

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 2

ผลการทดลองของขนาดของชิ้นงานและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 2 โดยในการศึกษานี้ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียลแบบ 3^k เมื่อ k คือ จำนวนตัวแปรป้อนเข้าหรือในการทดลองนี้คือ ตัวแปรการตัด ซึ่งในการทดลองนี้มีตัวแปรการตัดอยู่ 2 ตัวแปรด้วยกันคือ ระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน Pulse-on Time (Ton) และแรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค Power of Discharge (P) ซึ่งผลของการทดลองได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของขนาดของชิ้นงานและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานของการตัดละเอียดครั้งที่ 2

ลำดับ การ ทดลอง	ตัวแปร ป้อนเข้า		Replicate 1		Replicate 2		Replicate 3	
	Ton (μ s)	P (V)	Ra. (μ m)	Dimension (mm.)	Ra. (μ m)	Dimension (mm.)	Ra. (μ m)	Dimension (mm.)
1	20	57	1.289	5.0145	1.314	5.0143	1.307	5.0147
2	18	53	1.146	5.0135	1.147	5.0129	1.155	5.0138
3	18	57	1.188	5.0139	1.194	5.0137	1.176	5.0133
4	20	53	1.240	5.0145	1.249	5.014	1.250	5.0138
5	19	57	1.232	5.0144	1.236	5.0146	1.228	5.0142
6	20	55	1.242	5.0125	1.264	5.0129	1.263	5.0132
7	19	53	1.213	5.0149	1.206	5.0151	1.199	5.0152
8	19	55	1.099	5.0112	1.019	5.0115	1.095	5.0119
9	18	55	1.224	5.0131	1.219	5.0122	1.228	5.0124

4.1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA)

การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงาน สามารถทำได้โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของการวิเคราะห์ตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อขนาดของชิ้นงาน แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 โดยในกรณีนี้พบว่า ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 93.56 % และ Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 90.70 % และจากผลการวิเคราะห์พบว่า ตัว

แปร ON (Pulse on Time), P (Power of Discharge) และ Interaction ON*P เป็นตัวแปรที่มีผลต่อขนาดของชิ้นงาน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรทั้งสามมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 โดยตัวแปร P มีอิทธิพลต่อขนาดของชิ้นงานมากที่สุดเนื่องจากมีค่า F-ratio สูงสุด

สำหรับผลของการวิเคราะห์ตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิว แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยในกรณีนี้พบว่าค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 95.50 % และ Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 93.49 % และจากผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปร ON (Pulse on Time), P (Power of Discharge) และ Interaction ON*P เป็นตัวแปรที่มีผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรทั้งสามมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 โดยในกรณีนี้ตัวแปร ON เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานมากที่สุด (มีค่า F-ratio สูงสุด)

ตารางที่ 4.2 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ขนาดของชิ้นงาน

Source of Variation	Degrees of freedom	Sum of Square	Adj Sum of Square	Adj Mean Square	F-ratio	p-value
Pulse on Time (ON)	2	0.0000019	0.0000019	0.0000009	8.44	0.003
Power of discharge (P)	2	0.0000208	0.0000208	0.0000104	92.90	<0.001
ON*P	4	0.0000066	0.0000066	0.0000016	14.75	<0.001
Error	18	0.0000020	0.0000020	0.0000001		
Total	26	0.0000313				

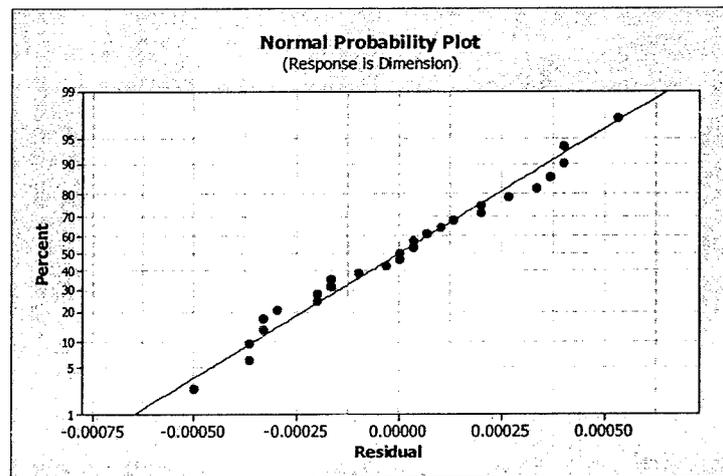
ตารางที่ 4.3 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ความหยาบผิว

Source of Variation	Degrees of freedom	Sum of Square	Adj Sum of Square	Adj Mean Square	F-ratio	p-value
Pulse on Time (ON)	2	0.050573	0.050573	0.025286	88.32	<0.001
Power of discharge (P)	2	0.015300	0.015300	0.007650	26.72	<0.001
ON*P	4	0.043368	0.043368	0.010842	37.87	<0.001
Error	18	0.005153	0.005153	0.000286		
Total	26	0.114395				

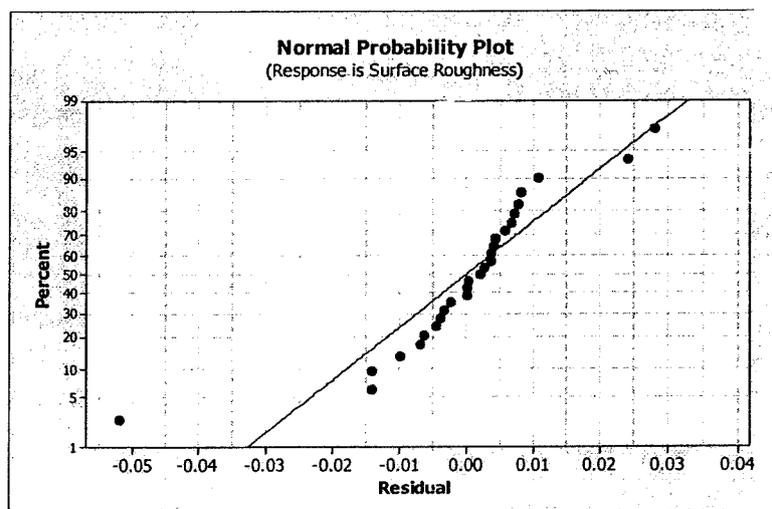
4.1.2 ตรวจสอบความถูกต้อง (Model adequacy checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักทางสถิติหรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ 2 ประเภท คือ

4.1.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) พล็อตลงบนกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper: NOPP) หากลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบจะตรงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ



รูปที่ 4.1 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าขนาดของชิ้นงาน



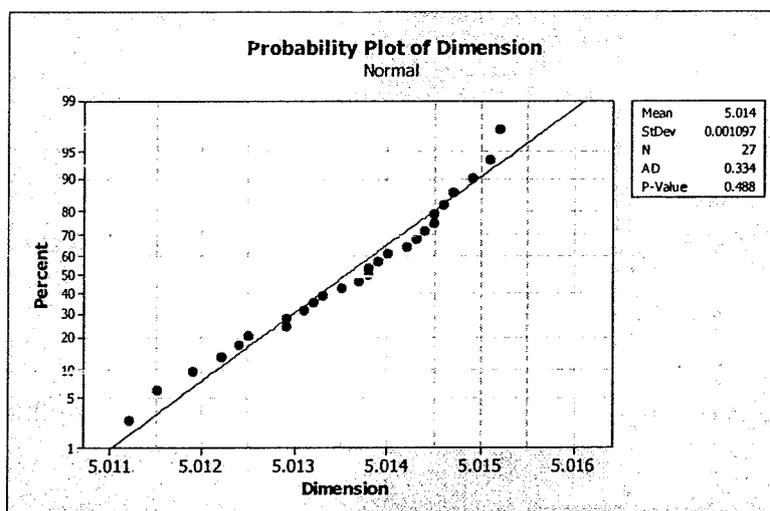
รูปที่ 4.2 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกค้างของค่าของความหยาบผิว

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกร้างของขนาดของชิ้นงานและความหนาผิว จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกร้างเกาะกลุ่มกันเป็นลักษณะไม่เป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบไม่ปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์อาจจะไม่สามารถเชื่อถือได้ โดยสามารถตรวจสอบความเป็น Normal ของขนาดของชิ้นงานและความหนาผิว ได้โดยวิธีการ Anderson-Darling

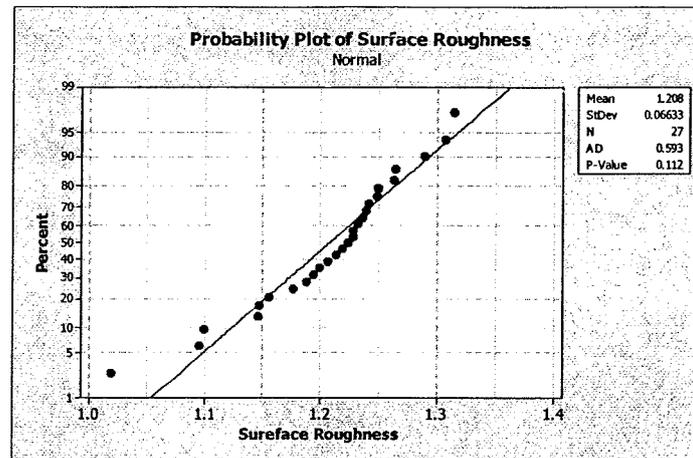
4.1.2.1.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกร้างจะใช้วิธี Anderson-Darling ในการตรวจสอบ โดยถ้าค่า P-value มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 นั้นหมายถึงส่วนตกร้างมีการแจกแจงแบบไม่ปกติ

จากรูปที่ 4.3 เป็นการทดสอบด้วยวิธี Anderson-Darling เพื่อตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของขนาดชิ้นงาน พบว่าค่า P-value ของการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.488 ซึ่งจะมีค่ามากกว่า 0.05 ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สรุปได้ว่าส่วนตกร้าง มีการแจกแจงแบบปกติ

จากรูปที่ 4.4 เป็นการทดสอบด้วยวิธี Anderson-Darling ของความหนาผิวของชิ้นงาน พบว่าค่า P-value ของการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.112 ซึ่งจะมีค่ามากกว่า 0.05 ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สรุปได้ว่าส่วนตกร้างมีการแจกแจงแบบปกติเช่นกัน



รูปที่ 4.3 การแจกแจงแบบปกติของขนาดชิ้นงาน ด้วยวิธี Anderson-Darling

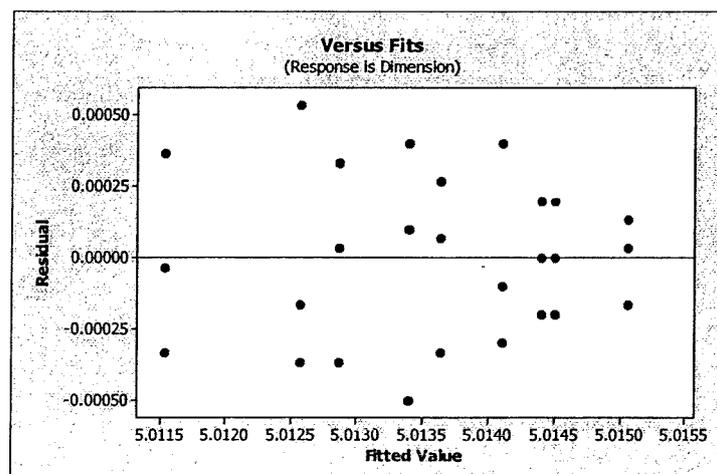


รูปที่ 4.4 การแจกแจงแบบปกติของความหยาบผิวของชิ้นงาน ด้วยวิธี Anderson-Darling

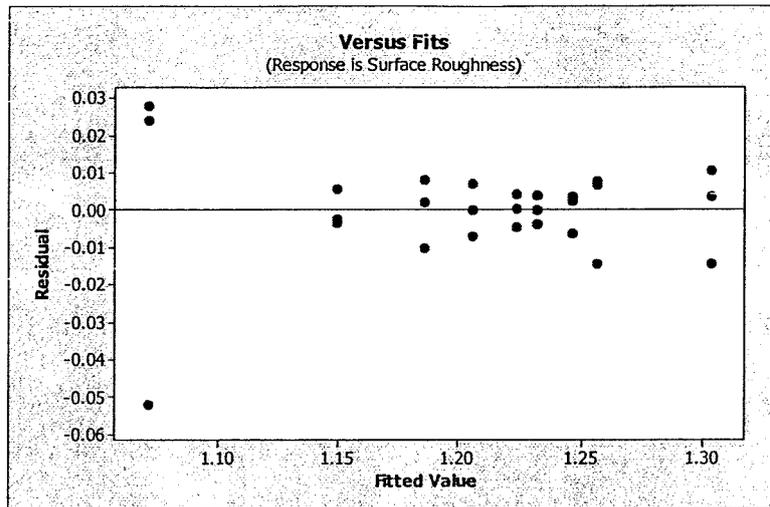
4.1.2.2 การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของส่วนตกค้าง โดยการใช้ค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ในที่นี้คือ ค่าของขนาดชิ้นงาน และความหยาบผิวของชิ้นงาน นำมาสร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted)

จากลักษณะของกราฟของขนาดชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.5 สรุปได้ว่า ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติมีความเป็นอิสระของข้อมูล ไม่มีแนวโน้มในลักษณะรูปแบบใดๆ และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

และจากลักษณะของกราฟของความหยาบผิวของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.6 ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ นั้นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์อาจจะไม่สามารถเชื่อถือได้ โดยสามารถตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของส่วนตกค้าง ด้วยวิธี Brown-Forsythe test



รูปที่ 4.5 ค่าส่วนตกค้างกับค่าของขนาดชิ้นงาน



รูปที่ 4.6 ค่าส่วนตกค้างกับค่าของความหยาบผิวของชิ้นงาน

4.1.2.2.1 การตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ด้วยวิธี Brown-Forsythe test

การตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ด้วยวิธี Brown-Forsythe test เป็นการคำนวณ ซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการพิจารณาจากกราฟ สามารถคำนวณ ได้ดังนี้

$$\text{จาก } t_{BF}^* = \frac{\bar{d}_1 - \bar{d}_2}{\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3}}} \quad (4.1)$$

$$S^2 = \frac{\sum (d_{i1} - \bar{d}_1)^2 + (\sum d_{i2} - \bar{d}_2)^2 + (\sum d_{i3} - \bar{d}_3)^2}{n - 2} \quad (4.2)$$

$$d_{i1} = |e_{i1} - \tilde{e}_1| \quad (4.3)$$

$$d_{i2} = |e_{i2} - \tilde{e}_2| \quad (4.4)$$

$$d_{i3} = |e_{i3} - \tilde{e}_3| \quad (4.5)$$

โดยที่

n_1, n_2, n_3 = จำนวนตัวอย่างจากกลุ่มที่ 1 และที่ 2 ตามลำดับ

e_{i1}, e_{i2}, e_{i3} = ส่วนตกค้างของตัวอย่างที่ i จากกลุ่มตัวอย่างที่ 1 และที่ 2

ตามลำดับ: $i = 1, 2$, และ 3

$\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \tilde{e}_3$ = ค่ามัธยฐาน (median) ของส่วนตกค้างของกลุ่มตัวอย่างที่ 1 และที่ 2

ตามลำดับ

n = จำนวนตัวอย่างทั้งหมด

วิธีการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

-แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม

-คำนวณหา d_{i1}, d_{i2}, d_{i3} โดยใช้สมการที่ 4.3, 4.4 และ 4.5

-คำนวณหาค่า $\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{d}_3$

ตารางที่ 4.4 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของขนาดชิ้นงานกลุ่มที่ 1

กลุ่มที่ 1			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - d_1$) ²
1	-0.01433333	0.01433333	0.00003512
2	-0.00333333	0.00333333	0.00002575
3	0.00200000	0.00200000	0.00004105
4	-0.00633333	0.00633333	0.00000430
5	0.00000000	0.00000000	0.00007068
6	-0.01433333	0.01433333	0.00003512
7	0.00700000	0.00700000	0.00000198
8	0.02800000	0.02800000	0.00038387
9	0.00033333	0.00033333	0.00006519
	Total	0.07566667	0.00066306
$\tilde{e}_1 = 0 \quad \bar{d}_1 = \frac{0.00216667}{9} = 0.00024074 \quad n_1 = 9$			

ตารางที่ 4.5 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของขนาดชิ้นงานกลุ่มที่ 2

กลุ่มที่ 2			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - d_1$) ²
1	-0.00020000	0.00016667	0.00000000
2	-0.00050000	0.00046667	0.00000009
3	0.00006667	0.00010000	0.00000000
4	-0.00010000	0.00006667	0.00000001
5	0.00020000	0.00023333	0.00000000
6	0.00003333	0.00006667	0.00000001
7	0.00003333	0.00006667	0.00000001
8	-0.00003333	0.00000000	0.00000003
9	-0.00036667	0.00033333	0.00000003
	Total	0.00150000	0.00000018
$\tilde{e}_1 = 0.0001333$ $\bar{d}_2 = \frac{0.00150}{9} = 0.00025556$ $n_1 = 9$			

ตารางที่ 4.6 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของขนาดชิ้นงานกลุ่มที่ 3

กลุ่มที่ 3			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - d_1$) ²
1	-0.00020000	0.00016667	0.00000000
2	-0.00050000	0.00046667	0.00000009
3	0.00006667	0.00010000	0.00000000
4	-0.00010000	0.00006667	0.00000001
5	0.00020000	0.00023333	0.00000000
6	0.00003333	0.00006667	0.00000001
7	0.00003333	0.00006667	0.00000001
8	-0.00003333	0.00000000	0.00000003
9	-0.00036667	0.00033333	0.00000003
	Total	0.00150000	0.00000018
$\tilde{e}_1 = 0.0001333$ $\bar{d}_3 = \frac{0.00230}{9} = 0.00025556$ $n_1 = 9$			

นำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 4.2

$$S^2 = \frac{0.00000065}{27-2}$$

$$S = 0.00016132$$

นำค่า S ไปแทนลงในสมการ 4.1

$$t_{BF}^* = \frac{0.00016667 - 0.00024074 - 0.00025556}{0.00016132 \sqrt{\frac{1}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9}}}$$

$$= 1.94850$$

จากการคำนวณค่าส่วนตกค้างของขนาดของชิ้นงานด้วยวิธี Brown-Forsythe test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.94850 จากตารางใน Percentiles of the t distribution ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ค่า $t_{(0.975,25)} = 2.060$ โดยถ้า $|t_{BF}^*| \leq 2.060$ ความแปรปรวนของส่วนตกค้างจะมีค่าคงที่ และถ้า $|t_{BF}^*| > 2.060$ ความแปรปรวนของส่วนตกค้างจะไม่เป็นค่าคงที่ ซึ่งจากการคำนวณได้ว่า $|t_{BF}^*| \leq 2.060$ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างของการทดลองนี้มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัว

ตารางที่ 4.7 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของความหยาบผิวกลุ่มที่ 1

กลุ่มที่ 1			
ลำดับที่	Residual (e_{ii})	(d_{ii})	($d_{ii} - d_1$) ²
1	-0.01433333	0.01433333	0.00003512
2	-0.00333333	0.00333333	0.00002575
3	0.00200000	0.00200000	0.00004105
4	-0.00633333	0.00633333	0.00000430
5	0.00000000	0.00000000	0.00007068
6	-0.01433333	0.01433333	0.00003512
7	0.00700000	0.00700000	0.00000198
8	0.02800000	0.02800000	0.00038387
9	0.00033333	0.00033333	0.00006519
	Total	0.07566667	0.00066306
$\bar{e}_1 = 0$ $\bar{d}_1 = \frac{0.07566667}{9} = 0.00840741$ $n_1 = 9$			

ตารางที่ 4.8 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของความหยาบผิวกลุ่มที่ 2

กลุ่มที่ 2			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - d_1$) ²
1	0.01066667	0.00800000	0.00002844
2	-0.00233333	0.00500000	0.00002426
3	0.00800000	0.00533333	0.00002109
4	0.00266667	0.00000000	0.00009852
5	0.00400000	0.00133333	0.00007383
6	0.00766667	0.00500000	0.00002426
7	0.00000000	0.00266667	0.00005270
8	-0.05200000	0.05466667	0.00200173
9	-0.00466667	0.00733333	0.00000672
	Total	0.08933333	0.00233157
$\tilde{e}_1 = 0.00266667$ $\bar{d}_2 = \frac{0.08933333}{9} = 0.00992593$ $n_1 = 9$			

ตารางที่ 4.9 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของความหยาบผิวกลุ่มที่ 3

กลุ่มที่ 3			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - d_1$) ²
1	0.00366667	0.00000000	0.00004153
2	0.00566667	0.00200000	0.00001975
3	-0.01000000	0.01366667	0.00005216
4	0.00366667	0.00000000	0.00004153
5	-0.00400000	0.00766667	0.00000149
6	0.00666667	0.00300000	0.00001186
7	-0.00700000	0.01066667	0.00001783
8	0.02400000	0.02033333	0.00019290
9	0.00433333	0.00066667	0.00003338
	Total	0.05800000	0.00041244
$\tilde{e}_1 = 0.00366667$ $\bar{d}_3 = \frac{0.05800000}{9} = 0.00644444$ $n_1 = 9$			

นำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 4.2

$$S^2 = \frac{0.00340708}{27-2}$$

$$S = 0.01167404$$

นำค่า S ไปแทนลงในสมการ 4.1

$$t_{BF}^* = \frac{0.00840741 - 0.00992593 - 0.00644444}{0.01167404 \sqrt{\frac{1}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9}}}$$

$$= 1.94850$$

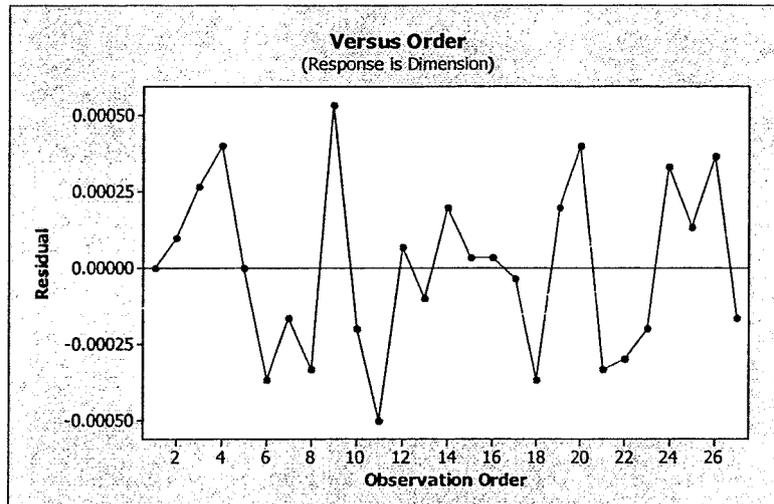
จากการตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวนของส่วนตกค้างที่มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของความหนาพิวของชิ้นงานด้วยวิธี Brown-Forsythe test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.18145 จากตารางใน Percentiles of the t distribution ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ค่า $t(0.975, 25) = 2.060$ ซึ่งจากการคำนวณได้ว่า $|t_{BF}^*| \leq 2.060$ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ความแปรปรวนของส่วนตกค้างของการทดลองนี้มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัว

4.1.2.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

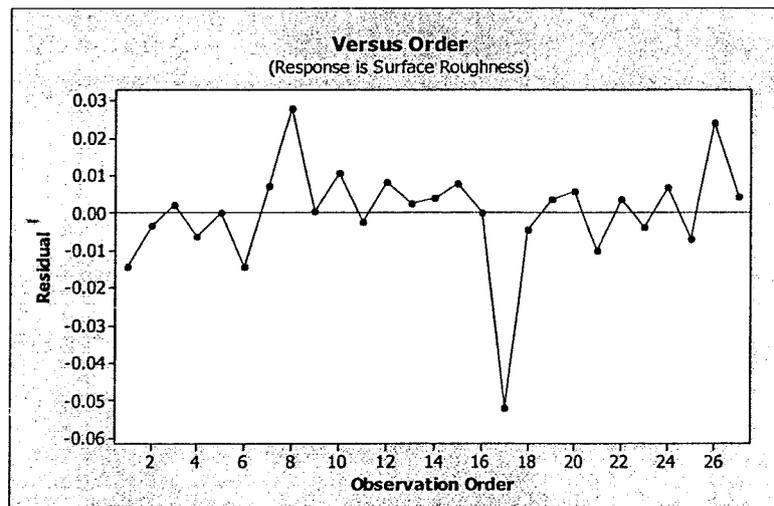
เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของส่วนตกค้าง โดยใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล มาทำการพล็อตกราฟค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน

จากรูปที่ 4.7 ค่าส่วนตกค้างของขนาดชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

จากรูปที่ 4.8 ค่าส่วนตกค้างของความหนาพิวของชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.7 ค่าส่วนตกค้างของขนาดชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3



รูปที่ 4.8 ค่าส่วนตกค้างของความหยาบผิวของชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3

4.1.2.3.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างโดยวิธี Durbin-Watson test

การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างอีกวิธีหนึ่งคือ วิธี Durbin-Watson test ซึ่งเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือสูงกว่าการพิจารณากราฟ เนื่องจากสามารถคำนวณค่าเป็นตัวเลขที่แน่นอนได้ โดยตั้งสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

$$H_0 : \rho = 0 \text{ ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระ}$$

$$H_a : \rho > 0 \text{ ส่วนตกค้างไม่มีความเป็นอิสระ}$$

สมการ Durbin-Watson test

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n 2(e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (4.6)$$

โดยที่

D = ค่า Durbin-Watson test

e_i = ส่วนตกค้างที่ลำดับการทดลองที่ i

ตารางที่ 4.10 การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของขนาดชิ้นงาน

ลำดับที่	Residual	$e_i - e_{i-1}$	$(e_i - e_{i-1})^2$	e_i^2
1	0.00000000	-	-	0.00000000
2	0.00010000	0.00010000	0.00000001	0.00000001
3	0.00026667	0.00016667	0.00000003	0.00000007
4	0.00040000	0.00013333	0.00000002	0.00000016
5	0.00000000	-0.00040000	0.00000016	0.00000000
6	-0.00036667	-0.00036667	0.00000013	0.00000013
7	-0.00016667	0.00020000	0.00000004	0.00000003
8	-0.00033333	-0.00016667	0.00000003	0.00000011
9	0.00053333	0.00086667	0.00000075	0.00000028
10	-0.00020000	-0.00073333	0.00000054	0.00000004
11	-0.00050000	-0.00030000	0.00000009	0.00000025
12	0.00006667	0.00056667	0.00000032	0.00000000
13	-0.00010000	-0.00016667	0.00000003	0.00000001
14	0.00020000	0.00030000	0.00000009	0.00000004
15	0.00003333	-0.00016667	0.00000003	0.00000000
16	0.00003333	0.00000000	0.00000000	0.00000000
17	-0.00003333	-0.00006667	0.00000000	0.00000000

ตารางที่ 4.10 (ต่อ) การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของขนาดชิ้นงาน

ลำดับที่	Residual	$e_t - e_{t-1}$	$(e_t - e_{t-1})^2$	e_t^2
18	-0.00036667	-0.00033333	0.00000011	0.00000013
19	0.00020000	0.00056667	0.00000032	0.00000004
20	0.00040000	0.00020000	0.00000004	0.00000016
21	-0.00033333	-0.00073333	0.00000054	0.00000011
22	-0.00030000	0.00003333	0.00000000	0.00000009
23	-0.00020000	0.00010000	0.00000001	0.00000004
24	0.00033333	0.00053333	0.00000028	0.00000011
25	0.00013333	-0.00020000	0.00000004	0.00000002
26	0.00036667	0.00023333	0.00000005	0.00000013
27	-0.00016667	-0.00053333	0.00000028	0.00000003
	Total		0.00000395	0.00000201

แทนค่าในสมการ 4.6

$$D = \frac{0.00000395}{0.00000201}$$

$$D = 1.9630$$

จากการคำนวณความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของขนาดของชิ้นงานด้วยวิธีของ Durbin-Watson test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.9630 จากตาราง Durbin-Watson ที่ $n = 27$, $k = 3$ ได้ค่า $d_L = 1.162$, $d_U = 1.651$ โดยถ้า $D > d_U$ จะยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0), ถ้า $D < d_L$ จะยอมรับสมมติฐานรอง (H_a), และถ้า $d_L < D < d_U$ จะไม่สามารถทำการสรุปผลได้ ซึ่งค่า D ที่ได้จากการทดลองนี้มีค่ามากกว่า d_U จึงยอมรับสมมติฐานหลัก นั่นคือส่วนตกค้างสำหรับการทดลองขนาดของชิ้นงานมีความเป็นอิสระต่อกัน

ตารางที่ 4.11 การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของความหยาบผิว

ลำดับที่	Residual	$e_i - e_{i-1}$	$(e_i - e_{i-1})^2$	e_i^2
1	-0.01433333	-	-	0.00020544
2	-0.00333333	0.01100000	0.00012100	0.00001111
3	0.00200000	0.00533333	0.00002844	0.00000400
4	-0.00633333	-0.00833333	0.00006944	0.00004011
5	0.00000000	0.00633333	0.00004011	0.00000000
6	-0.01433333	-0.01433333	0.00020544	0.00020544
7	0.00700000	0.02133333	0.00045511	0.00004900
8	0.02800000	0.02100000	0.00044100	0.00078400
9	0.00033333	-0.02766667	0.00076544	0.00000011
10	0.01066667	0.01033333	0.00010678	0.00011378
11	-0.00233333	-0.01300000	0.00016900	0.00000544
12	0.00800000	0.01033333	0.00010678	0.00006400
13	0.00266667	-0.00533333	0.00002844	0.00000711
14	0.00400000	0.00133333	0.00000178	0.00001600
15	0.00766667	0.00366667	0.00001344	0.00005878
16	0.00000000	-0.00766667	0.00005878	0.00000000
17	-0.05200000	-0.05200000	0.00270400	0.00270400
18	-0.00466667	0.04733333	0.00224044	0.00002178
19	0.00366667	0.00833333	0.00006944	0.00001344
20	0.00566667	0.00200000	0.00000400	0.00003211
21	-0.01000000	-0.01566667	0.00024544	0.00010000
22	0.00366667	0.01366667	0.00018678	0.00001344
23	-0.00400000	-0.00766667	0.00005878	0.00001600
24	0.00666667	0.01066667	0.00011378	0.00004444
25	-0.00700000	-0.01366667	0.00018678	0.00004900
26	0.02400000	0.03100000	0.00096100	0.00057600
27	0.00433333	-0.01966667	0.00038678	0.00001878
	Total		0.00976822	0.00515333

แทนค่าในสมการ 4.6

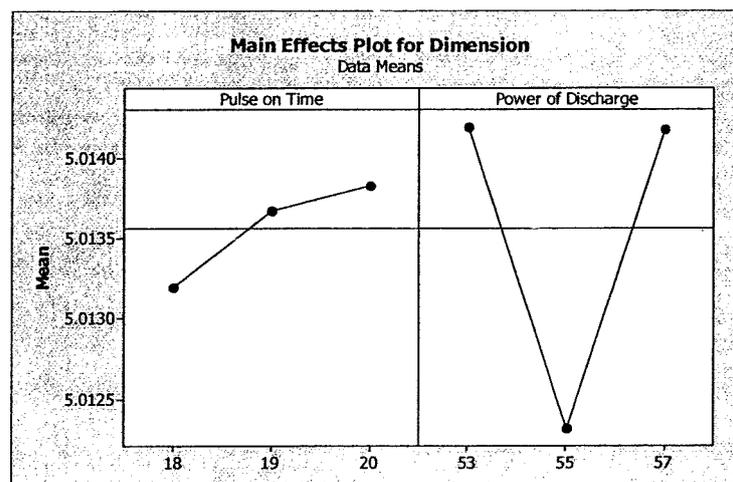
$$D = \frac{0.00976822}{0.00515333}$$

$$D = 1.89551530$$

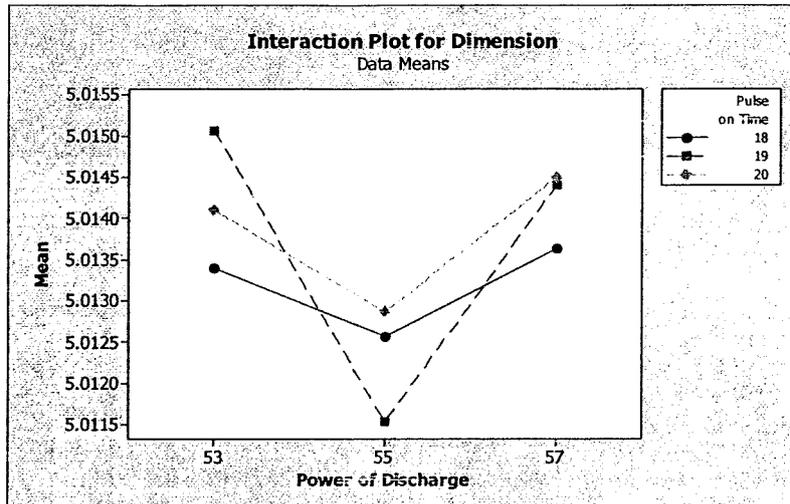
และการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของความหยาบผิวของชิ้นงานด้วยวิธีของ Durbin-Watson test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.89552 จากตาราง Durbin-Watson ที่ $n = 27$, $k = 3$ ได้ค่า $d_L = 1.162$, $d_U = 1.651$ ซึ่งค่า D ที่ได้จากการทดลองนี้มีค่ามากกว่า D_U จึงยอมรับสมมติฐานหลัก นั่นคือส่วนตกค้างสำหรับการทดลองความหยาบผิวของชิ้นงานมีความเป็นอิสระต่อกัน จากการตรวจสอบตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานของ ANOVA ทั้งสามข้อ ไม่พบการละเมิดสมมติฐานข้อใด การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลองด้วยวิธี ANOVA จึงมีความเชื่อถือได้

4.2 การวิเคราะห์อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม

จากราฟอิทธิพลหลักของขนาดชิ้นงานเทียบกับตัวแปรการตัดดังแสดงในรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรการตัดทั้งสองมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดของชิ้นงาน แต่จากตารางที่ 2 พบว่าอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่าง ON และ P มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดของชิ้นงาน ดังนั้นการเลือกเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมจึงต้องพิจารณาจากกราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปรการตัดทั้งสองนี้ และเมื่อพิจารณาจากกราฟอิทธิพลร่วมของขนาดชิ้นงานเทียบกับตัวแปรการตัด ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ของระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน (Pulse on Time) และ แรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค (Power of Discharge) ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าของระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน ที่ $19 \mu s$ และค่าของแรงดันไฟฟ้าในการสปาร์คที่ $55 V$ จะให้ขนาดของชิ้นงานที่ได้จะมีขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุด

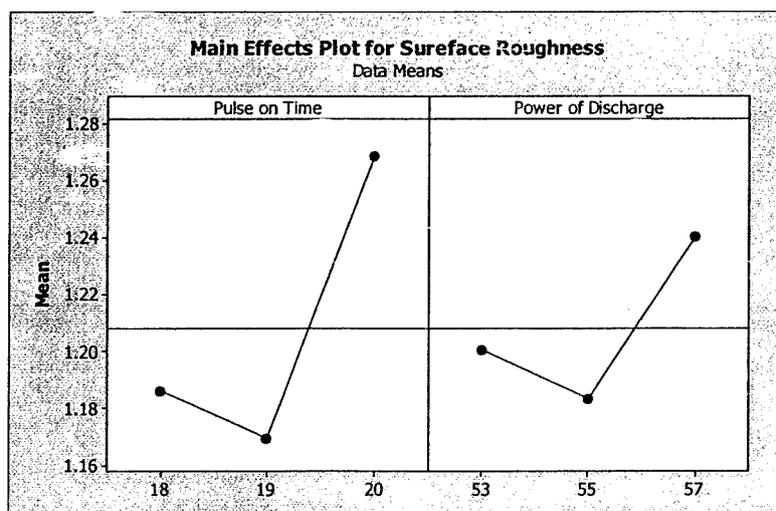


รูปที่ 4.9 กราฟอิทธิพลหลักของขนาดชิ้นงานเทียบกับตัวแปรการตัด

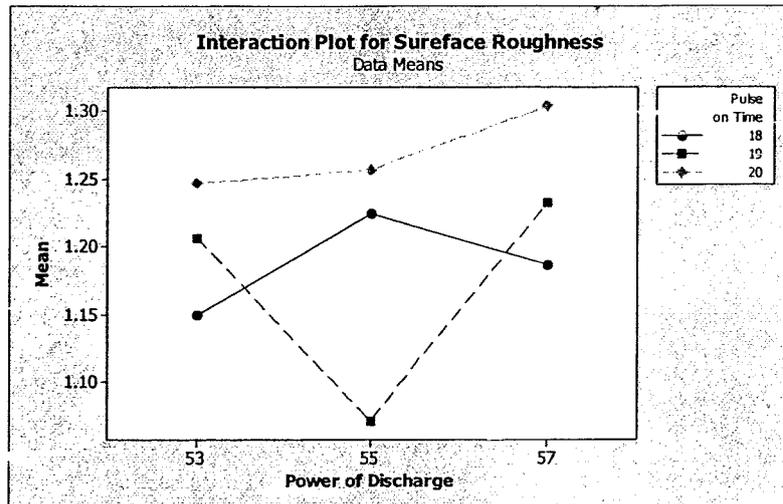


รูปที่ 4.10 กราฟอิทธิพลร่วมของขนาดชิ้นงานเทียบกับตัวแปรการตัด

จากกราฟอิทธิพลหลักของความหยาบผิวเทียบกับตัวแปรการตัดดังแสดงในรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรการตัดทั้งสองมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิว แต่จากตารางที่ 3 พบว่าอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่าง ON และ P มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหยาบผิว ดังนั้นการเลือกเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมจึงต้องพิจารณาจากกราฟอิทธิพลร่วมของตัวแปรการตัดทั้งสองนี้ และเมื่อพิจารณาจากกราฟอิทธิพลร่วมของความหยาบผิวเทียบกับตัวแปรการตัด ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ของระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน (Pulse on Time) และ แรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค (Power of Discharge) ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่า ค่าของระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน ที่ 19 μ s และค่าของแรงดันไฟฟ้าในการสปาร์คที่ 55 V จะให้ความหยาบผิวที่ได้จะมีค่าที่น้อยที่สุด



รูปที่ 4.11 กราฟอิทธิพลหลักของความหยาบผิวเทียบกับตัวแปรการตัด



รูปที่ 4.12 กราฟอิทธิพลร่วมของความหยาบผิวเทียบกับตัวแปรการตัด

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขของการตัดที่ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด และให้ขนาดของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุดของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 2 ซึ่งมีเป้าหมายในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 สำหรับการศึกษานี้คือ

1. ขนาดของชิ้นงาน เท่ากับ 5.010 ± 0.002 mm.
2. ความหยาบผิวของชิ้นงานที่น้อยที่สุด

เมื่อใช้เงื่อนไขในการตัดที่ได้จากการศึกษารอบนี้ที่ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด และให้ขนาดของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุด คือ ระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน (ON) ที่ $19 \mu\text{s}$ และแรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค (P) ที่ 55 V ไปทำการตัดชิ้นงานเพื่อยืนยันผลการศึกษา ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.12 และผลจากการทดสอบในการศึกษานี้พบว่าค่าความหยาบผิว และขนาดของชิ้นงานมีค่าที่สอดคล้องกับค่าพิสัยความเผื่อ (Tolerance) ตามที่ได้กำหนดไว้

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงาน

No.	Dimension (mm.)	Roughness ($\mu\text{m.}$)
1	5.0110	1.0240
2	5.0113	0.9840
3	5.0104	0.9920
4	5.0105	1.0770
5	5.0109	1.0000
6	5.0106	0.9210
7	5.0112	1.0570
8	5.0100	1.0590
9	5.0099	1.0650
10	5.0108	1.0470

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 3

ผลการทดลองของขนาดของชิ้นงานและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 3 โดยในการศึกษานี้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ โดยการใช้ตัวแบบการทดลองของ Box-Behnken Design ซึ่งในการทดลองนี้มีตัวแปรการตัดอยู่ 3 ตัวแปรด้วยกันคือ ความเร็วในการตัดชิ้นงาน (Cutting Speed: CS) กระแสที่ใช้ในการตัด (Current: IP) และ ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (Path Correction: Offset) ซึ่งผลของการทดลองได้แสดงในตาราง ที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองของขนาดของชิ้นงานและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานของการตัด
ละเอียดครั้งที่ 3

ลำดับ การ ทดลอง	ตัวแปรป้อนเข้า			Replicate 1		Replicate 2		Replicate 3	
	CS (mm/min.)	IP (A)	Offset (μm .)	Ra. (μm)	Dimension (mm.)	Ra. (μm)	Dimension (mm.)	Ra. (μm)	Dimension (mm.)
1	3.5	3	780	0.768	5.0032	0.734	5.0031	0.718	5.0026
2	3.5	1	780	0.199	5.0022	0.249	5.0021	0.247	5.0018
3	4.5	3	770	0.593	5.0006	0.719	5.0009	0.730	4.9995
4	5.5	2	790	0.190	5.0029	0.199	5.0032	0.206	5.0021
5	5.5	2	770	0.198	5.0005	0.205	4.9998	0.189	4.9991
6	4.5	3	790	0.725	5.0033	0.746	5.0043	0.747	5.0041
7	4.5	1	770	0.176	5.0006	0.173	5.0005	0.178	4.9997
8	3.5	2	790	0.244	5.0037	0.253	5.0026	0.250	5.0025
9	4.5	2	780	0.199	5.0011	0.195	5.0003	0.192	5.0005
10	4.5	2	780	0.195	5.001	0.190	5.0004	0.198	5.0006
11	5.5	3	780	0.676	5.0038	0.657	5.0023	0.670	5.0028
12	4.5	2	780	0.225	5.0012	0.227	5.0013	0.235	5.0009
13	5.5	1	780	0.242	5.0016	0.227	5.0015	0.237	5.0017
14	3.5	2	770	0.221	4.9996	0.224	5.0003	0.228	4.9994
15	4.5	1	790	0.207	5.0029	0.189	5.0033	0.199	5.0036

4.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA)

การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงาน สามารถทำได้โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของการวิเคราะห์ตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อขนาดของชิ้นงาน แสดงไว้ในตารางที่ 4.14 และตารางที่ 4.15 โดยในกรณีนี้พบว่า ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 89.85% และ Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 87.24% และจากผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปร กระแสที่ใช้ในการตัด (IP) ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (Offset) และ Interaction ของ CS*CS และ IP*IP เป็นตัวแปรที่มีผลต่อขนาดของชิ้นงาน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรทั้งสี่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05

สำหรับผลของการวิเคราะห์ตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิว แสดงไว้ในตารางที่ 4.16 และตารางที่ 4.17 โดยในกรณีนี้พบว่าค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 99.36% และ Adjusted

R^2 มีค่าเท่ากับ 99.19% และจากผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปร ความเร็วในการตัดชิ้นงาน (CS) กระแสที่ใช้ในการตัด (IP) ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (Offset) และ Interaction ของ CS*IP และ IP*IP เป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากตัวแปรทั้งห้ามีค่า P-value น้อยกว่า 0.05

ตารางที่ 4.14 Estimated Regression Coefficients ของขนาดของชิ้นงาน

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	5.00081	0.000169	29622.71	0.000
CS	-0.00008	0.000103	-0.725	0.473
IP	0.00037	0.000103	3.627	0.001
Offset	0.00158	0.000103	15.316	0.000
CS*CS	0.00047	0.000152	3.112	0.004
IP*IP	0.00111	0.000152	7.274	0.000
Offset*Offset	0.00002	0.000152	0.155	0.878
CS*IP	0.00011	0.000146	0.741	0.464
CS*Offset	-0.00006	0.000146	-0.399	0.692
IP*Offset	0.00014	0.000146	0.969	0.339

ตารางที่ 4.15 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ขนาดของชิ้นงาน

Source of Variation	Degrees of freedom	Sum of Square	Adj Sum of Square	Adj Mean Square	F-ratio	p-value
Regression	9	0.000079	0.000079	0.000009	34.41	0.000
Linear	3	0.000064	0.000064	0.000021	82.75	0.000
Square	3	0.000015	0.000015	0.000005	19.94	0.000
Interaction	3	0.000000	0.000000	0.000000	0.55	0.652
Residual Error	35	0.000009	0.000009	0.000000		
Lack-of-Fit	3	0.000001	0.000001	0.000000	1.44	0.249
Pure Error	32	0.000008	0.000008	0.000000		
Total	44					

ตารางที่ 4.16 Estimated Regression Coefficients ของความหยาบผิว

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.206222	0.006802	30.318	0.000
CS	-0.018292	0.004165	-4.391	0.000
IP	0.252708	0.004165	60.67	0.000
Offset	0.009	0.004165	2.161	0.038
CS*CS	0.011222	0.006131	1.83	0.076
IP*IP	0.251222	0.006131	40.975	0.000
Offset*Offset	-0.000194	0.006131	-0.032	0.975
CS*IP	-0.019	0.005891	-3.225	0.003
CS*Offset	-0.005917	0.005891	-1.004	0.322
IP*Offset	0.00025	0.005891	0.042	0.960

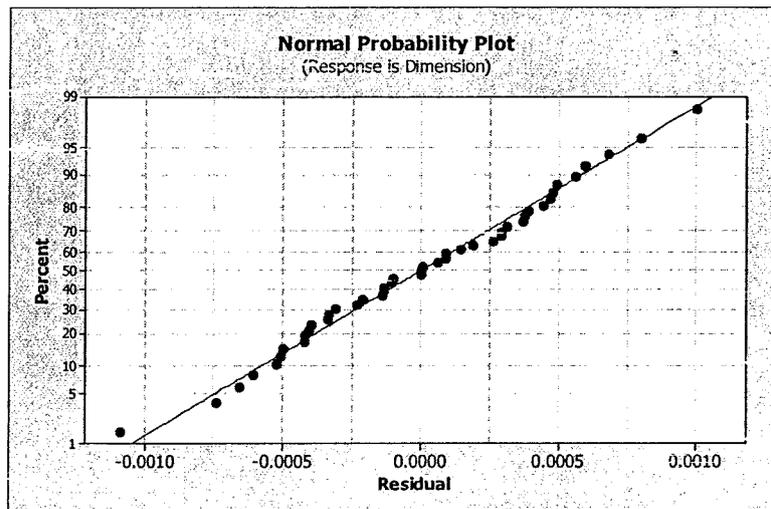
ตารางที่ 4.17 ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ความหยาบผิว

Source of Variation	Degrees of freedom	Sum of Square	Adj Sum of Square	Adj Mean Square	F-ratio	p-value
Regression	9	2.251250	2.251250	0.250138	600.720	0.000
Linear	3	1.542650	1.542650	0.514217	1234.930	0.000
Square	3	0.703840	0.703840	0.234614	563.440	0.000
Interaction	3	0.004750	0.004750	0.001584	3.800	0.018
Residual Error	35	0.014570	0.014570	0.000416		
Lack-of-Fit	3	0.007580	0.007580	0.002525	11.550	0.000
Pure Error	32	0.007000	0.007000	0.000219		
Total	44	2.265820				

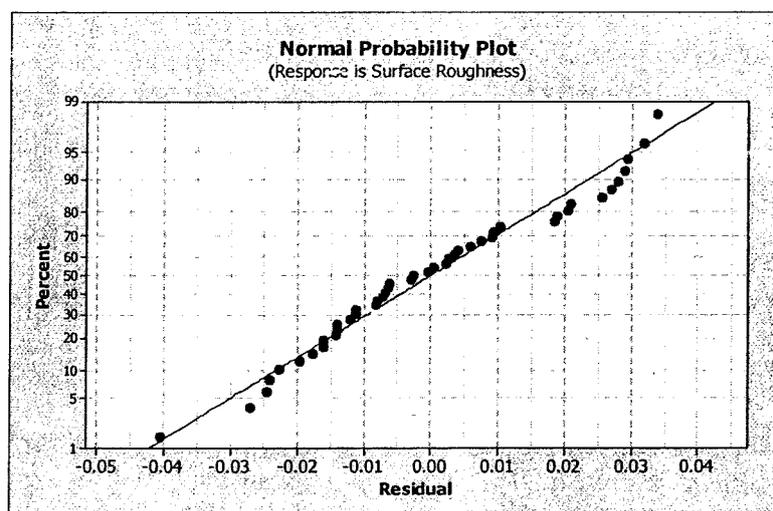
4.3.2 การตรวจสอบความถูกต้อง (Model adequacy checking)

4.2.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) พล็อตลงบนกราฟทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Paper: NOPP) หากลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเกือบจะตรงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 เป็นรูปกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) สำหรับค่าส่วนตกล้างของขนาดของชิ้นงานและความหยาบผิว ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าส่วนตกล้างเกาะกลุ่มกันเป็นลักษณะเกือบจะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปกติ นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์สามารถเชื่อถือได้ และสามารถตรวจสอบความเป็น Normal ของขนาดของชิ้นงานและความหยาบผิวเชิงตัวเลข ได้โดยใช้วิธีการ Anderson-Darling เพื่อยืนยันการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบว่าเป็นการแจกแจงปกติ



รูปที่ 4.13 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกล้างของค่าขนาดของชิ้นงาน

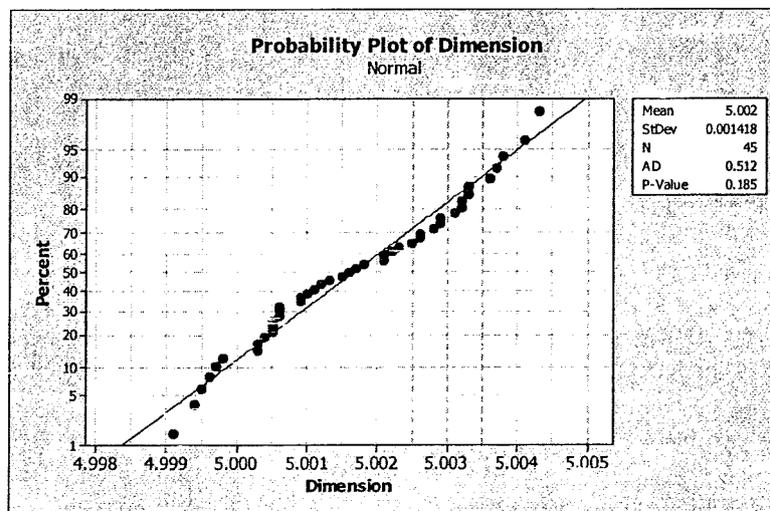


รูปที่ 4.14 การแจกแจงแบบปกติสำหรับค่าส่วนตกล้างของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

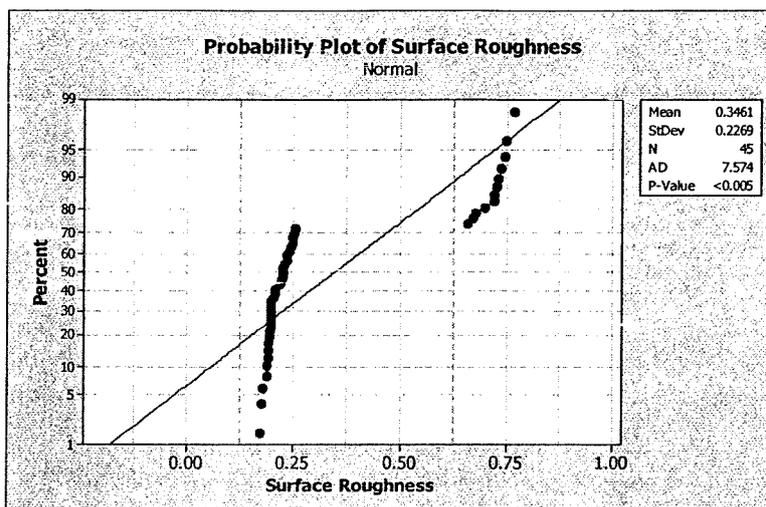
4.3.2.1.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกล้า้งจะใช้วิธี Anderson-Darling ในการตรวจสอบ โดยถ้าค่า P-value มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 นั้นหมายถึงส่วนตกล้า้งมีการแจกแจงแบบไม่ปกติ

จากการทดสอบด้วยวิธี Anderson-Darling เพื่อตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของขนาดชิ้นงาน พบว่าค่า P-value ของการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.185 ซึ่งจะมีค่ามากกว่า 0.05 ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สรุปได้ว่าส่วนตกล้า้ง มีการแจกแจงแบบปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.15

และจากการทดสอบด้วยวิธี Anderson-Darling ของความหนาผิวของชิ้นงาน พบว่าค่า P-value ของการทดสอบมีค่าน้อยกว่า 0.005 ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 สรุปได้ว่าส่วนตกล้า้ง แสดงว่าส่วนตกล้า้งที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบไม่ปกติ นั้นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์อาจจะไม่สามารถเชื่อถือได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 การแจกแจงแบบปกติของค่าความหนาผิว ด้วยวิธี Anderson-Darling



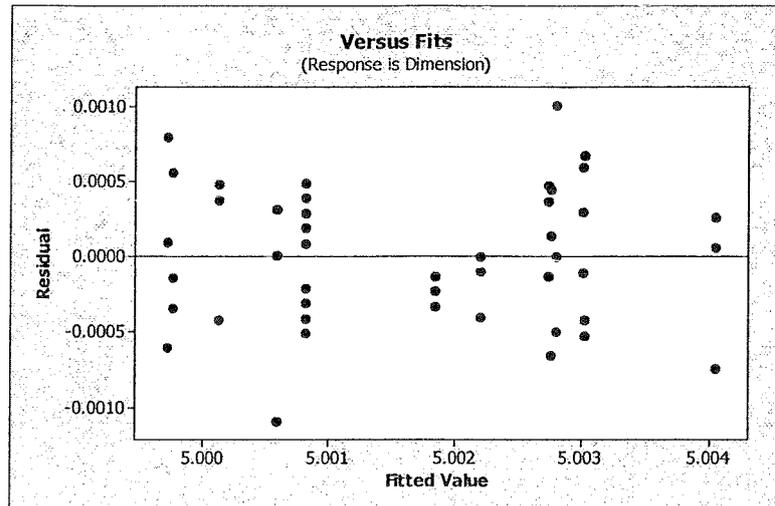
รูปที่ 4.16 การแจกแจงแบบปกติของขนาดชิ้นงาน ด้วยวิธี Anderson-Darling

4.3.2.2 การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

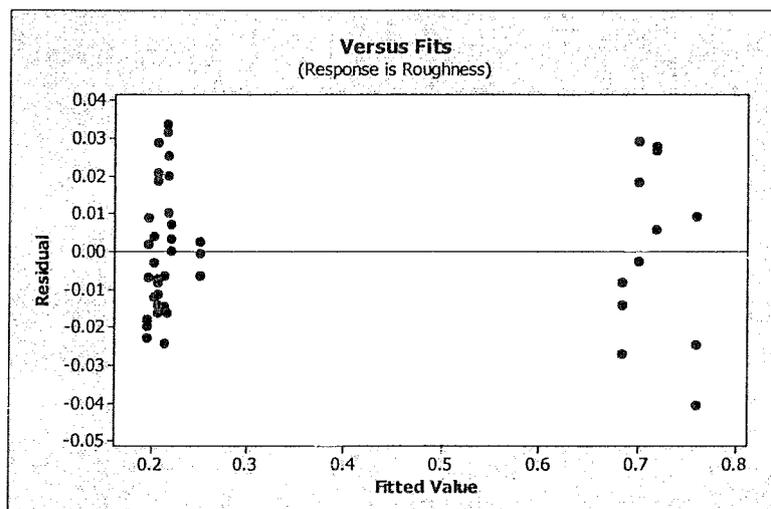
การตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของส่วนตกค้าง โดยการใช้อัตราส่วนค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต (Fitted) ในที่นี้คือค่าขนาดของชิ้นงาน และค่าความหยาบผิวของชิ้นงานนำมาสร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted)

จากลักษณะของกราฟค่าขนาดของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.17 สรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติมีความเป็นอิสระของข้อมูลไม่มีแนวโน้มในลักษณะรูปแบบใดๆ และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

จากลักษณะของกราฟค่าของความหยาบผิวของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่า ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบไม่เป็นปกติ ส่วนตกค้างมีการเกาะกลุ่มกันและไม่มีการกระจายตัวของส่วนตกค้าง นั่นหมายถึงข้อมูลการวิเคราะห์อาจจะไม่สามารถเชื่อถือได้ โดยสามารถตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน ด้วยวิธี Brown-Forsythe Test



รูปที่ 4.17 ค่าส่วนตกค้างกับขนาดของชิ้นงาน



รูปที่ 4.18 ค่าส่วนตกค้างกับความหยาบผิวของชิ้นงาน

4.3.1.2.1 การตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ด้วยวิธี Brown-Forsythe test เป็นการคำนวณ ซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการพิจารณาจากกราฟ ในการศึกษาี้ ใช้การตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างด้วยวิธี Brown-Forsythe test ในการตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างของขนาดชิ้นงานและความหยาบผิวของชิ้นงาน สามารถคำนวณได้ดังนี้

วิธีการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1

-แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม

-คำนวณหา d_{i1} , d_{i2} d_{i3} โดยใช้สมการที่ 4.3, 4.4 และ 4.5

-คำนวณหาค่า $\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{d}_3$

ตารางที่ 4.18 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของขนาดชิ้นงานกลุ่มที่ 1

กลุ่มที่ 1			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	$(d_{i1} - d_1)^2$
1	0.0004667	0.00027778	0.00000000
2	0.0000000	0.00018889	0.00000002
3	0.0000083	0.00018056	0.00000003
4	0.0001417	0.00004722	0.00000009
5	0.0007917	0.00060278	0.00000007
6	-0.0007417	0.00093056	0.00000034
7	0.0004750	0.00028611	0.00000000
8	0.0006750	0.00048611	0.00000002
9	0.0002889	0.00010000	0.00000006
10	0.0001889	0.00000000	0.00000012
11	0.0010000	0.00081111	0.00000022
12	0.0003889	0.00020000	0.00000002
13	-0.0002333	0.00042222	0.00000001
14	-0.0001417	0.00033056	0.00000000
15	-0.0001083	0.00029722	0.00000000
	Total	0.00516111	0.00000100
$\bar{e}_1 = 0.00018889 \quad \bar{d}_1 = \frac{0.00516111}{15} = 0.00034407 \quad n_1 = 15$			

ตารางที่ 4.19 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของขนาดชิ้นงานกลุ่มที่ 2

กลุ่มที่ 2			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - d_1$) ²
1	0.0003667	0.00010833	0.00000002
2	-0.0001000	0.00035833	0.00000000
3	0.0003083	0.00005000	0.00000008
4	0.0004417	0.00018333	0.00000002
5	0.0000917	0.00016667	0.00000003
6	0.0002583	0.00000000	0.00000011
7	0.0003750	0.00011667	0.00000005
8	-0.0004250	0.00068333	0.00000012
9	-0.0005111	0.00076944	0.00000019
10	-0.0004111	0.00066944	0.00000011
11	-0.0005000	0.00075833	0.00000018
12	0.0004889	0.00023056	0.00000001
13	-0.0003333	0.00059167	0.00000007
14	0.0005583	0.00030000	0.00000000
15	0.0002917	0.00003333	0.00000009
	Total	0.00501944	0.00000109
$\bar{e}_1 = 0.00025833 \quad \bar{d}_2 = \frac{0.00501944}{15} = 0.00033463 \quad n_1 = 15$			

ตารางที่ 4.20 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของขนาดชิ้นงานกลุ่มที่ 3

กลุ่มที่ 3			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - d_1$) ²
1	-0.0001333	0.00020833	0.00000000
2	-0.0004000	0.00005833	0.00000003
3	-0.0010917	0.00075000	0.00000027
4	-0.0006583	0.00031667	0.00000001
5	-0.0006083	0.00026667	0.00000000
6	0.0000583	0.00040000	0.00000003
7	-0.0004250	0.00008333	0.00000002
8	-0.0005250	0.00018333	0.00000000
9	-0.0003111	0.00003056	0.00000004
10	-0.0002111	0.00013056	0.00000001
11	0.0000000	0.00034167	0.00000001
12	0.0000889	0.00043056	0.00000004
13	-0.0001333	0.00020833	0.00000000
14	-0.0034167	0.00310556	0.00000510
15	0.0059167	0.00622778	0.00002895
	Total	0.01271111	0.00003901
$\tilde{e}_1 = 0.00034167 \quad \bar{d}_3 = \frac{0.01271111}{15} = 0.00084741 \quad n_1 = 15$			

นำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 4.2

$$\tilde{e}_1 = \frac{0.00000006}{45-2}$$

$$s = 0.00024743$$

นำค่า s ไปแทนลงในสมการ 4.1

$$t_{BF}^* = \frac{0.00034407 - 0.00033463 - 0.00023178}{0.00024743 \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{1}{15} + \frac{1}{15}}}$$

$$= 2.00927$$

จากการตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวนของส่วนตกค้างที่มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัว ของขนาดของชิ้นงานด้วยวิธี Brown-Forsythe test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 2.00927 จากตารางใน Percentiles of the t distribution ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ค่า $t(0.975,45) = 2.018$ ซึ่งจากการคำนวณได้ว่า $|t_{BF}^*| \leq 2.018$ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ความแปรปรวนของส่วนตกค้างของการทดลองนี้มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัว

ตารางที่ 4.21 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของความหยาบผิวของชิ้นงานกลุ่มที่ 1

กลุ่มที่ 1			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - d_1$) ²
1	0.0093333	0.01562500	0.00003950
2	-0.0162500	0.00995833	0.00000038
3	-0.0027083	0.00358333	0.00003314
4	-0.0120417	0.00575000	0.00001289
5	0.0021250	0.00841667	0.00000085
6	0.0057917	0.01208333	0.00000753
7	-0.0197917	0.01350000	0.00001731
8	-0.0064583	0.00016667	0.00008415
9	-0.0072222	0.00093056	0.00007072
10	-0.0112222	0.00493056	0.00001944
11	-0.0080833	0.00179167	0.00005697
12	0.0187778	0.02506944	0.00024742
13	0.0253333	0.03162500	0.00049663
14	0.0003750	0.00666667	0.00000715
15	-0.0062917	0.00000000	0.00008723
	Total	0.14009722	0.00118130
$\bar{e}_1 = -0.00629167$ $\bar{d}_1 = \frac{0.14009722}{15} = 0.00933981$ $n_1 = 15$			

ตารางที่ 4.22 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของความหยาบผิวของชิ้นงานกลุ่มที่ 2

กลุ่มที่ 2			
ลำดับที่	Residual (e_{i1})	(d_{i1})	($d_{i1} - d_1$) ²
1	-0.0246667	0.02720833	0.00060844
2	0.0337500	0.03120833	0.00020805
3	0.0182917	0.01575000	0.00000107
4	-0.0030417	0.00558333	0.00012546
5	0.0091250	0.00658333	0.00010406
6	0.0267917	0.02425000	0.00005574
7	-0.0227917	0.02533333	0.00007309
8	0.0025417	0.00000000	0.00028171
9	-0.0112222	0.01376389	0.00000912
10	-0.0162222	0.01876389	0.00000392
11	-0.0270833	0.02962500	0.00016488
12	0.0207778	0.01823611	0.00000211
13	0.0103333	0.00779167	0.00008087
14	0.0033750	0.00083333	0.00025443
15	-0.0242917	0.02683333	0.00010098
	Total	0.25176389	0.00207394
$\bar{e}_1 = 0.00254167 \cdot \bar{d}_2 = \frac{0.25176389}{15} = 0.01678426 \quad n_1 = 15$			

ตารางที่ 4.23 การคำนวณด้วยวิธี Brown-Forsythe test ของความหยาบผิวของชิ้นงานกลุ่มที่ 3

กลุ่มที่ 3			
ลำดับที่	Residual (e_{ii})	(d_{ii})	($d_{ii} - d_1$) ²
1	-0.0406667	0.04020833	0.00050683
2	0.0317500	0.03220833	0.00021063
3	0.0292917	0.02975000	0.00014531
4	0.0039583	0.00441667	0.00017632
5	-0.0068750	0.00641667	0.00012721
6	0.0277917	0.02825000	0.00011140
7	-0.0177917	0.01733333	0.00000013
8	-0.0004583	0.00000000	0.00031313
9	-0.0142222	0.01376389	0.00001546
10	-0.0082222	0.00776389	0.00009863
11	-0.0140833	0.01362500	0.00001657
12	0.0287778	0.02923611	0.00013319
13	0.0203333	0.02079167	0.00000959
14	0.0073750	0.00783333	0.00009726
15	-0.0142917	0.01383333	0.00001492
	Total	0.26543056	0.00197657
$\bar{e}_1 = -0.00045833$ $\bar{d}_3 = \frac{0.26543056}{15} = 0.01769537$ $n_1 = 15$			

นำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 4.2

$$S^2 = \frac{0.00012167}{45-2}$$

$$S = 0.01103042$$

นำค่า S ไปแทนลงในสมการ 4.1

$$t_{BF}^* = \frac{0.00933981 - 0.01678426 - 0.01769537}{0.01103042 \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{1}{15} + \frac{1}{15}}}$$

$$= 5.09630$$

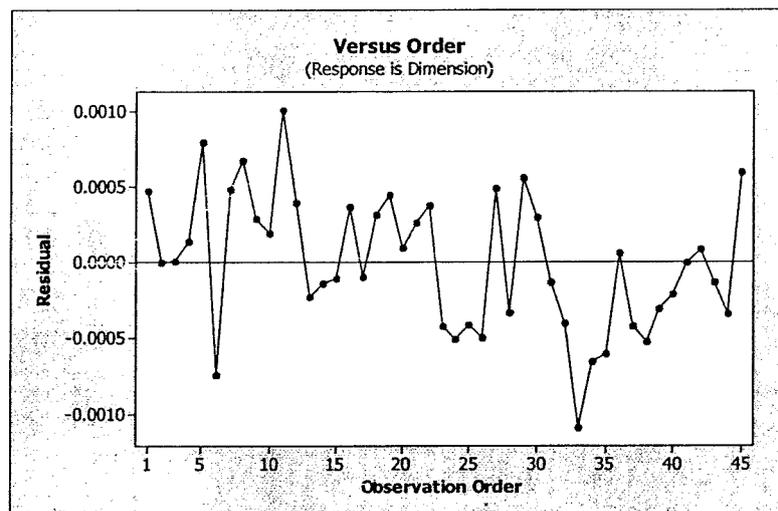
จากการตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวนของส่วนตกค้างที่มีความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของความหนาแน่นของชิ้นงานด้วยวิธี Brown-Forsythe test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 5.09630 จากตารางใน Percentiles of the t distribution ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ค่า $t(0.975, 45) = 2.018$ ซึ่งจากการคำนวณได้ว่า $|t_{BF}^*| \geq 2.018$ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ความแปรปรวนของส่วนตกค้างของการทดลองนี้ไม่มีความสัมพันธ์ของการกระจายตัว

4.3.2.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

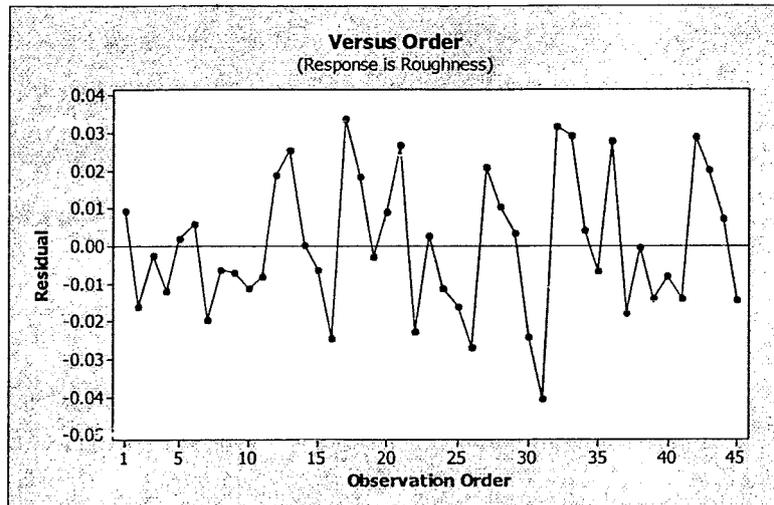
เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างโดยใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล มาทำการพล็อตกราฟค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน

จากรูปที่ 4.19 ค่าส่วนตกค้างของขนาดชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

จากรูปที่ 4.20 ค่าส่วนตกค้างของความหนาแน่นกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งลักษณะของกราฟมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลในการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.19 ค่าส่วนตกค้างของขนาดชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3



รูปที่ 4.20 ค่าส่วนตกค้างของขนาดชิ้นงานกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลของการตัดละเอียดครั้งที่ 3

4.2.1.3.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างเป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างโดยใช้ค่าส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล โดยใช้วิธีการตรวจสอบความเป็นอิสระของ Durbin-Watson test โดยตั้งสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

$H_0 : \rho = 0$ ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระ

$H_a : \rho > 0$ ส่วนตกค้างไม่มีความเป็นอิสระ

จากสมการที่ 4.6

$$D = \frac{\sum_{t=1}^n 2(e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}$$

D = ค่า Durbin-Watson test

e_t = ส่วนตกค้างที่ลำดับการทดลองที่ t

ตารางที่ 4.24 การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของขนาดชิ้นงาน

ลำดับที่	Residual	$e_t - e_{t-1}$	$(e_t - e_{t-1})^2$	e_t^2
1	0.0004667	-	-	0.00000000
2	0.0000000	-0.00046667	0.00000022	0.00000000
3	0.0000083	0.00000833	0.00000000	0.00000000
4	0.0001417	0.00013333	0.00000002	0.00000002
5	0.0007917	0.00065000	0.00000042	0.00000063
6	-0.0007417	-0.00153333	0.00000235	0.00000055
7	0.0004750	0.00121667	0.00000148	0.00000023
8	0.0006750	0.00020000	0.00000004	0.00000046
9	0.0002889	-0.00038611	0.00000015	0.00000008
10	0.0001889	-0.00010000	0.00000001	0.00000004
11	0.0010000	0.00081111	0.00000066	0.00000100
12	0.0003889	-0.00061111	0.00000037	0.00000015
13	-0.0002333	-0.00062222	0.00000039	0.00000005
14	-0.0001417	0.00009167	0.00000001	0.00000002
15	-0.0001083	0.00003333	0.00000000	0.00000001
16	0.0003667	0.00047500	0.00000023	0.00000013
17	-0.0001000	-0.00046667	0.00000022	0.00000001
18	0.0003083	0.00040833	0.00000017	0.00000010
19	0.0004417	0.00013333	0.00000002	0.00000020
20	0.0000917	-0.00035000	0.00000012	0.00000001
21	0.0002583	0.00016667	0.00000003	0.00000007
22	0.0003750	0.00011667	0.00000001	0.00000014
23	-0.0004250	-0.00080000	0.00000064	0.00000018
24	-0.0005111	-0.00086111	0.00000001	0.00000026
25	-0.0004111	0.00010000	0.00000001	0.00000017
26	-0.0005000	-0.0008889	0.00000001	0.00000025
27	0.0004889	0.00098889	0.00000098	0.00000024
28	-0.0003333	-0.00082222	0.00000068	0.00000011
29	0.0005583	0.00089167	0.00000080	0.00000031
30	0.0002917	-0.00026667	0.00000007	0.00000009

ตารางที่ 4.24 (ต่อ) การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของขนาดชิ้นงาน

ลำดับที่	Residual	$e_t - e_{t-1}$	$(e_t - e_{t-1})^2$	e_t^2
31	-0.0001333	-0.00042500	0.00000018	0.00000002
32	-0.0004000	-0.00026667	0.00000007	0.00000016
33	-0.0010917	-0.00069167	0.00000048	0.00000119
34	-0.0006583	0.00043333	0.00000019	0.00000043
35	-0.0006083	0.00005000	0.00000000	0.00000037
36	0.0000583	0.00066667	0.00000044	0.00000000
37	-0.0004250	-0.00048333	0.00000023	0.00000018
38	-0.0005250	-0.00010000	0.00000001	0.00000028
39	-0.0003111	0.00021389	0.00000005	0.00000010
40	-0.0002111	0.00010000	0.00000001	0.00000004
41	0.0000000	0.00021111	0.00000004	0.00000000
42	0.0000889	0.00008889	0.00000001	0.00000001
43	-0.0001333	-0.00022222	0.00000005	0.00000002
44	-0.0034167	-0.00328333	0.00001078	0.00001167
45	0.0059167	0.00933333	0.00008711	0.00003501
Total	0.00010975	0.00005497		

แทนค่าในสมการ 4.6

$$D = \frac{0.00010975}{0.00005497}$$

$$D = 1.996$$

จากการคำนวณความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของขนาดของชิ้นงานด้วยวิธีของ Durbin-Watson test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.996 จากตาราง Durbin-Watson test ที่ $n = 45$, $k = 3$ ได้ค่า $d_L = 1.383$, $d_U = 1.666$ โดยถ้า $D > d_U$ จะยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0), ถ้า $D < d_L$ จะยอมรับสมมติฐานรอง (H_a), และถ้า $d_L < D < d_U$ จะไม่สามารถทำการสรุปผลได้ ซึ่งค่า D ที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าอยู่ระหว่าง d_L D จึงยอมรับสมมติฐานหลัก นั่นคือส่วนตกค้างสำหรับการทดลองขนาดของชิ้นงานมีความเป็นอิสระต่อกัน

ตารางที่ 4.25 การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของความหยาบผิวชั้นงาน

ลำดับที่	Residual	$e_i - e_{i-1}$	$(e_i - e_{i-1})^2$	e_i^2
1	0.0093333	-	-	0.00008711
2	-0.0162500	-0.02558333	0.00065451	0.00026406
3	-0.0027083	0.01354167	0.00018338	0.00000734
4	-0.0120417	-0.00933333	0.00008711	0.00014500
5	0.0021250	0.01416667	0.00020069	0.00000452
6	0.0057917	0.00366667	0.00001344	0.00003354
7	-0.0197917	-0.02558333	0.00065451	0.00039171
8	-0.0064583	0.01333333	0.00017778	0.00004171
9	-0.0072222	-0.00076389	0.00000058	0.00005216
10	-0.0112222	-0.00400000	0.00001600	0.00012594
11	-0.0080833	0.00313889	0.00000985	0.00006534
12	0.0187778	0.02686111	0.00072152	0.00035260
13	0.0253333	0.00655556	0.00004298	0.00064178
14	0.0003750	-0.02495833	0.00062292	0.00000014
15	-0.0062917	-0.00666667	0.00004444	0.00003959
16	-0.0246667	-0.01837500	0.00033764	0.00060844
17	0.0337500	0.05841667	0.00341251	0.00113906
18	0.0182917	-0.01545833	0.00023896	0.00033459
19	-0.0030417	0.02133333	0.00045511	0.00000925
21	0.0267917	0.01766667	0.00031211	0.00071779
22	-0.0227917	-0.04958333	0.00245851	0.00051946
23	0.0025417	0.02533333	0.00064178	0.00000646
24	-0.0112222	-0.01376389	0.00018944	0.00012594
25	-0.0162222	-0.00500000	0.00002500	0.00026316
26	-0.0270833	-0.01086111	0.00011796	0.00073351
27	0.0207778	0.04786111	0.00229069	0.00043172

ตารางที่ 4.25 (ต่อ) การคำนวณด้วยวิธี Durbin-Watson test ของความหยาบผิวชิ้นงาน

ลำดับที่	Residual	$e_t - e_{t-1}$	$(e_t - e_{t-1})^2$	e_t^2
28	0.0103333	-0.01044444	0.00010909	0.00010678
29	0.0033750	-0.00695833	0.00004842	0.00001139
30	-0.0242917	-0.02766667	0.00076544	0.00059009
31	-0.0406667	-0.01637500	0.00026814	0.00165378
32	0.0317500	0.07241667	0.00524417	0.00100806
33	0.0292917	-0.00245833	0.00000604	0.00085800
34	0.0039583	-0.02533333	0.00064178	0.00001567
35	-0.0068750	-0.01083333	0.00011736	0.00004727
36	0.0277917	0.03466667	0.00120178	0.00077238
37	-0.0177917	-0.04558333	0.00207784	0.00031654
38	-0.0004583	0.01733333	0.00030044	0.00000021
39	-0.0142222	-0.01376389	0.00018944	0.00020227
40	-0.0082222	0.00600000	0.00003600	0.00006760
41	0.0140833	-0.00586111	0.00003435	0.00019834
42	0.0287778	0.04286111	0.00183707	0.00082816
43	0.0203333	-0.00844444	0.00007131	0.00041344
44	0.0073750	-0.01295833	0.00016792	0.00005439
45	-0.0142917	-0.02166667	0.00046944	0.00020425
Total	0.02764350	0.01457381		

แทนค่าในสมการ 4.6

$$D = \frac{0.02764350}{0.01457381}$$

$$D = 1.897$$

จากการคำนวณความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของความหยาบผิวชิ้นงาน ด้วยวิธีของ Durbin-Watson test ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1.897 จากตาราง Durbin-Watson ที่ $n = 45$, $k = 3$ ได้ค่า $d_L = 1.383$, $d_U = 1.666$ โดยถ้า $D > d_U$ จะยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0), ถ้า $D < d_L$ จะยอมรับสมมติฐานรอง (H_a), และถ้า $d_L < D < d_U$ จะไม่สามารถทำการสรุปผลได้ ซึ่งค่า D ที่ได้จากการทดลองนี้

มีค่ามากกว่า D_u จึงยอมรับสมมติฐานหลัก นั่นคือส่วนตักสำหรับการทดลองขนาดของชิ้นงาน มีความเป็นอิสระต่อกัน

4.3.3 การหาค่าตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองแบบ Response Surface Methodology

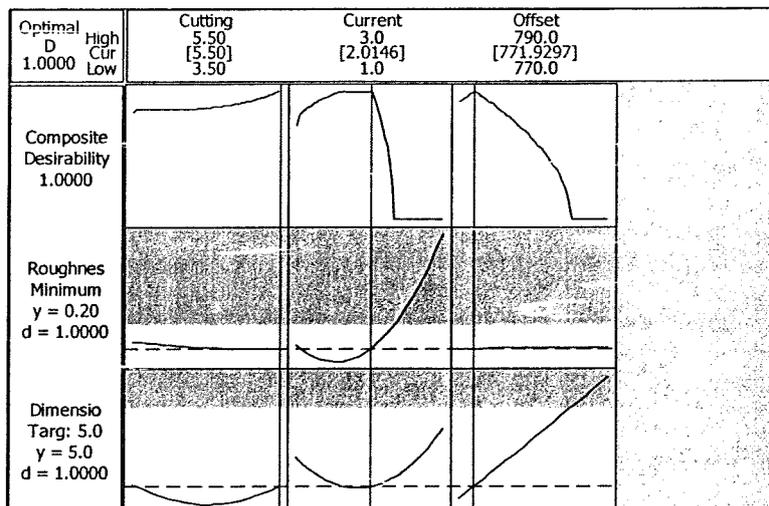
จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขของการตัดที่เหมาะสมที่ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด และให้ขนาดของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุดของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 3 ซึ่งมีเป้าหมายในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 สำหรับการศึกษาี้คือ

1. ขนาดของชิ้นงาน เท่ากับ 5.000 ± 0.002 mm.
2. ความหยาบผิวของชิ้นงานสูงสุด เท่ากับ $0.300 \mu\text{m}$.

โดยการกำหนดเป้าหมายค่าขนาดของชิ้นงานเป็นแบบ Target และเป้าหมายของความหยาบผิวของชิ้นงานเป็นแบบยิ่งน้อยยิ่งดี (Minimum) ดังแสดงในตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.26 การกำหนดค่าเป้าหมายของการตัด

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Roughness	Minimum	0.2	0.2	0.3	1	1
Dimension	Target	4.998	5	5.002	1	1



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงตัวแปรการตัดที่เหมาะสมที่สุด

ซึ่งให้ค่าของตัวแปรการตัดที่เหมาะสมของดังนี้

ความเร็วในการตัดชิ้นงาน CS เท่ากับ 5.5 mm/min

กระแสที่ใช้ในการตัด IP เท่ากับ 2.01460 A

ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน Offset เท่ากับ 771.930 μm

เมื่อใช้เงื่อนไขในการตัดที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ ไปทำการตัดทดสอบเพื่อยืนยันผลการศึกษา ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.27 และผลจากการทดลองของกระบวนการตัดละเอียดครั้งที่ 3 ในกรณีนี้พบว่าค่าความหยาบผิว และขนาดของชิ้นงานมีค่าที่สอดคล้องกับค่าพิสัยความเผื่อ (Tolerance) ตามที่กำหนด

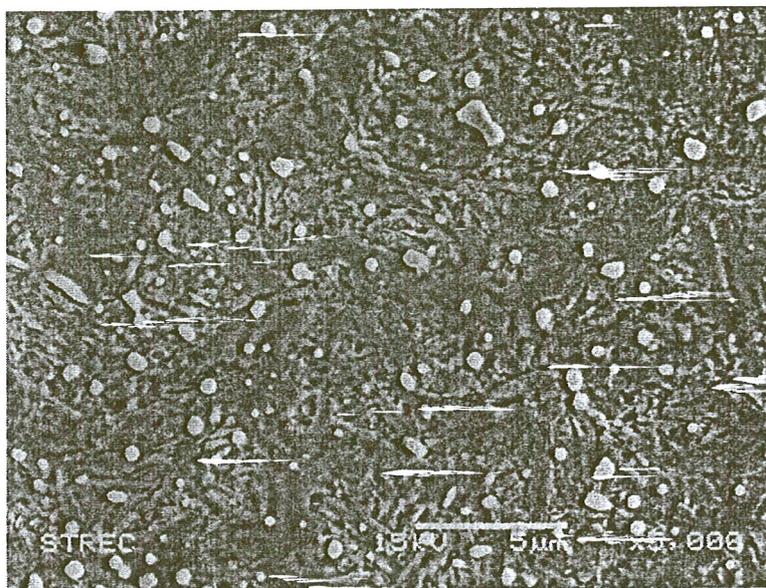
ตารางที่ 4.27 ตารางผลการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงาน

No.	Dimension (mm.)	Roughness ($\mu\text{m}.$)
1	5.0006	0.1810
2	5.0008	0.1900
3	5.0011	0.2020
4	5.0011	0.2150
5	5.0011	0.1900
6	5.0008	0.2000
7	5.0012	0.1950
8	5.0008	0.2020
9	5.0010	0.1880
10	5.0006	0.1950

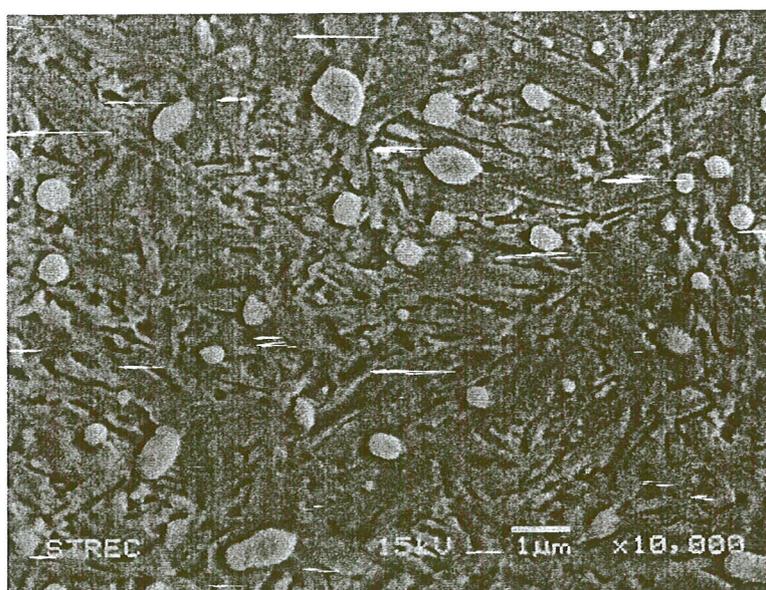
4.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ที่ผ่านการตัดด้วยวิธี Wire-EDM ที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ จะถูกนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM เพื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ก่อนทำการตัด ซึ่งจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบปรากฏว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคเนื่องจากการตัดด้วยวิธี EDM ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ เนื่องจากการตัดด้วยวิธี Wire-EDM เป็นการตัดที่ใช้พลังงานในการตัดไปเฉพาะที่หรือเฉพาะจุด ทำให้เกิดความเสียหายหรือการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยากับส่วน

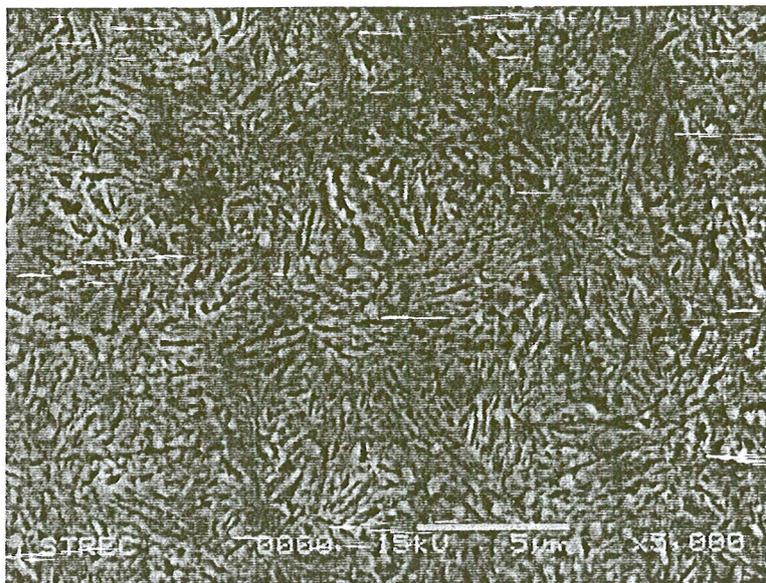
ใกล้เคียงน้อยมาก จึงไม่พบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 หลังจากการตัดด้วยวิธี Wire-EDM รูปที่ 4.21 – 4.22 แสดง โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ก่อนการตัด และรูปที่ 4.23 – 4.24 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 หลังจากการตัดด้วยวิธี Wire-EDM



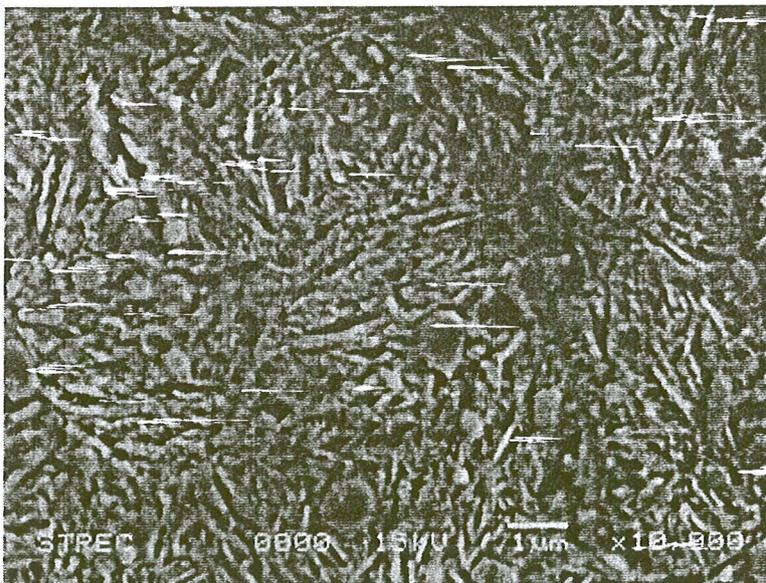
รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนตัดด้วยวิธี Wire-EDM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



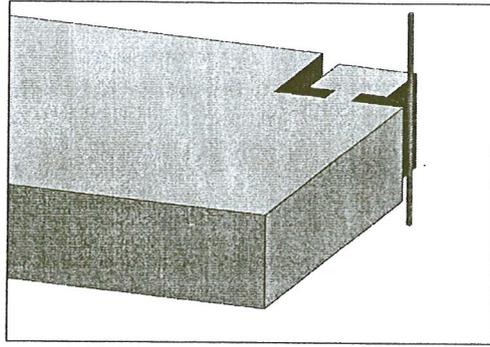
รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนตัดด้วยวิธี Wire-EDM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



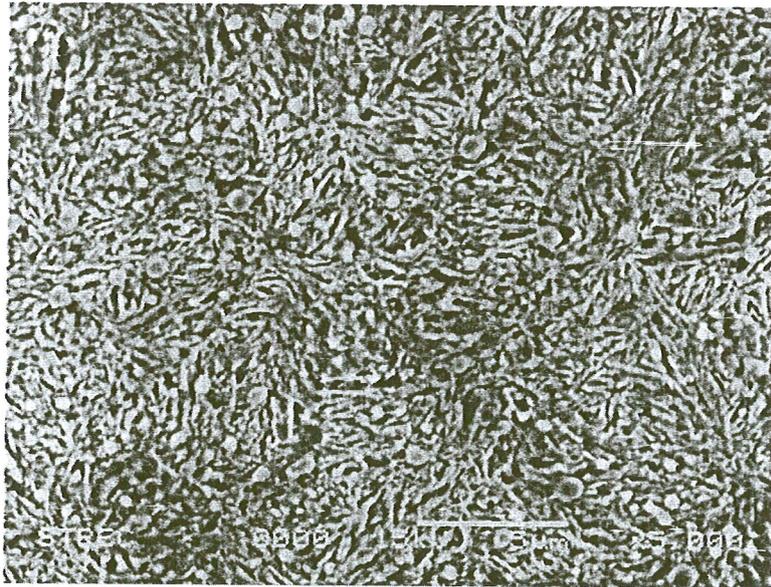
รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังตัดด้วยวิธี Wire-EDM ที่กำลังขยับ 5,000 เท่า



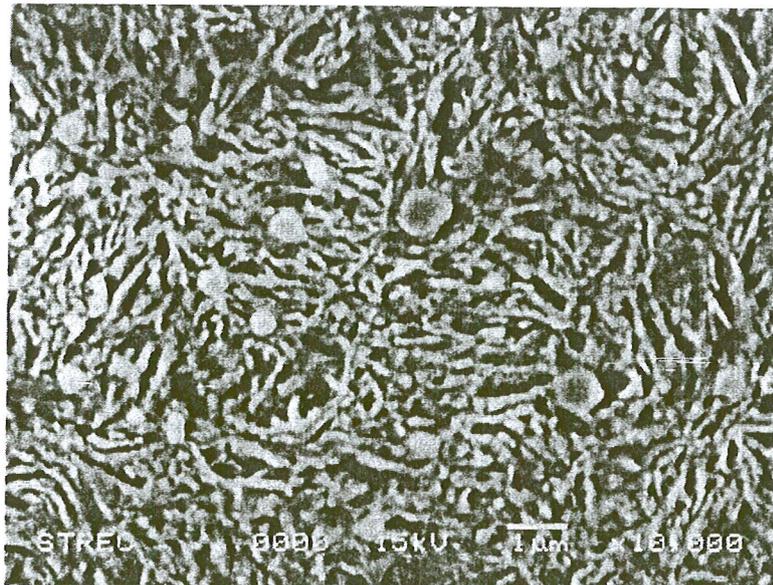
รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังตัดด้วยวิธี Wire-EDM ที่กำลังขยับ 10,000 เท่า



ลักษณะการตัดชิ้นงานทดสอบ



ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่กำลังขยาย 10,000 เท่า