระยะเพี้ยนน้อยก็ต้องมีการเตรียมชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงแม่นยำสูงเช่นกัน สิ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือกระบวนการขึ้นรูปแบบไหลเป็นกระบวนการขึ้นรูปเย็นที่ปริมาตรของชิ้นงานคงที่ ปริมาตรของชิ้นงานก่อนกระบวนการและชิ้นงานสุดท้ายมีค่าเท่ากัน การออกแบบรูปร่างของชิ้นงานจึงต้องคำนึงถึงปริมาตรวัสดุรวมถึงรูปร่างต้องเหมาะสมกับแบบแม่พิมพ์ (Mandrel) และลูกรีด (Roller) เพื่อให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างราบเรียบและใช้พลังงานอย่างเหมาะสม การเตรียมชิ้นงานสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกลึงชิ้นงาน (Machining) ที่ผ่านตีขึ้นรูป (Forging) สามารถเตรียมชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูงและสามารถผลิตชิ้นงานจากกระบวนการขึ้นรูปแบบไหลได้ดีที่สุด แต่ต้องมีความสูญเสียวัสดุอันเกิดจากกระบวนการกลึง ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองวัสดุ รวมถึงค่าเครื่องมือเครื่องจักรสำหรับการตีขึ้นรูปซึ่งมีราคาแพง ต้องทำเป็นปริมาณมากจึงจะมีความคุ้มค่าในการลงทุน นอกจากนี้แล้วยังสามารถเตรียมชิ้นงานจากโลหะแผ่นได้โดยผ่านกระบวนการ Spinning หรือ กระบวนการป้อนขึ้นรูป (Pressing) แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องความหนาของชิ้นงาน ความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ รวมถึงค่าเครื่องจักร อุปกรณ์ในการ Spinning หรือ Pressing อีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการเตรียมชิ้นงานก่อนการขึ้นรูปแบบไหล ก็คือการเชื่อม (Welding) ที่ต้องอาศัยแรงงานฝีมือที่มีคุณภาพสูง แต่มีค่าใช้จ่ายเรื่องเครื่องมือเครื่องจักรค่อนข้างต่ำ และมีความคุ้มค่าหากทำในปริมาณที่ไม่มากนักและชิ้นงานมีขนาดใหญ่ นอกจากนั้นแล้ว การขึ้นรูป

ชิ้นงานแบบไหลที่ผ่านการเชื่อมยังทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ชิ้นงานมีความมากขึ้น และสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดีขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคอันเป็นผลมาจากการแปรรูปแบบ Plastic Deformation ชิ้นงานสุดท้ายมีพื้นผิวที่สวยงามโดยไม่ต้องมีการขัดผิว การเตรียมชิ้นงานแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับ ชิ้นงานสุดท้ายแสดงดังรูปที่ 13

โดยการเตรียมชิ้นงานเริ่มต้น (preform) สำหรับใช้ในการรีดท่อแรงดันสูงด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น นั้น จะทำการออกแบบบนพื้นฐานปัจจัยสำคัญ 2 ปัจจัย คือ การเสียรูป (deformation) มากที่สุดที่วัสดุทำได้ซึ่งในที่นี้จะใช้ทฤษฎีการขึ้นรูปแบบเย็น (Cold working) มาใช้ ดังสมการที่ 1 และทฤษฎีปริมาตรคงที่ (Constant volume principle) โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2 ทั้งนี้ ได้ออกแบบการรีดไว้จำนวน 3 รอบ

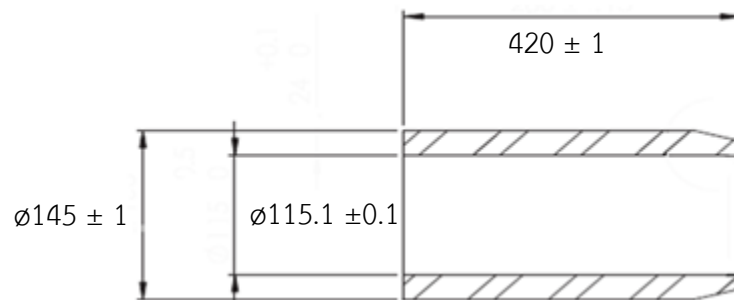
$$\%CW = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุหรือโลหะก่อนการเปลี่ยนรูป
 A_d คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุหรือโลหะหลังการเปลี่ยนรูป

$$\left[\frac{1}{4} \pi [D_0^2 - D_i^2] L \right]_f = \left[\frac{1}{4} \pi [D_0^2 - D_i^2] L \right]_p \quad (2)$$

เมื่อ D_0 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของชิ้นงาน
 D_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของชิ้นงาน
 L คือ ความยาวของชิ้นงาน
 f คือ ชิ้นงานหลังการรีดด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น
 p คือ ชิ้นงานก่อนการรีดด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น

ซึ่งจากคำนวณดังกล่าวได้ชิ้นงานเริ่มต้น ดังรูปที่ 12 โดยเมื่อคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปแบบเย็นที่ทำได้ประมาณ 82%



รูปที่ 12 ขนาดชิ้นงานเริ่มต้น (preform)

Preforms and Flowformed Parts



รูปที่ 13 การเตรียมชิ้นงาน (Pre-form) แบบต่างๆ

2.3 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ

2.3.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การออกแบบการทดลองใช้เพื่อตรวจสอบปัจจัย (Factor) หรือตัวแปรนำเข้า (Input variable) ที่มีผลต่อผลตอบที่ต้องการศึกษา โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) สำหรับการพิสูจน์ข้อเท็จจริง, ความเชื่อจากประสบการณ์ หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต
- เพื่อค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) เพื่อศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ ที่มีผลต่อกระบวนการสำหรับการออกแบบกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ สามารถแบ่งได้ 3 ส่วน คือ

1) การออกแบบระบบ (System design) เพื่อกำหนดค่าเริ่มต้นของลักษณะทางคุณภาพที่ต้องการ โดยใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมมาประยุกต์

2) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ (Parameter Design) เพื่อกำหนดระดับค่าที่ดีที่สุดภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่กระบวนการต้องการ

3) การออกแบบค่าพิกัดเผื่อ (Tolerance Design) เพื่อกำหนดช่วงหรือพิกัดเผื่อที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิต ส่งผลให้งานมีคุณภาพมากขึ้น

2.3.2 ขั้นตอนสำหรับการออกแบบการทดลอง

- 1) กำหนดวัตถุประสงค์ของการทดลอง
- 2) เลือกปัจจัยและระดับที่จะใช้ในการทดลอง

เพื่อศึกษาว่ามีปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง โดยดูว่าแต่ละปัจจัยควรมีช่วงในการทดลองอย่างไร และต้องระบุได้ว่าระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Effect), แบบสุ่ม (Random Effect) หรือแบบผสม(Mixed Effect)

3) กำหนดตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรผลลัพธ์

4) การเลือกแบบแผนการทดลอง

การเลือกแบบแผนการทดลองจะพิจารณาจากจำนวนปัจจัยที่ใช้ ตัวอย่างเช่น การทดลองปัจจัยเดียว แบบแผนการทดลองที่ควรใช้คือ การจำแนกทางเดียว (One-way ANOVA) การทดลองสองปัจจัยโดยไม่สนใจผลกระทบร่วม (อันตรกิริยา หรือ Interaction) แบบแผนการทดลองที่ควรใช้คือ การจำแนกสองทาง (Two-way ANOVA) หรือการออกแบบแบบสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่ม (Complete randomized block design) การทดลองสองปัจจัยหรือมากกว่าโดยสนใจผลกระทบร่วม แบบแผนการทดลองที่ควรใช้คือ การทดลองแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) เป็นต้น

5) การทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

การทดลองที่ดีจะต้องคำนึงถึง 3 สิ่ง คือ 5.1) ทดลองอย่างสุ่ม (Randomization) 5.2) แต่ละการทดลองต้องมีการทำซ้ำ (Replication) 5.3) พยายามลดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง (Reduction of Error) นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาด้านอื่นๆ ร่วมด้วยคือ การวัดผลแม่นยำชัดเจน, ทำได้จริงในทางปฏิบัติและการทดลอง รวมไปถึงมีค่าใช้จ่ายในการทดลองหรือปรับปรุง และเวลาที่เหมาะสม

6) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

7) การสรุปผลการทดลองเพื่อยืนยันผลและข้อเสนอแนะ

2.3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นวิธีการคำนวณแบบเลขคณิตโดยการแยกผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Total sum of square; SS_T) จากนั้นทำการวิเคราะห์แยกแยะความแตกต่างเหล่านั้น หากความแตกต่างใดมีค่ามากกว่าแสดงว่าปัจจัยนั้นทำให้เกิดความแตกต่างโดยมีผลต่อค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean square; MS) ซึ่งเป็นตัวที่ประมาณค่าความแปรปรวนที่ดีที่สุดซึ่ง

$$MS = \frac{SS}{df}$$

เมื่อ SS คือ ผลรวมกำลังสอง (Sum of square)

Df คือ ชั้นของความอิสระ (Degree of Freedom)

สามารถอธิบายการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละแบบการทดลองได้ดังนี้

2.3.3.1 การทดลองสุ่มแบบสมบูรณ์ (Completely randomized design; CRD)

ความแปรปรวนทั้งหมด ออกเป็น 2 ส่วน คือ ความแปรปรวนเนื่องจากการให้การทดลองร่วมปัจจัยต่างกัน และความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ตัวอย่างการสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบที่มีอิทธิพลเป็นค่าคงที่ (Fixed Effect Model)

$$\text{ตัวแบบ } ij = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}; i = 1, 2, \dots, a \text{ และ } j = 1, 2, \dots, n$$

โดยที่ ij คือ ค่าสังเกตที่ j เมื่อได้รับการทดลองร่วมปัจจัย i

μ คือ ค่าเฉลี่ยรวมของทุกประชากร

τ_i คือ อิทธิพลอันเกิดจากการทดลองร่วมปัจจัย i

ε_{ij} คือ ความคลาดเคลื่อนสุ่ม

2.3.3.2 การทดลองแบบแฟคทอเรียล

สำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียลเป็นการทดลองหลายปัจจัย (multi-factor experiment) เช่น การทดลองเปรียบเทียบกาแฟ 2 แบบ โดยการใส่น้ำตาลกับไม่ใส่น้ำตาล การทดลองนี้มีสองปัจจัย (factor) แต่ละปัจจัยมีสองระดับ (level) การทดลองนี้เป็นแบบแฟคทอเรียลขนาด 2×2 ที่มี การรวมกันของระดับต่าง ๆ ของสองปัจจัย เรียกว่า ทรีทเมนต์คอมบิเนชัน (treatment Combination) ได้ทั้งหมด 4 ทรีทเมนต์คอมบิเนชัน สำหรับการทดลองแฟคทอเรียลที่มีหลายปัจจัยศึกษาพร้อมกันในการทดลองเดียวกัน จะมีข้อดีที่ ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัยและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยด้วย

ลักษณะรูปแบบการทดลอง

- 1) มีตัวแปรทดลองตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป
 - 2) มีการศึกษาอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างตัวแปรทดลอง
 - 3) กลุ่มตัวอย่างใดจะได้รับตัวแปรทดลองใด จะต้องเป็นไปอย่างสุ่ม
- การทดลองสองปัจจัย

รูปแบบเชิงเส้นของการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองปัจจัย โดยปัจจัย A มี a ระดับ และปัจจัย B มี b ระดับที่ใช้แผนการทดลองแบบ CRD ทำ r ซ้ำ

การทดลองแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ในแผน CRD แสดงตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

เมื่อ Y_{ij} = ค่าสังเกตแต่ละค่า
 i = 1,.....,a (a = จำนวนระดับของปัจจัย A)
 j = 1,.....,a (a = จำนวนระดับของปัจจัย A)
 k = 1,.....,a (a = จำนวนระดับของปัจจัย A)
 μ = 1,.....,a (a = จำนวนระดับของปัจจัย A)
 A_i = 1,.....,a (a = จำนวนระดับของปัจจัย A)
 B_j = 1,.....,a (a = จำนวนระดับของปัจจัย A)
 $(AB)_{ij}$ = 1,.....,a (a = จำนวนระดับของปัจจัย A)
 ε_{ijk} = 1,.....,a (a = จำนวนระดับของปัจจัย A)

การทดลองแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ในแผน RCB แสดงตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

เมื่อ R เป็นอิทธิพลของบล็อก ส่วนค่าอื่นๆ เช่นเดียวกับแผน CRD

- การทดลองสามปัจจัย

รูปแบบเชิงเส้นของการทดลองสามปัจจัยโดยปัจจัย A มี a ระดับ ปัจจัย B มี b ระดับ ปัจจัย C มี c ระดับ ใช้แผนการทดลองแบบ CRD ทำ r ซ้ำ มีค่า

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_l + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{il} + (\beta\gamma)_{jl} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

$i = 1, 2, \dots, a$ $j = 1, 2, \dots, b$ $k = 1, 2, \dots, c$ $l = 1, 2, \dots, r$

- การทดลองขนาด 2^k

ในการทดลองที่มีจำนวนหลายปัจจัย โดยผู้ทดลองสนใจศึกษาแต่ละ 2 ปัจจัยเพียง 2 ระดับ เป็นระดับต่ำกับระดับสูง เช่นการทดลอง 2 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับเรียกว่า การทดลอง 2^2 แฟกทอเรียลการเขียนทริทเมนต์คอมบินเนชัน อยู่ในรูปมาตรฐานของ 2^2 ดังนี้

(1)	แทน	a_1b_1	a	แทน	a_2b_1
			b	แทน	a_2b_2
		a_1b_2	ab		

นั่นคือระดับสูงของปัจจัย จะปรากฏตัวอักษรนั้น เช่น a_2b_2 แทนด้วย ab ส่วนระดับต่ำทั้งสองปัจจัย (a_1b_1) แทนด้วย (1) สำหรับการทดลอง 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ เรียกว่า 2^3 แฟคทอเรียล เขียนทริทเมนต์คอมบิเนชันในรูปมาตรฐานดังนี้

(1)	แทน	$a_1b_1c_1$	c	แทน	$a_1b_1c_2$
a	แทน	$a_2b_1c_1$	ac	แทน	$a_2b_1c_2$
b	แทน	$a_1b_2c_1$	bc	แทน	$a_1b_2c_2$
ab	แทน	$a_2b_2c_1$	abc	แทน	$a_2b_2c_2$

2.3.4 ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ

ค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (Process capability index) แบ่งได้ 2 ประเภท คือ 1) ดัชนีชี้วัดศักยภาพของความสามารถ (Potential capability, C_p) และ ดัชนีชี้วัดความสามารถที่แท้จริงของกระบวนการ (Actual capability, C_{pk}) โดยที่จะใช้ C_p ตัดสินกระบวนการว่ามีความสามารถเพียงใดได้ต่อเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขบางประการ คือเมื่อค่าเฉลี่ยของการแปรผันตามธรรมชาติของกระบวนการอยู่ที่กึ่งกลางของช่วงมาตรฐานของข้อกำหนด ในขณะที่สามารถใช้ C_{pk} ตัดสินกระบวนการได้โดยไม่จำเป็นที่ค่าเฉลี่ยของความแปรผันดังกล่าวต้องอยู่ที่กึ่งกลางของช่วงมาตรฐานของข้อกำหนด

2.3.4.1 ดัชนีชี้วัดศักยภาพของความสามารถของกระบวนการ (Process potential capability, C_p)

สามารถระบุได้ว่ากระบวนการดำเนินการหนึ่งมีความสามารถหรือไม่ โดยพิจารณาจากค่า C_p โดยสามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$C_p = \frac{USL - LSL}{UCL - LCL} = \frac{USL - LSL}{6\sigma}$$

โดย $C_p=1$ เมื่อช่วงของข้อกำหนดมาตรฐานมีค่าเท่ากับช่วงของความแปรผันตามธรรมชาติของกระบวนการ ($\pm 3\sigma$, ความแปรผันของกระบวนการเป็นไปตาม *normal distribution* นั่นคือ 99.73% ของค่าที่สังเกตได้ตกอยู่ในช่วง $+3\sigma$ จากค่าเฉลี่ย) ในกรณีนี้กระบวนการระบุได้ว่ามีความสามารถในระดับที่น้อยที่สุด โดยมีศักยภาพที่จะผลิตผลิตภัณฑ์ที่ไม่บกพร่องจากช่วงของข้อกำหนดเลย ก็ต่อเมื่อค่าเฉลี่ยของกระบวนการ (process mean) ตกอยู่ที่กึ่งกลางของช่วงของข้อกำหนดคืออยู่ที่เป้าหมายที่กำหนด ในกรณีนี้มีโอกาสที่จะผลิตผลิตภัณฑ์ที่บกพร่องเพียงร้อยละ 0.27 หรือ 2700 ส่วนจากล้านส่วน (ppm) กล่าวคือมีโอกาสที่จะพบผลิตภัณฑ์ที่บกพร่องออกจากช่วง $+3\sigma$ เพียง 0.0027 ส่วนจาก 1 ส่วน

- ค่า $C_p > 1$ เมื่อช่วงของข้อกำหนดมาตรฐานมีค่ามากกว่าช่วงของความแปรผันตามธรรมชาติของกระบวนการ ในกรณีนี้ระบุได้ว่ากระบวนการมีศักยภาพของความสามารถ โดยที่จะผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นไปตามของข้อกำหนดได้ต่อเมื่อค่าเฉลี่ยของกระบวนการ (process mean) ตกอยู่ที่กึ่งกลางของช่วงของข้อกำหนดคืออยู่ที่เป้าหมายที่กำหนด

- ค่า $C_p < 1$ เมื่อช่วงของข้อกำหนดมาตรฐานมีค่าน้อยกว่าช่วงของความแปรผันตามธรรมชาติของกระบวนการ ในกรณีนี้ระบุได้ว่ากระบวนการไม่มีความสามารถ

2.3.4.2 ดัชนีวัดความสามารถที่แท้จริงของกระบวนการ (Actual process capability index, Cpk)

เมื่อค่าเฉลี่ยของกระบวนการไม่ตรงกับเป้าหมายของข้อกำหนดค่า C_p จะไม่ให้ข้อมูลที่มีความหมายมากนัก เนื่องจากจะบอกเพียงว่าช่วงของ control limit ของกระบวนการกับช่วงของข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ค่าใดจะกว้างกว่าเท่านั้น แต่ไม่อาจบอกได้ว่ากระบวนการจะผลิตผลิตภัณฑ์ที่บกพร่องหรือไม่จำเป็นต้องใช้ค่า capability index อีกค่าหนึ่งเพื่อพิจารณาหาความสามารถของกระบวนการที่จะตอบสนองต่อข้อกำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ค่าดัชนีวัดความสามารถที่แท้จริง (actual process capacity index, Cpk) ของกระบวนการ

การคำนวณหาค่า Cpk ทำได้โดยใช้สูตรการคำนวณต่อไปนี้

$$C_{pu} = (USL - \text{Average}) / (3\sigma)$$

$$C_{pl} = (\text{Average} - LSL) / (3\sigma)$$

$$C_{pk} = \text{ค่าที่น้อยที่สุดของ } C_{pu} \text{ และ } C_{pl}$$

- ถ้า $C_{pk} < 1.0$ แล้วถือว่ากระบวนการไม่มีความสามารถ

- ถ้า $C_{pk} = 1.0$ แล้วถือว่ากระบวนการมีความสามารถขั้นต่ำสุด

- แนะนำให้ Cpk ควรค่ามากกว่า 1.33

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(C.C Wong , T.A. Dean, & J. Lin, 2003) การขึ้นรูปโลหะโดย รีดขึ้นรูปแบบเย็น จัดเป็นกรรมวิธีขึ้นรูปเย็น (Cold Forming Process) ที่ได้รับการพัฒนาการขึ้นรูปมาจากวิธีการกลึง (Metal Spinning) (Bikramjit Podder, Chandan Mondal, K. Ramesh Kumar, & D.R. Yadav, 2012) กล่าวว่าส่วนใหญ่ใช้สำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกหรือชิ้นงานกลวงไร้ตะเข็บหรือรอยต่อ (Seamless pipe or Tube) เป็นกระบวนการที่มีความละเอียดแม่นยำสูง เหมาะกับการผลิตชิ้นงานที่ต้องการความแข็งแรง และรูปร่างที่ละเอียด เช่นงานด้านภาชนะและท่อกำลังดันสูง ยานยนต์ อากาศ

ยานและอวกาศ รวมทั้งงานด้านอาวุธยุทธโธปกรณ์ เช่น ท่อจรวด ที่จะต้องรับแรงดันสูงและต้องทนความร้อนได้ดีขณะทำการเผาไหม้ด้วย เพราะฉะนั้นการผลิตจึงต้องการความแข็งแรงมากเป็นพิเศษ จึงได้มีการประยุกต์ใช้วิธี Wighted Performance Index (WPI) (K.M. Rajan & K. Narasimhan, 2001) ในการหากระบวนการและวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตท่อจรวดหรือท่อแรงดันสูง ซึ่งจากการศึกษาพบว่ากระบวนการ ริดขึ้นรูปแบบเย็น เป็นกระบวนการที่ดีที่สุดที่ และวัสดุที่เลือกได้นั้นคือ เหล็กมาราจิง (Maraging Steel) แต่เนื่องจากมีราคาแพง จึงให้ใช้เหล็กประเภทเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steel) เช่น AISI 4130, 4140, 4340 แทน

แม้ว่ากระบวนการ ริดขึ้นรูปแบบเย็น จะเป็นกระบวนการที่ดีที่สุดสำหรับการขึ้นรูปท่อที่ต้องการความบางและความแข็งแรงสูง แต่เพื่อให้กระบวนการผลิตมีคุณภาพมากขึ้นจำเป็นต้องมีการศึกษาผลกระทบที่จะก่อให้เกิดข้อบกพร่องเป็นพิเศษ เช่น

2.4.1 ผลกระทบจากกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment)

ทั้งนี้วัสดุที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปด้วยวิธี ริดขึ้นรูปแบบเย็น นั้น ควรที่จะผ่านกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) มาก่อนเพราะส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน (K.M. Rajan et al., 2002) คือ

- กระบวนการอบอ่อน (Annealing) จะช่วยปรับปรุงคุณภาพการขึ้นรูป และช่วยลดความเครียด (Stress) ของเนื้อวัสดุระหว่างการขึ้นรูป

- กระบวนการอบปรกติ (Normalizing) และกระบวนการอบแข็ง (Harden and Temper) จะทำให้เกิดความเครียดของเนื้อวัสดุระหว่างการขึ้นรูป แต่จะช่วยให้มีความแข็งแรง (tensile strength) เพิ่มมากขึ้น ที่ Percent of die distance เดียวกัน

นอกจากการเลือกกรรมวิธีทางความร้อนให้เหมาะสมกับวัสดุที่จะนำมาริดแล้ว จะต้องคำนึงถึงระยะเวลาและอุณหภูมิที่จะใช้ด้วย เพราะถ้ามากหรือน้อยไปก็จะส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องกับชิ้นงานเช่นเดียวกัน เช่น การเกิดข้อบกพร่องสะเก็ดเหล็กแบบเกล็ดปลา และแตกขณะริด เป็นต้น

2.4.2 ผลกระทบจากปัจจัยควบคุมของกระบวนการ

เพื่อลดข้อบกพร่อง (K.M. Rajan & K. Narasimhan, 2001) ที่จะเกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงาน เช่น ชิ้นงานไม่ได้ขนาด, การแตกระดับจุลภาค (Micro-crack), การแตกระดับมหภาค (Macro-crack), ความเบี้ยวของชิ้นงาน (Ovality), ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโต (Diametral growth) เป็นต้น (M. Joseph Davidson, K. Balasubramanian, & G.R.N. Tagore, 2008) และ (M Lakshmana Rao, Dr T V L N Rao, M.V. Ramana, & Dr C S K P Rao, 2009) จึงได้ศึกษาปัจจัยสำคัญ ที่ผลต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธี ริดขึ้นรูปแบบเย็น โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ (Die distance)

- ระยะช่องว่างแม่พิมพ์มาก จะทำให้ท่อมมีผิวหยาบ ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวดได้ และทำให้ความแม่นยำของขนาดของชิ้นงานลดลง นอกจากนี้ยังทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขยายด้วย และไม่ควรกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์การลดความหนาโดยรวมมากกว่าหรือเท่ากับ 90% เพราะจะทำให้ชิ้นงานเกิดข้อบกพร่องแบบแตกได้ง่ายโดยเฉพาะชิ้นงานที่ไม่มีการอบอ่อน ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกนั้นเกิดจาก inclusion ที่เกิดขึ้นระหว่างการรีดนั่นเอง

- ระยะกินลึกน้อยเกินไป จะทำให้ผิวชิ้นงานเป็นขุยเหล็ก และทำให้เกิดข้อบกพร่องสะเก็ดเหล็กแบบเกล็ดปลา เนื่องจากลูกรีดกัดผิวชิ้นงานได้ไม่เต็มหน้าส่งผลให้เกิดประกะแตกกับผิวชิ้นงานได้ หรือทำให้เกิดการผิวที่ไม่สม่ำเสมอได้

2. ความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed)

- ความเร็วรอบของ mandrel ที่สูง จะทำให้ผิวของชิ้นงานดีขึ้น แต่ถ้ามากไปก็จะทำให้เกิดข้อบกพร่องจากสันสะท้อนของ mandrel

3. ความเร็วป้อนของลูกรีดในแนวแกน (Axial feed)

- ความเร็วป้อนต่ำมากไป จะทำให้เกิดรอยที่ผิผิวของชิ้นงานจากการสั่น (Vibration mark) และทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของท่อขยาย นอกจากนี้ยังเป็นสาเหตุให้เกิดข้อบกพร่องแบบแตกคล้ายเกล็ดปลาด้วยเช่นกัน เนื่องจากเกิดความความเค้นตกค้างสูง

- ความเร็วป้อนสูงไป จะทำให้ชิ้นงานมีความหนาไม่สม่ำเสมอ และผิวหยาบเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการฉีกขาดระหว่างการรีด

4. รูปร่างของลูกรีด

- ลูกรีดที่มีรัศมีขนาดใหญ่ จะทำให้เกิดการเปี้ยวของชิ้นงานมากขึ้น

- ปลายของลูกรีดที่สัมผัสกับชิ้นงานมีขนาดกว้างใหญ่ จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมมีขนาดใหญ่ขึ้น

- ปลายของลูกรีดที่มีความคมหรือมุมสัมผัสกับเนื้อวัสดุขณะรีดน้อยจะทำให้เกิดข้อบกพร่องแบบแตกลักษณะคล้ายเกล็ดปลาได้

6. ระยะระหว่างชิ้นงานกับ Mandrel

- ระยะห่างมากไป จะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางขยาย และทำให้เกิดการเปี้ยวของชิ้นงานมากขึ้นด้วย

- ระยะห่างน้อยไป จะทำให้เกิดการแตกด้านในของชิ้นงานระหว่างผิวของชิ้นงานกับแกนหมุนได้ จากความเค้นแรงดึงทำให้สารมลทิน (inclusion) ที่เกิดขณะรีดชิ้นงานเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดรอยแตกร้าขนาดเล็ก (Microcrack) จนนำไปสู่การแตกร้าขนาดใหญ่ในที่สุด (Macrocrack) นอกจากนี้จะทำให้ชิ้นงานติดกับ mandrel ทำให้ดึงไม่ออก

7. รอบการรีดชิ้นงาน

- ข้อบกพร่องส่วนใหญ่ที่พบจะพบหลังจากการรีดจรอบที่ 1 ไปแล้ว โดยสาเหตุหลักๆ เกิดจาก สารมลทิน (inclusion) ในเนื้อวัสดุเองที่นำไปสู่การแตกที่ใหญ่ขึ้น

- การแตกที่ลักษณะคล้ายเกล็ดปลา มักจะพบหลังจากจบการรีดรอบที่ 2 ไปแล้ว ซึ่งโดยส่วนใหญ่เกิดจากผิวของชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ และการเกิดความเค้นตึงต่างกันขณะรีดชิ้นงาน

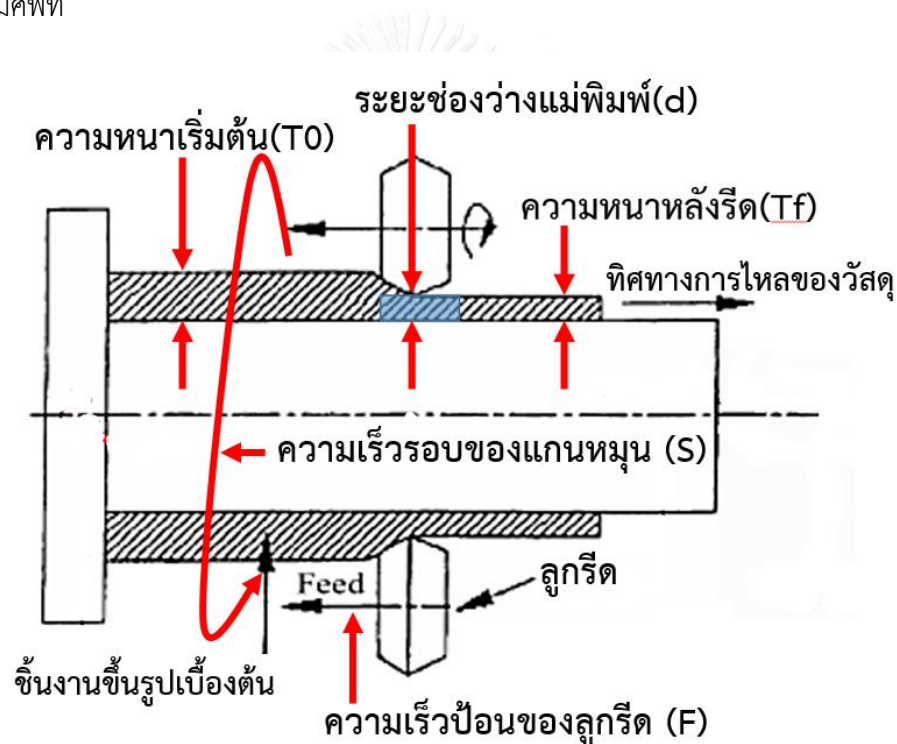
ทั้งนี้ ได้มีนักวิจัยหลายท่านที่มีการคิดวิธีการเพื่อที่จะนำมาใช้หาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ เช่น ได้ใช้วิธี RSM's Box-Behnken Design เพื่อสร้างสมการทำนายค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน โดยมี (M. Joseph Davidson et al., 2008) ปัจจัยที่ใช้ศึกษาคือ ความเร็วรอบ, ความเร็วป้อน และชนิดของน้ำหล่อเย็น รวมถึง (M. Joseph Davidson et al., 2008) มีการนำกระบวนการทางคหุชิ (Taguchi Method) มาใช้หาจุดที่ชิ้นงานยืดออกมายาวที่สุดต่อผลของความเรียบผิว และ (Hamid R. Molladavoudi & Djavanroodi, 2011) ใช้สำหรับหาปัจจัยที่มีผลทำให้ท่อชิ้นงานไม่กลมจากการขึ้นรูปแบบไหลของวัสดุ AISI 321 นอกจากนี้ยังไม่มีการทดลองใช้แบบจำลอง (Simulation) มาใช้ร่วมด้วย โดยโปรแกรมพื้นฐานที่นำมาใช้ร่วมคือ โปรแกรม Finite element (FEA) และ Forge เช่น (M.J. Roy, R.J. Klassen, & J.T. Wood, 2009) ได้ใช้ FEA ทำนายสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น (Liu Xintian Liu Xintian, Liu Chaghong, HuangHu, Zho Xiaoyong, & Sun Xinyi, 2009) ได้ใช้ รูปแบบการจำลองด้วยวิธี ABAQUS/Explicit สำหรับดูผลการขึ้นรูปชิ้นงานระหว่างกระบวนการผลิตและใช้โปรแกรม FEA สำหรับการดูผลขึ้นรูปชิ้นงานหลังกระบวนการผลิต นอกจากนี้ (Marie Houillon, Elisabeth massoni, Eric Ramel, & Roland Loge, 2007) ใช้โปรแกรม Forge ในการจำลองแบบด้วยวิธี Lagrangian และ ALE ซึ่งจะช่วยพัฒนาการปรุงการทำ mesh ระหว่างจุดเชื่อมต่อของชิ้นงานและลูกรีดได้ดี ทำให้ทำนายความเสียของลูกรีดได้ดีขึ้น นอกจากนี้ (G. Zeng, S.H. Li, Yu, & and X.M. Lai, 2009) การใช้รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้หาค่าที่เหมาะสมในการหมุนขึ้นรูปแบบเย็น เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนมาก จึงยังไม่มีนักวิจัยท่านใดที่สามารถสร้างแบบจำลองสถานการณ์การขึ้นรูปด้วยวิธี รีดขึ้นรูปแบบเย็น ได้อย่างสมบูรณ์แบบ

บทที่ 3

การนียมปัญหา

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการนียมปัญหา ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกในการดำเนินการวิจัย เพื่อทำให้เห็นทิศทางของงานวิจัย โดยนำเอาเครื่องมือคุณภาพของกระบวนการออกแบบการทดลอง (Design of experiment) นำมาประยุกต์ใช้เพื่อการปรับปรุงกระบวนการผลิตและให้ได้มาซึ่งการกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Flow forming

3.1 นียมศัพท์



รูปที่ 14 นียมศัพท์ที่ใช้ในกระบวนการรีด

1. ความหนาเริ่มต้น (T_0) คือ ความหนาของชิ้นงานขึ้นรูปเบื้องต้นในงานวิจัยนี้คือ 15 มม.
2. ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ (d) คือ ระยะที่ออกแบบไว้ในการขึ้นรูปให้ได้ตามที่ต้องการ โดยลูกรีดและแกนหมุนทำหน้าที่เสมือนเป็นตาย (die) ในการขึ้นรูป
3. ความหนาเริ่มต้น (T_i) คือ ความหนาเริ่มต้นในแต่ละรอบการรีด (เมื่อ $i = 1, 2$)

4. ความหนาหลังรีด (Tf) คือ ความหนาที่ได้หลังจากการรีดในแต่ละรอบ (เมื่อ $f = 2, 3$)
5. ความเร็วรอบของแกนหมุน(S) คือ ความเร็วรอบที่ใช้ควบคุมให้แกนหมุนและชิ้นงานหมุน มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที
6. ความเร็วป้อนของลูกรีด (Hamid R. Molladavoudi & Djavanroodi) คือ ระยะการป้อนชิ้นงานหรือลูกรีดเข้าหาชิ้นงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที
7. ระยะการขยายตัวของวัสดุ (Spring back, Sb) คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการยืดหยุ่นของวัสดุ (Modulus of Elasticity) ภายหลังจากขึ้นรูปและปล่อยแรงที่กระทำกับวัสดุ ทำให้เนื้อของวัสดุ มักจะติดตัวกลับ จากพลังงานของการยืดตัว (Elastic Energy) ที่ตกค้างและพยายามทำให้เนื้อวัสดุ กลับคืนสภาพเดิม

3.2 การกำหนดทีมงานดำเนินงาน

สำหรับการศึกษางานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดทีมงานดำเนินงาน โดยคัดเลือกจากผู้ที่มีประสบการณ์และได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากผู้ผลิตเครื่อง Flow forming ตั้งแต่การติดตั้งเครื่องจักรและทดสอบขึ้นรูปชิ้นงาน โดยทีมงานแต่ละคนได้มีการกำหนดหน้าที่ที่จะต้องทำงานร่วมกันคือการประชุมระดมสมอง เพื่อช่วยกันพิจารณาและคัดกรองปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อคุณภาพการขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งทีมงานที่คัดเลือกมามีดังนี้

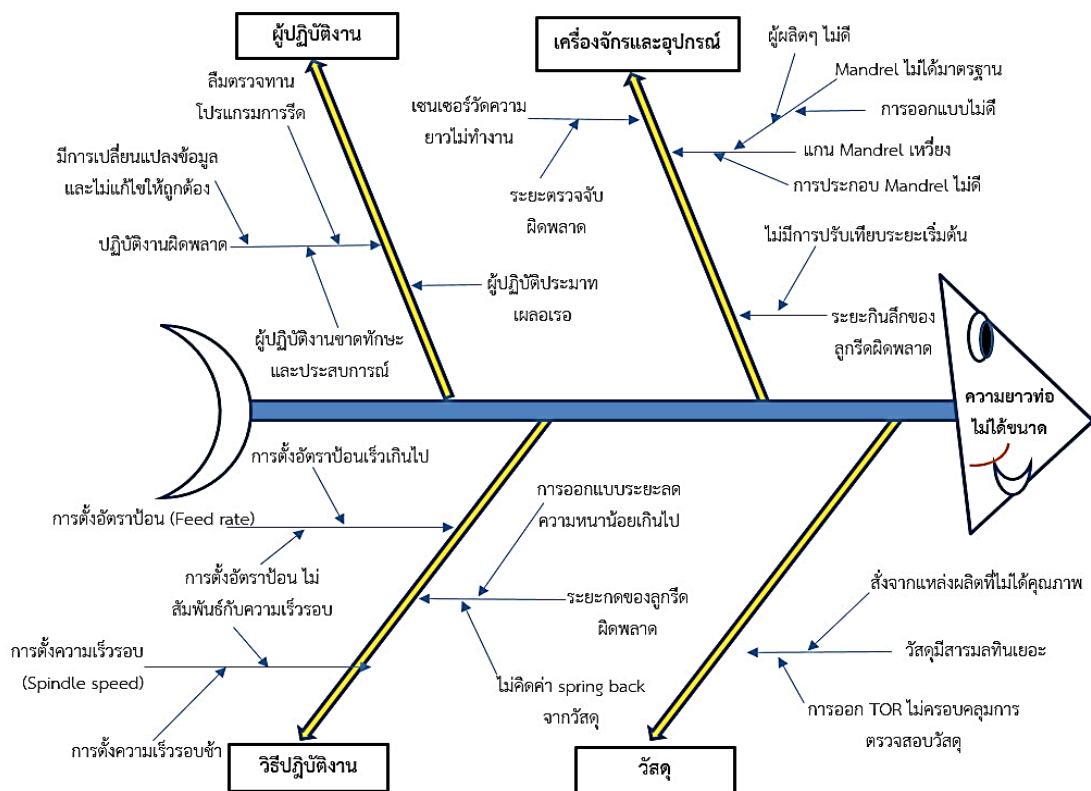
- ผู้อำนวยการโรงปฏิบัติการ
- ผู้อำนวยการส่วนงานวิศวกรรม
- วิศวกรควบคุมการผลิต 1
- วิศวกรควบคุมการผลิต 2
- หัวหน้าฝ่ายผลิต
- พนักงานฝ่ายผลิต
- พนักงานซ่อมบำรุง
- ผู้ดำเนินการวิจัย

3.3 การคัดเลือกปัจจัยและระดับที่จะทำการศึกษา

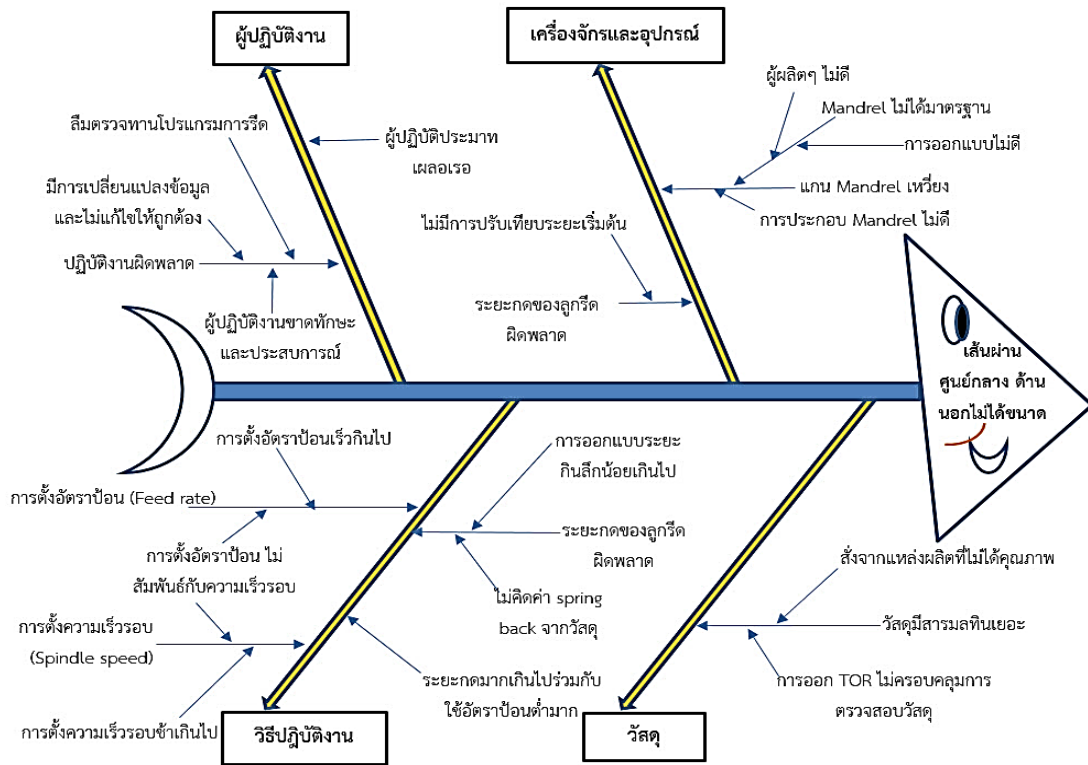
3.3.1 การคัดเลือกปัจจัย (Factor)

จากข้อบกพร่องที่พบในหัวข้อ 1.3 ผู้ดำเนินการวิจัยและทีมงานดำเนินงานได้ระดมสมองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยของสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องดังกล่าวสามารถสรุปได้ตั้งรูปที่ 15-17 เป็นหลัก โดยผลจากการวิเคราะห์สาเหตุดังกล่าวจึงได้มีการหาวิธีควบคุมปัจจัยที่สามารถแก้ไขได้ทันที และ

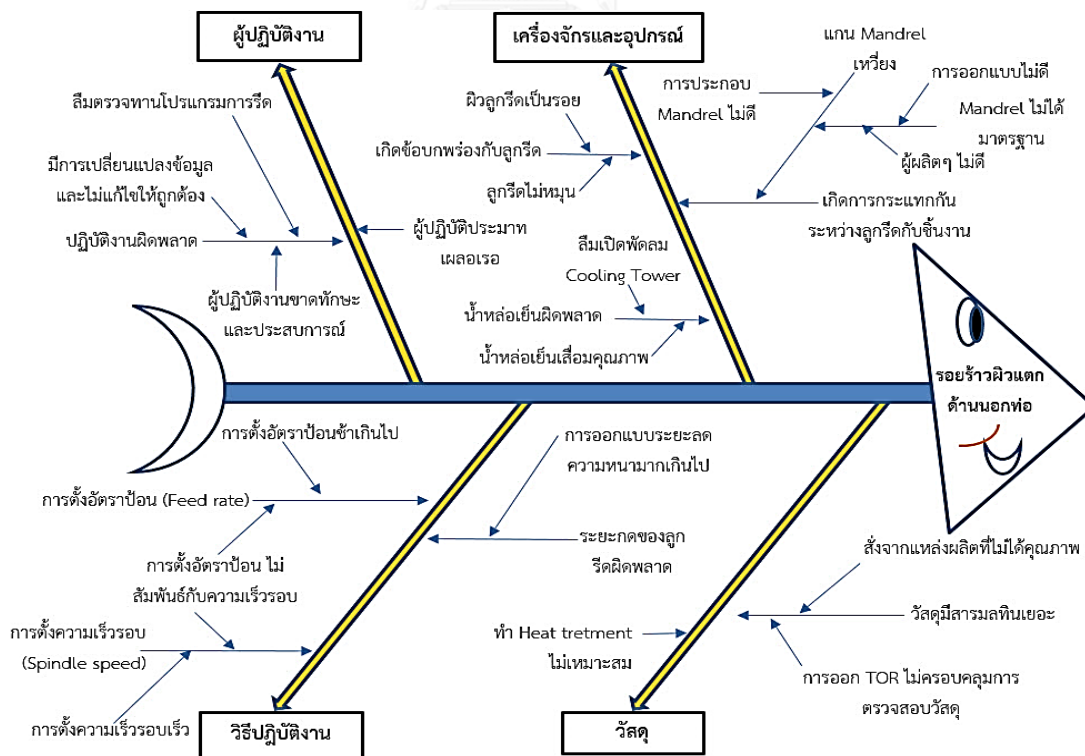
ปัจจัยที่ยังต้องศึกษาหาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเพิ่มเติม โดยสามารถสรุปปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 5 ซึ่งพบว่าปัจจัยที่ต้องทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากปัจจัยดังกล่าวต่อข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น จำนวน 3 ปัจจัย คือ 1. ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ (Die distance) 2. ความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate) และ 3. ความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed) ตามลำดับ



รูปที่ 15 แผนผังก้างปลาสาเหตุของข้อบกพร่องเนื่องจากขนาดของท่อไม่ได้ขนาด



รูปที่ 16 แผนผังก้างปลาสาเหตุของข้อบกพร่องเนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนอกไม่ได้ขนาด



รูปที่ 17 แผนผังก้างปลาสาเหตุของข้อบกพร่องเนื่องจากเกิดรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ

ตารางที่ 5 แนวทางการควบคุมปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องในการทดลอง

หัวข้อสาเหตุ	ปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง	ข้อบกพร่องที่พบ	แนวทางป้องกัน	หมายเหตุ
ผู้ปฏิบัติงาน	ผู้ปฏิบัติงานล้มตรวจทานโปรแกรม	D1 ความยาวของท่อไม่ได้ขนาด	1. สร้างขั้นตอนการปฏิบัติงาน	1. สร้างขั้นตอนการปฏิบัติงาน 2. สร้าง Check sheet ให้ผู้ปฏิบัติงานตรวจสอบก่อนปฏิบัติงานทุกครั้ง
		D2 เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกไม่ได้ขนาด		
		D6 ผิวชิ้นงานมีรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ		
	มีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลและไม่แก้ไขให้ถูกต้อง	D1 ความยาวของท่อไม่ได้ขนาด	1. กำหนดสิทธิ์ผู้ที่สามารถแก้ไขโปรแกรมได้	1. กำหนดสิทธิ์ผู้ที่สามารถแก้ไขโปรแกรมได้ 2. สร้าง Check sheet ให้ผู้ปฏิบัติงานตรวจสอบก่อนปฏิบัติงานทุกครั้ง
		D2 เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกไม่ได้ขนาด		
		D6 ผิวชิ้นงานมีรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ		
ผู้ปฏิบัติงานขาดทักษะและประสบการณ์	ผู้ปฏิบัติงานขาดทักษะและประสบการณ์	D1 ความยาวของท่อไม่ได้ขนาด	1. สร้างขั้นตอนการปฏิบัติงาน	1. สร้างขั้นตอนการปฏิบัติงาน 2. สร้าง Check sheet ให้ผู้ปฏิบัติงานตรวจสอบก่อนปฏิบัติงานทุกครั้ง 3. อบรมให้ความรู้และทดสอบทักษะอย่างสม่ำเสมอ
		D2 เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกไม่ได้ขนาด		
		D6 ผิวชิ้นงานมีรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ		

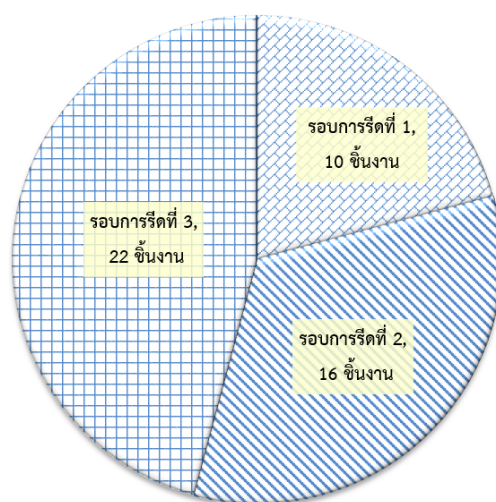
ตารางที่ 5 แนวทางการควบคุมปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องในการทดลอง (ต่อ)

หัวข้อสาเหตุ	ปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง	ข้อบกพร่องที่พบ	แนวทางป้องกัน	หมายเหตุ
วัสดุ	D1	ความยาวของท่อไม่ได้ขนาด	ทำการตรวจสอบวัสดุที่มีสารมลทิน น้อย มาใช้ในการทดลองโดยตรวจสอบจาก โครงสร้างจุลภาค	
	D2	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกไม่ได้ขนาด		
	D6	ผิวชั้นงานมีรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ	1. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค 2. กำหนดขั้นตอนการปฏิบัติงานให้ ชัดเจน	
	D6	ผิวชั้นงานมีรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ		
		ทำ Heat treatment ไม่เหมาะสม		
		แกน Mandrel เหวี่ยง		
เครื่องจักรและ อุปกรณ์	D1	ความยาวของท่อไม่ได้ขนาด	สร้างขั้นตอนการปฏิบัติงานในการ ประกอบ และตรวจสอบการเหวี่ยงและ วัดความตรงของ Mandrel ก่อนการ ปฏิบัติงาน	ดำเนินการโดย กำหนดค่าการแกว่ง ไม่เกิน 0.04 มม.
	D1	เซนเซอร์วัดความยาวไม่ทำงาน	ตรวจสอบก่อนการปฏิบัติงานทุกครั้ง	
	D1	กำหนดระยะการกดของลูกรีด ผิดพลาด (Thickness reduction)	หากระยะการกดที่เหมาะสมในแต่ละรอบ การรีด	ต้องทดลอง

ตารางที่ 5 แนวทางการควบคุมปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องในการทดลอง (ต่อ)

หัวข้อสาเหตุ	ปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง	ข้อบกพร่องที่พบ	แนวทางป้องกัน	หมายเหตุ		
เครื่องจักรและอุปกรณ์	เกิดข้อบกพร่องกับลูกรีด	D6	ผิวชิ้นงานมีรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ	1. ตรวจสอบก่อนการปฏิบัติงานทุกครั้ง 2. หากมีรอยให้ใช้กระดาษทรายขัด		
		D6	ผิวชิ้นงานมีรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ	1. ตรวจสอบการทำงานของระบบก่อนการปฏิบัติงานทุกครั้ง 2. มีการบันทึกชั่วโมงการใช้งานและจัดทำการอบการเปลี่ยนน้ำหล่อเย็น		
		D1	ความยาวของท่อไม่ได้ขนาด	หาความความเร็วบ่อนของลูกรีดที่เหมาะสมในแต่ละรอบการรีด		ต้องทดลอง
	วิธีปฏิบัติงาน	ความเร็วบ่อนของลูกรีด (Feed rate)	D2	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกไม่ได้ขนาด		
			D6	ผิวชิ้นงานมีรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ		
			D1	ความยาวของท่อไม่ได้ขนาด		
ความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed)		D2	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกไม่ได้ขนาด			
		D6	ผิวชิ้นงานมีรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ			
		D1	ความยาวของท่อไม่ได้ขนาด			
ระยะการกดของลูกรีดตีพลาต (Thickness reduction)	D2	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกไม่ได้ขนาด				
	D6	ผิวชิ้นงานมีรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ				
	D6	ผิวชิ้นงานมีรอยร้าวหรือแตกด้านนอกท่อ				

แต่เนื่องจากกระบวนการ ริดขึ้นรูปแบบเย็น เป็นกระบวนการที่ต้องมีรอบการรีดเนื้อวัสดุของชิ้นงานมากกว่า 1 รอบจนกว่าจะได้ความหนาตามที่ต้องการ ดังนั้นข้อบกพร่องบางอย่างอาจพบแล้วสามารถปรับแก้ได้ทันที แต่บางอย่างไม่สามารถแก้ไขได้ทันทีจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์กระบวนการว่าปัจจัยเดียวหรือปัจจัยร่วมตัวใดบ้างที่ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่อง นอกจากนี้ข้อบกพร่องบางอย่างไม่สามารถพบได้ในรอบการรีดรอบใดรอบหนึ่ง ต้องรอให้ผ่านการรีดรอบอื่นๆ ก่อน จึงจะสามารถพบข้อบกพร่องได้ และเพื่อให้สามารถวิเคราะห์และแก้ไขสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องในแต่ละรอบการรีดได้มากขึ้น จึงได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาข้อบกพร่องจากจำนวนชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 48 ชิ้นงานว่าเกิดจากรอบการรีดใดบ้างได้ผลดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 กราฟจำนวนข้อบกพร่องชิ้นงานที่พบในแต่ละรีดการรอบ

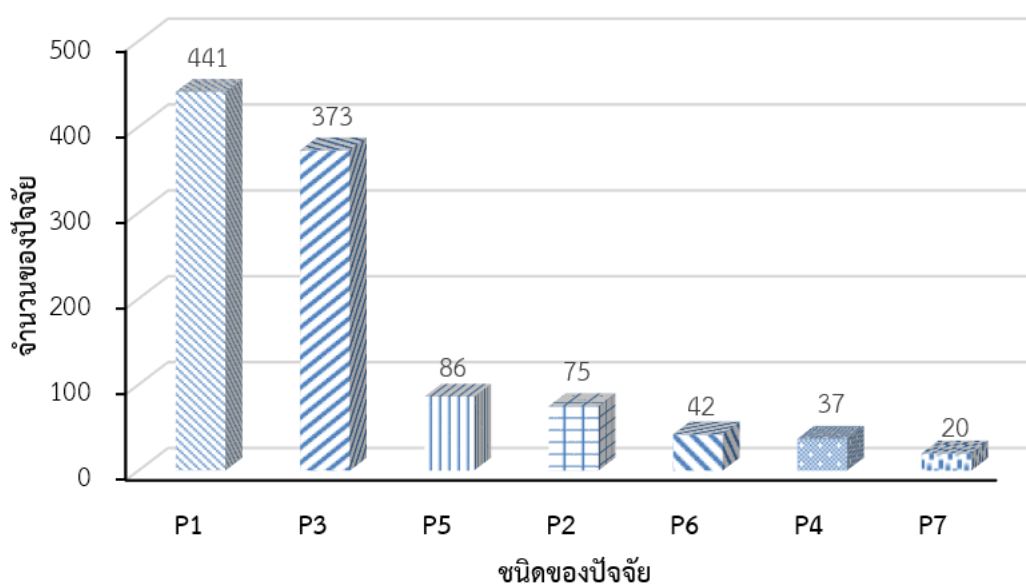
ทั้งนี้ทีมงานดำเนินงานได้ร่วมกันวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่อง โดยเบื้องต้นสามารถสรุปปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องได้ 6 ปัจจัย ดังตารางที่ 6 ทั้งนี้จะพิจารณาในส่วนของ การออกแบบกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง Flow forming เป็นหลัก สำหรับปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับ ผู้ปฏิบัติงาน, เครื่องจักร, วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน รวมถึงสภาพแวดล้อมขณะทำงานได้ทำการควบคุมเพื่อลดปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องดังที่กล่าวในตารางที่ 5 ซึ่งเมื่อผู้ดำเนินการวิจัยและทีมงานดำเนินงานทำการวิเคราะห์และรวบรวมข้อบกพร่องที่พบที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบการรีดตลอดจนปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องโดยใช้แบบสอบถามดัง **Error! Reference source not found.** สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 19 ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวจึงสามารถยืนยันปัจจัยที่จะศึกษามี 3 ปัจจัย ดังนี้

1. ระยะช่องว่างแม่พิมพ์
2. ความเร็วป้อนของลูกรีด
3. ความเร็วรอบของแกนหมุน

และจากรูปที่ 18 จึงเป็นที่มาของการศึกษากระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น เฉพาะการรีดรอบที่ 3 เพียงอย่างเดียวโดยมีรายละเอียดการพิจารณา ดังนี้

ตารางที่ 6 ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง

รหัสปัจจัย	ปัจจัย
P1	ระยะช่องว่างแม่พิมพ์
P2	คุณภาพของน้ำหล่อเย็นไม่เหมาะสม
P3	ความเร็วป้อนของลูกรีด
P4	ระยะเริ่มกดขึ้นงาน
P5	ความเร็วรอบของแกนหมุน
P6	ระยะช่องว่างระหว่างเนื้อวัสดุกับแกนหมุน



รูปที่ 19 กราฟชนิดของปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่อง

ตารางที่ 7 ผลความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผลของข้อบกพร่องในแต่ละรอบการรีด

รอบการรีด	ปัญหาที่พบ	รายละเอียด	ปัจจัยที่ส่งผล						
			P1	P2	P3	P4	P5	P6	
1	เครื่องทำงานเกินพิกัด	1. เครื่องหยุดกระทันหันไม่จบขั้นตอน	8	0	5	0	0	0	
		2. ผิวขึ้นงานเกิดรอยไหม้ดำ	8	8	6	0	0	0	
		3. ผิวขึ้นงานมีลักษณะแตกคล้ายเกล็ดปลา	8	0	7	0	0	3	
	ขึ้นงานไม่ได้ขนาด	1. เครื่องหยุดกระทันหันไม่จบขั้นตอน ส่งผลให้ ขึ้นงานไม่ได้ขนาดตามที่คาดหวัง	8	0	8	0	0	0	
		2. ขึ้นงานมีขนาดมากกว่าค่าที่กำหนด	7	0	8	0	0	0	
2	เครื่องทำงานเกินพิกัด	1. เครื่องหยุดกระทันหันไม่จบขั้นตอน	8	0	5	0	0	0	
		2. ผิวขึ้นงานเกิดรอยไหม้ดำ	7	8	6	0	0	0	
		3. ผิวขึ้นงานมีลักษณะแตกคล้ายเกล็ดปลา	7	0	8	0	0	3	
	ขึ้นงานไม่ได้ขนาด	1. เครื่องหยุดกระทันหันไม่จบขั้นตอน ส่งผลให้ ขึ้นงานไม่ได้ขนาดตามที่คาดหวัง	8	0	8	0	0	0	
		2. ขึ้นงานมีขนาดมากกว่าค่าที่กำหนด	7	0	8	0	0	0	
	พบการแตกที่ปลายชิ้นงาน	มีการแตกที่ปลายของชิ้นงานหลังจากลูกรีดเริ่ม กดชิ้นงาน	6	0	0	7	0	0	
	เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน ท่อยาย	ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกที่กำหนด ไม่สัมพันธ์กับความหนาที่ต้องการ	8	0	8	0	8	0	
ผิวขึ้นงานมีลักษณะ เป็นขุยเหล็ก	ผิวขึ้นงานหลังรีดมีลักษณะเป็นขุยเหล็กเป็นเส้นๆ บางหรือมีลักษณะการแตกคล้ายเกล็ดปลาแบบบาง	8	1	8	0	8	4		
3	ขึ้นงานไม่ได้ขนาด	1. ขึ้นงานมีขนาดมากกว่าค่าที่กำหนด	8	0	6	0	0	8	
		2. ผิวขึ้นงานเกิดรอยไหม้ดำ	8	8	7	0	0	0	
		3. ขึ้นงานมีขนาดต่ำกว่าค่าที่กำหนด	8	0	8	0	0	8	
		4. ความหนาของชิ้นงานไม่คงที่	5	0	4	1	6	4	
	พบการแตกที่ปลายชิ้นงาน	มีการแตกที่ปลายของชิ้นงานหลังจากลูกรีดเริ่ม กดชิ้นงาน	5	0	0	8	3	0	
	เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน ท่อยาย	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกที่กำหนดไม่ สัมพันธ์กับความหนาที่ต้องการ	8	0	6	0	5	0	
	ผิวขึ้นงานมีลักษณะ เป็นขุยเหล็ก	ผิวขึ้นงานหลังรีดมีลักษณะเป็นขุยเหล็กเป็นเส้นๆ บาง หรือมีลักษณะการแตกคล้ายเกล็ดปลาแบบบาง	7	0	6	0	5	0	
	ผิวขึ้นงานแตก	ผิวขึ้นงานหลังรีดมีลักษณะการแตกคล้าย เกล็ดปลาแบบกินลึกเข้าสู่ผิวขึ้นงาน หรือแตกเป็น แผ่นแบบแนวยาว	7	0	6	0	5	3	
	ไม่สามารถเอาชิ้นงาน ออกมาจากแกนหมุนได้	หลังจากรีดชิ้นงานเสร็จไม่สามารถนำชิ้นงานออก จากแกนหมุนได้	6	0	0	0	0	8	
ผลรวม			441	75	373	37	86	20	42

และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่าข้อบกพร่องส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่รอบการรีดรอบที่ 3 เป็นหลัก จากนั้นจึงเป็นรอบการรีดรอบที่ 2 และ 1 ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาความสำคัญของการรีดแต่ละรอบที่จำเป็นต้องศึกษาอย่างละเอียดหรือไม่นั้น จากหัวข้อ 2.3.2 สามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 8 การควบคุมข้อบกพร่องในการรีดท่อแรงดันสูงแต่ละรอบการรีด

รอบการรีด	ศึกษา/ไม่ศึกษา	เหตุผล
รอบที่ 1	ไม่ศึกษา	วัสดุมีความเค้นที่จะส่งให้เกิดข้อบกพร่องน้อยเนื่องจากในรอบการรีดรอบนี้ค่าความแข็งแรงและความแข็งจะน้อยกว่ารอบอื่นๆ ทั้งนี้ข้อบกพร่องที่มักพบในการรีดรอบนี้ส่วนใหญ่เกิดจากปัจจัยการลดความหนาของชิ้นงานมากเกิดไป จึงทำให้เกิดภาระงาน (Load) และค่าความต้านแรงดึง (tensile stress) สูง ส่งผลให้เครื่องทำงานเกิดพิบัติ ชิ้นงานมีข้อบกพร่องแบบใหม่ และเกิดการพับของเนื้อวัสดุไปตามทิศทางการรีดได้ ทั้งนี้การควบคุมการลดความหนาที่เหมาะสม จะส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องในรอบการรีดนี้ลดลง
รอบที่ 2	ไม่ศึกษา	สำหรับการรีดชิ้นงานรอบที่ 2 เหตุผลของการไม่ศึกษาเป็นเช่นเดียวกับการรีดรอบที่ 1 ทั้งนี้จำเป็นต้องเลือกลดความหนาให้ได้มากที่สุด เพื่อให้รอบที่ 3 ต้องลดความหนาของชิ้นงานไม่มากหรือน้อยเกินไปจนทำให้เกิดข้อบกพร่อง
รอบที่ 3	ศึกษา	เนื่องการรีดรอบนี้ต้องมีการควบคุมเพื่อให้ชิ้นงานมีความใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุดโดยไม่ทำให้เกิดข้อบกพร่องเลย จึงจำเป็นต้องศึกษาให้ได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการรีด

จากตารางที่ 8 เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อการรีดชิ้นงานรอบที่ 1 และรอบที่ 2 ที่เหมาะสมสำหรับนำไปรีดรอบที่ 3 ให้ได้ขนาดตามที่กำหนด จึงได้มีการพิจารณาออกแบบวิธีการรีดชิ้นงานให้สามารถคัดกรองปัจจัยได้ดี และลดจำนวนชิ้นงานที่จะใช้ในการทดสอบให้น้อยที่สุด จึงได้มีการประชุมเพื่อระดมสมองในการดำเนินการพิจารณาโดยอ้างอิงหลักการดังนี้

- 1) เปอร์เซ็นต์การลดความหนาโดยรวม (Total percent of thickness reduction) ต้องไม่เกิน 90%
- 2) เพื่อให้สามารถตรวจวัดค่าของปัจจัยที่กำหนดให้กับการรีดได้อย่างชัดเจนจึงทำการออกแบบชิ้นงาน 1 ชิ้นต่อ 1 รอบการรีด เพื่อให้ได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการรีดชิ้นงานรอบ 1 และ 2
- 3) เพื่อให้การรีดรอบที่ 3 ได้ค่าขนาดของชิ้นงานเข้าใกล้ค่าที่กำหนดมากที่สุดและไม่เกิดข้อบกพร่องจำเป็นต้องลดความหนาของชิ้นงานในรอบที่ 1 และ 2 ให้มากที่สุด เนื่องจากในรอบที่ 3 จะเกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงานเยอะ หากกำหนดความหนาที่จะรีดมากขึ้นอีกจะส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องกับชิ้นงานได้ง่าย และโอกาสที่ชิ้นงานจะแตกได้ง่ายเนื่องจากสารมลทิน (Inclusion) ที่มีทำให้เกิดค่าความเค้นมากขึ้นในระหว่างเกิดรีด ที่พร้อมจะเป็นจันเริ่มต้นให้เกิดการแตกขนาดเล็ก (Microcrack) จนนำไปสู่การแตกระดับมหภาคได้ (Macrocrack)

3.3.2 การเลือกระดับ (Level)

สำหรับงานทดลองนี้จะกำหนดระดับของปัจจัยเป็นแบบตายตัว (Fixed Levels) เนื่องจากปัจจัยที่เลือกมาทั้ง 3 ตัวนั้น เป็นปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าได้แน่นอน และงานวิจัยนี้ใช้ทฤษฎีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ในการศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลตอบ ดังนั้นปัจจัยแต่ละตัวจึงมีระดับ 2 ระดับ โดยแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยของชิ้นงานต้นแบบนี้ ผู้วิจัยจะพิจารณาและอ้างอิงจากการดำเนินการดังนี้

1) ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ (Die distance)

จากข้อ 2.3.2 สำหรับการออกแบบระยะช่องว่างแม่พิมพ์ในแต่ละรอบการรีดนั้น จะพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การลดความหนาชิ้นงานโดยรวม (Total percentage die distance) โดยจะต้องลดความหนาไม่เกิน 90% ของความหนาเดิมก่อนรีดชิ้นงาน เพื่อป้องกันไม่เกิดข้อบกพร่องแบบแตกที่ผิวของชิ้นงาน สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบที่รอบการรีดรอบที่ 3 และเพื่อให้ความหนาสุดท้ายมีเปอร์เซ็นต์การลดความหนาของชิ้นงานโดยรวมไม่เกิน 90% นั่นก็คือที่ความหนา $t_f = 1.7$ มม. จากความหนาทั้งต้นเดิมคือ 15 มม. จึงได้ระดับที่ศึกษาดังนี้

ระดับที่ 1 : $t_f = 2$ มม. เมื่อ Total percentage die distance = 87%

ระดับที่ 2 : $t_f = 1.7$ มม. เมื่อ Total percentage die distance = 89%

2) ความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed)

ค่าความเร็วรอบของแกนหมุนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะอ้างอิงผลจากการทดลองเดินเครื่อง Flow forming ที่มีทำการเดินเครื่องทดสอบด้วยความเร็วที่ต่างกันออกไป โดยพิจารณาจากหน้าจอมอนิเตอร์ของเครื่อง และทำการปรับความเร็วรอบตั้งแต่ 60 รอบต่อนาทีจนถึงค่า 130 รอบต่อนาที ซึ่งพบว่าที่ความเร็วรอบที่มากกว่า 120 รอบต่อนาที แกนหมุนเกิดการสั่นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจากหัวข้อ 2.3.2 จะพบว่าถ้าความเร็วรอบของแกนหมุนยิ่งมากยิ่งขึ้น แต่ถ้ามากเกินไปจะทำให้แกนหมุนสั่น โดยจะส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องที่ผิวของชิ้นงานทำให้ผิวของชิ้นงานมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ และอาจทำให้เกิดการแตกได้ ดังนั้นระดับของความเร็วรอบของแกนหมุนที่ใช้ในการศึกษารั้งนี้คือ

ระดับที่ 1 : $S = 60$ รอบต่อนาที

ระดับที่ 2 : $S = 120$ รอบต่อนาที

3) ความเร็วป้อนของลูกกรีด (Feed rate)

สำหรับอัตราการป้อนจะทำให้การเสียรูป (deformation) ของชิ้นงานในแนวรัศมี และจะเคลื่อนที่ไปในแนวแกนของแกนหมุน สำหรับการพิจารณาเลือกกระดับของความเร็วป้อนของลูกกรีดมาศึกษานั้นได้มีการทำการกำหนดแบบการทดสอบสำหรับคัดกรองพารามิเตอร์ที่จะนำมาใช้ในส่วนนี้ดังนี้

3.1 กำหนดตัวแปรต้น

ตัวแปรต้นที่ต้องการทดสอบคือ ค่าความเร็วป้อนของลูกกรีด โดยจะกำหนดค่าที่ใช้ในการทดสอบคือ 30 40 60 80 90 มม.ต่อนาที

3.2 กำหนดตัวแปรตามคือ

- ระยะเวลาความหนาของชิ้นงานหลังจากการรีดที่น้อยที่สุด
- ชิ้นงานจะต้องไม่พบข้อบกพร่องหลังจากรีดชิ้นงานจบ

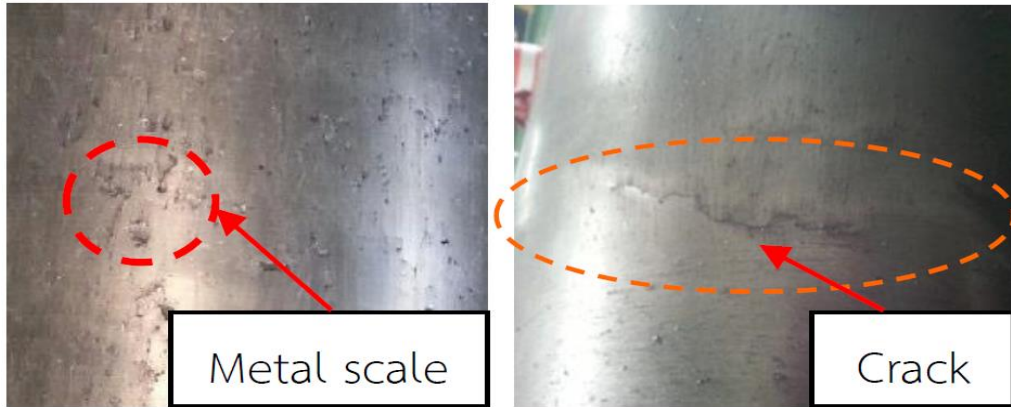
3.3 กำหนดตัวแปรควบคุม

- มีการปรับเทียบเครื่องจักรแล้ว
- ทำการกำหนดระยะช่องว่างแม่พิมพ์มาหนึ่งค่า สำหรับการทดสอบนี้คือ 8 มม.
- กำหนดค่าความเร็วรอบของลูกกรีดสำหรับการทดสอบที่ 120 รอบต่อนาที

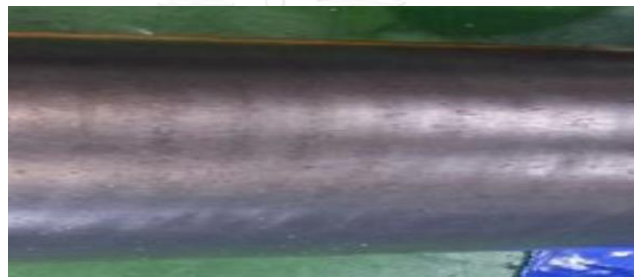
ซึ่งจากทดลองพบว่า ที่ความเร็วป้อนของลูกกรีดต่ำกว่า 50 มม.ต่อนาที ทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อด้านในขยาย โดยที่ความหนาของชิ้นงานที่ 40 มม.ต่อนาที พบข้อบกพร่องแบบแตกและมีลักษณะคล้ายเกล็ดปลาหรือสะเก็ดเหล็กดังรูปที่ 20 และความเร็วป้อนของลูกกรีดที่ 90 มม.ต่อนาที พบว่าผิวของชิ้นงานมีความหนาไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 21 ดังนั้น ระดับของความเร็วป้อนของลูกกรีดที่นำมาใช้ในการศึกษานี้คือ

ระดับที่ 1 : F = 40 มม.ต่อนาที

ระดับที่ 2 : F = 80 มม.ต่อนาที



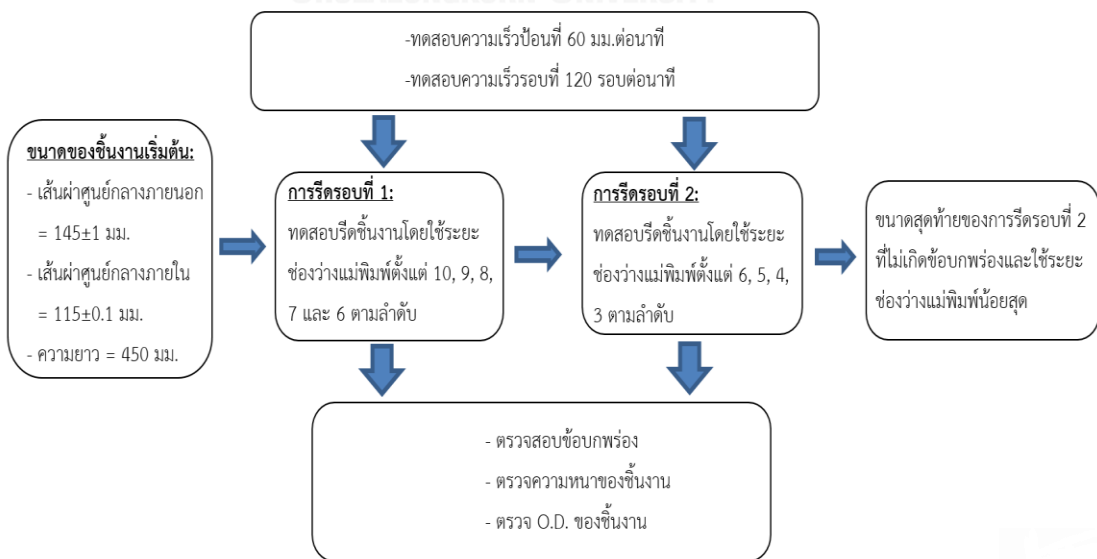
รูปที่ 20 ข้อบกพร่องแบบแตกและมีลักษณะเป็นสะเก็ดเหล็กหรือเกล็ดปลา



รูปที่ 21 ผิวของชิ้นงานที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอหรือเป็นคลื่น

3.3.3 การกำหนดปัจจัยสำหรับการรีดชิ้นงานในรอบที่ 1 และ 2

จากแนวทางการพิจารณาที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงได้ออกแบบการรีดชิ้นงานดังนี้



รูปที่ 22 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบรีดชิ้นงานในรอบที่ 1 และ 2

3.3.3.1 ผลการทดสอบหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการรีดรอบที่ 1

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการรีดรอบที่ 1

Expected Value		Measuring Value		Remark
Die distance (mm)	%Thickness Reduction	O.D. (mm)	Thickness (mm)	
10	33.33	137.01	11.01	No defect
9	40.00	135.07	10.04	No defect
8	46.67	133.28	9.14	No defect
7	53.33	131.63	8.32	Defect: Crack/Fish scale
6	60.00	129.1	7.05	Defect: Crack/Fish scale

ผลการทดสอบจากตารางที่ 10 พบว่าระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ชิ้นงานความหนาแน่นที่สุดโดยไม่เกิดข้อบกพร่องคือระยะที่ 8 มม. โดยจะทำให้ได้ชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 133.28 มม. และความหนาเท่ากับ 9.14 มม. และเมื่อนำมาทดสอบความแข็งโดยใช้ร็อคเวลสเกลซี (Rockwell C) ได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 31.45 HRC และความแข็งแรง (Tensile strength) เท่ากับ 962.652 Mpa.

3.3.3.2 ผลการทดสอบหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการรีดรอบที่ 2

สำหรับการรีดชิ้นงานรอบที่ 2 ได้นั้นจะต้องผ่านการรีดชิ้นงานรอบที่ 1 มาก่อน โดยปัจจัยที่ใช้รีดงานรอบที่ 1 จะใช้ค่าจากผลในหัวข้อ 3.3.3.1 ซึ่งได้ขนาดของชิ้นงานดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการวัดค่าชิ้นงานหลังจบกระบวนการรีดท่อรอบที่ 1

Average of Thickness (mm)	Average of OD. (mm)	Hardness (HRC)	Total Length (mm)
9.11	133.29	Min.=31.80 Max.=33.00 (Average≈31.45)	590

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการรีดรอบที่ 2

Expected Value		Measuring Value		Remark
Die distance (mm)	%Thickness Reduction	O.D. (mm)	Thickness (mm)	
6	34.13	139.19	6.97	No defect
5	45.12	127.11	6.08	No defect
4	56.09	125.44	5.12	No defect
3	67.07	123.3	3.25	Defect: Fish scale and burn on surface

ผลการทดสอบจากตารางที่ 11 พบว่าระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ชิ้นงานความหนาแน่นที่สุดโดยไม่เกิดข้อบกพร่องคือระยะที่ 4 มม. โดยจะทำให้ได้ชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 125.44 มม. และความหนาเท่ากับ 5.12 มม. และเมื่อนำมาทดสอบความแข็งโดยใช้รีดเวลสเกลซี (Rockwell C) ได้ค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 35.26 HRC และความแข็งแรง (Tensile strength) เท่ากับ 975.322 Mpa.

จากผลการรีดในหัวข้อ 3.3.3.1 และ หัวข้อ 3.3.3.2 ทำให้สามารถกำหนดการทดลองสำหรับการหาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานสำหรับการรีดในรอบที่ 3 ได้ดังตารางที่ 12 ซึ่งจะนำไปใช้ในการศึกษาในบทที่ 5 ต่อไป

ตารางที่ 12 การออกแบบโปรแกรมการรีดในแต่ละรอบของการทดลอง

รอบการรีด	%Thickness reduction	Cum. %Thickness reduction	Die Distance (mm)	ความหนา ออกแบบ (มม.) (Tf=d+Sb)
1	33%	33%	9	10
2	50%	67%	4	5
3	60%	87%	2	2.75
	68%	89%	1.7	

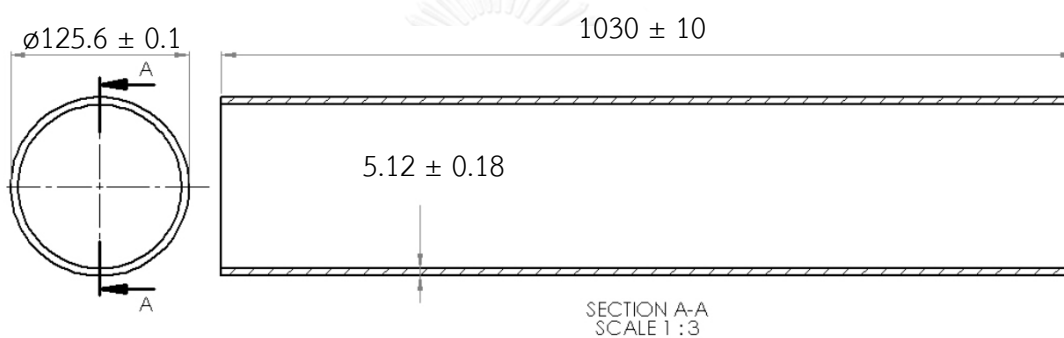
บทที่ 4

วิธีดำเนินการทดลอง

4.1 วัสดุและอุปกรณ์

4.1.1 ขนาดชิ้นงานหลังการรีดรอบที่ 2

เพื่อควบคุมปัจจัยที่จะส่งผลต่อการรีดชิ้นงานรอบที่ 3 นั้น จะกำหนดขนาดของชิ้นงานหลังผ่านการรีดรอบที่ 2 โดยมีขนาดดังรูปที่ 23 เพื่อให้หลังจบกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Flow forming ชิ้นงานมีขนาดสุดท้ายตามที่กำหนด



รูปที่ 23 ขนาดชิ้นงานหลังจบการรีดรอบที่ 2

4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.1.2.1 เครื่องตรวจโครงสร้างของวัสดุ

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน (Reflected Light Microscope) รุ่น ZEISS Model Axiotech ดังรูปที่ 24 ใช้สำหรับทดสอบเทคนิคการวิเคราะห์ Microscopy



รูปที่ 24 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงแบบแสงสะท้อน
(Reflected Light Microscope) รุ่น ZEISS Model Axiotech

4.1.2.2 เครื่อง Flow forming

เครื่อง Flow forming รุ่น F450.3000-4 รูปที่ 25 ใช้สำหรับการขึ้นรูปท่อแรงดันสูง



รูปที่ 25 เครื่อง Flow forming

4.1.2.2 เครื่องวัดความหนา

เครื่องวัดความหนา (Wall thickness gauge) รุ่น ECHOMETER 1076 Basic รูปที่ 26 ใช้สำหรับวัดความหนาชิ้นงาน



รูปที่ 26 เครื่องวัดความหนา Wall thickness gauge ECHOMETER 1076 Basic

4.1.2.3 เครื่องวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก

เครื่องวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ขนาด 100-125 มม. และ 125-150 มม. ดังรูปที่ 27 ใช้สำหรับวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของชิ้นงาน



รูปที่ 27 เครื่องวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของชิ้นงาน

4.2 วิธีการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน

4.2.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคก่อนและหลังการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Flow forming ตัดชิ้นงานให้ได้ขนาด 200x200 มิลลิเมตร โดยขณะทำการตัดชิ้นงานต้องระวังไม่ให้ชิ้นงานร้อน เพื่อป้องกันไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดความร้อนจนทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลง สำหรับขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานมีดังนี้

- 1) ทำความสะอาดชิ้นงานที่ตัดแล้วด้วยอะซิโตน
- 2) ทำการหล่อชิ้นงานด้วยเรซิน
- 3) ชัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 240 จนกระทั่งถึงเบอร์ 1200 จากนั้นขัดด้วยผงอลูมินา (Al₂O₃)
- 4) ทำการกัดผิวชิ้นงานด้วยกรด 2% Nital
- 5) ตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน (Reflected Light Microscope) รุ่น ZEISS Model Axiotech
- 6) วิเคราะห์ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

4.2.2 การวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน

- 1) ทำความสะอาดบริเวณผิวชิ้นงาน
- 2) เลื่อนสเกลให้ปากไมโครมิเตอร์วัดนอกสัมผัสชิ้นงาน
- 3) อ่านค่าชิ้นงานทันที ไม่ควรยกไมโครมิเตอร์ออกจากชิ้นงานเพื่ออ่านค่า เพราะจะทำให้ค่าที่ได้จากการวัดผิดพลาด

4.2.3 การวัดความหนาของชิ้นงาน

- 1) เลือกโพรบให้เหมาะสมกับความหนาที่ต้องการวัด
- 2) ทำความสะอาดบริเวณผิวชิ้นงาน
- 3) ทำการปรับเทียบเครื่องก่อนทำการวัดงาน
- 4) วางโพรบลงบนบริเวณที่ต้องการวัด อ่านค่าที่วัดได้บนหน้าจอแสดง

4.2.4 การหาค่าการขยายตัวของวัสดุ (Spring back; Sb)

หลังจากวัดขนาดความหนาของชิ้นงานหลังรีด ทำการคำนวณค่าการขยายตัวของวัสดุ ดังนี้

$$Sb = \left(\frac{Tf - d}{d} \right) \times 100$$

4.3 วิธีการทดลอง

จากการคัดเลือกปัจจัยสำหรับการทดลองในบทที่ 3 สามารถสรุปวิธีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของชิ้นงานหลังจบการรีดรอบที่ 3 ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 วิธีการทดลองปัจจัยที่เหมาะสมต่อขนาดของชิ้นงานหลังจบการรีดรอบที่ 3

ปัจจัย (Factor)			ผลตอบ (Response)		
Feed rate (mm/min)	Spindle speed (rev.)	Die distance (mm)	Outside diameter (mm)	Thickness (mm)	Spring back (%)
40	60	1.7			
		1.85			
		2.0			
	80	1.7			
		1.85			
		2.0			
	120	1.7			
		1.85			
		2.0			
60	60	1.7			
		1.85			
		2.0			
	80	1.7			
		1.85			
		2.0			
	120	1.7			
		1.85			
		2.0			
80	60	1.7			
		1.85			
		2.0			
	80	1.7			
		1.85			
		2.0			
	120	1.7			
		1.85			
		2.0			

4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้โปรแกรมมินิแท็บ (Minitab) ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีสมการตัวแบบที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

เมื่อ $i = 1, 2$ (ระดับของ Spindle speed, S)

$j = 1, 2$ (ระดับของ Feed rate, F)

$k = 1, 2$ (ระดับของ Die distance, T_f) (design)

โดยที่

Y คือ ผลตอบของการทดลองในที่นี้คือความหนาของชิ้นงานและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ

μ คือ ค่าเฉลี่ย

τ คือ อิทธิพลที่เกิดจากค่าความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S)

β คือ อิทธิพลที่เกิดจากความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate; F)

γ คือ อิทธิพลที่เกิดจากระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (Die distance; T_f)

$\tau\beta$ คือ อันตรกิริยา 2 ทาง ที่เกิดจากค่าความเร็วรอบของแกนหมุน (S) และ ความเร็วป้อนของลูกรีด (Hamid R. Molladavoudi & Djavanroodi)

$\tau\gamma$ คือ อันตรกิริยา 2 ทาง ที่เกิดจากค่าความเร็วรอบของแกนหมุน (S) และ ระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (T_f)

$\beta\gamma$ คือ อันตรกิริยา 2 ทาง ที่เกิดจากความเร็วป้อนของลูกรีด และ ระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (T_f)

$\tau\beta\gamma$ คือ อันตรกิริยา 3 ทาง ที่เกิดจากค่าความเร็วรอบของแกนหมุน (S), ความเร็วป้อนของลูกรีด (Hamid R. Molladavoudi & Djavanroodi) และระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (T_f)

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

สมมติฐานของการทดลอง คือ

1) สมมติฐานสำหรับปัจจัยเดี่ยวยมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

1.1) $H_0 : \tau_1 = \tau_2 = 0$ (ค่าความเร็วรอบของแกนหมุน (S) ที่ระดับ 1 และ 2 ให้ค่าผลตอบไม่ต่างกัน)

H_1 : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $\tau_i \neq 0$ (ค่าความเร็วรอบของแกนหมุน (S) ที่ระดับ 1 และ 2 ให้ค่าผลตอบต่างกัน)

1.2) $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$ (ความเร็วป้อนของลูกรีด (F) ที่ระดับ 1 และ 2 ให้ค่าผลตอบไม่ต่างกัน)

H_1 : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $\beta_i \neq 0$ (ความเร็วป้อนของลูกรีด (F) ที่ระดับ 1 และ 2 ให้ค่าผลตอบต่างกัน)

1.3) $H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = 0$ (ระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (T_f) ที่ระดับ 1 และ 2 ให้ค่าผลตอบไม่ต่างกัน)

H_1 : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $\gamma_i \neq 0$ (ระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (T_f) ที่ระดับ 1 และ 2 ให้ค่าผลตอบต่างกัน)

2) สมมติฐานสำหรับปัจจัยร่วมมี 3 สมมติฐาน ดังนี้

2.1) $H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$ สำหรับทุกค่า i, j (อันตรกิริยา 2 ทางที่เกิดจากค่าความเร็วรอบของแกนหมุน (S) และ ความเร็วป้อนของลูกรีด (Hamid R. Molladavoudi & Djavanroodi) ไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบ)

H_1 : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $(\tau\beta)_{ij} \neq 0$ (อันตรกิริยา 2 ทางที่เกิดจากค่าความเร็วรอบของแกนหมุน (S) และ ความเร็วป้อนของลูกรีด (Hamid R. Molladavoudi & Djavanroodi) มีอิทธิพลต่อผลตอบ)

2.2) $H_0 : (\tau\gamma)_{ik} = 0$ สำหรับทุกค่า i, j (อันตรกิริยา 2 ทางที่เกิดจากค่าความเร็วรอบของแกนหมุน (S) และ ระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (T_f) ไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบ)

H_1 : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $(\tau\gamma)_{ik} \neq 0$ (อันตรกิริยา 2 ทางที่เกิดจากค่าความเร็วรอบของแกนหมุน (S) และ ระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (T_f) มีอิทธิพลต่อผลตอบ)

2.3) $H_0 : (\beta\gamma)_{jk} = 0$ สำหรับทุกค่า i, j (อันตรกิริยา 2 ทางที่เกิดจากความเร็วป้อนของลูกรีด และ ระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (T_f) ไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบ)

H_1 : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $(\beta\gamma)_{jk} \neq 0$ (อันตรกิริยา 2 ทางที่เกิดจากความเร็วป้อนของลูกรีด และ ระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (T_f) มีอิทธิพลต่อผลตอบ)

2.4) $H_0 : (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0$ สำหรับทุกค่า i, j, k (อันตรกิริยา 3 ทางที่เกิดจากค่าความเร็วรอบของแกนหมุน (S) และ ความเร็วป้อนของลูกรีด (Hamid R. Molladavoudi & Djavanroodi) ไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบ)

H_1 : อย่างน้อยหนึ่งค่าของ $(\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0$ (อันตรกิริยา 3 ทางที่เกิดจากค่าความเร็วรอบของแกนหมุน (S) และ ความเร็วป้อนของลูกรีด (Hamid R. Molladavoudi & Djavanroodi) มีอิทธิพลต่อผลตอบ)

ทั้งนี้ได้มีการการลำดับผลการวิเคราะห์ในการวิจัย ดังนี้

4.4.1 การประเมินความสามารถของกระบวนการ

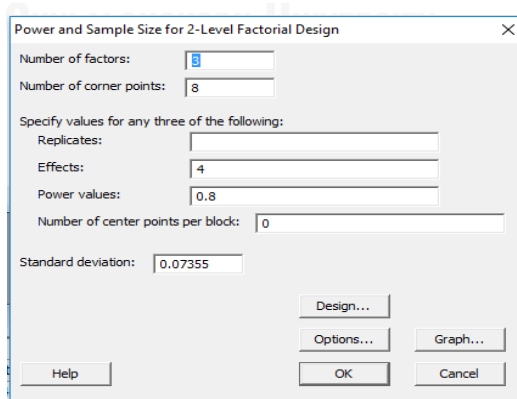
สำหรับค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (Process capability index) แบ่งได้ 2 ประเภท คือ 1) ดัชนีชี้วัดศักยภาพของความสามารถ (Potential capability, C_p) และ ดัชนีชี้วัดความสามารถที่แท้จริงของกระบวนการ (Actual capability, C_{pk}) โดยที่จะใช้ C_p ตัดสินกระบวนการว่ามีความสามารถเพียงใดได้ต่อเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขบางประการ คือเมื่อค่าเฉลี่ยของ

การแปรผันตามธรรมชาติของกระบวนการอยู่ที่กึ่งกลางของช่วงมาตรฐานของข้อกำหนด ในขณะที่สามารถใช้ Cpk ตัดสินกระบวนการได้โดยไม่ต้องเป็นที่ยอมรับของความแปรผันดังกล่าวต้องอยู่ที่กึ่งกลางของช่วงมาตรฐานของข้อกำหนด

4.4.2 การเลือกขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม (Sample size) หรือจำนวนทำซ้ำ (Replicates)

เพื่อความแม่นยำของการทดลองและลดความคลาดเคลื่อนของชุดข้อมูล ที่มีสาเหตุมาจากชิ้นงานและเครื่องมือ นั้น โดยทั่วไปการตรวจจับความแตกต่างตามที่กำหนดไว้ของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 1 กลุ่ม กับค่าคงที่ค่าหนึ่งหรือตรวจจับความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มหรือมากกว่า ความผิดพลาดแบบที่ 2 (β) ที่ทำหน้าที่เป็นฟังก์ชันของขนาดตัวอย่าง จะแสดงความผิดพลาดลดลงเมื่อขนาดตัวอย่างใหญ่ขึ้น เพราะความสามารถในการตรวจจับความแตกต่างตามที่กำหนดทำได้ง่ายขึ้น แต่ขนาดตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นย่อมส่งผลให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการเลือกขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบการทดลองที่จะต้องคำนึงถึงเป็นอย่างแรก และขนาดตัวอย่างจะต้องไม่น้อยเกินไปจนทำให้ไม่สามารถตรวจจับความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มตัวอย่างได้ ทั้งๆ ที่มีความแตกต่างเกิดขึ้น

รายงานการวิจัยฉบับนี้จะใช้โปรแกรมมินิแท็บ (Minitab) ช่วยวิเคราะห์ขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม โดยกำหนดให้ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการตรวจพบประมาณ 1 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และโอกาสที่จะตรวจจับความแตกต่างเจอเท่ากับ 0.8 ซึ่งเมนูโปรแกรมการคำนวณจะเลือกใช้ดังนี้ Stat > Power and Sample size > 2-Level Factorial Design ทั้งนี้ได้แสดงหน้าต่างของโปรแกรมและค่าคงที่ที่ต้องระบุดังรูปที่ 28



รูปที่ 28 กรอบโต้ตอบของโปรแกรมสำหรับหาขนาดตัวอย่างของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

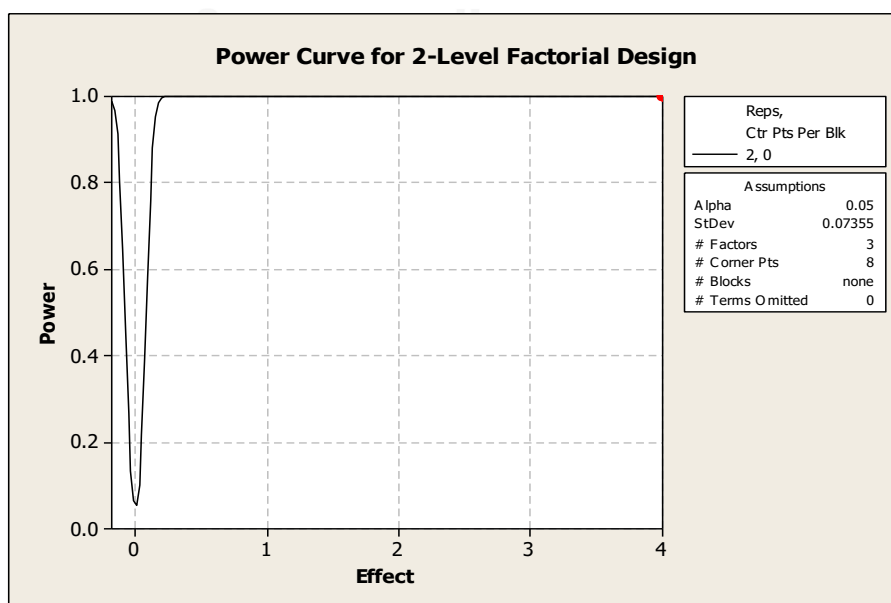
- Number of factors คือ 3
- Number of corner points คือ 8

- Replication ไม่ต้องระบุเนื่องจากเป็นค่าที่ต้องการหา
- Effect คือค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของค่าความหนาของชิ้นงาน ที่ต้องการปรับปรุงระบุ 4
- Sigma เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลในอดีต จากการสุ่มตัวอย่างออกมา 28 ตัว จากชิ้นงานต้นแบบและทำการวัดค่าความหนาของชิ้นงาน ได้ข้อมูลดังตารางที่ B ดังนั้น Sigma เท่ากับ 0.07355
- Power คือ $1 - \beta$ โดย β คือ Type-II error หรือโอกาสที่สามารถตรวจจับความแตกต่างของความหนาของชิ้นงานเจอ ในที่นี้ใช้ 0.8

ตารางที่ 14 กรอบโต้ตอบของการหาจำนวนซ้ำของการทดลอง

Power and Sample Size					
2-Level Factorial Design					
Alpha = 0.05 Assumed standard deviation = 0.07355					
Factors: 3 Base Design: 3, 8					
Blocks: none=-					
Center	Total		Target	Actual	
Points	Effect	Reps	Runs	Power	Power
0	4	2	16	0.8	1

Power Curve for 2-Level Factorial Design



รูปที่ 29 กราฟหาค่า Power Curve for 2-Level Factorial Design

จากการคำนวณโดยโปรแกรม Minitab ได้พบว่า จำนวน Replication เท่ากับ 2 สำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุที่มีนัยสำคัญต่อปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการรีดท่อด้วยเครื่อง Flow forming นั้น จะดำเนินการวิเคราะห์โดยใช้กระบวนการทางสถิติ สำหรับการเปรียบเทียบถึงแนวทางและรูปแบบที่ใช้ในการทดลอง แล้วจึงเลือกปัจจัยนำเข้าที่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีดขึ้นรูปแบบเย็น มาทำการทดลองและทดสอบนัยสำคัญซึ่งมีอยู่ 3 ปัจจัยหลัก ๆ คือ

1. ระยะช่องว่างแม่พิมพ์
2. ความเร็วป้อนของลูกรีด
3. ความเร็วรอบของแกนหมุน

โดยผลการจากการทดลองจะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่น่าจะมีผลกับการเกิดข้อบกพร่องและศึกษาการมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย ที่จะเป็นแนวทางในการปรับปรุงและวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

4.4.3 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ

เลือกชนิดของการทดลองเป็นแบบการออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) โดยใช้แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) งานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาตัวแปรที่ลักษณะเชิงรูปธรรมหรือวัดค่าได้ (Variable Characteristic) รวมถึงการทำการทดลองที่ต้องดำเนินการควบคู่ไปกับการผลิตจริง ดังนั้นขนาดตัวอย่างจึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมาก ผู้ทำงานวิจัยจึงได้ตัดสินใจเลือกชนิดของการทดลองเป็นแบบการออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE)

การดำเนินการทดลองใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 แบบเต็มรูป ซึ่งมีปัจจัยเชิงคุณลักษณะ (Attribute Factors) จำนวน 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ และ 2 เพลทเค็จในหนึ่งการทดลองร่วมปัจจัยและทำการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ เพื่อให้ผลการทดลองมีความเป็นอิสระ, ไม่เป็นลำดับต่อกัน และป้องกันความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่เกิดจากสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น เวลาที่ผ่านไป การไบแอส (Bias) ของผู้ทดลอง เป็นต้น ซึ่งจากการออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรมมินิแท็บ (Minitab) จึงได้จำนวนการทดลอง จำนวน 16 การทดลอง (run) ซึ่งลำดับการทดลองดังตารางที่ ก. 1

4.4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

- การตรวจสอบการแจกแจงปกติ (Normal Distribution)
- การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent)
- การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

4.4.5 การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการด้วยเทคนิคขั้นสูงและมีความซับซ้อน (Response Surface Methodology: RSM)

การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการด้วยเทคนิคขั้นสูงและมีความซับซ้อน (Response Surface Methodology: RSM) แบบการทดลองแบบบ็อก-เบนเคน (Box-Behnken design) เพื่อหาสมการพื้นผิวผลตอบและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้

4.4.6 การทดสอบยืนยันผล และติดตามควบคุม

การทดสอบยืนยันผล และติดตามควบคุมเป็นการดำเนินการในส่วนนี้เพื่อติดตามและตรวจสอบคุณภาพของกระบวนการโดยจัดทำเป็นแผนควบคุมกระบวนการเพื่อให้เจ้าหน้าที่ฝ่ายผลิตปฏิบัติตาม

4.4.7 แผนการออกแบบการทดลอง

1. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาปัจจัยของค่าความเร็วรอบของแกนหมุน (S), ความเร็วป้อนของลูกรีด (Hamid R. Molladavoudi & Djavanroodi) และระยะช่องว่างแม่พิมพ์ (d) ที่มีผลต่อค่าความหนา, ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ และค่าขยายตัวของวัสดุ (Spring back) ในกระบวนการรีดท่อด้วยเครื่อง Flow forming รอบที่ 3 สำหรับหาแนวโน้มการปรับเปลี่ยนปัจจัยของแต่ละปัจจัยเพื่อให้ได้ผลตอบทุกผลตอบที่ให้ค่าที่ดีที่สุด

2. ข้อมูลพื้นฐาน

คุณสมบัติของท่อแรงดันสูงที่ตีขึ้น จะต้องมึ้น้ำหนักเบาและได้ขนาดที่เหมาะสมให้มีความสามารถในการรับแรงดันได้ตามที่วิศวกรออกแบบ ซึ่งขนาดที่มีความสำคัญในที่นี้คือค่าความหนา และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ จากการพิจารณาเบื้องต้นพบว่า ปัจจัยที่น่าจะมีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของท่อหลังการรีดด้วยเครื่อง Flow forming เช่น ความหนาของท่อ และค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ เป็นต้น นั่นก็คือ 1.) ความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) 2.) ความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate; F) และ 3.) ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ (d)

3. ตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง

3.1 ผลตอบที่สนใจ

1.) ความหนาของท่อหลังรีดด้วยกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น อยู่ในระหว่างค่า 2.55-2.95 มม. โดยมีเป้าหมายความหนาที่ 2.75 มม.

2.) ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อหลังรีดด้วยกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น อยู่ในระหว่างค่า 120.40-120.90 มม. โดยมีเป้าหมายค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อเท่ากับ 120.65 มม.

3.) ค่าการขยายตัวของผิวชิ้นงานหลังโดนรีด (Spring back) สำหรับวัสดุ AISI4130

3.2 ปัจจัย

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย	
		-1 (ต่ำ)	+1 (สูง)
1. ความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed)	S	60	120
2. ความเร็วป้อนของลูกกรีด (Feed rate)	F	40	80
3. ค่าการกินลึกผิวชิ้นงาน (Die distance)	T_d	1.7	2

3.3 ปัจจัยที่ควบคุม

- กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ต้นแบบ
- อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ของเครื่อง Flow forming
- พนักงานผู้ทดสอบ
- วัสดุเหล็กกล้า AISI4130 ที่ผ่านกระบวนการอบชุบปกติ (Normalizing)

4. จำนวนซ้ำ

ทำซ้ำ 2 ครั้ง ในหนึ่งหน่วยการทดลองรวมปัจจัย

5. วิธีการทดลอง

ใช้วิธีการสุ่มสมบูรณ์ในการทดสอบ โดยลำดับการทดลองดังแสดงในตารางที่ ก.1

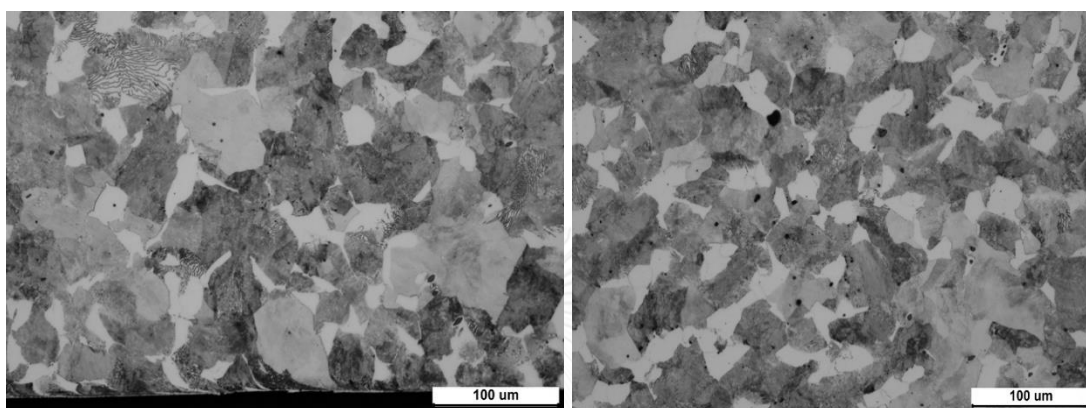
6. การวิเคราะห์การทดลอง

- 6.1 การวิเคราะห์ดัชนีความสามารถของกระบวนการ
- 6.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)
- 6.3 การวิเคราะห์ผลหลักและอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัยต่อผลตอบ (Factorial Design)
- 6.4 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)
- 6.5 การหาผลตอบที่ดีที่สุด (Response Optimizer)

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคก่อนการรีด



(ก)

(ข)

รูปที่ 30 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ AISI 4130 ที่ใช้ขึ้นรูปท่อ

(ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบชิ้นงานกำลังขยาย 200 เท่า

(ข) โครงสร้างจุลภาคบริเวณกลางชิ้นงานกำลังขยาย 200 เท่า

รูปที่ 30 แผนแผนผังสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณคาร์บอน 0.3% ที่อุณหภูมิห้อง เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.3 % จะมีโครงสร้างเป็นเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ซึ่งจากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เป็นวัตถุดิบ (Raw material) จากรูปที่ 30(ก) และ รูปที่ 30(ข) จะประกอบด้วยโครงสร้างของเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ที่มีลักษณะเป็นสีเข้ม และเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ที่มีลักษณะเป็นสีอ่อน ซึ่งเป็นโครงสร้างปกติของเหล็กประเภทไฮโปยูเทกตอยด์ (Hypo-eutectoid)

5.2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของท่อก่อนปรับปรุง

5.2.1 วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุง

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการรีดขึ้นรูปแบบเย็น จะทำการวิเคราะห์ความสามารถในด้านการขึ้นรูปให้ได้ความหนาตามที่กำหนด เนื่องจากความหนามีผลต่อความปลอดภัยต่อการใช้ท่อแรงดันสูงจำเป็นต้องพิจารณาเป็นพิเศษ โดยผลจากการสุ่มตัวอย่างของท่อที่ผลิตได้มาวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนปรับปรุงได้ผลดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงในส่วนของความหนา

ตัวอย่างท่อที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ความหนาของท่อ (มม.)	2.72	2.86	2.82	2.86	2.85	2.8	2.56	2.93	2.59	2.77
ตัวอย่างท่อที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ความหนาของท่อ (มม.)	2.81	2.65	2.61	2.71	2.76	2.77	2.76	2.77	2.8	2.8
ตัวอย่างท่อที่	21	22	23	24	25	26	27	28	Avg.	Stedev.
ความหนาของท่อ (มม.)	2.78	2.84	2.88	2.91	2.92	2.83	2.79	2.87	2.79	0.0932*

หมายเหตุ * คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยรวม (Overall) ซึ่งในการคำนวณค่ามิनिแทบจะใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแบบ Within ซึ่งเท่ากับ 0.08993 ส่งผลให้ค่าคำนวณที่ได้ต่างกันเล็กน้อย

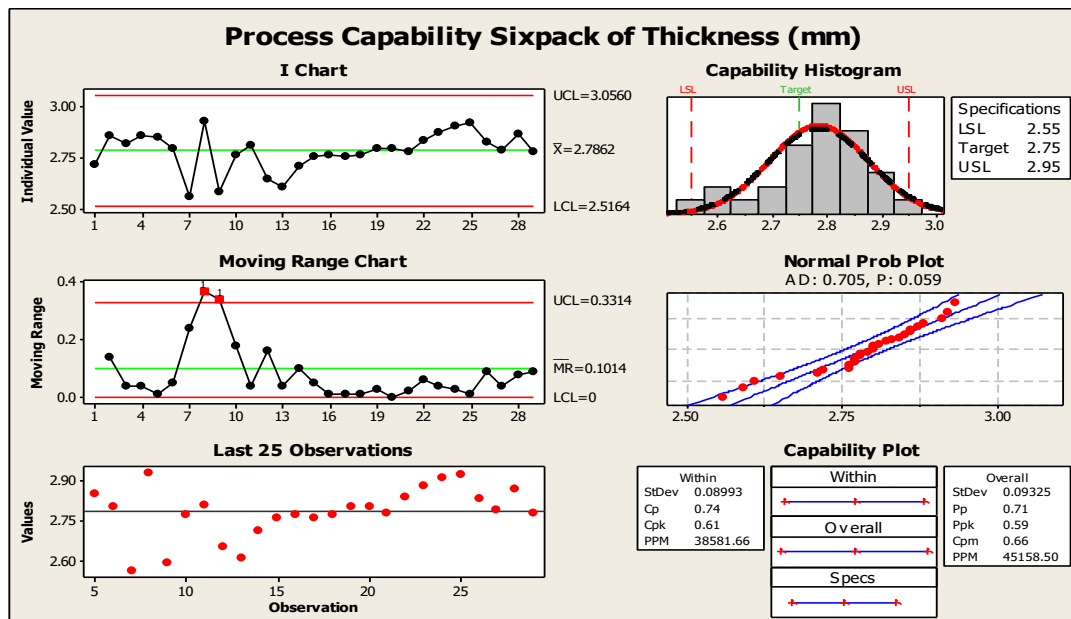
จากตารางที่ 15 สามารถคำนวณค่า C_p และ C_{pk} ได้ดังนี้

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = \frac{2.95 - 2.55}{6 \times 0.0932} = 0.7153$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \text{Average}}{3\sigma}, \frac{\text{Average} - LSL}{3\sigma}\right)$$

$$= \min\left(\frac{2.95 - 2.79}{3 \times 0.0932}, \frac{2.79 - 2.55}{3 \times 0.0932}\right)$$

$$= \min(0.5722, 0.8583) = 0.5722$$



รูปที่ 31 กราฟวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการขึ้นรูปสำหรับการกำหนดขนาดความหนาของท่อก่อนศึกษา

รูปที่ 31 กราฟด้านบนพบว่าความหนาที่ได้จากกระบวนการ ริดขึ้นรูปแบบเย็น ใน Pass 3 นั้นมีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบ normal โดยพิจารณาจาก Normal probability plot ที่มีค่า P-value = 0.059 ซึ่งมีค่ามากกว่า α ที่ 0.05 นอกจากนี้เมื่อพิจารณากราฟของ R-chart แล้วพบว่าค่ายังอยู่ในช่วงที่ควบคุม โดยดูจากการกระจายตัวของค่าความหนาไม่มีจุดใดอยู่นอกเหนือเส้น LCL และ UCL ทั้งนี้เมื่อพิจารณากราฟตั้งแต่จุดที่ 15 ถึงจุดที่ 25 จะพบว่ากราฟมีกระจายตัวอย่างมีรูปแบบหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ มีการกระจายตัวในลักษณะเพิ่มขึ้นหรือลดลงติดต่อกันมากกว่า 7 จุด แสดงว่าข้อมูลที่เกิดขึ้นมีสาเหตุที่สามารถควบคุมได้แต่ไม่ได้รับการควบคุม ซึ่งจากการพิจารณาสาเหตุของการเกิดในระหว่างนั้นพบว่าเป็นช่วงการผลิตที่ยังไม่มีการควบคุมความผิดปกติของเครื่องจักร อาทิเช่น ค่า round run-out ของลูกริดและแกนหมุน ทำให้ท่อที่ริดได้มีลักษณะเบี้ยว ส่งผลให้ค่าขนาดที่ศึกษามีความแปรปรวนลักษณะดังกล่าว ซึ่งในช่วงของการปรับปรุงจะทำการกำหนดให้มีการตรวจสอบค่าดังกล่าวเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น

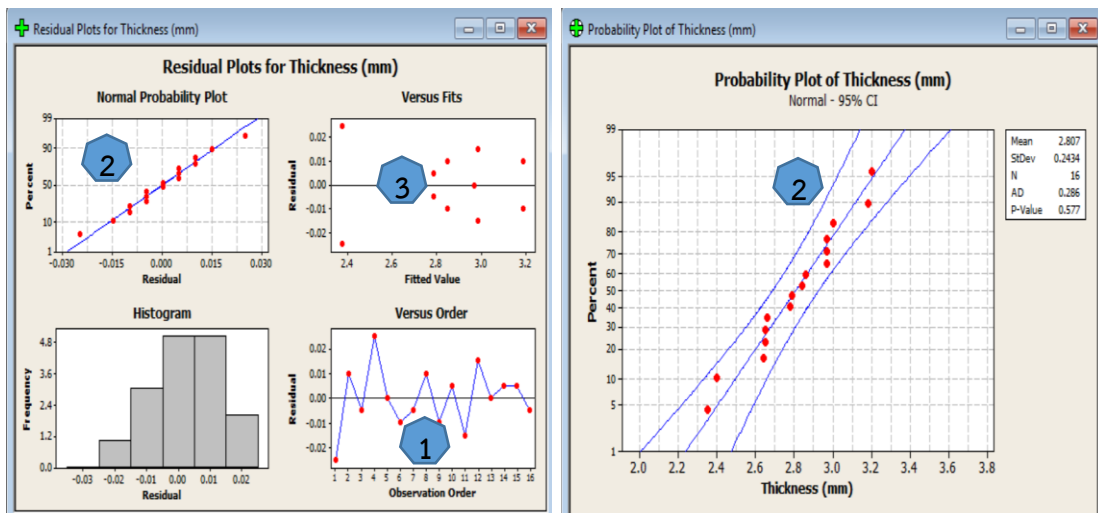
แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่า $C_p = 0.74$ และ ค่า $C_{pk} = 0.61$ สามารถวิเคราะห์ผลความสามารถของความหนาที่ได้จากกระบวนการ ริดขึ้นรูปแบบเย็น ยังห่างจากค่าเฉลี่ยของกระบวนการ เพราะค่า $C_{pk} < C_p$ นอกจากนี้ค่า C_{pk} ยังมีค่าน้อยกว่า 1.33 ซึ่งเป็นค่าแนะนำต่ำที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความหนาที่ได้กระบวนการ ริดขึ้นรูปแบบเย็น ยังจำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงให้ดีขึ้น

5.2.2 วิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพความหนาหน้าก่อนปรับปรุง

ตารางที่ 16 ผลการทดลองรีดเพื่อศึกษาผลกระทบจากปัจจัยศึกษา

Run Order	Std Order	Replication	Factors			Response		
			Spindle speed	Feed rate	Die distance	O.D. (mm)	Thickness (mm)	Spring back
1	1	1	60	40	1.7	119.87	2.35	0.85
2	7	1	60	80	2	121.57	3.2	1.2
3	10	1	120	40	1.7	120.47	2.65	1.15
4	9	2	60	40	1.7	119.97	2.4	0.9
5	3	2	60	80	1.7	121.11	2.97	1.47
6	14	1	120	40	2	120.85	2.84	0.84
7	12	1	120	80	1.7	120.73	2.78	1.28
8	6	2	120	40	2	120.89	2.86	0.86
9	15	2	60	80	2	121.53	3.18	1.18
10	4	2	120	80	1.7	120.75	2.79	1.29
11	8	1	120	80	2	121.11	2.97	0.97
12	16	2	120	80	2	121.17	3	1
13	11	2	60	80	1.7	121.11	2.97	1.47
14	13	1	60	40	2	120.47	2.65	0.65
15	2	2	120	40	1.7	120.49	2.66	1.16
16	5	2	60	40	2	120.45	2.64	0.64

นำผลการทดลองในตารางที่ 16 มาทำการตรวจสอบข้อสมมติฐาน (Assumption) ของความคลาดเคลื่อน ซึ่งวิธีการทดสอบที่ดีที่สุดคือ การวิเคราะห์ค่าเศษเหลือ (Residual Analysis)



รูปที่ 32 กราฟค่าเศษเหลือ (Residual Plot) ของความหนาท่อ

จากรูปที่ 32 สามารถสรุปได้ว่า (1) ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีลักษณะการสุ่มและมีการกระจายอย่างสมมาตรรอบค่ากลางแสดงว่าข้อมูลอยู่ภายใต้ความผันแปรจากสาเหตุธรรมชาติ (2) เรียงตัวของข้อมูลเป็นแบบปกติ (Normal) เนื่องจากจุดของค่าต่างๆ อยู่บริเวณใกล้เส้น Ideal Normal และเมื่อตรวจสอบด้วยกราฟ Normality Test พบว่า P-Value = 0.577 ($P > 0.05$) จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบโทรโซ่ง (3) แสดงว่าข้อมูลที่เกิดขึ้นมีสาเหตุที่สามารถควบคุมได้แต่ไม่ได้รับการควบคุม ซึ่งจากการพิจารณาสาเหตุของการเกิดในระหว่างนั้นพบว่าเป็นช่วงการผลิตที่ยังไม่มีการควบคุมความผิดปกติของเครื่องจักร อาทิเช่น ค่า round run-out ของลูกรีดและแกนหมุน ทำให้ท่อที่รีดได้มีลักษณะเบี้ยว ส่งผลให้ค่าขนาดที่ศึกษามีความแปรปรวนลักษณะดังกล่าว ซึ่งในช่วงของการปรับปรุงจะทำการกำหนดให้มีการตรวจสอบค่าดังกล่าวเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น

5.2.1.1 ระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนาของท่อก่อนปรับปรุง

ผู้วิจัยสามารถวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อพิจารณาอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม 2 ทาง และอิทธิพลร่วม 3 ทาง ว่ามีพจน์ใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อความหนาท่อหลังการขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดขึ้นรูปแบบเย็น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้จากตารางที่ 17

จากนั้นทำการประเมินผลจากกราฟ Normal Probability Plot และ Pareto Chart ดังรูปที่ 37 ตามลำดับ

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของความแปรปรวนขั้นต้นของความหนาต่อ

Estimated Effects and Coefficients for Thickness (mm) (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		2.8069	0.004193	669.48	0.000	
Spindle speed		0.0237	0.0119	2.83	0.022	
Feed rate		0.3513	0.004193	41.89	0.000	
Die distance		0.2212	0.004193	26.39	0.000	
Spindle speed*Feed rate		-0.2187	-0.1094	-26.09	0.000	
Spindle speed*Die distance		-0.0237	-0.0119	-2.83	0.022	
Feed rate*Die distance		-0.0112	-0.0056	-1.34	0.217	
Spindle speed*Feed rate*Die distance		0.0138	0.0069	1.64	0.140	

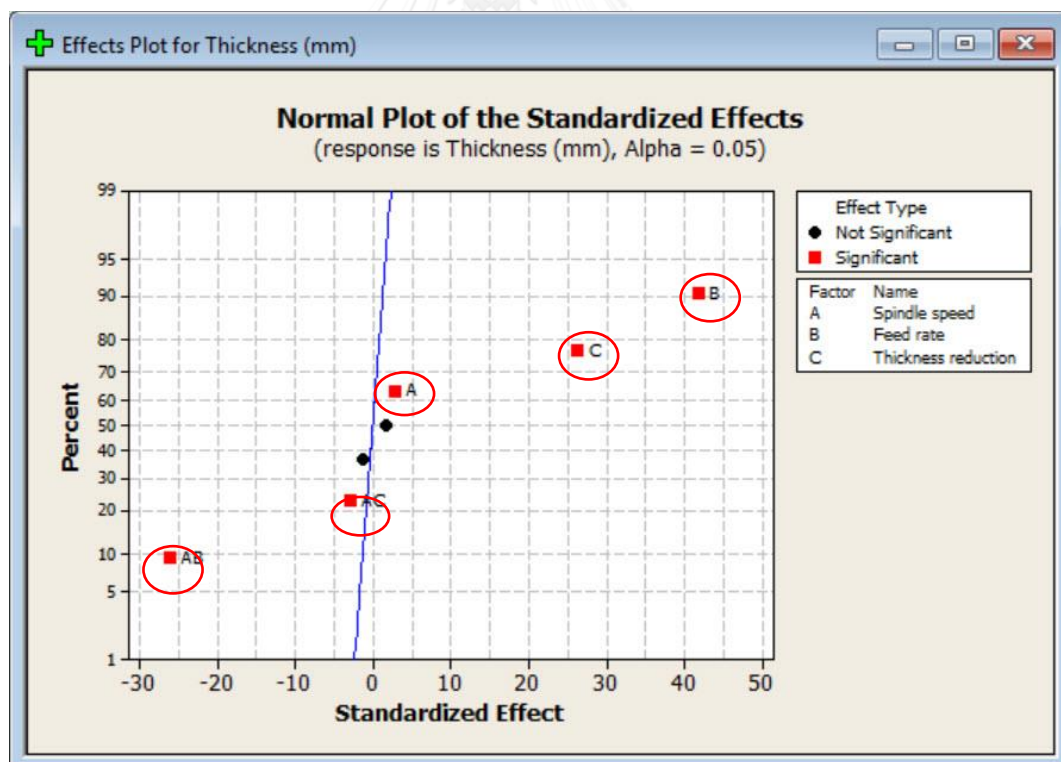
S = 0.0167705 PRESS = 0.009
R-Sq = 99.75% R-Sq(pred) = 98.99% R-Sq(adj) = 99.53%

Analysis of Variance for Thickness (mm) (coded units)

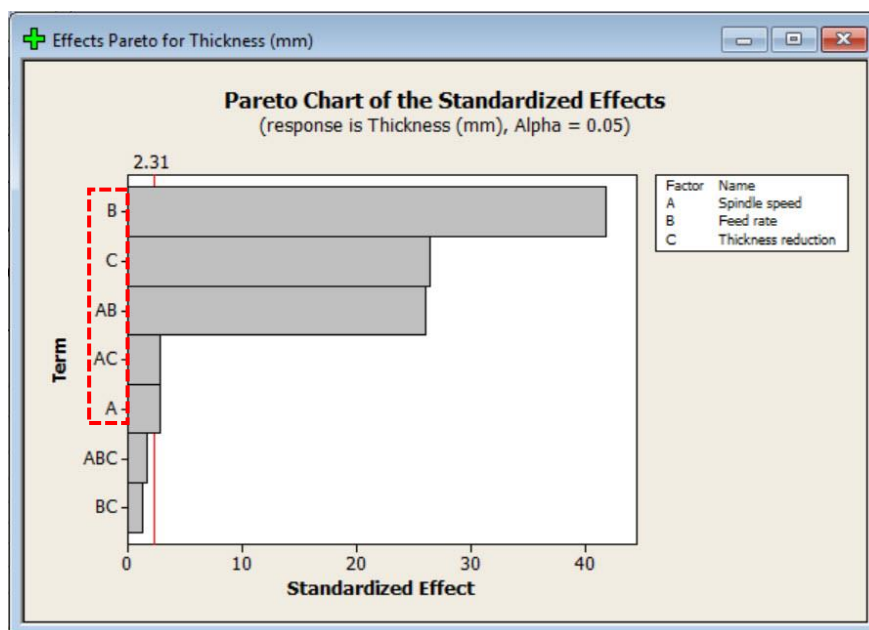
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
Main Effects	3	0.691569	0.691569	0.230523
Spindle speed	1	0.002256	0.002256	0.002256
Feed rate	1	0.493506	0.493506	0.493506
Die distance	1	0.195806	0.195806	0.195806
2-Way Interactions	3	0.194169	0.194169	0.064723
Spindle speed*Feed rate	1	0.191406	0.191406	0.191406
Spindle speed*Die distance	1	0.002256	0.002256	0.002256
Feed rate*Die distance	1	0.000506	0.000506	0.000506
3-Way Interactions	1	0.000756	0.000756	0.000756
Spindle speed*Feed rate*Die distance	1	0.000756	0.000756	0.000756
Residual Error	8	0.002250	0.002250	0.000281
Pure Error	8	0.002250	0.002250	0.000281
Total	15	0.888744		

Source	F	P
Main Effects	819.64	0.000
Spindle speed	8.02	0.022
Feed rate	1754.69	0.000
Die distance	696.20	0.000
2-Way Interactions	230.13	0.000
Spindle speed*Feed rate	680.56	0.000
Spindle speed*Die distance	8.02	0.022
Feed rate*Die distance	1.80	0.217
3-Way Interactions	2.69	0.140
Spindle speed*Feed rate*Die distance	2.69	0.140
Residual Error		
Pure Error		
Total		

ตารางที่ 17 แสดงผลการวิเคราะห์ Factorial Fit จากการออกแบบการทดลองแบบ 2-Level Factorial ซึ่งประกอบด้วย (1) อิทธิพลหลัก (Main Effects) และ อิทธิพลร่วม (Interaction Effects) แบบ 2 ทาง (2) และ (3) แบบ 3 ทาง เพื่อประเมินว่าปัจจัยใดมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ จะใช้หลักการพิจารณาผลจากตาราง ANOVA ให้ดูที่ค่า P-value ปัจจัยใดที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ($\alpha=0.05$) แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญด้วยความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการพิจารณาผลการทดสอบพบว่า มีปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อขนาดของท่อที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง รีดขึ้นรูปแบบเย็น ดังนี้ 1.) ผลหลักของความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) 2.) ผลหลักของความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate; F) 3.) ผลหลักของระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (Tf) 4.) อิทธิพลร่วม 2 ทาง ระหว่างความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) และ ความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate; F) เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 5.) อิทธิพลร่วม 2 ทาง ระหว่างความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) และค่าระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (Tf) ($P=0.022, 0.000, 0.000, 0.000$ และ 0.022 ตามลำดับ)



(ก)



(ข)

รูปที่ 33 ระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนาต่อ

(ก) กราฟ Normal Probability Plot (ข) กราฟพาเรโต

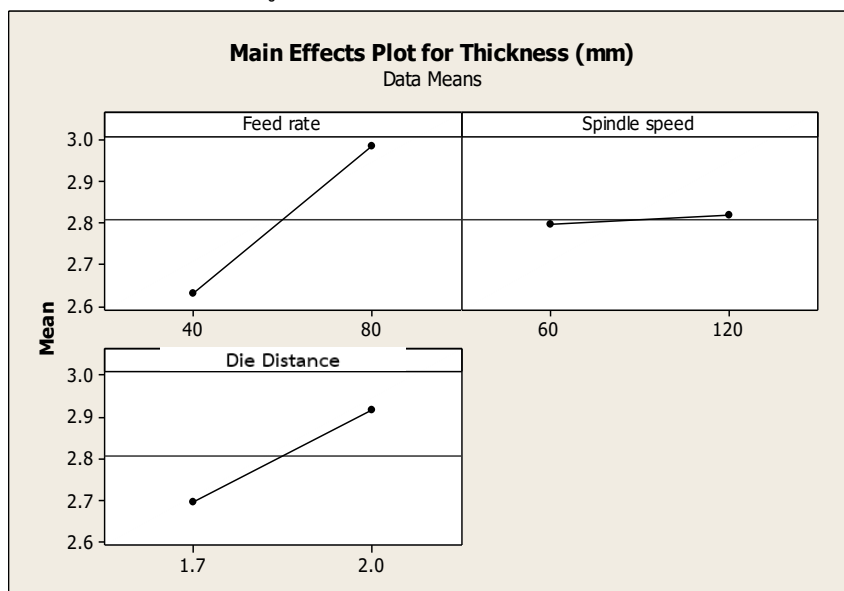
การประเมินผลจากกราฟ Normal Probability Plot และ Pareto Chart ในรูปที่ 33 สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- กราฟ Normal Probability Plot แสดงปัจจัยที่มีนัยสำคัญจะถูกระบุโดยสัญลักษณ์เป็นรูปสี่เหลี่ยมสีแดง เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 นั่นคือ

- 1.) ผลหลักของความเร็รรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S)
- 2.) ผลหลักของความเร็วบ้อนของลูกกรีด (Feed rate; F)
- 3.) ผลหลักของระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (Tf)
- 4.) อิทธิพลร่วม 2 ทาง ระหว่างความเร็รรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) และความเร็วบ้อนของลูกกรีด (Feed rate; F)
- 5.) อิทธิพลร่วม 2 ทาง ระหว่างความเร็รรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) และค่าระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (Tf) ตามลำดับ

- แผนภาพพาเรโต (Pareto Chart) แสดงค่าสัมบูรณ์ของผลกระทบบน Pareto Chart ถ้ากราฟของปัจจัยใดมีค่าเกินเส้นอ้างอิงหรือถูกเส้นแดงประตัดผ่าน นั้นแสดงว่าพจน์นั้นมีอิทธิพลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญด้วยความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และลำดับชั้นของพาเรโตแสดงถึงความรุนแรงของแต่ละพจน์ที่มีอิทธิพลต่อผลตอบ ทั้งนี้จึงไม่สามารถตัดปัจจัยนั้นได้ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกับกราฟ Normal Probability Plot

สำหรับการออกแบบการทดลองของงานวิจัยนี้แบบ 2-Level Factorial เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้น จึงใช้การวิเคราะห์แบบ Main Effects Plot และ Interaction ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 34

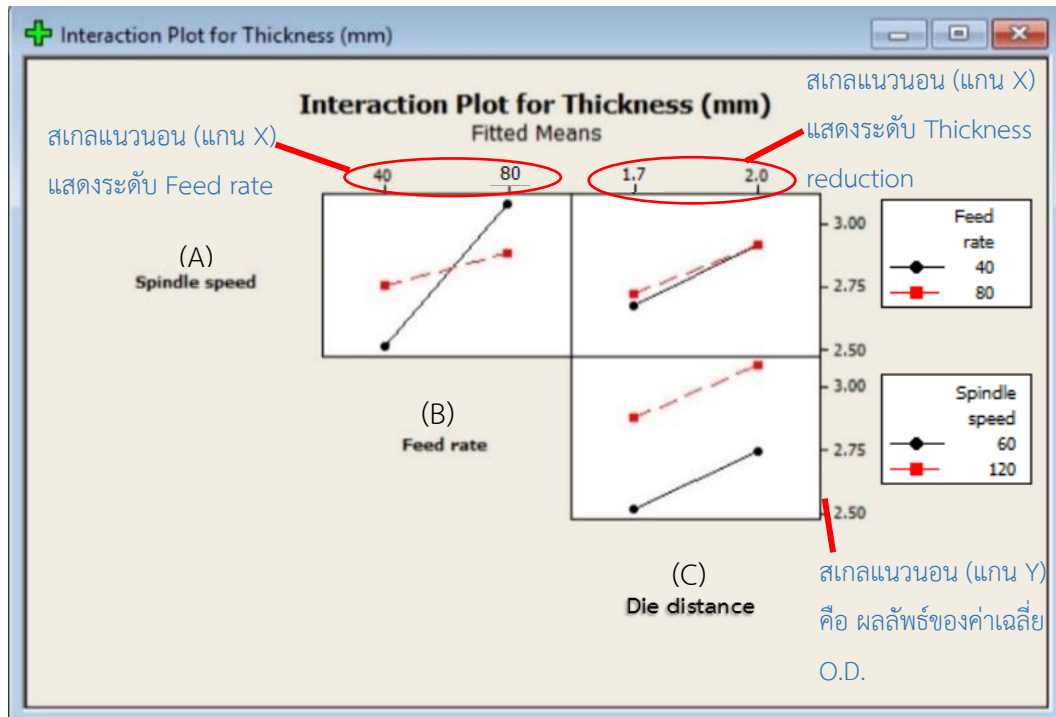


รูปที่ 34 กราฟ Main Effects Plot แสดงผลกระทบจากปัจจัยต่อขนาดความหนาของท่อ

กราฟ Main Effects Plot แสดงผลกระทบจากการกำหนดค่าตัวแปรเช่น Spindle speed, Feed rate และ Die distance เมื่อเทียบกับกระบวนการเดิม ซึ่งผลกระทบในแต่ละปัจจัยเหล่านี้ เรียกว่า อิทธิพลหลัก “Main Effect”

จากรูปที่ 34 จะเห็นว่ากราฟแสดงถึงการกำหนดค่าตัวแปร Spindle speed, Feed rate และ Die distance ที่ส่งผลต่อขนาดของท่อที่รีดด้วยเครื่อง รีดขึ้นรูปแบบเย็น นั่นก็คือ ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ, ความหนาของท่อ และค่า Spring back โดยสามารถวิเคราะห์ผลได้ว่าการกำหนดค่า Spindle speed ที่ 60 รอบต่อนาที, Feed rate ที่ 40 มม. ต่อนาที และ Die distance ที่ 1.7 มม. ส่งผลให้ความหนาของท่อที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง รีดขึ้นรูปแบบเย็น ต่ำกว่า 2.75 มม. โดยค่าเฉลี่ยของความหนาตกลงเมื่อเทียบกับ Spindle speed ที่ 120 รอบต่อนาที, Feed rate ที่ 80 มม. ต่อนาที และ Die distance ที่ 2 มม.

จึงสรุปได้ว่าการกำหนดค่าตัวแปรทั้ง 3 ปัจจัย กล่าวคือ Spindle speed, Feed rate และ Die distance ส่งผลต่อขนาดของท่อที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง รีดขึ้นรูปแบบเย็น ดังนั้นควรที่จะพิจารณาต่อไปใน Interaction Plot กล่าวคือ ถ้าอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยต่างๆ มีนัยสำคัญนั้นสามารถส่งผลถึงการวิเคราะห์ผลของอิทธิพลหลักได้



รูปที่ 35 กราฟ Interaction Plot แสดงอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนาท่อ

กราฟ Interaction Plot แสดงผลกระทบจากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยหนึ่งต่ออีกปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากอิทธิพลร่วมสามารถทำให้ผลของอิทธิพลหลักมีค่ามากขึ้นหรือลดลง ดังนั้นการพิจารณาอิทธิพลร่วมจึงมีความสำคัญอย่างมาก

จากรูปที่ 35 เราจะเห็นว่ากราฟแสดงถึงปัจจัย AB และ AC มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) ที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดของท่อที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น เช่น ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ, ความหนาท่อ และค่า Spring back นั่นคือ เส้นที่เชื่อมระหว่างค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ทั้ง 2 ปัจจัย มีจุดตัดกัน จึงส่งผลทำให้ปัจจัยทั้งสองมีค่ามากขึ้นหรือลดลง ปัจจัย BC ไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Not Interaction Effect) ทั้งนี้การประเมินผลจากกราฟ Interaction Plot ในรูปที่ 35 สามารถสรุปได้ว่า อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ AB กราฟของค่าความหนาของท่อจะมีค่าใกล้เคียง 2.75 มม. มากที่สุด เมื่อ A กำหนดค่าอยู่ที่ 120 รอบต่อนาที และ B กำหนดค่าอยู่ที่ 40 มม.ต่อนาที นอกจากนี้อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ AC กราฟของค่าความหนาของท่อจะมีค่าใกล้เคียง 2.75 มม. มากที่สุด เมื่อ A กำหนดค่าอยู่ที่ 120 รอบต่อนาที และ C กำหนดค่าอยู่ที่ 40 มม.ต่อนาที

5.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกก่อนปรับปรุง

5.3.1 วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุง

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการที่จัดขึ้นรูปแบบเย็น จะทำการวิเคราะห์ความสามารถในด้านการขึ้นรูปให้ได้ความหนาตามที่กำหนด เนื่องจากความหนาามีผลต่อความปลอดภัยต่อการใช้ท่อแรงดันสูงจำเป็นต้องพิจารณาเป็นพิเศษ โดยผลจากการสุ่มตัวอย่างของท่อที่ผลิตได้มาวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนปรับปรุงได้ผลดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงเส้นผ่าศูนย์กลางท่อด้านนอก

ตัวอย่างท่อที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อด้านนอก (มม.)	120.54	120.82	120.94	120.82	120.9	120.7	120.42	120.96	120.48	120.64
ตัวอย่างท่อที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อด้านนอก (มม.)	120.82	120.6	120.32	120.52	120.62	120.84	120.62	120.64	120.8	120.7
ตัวอย่างท่อที่	21	22	23	24	25	26	27	28	Avg.	Stedev.
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อด้านนอก (มม.)	120.86	120.78	120.86	120.92	120.94	120.86	120.68	120.84	120.7407	0.1490

หมายเหตุ * คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยรวม (Overall) ซึ่งในการคำนวณค่ามินิแทบจะใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแบบ Within ซึ่งเท่ากับ 0.1457 ส่งผลให้ค่าคำนวณที่ได้ต่างกันเล็กน้อย

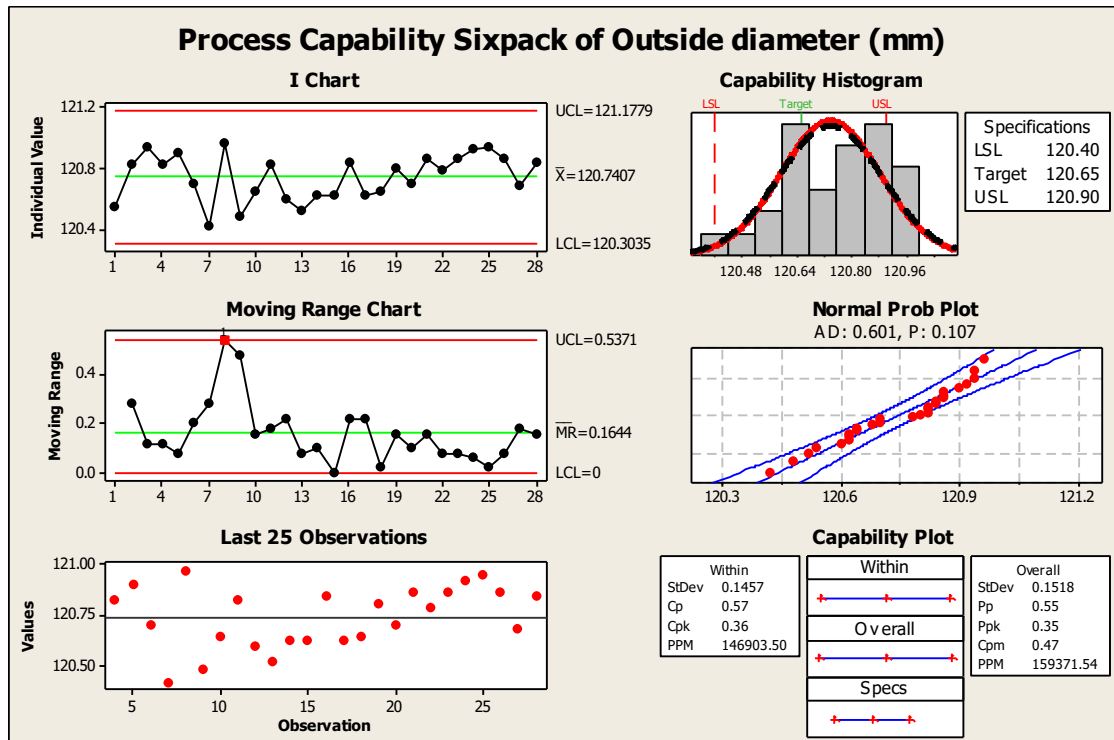
จากตารางที่ 18 สามารถคำนวณค่า C_p และ C_{pk} ได้ดังนี้

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = \frac{120.9 - 120.4}{6 \times 0.1490} = 0.5593$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - Average}{3\sigma}, \frac{Average - LSL}{3\sigma}\right)$$

$$= \min\left(\frac{120.9 - 120.74}{3 \times 0.1490}, \frac{120.74 - 120.4}{3 \times 0.1490}\right)$$

$$= \min(0.3579, 0.7606) = 0.3579$$



รูปที่ 36 กราฟวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการขึ้นรูปท่อ

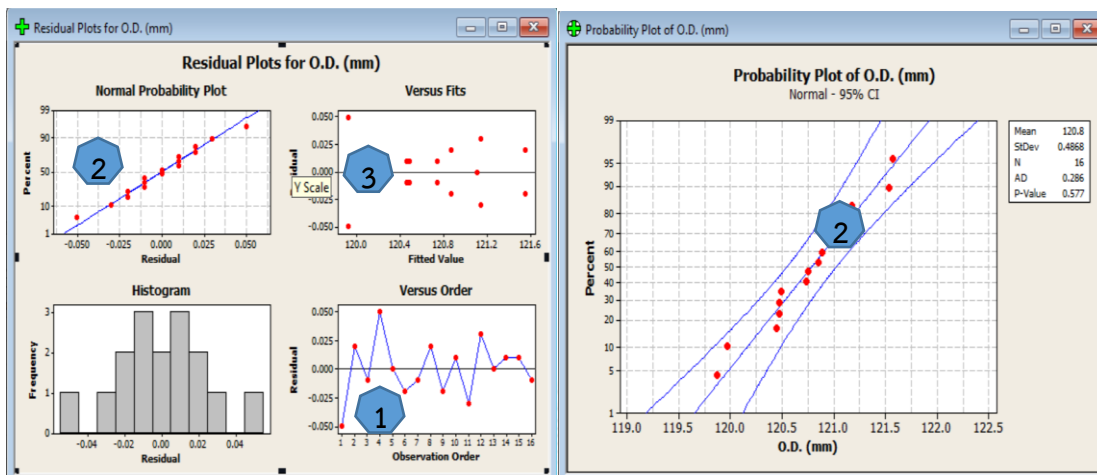
สำหรับข้อกำหนดด้านเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อก่อนการปรับปรุง

รูปที่ 36 พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อที่ได้จากกระบวนการ ริดขึ้นรูปแบบเย้น ใน Pass 3 นั้นมีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบ normal โดยพิจารณาจาก Normal probability plot ที่มีค่า P-value = 0.104 ซึ่งมีค่ามากกว่า α ที่ 0.05 นอกจากนี้เมื่อพิจารณากราฟของ R-chart แล้วพบว่าค่ายังอยู่ในช่วงที่ควบคุม โดยดูจากการกระจายตัวของค่าความหนาไม่มีจุดใดอยู่นอกเหนือเส้น LCL และ UCL ทั้งนี้เมื่อพิจารณากราฟตั้งแต่จุดที่ 17 ถึงจุดที่ 25 จะพบว่ากราฟมีกระจายตัวอย่างมีรูปแบบหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ มีการกระจายตัวในลักษณะเพิ่มขึ้นหรือลดลงติดต่อกันมากกว่า 7 จุด แสดงว่าข้อมูลที่เกิดขึ้นมีสาเหตุที่สามารถควบคุมได้แต่ไม่ได้รับการควบคุม ซึ่งจากการพิจารณาสาเหตุของการเกิดในระหว่งนั้นพบว่าเป็นช่วงการผลิตที่ยังไม่มีการควบคุมความผิดปกติของเครื่องจักร อาทิเช่น ค่า round run-out ของลูกรีดและแกนหมุน ทำให้ท่อที่รีดได้มีลักษณะเบี้ยว ส่งผลให้ค่าขนาดที่ศึกษามีความแปรปรวนลักษณะดังกล่าว ซึ่งในช่วงของการปรับปรุง จะทำการกำหนดให้มีการตรวจสอบค่าดังกล่าวเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่า Cp = 0.57 และ ค่า Cpk = 0.36 สามารถวิเคราะห์ผลความสามารถของความหนาที่ได้จากกระบวนการ ริดขึ้นรูปแบบเย้น ยังห่างจากค่าเฉลี่ยของกระบวนการ เพราะค่า Cpk < Cp นอกจากนี้ค่า Cpk ยังมีค่าน้อยกว่า 1.33 ซึ่งเป็นค่าแนะนำต่ำที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าขนาดที่ได้กระบวนการ ริดขึ้นรูปแบบเย้น ยังจำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงให้ดีขึ้น

5.3.2 วิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อก่อนปรับปรุง

นำผลการทดลองในตารางที่ 16 มาทำการตรวจสอบข้อสมมติฐาน (Assumption) ของความคลาดเคลื่อน ซึ่งวิธีการทดสอบที่ดีที่สุดคือ การวิเคราะห์ค่าเศษเหลือ (Residual Analysis)



รูปที่ 37 กราฟค่าเศษเหลือ (Residual Plot) ของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ

จากรูปที่ 37 สามารถสรุปได้ว่า (1) ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีลักษณะการสุ่มและมีการกระจายอย่างสมมาตรรอบค่ากลางแสดงว่าข้อมูลอยู่ภายใต้ความผันแปรจากสาเหตุธรรมชาติ (2) การเรียงตัวของข้อมูลเป็นแบบปกติ (Normal) เนื่องจากจุดของค่าต่างๆ อยู่บริเวณใกล้เส้น Ideal Normal และเมื่อตรวจสอบด้วยกราฟ Normality Test พบว่า P-Value = 0.577 ($P > 0.05$) จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวปกติ (3) แสดงว่าข้อมูลที่เกิดขึ้นมีสาเหตุที่สามารถควบคุมได้แต่ไม่ได้รับการควบคุม ซึ่งจากการพิจารณาสาเหตุของการเกิดในระหว่างนั้นพบว่าในช่วงการผลิตที่ยังไม่มีการควบคุมความผิดปกติของเครื่องจักร อาทิเช่น ค่า round run-out ของลูกรีดและแกนหมุน ทำให้ท่อที่รีดได้มีลักษณะเบี้ยว ส่งผลให้ค่าขนาดที่ศึกษามีความแปรปรวนลักษณะดังกล่าว ซึ่งในช่วงของการปรับปรุงจะทำการกำหนดให้มีการตรวจสอบค่าดังกล่าวเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น

5.3.2.1 ระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อหลังรีด

ผู้วิจัยสามารถวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อพิจารณาอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม 2 ทาง และอิทธิพลร่วม 3 ทาง ว่ามีพจน์ใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกท่อหลังการขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดขึ้นรูปแบบเย็น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้จาก

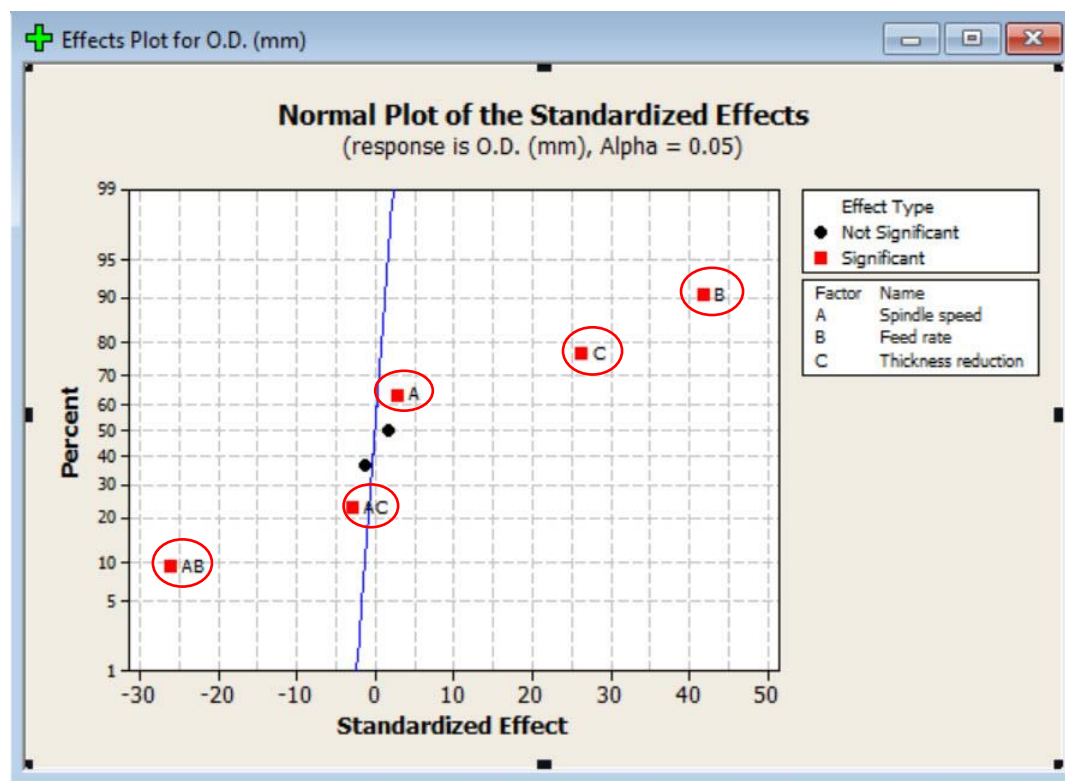
ตารางที่ 19 จากนั้นทำการประเมินผลจากกราฟ Normal Probability Plot และ Pareto Chart ดังรูปที่ 38

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของความแปรปรวนขั้นต้นของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ

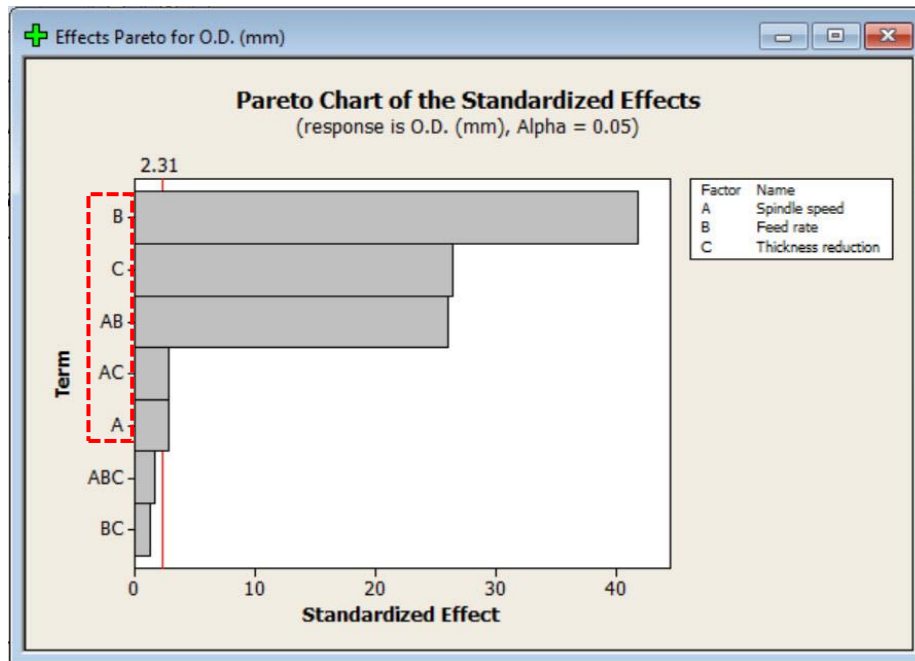
Estimated Effects and Coefficients for O.D. (mm) (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		120.784	0.008385	14404.30	0.000	
Spindle speed	0.047	0.024	0.008385	2.83	0.022	
Feed rate	0.703	0.351	0.008385	41.89	0.000	4
Die distance	0.442	0.221	0.008385	26.39	0.000	
Spindle speed*Feed rate	-0.437	-0.219	0.008385	-26.09	0.000	
Spindle speed*Die distance	-0.048	-0.024	0.008385	-2.83	0.022	
Feed rate*Die distance	-0.022	-0.011	0.008385	-1.34	0.217	
Spindle speed*Feed rate*Die distance	0.027	0.014	0.008385	1.64	0.140	
S = 0.0335410 PRESS = 0.036						
R-Sq = 99.75% R-Sq (pred) = 98.99% R-Sq (adj) = 99.53%						
Analysis of Variance for O.D. (mm) (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS		
Main Effects 1	3	2.76628	2.76628	0.92209		
Spindle speed	1	0.00902	0.00902	0.00902		
Feed rate	1	1.97403	1.97403	1.97403		
Die distance	1	0.78322	0.78322	0.78322		
2-Way Interactions 2	3	0.77668	0.77668	0.25889		
Spindle speed*Feed rate	1	0.76562	0.76562	0.76562		
Spindle speed*Die distance	1	0.00903	0.00903	0.00903		
Feed rate*Die distance	1	0.00202	0.00202	0.00202		
3-Way Interactions 3	1	0.00302	0.00302	0.00302		
Spindle speed*Feed rate*Die distance	1	0.00302	0.00302	0.00302		
Residual Error	8	0.00900	0.00900	0.00113		
Pure Error	8	0.00900	0.00900	0.00113		
Total	15	3.55498				
Source	F	P				
Main Effects	819.64	0.000				
Spindle speed	8.02	0.022				
Feed rate	1754.69	0.000				
Die distance	696.20	0.000				
2-Way Interactions	230.13	0.000				
Spindle speed*Feed rate	680.56	0.000				
Spindle speed*Die distance	8.02	0.022				
Feed rate*Die distance	1.80	0.217				
3-Way Interactions	2.69	0.140				
Spindle speed*Feed rate*Die distance	2.69	0.140				
Residual Error						
Pure Error						
Total						

ตารางที่ 19 แสดงผลการวิเคราะห์ Factorial Fit จากการออกแบบการทดลองแบบ 2-Level Factorial ซึ่งประกอบด้วย (1) อิทธิพลหลัก (Main Effects) และ อิทธิพลร่วม (Interaction Effects) แบบ 2 ทาง (2) และ (3) แบบ 3 ทาง เพื่อประเมินว่าปัจจัยใดมีผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญ จะใช้หลักการพิจารณาผลจากตาราง ANOVA ให้ดูที่ค่า P-value ปัจจัยใดที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ($\alpha=0.05$) แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญด้วยความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการพิจารณาผลการทดสอบพบว่ามีปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อขนาดของท่อที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง ริดขึ้น

รูปแบบเย็น ดังนี้ (4) 1.) ผลหลักของความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) 2.) ผลหลักของความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate; F) 3.) ผลหลักของระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (Tf) 4.) อิทธิพลร่วม 2 ทาง ระหว่างความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) และความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate; F) เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 5.) อิทธิพลร่วม 2 ทาง ระหว่างความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) และค่าระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (Tf) ($P=0.022, 0.000, 0.000, 0.000$ และ 0.022 ตามลำดับ)



(ก)



(ข)

รูปที่ 38 ระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกท่อ (O.D)

(ก) กราฟ Normal Probability Plot (ข) กราฟพาเรโต

การประเมินผลจากกราฟ Normal Probability Plot และ Pareto Chart ในรูปที่ 38 สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

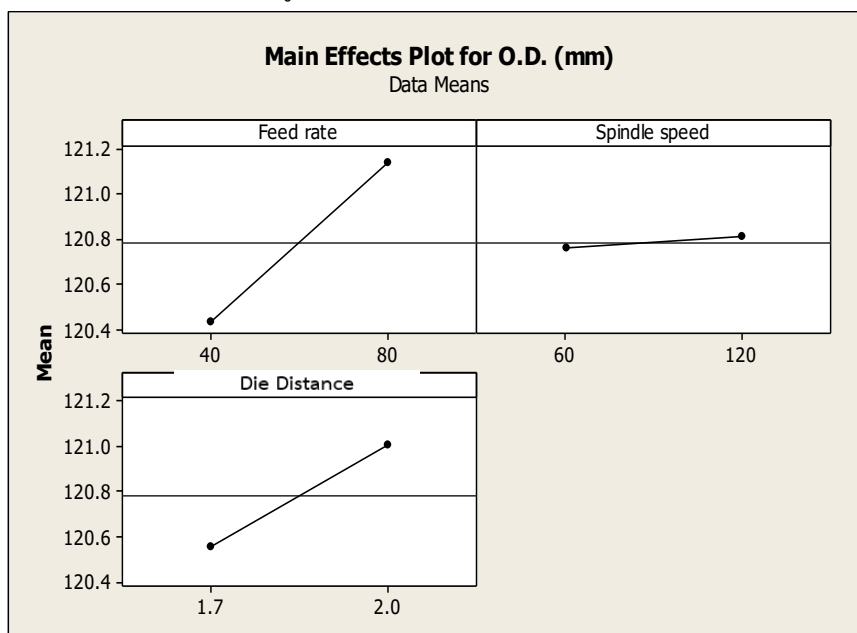
- กราฟ Normal Probability Plot แสดงปัจจัยที่มีนัยสำคัญจะถูกระบุโดยสัญลักษณ์เป็นรูปสี่เหลี่ยมสีแดง เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 นั่นคือ

- 1.) ผลหลักของความเร็รรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S)
- 2.) ผลหลักของความเร็วบ้อนของลูกรีด (Feed rate; F)
- 3.) ผลหลักของระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (Tf)
- 4.) อิทธิพลร่วม 2 ทาง ระหว่างความเร็รรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) และความเร็วบ้อนของลูกรีด (Feed rate; F)
- 5.) อิทธิพลร่วม 2 ทาง ระหว่างความเร็รรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) และค่าระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (Tf) ตามลำดับ

- แผนภาพพาเรโต (Pareto Chart) แสดงค่าสัมบูรณ์ของผลกระทบบน Pareto Chart ถ้ากราฟของปัจจัยใดมีค่าเกินเส้นอ้างอิงหรือถูกเส้นแดงประตัดผ่าน นั้นแสดงว่าพจน์นั้นมีอิทธิพลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญด้วยความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และลำดับขั้นของพาเรโตแสดงถึงความรุนแรงของแต่ละ

ละพจน์ที่มีอิทธิพลต่อผลตอบ ทั้งนี้จึงไม่สามารถตัดปัจจัยนั้นได้ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกับกราฟ Normal Probability Plot

สำหรับการออกแบบการทดลองของงานวิจัยนี้แบบ 2-Level Factorial เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้น จึงใช้การวิเคราะห์แบบ Main Effects Plot และ Interaction ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 39

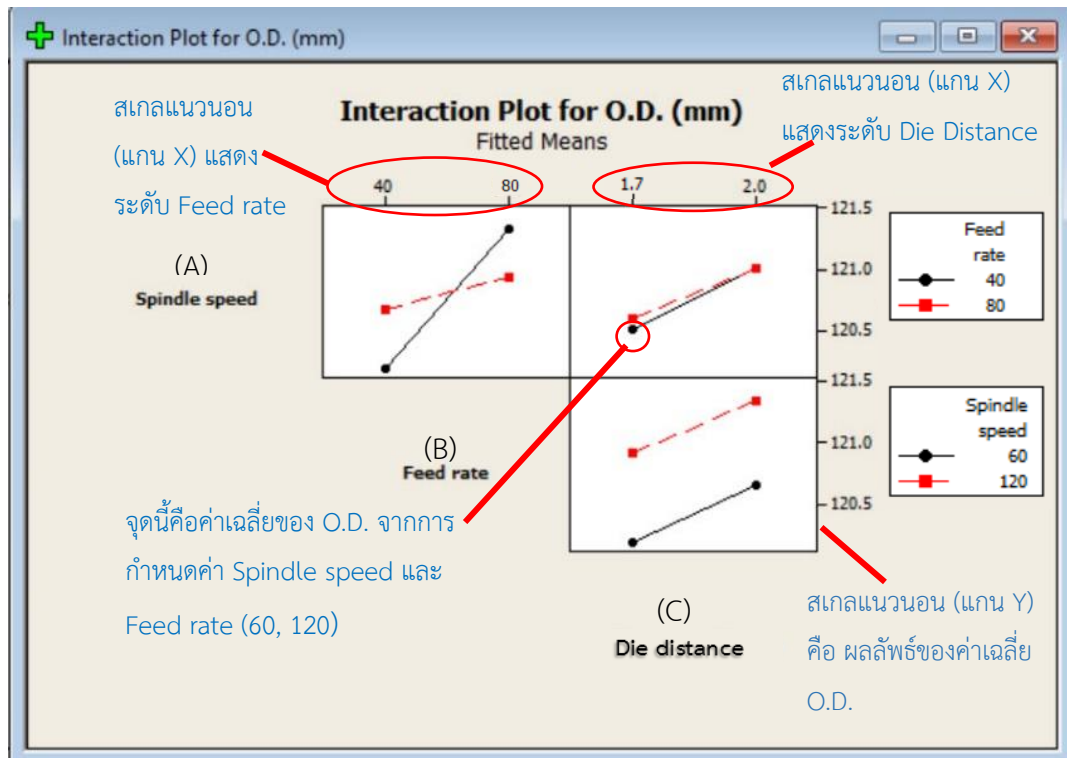


รูปที่ 39 กราฟ Main Effects Plot แสดงผลกระทบจากปัจจัยต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ

กราฟ Main Effects Plot แสดงผลกระทบจากการกำหนดค่าตัวแปรเช่น Spindle speed, Feed rate และ Die distance เมื่อเทียบกับกระบวนการเดิม ซึ่งผลกระทบในแต่ละปัจจัยเหล่านี้เรียกว่า อิทธิพลหลัก “Main Effect”

จากรูปที่ 39 จะเห็นว่ากราฟแสดงถึงการกำหนดค่าตัวแปร Spindle speed, Feed rate และ Die distance ที่ส่งผลต่อขนาดของท่อที่รีดด้วยเครื่อง รีดขึ้นรูปแบบเย็น นั่นก็คือ ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ, ความหนาของท่อ และค่า Spring back โดยสามารถวิเคราะห์ผลว่าการกำหนดค่า Spindle speed ที่ 60 รอบต่อนาที, Feed rate ที่ 40 มม. ต่อนาที และ Die distance ที่ 1.7 มม. ส่งผลทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง รีดขึ้นรูปแบบเย็น ต่ำกว่า 120.65 มม. โดยค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลดลงเมื่อเทียบกับ Spindle speed ที่ 120 รอบต่อนาที, Feed rate ที่ 80 มม. ต่อนาที และ Die distance ที่ 2 มม.

จึงสรุปได้ว่าการกำหนดค่าตัวแปรทั้ง 3 ปัจจัย กล่าวคือ Spindle speed, Feed rate และ Die distance ส่งผลต่อขนาดของท่อที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง รีดขึ้นรูปแบบเย็น ดังนั้นควรที่จะพิจารณาต่อไปใน Interaction Plot กล่าวคือ ถ้าอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยต่างๆ มีนัยสำคัญนั้นสามารถส่งผลถึงการวิเคราะห์ผลของอิทธิพลหลักได้



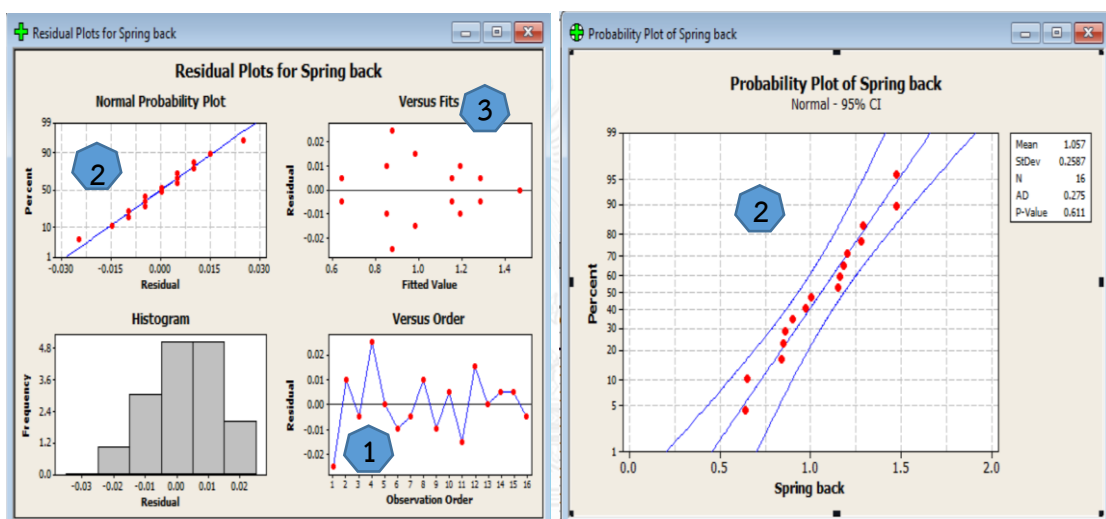
รูปที่ 40 กราฟ Interaction Plot แสดงอิทธิพลร่วม
ระหว่างปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกท่อ

กราฟ Interaction Plot แสดงผลกระทบจากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยหนึ่งต่ออีกปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากอิทธิพลร่วมสามารถทำให้ผลของอิทธิพลหลักมีค่ามากขึ้นหรือลดลง ดังนั้นการพิจารณาอิทธิพลร่วมจึงมีความสำคัญอย่างมาก

จากรูปที่ 40 เราจะเห็นว่ากราฟแสดงถึงปัจจัย AB และ AC มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) ที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดของท่อที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น เช่น ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ, ความหนาท่อ และค่า Spring back นั่นคือ เส้นที่เชื่อมระหว่างค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ทั้ง 2 ปัจจัย มีจุดตัดกัน จึงส่งผลทำให้ปัจจัยทั้งสองมีค่ามากขึ้นหรือลดลง ปัจจัย BC ไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Not Interaction Effect) ทั้งนี้การประเมินผลจากกราฟ Interaction Plot สามารถสรุปได้ดังนี้

- อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ AB กราฟของค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกที่จะมีค่าใกล้เคียง 120.65 มม. มากที่สุด เมื่อ A กำหนดค่าอยู่ที่ 120 รอบต่อนาที และ B กำหนดค่าอยู่ที่ 40 มม. ต่อนาที
- อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ AC กราฟของค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกที่จะมีค่าใกล้เคียง 120.65 มม. มากที่สุด เมื่อ A กำหนดค่าอยู่ที่ 120 รอบต่อนาที และ C กำหนดค่าอยู่ที่ 1.5 มม. ต่อนาที

5.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระยะขยายของวัสดุหลังรีด



รูปที่ 41 กราฟค่าเศษเหลือ (Residual Plot) ของ Spring back

จากรูปที่ 41 สามารถสรุปได้ว่า (1) ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีลักษณะการสุ่มและมีการกระจายอย่างสมมาตรรอบค่ากลางแสดงว่าข้อมูลอยู่ภายใต้ความผันแปรจากสาเหตุธรรมชาติ (2) การเรียงตัวของข้อมูลเป็นแบบปกติ (Normal) เนื่องจากจุดของค่าต่างๆ อยู่บริเวณใกล้เส้น Ideal Normal และเมื่อตรวจสอบด้วยกราฟ Normality Test พบว่า P-Value = 0.611 ($P > 0.05$) จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวปกติ (3) ข้อมูลแต่ละทรีตเมนต์มีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ แสดงว่าข้อมูลมีความผันแปรที่ไม่แตกต่างกัน

5.4.1 ระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อระยะขยายตัวของวัสดุหลังรีด

ผู้วิจัยสามารถวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อพิจารณาอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม 2 ทาง และอิทธิพลร่วม 3 ทาง ว่ามีพจน์ใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อระยะขยายตัวของวัสดุหลังการขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดขึ้นรูปแบบเย็น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้จากตารางที่ 20 จากนั้นทำการประเมินผลจากกราฟ Normal Probability Plot และ Pareto Chart ดังรูปที่ 42 ตามลำดับ

ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA หาคความแปรปรวนขั้นต้นของค่า Spring back

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		1.0569	0.004193	252.08	0.000
Spindle speed	0.0237	0.0119	0.004193	2.83	0.022
Feed rate	0.3513	0.1756	0.004193	41.89	0.000
Die distance	-0.2787	-0.1394	0.004193	-33.24	0.000
Spindle speed*Feed rate	-0.2188	-0.1094	0.004193	-26.09	0.000
Spindle speed*Die distance	-0.0237	-0.0119	0.004193	-2.83	0.022
Feed rate*Die distance	-0.0112	-0.0056	0.004193	-1.34	0.217
Spindle speed*Feed rate*Die distance	0.0137	0.0069	0.004193	1.64	0.140

s = 0.0167705 PRESS = 0.009
R-Sq = 99.78% R-Sq(pred) = 99.10% R-Sq(adj) = 99.58%

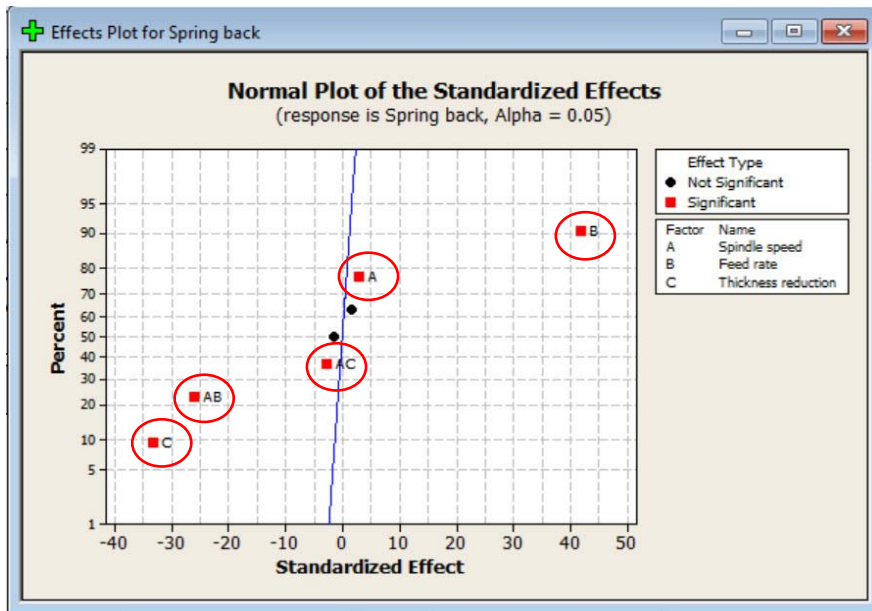
Analysis of Variance for Spring back (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS
Main Effects 1	3	0.80657	0.806569	0.268856
Spindle speed	1	0.00226	0.002256	0.002256
Feed rate	1	0.49351	0.493506	0.493506
Die distance	1	0.31081	0.310806	0.310806
2-Way Interactions 2	3	0.19417	0.194169	0.064723
Spindle speed*Feed rate	1	0.19141	0.191406	0.191406
Spindle speed*Die distance	1	0.00226	0.002256	0.002256
Feed rate*Die distance	1	0.00051	0.000506	0.000506
3-Way Interactions 3	1	0.00076	0.000756	0.000756
Spindle speed*Feed rate*Die distance	1	0.00076	0.000756	0.000756
Residual Error	8	0.00225	0.002250	0.000281
Pure Error	8	0.00225	0.002250	0.000281
Total	15	1.00374		

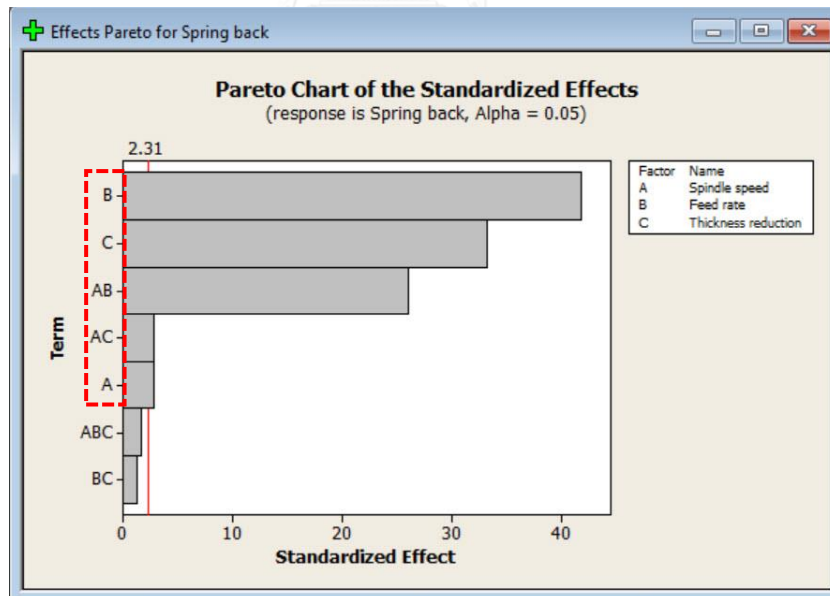
Source	F	P
Main Effects	955.93	0.000
Spindle speed	8.02	0.022
Feed rate	1754.69	0.000
Die distance	1105.09	0.000
2-Way Interactions	230.13	0.000
Spindle speed*Feed rate	680.56	0.000
Spindle speed*Die distance	8.02	0.022
Feed rate*Die distance	1.80	0.217
3-Way Interactions	2.69	0.140
Spindle speed*Feed rate*Die distance	2.69	0.140
Residual Error		
Pure Error		
Total		

ตารางที่ 20 แสดงผลการวิเคราะห์ Factorial Fit จากการออกแบบการทดลองแบบ 2-Level Factorial ซึ่งประกอบด้วย (1) อิทธิพลหลัก (Main Effects) และ อิทธิพลร่วม (Interaction Effects) แบบ 2 ทาง (2) และ (3) แบบ 3 ทาง เพื่อประเมินว่าปัจจัยใดมีผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญ จะใช้หลักการพิจารณาผลจากตาราง ANOVA ให้ดูที่ค่า P-value ปัจจัยใดที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ($\alpha=0.05$) แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญด้วยความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการพิจารณาผลการทดสอบพบว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อขนาดของท่อที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง ริดขึ้นรูปแบบเย็น ดังนี้ (4) 1.) ผลหลักของความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) 2.) ผลหลักของความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate; F) 3.) ผลหลักของระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (Tf) 4.) อิทธิพลร่วม 2 ทาง ระหว่างความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) และ ความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate; F) เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 5.)

อิทธิพลร่วม 2 ทาง ระหว่างความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) และค่าระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (Tf) ($P=0.022, 0.000, 0.000, 0.000$ และ 0.022 ตามลำดับ)



(ก)



(ข)

รูปที่ 42 ระบุปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อระยะขยายตัว

(ก) กราฟ Normal Probability Plot (ข) กราฟพาเรโต

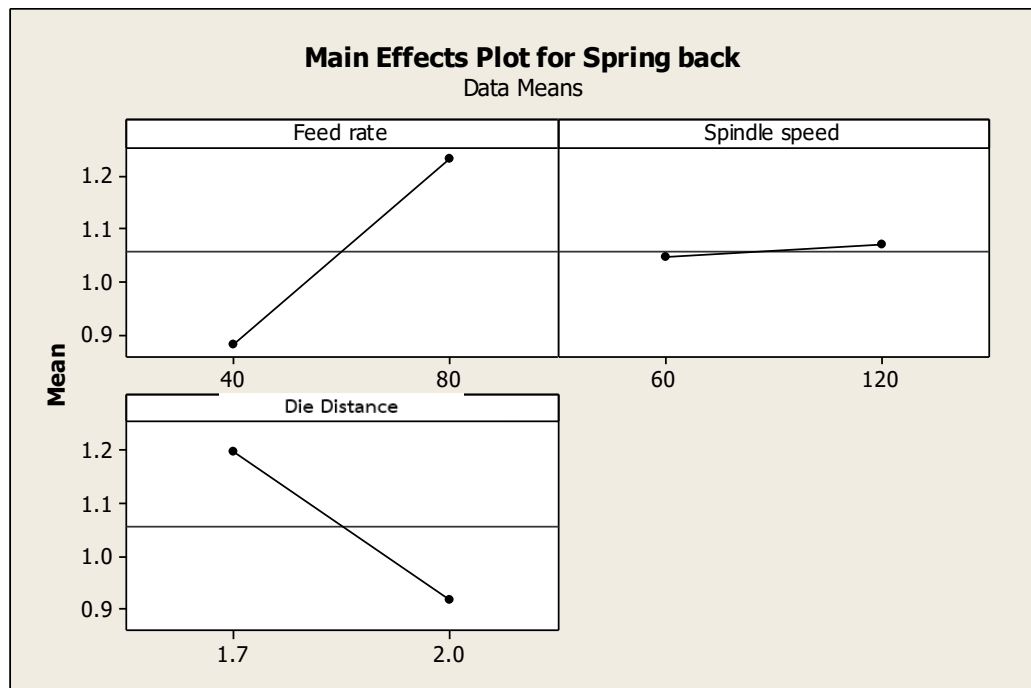
การประเมินผลจากกราฟ Normal Probability Plot และ Pareto Chart ในรูปที่ 42 สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- กราฟ Normal Probability Plot แสดงปัจจัยที่มีนัยสำคัญจะถูกระบุโดยสัญลักษณ์เป็นรูปสี่เหลี่ยมสีแดง เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 นั่นคือ

- 1.) ผลหลักของความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S)
- 2.) ผลหลักของความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate; F)
- 3.) ผลหลักของระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (Tf)
- 4.) อิทธิพลร่วม 2 ทาง ระหว่างความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) และความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate; F)
- 5.) อิทธิพลร่วม 2 ทาง ระหว่างความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S) และค่าระยะการลดความหนาของผิวชิ้นงาน (Tf) ตามลำดับ

- แผนภาพพาเรโต (Pareto Chart) แสดงค่าสัมบูรณ์ของผลกระทบบน Pareto Chart ถ้ากราฟของปัจจัยใดมีค่าเกินเส้นอ้างอิงหรือถูกเส้นแดงประตัดผ่าน นั้นแสดงว่าพจน์นั้นมีอิทธิพลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญด้วยความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และลำดับชั้นของพาเรโตแสดงถึงความรุนแรงของแต่ละพจน์ที่มีอิทธิพลต่อผลตอบ ทั้งนี้จึงไม่สามารถตัดปัจจัยนั้นได้ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกับกราฟ Normal Probability Plot

สำหรับการออกแบบการทดลองของงานวิจัยนี้แบบ 2-Level Factorial เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้น จึงใช้การวิเคราะห์แบบ Main Effects Plot และ Interaction ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 43



รูปที่ 43 กราฟ Main Effects Plot แสดงผลกระทบจากปัจจัยต่อระยะขยายตัวของวัสดุ

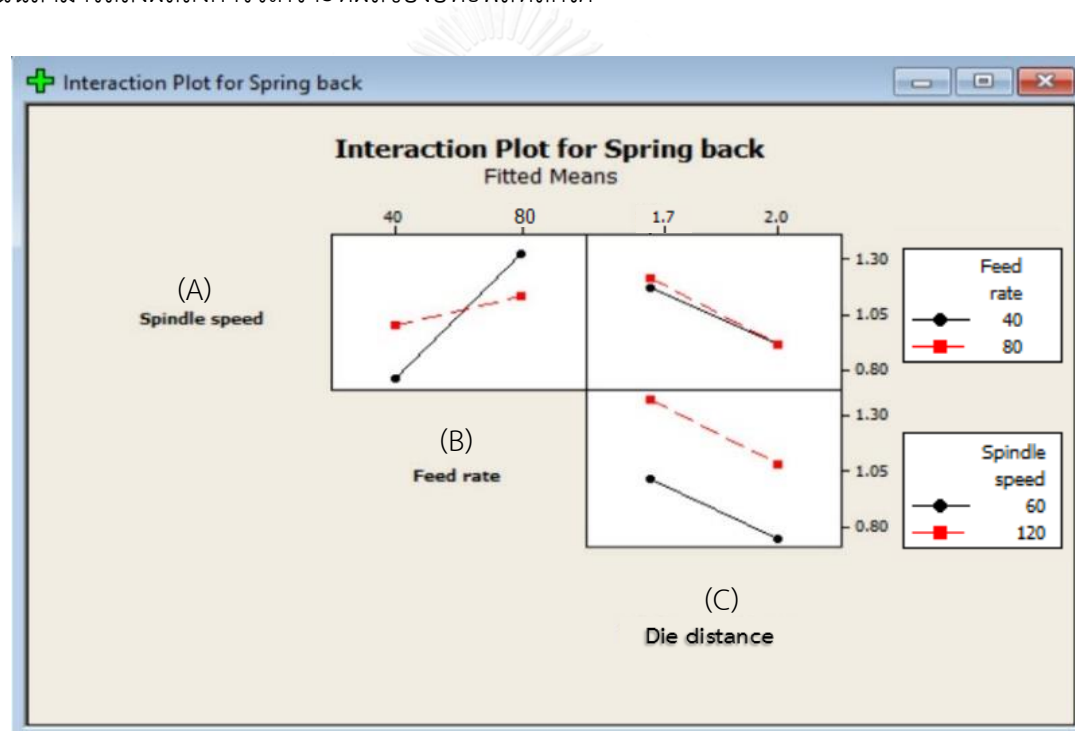
กราฟ Main Effects Plot แสดงผลกระทบจากการกำหนดค่าตัวแปรเช่น Spindle speed, Feed rate และ Die distance เมื่อเทียบกับกระบวนการเดิม ซึ่งผลกระทบในแต่ละปัจจัยเหล่านี้เรียกว่า อิทธิพลหลัก “Main Effect”

จากรูปที่ 43 จะเห็นว่ากราฟแสดงถึงการกำหนดค่าตัวแปร Spindle speed, Feed rate และ Die distance ที่ส่งผลต่อขนาดของท่อที่รีดด้วยเครื่อง รีดขึ้นรูปแบบเย็น นั่นก็คือ ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ, ความหนาของท่อ และค่า Spring back โดยสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- การกำหนดค่า Spindle speed ที่ 60 รอบต่อนาที, Feed rate ที่ 40 มม. ต่อนาที และ Die distance ที่ 1.7 มม. ส่งผลทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง รีดขึ้นรูปแบบเย็น ต่ำกว่า 120.65 มม. โดยค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลดลงเมื่อเทียบกับ Spindle speed ที่ 120 รอบต่อนาที, Feed rate ที่ 80 มม. ต่อนาที และ Die distance ที่ 2 มม.
- การกำหนดค่า Spindle speed ที่ 60 รอบต่อนาที, Feed rate ที่ 40 มม. ต่อนาที และ Die distance ที่ 1.7 มม. ส่งผลทำให้ความหนาของท่อที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง รีดขึ้นรูปแบบเย็น ต่ำกว่า 2.75 มม. โดยค่าเฉลี่ยของความหนาลดลงเมื่อเทียบกับ Spindle speed ที่ 120 รอบต่อนาที, Feed rate ที่ 80 มม. ต่อนาที และ Die distance ที่ 2 มม.

- การกำหนดค่า Spindle speed ที่ 60 รอบต่อนาที, Feed rate ที่ 40 มม. ต่อนาที และ Die distance ที่ 2 มม. ส่งผลให้ค่า Spring back ที่เกิดระหว่างการขึ้นรูปด้วยเครื่อง รีดขึ้นรูปแบบเย็น เกิดน้อย โดยค่าเฉลี่ยของค่า Spring back ลดลงเมื่อเทียบกับ Spindle speed ที่ 120 รอบต่อนาที, Feed rate ที่ 90 มม. ต่อนาที และ Die distance ที่ 1.7 มม.

จึงสรุปได้ว่าการกำหนดค่าตัวแปรทั้ง 3 ปัจจัย กล่าวคือ Spindle speed, Feed rate และ Die distance ส่งผลต่อขนาดของท่อที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง รีดขึ้นรูปแบบเย็น ดังนั้นควรที่จะพิจารณาต่อไปใน Interaction Plot กล่าวคือ ถ้าอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยต่างๆ มีนัยสำคัญนั้นสามารถส่งผลถึงการวิเคราะห์ผลของอิทธิพลหลักได้



รูปที่ 44 กราฟ Interaction Plot แสดงอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่า Spring back

กราฟ Interaction Plot แสดงผลกระทบจากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยหนึ่งต่ออีกปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากอิทธิพลร่วมสามารถทำให้ผลของอิทธิพลหลักมีค่ามากขึ้นหรือลดลง ดังนั้นการพิจารณาอิทธิพลร่วมจึงมีความสำคัญอย่างมาก

จากรูปที่ 44 เราจะเห็นว่ากราฟแสดงถึงปัจจัย AB และ AC มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) ที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดของท่อที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น เช่น ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ, ความหนาท่อ และค่า Spring back นั่นคือ เส้นที่

เชื่อมระหว่างค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ทั้ง 2 ปัจจัย มีจุดตัดกัน จึงส่งผลทำให้ปัจจัยทั้งสองมีค่ามากขึ้นหรือลดลง ปัจจัย BC ไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Not Interaction Effect) ทั้งนี้การประเมินผลจากกราฟ Interaction Plot ได้ดังนี้

- อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ AB กราฟของค่า Spring back น้อยที่สุด เมื่อ A กำหนดค่าอยู่ที่ 60 รอบต่อนาที และ B กำหนดค่าอยู่ที่ 2 มม.ต่อนาที
- อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ AC กราฟของค่า Spring back น้อยที่สุด เมื่อ A กำหนดค่าอยู่ที่ 120 รอบต่อนาที หรือ 60 รอบต่อนาที แต่ C ต้องกำหนดค่าอยู่ที่ 2 มม.ต่อนาที

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลในข้างต้น ผู้วิจัยจึงสรุปปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อขนาดของท่อที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น ได้ดังต่อไปนี้

อิทธิพลหลัก (Main Effect) : B, C และ A

อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) : AB และ AC

5.5 การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการรีดขึ้นรูปที่ 3

หลังจากการทำการทดสอบสมมติฐาน โดยการนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลการทดสอบสมมติฐานที่ละปัจจัย และการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของท่ออย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อได้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดของท่อที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น แล้ว นำปัจจัยดังกล่าวไปทำการทดลอง โดยเริ่มตั้งแต่การออกแบบการทดลอง ดำเนินการทดลองตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง หาค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลอง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยนั้นๆ โดยที่จะส่งผลต่อขนาดของท่อที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น

จากการกรองปัจจัยนำเข้าในกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น ทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า 3 ปัจจัย ที่มีนัยสำคัญทางสถิติต่อขนาดของท่อที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น นั้นก็คือ

- ความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle speed; S)
- ความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate; F)
- ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ (d)

ในการทดลองเพื่อระดับที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย นี้จะใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) จากนั้นจึงทดลองปัจจัยที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยใช้ค่าปรับตั้งเก่าเปรียบเทียบกับค่าปรับตั้งใหม่ เพื่อให้ได้ค่าขนาดของท่อที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น ตามเป้าหมายที่กำหนด

ตารางที่ 21 รายละเอียดการออกแบบโดยใช้โปรแกรมมินิแท็บ

Box-Behnken Design

Factors: 3 Replicates: 2

Base runs: 15 Total runs: 30

Base blocks: 1 Total blocks: 1

Center points: 6

หลังจากออกแบบการทดลอง จึงดำเนินการทดลองตามลำดับของตารางออกแบบการทดลอง (Design Matrix) และเมื่อได้ผลการทดลองแล้วต้องนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ทั้งนี้ผลการทดลองและการแปลงค่าแสดงใน ตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ลำดับการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

StdOrder	RunOrder	PtType	Factors			Response		
			Spindle speed	Feed rate	Die distance	O.D. (mm)	Thickness (mm)	Spring back
						120.4 -120.9	2.55 -2.95	
26	1	0	90	40	2.00	120.57	2.68	0.34
10	2	2	90	80	1.70	120.91	2.90	0.70
7	3	2	60	60	2.00	120.37	2.61	0.30
19	4	2	120	80	1.85	120.80	2.80	0.52
24	5	2	90	40	1.70	120.49	2.64	0.57
29	6	0	90	60	1.85	120.81	2.82	0.53
9	7	0	90	40	1.70	120.47	2.66	0.58
15	8	2	90	60	1.85	120.79	2.82	0.54
3	9	2	60	80	1.85	121.13	3.02	0.63
13	10	2	90	60	1.85	120.66	2.75	0.63
27	11	0	90	80	2.00	120.97	2.91	0.45
30	12	2	90	60	1.85	120.83	2.87	0.56
17	13	0	120	40	1.85	120.62	2.73	0.49
4	14	2	120	80	1.85	120.79	2.81	0.53

ตารางที่ 23 ลำดับการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (ต่อ)

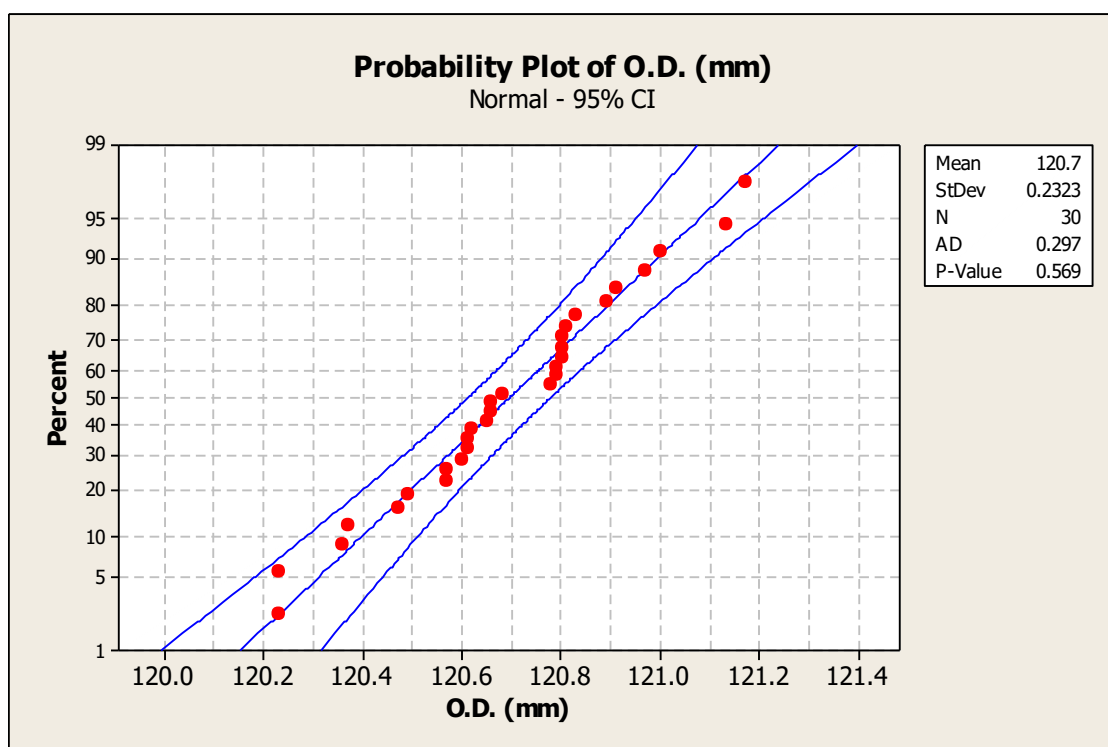
StdOrder	RunOrder	PtType	Factors			Response		
			Spindle speed	Feed rate	Die distance	O.D. (mm)	Thickness (mm)	Spring back
						120.4 -120.9	2.55 -2.95	
16	15	2	60	40	1.85	120.61	2.73	0.49
20	16	2	60	60	1.70	120.23	2.57	0.53
12	17	0	90	80	2.00	121.00	3.00	0.50
11	18	2	90	40	2.00	120.57	2.68	0.34
8	19	2	120	60	2.00	120.78	2.84	0.42
23	20	2	120	60	2.00	120.68	2.77	0.39
2	21	2	120	40	1.85	120.61	2.73	0.49
18	22	2	60	80	1.85	121.17	3.04	0.64
25	23	2	90	80	1.70	120.89	2.87	0.68
22	24	2	60	60	2.00	120.36	2.60	0.30
6	25	2	120	60	1.70	120.66	2.76	0.63
1	26	2	60	40	1.85	120.60	2.71	0.48
21	27	2	120	60	1.70	120.65	2.76	0.63
28	28	2	90	60	1.85	120.80	2.85	0.55
5	29	2	60	60	1.70	120.23	2.57	0.53
14	30	2	90	60	1.85	120.80	2.82	0.54

5.5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

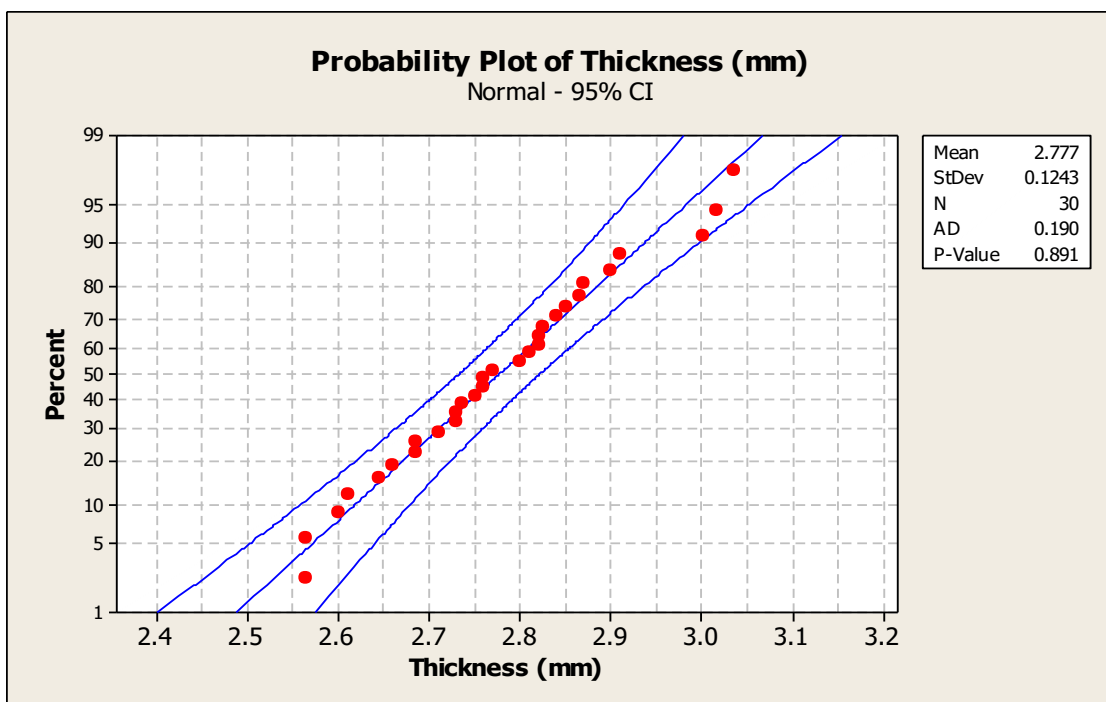
การวิเคราะห์ผลของการทดลองนั้น จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) โดยตรวจสอบว่าข้อมูลมีคุณสมบัติครั้งทั้ง 3 ข้อ ของเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง คือ NID ($0, \sigma^2$)หรือไม่ ด้วยการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของการทดลองตามสมมติฐาน ก่อนที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์และสรุปผลของการออกแบบการทดลองดังนี้

5.5.1.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

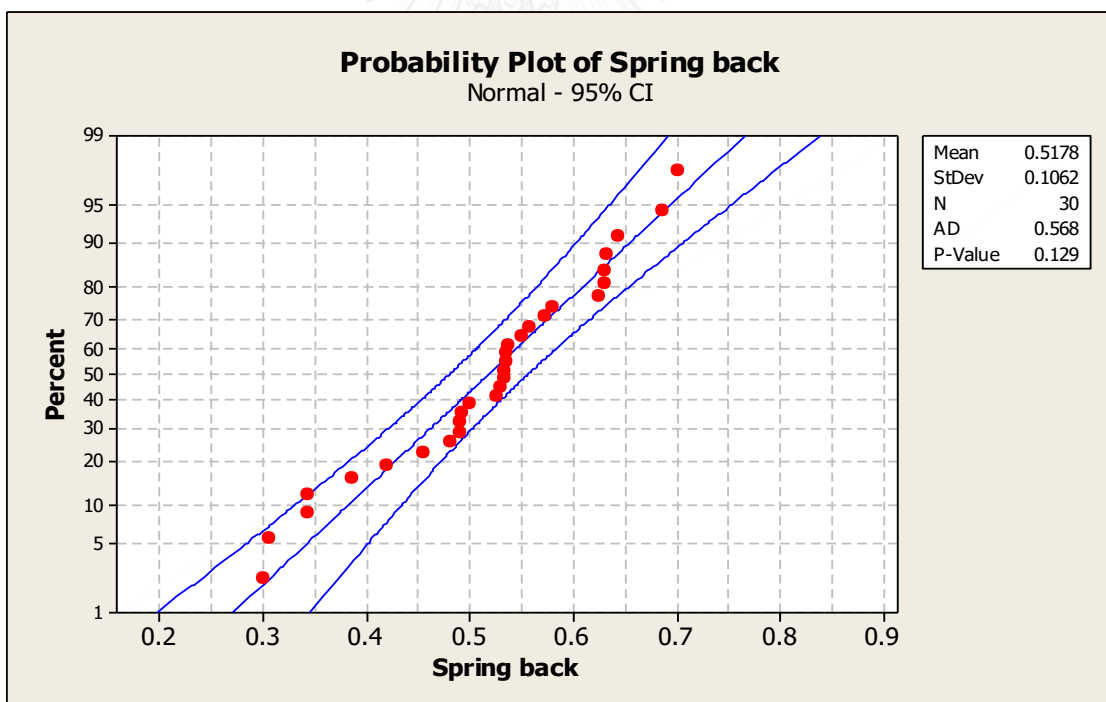
ในการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal Distribution Assumption) ทำโดยการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของตัวแปรตอบสนองว่ามีแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ซึ่งทำการพิจารณาจาก Normal Probability Plot เพื่อพิจารณาการกระจายตัวควรเป็นตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-Value จากการทดสอบความเป็นปกติ (Normality Test) มากกว่า 0.05



รูปที่ 45 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ
ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของท่อ



รูปที่ 46 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติของขนาดความหนาของท่อ

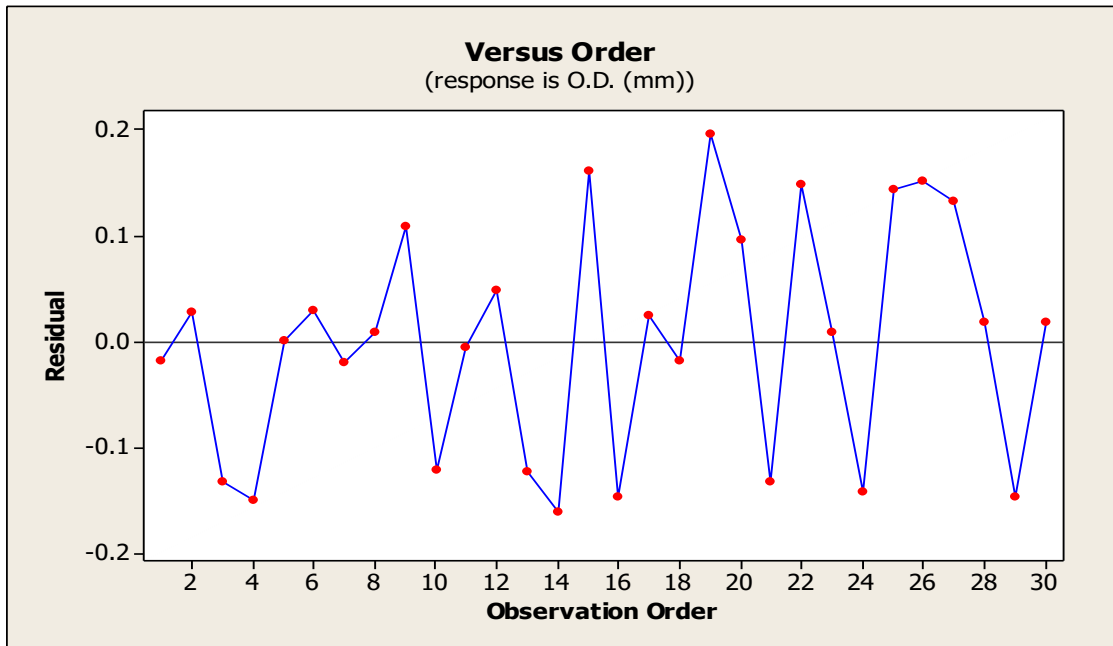


รูปที่ 47 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติของระยะขยายของวัสดุหลังรีด

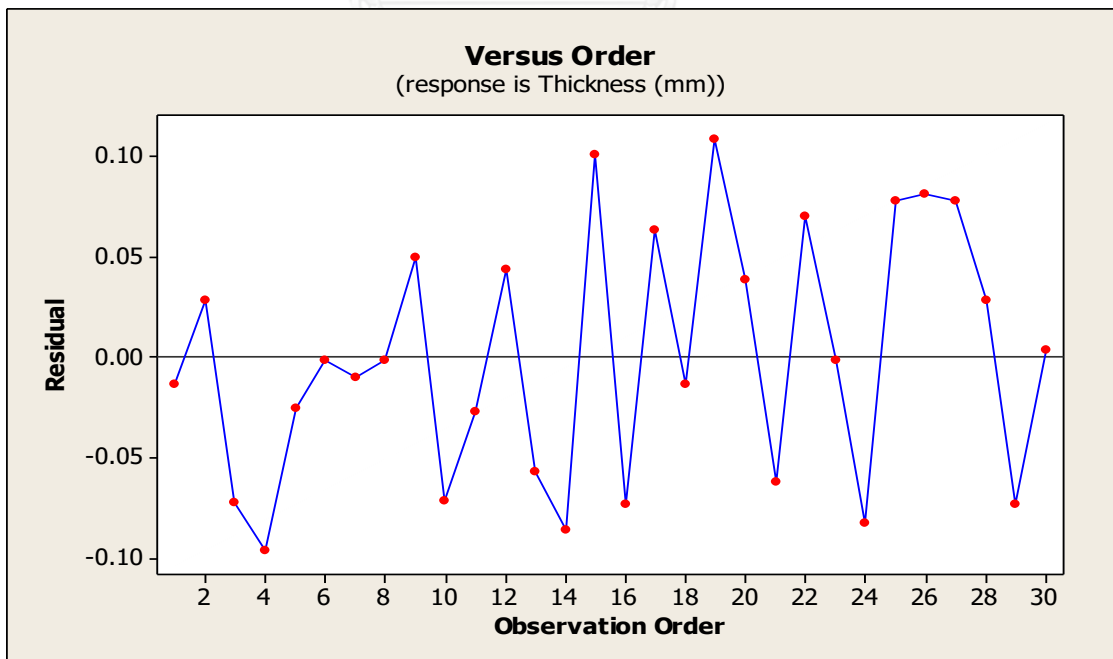
จากผลการทดสอบพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-value มากกว่า 0.05 คือ มีค่าเท่ากับ 0.569, 0.891 และ 0.129 ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ

5.5.1.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent)

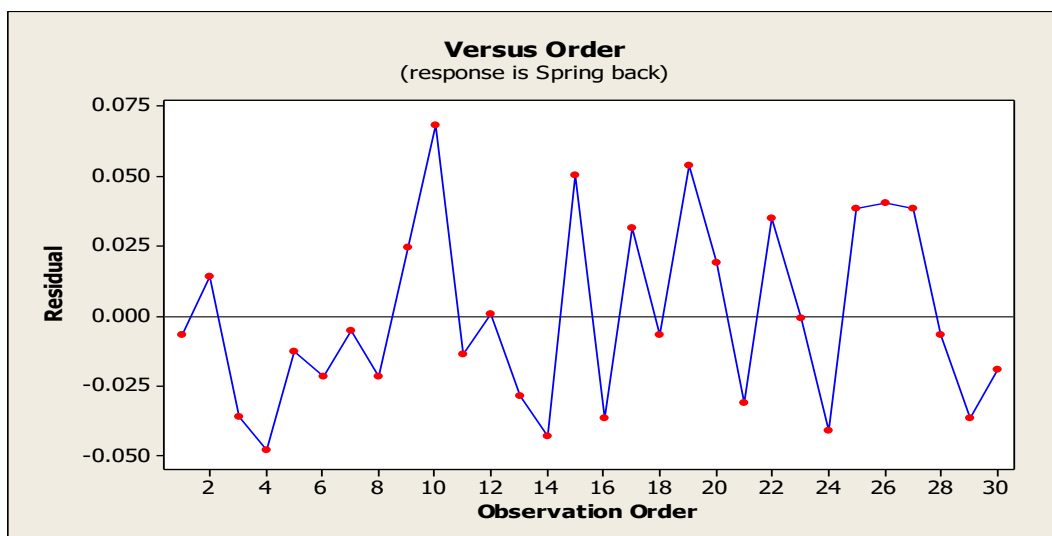
การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence of Residual) จะดำเนินการตรวจสอบได้โดยการพิจารณาแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับของการเก็บข้อมูล (Observation Order)



รูปที่ 48 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของค่าเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก



รูปที่ 49 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของขนาดความหนาของท่อ

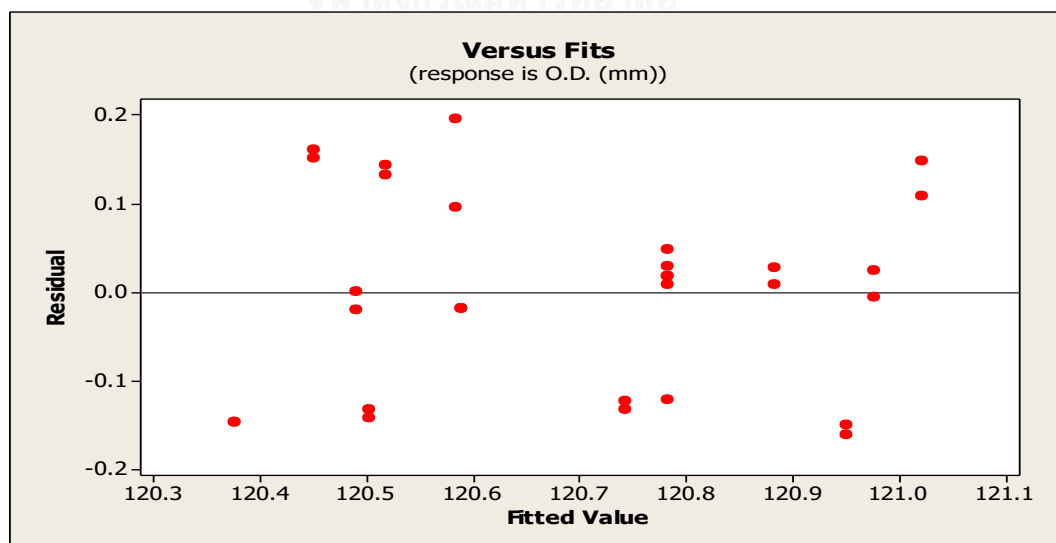


รูปที่ 50 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของระยะขยายตัวของวัสดุ

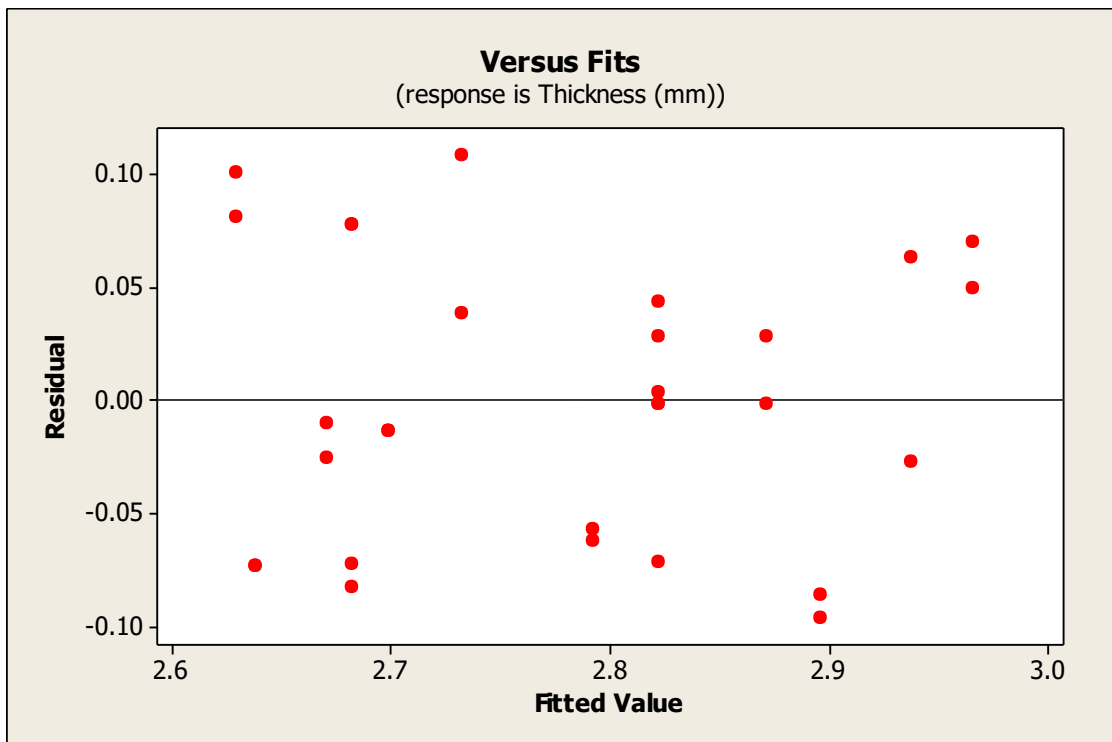
จากผลการทดสอบพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบอิสระต่อกันคือ ไม่มีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

5.5.1.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance stability)

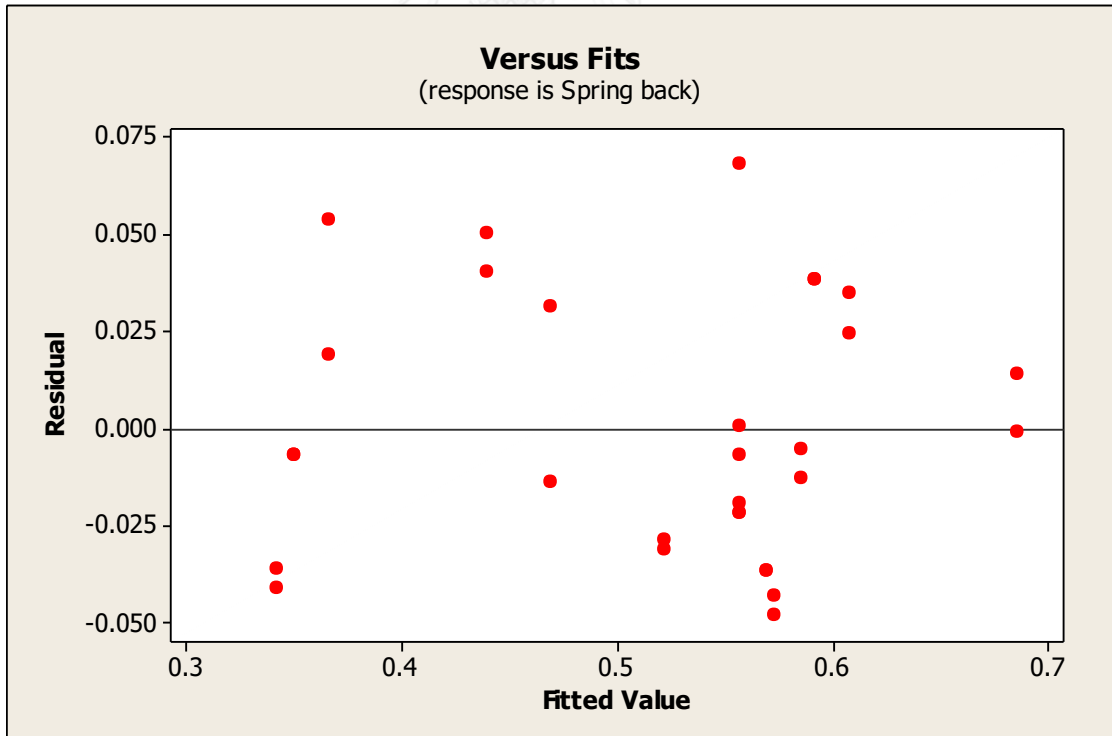
การทดสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนสามารถพิจารณาได้จากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted value) โดยแนวโน้มการกระจายตัวที่ดีต้องกระจายตัวรอบค่ากลางและการกระจายตัวของข้อมูลไม่ควรมีรูปแบบกรวยปากเปิดหรือเป็นแนวโน้ม



รูปที่ 51 แผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ



รูปที่ 52 แผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตของความหนา



รูปที่ 53 แผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตของระยะเวลา
ขยายตัวของวัสดุ

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าส่วนตกค้างไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

5.5.1.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลางด้วยโปรแกรมมินิแทบ สามารถแสดงผลของปัจจัยหลักและอัตรากิริยาที่นัยสำคัญออกมาได้ ดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 การวิเคราะห์ ANOVA ทาผล Response surface regression ของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ

Response Surface Regression: O.D. (mm) versus Spindle spee, Feed rate, ...						
The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for O.D. (mm)						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	120.782	0.05408	2233.347	0.000		
Spindle speed	0.056	0.03312	1.680	0.109		
Feed rate	0.195	0.03312	5.888	0.000		
Die distance	0.048	0.03312	1.453	0.162		
Spindle speed*Spindle speed	-0.115	0.04875	-2.351	0.029		
Feed rate*Feed rate	0.124	0.04875	2.547	0.019		
Die distance*Die distance	-0.172	0.04875	-3.530	0.002		
Spindle speed*Feed rate	-0.091	0.04684	-1.948	0.066		
Spindle speed*Die distance	-0.015	0.04684	-0.320	0.752		
Feed rate*Die distance	-0.001	0.04684	-0.027	0.979		
S = 0.132471 PRESS = 0.87756						
R-Sq = 77.58% R-Sq(pred) = 43.95% R-Sq(adj) = 67.49%						
Analysis of Variance for O.D. (mm)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	1.21458	1.21458	0.134953	7.69	0.000
Linear	3	0.69496	0.69496	0.231654	13.20	0.000
Spindle speed	1	0.04951	0.04951	0.049506	2.82	0.109
Feed rate	1	0.60840	0.60840	0.608400	34.67	0.000
Die distance	1	0.03706	0.03706	0.037056	2.11	0.162
Square	3	0.45119	0.45119	0.150397	8.57	0.001
Spindle speed*Spindle speed	1	0.09226	0.09696	0.096955	5.52	0.029
Feed rate*Feed rate	1	0.14025	0.11385	0.113851	6.49	0.019
Die distance*Die distance	1	0.21868	0.21868	0.218678	12.46	0.002
Interaction	3	0.06843	0.06843	0.022808	1.30	0.302
Spindle speed*Feed rate	1	0.06661	0.06661	0.066613	3.80	0.066
Spindle speed*Die distance	1	0.00180	0.00180	0.001800	0.10	0.752
Feed rate*Die distance	1	0.00001	0.00001	0.000012	0.00	0.979
Residual Error	20	0.35097	0.35097	0.017549		
Lack-of-Fit	3	0.32539	0.32539	0.108462	72.07	0.000
Pure Error	17	0.02558	0.02558	0.001505		
Total	29	1.56555				

ตารางที่ 25 การวิเคราะห์ ANOVA ทหาสมการตัวแบบถดถอยของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ

Response Surface Regression: O.D. (mm) versus Spindle spee, Feed rate, ...	
Estimated Regression Coefficients for O.D. (mm) using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	91.9242
Spindle speed	0.0400625
Feed rate	-0.0130417
Die distance	28.9440
Spindle speed*Spindle speed	-1.27315E-04
Feed rate*Feed rate	0.000310417
Die distance*Die distance	-7.64815
Spindle speed*Feed rate	-1.52083E-04
Spindle speed*Die distance	-0.00333333
Feed rate*Die distance	-4.16667E-04

สามารถสรุปเป็นสมการพยากรณ์ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางท่อได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ} = & 91.9242 + 0.0400625S - 0.0130417F + 28.9440d \\ & - 0.000152083 (SxF) - 0.00333333 (Sxd) - 4.16667(Fxd) \\ & - 0.000127315S^2 + 0.000310417F^2 - 7.64815d^2 \end{aligned}$$

โดยตัวแบบถดถอยนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 77.58% ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ และเมื่อพิจารณาผลจากการออกแบบการทดลอง สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ว่าปัจจัยหลัก ในส่วนของความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate) มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่ออย่างมีนัยสำคัญ เพราะมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 โดยที่พจน์ของสมการอันดับที่ 1 พจน์ของอันตกริยา และพจน์ของสมการอันดับที่ 2 ตัวอื่นๆ นั้น ไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ

ตารางที่ 26 การวิเคราะห์ ANOVA ทาผล Response surface regression ของความหนาท่อ

Response Surface Regression: Thickness (m versus Spindle speed, Feed rate, ...)						
The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for Thickness (mm)						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	2.82167	0.03047	92.590	0.000		
Spindle speed	0.02187	0.01866	1.172	0.255		
Feed rate	0.11187	0.01866	5.995	0.000		
Die distance	0.02250	0.01866	1.206	0.242		
Spindle speed*Spindle speed	-0.05396	0.02747	-1.964	0.064		
Feed rate*Feed rate	0.05354	0.02747	1.949	0.065		
Die distance*Die distance	-0.08271	0.02747	-3.011	0.007		
Spindle speed*Feed rate	-0.05875	0.02639	-2.226	0.038		
Spindle speed*Die distance	0.00250	0.02639	0.095	0.925		
Feed rate*Die distance	0.01000	0.02639	0.379	0.709		
S = 0.0746478 PRESS = 0.276024						
R-Sq = 75.41% R-Sq(pred) = 39.09% R-Sq(adj) = 64.34%						
Analysis of Variance for Thickness (mm)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.341741	0.341741	0.037971	6.81	0.000
Linear	3	0.216012	0.216012	0.072004	12.92	0.000
Spindle speed	1	0.007656	0.007656	0.007656	1.37	0.255
Feed rate	1	0.200256	0.200256	0.200256	35.94	0.000
Die distance	1	0.008100	0.008100	0.008100	1.45	0.242
Square	3	0.097266	0.097266	0.032422	5.82	0.005
Spindle speed*Spindle speed	1	0.020093	0.021500	0.021500	3.86	0.064
Feed rate*Feed rate	1	0.026657	0.021170	0.021170	3.80	0.065
Die distance*Die distance	1	0.050516	0.050516	0.050516	9.07	0.007
Interaction	3	0.028463	0.028463	0.009488	1.70	0.199
Spindle speed*Feed rate	1	0.027613	0.027613	0.027613	4.96	0.038
Spindle speed*Die distance	1	0.000050	0.000050	0.000050	0.01	0.925
Feed rate*Die distance	1	0.000800	0.000800	0.000800	0.14	0.709
Residual Error	20	0.111446	0.111446	0.005572		
Lack-of-Fit	3	0.095512	0.095512	0.031837	33.97	0.000
Pure Error	17	0.015933	0.015933	0.000937		
Total	29	0.453187				

ผลจากการออกแบบการทดลอง สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ว่าปัจจัยหลัก ในส่วนของความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate), อัตราการไหลของความเร็วรอบของแกนหมุน, อัตราการไหลของระยะช่องว่างแม่พิมพ์ มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่ออย่างมีนัยสำคัญ เพราะมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 เช่นเดียวกับอันตรกิริยาของโดยที่พจน์ของสมการอันดับที่ 1 พจน์ของอันตรกิริยา และพจน์ของสมการอันดับที่ 2 ตัวอื่นๆ นั้น ไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ โดยตัวแบบถดถอยนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 75.41% ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

ตารางที่ 27 การวิเคราะห์ ANOVA หาสมการตัวแบบถดถอยของความหนาท่อ

Response Surface Regression: Thickness (m versus Spindle spee, Feed rate, ...	
Estimated Regression Coefficients for Thickness (mm) using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	-10.5079
Spindle speed	0.0163681
Feed rate	-0.00782292
Die distance	13.5009
Spindle speed*Spindle speed	-5.99537E-05
Feed rate*Feed rate	0.000133854
Die distance*Die distance	-3.67593
Spindle speed*Feed rate	-9.79167E-05
Spindle speed*Die distance	0.000555556
Feed rate*Die distance	0.00333333

สามารถสรุปเป็นสมการพยากรณ์ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางท่อได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น ขนาดความหนาของท่อ} = & -10.5079 + 0.0163681S - 0.00782292F + 13.5009d \\
 & - 0.0000979167(S \times F) + 0.000555556(S \times d) + 0.00333333(F \times d) \\
 & - 0.0000599537S^2 + 0.000133854F^2 - 3.67593d^2
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 28 การวิเคราะห์ ANOVA ทาผล Response surface regression ของระยะขยายของวัสดุ

Response Surface Regression: Spring back versus Spindle spee, Feed rate, ...					
The analysis was done using coded units.					
Estimated Regression Coefficients for Spring back					
Term	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	0.558333	0.01680	33.233	0.000	
Spindle speed	0.012500	0.01029	1.215	0.239	
Feed rate	0.054375	0.01029	5.285	0.000	
Die distance	-0.113125	0.01029	-10.996	0.000	
Spindle speed*Spindle speed	-0.039167	0.01514	-2.586	0.018	
Feed rate*Feed rate	0.014583	0.01514	0.963	0.347	
Die distance*Die distance	-0.052917	0.01514	-3.494	0.002	
Spindle speed*Feed rate	-0.028750	0.01455	-1.976	0.062	
Spindle speed*Die distance	0.001250	0.01455	0.086	0.932	
Feed rate*Die distance	0.005000	0.01455	0.344	0.735	
S = 0.0411527 PRESS = 0.079224					
R-Sq = 89.69% R-Sq(pred) = 75.88% R-Sq(adj) = 85.05%					
Analysis of Variance for Spring back					
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Regression	9	0.294559	0.294559	0.032729	19.33
Linear	3	0.254563	0.254563	0.084854	50.10
Spindle speed	1	0.002500	0.002500	0.002500	1.48
Feed rate	1	0.047306	0.047306	0.047306	27.93
Die distance	1	0.204756	0.204756	0.204756	120.90
Square	3	0.033172	0.033172	0.011057	6.53
Spindle speed*Spindle speed	1	0.009909	0.011328	0.011328	6.69
Feed rate*Feed rate	1	0.002585	0.001571	0.001571	0.93
Die distance*Die distance	1	0.020678	0.020678	0.020678	12.21
Interaction	3	0.006825	0.006825	0.002275	1.34
Spindle speed*Feed rate	1	0.006612	0.006612	0.006612	3.90
Spindle speed*Die distance	1	0.000012	0.000012	0.000012	0.01
Feed rate*Die distance	1	0.000200	0.000200	0.000200	0.12
Residual Error	20	0.033871	0.033871	0.001694	
Lack-of-Fit	3	0.025087	0.025087	0.008362	16.19
Pure Error	17	0.008783	0.008783	0.000517	
Total	29	0.328430			
Source	P				
Regression	0.000				
Linear	0.000				
Spindle speed	0.239				
Feed rate	0.000				
Die distance	0.000				
Square	0.003				
Spindle speed*Spindle speed	0.018				
Feed rate*Feed rate	0.347				
Die distance*Die distance	0.002				
Interaction	0.289				
Spindle speed*Feed rate	0.062				
Spindle speed*Die distance	0.932				
Feed rate*Die distance	0.735				
Residual Error					
Lack-of-Fit	0.000				
Pure Error					
Total					

ผลจากการออกแบบการทดลอง สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ว่าปัจจัยหลัก ในส่วนของความเร็วป้อนของลูกรีด (Feed rate), อัตราการหมุนรอบของแกนหมุน, อัตราการขยายช่องว่างแม่พิมพ์ มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่ออย่างมีนัยสำคัญ เพราะมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 เช่นเดียวกับกับอัตราการขยายของโดยที่พจน์ของสมการอันดับที่ 1 พจน์ของอัตราการขยาย และพจน์ของสมการอันดับที่ 2 ตัวอื่นๆ นั้น ไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ โดยตัวแบบถดถอยนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 89.69% ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

ตารางที่ 29 การวิเคราะห์ ANOVA หาสมการตัวแบบถดถอยของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ

Response Surface Regression: Spring back versus Spindle speed, Feed rate, ...	
Estimated Regression Coefficients for Spring back using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	-6.54505
Spindle speed	0.0106111
Feed rate	-4.27083E-04
Die distance	7.82269
Spindle speed*Spindle speed	-4.35185E-05
Feed rate*Feed rate	3.64583E-05
Die distance*Die distance	-2.35185
Spindle speed*Feed rate	-4.79167E-05
Spindle speed*Die distance	0.000277778
Feed rate*Die distance	0.00166667

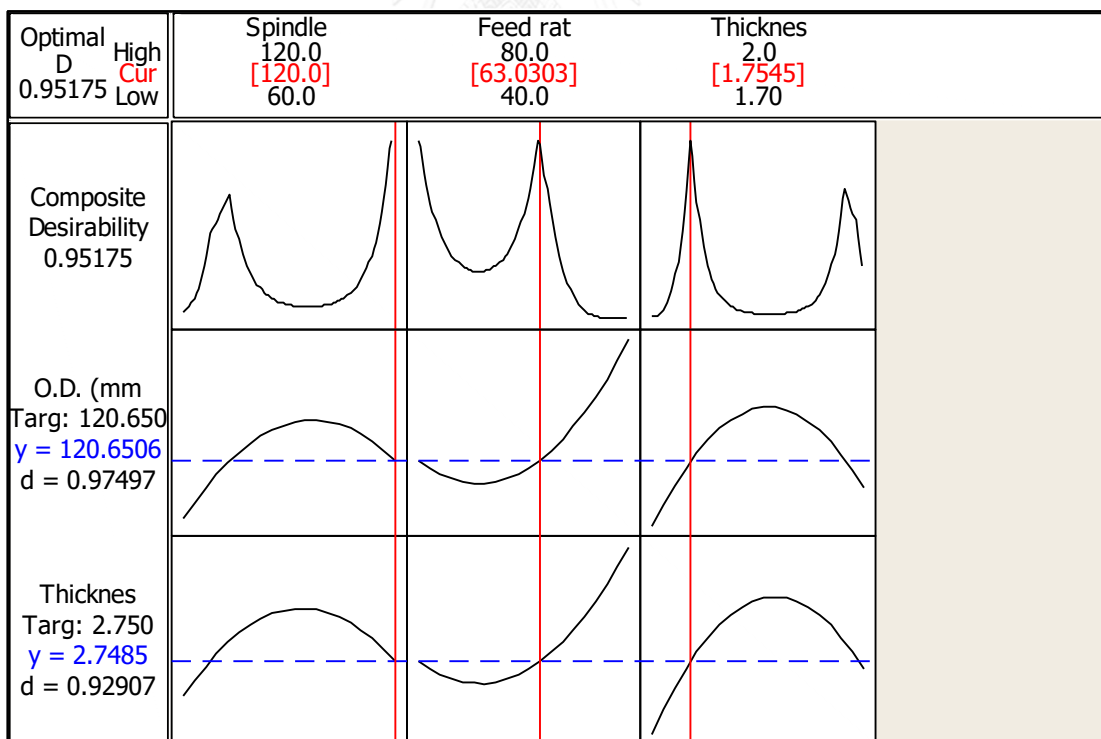
จากตารางที่ สามารถสรุปเป็นสมการพยากรณ์ระยะขยายของวัสดุได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ระยะขยายของวัสดุ} = & -6.54505 + 0.0106111S - 0.000427083F + 7.82269d - 0.0000479167(S \times F) \\ & - 0.000277778(S \times d) + 0.00166667(F \times d) - 0.0000435185S^2 \\ & + 0.0000364583F^2 - 2.35185d^2 \end{aligned}$$

สำหรับการระดับปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย สามารถใช้หลักการ Optimization โดยใช้ฟังก์ชัน Response optimization ของโปรแกรมมินิแทบ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าได้ระดับของปัจจัยที่มีค่าเหมาะสมคือ ความเร็วรอบของแกนหมุนที่ 120 รอบต่อนาที, ความเร็วป้อนของลูกรีดที่ 63 มิลลิเมตรต่อนาที และ ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่ 1.75 มิลลิเมตร และได้ค่าทำนายของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อเฉลี่ยเท่ากับ 120.6506 มิลลิเมตร และขนาดความหนาของท่อเฉลี่ยเท่ากับ 2.7485 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 30 และรูปที่ 54

ตารางที่ 30 ผลการหาค่าตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimization)

Response Optimization						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
O.D. (mm)	Target	120.40	120.65	120.90	10	1
Thickness (m	Target	2.55	2.75	2.95	10	1
Global Solution						
Spindle spee	=	120				
Feed rate	=	63.0303				
Thickness re	=	1.75455				
Predicted Responses						
O.D. (mm)	=	120.651	,	desirability =	0.974973	
Thickness (m	=	2.749	,	desirability =	0.929072	
Composite Desirability = 0.951746						

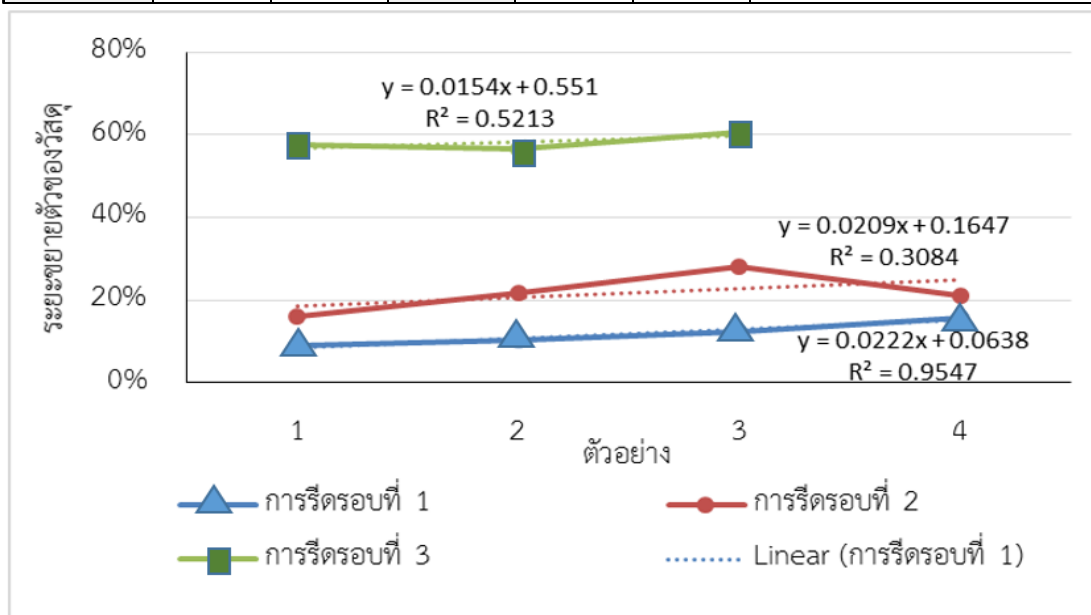


รูปที่ 54 Optimization plot จากโปรแกรมมินิแทบ

5.6 การตรวจสอบระยะขยายของวัสดุในแต่ละรอบการรีด (Spring back)

ตารางที่ 31 ข้อมูลเปรียบเทียบระยะขยายของวัสดุแต่ละรอบการรีด

d1	T1	Sb1	d2	T2	Sb2	d3	T3	Sb3
10	11.01	9%	6	6.97	16%	2	3.15	58%
9	10.04	10%	5	6.08	22%	1.8	2.82	56%
8	9.14	12%	4	5.12	28%	1.7	2.73	61%
7	8.32	16%	3	3.63	21%			



รูปที่ 55 กราฟระยะการขยายตัวของวัสดุในแต่ละรอบการรีด

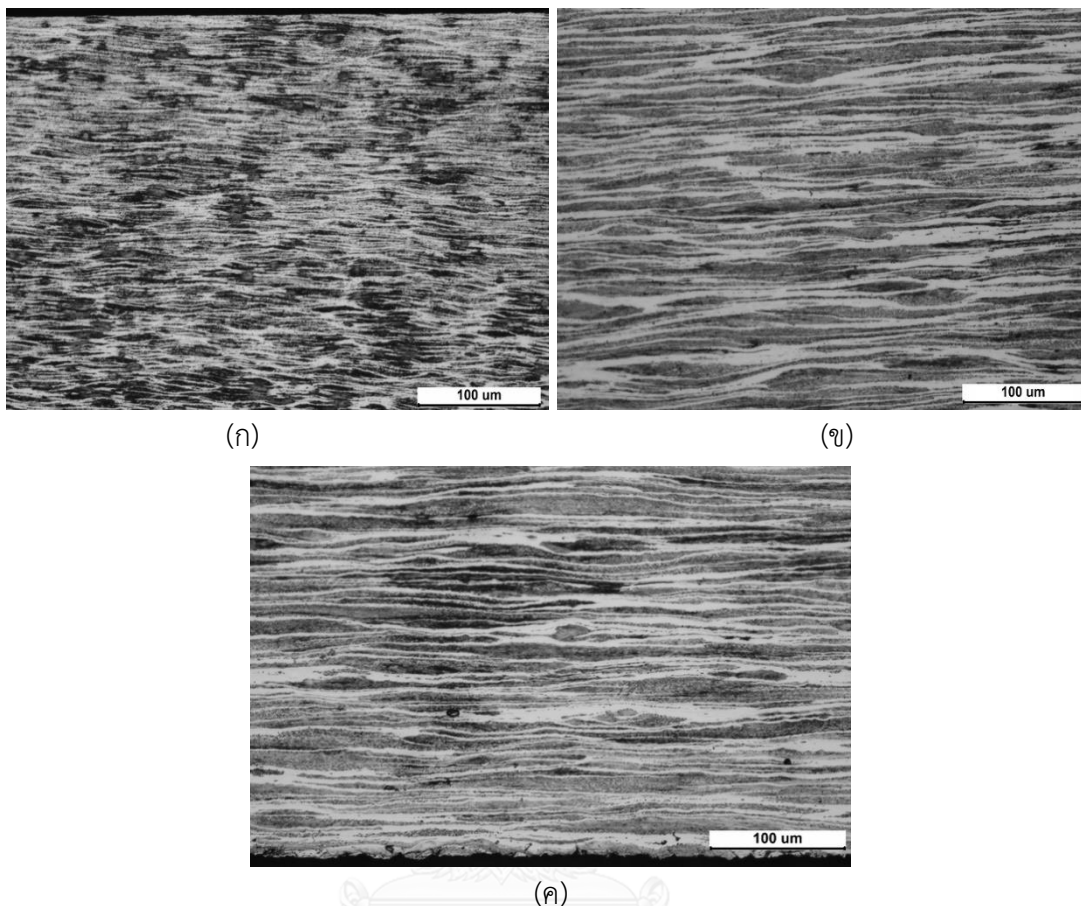
จากผลการทดสอบระยะยืดตัวของวัสดุในแต่ละรอบการรีดพบว่า ยิ่งจำนวนรอบการรีดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะการขยายตัวของวัสดุเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามรูปแบบการเสียรูปถาวร (Plastic Deformation) แต่ยังไม่ถึงจุดแตกหักของวัสดุ ดังนั้นระยะการขยายตัวจึงเป็นไปตามแรงที่กระทำกับวัสดุเนื่องจากความเค้น นั่นคือยิ่งรอบการรีดเพิ่มมากขึ้นระยะการกดน้อยลงทำให้เกิดความเค้นกับวัสดุน้อยระยะการขยายตัวจึงเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ได้สมการของระยะการขยายตัวของวัสดุดังนี้

$$\text{รอบที่ 1: } y = 0.222X + 0.0638 ; R^2 = 95.47\%$$

$$\text{รอบที่ 2: } y = 0.0209X + 0.1647 ; R^2 = 30.84\%$$

$$\text{รอบที่ 3: } y = 0.0154X + 0.551 ; R^2 = 52.13\%$$

5.7 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหลังการรีด



(ค)

รูปที่ 56 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังรีบจบรอบที่ 3

(ก) โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบนอกชิ้นงานกำลังขยาย 200 เท่า

(ข) โครงสร้างจุลภาคบริเวณกลางชิ้นงานกำลังขยาย 200 เท่า

(ค) โครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบในชิ้นงานกำลังขยาย 200 เท่า

จากรูปที่ 56 (ก)-(ข) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ รีดขึ้นรูปแบบเย็น จะประกอบด้วยโครงสร้างของเฟิร์ลไลต์และเฟอร์ไรต์ที่มีลักษณะแบนเรียบไปตามแนวการทำ รีดขึ้นรูปแบบเย็น โครงสร้างบริเวณขอบนอกของท่อจะพบถึงโครงสร้างของเฟิร์ลไลต์และเฟอร์ไรต์ที่มีการเกิด Plastic Deformation ในระดับที่สูงกว่า หรือโครงสร้างที่เรียงตัวแน่นกว่าโครงสร้างบริเวณกลางและขอบในของท่อ เนื่องจากการทำ รีดขึ้นรูปแบบเย็น นั้น ผิวด้านนอกของท่อจะถูกรีดตามแนวแกนทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกจะมีขนาดลดลง ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของท่อ ยังคงมีขนาดเท่าเดิม ถ้ามี Plastic Deformation เกิดขึ้นก็น่าจะเกิดน้อยกว่าด้านนอก ดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนที่น้อยกว่า

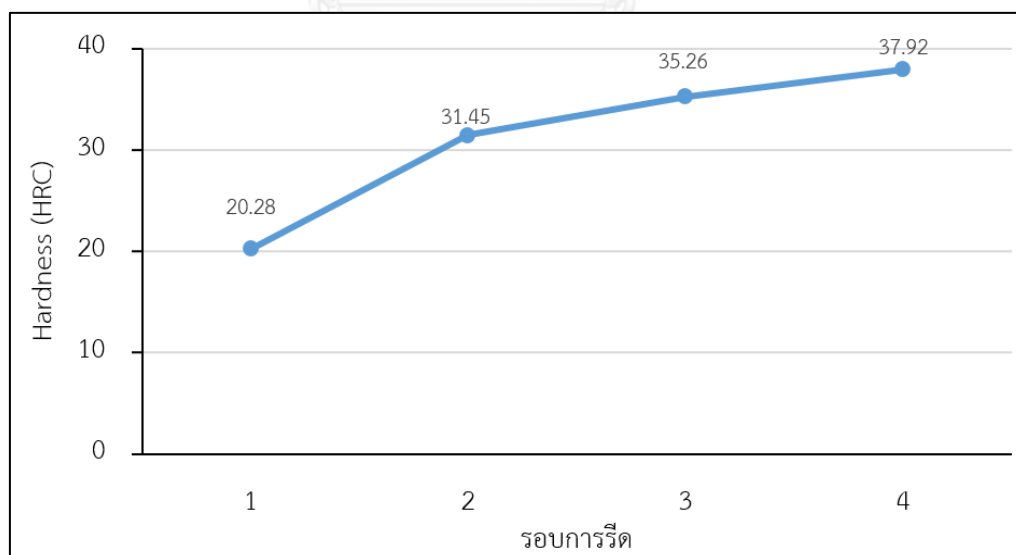
5.8 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกล

จากการทดสอบการขึ้นรูปท่อแรงดันสูงทั้ง 3 รอบการรีดเพื่อให้ได้ขนาดของท่อตามที่กำหนดนั้น สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 32 และรูปที่ 60-61 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งและค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานมีความบางลงส่งผลให้ค่าความแข็งและความแข็งแรงสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานลดลงที่จำนวนรอบที่เพิ่มมากขึ้น

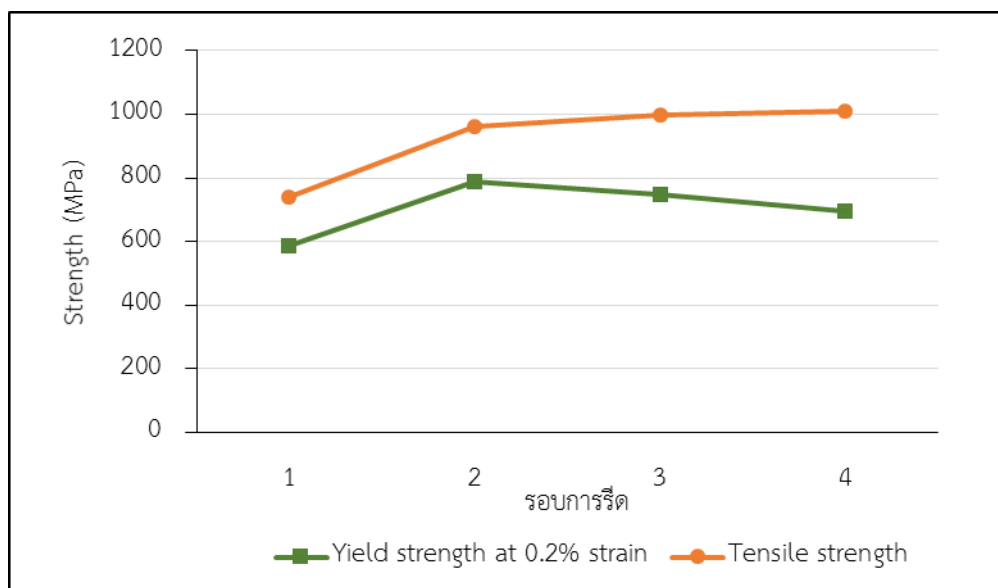
ตารางที่ 32 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของท่อหลังจบการรีดแต่ละรอบ

รอบการรีด	ค่าความแข็ง* (HRC)	Yield Strength at 0.2% Strain (Mpa)	Tensile Strength (Mpa)	Elongation at break (%)	Remark
0	20.28	586.62	739.52	16.16	จากตัวอย่าง ชิ้นงานชิ้นที่ 1
1	31.45	787.46	962.65	10.95	จากตัวอย่าง ชิ้นงานชิ้นที่ 2
2	35.26	690.46	996.49	8.62	จากตัวอย่าง ชิ้นงานชิ้นที่ 3
3	37.92	696.15	1,010.09	6.89	จากตัวอย่าง ชิ้นงานชิ้นที่ 4

หมายเหตุ * การทดสอบค่าความแข็งใช้จากชิ้นงานชิ้นเดียวกันทั้งสามรอบการรีด



รูปที่ 57 กราฟค่าความแข็งของท่อแรงดันสูงหลังจากจบการรีดในแต่ละรอบ



รูปที่ 58 กราฟค่าความแข็งแรงของท่อแรงดันสูงหลังจากจบการรีดในแต่ละรอบ



บทที่ 6

การทดสอบยืนยันผล และการตรวจติดตามควบคุม

การทดสอบยืนยันผล และการตรวจติดตามควบคุม ซึ่งจะดำเนินการเก็บข้อมูลที่ได้จากการปรับค่าของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญตามที่จากหัวข้อที่ 5.5.1.4 เป็นระยะเวลา 2 เดือน หรือทำการรีดชิ้นงานไม่น้อยกว่า 30 ชิ้นงาน โดยจะนำข้อมูลมาตรวจสอบว่าขนาดของท่อหลังรีดเฉลี่ยเป็นไปตามผลการทดลองหรือไม่ จากนั้นจึงการกำหนดวิธีการตรวจสอบปัจจัยปรับตั้งให้เป็นไปตามที่ได้ทำการทดลองไว้ และมีการนำแผนภูมิควบคุมเข้าใช้เพื่อควบคุมกระบวนการผลิตให้อยู่ในค่าควบคุม โดยหากออกนอกค่าควบคุมให้ดำเนินการตามแผนการแก้ไขเมื่อตรวจสอบแล้วพบว่าขนาดของท่อหลังรีดออกนอกเส้นควบคุม รวมถึงจัดทำมาตรฐานการทำงานใหม่ในปัจจัยเชิงคุณลักษณะที่เป็นขั้นตอนทำงาน

6.1 การทดสอบยืนยันผล

เพื่อยืนยันผลของค่าปัจจัยนำเข้าที่ได้เลือกและกำหนดมาในขั้นตอนที่แล้ว โดยค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัยดังแสดงใน ตารางที่ 33

ตารางที่ 33 ระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่จะทำการปรับปรุง

สัญลักษณ์ของปัจจัย	ปัจจัย	ระดับที่เหมาะสม	หน่วย
S	ความเร็วรอบของแกนหมุน	120	รอบต่อนาที
F	ความเร็วป้อนของลูกรีด	63	มิลลิเมตรต่อนาที
d	ระยะช่องว่างแม่พิมพ์	1.75	มิลลิเมตร

6.1.1 ขั้นตอนในการทดลอง

ดำเนินการปรับตั้งค่าเครื่อง Flow forming ให้เรียบร้อยก่อนการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยกำหนดให้มีการตรวจสอบค่าปรับตั้งเครื่องให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ จากนั้นแจ้งหัวหน้าฝ่ายการผลิตและเจ้าหน้าที่ฝ่ายผลิตว่าจะดำเนินการปรับโปรแกรมการรีดท่อดังตารางที่ 34

ตารางที่ 34 การออกแบบโปรแกรมการรีดในแต่ละรอบของการทดลอง

รอบ การรีด	Cum. %Thickness reduction	ปัจจัยนำเข้า			ค่าตรวจสอบหลังรีดในแต่ละรอบ		
		d	S	F	เส้นผ่าศูนย์กลาง ด้านนอก (มม)	ความหนา (มม)	ความยาว (มม)
1	47%	8	120	60	Ø132.15±0.15	9.13±0.13	510±10
2	73%	4	120	60	Ø125.60±0.1	5.12±0.18	1030±10
3	88%	1.75	120	63	Ø120.65	2.748	>1500

ค่าพยากรณ์

6.2 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ดำเนินการทดลองและบันทึกผลการรีด จากนั้นทำการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบความสามารถของกระบวนการก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง และดำเนินการสรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 35 ความสามารถของกระบวนการหลังปรับปรุงในส่วนของความหนา

ตัวอย่างท่อที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ความหนาของท่อ (มม.)	2.74	2.78	2.77	2.76	2.76	2.75	2.76	2.76	2.75	2.78
ตัวอย่างท่อที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ความหนาของท่อ (มม.)	2.73	2.76	2.74	2.79	2.75	2.8	2.76	2.77	2.8	2.78
ตัวอย่างท่อที่	21	22	23	24	25	26	27	28	29	20
ความหนาของท่อ (มม.)	2.79	2.77	2.75	2.78	2.77	2.75	2.76	2.76	2.78	2.75
ตัวอย่างท่อที่	31	32	33	34	35	Avg.	Stedev.			
ความหนาของท่อ (มม.)	2.74	2.79	2.75	2.76	2.78	2.7648*	0.0177*			

หมายเหตุ * คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยรวม (Overall) ซึ่งในการคำนวณค่ามินิแทบจะใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแบบ Within ซึ่งเท่ากับ 0.01982 ส่งผลให้ค่าคำนวณที่ได้ต่างกันเล็กน้อย

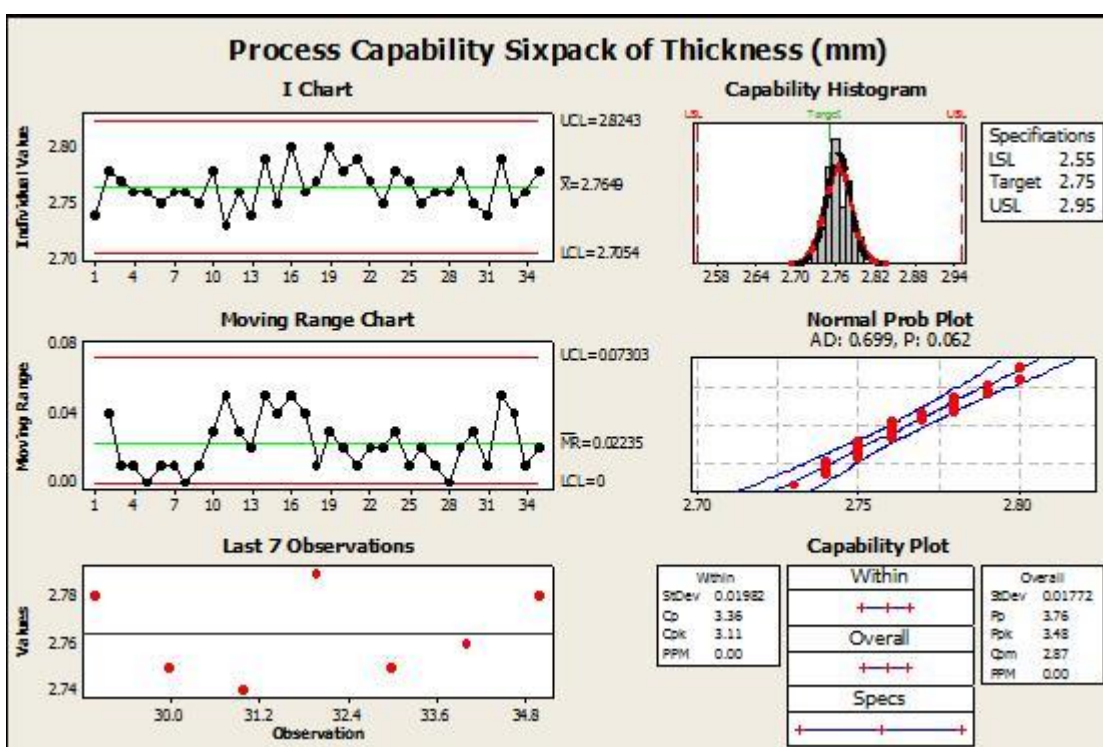
จากตารางที่ 35 สามารถคำนวณค่า C_p และ C_{pk} ได้ดังนี้

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = \frac{2.95 - 2.55}{6 \times 0.0177} = 3.76$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - Average}{3\sigma}, \frac{Average - LSL}{3\sigma}\right)$$

$$= \min\left(\frac{2.95 - 2.76}{3 \times 0.0177}, \frac{2.76 - 2.55}{3 \times 0.0177}\right)$$

$$= \min(3.578, 3.9548) = 3.578$$



รูปที่ 59 กราฟวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการขึ้นรูปสำหรับการกำหนดขนาดความหนาของท่อหลังปรับปรุง

จากรูปที่ 59 พบว่าความหนาที่ได้จากกระบวนการ ริดขึ้นรูปแบบเย็น ใน Pass 3 นั้นมีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบ normal โดยพิจารณาจาก Normal probability plot ที่มีค่า P-value = 0.062 ซึ่งมีค่ามากกว่า α ที่ 0.05 นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปของ R-chart แล้วพบว่าค่ายังอยู่ในช่วงที่ควบคุม โดยดูจากการกระจายตัวของค่าความหนาไม่มีจุดใดอยู่นอกเหนือเส้น LCL และ UCL

และเมื่อพิจารณาค่า $C_p = 3.36$ และ ค่า $C_{pk} = 3.11$ สรุปได้ว่ากระบวนการ ริดขึ้นรูปแบบเย็น มีความสามารถที่ดี และสามารถผลิตท่อแรงดันสูงได้ค่าความหนาตามต้องการ

ตารางที่ 36 ความสามารถของกระบวนการหลังปรับปรุงในส่วนของความหนา

ตัวอย่างท่อที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
เส้นผ่าศูนย์กลาง ภายนอกของท่อ (มม.)	120.63	120.66	120.64	120.68	120.62	120.68	120.67	120.62	120.67	120.66
ตัวอย่างท่อที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
เส้นผ่าศูนย์กลาง ภายนอกของท่อ (มม.)	120.64	120.66	120.63	120.74	120.68	120.72	120.65	120.69	120.7	120.66
ตัวอย่างท่อที่	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
เส้นผ่าศูนย์กลาง ภายนอกของ ท่อ (มม.)	120.68	120.64	120.63	120.73	120.64	120.68	120.65	120.62	120.66	120.67
ตัวอย่างท่อที่	31	32	33	34	35	Avg.	Stedev.			
เส้นผ่าศูนย์กลาง ภายนอกของท่อ (มม.)	120.66	120.70	120.67	120.64	120.66	120.663*	0.03*			

หมายเหตุ * คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยรวม (Overall) ซึ่งในการคำนวณค่ามินิแทบจะใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแบบ Within ซึ่งเท่ากับ 0.1457 ส่งผลให้ค่าคำนวณที่ได้ต่างกันเล็กน้อย

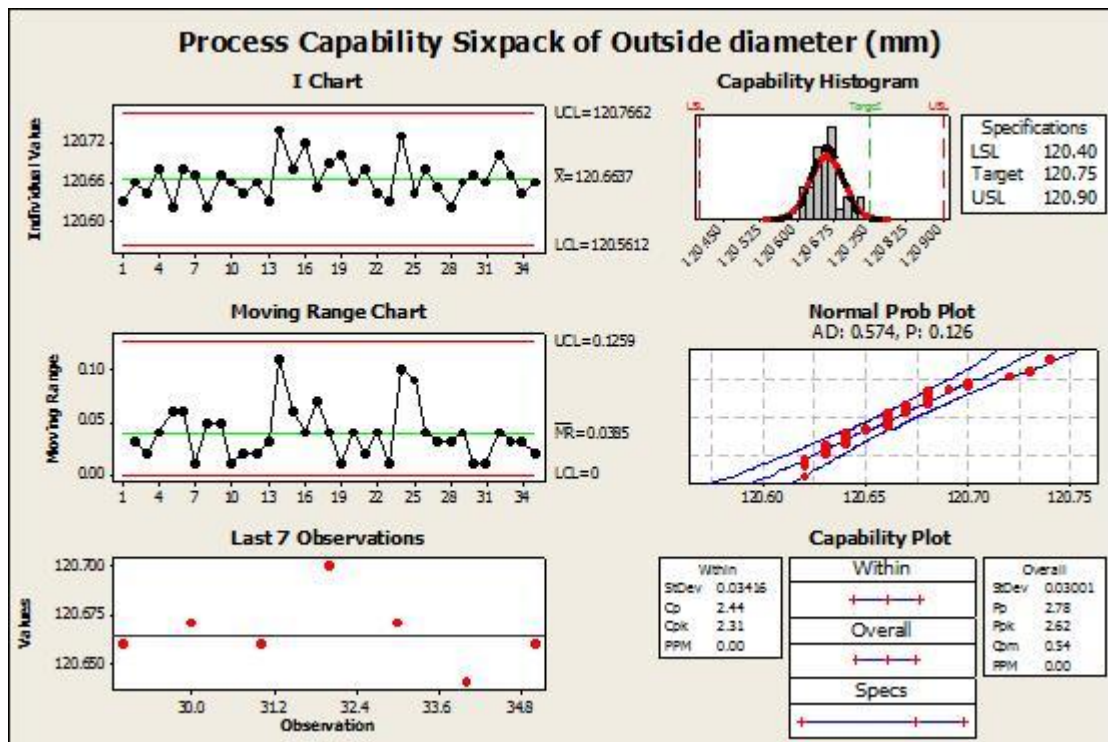
จากตารางที่ 36 สามารถคำนวณค่า C_p และ C_{pk} ได้ดังนี้

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = \frac{120.9 - 120.4}{6 \times 0.1490} = 0.5593$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - Average}{3\sigma}, \frac{Average - LSL}{3\sigma}\right)$$

$$= \min\left(\frac{120.9 - 120.74}{3 \times 0.1490}, \frac{120.74 - 120.4}{3 \times 0.1490}\right)$$

$$= \min(0.3579, 0.7606) = 0.3579$$



รูปที่ 60 กราฟวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการขึ้นรูปสำหรับการกำหนดขนาด
เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อหลังปรับปรุง

จากรูปที่ 60 พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อที่ได้จากกระบวนการ ริดขึ้นรูปแบบ
เย็น ใน Pass 3 นั้นมีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบ normal โดยพิจารณาจาก Normal
probability plot ที่มีค่า P-value = 0.126 ซึ่งมีค่ามากกว่า α ที่ 0.05 นอกจากนี้เมื่อพิจารณากราฟ
ของ R-chart แล้วพบว่าค่ายังอยู่ในช่วงที่ควบคุม โดยดูจากการกระจายตัวของค่าความหนาไม่มีจุดใดอยู่
นอกเหนือเส้น LCL และ UCL

และเมื่อพิจารณาค่า $C_p = 2.44$ และ ค่า $C_{pk} = 2.31$ สรุปได้ว่ากระบวนการ ริดขึ้นรูปแบบเย็น
มีความสามารถที่ดี และสามารถผลิตท่อแรงดันสูงได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกตามต้องการ

6.3 แผนการควบคุมกระบวนการริดขึ้นรูปเย็น

6.3.1 มาตรฐานการทำงานสำหรับการริดขึ้นรูปเย็นท่อแรงดันสูง

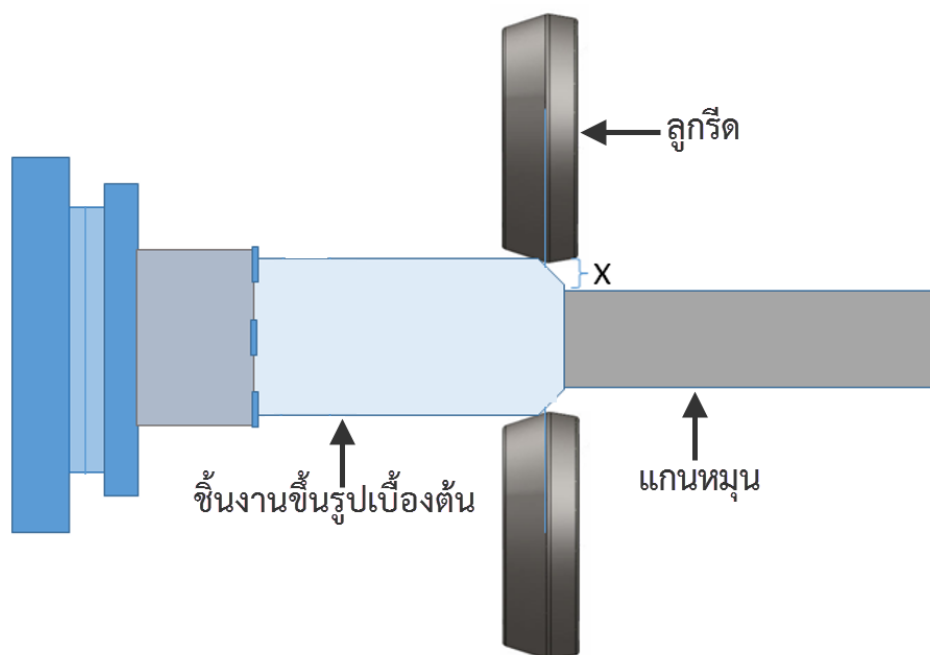
เพื่อให้เกิดการทำงานที่มีระบบและได้มาตรฐานการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงาน กำหนดให้
ผู้ปฏิบัติงานปฏิบัติตามมาตรฐานการทำงานสำหรับการริดขึ้นรูปเย็นท่อแรงดันสูง ดังตารางที่ 37

ตารางที่ 37 มาตรฐานการทำงานสำหรับการรีดขึ้นรูปเย็นท่อแรงดันสูง

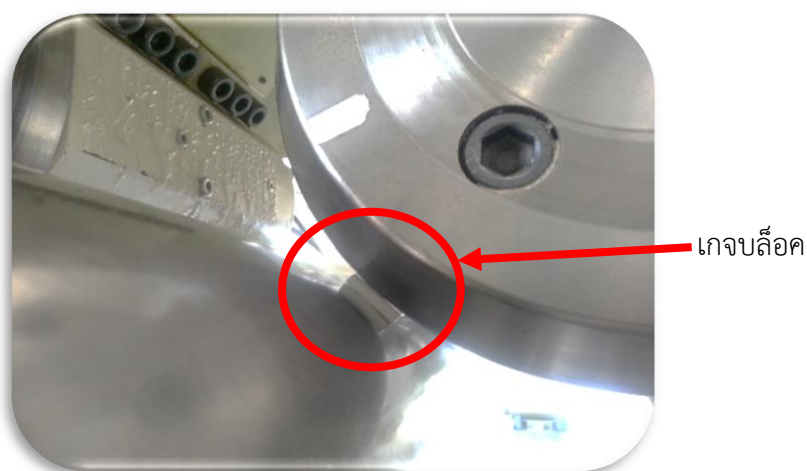
มาตรฐานการทำงานสำหรับการรีดขึ้นรูปเย็นท่อแรงดันสูง				
Part Name		Machine		Process
High pressure tubes		Flow forming Model F450		Flow forming
ผู้จัดทำ	ฝ่ายผลิต	ฝ่ายวิศวกรรม	ผู้อำนวยการโรงงาน	
Approve/...../.....	Approve/...../.....	Approve/...../.....	Approve/...../.....	
<p>เงื่อนไขการปรับตั้งเครื่องจักร</p> <p>การรีดรอบที่ 1:</p> <p>1) ใช้ความเร็วรอบของแกนหมุน 120 รอบต่อนาที 2) ใช้ความเร็วป้อนของลูกรีด 60 มิลลิเมตรต่อนาที</p> <p>การรีดรอบที่ 2:</p> <p>1) ใช้ความเร็วรอบของแกนหมุน 120 รอบต่อนาที 2) ใช้ความเร็วป้อนของลูกรีด 60 มิลลิเมตรต่อนาที</p> <p>การรีดรอบที่ 3:</p> <p>1) ใช้ความเร็วรอบของแกนหมุน 120 รอบต่อนาที 2) ใช้ความเร็วป้อนของลูกรีด 63 มิลลิเมตรต่อนาที</p> <p>ขั้นตอนการปฏิบัติงาน</p> <ol style="list-style-type: none"> ตรวจสอบขนาดของชิ้นงานขึ้นรูปเบื้องต้นจากใบบันทึกคุณภาพจาก QC ทำการเปรียบเทียบเครื่อง Flow forming และบันทึกผลการตรวจวัดในใบตรวจสอบ Flow forming monthly check sheet ทำการตรวจสอบโปรแกรมการรีด โดยเทียบกับเงื่อนไขการปรับตั้งเครื่องจักร และค่า X ตรวจสอบระบบน้ำหล่อเย็น และอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องว่าอยู่ในสภาพปกติไม่มีความเสียหาย ทาสารหล่อลื่นบนตัวแกนหมุนก่อนนำชิ้นงานขึ้นรูปเบื้องต้นไปสวม นำชิ้นงานสวมเข้ากับแกนหมุน ตรวจสอบความปลอดภัยของเครื่องว่าไม่มีอุปกรณ์หรือชิ้นงานตกค้างที่เครื่องอันจะเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหาย ปิดประตูเพื่อเริ่มเดินโปรแกรม เริ่มโปรแกรมการรีดขึ้นงานรอบที่ 1 บันทึกขนาดหลังจากรีดจบรอบที่ 1 ในใบตรวจสอบชิ้นงาน ทำซ้ำขั้นตอนที่ 9-10 โดยเปลี่ยนโปรแกรมเป็นรอบที่ 2 และ 3 ตามลำดับ กรณีพบข้อบกพร่องในรอบที่ 1 และ 2 ให้ดำเนินการดังนี้ <ul style="list-style-type: none"> - ข้อบกพร่องที่มีลักษณะแบบขยุ้มเหล็กที่ไม่เปิดผิวชิ้นงานหรือไม่กินลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงาน สามารถรีดงานในรอบถัดไปได้เลยโดยไม่ส่งผลให้เกิดความเสียหายบนชิ้นงานในการรีดรอบถัดไป - ข้อบกพร่องที่มีลักษณะแบบสะเก็ดเหล็ก ที่มีการเปิดผิวชิ้นงานหรือกินลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงาน ให้ทำการตัดด้วยกระดาษทรายให้ผิวเรียบก่อนที่จะขึ้นงานในรอบการรีดถัดไป เอาชิ้นงานออก โดยทำการตรวจสอบชิ้นงานในส่วนของผิว และขนาดของชิ้นงาน ซึ่งต้องไม่พบข้อบกพร่องใดๆ หากพบข้อบกพร่องให้แจ้งฝ่ายวิศวกรรมเพื่อตรวจสอบและทำการปรับเครื่องจักรใหม่ แล้วทำการผลิตต่อไป 				

6.3.3 การปรับเทียบเครื่องจักร

การปรับเทียบเครื่องจักร โดยการทำการวัดเปรียบเทียบค่าจริงคือ ค่า X (ระยะช่องว่างแม่พิมพ์) จากจอบควบคุมการทำงานของเครื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด คือค่าจากการวัดระยะห่างของลูกรีด Roller เทียบกับแกนหมุน (Mandrel) โดยใช้เกจบล็อกขนาด 1 มม. ดังรูปที่ 62-63 ซึ่งจะทำการตรวจสอบค่า X ทั้ง 4 ลูกรีด จากนั้นทำการบันทึกผลลงในตารางที่ 40



รูปที่ 61 ระยะ X หรือระยะช่องว่างแม่พิมพ์สำหรับปรับเทียบค่ากด



รูปที่ 62 วิธีการตรวจวัดระยะช่องว่างแม่พิมพ์โดยใช้เกจบล็อก

ตารางที่ 40 ใบตรวจสอบสำหรับเครื่อง Flow forming

Flow forming Monthly Check sheet




Date

Name of Operator 1.....

Name of Operator 2.....

Name of Operator 3.....

Name of Operator 4.....

Process Name	Part name	Picture	Spec.	Measure Value	Remark
Die distance (X)	Roller 1		68±0.05		
	Roller 2		68±0.05		
	Roller 3		68±0.05		
	Roller 4		68±0.05		
Round run-out (mm)	Roller 1		0.02±0.2 mm		
	Roller 2				
	Roller 3				
	Roller 4				
	Mandrel		0.02±0.2 mm		
Process	Cause		Response		

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์การศึกษา, ออกแบบ และปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปท่อแรงดันสูงที่ผลิตด้วยวัสดุ AISI 4130 ด้วยเครื่อง Flow forming โดยใช้แนวทางการออกแบบการทดลอง (Design of experiment) ได้ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. การออกแบบเปอร์เซ็นต์ลดความหนาของชิ้นงานโดยรวม (Total percent of die distance) สำหรับใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง Flow forming ไม่ควรเกิน 90% เพื่อลดโอกาสเกิดข้อบกพร่องแบบแตก

2. ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง Flow forming หลักๆ คือ ความเร็วรอบของแกนหมุน, ความเร็วป้อนของลูกรีด และระยะช่องว่างแม่พิมพ์ในแต่ละรอบ

3. จากผลการศึกษาสามารถลดข้อบกพร่องที่อาจจะเกิดที่ผิวของชิ้นงานได้ จากการทดลองพบว่า ควรปรับตั้งค่าเครื่องในรอบสุดท้ายหรือรอบที่ 3 ดังนี้ ความเร็วรอบของแกนหมุน 120 รอบต่อนาที, ความเร็วป้อนของลูกรีดที่ 63 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะช่องว่างแม่พิมพ์ที่ 1.75 มิลลิเมตร จะให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อและค่าความหนาเท่ากับ 120.66 ± 0.03 มิลลิเมตร และ 2.76 ± 0.02 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนดคือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อเท่ากับ 120.65 ± 0.25 มิลลิเมตร และความหนาท่อเท่ากับ 2.75 ± 0.20 มิลลิเมตร

4. ดัชนีความสามารถของกระบวนการขึ้นรูปได้แก่ค่า Cp และ Cpk ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเพิ่มขึ้นจากเดิมเท่ากับ Cp เท่ากับ 0.57 และ Cpk เท่ากับ 0.36 เป็น Cp เท่ากับ 2.44 และ Cpk เท่ากับ 2.31 ตามลำดับ

5. ดัชนีความสามารถของกระบวนการขึ้นรูปได้แก่ค่า Cp และ Cpk ของขนาดความหนาของท่อเพิ่มขึ้นจากเดิมเท่ากับ Cp เท่ากับ 0.74 และ Cpk เท่ากับ 0.61 เป็น Cp เท่ากับ 3.36 และ Cpk เท่ากับ 3.11 ตามลำดับ

6. กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Flow forming ไม่ทำให้โครงสร้างของวัสดุเปลี่ยนไปแต่จะทำให้เกรนของโครงสร้างมีลักษณะแบนลงและยาวขึ้นตามทิศทางการยืดตัวของวัสดุ เป็นผลให้วัสดุมีความแข็งแรงในแนวแกนเพิ่มมากขึ้น

7. ระยะเวลาขยายตัวของวัสดุ (Spring back) เพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบการรีดขึ้นงานสูงขึ้น เนื่องจากระยะลดความหนาจากความหนาตั้งต้นน้อยลง ทำให้เกิดแรงคืนกับวัสดุน้อยลงด้วย

8. กระบวนการรีดขึ้นรูปแบบเย็นเมื่อจำนวนรอบการรีดที่มากขึ้นส่งผลให้สมบัติทางกลของวัสดุเพิ่มขึ้นนั่นคือค่าความแข็ง และความแข็งแรงของวัสดุ ในทางกลับกันส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุลดลง

9. ในกรณีพบข้อบกพร่องแบบขยุยเหล็ก หรือข้อบกพร่องแบบสะเก็ดเหล็กให้พิจารณาดังนี้

- กรณีพบข้อบกพร่องแบบขยุยเหล็กที่ไม่เปิดผิวขึ้นงานหรือไม่กินลึกเข้าไปในเนื้อขึ้นงานสามารถรีดงานในรอบถัดไปได้เลยโดยไม่ส่งผลให้เกิดความเสียหายบนชิ้นงานในการรีดรอบถัดไป

- กรณีพบข้อบกพร่องแบบสะเก็ดเหล็ก ที่มีการเปิดผิวขึ้นงานหรือกินลึกเข้าไปในเนื้อขึ้นงานให้ทำการขัดด้วยกระดาษทรายให้ผิวเรียบก่อนที่จะขึ้นงานในรอบการรีดถัดไป

7.2 ข้อเสนอแนะ

1) ผลการศึกษาในที่นี้สามารถใช้เป็นข้อมูล สำหรับการรีดขึ้นงานที่ผลิตจากวัสดุ AISI 4130 ที่ผ่านการอบชุบแบบปกติในรอบที่มีระยะลดความหนาขึ้นงานไม่มากเกินไป และต้องการความแม่นยำสูง ทั้งนี้จำเป็นต้องคำนึงถึงวิธีการทำงาน ข้อกำหนดเฉพาะ และสภาพเครื่องจักรด้วย

2) การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Flow forming ของปัจจัยแต่ละปัจจัย ต้องมีการทำข้อกำหนดมาตรฐานการทำงานและค่ามาตรฐานในการควบคุม ซึ่งต้องมีการจัดฝึกอบรมพนักงานให้มีความรู้ความเข้าใจและมีความใส่ใจต่อเครื่องจักรมากขึ้น เช่นวิธีการตรวจสอบเครื่องจักรก่อนเดินเครื่อง เป็นต้น

3) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการดังนี้

- ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการอบชุบต่อคุณภาพของขึ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง flow forming โดยพิจารณาโครงสร้างของวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป

- ศึกษาอิทธิพลของค่าความเค้นและความเครียด (Stress & Strain) ที่มีผลต่อระยะขยายตัวของวัสดุที่ผ่านกระบวนการรีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Flow forming

7.3 ข้อจำกัดของการทดลอง

1) เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษาเป็นบริษัทที่จัดทำในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นต้นแบบ จึงทำให้ไม่สามารถทำการทดลองเป็นจำนวนมากได้ เนื่องจากวัสดุที่จัดหามา นั้นต้องพิจารณาการนำมาใช้ในการทดลองให้น้อยและมีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากต้นทุนวัตถุดิบมีมูลค่าสูง

2) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการมีความสามารถในการปรับแต่งเครื่องจักรได้น้อย เนื่องจากต้องมีการลงทุนสูง และไม่มีตัวแทนจำหน่ายในไทยในกรณีที่เครื่องจักรมีปัญหา

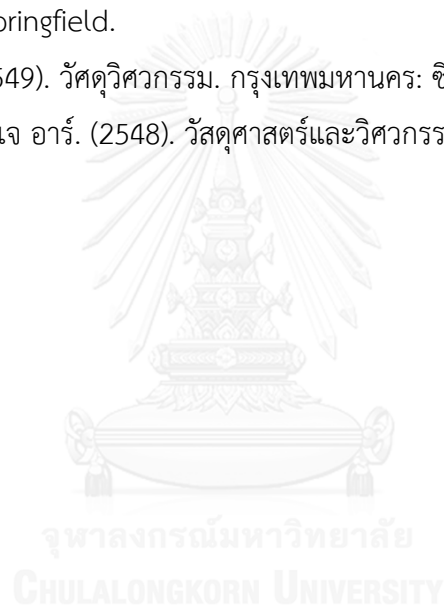
3) ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงได้ เนื่องจากเป็นการออกแบบและปรับปรุงขั้นตอนการทำงานและการปรับตั้งค่าของเครื่องจักร ที่ไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ไม่สามารถคำนวณค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระหว่างการทดลองได้ เนื่องจากการคำนวณค่าไฟฟ้าในแต่ละเดือนเป็นการคำนวณค่าใช้จ่ารวมของทั้งโรงงาน ซึ่งไม่สามารถแยกข้อมูลมาคิดเฉพาะเครื่องได้



รายการอ้างอิง

- ASTM International. (2012). *ASTM Handbook* (Vol. 1): ASTM International.
- Bikramjit Podder, Chandan Mondal, K. Ramesh Kumar, & D.R. Yadav. (2012). Effect of perform heat treatment on the flow formability and mechanical properties of AISI4340 steel. *Material and Design*, 37, 174-181.
- C.C Wong , T.A. Dean, & J. Lin. (2003). A review of spinning, she{C.C Wong , 2003 #4}ar forming and flow forming processes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 1419-1435.
- G. Zeng, S.H. Li, Yu, Z. Q., & and X.M. Lai. (2009). Optimization design of roll profiles for cold roll forming based on response surface method. *Materials and Design*, 30(6), 1930-1938.
- Hamid R. Molladavoudi, & Djavanroodi, F. (2011). Experimental study of thickness reduction effects on mechanical properties and spinning accuracy of aluminum 7075-O, during flow forming. *Int J Adv Manuf Technol*, 52, 949-957.
- K.M. Rajan, & K. Narasimhan. (2001). An Investigation of the Development of Defects During Flow Forming of High Strength Thin Wall Steel Tubes. *Practical Failure Analysis*, 5(1), 69-76.
- K.M. Rajan et al., K. N. (2002). An Approach to Selection of Material and Manufacturing Process for Rocket Motor Cases Using Weight Performance Index. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11, 444-449.
- Liu Xintian Liu Xintian, Liu Chaghong, Z. L., HuangHu, Zho Xiaoyong, & Sun Xinyi. (2009). The Finite Element Method Appling in the Flow Forming. *International Conference on Computational Intelligence and Security*, 556-558.
- M Lakshmana Rao, Dr T V L N Rao, M.V. Ramana, & Dr C S K P Rao. (2009). A Study on the Influence of Flow Forming Parameters of Maraging Steel Tubes. *IE(I) Journal-PR*, 89, 10-13.
- M. Joseph Davidson, K. Balasubramanian, & G.R.N. Tagore. (2008). An experimental study on the quality of flow formed AA6061 tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 203, 321-325.

- M.J. Roy, R.J. Klassen, & J.T. Wood. (2009). Evolution of plastic strain during a flow forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1018-1025.
- M.Sivanandini, S.S.Dhami, & B.S.Pabla. (2012). Flow Forming Tubes- A Review. *International Journal of Scientific&Engineering Research*, 3(5), 1-11.
- Marie Houillon, Elisabeth massoni, Eric Ramel, & Roland Loge. (2007). 3D FEM Simulation of the Flow Forming Using lagrangian and ALE Methods. *Materials Processing and Design, Simulation and Application*, 908(1), 257-262.
- National aeronautics and space administration NASA. (1970). *Solid Rocket Motor Metal Cases*. (NASA SP-8025). Virginia 22151: Federal Scientific and Technical Information Springfield.
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2549). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- วิลเลียม ดีม คาลิสเตอร์. เจ อาร์. (2548). วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. กรุงเทพมหานคร: ท้อป.







ตารางที่ ก. 1 รายละเอียดการออกแบบโดยใช้โปรแกรมมินิแท็บ

Full Factorial Design

Factors: 3 Base Design: 3, 8
 Runs: 16 Replicates: 2
 Blocks: 1 Center pts (total): 0

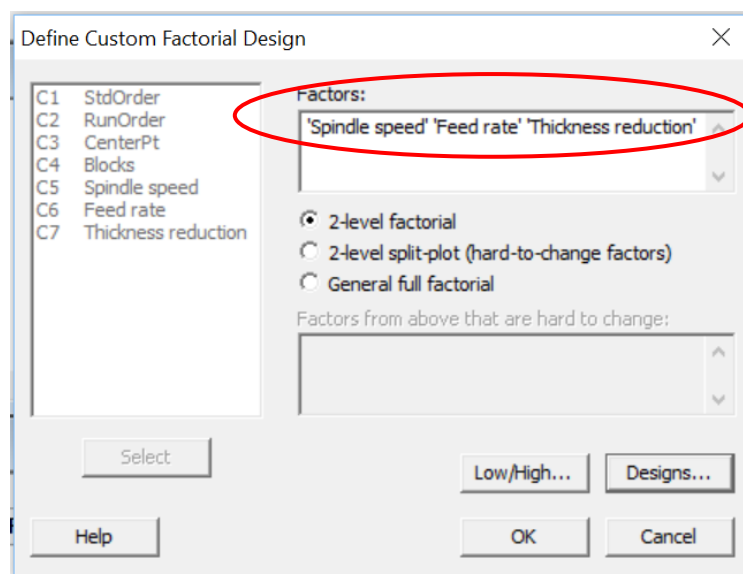
Run Order	Std Order	Replication	Factors			Response		
			Spindle speed	Feed rate	Die distance	Thickness (mm)	O.D. (mm)	Spring back
1	1	1	60	40	1.7			
2	7	1	60	80	2			
3	10	1	120	40	1.7			
4	9	2	60	40	1.7			
5	3	2	60	80	1.7			
6	14	1	120	40	2			
7	12	1	120	80	1.7			
8	6	2	120	40	2			
9	15	2	60	80	2			
10	4	2	120	80	1.7			
11	8	1	120	80	2			
12	16	2	120	80	2			
13	11	2	60	80	1.7			
14	13	1	60	40	2			
15	2	2	120	40	1.7			
16	5	2	60	40	2			



วิธีการใช้โปรแกรมมินิแทบสำหรับการประเมินผลจากปัจจัย

จากผลการเก็บข้อมูลสามารถหาโมเดลในรูปแบบของสมการและสร้างกราฟในการประเมินผลจากปัจจัยต่างๆ จากนั้นพิจารณาจากโมเดลและกราฟเพื่อทำการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อขนาดของท่อหลังการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Flow forming ซึ่งการใส่เงื่อนไขต่างๆ มีดังต่อไปนี้

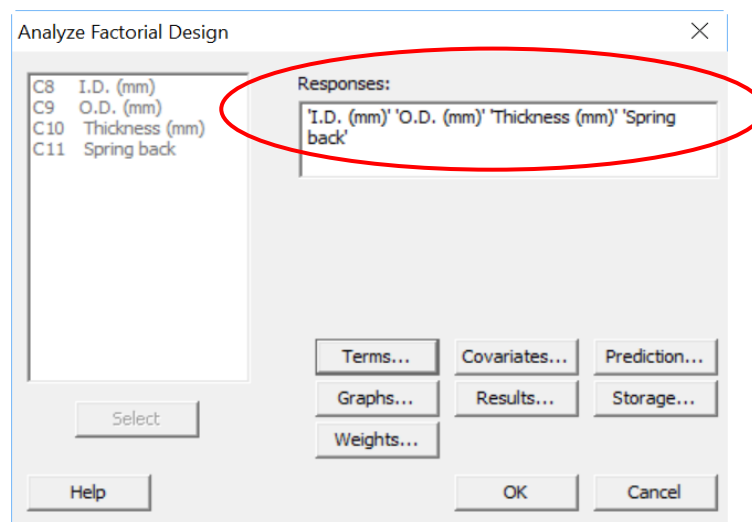
- Stat>DOE>Factorial>Define Custom Factorial Design..



รูปที่ 63 กรอบโต้ตอบ Define Custom Factorial Design

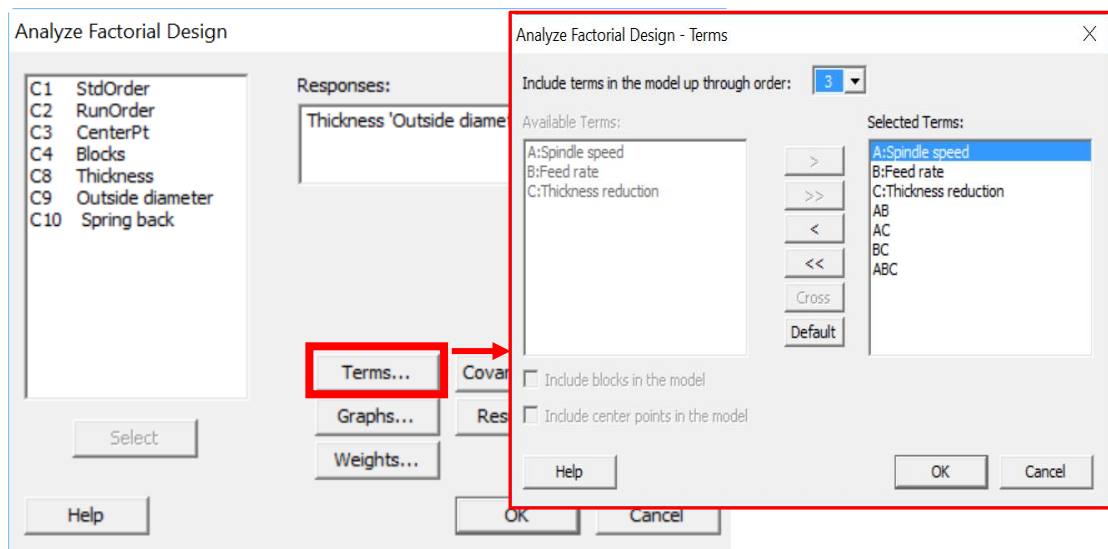
- 1) หน้าต่าง Define Custom Factorial Design ปรากฏขึ้นดังรูปข้างบน
- 2) ระบุปัจจัยที่ศึกษาและกด OK

- Stat>DOE>Factorial>Analyze Factorial Design...



รูปที่ 64 กรอบโต้ตอบ Analyze Factorial Design

- 1) หน้าต่าง Analyze Factorial Design ปรากฏขึ้นดังรูปข้างบน
- 2) ระบุผลตอบที่ต้องการศึกษา
- 3) เลือก Terms... จะปรากฏหน้าต่าง Analyze Factorial Design -Term

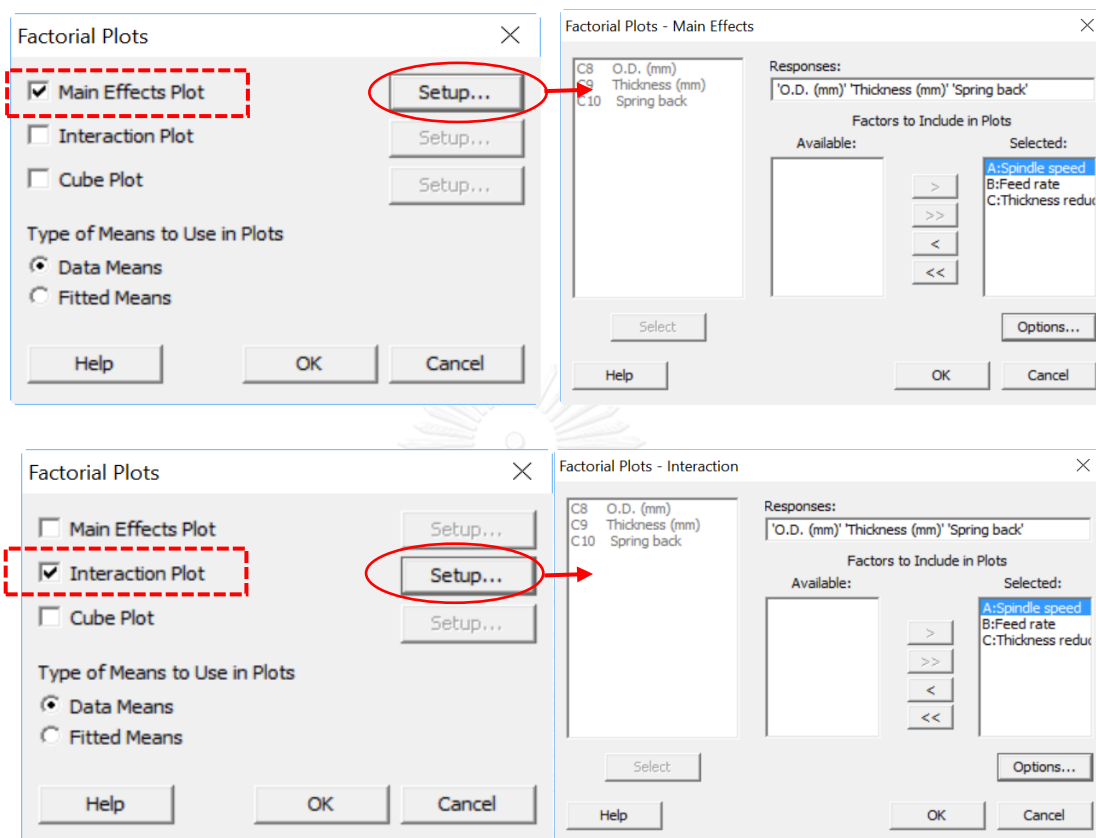


รูปที่ 65 กรอบโต้ตอบ Analyze Factorial Design-Term

- 4) กำหนดเทอมที่จะทดสอบสมมติฐานลงในช่อง Selected Terms และกด OK
- 5) กด OK

วิธีการใช้โปรแกรมมินิแทบสำหรับการวิเคราะห์แบบ Main Effects Plot และ Interaction Plot

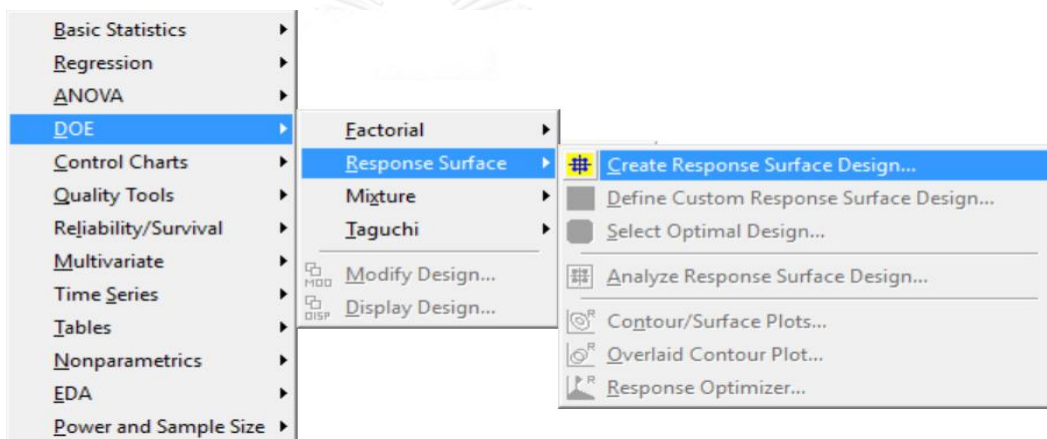
การวิเคราะห์แบบ Main Effects Plot และ Interaction Plot โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



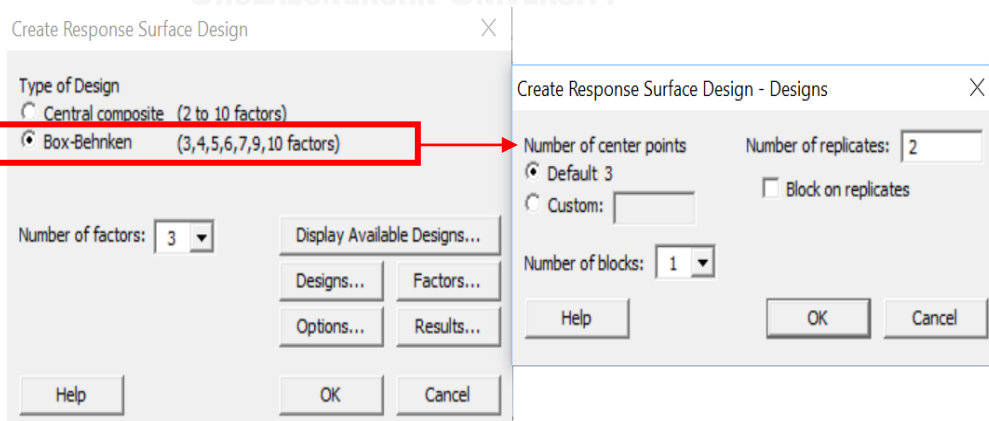
รูปที่ 66 การสร้างกราฟ Main Effects Plot และ Interaction Plot

วิธีการใช้โปรแกรมมินิแทบสำหรับออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ

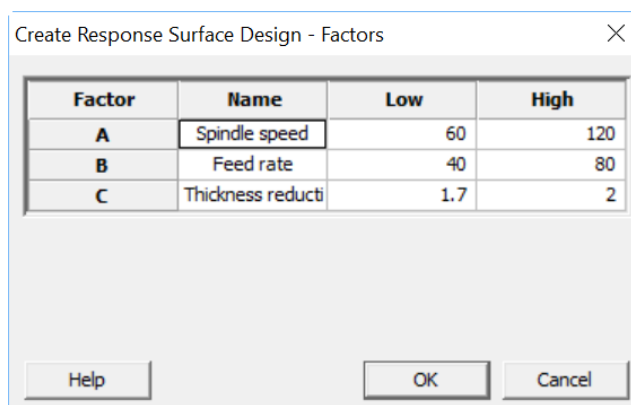
สำหรับระยะการปรับปรุงกระบวนการจะดำเนินการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response surface design) แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) การออกแบบด้วยวิธีนี้จะไม่นำจุดยอดของลูกบาศก์หรือขีดจำกัดของแต่ละตัวแปรมาทำการทดลอง ซึ่งมีประโยชน์ในการลดจำนวนการทดลองสำหรับจุดที่เป็นไปได้ (Extreme Setting) ที่อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานอย่างรุนแรง และยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดลอง ทั้งนี้การทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) สามารถตอบวัตถุประสงค์การทดลอง คือ ทราบว่าปัจจัยหรือปัจจัยรวมใดมีผลต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถหาจุดที่ดีที่สุดในการตั้งค่าระดับปัจจัยได้ สำหรับการออกแบบการทดลองแบบ Response Surface สามารถทำได้ดังนี้



รูปที่ 67 ขั้นตอนการหาขนาดตัวอย่าง



รูปที่ 68 ขั้นตอนการหาขนาดตัวอย่าง



รูปที่ 69 การกำหนดระดับให้กับปัจจัย



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสาวิตรี ผาบจันดา เกิดเมื่อ 22 กันยายน พ.ศ.2527 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เมื่อปีการศึกษา 2548 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

