

การหาสภาวะเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของกระบวนการยึงอนุภาคแข็งบนวัสดุแม่พิมพ์
ทึบขึ้นรูปร้อนโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ-เกรย์

จตุรงค์ อุบล

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2564

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF SOLID PARTICLE BOMBARDING PROCESS ON HOT
FORGING DIE MATERIAL USING TAGUCHI-GREY RELATIONAL ANALYSIS

Jaturong Ubon

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology
Graduate School
Thai-Nichi Institute of Technology
Academic Year 2021

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาสภาวะเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของ
กระบวนการยึงอนุภาคแข็งบนวัสดุแม่พิมพ์ทึบขึ้นรูปร้อนโดย
ใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ

โดย

จตุรงค์ อุบล

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.ดอน แก้วดก

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต สุขสวัสดิ์)

..... กรรมการ

(นาวาโท ดร.บพิตร ทศเทพพิทักษ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร.ดอน แก้วดก)

จตุรงค์ อุบล : การหาสภาวะเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของกระบวนการยึงอนุภาค
แข็งบนวัสดุแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปร้อนโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทากูชิ-เกรย์. อาจารย์
ที่ปรึกษา : ดร.ดอน แก้วดก, 99 หน้า

การยึงอนุภาคแข็งเป็นวิธีการแบบเย็นที่ใช้ปรับปรุงโครงสร้างของชิ้นงานสำเร็จประเภท
เหล็กเพื่อป้องกันการล้าและการสึกหรอจากความเค้น จุดประสงค์เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นงาน
งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาปัจจัยและหาสภาวะเหมาะสมที่สุดของกระบวนการยึงอนุภาคแข็งบน
แม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปร้อนเกรด JIS-SKD61 โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิและการ
วิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ ในการศึกษาครั้งนี้ การคลุมผิว, ขนาดเม็ดโลหะและแรงดันลม คือ
ปัจจัยในกระบวนการยึงอนุภาคแข็ง ซึ่งเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการยึงอนุภาคแข็ง ได้มา
จากการกำหนดจากค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ ผลลัพธ์ที่ได้สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดใน
กระบวนการยึงอนุภาคแข็งมีค่าการคลุมผิวที่ 200 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเม็ดโลหะ 0.1 มิลลิเมตร และ
แรงดันลม 0.2 เมกะปาสคาล ผลจากการทดลองค่าเฉลี่ยความเค้นอัดตกค้าง 1638 เมกะปาสคาล
และความหยาบผิว (Ra) 0.41 ไมโครเมตรและมีค่าความผิดพลาดของการทดลองจากสมการพยากรณ์
อยู่ที่ 8.7 เปอร์เซ็นต์ จากผลลัพธ์ของวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เป็นวิธีการที่มี
ประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาในกรณีที่มีผลตอบสนองหลายวัตถุประสงค์

บัณฑิตวิทยาลัย
สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

JATURONG UBON : MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF SOLID PARTICLE BOMBARDING PROCESS ON HOT FORGING DIE MATERIAL USING TAGUCHI-GREY RELATIONAL ANALYSIS. ADVISOR : DR.DON KAEWDOOK, 99 PP.

Solid particle bombarding is a cold work used to finish metal parts to prevent fatigue and stress corrosion failures and increases product life for the part. This paper aims to present the prospect of the surface improvement of hot forging die material SKD61 grade to improve the durability of die material by using a statistical method for the optimization of solid particle bombarding process parameters. Taguchi method was designed as experimental strategy and grey relational analysis was shown a response optimization on residual stress and surface roughness. In this study, coverage percentage, shot diameter, and air pressure were the solid particle bombarding parameters. The optimal solid particle bombarding conditions were determined from average grey relational grade of the processing characteristics. The results demonstrated that the optimum condition for solid particle bombarding parameters were 200% Coverage, shot size diameter 0.1 mm, and air pressure 0.2 MPa. The results of the experiment performed from grey relational analysis were residual stress 1646 MPa and surface roughness R_a 0.41 μm . and experimental error from prediction was 8.7% From the results grey relational analysis method was an effective optimal solution in case of multiple response.

TNI

Graduate School
Field of Engineering Technology
Academic Year 2021

Student's Signature.....
Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีเกี่ยวกับงานวิจัย และแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ในงานวิจัยจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ดอน แก้วดก ประธานกรรมสอบ รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต สุขสวัสดิ์ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ) และกรรมการสอบนายโท ดร.บพิท ทศเทพพิทักษ์ (หัวหน้าช่างโรงงานหล่อหลอมและไม้แบบ อุทหาเรื่อธนบุรี กรมอุทหาเรื่อ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่ได้กล่าวนามที่ให้ความอนุเคราะห์ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และคอยให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์กับงานวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท Oxiso (Thailand) ในความอนุเคราะห์เครื่องจักรสำหรับการทดลอง การยิงอนุภาคแข็งและอุปกรณ์เครื่องวัดในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท Asahi Tec Aluminium (Thailand) ที่อนุเคราะห์ให้ยืมเครื่องวัดความหนาผิวในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่สนับสนุน อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ศึกษาไม่มากนักน้อยซึ่งขอกราบขอบพระคุณพ่อ แม่ ครอบครัวและเพื่อนๆ ทุกท่านทั้งที่กล่าวนามและมีได้กล่าวนามที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและสนับสนุนในการทำงานจนดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จตุรงค์ อุบล

TNI

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ

บทที่		หน้า
1	บทนำ.....	1
	ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
	ขอบเขตของการวิจัย.....	2
	ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
	แผนการดำเนินงานวิจัย.....	4
2	หลักการพื้นฐาน เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
	การทึบขึ้นรูปโลหะ.....	5
	วัสดุแม่พิมพ์.....	8
	ความล้าและการทดสอบความล้า.....	11
	กระบวนการไฟน์ ชอท ฟินนิง.....	22
	การออกแบบการทดลอง.....	23
	การออกแบบการทดลองวิธีการทาทุชี.....	30
	ความเค้นตกค้าง.....	32
	การวัดความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค XRD.....	33
	คุณภาพผิวงาน.....	37
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....43
	บทนำ.....43
	วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....43
	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....43
	โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย.....44
	เครื่องจักร อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....44
	การออกแบบการทดลอง.....46
	การวิเคราะห์ผลวิธีทางสถิติ.....50
	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์.....51
4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....55
	วิธีการทางสถิติสำหรับความเค้นอัดตกค้าง.....55
	การวิเคราะห์สัญญาณต่อสิ่งรบกวนสำหรับความเค้นอัดตกค้าง S/N-Ratio.....56
	การวิเคราะห์หาปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลักของโดยอาศัยค่า S/N-Ratio.....58
	วิธีการทางสถิติสำหรับความหยาบผิว.....60
	การวิเคราะห์สัญญาณต่อสิ่งรบกวนสำหรับความหยาบผิว S/N-Ratio.....62
	การวิเคราะห์หาปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลักของโดยอาศัยค่า S/N-Ratio.....63
	วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์.....65
	การแปลงข้อมูล.....65
	การหาค่าเบี่ยงเบนลำดับ.....67
	การหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์.....68
	การยืนยันผลการทดลอง.....70

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5	สรุปผลการทดลอง.....74
	สรุปผลการทดลองจากวิธีการหาภาษีสำหรับค่าความเค้นอัดตกค้างที่ผิว.....74
	สรุปผลการทดลองจากวิธีการหาภาษีสำหรับค่าความหยابผิว.....74
	สรุปผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์.....75
	อภิปรายผล.....75
	ข้อเสนอแนะ.....76
	บรรณานุกรม.....77
	ภาคผนวก.....81
	ภาคผนวก ก ภาพร่างชิ้นงานทดสอบในงานวิจัย.....82
	ภาคผนวก ข ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานทดสอบ.....84
	ภาคผนวก ค มาตรฐานการปรับตั้งค่าในการวัดความหยابผิว.....86
	ภาคผนวก ง บทความการประชุมวิชาการ.....88
	ประวัติย่อผู้วิจัย.....99

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงานปี พ.ศ. 2562-2563.....	4
2.1 ชนิดวัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะ.....	8
2.2 กระบวนการและคุณสมบัติของวัสดุแม่พิมพ์.....	10
2.3 การเปรียบเทียบจำนวนการทดลองระหว่าง Full Factorial กับ Taguchi.....	30
2.4 การเลือกใช้ Standard Orthogonal Array.....	31
3.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน JIS-SKD61.....	43
3.2 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ศึกษา.....	48
3.3 ตารางการทดลองแบบวิธีการทางสถิติ L18 Mix level Design.....	49
4.1 ผลการวัดความเค้นอัดตกค้างที่ผิวของชิ้นงาน.....	55
4.2 ค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของความเค้นอัดตกค้างที่ผิว (S/N Ratio).....	57
4.3 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N Ratio ของปัจจัยในแต่ละระดับ ของค่าความเค้นอัดตกค้าง.....	58
4.4 ค่าเฉลี่ยความเค้นอัดตกค้างของปัจจัยในแต่ละระดับ.....	58
4.5 ผลการวัดความหยาบผิว.....	61
4.6 ค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของความหยาบผิว (S/N Ratio).....	62
4.7 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N Ratio ของปัจจัยในแต่ละระดับ ของค่าความหยาบผิว.....	63
4.8 ค่าเฉลี่ยความเค้นอัดตกค้างของปัจจัยในแต่ละระดับ.....	63
4.9 ผลการแปลงค่าตอบสนองจากข้อมูลดิบ S/N Ratio ให้อยู่ช่วง 0-1.....	65
4.10 ค่าเบี่ยงเบนลำดับของ S/N Ratio.....	67
4.11 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์แต่ละการทดลอง.....	68
4.12 ค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์.....	69
4.13 เปรียบเทียบผลทดลองสำหรับเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์.....	70
4.14 เปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนของชิ้นงานจากสมการพยากรณ์และค่าที่วัดจริง.....	71
ค.1 มาตรฐานการปรับตั้งในการวัดความหยาบผิว.....	89

สารบัญรูป

รูป		หน้า
2.1	การทุบขึ้นรูปแบบอัด.....	6
2.2	กรรมวิธีการตีขึ้นรูป.....	6
2.3	การทุบขึ้นรูปแบบอิมเพรสชั่น.....	7
2.4	การทุบขึ้นรูปแบบอิมเพรสชั่น.....	7
2.5	พื้นผิวการแตกหักจากการล้าของเหล็กกล้า.....	12
2.6	พื้นผิวเรียบของการขัดสีของรอยแตก.....	12
2.7	การยุบเข้าของแถบการเลื่อน (Slip band intrusion).....	13
2.8	กราฟผลทดสอบการล้า (S-N Curve).....	15
2.9	เครื่องทดสอบความล้าโดยการปั๊มแบบหมุนรอบ.....	16
2.10	ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความล้าแบบหมุนรอบ.....	17
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนวัฏจักร.....	18
2.12	การเปลี่ยนแปลงความเค้นแบบไซน์ซอยดัล (Sinusoidal).....	19
2.13	เกณฑ์ของไซเดอร์เบิร์ก.....	21
2.14	กลไกการสร้างความเค้นอัดลงบนผิวโลหะ.....	23
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องในการส่งผ่านสู่ผลตอบสนองที่ต้องการ.....	24
2.16	รูปแบบของความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นโดยกระบวนการยิงอนุภาคแข็ง.....	33
2.17	แบบจำลองสำหรับกฎของแบร์ริก.....	34
2.18	การตั้งค่าทางเลขคณิตของการวัดความเค้นอัดตกค้างของเทคนิค XRD.....	37
2.19	การวัดความหยาบของพื้นผิวแบบจุดสูงสุดและต่ำสุด.....	37
2.20	การวัดความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต.....	38
2.21	การวัดความหยาบของพื้นผิวแบบเป็นช่วงเท่าๆกัน.....	39
2.22	จุดคำนึงในการวัดความหยาบผิว.....	40
3.1	ชิ้นงานทดสอบ.....	44
3.2	เครื่องยิงเม็ดโลหะแบบแรงดันลม (Shot Peening Machine).....	44
3.3	เครื่องวัดค่าความเค้นตกค้าง.....	45

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
3.4 เครื่องวัดความหยابผิว.....	46
3.5 ลำดับขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	47
3.6 รูปแบบกระบวนการยิงอนุภาคแข็ง.....	50
3.7 ตัวอย่างใบควบคุมเงื่อนไขสำหรับการทดลอง.....	50
4.1 กราฟค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N Ratio ของปัจจัยในแต่ละระดับของค่าความเค้นอัดตกค้างที่ผิว.....	59
4.2 กราฟค่าเฉลี่ยความเค้นอัดตกค้างของปัจจัยในแต่ละระดับ.....	59
4.3 กราฟค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N Ratio ของปัจจัยในแต่ละระดับของค่าความหยابผิว.....	64
4.4 กราฟค่าเฉลี่ยความหยابผิวของปัจจัยในแต่ละระดับ.....	64
4.5 กราฟค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์.....	70
4.6 แจกแจงเปรียบเทียบระหว่างค่าความสัมพันธ์แบบเกรย์กับสมการพยากรณ์.....	72
4.7 สภาพผิวของชิ้นงานทดสอบ.....	73
ก.1 ภาพร่างชิ้นงานทดสอบในงานวิจัย.....	83
ข.1 ภาพรวมการสร้างชิ้นงานทดสอบ.....	85
ค.1 ตำแหน่งของการวัดความหยابผิว.....	87

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการชุบขึ้นรูปเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและประหยัดสำหรับอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ [1] ซึ่งกระบวนการชุบขึ้นรูปขึ้นงานร้อน (Hot forging) เป็นหนึ่งในกระบวนการที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ในอุตสาหกรรมหลายประเภท กระบวนการชุบขึ้นรูปร้อนนี้ถ้าเทียบกับกระบวนการแปรรูปขึ้นงานแบบอื่น ๆ ที่ต้องการให้มีรูปร่างและขนาดที่ซับซ้อนเหมือนกัน จะพบได้ว่ามีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการอื่น ๆ เป็นอย่างมาก อาทิเช่น เวลา ต้นทุน และคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical Property) เป็นต้น

อย่างไรก็ดีแม้จะมีข้อได้เปรียบที่ไม่อาจจะปฏิเสธหลายประการของกระบวนการชุบขึ้นรูปร้อน แต่ปัจจัยหลักของกระบวนการชุบขึ้นรูปร้อนคือแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อคุณภาพและต้นทุนต่อการผลิตชิ้นงาน ยังคงประสบปัญหาบางอย่าง คือ การสึกหรอของพิมพ์ (Tools Wear) อายุการใช้งานแม่พิมพ์ที่สั้น (Tools life) ซึ่งสิ่งนี้จะเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตและส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน [2] และยังเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตจากการซ่อมบำรุงและเปลี่ยนแม่พิมพ์ ประเมินค่าใช้จ่ายแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปที่เกิดขึ้นโดยประมาณ 15-40% ของต้นทุนการผลิต [1] ตัวแปรที่สำคัญของอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปคือ 1. คุณสมบัติของวัสดุที่ทำแม่พิมพ์ 2. การออกแบบแม่พิมพ์ 3. กระบวนการทางความร้อนและการปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ 4. ขั้นตอนและตัวแปรในการชุบขึ้นรูป สำหรับกลไกการเสียหายของแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปเมื่อใช้งานไปได้ระยะหนึ่งจะเกิดความล้า (Fatigue) และการสึกหรอ (Wear) ขึ้นทั้งนี้อาจจะเกิดจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งหรือเกิดพร้อมกันก็ได้ [3-6]

กระบวนการยิงอนุภาคแข็งเป็นหนึ่งในวิธีการที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงการล้า (Fatigue Strength) ซึ่งความล้า (Fatigue) เป็นตัวการที่จะส่งผลให้สึกหรอ แตกร้าว ของแม่พิมพ์ โดยการยิงอนุภาคแข็ง มีวิธีการคือยิงเม็ดโลหะในขนาดระดับไมครอนด้วยความเร็วสูง โดยการอัดอากาศพร้อมกับเม็ดโลหะให้เข้าไปแทรกกับพื้นผิวของชิ้นงานเป้าหมาย ด้วยกระบวนการนี้ทำให้ได้พื้นผิวที่ดีขึ้นและมีความเค้นกดตกค้างสูง (Residual Compressive Stress) [7-8] ความเค้นอัดตกค้างที่เกิดขึ้นที่วัสดุจะช่วยต้านทานการแตกร้าวที่เกิดจากความล้าและชะลอการโตของรอยแตกจากความล้าของวัสดุได้ [9-11] ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของพื้นผิวและความทนทานต่อการสึกหรอของแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูป

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาปัจจัยในกระบวนการยิงอนุภาคแข็งที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของผิวแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อนเกรด JIS-SKD61 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยของกระบวนการยิงอนุภาคแข็งและหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มคุณภาพของแม่พิมพ์และลดต้นทุนการผลิต นำมาซึ่งแนวทางในการแก้ปัญหาการผลิตในภาคอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยในกระบวนการยิงอนุภาคแข็งที่มีอิทธิพลต่อความเค้นอัดตกค้างและความหยาบผิวของวัสดุแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อน

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการยิงอนุภาคแข็งสำหรับค่าเค้นอัดตกค้างและความหยาบผิวของวัสดุแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อนด้วยวิธีการออกแบบการทดลองวิธีการทางทฤษฎีร่วมกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 การวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบจากการยิงอนุภาคแข็งบนวัสดุแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อนเกรด JIS-SKD61 โดยในกระบวนการทดสอบจะมีการควบคุมเงื่อนไขในกระบวนการดังนี้

- วัสดุแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนเกรด JIS-SKD61 ขนาด 76.2x18.95x5 มิลลิเมตร
- เครื่องวัดความหยาบผิวแบบเข็มลาก (Stylus)
- เครื่องวัดความเค้นตกค้างแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractive)

1.3.2 การวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรในกระบวนการยิงอนุภาคแข็งโดยการทดลองจะมีการควบคุมเงื่อนไขกระบวนการทดลองดังนี้

- วัสดุเม็ดโลหะทรงกลม (Media) ความแข็งที่ 70-100 HV
- เครื่องยิงอนุภาคแข็งแบบแรงดันลม

1.3.3 การออกแบบการทดลองและหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการยิงอนุภาคแข็งที่มีผลต่อความเค้นอัดตกค้างและค่าความหยาบผิวของวัสดุแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อนด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab 18 V.2018

1.3.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

1.3.4.1 ตัวแปรต้น

- ขนาดเม็ดของก้อนโลหะในกระบวนการยิงอนุภาคแข็ง
- แรงดันในการยิงอนุภาคแข็ง
- การคลุมผิวชิ้นงานในกระบวนการยิงอนุภาคแข็ง

1.3.4.2 ตัวแปรตาม

- ค่าความหยาบของผิวชิ้นงานทดสอบ
- ค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานทดสอบ

1.3.4.3 ตัวแปรควบคุม

- ขนาดของชิ้นงานทดสอบ
- ระยะห่างของหัวยิงกับชิ้นงานทดสอบ
- ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ
- มุมองศาของหัวยิงกับชิ้นงานทดสอบ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเค้นอัดตกค้างและค่าความหยาบผิวของวัสดุแม่พิมพ์ทึบขึ้นรูปร้อน

1.4.2 สามารถหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการยิงอนุภาคแข็งที่มีต่อความเค้นอัดตกค้างและค่าความหยาบผิวของวัสดุแม่พิมพ์ทึบขึ้นรูปร้อนเกรด JIS-SKD61

1.4.3 เป็นแนวทางในการออกแบบกรรมวิธีเพื่อเพิ่มความทนทานของแม่พิมพ์ทึบขึ้นรูปร้อนเกรด JIS-SKD61 ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทุบขึ้นรูปโลหะ (Forging of Metals) [12]

การทุบขึ้นรูปโลหะเป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะก่อนภายในแม่พิมพ์ด้วยแรงอัดจากเครื่องอัด (Press) หรือค้อนตี (Hammer) การทุบขึ้นรูปโลหะในสมัยแรกๆ เป็นการขึ้นรูปเครื่องประดับอาวุธที่ใช้ในการต่อสู้ เหริญ และเครื่องใช้ต่างๆ โดยใช้ค้อนตีขึ้นรูป ลักษณะการตีขึ้นรูปแบบง่ายๆ โดยใช้ค้อน (Heavy Hand Hammer) กับทั่งตีเหล็ก (Anvil) เป็นอุปกรณ์ในการตีขึ้นรูป

2.1.1 การทุบขึ้นรูปโลหะสามารถตามอุณหภูมิการขึ้นรูปได้ 3 แบบดังนี้

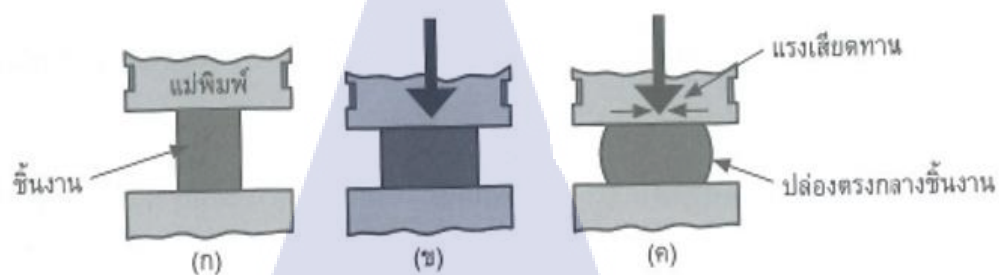
1) การทุบขึ้นรูปโลหะเย็น (Cool Forging) การทุบขึ้นรูปโลหะที่อุณหภูมิห้อง (Room Temperature) ของโลหะเหมาะสำหรับการทุบขึ้นรูปโลหะที่มีความเหนียวสูง เนื่องจากต้องใช้แรงในการทุบขึ้นรูปสูง ข้อดีสำหรับการทุบขึ้นรูปเย็นคือได้ผิวสำเร็จของงานที่ดีสภาพการทำงานปลอดภัยและสามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ง่าย

2) การทุบขึ้นรูปโลหะอุ่น (Warm Forging) การทุบขึ้นรูปโลหะที่อุณหภูมิอยู่ระหว่างการทุบขึ้นรูปเย็นกับการทุบขึ้นรูปร้อนเหมาะสำหรับโลหะที่มีความแข็งแรงไม่มากนักข้อดีสำหรับการทุบขึ้นรูปอุ่นคือ สามารถลดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อนได้และใช้แรงในการทุบต่ำ

3) การทุบขึ้นรูปโลหะร้อน (Hot Forging) เป็นการทุบขึ้นรูปโลหะ ณ อุณหภูมิวิกฤต (Recrystallization Temperature) ของโลหะ เหมาะสำหรับโลหะที่มีความแข็งแรงและต้องการขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อน ข้อดีสำหรับการการทุบขึ้นรูปโลหะร้อนคือ ใช้แรงในการทุบขึ้นรูปต่ำสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อน และไม่มีเค้นตกค้างภายในชิ้นงาน แต่มีข้อเสียในด้านคุณภาพผิวชิ้นงานไม่ดีและควบคุมขนาดชิ้นงานค่อนข้างลำบาก

2.1.2 การทุบขึ้นรูปโลหะสามารถตามลักษณะของแม่พิมพ์ได้ 3 แบบดังนี้

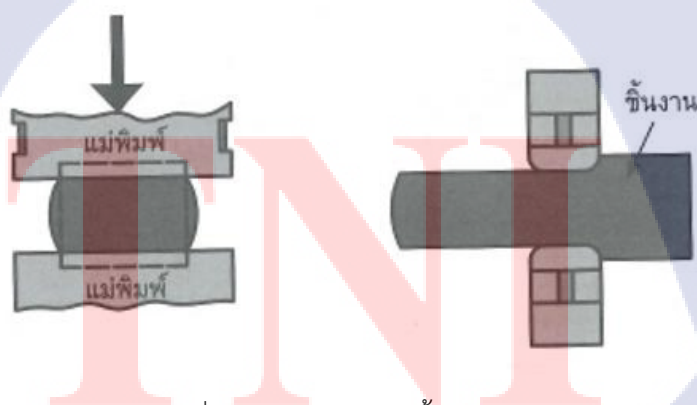
1) การทุบขึ้นรูปโลหะแบบแม่พิมพ์เปิด (Open Die Forging) การทุบขึ้นรูปโลหะแบบแม่พิมพ์เปิดเป็นกรรมวิธีการทุบขึ้นรูปโลหะอย่างง่าย โดยทั่วไปแม่พิมพ์แบบเปิดมีน้ำหนักอยู่ระหว่าง 15-500 กิโลกรัม หลักการทุบขึ้นรูปแบบนี้คือ การนำชิ้นงาน (Solid Work piece) วางลงบนระหว่างแม่พิมพ์ จากนั้นทุบขึ้นรูปลดความสูงด้วยแรงอัด หรือเรียกกรรมวิธีนี้ว่าการทุบขึ้นรูปแบบอัด (Upsetting) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทุบขึ้นรูปแบบอัด [12]

จากรูปที่ 2.1 (ค) ชิ้นงานเกิดการปล่องตรงกลางชิ้นงานเรียกว่า Barreling เริ่มเกิดโดยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานกับแม่พิมพ์ และสามารถลดได้โดยการใช้สารหล่อลื่น Barreling อาจเกิดขึ้นโดยการทุบขึ้นรูปร้อนระหว่างแม่พิมพ์เย็นตัวลงเป็นเหตุให้ผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับผิวแม่พิมพ์เกิดการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว และเกิดการต้านทานการเปลี่ยนรูป ขณะที่ส่วนอื่นๆ ยังคงร้อนอยู่ทำให้จุดตรงกลางของชิ้นงานยังคงเกิดการเป็นรูปอยู่ สาเหตุนี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ขณะทุบขึ้นรูป

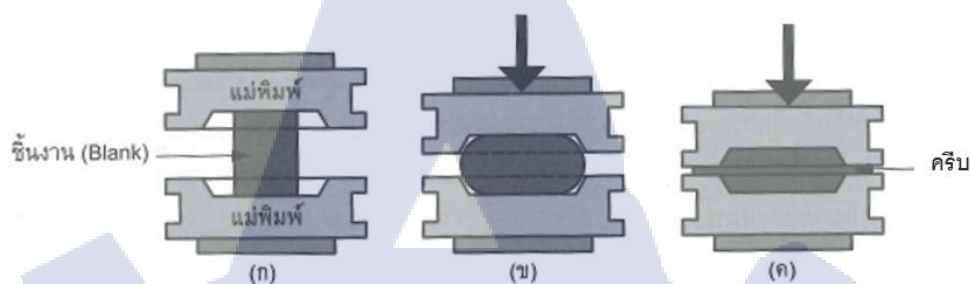
การตีขึ้นรูปโลหะเพื่อลดความหนาชิ้นงานลงเรียกว่า Cogging หรือ Drawing Out เป็นกรรมวิธีการทุบขึ้นรูปโลหะหลายๆ ครั้งต่อเนื่องกัน โดยการป้อนชิ้นงานและระยะทุบไม่มากนัก การทุบขึ้นรูปแบบนี้จะให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กรรมวิธีการตีขึ้นรูป [12]

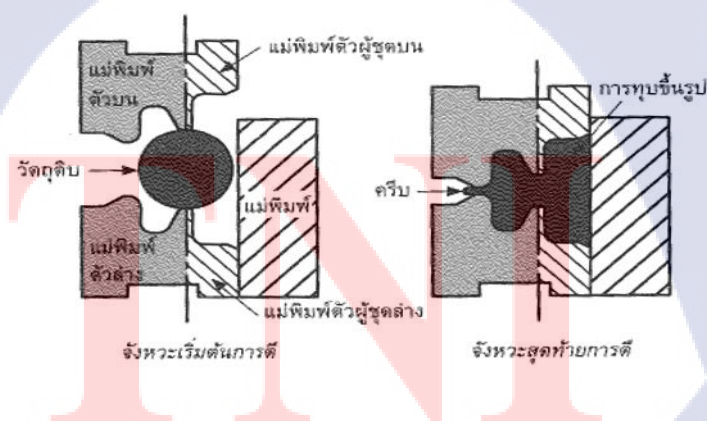
2) การทุบขึ้นรูปแบบอิมเพรสชั่น กรรมวิธีการทุบขึ้นรูปโลหะแบบอิมเพรสชั่นเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ขณะทำการทุบขึ้นรูป วัสดุจะไหลไปตามช่องว่างของแม่พิมพ์ส่วนที่

เกินออกมาเกิดเป็นครีบ การทุบขึ้นรูปแบบนี้เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความเสียหายน
สูงส่งผลให้แม่พิมพ์มีความดันสูงด้วยเหตุผลนี้ทำให้ชิ้นงานไหลเข้าแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การทุบขึ้นรูปแบบอิมเพรสชั่น [12]

3) การทุบขึ้นรูปโลหะแบบแม่พิมพ์ปิด (Closed Die Forging) กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแบบแม่พิมพ์ปิดมีลักษณะขั้นตอนการทุบขึ้นรูปเช่นเดียวกับกรรมวิธีการทุบขึ้นรูปโลหะแบบอิมเพรสชั่น แตกต่างตรงที่การทุบขึ้นรูปโลหะแบบแม่พิมพ์ปิดไม่มีครีบเกิดขึ้นในขั้นตอนสุดท้ายชิ้นงานถูกขึ้นรูปเสร็จสมบูรณ์ภายในแม่พิมพ์ สิ่งสำคัญสำหรับการทุบขึ้นรูปชนิดนี้คือ การออกแบบแม่พิมพ์ต้องให้ได้ขนาด และพิถีพิถันเพื่อที่ถูกต้องเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การทุบขึ้นรูปแบบอิมเพรสชั่น [12]

2.2 วัสดุทำแม่พิมพ์ [13]

วัสดุทำพิมพ์มีความจำเป็นสำหรับผู้ ออกแบบผลิตหรือใช้แม่พิมพ์เพื่อการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสภาวะและเงื่อนไขการผลิตที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปแล้ววัสดุทำพิมพ์ที่ดีย่อมหมายถึงวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง มีค่าความแข็งสูง ทนต่อการสึกหรอ ทนต่อการกัดกร่อนมีความเหนียวแตกหักยาก แต่ยิ่งวัสดุมีสมบัติที่ดีเท่าใดต้นทุนของวัสดุก็จะมีราคาสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนั้นวัสดุที่มีความแข็งสูงมาก ๆ แม้จะมีข้อดีทางด้านความต้านทานการสึกหรอสูงแต่ก็มักจะมีต้นทุนต่ำไม่ทนต่อแรงกระแทกเกิดการแตกหักได้ง่ายรวมถึงแปรรูปให้เป็นรูปทรงแม่พิมพ์ที่ต้องการได้ยาก ซึ่งหมายถึงค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นรวมทั้งวัสดุบางชนิดก็ต้องการเทคนิคเฉพาะในการแปรรูป

2.2.1 ชนิดของวัสดุทำแม่พิมพ์

วัสดุที่นิยมใช้ในการทำแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดวัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะ [13]

วัสดุ	การใช้งาน
เพชร (Diamond)	แม่พิมพ์ดิ่งลวด
ทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide)	แม่พิมพ์ตัดเจาะ, แม่พิมพ์ขึ้นรูป, แม่พิมพ์ดิ่งลวด, มักอยู่ในรูปของอินเสิร์ท (Insert)
เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steel) - เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง (High Speed Tool Steel) - เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานเย็น (Cold Work Tool Steel) - เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน (Hot Work Tool Steel)	แม่พิมพ์ทั่วไป
เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel)	ชิ้นส่วนโครงสร้างของแม่พิมพ์ชิ้นส่วนมาตรฐาน
เหล็กหล่อ	ใช้กับแม่พิมพ์ขนาดใหญ่ - โครงสร้างของแม่พิมพ์ - แม่พิมพ์ตัดขอบ (Trimming Die) - พUNCH และตาย (Punch and Die) ของแม่พิมพ์ขึ้นรูป

2.2.2 แนวทางการเลือกวัสดุทำแม่พิมพ์

แม่พิมพ์แต่ละแบบมีเกณฑ์ในการเลือกใช้วัสดุที่แตกต่างกัน สภาพะการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น ชนิดของวัสดุขึ้นงาน รูปร่าง ขนาด ความหนา ค่าพิกัดความคลาดเคลื่อนที่กำหนดจะส่งผลให้การเลือกใช้วัสดุทำพิมพ์แตกต่างกัน วัสดุทำพิมพ์ที่มีคุณภาพดีมากจะมีราคาสูงแนวทางในการเลือกชนิดของวัสดุทำแม่พิมพ์ที่เหมาะสมจึงไม่ได้ขึ้นกับสมบัติที่ดีของวัสดุเพียงอย่างเดียว แต่ต้องมองถึงความคุ้มค่าในการใช้งานด้วย

เนื่องจากวัสดุในกลุ่มนี้มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นปัจจัยหลักที่ใช้ในการกำหนดเกรดของวัสดุในการทำแม่พิมพ์ทั่วไปจึงมักจะขึ้นอยู่กับปริมาณการผลิตงานที่ต้องการปริมาณการผลิตสูงจะสามารถเลือกใช้วัสดุทำพิมพ์ที่เกรดสูงและราคาแพงได้ ส่วนในกรณีที่ต้องการปริมาณการผลิตไม่มาก การเลือกใช้วัสดุที่ราคาถูกจะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงไม่เกิดความคุ้มค่าในการผลิตจึงควรเลือกใช้เกรดวัสดุที่ต่ำลงหรือกล่าวง่าย ๆ ว่าใช้วัสดุเกรดที่มีความแข็งแรงทนทานเพียงพอที่จะใช้ผลิตตามปริมาณที่ต้องการเท่านั้น

แต่ก็มีข้อพึงระวังด้วยว่าการกำหนดชนิดวัสดุทำพิมพ์ไม่ได้ขึ้นกับปริมาณการผลิตเพียงอย่างเดียว ความรุนแรงในการขึ้นรูปชนิดของวัสดุขึ้นงานขนาดของงานที่ผลิตข้อกำหนดทางด้านความเที่ยงตรงในการผลิต ล้วนแต่เป็นปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงทั้งสิ้น

สำหรับการพิจารณาวัสดุทำแม่พิมพ์ทุกชิ้นรูปร่างเบื้องต้นประกอบดังนี้ [13]

- ขนาดของแม่พิมพ์
- ส่วนผสมทางเคมีของขึ้นงาน
- รูปทรงของขึ้นงาน
- อุณหภูมิการชุบขึ้นรูป
- วิธีการชุบขึ้นรูป
- ต้นทุนของวัสดุทำแม่พิมพ์
- ปริมาณขึ้นงานชุบขึ้นรูป
- การถ่ายเทความร้อนของขึ้นงานต่อแม่พิมพ์

คุณสมบัติวัสดุทำแม่พิมพ์ทุกชิ้นรูปร่าง [13]

- ความแข็งแรง (Strength) และสามารถดูดซับพลังงานได้ดี (Toughness) ที่อุณหภูมิสูง
- ความแข็งแรงและต้านทานการเปลี่ยนรูป (Hardenability)
- ความต้านทานเชิงกลและความร้อน
- ความต้านทานการสึกหรอ โดยเฉพาะในงานชุบขึ้นรูปร้อน

ตารางที่ 2.2 กระบวนการและคุณสมบัติของวัสดุแม่พิมพ์[13]

มาตรฐาน AISI	ด้านทานต่อการลดปริมาณคาร์บอน (Decarburization)	ด้านทานต่อการแตกหัก	ความแข็ง (HRC)	ความสามารถการตัดเฉือน	ความแข็งแรงเหนียว	ด้านทานต่อการอ่อนตัว	ด้านทานการสึกหรอ
M2	ปานกลาง	ปานกลาง	60-65	ปานกลาง	ต่ำ	สูงมาก	สูงมาก
T1	สูง	สูง	60-65	ปานกลาง	ต่ำ	สูงมาก	สูงมาก
T5	ต่ำ	ปานกลาง	60-65	ปานกลาง	ต่ำ	สูงมาก	สูงมาก
H11,H12,H13	ปานกลาง	สูงมาก	38-55	ปานกลาง-สูงมาก	สูงมาก	สูง	ปานกลาง
A2	ปานกลาง	สูงมาก	57-62	ปานกลาง	สูง	สูง	สูง
A9	ปานกลาง	สูงมาก	35-56	ปานกลาง	สูง	สูง	ปานกลาง-สูงมาก
D2	ปานกลาง	สูงมาก	54-61	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง-สูงมาก
D3	ปานกลาง	สูงมาก	54-61	ต่ำ	ต่ำ	สูง	ปานกลาง-สูงมาก
H21	ปานกลาง	สูงมาก	36-54	ปานกลาง	สูง	สูง	ปานกลาง
H26	ปานกลาง	สูงมาก	43.58	ปานกลาง	ปานกลาง	สูงมาก	สูง

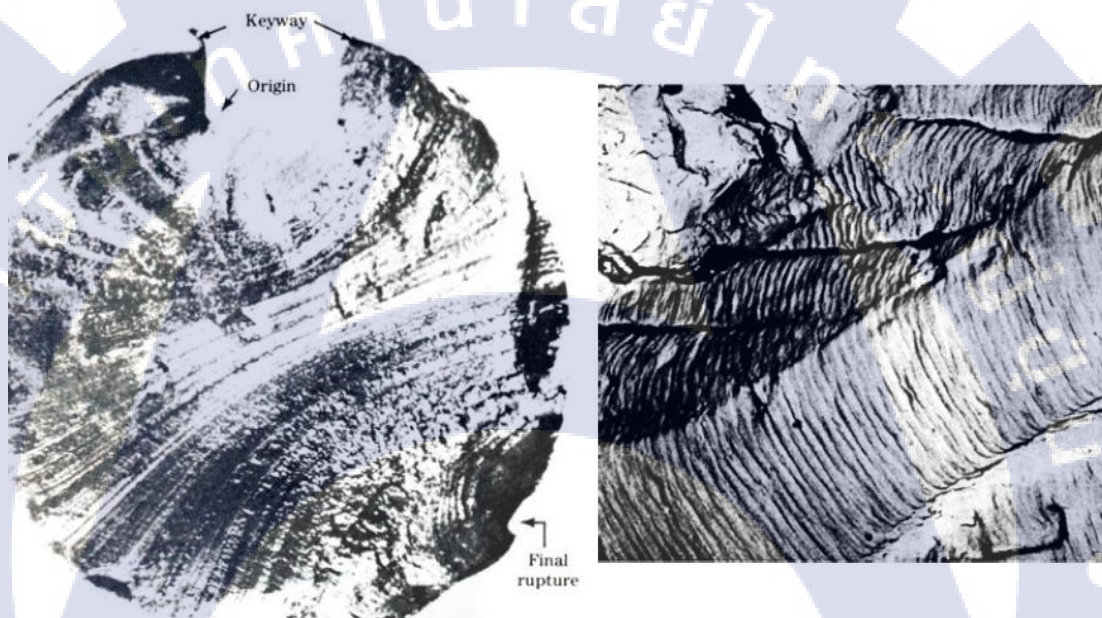
ตารางที่ 2.2 กระบวนการและคุณสมบัติของวัสดุแม่พิมพ์ (ต่อ)

มาตรฐาน AISI	ด้านทานต่อการลดปริมาณคาร์บอน (Decarburization)	ด้านทานต่อการแตกหัก	ความแข็ง (HRC)	ความสามารถการตัดเฉือน	ความแข็งแรงเหนียว	ด้านทานต่อการกร่อนตัว	ด้านทานการสึกหรอ
P20	สูงมาก	สูงมาก	28-37	ปานกลาง-สูงมาก	สูง	ต่ำ	ต่ำ-ปานกลาง
P21	สูง	สูงมาก	30-40	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ-ปานกลาง
W1,W2	สูงมาก	ปานกลาง	50-64	สูงมาก	สูง	ต่ำ	ต่ำ-ปานกลาง

2.3 ความล้าและการทดสอบความล้า [14]

การล้าเป็นความเสียหายของวัสดุจากการรับแรงเค้นแบบซ้ำหรือแบบเวียนรอบจำนวนรอบของการรับแรงที่ทำให้วัสดุแตกหักจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงเค้นที่กระทำและเงื่อนไขที่กระทำกับวัสดุ เช่น การตัดงอเส้นลวดจนแตกหักด้วยอัตราเร็วค่าหนึ่งพบว่าต้องทำการตัดงอนานกว่าด้วยจำนวนครั้งที่มากกว่าเมื่อเทียบกับการตัดงอเส้นลวดเดียวกันด้วยอัตราการตัดงอที่เร็วขึ้นเป็นสองเท่า นั่นคือแม้จะใช้แรงเค้นเท่ากันแต่ถ้าเพิ่มอัตราเร็วและองศาของการตัดงอจะทำให้วัสดุแตกหักเร็วขึ้น โดยไม่เกี่ยวข้องกับขนาดของแรงเค้นที่กระทำขึ้น ส่วนโลหะหลายประเภทที่นำไปใช้เพื่อการรับแรงเค้นแบบหมุนรอบหรือแบบ ซ้ำๆ เกิดความเสียหายที่แรงเค้นต่ำกว่าแรงเค้นปกติที่สามารถรับได้อย่างมาก ความเสียหายเหล่านี้ที่เกิดขึ้นภายใต้การรับแรงเค้นแบบหมุนรอบหรือแบบซ้ำๆ เรียกว่าความเสียหายจากการล้า (Fatigue Failures) ยกตัวอย่างชิ้นส่วนเครื่องจักรที่มีความเสียหายจากการล้า ได้แก่ ความเสียหายจากการล้าของเพลาลูกเบี้ยวรูปที่ 2.5 ปกติความเสียหายจากการล้าจะเริ่มเกิดที่จุดศูนย์รวมแรงเค้นเช่นส่วนที่เป็นมุมหรือร่องบากหรือบริเวณที่มี ตำหนิหรือมีสิ่งเจือปน

ทางโลหวิทยา จากจุดเริ่มแตกรอยแตกจะลุกลามไปยังด้านตรงข้ามของชิ้นส่วนภายใต้การหมุนหรือการรับแรงเค้นแบบซ้ำๆ ในระหว่างขั้นตอนนี้ของกระบวนการล้าบริเวณที่จับยึด (clamshell) หรือบริเวณขอบรอยบาก (beach mark) ของชิ้นส่วนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น สุดท้ายบริเวณที่เป็นพื้นที่หน้าตัดจะลดน้อยลงจนไม่สามารถรับแรงเค้นได้อีก จากนั้นชิ้นส่วนจะเกิดการแตกหักอย่างสมบูรณ์ โดยปกติพื้นผิวรอยแตกมีสองบริเวณที่ต่างกันกล่าวคือบริเวณที่มีผิวเรียบซึ่งเกิดจากการขัดสีกันของผิวรอยแตกเริ่มต้น ดังรูปที่ 2.5 กลายเป็นรอยแตกลุกลามไปทั่วหน้าตัดและอีกบริเวณหนึ่งเป็นบริเวณพื้นผิวที่ขรุขระซึ่งเกิดจากการแตกหักของพื้นที่หน้าตัดที่เหลือรับแรงเค้นที่สูงเกินไปกว่าจะรับได้ ใน รูปที่ 2.6 รอยแตกจากการล้าจะลุกลามตลอดพื้นที่หน้าตัดก่อนเกิดการแตกหักในท้ายที่สุด



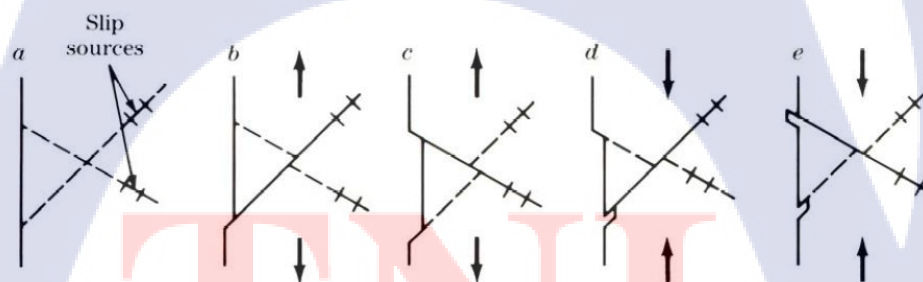
รูปที่ 2.5 พื้นผิวการแตกหักจากการล้าของเหล็กกล้า รูปที่ 2.6 พื้นผิวเรียบของการขัดสีของรอยแตก

ชิ้นส่วนตะขอรถเครนชิ้นส่วนเครื่องจักรและผิวของเครื่องบินจะเกิดการแตกหักเสียหายจากการรับแรงเค้นแบบเวียนรอบปกติแรงเค้นที่เกิดเฉพาะบริเวณเหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างถาวรภายในชิ้นงานตลอดจนเกิดรอยร้าวและแตกหัก หลังจากรับแรงสลับไปมาจำนวนหนึ่ง โดยเริ่มแรกจะเกิดรอยร้าวจากนั้นแรงเค้นที่เกิดขึ้น รอบรอยร้าว จะทำให้วัสดุแตกหักโดยเฉพาะในวัสดุเปราะภายใต้แรงเค้นดึงจะทำให้เกิดความเข้มข้นแรงเค้นที่บริเวณปลายของรอยร้าวทำให้รอยร้าวลุกลามจนชิ้นงานแตกหักช่วงที่รอยร้าวลุกลามวัสดุจะมีความเครียดแบบถาวร ความเสียหายจากการล้าส่วนใหญ่เริ่มจากรอยแตกขนาดเล็ก (Microscopic cracks) ซึ่งเกิดการลุกลามและขยายตัว

จากแรงเค้นที่สะสมเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกินจุดแตกหักของวัสดุรอยร้าวเหล่านี้มักเกิดจากแนวการเลื่อน (slip lines) ซึ่งเกิดขึ้นในวัสดุจากการรับแรงเค้นแบบซ้ำๆ และเกิดจากดิสโลเคชันขนาดเล็ก โดยมีความบกพร่องเช่นรอยขีดข่วนที่พื้นผิวร่องบาก สิ่งเจือปน และจุดบกพร่องอื่นๆ เป็นจุดกำเนิดของรอยร้าว

2.3.1 โครงสร้างพื้นฐานในระหว่างกระบวนการล้าดังนี้ [14]

- 1) การเกิดจุดเริ่มต้นของรอยแตกหัก เป็นขั้นเริ่มต้นของการเสียหายจากการล้า
- 2) การเติบโตของรอยแตกในรูปของแถบการเลื่อน จุดเริ่มต้นของรอยแตกที่เกิดจากการเสียรูปถาวรมาจากระบวนการที่ไม่สามารถเกิดการเสียรูปย้อนรอยเดิมได้อย่างสมบูรณ์ การเสียรูปถาวรในทิศทางหนึ่งแล้วเกิดสลับในทิศทางกลับกันเป็นเหตุทำให้พื้นผิวเกิดสันและร่องเรียกว่าการขับออกของแถบการเลื่อน (Slip band extrusion) และการยุบเข้าของแถบการเลื่อน (Slip band intrusion) เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบโลหะ (รูปที่ 2.7) เช่นเดียวกับความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะตลอดแถบการเลื่อนที่เกิดขึ้น ความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวและความเสียหายตลอดแถบการเลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นเหตุทำให้เกิดรอยแตกที่บริเวณพื้นผิว หรือที่บริเวณใกล้พื้นผิว ซึ่งจะลุกลามเข้าไปในชิ้นทดสอบตลอดระยะนาบที่ได้รับแรงเค้นเฉือนสูง ขั้นนี้เรียกว่าการเติบโตขั้นที่หนึ่ง (stage I) ของรอยแตกจากการล้าและอัตราการเติบโตของรอยแตกโดยปกติจะช้ามาก ประมาณ 10-10m/cycle



รูปที่ 2.7 การยุบเข้าของแถบการเลื่อน (Slip band intrusion) [14]

- 3) การเติบโตของรอยแตกบนระยะนาบที่ได้รับแรงเค้นเฉือนสูงในระหว่างขั้นที่หนึ่งรอยแตกอาจเติบโตในโลหะหลายผลึกแต่จะมีขนาดเพียงสองถึงสามเกรนเท่านั้น ก่อนที่จะเปลี่ยนทิศทางไปในทิศตั้งฉากกับแรงเค้นดึงสูงที่สุดบนชิ้นทดสอบโลหะการเติบโตในขั้นที่สอง (stage II) รอยแตกจะเกิดการลุกลามด้วยอัตราค่อนข้างเร็ว เช่น 10m/cycle จากนั้นร่องการล้า (Fatigue striation) จะโตขึ้นอย่างต่อเนื่องกลายเป็นรอยแตกขวางพื้นที่หน้าตัดชิ้นทดสอบ (รูปที่ 2.5) ร่องการล้าเหล่านี้จะเป็น

ประโยชน์ในการวิเคราะห์ความเสียหายจากการล้าในการกำหนดจุดเริ่มและทิศทางของการลุกลามของรอยแตกจากการล้า

4) ความเสียหายแบบเหนียวสูงสุด (Ultimate Ductile Failure) สุตท้ายเมื่อรอยแตก ครอบคลุมพื้นที่มากพอจนหน้าตัดของเนื้อโลหะที่เหลือไม่สามารถรองรับแรงที่กระทำขึ้นทดสอบ จะเกิดการแตกหักแบบเหนียว

2.3.2 ตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงการล้าของโลหะ [14]

1) จุดรวมแรงเค้น (Stress Concentration) ความแข็งแรงการล้าจะลดลงอย่างมาก ถ้ามีจุด สะสมแรงเค้น เช่นรอยบาก ฟองอากาศ ร่องสลักและการเปลี่ยนรูปของหน้าตัด ตัวอย่างเช่น ความเสียหายจากการล้าในรูปที่ 2.5 ซึ่งเริ่มเกิดจากร่องสลักในเพลาลูก ความเสียหายจากการล้าสามารถลดได้โดยการออกแบบอย่างระมัดระวัง โดยหลีกเลี่ยงรูปทรงที่จะทำให้เกิดการสะสมของแรงเค้น

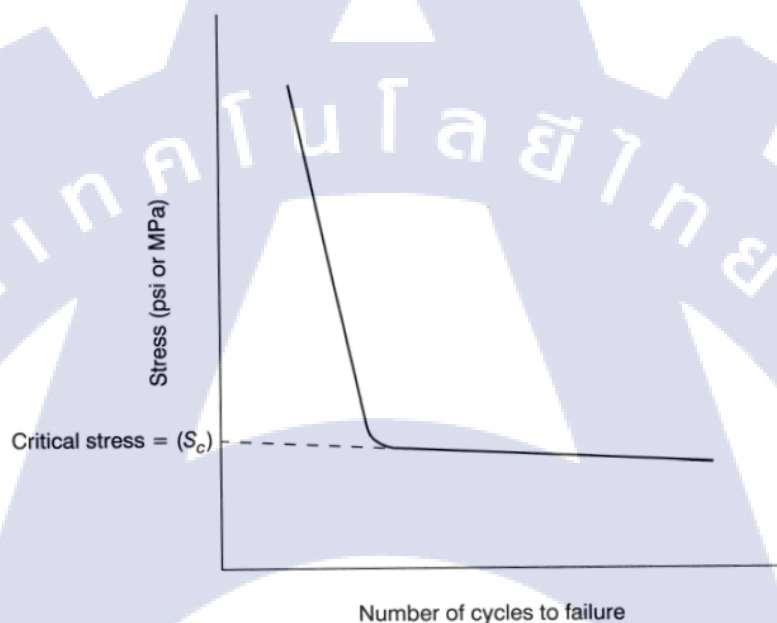
2) ความหยาบของพื้นผิว (Surface Roughness) ปกติพื้นผิวสุดท้ายของชิ้นทดสอบ โลหะที่มีความเรียบมากกว่ามีความแข็งแรงการล้าที่สูงกว่า เนื่องจากพื้นผิวหยาบจะมีการสะสมแรงเค้นซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการเกิดรอยแตกจากการล้า

3) สภาพของพื้นผิว (Surface Condition) เนื่องจากความเสียหายจากการล้าสูงสุด เริ่ม เกิดที่ผิวของโลหะ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสภาพของพื้นผิวจึงมีความสำคัญต่อความแข็งแรง การล้าของโลหะ ยกตัวอย่างกระบวนการชุบผิวแข็ง เช่น carburizing และ Nitriding ซึ่งจะทำให้พื้นผิวของเหล็กกล้าแข็งขึ้นส่งผลทำให้มีอายุการล้าเพิ่มขึ้นในทางตรงข้าม Decarburizing จะทำให้พื้นผิวของเหล็กอ่อนลงและมีอายุการล้าลดลง เช่นเดียวกับการทำให้พื้นผิวของโลหะ มีแรงเค้นตกค้างโดยการขึ้นรูปจะช่วยเพิ่มอายุการล้าได้

4) สิ่งแวดล้อม (Environment) ถ้าโลหะมีการรับแรงเค้นแบบหมุนรอบใน สิ่งแวดล้อม ที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน การกัดกร่อนทางเคมีจะเร่งอัตราการลุกลามของรอยแตกจากการล้า การร่วมกันของการกัดกร่อนกับการรับแรงเค้นแบบหมุนรอบของโลหะเรียกว่า การล้าจากการกัดกร่อน (Corrosion Fatigue)

แรงเค้นที่ทำให้เกิดการแตกหักจากการล้าจะกำหนดจากระดับความแตกต่างและชนิดของแรงเค้น โดยแรงเค้นอาจเป็นแรงเค้นตามแนวแกน แรงเค้นเฉือน บิด หรือดัดงอ ค่าแรงเค้นที่วัสดุเกิดการแตกหักจากการล้าเรียกว่าความแข็งแรงการล้า (Fatigue strength) แรงเค้นจำกัด (Limiting stress) หรือแรงเค้นวิกฤติ (Critical stress) เป็นแรงเค้นในช่วงที่วัสดุสามารถรับแรงแบบซ้ำๆ โดยไม่แตกหักและไม่ขึ้นกับจำนวนรอบ ซึ่งเรียกว่าขีดจำกัดความทนทาน (Endurance limit)

การทดสอบการล้าเป็นการทดสอบแบบระยะยาว บางครั้งอาจเป็นเดือนหรือเป็นปีปกติการทดสอบการล้าจะไม่ใช่ในกระบวนการควบคุมคุณภาพหรือการตรวจสอบ เนื่องจากต้องใช้เวลาและความพยายามค่อนข้างมากในการจัดเก็บข้อมูลที่เป็น โดยในการทดสอบการล้ามีเครื่องมือหลายชนิดแต่ทุกชนิดมีสองสิ่งๆที่เหมือนกันคือต้องสามารถนับจำนวนรอบ การหมุนอย่างถูกต้องจนกระทั่งชิ้นงานแตกหักและต้องสามารถบันทึกแรงเค้นที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้อย่างถูกต้อง ถ้ามีการทดสอบกับชิ้นทดสอบหลายชิ้นด้วยแรงเค้น



รูปที่ 2.8 กราฟผลทดสอบการล้า (S-N Curve) [14]

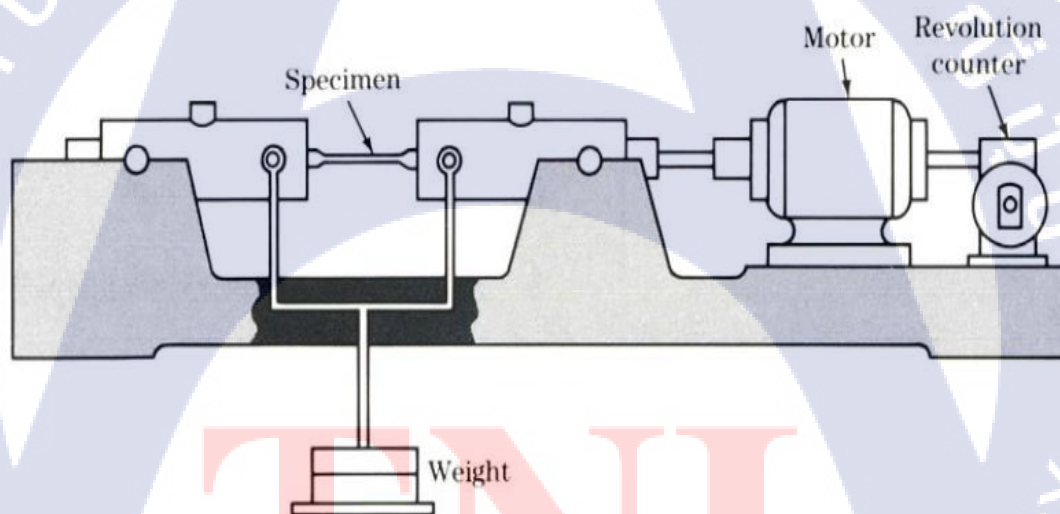
จากรูปที่ 2.8 จะพบว่าเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นที่ค่อนข้างตรงสองเส้นมาบรรจบกันและถ้าทำการลากเส้นกราฟล่างมาตัดกับแกนของแรงเค้นจะทำให้ได้ค่าขีดจำกัดแรงเค้นหรือแรงเค้นวิกฤต (S_c) ของวัสดุ

อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงการล้าของวัสดุ คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความแข็งแรงของวัสดุจะลดลงทำให้ความแข็งแรงการล้าและขีดจำกัดการล้า (Endurance limit) ลดลงด้วย นอกจากนั้นความแข็งแรงการล้าของโลหะยังได้รับผลกระทบจากส่วนประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเช่นการเติมธาตุผสมบางชนิดจะทำให้ความแข็งแรงการล้าของโลหะเพิ่มขึ้นรวมทั้งกระบวนการต่างๆ เช่นกระบวนการทางความร้อนและการขึ้นรูปเย็นจะช่วยให้โลหะมีความแข็งแรงการล้าเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้การทำให้วัสดุให้เรียบหรือกระบวนการ

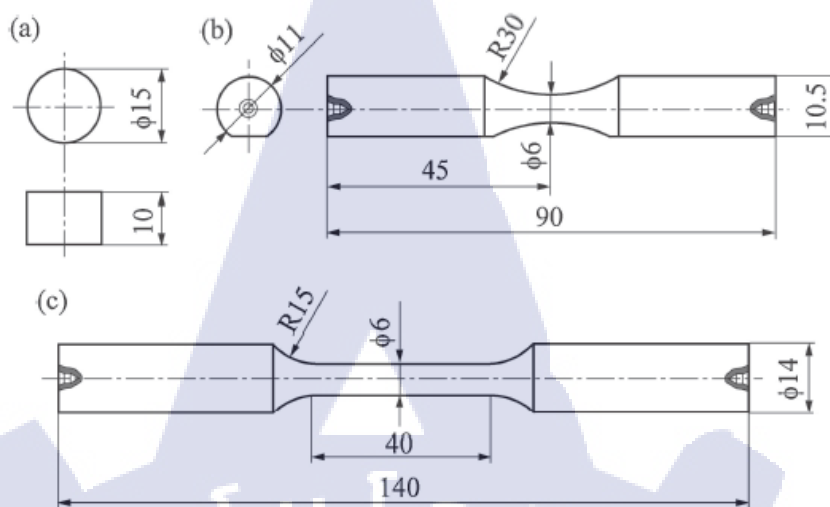
ต่างๆที่จะช่วยลดการเกิดของดิสโลเคชั่น และลดจุดเริ่มเกิดหรือการขยายตัวของรอยแตกล้วนช่วยให้วัสดุมีความแข็งแรงการล้าเพิ่มขึ้น

2.3.3 กระบวนการทดสอบ [14]

การทดสอบการล้าสามารถใช้เครื่องทดสอบได้หลายชนิด เช่น เครื่องทดสอบแรงเค้นแนวแกน เครื่องทดสอบแรงเค้นการดัดงอเครื่องทดสอบแรงเค้นเฉือนบิดและเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) โดยในการกำหนดอายุการล้าของวัสดุจะทำการทดสอบการล้ากับชิ้นทดสอบที่มีขนาดไม่ใหญ่มากในลักษณะของการหมุนแท่งเหล็กซึ่งขณะที่หมุนขึ้นทดสอบจะได้รับแรงสลับกันระหว่างแรงกดกับแรงเค้นดึงในปริมาณที่เท่ากัน (รูปที่ 2.9) ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบการล้าแบบพับงอ (reversed bending) ของ R.R. Moor ดังรูปที่ 2.10 จะต้องทำการขัดเงาผิวชิ้นทดสอบจนถึงตรงแกนกลาง โดยข้อมูลจากการทดสอบจะนำมาบันทึกในรูปของกราฟ S-N คือบันทึกแรงเค้น S เทียบกับจำนวนรอบการหมุน N ที่ทำให้วัสดุแตกหัก



รูปที่ 2.9 เครื่องทดสอบความล้าโดยการพับงอแบบหมุนรอบ [14]



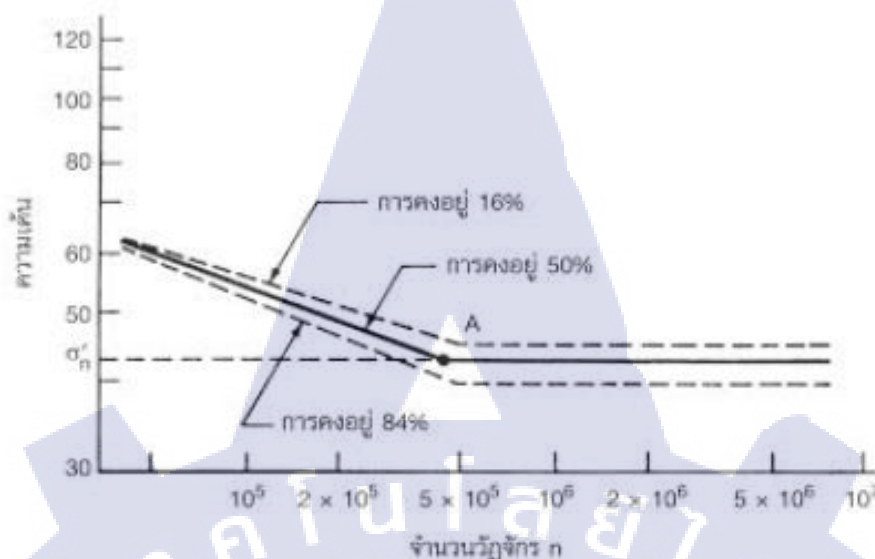
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความล้าแบบหมุนรอบ [14]

การทดสอบการล้าในลักษณะการหมุนรอบด้วยการยึดชิ้นทดสอบทรงกระบอกไว้ที่ปลายด้านหนึ่งของเครื่องทดสอบแล้วถ่วงน้ำหนักไว้ที่ปลายอีกด้าน ในช่วงแรกพื้นผิวด้านบนของชิ้นทดสอบจะรับแรงดึงและด้านล่างจะรับแรงอัด เมื่อทำการหมุนไปครึ่งรอบพื้นผิวด้านบนจะเคลื่อนไปอยู่ด้านล่างและรับแรงอัด ส่วนผิวด้านล่างจะพลิกมาอยู่ด้านบนและรับแรงดึงและเมื่อทำการหมุนครบรอบพื้นผิวทั้งสองจะกลับมารับแรงแบบเดิมอีกครั้งตลอดการทดสอบชิ้นทดสอบจะรับแรงสลับกลับกันเช่นนี้ต่อเนื่องกัน

2.3.4 ความต้านแรงทนทานและขีดจำกัดความทนทาน [15]

ขีดจำกัดความทนทานหรือขีดจำกัดความล้า (Fatigue limit) σ'_n หมายถึงความเค้นที่กระทำซ้ำกันทิศทาง (Reversed Stress) ต่อชิ้นงานทดสอบผิวมัน (Mirror Polished) เป็นวัฏจักรนับไม่ถ้วน โดยชิ้นทดสอบนั้นไม่เกิดการแตกหัก (เส้นผ่าศูนย์กลางชิ้นงานทดสอบประมาณ 8 มิลลิเมตร)

การทดสอบอาจกระทำได้ 3 วิธีคือ การดึง การบิด และการดัด ข้อมูลจากการทดสอบที่มีอยู่ค่อนข้างมากคือ การดัด (Reversed Bending) รูปที่ 2.9 แสดงถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบนี้ ในการทดลองให้แขวนน้ำหนักที่ต้องการเพื่อให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการเค้นดัด จากนั้นมอเตอร์ก็จะหมุนไปด้วยความเร็วรอบคงที่(น้ำหนักไม่หมุนไปด้วย)ในขณะที่ชิ้นงานหมุนไป 1 รอบ ตำแหน่งคงที่ ณ ผิวของชิ้นงานทดสอบก็จะได้รับความเค้นที่เปลี่ยนจากความเค้นดึงสูงสุดไปเป็นความเค้นกดสูงสุดแล้วกลับมาเป็นความเค้นดึงสูงสุดอีกเรียกว่า 1 วัฏจักร ถ้าวัสดุชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็ก เมื่อนำผลจากการทดลองมาเขียนเป็นกราฟจะได้ดังแสดงในรูป 2.11



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนวัฏจักร[15]

จากตำแหน่งของ A ในรูปที่ 2.11 จะเห็นว่ากราฟเป็นเส้นตรงเกือบอยู่ในแนวระดับ แสดงว่าถ้าให้ความเค้นต่อชิ้นทดสอบต่ำกว่านี้แล้วชิ้นงานจะไม่แตกหักเลย (ทางทฤษฎี) แต่ในทางปฏิบัติ ชิ้นงานจะต้องขาดออกเมื่อจำนวนวัฏจักรสูงมาก ถ้าชิ้นงานเป็นผิวขัดมันและมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8 มิลลิเมตร ความเค้นที่จุด A บนเส้นการคงอยู่ 50% (Survival) เรียกว่าขีดจำกัดความทนทานและชิ้นงานที่ได้รับความเค้นระดับนี้ให้ถือว่ามียอายุการใช้งานไม่จำกัด (Infinite life) ในทางปฏิบัติให้ถือว่าชิ้นงานที่สามารถรับแรงได้จำนวนวัฏจักรมากกว่า 1 ล้าน เป็นชิ้นงานที่มีอายุการใช้งานไม่จำกัด

สำหรับวัสดุบางชนิด เช่น ทองเหลือง ทองแดง อลูมิเนียม และแมกนีเซียม เส้นกราฟจะไม่มียอดหักมุม ดังแสดงในรูป 2.11 แต่เส้นกราฟจะลดลงมาเรื่อยๆ แสดงว่าวัสดุเหล่านี้ไม่มีขีดจำกัดความทนทาน วัสดุเหล่านี้จะต้องระบุจำนวนวัฏจักรและระดับความเค้นที่ทำให้ชิ้นทดสอบแตกหักด้วย และความเค้นนี้เรียก ความต้านแรงทนทาน

ชิ้นงานทั่วไปจะมีขนาดไม่เท่ากับชิ้นทดสอบและผิวหน้าก็อาจไม่ได้ขัดมันตลอดจนแรงที่กระทำก็อาจจะเป็นแรงอย่างอื่นๆ เช่น แรงบิด จากการทดสอบพบว่าขีดจำกัดความทนทานจะผิดไปจากชิ้นทดสอบมาตรฐาน ในกรณีเช่นนี้ก็จะเรียกว่า ความต้านทานแรงทนทาน เช่นกัน เพราะฉะนั้นเมื่อกล่าวอย่างกว้างๆ แล้วความต้านแรงทนทานหมายถึงความต้านแรงทนทานของชิ้นทดสอบที่ไม่มีขีดจำกัดความทนทานหรือความต้านแรงทนทานของชิ้นงานจริง

เนื่องจากข้อมูลเกี่ยวกับขีดจำกัดความทนทานมีน้อยมาก ดังนั้นจึงได้ประมาณค่าขีดจำกัดความทนทาน (สำหรับการคงอยู่ 50%) ในกรณีของงานดัด ดังนี้คือ

$\sigma'_n = 0.5 \sigma_u$ สำหรับเหล็กกล้าเหนียวซึ่ง $\sigma_u < 1380 \text{ N/mm}^2$ และ $HB < 400$

$\sigma'_n = 690 \text{ N/mm}^2$ สำหรับเหล็กกล้าเหนียวซึ่ง $\sigma_u > 1380 \text{ N/mm}^2$

$\sigma'_n = 0.4 \sigma_u$ สำหรับเหล็กกล้าหล่อ และเหล็กหล่อ

$\sigma'_n = 0.38 \sigma_u$ สำหรับแมกนีเซียมผสมหล่อและแมกนีเซียมผสมเหนียว (อายุการใช้งาน 10^6 วัฏจักร)

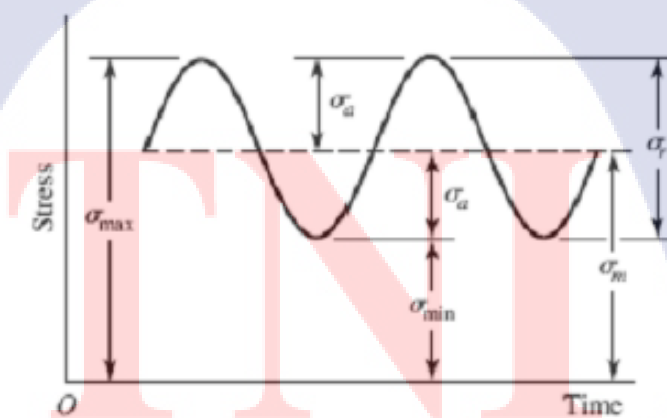
$\sigma'_n = 0.45 \sigma_u$ สำหรับนิกเกิลผสมและทองแดงผสม

$\sigma'_n = 0.38 \sigma_u$ สำหรับอลูมิเนียมผสมเหนียวที่มีความต้านทานแรงดึงสูงถึง 278 N/mm^2 (อายุการใช้งาน 5×10^8 วัฏจักร)

$\sigma'_n = 0.16 \sigma_u$ สำหรับอลูมิเนียมผสมหล่อที่มีความต้านทานแรงดึงสูงถึง 345 N/mm^2 (อายุการใช้งาน 5×10^8 วัฏจักร)

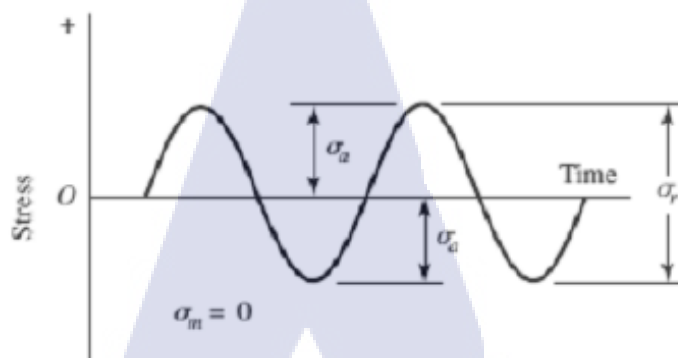
2.3.5 เกณฑ์ของโซเดอร์เบิร์ก [15]

ในการออกแบบชิ้นงานโดยคิดถึงความปลอดภัยนิยมใช้วิธีการที่เรียกว่า เกณฑ์ของโซเดอร์เบิร์ก (Soderberg's Criterion) เป็นส่วนมาก แต่ก่อนที่จะถึงวิธีการออกแบบดังกล่าวให้มาพิจารณาถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงแรง(หรือความเค้น)และนิยามบางคำต่อไปนี้

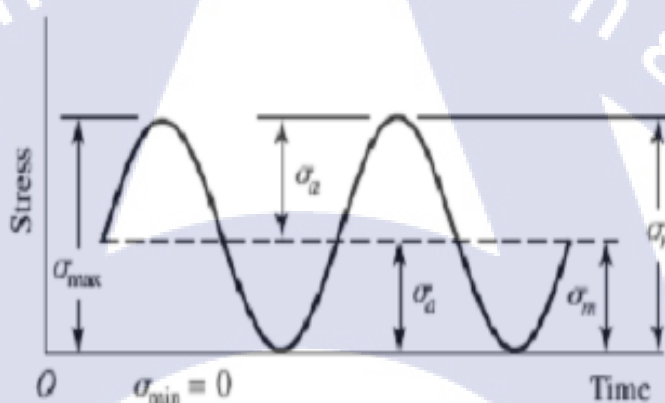


(ก) เป็นบวกตลอด

รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงความเค้นแบบไซน์ซอยดัล (Sinusoidal) [15]



(ข) กระทำซ้ำ



(ค) กระทำกลับไปกลับมา

รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงความเค้นแบบไซน์ซอยดัล (Sinusoidal) [15] (ต่อ)

ในขั้นงานทั่วไปแล้วแรงจะเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่อาจจะทราบได้อย่างแน่นอนแต่เพื่อให้สามารถคำนวณได้จึงสมมติให้แรงเปลี่ยนแปลงในลักษณะแบบไซน์ซอยดัล (Sinusoidal) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความเค้นซึ่งมีค่าเป็นบวก(ความเค้นดึง) ตลอดเวลา ส่วนในรูปที่ 2.12 (ข) เป็นแบบกระทำซ้ำคือเปลี่ยนแปลงจากค่าศูนย์ไปเป็นค่าสูงสุดแล้วกลับมาเป็นศูนย์อีก และในรูปที่ 2.12 (ค) เป็นแบบกลับไปกลับมาคือการเปลี่ยนแปลงจากค่าบวกสูงสุดไปยังค่าลบสูงสุดที่มีขนาดเท่ากัน ถ้าให้อัตราส่วนดังสมการที่ 2.1

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.1)$$

โดยที่ σ_{min} = ความเค้นต่ำสุด

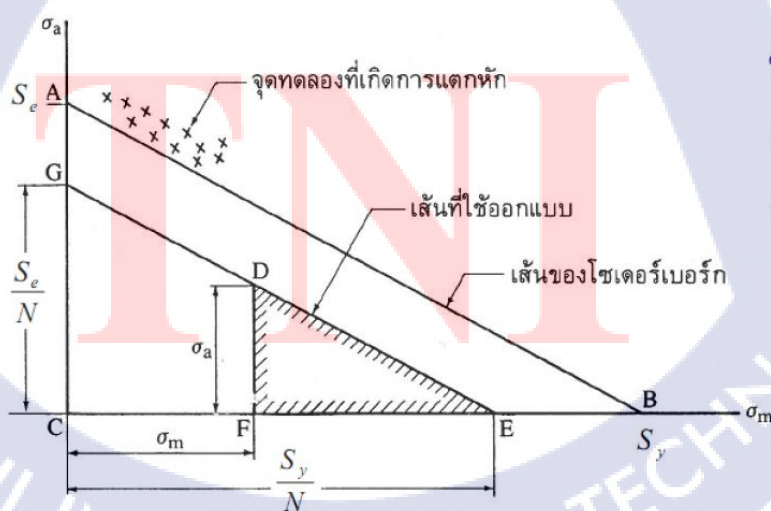
σ_{max} = ความเค้นสูงสุด จะได้ว่า $R = 0$ ในกรณีรูปที่ 2.15 (ข) $R = -1$ ในกรณีรูปที่ 2.15 (ค)

นอกจากนี้ยังมีนิยามที่จำเป็นจะต้องทราบอีกคือ

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \text{ความเค้นส่วนเปลี่ยน (Stress Amplitude)} \quad (2.2)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \text{ความเค้นเฉลี่ย (Mean Stress)} \quad (2.3)$$

ไซเดอร์เบิร์กได้เขียนจุดที่ได้จากการทดสอบขึ้นตัวอย่างจนแตกหักบนแกน $\sigma_a - \sigma_m$ แล้วโยงเส้น AB จากค่า $\sigma_a = \sigma_n$ ไปยัง $\sigma_m = \sigma_y$ แล้วพบว่าจุดเหล่านี้อยู่นอกเส้น AB เป็นส่วนใหญ่ แสดงว่าถ้าหากขนาดของชิ้นงานทำให้สภาพความเค้นอยู่บนเส้น AB แล้วชิ้นงานจะไม่แตกหักเนื่องจากความล้า ในการออกแบบจะเพิ่มค่าความปลอดภัย N เข้าไปอีก ดังนั้นเส้น GE จึงเป็นเส้นที่ใช้ในการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เกณฑ์ของไซเดอร์เบิร์ก [15]

2.4 กระบวนการไฟน์ ชอท ฟินนิง (Fine shot peening)

กระบวนการ ไฟน์ ชอท ฟินนิง (Fine shot peening : FPS) หรือ ไฟน์ พาร์ติเคิล ชอท ฟินนิง (Fine particle shot peening : FPSP) คือกระบวนการพ่นวัสดุทรงกลมขนาดเล็กระดับ ไมครอน (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20-200 ไมโครเมตร) ยิ่งกระแทกกับผิววัสดุที่ความเร็วมากกว่า 100 เมตร/วินาที โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้จะเป็นวัสดุที่ทำจาก เหล็ก แก้ว และเซรามิค ที่มีความแข็งที่ 750 – 1000 HV. เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการสามารถใช้กับเครื่องอัดแรงดัดลมที่ใช้กับกระบวนการ ชอท ฟินนิง (Shot peening) ทำไปได้ กระบวนการไฟน์ ชอท ฟินนิง สามารถปรับปรุงความแข็งแรงต่อการล้าและการต้านทานต่อการแตกหัก และสิ่งสำคัญคือได้ผิวที่เรียบของผิวสำเร็จ กระบวนการ ไฟน์ ชอท ฟินนิง เป็นหนึ่งในวิธีการที่ช่วยเพิ่มความความแข็งแรงต่อการล้า (Fatigue strength) ซึ่งความล้า (Fatigue) เป็นตัวการที่จะส่งผลให้สึกหรอ แตกร้าว ของแม่พิมพ์ โดยการอัดอากาศพร้อมกับเม็ดมีเดียให้เข้าไปกระแทกกับพื้นผิวของชิ้นงานเป้าหมายด้วยกระบวนการนี้ทำให้ได้พื้นผิวที่ดีขึ้นและมีความเค้นกดตกค้างสูง (Residual compressive stress)

2.4.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของ 2 กระบวนการ FPS กับ SP

ข้อดีของกระบวนการ ชอท ฟินนิง (Shot peening)

- 1) สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานจากการล้าได้
- 2) เป็นกรรมวิธีที่ค่อนข้างประหยัด
- 3) มีการวิจัยที่เป็นรูปธรรมและการควบคุมภาพที่เพิ่มคุณค่าของกระบวนการ
- 4) วัสดุ(Media)และอุปกรณ์ที่พร้อมใช้งาน
- 5) สามารถสร้างผิวที่เป็นรอยบ่มซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานบางชนิด

ข้อดีของกระบวนการไฟน์ ชอท ฟินนิง (Fine shot peening)

- 1) สามารถสร้างผิวที่มีความแข็งแรงและต้านทานการสึกหรอ
- 2) สร้างผิวที่เรียบเนียนเป็นพิเศษ
- 3) จะไม่ทำให้ชิ้นงานที่ห้ามมีความคลาดเคลื่อน (Close-Tolerance) บิด
- 4) จะไม่ทำลายชิ้นงานที่มีความเปราะ

ข้อเสียของกระบวนการ ชอท ฟินนิง (Shot peening)

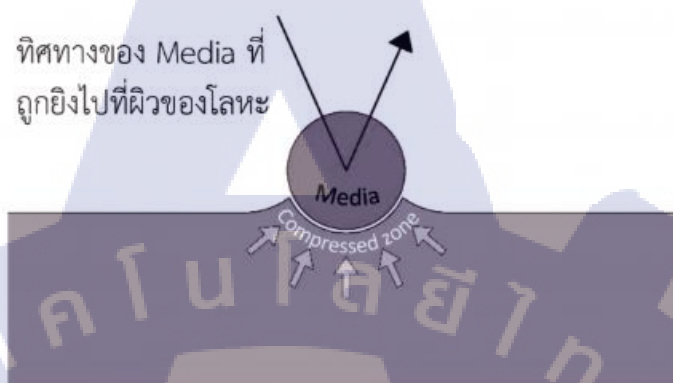
- 1) รอยบ่มที่ผิวไม่เหมาะกับงานบางชนิด
- 2) อาจทำให้เกิดการบิดกับชิ้นงานที่ห้ามมีการคลาดเคลื่อน

ข้อเสียของกระบวนการไฟน์ ชอท ฟินนิง (Fine shot peening)

- 1) องค์กรที่เชี่ยวชาญยังค่อนข้างน้อย

2) วัสดุ(Media)ค่อนข้างใช้ยากและอุปกรณ์ยังค่อนข้างมีน้อยและผู้ผลิตวัสดุชิ้นนี้
ยังต้องใช้ผู้มีประสบการณ์ค่อนข้างมาก

3) ข้อจำกัดของความลึกบนพื้นผิวอาจไม่เหมาะสมกับงานบางประเภท



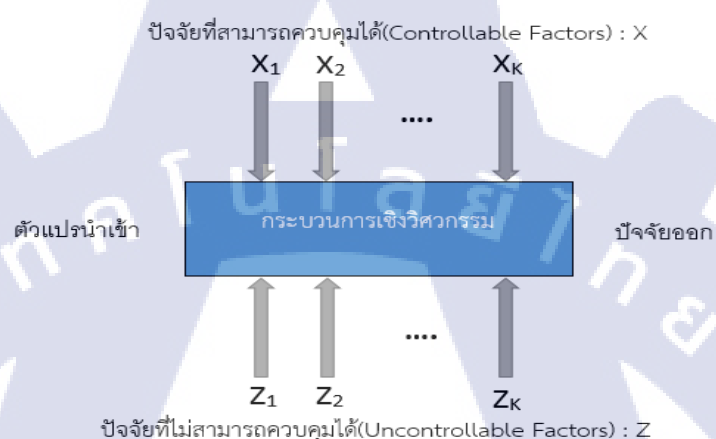
รูปที่ 2.14 กลไกการสร้างความเค้นอัดลงบนผิวโลหะ

2.5 การออกแบบการทดลอง (DOE) [16]

2.5.1 กลยุทธ์ในการทดลอง (Strategy of Experiment)

การทดลองโดยทั่วไปมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ในการหาค่าหรือคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาที่มีอยู่ในกระบวนการเชิงวิศวกรรมหรือระบบที่พิจารณาใดๆ ทั้งนี้การทดลองอาจเป็นการทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือเป็นชุดของการทดสอบ เพื่อใช้ในการตรวจจับหรือบ่งชี้เหตุผลของการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรตามหรือหรือผลตอบสนอง (Output or Response) ที่ได้รับจากการกำหนดระดับ (Level) ของตัวแปรต้นหรือปัจจัยป้อนเข้า (Input Variables or Factors) ของกระบวนการ หรือระบบใดๆ ที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นการวางแผนและการดำเนินการทดลองรวมทั้งการวิเคราะห์ผลของข้อมูลที่ได้รับเพื่อทำการวิจัยสรุปผลในขั้นสุดท้ายจะเน้นหนักทางด้านการแก้ปัญหาของกระบวนการ หรือ ระบบทางวิศวกรรม ภายภาพ เคมี ในด้านทางวิศวกรรมการทดลองเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่รวมทั้งการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์หลักในงานด้านต่างๆยังคงเน้นหนักเพื่อพัฒนากระบวนการหรือระบบให้มีความทนทาน (Robust) กล่าวคือทำให้กระบวนการมีผลกระทบที่ต่ำที่สุดต่ออิทธิพลที่เกิดขึ้นมาจากปัจจัย รวมทั้งปัจจัยรบกวนหรือสิ่งรบกวน (Noise) จากภายนอกโดยทั่วไปการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อประโยชน์ทางด้านการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการทางวิศวกรรมหรือระบบต่างๆ ซึ่งแสดงด้วยกล่องความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องในการส่งผ่านสู่ผลตอบสนองหรือผลลัพธ์

ที่ต้องการในขั้นตอนท้ายที่สุดของกระบวนการเชิงวิศวกรรม (Transferred Box of Relevant Factors to Meet Required Response) ดังแสดงในภาพที่ 2.15 โดยกระบวนการเชิงวิศวกรรม หมายถึง องค์ประกอบรวมของเครื่องจักร วิธีการ บุคลากรด้านต่างๆ และทรัพยากรอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะทำการเปลี่ยนปัจจัยนำเข้า (Input) ให้เป็นปัจจัยออก (Output) ประสิทธิภาพของปัจจัยออกสามารถพิจารณาได้โดยการใช้ผลตอบแทนซึ่งอาจมีมากกว่าหนึ่ง



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องในการส่งผ่านสู่ผลตอบแทนที่ต้องการ

โดยตัวแปรนำเข้าของกระบวนการเชิงวิศวกรรมจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่าปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors : $X_1, X_2, \dots, X_k$) หรือปัจจัยที่สามารถออกแบบได้ (Design Variables or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้เรียกว่าปัจจัยที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or Noise Variables of Factors : $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$) อย่างไรก็ตามต้องสามารถควบคุมได้ควบคุมได้ในขณะดำเนินการทดลอง วัตถุประสงค์ต่างๆของการทดลองประกอบด้วย

- 1) ตรวจสอบว่าปัจจัยใด (Factor : X) มีอิทธิพลต่อผลตอบแทน (Response : Y)
- 2) มีวิธีการใดที่จะตั้งค่าปัจจัย (Factor : X) เพื่อให้ค่าผลตอบแทน (Response : Y) มีความใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ
- 3) มีวิธีการใดที่จะตั้งค่าปัจจัย (Factor : X) เพื่อให้ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นกับค่าผลตอบแทน (Response : Y) มีค่าต่ำ
- 4) มีวิธีการใดที่จะตั้งค่าปัจจัย (Factor : X) เพื่อทำให้ผลกระทบเนื่องจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factors : Z) มีค่าต่ำ

จากกล่องความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการส่งผ่านสู่ผลตอบสนองดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการทดลองต้องสัมพันธ์กับหลายๆ ปัจจัย ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของการทดลองของผู้ทำการทดลอง(Experimenter) จึงเป็นการพิจารณาปัจจัยเหล่านี้ว่ามีอิทธิพลต่อผลตอบสนองของระบบนั้นหรือไม่ วิธีการโดยทั่วๆ ไปในการวางแผนและดำเนินการทดลองเรียกว่ากลยุทธ์ในการทดลอง (Strategy of Experimentation)

2.5.2 การประยุกต์ใช้งานการออกแบบการทดลอง (Some Typical Applications of Experimental Design)

กลวิธีการออกแบบการทดลองได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามกลวิธีการทดลองดังกล่าวเป็นเพียงส่วนประกอบหนึ่งของกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และเป็นเพียงหนทางหนึ่งในหลายๆ ทางที่สามารถช่วยให้สามารถเรียนรู้ถึงการทำงานของกระบวนการหรือระบบใดๆ โดยทั่วๆ ไปสามารถเรียนรู้ผ่านกิจกรรมต่างๆ ของกระบวนการและการดำเนินการทดลอง เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลจากกระบวนการดังกล่าวและใช้ข้อมูลจากการทดลองเพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่เกิดขึ้นนั่นเอง การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่สำคัญในทางวิศวกรรม กล่าวคือเป็นตัวช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการ นอกนั้นยังสามารถประยุกต์ใช้ในงานพัฒนากระบวนการใหม่ๆ อีกทางหนึ่งด้วย ทั้งนี้การประยุกต์ใช้งานเทคนิคในการออกแบบการทดลอง สำหรับการพัฒนากระบวนการ (Process Development) ก่อให้เกิดผลดีในด้านต่างๆ อาทิเช่น

- 1) พัฒนาผลลัพธ์ของกระบวนการ
- 2) ลดความแปรปรวนของกระบวนการผลิตลง
- 3) ลดเวลาในการพัฒนากระบวนการจริง
- 4) ลดต้นทุนรวม

นอกจากนี้กลวิธีในการออกแบบการทดลองยังมีประโยชน์ในด้านการออกแบบเชิงวิศวกรรม (Engineering Design) กล่าวคือเป็นการคิดค้นหาผลิตภัณฑ์ใหม่ออกสู่ตลาด โดยมีเป้าหมายในการใช้งานการออกแบบการทดลอง เพื่อประโยชน์ด้านต่างๆ ดังนี้

- 1) การประเมินค่าและการเปรียบเทียบรูปร่างการออกแบบพื้นฐาน (Evaluation and Comparison of Basic Design Configuration)
- 2) การประเมินค่าทางเลือกของวัสดุ (Evaluation of Material Alteration)
- 3) การคัดเลือกช่วงที่ยอมรับได้ของพารามิเตอร์ในการออกแบบ (Selection of Design Parameter) เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความทนทาน (Robust)
- 4) การกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญของการออกแบบผลิตภัณฑ์ (Determination of Key Product Design Parameters)

2.5.3 หลักการพื้นฐาน (Basic Principles)

ในการทดลองเพื่อให้มีประสิทธิภาพ กลยุทธ์ทางด้านวิทยาศาสตร์จึงเข้ามามีบทบาทยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) ซึ่งเป็นกระบวนการของการวางแผนการทดลองเพื่อให้ข้อมูลที่สามารถรวบรวมได้สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงสถิติได้อย่างถูกต้องเหมาะสม อีกทั้งกลวิธีทางด้านสถิติในการออกแบบการทดลองยังมีส่วนช่วยให้การสรุปผลจากข้อมูลที่ได้รับมีความถูกต้องยิ่งขึ้นด้วย เนื่องจากกลวิธีทางด้านสถิติมีการพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมาใช้ในการวิเคราะห์ผล ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแนวคิดที่สำคัญในปัญหาด้านการทดลองจึงประกอบไปด้วย การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ โดยแนวคิดทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอย่างมาก เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้รับจากการออกแบบเอาไว้เบื้องต้นหลักการพื้นฐาน 3 ประการของการออกแบบการทดลองประกอบด้วย

- 1) จำนวนการทำซ้ำ (Replicate or Replication)
- 2) การทดลองสุ่ม (Randomization)
- 3) การจัดกลุ่ม (Blocking)

จำนวนการทำซ้ำ หมายถึง การทำซ้ำที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบเฉพาะ หรือวิธีปฏิบัติของการทดลองจำนวนการทำซ้ำในการทดลองมีความสำคัญสองประการคือ เป็นตัวช่วยให้ผู้ทำการทดลองสามารถหาค่าประมาณความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง (An Estimate of the Experimental Error) ได้ซึ่งค่าดังกล่าวนี้เป็นตัววัดความแตกต่างกันในทางสถิติหรือไม่ อีกประการหนึ่งจำนวนการทำซ้ำในการทดลองยังสามารถช่วยให้ผู้ทำการทดลองประมาณค่าผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ในการทดลองให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้นกล่าวคือ ถ้ากำหนดให้ σ^2 เป็นความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละข้อมูลการทดลอง และมีจำนวน n ครั้งในการทดลอง ดังนั้นในความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยตัวอย่าง (Variance of Sample Mean, σ_y^2) เท่ากับสมการที่ 2.4

$$\sigma_y^2 = \frac{\sigma^2}{n} \quad (2.4)$$

ดังนั้นถ้ากำหนดให้จำนวนการทำซ้ำของการทดลองมีค่าเท่ากับ 1 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการอนุมานผลแตกต่างของแต่ละวิธีปฏิบัติไม่สามารถสรุปได้อย่างแน่ชัดนอกจาก ค่าความแตกต่างที่ได้รับอาจเป็นผลสืบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้ อย่างไรก็ตามมีความแตกต่างที่เกิดขึ้นของจำนวนการทำซ้ำในการทดลองและการวัดซ้ำ (Repeated Measurement) หากการทดลองมีการวัดค่าระดับของผลตอบสนองซ้ำกันสามครั้ง การวัดซ้ำดังกล่าวมิใช่จำนวนการทำซ้ำในการทดลอง การทำซ้ำดังกล่าวเป็นตัวช่วยตรวจสอบความหลากหลายจากการวัดที่เกิดขึ้นหลายๆ ครั้งของเครื่องมือหรือระบบที่ใช้วัดแต่เพียงครั้งเดียว นอกจากนี้หากชิ้นงานจำนวนมากกว่าหนึ่งได้ถูก

กระทำด้วยลักษณะของการทดลองเหมือนๆ กันพร้อมกันเพียงครั้งเดียว การวัดผลจากชิ้นงานดังกล่าวทั้งหมดมิใช่จำนวนการทำซ้ำในการทดลองเช่นเดียวกัน แต่เป็นการวัดความแตกต่างของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานจากการทดลองชนิดเดียวกันเท่านั้น

การทดลองสุ่มเป็นหัวใจสำคัญของการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ การทดลองสุ่มหมายถึงการจัดสรรทรัพยากรที่จำเป็นด้วยลำดับของการทดลองอย่างสุ่ม วิธีทางสถิติมีความเกี่ยวข้องกับข้อมูลหรือค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นปัจจัยสุ่มที่มีความเป็นอิสระต่อกัน การทดลองสุ่มเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดความคลาดเคลื่อนอันเกิดขึ้นได้ในการวิเคราะห์ข้อมูล หากการวัดค่าระดับของผลตอบสนองด้วยระดับปัจจัยที่แตกต่างกัน อาจมีผลสืบเนื่องมาจากผู้ปฏิบัติการวัดระดับของผลตอบสนอง ดังนั้นถ้าปัจจัย ณ ระดับ 1 ถูกใช้ในการวัดค่าระดับผลตอบสนองก่อนปัจจัย ณ ระดับที่ 2 ค่าของความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ และสรุปผลอาจเกิดขึ้นได้จากเมื่อยาล้าของผู้ปฏิบัติการวัดอีกทางหนึ่งด้วย ดังนั้นการทดลองอย่างสุ่มเพื่อวัดค่าระดับของผลตอบสนองจึงมีความเหมาะสมกว่า เพื่อลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นดังกล่าว

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย เพื่อช่วยผู้ทำการทดลองในการคัดเลือกและสร้างการออกแบบการทดลอง โปรแกรมเหล่านี้ได้แสดงถึงลำดับในการทดลองอย่างสุ่มที่เกิดขึ้นกับวิธีปฏิบัติในการทดลองแบบต่างๆโดยมีการสุ่มทั้งวัตถุดิบ คนงาน เครื่องมือวัด และอื่นๆ อย่างไรก็ตามในบางสถานการณ์การทดลองสุ่มค่อนข้างยุ่งยาก อาทิเช่น กระบวนการทางเคมี ปัจจัยบางประเภทเช่น อุณหภูมิซึ่งมีความยุ่งยากในการปรับเปลี่ยนในแต่ละครั้ง วิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติชนิดอื่นๆ ที่เหมาะสมอาจถูกนำมาใช้เพื่อให้สอดคล้องกับข้อจำกัดดังกล่าว

การจัดกลุ่ม เป็นเทคนิคการออกแบบเพื่อทำการปรับปรุงความถูกต้องในการพิจารณาเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆที่สนใจ รวมทั้งถูกนำมาใช้เพื่อลดหรือขจัดความแปรปรวนอันเกิดขึ้นจากปัจจัยรบกวนอื่นๆ (Nuisance Factors) ที่มีอยู่ในระบบหรือกระบวนการผลิต แต่มีได้อยู่ในความสนใจของผู้ทำการทดลองในขณะนั้นๆ เช่น ในกระบวนการเคมี ซึ่งจำเป็นต้องใช้ชิ้นงานในการทดสอบจำนวนหนึ่ง อย่างไรก็ตามชิ้นงานเหล่านั้นมาจากสองรุ่นการผลิต (Batches) ที่มีผู้ผลิตที่แตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นระหว่างสองรุ่นการผลิตอาจส่งผลในการทดลองที่กำลังพิจารณาอยู่ อย่างไรก็ตามผู้ทำการทดลองมิได้สนใจพิจารณาเปรียบเทียบผู้ผลิตชิ้นงานที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้ผลิตที่แตกต่างกันจึงเป็นปัจจัยรบกวนแต่เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยทั่วไป การจัดกลุ่มเป็นเซตของเงื่อนไขการทดลองที่มีลักษณะเหมือนกัน ดังนั้นในกระบวนการข้างต้นแต่ละรุ่นของวัตถุดิบจะถูกจัดเป็นกลุ่ม หรือข้อจำกัดการทดลอง (Block) ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า ความแปรปรวนภายในแต่ละกลุ่มหรือรุ่น (Variability within Batch) มีอิทธิพลที่ต่ำกว่าความแปรปรวนระหว่างรุ่น (Variability between Batch) ดังนั้นผู้ทำการทดลองจึงสามารถออกแบบการทดลองเชิงสถิติได้โดยที่วิธีปฏิบัติ (Treatment) ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องจะถูกดำเนินภายในกลุ่มเดียว

2.5.4 ข้อเสนอแนะในการออกแบบการทดลอง (Guidelines for Designing Experiment)

การใช้กลวิธีทางด้านสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งจำเป็นทุกๆคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงปัญหาที่กำลังพิจารณาอย่างถ่องแท้ เพื่อให้ได้ข้อมูลต่างๆที่สามารถรวบรวมได้จากการทดลอง สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบการทดลองรวมทั้งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้คือ

1) การกำหนดปัญหาที่กำลังพิจารณา

โดยทั่วๆ ไปการกำหนดปัญหาที่สนใจเป็นสิ่งที่ค่อนข้างยากที่จะกระทำได้อย่างชัดเจน ดังนั้นการพัฒนาและรวบรวมแนวคิดจากทุกๆฝ่าย ไม่ว่าจะเป็นงานวิศวกร การประกันคุณภาพ การผลิต การตลาด การจัดการ ผู้ปฏิบัติการ กล่าวคือจะต้องทำงานเป็นกลุ่ม (Team Approach) เพื่อการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมที่สุด

2) การคัดเลือกปัจจัย (Factors, X) และระดับของปัจจัย (Levels)

การพิจารณาปัจจัยซึ่งคาดว่าจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการหรือระบบที่สนใจ จำเป็นที่จะต้องแยกให้เห็นความแตกต่าง(โดยภาพรวม)ของปัจจัยที่มีอยู่ว่าเป็นปัจจัยของการออกแบบ (Design Factors) หรือปัจจัยรบกวน (Nuisance Factors) อย่างไรก็ตามในบางครั้งอาจมีผู้จำแนกชนิดของปัจจัยออกเป็น 3 ประเภทคือ ปัจจัยการออกแบบ (ปัจจัยที่ถูกคิดสรรสำหรับการศึกษาในการทดลอง) นอกจากนี้ปัจจัยใดซึ่งอาจส่งอิทธิพลต่อผลตอบสนอง แต่ไม่ได้อยู่ในความสนใจในขณะนั้น มักจะถูกกำหนดให้เป็นปัจจัยคงที่ (Held-Constant Factors)และปัจจัยอีกชนิดหนึ่งคือ ปัจจัยที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ (Allowed - to - vary Factors) ซึ่งอาจพบได้ทั่วไปในขณะทำการศึกษา เช่น รุ่นของวัตถุดิบเดียวกันอาจมีความหลากหลาย แต่ไม่สามารถควบคุมได้ อย่างไรก็ตามปัจจัยต่างๆเหล่านี้สามารถถูกขจัดความแปรปรวนได้โดยการออกแบบการทดลองแบบสุ่มในรุ่มนั้นๆ (Randomized Block Design) เพื่อลดอิทธิพลดังกล่าว ดังนั้นในการทดลองต่างๆปัจจัยทั้งสองแบบสุดท้ายจะไม่ถูกพิจารณาให้ความสนใจมากนัก

อย่างไรก็ตามในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะการจำแนก 2 ประเภทตามดังกล่าวข้างต้น นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ระบบปัญหา ปัจจัยชนิดที่สองคือ ปัจจัยรบกวน (Nuisance Factors) ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์ข้อมูล และได้ถูกจำแนกออกเป็นประเภทย่อยต่างๆคือ ปัจจัยรบกวนที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Noise Factors) ปัจจัยรบกวนที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Noise Factors) ปัจจัยรบกวนที่ควบคุมได้จะถูกกำหนดโดยผู้ทำการทดลอง เช่น การกำหนดรุ่นของวัตถุดิบ วันที่แตกต่างในการดำเนินการทดลอง เป็นต้น อย่างไรก็ตามปัจจัยรบกวนที่ไม่สามารถควบคุมได้สามารถนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (Analysis of Covariance, ANCOVA) มาใช้ในการศึกษาผลกระทบอีกทางหนึ่งได้ ทั้งนี้ในการคัดสรรปัจจัยของการออกแบบข้อจำกัดอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นคือ การพิจารณาระดับของปัจจัยในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง

เพื่อให้กระบวนการหรือระบบสามารถควบคุมและวัดผลตอบสนองได้ ความรู้ด้านกระบวนการ (Process Knowledge) จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลอง ความรู้ด้านกระบวนการเป็นองค์ประกอบร่วมระหว่างประสบการณ์ในการทำงาน และความเข้าใจทางด้านทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน การพิจารณาตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ในอดีตต่อผลตอบสนองที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้จึงมีส่วนช่วยในการออกแบบระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้ดียิ่งขึ้น

3) การคัดเลือกผลตอบสนองที่ต้องการ (Response Variable, Y)

ในการคัดเลือกผลตอบสนอง ผู้ทำการทดลองควรตรวจสอบอย่างแน่ชัดว่า ปัจจัยตอบสนองดังกล่าว สามารถให้ข้อมูลที่ต้องการของการศึกษาในครั้งนี้ได้ โดยปกติผลตอบสนองที่ต้องการมักอยู่ในรูปแบบสองชนิดคือ ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) หรือความแปรปรวน (Variance) โดยทั่วไปมักพิจารณาการศึกษากรณีหนึ่งผลตอบสนอง นอกจากนี้ความสามารถในการวัดค่าผลตอบสนองเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ หากต้องการลดผลกระทบดังกล่าวสามารถกระทำได้โดยการใช้จำนวนการทำซ้ำในการทดลองที่เพิ่มขึ้น

4) การคัดเลือกวิธีการทดลอง (Replication, Randomization, Blocking)

ในการคัดสรรการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม นอกจากการกำหนดขนาดของการทดลองหรือจำนวนครั้งที่เหมาะสม การทดลองแบบสุ่ม และการพิจารณาถึงการจัดกลุ่มแล้ว เรายังต้องกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบที่สอดคล้องกัน ขนาดของความเปลี่ยนแปลง (Magnitude) อันจะเกิดขึ้นกับผลตอบสนองที่ได้รับจากการทดลองอีกทางหนึ่งด้วย

5) การดำเนินการทดลองและบันทึกข้อมูล

การดำเนินการทดลองควบคุมไปกับการตรวจจับกระบวนการ ให้ตรงตามแผนงานที่ได้วางไว้ล่วงหน้าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ความผิดพลาดในการดำเนินการทดลองจะส่งผลเสียต่อการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นในอนาคต

6) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิธีการทางด้านสถิติได้ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ผล และบทสรุปต่างๆ ถ้าการออกแบบมีความถูกต้อง การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับจะมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น อีกทั้งโปรแกรมสำเร็จรูปที่เกี่ยวข้องยังสามารถใช้ได้ทั้งการออกแบบการนำเสนอข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การตีความหมาย นอกจากนี้ยังสามารถสร้างความสัมพันธ์ของปัจจัยของการออกแบบและผลตอบสนอง (Empirical Model) เพื่อทำการทำนายการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยของการออกแบบได้อีกทางหนึ่งด้วย อย่างไรก็ตาม วิธีการทางสถิติเป็นเพียงข้อแนะนำที่มีความน่าเชื่อถือที่เกิดขึ้นจากข้อมูลจากการทดลองมิใช่ข้อสรุปที่ถูกต้องอย่างสมบูรณ์ของผลกระทบจากปัจจัยของการออกแบบกับผลตอบสนองที่กำลังพิจารณาศึกษาในขณะนั้น

7) การสรุปผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้ทำการทดลองต้องทำการสรุปผลที่สามารถปฏิบัติจริงได้ วิธีการนำเสนอในรูปแบบกราฟจึงเป็นสิ่งที่เหมาะสมในการอธิบายต่อผู้ปฏิบัติงานต่อไป นอกจากนี้จากการทดสอบเพื่อยืนยันผล (Followed-up Runs or Confirmation Testing) ควรจะถูกระทำเพื่อความถูกต้องยิ่งขึ้น

2.6 การออกแบบการทดลองวิธีทาгуชิ (Taguchi Method)

การออกแบบการทดลองแบบทาгуชิ พัฒนาโดย Dr.Genichi Taguchi วิศวกรชาวญี่ปุ่น ผู้รับผิดชอบพัฒนาระบบโทรศัพท์ของญี่ปุ่นต้องการลดต้นทุนและเวลาในการทดลอง ในปี ค.ศ.1980 เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อปรับปรุงเครื่องมือกระบวนการ และวัตถุดิบที่เกี่ยวข้องกับการผลิต โดยศึกษาการควบคุมตัวแปรหลักในกระบวนการ และหาสภาวะที่เหมาะสมของการทดลองหรือออกแบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด วิธีการทาгуชิออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial ร่วมกับ Orthogonal Array (OA) จากนั้นนำข้อมูลของตัวแปรที่ต้องการทดลอง (Design Variable) และตัวแปรรบกวน (Design Variable) และตัวแปรรบกวน (Noise Variable) มาจัดวางลงในการทดลอง เพื่อคำนวณหาค่าตอบสนองที่เหมาะสมในรูปแบบอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratio : S/N Ratio) จากนั้นจึงเลือกตัวแปรให้ตรงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด

วิธีการทาгуชิเป็นรูปแบบการทดลองอีกแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากมีข้อได้เปรียบคือ มีตารางสำเร็จรูปให้เลือกใช้ทำให้มีความง่ายในการวิเคราะห์ผลโดยไม่ต้องแจกแจงทางสถิติและตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน วิธีทาгуชิสามารถใช้จำนวนการทดลองที่น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับ One-factor-at-a-time และ full factorial combination ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบจำนวนการทดลองระหว่าง Full Factorial กับ Taguchi

ปัจจัย	ระดับ	Full Factorial	Taguchi Factorial
3	2	8	4
4	3	81	9
5	4	1024	16
6	5	15635	25
15	2	32768	16

นิยมใช้ในการวางแผนการทดลองของกระบวนการทางการเกษตร ทางชีวภาพและด้านอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ

2.6.1 แนวปฏิบัติของทฤษฎีทากูชิ

เจนอิชิ ทากูชิ ได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาแบบต่างๆ ซึ่งได้รวบรวมและอ้างถึงในมุมมองเฉพาะที่เรียกว่า ปัญหาการออกแบบพารามิเตอร์ที่คงทน (Robust Parameter Design Problem, RPD Problem) โดยวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1) การออกแบบ (ผลิตภัณฑ์ หรือกระบวนการ) ที่ไม่ตอบสนองต่อปัจจัยแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป แต่สามารถส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพของระบบ
- 2) การออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของระบบ
- 3) ออกแบบกระบวนการ เพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ตามเป้าหมายที่ต้องการได้มากที่สุด
- 4) การกำหนดเงื่อนไขในการปฏิบัติการสำหรับกระบวนการ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะที่มีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ตั้งไว้ และความผันแปรของสิ่งแวดล้อมมีผลกระทบต่อค่าเป้าหมายที่ต้องการน้อยที่สุด

ตารางที่ 2.4 การเลือกใช้ Standard Orthogonal Array

Orthogonal Array	จำนวนแถว	จำนวนปัจจัยสูงสุด	จำนวนสูงสุดของคอลัมน์ที่ 3 ระดับ			
			2	3	4	5
L4	4	3	3	-	-	-
L8	8	7	7	-	-	-
L9	9	4	-	4	-	-
L12	12	11	11	-	-	-
L16	16	15	15	-	-	-
L16	16	5	-	-	5	-
L18	18	8	1	7	-	-
L25	25	6	-	-	-	6
L27	27	13	-	13	-	-
L32	32	31	31	-	-	-
L32	32	10	1	-	9	-

ตารางที่ 2.4 การเลือกใช้ Standard Orthogonal Array (ต่อ)

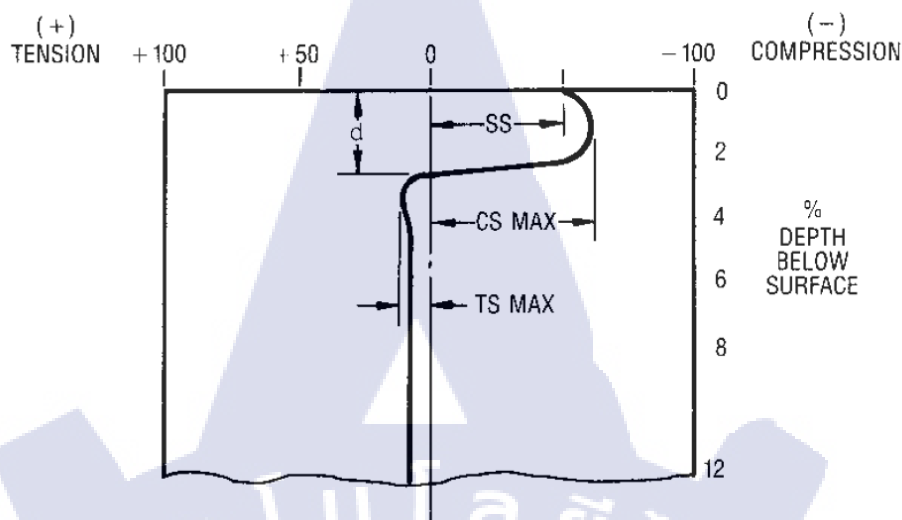
Orthogonal Array	จำนวนแถว	จำนวนปัจจัยสูงสุด	จำนวนสูงสุดของคอลัมน์ที่ 3 ระดับ			
			2	3	4	5
L36	36	23	11	12	-	-
L36	36	16	3	13	-	-
L50	50	12	1	-	-	11
L54	54	26	1	25	-	-
L64	64	63	63	-	-	-
L64	64	21	-	-	21	-
L81	81	40	-	40	-	-

2.7 ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) [9]

ความเค้นตกค้างคือความเค้นที่เหลืออยู่ที่ชิ้นงานหลังจากกระบวนการผลิตเสร็จสิ้น โดยไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ความเค้นเหล่านี้อาจเป็นได้ทั้งความเค้นดึงและความเค้นอัด ตัวอย่างเช่น รอยเชื่อมจะมีความเค้นแรงดึงตกค้างสูงในบริเวณที่ได้รับความร้อนสูงที่ติดกับรอยเชื่อม ในทางกลับกันพื้นผิวของส่วนประกอบเหนียวหนา อาจได้รับความเค้นแรงอัดตกค้าง ในการใช้งานส่วนใหญ่สำหรับกระบวนการยิงอนุภาคเชิงประโยชน์โดยตรงที่ได้รับคือความเค้นแรงอัดตกค้างที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน

รายละเอียดทั่วไปของความเค้นอัดตกค้างเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกลงจะแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งมีอยู่ 4 ลักษณะสำคัญดังนี้

- 1) SS ความเค้นอัดตกค้างที่ผิว, เป็นการวัดความเค้นที่ผิวของชิ้นงาน
- 2) Cs_{max} ความเค้นอัดตกค้างสูงสุด, ค่ามากที่สุดของความเค้นอัดที่ได้นั้น โดยปกติจะอยู่บริเวณด้านล่างลึกจากผิวของชิ้นงาน
- 2) d ความลึก,ความลึกของความเค้นอัดคือจุดที่ความเค้นอัดตรงข้ามกับแกนกลางและอีกฝั่งจะกลายเป็นความเค้นแรงดึง
- 4) Ts_{max} ความเค้นดึงสูงสุด, ความเค้นดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น การชดเชยความเค้นแรงดึงในแกนกลางของความสมดุลของชิ้นผิววัสดุของความเค้นอัดเพื่อให้ส่วนนั้นอยู่สภาวะสมดุล Ts_{max} ต้องไม่มีขนาดใหญ่พอที่จะสร้างความเสียหายจากภายในเร็วเกินไป

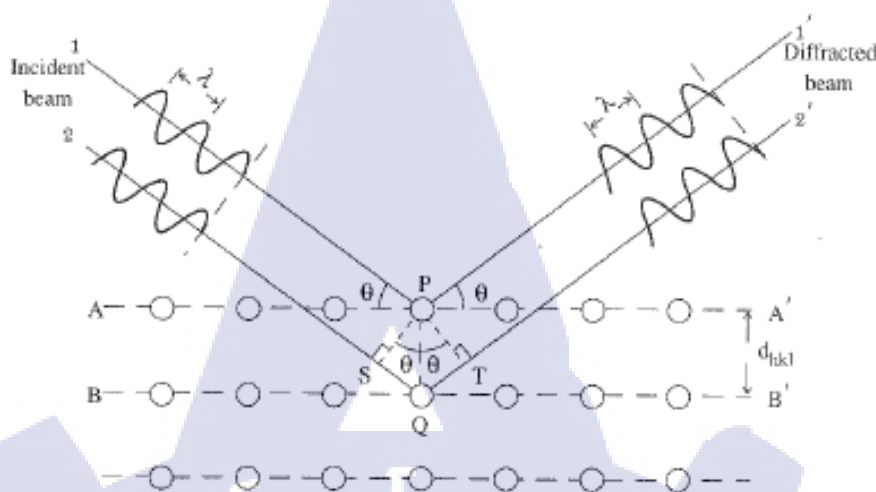


รูปที่ 2.16 รูปแบบของความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นโดยกระบวนการยิงอนุภาคแข็ง

2.8 การวัดความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค XRD [17]

การวัดความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค X-ray diffraction ตามมาตรฐาน SAE J784a โดยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยหลักการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ และมีตัวรับรังสีเลี้ยวเบน เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของผลึกของชิ้นงาน โดยการหาค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงาน

กฎของแบร็กก์คือการมองโครงสร้างผลึกว่าประกอบไปด้วยชั้น (Layer) หรือระนาบ (Plan) ของอะตอมที่สามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบได้โดยมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่ถูกสะท้อนออกมาจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มข้นสูง (เกิดการแทรกสอดแบบเสริมสร้าง) ก็ต่อเมื่อ ความแตกต่างระหว่างระยะเดินทาง (Path difference) ของคลื่นที่ถูกสะท้อนจากระนาบใดๆ กับระนาบที่อยู่ข้างเคียงกันมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบตามรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แบบจำลองสำหรับกฎของแบร็กก์ [18]

จากรูปที่ 2.17 จะเห็นเห็นว่าระยะทางที่คลื่นทั้งสองขบวนเดินทางไปตกกระทบบนระนาบ A และ B แล้วสะท้อนออกมา มีความแตกต่างระหว่างระยะเดินทางเท่ากับ SQ+QT โดยที่ระยะ SQ มีค่าเท่ากับระยะ QT และสามารถหาค่าระยะ SQ ได้จากความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติของสามเหลี่ยม PSQ ซึ่งได้ค่าระยะ SQ ออกมาเท่ากับ $d_{hkl}\sin\theta$ ดังนั้นความแตกต่างระหว่างระยะเดินทางของคลื่นทั้ง 2 ขบวนจึงมีค่าเท่ากับ $2d_{hkl}\sin\theta$ และจากแนวคิดของแบร็กก์ทำให้ได้สมการที่ใช้อธิบายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยโครงสร้างผลึกดังสมการที่ 2.5

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (2.5)$$

เมื่อ d_{hkl} = ค่าระยะห่างระหว่างระนาบอะตอมในผลึก (d-spacing)

λ = ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

θ = มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์บนชิ้นงาน

n = ค่าคงที่เลขจำนวนเต็มใดๆ ที่บอกลำดับการเลี้ยวเบนผ่านอะตอมในแต่ละระนาบของผลึก

2.8.1 องค์ประกอบพื้นฐานในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มี 3 องค์ประกอบ

1) สารที่นำมาทดสอบจะต้องมีความเป็นผลึก หรือสารชนิดนั้นจะต้องมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นโครงสร้างผลึกแบบใดแบบหนึ่งในรูปแบบตามแลตทิซบราวเ

2) การเกิดฟลักในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นั้น เกิดจากการแทรกสอดแบบเสริมสร้างของรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อนมาจากระนาบผลึก ($h k l$) ใดๆ ในโครงสร้างผลึกของวัสดุ

3) ฟลักหรือมุมที่เกิดการแทรกสอดแบบเสริมสร้างของรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อนมาก โครงสร้างผลึก ($h k l$) ใดๆ จะเป็นไปตามกฎของแบร็กก์เสมอ หมายความว่าหากเราทราบค่า d -spacing ของระนาบผลึก ($h k l$) ใดๆ จะสามารถทำนายตำแหน่งมุมของฟลักที่ปรากฏในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้จากกฎของแบร็กก์ ในทางกลับกันหากเราทราบค่าตำแหน่งมุมของฟลักที่ได้จากการทดสอบสสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะสามารถคำนวณหาค่า d -spacing ของระนาบผลึก ($h k l$) ใดๆ ในโครงสร้างผลึกได้เช่นกัน

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยโครงสร้างผลึกในวัสดุเกิดจากการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ในทุกทิศทางโดยอะตอมที่อยู่ในโครงสร้างผลึก แต่หากพิจารณาการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์จากอะตอมที่อยู่ในระนาบผลึกเดียวกันจะพบว่ามุมที่พบความเข้มของรังสีเอ็กซ์สูงสุดจะมีค่ามุมเท่ากับรังสีเอ็กซ์มาตกกระทบบนระนาบผลึกนั้น ดังนั้น ถ้าหากเปรียบเทียบระนาบผลึกเป็นเสมือนกระจกเรียงซ้อนกันอยู่ในโครงสร้างผลึก จะพบว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวจะมีความคล้ายคลึงกับการสะท้อนของแสงโดยกระจก แต่จะมีความแตกต่างกันอยู่อย่างน้อย 3 ประการคือ

- 1) การสะท้อนของแสงโดยกระจกจะเกิดที่ผิวบางๆของกระจกเท่านั้น แต่การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยโครงสร้างผลึกจะเกิดลึกลงไปเนื้อของวัสดุ
- 2) การสะท้อนของแสงจะพบความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมาได้สำหรับทุกมุมที่แสงตกลงมาตกกระทบบ แต่การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยโครงสร้างผลึกจะพบความเข้มของรังสีเอ็กซ์ได้เฉพาะบางมุมที่สอดคล้องกับกฎของแบร็กก์เท่านั้น (มุมที่เกิดการแทรกสอดแบบเสริมสร้าง)
- 3) ความเข้มของแสงที่สะท้อนจากกระจกจะมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มของแสงที่มาตกกระทบบแต่ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนจากโครงสร้างผลึกจะมีค่าน้อยกว่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบบค่อนข้างมาก

2.8.2 เทคนิค $\text{Sin}^2 \Psi$

ความเค้นอัดตกค้างที่มีขนาดสม่ำเสมอทั้งชิ้นงานและอยู่ในระนาบของชิ้นงาน หากมีแรงกระทำสูงพอทำให้เกรนของชิ้นงานถูกบีบ (ความเค้นอัด) หรือ ยืดออก (ความเค้นดึง) ในทิศขนานกับระนาบชิ้นงาน เมื่อเม็ดผลึกถูกบีบหรือยืดในทิศขนานกับระนาบชิ้นงาน ขนาดของเกรนในแนวตั้งฉากกับระนาบของชิ้นงานจะเปลี่ยนตาม เนื่องจากสมบัติความยืดหยุ่นหรือเกิดความเครียดในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของชิ้นงานจะเปลี่ยนตาม เนื่องจากสมบัติความยืดหยุ่น หรือเกิดความเครียดในทิศตั้งฉากกับระนาบชิ้นงาน สำหรับเกรนซึ่งหันระนาบ ($h k l$) ขนานกับระนาบของชิ้นงานค่า D -spacing ของระนาบ ($h k l$) เปลี่ยนไป การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ด้วยดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยใช้การกวาด

แบบ Θ - 2Θ ตามปกติ จะพบว่าพีคการเลี้ยวเบนจากระนาบมีการเลื่อนตำแหน่งไป เมื่อเทียบกับพีคเดียวกันที่ไม่มีความเค้นตกค้าง ถ้ามีความเค้นดึง พีคจะเลื่อนไปทางขวา กรณีความเค้นอัด พีคจะเลื่อนไปทางซ้าย (มุม 2Θ ลดลง) เนื่องจาก d_{hkl} เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่า d_{hkl} กับความเค้นสามารถหาขนาดความเค้นได้จากการเลื่อนขนาดของพีค (Peck Shift) ได้ เทคนิค $\sin^2 \Psi$ เป็นที่ได้รับความนิยมสำหรับการวัดความเค้นอัดตกค้างสม่ำเสมอในระนาบของชิ้นงาน รูปที่ 2.18 แสดงผังการทำงานของ XRD เนื่องจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่า D-spacing ของระนาบ (h k l) ของเกรนที่หันระนาบขนานกับระนาบของชิ้นงานเพิ่มขึ้นหรือลดลง และเกรนหันระนาบทำ Ψ กับระนาบของชิ้นงาน ก็จะได้ผลกระทบ (เกิดความเครียด) จากความเค้นอัดตกค้าง แต่ความเครียดที่เกิดขึ้นจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับระหว่างระนาบ (h k l) กับแนวความเค้น เมื่อทำการวัดมุม Ψ ต่างๆกับระนาบชิ้นงาน ก็สามารถคำนวณความเค้นตกค้างในระนาบได้ สมการที่ใช้วิเคราะห์ความเค้นตกค้างโดยวิธี $\sin^2 \Psi$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.6

$$d_{\Psi}^{hkl} = d_{\Psi=0}^{hkl} + \left(\frac{1 + \nu_c}{E_c} \right) d_0^{hkl} \sigma_i \sin^2 \Psi \quad (2.6)$$

เมื่อ d_0^{hkl} = เป็น D-spacing ของระนาบ (hkl) เมื่อไม่มีความเค้น

$d_{\Psi=0}^{hkl}$ = เป็น D-spacing ของระนาบ (hkl) ของเกรนที่หันระนาบขนาน

($\Psi = 0$) กับระนาบของชิ้นงานและอยู่ภายใต้ความเค้น σ_i

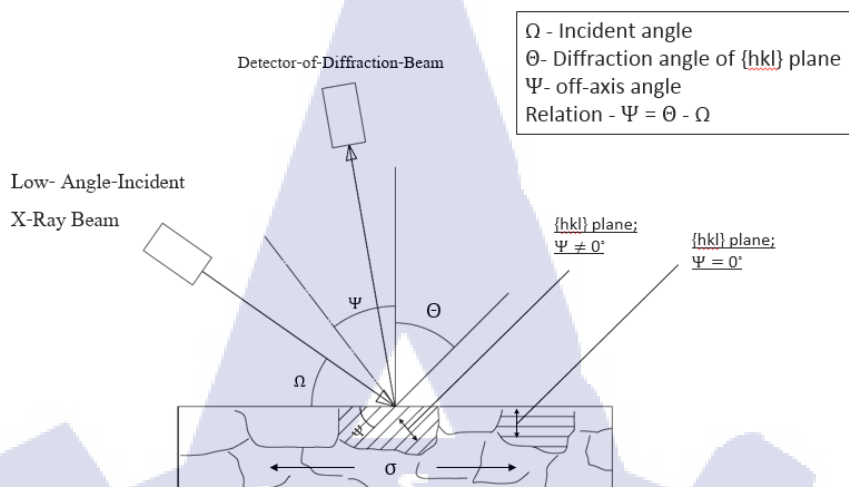
d_{Ψ}^{hkl} = เป็น D-spacing ของระนาบ (hkl) ของแกนที่หันระนาบทำมา Ψ

กับระนาบของชิ้นงานและอยู่ภายใต้ความเค้นตามในระนาบของ

ชิ้นงาน σ_i

E_c = ค่า Young Modulus ของชิ้นงาน

ν_c = ค่า Poisson ratio ของชิ้นงาน



รูปที่ 2.18 การตั้งค่าทางเลขคณิตของการวัดความเค้นอัดตักค้างของเทคนิค XRD [19]

2.9 คุณภาพของผิวงาน [20]

ถ้านำเอาผิวของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการปาดผิวแบบต่างๆ เช่น กลึง กัด ตัด ไส เจียรใน เจาะ ฯลฯ มาส่งดูด้วยแว่นขยาย จะพบว่าผิวของชิ้นงานขรุขระเป็นลูกคลื่น ชิ้นงานใดที่มีลูกคลื่นสูงก็แสดงว่าชิ้นงานนั้นมีความหยาบ ส่วนชิ้นงานที่มีลูกคลื่นต่ำแสดงว่าชิ้นงานนั้นเรียบ ความหยาบผิวมีผลต่อการใช้งานเป็นอย่างมากถ้าผิวชิ้นงานไม่ตรงกับสภาพตามความเป็นจริงจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นงานนั้นสั้นลง หรือชิ้นงานบางชิ้นที่ผลิตขึ้นมาผิวละเอียดแต่สภาพการใช้งานจริงไม่จำเป็นจะทำให้เสียเวลาในการทำงานโดยเปล่าประโยชน์

2.9.1 รูปแบบการวัดความหยาบผิวงาน

1) ค่าความหยาบ R_t ได้จากการวัดจากระยะห่างจุดสูงสุดที่สุดของผิวงานกับจุดที่ต่ำสุดของผิวงานมีหน่วยเป็นไมโครเมตร

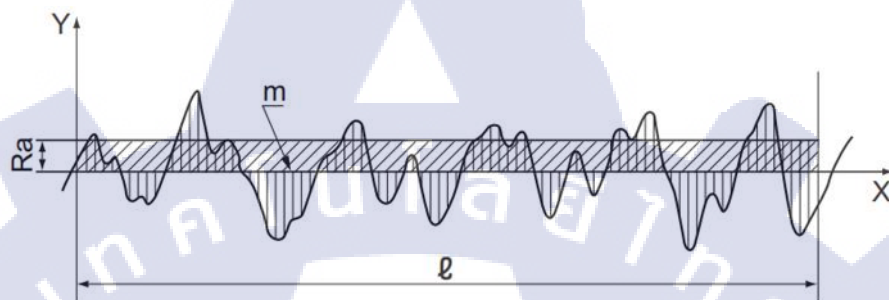


รูปที่ 2.19 การวัดความหยาบของพื้นผิวแบบจุดสูงสุดและต่ำสุด [20]

โดย H = จุดสูงสุด

T = จุดต่ำสุด

2) ค่าความหยาบผิว R_a ได้จากการรวมยอดแหลมเหนือเส้นกึ่งกลางกับพื้นที่หลุมใต้เส้นกึ่งกลางแล้วหารด้วยความยาว l ค่าของ R_a มีหน่วยเป็นไมโครเมตร



รูปที่ 2.20 การวัดความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต [20]

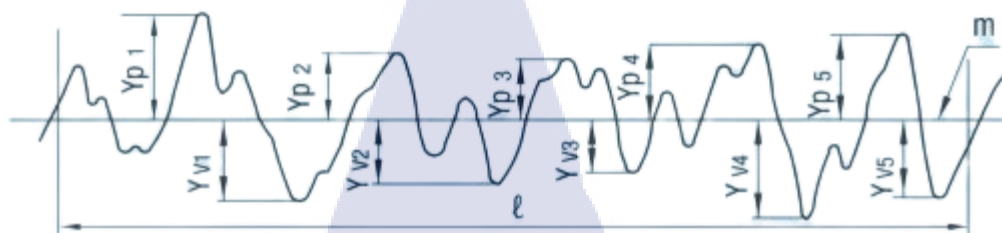
โดยการคำนวณ R_a นั้นใช้ผลรวมของพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลางและพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ยในการวัด ดังสมการที่ 2.8

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l \{f(x)\} dx \quad (2.7)$$

โดย $f(x)$ = ฟังก์ชันคลื่นความหยาบของพื้นผิว

l = ระยะการวัดผิวในแนวราบ

3) ค่าความหยาบ R_z ได้จากการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่าๆกัน 5 ช่วงซึ่งวัดบนผิวงานจริงแล้วนำค่าที่ได้มารวมกันแล้วหารด้วย 5 ค่าของ R_z จะมีหน่วยเป็นไมโครเมตร โดยการคำนวณ R_z นั้นดังสมการที่ 2.9



รูปที่ 2.21 การวัดความหยาบของพื้นผิวแบบเป็นช่วงเท่าๆกัน [20]

$$R_z = \frac{|Y_{p1} + Y_{p2} + Y_{p3} + Y_{p4} + Y_{p5}| + |Y_{v1} + Y_{v2} + Y_{v3} + Y_{v4} + Y_{v5}|}{5} \quad (2.8)$$

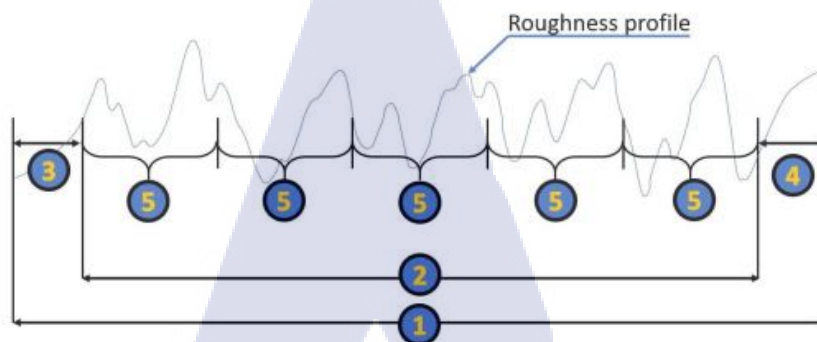
โดย Y_p = จุดสูงสุดของกราฟในช่วงสุ่มเลือก

Y_v = จุดต่ำสุดของกราฟในช่วงสุ่มเลือก

4) ค่าความหยาบผิวสูงสุด R_{max} หมายถึง ความลึกสูงสุดของร่องความหยาบที่มีอยู่ในระหว่างการทดสอบ

2.9.2 การวิเคราะห์หัตถ์ค่าความหยาบผิวที่ต้องคำนึงถึง [21]

- 1) ระยะความยาวทั้งหมดที่หัวโพรบลากบนผิววัตถุทดสอบ (Tracing length หรือ Travel length)
- 2) ระยะความยาวที่นำมาคำนวณหาค่าความหยาบผิว (Evaluation Length)
- 3) ระยะลากเพื่อก่อนการวัดค่าความหยาบผิว (Pre-operation Length) คือ ใช้เพื่อหลีกเลี่ยงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเข็มสัมผัสชิ้นงานครั้งแรก ซึ่งอาจจะเกิดค่าสูงสุดและต่ำสุดขึ้นได้ในจุดนี้ ความยาวตรงส่วนนี้ไม่ได้นำมาใช้ในการคำนวณ
- 4) ระยะลากเพื่อหลังการวัดค่าความหยาบผิว (Post-operation Length) คือ ใช้เพื่อหลีกเลี่ยงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเข็มหยุดการเคลื่อนทันที เมื่อถึงตำแหน่งที่ต้องการวัด ซึ่งอาจจะเกิดค่าสูงสุดและต่ำสุดขึ้นได้ในจุดนี้ ความยาวตรงส่วนนี้ไม่ได้นำมาใช้ในการคำนวณ
- 5) ระยะใช้ในการกรองค่าสูงสุดและต่ำสุดที่จะนำมาใช้คำนวณ (Sampling length หรือ ระยะ Cut-off) ระยะที่นิยมใช้กัน ได้แก่ 0.25 mm. 0.8 mm. และ 2.5 mm. เป็นต้น



รูปที่ 2.22 จุดคำนึงในการวัดความหยาบผิว [21]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Z. Gronostajski et al. [1] ได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบเทคโนโลยีการเคลือบผิวเพื่อเพิ่มความทนทานของแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อน โดยเปรียบเทียบทั้งหมด 4 ตัวเลือก คือไนไตรดิง (Nitriding) การเคลือบผิว PVD แบบหลายชั้นซึ่งเคมีแตกต่างกันอีกสามแบบคือ Cr/CrN coating, Cr/CrN/AlTiCrN coating, CrN/AlCrN/AlCrTiSiN coating. ซึ่งขั้นตอนการทดลองจะทดสอบกับแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปลำดับที่ 2 (Upset Die) ชิ้นงานเป็นแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปเฟือง โดยแบ่งแม่พิมพ์เป็น 4 ส่วนเท่าๆกัน ทดสอบที่อุณหภูมิ 1150-1180°C วิธีการวิเคราะห์คือ 1. ใช้กล้องไมโครสโคป (Microscope) ดูรอยการสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังจากทำการทุบไป 3000 ครั้ง แล้วเอาผลมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ โดยพื้นที่การตรวจสอบจะแบ่งเป็น 2 พื้นที่สำคัญ และวิธีที่ 2 คือใช้เครื่องเลเซอร์สแกน (Laser Scan) เพื่อดูพื้นผิวหลังทำการทุบไป 1000 ครั้ง 2000 ครั้ง 3000 ครั้ง ตามลำดับ จากการตรวจสอบจะพบว่าทั้งสองพื้นที่จะมีการสึกหรอที่ต่างกัน คือในส่วนพื้นที่ที่เป็นมุม (Corner) จะพบรูปแบบการสึกหรอแบบรอยขีดข่วน (Abrasive Wear) และพื้นที่แนวระนาบจะพบรูปแบบการสึกหรอแบบรอยหย่นและรอยแตกแบบการล้าตัวจากความร้อน (Thermal Fatigue) และการล้าตัวทางกล (Mechanical Fatigue) จากการทดสอบพบว่า 1. Cr/CrN coating จะมีประสิทธิภาพในการต้านทานการสึกหรอของแม่พิมพ์ตรงพื้นที่เป็นขอบมุม (Corner) ซึ่งสามารถป้องกันไม่ให้เกิดรอยแตก (Crack) ขยายได้และ 2. Cr/CrN/AlTiCrN coating มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความทนทานของแม่พิมพ์เพราะมีคุณสมบัติเป็นชั้นกันความร้อนจากชิ้นงาน และสามารถต้านทานการขีดข่วนตรงพื้นที่เป็นขอบมุม (Corner) ได้ดีเหมือนกัน 3. การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นผิวเคลือบจากการทดสอบหากใช้ไม่เหมาะสมจะพบว่าการสึกหรอจะเพิ่มอย่างรวดเร็ว

ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการทำ ซอท ฟินนึ่ง ที่มีผลต่อวัสดุแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อนเกรด JIS-SKD61 โดยทำการทดสอบจากชิ้นงานเหล็กกล้า

เครื่องมือร้อนเกรด JIS-SKD61 ทรงกลม 15 ชนิด แบ่งเป็น 3 ชนิดที่มีการเตรียมสภาพผิวแตกต่างกัน แบ่งชนิดละ 5 ชิ้น 1. ชิ้นทดสอบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) 2. ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิว โดยการชุบแข็งด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Hardening) 3. ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิวโดยการชุบแข็งด้วยกรรมวิธีทางความร้อนแล้วไปไนไตรดิง (Hardening + Nitriding) โดยชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 ชนิดจะถูกวัดค่าความหยาบ ความแข็ง และความเค้นตกค้าง ทั้งก่อนและหลังทำการ ชอท ฟินนิง และสุดท้ายจะทดสอบความล้าด้วยเครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนดัด หลังจากการทดสอบจะพบว่าค่าความแข็ง (Hardness) ความหยาบ (Roughness) ค่าความเค้นตกค้าง (Residual Stress) เพิ่มขึ้น หลังจากเมื่อชิ้นงานผ่านกรรมวิธี ชอท ฟินนิง โดยค่าความเค้นตกค้างที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดคือ ชิ้นงานทดสอบชนิดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิว โดยการชุบแข็งด้วยกรรมวิธีทางความร้อนบวกกับไนไตรดิง และ ชอท ฟินนิง (Hardening + Nitriding + Shot Peening) มีค่าความเค้นตกค้างถึง -1222.5 MPa เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรรมวิธีทางความร้อน จะมีความเค้นตกค้างเนื่องจากอุณหภูมิที่ทำให้โลหะเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง จึงทำให้ชิ้นงานชนิดข้างต้นมีความเค้นตกค้างที่สูงกว่าชิ้นงานชนิดอื่น จากการทดสอบความล้าชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการ ชอท ฟินนิง จะมีความต้านทานต่อความล้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากงานที่ผ่านกระบวนการ ชอท ฟินนิง จะค่าความเค้นตกค้างที่จะช่วยยับยั้งการเกิดรอยแตก (Crack Initiative) ที่ผิวชิ้นงานจึงทำให้สามารถยืดอายุความเสียหายของชิ้นงานผ่านไปได้

Y. Omiya et al. [23] ได้ทำการศึกษาการตรวจจစ်อิทธิพลของคุณสมบัติพื้นผิวที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิว ไฟน์ ชอท ฟินนิง ของ ลูกกลิ้งทรงกระบอก โดยวิธีการศึกษาคือ ใช้ลูกกลิ้งทรงกระบอก (Cylinder Roller) ขนาด 40 มิลลิเมตร (เกรด JIS-SUJ2) 2 ประเภทคือ ลูกกลิ้งทรงกระบอก (Cylinder Roller) ที่ผ่านกระบวนการ ไฟน์ ชอท ฟินนิง กับลูกกลิ้งทรงกระบอกที่ไม่ผ่านกระบวนการ ไฟน์ ชอท ฟินนิง (Fine Shot Peening) เพื่อเปรียบเทียบ 2 คุณสมบัติผิวทั้งสองประเภทโดยวิธีการให้ลูกกลิ้งทรงกระบอก (Cylinder Roller) วิ่งสัมผัสกันเพื่อครูดกัน (Scuffing Test) โดยแยกต้นกำลังเป็นสองข้างเป็นมอเตอร์ความเร็วสูง (Faster motor) กับมอเตอร์แบบช้า (Slower motor) ใช้สารหล่อลื่นความหนืด 40 องศา และปริมาณ 300 มิลลิกรัม/นาที สำหรับการเพิ่มแรงรับภาระ (Load) ในการทดสอบการครูด (Scuffing Test) เป็นการเลื่อนครั้งละ 1.75 เมตร/นาที. เฉพาะฝั่งที่มีความเร็วสูง (Faster Roller) จากการทดสอบลูกกลิ้งทรงกระบอก (Cylinder Roller) ที่ผ่านกระบวนการ ไฟน์ ชอท ฟินนิง จะมีการต้านทานการครูด (Scuffing) ที่ดีกว่าลูกกลิ้งทรงกระบอก (Cylinder Roller) ที่ไม่ผ่านกระบวนการ ไฟน์ ชอท ฟินนิง (Fine Shot Peening)

Z. Jia et al. [24] ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อน (Forging Die) ที่ผ่านกระบวนการ ชอท ฟินนิง (Shot peening) โดยทำการทดลองกับแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปเพลาล้อเหยียง (Clanks Shaft) จำนวน 5 แม่พิมพ์ วัสดุแม่พิมพ์เป็นเกรดวัสดุเครื่องมืองานร้อนเกรด JIS-

SKD61 โดยแม่พิมพ์ 3 ใน 5 เป็นแม่พิมพ์ที่ผ่านกระบวนการ ชอท ฟินนิ่ง และที่เหลือเป็นแม่พิมพ์แบบดั้งเดิม(Original Die) โดยกระบวนการ ชอท ฟินนิ่ง (Shot Peening) ได้ทำการควบคุมเงื่อนไขดังนี้ ขนาดเม็ดโลหะ (Media) 0.4-0.6 มิลลิเมตร ความเร็วในการกระแทกที่ 50-75 มิลลิเมตร และคลอบคลุมพื้นที่ 100-150% แล้วทำการทุบขึ้นรูปในกระบวนการผลิตเพลาค้อเหวี่ยงจริง ๆ จากการทดสอบแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการ ชอท ฟินนิ่ง (Shot Peening) มีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นโดยประมาณที่ 9000 ขึ้นมากกว่าแม่พิมพ์แบบดั้งเดิม (Original Die) ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการ ชอท ฟินนิ่ง (Shot Peening) มีอายุการใช้งานที่ 8000 ขึ้น ซึ่งแม่พิมพ์ที่ผ่านกระบวนการ ชอท ฟินนิ่ง จะมีความแข็งแรงต่อการล้าเพิ่มขึ้นและรอยบวมที่ผ่านกระบวนการยิงกระแทกจากเม็ดโลหะจากเพิ่มความสามารถในการเก็บนั้นหล่อลื่นซึ่งจะมีหน้าที่ต้านทานการขีดข่วนในกระบวนการทุบขึ้นรูปได้ดีอีกด้วยเป็นที่น่าสนใจให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์มีอายุการใช้งานที่มากกว่า

T. Morita et al. [25] และคณะได้ทำการศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติของผิวและความแข็งแรงต่อการล้าของชิ้นงานประเภทไทเทเนียมเกรด Ti6Al4V alloy ที่ผ่านกระบวนการ ชอท ฟินนิ่ง ด้วยเม็ดโลหะแบบละเอียด (Fine particle bombarding) เปรียบเทียบกับชิ้นงานไทเทเนียมที่ผ่านกระบวนการ ชอท ฟินนิ่ง แบบดั้งเดิม โดยเป็นการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง ขนาดของเกรน ความเค้นตกค้าง ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทั้งสองแบบข้างต้น โดยการทดสอบจะแบ่งเป็นชิ้นงานทดสอบ 3 รูปแบบแบ่งตามเงื่อนไขการทดสอบ a) $\phi 15 \times 10$ b) $\phi 10.5 \times 90$ c) $\phi 14 \times 140$ ตัวแปรต้นในการกระบวนการจะแบ่ง 2 ตัวแปรเป็น 1. ขนาดของเม็ดโลหะ (High speed steel) ที่ใช้ในกระบวนการ ชอท ฟินนิ่ง 2. ความแรงของแรงดันลมในกระบวนการ ตัวแปรควบคุมคือ 1. ขนาดของหัวยิง 2. ระยะห่างจากหัวยิงกับชิ้นงานทดสอบ 3. ระยะเวลาในการยิง 1. จากการทดลองทั้งสองแบบชิ้นโครงสร้างผลึกผิวมีความเหมือนกัน ขนาดของเกรนมีขนาดเล็กลงเมื่อใช้เม็ดโลหะที่ขนาดเล็กกว่าและเพิ่มแรงดันในการยิง ความแข็งของผิวมีความสัมพันธ์กับขนาดของเกรน ความเค้นตกค้างเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ขนาดเม็ดโลหะที่เล็กและเพิ่มความแรงของแรงดันในการยิง 2. การลดขนาดของเม็ดโลหะสามารถลดความหยาบของผิวชิ้นงานและความหนาของโครงสร้างชั้นผิวและชั้นความแข็งด้วย 3. กระบวนการ FPB เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพที่สามารถเปลี่ยนรูปถาวรบนชั้นผิว 4. กระบวนการ FPB และ SP จะไม่กระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน 5. ความแข็งต่อการล้าดีขึ้นอย่างมากเมื่อใช้วิธี FPB และ SP เพราะสามารถยับยั้งการเกิดรอยแตกของผิวชิ้นงาน จากการศึกษาการใช้ เม็ดโลหะขนาดเล็กละเอียดและแรงดันในการยิงที่สูงจะให้ประสิทธิภาพถึง 52%

บทที่ 3

วิธีการดำเนินวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการ ไฟน์ ชอต ฟินนิง (Fine Shot Peening) ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อน (Hot Forging Die) เกรดงานร้อน (JIS-SKD61) โดยการศึกษาปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อความเค้นอัดตกค้าง (Surface Compressive Residual Stress) ที่ผิวกับความหยาบผิว (Surface Roughness) กับวัสดุแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อน (JIS-SKD61) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (DOE) ร่วมกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey Relational Analysis) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการไฟน์ ชอต ฟินนิง โดยทำการทดลองกับชิ้นงานทดสอบที่ถูกออกแบบขึ้น เพื่อศึกษาข้อมูลอย่างละเอียดเพื่อความเข้าใจในกระบวนการอย่างถ่องแท้ รวมถึงการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฟน์ ชอต ฟินนิง เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยและเพื่อให้การทดลองสำเร็จลุล่วงและไปตามวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดวิธีดำเนินวิจัยตามขั้นตอนปฏิบัติดังต่อไปนี้

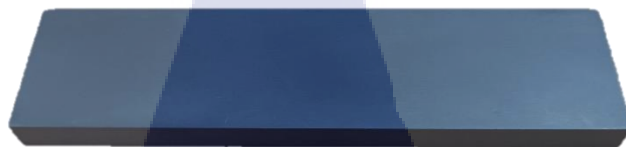
3.2 วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.2.1 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางหรือเรียกกันว่าเหล็กกล้าเครื่องมือเกรดงานร้อนเหล็กนี้นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมขึ้นรูปร้อน SKD61 ของมาตรฐาน JIS ของญี่ปุ่นและ H13 ของมาตรฐาน ANSI ของอเมริกา มีส่วนประกอบทางเคมีตามตารางที่ 3.1 เหล็กชนิดนี้ใช้ในสภาพร้อนสามารถทนต่อแรงดึง ทนต่อการเสียดสี มีความเหนียวและทนต่อการเกิดลายแตกบนพื้นผิวแม่พิมพ์รักษาความแข็งแรงได้ดีขณะร้อนไม่เกิน 425 องศาเซลเซียส การเสีรูปน้อยมากถ้าอุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 425 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงคงที่ การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการทดลองจะสำหรับชิ้นงานทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน JIS-SKD61

คาร์บอน (C%)	ซิลิกอน (Si%)	แมงกานีส (Mn%)	โครเมียม (Cr%)	โมลิบดีมัม (Mo%)	วานาเดียม (V%)
0.40	1.00	0.40	5.00	1.30	1.00



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานทดสอบ

3.2.2 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

โปรแกรม Minitab โปรแกรมสำเร็จรูปหรือเครื่องมือสำหรับคำนวณข้อมูลทางสถิติและพล็อตกราฟแสดงผลการวิเคราะห์

3.2.3 เครื่องยิงเม็ดโลหะแบบแรงดันลม (Shot Peening Machine)

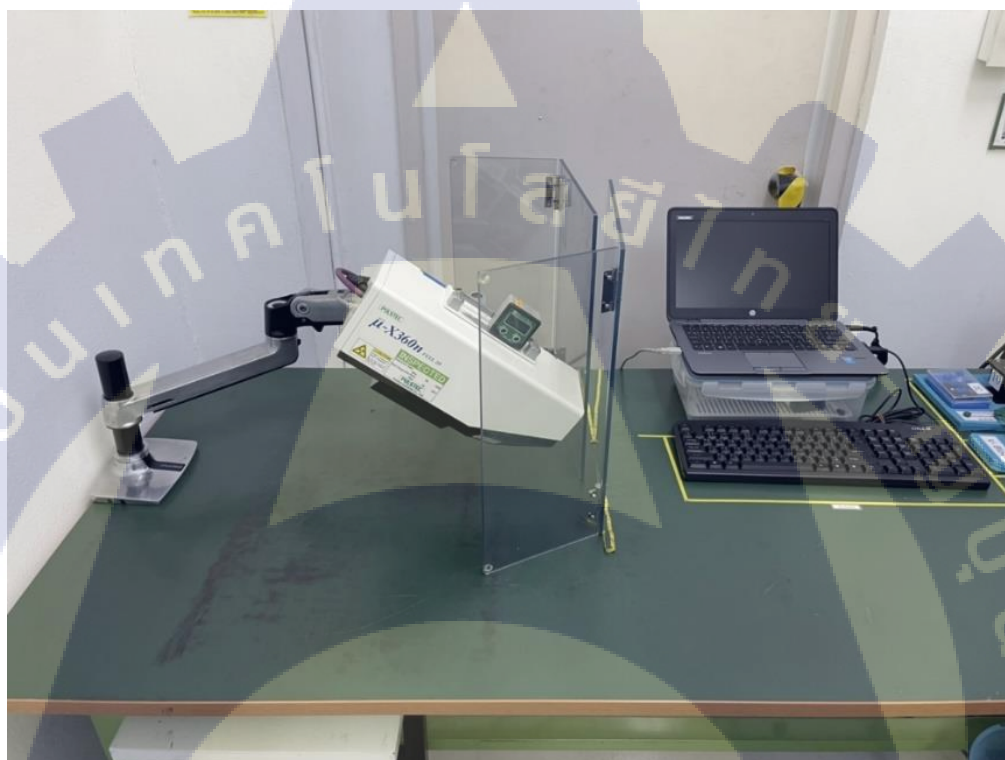
เป็นเครื่องยิงเม็ดโลหะแบบแรงดันลม ซึ่งจะทำงานโดยใช้ระบบแรงดันลมอัดผสมเข้ากับเม็ดโลหะเพื่อยิงไปยังชิ้นงานเป้าหมายเพื่อให้ได้ตามเงื่อนไขที่ต้องการ



รูปที่ 3.2 เครื่องยิงเม็ดโลหะแบบแรงดันลม (Shot Peening Machine)

3.2.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffract Meter)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ยี่ห้อ PULSTEC รุ่น μ -360n full2D เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray Diffract meter) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์แบบไม่ทำลายเพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกการจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและกระเจิงของรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดค่าความเค้นตกค้าง

3.2.5 วัดความหยาบผิว (Surface Roughness Test)

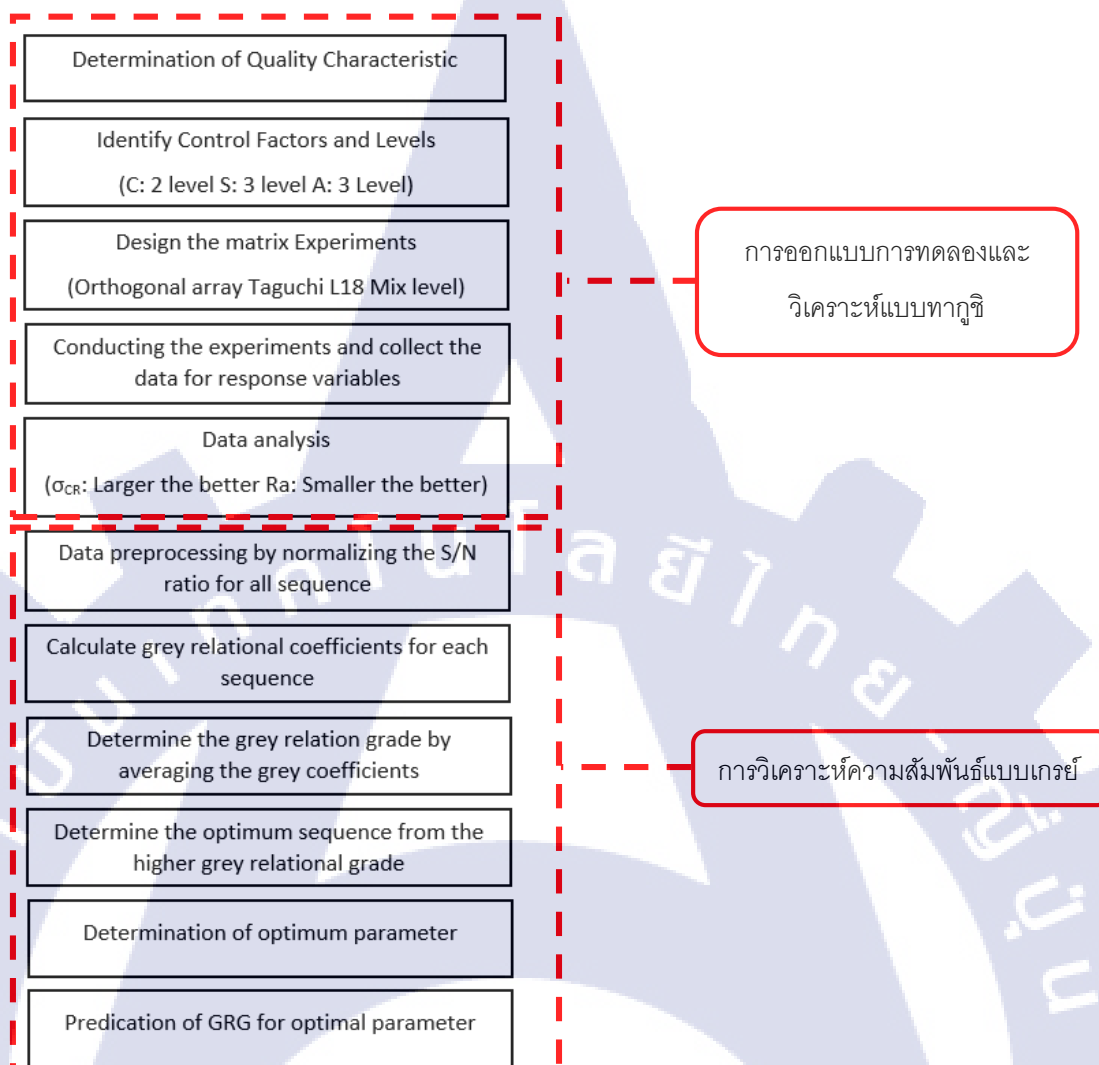
เครื่องวัดความหยาบผิวแบบพกพา ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น Surface Roughness tester portable type SJ-210 series 178.



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความหยาบผิว

3.3 วิธีการออกแบบการทดลองแบบ (DOE)

ในการวิจัยเพื่อให้มีประสิทธิภาพ กลยุทธ์ทางด้านวิทยาศาสตร์จึงเข้ามามีบทบาทยิ่ง โดยเฉพาะการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) ซึ่งเป็นกระบวนการของการวางแผนการทดลองเพื่อให้ข้อมูลที่สามารถรวบรวมได้สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงสถิติได้อย่างถูกต้องเหมาะสม อีกทั้งกลวิธีทางด้านสถิติในการออกแบบการทดลองยังมีส่วนช่วยให้การสรุปผลจากข้อมูลที่ได้รับมีความถูกต้องยิ่งขึ้นด้วย งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อหาศึกษาและหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการโพน์ ซอท ฟินนิง จึงได้นำหลักการวิธีการมาบูรณาการกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ เพื่อศึกษาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการ โดยวิธีการดำเนินการทดลองมีลำดับขั้นตอนดังรูปที่ 3.5 ได้ดังนี้



รูปที่ 3.5 ลำดับขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

จากรูปที่ 3.5 มีขั้นตอนการออกแบบการทดลอง ดังแสดงหัวข้อดังต่อไปนี้

3.3.1 การกำหนดปัญหาที่กำลังพิจารณา

การกำหนดปัญหาที่น่าสนใจ โดยการศึกษาครั้งนี้ได้บ่งชี้ไปที่ปัญหาของอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ชุบชั้นรูปร้อนวัสดุเกรด JIS-SKD61 ซึ่งพบปัญหาการสึกหรอ (Tool ware) อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ (Tool life) ซึ่งจะต้องปรับปรุงโดยใช้กระบวนการปรับสภาพผิวของแม่พิมพ์ด้วยวิธีการพ่นพลาสมา เพื่อเพิ่มความเค้นตกค้าง (Compressive Residual Stress) ของชิ้นงานทดสอบซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ชุบชั้นรูปร้อน ประกอบทั้งปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบคือความหยาบผิวชิ้นงานทดสอบ (Roughness) ในการคัดเลือกผลตอบสนอง ผู้ทำการวิจัยจะศึกษา

วิเคราะห์ตรวจสอบอย่างแน่ชัดว่า ปัจจัยตอบสนองดังกล่าว มีอิทธิพลที่ต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์ของวัสดุเครื่องมือเกรตงานร้อน JIS-SKD61

3.3.2 การกำหนดปัจจัยนำเข้าและระดับในการทดลอง

สำหรับการวิจัยนี้ปัจจัยซึ่งคาดว่าจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการยิงอนุภาคแข็งหรือระบบที่สนใจ จำเป็นที่จะต้องแยกให้เห็นความแตกต่างโดยภาพรวมของปัจจัยที่มีอยู่ว่าเป็นปัจจัยของการออกแบบ(Design Factors) หรือปัจจัยรบกวน (Nuisance Factors) ในการคัดเลือกตัวแปรหรือปัจจัยจำเป็นต้องคัดกรองจากกระบวนการจริง เพื่อให้ได้ปัจจัยออกแบบที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลต่อผลตอบแทนที่ต้องการ รวมทั้งกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลอง ซึ่งระดับของแต่ละปัจจัยต้องเหมาะสมหรือสอดคล้องกับสมรรถนะของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่มีจึงจำเป็นต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่าระดับที่กำหนดไว้เหมาะสมหรือเพียงพอหรือไม่ซึ่งเป็นปัจจัยและระดับในการทดลองแสดงดังในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ศึกษา

Process parameter	Unit	Level of Process parameter		
		1 (Low)	2 (medium)	3(high)
Coverage	%	100	200	-
Shot Diameter	mm.	0.05	0.10	0.30
Air Pressure	MPa	0.2	0.4	0.6

3.3.3 การออกแบบตารางการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองในรูปแบบของวิธีทากูซิจะเป็นการทดลองในรูปแบบการสร้างแผนการทดลองแบบเมตริกซ์หรือมักเรียกว่าตารางออร์ทอกอนอลอะเรย์ (Orthogonal array) ซึ่งเป็นรูปแบบการทดลองที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อการทดลองสมบูรณ์และเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ เพื่อลดเวลาและความสิ้นเปลืองทรัพยากรจากการทดลองจำนวนมาก สำหรับการทดลองครั้งนี้จะใช้เป็น L18 (Mix Level Design) ซึ่งเหมาะสำหรับการออกแบบการทดลองที่มีระดับของแต่ละปัจจัยไม่เท่ากัน ซึ่งสำหรับการทดลองนี้ปัจจัยการคลุ่มผิวที่ 2 ระดับ และอีก 2 ปัจจัยที่ 3 ระดับ คือขนาดเม็ดโลหะและแรงดันลมสำหรับตารางการทดลองแบบวิธีทากูซิจิ L18 แสดงดังในตารางที่ 3.3

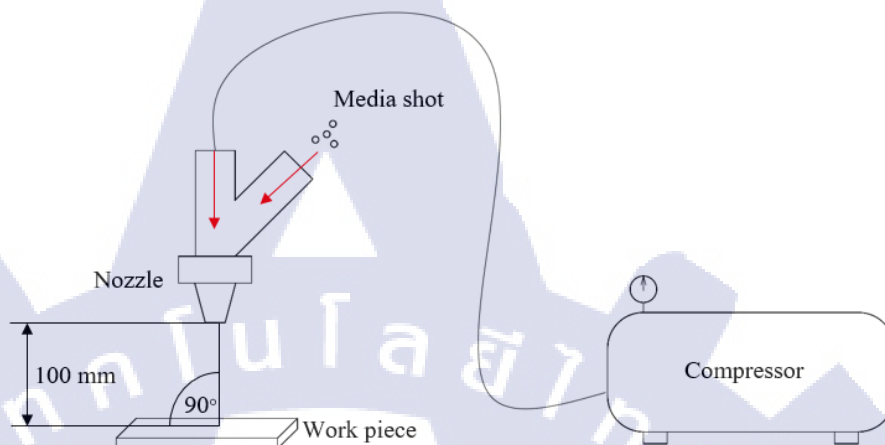
ตารางที่ 3.3 ตารางการทดลองแบบวิธีการทางสถิติ L18 Mix level Design

Run	ระดับปัจจัย			ค่าตอบสนอง	
	Coverage (%.)	Shot Diameter (mm.)	Air Pressure (MPa.)	Residual Stress (MPa)	Surface Roughness (Ra[μ m])
1	1	1	1	Larger the better	Smaller the better
2	1	1	2	Larger the better	Smaller the better
3	1	1	3	Larger the better	Smaller the better
4	1	2	1	Larger the better	Smaller the better
5	1	2	2	Larger the better	Smaller the better
6	1	2	3	Larger the better	Smaller the better
7	1	3	1	Larger the better	Smaller the better
8	1	3	2	Larger the better	Smaller the better
9	1	3	3	Larger the better	Smaller the better
10	2	1	1	Larger the better	Smaller the better
11	2	1	2	Larger the better	Smaller the better
12	2	1	3	Larger the better	Smaller the better
13	2	2	1	Larger the better	Smaller the better
14	2	2	2	Larger the better	Smaller the better
15	2	2	3	Larger the better	Smaller the better
16	2	3	1	Larger the better	Smaller the better
17	2	3	2	Larger the better	Smaller the better
18	2	3	3	Larger the better	Smaller the better

3.3.4 การทดลองและเก็บข้อมูล

สำหรับการทดลองนั้นชิ้นงานทดสอบวัสดุแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนเกรด JIS-SKD61 ขนาด 76.2 x 18.95 x 5 มิลลิเมตรจะทำการติดตั้งกับแท่นจับยึดชิ้นงานของเครื่องึงเม็ดโลหะชนิดแรงดันลมดังรูปที่ 3.6 โดยขั้นตอนการทดลองจะใช้เงื่อนไขในการควบคุมพารามิเตอร์ดังในแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้คือทั้งหมด 18 เงื่อนไขและจะทดลองซ้ำที่ 2 ครั้งรวมเป็น 36 การ

ทดลองและเพื่อป้องกันความผิดพลาดในทดลองและเก็บข้อมูลจึงได้ออกแบบใบควบคุมเงื่อนไขในการทดลองของแต่ละการทดลองไว้ดังตัวอย่างดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 รูปแบบกระบวนการยิงอนุภาคแข็ง

Run : 1	
Data : / /	
Coverage (%)	100
Shot size (mm)	0.05
Pressure (MPa)	0.4
Residual stress(MPa)	
Roughness(Ra[μm])	

รูปที่ 3.7 ตัวอย่างใบควบคุมเงื่อนไขสำหรับการทดลอง

3.4 การวิเคราะห์ผลวิธีทางสถิติ

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลรูปแบบวิธีทางสถิติ หลังจากการทดลองทำการเก็บข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab โดยจะพิจารณาค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (The signal-to noise ratio; S/N) โดยสำหรับผลตอบแทนของค่าความเค้นอัดตกค้างจะพิจารณาในรูปแบบค่ายิ่งยวด (The larger the-better) ดังในสมการที่ 3.1 และกรณีผลตอบแทนของค่า

ความหยาบผิวจะพิจารณาในรูปแบบค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (The smaller the-better) ดังในสมการที่ 3.2 สำหรับการพิจารณาตามหลักทฤษฎี เพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้จากค่าเฉลี่ยของแต่ละปัจจัยที่มีค่าสูงสุดของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N ration (Signal-to-noise ratio)

ผลตอบสนองในรูปแบบที่ยิ่งมีค่ามากยิ่งดี (The larger-The-better)

$$SN_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.1)$$

ผลตอบสนองในรูปแบบที่ยิ่งมีค่าน้อยยิ่งดี (The smaller-the-better)

$$SN_S = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.2)$$

โดย Y_i = ผลตอบสนองของลำดับการทดลองที่ i

n = จำนวนการทดลอง

3.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เป็นวิธีการหนึ่งในการหาปัจจัยที่เหมาะสมที่เหมาะสมสำหรับใช้แก้ปัญหาในกระบวนการที่มีผลตอบสนองหลายอย่าง (Multiple response optimization) วิธีการนี้ใช้เปรียบเทียบอิทธิพลของปัจจัยแต่ละตัวที่ระดับต่างๆ ที่มีผลต่อผลตอบสนองทั้งหมด ถ้าระดับของตัวแปรหนึ่งๆ ให้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงค่าอ้างอิงมากก็จะมีค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์มากและกระบวนการนั้นจะได้ผลตอบสนองที่ดีถ้าได้เลือกใช้ระดับของปัจจัยต่างๆ ที่มีค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์สูงสุดในขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การแปลงข้อมูลดิบ (Normalize feature extracted)

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์นั้นจะเริ่มต้นด้วยการแปลงผลตอบสนองที่อยู่ในรูปข้อมูลดิบให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

ผลตอบแทนในรูปแบบที่ยิ่งมีค่ามากยิ่งขึ้นดี (The larger-The-better)

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^{(0)}(k) - \min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)}{\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k) - \min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)} \quad (3.3)$$

ผลตอบแทนในรูปแบบที่ยิ่งมีค่าน้อยยิ่งดี (The smaller-the-better)

$$x_i^*(k) = \frac{\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k) - x_i^{(0)}(k)}{\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k) - \min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)} \quad (3.4)$$

เมื่อ $x_i^*(k)$ = ผลตอบแทนที่ได้จากการแปลงข้อมูลดิบที่ i^{th} ของการทดลอง k

$x_i^{(0)}(k)$ = ผลตอบแทนที่อยู่ในรูปของข้อมูลดิบที่ i^{th} ของการทดลอง k

$\min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)$ = ผลตอบแทนที่อยู่ในรูปข้อมูลดิบที่มีค่าน้อยที่สุดของการทดลอง k .

$\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k)$ = ผลตอบแทนที่อยู่ในรูปข้อมูลดิบที่มีค่ามากที่สุดของการทดลอง k

2. การหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey relational coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เป็นตัวแปรที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนที่ได้จากการทดลองกับผลตอบแทนอ้างอิงหรือผลตอบแทนในกรณีอุดมคติ โดยสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3.5

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \Psi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \Psi \Delta_{\max}} \quad (3.5)$$

เมื่อ $\xi_i(k)$ = ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบแทนที่ i^{th} ของการทดลอง k .

Ψ = ค่าสัมประสิทธิ์ความแตกต่าง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1

$\Delta_{\min}$ = ค่าเบี่ยงเบนต่ำสุด

$\Delta_{\max}$ = ค่าเบี่ยงเบนสูงสุด

โดยกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความแตกต่าง (Distinguishing Coefficient) เท่ากับ 0.5 หรือเป็นการให้ความสำคัญกับผลตอบแทนทั้งค่าความเค้นอัดตกค้างและค่าความหยาบผิวในระดับที่เท่าๆ กัน

โดย $\Delta_{\min}$, $\Delta_{\max}$ และ $\Delta_{0i}(k)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6 , 3.7 และ 3.8

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} |x_0^*(k) - x_j^*(k)| \quad (3.6)$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} |x_0^*(k) - x_j^*(k)| \quad (3.7)$$

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0^*(k) - x_i^*(k)| \quad (3.8)$$

โดย $\Delta_{0i}(k)$ = ค่าความเบี่ยงเบน

$x_0^*(k)$ = ลำดับที่อ้างอิง

$x_i^*(k)$ = ลำดับที่เปรียบเทียบกับลำดับ

3. การหาเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey Relational Grade, GRG)

การหาเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 3.9

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (3.9)$$

เมื่อ γ_i = เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบแทนที่ i^{th} ซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบแทนที่ i^{th} จำนวน n การทดลอง

4. การหาค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Average grade relational grade)

สำหรับการตัดสินใจเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมด้วยวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์นั้น จะทำการเลือกจากค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์สำหรับแต่ละระดับของปัจจัยในกระบวนการโดยจะเลือกปัจจัยจากระดับที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดของปัจจัยนั้นๆ

5. การพยากรณ์และการยืนยันผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

สำหรับขั้นตอนการยืนยันผลการทดลองนั้น จะยืนยันผลโดยการเปรียบเทียบผลของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของการทดลองลำดับแรกกับค่าที่พยากรณ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ตามสมการที่ 3.10 และตรวจสอบความแม่นยำของการทดลองโดยเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ค่าเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์กับผลการทดลองจริงของเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\gamma}_i - \gamma_m) \quad (3.10)$$

เมื่อ $\hat{\gamma}$ = ผลของการทำนายแบบเกรย์

γ_m = ผลรวมทั้งหมดของค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์แบบเกรย์ $\bar{\gamma}_i$ คือค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของระดับที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรแต่ละตัว

q = จำนวนของปัจจัยที่มีผลต่อวัตถุประสงค์แบบหลายวัตถุประสงค์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของกระบวนการยิงอนุภาคแข็งบนวัสดุแม่พิมพ์พุขึ้นรูปร้อน โดยใช้วิธีทางทฤษฎีร่วมกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ ซึ่งมีปัจจัยที่ต้องการศึกษาคือ การคลุมผิว (Coverage) ที่ 100-200 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเม็ดโลหะ 0.05-0.30 มิลลิเมตร และแรงดันลมที่ใช้ยิงเม็ดโลหะที่ 0.2-0.6 เมกะปาสคาล ซึ่งทำการทดลองแล้วทำการวัดค่าความเค้นอัดตกค้างที่ผิว (Residual compressive stress) และวัดค่าความหยาบผิว (Surface Roughness) ของชิ้นงานทดสอบเกรดวัสดุแม่พิมพ์พุขึ้นร้อนเกรด JIS-SKD61 และวิเคราะห์ผลผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab R18

4.1 วิธีการทางทฤษฎีสำหรับความเค้นอัดตกค้างที่ผิว

สำหรับการวัดความเค้นอัดตกค้างที่ผิวของชิ้นงานทดสอบนั้นหลังจากนำปัจจัยมาทดลองโดยการเปลี่ยนระดับที่แตกต่างกันของปัจจัย จากการทดลองจะมีทั้งหมด 18 เงื่อนไข และจะทำซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง รวมทั้งหมดเป็น 36 รัน ผลการบันทึกผลการทดลองของแต่ละเงื่อนไขดังในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความเค้นอัดตกค้างที่ผิวของชิ้นงาน

Run	ระดับปัจจัย			ค่าตอบสนอง		
	การคลุมผิว C (%)	ขนาดเม็ดโลหะ S (mm.)	แรงดันลม A (MPa.)	ความเค้น อัดตกค้างที่ ผิว (MPa)	ความเค้น อัดตกค้างที่ ผิว (MPa)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
1	100	0.05	0.2	1250	1240	1245
2	100	0.05	0.4	1171	1112	1142
3	100	0.05	0.6	1142	1078	1110
4	100	0.10	0.2	1315	1349	1332
5	100	0.10	0.4	1432	1493	1463
6	100	0.10	0.6	1289	1214	1252

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความเค้นอัดตกค้างที่ผิวของชิ้นงาน (ต่อ)

Run	ระดับปัจจัย			ค่าตอบสนอง		
	การคลุมผิว C (%)	ขนาดเม็ดโลหะ S (mm.)	แรงดันลม A (MPa.)	ความเค้นอัด ตกค้างที่ผิว (MPa)	ความเค้นอัด ตกค้างที่ผิว (MPa)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
7	100	0.30	0.2	1409	1433	1421
8	100	0.30	0.4	1389	1192	1291
9	100	0.30	0.6	1021	1391	1206
10	200	0.05	0.2	1299	1396	1348
11	200	0.05	0.4	1250	1217	1234
12	200	0.05	0.6	1053	1107	1080
13	200	0.10	0.2	1662	1639	1651
14	200	0.10	0.4	1572	1569	1571
15	200	0.10	0.6	1347	1485	1416
16	200	0.30	0.2	1659	1596	1628
17	200	0.30	0.4	1458	1475	1467
18	200	0.30	0.6	1201	1264	1233

สำหรับค่าความเค้นอัด (Compressive Stress) ในทางทฤษฎีจะแทนค่าด้วยค่าลบ (-) และค่าความเค้นดึง (Tensile Stress) จะแทนค่าด้วยค่าบวก (+)

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวนสำหรับค่าความเค้นอัดตกค้างที่ผิว (S/N Ratio)

เมื่อนำปัจจัยมาทดลองโดยการเปลี่ยนระดับที่แตกต่างกันของแต่ละปัจจัยดังในตารางที่ 4.1 จากนั้นนำผลตอบสนองมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (The signal-to noise ration) หรือค่า S/N ratio ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab โดยจะพิจารณาค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวน โดยสำหรับค่าผลตอบสนองของความเค้นอัดตกค้างที่ผิวจะพิจารณาในรูปแบบค่ายิ่งยวดยิ่งดี (The larger the-better) ซึ่งผลการทดสอบของค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของค่าความเค้นตกค้างที่ผิวดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของความเค้นอัดตกค้างที่ผิว (S/N Ratio)

Run	ระดับปัจจัย			ผลตอบสนอง	
	การคลุมผิว C (%)	ขนาดเม็ดโลหะ S (mm.)	แรงดันลม A (MPa.)	ค่าเฉลี่ยความเค้นอัด ตกค้างที่ผิว (MPa)	ค่าสัญญาณต่อ สิ่งรบกวน (db)
1	100	0.05	0.2	1245	61.9034
2	100	0.05	0.4	1142	61.1495
3	100	0.05	0.6	1110	60.9065
4	100	0.10	0.2	1332	62.4901
5	100	0.10	0.4	1463	63.3019
6	100	0.10	0.6	1252	61.9486
7	100	0.30	0.2	1421	63.0519
8	100	0.30	0.4	1291	62.2152
9	100	0.30	0.6	1206	61.6269
10	200	0.05	0.2	1348	62.5906
11	200	0.05	0.4	1337	61.8228
12	200	0.05	0.6	1080	60.6685
13	200	0.10	0.2	1651	64.3523
14	200	0.10	0.4	1571	63.9208
15	200	0.10	0.6	1416	63.0213
16	200	0.30	0.2	1628	64.2304
17	200	0.30	0.4	1467	63.3256
18	200	0.30	0.6	1233	61.8157

4.1.2 การวิเคราะห์หาปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลักของโดยอาศัยค่า S/N-Ratio

สำหรับการหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนองที่ต้องการนั้น ถ้าค่าเฉลี่ย S/N ratio ของปัจจัยที่ควบคุมนั้นมีค่ามาก หมายความว่า การปรับระดับของปัจจัยที่ควบคุมนั้นส่งผลทำให้คุณภาพออกมาดี โดยการวิเคราะห์หาอิทธิพลหลักของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio ดังตารางที่ 4.3

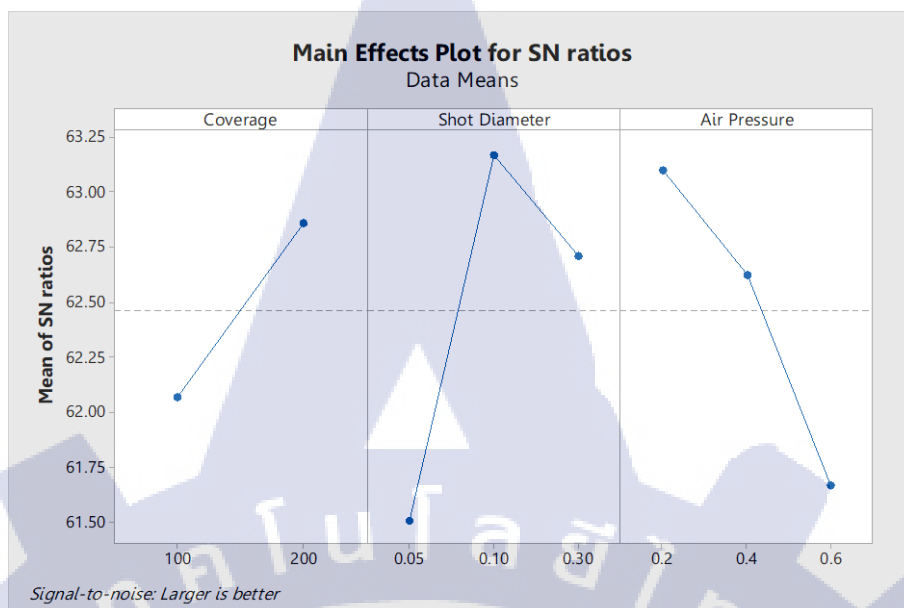
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N Ratio ของปัจจัยในแต่ละระดับของค่าความเค้นอัดตกค้าง

ปัจจัย	ค่าเฉลี่ย S/N-Ratio			Max	Min	Max-Min	Rank
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3				
C	62.07	62.86	-	62.86	62.07	0.79	3
S	61.51	63.17	62.71	63.17	61.51	1.67	1
A	63.10	62.62	61.66	63.10	61.66	1.44	2

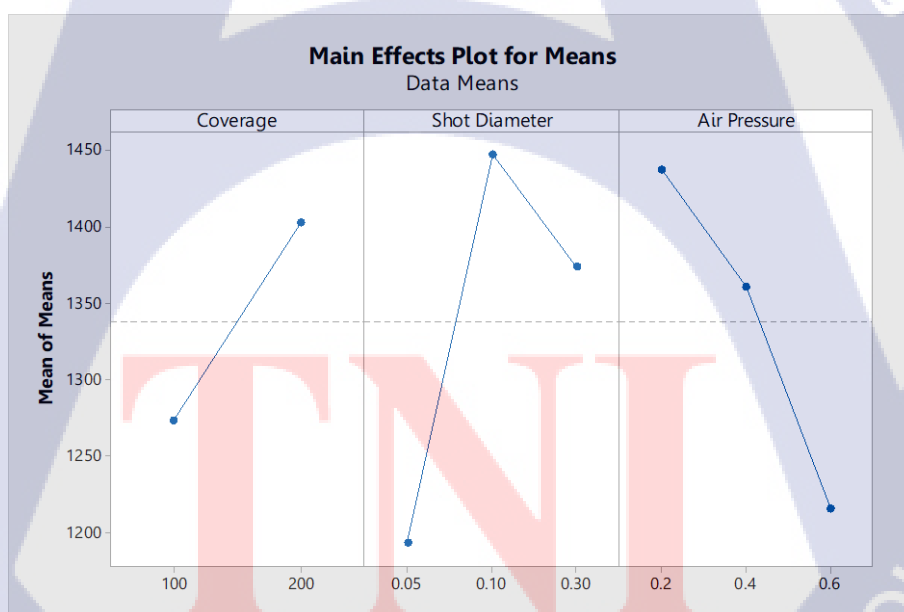
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยความเค้นอัดตกค้างของปัจจัยในแต่ละระดับ

ปัจจัย	ค่าเฉลี่ย S/N-Ratio			Max	Min	Max-Min	Rank
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3				
C	1273	1403	-	1403	1273	129	3
S	1193	1447	1374	1447	1193	254	1
A	1437	1361	1216	1437	1216	221	2

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 สามารถสร้างกราฟค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N Ratio ของปัจจัยในแต่ละระดับของค่าความเค้นอัดตกค้างและกราฟค่าเฉลี่ยความเค้นอัดตกค้างของปัจจัยในแต่ละระดับได้ดังภาพที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กราฟค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N Ratio ของปัจจัยในแต่ละระดับของค่าความเค้นอัดตกค้างที่ผิว



รูปที่ 4.2 กราฟค่าเฉลี่ยความเค้นอัดตกค้างของปัจจัยในแต่ละระดับ

จากตารางที่ 4.3 หรือรูปที่ 4.1 พบได้ว่าปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลักที่ส่งผลต่อค่าเค้นอัดตกค้างที่ผิวชิ้นงานวัสดุแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อนลำดับที่ 1 คือ ขนาดของเม็ดโลหะและลำดับที่ 2 คือ

แรงดันลมและการคลุมผิวตามลำดับ เมื่อสรุปจากกราฟสรุปได้ว่าเมื่อต้องการค่าความเค้นอัดตกค้างที่ผิวชิ้นงานวัสดุแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อนที่สูงควรกำหนดให้การคลุมผิวที่ระดับที่ 2 คือ 200%, ขนาดเม็ดโลหะที่ระดับที่ 2 คือ 0.10 มิลลิเมตรและแรงดันลมที่ระดับที่ 1 คือ 0.2 เมกะปาสคาล

จากรูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของความเค้นอัดตกค้างที่ปัจจัยขนาดเม็ดโลหะที่แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของความเค้นอัดตกค้างไม่ได้สูงขึ้นเมื่อเปลี่ยนขนาดเม็ดโลหะให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นขนาด 0.3 มิลลิเมตรซึ่งเป็นขนาดเม็ดโลหะในกลุ่มของ ซอท ฟินนิง นั้นเป็นเพราะว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นคือขนาดเม็ดโลหะและตัวแปรตามคือความเค้นอัดตกค้างไม่ได้เป็นรูปแบบความสัมพันธ์เส้นตรง จากการวิจัยของจิราพร ศรีประเสริฐ [26] ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการ ซอท ฟินนิงกับกระบวนการ ไฟน์ ซอท ฟินนิง ผลออกมาคือกระบวนการ ไฟน์ ซอท ฟินนิงจะให้ค่าความเค้นตกค้างที่สูงกว่าและมีความสามารถในการต้านทานความล้าได้สูงที่สุด แต่แค่เปลี่ยนขนาดของอนุภาคแข็งให้เล็กลงนั้นก็ไม่ได้หมายความว่าจะสามารถเพิ่มความเค้นอัดตกค้างได้ จากงานวิจัยของ S.Kikuchi et. al. [27] ได้ปรับเปลี่ยนขนาดของอนุภาคให้เล็กลงแต่ผลออกมาคือความเค้นอัดตกค้างไม่ได้เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนขนาดของอนุภาคแข็งให้เล็กลง จากรูปที่ 4.2 เห็นได้ว่าที่ปัจจัยขนาดเม็ดโลหะนั้นเมื่อเปลี่ยนขนาดของเม็ดโลหะไปที่ระดับที่โตขึ้นไประดับ 0.3 มิลลิเมตรทำให้ค่าเค้นอัดตกค้างลดลง และเมื่อลดขนาดเม็ดโลหะมาที่ 0.05 มิลลิเมตรก็ทำให้ได้ค่าความเค้นอัดน้อยเช่นกัน ดังนั้นปัจจัยขนาดเม็ดโลหะในกระบวนการยิงอนุภาคแข็งนั้นจะมีระดับที่เหมาะสมของกระบวนการทดลองอยู่ เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดนั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆร่วมด้วย

4.2 วิธีการหาอายุสำหรับความหยาบผิว

สำหรับการวัดหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบนั้นหลังจากนำปัจจัยมาทดลองโดยการเปลี่ยนระดับที่แตกต่างกันของปัจจัย จากการทดลองจะมีทั้งหมด 18 เงื่อนไข และจะทำซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง รวมทั้งหมดเป็น 36 วันซึ่งเป็นชิ้นงานทดสอบ เป็นชิ้นงานเดียวกันกับชิ้นงานที่วัดความเค้นอัดตกค้าง ผลการบันทึกผลการทดลองของแต่ละเงื่อนไขดังในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดความหยาบผิว

EX.	ระดับปัจจัย			ค่าตอบสนอง		
	การคลุมผิว C (%)	ขนาดเม็ดโลหะ S (mm.)	แรงดันลม A (MPa.)	ความหยาบผิว (μm)	ความหยาบผิว (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)
1	100	0.05	0.2	0.350	0.341	0.346
2	100	0.05	0.4	0.352	0.387	0.370
3	100	0.05	0.6	0.390	0.394	0.392
4	100	0.10	0.2	0.370	0.376	0.373
5	100	0.10	0.4	0.413	0.405	0.409
6	100	0.10	0.6	0.457	0.445	0.451
7	100	0.30	0.2	0.468	0.478	0.473
8	100	0.30	0.4	0.539	0.530	0.5345
9	100	0.30	0.6	0.623	0.623	0.623
10	200	0.05	0.2	0.407	0.407	0.407
11	200	0.05	0.4	0.412	0.417	0.415
12	200	0.05	0.6	0.429	0.414	0.422
13	200	0.10	0.2	0.403	0.418	0.411
14	200	0.10	0.4	0.429	0.459	0.444
15	200	0.10	0.6	0.443	0.485	0.464
16	200	0.30	0.2	0.544	0.539	0.542
17	200	0.30	0.4	0.546	0.548	0.547
18	200	0.30	0.6	0.659	0.659	0.659

สำหรับค่าความหยาบผิวที่ใช้วัดในการทดลองครั้งนี้เป็นรูปแบบความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average : Ra) เป็นการแสดงความหยาบด้วยค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิวที่วัด โดยค่า Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร และผิวชิ้นงานทดสอบก่อนทำการทดลองค่าเฉลี่ยความหยาบผิวอยู่ที่ 0.350 ไมโครเมตร ทั้งนี้ความหยาบผิวของชิ้นงานขึ้นอยู่กับกรรมวิธีสุดท้ายในกระบวนการปรับผิวของชิ้นงาน

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวนสำหรับค่าความหยาบผิว (S/N-Ratio)

เมื่อนำปัจจัยมาทดลองโดยการเปลี่ยนระดับที่แตกต่างกันของแต่ละปัจจัยดังในตารางที่ 4.5 จากนั้นนำผลตอบสนองมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (The signal-to noise ratio) หรือค่า S/N ratio ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab โดยจะพิจารณาค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวน โดยสำหรับค่าผลตอบสนองของความหยาบผิวจะพิจารณาในรูปแบบค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (The smaller the-better) ซึ่งผลการทดสอบของค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของค่าความหยาบผิวดังในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของความหยาบผิว (S/N Ratio)

EX.	ระดับปัจจัย			ผลตอบสนอง	
	การคลุมผิว C (%)	ขนาดเม็ดโลหะ S (mm.)	แรงดันลม A (MPa.)	ค่าเฉลี่ยความ หยาบผิว (MPa)	ค่าสัญญาณต่อ สิ่งรบกวน (db)
1	100	0.05	0.2	0.346	9.2310
2	100	0.05	0.4	0.370	8.6477
3	100	0.05	0.6	0.392	8.1343
4	100	0.10	0.2	0.373	8.5658
5	100	0.10	0.4	0.409	7.7655
6	100	0.10	0.6	0.451	6.9165
7	100	0.30	0.2	0.473	6.5028
8	100	0.30	0.4	0.5345	5.4410
9	100	0.30	0.6	0.623	4.1158
10	200	0.05	0.2	0.407	7.8081
11	200	0.05	0.4	0.415	7.6495
12	200	0.05	0.6	0.422	7.5040
13	200	0.10	0.2	0.411	7.7337
14	200	0.10	0.4	0.444	7.0523

ตารางที่ 4.6 ค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของความหยาบผิว (S/N Ratio) (ต่อ)

EX.	ระดับปัจจัย			ผลตอบแทน	
	การคลุมผิว C (%)	ขนาดเม็ดโลหะ S (mm.)	แรงดันลม A (MPa.)	ค่าเฉลี่ยความหยาบ ผิว (MPa)	ค่าสัญญาณต่อ สิ่งรบกวน (db)
15	200	0.10	0.6	0.464	6.6696
16	200	0.30	0.2	0.542	5.3280
17	200	0.30	0.4	0.547	5.2403
18	200	0.30	0.6	0.659	3.6223

4.2.2 การวิเคราะห์หาปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลักของโดยอาศัยค่า S/N-Ratio

สำหรับการหาปัจจัยที่มีอิทธิพลที่ส่งต่อค่าผลตอบแทนที่ต้องการนั้น ถ้าค่าเฉลี่ย S/N ratio ของปัจจัยที่ควบคุมนั้นมีค่ามาก หมายความว่า การปรับระดับของปัจจัยที่ควบคุมนั้นส่งผลทำให้คุณภาพออกมาดี โดยการวิเคราะห์หาอิทธิพลหลักของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio ดังตารางที่ 4.7

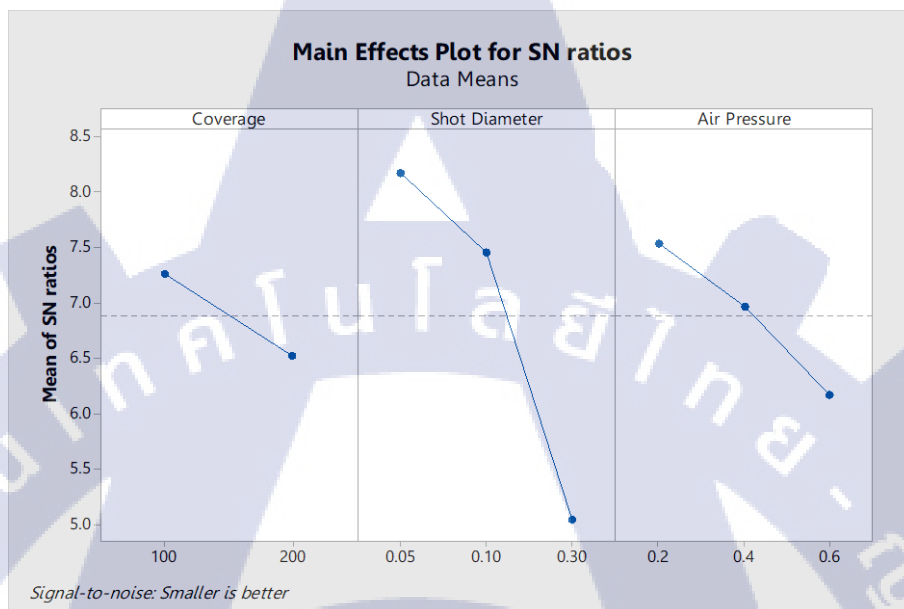
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N Ratio ของปัจจัยแต่ละระดับของค่าความหยาบผิว

ปัจจัย	ค่าเฉลี่ย S/N-Ratio			Max	Min	Max-Min	Rank
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3				
C	7.258	6.512	-	7.258	6.512	0.746	3
S	8.162	6.977	5.042	8.162	5.042	3.121	1
A	7.528	6.966	6.160	7.528	6.160	1.368	2

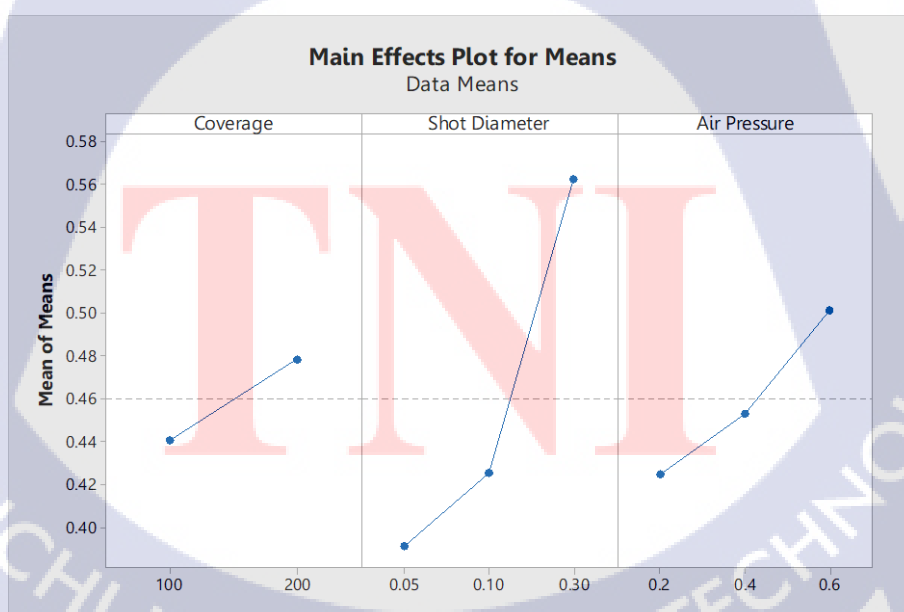
ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยความหยาบผิวของปัจจัยแต่ละระดับ

ปัจจัย	ค่าเฉลี่ย S/N-Ratio			Max	Min	Max-Min	Rank
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3				
C	0.4411	0.4788	-	0.4788	0.4411	0.0377	3
S	0.3917	0.4252	0.5629	0.5629	0.3917	0.1713	1
A	0.4251	0.4531	0.5017	0.5017	0.4251	0.0766	2

จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 สามารถสร้างกราฟค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N Ratio ของปัจจัยในแต่ละระดับของค่าความหนาผิวและกราฟค่าเฉลี่ยความหนาผิวของปัจจัยในแต่ละระดับได้ดังภาพที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 กราฟค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N Ratio ของค่าความหนาผิว



รูปที่ 4.4 กราฟค่าเฉลี่ยความหนาผิวของปัจจัยในแต่ละระดับ

จากตารางที่ 4.7 หรือรูปที่ 4.3 พบได้ว่าปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลักที่ส่งผลต่อค่าหายาผิวของชิ้นงานวัสดุแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อนลำดับที่ 1 คือ ขนาดของเม็ดโลหะและลำดับที่ 2 คือ แรงดันลมและการคลุมผิวตามลำดับ เมื่อสรุปจากกราฟจะสรุปได้ว่าเมื่อต้องการค่าความผิวของชิ้นงานวัสดุแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อนที่ดีนั้นควรกำหนดให้การคลุมผิวที่ระดับที่ 1 คือ 100%, ขนาดเม็ดโลหะที่ระดับที่ 1 คือ 0.05 มิลลิเมตร และแรงดันลมที่ระดับที่ 1 คือ 0.2 เมกะปาสกาล

4.3 วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

หลังจากทดลองและวิเคราะห์ในรูปแบบวิธีการทางสถิติไปแล้ว ผลการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของค่าความเค้นอัดตกค้างและค่าความหายาผิวนั้น สถานะที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบสนองทั้งสองต้องกำหนดเงื่อนไขของปัจจัยแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อต้องการเงื่อนไขที่เหมาะสมเพียงหนึ่งเงื่อนไขแต่หลายผลตอบสนอง จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ในการตัดสินใจเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมเพียงเงื่อนไขเดียวซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

4.3.1 แปลงข้อมูล (Normalize Features Extracted)

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์นั้นจะเริ่มต้นด้วยการแปลงผลตอบสนองที่อยู่ในรูปข้อมูลดิบให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยสำหรับค่าความเค้นอัดตกค้างจะใช้ในรูปแบบค่ายิ่งยวดยิ่งดี (The-larger-the-better) และสำหรับค่าหายาผิวใช้ในรูปแบบยิ่งมีค่ายิ่งดีเช่นกันเนื่องจากค่าความหายาผิวถูกเปลี่ยนเป็นค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N ration) แล้ว สำหรับผลของการแปลงผลตอบสนองให้อยู่ช่วง 0-1 สำหรับผลตอบสนองของค่าความเค้นอัดตกค้างและความหายาผิวดังในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการแปลงค่าตอบสนองจากข้อมูลดิบ S/N Ratio ให้อยู่ช่วง 0-1

ลำดับการทดลอง	ความเค้นอัดตกค้าง [0-1]	ความหายาผิว [0-1]
1	0.3352	1
2	0.1306	0.8960
3	0.0646	0.8045

ตารางที่ 4.9 ผลการแปลงค่าตอบสนองจากข้อมูลดิบ S/N Ratio ให้อยู่ช่วง 0-1 (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ความเค้นอัดตกค้าง [0-1]	ความหยาบผิว [0-1]
4	0.4945	0.8814
5	0.7149	0.7387
6	0.3475	0.5873
7	0.6470	0.5136
8	0.4199	0.3243
9	0.2602	0.0880
10	0.5218	0.7463
11	0.3133	0.7180
12	0	0.6921
13	1	0.7330
14	0.8829	0.6116
15	0.6387	0.5433
16	0.9669	0.3041
17	0.7213	0.2885
18	0.3114	0

จากตารางที่ 4.9 ผลจากการเปลี่ยนข้อมูลดิบในกรณีของค่าความเค้นอัดตกค้างที่ต้องการผลตอบสนองยิ่งมีค่ามากยิ่งดี ลำดับการทดลองที่มีข้อมูลดิบมีค่ามากที่สุดจะแปลงข้อมูลเท่ากับ 1 ในขณะที่ลำดับการทดลองที่มีข้อมูลดิบค่าน้อยที่สุดจะแปลงข้อมูลเท่ากับ 0 และในกรณีของค่าความหยาบผิวที่ต้องการผลตอบสนองยิ่งมีค่าน้อยยิ่งดีลำดับการทดลองที่มีข้อมูลดิบค่าน้อยที่สุดจะแปลงข้อมูลเท่ากับ 1 ในขณะที่ลำดับการทดลองที่มีข้อมูลดิบค่ามากที่สุดจะแปลงข้อมูลเท่ากับ 0

เมื่อแปลงข้อมูลดิบให้อยู่ในรูปแบบ 0-1 แล้ว จึงนำค่าที่แปลงแล้วมาหาค่าเบี่ยงเบนลำดับซึ่งผลลัพธ์ค่าเบี่ยงเบนลำดับเป็นไปดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าเบี่ยงเบนลำดับของ S/N Ratio

ลำดับการ ทดลอง	ความเค้นอัดตกค้าง Δi	ความหยาบผิว Δi
1	0.6648	0
2	0.8694	0.1040
3	0.9354	0.1955
4	0.5055	0.1186
5	0.2851	0.2613
6	0.6525	0.4127
7	0.3530	0.4864
8	0.5801	0.6757
9	0.7398	0.9120
10	0.4782	0.2537
11	0.6867	0.2820
12	1	0.3079
13	0	0.2670
14	0.1171	0.3884
15	0.3613	0.4567
16	0.0331	0.6959
17	0.2787	0.7115
18	0.6886	1

4.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey relational coefficient and Grade)

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ซึ่งเป็นปัจจัยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองกับผลตอบสนองอ้างอิง สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความแตกต่าง (Distinguishing Coefficient) เท่ากับ 0.5 หรือเป็นการให้ความสำคัญกับผลตอบสนองทั้งค่าความเค้นอัดตกค้างและค่าความหยาบผิวในระดับที่เท่าๆกัน หลังจากได้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ก็สามารถคำนวณค่าเกรดความสัมพันธ์ของแต่ละการทดลองได้ ผลตอบสนองในกรณีอุดมคติโดยค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์แสดงดังในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์แต่ละการทดลอง

ลำดับการทดลอง	ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความเค้นอัดตกค้าง	ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความหยาบผิว	เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์	อันดับ
1	0.4293	1	0.7146	2
2	0.3651	0.8278	0.5965	7
3	0.3483	0.7189	0.5336	9
4	0.4973	0.8083	0.6528	5
5	0.6368	0.6568	0.6468	6
6	0.4338	0.5478	0.4908	14
7	0.5862	0.5069	0.5465	10
8	0.4629	0.4253	0.4441	16
9	0.4033	0.3541	0.3787	17
10	0.5111	0.6634	0.5873	8
11	0.4214	0.6394	0.5304	12
12	0.3333	0.6189	0.4761	15
13	1	0.6519	0.8260	1
14	0.8102	0.5628	0.6865	3

ตารางที่ 4.11 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์แต่ละการทดลอง (ต่อ)

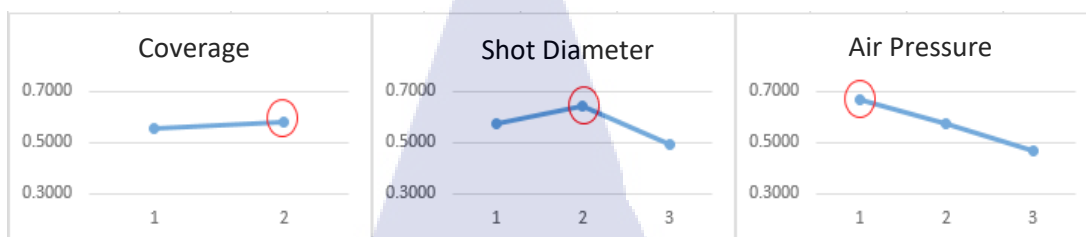
ลำดับการทดลอง	ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความเค้นอัดตกค้าง	ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความหยาบผิว	เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์	อันดับ
15	0.5805	0.5226	0.5516	9
16	0.9379	0.4181	0.6780	4
17	0.6421	0.4127	0.5274	13
18	0.4207	0.3333	0.3770	18

สำหรับการแบ่งอันดับของแต่ละการทดลองจะพิจารณาจากค่าเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ที่มีค่ามากไปหาค่าน้อย

ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์

ปัจจัย	ค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์			Max	Min	Max-Min	Rank
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3				
C	0.5560	0.5822*	-	0.5822	0.5560	0.0262	3
S	0.5731	0.6424*	0.4920	0.6424	0.4920	0.1505	2
A	0.6675*	0.5719	0.4680	0.6675	0.4680	0.1996	1

จากตารางที่ 4.12 สามารถสร้างกราฟค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ดังรูปที่ 4.5 และสำหรับการตัดสินใจเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมด้วยวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์นั้นจะทำการเลือกจากค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Average grey relational grade พิจารณาเลือกเงื่อนไขนั้นจะพิจารณาจากระดับของปัจจัยนั้นๆที่มีค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์สูงสุดของปัจจัยนั้นๆ สรุปจากตารางที่ 4.12 หรือรูปที่ 4.5 สำหรับเงื่อนไขที่สามารถให้ค่าตอบสนองที่ดีทั้งค่าความเค้นอัดตกค้างและความหยาบผิว คือกำหนดให้การคลุมผิวที่ระดับ 2 คือ 200% ขนาดเม็ดโลหะ ที่ระดับ 2 คือ 0.10 มิลลิเมตรและแรงดันลมที่ระดับที่ 1 คือ 0.2 เมกะปาสคาล



รูปที่ 4.5 กราฟค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์

4.4 การยืนยันผลการทดลอง

สำหรับขั้นตอนการยืนยันผลการทดลองนั้น จะยืนยันผลโดยการเปรียบเทียบผลของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของการทดลองลำดับแรกที่กำหนดการคลุมผิวที่ 100% ขนาดของเม็ดโลหะ 0.05 มิลลิเมตรและแรงดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล ($C_1 S_1 A_1$) กับค่าที่พยากรณ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ตามสมการที่ 10 กำหนดการคลุมผิวที่ 200% ขนาดของเม็ดโลหะ 0.1 มิลลิเมตรและแรงดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล ($C_2 S_2 A_1$) และตรวจสอบความแม่นยำของการทดลองโดยเปรียบเทียบผลการทำนายค่าเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์กับผลการทดลองของเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดกับผลการทำนายความสัมพันธ์แบบเกรย์ตามตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบผลทดลองสำหรับเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์

	สถานะที่เหมาะสมที่สุด		
	การทดลองแรกเริ่ม	พยากรณ์	การทดลอง
ระดับ	$C_1 S_1 A_1$	$C_2 S_2 A_1$	$C_2 S_2 A_1$
ความเค้นอัดตกค้างที่ผิว	1245	1611	1638
ความหยาบผิว	0.345	0.409	0.411
เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ (GRG)	0.7146	0.7539	0.8260
การปรับปรุงจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์	0.1114		
ความคลาดเคลื่อนการพยากรณ์แบบเกรย์	8.7 %		

สำหรับการยืนยันผลตามตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่ผ่านการวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่ดีที่สุดผ่านการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่เงื่อนไขเริ่มต้นในแผนการทดลองแบบทากูชิ ค่าเกรดความสัมพันธ์ของเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่ทำนายคือ 0.7539 ซึ่งมากกว่าเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของเงื่อนไขเริ่มต้นที่ 0.7146 ซึ่งสามารถปรับปรุงเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ได้ 0.1114 และผลการพยากรณ์เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์กับค่าเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์กับผลที่ทดลองจริงของเงื่อนไขที่ดีที่สุดจะได้ 0.7539 และ 0.8260 ตามลำดับซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ที่ 8.7 เปอร์เซ็นต์

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทั้งสามแทนค่าลงไปในการสมการที่ 3.10 เพื่อทำการพยากรณ์เพื่อตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดที่ขึ้นงานจริงและค่าที่ได้จากการพยากรณ์ จะแสดงดังตารางที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าจะมีค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงระหว่าง -23% ถึง 14% ซึ่งเมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนทั้งหมดจะอยู่ที่ 2% เพื่อใช้ในการพยากรณ์เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ได้ในอนาคต

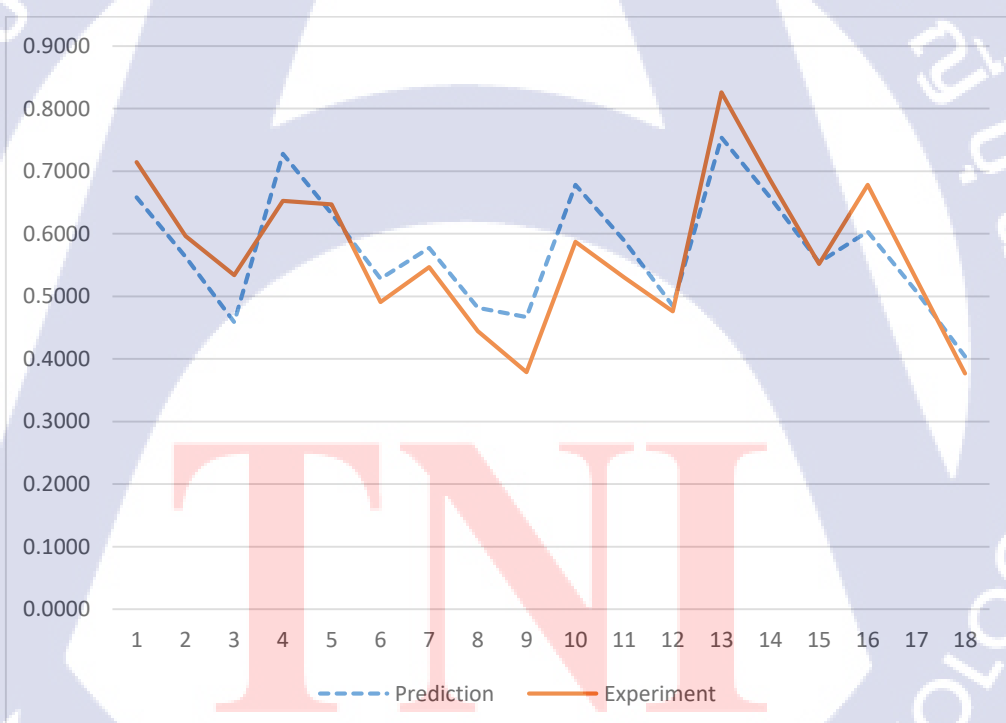
ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนของขึ้นงานจากสมการพยากรณ์และค่าที่วัดจริง

ลำดับการทดลอง	เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์	ค่าพยากรณ์แบบเกรย์	% ความคลาดเคลื่อน
1	0.6584	0.7146	7.87
2	0.5628	0.5965	5.65
3	0.4588	0.5336	14.02
4	0.7277	0.6528	-11.48
5	0.6321	0.6468	2.27
6	0.5281	0.4908	-7.60
7	0.5772	0.5465	-5.62
8	0.4816	0.4441	-8.46
9	0.4669	0.3787	-23.29
10	0.6782	0.5873	-15.48
11	0.5890	0.5304	-11.05
12	0.4850	0.4761	-1.87
13	0.7539	0.8260	8.73
14	0.6583	0.6865	4.11

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนของชิ้นงานจากสมการพยากรณ์และค่าที่วัดจริง (ต่อ)

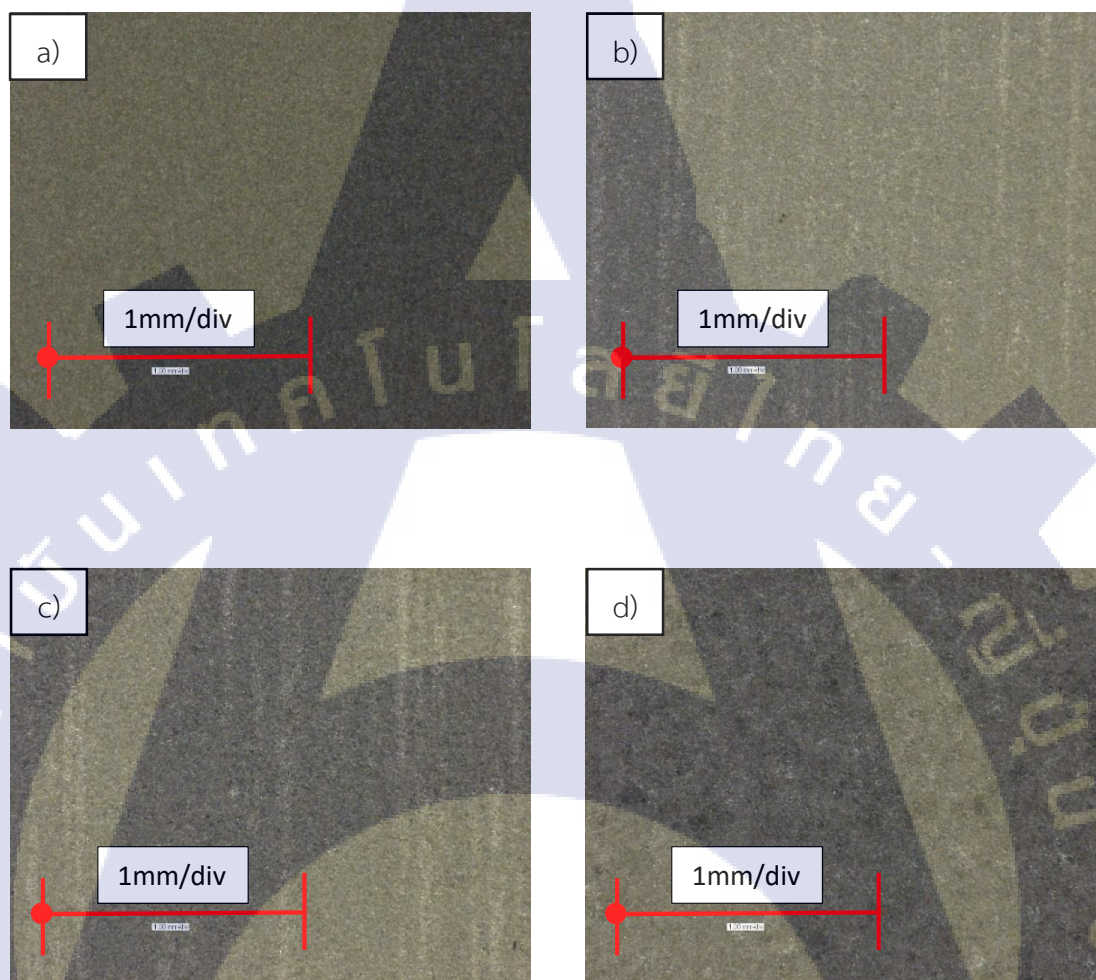
ลำดับการทดลอง	เกรดความสัมพันธ์เกรย์	ค่าพยากรณ์แบบเกรย์	% ความคลาดเคลื่อน
15	0.5543	0.5516	-0.50
16	0.6034	0.6780	11.00
17	0.5078	0.5274	3.71
18	0.4039	0.3770	-7.13

จากรูปที่ 4.6 แสดงกราฟแจกแจงเปรียบเทียบระหว่างค่าความสัมพันธ์แบบเกรย์กับสมการพยากรณ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการการพยากรณ์เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ จะเห็นว่าแผนภาพของกราฟทั้งสองเส้นมีความใกล้เคียงกันและมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย สามารถนำมาใช้พยากรณ์ค่าความเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ในอนาคตได้



รูปที่ 4.6 แจกแจงเปรียบเทียบระหว่างค่าความสัมพันธ์แบบเกรย์กับสมการพยากรณ์

ผลการเปรียบเทียบสภาพผิวของชิ้นงานที่ผ่านการยิงอนุภาคแข็งที่มีขนาดของเม็ดโลหะที่แตกต่างกันในการทดลองครั้งนี้ดูจากรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สภาพผิวของชิ้นงานทดสอบ a) ชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการยิงอนุภาคแข็ง b) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการยิงอนุภาคแข็งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.05 มิลลิเมตร c) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการยิงอนุภาคแข็งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร และ d) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการยิงอนุภาคแข็งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลจากการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกรณีที่มีหลายวัตถุประสงค์ของกระบวนการยิงอนุภาคแข็งบนวัสดุแม่พิมพ์ทึบขึ้นรูปร้อน โดยใช้วิธีทางทฤษฎีร่วมกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ โดยปัจจัยนำเข้าที่ต้องการศึกษาคือ การคลุมผิว (Coverage) ขนาดของเม็ดโลหะ (Shot Diameter) และแรงดันลม (Air Pressure) ส่วนผลตอบสนองที่ต้องการคือ ความเค้นอัดตกค้างที่ผิว โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffract meter) และความหยาบผิว โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิวแบบเข็มลาก (Roughness Tester) โดยระดับปัจจัยนำเข้าได้กำหนดไว้ดังนี้ คือ การคลุมผิวมี 2 ระดับ คือ 100%, 200% ขนาดของเม็ดโลหะมี 3 ระดับคือ 0.05, 0.10 และ 0.30 มิลลิเมตร แรงดันลมมี 3 ระดับคือ 0.2, 0.4 และ 0.6 เมกะปาสคาล หลังการทดลองจากการเปลี่ยนระดับของแต่ละปัจจัยนำเข้าที่แตกต่างกันในรูปแบบของวิธีการทางทฤษฎีแบบ L18 Mix level design โดยทำการทดลองทั้งหมด 18 เงื่อนไข และแต่ละเงื่อนไขทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อความแม่นยำในการทดลอง จะสรุปผลดังต่อไปนี้

5.1.1 สรุปผลการทดลองจากวิธีการทางทฤษฎีสำหรับค่าความเค้นอัดตกค้างที่ผิว

จากการทดลองพบว่า ระดับของปัจจัยที่ทำให้ค่าความเค้นอัดตกค้างของวัสดุแม่พิมพ์ทึบขึ้นรูปร้อนมีค่าความเค้นอัดตกค้างที่ผิวมากที่สุดคือ การกำหนดให้การคลุมผิว (C) ที่ระดับที่ 2 คือ 200% ขนาดของเม็ดโลหะ (S) ที่ระดับที่ 2 คือ 0.10 มิลลิเมตร และแรงดันลม (A) ที่ระดับที่ 1 คือ 0.2 เมกะปาสคาล ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองแบบทางทฤษฎีสามารถให้ความเค้นอัดตกค้างเฉลี่ยที่ 1638 เมกะปาสคาล

5.1.2 สรุปผลการทดลองจากวิธีการทางทฤษฎีสำหรับค่าความหยาบผิว

จากการทดลองพบว่า ระดับของปัจจัยที่ทำให้ค่าความหยาบผิวของวัสดุแม่พิมพ์ทึบขึ้นรูปร้อนมีค่าความหยาบที่ผิวน้อยที่สุดคือ การกำหนดให้การคลุมผิว (C) ที่ระดับที่ 1 คือ 100% ขนาดของเม็ดโลหะที่ระดับที่ 1 คือ 0.05 มิลลิเมตร และแรงดันลมที่ระดับที่ 1 คือ 0.2 เมกะปาสคาล ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองแบบทางทฤษฎีสามารถให้ความหยาบผิวเฉลี่ยที่ 0.346 ไมโครเมตร

5.1.3 สรุปผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

ในการทดลองครั้งนี้วัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพียงเงื่อนไขเดียวแต่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งหลังจากการวิเคราะห์แบบทากูชิเงื่อนไขที่ได้จะได้เป็น 2 เงื่อนไข คือเงื่อนไขแรกเป็นของค่าความเค้นอัดตกค้างที่ผิว และเงื่อนไขที่ 2 เป็นของค่าความหยาบผิว ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพียงเงื่อนไขเดียว จากการวิเคราะห์พบว่าระดับของปัจจัยที่ทำให้ค่าความเค้นอัดตกค้างสูงและค่าความหยาบผิวต่ำของวัสดุแม่พิมพ์ทูปขึ้นรูปร้อนคือ การกำหนดให้การคลุมผิว (C) ที่ระดับที่ 2 คือ 200% ขนาดของเม็ดโลหะ (S) ที่ระดับที่ 2 คือ 0.10 มิลลิเมตร และแรงดันลม (A) ที่ระดับที่ 1 คือ 0.2 เมกะปาสกาล ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองแบบทากูชิร่วมกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์สามารถให้ความเค้นอัดตกค้างเฉลี่ยที่ 1638 เมกะปาสกาลและความหยาบผิวที่ 0.411 ไมโครเมตรและมีค่าความผิดพลาดของการทดลองจากสมการพยากรณ์อยู่ที่ 8.7 เปอร์เซ็นต์

5.2 อภิปรายผล

กระบวนการทูปขึ้นรูปร้อนเป็นวิธีการที่ยังมีความสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์และอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกหลายประเภท งานวิจัยนี้ได้นำเอากระบวนการปรับสภาพผิวโดยการยิงอนุภาคแข็งนำมาใช้กับวัสดุแม่พิมพ์ทูปขึ้นรูปร้อนเพื่อความทนทานของแม่พิมพ์และยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ในภาคอุตสาหกรรมได้ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยของกระบวนการยิงอนุภาคแข็ง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการคือ ความเค้นอัดตกค้างและความหยาบผิว จากผลการวิจัยพบว่าผู้วิจัยสามารถหาระดับของแต่ละปัจจัยหลักที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลองแบบทากูชิร่วมกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ที่จะสามารถให้ความเค้นอัดตกค้างสูงและความหยาบผิวต่ำซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับแม่พิมพ์ทูปขึ้นรูปร้อนได้ ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการหาระดับและปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าในกระบวนการยิงอนุภาคแข็งเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามความต้องการของผู้ผลิตแม่พิมพ์ทูปขึ้นรูปร้อนได้ ซึ่งจะช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการลองผิดลองถูกในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้เป็นการหาความเค้นอัดตกค้างที่ผิวของชิ้นงานเพียงเท่านั้นในการศึกษา ซึ่งหากมีการดำเนินวิจัยต่อจากงานวิจัยนี้แนะนำให้ศึกษาหาความเค้นอัดตกค้างที่ลึกลงไปจากระดับผิวของชิ้นงานเพื่อหาค่ามากที่สุดของความเค้นอัดตกค้าง
2. ในงานวิจัยนี้เป็นการหาสถานะที่เหมาะสมของผลตอบสนองสองตอบสนองคือ ความเค้นอัดตกค้างและความหยابผิว ดังนั้นงานวิจัยครั้งต่อไปควรมีการเพิ่มคุณสมบัติด้านความแข็งของผิวชิ้นงานเข้ามามีวิจัยเพิ่มด้วย



บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] Z. Gronostajski et al., "Analysis of wear mechanisms of hot forging tools protected with hybrid layers performed by nitriding and PVD coatings deposition," *Wear*, vol. 420-421, no 1, pp. 269-280, February 2019.
- [2] Z. Gronostajski et al., "Improving durability of hot forging tools by applying hybrid layers," *METABK*, vol. 54, no. 4, pp. 687-690, October 2015.
- [3] A. Medvedeva et al., "High-temperature properties and microstructural stability of hot-work tool steels," *Materials Science and Engineering*, vol. 523, no. 1-2, pp. 39-46, October 2009.
- [4] E. Feyzullahoglu and S. Karabay, "Processing damages of material components of aerial conductors and their tribological behaviors under dry friction," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 682-690, August 2014.
- [5] M. Hawryluk et al., "Possibilities of investigating abrasive wear in conditions close to those prevailing in industrial forging processes," *Maintenance and Reliability*, vol. 16, no. 4, pp. 600-607, January 2014.
- [6] Z. Gronostajski et al., "Numerical modelling of the thermal fatigue of steel WCLV used for hot forging," *Maintenance and Reliability*, vol. 15, no. 2, pp. 129-133, January 2013.
- [7] Y. Harada et al., "Influence of microshot peening on surface layer characteristics of structural steel," *Material Processing Technology*, vol. 191, no.1, pp. 297-301, August 2007.
- [8] Oxiso, "OX-FSP," [Online]. Available: <http://www.oxiso.co.jp/th/product/>. [Accessed: September 9, 2019].
- [9] J. Champaigne, "Shot Peening Overview," [Online]. Available: <http://www.shotpeener.com/about/shot-peening/>. [Accessed: December 2, 2020].
- [10] B. Y. He et al., "Fatigue crack growth behavior in the LCF regime in a shot peened steam turbine blade material," *International Journal of Fatigue*, vol. 82, pp. 280-291, March 2015.

- [11] A. Bag et al., “Effect of shot peening on short crack propagation in 300M steel,” *International Journal of Fatigue*, vol. 131:105346, n.p., October 2019.
- [12] วารุณี เปรมานนท์ และ อรจิรา เตี้ยวณิชย์, *การขึ้นรูปโลหะ เล่มที่ 2*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2554.
- [13] ศิริชัย ต่อสกุล และ อนุชา วัฒนาภา, *เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2554.
- [14] อรรถพล ตะରେ, *คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2551.
- [15] วรสิทธิ์ อึ้งภากรณ์ และ ชาญ ถนังดา, *การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1*, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2556.
- [16] พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, *การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการเชิงวิศวกรรมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองประยุกต์*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2557.
- [17] ศุภกฤต เห็นประเสริฐแท้, “ทำไมต้องมีเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction),” *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*, ฉบับที่ 66, หน้า 12-18, กรกฎาคม-กันยายน, กรกฎาคม 2555.
- [18] บัญชา ธนบุญสมบัติ, *การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2544.
- [19] Q. Luo et al., “Uncertainty of the X-ray diffraction (XRD) $\sin^2 \Psi$ technique in measuring residual stresses of physical vapor deposition (PVD) hard coatings,” *Coatings*, vol. 7, no. 8, pp. 128-146, August 2017.
- [20] มานพ ตันตระกูล, *เขียนแบบวิศวกรรม (ระบบ ISO และเมตริก)*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2554.
- [21] Misumi Technical “What - is - roughness,” [Online]. Available: <https://misumi-technical.com/technical/tools/what-is-roughness>. [Accessed: September 9, 2020].
- [22] ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ และคณะ, “ผลกระทบของการทำ ซอท ฟินนิ่ง ที่มีต่อวัสดุแม่พิมพ์ ทูบขึ้นรูปร้อน เกรด JIS-SKD61,” *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 31*, MENETT 31, นครนายก, 4-7 กรกฎาคม 2560, ไม่ปรากฏเลขหน้า.

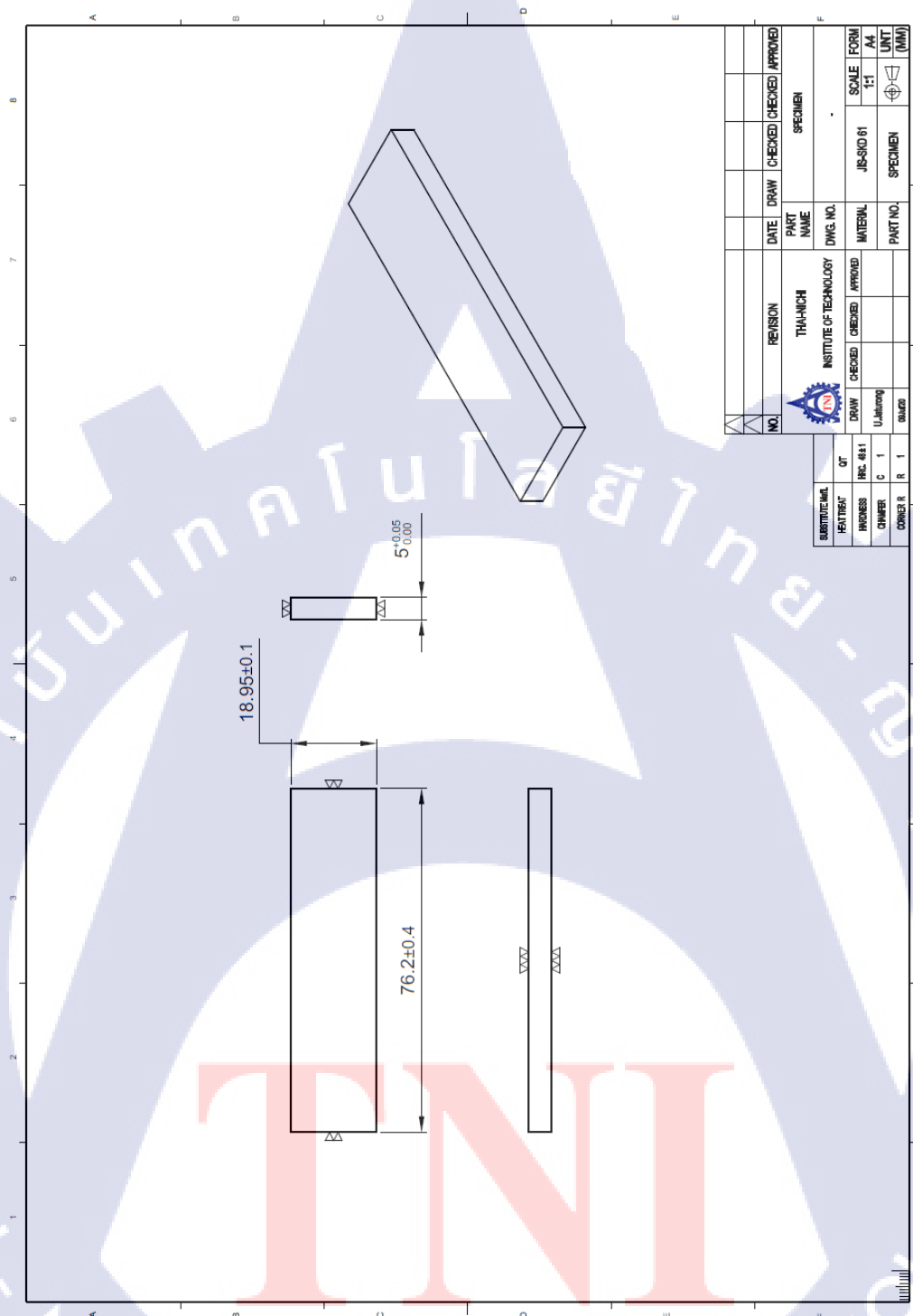
- [23] Y. Omiya et al., "Influence of surface properties modified with fine shot peening on scuffing," *Journal of surface engineered materials and advanced technology*, vol. 8, no. 3, pp. 58-69, January 2018.
- [24] Z. Jia et al., "Influence analysis of shot peening on hot forging die," *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, no. 5-8, pp. 1779-1787, May 2017.
- [25] T. Moriya et al., "Effects of fine particle bombarding on surface characteristics and fatigue strength of commercial pure titanium," *Materials Transactions*, vol. 53, no. 11, pp. 1938-1945, April 2017.
- [26] จีราพร ศรีประเสริฐ, "ทางเลือกใหม่ของการปรับผิวแม่พิมพ์," *วารสารแม่พิมพ์ (Mold & Die Journal)*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 4, หน้า 27-32, ตุลาคม-ธันวาคม 2560.
- [27] S. Kikuchi et al., "Effect of shot peening using ultra-fine particles on fatigue properties of 5056 aluminum alloy under rotating bending," *Materials Science & Engineering*, vol. 652, no. 1, pp. 279-286, January 2016.

ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.
ภาพร่างชิ้นงานทดสอบในงานวิจัย

TNI



รูปที่ ก.1 ภาพร่างชิ้นงานทดสอบในงานวิจัย

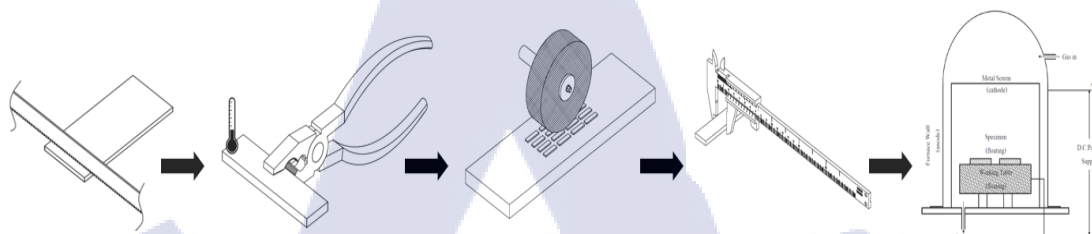
ภาคผนวก ข.

ภาพรวมขั้นตอนการสร้างชิ้นงานทดสอบ

TNI

ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานทดสอบ

ขั้นตอนภาพรวมการสร้างชิ้นงานทดสอบแสดงในรูป ข.1



รูป ข.1 ภาพรวมการสร้างชิ้นงานทดสอบ

ขั้นตอนการผลิต

1. ตัดชิ้นงานด้วยเครื่องเลื่อยให้ได้ขนาดความกว้าง 22 มิลลิเมตร ความยาว 78 มิลลิเมตร และหนา 7 มิลลิเมตร
2. นำชิ้นงานทดสอบไปทำการชุบแข็ง (Hardening) ที่ความแข็ง 48 ± 1 HRC
3. นำชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาทำการกัดและเจียรระไนเพื่อปรับผิวและปรับขนาดทั้ง 6 ด้านให้ได้ตามที่ขนาดตามที่แบบกำหนด
4. นำชิ้นงานทดสอบมาตรวจวัดขนาดด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์
5. เมื่อได้ขนาดที่ต้องการแล้วนำชิ้นงานไปทำไนไตรดิง (Nitriding)

TNI

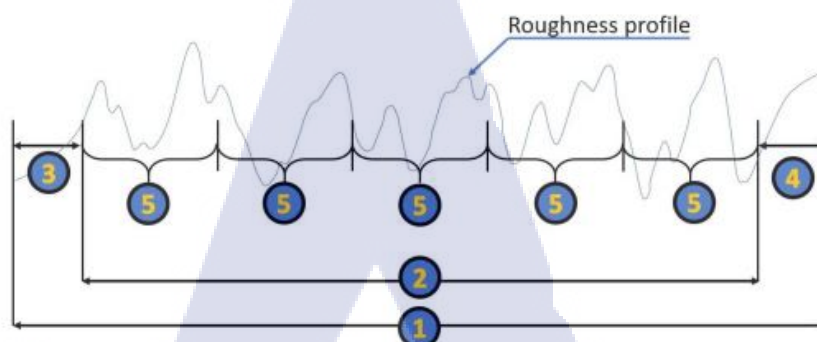
THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ภาคผนวก ค.

มาตรฐานการปรับตั้งค่าในการวัดค่าความหยาบผิว

TNI

มาตรฐานการปรับตั้งค่าในการวัดค่าความหยาบผิว



รูปที่ ค.1 ตำแหน่งของการวัดความหยาบผิว

1. Tracing length or Travel length
2. Evaluation length
3. Pre-operation length
4. Post-operation length
5. Sampling length or Cut-off

ตารางที่ ค.1 มาตรฐานการปรับตั้งในการวัดความหยาบผิว

Recommend Cut-off (ISO 4288-1996)				
Periodic Profiles	Non-Periodic Profiles		Cut-off	Sampling Length/ Evaluation Length
Spacing Distance RSm (mm)	Rz (μm)	Ra (μm)	λ_C (mm)	λ_C (mm)/L
>0.013 – 0.04	To 0.1	To 0.02	0.08	0.08/0.4
>0.04-0.13	>0.1-0.5	>0.02-0.1	0.25	0.25/1.25
>0.13-0.4	>0.5-10	>0.1-2	0.8	0.8/4
>0.4-1.3	>10-50	>2-10	2.5	2.5/12.5
>1.3-4.0	>50	>10	8	8/40

ภาคผนวก ง
บทความการประชุมวิชาการ

TNI



การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการยิงอนุภาคแข็งบนวัสดุแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปร้อนโดยวิธีทาคุชิ

Optimization of Solid Particle Bombarding Process on Hot Forging

Die Material by Taguchi Method

จตุรงค์ อุบล¹, ดอน แก้วดก²

¹ สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น เขตสวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250

² หน่วยวิจัยการออกแบบและเทคโนโลยีการผลิตขั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น เขตสวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250

*จตุรงค์ อุบล : ubjaturong_st@tniac.th, 0832292066

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นอัดตกค้างในกระบวนการยิงอนุภาคแข็งบนวัสดุผลิตแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปร้อนเกรด JIS-SKD61 โดยกำหนดปัจจัย 3 ปัจจัย คือ อัตราการครอบคลุมผิว, ขนาดเม็ดโลหะและแรงดันลมโดยออกแบบการทดลองตามหลักเทคนิคแบบอโทคอนลอเรย์ ตามแนวทางของ “ทาคุชิ” ผลที่ได้จากการทดลองนำมาคำนวณค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวนสูงสุด (Max Signal-to-noise Ratio) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการทดลองและทำการพยากรณ์ จากการศึกษพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นอัดตกค้างที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้แก่ อัตราการครอบคลุมผิว, ขนาดเม็ดโลหะและแรงดันลมและเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทาคุชิ แนะนำให้เลือกใช้อัตราการครอบคลุมผิวระดับที่ 2 คือ 200% ขนาดเม็ดโลหะระดับที่ 2 คือ 0.1 มิลลิเมตรและแรงดันลมระดับที่ 1 คือ 0.2 เมกะปาสกาล

คำสำคัญ: วิธีทาคุชิ, งานชุบขึ้นรูปร้อน, การยิงอนุภาคแข็ง, วัสดุแม่พิมพ์, ความเค้นตกค้าง

Abstract

This research aims to study parameters that have an influence in compressive residual stress in solid particle bombarding process on hot forging die material JIS-SKD61 grade. Three factors; coverage ratio, shot size, and air pressure for experiment have been defined by taguchi method. The experimental results have been calculated the S/N ratio for select the Max signal-to-noise ratio for the optimal processing parameters. Next, variance analyzing is operated for experimental validity testing. And prediction. From the study with confidence 95%, Factor that have an influence on compressive residual stress are coverage ratio, shot size, and air pressure. The results from taguchi method suggest to selecting coverage ratio, shot size and air pressure at 200%, 0.1 mm and 0.2 Mpa, respectively.

Keywords: Taguchi method, Hot Forging, Shot peening, Die material, Residual stress

การประมวลผลวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 12

20 สิงหาคม 2564 ณ โรงแรมดิเอ็มปาย เชียงใหม่ แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์ เชียงใหม่

สำนักพิมพ์ จีเอ็มเอ็มเพรส

1. บทนำ

กระบวนการชุบขึ้นรูปเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและประหยัดสำหรับอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ [1] ซึ่งกระบวนการชุบขึ้นรูปชิ้นงานร้อน (Hot forging) เป็นหนึ่งในกระบวนการที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ในอุตสาหกรรมหลายประเภท กระบวนการชุบขึ้นรูปร้อนนี้ถ้าเทียบกับกระบวนการแปรรูปชิ้นงานแบบอื่น ๆ ที่ต้องการให้มีรูปร่างและขนาดที่ซับซ้อนเหมือนกัน จะพบได้ว่ามีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการอื่น ๆ เป็นอย่างมาก อาทิเช่น เวลา ต้นทุน และคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical Property) เป็นต้น

อย่างไรก็ดีแม้จะมีข้อได้เปรียบที่ไม่อาจจะปฏิเสธหลายประการของกระบวนการชุบขึ้นรูปร้อน แต่ปัจจัยหลักของกระบวนการชุบขึ้นรูปร้อนคือแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อคุณภาพและต้นทุนต่อการผลิตชิ้นงาน ยังคงประสบปัญหาบางอย่าง คือ การสึกหรอของพิมพ์ (Tools Wear) อายุการใช้งานแม่พิมพ์ที่สั้น (Tools life) ซึ่งสิ่งนี้จะเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตและส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน [2] และยังเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตจากการซ่อมบำรุงและเปลี่ยนแม่พิมพ์ ประเมินค่าใช้จ่ายแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปที่เกิดขึ้นโดยประมาณ 15-40% ของต้นทุนการผลิต [1] ตัวแปรที่สำคัญของอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปคือ 1.คุณสมบัติของวัสดุที่ทำแม่พิมพ์ 2. การออกแบบแม่พิมพ์ 3.

กระบวนการทางความร้อนและการปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ 4. ขั้นตอนและตัวแปรในการชุบขึ้นรูป สำหรับกลไกการเสียหายของแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปเมื่อใช้งานไปได้ระยะหนึ่งจะเกิดความล้า (Fatigue) และการสึกหรอ (Wear) ขึ้นทั้งนี้อาจจะเกิดจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งหรือเกิดพร้อมกันก็ได้ [3-6]

กระบวนการยิงอนุภาคแข็งเป็นหนึ่งในวิธีการที่ช่วยเพิ่มความต้านทานการล้า (Fatigue Strength) ซึ่งความล้า (Fatigue) เป็นตัวการที่จะส่งผลให้สึกหรอ แตกร้าว ของแม่พิมพ์ โดยการยิงอนุภาคแข็ง มีวิธีการคือยิงเม็ดโลหะในขนาดระดับไมครอนด้วยความเร็วสูง โดยการอัดอากาศพร้อมกับเม็ดโลหะให้เข้าไปกระแทกกับพื้นผิวของชิ้นงานเป้าหมาย ด้วยกระบวนการนี้ทำให้ได้พื้นผิวที่หยาบและมีความเค้นกดตกค้างสูง (Residual Compressive Stress) [7-8] ความเค้นอัดตกค้างที่เกิดขึ้นที่วัสดุจะช่วยต้านทานการแตกร้าวที่เกิดจากความล้าและชะลอการไหลของรอยแตกจากความล้าของวัสดุได้ [9-11] ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของพื้นผิวและความทนทานต่อการสึกหรอของแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูป

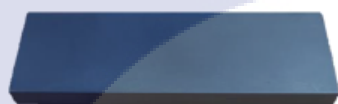
งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อศึกษาปัจจัยและหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการยิงอนุภาคแข็งที่มีผลต่อความเค้นอัดตกค้างที่ผิวแม่พิมพ์ชุบขึ้นรูปร้อนเกรด JIS-SKD61 เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานและลดต้นทุนการผลิต นำมาซึ่งแนวทางในการแก้ปัญหาการผลิตในภาคอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

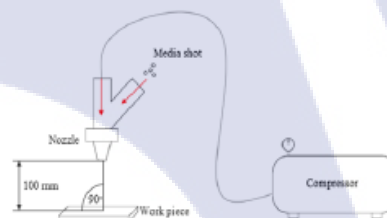
ในการทดลองวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือร้อนเกรด JIS-SKD 61 มีคุณสมบัติดังตาราง 1 ซึ่งเหล็กชนิดนี้เป็นเหล็กที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อน (Hot Forging Die) โดยชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้จะมีขนาด ความยาว 76.2 มม. ความกว้าง 18.98 มม. ความหนา 5 มม. ดังรูปที่ 1 ชิ้นงานทุกชิ้นมีผิวสำเร็จที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตเช่นเดียวกับแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อนและผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อน (Hardening + Nitriding) ความแข็งอยู่ที่ 48 HRC. เช่นเดียวกับแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อนทุกประการ และผ่านการขัดผิวซึ่งผิวของชิ้นงานทดสอบมีความหยาบผิวเฉลี่ยที่ $Ra = 0.35$ ไมโครเมตร

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ JIS-SKD61

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.35	0.95	0.45	5.35	1.24	0.81



รูปที่ 1 ชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 2 รูปแบบของกระบวนการยิงอนุภาคแข็ง

การประชุมนิเทศการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 12

20 สิงหาคม 2564 ณ โรงแรมดิเอ็มเพิร์ล โฮเทล แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์โคราช

สำนักวิจัย จีทีเอ็นเทคโนโลยี

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับการทดลอง

Factors	Process Parameters			
	Low (1)	Medium (2)	High (3)	Symbol
Coverage	100	200		CR
Shot Size	0.05	0.1	0.3	SS
Air Pressure	0.2	0.4	0.6	AP

การวัดความเค้นตกค้างที่ผิวชิ้นงานใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffract Meter) ยี่ห้อ PULSTEC รุ่น MU-360n full2D ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffract meter)

3. ผลการทดลอง

หลังจากได้ทดลองจากการเปลี่ยนระดับของแต่ละปัจจัยที่แตกต่างกับดังในตารางที่ 3 เก็บข้อมูลของแต่ละการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยและระดับที่

เหมาะสมผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab โดยจะพิจารณาค่าสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (The signal-to noise ratio; S/N) โดย สำหรับ ผลตอบสนองของค่าความเค้นอัดตกค้างจะพิจารณาในรูปแบบค่ายิ่งมกยิ่งดี (The larger the-better) ตั้งในสมการที่ 1 สำหรับการพิจารณาตามหลักทฤษฎี เพื่อกำหนดค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้จากตารางค่าเฉลี่ยของแต่ละปัจจัยที่มีค่าสูงสุดในตาราง อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N ration (Signal-to-noise Ratio) ตั้งในตารางที่ 4 จะพบได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับค่าความเค้นอัดตกค้างได้จากการกำหนดอัตราการครอบคลุมผิวที่ 200% ขนาดของเม็ดโลหะ 0.1 มิลลิเมตรและแรงดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล (CR₂ SS₂ AP₁) หรือสามารถเลือกระดับของแต่ละปัจจัยจากกราฟผลตอบสนองค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N Ratio (Signal-to-noise Ratio) ดังแสดงในรูป 3

กรณีค่ายิ่งมกยิ่งดี (The larger-the-better)

$$SN_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

เมื่อ n = จำนวนครั้งของเงื่อนไขการทดลอง

y_i = ผลการทดลองแต่ละครั้ง



ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยผลตอบแทนจากระดับของตัวแปรที่แตกต่างกัน

Exp.	CR	SS	AP	RS	S/N
1	1	1	1	1245	61.90
2	1	1	2	1142	61.14
3	1	1	3	1110	60.90
4	1	2	1	1332	62.49
5	1	2	2	1463	63.30
6	1	2	3	1252	61.94
7	1	3	1	1421	63.05
8	1	3	2	1291	62.21
9	1	3	3	1206	61.62
10	2	1	1	1348	62.59
11	2	1	2	1234	61.82
12	2	1	3	1080	60.66
13	2	2	1	1651	64.35
14	2	2	2	1571	63.92
15	2	2	3	1416	63.02
16	2	3	1	1628	64.32
17	2	3	2	1467	63.32
18	2	3	3	1233	61.81

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N Ratio ของระดับแต่ละปัจจัยของค่าความเค้นอัดตกค้าง

Level	Factors		
	CR	SS	AP
1	62.07	61.51	63.10*
2	62.86*	63.17*	62.62
3		62.71	61.66
Delta	0.79	1.66	1.44
Rank	3	1	2

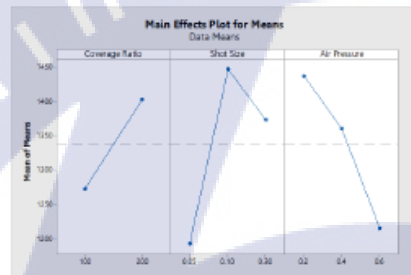
ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยของระดับแต่ละปัจจัยของค่าความเค้นอัดตกค้าง

Level	Factors		
	CR	SS	AP
1	1273	1193	1437
2	1403	1447	1361
3		1374	1216
Delta	120	254	221
Rank	3	1	2

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 12
20 สิงหาคม 2564 ณ โรงแรมดิเอ็มโพเรียม โฮเทล แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์โคราช
อำนาจเมือง จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 3 กราฟผลตอบสนองค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อ
สิ่งรบกวน S/N Ratio ของค่าความเค้นอัดตกค้าง



รูปที่ 4 กราฟผลตอบสนองค่าเฉลี่ยของค่าความเค้น
อัดตกค้าง

ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของการ
ทดลองและอิทธิพลหลักของกระบวนการยิงอนุภาค
เชิงจะตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน
(Analysis of Variance) ของค่า S/N ratio ของความ

เค้นอัดตกค้าง สำหรับการทดลองนี้กำหนดให้ความ
เชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ได้ทดสอบดังในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ S/N
Ratio ของค่าความเค้นอัดตกค้าง

Factor	SS	DF	MS	F	P
CR	2.8433	1	2.8433	14.68	<0.05
SS	8.8743	2	4.4371	22.91	<0.05
AP	6.4361	2	3.2180	16.62	<0.05
Error	2.3232	12	0.1936		
Total	20.4770	17			

จากตารางที่ 6 พบว่าค่า P-Value ของอัตราการใช้
ครอบคลุมผิว (CR) ขนาดเม็ดโลหะ (SS) และแรงดัน
ลม (AP) มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยทั้ง 3
ปัจจัยมีผลต่อความเค้นอัดตกค้างอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อนำปัจจัยที่เหมาะสมของการยิงอนุภาคเชิงไป
พยากรณ์แบบวิธีการทางสถิติเชิงสมการที่ 2 ค่าที่
เหมาะสมที่ได้คือ 1609 เมกะปาสกาล

$$Y_{optimal} = m + \sum_{j=1}^n [(m_{i,j})_{opt} - m] \quad (2)$$

เมื่อ $(m_{i,j})_{opt}$ = ค่าที่เหมาะสมตามกรณี

m = ค่าเฉลี่ยรวม

n = จำนวนปัจจัย

จากนั้นทำการทดลองยืนยันผลตามเงื่อนไขที่เหมาะสมผลจากการกำหนดอัตราการครอบคลุมผิวที่ 200% ขนาดของเม็ดโลหะ 0.1 มิลลิเมตรและแรงดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล (CR₂ SS₂ AP₁) ที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการทดลองยืนยันผล

Exp.	CR	SS	AP	RS
1	2	2	1	1662
2	2	2	1	1639
3	2	2	1	1612

ทำการยืนยันผลด้วย T-test โดยใช้สมการที่ 3 แล้วนำค่า t ที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่า t ที่ช่วงระดับความเชื่อมั่นที่ 95% หรือระดับนัยสำคัญ 0.05 ของ 3 ตัวอย่างการทดลอง แบบ Two-tails มีค่าเท่ากับ 4.303 โดยถ้าหากค่า t ที่คำนวณได้จากสมการที่ 3 มีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤต 4.303 จะสามารถยอมรับได้ว่าผลการทดลองกับค่าพยากรณ์ไม่แตกต่างกันผลการทดสอบดังตารางที่ 8

$$t = \frac{(\bar{X} - \mu)}{\left(\frac{SD}{\sqrt{n}}\right)} \quad (3)$$

เมื่อ $\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยของการยืนยันผล

μ = ค่าพยากรณ์แบบทฤษฎี

SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

n = จำนวนการทดลองยืนยัน

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบค่า t ของการทดลองยืนยันผล

	RS	$t < 4.303$	result
Prediction	1609	1.985 <	Accept
Confirmation	1638	4.303	able

หลังจากนั้นทำการหาช่วงความเชื่อมั่นจากการยืนยันผลที่ได้จากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสามารถหาช่วงความเชื่อมั่นได้ดังสมการที่ 4 ซึ่งค่าความเค้นอัดตกค้างที่จะได้จากการกำหนดอัตราการครอบคลุมผิวที่ 200% ขนาดของเม็ดโลหะ 0.1 มิลลิเมตรและแรงดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล (CR₂ SS₂ AP₁) โดย 95% จะมีค่าความเค้นอัดตกค้างอยู่ระหว่าง 1575 เมกะปาสคาล ถึง 1699 เมกะปาสคาล และส่วนที่เหลือ 5% จะมากและน้อยกว่าช่วงดังกล่าวในจำนวนเท่าๆกัน คือ 2.5%

$$\text{Lower} = \mu \geq \bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} S / \sqrt{n}$$

$$\text{Upper} = \mu \leq \bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} S / \sqrt{n} \quad (4)$$

เมื่อ $\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยของการยืนยันผล

μ = ค่าเฉลี่ยช่วงความเชื่อมั่นประมาณการ

n = จำนวนการทดลองยืนยัน

S = ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$ = ค่าสถิติ t ที่เปิดได้จากตารางที่

$df = n-1$

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 12

20 สิงหาคม 2564 ณ โรงแรมดิเอ็มปาร์ค โฮเทล แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์โคราช

อำนาจเมือง จังหวัดนครราชสีมา

4. สรุปผล

บทความนี้นำเสนอวิธีการเลือกปัจจัยและระดับที่เหมาะสมของกระบวนการอึงอนุภาคแข็ง ที่ให้ความเค้นอัดตกค้างที่ผิวของวัสดุแม่พิมพ์ชุบชั้นรูปร้อนโดยใช้วิธีของทางอุทกวิทยาจากปัจจัยที่ต้องการศึกษา คือ อัตราการครอบคลุมผิว ขนาดของเม็ดโลหะและแรงดันลม ซึ่งผลการทดลองพบว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่อความเค้นอัดตกค้างของชิ้นงานทดลองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และการวิเคราะห์แบบวิธีทางอุทกวิทยาที่เหมาะสมคือ อัตราการครอบคลุมผิวที่ 200 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเม็ดโลหะขนาด 0.1 มิลลิเมตรและแรงดันลมที่ 0.2 เมกะปาสกาล ซึ่งระดับปัจจัยที่เหมาะสมดังกล่าวจะส่งผลต่อการปรับปรุงผิวของชิ้นงานให้ดีขึ้น โดยผิวของชิ้นงานมีความเค้นอัดตกค้างสูงซึ่งค่าความเค้นอัดตกค้างจะเป็นตัวต้านทานการสึกหรอจากความล้าของวัสดุได้และเป็นแนวทางในการเพิ่มคุณภาพของแม่พิมพ์และลดต้นทุนการผลิตนำมาซึ่งแนวทางในการแก้ปัญหาการผลิตในภาคอุตสาหกรรมการชุบชั้นรูปร้อนได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่สนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้และขอขอบคุณบริษัท Oxiso (thailand) co. ltd ที่สนับสนุนการทดลองการอึงอนุภาคแข็งและอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffract meter)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gronostajski Z., Kaszuba M., Hawryluk M., Marciniak M., Zwierzchowski M., Mazurkiewicz A. and Smolik J. (2015). Improving durability of hot forging tools by applying hybrid layers. METABK, Vol. 54 (4), pp.687-690
- [2] Gronostajski Z., Kaszuba M., Widomski P., Smolik J., Ziemba J. and Hawryluk M. (2019). Analysis of wear mechanisms of hot forging tools protected with hybrid layers performed by nitriding and PVD coatings deposition. Wear, Vol. 420-421, pp.269-280.
- [3] Medvedeva A., Bergstrom J., S. Gunnarsson S., J. Andersson J. (2009). High-temperature properties and microstructural stability of hot-work tool steels. Materials Science and Engineering, A523 (1-2), pp.39-46.
- [4] Feyzullahoglu E., Karabay S. (2014). Processing damages of material components of aerial conductors and their tribological behaviors under dry friction. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol.14 (4), pp.682-690.
- [5] Hawryluk M., Marciniak M., Misiun G. (2014). Possibilities of investigating abrasive wear in conditions close to those prevailing in



industrial forging processes. Maintenance and Reliability, Vol.16 (4), pp.600-607.

[6] Gronostajski Z., Hawryluk M., Krawczyk J., Marciniak M. (2013). Numerical modelling of the thermal fa-tigue of steel WCLV used for hot forging. Maintenance and Reliability, Vol.15 (2), pp.129-133.

[7] Harada Y., Fukaura K., Haga S. (2007). Influence of micro shot peening on surface layer characteristics of structural steel. Material Processing Technology, Vol.191, pp.297-301.

[8] Oxiso. "OX-FSP" .Online.Available: <http://www.oxiso.co.jp/th/product>, access on 9/09/2019

[9] Champaigne J. Shot Peening Overview. [Online] document <http://www.shotpeener.com/abpnt/shot-peening>, access on 2/12/2020.

[10] He B., Soady K.A., Mellor B.G., Harrison G. and Reed P.A.S. (2015). Fatigue crack growth behaviour in the LCF regime in a shot peened steam turbine blade material. International Journal of Fatigue, Vol.82, pp.280–291.

[11] Bag A., Lévesque M. and Brochu M. (2019). Effect of shot peening on short crack

propagation in 300M steel. International Journal of Fatigue, Vol.131, pp.105346.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 12

20 สิงหาคม 2564 ณ โรงแรมดิเอ็มโพเรียม โฮเทล แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์อาคาร

ผ่านจอเมือง จังหวัดนครราชสีมา





การประชุมวิชาการ

วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 12 ประจำปี 2564

วิศวกรรมในอนาคตสู่ชีวิตวิถีใหม่หลังโรคระบาดใหญ่

(Engineering in the Future under the New Normal after PANDEMIC)

ขอมอบเกียรติบัตรฉบับนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

จตุรงค์ อูบล และ กอน แก้วถก

ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความวิจัยหัวข้อ

การสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการยิงอนุภาคแข็งบนวัสดุแม่พิมพ์ขึ้นรูปโดยวิธีทากูชิ

(Optimization of Solid Particle Bombarding Process on Hot Forging Die Material by Taguchi Method)

วันที่ 20 สิงหาคม 2564 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญธานี (รูปแบบออนไลน์)


 (รองศาสตราจารย์ ดร.นงนทีศักดิ์ ธรรมนิษฐ์)
 รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิเทศสัมพันธ์
 รักษาการแทน คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์


The 12th Engineering, Science, Technology and Architecture Conference 2021 (ESTACON 2021)