



การศึกษาประสิทธิภาพทิศทางการกัดงานที่มีผลต่อความหยาบผิวโดยวิธีการทากุชิ
A Study direction milling affecting surface roughness by the Taguchi method

คมพันธ์ ชมสมุทร
สุกัญญา เชิดชุงาม



งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้หน่วยงาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



การศึกษาประสิทธิภาพทิศทางการกัดงานที่มีผลต่อความหยาบผิวโดยวิธีการทากุชิ
A Study direction milling affecting surface roughness by the Taguchi method



คมพันธ์ ชมสมุทร
สุกัญญา เชิดชุงาม

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้หน่วยงาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อโครงการวิจัย	การศึกษาประสิทธิภาพทิศทางการกัดงานที่มีผลต่อความหยาบผิวโดยวิธีการทาทุชิ
หัวหน้าโครงการวิจัย	คมพันธ์ ชมสมุทร
ผู้ช่วยวิจัย	สุกัญญา เชิดชูงาม

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้หน่วยงาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

การทดสอบและวัดประสิทธิภาพทิศทางการกัดชิ้นงานด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ ด้วยดอกกัดขนาด 10 มิลลิเมตร โดยทิศทางการกัดต่างกันกัดตามเข็มนาฬิกา G41 และกัดทวนเข็มนาฬิกา G42 มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดประสิทธิภาพของทิศทางการกัดชิ้นงานโดยทดสอบกับวัสดุทองเหลืองและอลูมิเนียม จากการทดสอบประสิทธิภาพทิศทางการกัดชิ้นงานโดยกำหนดให้ อัตราการป้อน 100 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที และความลึกในการกัดชิ้นงาน 3 มิลลิเมตร เพื่อวัดประสิทธิภาพของทิศทางการกัดชิ้นงานพบว่า การกัดแบบตามเข็มนาฬิกา กับทวนเข็มนาฬิกา ให้ค่าความหยาบผิวที่ดีกว่า และจากการทดสอบระดับปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของทองเหลืองและอลูมิเนียม โดยปรับเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน ทดสอบจำนวน 4 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ อัตราการป้อน 80, 100 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วรอบ 1200, 1500 และ 1800 รอบต่อนาที ความลึกในการกัดชิ้นงาน 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร และทิศทางในการกัดแบ่งออกเป็น 2 ปัจจัย ได้แก่ กัดตามเข็มนาฬิกา G41 กัดทวนเข็มนาฬิกา G42 โดยการทดสอบวัสดุทองเหลืองและอลูมิเนียม พบว่าทิศทางที่เหมาะสมสำหรับการกัดทองเหลือง คือ ทิศทางการกัดงาน G41 โดยกำหนดค่าความเร็วตัด เป็น 1200 เมตร/นาที ค่าอัตราป้อน เป็น 120 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกในการกัด เป็น 4 มิลลิเมตร ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานน้อยที่สุด โดยจากการทดสอบได้ค่าความหยาบผิวที่ 0.84 ไมโครเมตร ส่วน ทิศทางที่เหมาะสมสำหรับการกัดอลูมิเนียม คือ ทิศทางการกัดงาน G42 โดยกำหนดค่าความเร็วตัด เป็น 1200 เมตร/นาที ค่าอัตราป้อน เป็น 120 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกในการกัด เป็น 5 มิลลิเมตร ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานน้อยที่สุด โดยจากการทดสอบได้ค่าความหยาบผิวที่ 0.75 ไมโครเมตร

คำสำคัญ : ทิศทางการกัดงาน ความหยาบผิว วิธีการทาทุชิ

Researcher Title A Study direction milling affecting surface roughness by the
 Taguchi method
Researcher By Mr.Kompan Chomsamutr
 Miss Sukanya Cherdchoongam

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้หน่วยงาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560
Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

Abstract

A Study direction milling affecting surface roughness by the Taguchi method with a 10 mm. bite milling cutter, the direction of milling is clockwise, G41 and counter clockwise milling. G42 is intended to measure the milling direction of the workpiece by testing with brass and aluminum materials. By measuring the milling direction, the feed rate is 100 mm / min, the speed is 1500 rpm and the depth of milling is 3 mm. The clockwise and counterclockwise hands provide better surface roughness and, from the test, the factors that affect the roughness of the surface are brass and aluminum. The coefficient of variation in surface roughness of the test specimens was 4 factors, namely, feed rate of 80, 100 and 120 mm/min, speed of 1200, 1500 and 1800 rpm. The 3, 4 and 5 mm workpieces are machined and the milling direction is divided into two parts: G41 clockwise bite counterclockwise G42 brass and brass material testing. It is found that the correct direction for brass milling is the direction of machining G41, with a cutting speed of 1200 rpm. The feed rate is 120 mm/min. And the depth of bite is 4 mm. The surface roughness of the workpiece is minimal. The surface roughness is 0.84 μm . The optimum direction for aluminum milling is G42 cutting direction. The cutting speed is 1200 m/min. The feed rate is 120 mm/min. And the depth of biting is 5 mm. The surface roughness of the workpiece is minimal. The surface roughness was 0.75 μm .

Key words : direction milling, surface roughness, Taguchi method

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้หน่วยงาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และทดลองที่ห้องปฏิบัติการห้องปฏิบัติการเครื่องจักรกลอัตโนมัติ สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ผลการทำโครงการวิจัย เรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพทิศทางการกีดงานที่มีผลต่อความหยาบผิวโดยวิธีการทากูชิ ขอขอบคุณความช่วยเหลือจากส่วนงานต่างๆ ที่ได้สนับสนุนงานวิจัย จนกระทั่งประสบผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

นายคมพันธ์ ชมสมุทร
หัวหน้าโครงการ



สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 สมมติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	3
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย	3
1.6 สถานที่ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูลโครงการวิจัย	3
1.7 ระยะเวลาทำการวิจัย	4
1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องจักรกลอัตโนมัติ	5
2.2 คำสั่งต่างๆ ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม	6
2.3 การใช้คำสั่ง G40 คำสั่งยกเลิกค่าชดเชยรัศมี G41 และ G42	9
2.4 เงื่อนไขการกลึง (Cutting Conditions)	10
2.5 การทดสอบสมมติฐาน	14
2.6 การออกแบบการทดลองโดยวิธีทาคูชิ	21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 การดำเนินงานและวิธีวิจัย	30
3.1 การกำหนดปัจจัยที่ต้องควบคุมและผลตอบสนองที่จะทำการศึกษา พร้อมทั้งกำหนดขอบเขตของการวิจัย	31
3.2 ออกแบบโปรแกรมเครื่องจักรกลอัตโนมัติในการทดสอบ	35
3.3 นำชิ้นงานทั้งหมดจากเงื่อนไขทดสอบการกัดงานจริง	38
3.4 ทดสอบและเก็บผลการทดลอง	42

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	45
4.1 วิธีการทากูชิสำหรับชิ้นงานทองเหลือง	45
4.2 วิธีการทากูชิสำหรับชิ้นงานอลูมิเนียม	57
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	70
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารอ้างอิง	73
ประวัติย่อผู้วิจัย	74



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ชุดคำสั่ง G-Code	7
2-2 ชุดคำสั่ง M-Code	8
2-3 พัฒนาการของการออกแบบการทดลอง	21
2-4 ตารางมาตรฐานของวิธีการทากูชิ (Standard Orthogonal Array)	24
2-5 ตัวอย่างจำนวนของปัจจัยและระดับปัจจัยของ Orthogonal Array L8(27) และ L12(211)	25
2-6 L8 Standard Array ที่ 2 ระดับปัจจัย	25
3-1 วัตถุประสงค์ของ ปัจจัยควบคุมและระดับของปัจจัยควบคุมในการทดลอง	31
3-2 การทดลองแบบ full factorial design	31
3-3 มาตรฐานของวิธีการทากูชิ (Standard Orthogonal Array)	33
3-4 แผนการทดลอง (Matrix Experiment) ที่เหมาะสม Orthogonal Array L9	34
3-5 แผนการทดลองโดยใช้ Orthogonal Array L9 ตามวิธีการทากูชิ แบบ Coded unit และ Uncoded unit โดยควบคุมทิศทางการกัดชิ้นงาน (G)	35
3-6 คำสั่งในการทดสอบกัดชิ้นงานคำสั่ง G41	36
3-7 คำสั่งในการทดสอบกัดชิ้นงานคำสั่ง G42	36
3-8 ความหยาบผิวของทองเหลืองที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G41	42
3-9 ความหยาบผิวของทองเหลืองที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G42	42
3-10 ความหยาบผิวของอลูมิเนียมที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G41	43
3-11 ความหยาบผิวของอลูมิเนียมที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G42	43
4-1 ความหยาบผิวของทองเหลืองที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G41	45
4-2 สูตรอัตราส่วน S/N คำนวณค่าความหยาบจากผลการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง	46
4-3 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เกลี่ยของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน	48
4-4 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน	50
4-5 ความหยาบผิวของทองเหลืองที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G42	51
4-6 สูตรอัตราส่วน S/N คำนวณค่าความหยาบจากผลการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง	53

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-7 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน	54
4-8 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน	56
4-9 ความหยาบผิวของอลูมิเนียมที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G41	57
4-10 สรุปร้อยส่วน S/N คำนวณค่าความหยาบจากผลการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง	59
4-11 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน	60
4-12 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน	62
4-13 ความหยาบผิวของอลูมิเนียมที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G42	63
4-14 สรุปร้อยส่วน S/N คำนวณค่าความหยาบจากผลการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง	65
4-15 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน	66
4-16 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน	68

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1	1
1-2	1
2-1	6
2-2	9
2-3	9
2-4	10
2-5	13
2-6	16
2-7	17
2-8	17
2-9	18
2-10	22
2-11	24
2-12	28
3-1	30
3-2	35
3-3	36
3-4	38
3-5	39
3-6	39
3-7	40
3-8	40
3-9	41
4-1	49
4-2	50
4-3	55
4-4	56
4-5	61
4-6	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-7	ความสัมพันธ์ของระดับต่างๆ ของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองกับ ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน	67
4-8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ S/N-Ratio ของความหยาบผิว (X)	68



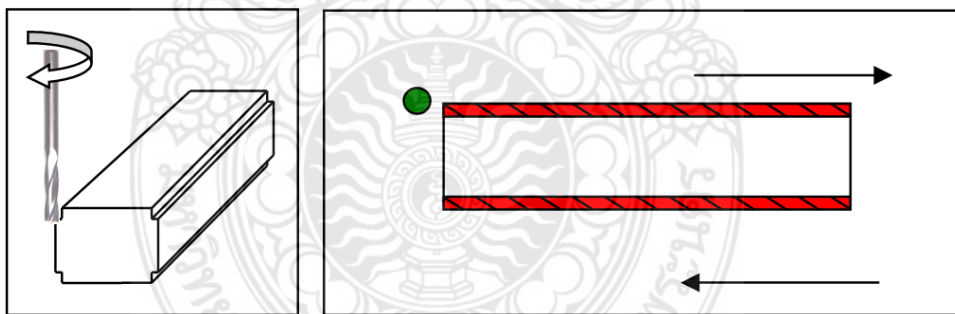
บทที่ 1

บทนำ

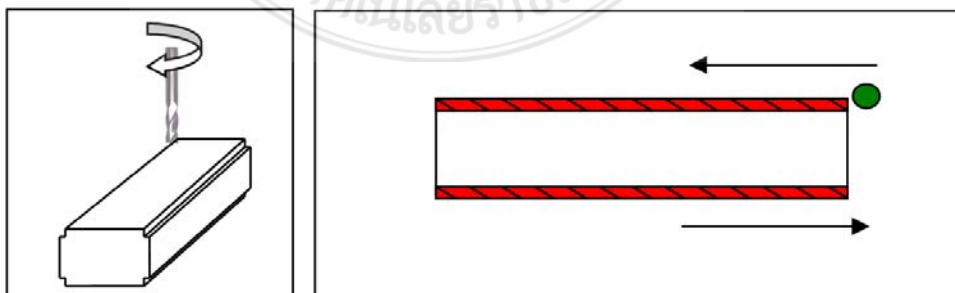
1.1 ความเป็นมาและที่มาของการวิจัย

ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นเรื่องคุณภาพของชิ้นงาน ต้นทุนกระบวนการผลิต และปัจจัยการผลิตอื่นๆ ซึ่งคุณภาพของชิ้นงานพิจารณาจากค่าความหยาบผิว และพิสัยของชิ้นงานกัดเป็นปัจจัยหลัก ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้เครื่องจักรกลอัตโนมัติ (Computerized Numerical Control) เครื่องมือ (Tools) และวิธีการในกระบวนการผลิต เป็นต้น โดยผู้ผลิตส่วนมากจะมองข้ามไปคือเรื่องของโปรแกรมที่มีผลต่อการกำหนดเงื่อนไขในการกัดงานที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเลือกทิศทางการกัดงานตามโปรแกรม G-Code ได้แก่ G41 และ G42 ซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่าความหยาบผิว และการสึกหรอของเครื่องมือ [1]

ในการกัดงานด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องมีการชดเชยรัศมีของดอกกัดเพื่อที่จะได้กำหนดค่าโคออดิเนตได้ง่ายขึ้น การชดเชยรัศมีของดอกกัดสามารถกำหนดได้ด้วย G41 เป็นการชดเชยรัศมีดอกกัดทางด้านซ้าย และ G42 เป็นการชดเชยรัศมีดอกกัดทางด้านขวาดังแสดงในภาพที่ 1-1 และ 1-2 [2]



ภาพที่ 1-1 เส้นทางการตัดเฉือน โปรแกรม G41



ภาพที่ 1-2 เส้นทางการตัดเฉือน โปรแกรม G42

ด้วยเหตุผลข้างต้นผู้วิจัยจึงเลือกที่จะศึกษาวิจัยเรื่องประสิทธิภาพทิศทางการกัดงานที่มีผลต่อความหยาบผิวโดยวิธีการทากูชิ ซึ่งเป็นการศึกษาเงื่อนไขในการกัดงานที่เหมาะสมที่ให้ค่าความหยาบผิวที่ดีที่สุด ภายใต้การกำหนดเงื่อนไขในการกัดงานที่ต่างกัน คือ ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกในการกัด (Depth of cut) โดยเลือกวิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ (Taguchi Method)

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความหยาบผิวและเงื่อนไขในการกัดงาน
- 1.2.2 เพื่อหาค่าประกอบเงื่อนไขในการกัดงานที่เหมาะสมที่สุด
- 1.2.3 เพื่อหารูปแบบทิศทางการกัดงานที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยดอกกัด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ใช้คำสั่งการกัดชิ้นงาน G41 และ G42
- 1.3.2 วัสดุที่ทำงานกัด คือ ทองเหลืองเกรด JIS H3250 C3604 หรือ ASTM B283 No.3600 และอลูมิเนียมเกรด (AL6061) ขนาด กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร และ กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร
- 1.3.3 ใช้ End Mill เหล็กกล้ารอบสูง HSSCo8 E2412100 4F 10×10×25×80 regular
- 1.3.4 เงื่อนไขการกัดชิ้นงานเป็นไปตามมาตรฐานของผู้ผลิต End Mill โดยใช้อัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed Rate) 100 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วรอบ (Cutting Speed) 1500 รอบต่อนาที ความลึกในการกัด (Depth of Cut) 3 มิลลิเมตร
- 1.3.5 ใช้เครื่องจักร CNC Milling รุ่น PC-Mill 155
- 1.3.6 ทดลองโดยไม่ใช้สารหล่อเย็น
- 1.3.7 ตรวจสอบความหยาบผิว (Ra) ในระยะเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของชิ้นงาน
- 1.3.8 เปรียบเทียบเงื่อนไขในการกัดงานที่เหมาะสมสำหรับวิธีทากูชิ (Taguchi method) ของเครื่องกัดอัตโนมัติ ยี่ห้อ EMCO รุ่น MILL 105 โดยใช้วัสดุทองเหลือง ทดสอบผลต่อคุณภาพผิวงาน โดยอยู่บนพื้นฐานของการเก็บข้อมูลตามวิธีการทากูชิ (Orthogonal Array L9) จากปัจจัย 3 ปัจจัยคือ ระยะป้อนลึก (Depth of Cut) ความเร็วตัด (Cutting Speed) และอัตราป้อน (Feed Rate) และในแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ (Level) เป็นการทดสอบแบบแฟ้ม

1.4 สมมติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ คือ การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการทดลองที่จะทำให้สามารถตีความหมายถึงสาเหตุและผลที่ต้องตัดสินใจได้ โดยพิจารณาความแตกต่างของข้อมูลจากสาเหตุที่สามารถควบคุมได้ ซึ่งจุดประสงค์สำคัญของการทดลอง คือ การยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) การค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) การทดลองกระทำได้ 2 วิธี คือ

- การทดลองปฏิบัติงานจริง (Physical Experiment)
- การทดลองด้วยการจำลองผล (Simulation)

1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นกับการกีดขวางงานด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ

1.5.2 สำนวจงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.5.3 ศึกษาความสัมพันธ์ของความหนาผิวและเลือกเงื่อนไขในการกัด ที่สำคัญในการศึกษา พร้อมทั้งกำหนดขอบเขตของการวิจัย

1.5.4 นำพารามิเตอร์ที่เลือกมาทำการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการทากูชิ

1.5.5 ดำเนินการทดลอง และเก็บรวบรวมข้อมูล

1.5.6 ทำการวิเคราะห์ผล เพื่อหาพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อปัญหาของกระบวนการด้วยวิธีการของทากูชิ

1.5.7 วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยของพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Regression)

1.5.8 เปรียบผลการทดลองระหว่างวิธีการของทากูชิและวิธีการวิเคราะห์การถดถอยของพื้นผิวผลตอบ และตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการทั้งสองกับค่าการทดลองจริง

1.5.9 เพื่อวิเคราะห์และปรับรูปแบบ (Model) อายุการใช้งานของเม็ดมิต และคุณภาพชิ้นงาน เพื่อให้ได้รูปแบบที่เหมาะสม

1.5.10 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.6 สถานที่ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูลโครงการวิจัย

สถานที่ทดลองและเก็บข้อมูล ห้องปฏิบัติการเครื่องจักรกลอัตโนมัติ สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1.7 ระยะเวลาทำการวิจัย

ระยะเวลาโครงการ ประมาณ 1 ปี (ตุลาคม 2559 – กันยายน 2560)

กิจกรรม	2559			2560									
	ตค	พย	ธค	มค	กพ	มีค	เมย	มิย	พค	กค	สค	กย	
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง													
2. ออกแบบการทดลอง													
3. เก็บข้อมูลจากการทดลองก่ดงาน													
4. สรุปผลการทดลอง													
5. เผยแพร่ผลงานวิจัย													

1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ

ด้านสังคมและชุมชน รวมถึงการเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1.8.1 ได้เสนอใจในการก่ดงานที่เหมาะสม มีผลต่อคุณภาพผิวงาน ของเครื่องก่ดอัตโนมัติ

1.8.2 สามารถลดจำนวนของเสียที่เกิดจากคุณภาพผิวงานไม่ได้ตามมาตรฐาน อันเกิดจากการกำหนดทิศทางการก่ดงานที่ผิดพลาด



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

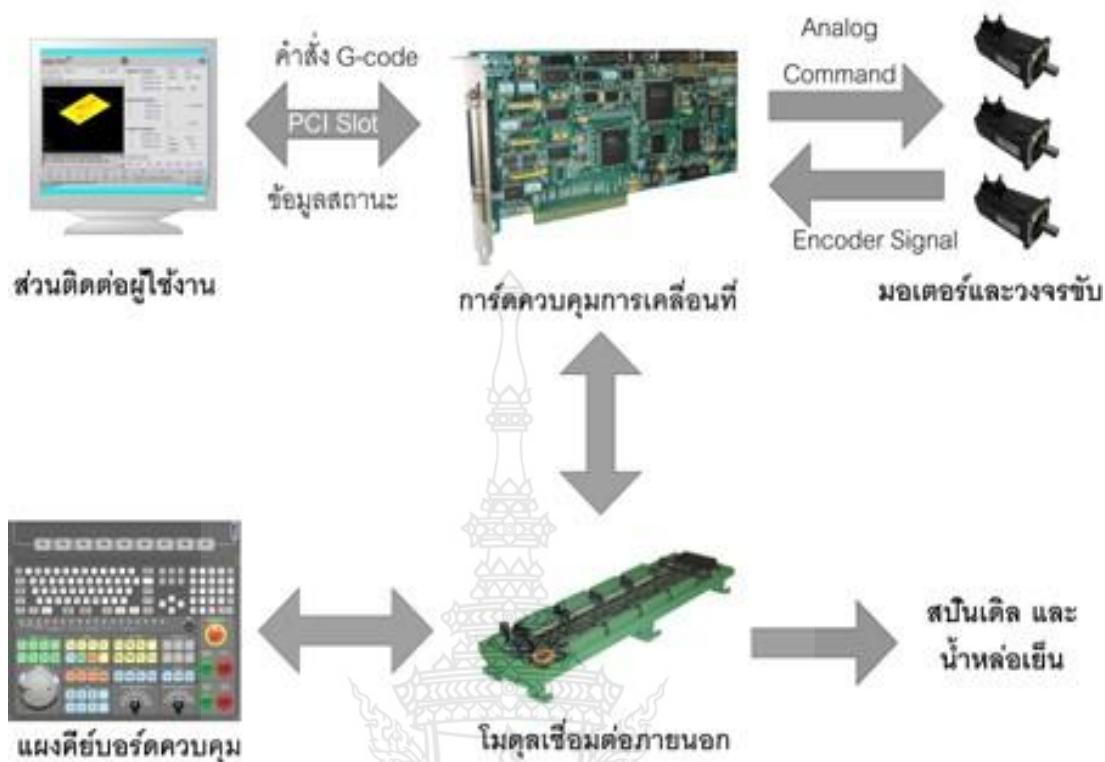
ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเอกสารงานที่เกี่ยวข้องต่างๆ ได้ทำการแยกรายละเอียดเกี่ยวกับโครงการดังต่อไปนี้

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องจักรกลอัตโนมัติ

เครื่องจักรซีเอ็นซีเป็นเครื่องจักรที่ถูกควบคุมการทำงานด้วยอนุกรมของรหัสควบคุมเครื่องรหัสประกอบไปด้วย ตัวเลข ตัวอักษร และสัญลักษณ์อื่น ๆ รหัสเหล่านี้จะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วส่งไปกระตุ้นให้มอเตอร์และอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องจักรทำงานในลักษณะการเคลื่อนที่และการปรับเปลี่ยนอัตราความเร็วในการเคลื่อนที่ รวมถึงการทำงานอื่น ๆ ด้วย และการควบคุมเครื่องจักรที่ง่ายขึ้นเหล่านี้จะเรียกว่า เครื่องจักรซีเอ็นซี (Computerized Numerical Control)

เครื่องซีเอ็นซี (CNC) มีระบบควบคุมที่ป้อนข้อมูลโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของเครื่องผ่านแผงคีย์บอร์ด หรือแป้นพิมพ์ (Key Board) หรือเทปแม่เหล็ก (Magnetic Tape) เมื่อระบบควบคุมอ่านโปรแกรมเสร็จไปควบคุมให้เครื่องจักรกลทำงาน โดยอาศัยมอเตอร์ป้อน (Feed Motor) เพื่อให้แท่นเลื่อนเคลื่อนที่ตามคำสั่ง เช่น เครื่องกลึง ซีเอ็นซี (CNC Machine) ก็จะมีมอเตอร์ในการเคลื่อนที่ที่อยู่ 2 ตัว หรือเครื่องกัด ซีเอ็นซี ก็จะมีมอเตอร์ป้อน 3 ตัว เมื่อระบบควบคุมอ่านโปรแกรมเสร็จ จะเปลี่ยนรหัสโปรแกรมเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อควบคุมให้มอเตอร์ทำงาน แต่เนื่องจากสัญญาณที่ออกจากระบบควบคุมนี้มีกำลังน้อย ไม่สามารถไปหมุนขับให้มอเตอร์ทำงานได้ ดังนั้น จึงต้องส่งสัญญาณนี้เข้าไปในภาคขยายสัญญาณของระบบขับ (Drive Amplified) และส่งสัญญาณต่อไปยังมอเตอร์ป้อน แนวแกนตามที่โปรแกรมกำหนด ทั้งความเร็วและระยะทาง การเคลื่อนที่ของแท่นเลื่อนจะถูกโปรแกรมไว้ทั้งหมด เพื่อควบคุมเครื่องจักรซีเอ็นซี (CNC) และมีเครื่องมืออุปกรณ์ที่ตรวจสอบตำแหน่งของแท่นเลื่อน เรียกว่า ระบบวัดขนาด (Measuring System) ซึ่งประกอบด้วยพื้นที่ระนาบแนวตรง (Liner Scale) มีจำนวนเท่ากับจำนวนแนวแกนในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกล ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับระยะทางที่แท่นเลื่อนเคลื่อนที่กลับไปยังระบบควบคุม ทำให้ระบบควบคุมรู้ทิศทางแท่นเลื่อนเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางเท่าใด

จากหลักการควบคุมการทำงานดังกล่าว ทำให้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีสามารถผลิตชิ้นงานให้มีรูปร่าง และรูปทรงให้มีขนาดตามที่ลูกค้าต้องการได้ เนื่องจากการสร้างและการทำงานที่เหนือกว่าเครื่องจักรกลทั่วไป จึงทำให้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากในปัจจุบันนี้ หากต้องการผลิตสินค้าให้ได้จำนวนมากๆ และลดจำนวนระยะเวลาการผลิตของสินค้า เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าและเที่ยงตรง



ภาพที่ 2-1 ระบบการทำงานของเครื่องจักรกลอัตโนมัติหรือเครื่องซีเอ็นซี

2.2 คำสั่งต่างๆ ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม

โค้ด หรือ ชุดคำสั่งที่ใช้ในการเขียนเอ็นซีโปรแกรม มี 3 ประเภท คือ G-Code, M-Code และ ชุดคำสั่งอื่นๆ ซึ่งชุดคำสั่งแต่ละประเภทมีหน้าที่แตกต่างกันไป ดังนี้

2.2.1 คำสั่ง G-Code เป็นชุดคำสั่งประเภทหนึ่งในการเขียนโปรแกรมติดต่อกับเครื่องจักรเคลื่อนที่ไปตามคำสั่งในรูปแบบการเคลื่อนที่แบบรูปเลขาคณิต เช่น เส้นตรง เส้นโค้ง วงกลม หรือเคลื่อนที่แบบวิถีจักรและเป็นชุดคำสั่งกำหนดค่าต่างๆ ให้กับเครื่องจักร ได้แก่ การกำหนดระนาบการทำงาน กำหนดหน่วยวัด กำหนดประเภทการกำหนดพิกัด

2.2.2 คำสั่ง M-Code นอกเหนือจาก G-Code แล้วจะต้องมีคำสั่งที่เครื่องจักรกลอัตโนมัติต้องใช้ในกระบวนการแมชชีนต่างๆ เช่น การใช้สปีดเทลหมุนในทิศที่ต้องการการเปลี่ยนทูลการใช้ น้ำหล่อเย็น (Coolant) การหยุดสปีดเทลและการหยุดโปรแกรมโดยคำสั่งเหล่านี้กำหนดให้ใช้เป็นคำสั่ง M-Code

2.2.3 ชุดคำสั่งอื่นๆ เป็นชุดคำสั่งหรืออักษรที่ช่วยในการเขียนโปรแกรมเอ็นซีติดต่อกับเครื่องจักรที่นอกเหนือจาก G-Code และ M-Code

ตารางที่ 2-1 ชุดคำสั่ง G-Code

CNC Milling G-Code List	
ชุดคำสั่ง G-Code	ลักษณะการทำงาน (Description)
G00	การเคลื่อนที่เชิงเส้นอย่างรวดเร็ว
G01	การเคลื่อนที่เชิงเส้นที่อัตราการป้อน
G02	การเคลื่อนที่เป็นแนวโค้งตามรัศมี มีทิศทางการเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกา
G03	การเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นโค้งตามรัศมี มีทิศทางการเคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกา
G04	เป็นคำสั่งให้หยุดทำงานชั่วขณะในลักษณะของการหน่วง
G17	การเลือกพื้นผิวบนระนาบ X Y
G18	การเลือกพื้นผิวบนระนาบ ZX
G19	การเลือกพื้นผิวบนระนาบ ZY
G28	การกลับสู่จุดที่ใช้ในการอ้างอิงของเครื่อง
G30	การกลับจุดอ้างอิงของเครื่องจากการกำหนดข้อมูลในเครื่อง
G40	การยกเลิกค่าชดเชยรัศมี
G41	การกำหนดค่าชดเชยรัศมีไปทางด้านซ้าย
G42	การกำหนดค่าชดเชยรัศมีไปทางด้านขวา
G43	การกำหนดความยาวของมิตกัตที่มีค่าบวก
G44	การกำหนดความยาวของมิตกัตที่มีค่าลบ
G49	ยกเลิกค่าความยาวของมิตกัต
G53	การเลือกพิกัดเครื่องจักรกลอัตโนมัติ
G54	กำหนดตำแหน่งงานในข้อมูลที่ 1
G55	กำหนดตำแหน่งงานในข้อมูลที่ 2
G56	กำหนดตำแหน่งงานในข้อมูลที่ 3
G57	กำหนดตำแหน่งงานในข้อมูลที่ 4
G58	กำหนดตำแหน่งงานในข้อมูลที่ 5
G59	กำหนดตำแหน่งงานในข้อมูลที่ 6
G68	การลอกแบบงานโดยหมุนรอบจุดอ้างอิง
G69	ยกเลิกการลอกแบบงาน
G73	การเจาะแบบหยุดให้คายเศษ
G74	การทำเกลียวด้วยการทำงานอย่างซ้ำๆ
G76	การคว้านรูแบบละเอียด
G80	ยกเลิกการเจาะ การคว้านในแบบต่างๆ
G81	การเจาะแบบไม่ยก (Spot Drilling)

CNC Milling G-Code List	
ชุดคำสั่ง G-Code	ลักษณะการทำงาน (Description)
G82	การเจาะแบบไม่ยก (Counter Boring)
G83	การเจาะลึกแบบยกคายเศษ
G84	การทำเกลียวในแบบ (Tapping)
G85	การคว้านรูแบบคว้านหยาบ
G86	การคว้านรูแบบคว้านหยาบ
G87	การคว้านรูแบบคว้านหยาบ
G88	การคว้านรูแบบคว้านหยาบเป็นระยะๆ
G89	การคว้านรูแบบคว้านหยาบ
G90	วัดระยะจากจุดศูนย์งานทุกครั้ง (Absolute System)
G91	วัดระยะจากจุดเริ่มงานทุกครั้ง (Increment System)
G92	การเปลี่ยนจุดศูนย์ของงานที่ใช้อ้างอิง
G98	การเปลี่ยนตำแหน่งเท่ากับค่า G43

ตารางที่ 2-2 ชุดคำสั่ง M-Code

CNC Milling M-Code List	
คำสั่ง M-Code	ลักษณะการทำงาน (Description)
M00	หยุดการทำงานของโปรแกรม
M01	หยุดการทำงานชั่วคราว
M02	จบการทำงานของโปรแกรม
M03	หมุนหัว (Spindle) ตามเข็มนาฬิกา
M04	หมุนหัว (Spindle) ทวนเข็มนาฬิกา
M05	หยุดการหมุนของหัว (Spindle)
M06	เปลี่ยนเครื่องมือ
M07	เปิดน้ำหล่อเย็น (Coolant On)
M08	ปิดน้ำหล่อเย็น (Coolant Off)
M09	ปิดน้ำหล่อเย็น
M19	หัวอยู่ในตำแหน่งเปลี่ยนทูล (tool)
M28	คำสั่งการเลื่อนกลับตำแหน่งอ้างอิง
M29	จุดเข็มงวด
M30	ส่วนจบโปรแกรม
M41	เลือกรอบต่ำ

CNC Milling M-Code List	
คำสั่ง M-Code	ลักษณะการทำงาน (Description)
M42	เลือกรอบสูง
M94	ยกเลิกการสะท้อน
M95	ภาพสะท้อนแกน X
M96	ภาพสะท้อนแกน Y
M98	เรียกใช้โปรแกรมย่อย
M99	ยกเลิกโปรแกรมย่อย

2.3 การใช้คำสั่ง G40 คำสั่งยกเลิกค่าชดเชยรัศมี G41 และ G42

การทำงานที่มีคำสั่งการชดเชยรัศมีของคัตเตอร์จำเป็นจะต้องสั่งยกเลิกการทำงานครั้งนั้นเสียก่อนและคำสั่งยกเลิกก็คือ G40 การยกเลิกคำสั่งนี้จะต้องให้ G40 อยู่บรรทัดเดียวกับ G00 หรือ G01 โดยปกติ G00 เขียนโปรแกรมในจุดที่มีการเปลี่ยนเครื่องมือ

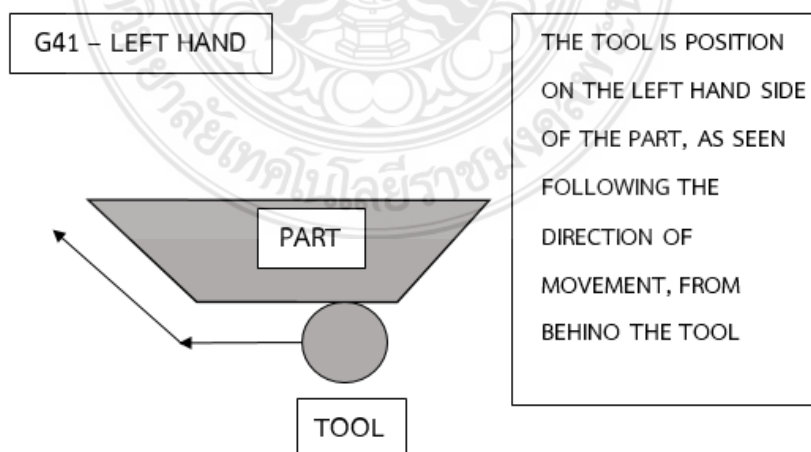
2.3.1 G41 การชดเชยรัศมีคัตเตอร์ด้านซ้ายมือ

การที่จะใช้ G41 เขียนโปรแกรมทำงานจะต้องให้คัตเตอร์เริ่มเดินจากจุดศูนย์กลางของงานด้านซ้ายมือของเราและขึ้นไปตามแนวแกน Y

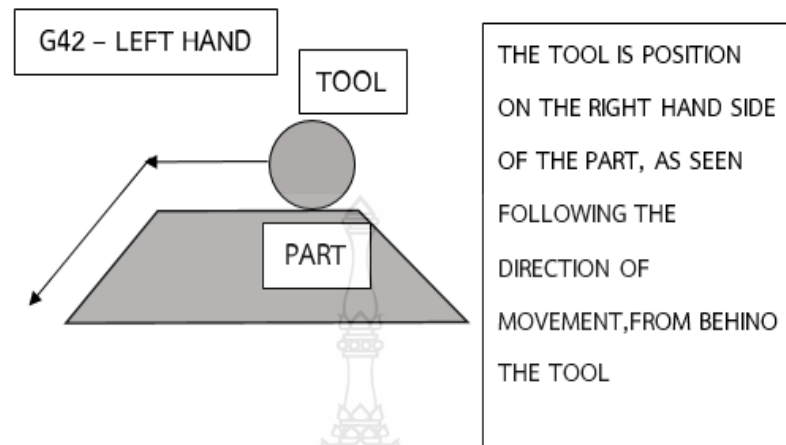
ค่าพารามิเตอร์ H จะเป็นตัวกำหนดการออฟเซตรัศมีของคัตเตอร์และต้องเก็บข้อมูลของรัศมีให้ตรงกับพารามิเตอร์ G41 จะเป็นตัวเรียกมาใช้เอง

2.3.2 G42 การชดเชยรัศมีคัตเตอร์ด้านขวามือ

การที่จะใช้ G42 เขียนโปรแกรมทำงานจะต้องให้คัตเตอร์เริ่มเดินจากจุดศูนย์กลางของงานด้านขวามือของเราและขึ้นไปตามแนวแกน Y ซึ่งสวนทางกับ G41 ส่วนข้อมูลอื่นๆ ก็เหมือนๆกับ G41



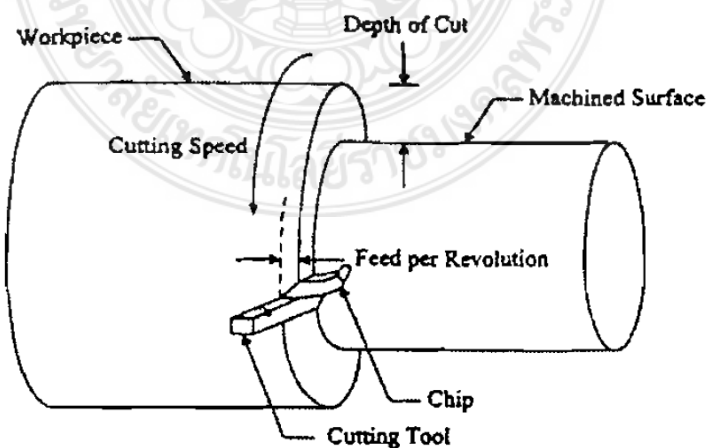
ภาพที่ 2-2 รูปแบบการทำงานของคำสั่งการกำหนดขนาดหน้าตัด G41



ภาพที่ 2-3 รูปแบบการทำงานของคำสั่งการกัดตามเข็มนาฬิกา G42

2.4 เงื่อนไขการกลึง (Cutting Conditions)

เงื่อนไขการกลึงถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการกลึงชิ้นงานให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ และยังใช้เป็นตัวควบคุมประสิทธิภาพและความสามารถของกระบวนการกลึงได้อย่างดีหากเลือกใช้ได้อย่างถูกต้องใช้ได้อย่างถูกต้องหรือเหมาะสมในแต่ละกระบวนการทำงาน [3] ซึ่งในงานกลึงโลหะส่วนใหญ่จะใช้เงื่อนไขลักษณะเดียวกันนี้เป็นพารามิเตอร์ควบคุม (Control Parameter) ที่สามารถปรับเปลี่ยนให้มีความเหมาะสมในแต่ละองค์ประกอบของกระบวนการ ดังนั้นการกำหนดหรือเลือกใช้เงื่อนไขการกลึงจึงจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบต่างๆ ในกระบวนการกลึงปอกชิ้นงานให้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างบรรลุเป้าหมายที่ต้องการ โดยมีองค์ประกอบหลักของเงื่อนไขการกลึง [4] ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2-4 องค์ประกอบหลักในการกลึงปอกผิว (Graham T. Smith. 1988)

2.4.1 ความเร็วตัด (Cutting Speed)

ความเร็วตัด หมายถึง ความเร็วที่ปลายของเครื่องมือตัดหรือมีดกลึงในขณะที่ทำการตัดเฉือนชิ้นงาน ตามทิศทางของการตัดโดยวัดจากระยะความยาวของขอบเนื้อโลหะที่ถูกตัดเฉือนผ่ายปลายคมตัด ในระยะเวลา 1 นาที โดยที่หน่วยเป็นเมตร (ระบบ ISO)

ในการเลือกใช้ค่าความเร็วตัดที่เหมาะสม จะต้องพิจารณาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบดังต่อไปนี้

- วัสดุคมตัด (Cutting Tool Materials)

ระหว่างการผลิตที่เศษโลหะถูกตัดออกมาจะมีดกลึงจะได้รับแรงกดและมีอุณหภูมิสูงมาก โดยเฉพาะการกลึงที่ความเร็วสูงๆ เพื่อยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานและป้องกันไม่ให้มีดกลึงเสียหายก่อนเวลาที่เหมาะสม ต้องมีการควบคุมและเลือกใช้วัสดุคมตัดให้เหมาะสมกับงานและต้นทุนในการผลิตด้วย

- วัสดุชิ้นงาน (Work piece Materials)

การเลือกใช้ความเร็วตัดให้เหมาะสมกับวัสดุงานสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือความสามารถในการตัดเฉือนของวัสดุ 3 ส่วนหลัก คือ ความเร็วตัดที่ทำให้ชิ้นงานออกมาดีทำให้อายุการใช้มีดยาวนาน ใช้แรงและกำลังในการตัดเฉือนต่ำ โดยทั่วไปแล้วข้อมูลของ

- อัตราป้อน (Rate of Feed)

โดยทั่วไปแล้วถ้าอัตราป้อน (Feed) เพิ่ม ความเร็วตัด (Cutting Speed) จะต้องลดลง เมื่อความลึกป้อนตัดคงที่ และถ้าความเร็วตัดเพิ่มอัตราป้อนจะต้องลดลงเพื่อให้ความสามารถของการตัดอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

- ความลึกป้อนตัด (Depth of Cut)

โดยทั่วไปแล้วถ้าป้อนตัดลึกจะใช้ความเร็วตัดต่ำกว่าป้อนตัดตื้น เนื่องจากมีผลต่อความสามารถของการตัดอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

- รูปแบบของคมตัด (Tool Geometry)

รูปแบบที่ต้องใช้หน้าสัมผัสในการตัดชิ้นงานหลายๆ จะใช้ความเร็วตัดที่ต่ำเนื่องจากมีผลต่อความสามารถของการตัดเฉือนเช่นเดียวกัน นอกจากนั้นการออกแบบมุมมีดสำหรับการกลึงยังมีผลต่อความเร็วรวมอีกด้วย

- กำลังของเครื่องจักรหรือสภาพเครื่อง (Power of Machines)

- อุปกรณ์จับยึด (Works Holding)

อุปกรณ์จับยึดและวิธีการจับยึด เช่นในกรณีชิ้นงานที่ถูกจับหัวจับ (Chuck) ซึ่งไหล่ออกมาสั้นๆ จะใช้ความเร็วตัดได้สูงกว่าชิ้นงานที่ถูกจับไหล่ออกมาจากหัวจับยาวๆ

- การระบายความร้อน (Cutting Lubricant)

ความเร็วตัดของการกลึงวัสดุบางชนิด อาจเพิ่มให้สูงขึ้นได้ เมื่อมีการระบายความร้อนที่ถูกต้อง

- อายุการใช้งานของมีดกลึง (Tool Life)

ในปัจจุบันถือได้ว่าเป็นสิ่งที่สำคัญต่อต้นทุนในการผลิตเป็นอย่างแรกโดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานจำนวนมาก (Mass Production) มักจะมีการควบคุมความเร็วตัดให้เหมาะสมกับอายุการใช้งานมีดกลึง เพื่อให้ต้นทุนที่เกิดจากการปรับเทียบเครื่องมืออยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

จะเห็นได้ว่ามีพารามิเตอร์มากมายที่มีผลกระทบต่อความเร็วตัด ดังนั้นการเลือกใช้ความเร็วที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการผลิตจึงขึ้นอยู่กับการตัดสินใจในการเลือกใช้ข้อมูลสำหรับการทำงานรวมทั้งประสบการณ์ที่มีอยู่ด้วย

จากข้างต้นที่กล่าวมาว่าความเร็วตัดจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบสูงสุดที่อยู่ระหว่างคมตัดชิ้นงานขณะตัดเฉือน ดังนั้นการตัดสินใจเลือกความเร็วตัดสำหรับงานกลึงในเบื้องต้นจะอาศัยความสัมพันธ์ของการคำนวณดังนี้

$$v = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad (\text{เมตรต่อนาที}) \quad (2-1)$$

เมื่อ v แทนความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)

D แทนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

N แทนความเร็วรอบของเพลาหมุน (รอบต่อนาที)

โดยทั่วไปแล้วงานกลึงจะกำหนดความเร็วรอบในการหมุนของชิ้นงานคงที่โดยในการกลึงปอกเพลลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่จะกำหนดค่าความเร็วรอบคงที่ สำหรับการป้อนค่าความเร็วตัดในเครื่องกลึงอัตโนมัติ จะขึ้นอยู่กับชนิดของระบบควบคุมของเครื่องจักรด้วย โดยมีวิธีการป้อนข้อมูล 2 วิธีคือ

- ผู้ทำงานเลือกใช้ค่าความเร็วรอบที่เหมาะสม สำหรับงานกลึงชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและวัสดุต่างกัน โดยดูจากคู่มือการใช้งานหรือตารางสำหรับเลือกใช้รวมทั้งประสบการณ์การทำงานป้อนข้อมูลให้แก่เครื่องกลึง

- ผู้ทำงานจะป้อนค่าความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง ตามชนิดของวัสดุชิ้นงานเข้าไปในระบบควบคุม หลังจากนั้นระบบควบคุมจะทำการคำนวณและเลือกใช้ค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่กำลังกลึงอยู่อัตโนมัติ

สิ่งสำคัญของการเลือกใช้ความเร็วในอุตสาหกรรมการผลิตคือ การเลือกใช้ให้เหมาะสมทั้งในด้านเทคโนโลยีการผลิตและเศรษฐศาสตร์การผลิตไปพร้อมๆ กัน

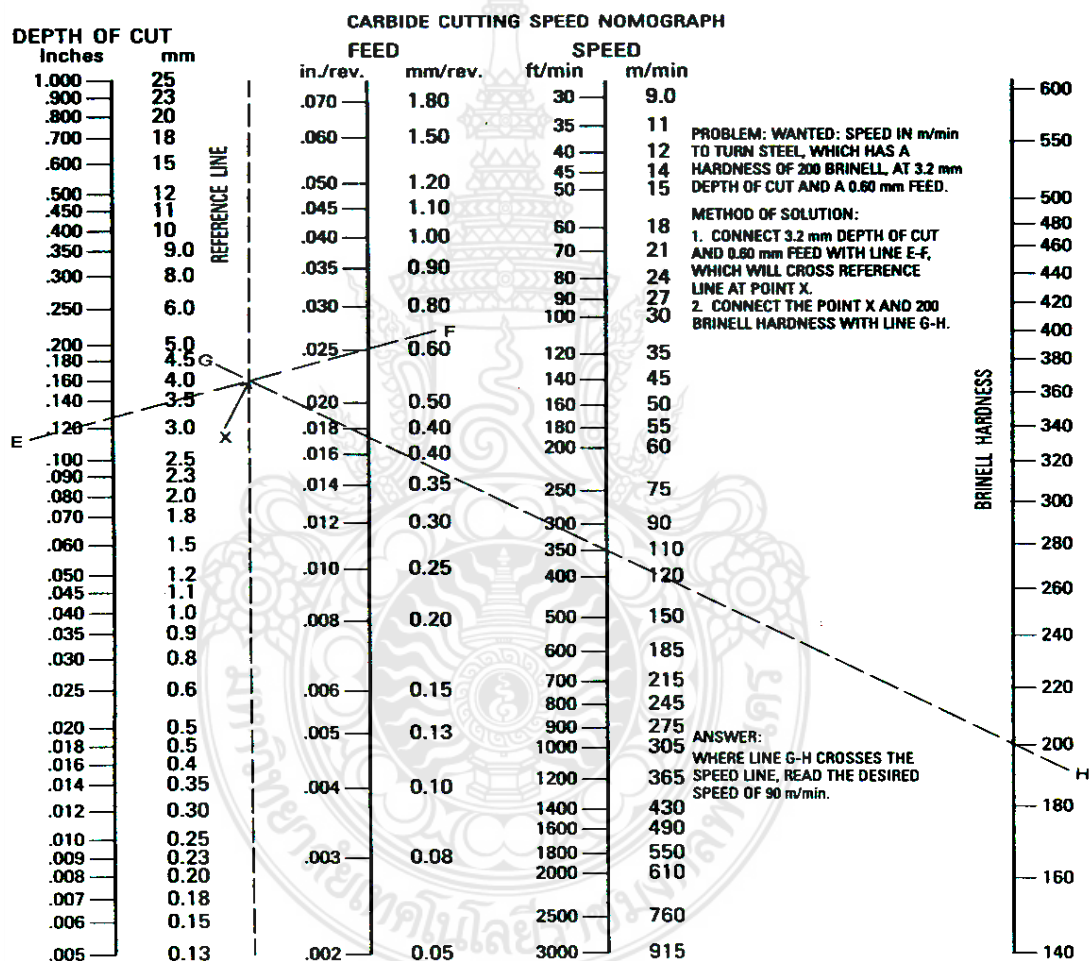
2.4.2 อัตราป้อน (Feed Rate)

อัตราป้อนคือ ระยะทางที่เครื่องมือเคลื่อนที่ไปในทิศทางของการตัดค่าของอัตราป้อนจะถูกกำหนดจากผู้ทำงานโดยการป้อนค่าอัตราป้อนที่อาจมีหน่วยเป็น

- ระยะทางต่อรอบการหมุนของชิ้นงาน เช่น มิลลิเมตรต่อรอบ (mm/rev)
- ระยะทางต่อนาที เช่น มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

ในเครื่องกลึงอัตโนมัติโดยทั่วไปแล้วอัตราป้อนจะถูกกำหนดแทนด้วยสัญลักษณ์อักษร F ตัวอย่าง F = 0.2 mm/rev หมายความว่าอัตราป้อนเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ F = 40 mm/min หมายความว่าอัตราป้อนเท่ากับ 40 mm/min

หากกำหนดอัตราป้อนสูงจะทำให้การตัดเฉือนใช้เวลาน้อยลง ขณะเดียวกันจะมีผลต่อการสึกหรอของมีดกลึงและผิวของชิ้นงาน ทำให้ต้องเสียเวลาในการปรับเปลี่ยนมีดกลึงและควบคุมผิวชิ้นงานให้ได้ตามที่ต้องการยากขึ้นด้วย นอกจากนี้แล้วอัตราป้อนยังมีผลต่อแรงและกำลังที่ใช้ในการตัดเฉือนอีกด้วย



ภาพที่ 2-5 การเลือกเงื่อนไขในการกลึงงานจากตาราง Monograph

2.4.3 ความลึกป้อนตัด (Depth of Cut)

ความลึกของการตัด คือ ระยะทางที่วัดจากผิวงานไปถึงจุดปลายของเครื่องมือตัดหรือมีดกลึง ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของการทำงาน ความลึกของการตัดเฉือนจะเป็นส่วนที่แสดงให้เห็นว่าจุด

ปลายของเครื่องมือตัดว่ามีลักษณะการเคลื่อนที่ตลอดขอบรูปของชิ้นงานในขณะที่ทำการตัดเป็นอย่างไร

การตัดผิวสำเร็จในทิศทางตามแนวยาวจะใช้ความลึกของการตัดเฉือนเท่ากับค่าแตกต่างระหว่างขนาดเผื่องานตัดเฉือน (Machining Allowance) กับขนาดสำเร็จหลังการตัด สำหรับการตัดหยาบ (Roughing) ความลึกของการตัดจะขึ้นอยู่กับจำนวนชิ้นงานของการตัดหยาบ ดังนั้นเพื่อให้ได้การสึกหรอของเครื่องมือตัดที่สม่ำเสมอจึงควรเลือกใช้ความลึกของการตัดที่สามารถใช้ประโยชน์จากความกว้างของจุดปลายคมตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่สามารถทำได้

การเลือกใช้อัตราป้อนและความลึกของการตัดจะเป็นตัวกำหนดขนาดพื้นที่ภาคตัดของเศษตัด รูปทรงพื้นที่ภาคตัดของเศษอาจเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือสี่เหลี่ยมด้านขนานก็ได้ ขึ้นอยู่กับมุมตั้งมีด (Setting Angle)

ข้อมูลเงื่อนไขการกลึงไม่ว่าจะเป็นความเร็วตัด อัตราป้อน หรือความลึกป้อนตัด สำหรับในด้านเทคโนโลยีการผลิต สามารถที่จะหาได้จากคู่มือการทำงานหรือขอแนะนำจากผู้ผลิตเครื่องมือหรือเครื่องจักร และเลือกใช้ให้เหมาะสมกับวัสดุเครื่องมือตัด และชิ้นงานที่จะทำการกลึงเป็นข้อมูลพื้นฐานในเบื้องต้น แต่ในด้านเศรษฐศาสตร์การตัด ข้อมูลเหล่านี้จะต้องมีการจัดเตรียมและวางแผนการใช้งานเพื่อเป้าหมายของต้นทุนและเวลาในการผลิตชิ้นงานโดยรวม

2.5 การทดสอบสมมติฐาน

สมมติฐาน (Hypothesis) มี 2 ชนิด คือ สมมติฐานทางการวิจัย (Research Hypothesis) กับสมมติฐานทางสถิติ (Statistical Hypothesis) การวิจัยบางเรื่องอาจไม่มีสมมติฐานการวิจัยที่ มีสมมติฐานมักเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เช่น ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถนัดทางการเรียนกับผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เป็นต้น หรือเป็นการวิจัยที่อยู่ในลักษณะ ที่เป็นการเปรียบเทียบความมีวินัยในตนเองระหว่างนักเรียนที่ได้รับการอบรมเลี้ยงดูด้วยวิธีต่างกัน

กระบวนการทดสอบสมมติฐาน จะช่วยผู้วิจัยในการตัดสินใจสรุปผลว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรจริงหรือไม่ หรือช่วยในการตัดสินใจเพื่อสรุปผลว่าสิ่งที่นำมาเปรียบเทียบกันนั้นแตกต่างกันจริงหรือไม่ สำหรับหัวข้อสำคัญที่จะกล่าวถึงคือ ความหมายของสมมติฐาน ประเภทของสมมติฐาน ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน ชนิดของความคลาดเคลื่อน ระดับนัยสำคัญ และการทดสอบสมมติฐานแบบมีทิศทางและแบบไม่มีทิศทาง

2.5.1 สมมติฐานทางการวิจัย (Research hypothesis)

สมมติฐานทางการวิจัย (Research hypothesis) เป็นคำตอบที่ผู้วิจัยคาดคะเนไว้ล่วงหน้า และเป็นข้อความที่แสดงความเกี่ยวข้องระหว่างตัวแปร สมมติฐานดังกล่าวเป็นเพียงการคาดคะเน ยังไม่เป็นที่รู้ที่เชื่อถือได้ จนกว่าจะได้รับการทดสอบโดยใช้วิธีการทางสถิติ สมมติฐานทางการวิจัย มี 2 ชนิดคือ

2.5.1.1 สมมติฐานทางการวิจัยมีแบบมีทิศทาง (Directional hypothesis) เป็นสมมติฐานที่เขียนระบุอย่างชัดเจนถึงทิศทางของความแตกต่างถึงทิศทางของความแตกต่างระหว่างกลุ่ม โดยมีคำว่า “ดีกว่า” หรือ “สูงกว่า” หรือ “ต่ำกว่า” หรือ “น้อยกว่า” ในสมมติฐานนั้นๆ

2.5.1.2 สมมติฐานทางการวิจัยไม่มีแบบไม่มีทิศทาง (Nondirectional hypothesis) เป็นสมมติฐานที่ไม่กำหนดทิศทางของความแตกต่างดังตัวอย่างที่ 2 หรือไม่กำหนดทิศทางของความสัมพันธ์

2.5.2 สมมติฐานทางสถิติ (Statistical hypothesis)

สมมติฐานทางสถิติ (Statistical hypothesis) เป็นสมมติฐานที่ตั้งขึ้นเพื่อใช้ทดสอบว่าสมมติฐานทางการวิจัยที่ผู้วิจัยตั้งไว้เป็นจริงหรือไม่ เป็นสมมติฐานที่เขียนอยู่ในรูปแบบของโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้อยู่ในรูปที่สามารถทดสอบได้ด้วยวิธีการทางสถิติ สัญลักษณ์ที่ใช้เขียนในสมมติฐานทางสถิติจะเป็นพารามิเตอร์เสมอ ที่พบบ่อยๆ ได้แก่

μ (อ่านว่า มิว) แทนตัวกลางเลขคณิตหรือค่าเฉลี่ยของกลุ่มประชากร

σ (อ่านว่า ซิกมา) แทนความเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มประชากร

ρ (อ่านว่า โร) แทนสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

สมมติฐานทางสถิติ มี 2 ชนิดคือ

1. สมมติฐานที่เป็นกลางหรือสมมติฐานที่ไร้นัยสำคัญ (Null hypothesis) สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ H_0

2. สมมติฐานอื่น (Alternative hypothesis) สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ H_1

ในการวิจัยหลังจากที่ตั้งความมุ่งหมายของการวิจัยแล้ว ผู้วิจัยมักจะตั้งสมมติฐานทางการวิจัยเพื่อคาดคะเนคำตอบไว้ล่วงหน้า แล้วจึงเก็บรวบรวม ข้อมูลเพื่อทำการทดสอบสมมติฐานทางการวิจัยที่ตั้งไว้ โดยจะต้องแปลงสมมติฐานทางการวิจัยให้เป็นสมมติฐานทางสถิติก่อน จึงจะทดสอบได้ด้วยวิธีการทางสถิติเวลาตั้งสมมติฐานทางสถิติจะต้องตั้งทั้ง Null hypothesis และ Alternative hypothesis

สมมติฐานไร้นัยสำคัญแทนด้วย H_0 เป็นสมมติฐานที่แสดงให้เห็นว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เช่น

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

หมายความว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มประชากรกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 เท่ากันหรือไม่มีความแตกต่างกัน

สมมติฐานอื่น แทนด้วย H_1 เป็นสมมติฐานที่แสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างระหว่างกลุ่มหรือมีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เช่น

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

หมายความว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มประชากร กลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ไม่เท่ากันหรือมีความแตกต่างกัน

ในกรณีที่เป็งานวิจัยในลักษณะเปรียบเทียบ H_1 จะมีได้ 3 ลักษณะ ดังนี้

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 > \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 < \mu_2$$

ในการทดสอบสมมติฐานแต่ละครั้งจะใช้ H_1 เพียงลักษณะเดียว โดยตั้งให้สอดคล้องกับสมมติฐานทางการวิจัย

การทดสอบสมมติฐานมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ตั้งสมมติฐานทางสถิติ

ขั้นที่ 2 กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ (กำหนด α)

ขั้นที่ 3 คำนวณค่าสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐาน

ขั้นที่ 4 นำค่าสถิติที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าวิกฤต (ค่าที่ได้จากตาราง)

ขั้นที่ 5 การตัดสินใจ มี 2 กรณี

1) ปฏิเสธ (reject) H_0 ยอมรับ (accept) H_1 ถ้าค่าที่คำนวณได้ตกอยู่ในพื้นที่

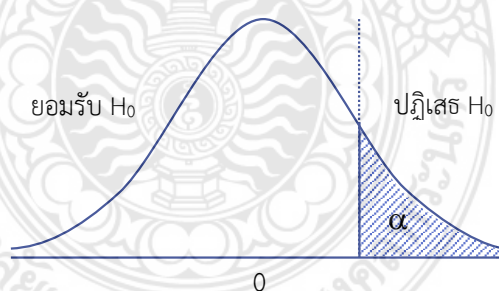
วิกฤตจะปฏิเสธ

2) ยอมรับ H_0 ถ้าค่าสถิติที่คำนวณได้อยู่ในเขตยอมรับ

2.5.3 การทดสอบสมมติฐานแบบมีทิศทางและไม่มีทิศทาง

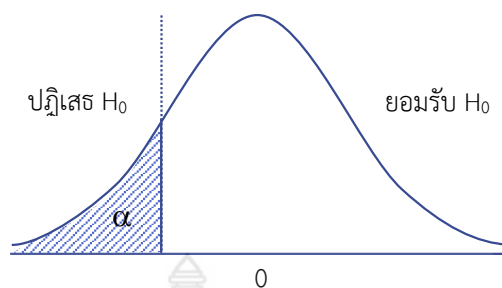
2.5.3.1 การทดสอบแบบมีทิศทาง หรือบางที่เรียกว่า การทดสอบแบบหางเดียว (One-tailed test) มี 2 กรณี คือ

1) กรณีหางเดียวทางขวา $H_1 : \mu_1 > \mu_2$



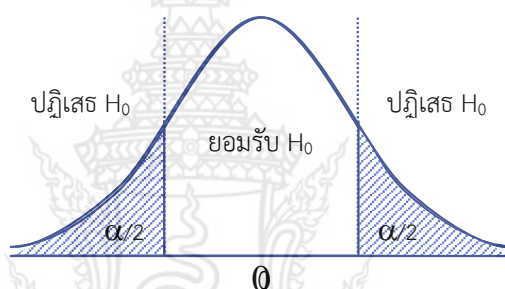
ภาพที่ 2-6 พื้นที่ตัดสินใจสำหรับการทดสอบแบบหางเดียวทางขวา

2) กรณีหางเดียวทางซ้าย $H_1 : \mu_1 < \mu_2$



ภาพที่ 2-7 พื้นที่ตัดสินใจสำหรับการทดสอบแบบหางเดียวทางซ้าย

2.5.3.2 แบบไม่มีทิศทาง หรือการทดสอบแบบสองหาง (Two - tailed test) ซึ่งเป็นการทดสอบเมื่อ $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$

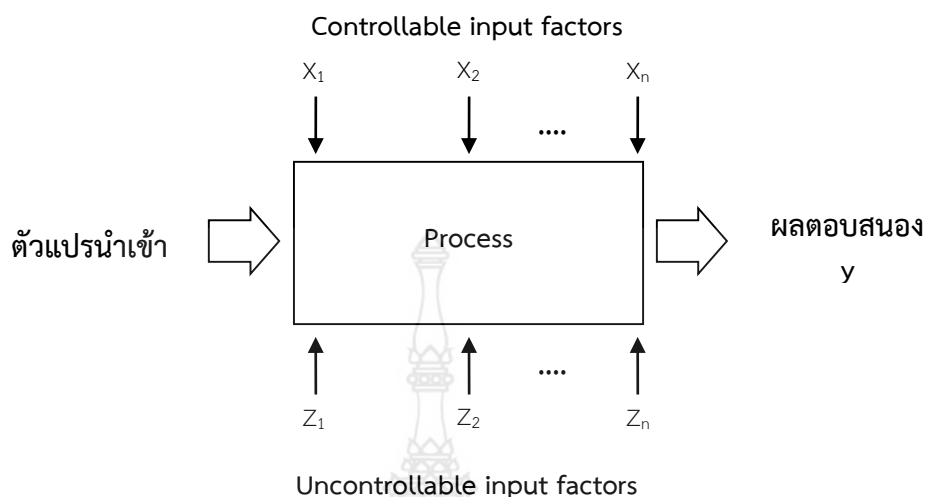


ภาพที่ 2-8 พื้นที่ตัดสินใจสำหรับการทดสอบแบบสองหาง

2.5 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) คือ การทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่มีวัตถุประสงค์ที่จะเปลี่ยนปัจจัย (factor) นำเข้าของกระบวนการ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นของผลตอบ (response) ดังแสดงในภาพที่ 2-9 มีวัตถุประสงค์หลัก คือ ต้องการพัฒนากระบวนการที่มีความเข้มแข็งโดยกระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ หรือทรัพยากรอื่นๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนปัจจัยขาเข้า เช่น วัตถุดิบ ไปสู่ผลลัพธ์ขาออกที่มีผลตอบออกมาหนึ่งผลตอบ หรือมากกว่าก็ได้ ซึ่งปัจจัยบางชนิดเป็นปัจจัยที่เราสามารถควบคุมได้ในขณะที่ปัจจัยบางชนิดไม่สามารถควบคุมได้ โดยกำหนดให้ตัวแปร x_1, x_2, \dots, x_n เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ (controllable) ขณะที่ตัวแปร z_1, z_2, \dots, z_m เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (uncontrollable) และบางครั้งเรียกว่า ปัจจัยรบกวน (noise) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองมีดังนี้ (Douglas C. Montgomery, 2005)

1. การหาตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลตอบ y
2. การหาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อให้ได้ค่า y ตามต้องการ
3. การหาวิธีการตั้งค่า x เพื่อที่จะให้เกิดความแปรปรวนในค่า y น้อยที่สุด
4. การหาวิธีการตั้งค่า x เพื่อที่จะให้ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ z มีค่าต่ำสุด



ภาพที่ 2-9 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ (Douglas C. Montgomery, 2005)

หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง คือ

1. การทดลองซ้ำ (Replication) เพื่อให้ทราบตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ จำนวนซ้ำของการทดลองจะทำให้มีโอกาสที่จะพบผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (Signal) ในขอบเขตของความแปรปรวนในกระบวนการทางธรรมชาติ (Noise) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาดนี้กลายเป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาว่าความแตกต่างของข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นการทดลองซ้ำทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระบวนการนี้
2. การสุ่มลำดับการทดลอง (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่า ข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การสุ่มลำดับการทดลอง จะทำให้สมมติฐานเป็นจริง การสุ่มลำดับการทดลองทำให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้
3. บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกกิ้งหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้ซึ่งทำให้ทราบแหล่งของความแปรปรวนโดยการแบ่งอันดับการทดลองให้อยู่ในบล็อกเดียวกันที่มีความคล้ายกันและใช้หลักการทางพีชคณิตแยกความแตกต่างออกมาจะทำให้เพิ่มความไวต่อการออกแบบการทดลอง (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

ข้อดีของการออกแบบการทดลองคือ ให้ผลของความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการ นอกจากนี้ยังมีความรวดเร็วในการดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหาการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องจะต้องมีความเข้าใจล่วงหน้าว่า เรากำลังศึกษาอะไรอยู่จะเก็บข้อมูลได้อย่างไรและจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินงานอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา

พัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบ่อยครั้งที่เราจะต้องหาข้อมูลสำหรับป้อนเข้าจากบุคคลที่มีความรู้ความชำนาญในแต่ละด้าน นั้นเป็นองค์ประกอบหนึ่งของการออกแบบการทดลองเพราะเป็นจุดเริ่มต้นของการดำเนินงานคือ การใช้ประสบการณ์คาดคะเนว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อปัญหาที่เราสนใจ ถ้าหากไม่มีในส่วนของประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญเข้ามาเกี่ยวข้อง การออกแบบการทดลองก็ยังคงดำเนินต่อไปแต่จะใช้เวลานานขึ้นเพราะต้องเสียเวลาในการตรวจสอบทุกๆปัจจัยที่มีอยู่ทั้งหมด

2. เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต

ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดได้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมากซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่เราจะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) ซึ่งต้องเลือกวิธีการคัดกรองปัจจัยให้เหมาะสมกับการทดลอง และควรที่จะกำหนดให้ ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญ เช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและที่ระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตให้แคบลงได้

3. เลือกตัวแปรตอบสนอง

ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรตอบสนอง เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจมีตัวแปรตอบสนองหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรตอบสนอง และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

4. เลือกรูปแบบการทดลอง

ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้อย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกรูปแบบการทดลองเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนการทำซ้ำ) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อกหรือการสุ่มลำดับการทดลอง อย่างไรก็ตามหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกรูปแบบการทดลอง เราจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อค่าตอบสนองที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

5. ทำการทดลอง

เมื่อทำการทดลองเราจะต้องทำการทดลองอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

ใช้วิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติ เป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจอย่างมีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

7. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของ นอกจากนี้แล้วการทำทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation testing) ควรจะทำขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

จากขั้นตอนการเลือกรูปแบบการทดลองนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนอง เช่น ถ้าจำนวนปัจจัยเป็นหนึ่งและมีจำนวนระดับของปัจจัยมากกว่าสาม การออกแบบการทดลองที่ใช้คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่เป็นทางเดียว (One way analysis of variance) ถ้าจำนวนของปัจจัยมีมากกว่าหนึ่งแต่ไม่เกินห้า ควรใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล (Factorial design) หรือถ้าจำนวนปัจจัยมีมากกว่าห้า ควรใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคชันนัลแฟคตอเรียล (Fractional factorial design) เพื่อลดการทดลองลง ส่วนในกรณีที่ต้องการลดการทดลองโดยที่จำนวนปัจจัยมีน้อยกว่าห้า ควรใช้แนวคิดของทาคุชิ (Taguchi's Method) ในการออกแบบการทดลอง

2.6 การออกแบบการทดลองโดยวิธีทากูชิ

การออกแบบการทดลองวิธีของทากูชิเป็นการออกแบบชนิดหนึ่งในการประยุกต์การออกแบบการทดลองปัจจัยควบคุมได้ (Control Factor) เช่น ขนาดของชิ้นส่วนสามารถควบคุมได้ง่าย โดยผู้ออกแบบ ปัจจัยควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) หรือ Noise Factor เช่น ตัวแปรทางด้านสภาพแวดล้อม การเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ กรรมวิธีการผลิตที่ไม่สมบูรณ์ ฯลฯ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ยังเป็นแหล่งของความผันแปรอีกด้วยซึ่งอิทธิพลที่เกิดจากตัวแปรเหล่านี้ไม่สามารถที่จะกำจัดได้ เพราะฉะนั้นหน้าที่หลักของ Robust Design (RD) เป็นการลดความผันแปรของผลิตภัณฑ์ โดยทำการลดความไวของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อแหล่งความผันแปร โดยทำการควบคุมแหล่งความผันแปรเหล่านี้ หรืออีกนัยหนึ่งคือ RD จะลดความผันแปรของค่าตอบสนอง โดยทำการเลือกปรับตั้งปัจจัยควบคุม (Control Factor) เพื่อลดอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมได้ยาก (Hard-to-Control Noise) ซึ่งเป็นจุดสำคัญของ Off Line Quality Control

อย่างไรก็ตามกระบวนการออกแบบการทดลองไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้จึงมีการปรับปรุงด้วยการใช้แนวคิดของทากูชิ (Taguchi's Method) ซึ่งวิธีทากูชิเป็นแนวคิดที่จะรวมคุณภาพให้อยู่ในผลิตภัณฑ์ แทนที่จะใช้การสุ่มตรวจสอบคุณภาพที่ขบวนการสุดท้าย ในการสุ่มตรวจสอบแบบทั่ว ๆ ไปผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพจะถูกแยกออกแต่คุณภาพของกระบวนการยังคงอยู่เหมือนเดิม ซึ่งอันที่จริงแล้วกระบวนการต่างหากที่ก่อให้เกิดคุณภาพและสำคัญกว่าการสุ่มตัวอย่าง วิธีการของทากูชิได้เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสร้างคุณภาพให้กับผลิตภัณฑ์ โดยวิธีของทากูชินี้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าคุณภาพจะลดลงโดยการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนของสิ่งแวดล้อม ดังนั้นวิธีของทากูชิพยายามทำให้กระบวนการทำงานได้ตามที่ถูกออกแบบโดยไม่มีผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน

2.6.1 ขั้นตอนการทำการทดลองโดยวิธีของทากูชิ

การออกแบบการทดลอง คือ การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการทดลองที่จะทำให้สามารถตีความหมายถึงสาเหตุและผลที่ต้องตัดสินใจได้ โดยพิจารณาความแตกต่างของข้อมูลจากสาเหตุที่สามารถควบคุมได้ ซึ่งจุดประสงค์สำคัญของการทดลอง คือ การยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) การค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) การทดลองกระทำได้ 2 วิธี คือ

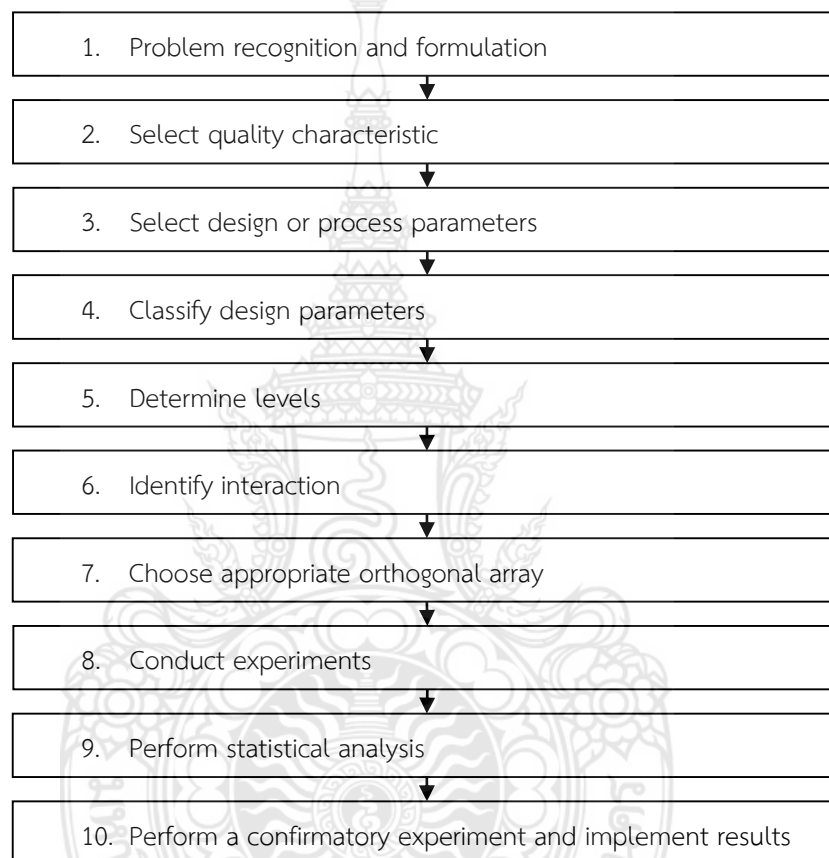
- การทดลองปฏิบัติงานจริง (Physical Experiment)
- การทดลองด้วยการจำลองผล (Simulation)

ตารางที่ 2-3 พัฒนาการของการออกแบบการทดลอง

แบบเก่า	แบบใหม่
1. ปรับทีละตัวแปรต่อครั้ง	1. ปรับทุกตัวแปรทั้งหมด (Full Factorials)
2. ทำทุกตัวแปรที่เป็นไปได้ในการปรับ	2. ทำเพียงบางส่วน (Fractional Factorials)
3. เลือกเอาเฉพาะการทดลองโดยการเดา	3. เลือกการทดลองโดยมีหลักการ (Screening Design)

ที่มา: เปมิกา สุวรรณณี, 2548, น. 30

จุดประสงค์สำคัญของการทดลองมี 2 ประการ คือ เป็นการยืนยันข้อเท็จจริง เป็นการพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริง หรือความเชื่อจากประสบการณ์ หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต และเป็นการค้นหาข้อเท็จจริง เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีต่อระบบการผลิตโดยวิธีของทากูชิสำหรับสนับสนุน Roust Design (RD) มีขั้นตอนในการปฏิบัติสำคัญ 4 ขั้นตอนดังแสดงดังภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 ขั้นตอนการทำการทดลองโดยวิธีของทากูชิ

2.6.1.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา (problem recognition and formulation)

ขั้นตอนนี้ต้องพยายามทำความเข้าใจว่าอะไรที่เป็นปัญหาและวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยเป้าหมายของการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ในกระบวนการผลิต คือ เพื่อให้ได้ค่า y ที่ดีที่สุด (optimal) แบ่งเป็น 3 แบบคือ

1. ค่ายิ่งมากยิ่งดี (Higher is Better Type Problem) คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดจะต้องมีค่าให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เช่น ความทนแรงดึง และอายุการใช้งาน

2. ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Lower is Better Type Problem) คือ ความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดจะต้องมีค่าให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เช่น เวลาในการทำปฏิกิริยาและจำนวนของเสีย

3. เท่ากับค่าที่ต้องการดีที่สุด (Nominal is Best Type Problem) คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับค่าที่ได้กำหนดไว้หรือค่าที่จำกัดไว้ เช่น ปริมาตร และความหนา

2.6.1.2 เลือกผลตอบของปัญหา (select quality characteristic)

ผู้ทดลองควรแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องกำหนดให้ได้ว่าอะไรคือตัวแปรตอบและจะวัดตัวแปรเหล่านี้ก่อนที่จะเริ่มการทดลองจริง

2.6.1.3 เลือกการออกแบบการทดลอง (select design or process parameters)

เลือกให้เหมาะสมกับจำนวนปัจจัยควบคุมทั้งหมดที่คิดว่าส่งผลต่อค่าคุณลักษณะที่เลือกไว้

2.6.1.4 ทำการแบ่งประเภทปัจจัย (classify design parameters into control, noise and signal factors)

ทำการแบ่งปัจจัยตามลักษณะว่าปัจจัยไหนเป็นปัจจัยควบคุม ปัจจัยรบกวน และปัจจัยผลตอบสนอง

2.6.1.5 กำหนดระดับของปัจจัยควบคุม (determine levels of design or process parameters)

เลือกตามวัตถุประสงค์ และความเหมาะสมของการทดลองนิยมทำการทดลองที่ 2-3 ระดับ ถ้าการทดลองมีปัจจัยควบคุมจำนวนมากและมีข้อจำกัดของเวลาและทรัพยากรควรใช้ 2 ระดับ แต่ถ้ามีจำนวนปัจจัยควบคุมน้อย หรือจำนวนมาก แต่ไม่มีข้อจำกัดของเวลาและทรัพยากรควรใช้ 3 ระดับ

2.6.1.6 กำหนดคู่ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกัน (identify interactions)

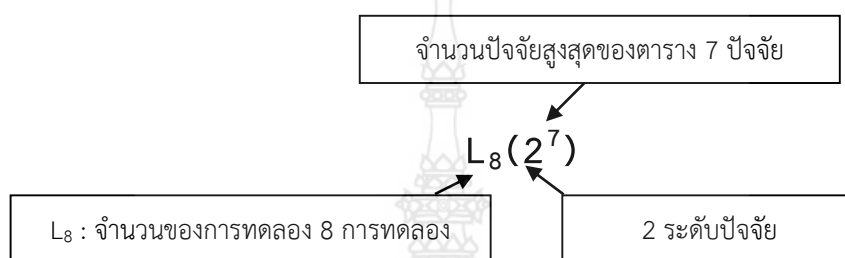
ผู้ทดลองต้องกำหนดคู่ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกันและมีผลต่อตัวแปรผลตอบ เพราะเทคนิคทางสถิติจะไม่สามารถหาค่าคู่ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกันได้ครบทุกตัว ดังนั้นต้องพิจารณาให้รอบคอบ

2.6.1.7 เลือกคอลัมน์ของการจัดเรียงแบบออร์ทogonal (choose appropriate orthogonal array; OA)

การเลือกการจัดเรียงแบบออร์ทogonalเป็นตารางกำหนดค่าระดับการทดลองที่มีแนวนอนเป็นจำนวนครั้งที่ทำการทดลอง และแนวตั้งเป็นตัวแปรที่จะกำหนดให้ โดยก่อนเลือกการจัดเรียงแบบออร์ทogonalต้องใช้ควบคู่กับกราฟเส้นตรง (linear graphs) และตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interaction tables) มาประกอบด้วยเพื่อทำความเข้าใจกับการออกแบบที่มีการจัดเรียงแบบออร์ทogonal (G. Taguchi and S. Konishi, 1999) การกำหนดว่าปัจจัยอยู่ในคอลัมน์ใดในตาราง Orthogonal Array (แสดงดังตารางที่ 2-3) ต้องใช้ Linear graphs ประกอบ และการเลือก OA ยังขึ้นกับค่าวัดจำนวนข้อมูลที่สามารถผันแปรได้อย่างอิสระเมื่อกำหนดค่าที่ต้องการ (degrees of

freedom: df) ระหว่างปัจจัยควบคุมกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกันและผลตอบของการทดลอง ตลอดจนวัตถุประสงค์ในการทดลองที่มีข้อจำกัดของเวลาและทรัพยากร

ในการกำหนดตารางแผนการทดลอง (Matrix Experiment) โดยใช้ตารางมาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง การนำ Orthogonal Array มาตรฐานไปใช้งานขึ้นอยู่กับระดับปัจจัยและจำนวนปัจจัยในการทดลอง ซึ่งจะได้จำนวนการทดลองตามมาตรฐานของ Orthogonal Array นั้น ใช้สัญลักษณ์ L ตามด้วยตัวอักษรซึ่งบ่งบอกจำนวนการทดลอง ดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 ความหมายของสัญลักษณ์ตาราง Orthogonal Array

ตารางที่ 2-4 ตารางมาตรฐานของวิธีการทากูชิ (Standard Orthogonal Array)

จำนวนปัจจัย	ระดับของปัจจัย				จำนวนปัจจัย	ระดับของปัจจัย			
	2	3	4	5		2	3	4	5
2	L4	L9	L16	L25	17	L32	L36	-	-
3	L4	L9	L16	L25	18	L32	L36	-	-
4	L8	L9	L16	L25	19	L32	L36	-	-
5	L8	L18	L16	L25	20	L32	L36	-	-
6	L8	L18	L32	L25	21	L32	L36	-	-
7	L8	L18	L32	L50	22	L32	L36	-	-
8	L12	L18	L32	L50	23	L32	L36	-	-
9	L12	L27	L32	L50	24	L32	-	-	-
10	L12	L27	L32	L50	25	L32	-	-	-
11	L12	L27	L32	L50	26	L32	-	-	-
12	L16	L27	L32	L50	27	L32	-	-	-
13	L16	L27	-	-	28	L32	-	-	-
14	L16	L36	-	-	29	L32	-	-	-
15	L16	L36	-	-	30	L32	-	-	-
16	L32	L36	-	-	31	L32	-	-	-

การใช้ตาราง Orthogonal Array มีข้อดีคือ ทำให้สามารถลดการทดลองให้น้อยลง และเป็นผลให้ลดเวลาและต้นทุนในการทดลองได้อย่างมาก เช่นตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ตัวอย่างจำนวนของปัจจัยและระดับปัจจัยของ Orthogonal Array $L_8(2^7)$ และ $L_{12}(2^{11})$

จำนวนปัจจัย	ระดับปัจจัย	การทดลองปกติใช้	การทดลองของทากูชิ
7 ปัจจัย	2	128 การทดลอง	8 การทดลอง (L8)
11 ปัจจัย	2	2048 การทดลอง	12 การทดลอง (L12)

จากตารางที่ 2-5 แสดง Orthogonal Array $L_8(2^7)$ มีระดับปัจจัยเท่ากับ 2 ระดับ และจำนวนของปัจจัยเท่ากับ 7 ปัจจัย จะมีการทดลอง 8 การทดลอง

ตารางที่ 2-5 L_8 Standard Array ที่ 2 ระดับปัจจัย

Trial no.	Column no.						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

ที่มา: Ross Phillip J, 1996, P. 267

2.6.1.8 ทำการทดลอง (conduct experiments) ทำการทดลองตามแผนที่กำหนดจากตารางการจัดเรียงแบบออร์ทอกอนอล

2.6.1.9 วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยหลักการทางสถิติ (perform statistical analysis) ใช้วิธีการทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อดูว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองและช่วยให้การตัดสินใจมีประสิทธิภาพ

2.6.1.10 ทำการทดลองซ้ำ และสรุปผลการทดลอง (perform a confirmatory experiment and implement results) หลังจากวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองแล้วจะต้องหาข้อสรุปและข้อเสนอแนะของผลการทดลองที่เกิดขึ้น เพื่อนำเสนอผลงานให้หน่วยงานหรือผู้เกี่ยวข้องรับทราบ นอกจากนี้ควรทำการทดลองเพื่อตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้น

ดังนั้นการออกแบบการทดลองจึงอาจนำมาใช้ทั้งการพัฒนากระบวนการที่มีปัญหาเพื่อให้กระบวนการนั้นมีสมรรถนะดีขึ้น หรือทำให้เกิดความมั่นคง (Robust or insensitive) ต่อแหล่งความผันแปรที่อยู่ภายนอก วิธีการควบคุมกระบวนการทางสถิติและการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือสองชนิดที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการปรับปรุงและหาค่าที่ดีที่สุดของกระบวนการ ดังเช่นถ้ากระบวนการอยู่ในการควบคุมทางสถิติแต่ความสามารถของกระบวนการยังไม่ดีก็จึงต้องมีการปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดความผันแปรให้น้อยลง ดังนั้นการออกแบบการทดลองจึงทำให้

ความสามารถของกรรมวิธีการผลิต ความมั่นคงของระบบ และความเชื่อมั่นเพิ่มขึ้นตลอดจนเวลาในการผลิตและต้นทุนลดลง (Montgomery, D.C, 2005)

2.6.2 อัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวน (Signal-to-noise ratio; S/N)

เป็นเครื่องมือวัดประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมกันระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าผันแปร (Single performance measure) จึงได้ค่าที่เหมาะสมโดยลดความผันแปรของกระบวนการ (Jiju Antony, 2006) ซึ่งความสัมพันธ์ของสมการอัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวนนั้น เลขเศษหรือสัญญาณของอัตราส่วน คือ ความสามารถของกระบวนการในการสร้างผลิตภัณฑ์ที่ดี หรือความสามารถของผลิตภัณฑ์เพื่อการดำเนินการได้อย่างถูกต้อง ตัวส่วน คือ ผลรวมของผลกระทบของปัจจัยแทรกซ้อนที่มีต่อกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวน (Signal-to-noise ratio; S/N) โดยทั่วไปผลของการทดลองจากการออกแบบการทดลองใดๆ มักจะแทนด้วยสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์คือ y_i ซึ่งก็คือค่าของตัวแปรตาม (Response Variable) ที่เราสนใจนั่นเอง ซึ่งในแง่ของการออกแบบการทดลองโดยทั่วไปมักจะให้ความสนใจกับ y_i หรือค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามค่อนข้างสูง ว่ามีความสอดคล้องกับความต้องการหรือไม่ โดยบางครั้งก็พิจารณาถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองนั้นๆ ว่ามีมากน้อยเพียงใด

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำของตัวแปรตามใดๆ หรือของขบวนการใดเป็นสิ่งบ่งบอกถึงควมมีคุณภาพสูงและการออกแบบที่ดีมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณภาพที่ดีและการออกแบบที่ดีมีประสิทธิภาพ โดย ดร.ทาคุชิ ได้พัฒนาวิธีการคำนวณหาค่า Signal-to-Noise Ratio ของผลการทดลองใดๆ เพื่อบ่งชี้ว่าการทดลองนั้นให้ผลตามเป้าหมายที่เราต้องการหรือไม่ โดยพิจารณาทั้งค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง และคำนวณค่า Signal-to-Noise (S/N) คือ อัตราส่วนหรือค่าเฉลี่ย (Signal) กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Noise) ดังแสดงในสมการที่ 2-2

$$S/N = -10\log(\text{MSD}) \quad (2-2)$$

MSD (Mean Square Deviation) เป็นตัวแปรค่าหนึ่งที่ได้มาจากการคำนวณตามแนวทางของ ทาคุชิ ซึ่งมี 3 วิธีการคำนวณแสดงดังสมการที่ 2-3 ถึงสมการที่ 2-5

1. กรณีที่ต้องการค่าน้อยกว่าเป็นค่าที่ดีกว่า (Lower is Better Type Problem) สามารถคำนวณ MSD ได้ดังนี้

$$\text{MSD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (2-3)$$

2. กรณีที่ต้องการค่ามากกว่าเป็นค่าที่ดีกว่า (Higher is Better Type Problem) สามารถคำนวณ MSD ได้ดังนี้

$$\text{MSD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (2-4)$$

3. กรณีที่ต้องการค่าตามความต้องการเป็นค่าที่ดีที่สุด (Nominal is Best Type Problem) สามารถคำนวณ MSD ได้ดังนี้

$$MSD = \left| \frac{1}{n} \left(\frac{S_m - V_e}{V_e} \right) \right| \quad (2-5)$$

เมื่อ

$$V_e = \frac{(y_1^2 + y_1^2 + \dots + y_n^2) - S_m}{n-1} \quad (2-6)$$

$$S_m = \frac{T^2}{n} \quad (2-7)$$

$$T = \sum_{i=1}^n y_i \quad (2-8)$$

โดยที่ T แทนผลรวมของข้อมูล (ผลที่ได้จากการทดลอง)

n แทนจำนวนชุดข้อมูล

S_m แทนผลรวมกำลังสองของค่าเฉลี่ย (Sum of the squares of the mean)

V_e แทนความแปรปรวนของการทดลอง

2.6.3 การประมาณอิทธิพลของแต่ละปัจจัย (Analysis of Means)

Analysis of Means เป็นการประมาณอิทธิพลของแต่ละปัจจัยโดยใช้ค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์ โดยการคำนวณค่าเฉลี่ยรวมของ S/N Ratio ในการทดลองโดยใช้สูตร

$$\overline{S/N} = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n S/N_i \right] \quad (2-9)$$

เมื่อ $\overline{S/N}$ = ค่าเฉลี่ยรวมของ S/N Ratio ในการทดลอง

S/N_i = S/N Ration ของแต่ละการทดลอง

i = ลำดับของการทดลอง

การหาอิทธิพลของระดับปัจจัยแต่ละระดับ โดยคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนของ S/N Ratio เฉลี่ยของปัจจัยแต่ละระดับ ที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยรวมของ S/N Ratio ในการทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$\text{Factor} = (\overline{S/N_i} - \overline{S/N}) \quad (2-10)$$

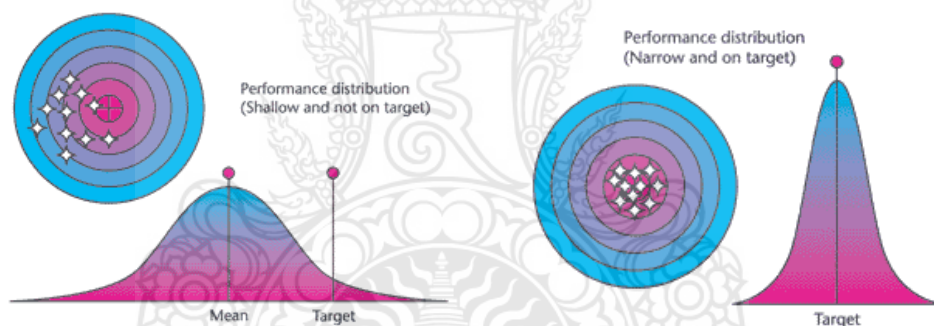
เมื่อ Factor = ค่าเฉลี่ยของปัจจัยแต่ละระดับที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยรวม

$\overline{S/N_i}$ = S/N Ration เฉลี่ยของแต่ละการทดลอง

i = ลำดับของการทดลอง

2.9.4 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

1. การออกแบบการทดลองในส่วนผลิตภัณฑ์
 - ง่ายต่อการนำไปผลิต
 - ความเชื่อมั่น (reliability) ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น หรืออายุการใช้งานนานขึ้น
 - ต้นทุน (costs) การผลิตลดลง
 - ลดเวลาในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์
2. การออกแบบการทดลองในส่วนกระบวนการ
 - เพื่อให้กระบวนการสามารถทำงานได้อย่างมั่นคง ได้สภาพแวดล้อมที่หลากหลาย
 - การเพิ่มผลการผลิตที่ได้ (yields) จากกระบวนการ
 - ลดเวลาที่ใช้ในการพัฒนาขั้นตอนของกระบวนการ
 - ลดต้นทุนการผลิต
 - ลดความผันแปร (variation) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ทำให้ได้ค่าที่เข้าใกล้ค่าเป้าหมาย (target) มากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 การปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการโดยเทคนิคทากูชิ (Ranjit K. Roy, 2001) [6]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปวุฒิ เพชรไพรินทร์ (2552) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของคมตัดในการกัดทองเหลือง โดยการทดลองได้ใช้ทองเหลืองผสม และดอกกัด (End Mill) ชนิดเหล็กกล้ารอบสูง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิว และการสึกหรอของคมตัด ได้กำหนดปัจจัยดังนี้ ชนิดสารหล่อเย็น ความเร็วรอบ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการป้อนตัด ผลการทดลองพบว่าชนิดสารหล่อเย็น ความเร็วตัด อัตราป้อน มีผลต่อความหยาบผิว

เกษร หล่อบุญสม (2554) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการกัดเฉือนเหล็กหล่อสีขา ด้วยเม็ดเม็ดคาร์ไบด์เคลือบผิวไททาเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ โดยใช้ตัวแปร 3 ชนิด คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการกัด พิจารณาการสึกหรอของเม็ดเม็ดและค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน สำหรับการดำเนินการทดลองโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง Design of Experiment (DOE) เข้ามาช่วยใน

การออกแบบเพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการกัดผลการศึกษาพบว่า ความเร็วตัด มีผลต่อการสึกหรอของเม็ดมีดมากที่สุด รองลงมาคือ อัตราป้อน และความลึกในการกัด ค่าที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาด้านการสึกหรอของเม็ดมีดมากที่สุด คือ ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.1 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึกในการกัด 0.6 มิลลิเมตร สำหรับด้านต้นทุนการผลิต ค่าที่เหมาะสมคือ ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.1 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึกในการกัด 1.0 มิลลิเมตรตามลำดับ

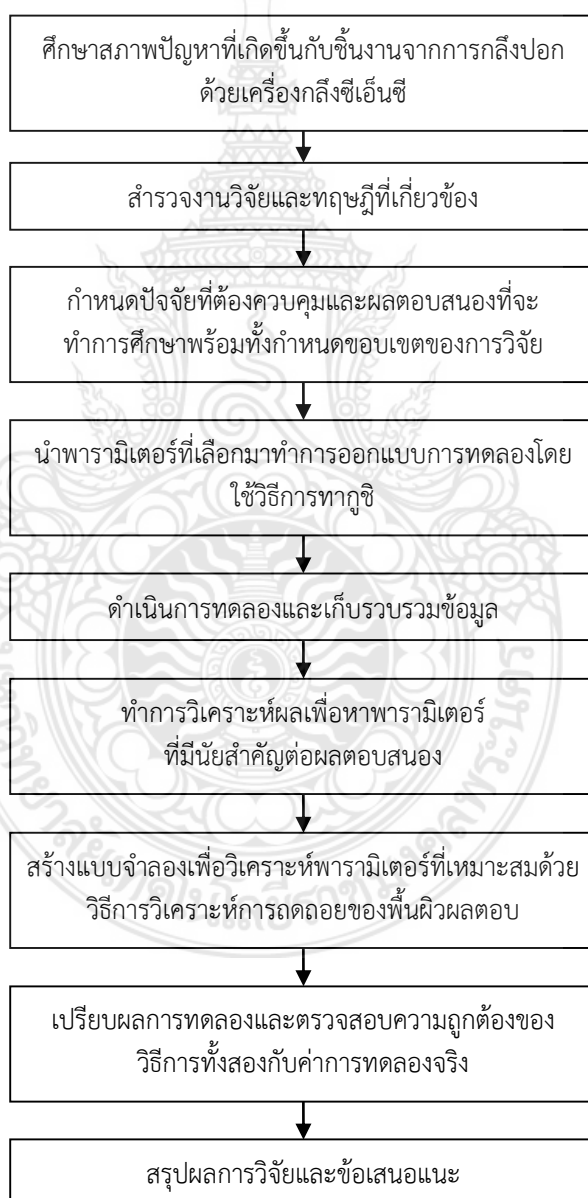
ANIL CHOUBEY et al (2012) ได้ใช้หลักการออกแบบการทดลองในการหาเงื่อนไขการกัดงานที่เหมาะสม ด้วยวิธี Taguchi โดยกำหนดปัจจัยคือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการกัด และความกว้างในการกัด เพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิว และอัตราการเคลื่อนที่ของวัสดุที่ดีที่สุด โดยได้ค่าความเหมาะสมเท่ากัน คือความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อัตราป้อน 1000 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการกัด 0.01 มิลลิเมตร และความกว้างในการกัด 0.1 มิลลิเมตร



บทที่ 3

การดำเนินงานและวิธีวิจัย

การดำเนินงานและวิธีวิจัย เรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพทิศทางการกักงานที่มีผลต่อความหยابผิวโดยวิธีการทาคุชิ ในการดำเนินงานได้กำหนดแผนการดำเนินงาน ตั้งแต่การเริ่มต้นศึกษารวบรวมข้อมูลจนถึงทำการทดลอง โดยกำหนดแผนการทำงาน ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การกำหนดปัจจัยที่ต้องควบคุมและผลตอบสนองที่จะทำการศึกษารวมทั้งกำหนดขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยเพื่อหาประสิทธิภาพทิศทางการกัดงานที่มีผลต่อความหยาบผิวโดยวิธีการทางสถิติ กำหนดให้มีการทดสอบกับวัสดุทดสอบ 2 ชนิดคือ ทองเหลือง และ อลูมิเนียม โดยกำหนดปัจจัยที่ต้องควบคุมทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ทิศทางการกัดชิ้นงาน ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกในการกัด (Depth of cut) นำปัจจัยทั้งหมดมาใช้ออกแบบการทดลอง การทดสอบกับชิ้นงานและมีค่าผลตอบสนองเป็นค่าความหยาบผิว โดยมีรายละเอียดของการกำหนดปัจจัยดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 วัสดุทดสอบ ปัจจัยควบคุมและระดับของปัจจัยควบคุมในการทดลอง

วัสดุทดสอบ	ปัจจัยควบคุม	ระดับของปัจจัยควบคุม
ทองเหลือง และ อลูมิเนียม	ทิศทางการกัดชิ้นงาน (G)	2 ระดับ : Code-G41, Code-G42
	ความเร็วตัด (V)	3 ระดับ : 1200, 1500, 1800 รอบต่อนาที
	อัตราป้อน (F)	3 ระดับ : 80, 100, 120 มิลลิเมตรต่อนาที
	ความลึกในการกัด (D)	3 ระดับ : 3, 4, 5 มิลลิเมตร

จากตารางที่ 3-1 แสดงปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลองกัดชิ้นงาน ซึ่งมี 3 ปัจจัย 3 ระดับ และ 1 ปัจจัย 2 ระดับ หากทำการทดลองแบบ full factorial design จะต้องทำการทดลองทั้งสิ้น $3^3 \times 2^1 = 54$ การทดลอง ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 การทดลองแบบ full factorial design

การทดลองที่	ปัจจัยควบคุม			
	ทิศทางการกัดชิ้นงาน (G)	ความเร็วตัด (V)	อัตราป้อน (F)	ความลึกในการกัด (D)
1	G41	1200	80	3
2	G41	1200	80	4
3	G41	1200	80	5
4	G41	1200	100	3
5	G41	1200	100	4
6	G41	1200	100	5
7	G41	1200	120	3
8	G41	1200	120	4
9	G41	1200	120	5
10	G41	1500	80	3
11	G41	1500	80	4

การทดลองที่	ปัจจัยควบคุม			
	ทิศทางการกีดขวางงาน (G)	ความเร็วตัด (V)	อัตราป้อน (F)	ความลึกในการกัด (D)
12	G41	1500	80	5
13	G41	1500	100	3
14	G41	1500	100	4
15	G41	1500	100	5
16	G41	1500	120	3
17	G41	1500	120	4
18	G41	1500	120	5
19	G41	1800	80	3
20	G41	1800	80	4
21	G41	1800	80	5
22	G41	1800	100	3
23	G41	1800	100	4
24	G41	1800	100	5
25	G41	1800	120	3
26	G41	1800	120	4
27	G41	1800	120	5
28	G42	1200	80	3
29	G42	1200	80	4
30	G42	1200	80	5
31	G42	1200	100	3
32	G42	1200	100	4
33	G42	1200	100	5
34	G42	1200	120	3
35	G42	1200	120	4
36	G42	1200	120	5
37	G42	1500	80	3
38	G42	1500	80	4
39	G42	1500	80	5
40	G42	1500	100	3
41	G42	1500	100	4
42	G42	1500	100	5
43	G42	1500	120	3
44	G42	1500	120	4
45	G42	1500	120	5

การทดลองที่	ปัจจัยควบคุม			
	ทิศทางการกีดขวางงาน (G)	ความเร็วตัด (V)	อัตราป้อน (F)	ความลึกในการกัด (D)
46	G42	1800	80	3
47	G42	1800	80	4
48	G42	1800	80	5
49	G42	1800	100	3
50	G42	1800	100	4
51	G42	1800	100	5
52	G42	1800	120	3
53	G42	1800	120	4
54	G42	1800	120	5

เนื่องจากการทดลองแต่ละครั้งต้องใช้ค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการกลึง ค่าเครื่องจักรและอุปกรณ์รวมไปถึงค่าแรงพนักงาน เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายดังกล่าวจึงต้องลดการทดลอง วิธีของทากูชิถูกเลือกเข้ามาใช้เพื่อลดจำนวนครั้งในการทดลองอย่างมีประสิทธิภาพโดยวิธีการของทากูชิที่ 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ เมื่อเทียบกับตารางมาตรฐานของวิธีการทากูชิ (Orthogonal Array) ดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 มาตรฐานของวิธีการทากูชิ (Standard Orthogonal Array)

จำนวนปัจจัย	ระดับของปัจจัย				จำนวนปัจจัย	ระดับของปัจจัย			
	2	3	4	5		2	3	4	5
2	L4	L9	L16	L25	17	L32	L36	-	-
3	L4	L9	L16	L25	18	L32	L36	-	-
4	L8	L9	L16	L25	19	L32	L36	-	-
5	L8	L18	L16	L25	20	L32	L36	-	-
6	L8	L18	L32	L25	21	L32	L36	-	-
7	L8	L18	L32	L50	22	L32	L36	-	-
8	L12	L18	L32	L50	23	L32	L36	-	-
9	L12	L27	L32	L50	24	L32	-	-	-
10	L12	L27	L32	L50	25	L32	-	-	-
11	L12	L27	L32	L50	26	L32	-	-	-
12	L16	L27	L32	L50	27	L32	-	-	-
13	L16	L27	-	-	28	L32	-	-	-

จำนวนปัจจัย	ระดับของปัจจัย				จำนวนปัจจัย	ระดับของปัจจัย			
	2	3	4	5		2	3	4	5
14	L16	L36	-	-	29	L32	-	-	-
15	L16	L36	-	-	30	L32	-	-	-
16	L32	L36	-	-	31	L32	-	-	-

ข้อมูลภายในตารางที่ 3-3 แสดงรูปแบบตารางแผนการทดลอง (Matrix Experiment) ที่เหมาะสม จากจำนวนปัจจัย 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แผนการทดลองที่เหมาะสมคือ Orthogonal Array L9 ซึ่งมีระดับขั้นความอิสระเท่ากับ 9 ชั้น แสดงดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 แผนการทดลอง (Matrix Experiment) ที่เหมาะสม Orthogonal Array L9

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย		
	1	2	3
1	1 (-)	1 (-)	1 (-)
2	1 (-)	2 (0)	2 (0)
3	1 (-)	3 (+)	3 (+)
4	2 (0)	1 (-)	2 (0)
5	2 (0)	2 (0)	3 (+)
6	2 (0)	3 (+)	1 (-)
7	3 (+)	1 (-)	3 (+)
8	3 (+)	2 (0)	1 (-)
9	3 (+)	3 (+)	2 (0)

การทดลองนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกลิ้งชิ้นงานด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซี ซึ่งพิจารณาปัจจัยทั้งสิ้น 3 ปัจจัย คือ อัตราป้อน ความเร็วตัด และระยะป้อนลึก โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ เมื่อพิจารณาที่ตารางมาตรฐานของวิธีการทากูชิ (Standard Orthogonal Array) จึงเลือกใช้ Orthogonal Array L9 ซึ่งมีระดับขั้นความอิสระเท่ากับ 9 ชั้น ดังตารางที่ 3-5 แสดงระดับปัจจัยแบบ Coded unit และ Uncoded unit

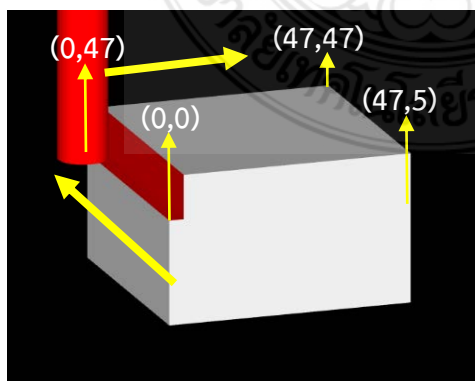
ตารางที่ 3-5 แผนการทดลองโดยใช้ Orthogonal Array L9 ตามวิธีการทากูชิ แบบ Coded unit และ Uncoded unit โดยควบคุมทิศทางการกัดชิ้นงาน (G)

ลำดับการทดลอง	ปัจจัยที่ทำการควบคุมในการทดลอง		
	D ระยะป้อนลึก (mm)	V ความเร็วตัด (m/min)	F อัตราป้อน (mm/rev)
1	(1) 3	(1) 1200	(1) 80
2	(1) 3	(2) 1500	(2) 100
3	(1) 3	(3) 1800	(3) 120
4	(2) 4	(1) 1200	(2) 100
5	(2) 4	(2) 1500	(3) 120
6	(2) 4	(3) 1800	(1) 80
7	(3) 5	(1) 1200	(3) 120
8	(3) 5	(2) 1500	(1) 80
9	(3) 5	(3) 1800	(2) 100

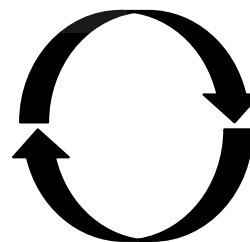
จากแผนการทดลองตามวิธีการทากูชิ โดยกำหนดปัจจัย 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกในการกัด (Depth of cut) ซึ่งไม่รวมปัจจัยของทิศทางการกัดชิ้นงานซึ่งมี 2 ระดับ คือ G41 และ G42 จึงต้องทำการทดสอบ ตามแผนการทดลองตามวิธีทากูชิ 2 ครั้ง ด้วยแผนเดียวกับแต่มีทิศทางการกัดชิ้นงานต่างกัน

3.2 ออกแบบโปรแกรมเครื่องจักรกลอัตโนมัติในการทดสอบ

3.2.1 โปรแกรมการกัดตามคำสั่ง G41



คำสั่ง G41 ตามเข็มนาฬิกา

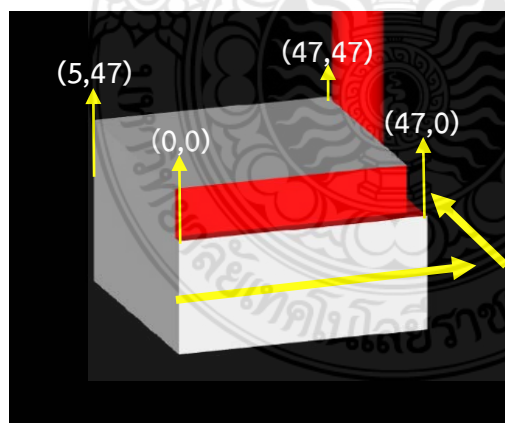


ภาพที่ 3-2 รูปแบบการทำงานของคำสั่งการกัด G41

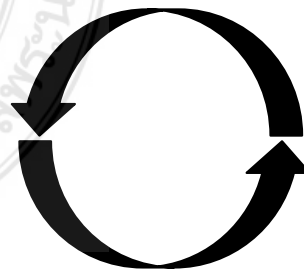
ตารางที่ 3-6 คำสั่งในการทดสอบกัดชิ้นงานคำสั่ง G41

ชุดคำสั่ง	คำอธิบาย
N0000 : G54	ตำแหน่งจุดศูนย์เครื่องจักรอัตโนมัติ
N0010 : G92 X0.000 Y-50.000 Z24.10	การย้ายจุดศูนย์กลางเครื่องจากตำแหน่งเดิม
N0020 : G59	คำสั่งเริ่มกำหนดตำแหน่งงาน
N0030 : T0505	เลือกเครื่องมือในการกัดชิ้นงาน
N0040 : S1500 G94 F100 M03	1500 รอบต่อนาที ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที
N0050 : G00 X-10.000 Y-10.00 Z50.000	เดินเครื่อง ที่ X 10 Y 10 Z 50 มิลลิเมตร
N0060 : Z-3.000	เดินเครื่องกินชิ้นงาน Z -3
N0070 : G01 G41 X3.000 Y-3.000	เดินเครื่องกินชิ้นงานคำสั่งตามเข็มนาฬิกา
N0080 : Y47.000	X 3 Y -3 มิลลิเมตร
N0090 : X47.000	Y 47 X 47 มิลลิเมตร
N0100 : Y3.000	Y 3 มิลลิเมตร
N0110 : X-5.000	X 3 มิลลิเมตร
N0120 : G01 X-10.000 Y-10.000	เดินชิ้นงานออกจากเครื่อง X 10 Y -10 มิลลิเมตร
N0130 : G00 Z50.00	Z 50 มิลลิเมตร
N0140 : G53 G56 M30	จบโปรแกรมการทำงานของเครื่อง

3.2.2 โปรแกรมการกัดตามคำสั่ง G42



คำสั่ง G42 ทวนเข็มนาฬิกา



ภาพที่ 3-3 รูปแบบการทำงานของคำสั่งการกัด G42

ตารางที่ 3-7 คำสั่งในการทดสอบกัดชิ้นงานคำสั่ง G42

ชุดคำสั่ง	คำอธิบาย
N0000 : G54	ตำแหน่งจุดศูนย์เครื่องจักรอัตโนมัติ

N0010 : G92 X0.000 Y-50.000 Z24.100	การย้ายจุดศูนย์กลางเครื่องจากตำแหน่งเดิม
N0020 : G59	คำสั่งเริ่มกำหนดตำแหน่งงาน
N0030 : T0505	เลือกเครื่องมือในการกัดชิ้นงาน
N0040 : S1500 G94 F100 M03	1500 รอบต่อนาที ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที
N0050 : G00 X-10.000 Y-10.00 Z50.0	เดินเครื่อง ที่ X -10 Y -10 Z 50 มิลลิเมตร
N0060 : Z-3.000	เดินเครื่องกินชิ้นงาน Z -3
N0070 : G01 G42 X3.000 Y-3.000	เดินเครื่องกินชิ้นงานคำสั่งทวนเข็มนาฬิกา
N0080 : Y47.000	X 3 Y -3 มิลลิเมตร
N0090 : X47.000	Y 47 X 47 มิลลิเมตร
N0100 : Y3.000	Y 3 มิลลิเมตร
N0110 : X-5.000	X -5 มิลลิเมตร
N0120 : G01 X-10.000 Y-10.000	เดินชิ้นงานออกจากเครื่อง X -10 Y -10 มิลลิเมตร
N0130 : G00 Z50.00	Z 50 มิลลิเมตร
N0140 : X60.000 Y60.000	เดินเครื่องออกจากโต๊ะงาน X 60 Y 60 มิลลิเมตร
N0150 : G53 G56 M30	จบโปรแกรมการทำงานของเครื่อง



3.3 นำชิ้นงานทั้งหมดจากเงื่อนไขทดสอบการกัดงานจริง

3.3.1 เตรียมความพร้อมของเครื่องจักรกลอัตโนมัติ

3.3.1.1 ตรวจสอบชุดจับยึดชิ้นงาน

3.3.1.2 ตรวจสอบอุปกรณ์คอมพิวเตอร์

3.3.1.3 ตรวจสอบการเคลื่อนของทิศทาง X, Y, Z

3.3.1.4 อัดน้ำมันพื้นที่การเดินเครื่องในแต่ละแกน

3.3.1.5 ทำความสะอาดพื้นผิวเครื่องที่มีผลต่อการทดลอง

3.3.2 ทดลองชิ้นงาน 1 ชิ้นเพื่อหาระยะดอกกัดที่เหมาะสม

3.3.2.1 กัดชิ้นงานทดสอบ 1 ชิ้น ด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ

3.3.2.2 วัดความลึกของคมตัดที่ผิวชิ้นงานเพื่อหาระยะความลึกที่เหมาะสมกับดอกกัด

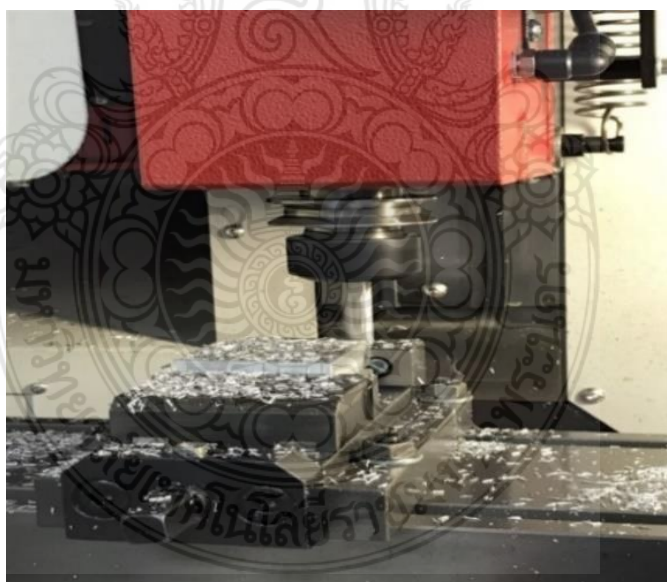
ตามเงื่อนไขผู้ผลิต (End Mill)

3.3.2.3 แก้ไขโปรแกรมในทิศทางแกน Y บวกลบตามระยะชิ้นงานทดลอง

3.3.2.4 ถอดหัวเครื่องมือ (Tool) เพื่อทำการเปลี่ยนดอกกัดจริงและวัดระยะห่างของหัว

จับทูลกับดอกกัดให้ได้ระยะที่ชิ้นงานทดลองวัดได้

3.3.2.5 ประกอบทูลเข้ากับเครื่องจักรกลอัตโนมัติ



ภาพที่ 3-4 ชิ้นงานทดสอบหาระยะป้อนคำสั่งโปรแกรม NC

3.3.3 ทำการ (Set Program) การกัดทั้ง G41 และ G42

G41 คือ คำสั่ง ในเครื่องจักรกลอัตโนมัติ PROGRAM 0007 ใช้ในการกัดงานทดสอบงานจริง คำสั่งการกัดตามเข็มนาฬิกา ทดสอบโดยมีความลึกตัดในทางแกน X 3 มิลลิเมตร แกน Y 3 มิลลิเมตร จากขอบชิ้นงานทดสอบ

EDIT		PROGRAM 0007	
N0000 G54		N0100 Y3.000	
N0010 G92 X0.000 Y-50.000 Z24.100		N0110 X-5.000	
N0020 G59		N0120 G01 G40 X-10.000 Y-10.000	
N0030 T0505		N0130 G00 Z50.000	
N0040 S1500 G94 F100 M03		N0140 X60.000 Y60.000	
N0050 G00 X-10.000 Y-10.000 Z50.000		N0150 G53 G56 M30	
N0060 Z-3.000			
N0070 G01 G41 X3.000 Y-3.000			
N0080 Y47.000			
N0090 X47.000			

ภาพที่ 3-5 โปรแกรมใช้ในคำสั่งการกัด G41

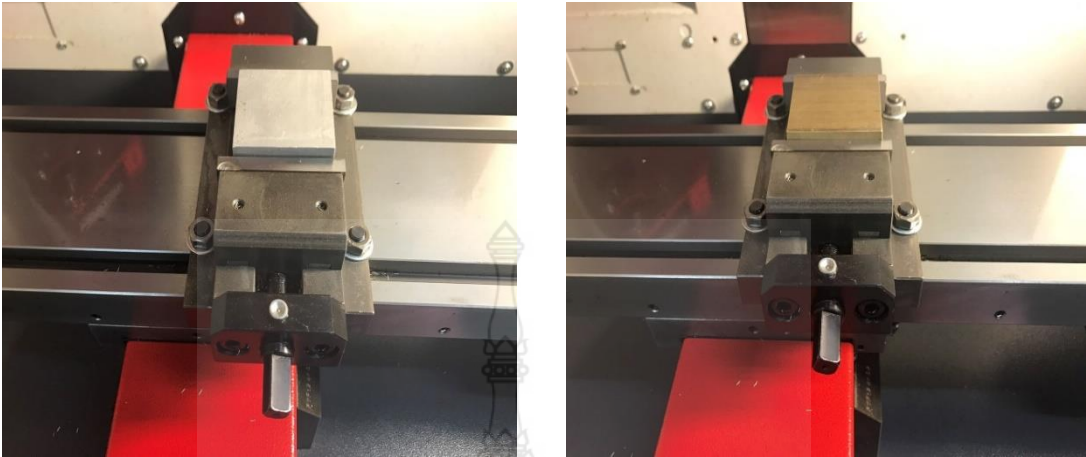
G42 คือ คำสั่ง ในเครื่องจักรกลอัตโนมัติ PROGRAM 0008 ใช้ในการกัดงานทดสอบงานจริง คำสั่งการกัดทวนเข็มนาฬิกา ทดสอบโดยมีความลึกตัดในทางแกน X 3 มิลลิเมตร แกน Y 3 มิลลิเมตร จากขอบชิ้นงานทดสอบ

EDIT		EDIT	
PROGRAM 0008		PROGRAM 0008	
N0000 G54		N0100 X3.000	
N0010 G92 X0.000 Y-50.000 Z24.100		N0110 Y-5.000	
N0020 G59		N0120 G01 G40 X-10.000 Y-10.000	
N0030 T0505		N0130 G00 Z50.000	
N0040 S1500 G94 F100 M03		N0140 X60.000 Y60.000	
N0050 G00 X-10.000 Y-10.000 Z50.000		N0150 G53 G56 M30	
N0060 Z-3.000			
N0070 G01 G42 X3.000 Y3.000			
N0080 X47.000			
N0090 Y47.000			

ภาพที่ 3-6 ใช้ในคำสั่งการกัด G42

3.3.4 นำชิ้นงานจับยึดกับปากกาจับชิ้นงานเทียบศูนย์ (W) กับปากกา

จับชิ้นงานทดสอบเข้ากับปากกาหาระยะศูนย์ของเครื่องจักรกลอัตโนมัติโดยใช้จุดศูนย์กลางของปากกาที่จุด (W) ทิศทางด้านซ้ายสุดของปากกา



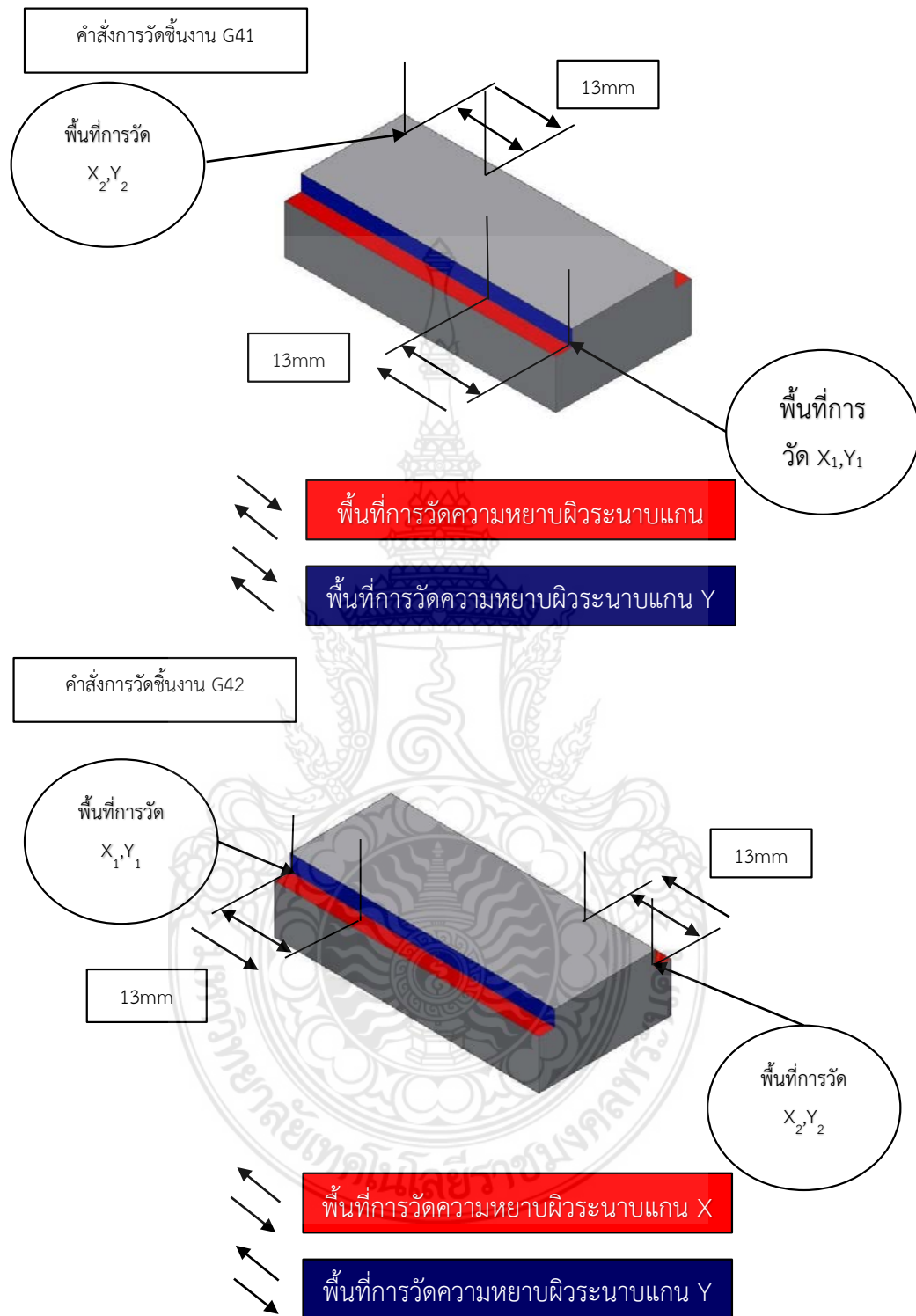
ภาพที่ 3-7 การจับชิ้นงานกับปากก

3.3.5 เริ่มกระบวนการกัดชิ้นงานการกัดตามเข็มนาฬิกา (G41) และทวนเข็มนาฬิกา (G42)

3.3.6 นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัดเสร็จสิ้นทั้งการกัดตามเข็มนาฬิกา (G41) และกัดทวนเข็มนาฬิกา (G42) มาวัดความหยาบผิวของชิ้นงาน



ภาพที่ 3-8 ชิ้นงานทองเหลืองและอลูมิเนียมผ่านการกัด



ภาพที่ 3-9 พื้นที่วัดความหยาบผิวของทองเหลืองและอลูมิเนียม

3.4 ทดสอบและเก็บผลการทดลอง

จากแผนการทดลองตามวิธีการทากูชิ โดยกำหนดปัจจัย 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกในการกัด (Depth of cut) ซึ่งไม่รวมปัจจัยของทิศทางการกัดชิ้นงานซึ่งมี 2 ระดับ คือ G41 และ G42 จึงต้องทำการทดสอบ ตามแผนการทดลองตามวิธีทากูชิ 2 ครั้ง ด้วยแผนเดียวกันแต่มีทิศทางการกัดชิ้นงานต่างกัน ได้ผลการทดสอบแต่ละรูปแบบการทดลองดังนี้

ตารางที่ 3-8 ความหยาบผิวของทองเหลืองที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G41

ลำดับการทดลอง	ทิศทางการกัด G41 ปัจจัย			ความหยาบผิว : X (μm) ทองเหลือง		
	D (mm)	V (m/min)	F (mm/rev)	X ₁ (μm)	X ₂ (μm)	ค่าเฉลี่ย
1	3	1200	80	0.74	0.69	0.72
2	3	1500	100	0.77	0.63	0.70
3	3	1800	120	0.63	0.69	0.66
4	4	1200	100	1.14	0.99	1.07
5	4	1500	120	0.96	1.56	1.26
6	4	1800	80	0.96	1.41	1.19
7	5	1200	120	1.17	1.13	1.15
8	5	1500	80	0.76	1.14	0.95
9	5	1800	100	1.12	0.79	0.96

ตารางที่ 3-9 ความหยาบผิวของทองเหลืองที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G42

ลำดับการทดลอง	ทิศทางการกัด G42 ปัจจัย			ความหยาบผิว : X (μm) ทองเหลือง		
	D (mm)	V (m/min)	F (mm/rev)	X ₁ (μm)	X ₂ (μm)	ค่าเฉลี่ย
1	3	1200	80	1.10	0.98	1.04
2	3	1500	100	1.22	1.48	1.35
3	3	1800	120	0.84	1.23	1.04
4	4	1200	100	1.57	1.41	1.49
5	4	1500	120	1.43	1.05	1.24
6	4	1800	80	1.88	1.02	1.45
7	5	1200	120	1.47	1.92	1.70

ลำดับการทดลอง	ทิศทางการกัด G42 ปัจจัย			ความหยาบผิว : X (μm) ทองเหลือง		
	D (mm)	V (m/min)	F (mm/rev)	X ₁ (μm)	X ₂ (μm)	ค่าเฉลี่ย
8	5	1500	80	1.19	1.28	1.24
9	5	1800	100	1.50	1.31	1.41

ตารางที่ 3-10 ความหยาบผิวของอลูมิเนียมที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G41

ลำดับการทดลอง	ทิศทางการกัด G41 ปัจจัย			ความหยาบผิว : X (μm) อลูมิเนียม		
	D (mm)	V (m/min)	F (mm/rev)	X ₁ (μm)	X ₂ (μm)	ค่าเฉลี่ย
1	3	1200	80	1.43	1.51	1.47
2	3	1500	100	0.48	0.27	0.38
3	3	1800	120	1.13	1.31	1.22
4	4	1200	100	1.05	0.99	1.02
5	4	1500	120	0.58	0.47	0.53
6	4	1800	80	0.36	0.39	0.38
7	5	1200	120	1.64	1.58	1.61
8	5	1500	80	0.52	0.49	0.51
9	5	1800	100	0.48	0.43	0.46

ตารางที่ 3-11 ความหยาบผิวของอลูมิเนียมที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G42

ลำดับการทดลอง	ทิศทางการกัด G42 ปัจจัย			ความหยาบผิว : X (μm) อลูมิเนียม		
	D (mm)	V (m/min)	F (mm/rev)	X ₁ (μm)	X ₂ (μm)	ค่าเฉลี่ย
1	3	1200	80	0.36	0.39	0.38
2	3	1500	100	0.46	0.38	0.42
3	3	1800	120	0.47	0.35	0.41
4	4	1200	100	0.55	0.66	0.61
5	4	1500	120	0.58	0.62	0.60
6	4	1800	80	0.44	0.34	0.39
7	5	1200	120	0.64	0.86	0.75

ลำดับการทดลอง	ทิศทางการกัด G42 ปัจจัย			ความหยาบผิว : X (μm) อลูมิเนียม		
	D (mm)	V (m/min)	F (mm/rev)	X ₁ (μm)	X ₂ (μm)	ค่าเฉลี่ย
8	5	1500	80	0.60	0.47	0.54
9	5	1800	100	0.51	0.65	0.58

จากข้อมูลการทดลองทั้งนี้จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทากูซีเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกัดชิ้นงานและเงื่อนไขในการกัดที่เหมาะสมที่สุดในบทที่ 4 ต่อไป



บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

จากแผนการทดลองตามวิธีการทากูชิที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งได้กำหนดปัจจัย 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกในการกัด (Depth of cut) ซึ่งไม่รวมปัจจัยของทิศทางการกัดชิ้นงานซึ่งมี 2 ระดับ คือ G41 และ G42 จึงต้องทำการทดสอบ ตามแผนการทดลองตามวิธีทากูชิ 2 ครั้ง ด้วยแผนเดียวกับแต่มีทิศทางการกัดชิ้นงานต่างกัน ทำการวิเคราะห์ได้ผลดังนี้

4.1 วิธีการทากูชิสำหรับชิ้นงานทองเหลือง

4.1.1 วิธีการทากูชิสำหรับทิศทางการกัดชิ้นงาน G41

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองทั้ง 9 ชุดการทดลอง ได้ค่าผลตอบสนองของความหยาบผิว (Surface Roughness) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ความหยาบผิวของทองเหลืองที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G41

ลำดับการทดลอง	ทิศทางการกัด G41 ปัจจัย			ความหยาบผิว : X (μm) ทองเหลือง		
	D (mm)	V (m/min)	F (mm/rev)	X ₁ (μm)	X ₂ (μm)	ค่าเฉลี่ย
1	3	1200	80	0.74	0.69	0.72
2	3	1500	100	0.77	0.63	0.70
3	3	1800	120	0.63	0.69	0.66
4	4	1200	100	1.14	0.99	1.07
5	4	1500	120	0.96	1.56	1.26
6	4	1800	80	0.96	1.41	1.19
7	5	1200	120	1.17	1.13	1.15
8	5	1500	80	0.76	1.14	0.95
9	5	1800	100	1.12	0.79	0.96

4.1.1.1 ค่าอัตราส่วน S/N – Ratio ของความหยาบผิว

จากการทดสอบชิ้นงานด้วยระดับปัจจัยที่แตกต่างกันได้ค่าความหยาบผิวดังตารางที่ 4-1 นำมาใช้ในการคำนวณหาค่า S/N – Ratio โดยค่าความหยาบผิวหาค่าอัตราส่วน S/N – Ratio ชนิดที่ค่าตอบสนองที่น้อยที่สุดคือค่าที่ดีที่สุด (the smaller – the better) ตามสมการที่ 4-1

S/N – Ratio แบบ the smaller – the better

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4-1)$$

เมื่อ S/N แทน อัตราส่วนของ S/N ในแต่ละ Experiment Number
 n แทน จำนวนการทดลองซ้ำในแต่ละ Experiment Number
 y_j แทน ค่าตอบสนอง (Response) ในแต่ละครั้งของการทดลอง ของแต่ละ Experiment Number

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 1 = $-10 \log (0.72^2) = -10 \log (0.518) = 2.853$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 2 = $-10 \log (0.70^2) = -10 \log (0.490) = 3.098$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 3 = $-10 \log (0.66^2) = -10 \log (0.436) = 3.609$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 4 = $-10 \log (1.07^2) = -10 \log (1.145) = -0.588$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 5 = $-10 \log (1.26^2) = -10 \log (1.588) = -2.007$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 6 = $-10 \log (1.19^2) = -10 \log (1.416) = -1.511$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 7 = $-10 \log (1.15^2) = -10 \log (1.323) = -1.214$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 8 = $-10 \log (0.95^2) = -10 \log (0.903) = 0.446$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 9 = $-10 \log (0.96^2) = -10 \log (0.922) = 0.355$

นั่นคือการคำนวณค่าอัตราส่วน S/N ของความหยาบผิวจากทดลองทั้ง 9 การทดลอง สรุปได้ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 สรุปอัตราส่วน S/N คำนวณค่าความหยาบผิวจากผลการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง

ลำดับการทดลอง	ระยะป้อนลึก (mm)	ความเร็วตัด (m/min)	อัตราป้อน (mm/rev)	ความหยาบผิว (μm)			MSD	S/N-Ratio
	D	Vc	F	X ₁	X ₂	ค่าเฉลี่ย		
1	3	1200	80	0.74	0.69	0.72	0.518	2.853
2	3	1500	100	0.77	0.63	0.70	0.490	3.098
3	3	1800	120	0.63	0.69	0.66	0.436	3.609
4	4	1200	100	1.14	0.99	1.07	1.145	-0.588

ลำดับการทดลอง	ระยะป้อนลึก (mm)	ความเร็วตัด (m/min)	อัตราป้อน (mm/rev)	ความหยาบผิว (μm)			MSD	S/N-Ratio
	D	Vc	F	X ₁	X ₂	ค่าเฉลี่ย		
5	4	1500	120	0.96	1.56	1.26	1.588	-2.007
6	4	1800	80	0.96	1.41	1.19	1.416	-1.511
7	5	1200	120	1.17	1.13	1.15	1.323	-1.214
8	5	1500	80	0.76	1.14	0.95	0.903	0.446
9	5	1800	100	1.12	0.79	0.96	0.922	0.355

Average = 0.560

จากตารางที่ 4-2 จะเห็นได้ว่าค่าความหยาบผิวที่ได้อยู่ในช่วง 0.66-1.26 ไมโครเมตร และค่ากลางเบี่ยงเบนมาตรฐาน (MSD) ของค่าความหยาบผิวอยู่ระหว่าง 0.44-1.59 อัตราส่วน S/N-Ratio ที่ได้ของค่าความหยาบผิวอยู่ระหว่าง -2.01 ถึง 3.61 โดยมีค่าเฉลี่ยของ S/N-Ratio อยู่ที่ 0.56

4.1.1.2 การวิเคราะห์ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิว

ถ้าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัยควบคุมใดมีค่ามากหมายความว่าที่ระดับปัจจัยควบคุมนั้น จะมีผลทำให้คุณภาพงานออกมาไม่ดี โดยได้ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 1} &= [(2.853) + (3.098) + (3.609)] / 3 \\ &= 3.187 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 2} &= [(-0.588) + (-2.007) + (-1.511)] / 3 \\ &= -1.369 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 3} &= [(-1.214) + (0.446) + (0.355)] / 3 \\ &= -0.138 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย V ระดับที่ 1} &= [(2.853) + (-0.588) + (-1.214)] / 3 \\ &= 0.351 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย V ระดับที่ 2} &= [(3.098) + (-2.007) + (0.446)] / 3 \\ &= 0.512 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย V ระดับที่ 3} &= [(3.609) + (-1.511) + (0.355)] / 3 \\ &= 0.818 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 1} &= [(2.853) + (-1.511) + (0.446)] / 3 \\ &= 0.596 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 2} &= [(3.098) + (-0.588) + (0.355)] / 3 \\ &= 0.955 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 3} &= [(3.609) + (-2.007) + (-1.214)] / 3 \\ &= 0.129 \end{aligned}$$

ดังนั้นได้ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวจากทดลองทั้ง 3 ปัจจัย และ 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย			min	max	max-min	%main effect
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3				
D	3.187	-1.369	-0.138	-1.369	3.187	4.556	77.90
Vc	0.351	0.512	0.818	0.351	0.818	0.467	7.99
F	0.596	0.955	0.129	0.129	0.955	0.826	14.12
					รวม	5.848	100

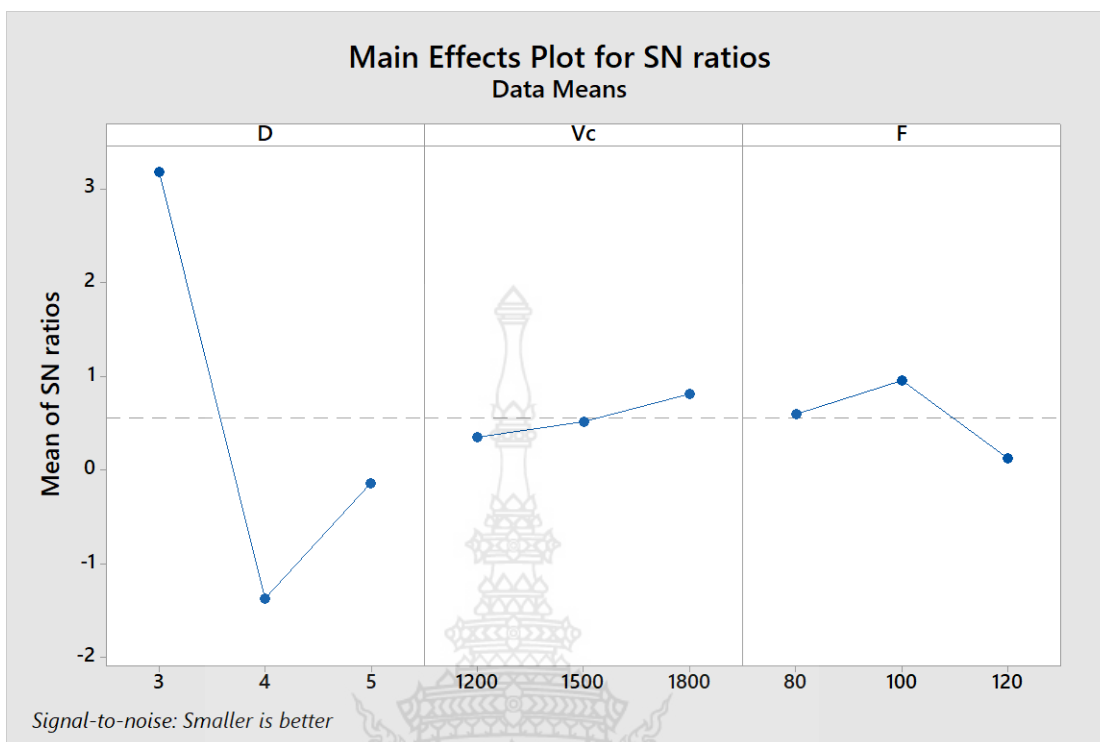
จากตารางที่ 4-3 ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย จะถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัย จากผลต่างของค่าของระดับปัจจัยที่สูง (max) และต่ำ (min) และทำการวิเคราะห์ร้อยละของอิทธิพลหลัก (%main effect) ของแต่ละปัจจัยดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{main effect ของปัจจัย D} &= (4.556 / 5.848) \times 100 \\ &= 77.90\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{main effect ของปัจจัย V} &= (0.467 / 5.848) \times 100 \\ &= 7.99\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{main effect ของปัจจัย F} &= (0.826 / 5.848) \times 100 \\ &= 14.12\% \end{aligned}$$

พบว่า ระยะเวลาป้อนลึก (D) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวของชิ้นงานมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 77.90 รองลงมาคือ อัตราป้อน (F) และความเร็วดัด (V) ตามลำดับ จากผลในตารางที่ 4-3 สามารถสร้างกราฟผลตอบสนอง S/N-Ratio โดยขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยที่ถูกคำนวณสำหรับแต่ละระดับปัจจัยและผลกระทบรวมได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ของระดับต่างๆ ของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองกับ
ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

จากภาพที่ 4-1 พบว่าที่ระดับปัจจัย V และ F ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน น้อยมาก เมื่อเทียบกับระดับปัจจัย D ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานมาก โดยที่ D ระดับที่ 2 ทำให้ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด โดยสรุปจากกราฟหากต้องการให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด ควรกำหนด D ระดับที่ 2 คือ 4 มิลลิเมตร, V ระดับที่ 1 คือ 1200 เมตรต่อนาที และ F ระดับที่ 3 คือ 120 มิลลิเมตรต่อรอบ

การวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ถ้าหากระดับของแต่ละปัจจัยใดมีค่ามากกว่าศูนย์ หมายความว่า ค่าของปัจจัยหลักที่ระดับปัจจัยนั้นเป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว แต่หากระดับของแต่ละปัจจัยใดมีค่าน้อยกว่าศูนย์ หมายความว่า ค่าของปัจจัยหลักที่ระดับปัจจัยนั้นเป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว โดยอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานแสดงผลดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน

ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย (1)			อิทธิพลต่อความหยาบผิว = (1) - (2)		
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3
D	3.187	-1.369	-0.138	2.627	-1.929	-0.698
V	0.351	0.512	0.818	-0.209	-0.048	0.258
F	0.596	0.955	0.129	0.036	0.395	-0.431

หมายเหตุ : (2) ค่าเฉลี่ย S/N-Ratio ของความหยาบผิว = 0.560 (ตารางที่ 4-2)

จากตารางที่ 4-4 เป็นอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน พบว่า องค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว 0.56 คือ D ระดับที่ 1, V ระดับที่ 3 และ F ระดับที่ 1 และ 2 (ค่าของอิทธิพลมากกว่าศูนย์) และ องค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว 0.56 คือ D ระดับที่ 2 และ 3, V ระดับที่ 1 และ 2, F ระดับที่ 3 (ค่าของอิทธิพลน้อยกว่าศูนย์)

4.1.1.3 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง สำหรับการทดลองนี้กำหนดให้ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 4-2

General Linear Model: Ra versus D, Vc, F						
Method						
Factor coding (-1, 0, +1)						
Factor Information						
Factor	Type	Levels	Values			
D	Fixed	3	3, 4, 5			
Vc	Fixed	3	1200, 1500, 1800			
F	Fixed	3	80, 100, 120			
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
D	2	0.360622	0.180311	15.66	0.060	
Vc	2	0.003089	0.001544	0.13	0.882	
F	2	0.019622	0.009811	0.85	0.540	
Error	2	0.023022	0.011511			
Total	8	0.406356				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			

0.107290	94.33%	77.34%	0.00%		
Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.9622	0.0358	26.91	0.001	
D					
3	-0.2689	0.0506	-5.32	0.034	1.33
4	0.2111	0.0506	4.17	0.053	1.33
Vc					
1200	0.0178	0.0506	0.35	0.759	1.33
1500	0.0078	0.0506	0.15	0.892	1.33
F					
80	-0.0089	0.0506	-0.18	0.877	1.33
100	-0.0522	0.0506	-1.03	0.410	1.33
Regression Equation					
$Ra = 0.9622 - 0.2689 D_3 + 0.2111 D_4 + 0.0578 D_5 + 0.0178 Vc_{1200} + 0.0078 Vc_{1500} - 0.0256 Vc_{1800} - 0.0089 F_{80} - 0.0522 F_{100} + 0.0611 F_{120}$					

ภาพที่ 4-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ S/N-Ratio ของความหยาบผิว (X)

จากภาพที่ 4-2 พบว่าค่า P-value ของปัจจัยทดสอบทั้ง 3 ปัจจัย ไม่มีปัจจัยใดที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีปัจจัย D ที่มีค่า P-value ใกล้ 0.05 มากที่สุด แสดงว่าระยะป้อน (D) ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่ว่าค่า D มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวมากที่สุด

4.1.2 วิธีการหาQUIS สำหรับทิศทางการกัดชิ้นงาน G42

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองทั้ง 9 ชุดการทดลอง ได้ค่าผลตอบสนองของความหยาบผิว (Surface Roughness) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ความหยาบผิวของทองเหลืองที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G42

ลำดับการทดลอง	ทิศทางการกัด G42 ปัจจัย			ความหยาบผิว : X (μm) ทองเหลือง		
	D (mm)	V (m/min)	F (mm/rev)	X ₁ (μm)	X ₂ (μm)	ค่าเฉลี่ย
1	3	1200	80	1.10	0.98	1.04
2	3	1500	100	1.22	1.48	1.35
3	3	1800	120	0.84	1.23	1.04
4	4	1200	100	1.57	1.41	1.49

ลำดับการทดลอง	ทิศทางการกัด G42 ปัจจัย			ความหยาบผิว : X (μm) ทองเหลือง		
	D (mm)	V (m/min)	F (mm/rev)	X ₁ (μm)	X ₂ (μm)	ค่าเฉลี่ย
5	4	1500	120	1.43	1.05	1.24
6	4	1800	80	1.88	1.02	1.45
7	5	1200	120	1.47	1.92	1.70
8	5	1500	80	1.19	1.28	1.24
9	5	1800	100	1.50	1.31	1.41

4.1.2.1 ค่าอัตราส่วน S/N – Ratio ของความหยาบผิว

จากการทดสอบชิ้นงานด้วยระดับปัจจัยที่ต่างกันได้ค่าความหยาบผิวดังตารางที่ 4-5 นำมาใช้ในการคำนวณหาค่า S/N – Ratio โดยค่าความหยาบผิวหาค่าอัตราส่วน S/N – Ratio ชนิดที่ค่าตอบสนองที่น้อยที่สุดคือค่าที่ดีที่สุด (the smaller – the better) ตามสมการที่ 4-2

S/N – Ratio แบบ the smaller – the better

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4-2)$$

เมื่อ S/N แทน อัตราส่วนของ S/N ในแต่ละ Experiment Number

n แทน จำนวนการทดลองซ้ำในแต่ละ Experiment Number

y_j แทน ค่าตอบสนอง (Response) ในแต่ละครั้งของการทดลอง ของแต่ละ Experiment Number

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 1 = $-10 \log (1.04^2) = -10 \log (1.082) = -0.341$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 2 = $-10 \log (1.35^2) = -10 \log (1.823) = -2.607$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 3 = $-10 \log (1.04^2) = -10 \log (1.082) = -0.341$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 4 = $-10 \log (1.49^2) = -10 \log (2.200) = -3.464$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 5 = $-10 \log (1.24^2) = -10 \log (1.538) = -1.868$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 6 = $-10 \log (1.45^2) = -10 \log (2.103) = -3.227$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 7 = $-10 \log (1.70^2) = -10 \log (2.890) = -4.609$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 8 = $-10 \log (1.24^2) = -10 \log (1.538) = -1.868$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 9 = $-10 \log (1.41^2) = -10 \log (1.988) = -2.984$

นั่นคือการคำนวณค่าอัตราส่วน S/N ของความหยาบผิวจากทดลองทั้ง 9 การทดลอง สรุปได้ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 สรุปอัตราส่วน S/N คำนวณค่าความหยาบจากผลการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง

ลำดับการทดลอง	ระยะป้อนลึก (mm)	ความเร็วตัด (m/min)	อัตราป้อน (mm/rev)	ความหยาบผิว (μm)			MSD	S/N-Ratio
	D	Vc	F	X ₁	X ₂	ค่าเฉลี่ย		
1	3	1200	80	1.1	0.98	1.04	1.082	-0.341
2	3	1500	100	1.22	1.48	1.35	1.823	-2.607
3	3	1800	120	0.84	1.23	1.04	1.082	-0.341
4	4	1200	100	1.57	1.41	1.49	2.220	-3.464
5	4	1500	120	1.43	1.05	1.24	1.538	-1.868
6	4	1800	80	1.88	1.02	1.45	2.103	-3.227
7	5	1200	120	1.47	1.92	1.7	2.890	-4.609
8	5	1500	80	1.19	1.28	1.24	1.538	-1.868
9	5	1800	100	1.5	1.31	1.41	1.988	-2.984

Average = -2.368

จากตารางที่ 4-6 จะเห็นได้ว่าค่าความหยาบผิวที่ได้อยู่ในช่วง 1.04-1.70 ไมโครเมตร และค่ากลางเบี่ยงเบนมาตรฐาน (MSD) ของค่าความหยาบผิวอยู่ระหว่าง 1.08-2.89 อัตราส่วน S/N-Ratio ที่ได้ของค่าความหยาบผิวอยู่ระหว่าง -4.61 ถึง -0.34 โดยมีค่าเฉลี่ยของ S/N-Ratio อยู่ที่ -2.368

4.1.2.2 การวิเคราะห์ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิว

ถ้าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัยควบคุมใดมีค่ามากหมายความว่าที่ระดับปัจจัยควบคุมนั้นจะมีผลทำให้คุณภาพงานออกมาไม่ดี โดยได้ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 1} &= [(-0.341) + (-2.607) + (-0.341)] / 3 \\ &= -1.096 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 2} &= [(-3.464) + (-1.868) + (-3.227)] / 3 \\ &= -2.853 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 3} &= [(-4.609) + (-1.868) + (-2.984)] / 3 \\ &= -3.154 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย V ระดับที่ 1} &= [(-0.341) + (-3.464) + (-4.609)] / 3 \\ &= -2.804 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย V ระดับที่ 2} &= [(-2.607) + (-1.868) + (-1.868)] / 3 \\ &= -2.115 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย V ระดับที่ 3} &= [(-0.341) + (-3.227) + (-2.984)] / 3 \\ &= -2.184 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 1} &= [(-0.341) + (-3.227) + (-1.868)] / 3 \\ &= -1.812 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 2} &= [(-2.607) + (-3.464) + (-2.984)] / 3 \\ &= -3.018 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 3} &= [(-0.341) + (-1.868) + (-4.609)] / 3 \\ &= -2.273 \end{aligned}$$

ดังนั้นได้ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวจากทดลองทั้ง 3 ปัจจัย และ 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย			min	max	max-min	%main effect
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3				
D	-1.096	-2.853	-3.154	-3.154	-1.096	2.058	52.05
Vc	-2.804	-2.115	-2.184	-2.804	-2.115	0.690	17.45
F	-1.812	-3.018	-2.273	-3.018	-1.812	1.206	30.50
						รวม 3.954	100

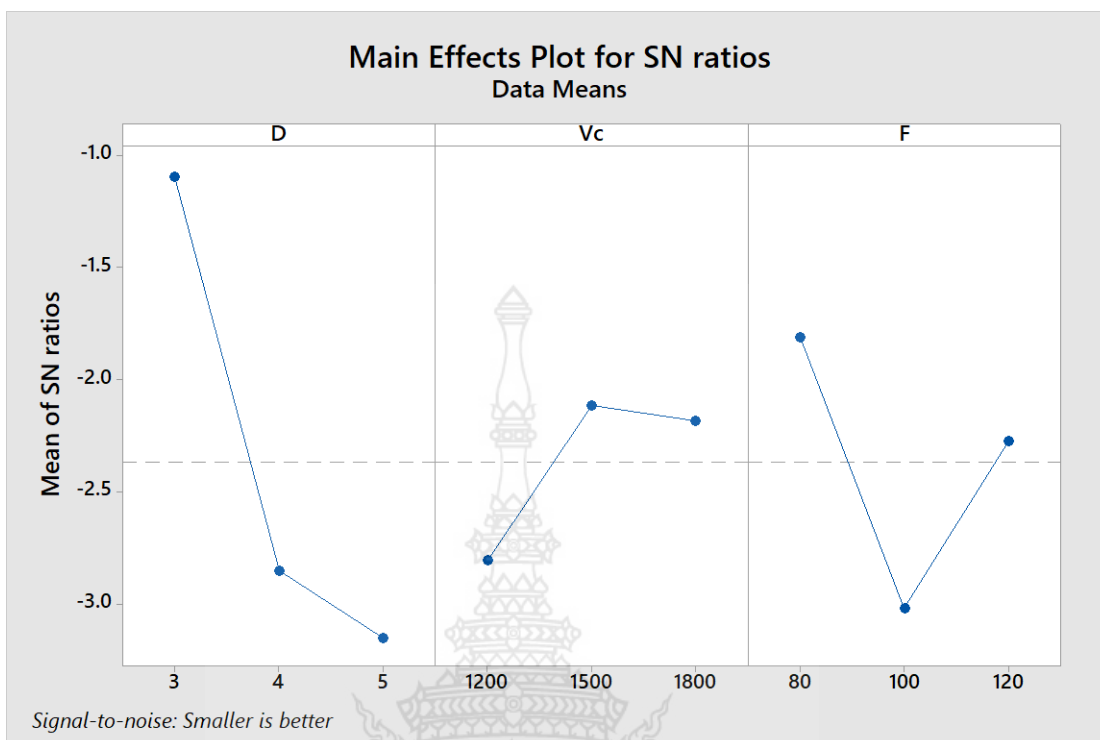
จากตารางที่ 4-7 ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย จะถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัย จากผลต่างของค่าของระดับปัจจัยที่สูง (max) และต่ำ (min) และทำการวิเคราะห์ร้อยละของอิทธิพลหลัก (%main effect) ของแต่ละปัจจัยดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{main effect ของปัจจัย D} &= (2.058 / 3.954) \times 100 \\ &= 52.05\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{main effect ของปัจจัย V} &= (0.690 / 3.954) \times 100 \\ &= 17.45\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{main effect ของปัจจัย F} &= (1.206 / 3.954) \times 100 \\ &= 30.50\% \end{aligned}$$

พบว่า ระยะเวลาป้อน (D) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวของชิ้นงานมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 52.05 รองลงมาคือ อัตราป้อน (F) เป็นร้อยละ 30.50 และความเร็วตัด (V) เป็นร้อยละ 17.45 ตามลำดับ จากผลในตารางที่ 4-7 สามารถสร้างกราฟผลตอบสนอง S/N-Ratio โดยขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยที่ถูกคำนวณสำหรับแต่ละระดับปัจจัยและผลกระทบรวมได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ของระดับต่างๆ ของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองกับ
ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

จากภาพที่ 4-3 พบว่าที่ระดับปัจจัย V และ F ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน น้อยมาก เมื่อเทียบกับระดับปัจจัย D ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานมาก โดยที่ D ระดับที่ 3 ทำให้ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด โดยสรุปจากกราฟหากต้องการให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด ควรกำหนด D ระดับที่ 3 คือ 5 มิลลิเมตร, V ระดับที่ 1 คือ 1200 เมตรต่อนาที และ F ระดับที่ 2 คือ 100 มิลลิเมตรต่อรอบ

การวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ถ้าหากระดับของแต่ละปัจจัยใดมีค่ามากกว่าศูนย์ หมายความว่า ค่าของปัจจัยหลักที่ระดับปัจจัยนั้นเป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว แต่หากระดับของแต่ละปัจจัยใดมีค่าน้อยกว่าศูนย์ หมายความว่า ค่าของปัจจัยหลักที่ระดับปัจจัยนั้นเป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว โดยอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานแสดงผลดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน

ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย (1)			อิทธิพลต่อความหยาบผิว = (1) - (2)		
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3
D	-1.096	-2.853	-3.154	1.272	-0.485	-0.786
V	-2.804	-2.115	-2.184	-0.437	0.253	0.184
F	-1.812	-3.018	-2.273	0.556	-0.651	0.095

หมายเหตุ : (2) ค่าเฉลี่ย S/N-Ratio ของความหยาบผิว = -2.368 (ตารางที่ 4-6)

จากตารางที่ 4-8 เป็นอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน พบว่าองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว -2.368 คือ D ระดับที่ 1, V ระดับที่ 2 และ 3, F ระดับที่ 1 และ 3 (ค่าของอิทธิพลมากกว่าศูนย์) และองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว -2.368 คือ D ระดับที่ 2 และ 3, V ระดับที่ 1 และ F ระดับที่ 2 (ค่าของอิทธิพลน้อยกว่าศูนย์)

4.1.2.3 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง สำหรับการทดลองนี้กำหนดให้ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 4-4

General Linear Model: Ra versus D, Vc, F					
Method					
Factor coding (-1, 0, +1)					
Factor Information					
Factor	Type	Levels	Values		
D	Fixed	3	3, 4, 5		
Vc	Fixed	3	1200, 1500, 1800		
F	Fixed	3	80, 100, 120		
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
D	2	0.15976	0.07988	1.20	0.454
Vc	2	0.03042	0.01521	0.23	0.814
F	2	0.04509	0.02254	0.34	0.747
Error	2	0.13282	0.06641		
Total	8	0.36809			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0.257704	63.92%	0.00%	0.00%	

Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1.3289	0.0859	15.47	0.004	
D					
3	-0.186	0.121	-1.53	0.266	1.33
4	0.064	0.121	0.53	0.649	1.33
Vc					
1200	0.081	0.121	0.67	0.573	1.33
1500	-0.052	0.121	-0.43	0.709	1.33
F					
80	-0.086	0.121	-0.70	0.554	1.33
100	0.088	0.121	0.72	0.545	1.33
Regression Equation					
$Ra = 1.3289 - 0.186 D_3 + 0.064 D_4 + 0.121 D_5 + 0.081 Vc_{1200} - 0.052 Vc_{1500} - 0.029 Vc_{1800} - 0.086 F_{80} + 0.088 F_{100} - 0.002 F_{120}$					

ภาพที่ 4-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ S/N-Ratio ของความหยาบผิว (X)

จากภาพที่ 4-4 พบว่าค่า P-value ของปัจจัยทดสอบทั้ง 3 ปัจจัย ไม่มีปัจจัยใดที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีปัจจัย D ที่มีค่า P-value ใกล้เคียง 0.05 มากที่สุด แสดงว่าระยะป้อน (D) ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่ว่าค่า D มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวมากที่สุด

4.2 วิธีการทางสถิติสำหรับชิ้นงานอลูมิเนียม

4.2.1 วิธีการทางสถิติสำหรับการกัดชิ้นงาน G41

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองทั้ง 9 ชุดการทดลอง ได้ค่าผลตอบสนองของความหยาบผิว (Surface Roughness) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 ความหยาบผิวของอลูมิเนียมที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G41

ลำดับการทดลอง	ทิศทางการกัด G41 ปัจจัย			ความหยาบผิว : X (μm) อลูมิเนียม		
	D (mm)	V (m/min)	F (mm/rev)	X ₁ (μm)	X ₂ (μm)	ค่าเฉลี่ย
1	3	1200	80	1.43	1.51	1.47
2	3	1500	100	0.48	0.27	0.38
3	3	1800	120	1.13	1.31	1.22
4	4	1200	100	1.05	0.99	1.02
5	4	1500	120	0.58	0.47	0.53

ลำดับการทดลอง	ทิศทางกัด G41 ปัจจัย			ความหยาบผิว : X (μm) อลูมิเนียม		
	D (mm)	V (m/min)	F (mm/rev)	X ₁ (μm)	X ₂ (μm)	ค่าเฉลี่ย
6	4	1800	80	0.36	0.39	0.38
7	5	1200	120	1.64	1.58	1.61
8	5	1500	80	0.52	0.49	0.51
9	5	1800	100	0.48	0.43	0.46

4.2.1.1 ค่าอัตราส่วน S/N – Ratio ของความหยาบผิว

จากการทดสอบชิ้นงานด้วยระดับปัจจัยที่แตกต่างกันได้ค่าความหยาบผิวดังตารางที่ 4-9 นำมาใช้ในการคำนวณหาค่า S/N – Ratio โดยค่าความหยาบผิวหาค่าอัตราส่วน S/N – Ratio ชนิดที่ค่าตอบสนองที่น้อยที่สุดคือค่าที่ดีที่สุด (the smaller – the better) ตามสมการที่ 4-3

S/N – Ratio แบบ the smaller – the better

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4-3)$$

เมื่อ S/N แทน อัตราส่วนของ S/N ในแต่ละ Experiment Number

n แทน จำนวนการทดลองซ้ำในแต่ละ Experiment Number

y_j แทน ค่าตอบสนอง (Response) ในแต่ละครั้งของการทดลอง ของแต่ละ Experiment Number

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 1 = $-10 \log (1.47^2) = -10 \log (2.161) = -3.346$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 2 = $-10 \log (0.38^2) = -10 \log (0.144) = 8.404$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 3 = $-10 \log (1.22^2) = -10 \log (1.488) = -1.727$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 4 = $-10 \log (1.02^2) = -10 \log (1.040) = -0.172$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 5 = $-10 \log (0.53^2) = -10 \log (0.281) = 5.514$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 6 = $-10 \log (0.38^2) = -10 \log (0.144) = 8.404$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 7 = $-10 \log (1.61^2) = -10 \log (2.592) = -4.137$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 8 = $-10 \log (0.51^2) = -10 \log (0.260) = 5.849$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 9 = $-10 \log (0.46^2) = -10 \log (0.212) = 6.745$

นั่นคือการคำนวณค่าอัตราส่วน S/N ของความหยาบผิวจากทดลองทั้ง 9 การทดลอง สรุปได้ดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 สรุปลักษณะ S/N คำนวณค่าความหยาบจากผลการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง

ลำดับการทดลอง	ระยะป้อนลึก (mm)	ความเร็วตัด (m/min)	อัตราป้อน (mm/rev)	ความหยาบผิว (μm)			MSD	S/N-Ratio
	D	Vc	F	X ₁	X ₂	ค่าเฉลี่ย		
1	3	1200	80	0.74	0.69	0.72	2.161	-3.346
2	3	1500	100	0.77	0.63	0.70	0.144	8.404
3	3	1800	120	0.63	0.69	0.66	1.488	-1.727
4	4	1200	100	1.14	0.99	1.07	1.040	-0.172
5	4	1500	120	0.96	1.56	1.26	0.281	5.514
6	4	1800	80	0.96	1.41	1.19	0.144	8.404
7	5	1200	120	1.17	1.13	1.15	2.592	-4.137
8	5	1500	80	0.76	1.14	0.95	0.260	5.849
9	5	1800	100	1.12	0.79	0.96	0.212	6.745

Average = 2.837

จากตารางที่ 4-10 จะเห็นได้ว่าค่าความหยาบผิวที่ได้อยู่ในช่วง 0.38-1.61 ไมโครเมตร และค่ากลางเบี่ยงเบนมาตรฐาน (MSD) ของค่าความหยาบผิวอยู่ระหว่าง 0.14-2.59 อัตราส่วน S/N-Ratio ที่ได้ของค่าความหยาบผิวอยู่ระหว่าง -4.14 ถึง 8.40 โดยมีค่าเฉลี่ยของ S/N-Ratio อยู่ที่ 2.837

4.2.1.2 การวิเคราะห์ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิว

ถ้าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัยควบคุมใดมีค่ามากหมายความว่าที่ระดับปัจจัยควบคุมนั้นจะมีผลทำให้คุณภาพงานออกมาไม่ดี โดยได้ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 1} &= [(-3.346) + (8.404) + (-1.727)] / 3 \\ &= 1.110 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 2} &= [(-0.172) + (5.514) + (8.404)] / 3 \\ &= 4.582 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 3} &= [(-4.137) + (5.849) + (6.745)] / 3 \\ &= 2.819 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย V ระดับที่ 1} &= [(-3.346) + (-0.172) + (-4.137)] / 3 \\ &= -2.552 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย V ระดับที่ 2} &= [(8.404) + (5.514) + (5.849)] / 3 \\ &= 6.589 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย V ระดับที่ 3} &= [(-1.727) + (8.404) + (6.745)] / 3 \\ &= 4.474 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 1} &= [(-3.346) + (8.404) + (5.849)] / 3 \\ &= 3.636 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 2} &= [(8.404) + (-0.172) + (6.745)] / 3 \\ &= 4.992 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 3} &= [(-1.727) + (5.514) + (-4.137)] / 3 \\ &= -0.116 \end{aligned}$$

ดังนั้นได้ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวจากทดลองทั้ง 3 ปัจจัย และ 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย			min	max	max-min	%main effect
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3				
D	1.110	4.582	2.819	1.110	4.582	3.472	19.59
Vc	-2.552	6.589	4.474	-2.552	6.589	9.141	51.58
F	3.636	4.992	-0.116	-0.116	4.992	5.109	28.83
					รวม	17.722	100

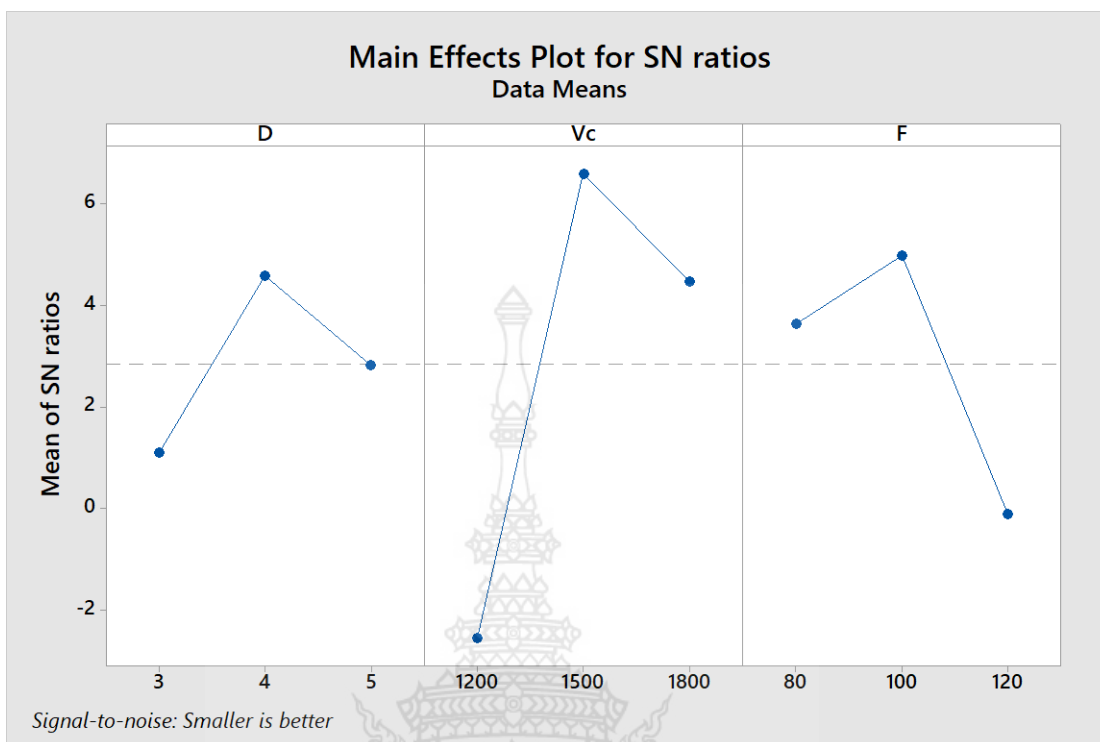
จากตารางที่ 4-11 ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย จะถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัยจากผลต่างของค่าของระดับปัจจัยที่สูง (max) และต่ำ (min) และทำการวิเคราะห์ร้อยละของอิทธิพลหลัก (%main effect) ของแต่ละปัจจัยดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{main effect ของปัจจัย D} &= (3.472 / 17.722) \times 100 \\ &= 19.59\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{main effect ของปัจจัย V} &= (9.141 / 17.722) \times 100 \\ &= 51.58\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{main effect ของปัจจัย F} &= (5.109 / 17.722) \times 100 \\ &= 28.83\% \end{aligned}$$

พบว่า ความเร็วตัด (V) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวของชิ้นงานมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 51.58 รองลงมาคือ อัตราป้อน (F) และระยะป้อนลึก (D) ตามลำดับจากผลในตารางที่ 4-11 สามารถสร้างกราฟผลตอบสนอง S/N-Ratio โดยขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยที่ถูกคำนวณสำหรับแต่ละระดับปัจจัยและผลกระทบรวมได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ของระดับต่างๆ ของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองกับ
ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

จากภาพที่ 4-5 พบว่าที่ระดับปัจจัย D และ F ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานไม่แตกต่างกันมาก เมื่อเทียบกับระดับปัจจัย Vc ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานมาก โดยที่ระดับที่ 1 ทำให้ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด โดยสรุปจากกราฟหากต้องการให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด ควรกำหนด D ระดับที่ 1 คือ 3 มิลลิเมตร, Vc ระดับที่ 1 คือ 1200 เมตรต่อนาที และ F ระดับที่ 3 คือ 120 มิลลิเมตรต่อรอบ

การวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ถ้าหากระดับของแต่ละปัจจัยใดมีค่ามากกว่าศูนย์ หมายความว่า ค่าของปัจจัยหลักที่ระดับปัจจัยนั้นเป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว แต่หากระดับของแต่ละปัจจัยใดมีค่าน้อยกว่าศูนย์ หมายความว่า ค่าของปัจจัยหลักที่ระดับปัจจัยนั้นเป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว โดยอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานแสดงผลดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน

ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย (1)			อิทธิพลต่อความหยาบผิว = (1) - (2)		
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3
D	1.110	4.582	2.819	-1.727	1.745	-0.018
V	-2.552	6.589	4.474	-5.389	3.752	1.637
F	3.636	4.992	-0.116	0.798	2.155	-2.954

หมายเหตุ : (2) ค่าเฉลี่ย S/N-Ratio ของความหยาบผิว = 2.837 (ตารางที่ 4-10)

จากตารางที่ 4-12 เป็นอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน พบว่าองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว 2.837 คือ D ระดับที่ 2, V ระดับที่ 2 และ 3, F ระดับที่ 1 และ 2 (ค่าของอิทธิพลมากกว่าศูนย์) และองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว 2.837 คือ D ระดับที่ 1 และ 3, V ระดับที่ 1, F ระดับที่ 3 (ค่าของอิทธิพลน้อยกว่าศูนย์)

4.2.1.3 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง สำหรับการทดลองนี้กำหนดให้ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 4-6

General Linear Model: Ra versus D, Vc, F					
Method					
Factor coding (-1, 0, +1)					
Factor Information					
Factor	Type	Levels	Values		
D	Fixed	3	3, 4, 5		
Vc	Fixed	3	1200, 1500, 1800		
F	Fixed	3	80, 100, 120		
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
D	2	0.21802	0.10901	8.29	0.108
Vc	2	1.30596	0.65298	49.68	0.020
F	2	0.38889	0.19444	14.79	0.063
Error	2	0.02629	0.01314		
Total	8	1.93916			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0.114649	98.64%	94.58%	72.55%	

Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.8422	0.0382	22.04	0.002	
D					
3	0.1811	0.0540	3.35	0.079	1.33
4	-0.1989	0.0540	-3.68	0.067	1.33
Vc					
1200	0.5244	0.0540	9.70	0.010	1.33
1500	-0.3689	0.0540	-6.83	0.021	1.33
F					
80	-0.0556	0.0540	-1.03	0.412	1.33
100	-0.2222	0.0540	-4.11	0.054	1.33
Regression Equation					
$Ra = 0.8422 + 0.1811 D_3 - 0.1989 D_4 + 0.0178 D_5 + 0.5244 Vc_{1200} - 0.3689 Vc_{1500} - 0.1556 Vc_{1800} - 0.0556 F_{80} - 0.2222 F_{100} + 0.2778 F_{120}$					

ภาพที่ 4-6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ S/N-Ratio ของความหยาบผิว (X)

จากภาพที่ 4-6 พบว่าค่า P-value ของปัจจัยทดสอบทั้ง 3 ปัจจัย มีเพียงปัจจัย Vc ที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว โดย Vc มีค่า P-value 0.02 น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงว่าความเร็วตัดส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่ว่าค่า Vc มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวมากที่สุด

4.2.2 วิธีการทางสถิติสำหรับการกัดชิ้นงาน G42

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองทั้ง 9 ชุดการทดลอง ได้ค่าผลตอบสนองของความหยาบผิว (Surface Roughness) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-13 ความหยาบผิวของอลูมิเนียมที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 1 ครั้ง ด้วยทิศทางการกัด G42

ลำดับการทดลอง	ทิศทางการกัด G42 ปัจจัย			ความหยาบผิว : X (μm) อลูมิเนียม		
	D (mm)	V (m/min)	F (mm/rev)	X ₁ (μm)	X ₂ (μm)	ค่าเฉลี่ย
1	3	1200	80	0.36	0.39	0.38
2	3	1500	100	0.46	0.38	0.42
3	3	1800	120	0.47	0.35	0.41
4	4	1200	100	0.55	0.66	0.61
5	4	1500	120	0.58	0.62	0.60

ลำดับการทดลอง	ทิศทางการกัด G42 ปัจจัย			ความหยาบผิว : X (μm) อลูมิเนียม		
	D (mm)	V (m/min)	F (mm/rev)	X ₁ (μm)	X ₂ (μm)	ค่าเฉลี่ย
6	4	1800	80	0.44	0.34	0.39
7	5	1200	120	0.64	0.86	0.75
8	5	1500	80	0.6	0.47	0.54
9	5	1800	100	0.51	0.65	0.58

4.2.2.1 ค่าอัตราส่วน S/N – Ratio ของความหยาบผิว

จากการทดสอบชิ้นงานด้วยระดับปัจจัยที่แตกต่างกันได้ค่าความหยาบผิวดังตารางที่ 4-13 นำมาใช้ในการคำนวณหาค่า S/N – Ratio โดยค่าความหยาบผิวหาค่าอัตราส่วน S/N – Ratio ชนิดที่ค่าตอบสนองที่น้อยที่สุดคือค่าที่ดีที่สุด (the smaller – the better) ตามสมการที่ 4-4

S/N – Ratio แบบ the smaller – the better

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4-4)$$

เมื่อ S/N แทน อัตราส่วนของ S/N ในแต่ละ Experiment Number

n แทน จำนวนการทดลองซ้ำในแต่ละ Experiment Number

y_j แทน ค่าตอบสนอง (Response) ในแต่ละครั้งของการทดลอง ของแต่ละ Experiment Number

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 1 = $-10 \log (0.38^2) = -10 \log (0.144) = 8.404$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 2 = $-10 \log (0.42^2) = -10 \log (0.176) = 7.535$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 3 = $-10 \log (0.41^2) = -10 \log (0.168) = 7.744$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 4 = $-10 \log (0.61^2) = -10 \log (0.372) = 4.293$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 5 = $-10 \log (0.60^2) = -10 \log (0.360) = 4.437$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 6 = $-10 \log (0.39^2) = -10 \log (0.152) = 8.179$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 7 = $-10 \log (0.75^2) = -10 \log (0.563) = 2.499$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 8 = $-10 \log (0.54^2) = -10 \log (0.292) = 5.352$

ค่า S/N-Ratio ของการทดลองที่ 9 = $-10 \log (0.58^2) = -10 \log (0.336) = 4.731$

นั่นคือการคำนวณค่าอัตราส่วน S/N ของความหยาบผิวจากทดลองทั้ง 9 การทดลอง สรุปได้ดังตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 สรุปอัตราส่วน S/N คำนวณค่าความหยาบจากผลการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง

ลำดับการทดลอง	ระยะป้อนลึก (mm)	ความเร็วตัด (m/min)	อัตราป้อน (mm/rev)	ความหยาบผิว (μm)			MSD	S/N-Ratio
	D	Vc	F	X ₁	X ₂	ค่าเฉลี่ย		
1	3	1200	80	0.36	0.39	0.38	0.144	8.404
2	3	1500	100	0.46	0.38	0.42	0.176	7.535
3	3	1800	120	0.47	0.35	0.41	0.168	7.744
4	4	1200	100	0.55	0.66	0.61	0.372	4.293
5	4	1500	120	0.58	0.62	0.6	0.360	4.437
6	4	1800	80	0.44	0.34	0.39	0.152	8.179
7	5	1200	120	0.64	0.86	0.75	0.563	2.499
8	5	1500	80	0.6	0.47	0.54	0.292	5.352
9	5	1800	100	0.51	0.65	0.58	0.336	4.731

Average = 5.908

จากตารางที่ 4-14 จะเห็นได้ว่าค่าความหยาบผิวที่ได้อยู่ในช่วง 0.38-0.75 ไมโครเมตร และค่ากลางเบี่ยงเบนมาตรฐาน (MSD) ของค่าความหยาบผิวอยู่ระหว่าง 0.14-0.56 อัตราส่วน S/N-Ratio ที่ได้ของค่าความหยาบผิวอยู่ระหว่าง 2.50 ถึง 8.40 โดยมีค่าเฉลี่ยของ S/N-Ratio อยู่ที่ 5.908

4.2.2.2 การวิเคราะห์ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิว

ถ้าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัยควบคุมใดมีค่ามากหมายความว่าที่ระดับปัจจัยควบคุมนั้นจะมีผลทำให้คุณภาพงานออกมาไม่ดี โดยได้ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 1} &= [(8.404) + (7.535) + (7.744)] / 3 \\ &= 7.895 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 2} &= [(4.293) + (4.437) + (8.179)] / 3 \\ &= 5.636 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 3} &= [(2.499) + (5.352) + (4.731)] / 3 \\ &= 4.194 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย V ระดับที่ 1} &= [(8.404) + (4.293) + (2.499)] / 3 \\ &= 5.066 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย V ระดับที่ 2} &= [(7.535) + (4.437) + (5.352)] / 3 \\ &= 5.775 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย V ระดับที่ 3} &= [(7.744) + (8.179) + (4.731)] / 3 \\ &= 6.885 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 1} &= [(8.404) + (8.179) + (5.352)] / 3 \\ &= 7.312 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 2} &= [(7.535) + (4.293) + (4.731)] / 3 \\ &= 5.520 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 3} &= [(7.744) + (4.437) + (2.499)] / 3 \\ &= 4.893 \end{aligned}$$

ดังนั้นได้ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวจากทดลองทั้ง 3 ปัจจัย และ 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-15

ตารางที่ 4-15 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย			min	max	max-min	%main effect
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3				
D	7.895	5.636	4.194	4.194	7.895	3.700	46.62
Vc	5.066	5.775	6.885	5.066	6.885	1.819	22.92
F	7.312	5.520	4.893	4.893	7.312	2.418	30.47
				รวม		3.954	100

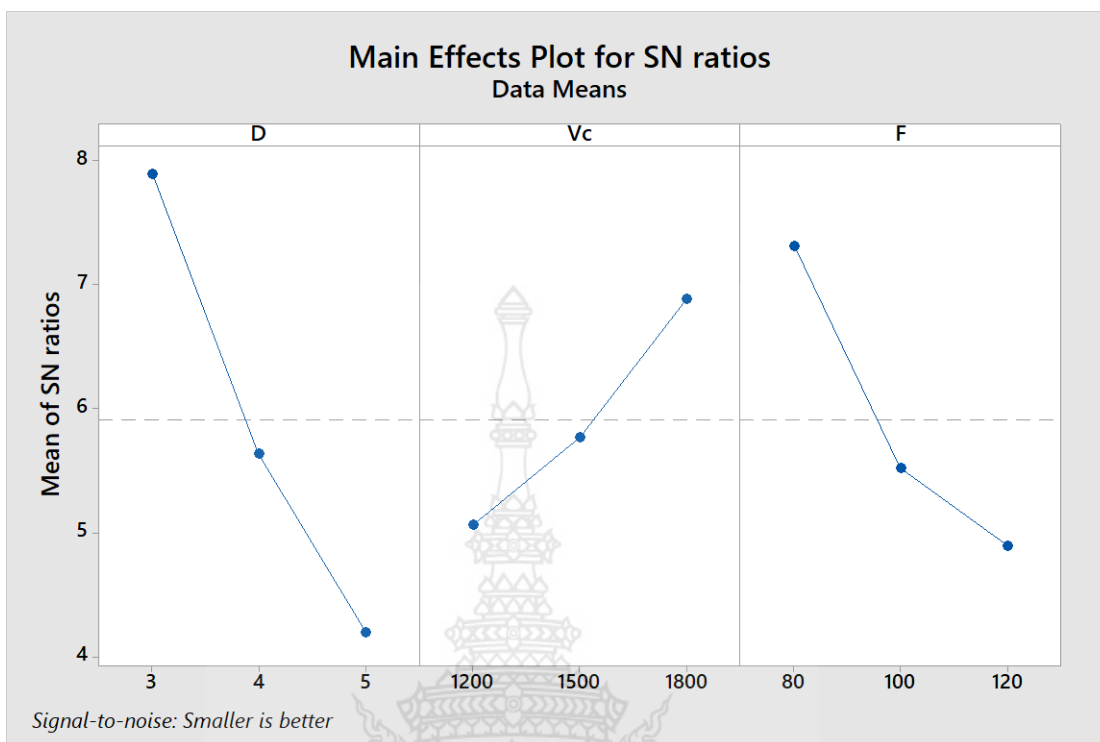
จากตารางที่ 4-15 ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย จะถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัย จากผลต่างของค่าของระดับปัจจัยที่สูง (max) และต่ำ (min) และทำการวิเคราะห์ร้อยละของอิทธิพลหลัก (%main effect) ของแต่ละปัจจัยดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{main effect ของปัจจัย D} &= (3.700 / 3.954) \times 100 \\ &= 46.62\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{main effect ของปัจจัย V} &= (1.819 / 3.954) \times 100 \\ &= 22.92\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{main effect ของปัจจัย F} &= (2.418 / 3.954) \times 100 \\ &= 30.47\% \end{aligned}$$

พบว่า ระยะเวลาป้อนลึก (D) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวของชิ้นงานมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 46.62 รองลงมาคือ อัตราป้อน (F) เป็นร้อยละ 30.47 และความเร็วตัด (V) เป็นร้อยละ 22.92 ตามลำดับ จากผลในตารางที่ 3-15 สามารถสร้างกราฟผลตอบสนอง S/N-Ratio โดยขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยที่ถูกคำนวณสำหรับแต่ละระดับปัจจัยและผลกระทบรวมได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ของระดับต่างๆ ของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองกับ
ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

จากภาพที่ 4-7 พบว่าที่ระดับปัจจัย D, V และ F ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่แตกต่างกันมาก โดยที่ D ระดับที่ 3 ทำให้ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด โดยสรุปจากกราฟหากต้องการให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด ควรกำหนด D ระดับที่ 3 คือ 5 มิลลิเมตร, V ระดับที่ 1 คือ 1200 เมตรต่อนาที และ F ระดับที่ 3 คือ 120 มิลลิเมตรต่อรอบ

การวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ถ้าหากระดับของแต่ละปัจจัยใดมีค่ามากกว่าศูนย์ หมายความว่า ค่าของปัจจัยหลักที่ระดับปัจจัยนั้นเป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว แต่หากระดับของแต่ละปัจจัยใดมีค่าน้อยกว่าศูนย์ หมายความว่า ค่าของปัจจัยหลักที่ระดับปัจจัยนั้นเป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว โดยอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานแสดงผลดังตารางที่ 4-16

ตารางที่ 4-16 อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน

ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย (1)			อิทธิพลต่อความหยาบผิว = (1) - (2)		
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3
D	7.895	5.636	4.194	1.986	-0.272	-1.714
V	5.066	5.775	6.885	-0.843	-0.134	0.976
F	7.312	5.520	4.893	1.403	-0.388	-1.015

หมายเหตุ : (2) ค่าเฉลี่ย S/N-Ratio ของความหยาบผิว = 5.908 (ตารางที่ 4-14)

จากตารางที่ 4-16 เป็นอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน พบว่า องค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว 5.908 คือ D ระดับที่ 1, V ระดับที่ 3 และ F ระดับที่ 1 (ค่าของอิทธิพลมากกว่าศูนย์) และ องค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิว 5.908 คือ D ระดับที่ 2 และ 3, V ระดับที่ 1 และ 2, F ระดับที่ 2 และ 3 (ค่าของอิทธิพลน้อยกว่าศูนย์)

4.2.2.3 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง สำหรับการทดลองนี้กำหนดให้ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 4-8

General Linear Model: Ra versus D, Vc, F					
Method					
Factor coding (-1, 0, +1)					
Factor Information					
Factor	Type	Levels	Values		
D	Fixed	3	3, 4, 5		
Vc	Fixed	3	1200, 1500, 1800		
F	Fixed	3	80, 100, 120		
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
D	2	0.073400	0.036700	*	*
Vc	2	0.021600	0.010800	*	*
F	2	0.035000	0.017500	*	*
Error	2	0.000000	0.000000		
Total	8	0.130000			

Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
0	100.00%	100.00%	100.00%			
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	0.5200	0.0000	*	*		
D						
3	-0.1167	0.0000	*	*	1.33	
4	0.01333	0.00000	*	*	1.33	
Vc						
1200	0.06000	0.00000	*	*	1.33	
1500	0.000000	0.000000	*	*	1.33	
F						
80	-0.08333	0.00000	*	*	1.33	
100	0.01667	0.00000	*	*	1.33	
Regression Equation						
$Ra = 0.5200 - 0.1167 D_3 + 0.01333 D_4 + 0.1033 D_5 + 0.06000 Vc_{1200} + 0.000000 Vc_{1500} - 0.06000 Vc_{1800} - 0.08333 F_{80} + 0.01667 F_{100} + 0.06667 F_{120}$						

ภาพที่ 4-8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ S/N-Ratio ของความหยาบผิว (X)

จากภาพที่ 4-8 พบว่าค่า P-value ของปัจจัยทดสอบทั้ง 3 ปัจจัย เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยทุกปัจจัยมีค่า P-value น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงว่าทั้ง 3 ปัจจัย ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่ว่าค่า D, V และ F มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวโดยค่า D มีผลมากที่สุด รองลงมาคือ F และ V ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองตามวิธีการทางสถิติที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 สามารถสรุปผลงานวิจัยตามวัตถุประสงค์ของหัวข้องานวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

5.1.1 ความสัมพันธ์ของความหยาบผิวและเงื่อนไขในการกัดงาน

จากเงื่อนไขการกัดชิ้นงานที่ได้กำหนดไว้ 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกในการกัด (Depth of cut) ทำการทดสอบกับชิ้นงาน 2 ประเภทคือทองเหลืองและอลูมิเนียม ได้ผลดังนี้

- ทองเหลือง ที่ทิศทางการกัดงาน G41 ค่าความหยาบผิวมีความความสัมพันธ์กับการกำหนดค่าความลึกในการกัด (Depth of cut) ส่วน ความเร็วตัด (Cutting speed) และอัตราป้อน (Feed rate) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิว ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงค่าความลึกในการกัด (Depth of cut) จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน แต่การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วตัด (Cutting speed) และ อัตราป้อน (Feed rate) จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

- ทองเหลือง ส่วนที่ทิศทางการกัดงาน G42 ค่าความหยาบผิวไม่มีความความสัมพันธ์กับปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกในการกัด (Depth of cut) จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

- อลูมิเนียม ที่ทิศทางการกัดงาน G41 ค่าความหยาบผิวมีความสัมพันธ์กับการกำหนดค่าความเร็วตัด (Cutting speed) ส่วน อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกในการกัด (Depth of cut) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิว ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วตัด (Cutting speed) จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน แต่การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราป้อน (Feed rate) และความลึกในการกัด (Depth of cut) จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

- อลูมิเนียม ที่ทิศทางการกัดงาน G42 ค่าความหยาบผิวมีความสัมพันธ์กับปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกในการกัด (Depth of cut) ตัวใดตัวหนึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

5.1.2 องค์ประกอบเงื่อนไขในการกัดงานที่เหมาะสมที่สุด

จากเงื่อนไขการกัดชิ้นงานที่ได้กำหนดไว้ 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกในการกัด (Depth of cut) ทำการทดสอบกับชิ้นงาน 2 ประเภทคือทองเหลืองและอลูมิเนียม พบว่ามีองค์ประกอบเงื่อนไขในการกัดงานที่เหมาะสมที่สุดดังนี้

- ทองเหลือง ที่ทิศทางการกัดงาน G41 สมควรกำหนดค่าความเร็วตัด (Cutting speed) ระดับที่ 1 คือ 1200 เมตร/นาที ค่าอัตราป้อน (Feed rate) ระดับที่ 3 คือ 120 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกในการกัด (Depth of cut) ระดับที่ 2 คือ 4 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานน้อยที่สุด โดยจากการทดสอบได้ค่าความหยาบผิวที่ 0.84 ไมโครเมตร

- ทองเหลือง ส่วนที่ทิศทางการกัดงาน G42 สมควรกำหนดค่าความเร็วตัด (Cutting speed) ระดับที่ 1 คือ 1200 เมตร/นาที ค่าอัตราป้อน (Feed rate) ระดับที่ 2 คือ 100 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกในการกัด (Depth of cut) ระดับที่ 3 คือ 5 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานน้อยที่สุด โดยจากการทดสอบได้ค่าความหยาบผิวที่ 1.60 ไมโครเมตร

- อลูมิเนียม ที่ทิศทางการกัดงาน G41 สมควรกำหนดค่าความเร็วตัด (Cutting speed) ระดับที่ 1 คือ 1200 เมตร/นาที ค่าอัตราป้อน (Feed rate) ระดับที่ 3 คือ 120 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกในการกัด (Depth of cut) ระดับที่ 1 คือ 3 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานน้อยที่สุด โดยจากการทดสอบได้ค่าความหยาบผิวที่ 1.23 ไมโครเมตร

- อลูมิเนียม ที่ทิศทางการกัดงาน G42 สมควรกำหนดค่าความเร็วตัด (Cutting speed) ระดับที่ 1 คือ 1200 เมตร/นาที ค่าอัตราป้อน (Feed rate) ระดับที่ 3 คือ 120 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกในการกัด (Depth of cut) ระดับที่ 3 คือ 5 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานน้อยที่สุด โดยจากการทดสอบได้ค่าความหยาบผิวที่ 0.75 ไมโครเมตร

5.1.3 รูปแบบทิศทางการกัดงานที่เหมาะสมสำหรับการขัดเซียดอกกัด

จากเงื่อนไขการกัดชิ้นงานที่ได้กำหนดไว้ 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความลึกในการกัด (Depth of cut) ทำการทดสอบกับชิ้นงาน 2 ประเภทคือทองเหลืองและอลูมิเนียม ทดสอบกับทิศทางการกัดงาน G41 และ G42 พบว่า ทิศทางที่เหมาะสมสำหรับการกัดทองเหลือง คือ ทิศทางการกัดงาน G41 เพราะให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานน้อยกว่า ทิศทางการกัดงาน G42 ส่วน ทิศทางที่เหมาะสมสำหรับการกัดอลูมิเนียม คือ ทิศทางการกัดงาน G42 เพราะให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานน้อยกว่า ทิศทางการกัดงาน G41

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 วิธีการออกแบบการทดลองสำหรับ 3 ปัจจัย 3 ระดับนั้นสามารถออกแบบการทดลองทางสถิติได้ 2 แบบคือเป็นทดลองทางสถิติ L9 หรือ L27 ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกที่จะทำการทดลองทางสถิติ L9 เนื่องจากข้อจำกัดด้านต้นทุนวัตถุดิบ ทำให้ไม่สามารถศึกษาผลกระทบของสมการกำลังสองของปัจจัยต่างๆ ได้ แต่หากสามารถทดลองทางสถิติ L27 ก็จะสามารถศึกษาผลกระทบของสมการกำลังสองและความสัมพันธ์ร่วมระหว่างปัจจัยต่างๆ ได้ด้วย

5.2.2 ยังมีตัวแปรอิสระอื่นที่น่าสนใจที่น่าจะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน ไม่ว่าจะเป็นตัวชนิดของชิ้นงาน ชนิดของเม็ด น้ำหล่อเย็น เป็นต้น ที่ยังสามารถศึกษาและพัฒนาต่อไปได้ในอนาคต



เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาลี ตระการกุล, เทคโนโลยีซีเอ็นซี, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) พิมพ์ครั้งที่ 8, 2542
- [2] EMCO Maier Software Description Emco winNC EMCOTRONIC M2 Hallein Austria
- [3] เปมิกา สุวรรณมณี. 2548. การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการพ่นสีเฟออร์นิจอร์ไม้ โดยการออกแบบการทดลองกรณีศึกษา : โรงงานผลิตเฟออร์นิจอร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [4] Ross Phillip J. Taguchi Technique for Quality Engineering. New York : McGrew Hill Book Company, 1988.
- [5] Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments. 6th edition. New York : John Wiley & Sons, 2005.
- [6] Roy, Ranjit K. Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [7] ปวุฒิ เพชรไพรินทร์ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิว และความสึกหรอของคมตัดในการกัดทองเหลืองผสม วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2549
- [8] เกษร หล่อบุญสม อิทธิพลของตัวแปรในการกัดด้วยเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวไททาเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์บนเหล็กหล่อสีเทา วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2554
- [9] ANIL CHOUBEY, VEDANSH CHATURVEDI , JYOTI VIMAL Optimization of process parameters of CNC Milling machine for mild steel using Taguchi design and Single to noise ratio Analysis International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN : 2278-0181 Vol. 1 Issue 6, August – 2012.

หัวหน้าโครงการวิจัย

- ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) : นายคมพันธ์ ชมสมุทร
ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ) : Mr.Kompan Chomsamutr
- หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3730400073097
- ตำแหน่ง อาจารย์ ระดับ 7
- หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก
ที่อยู่ (หน่วยงาน) : สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1581 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 0-2836-3000 ต่อ 4228
โทรศัพท์มือถือ 081-3039822
ที่อยู่ปัจจุบัน : 57 หมู่ 2 ตำบลลำเหย อำเภอดอนตูม จังหวัดนครปฐม 73150
- ประวัติการศึกษา

คุณวุฒิ	สถาบัน/มหาวิทยาลัย	สาขา	ปีการศึกษาที่จบ
ระดับปริญญาตรี : ค.อ.บ.	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์	วิศวกรรมอุตสาหกรรม - เครื่องมือกล	2537
ระดับปริญญาตรี : วศ.บ	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	วิศวกรรมอุตสาหกรรม	2544
ระดับปริญญาโท : วศ.ม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ	วิศวกรรมการจัดการ อุตสาหกรรม	2542
ระดับปริญญาเอก : ปร.ด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมอุตสาหกรรม	2555

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ สาขาวิศวกรรมและเทคโนโลยี

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

พศ.2547 เป็นหัวหน้างานวิจัย เรื่องการสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่อง การฝึกปฏิบัติงานบนเครื่องกลึงอัตโนมัติ

พศ.2549 เป็นหัวหน้างานวิจัย เรื่องการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตัดเฉือนของโปรแกรมงานกัดด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติสำหรับการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรม

พศ. 2549 เป็นหัวหน้างานวิจัยเรื่อง การสร้างและหาประสิทธิภาพบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนเรื่อง การฝึกปฏิบัติงานบนเครื่องกลึงอัตโนมัติขั้นสูง

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

- ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) : นางสาวสุกัญญา เชิดชูงาม
ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ) : Miss SukanyaCherdchoongam
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 1102000146501
- ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
- หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก
ที่อยู่ (หน่วยงาน) : สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1581 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 0-2836-3000 ต่อ 4228
โทรสาร 0-2903-0080 ต่อ 7465
โทรศัพท์มือถือ 085-505-7465
E-mail : sukanya.che@rmutp.ac.th
- ประวัติการศึกษาต้องระบุสถาบันการศึกษา สาขาวิชาและปีที่จบการศึกษา

คุณวุฒิ	สถาบัน/มหาวิทยาลัย	สาขา	ปีการศึกษาที่จบ
ปริญญาตรี : วท.บ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	คณิตศาสตร์	2550
ปริญญาโท : วศ.บ	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	วิศวกรรมอุตสาหกรรม	2558
ปริญญาโท : วศ.ม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมอุตสาหกรรม	2553
ปริญญาเอก:วศ.ด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมอุตสาหกรรม	กำลังศึกษา

- สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

Operation Research
Engineering Statistics
Computer Simulation
Logistics and Supply Chain Management

- ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

2557 นักวิจัยร่วม:

โครงการเพิ่มขีดความสามารถอุตสาหกรรมยางพาราอาร์บี AEC กลุ่มจังหวัดภาคใต้ฝั่ง
อ่าวไทย (ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช พัทลุง) กิจกรรม การจัดทำฉลาก
คาร์บอนสำหรับอุตสาหกรรมยางพารา ปาล์มน้ำมัน และอุตสาหกรรมอื่นๆ
สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัด (ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช และพัทลุง)

- 2557 นักวิจัยร่วม:
โครงการเพิ่มขีดความสามารถอุตสาหกรรมยางพารารอรับ AEC กลุ่มจังหวัดภาคใต้ฝั่ง
อ่าวไทย (ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช พัทลุง) กิจกรรม การพัฒนาระบบบำบัด
น้ำเสียในกระบวนการผลิตของสหกรณ์กองทุนสวนยางให้ได้มาตรฐาน
สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัด (ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช และพัทลุง)
- 2557 นักวิจัยร่วม:
โครงการเพิ่มขีดความสามารถอุตสาหกรรมยางพารารองรับ AEC กลุ่มจังหวัดภาคใต้ฝั่ง
อ่าวไทย (ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช พัทลุง) กิจกรรม การเพิ่มประสิทธิภาพ
การผลิต ของอุตสาหกรรมยางพารา (SMEs) และสถาบันเกษตรกร
สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัด (ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช และพัทลุง)
- 2556 นักวิจัยร่วม
โครงการวิจัย: กลไกในการวิเคราะห์สถานการณ์ของราคาปาล์มน้ำมัน,
สำนักประสานงานเชิงนโยบายเกษตรและเสริมสร้างเครือข่ายงานวิจัยเชิงนโยบาย
สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.)
- 2556 นักวิจัยร่วม
โครงการวิจัย การศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อเสถียรภาพของราคาทะลายปาล์มสด
และน้ำมันปาล์ม
สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) (สวก).
- 2556 นักวิจัยร่วมโครงการ:
การพัฒนาผลิตภัณฑ์และบริการด้วยวัฒนธรรมและภูมิปัญญาท้องถิ่นพื้นที่ภาคใต้
โครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อการท่องเที่ยวที่เชื่อมโยงกับวัฒนธรรมท้องถิ่น
สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.)
- 2555 นักวิจัยร่วม
โครงการวิจัย การศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อการรักษาเสถียรภาพของราคา
ยางพารา
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- 2555 นักวิจัยร่วม
โครงการ การจัดทำฐานข้อมูลงานวิจัยภายใต้โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรแปรรูป
สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรแปรรูป กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวง
อุตสาหกรรม

- 2553 นักวิจัยร่วม
โครงการ การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลให้ต้นทุนโลจิสติกส์ ด้านการเก็บรักษาสินค้าคงคลัง ลดลง พร้อมเสนอแนวทางในการปฏิบัติที่ดีที่สุด กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ไม้ ยางพารา
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
- 2552 นักวิจัยร่วม
การประยุกต์อัลกอริธึมเชิงพันธุกรรมสำหรับการหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด ภายใต้ความต้องการผันแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่อง กรณีสินค้า 1 ชนิด และมีช่วงเวลานำที่แน่นอน
คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- 2552 นักวิจัยร่วม
โครงการชี้วัดความสามารถในการแข่งขันของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม
สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดพระนครศรีอยุธยา
- 2552 นักวิจัยร่วม
โครงการ การศึกษาการบริหารคลังสินค้าและสินค้าคงคลังของกลุ่มผู้ที่ต้องการป้องกันความเสี่ยงในตลาดสินค้าเกษตรล่วงหน้าแห่งประเทศไทย เพื่อลดต้นทุนด้านโลจิสติกส์
กรณีศึกษา : ยางแผ่นรมควันชั้น 3
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
- 2552 นักวิจัยร่วม
โครงการยกระดับประสิทธิภาพโลจิสติกส์เพื่อส่งเสริมการผลิตอาหารฮาลาล
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
- 2552 นักวิจัยร่วม
โครงการ เพิ่มประสิทธิภาพและผลิตภาพโดยนวัตกรรมการใช้ระบบสมองกลฝังตัว (Embedded System) เพื่อจัดการการใช้พลังงานและการผลิต สำหรับอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
- 2551 นักวิจัยร่วม
โครงการ การจัดอบรมเชิงปฏิบัติการด้านลอจิสติกส์ (Workshop) Business Improvement โครงการพัฒนาขีดความสามารถด้านลอจิสติกส์
สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย