

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลงานวิจัยฉบับนี้ได้ถูกออกแบบและกำหนดขั้นตอนการทดลองไว้ 3 ขั้นตอนด้วยกัน โดยมีวัตถุประสงค์ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกัดร่องเพื่อให้ได้ค่าความเที่ยงตรงของความลึกและอัตราส่วนของร่องตรงตามเป้าหมายมากที่สุด โดยการทดลองและการวิเคราะห์ผลจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ

1. ผลการทดลองและการวิเคราะห์การทดลองขั้นต้น
2. ผลการทดลองและการวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนการทดลองเพื่อยืนยันผล

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์การทดลองขั้นต้น

การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองเบื้องต้นด้วยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ผลการทดลองเบื้องต้นอื่นเกี่ยวกับการการคัดเลือกปัจจัยที่จะศึกษาถึงผลกระทบต่อค่าความเที่ยงตรงของความลึกและอัตราส่วนของร่อง โดยอาศัยการทดลองอย่างสุ่มสมบูรณ์ หรือการจำแนกทางเดียว (Complete Randomized Design; CRD หรือ One-Way ANOVA)

4.1.1 ผลการทดลองอย่างสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomized Design; CRD)

ปัจจัยและระดับของปัจจัยของกระบวนการกัดร่องสำหรับสปีนเดิลมอเตอร์ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Machining Process) ในการทดลองเป็นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

ปัจจัยและระดับของปัจจัยของกระบวนการกัดร่อง

ปัจจัย	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3	หน่วย
กระแสไฟฟ้า(CC)	8	9	10	A
สัญญาณพัลส์(Pulse)	10	15	20	สัญญาณ/100ms
อัตราการทำงานต่อคาบเวลา(Duty Cycle)	20	30	50	%
ช่องว่าง(Gap)	40	50	60	μm

ผลการทดสอบทางสถิติในส่วนของการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ของปัจจัยต่างๆ โดยผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทำการทำการคัดเลือกปัจจัยต่างๆ มีดังนี้

1. **กระแสไฟฟ้า (CC)** ทำการเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ ได้แก่ ระดับที่ 1 เท่ากับ 8 A, ระดับที่ 2 เท่ากับ 9 A, ระดับที่ 3 เท่ากับ 10 A ส่วนปัจจัยอื่นๆ กำหนดที่สภาวะปัจจุบัน คือ สัญญาณพัลส์ เท่ากับ 10 สัญญาณ, อัตราการทำงานต่อคาบเวลาเท่ากับ 30% และช่องว่าง เท่ากับ 50 μm

สรุปตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ช่วงความเชื่อมั่น (CI) 95% กรณีปัจจัย คือ กระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 4.2

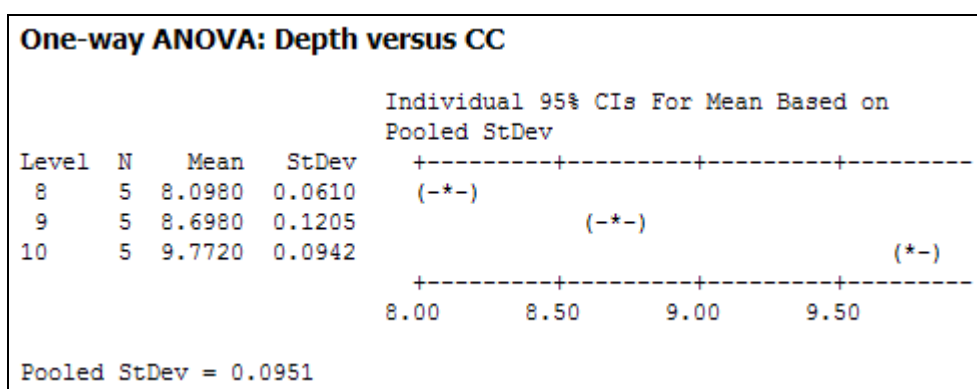
การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ความลึกของร่องกรณีปัจจัยกระแสไฟฟ้า

Source	df	Sums of Squares	Mean Squares	F-Statistic	P-value
กระแสไฟฟ้า	2	7.192	3.596	397.99	0.000
Error	12	0.108	0.009		
Total	14	7.301			

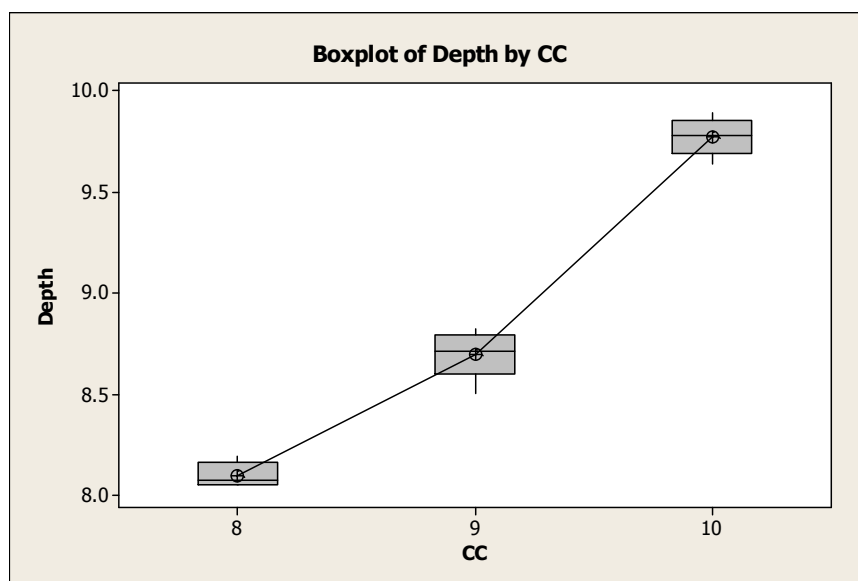
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดย Minitab Version 14.0 แสดงความแตกต่างผลเฉลี่ยความลึกของร่องระหว่างระดับของปัจจัยกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 4.3

ความแตกต่างผลเฉลี่ยความลึกของร่องระหว่างระดับของปัจจัยกระแสไฟฟ้า



จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14.0 เมื่อพิจารณาค่าของ P-value ในตารางที่ 4.2 พบว่าค่า P-value ของปัจจัยกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α ที่กำหนด คือ 0.05 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า กระแสไฟฟ้ามีอิทธิพลต่อความลึกของร่อง ในกระบวนการกัดร่องอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.1

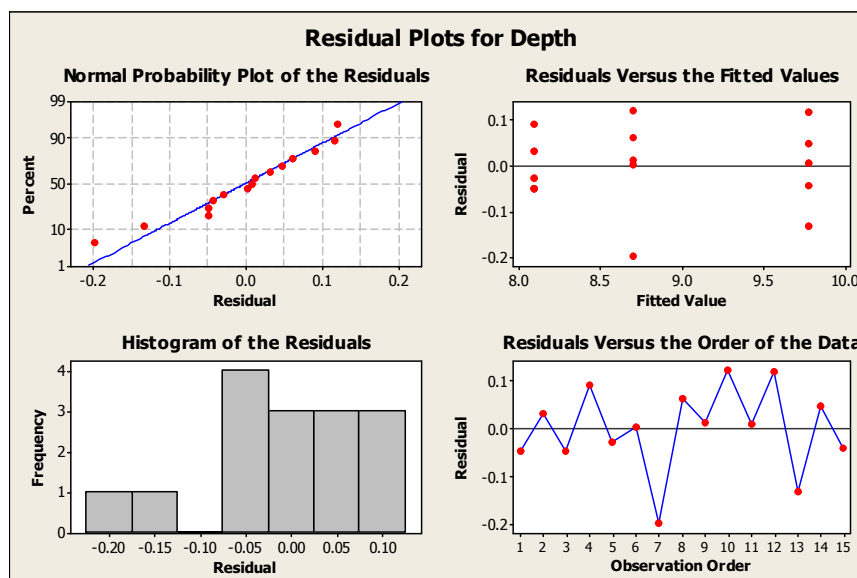
แผนภาพกล่องแสดงผลความลึกของร่องของปัจจัยกระแสไฟฟ้า

การเปรียบเทียบผลความแตกต่างของค่าเฉลี่ยจากภาพที่ 4.1 โดยแผนภาพกล่องในแต่ละระดับของปัจจัยกระแสไฟฟ้า พบว่า ค่าความลึกของร่องเพิ่มขึ้นเมื่อระดับของกระแสไฟฟ้าในการกัดร่องเพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 4.2 พบว่า การกระจายของส่วนตกค้าง (Residuals) ของข้อมูลมีการกระจายตามแนวเส้นตรง ทำให้สรุปได้ว่า ส่วนตกค้างมีการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) รวมทั้งกระจายตัวของส่วนตกค้างมีรูปแบบการกระจายเป็นอิสระไม่สามารถทำนายรูปแบบได้แน่นอน แสดงให้เห็นว่า ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกันและค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างพบว่า ส่วนตกค้างในแต่ละระดับมีการกระจายในด้านบวกและลบมีความสมดุลกันจึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงศูนย์

ดังนั้น ภาพที่ 4.2 เป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของตัวแบบของปัจจัยกระแสไฟฟ้าตามหลักการ $\varepsilon_i \sim NID(0, \sigma^2)$ พบว่า รูปแบบของส่วนตกค้างที่ได้จาก

ข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการทุกประการ ดังนั้น ข้อมูลของการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้



ภาพที่ 4.2

การทดสอบการกระจายและความเป็นอิสระของข้อมูลความลึกของร่องของปัจจัยกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 4.4

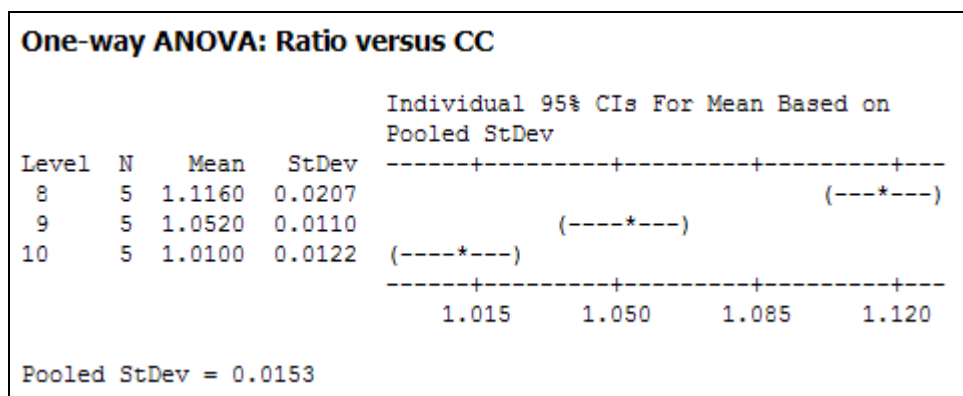
การวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของร่องกรณีปัจจัยกระแสไฟฟ้า

Source	df	Sums of Squares	Mean Squares	F-Statistic	P-value
กระแสไฟฟ้า	2	0.028	0.014	61.06	0.000
Error	12	0.002	0.000		
Total	14	0.031			

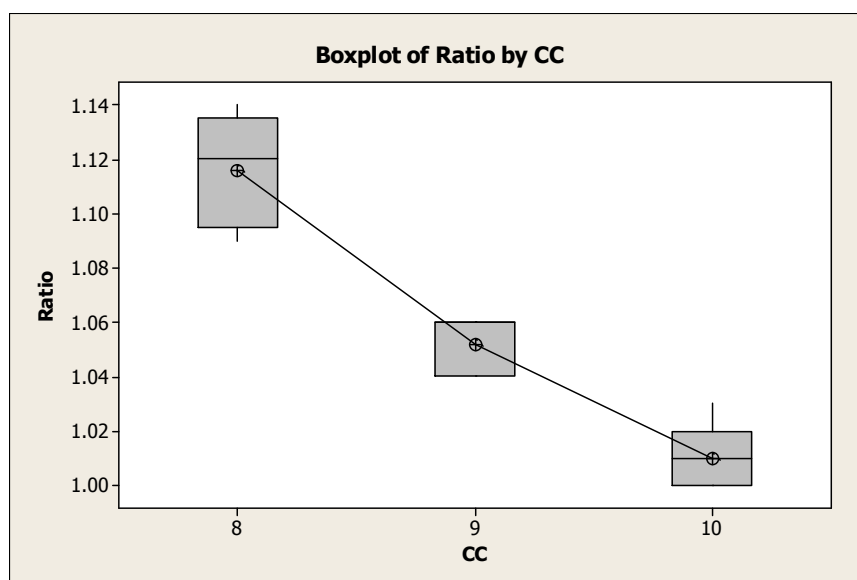
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดย Minitab Version 14.0 แสดงความแตกต่างผลเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องระหว่างระดับของปัจจัยกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 4.5

ความแตกต่างผลเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องระหว่างระดับของปัจจัยกระแสไฟฟ้า



จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14.0 เมื่อพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4.4 พบว่า ค่า P-value ของปัจจัยกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α ที่กำหนดคือ 0.05 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า กระแสไฟฟ้ามีอิทธิพลต่ออัตราส่วนของร่องในกระบวนการกัดร่องอย่างมีนัยสำคัญ

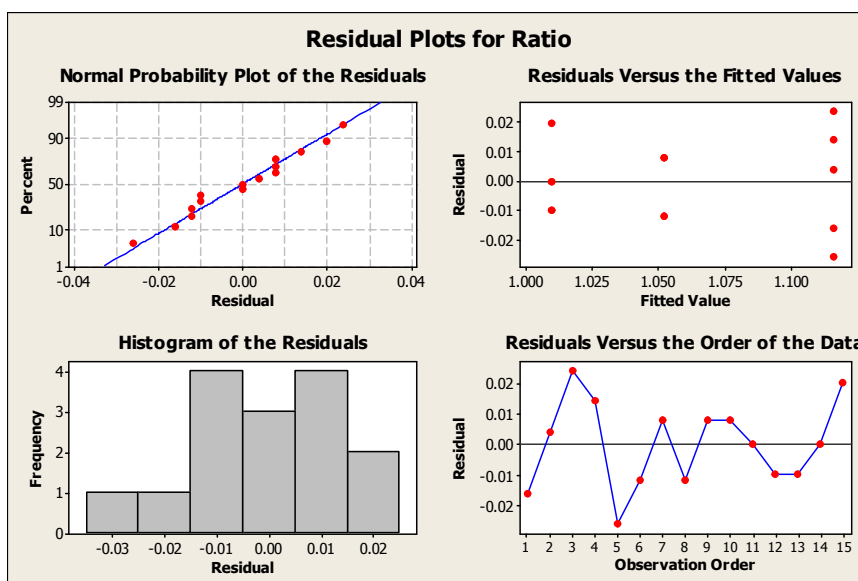


ภาพที่ 4.3

แผนภาพกล่องแสดงผลอัตราส่วนของร่องของปัจจัยกระแสไฟฟ้า

การเปรียบเทียบผลความแตกต่างของค่าเฉลี่ยจากภาพที่ 4.3 โดยแผนภาพกล่องในแต่ละระดับของปัจจัยกระแสไฟฟ้า พบว่า ค่าอัตราส่วนของร่องลดลงเมื่อระดับของกระแสไฟฟ้าในการกัดร่องเพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 4.4 พบว่า รูปแบบของส่วนตกค้างที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการทุกประการ ดังนั้น ข้อมูลของการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้



ภาพที่ 4.4

การทดสอบการกระจายและความเป็นอิสระของข้อมูลอัตราส่วนของร่องของปัจจัยกระแสไฟฟ้า

2. สัญญาณพัลส์ (Pulse) ทำการเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ ได้แก่ ระดับที่ 1 เท่ากับ 10 สัญญาณ, ระดับที่ 2 เท่ากับ 15 สัญญาณ, ระดับที่ 3 เท่ากับ 30 สัญญาณ ส่วนปัจจัยอื่นๆ กำหนดที่สภาวะปัจจุบัน คือ กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10 A, อัตราการทำงานต่อคาบเวลาเท่ากับ 30% และช่องว่างเท่ากับ 50 μm

สรุปตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ช่วงความเชื่อมั่น (CI) 95% กรณีปัจจัย คือ สัญญาณพัลส์

ตารางที่ 4.6

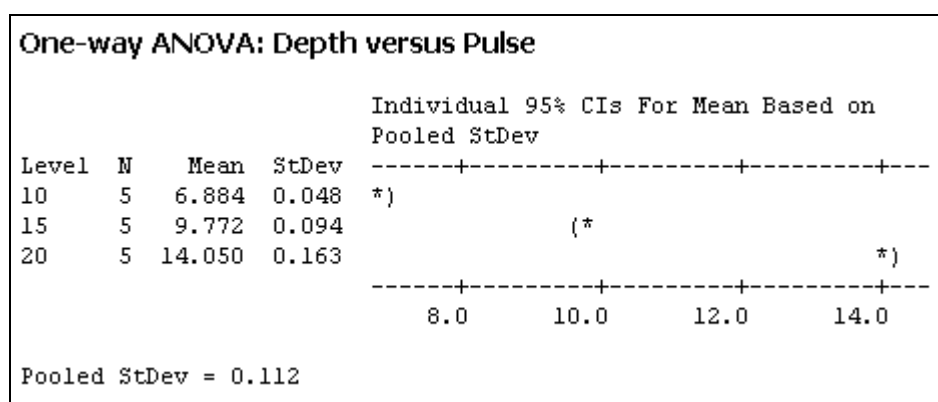
การวิเคราะห์ความแปรปรวนความลึกของร่องกรณีปัจจัยสัญญาณพัลส์

Source	df	Sums of Squares	Mean Squares	F-Statistic	P-value
สัญญาณพัลส์	2	129.98	64.99	5185.73	0.000
Error	12	0.15	0.01		
Total	14	130.13			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดย Minitab Version 14.0 แสดงความแตกต่างผลเฉลี่ยความลึกของร่องระหว่างระดับของปัจจัยสัญญาณพัลส์

ตารางที่ 4.7

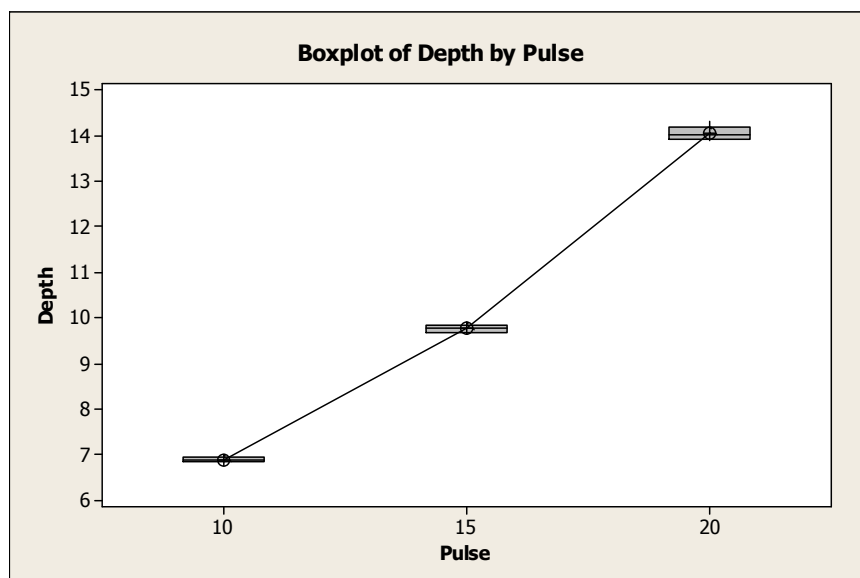
ความแตกต่างผลเฉลี่ยความลึกของร่องระหว่างระดับของปัจจัยสัญญาณพัลส์



จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14.0 เมื่อพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4.6 พบว่า ค่า P-value ของปัจจัยสัญญาณพัลส์มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α ที่กำหนด คือ 0.05 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า สัญญาณพัลส์มีอิทธิพลต่อความลึกของร่องในกระบวนการกัดร่องอย่างมีนัยสำคัญ

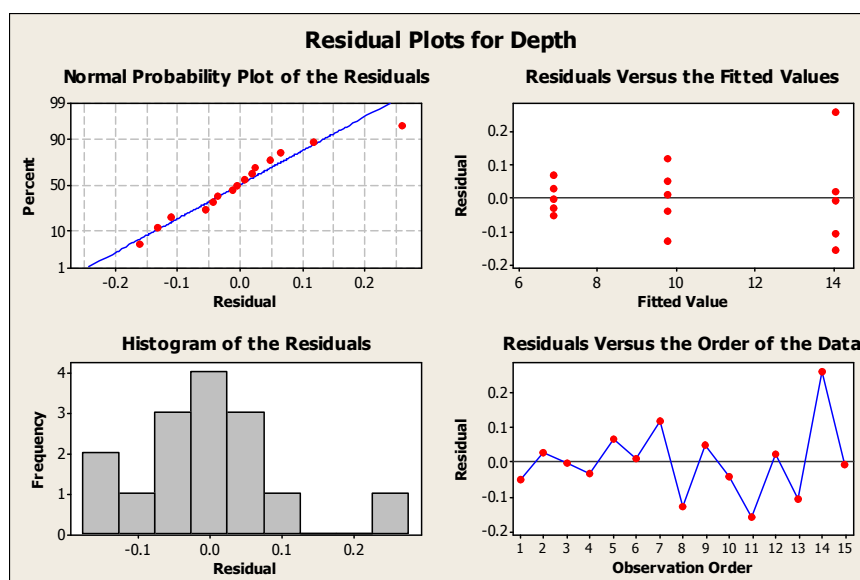
การเปรียบเทียบผลความแตกต่างของค่าเฉลี่ยจากภาพที่ 4.5 โดยแผนภาพกล่อง ในแต่ละระดับของปัจจัยสัญญาณพัลส์ พบว่า ค่าความลึกของร่องเพิ่มขึ้นเมื่อระดับของสัญญาณพัลส์ในการกัดร่องเพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 4.6 พบว่า รูปแบบของส่วนตกค้างที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการทุกประการ ดังนั้น ข้อมูลของการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้



ภาพที่ 4.5

แผนภาพกล่องแสดงผลความลึกของร่องของปัจจัยสัญญาณพัลส์



ภาพที่ 4.6

การทดสอบการกระจายและความเป็นอิสระของข้อมูลความลึกของร่องของปัจจัยสัญญาณพัลส์

ตารางที่ 4.8

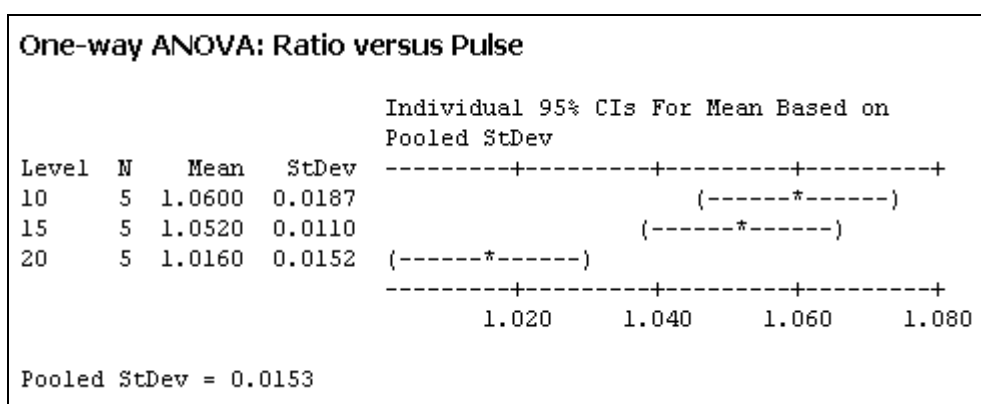
การวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของร่องกรณีปัจจัยสัญญาณพัลส์

Source	df	Sums of Squares	Mean Squares	F-Statistic	P-value
สัญญาณพัลส์	2	0.005	0.002	11.77	0.001
Error	12	0.002	0.002		
Total	14	0.008			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดย Minitab Version 14.0 แสดงความแตกต่างผลเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องระหว่างระดับของปัจจัยสัญญาณพัลส์

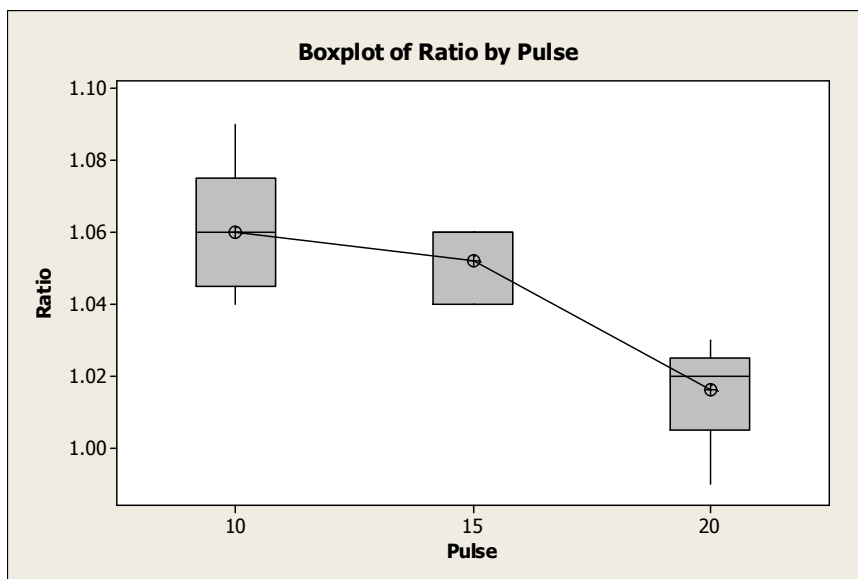
ตารางที่ 4.9

ความแตกต่างผลเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องระหว่างระดับของปัจจัยสัญญาณพัลส์



จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14.0 เมื่อพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4.8 พบว่า ค่า P-value ของปัจจัยสัญญาณพัลส์มีค่าเท่ากับ 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α ที่กำหนดคือ 0.05 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า สัญญาณพัลส์มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนของร่องในกระบวนการกัดร่องอย่างมีนัยสำคัญ

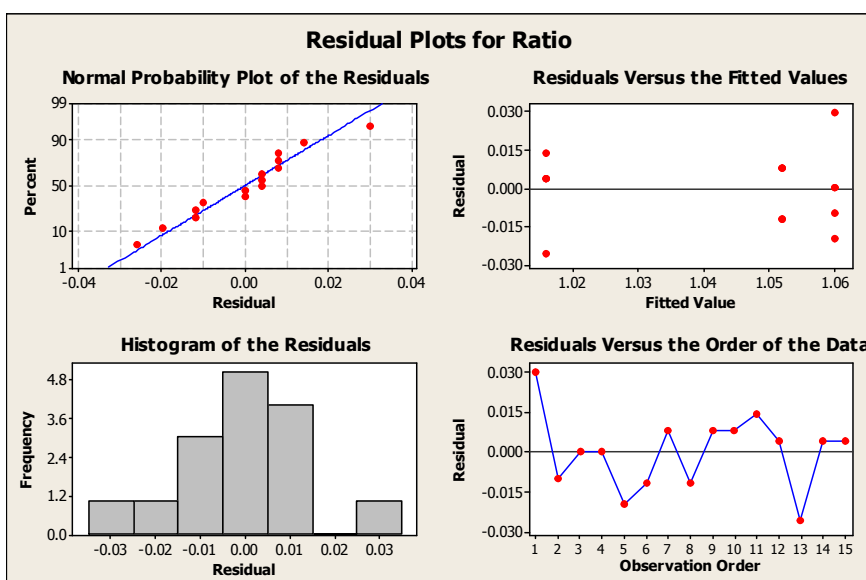
การเปรียบเทียบผลความแตกต่างของค่าเฉลี่ยจากภาพที่ 4.7 โดยแผนภาพกล่องในแต่ละระดับของปัจจัยสัญญาณพัลส์ พบว่า ค่าอัตราส่วนของร่องลดลงเมื่อระดับของสัญญาณพัลส์ในการกัดร่องเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.7

แผนภาพกล่องแสดงผลอัตราส่วนของร่องของปัจจัยสัญญาณพัลส์

จากภาพที่ 4.8 พบว่า รูปแบบของส่วนตกค้างที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการทุกประการ ดังนั้น ข้อมูลของการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้



ภาพที่ 4.8

การทดสอบการกระจายและความเป็นอิสระของข้อมูลอัตราส่วนของร่องของปัจจัยสัญญาณพัลส์

3. อัตราการทำงานต่อคาบเวลา (Duty Cycle) ทำการเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ ได้แก่ ระดับที่ 1 เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์, ระดับที่ 2 เท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์, ระดับที่ 3 เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ส่วนปัจจัยอื่น ๆ กำหนดที่สภาวะปัจจุบัน คือ กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10 A, สัญญาณพัลส์ เท่ากับ 10 สัญญาณและช่องว่างเท่ากับ 50 μm

สรุปตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ช่วงความเชื่อมั่น (CI) 95 % กรณีปัจจัย คือ อัตราการทำงานต่อคาบเวลา

ตารางที่ 4.10

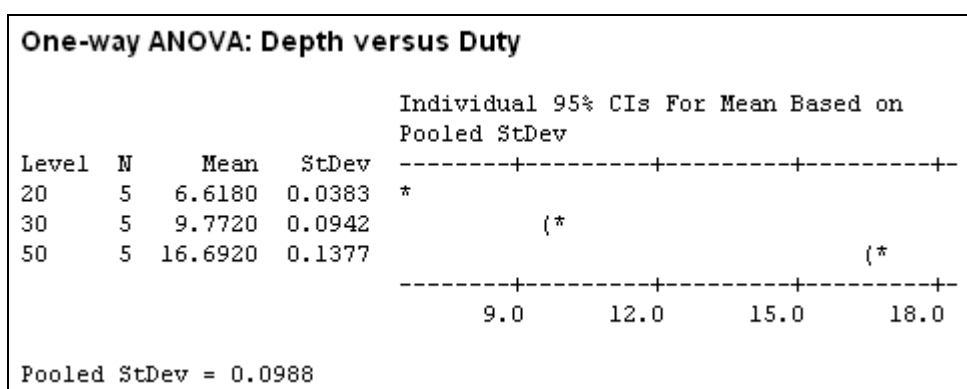
การวิเคราะห์ความแปรปรวนความลึกของร่องกรณีปัจจัยอัตราการทำงานต่อคาบเวลา

Source	df	Sums of Squares	Mean Squares	F-Statistic	P-value
อัตราการทำงานต่อคาบเวลา	2	265.53	132.76	13589.18	0.000
Error	12	0.11	0.01		
Total	14	265.65			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดย Minitab Version 14.0 แสดงความแตกต่างผลเฉลี่ยความลึกของร่องระหว่างระดับของปัจจัยอัตราการทำงานต่อคาบเวลา

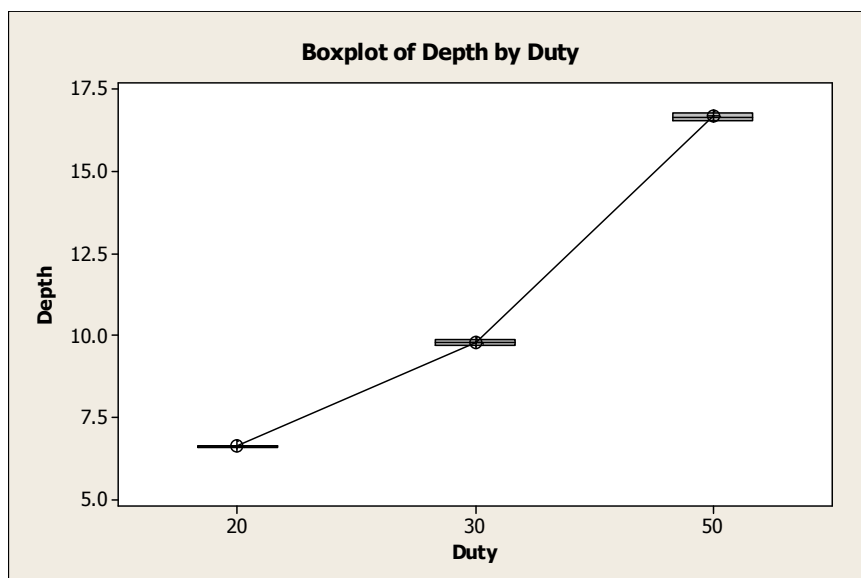
ตารางที่ 4.11

ความแตกต่างผลเฉลี่ยความลึกของร่องระหว่างระดับของปัจจัยอัตราการทำงานต่อคาบเวลา



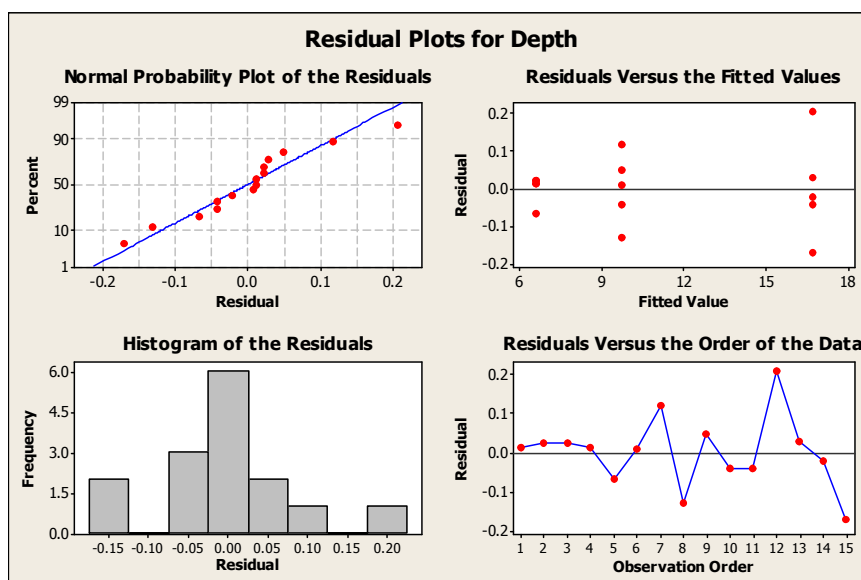
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14.0 เมื่อพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4.10 พบว่า ค่า P-value ของปัจจัยอัตราการทำงานต่อคาบเวลา

มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α ที่กำหนดคือ 0.05 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า อัตราการทำงานต่อคาบเวลามีอิทธิพลต่อความลึกของร่องในกระบวนการกัดร่องอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.9

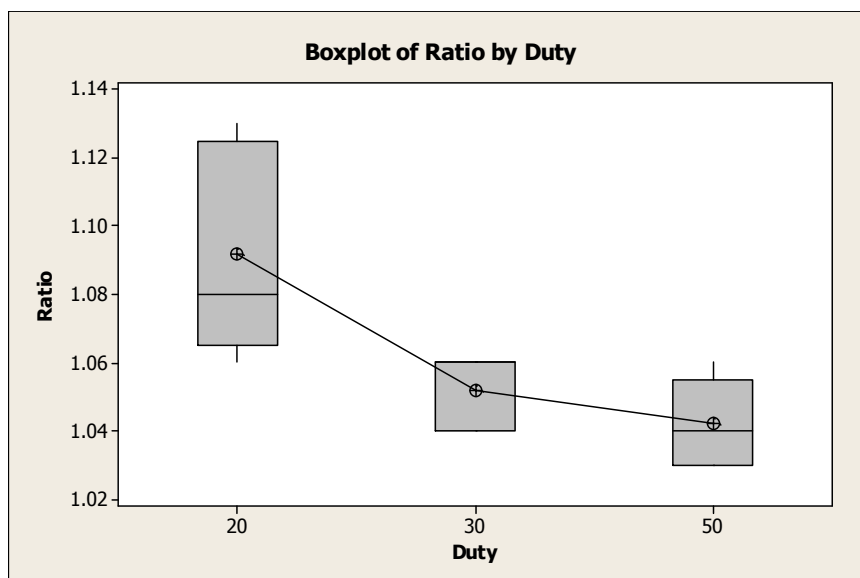
แผนภาพกล่องแสดงผลความลึกของร่องของปัจจัยอัตราการทำงานต่อคาบเวลา



ภาพที่ 4.10

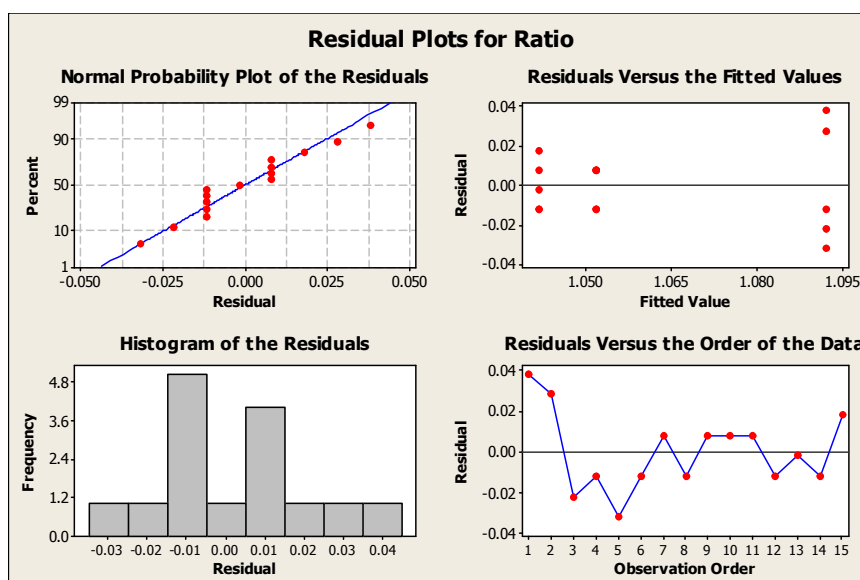
การทดสอบการกระจายและความเป็นอิสระของข้อมูลความลึกของร่องของปัจจัย
อัตราการทำงานต่อคาบเวลา

มีค่าเท่ากับ 0.005 ซึ่งมีความน้อยกว่า α ที่กำหนดคือ 0.05 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า อัตราการทำงานต่อคาบเวลามีอิทธิพลต่ออัตราส่วนของร่องในกระบวนการกัดร่องอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.11

แผนภาพกล่องแสดงผลอัตราส่วนของร่องของปัจจัยอัตราการทำงานต่อคาบเวลา



ภาพที่ 4.12

การทดสอบการกระจายและความเป็นอิสระของข้อมูลอัตราส่วนของร่องของปัจจัย
อัตราการทำงานต่อคาบเวลา

การเปรียบเทียบผลความแตกต่างของค่าเฉลี่ยจากภาพที่ 4.11 โดยแผนภาพกล่อง ในแต่ละระดับของปัจจัยอัตราการทำงานต่อคาบเวลาพบว่า ค่าอัตราส่วนของร่องลดลงเมื่อระดับของอัตราการทำงานต่อคาบเวลาในการกัดร่องเพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 4.12 พบว่ารูปแบบของส่วนตกค้างที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการทุกประการ ดังนั้น ข้อมูลของการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้

4. ช่องว่าง (Gap) ทำการเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ ได้แก่ ระดับที่ 1 เท่ากับ 40 μm , ระดับที่ 2 เท่ากับ 50 μm , ระดับที่ 3 เท่ากับ 60 μm ส่วนปัจจัยอื่น ๆ กำหนดที่สภาวะปัจจุบัน คือ กระแสไฟฟ้า เท่ากับ 10 A, อัตราการทำงานต่อคาบเวลาเท่ากับ 30% และสัญญาณพัลส์เท่ากับ 10 สัญญาณ

สรุปตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ช่วงความเชื่อมั่น (CI) 95 % กรณีปัจจัย คือ ช่องว่าง

ตารางที่ 4.14

การวิเคราะห์ความแปรปรวนความลึกของร่องกรณีปัจจัยช่องว่าง

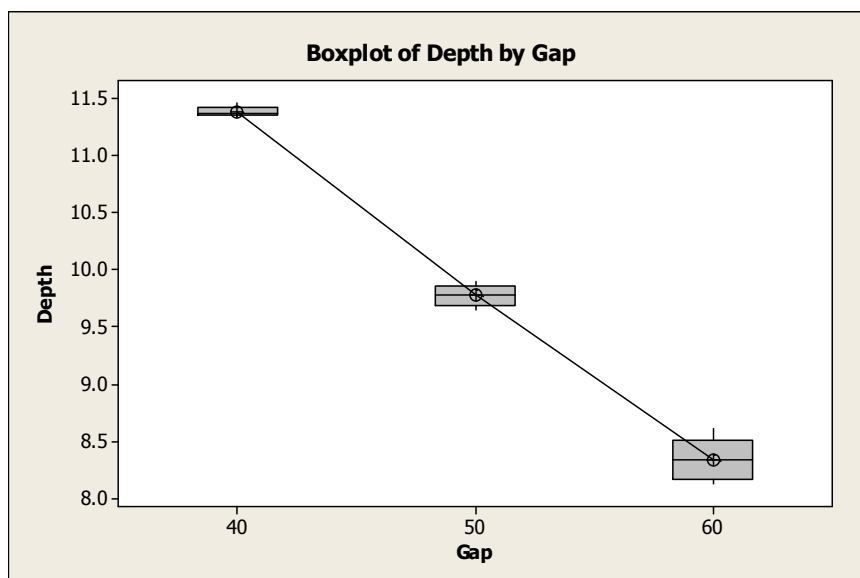
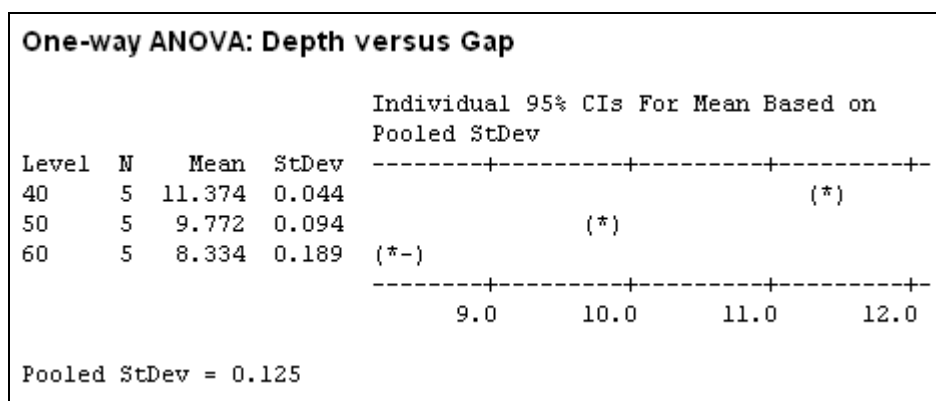
Source	df	Sums of Squares	Mean Squares	F-Statistic	P-value
ช่องว่าง	2	23.126	11.563	745.53	0.000
Error	12	0.186	0.015		
Total	14	230.312			

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14.0 เมื่อพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4.14 พบว่า ค่า P-value ของปัจจัยช่องว่างมีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α ที่กำหนด คือ 0.05 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ช่องว่างมีอิทธิพลต่อความลึกของร่องในกระบวนการกัดร่องอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดย Minitab Version 14.0 แสดงความแตกต่างผลเฉลี่ยความลึกของร่องระหว่างระดับของปัจจัยช่องว่าง

ตารางที่ 4.15

ความแตกต่างผลเฉลี่ยความลึกของร่องระหว่างระดับของปัจจัยช่องว่าง

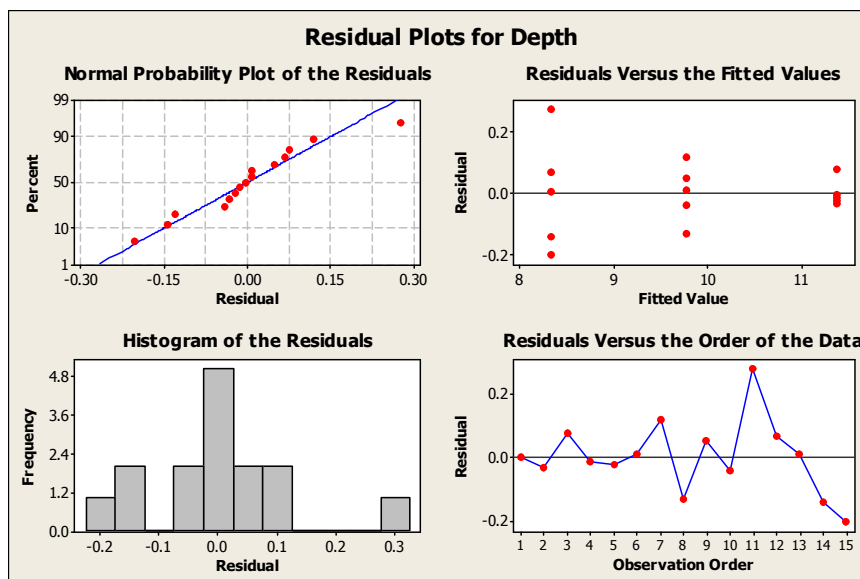


ภาพที่ 4.13

แผนภาพกล่องแสดงผลความลึกของร่องของปัจจัยช่องว่าง

การเปรียบเทียบผลความแตกต่างของค่าเฉลี่ยจากภาพที่ 4.13 โดยแผนภาพกล่อง ในแต่ละระดับของปัจจัยช่องว่างพบว่า ค่าความลึกของร่องลดลงเมื่อระดับของช่องว่างในการกัดร่องเพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 4.14 พบว่า รูปแบบของส่วนตกค้างที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการทุกประการ ดังนั้น ข้อมูลของการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้



ภาพที่ 4.14

การทดสอบการกระจายและความเป็นอิสระของข้อมูลความลึกของร่องของปัจจัยช่องว่าง

ตารางที่ 4.16

การวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของร่องกรณีปัจจัยช่องว่าง

Source	df	Sums of Squares	Mean Squares	F-Statistic	P-value
ช่องว่าง	2	0.417	0.208	814.05	0.000
Error	12	0.003	0.000		
Total	14	0.420			

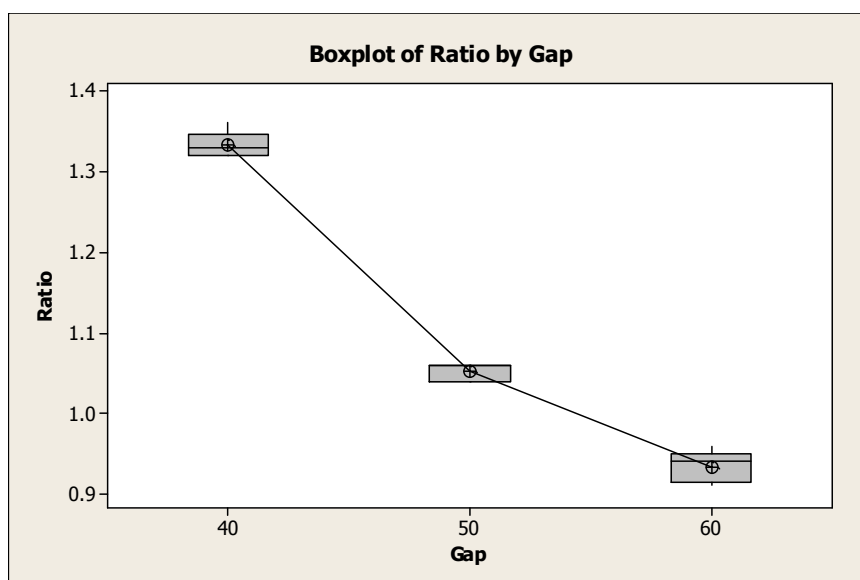
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14.0 เมื่อพิจารณาค่า P-value ในตารางที่ 4.14 พบว่า ค่า P-value ของปัจจัยช่องว่าง มีค่าเท่ากับ 0.005 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α ที่กำหนดคือ 0.05 ดังนั้น สรุปได้ว่า ช่องว่างมีอิทธิพลต่ออัตราส่วนของร่องในกระบวนการกัดร่องอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดย Minitab Version 14.0 แสดงความแตกต่างผลเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องระหว่างระดับของช่องว่าง

ตารางที่ 4.17

ความแตกต่างผลเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องระหว่างระดับของปัจจัยช่องว่าง

One-way ANOVA: Ratio versus Gap				
				Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
Level	N	Mean	StDev	
40	5	1.3320	0.0164	(*)
50	5	1.0520	0.0110	(-*)
60	5	0.9340	0.0195	(*)
				0.96 1.08 1.20 1.32
Pooled StDev = 0.0160				

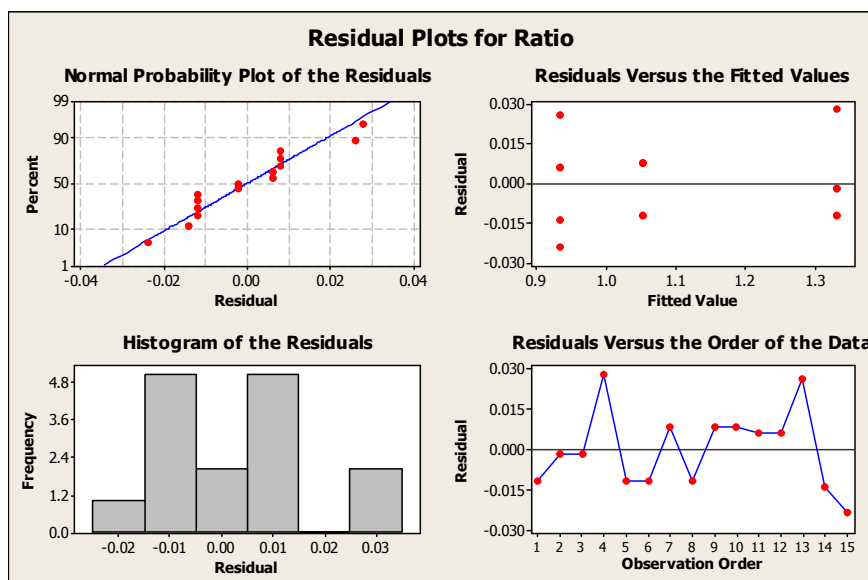


ภาพที่ 4.15

แผนภาพกล่องแสดงผลอัตราส่วนของร่องของปัจจัยช่องว่าง

การเปรียบเทียบผลความแตกต่างของค่าเฉลี่ยจากภาพที่ 4.15 โดยแผนภาพกล่อง ในแต่ละระดับของปัจจัยช่องว่างพบว่า ค่าอัตราส่วนของร่องลดลงเมื่อระดับของช่องว่างในการกัดร่องเพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 4.16 พบว่า รูปแบบของส่วนตกค้างที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการทุกประการ ดังนั้น ข้อมูลของการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้



ภาพที่ 4.16

การทดสอบการกระจายและความเป็นอิสระของข้อมูลอัตราส่วนของร่องของปัจจัยช่องว่าง

4.1.2 การวิเคราะห์กราฟความน่าจะเป็นแจกแจงปกติของผลกระทบของปัจจัยและความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย

ในการยืนยันผลความมีนัยสำคัญของปัจจัย โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อค้นหาค่าความเที่ยงตรงของความลึกและอัตราส่วนของร่อง รวมถึงผลกระทบร่วม โดยใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยการเขียนกราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติสำหรับผลกระทบของปัจจัยและความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Normal Probability Plot of the Standardized Effects)

โดยทำการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^K (2^K Factorial Experiment) ของปัจจัย กระแสไฟฟ้า (Current) สัญญาณพัลส์ (Pulse) อัตราการทำงานต่อคาบเวลา (Duty cycle) และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับสลิฟหรือช่องว่าง (Gap) ซึ่งระดับของปัจจัยที่ทำการวิเคราะห์ คือ เลือกระดับสูงสุดและระดับต่ำสุด ดังนี้

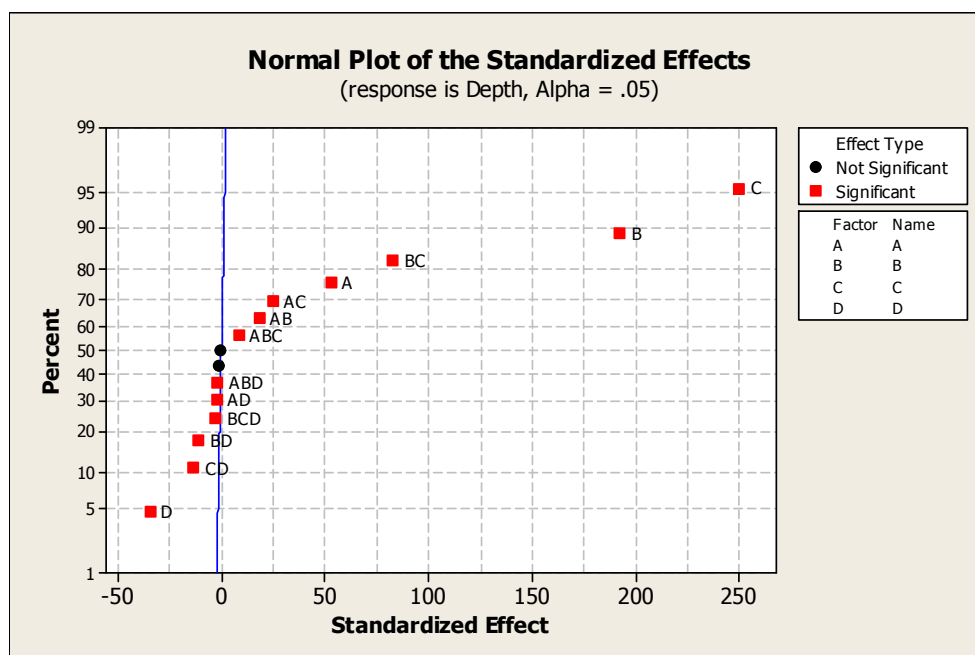
ตารางที่ 4.18

ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองวิเคราะห์ Normal Plot of the Standardized Effects

ปัจจัย	ระดับต่ำสุด	ระดับสูงสุด	หน่วย
A : กระแสไฟฟ้า(CC)	40	60	A
B : สัญญาณพัลส์(Pulse)	10	20	สัญญาณ/100ms
C : อัตราการทำงานต่อคาบเวลา(Duty Cycle)	20	50	%
D : ช่องว่าง(Gap)	8	10	μm

1. ผลการวิเคราะห์และการสรุปผลของกราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติ สำหรับผลกระทบของปัจจัยและความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่อค่าความลึกของร่อง

ค่าความลึกของร่องของการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^K ของแต่ละปัจจัยได้นำมา วิเคราะห์ความแปรปรวนและแสดงผลในภาพที่ 4.17 และตารางที่ 4.19 พบว่า มีเพียงอันตรกิริยา ของ ACD และ ABCD เท่านั้นที่ไม่มีอิทธิพลหรือนัยสำคัญต่อค่าความลึกของร่อง นอกเหนือจาก นั้น ทุกปัจจัยหลักและอันตรกิริยามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญในช่วงความเชื่อมั่น 95% โดย ปัจจัยหลัก D จะมีอิทธิพลในทางลบ ส่วนปัจจัยหลัก A, B, C จะมีอิทธิพลในทางบวก



ภาพที่ 4.17

Normal Probability Plot of Standard Effect ของแต่ละปัจจัยต่อค่าความลึกของร่อง

ตารางที่ 4.19

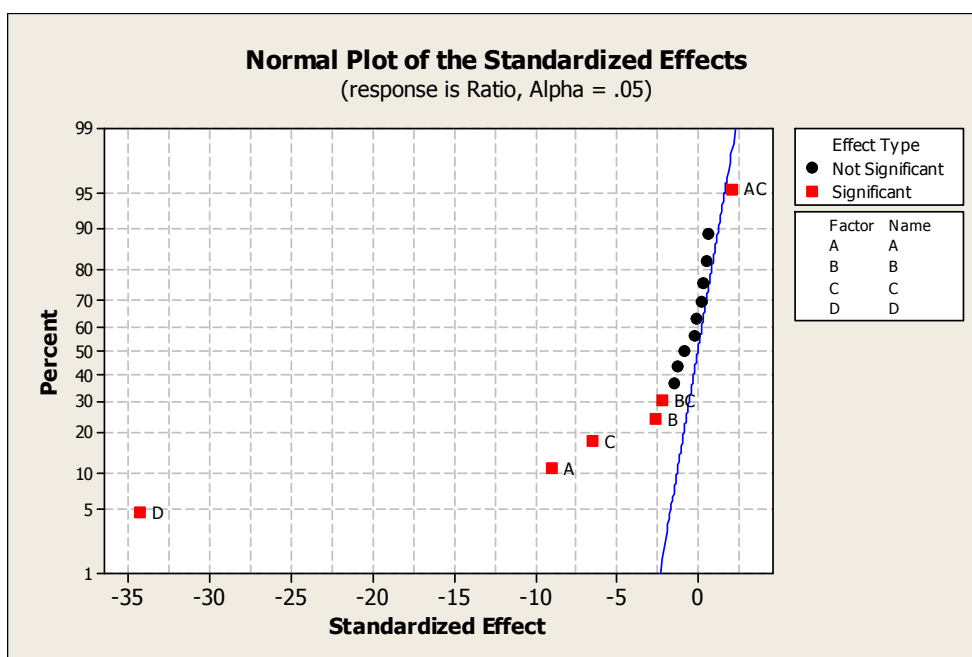
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของทดลอง 2^K ของแต่ละปัจจัยต่อค่าความลึกของร่อง

Factorial Fit: Depth versus A, B, C, D						
Estimated Effects and Coefficients for Depth (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		11.5098	0.01999	575.74	0.000	
A	2.1187	1.0594	0.01999	52.99	0.000	
B	7.7071	3.8535	0.01999	192.76	0.000	
C	10.0129	5.0065	0.01999	250.43	0.000	
D	-1.3846	-0.6923	0.01999	-34.63	0.000	
A*B	0.7329	0.3665	0.01999	18.33	0.000	
A*C	0.9971	0.4985	0.01999	24.94	0.000	
A*D	-0.0971	-0.0485	0.01999	-2.43	0.021	
B*C	3.3171	1.6585	0.01999	82.96	0.000	
B*D	-0.4404	-0.2202	0.01999	-11.02	0.000	
C*D	-0.5429	-0.2715	0.01999	-13.58	0.000	
A*B*C	0.3313	0.1656	0.01999	8.28	0.000	
A*B*D	-0.0829	-0.0415	0.01999	-2.07	0.046	
A*C*D	-0.0571	-0.0285	0.01999	-1.43	0.163	
B*C*D	-0.1087	-0.0544	0.01999	-2.72	0.010	
A*B*C*D	-0.0029	-0.0015	0.01999	-0.07	0.942	
S = 0.138504 PRESS = 1.3812						
R-Sq = 99.97% R-Sq(pred) = 99.94% R-Sq(adj) = 99.96%						
Analysis of Variance for Depth (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	1992.77	1992.77	498.191	25970.01	0.000
2-Way Interactions	6	156.39	156.39	26.065	1358.74	0.000
3-Way Interactions	4	1.58	1.58	0.395	20.59	0.000
4-Way Interactions	1	0.00	0.00	0.000	0.01	0.942
Residual Error	32	0.61	0.61	0.019		
Pure Error	32	0.61	0.61	0.019		
Total	47	2151.35				

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ทุกๆ ปัจจัยหลัก อันได้แก่ กระแสไฟฟ้า สัญญาณพัลส์ อัตราการทำงานต่อคาบเวลาและช่องว่างมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าความลึกของร่องและสามารถยืนยันได้ว่า แต่ละปัจจัยที่เลือกสำหรับทำการศึกษานั้นมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความลึกของร่องอันนำไปสู่การวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมในขั้นตอนต่อไป

2. ผลการวิเคราะห์และการสรุปผลของกราฟความน่าจะเป็นการแจกแจงปกติ สำหรับผลกระทบของปัจจัย และความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่อค่าอัตราส่วนของร่อง

ค่าอัตราส่วนของร่องของการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^K ของแต่ละปัจจัยได้นำมา วิเคราะห์ความแปรปรวนและแสดงผลในภาพที่ 4.18 และตารางที่ 4.20 ปัจจัยหลัก A, B, C, D และอันตรกิริยา BC มีอิทธิพลทางลบอย่างมีนัยสำคัญในช่วงความเชื่อมั่น 95% อันตรกิริยา CD มี อิทธิพลทางบวกอย่างมีนัยสำคัญในช่วงความเชื่อมั่น 95%



ภาพที่ 4.18

Normal Probability Plot of Standard Effect ของแต่ละปัจจัยต่อค่าอัตราส่วนของร่อง

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.20 พบว่า ทุกๆ ปัจจัยหลัก อัน ได้แก่ กระแสไฟฟ้า สัญญาณพัลส์ อัตราการทำงานต่อคาบเวลาและช่องว่างมีอิทธิพลทางลบต่อ ค่าอัตราส่วนของร่อง

ดังนั้น สามารถยืนยันได้ว่า แต่ละปัจจัยที่เลือกสำหรับทำการศึกษา นั้นมีอิทธิพล อย่างมีนัยสำคัญต่อค่าอัตราส่วนของร่องอันนำไปสู่การวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.20

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของทดลอง 2^k ของแต่ละปัจจัยต่อค่าอัตราส่วนของร่อง

Factorial Fit: Ratio versus A, B, C, D						
Estimated Effects and Coefficients for Ratio (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		0.94312	0.002826	333.73	0.000	
A	-0.05042	-0.02521	0.002826	-8.92	0.000	
B	-0.01458	-0.00729	0.002826	-2.58	0.015	
C	-0.03625	-0.01813	0.002826	-6.41	0.000	
D	-0.19375	-0.09687	0.002826	-34.28	0.000	
A*B	-0.00458	-0.00229	0.002826	-0.81	0.423	
A*C	0.01208	0.00604	0.002826	2.14	0.040	
A*D	0.00125	0.00063	0.002826	0.22	0.826	
B*C	-0.01208	-0.00604	0.002826	-2.14	0.040	
B*D	-0.00792	-0.00396	0.002826	-1.40	0.171	
C*D	0.00208	0.00104	0.002826	0.37	0.715	
A*B*C	-0.00708	-0.00354	0.002826	-1.25	0.219	
A*B*D	0.00375	0.00188	0.002826	0.66	0.512	
A*C*D	-0.00125	-0.00062	0.002826	-0.22	0.826	
B*C*D	0.00292	0.00146	0.002826	0.52	0.609	
A*B*C*D	-0.00042	-0.00021	0.002826	-0.07	0.942	
S = 0.0195789 PRESS = 0.0276						
R-Sq = 97.63% R-Sq(pred) = 94.66% R-Sq(adj) = 96.52%						
Analysis of Variance for Ratio (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	0.499292	0.499292	0.124823	325.63	0.000
2-Way Interactions	6	0.004579	0.004579	0.000763	1.99	0.096
3-Way Interactions	4	0.000892	0.000892	0.000223	0.58	0.678
4-Way Interactions	1	0.000002	0.000002	0.000002	0.01	0.942
Residual Error	32	0.012267	0.012267	0.000383		
Pure Error	32	0.012267	0.012267	0.000383		
Total	47	0.517031				

4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

4.2.1 ระบุแผนการทดลองแบบ Orthogonal Array ตามหลักการของทาคุชิ

เพื่อเป็นการตัดสินใจการปรับเปลี่ยนระดับที่เกิดขึ้นของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ โดยปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้การออกแบบการทดลองโดยวิธีทาคุชิ แสดงดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21

ปัจจัยและรายละเอียดของปัจจัยรวมถึงระดับที่ใช้ในการทดลองของทาคุชิ

ปัจจัย/ระดับ	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3	หน่วย
กระแสไฟฟ้า (CC)	8	9	10	A
สัญญาณพัลส์ (Pulse)	10	15	20	สัญญาณ/100ms
อัตราการทำงานต่อคาบเวลา (Duty Cycle)	20	30	40	%
ช่องว่าง (Gap)	40	50	60	μm

ดังนั้น จึงสามารถออกแบบตารางแสดงผลการทดลองค่าความลึกและและอัตราส่วนของร่องได้ดังตารางที่ 4.22 โดยในจำนวนการทดลองซ้ำ (Replicate) ในแต่ละการทดลองมีจำนวน 3 ครั้ง ($n=3$) เพื่อนำค่าเฉลี่ยในแต่ละการทดลองบันทึกในตารางแสดงผล อย่างไรก็ตามการออกแบบการทดลองนี้สามารถดำเนินการทดลองได้เต็มรูปแบบแฟคทอเรียลและสามารถใช้หลักการทาคุชิ ออกแบบได้ตาม L_{18} Orthogonal Array เพื่อทำการวิเคราะห์ค่า Signal to Noise Ratios (S/N) ในกรณีศึกษาเป็นกรณี “Target-the-Best” หรือ “Nominal-the-Best” โดยตามสูตรคำนวณดังนี้

$$S/N_r = 10 \log \left(\frac{\bar{y}_i^2}{S_i^2} \right)$$

โดยที่

$\bar{y}_i$ = ค่าเฉลี่ยสิ่งที่วัดได้จากการทำซ้ำครั้งที่ i

S_i^2 = ค่าความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่าง

ในปัจจุบันสูตร S/N ได้ปรับเปลี่ยนให้มีความแตกต่างไปตามการนำไปประยุกต์ใช้ (อ่านเพิ่มเติม Taguchi's Quality Engineering Handbook (2004) บทที่ 4)

ตารางที่ 4.22

การออกแบบการทดลอง L_{18} Orthogonal Array ที่ใช้ในการทดลองของทาคุชิ

ลำดับ การทดลอง (Exp.No.)	ปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง			
	A	B	C	D
	กระแสไฟฟ้า (CC)	สัญญาณพัลส์ (Pulse)	อัตราการทำงานต่อ คาบเวลา(Duty)	ช่องว่าง (Gap)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	1	2
5	2	2	2	3
6	2	3	3	1
7	3	1	2	1
8	3	2	3	2
9	3	3	1	3
10	1	1	3	3
11	1	2	1	1
12	1	3	2	2
13	2	1	2	3
14	2	2	3	1
15	2	3	1	2
16	3	1	3	2
17	3	2	1	3
18	3	3	2	1

ที่มา : Taguchi method and ANOVA : An approach for process parameters optimization of hard machining hardened steel, Vol.68, August 2009, 685-695

4.2.2 ผลการทดลองตามการวิธีการออกแบบของทาคุชิ

1. ค่าความลึกของร่องจากการวิธีการออกแบบของทาคุชิ

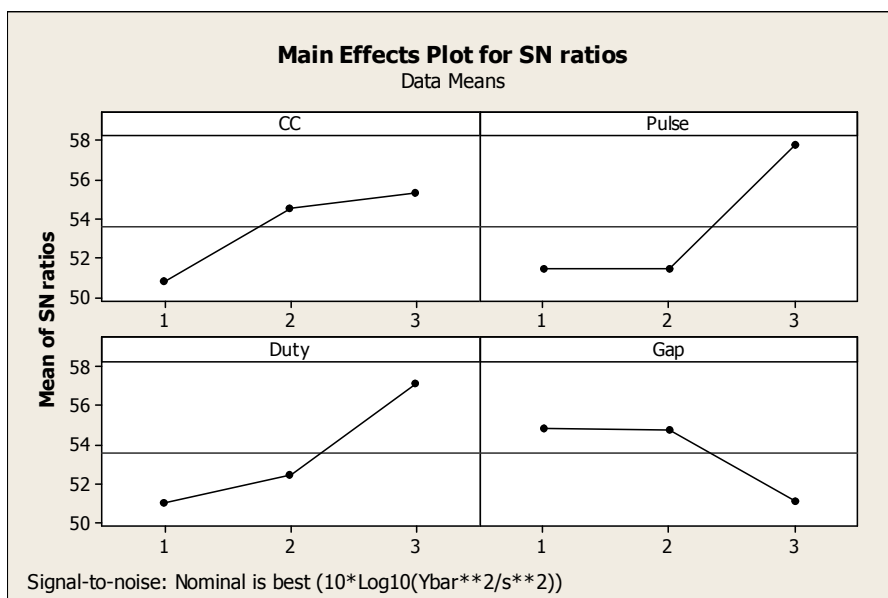
ค่าความลึกของร่องที่ได้จากการวิธีการออกแบบของทาคุชิ แสดงดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23

ค่าความลึกของร่องที่ได้จากการวิธีการออกแบบของทาคุชิ

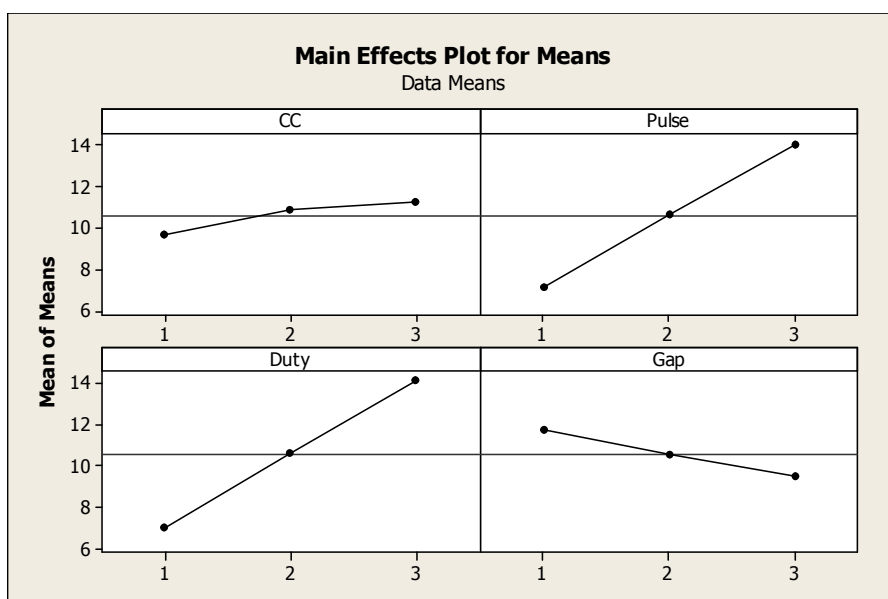
ลำดับ การทดลอง	ค่าความลึกของร่อง (Depth, μm)			S/N Ratio	ค่าเฉลี่ย
	R1	R2	R3		
1	4.58	4.59	4.55	46.8364	4.57333
2	9.71	9.79	9.71	46.4776	9.73667
3	15.99	16.02	16.01	60.4063	16.0067
4	4.82	4.81	4.82	58.4261	4.81667
5	9.93	9.97	9.93	52.6807	9.94333
6	19.65	19.63	19.62	62.1801	19.6333
7	8.31	8.37	8.34	48.8809	8.3400
8	15.62	15.65	15.68	54.3479	15.6500
9	9.40	9.49	9.46	46.2864	9.4500
10	8.15	8.17	8.12	50.2033	8.14667
11	6.75	6.73	6.79	46.8943	6.75667
12	12.89	12.84	12.87	54.1730	12.8667
13	6.41	6.49	6.47	43.8113	6.45667
14	14.64	14.66	14.69	55.3083	14.6633
15	9.63	9.60	9.63	54.8923	9.6200
16	10.54	10.53	10.52	60.4486	10.5300
17	6.95	6.97	6.98	53.1807	6.96667
18	16.29	16.29	16.30	69.0114	16.2933

นำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14.0 สามารถแสดงผลปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยความลึกของร่องและปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลหลักของต่อค่าเฉลี่ย Signal-to-Noise Ratio (S/N) ของปัจจัย ดังภาพที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.19

อิทธิพลหลักของค่าเฉลี่ย Signal-to-Noise Ratio (S/N) แต่ละปัจจัยของค่าเฉลี่ยความลึกของร่อง



ภาพที่ 4.20

อิทธิพลหลักของค่าเฉลี่ยความลึกของร่องแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 4.24

ค่าเฉลี่ยของ S/N ความลึกของร่อง ณ ระดับต่างๆ ของปัจจัย

ปัจจัย	A	B	C	D
	กระแสไฟฟ้า (CC)	สัญญาณพัลส์ (Pulse)	อัตราการทำงานต่อ คาบเวลา(Duty Cycle)	ช่องว่าง (Gap)
ระดับที่ 1	50.83	51.43	51.09	54.85
ระดับที่ 2	54.55	51.48	52.51	54.79
ระดับที่ 3	55.36	57.82	57.15	51.09
ผลกระทบ	4.53	6.39	6.06	3.76
Rank	3	1	2	4

จากตารางที่ 4.24 สรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่า Signal-to-Noise Ratio (S/N) ของความลึกของร่อง คือ ปัจจัย B, C, A และ D ตามลำดับของ Rank

ตารางที่ 4.25

ค่าเฉลี่ยความลึกของร่อง ณ ระดับต่างๆ ของปัจจัย

ปัจจัย	A	B	C	D
	กระแสไฟฟ้า (CC)	สัญญาณพัลส์ (Pulse)	อัตราการทำงานต่อ คาบเวลา(Duty Cycle)	ช่องว่าง (Gap)
ระดับที่ 1	9.681	7.144	7.031	11.710
ระดับที่ 2	10.856	10.619	10.606	10.537
ระดับที่ 3	11.205	13.978	14.105	9.495
ผลกระทบ	1.524	6.834	7.074	2.215
Rank	4	2	1	3

และจากตารางที่ 4.25 สรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความลึกของร่องเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก คือ ปัจจัย C, B, D และ A ตามลำดับของ Rank

ค่า Rank จะถูกเรียงลำดับมาจากค่าผลกระทบที่เกิดขึ้นจากระดับต่างๆ ของปัจจัย ซึ่งค่าผลกระทบที่มีค่ามากจะถูกจัดอยู่ใน Rank ลำดับต้นๆ ซึ่งอธิบายได้ว่า ปัจจัยที่อยู่ใน Rank ต้นๆ นั้นจะมีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยของ S/N หรือ ค่าเฉลี่ยมากเช่นเดียวกัน โดยปัจจัยที่จะใช้เป็นตัวแปรการปรับค่า (Adjustment Factor or Adjustment Variable) นั้นจะต้องเป็น ปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยของ S/N และต้องมีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

1.1 การเลือกปัจจัยที่ใช้เป็นตัวแปรปรับค่าของค่าความลึกของร่อง

ตารางที่ 4.26

การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการปรับค่าของค่าความลึกของร่อง

ค่าเฉลี่ยของ S/N ความลึกของร่อง			ค่าเฉลี่ยความลึกของร่อง		
Rank (S/N)	ผลกระทบ	ปัจจัย	Rank (Avg)	ผลกระทบ	ปัจจัย
1	6.39	B	1	7.074	C
2	6.06	C	2	6.834	B
3	4.53	A	3	2.215	D
4	3.76	D	4	1.524	A

จากตารางที่ 4.26 พบว่า ปัจจัย D (ช่องว่าง) เหมาะสมที่สุดในการเลือกเป็นปัจจัยที่ใช้ในการปรับค่า เนื่องจากปัจจัย D เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยเพียงอย่างเดียวและไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของ S/N ซึ่งมีค่าผลกระทบอยู่ใน Rank (S/N) ที่ 4 โดยจะเห็นได้ว่า ปัจจัย B และปัจจัย C มีผลต่อค่าเฉลี่ยของ S/N เนื่องจากมีค่าผลกระทบอยู่ใน Rank (S/N) ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนปัจจัย A นั้นไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความลึกของร่อง เนื่องจากมีค่าผลกระทบอยู่ใน Rank (Avg) ที่ 4 จึงไม่ถูกนำมาพิจารณาเป็นตัวแปรปรับค่า

ดังนั้น จึงทำการกำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย B, C และ A ณ จุดที่ทำให้ค่าเฉลี่ยของ S/N มีค่าสูงสุด (ตามตารางที่ 4.24) จะได้

B ควรกำหนดไว้ที่ระดับที่ 3 (Max S/N = 57.82)

C ควรกำหนดไว้ที่ระดับที่ 3 (Max S/N = 57.15)

A ควรกำหนดไว้ที่ระดับที่ 3 (Max S/N = 55.36)

สำหรับปัจจัย D จะสามารถคำนวณค่าจากสมการประมาณค่าซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อที่ 3 ต่อไป

2. ค่าอัตราส่วนของร่องจากวิธีการออกแบบของทาคุชิ

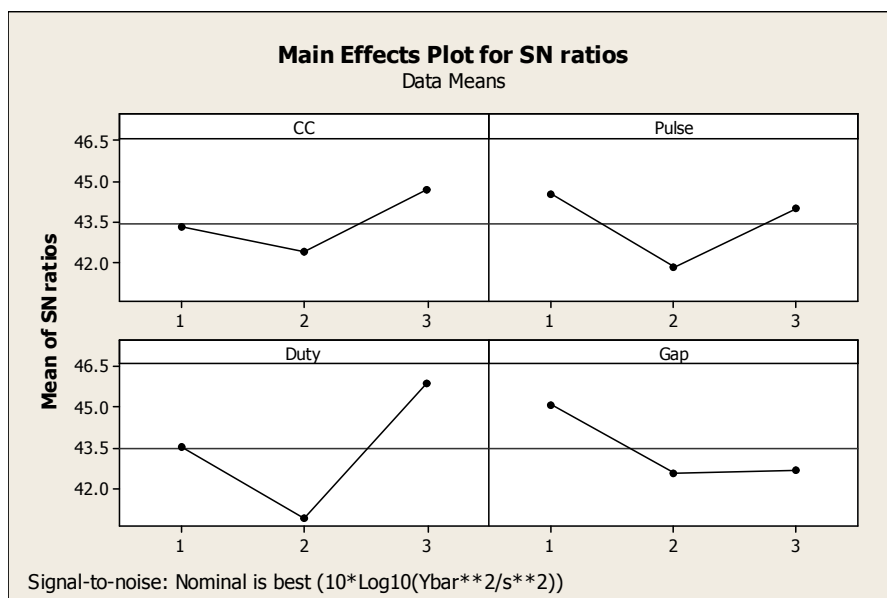
ค่าอัตราส่วนของร่องที่ได้จากวิธีการออกแบบของทาคุชิ แสดงดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.27

ค่าอัตราส่วนของร่องที่ได้จากวิธีการออกแบบของทาคุชิ

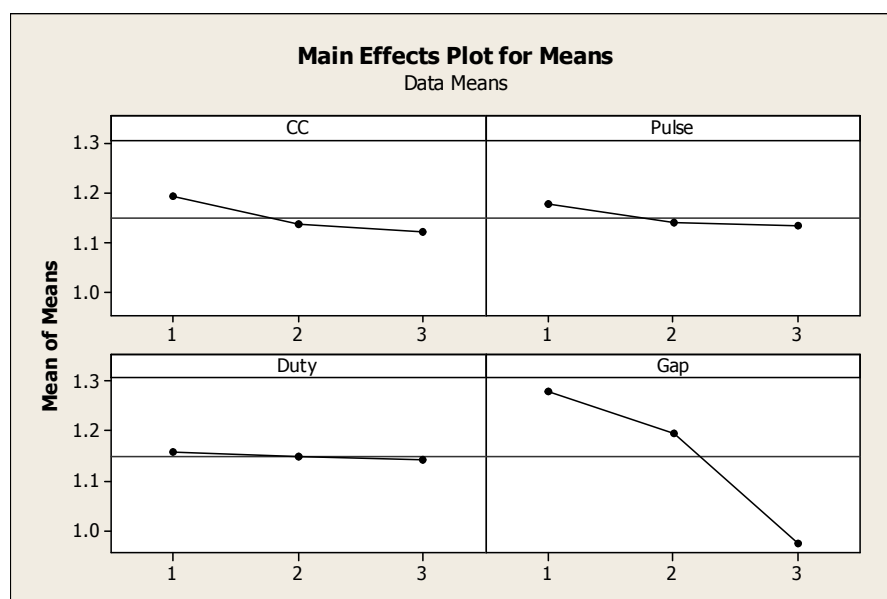
ลำดับ การทดลอง	ค่าอัตราส่วนของร่อง (Ratio)			S/N Ratio	ค่าเฉลี่ย
	R1	R2	R3		
1	1.36	1.35	1.34	42.6067	1.35000
2	1.25	1.23	1.20	33.7582	1.22667
3	1.00	1.01	1.00	44.8001	1.00333
4	1.22	1.23	1.24	41.7981	1.23000
5	0.97	0.93	0.94	33.1557	0.946667
6	1.23	1.22	1.22	46.5221	1.22333
7	1.29	1.30	1.29	47.0054	1.29333
8	1.16	1.16	1.17	46.0853	1.16333
9	0.94	0.93	0.94	44.2029	0.936667
10	1.05	1.06	1.05	45.2225	1.05333
11	1.32	1.33	1.32	47.2046	1.32333
12	1.20	1.20	1.19	46.3307	1.19667
13	0.97	0.98	0.98	44.5661	0.976667
14	1.25	1.24	1.25	46.6862	1.24667
15	1.18	1.20	1.19	41.5109	1.19000
16	1.17	1.16	1.16	46.0853	1.16333
17	0.92	0.93	0.92	44.0784	0.923333
18	1.24	1.26	1.24	40.6656	1.24667

นำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม Minitab version 14.0 สามารถแสดงผลปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องและปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลหลักของต่อค่าเฉลี่ย Signal-to-Noise Ratio (S/N) ของปัจจัย ดังภาพที่ 4.21 และ 4.22



ภาพที่ 4.21

อิทธิพลหลักของค่าเฉลี่ย Signal-to-Noise Ratio (S/N) แต่ละปัจจัยของอัตราส่วนของร่อง



ภาพที่ 4.22

อิทธิพลหลักของค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 4.28

ค่าเฉลี่ยของ S/N อัตราส่วนของร่อง ณ ระดับต่างๆ ของปัจจัย

ปัจจัย	A	B	C	D
	กระแสไฟฟ้า (CC)	สัญญาณพัลส์ (Pulse)	อัตราการทำงานต่อ คาบเวลา(Duty)	ช่องว่าง (Gap)
ระดับที่ 1	43.32	44.55	43.57	45.12
ระดับที่ 2	42.37	41.83	40.91	42.59
ระดับที่ 3	44.69	44.01	45.90	42.67
ผลกระทบ	2.31	2.71	4.99	2.52
Rank	4	2	1	3

จากตารางที่ 4.28 สรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่า Signal-to-Noise Ratio (S/N) ของอัตราส่วนของร่อง คือปัจจัย C, B, D และ A ตามลำดับของ Rank

ตารางที่ 4.29

ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่อง ณ ระดับต่างๆ ของปัจจัย

ปัจจัย	A	B	C	D
	กระแสไฟฟ้า (CC)	สัญญาณพัลส์ (Pulse)	อัตราการทำงานต่อ คาบเวลา(Duty)	ช่องว่าง (Gap)
ระดับที่ 1	1.1922	1.1778	1.1589	1.2806
ระดับที่ 2	1.1356	1.1383	1.1478	1.1950
ระดับที่ 3	1.1211	1.1328	1.1422	0.9733
ผลกระทบ	0.0711	0.0450	0.0167	0.3072
Rank	2	3	4	1

และจากตารางที่ 4.29 สรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่อง เรียงลำดับจากน้อยไปหามาก คือ ปัจจัย D, A, B และ C ตามลำดับของ Rank

2.1 การเลือกปัจจัยที่ใช้เป็นตัวแปรการปรับค่าของค่าอัตราส่วนของร่อง

ตารางที่ 4.30

การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการปรับค่าของค่าอัตราส่วนของร่อง

ค่าเฉลี่ยของ S/N อัตราส่วนของร่อง			ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่อง		
Rank(S/N)	ผลกระทบ	ปัจจัย	Rank(Avg)	ผลกระทบ	ปัจจัย
1	4.99	C	1	0.3072	D
2	2.71	B	2	0.0711	A
3	2.52	D	3	0.0450	B
4	2.31	A	4	0.0167	C

จากตารางที่ 4.30 พบว่า ปัจจัย D (ช่องว่าง) เหมาะสมที่สุดในการเลือกเป็นปัจจัยที่ใช้ในการปรับค่า เนื่องจากปัจจัย D เป็นปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของ S/N ซึ่งมีค่าผลกระทบอยู่ใน Rank (S/N) ที่ 3 และค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องมีค่าผลกระทบอยู่ใน Rank (Avg) ที่ 1 นั้นหมายความว่าปัจจัย D เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

ดังนั้นจึงทำการกำหนดค่าที่เหมาะสมของปัจจัย C, B และ A ณ จุดที่ทำให้ค่าเฉลี่ยของ S/N มีค่าสูงสุด (ตามตารางที่ 4.27) จะได้

C ควรกำหนดไว้ที่ระดับที่ 3 (Max S/N = 45.90)

B ควรกำหนดไว้ที่ระดับที่ 1 (Max S/N = 44.55)

A ควรกำหนดไว้ที่ระดับที่ 3 (Max S/N = 44.69)

สำหรับปัจจัย D จะสามารถคำนวณค่าจากสมการประมาณค่าซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อที่ 3 ต่อไป

3. การประมาณค่าสมการค่าเฉลี่ย

จากการกำหนดค่าที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับค่าอัตราส่วนของร่องพบว่า จำเป็นต้องเปลี่ยนระดับของปัจจัย B จากการกำหนดค่าที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับค่าความลึกของร่องที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้ จากเดิมกำหนดไว้ที่ระดับที่ 3 เปลี่ยนเป็นระดับที่ 1 เพื่อให้สอดคล้องกับการกำหนดค่าที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับค่าอัตราส่วนของร่อง เนื่องจาก ดังตารางที่ 4.23 ลำดับการทดลองที่ 16 จะพบว่า เมื่อระดับของปัจจัย A = 3, B = 1 และ C = 3 จะทำให้ค่าเฉลี่ยความลึกของร่องเท่ากับ 10.530 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงเป้าหมายที่ 10 μm มากที่สุด

ดังนั้นจึงทำการกำหนดค่าที่เหมาะสมของปัจจัย A, B และ C ในการประมาณค่าสมการค่าเฉลี่ยเพื่อปรับค่าปัจจัย D ให้ได้ค่าเฉลี่ยของความลึกของร่องมีค่าเท่ากับ 10 μm และค่าอัตราส่วนของร่องมีค่าเท่ากับ 1 ดังนี้

C กำหนดไว้ที่ระดับที่ 3 (Max S/N (Depth) = 55.36, Max S/N(Ratio) = 45.90)

B กำหนดไว้ที่ระดับที่ 1 (3rd S/N (Depth) = 51.43, Max S/N(Ratio) = 44.55)

A กำหนดไว้ที่ระดับที่ 3 (Max S/N (Depth) = 57.15, Max S/N(Ratio) = 44.69)

สมการประมาณค่าสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\therefore \hat{\mu}_y = \bar{T} + \hat{\alpha} + \hat{\xi} + \hat{\phi}$$

โดยที่	$\hat{\mu}_y$	แทน	ผลตอบสนองเฉลี่ย
	$\hat{\alpha}$	แทน	ผลกระทบอันเกิดจากระดับของปัจจัย C
	$\hat{\xi}$	แทน	ผลกระทบอันเกิดจากระดับของปัจจัย B
	$\hat{\phi}$	แทน	ผลกระทบอันเกิดจากระดับของปัจจัย D
	$\bar{T}$	แทน	ค่าเฉลี่ยรวมจากระดับของปัจจัย C และ B

หมายเหตุ : ปัจจัย A นั้นไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ย S/N และค่าเฉลี่ยของทั้งค่าความลึกของร่องและค่าอัตราส่วนของร่อง จึงไม่ถูกนำมาพิจารณาในสมการประมาณค่า

การประมาณค่าสมการค่าเฉลี่ย เพื่อปรับค่าปัจจัย D ให้ได้ค่าเฉลี่ยของความลึกของร่องมีค่าเท่ากับ 10 μm สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\therefore \hat{\mu}_y = \bar{T} + (\bar{C}_3 - \bar{T}) + (\bar{B}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_7 - \bar{T})$$

$$\bar{T} = \frac{(\bar{C}_1 + \bar{C}_2 + \bar{C}_3) + (\bar{B}_1 + \bar{B}_2 + \bar{B}_3)}{6} = \frac{31.741 + 31.742}{6} = 10.58$$

โดยที่ $\bar{T}$ = ค่าเฉลี่ยรวมของความลึกของร่อง

อ่านค่า $\bar{C}_3$ และ $\bar{B}_1$ จากตารางที่ 4.25

$$\begin{aligned}\therefore 10 &= \bar{C}_3 + \bar{B}_1 + \bar{D}_7 - 2\bar{T} \\ &= 14.105 + 7.144 + \bar{D}_7 - 2(10.58) \\ \bar{D}_7 &= 9.912\end{aligned}$$

จากตารางที่ 4.25 ปัจจัย D ระดับที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกับ 9.912 มากที่สุด

การประมาณค่าสมการค่าเฉลี่ย เพื่อปรับค่าปัจจัย D ให้ได้ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของร่องมีค่าเท่ากับ 1 สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\therefore \hat{\mu}_y &= \bar{T} + (\bar{C}_3 - \bar{T}) + (\bar{B}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_7 - \bar{T}) \\ \bar{T} &= \frac{(\bar{C}_1 + \bar{C}_2 + \bar{C}_3) + (\bar{B}_1 + \bar{B}_2 + \bar{B}_3)}{6} = \frac{3.4489 + 3.4489}{6} = 1.15\end{aligned}$$

โดยที่ $\bar{T}$ = ค่าเฉลี่ยรวมของอัตราส่วนของร่อง

อ่านค่า $\bar{C}_3$ และ $\bar{B}_1$ จากตารางที่ 4.29

$$\begin{aligned}\therefore 1 &= \bar{C}_3 + \bar{B}_1 + \bar{D}_7 - 2\bar{T} \\ &= 1.1422 + 1.1778 + \bar{D}_7 - 2(1.15) \\ \bar{D}_7 &= 0.979\end{aligned}$$

จากตารางที่ 4.29 ปัจจัย D ระดับที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกับ 0.979 มากที่สุด

จากการประมาณค่าสมการค่าเฉลี่ย เพื่อปรับค่าปัจจัย D ให้ได้ค่าเฉลี่ยของความลึกของร่องมีค่าเท่ากับ 10 μm และค่าอัตราส่วนของร่องมีค่าเท่ากับ 1 พบว่า ระดับของปัจจัยค่าเฉลี่ยของความลึกของร่องและค่าอัตราส่วนของร่องสอดคล้องกัน กล่าวคือ ระดับที่เหมาะสมที่สุดอยู่ระหว่าง ระดับที่ 3 จึงสรุปได้ว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ คือ

ปัจจัย A ควรกำหนดไว้ระดับที่ 3 (กระแสไฟฟ้า 10 A)

ปัจจัย B ควรกำหนดไว้ระดับที่ 1 (สัญญาณพัลส์ 10 สัญญาณ)

ปัจจัย C ควรกำหนดไว้ระดับที่ 3 (อัตราการทำงานต่อคาบเวลา 40%)

ปัจจัย D ควรกำหนดไว้ระดับที่ 3 (ช่องว่าง 60 μm)

4. การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

หลังจากการประมาณค่าสมการค่าเฉลี่ยเพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับค่าความลึกของร่องและอัตราส่วนของร่องได้แล้วนั้น จะทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมในส่วนของการวิเคราะห์การถดถอยซึ่งจะออกมาในรูปของสมการพยากรณ์ ($\hat{Y} = f(x)$) เพื่อพยากรณ์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกและอัตราส่วนของร่องต่อปัจจัยหลัก อันได้แก่ กระแสไฟฟ้า สัญญาณพัลส์ อัตราการทำงานต่อคาบเวลาและช่องว่าง โดยจะใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) กำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ ตัวอย่างความสัมพันธ์อาจกำหนดได้ ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

Y	คือ	ค่าตอบสนอง
$X_1, X_2, \dots, X_k$	คือ	ตัวแปรอิสระ
ε	คือ	ความผิดพลาด

จากตารางที่ ข-2 ในภาคผนวก ข สมการพยากรณ์สำหรับค่าความลึกของร่อง โดยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติได้ผลลัพธ์ ดังนี้

$$Depth = -11.6 + 0.762 \times CC + 0.683 \times Pulse + 0.354 \times Duty - 0.111 \times Gap$$

จากตารางที่ ข-3 ในภาคผนวก ข สมการพยากรณ์สำหรับค่าอัตราส่วนของร่อง โดยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติได้ผลลัพธ์ ดังนี้

$$Ratio = 2.33 - 0.0356 \times CC - 0.00450 \times Pulse - 0.00083 \times Duty - 0.0154 \times Gap$$

จากการกำหนดระดับที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ คือ กระแสไฟฟ้า 10 A, สัญญาณพัลส์ 10 สัญญาณ, อัตราการทำงานต่อคาบเวลา 40% และ ช่องว่าง 60 μm แทนค่าลงในสมการสำหรับการพยากรณ์ค่าความลึกของร่องและค่าอัตราส่วนของร่อง จะได้ดังนี้

$$\text{Depth} = -11.6 + 0.762 \times 10 + 0.683 \times 10 + 0.354 \times 40 - 0.111 \times 60 = 10.35$$

$$\text{Ratio} = 2.33 - 0.0356 \times 10 - 0.00450 \times 10 - 0.00083 \times 40 - 0.0154 \times 60 = 0.972$$

สำหรับค่าความลึกของร่องและค่าอัตราส่วนของร่องที่ได้จากสมการจะเป็นค่าสำหรับพยากรณ์ในการทดลองเพื่อยืนยันผล ในการตรวจสอบค่าเฉลี่ยความลึกของร่องและค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องใกล้เคียงเป้าหมายมากที่สุดหรือไม่

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของทดลองเพื่อยืนยันผล

การทดลองเพื่อยืนยันผลเป็นการทดลองเพื่อทำการพิสูจน์ว่า ค่าที่กำหนดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเป็นค่าที่ดีที่สุดจริงในการที่จะให้ได้ค่าเฉลี่ยของความลึกของร่องมีค่าเท่ากับ 10 μm และค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องมีค่าเท่ากับ 1 โดยการเปรียบเทียบระดับที่ได้จากการวิจัยกับระดับที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31

ระดับของกระบวนการปัจจุบันและจากการวิจัย

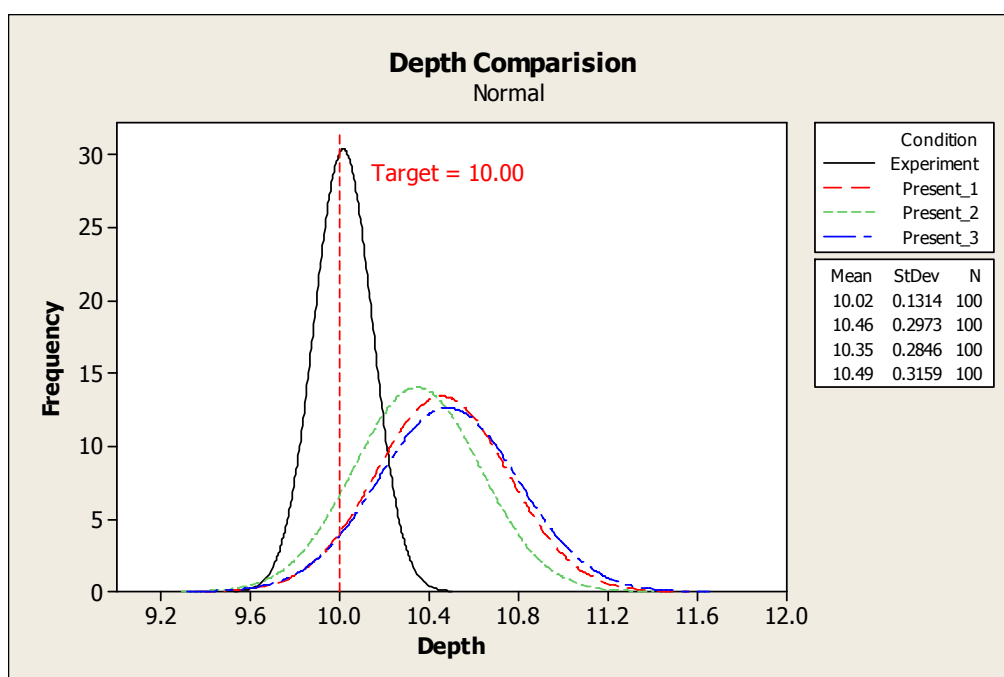
ปัจจัย		ระดับจากการวิจัย	ระดับปัจจุบัน			หน่วย
		Experiment	Present_1	Present_2	Present_3	
A	กระแสไฟฟ้า	10	9.5	10	9.5	A
B	สัญญาณพัลส์	10	16	17	19	สัญญาณ/ 100ms
C	อัตราการทำงานต่อคาบเวลา	40	30	30	25	%
D	ช่องว่าง	60	55	60	50	μm

4.3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยของความลึกของร่อง

ตารางที่ 4.32

ข้อมูลทางสถิติความลึกของร่องระหว่างระดับของกระบวนการปัจจุบันและจากการวิจัย

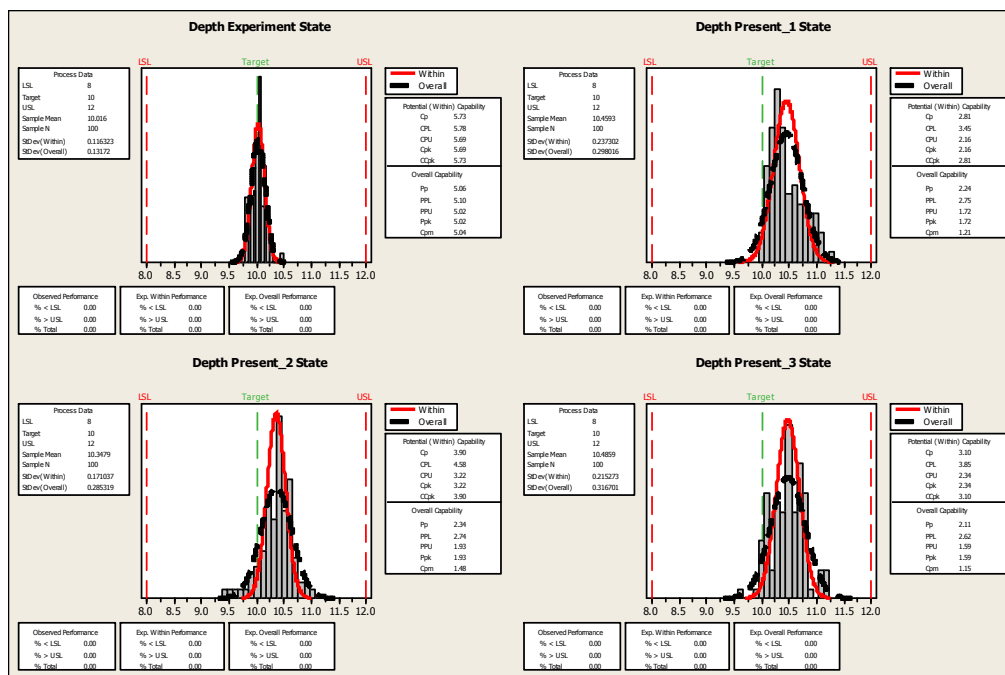
Condition		N	Mean	StDev	Cpk
ระดับจากการวิจัย	Experiment	100	10.02	0.131	5.69
ระดับปัจจุบัน	Present_1	100	10.46	0.297	2.16
	Present_2	100	10.35	0.284	3.22
	Present_3	100	10.49	0.316	1.59



ภาพที่ 4.23

ฮิสโตแกรมแสดงค่าเฉลี่ยความลึกของร่องระหว่าง
ระดับที่ได้จากการวิจัยกับระดับที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

จากภาพที่ 4.23 แสดงค่าเฉลี่ยความลึกของร่องระหว่างระดับที่ได้จากการวิจัยซึ่งเป็นสภาวะที่ดีที่สุดกับระดับที่ใช้อยู่ในปัจจุบันถูกวิเคราะห์เปรียบเทียบกันโดยฮิสโตแกรม



ภาพที่ 4.24

ฮีสโตแกรมแสดงค่าความสามารถของกระบวนการ (Cpk) ความลึกของร่อง
ระหว่างระดับที่ได้จากการวิจัยกับระดับที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

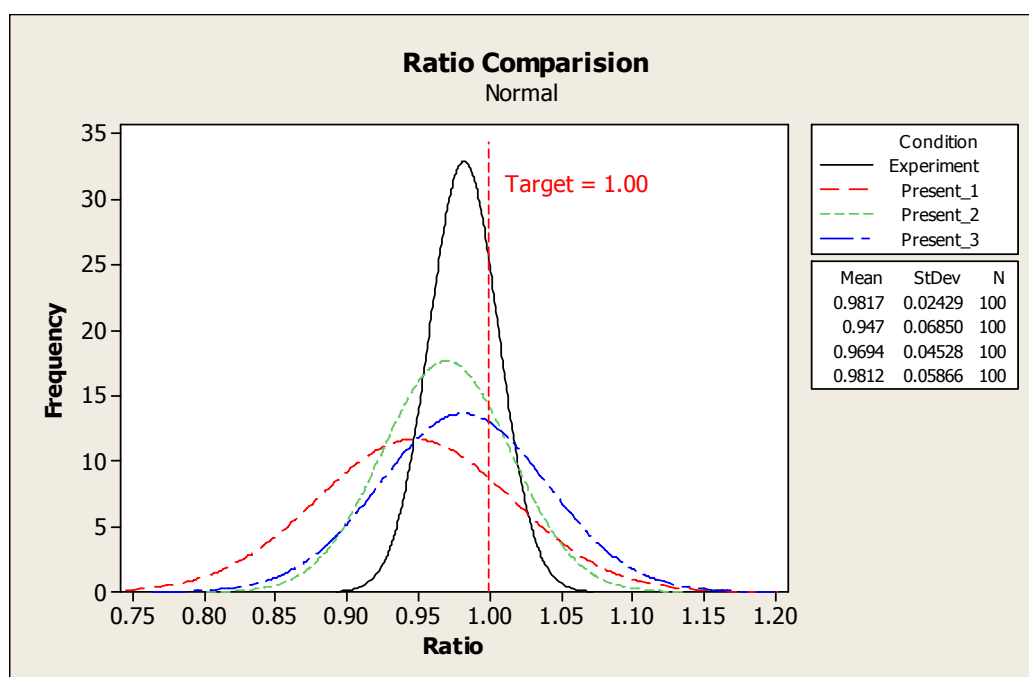
ข้อมูลทางสถิติในตารางที่ 4.32 พบว่า ค่าเฉลี่ยความลึกของร่องที่ได้จากการวิจัยมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ค่าเฉลี่ยความลึกของร่องเท่ากับ 10 μm มากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยความลึกของร่องที่ 10.02 μm นอกจากนี้ระดับที่ได้จากการวิจัยยังสามารถลดความแปรปรวนของค่าความลึกของร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ โดยมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.131 และภาพที่ 4.25 เป็นการแสดงค่าความสามารถของกระบวนการ (Cpk) ของระดับที่ได้จากการวิจัย ซึ่งจะพบว่า ค่า Cpk มีค่ามากกว่าระดับปัจจุบัน โดยมีค่าเท่ากับ 5.69 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกระบวนการที่เพิ่มมากขึ้น อันจะนำไปสู่การลดอัตราการสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ โดยที่มิตมีความผิดพลาดจากสมการพยากรณ์ค่าเฉลี่ยความลึกของร่องที่ 10.35 เท่ากับ 3.3%

4.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อยืนยันผลของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของร่อง

ตารางที่ 4.33

ข้อมูลทางสถิติอัตราส่วนของร่องระหว่างระดับของกระบวนการปัจจุบันและการวิจัย

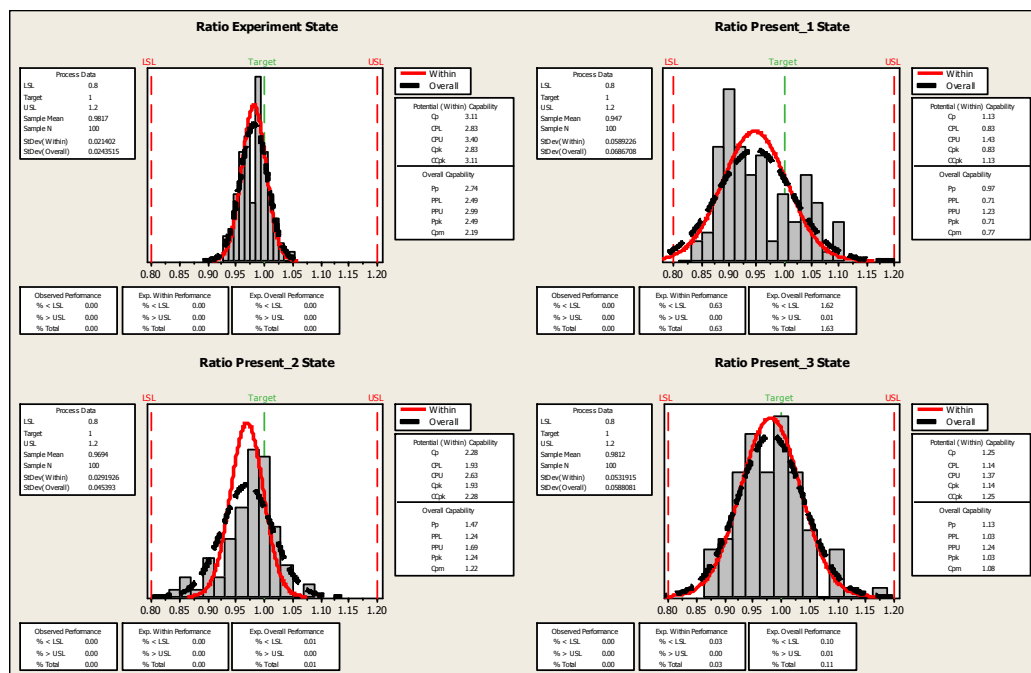
Condition		N	Mean	StDev	Cpk
ระดับจากการวิจัย	Experiment	100	0.981	0.0242	2.83
ระดับปัจจุบัน	Present_1	100	0.947	0.0685	0.83
	Present_2	100	0.969	0.0452	1.93
	Present_3	100	0.981	0.0586	1.14



ภาพที่ 4.25

ฮิสโตแกรมแสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องระหว่าง
ระดับที่ได้จากการวิจัยกับระดับที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

จากภาพที่ 4.25 แสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องระหว่างระดับที่ได้จากการวิจัยซึ่งเป็นสภาวะที่ดีที่สุดกับระดับที่ใช้อยู่ในปัจจุบันถูกวิเคราะห์เปรียบเทียบกันโดยฮิสโตแกรม



ภาพที่ 4.26

ฮีสโตแกรมแสดงค่าความสามารถของกระบวนการ (Cpk) อัตราส่วนของร่อง
ระหว่างระดับที่ได้จากการวิจัยกับระดับที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

ข้อมูลทางสถิติในตารางที่ 4.33 พบว่า ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องที่ได้จากการวิจัยมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องเท่ากับ 1 มากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องที่ 0.981 นอกจากนี้ระดับที่ได้จากการวิจัยยังสามารถลดความแปรปรวนของค่าอัตราส่วนของร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ โดยมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.0242 และภาพที่ 4.26 เป็นการแสดงค่าความสามารถของกระบวนการ (Cpk) ของระดับที่ได้จากการวิจัย ซึ่งจะพบว่า ค่า Cpk มีค่ามากกว่าระดับปัจจุบัน โดยมีค่าเท่ากับ 2.83 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกระบวนการที่เพิ่มมากขึ้น อันจะนำไปสู่การลดอัตราการสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ โดยที่มีความผิดพลาดจากสมการพยากรณ์ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของร่องที่ 0.972 เท่ากับ 0.9%