

## บทที่ 6

### การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ

หลังจากการทดสอบความมีนัยสำคัญเพื่อเลือกปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อค่าความกว้างของขนาดเส้นลายวงจร ในขั้นตอนนี้จะนำปัจจัยนำเข้าสำคัญ 4 ปัจจัยมาทำการออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงกระบวนการสร้างเส้นลายวงจรพิมพ์ ในขั้นตอนนี้จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความกว้างของขนาดเส้นลายวงจรพิมพ์ในสภาวะต่าง ๆ ของปัจจัยนำเข้าทั้ง 4 ปัจจัย จากนั้นจะทำการกำหนดปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้ง 4 ปัจจัยของกระบวนการสร้างเส้นลายวงจรพิมพ์

#### 6.1 ปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ

ปัจจัยนำเข้าที่นำมาศึกษาเพื่อหาผลกระทบคือ ค่าอัตราการแกว่งของสเปรย์  $\text{CuCl}_2$  Solution ค่ามุมในการแกว่งของสเปรย์  $\text{CuCl}_2$  Solution ค่าแรงดันของสเปรย์  $\text{CuCl}_2$  Solution และค่าความเร็วของสายพานใน  $\text{CuCl}_2$  Chamber ของกระบวนการสร้างเส้นลายวงจรพิมพ์ โดยแต่ละปัจจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ระดับคือ ระดับต่ำและระดับสูง ซึ่งแทนด้วยหมายเลข -1 และ 1 ตามลำดับ การกำหนดปัจจัยนำเข้าที่สำคัญในแต่ละระดับของการทดลองจะกำหนดตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์หรือช่วงของการใช้งานในกระบวนการสร้างเส้นลายวงจรพิมพ์ปัจจุบันซึ่งแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าระดับปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		หน่วย
	-1	1	
อัตราการแกว่งของสเปรย์ $\text{CuCl}_2$ Solution	25	35	รอบ/นาที
มุมในการแกว่งของสเปรย์ $\text{CuCl}_2$ Solution	56	64	องศา
แรงดันสเปรย์ของ $\text{CuCl}_2$ Solution	0.08	0.012	MPa
ความเร็วสายพานใน $\text{CuCl}_2$ Chamber	2.20	2.60	เมตร / นาที

## 6.2 ตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในการศึกษาคือ ค่าความกว้างของขนาดเส้นลายวงจรมิมพ์ในกระบวนการสร้างเส้นลายวงจรมิมพ์ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร โดยจะแสดงในรูปของค่าเฉลี่ยค่าความกว้างของขนาดเส้นลายวงจรมิมพ์ในแต่ละระดับการทดลองนั้น

## 6.3 แบบการทดลอง

แบบการทดลองที่พิจารณาจะใช้การทดลองแบบ  $2^k$  แฟคทอเรียล เนื่องจากเป็นแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาอิทธิพลจากหลาย ๆ ปัจจัยพร้อมกัน โดยมีปัจจัยนำเข้า 4 ปัจจัยและในแต่ละปัจจัยแบ่งเป็น 2 ระดับ ซึ่งหลักในการออกแบบการทดลองที่พิจารณาคือ

### 6.3.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล  $2^k$  ( $2^k$  Full Factorial Design) และการเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การทดลอง (Addition of the Center Point) ในการออกแบบการทดลองแบบนี้เป็นการออกแบบที่นิยมอย่างมาก เพราะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลอง รวมทั้งช่วยกลั่นกรองปัจจัยที่ไม่สำคัญ และการเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การทดลองเป็นเทคนิคในการทดสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ ในการออกแบบการทดลอง

### 6.3.2 การทำซ้ำ (Replication)

การทำซ้ำหมายถึงการที่ Treatment Combination หนึ่งจะถูกการทดลองมากกว่า 1 ครั้ง ซึ่งการทำซ้ำนี้จะช่วยให้สามารถทำประมาณค่าความผิดพลาดจากการทดลองได้และลดความผิดพลาดให้น้อยลง

### 6.3.3 การบล็อก (Blocking) และคอนฟาวด์ในการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ $2^k$

การบล็อกเป็นเทคนิคในการออกแบบการทดลองที่จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ทำการศึกษา โดยการลดหรือกำจัดทั้งความผันแปรที่เกิดจากปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่ได้ทำการศึกษา (Nuisance factor)

คอนฟาวด์เป็นเทคนิคในการออกแบบการทดลองกรณีที่ไม่สามารถที่จะทำการทดลองได้ โดยทำการทำซ้ำที่จะบริบูรณ์ได้ภายใต้ 1 บล็อก โดยขนาดของบล็อกเล็กกว่าจำนวนการทดลองรวมปัจจัยทั้งหมดในหนึ่งการทำซ้ำ

#### 6.3.4 การเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Center Point)

การเพิ่มจุดศูนย์กลางเข้าไปในการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$  ช่วยทำให้ประหยัดจำนวนครั้งของการทดลองเพื่อตรวจสอบสมมติฐานความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของผลที่จะเกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ แต่ละการประมาณค่าผิดพลาดจากการทดลองจะได้มาจากการเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การทดลอง

#### 6.4.5 การสุ่ม (Randomization)

การสุ่มเป็นหลักการสำคัญในการใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบการทดลอง โดยการสุ่มจะหมายถึงการจัดสรรหน่วยการทดลองและลำดับการทดลองให้เป็นไปโดยสุ่ม ซึ่งทำให้ผลการทดลองตรงกับข้อกำหนดทางสถิติที่ว่า ค่าสังเกตจากการทดลองต้องมีความเป็นอิสระต่อกัน และการสุ่มยังสามารถที่จะเฉลี่ยออกความผันแปรภายนอกที่ไม่ได้เกิดจากสาเหตุโดยธรรมชาติออกไปได้ ทำให้การวิเคราะห์ผลจากการทดลองมีความถูกต้องมากขึ้น

#### 6.4.6 การเลือกขนาดตัวอย่าง

การทดลองออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  มีปัจจัย 5 ปัจจัยด้วยโปรแกรม MINITAB โดยมีข้อกำหนดต่าง ๆ ดังนี้ .

- Corner Point เท่ากับ 16 จุด (Full factorial)
- Effect พิจารณาจาก ผู้ทำวิจัยต้องการที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลักด้วยความน่าจะเป็นอย่างน้อย 0.90 ถ้าค่าเฉลี่ยของ 2 ระดับใด ๆ มีความแตกต่างกันเท่ากับ  $1.5\sigma$  นั่นคือ Effect เท่ากับ 0.0174
- Power value หรือกำลังของการทดสอบ (Power of Test) อย่างน้อยเท่ากับ 0.90 ( $\beta = 0.10$ )
- จำนวน Center Point เท่ากับ 3 ค่าต่อบล็อก
- Sigma จากข้อมูลการประเมินความสามารถของกระบวนการในบทที่ 1 พบว่ากระบวนการมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0116
- ความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha = 0.05$ )

ตารางที่ 6.2 แสดงการคำนวณจำนวนการทำซ้ำด้วยโปรแกรม MINITAB

Power and Sample Size				
2-Level Factorial Design				
Sigma = 0.0116 Alpha = 0.05				
Factors:	4	Base Design:	4, 16	
Blocks:	none			
Including a term for center points in model.				
Center Points			Target Power	Actual Power
Per Block	Effect	Reps		
3	0.0174	2	0.9000	0.9797

จากผลการคำนวณพบว่า ที่จำนวนหาทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จะมีค่ากำลังของการทดสอบ (Power of Test) เท่ากับ 0.9797 ซึ่งมากกว่าค่ากำลังของการทดสอบ (Power of Test) ที่กำหนดไว้ที่ 0.90 ดังนั้นการทดลองนี้จึงใช้การออกแบบการทดลองที่มีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

การทดลองนี้จะใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  Full Factorial Design ที่มีการทำซ้ำ 2 ครั้งและมีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Center Point) เข้าไป 3 จุด เนื่องจากตามทฤษฎีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง 3 – 5 จุด เป็นการประหยัดจำนวนครั้งของการทดลองเพื่อตรวจสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของผลที่จะเกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ

#### 6.4 การเตรียมการทดลอง

- เตรียมชิ้นงานที่จะใช้ในการทดลองให้ครบจำนวนที่ต้องการ ได้แก่ EPP-001S ที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาด กระบวนการติด Dry Film กระบวนการฉายแสงและกระบวนการสร้างแบบลวดลายของเส้นลายวงจรมิมพ์
- เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการขนย้ายชิ้นงาน
- ตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ ได้แก่
  - เตรียมชิ้นงานแผ่นวงจรมิมพ์ที่มาจากรุ่นเดียวกันทั้งหมดและผ่านกระบวนการก่อนหน้ามาอย่างต่อเนื่องเป็นกลุ่มเดียวกัน
  - ใช้เครื่องจักรเครื่องเดียวกันในการทดลอง
  - ใช้เครื่องวัดเครื่องเดียวกัน
  - ใช้พนักงานคนเดียวกันในการปฏิบัติงาน
- ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิ และสิ่งแวดล้อมอื่น



## 6.5 ขั้นตอนในการทดลอง

ให้พนักงานประจำกระบวนการสร้างเส้นลายวงจรพิมพ์ทำการปรับค่าปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้ง 4 ปัจจัยในแต่ละสถานะของการทดลองให้ตรงกับที่กำหนดไว้ในช่อง “RunOrder” ของตาราง ที่ 6.3 และขั้นตอนในการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ขั้นตอนการทดลองเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต

## 6.6 ดำเนินการทดลอง

การสุ่มลำดับการทดลองในการทดลองนี้จะกระทำโดยโปรแกรม MINITAB ซึ่งกำหนดพร้อมกับการสร้างเมตริกการออกแบบ (Design Matrix) โดยสังเกตลำดับการทดลองได้จาก Run Order ของตาราง รวมทั้งสิ้น 35 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 6.3

- กำหนดให้
- A แทนอัตราการแกว่งของสเปรย์  $\text{CuCl}_2$  Solution
  - B แทนมุมในการแกว่งของสเปรย์  $\text{CuCl}_2$  Solution
  - C แทนแรงดันสเปรย์ของ  $\text{CuCl}_2$  Solution
  - D แทนความเร็วสายพานใน  $\text{CuCl}_2$  Chamber

ตารางที่ 6.3 ตารางแสดงผลการทดลอง

RunOrder	CenterPt	Blocks	Oscillation	Angle	Pressure	Speed	Circuit Width
1	1	1	-1	-1	-1	-1	0.063
2	1	1	1	-1	-1	-1	0.064
3	1	1	-1	1	-1	-1	0.07
4	1	1	1	1	-1	-1	0.059
5	1	1	-1	-1	1	-1	0.062
6	1	1	1	-1	1	-1	0.06
7	1	1	-1	1	1	-1	0.065
8	1	1	1	1	1	-1	0.057
9	1	1	-1	-1	-1	1	0.078
10	1	1	1	-1	-1	1	0.074
11	1	1	-1	1	-1	1	0.072
12	1	1	1	1	-1	1	0.068
13	1	1	-1	-1	1	1	0.069
14	1	1	1	-1	1	1	0.062
15	1	1	-1	1	1	1	0.064
16	1	1	1	1	1	1	0.061
17	1	1	-1	-1	-1	-1	0.064
18	1	1	1	-1	-1	-1	0.066
19	1	1	-1	1	-1	-1	0.073
20	1	1	1	1	-1	-1	0.056
21	1	1	-1	-1	1	-1	0.063
22	1	1	1	-1	1	-1	0.062
23	1	1	-1	1	1	-1	0.064
24	1	1	1	1	1	-1	0.059
25	1	1	-1	-1	-1	1	0.076
26	1	1	1	-1	-1	1	0.075
27	1	1	-1	1	-1	1	0.07
28	1	1	1	1	-1	1	0.066
29	1	1	-1	-1	1	1	0.071
30	1	1	1	-1	1	1	0.063
31	1	1	-1	1	1	1	0.062
32	1	1	1	1	1	1	0.06
33	0	1	0	0	0	0	0.0667
34	0	1	0	0	0	0	0.0675
35	0	1	0	0	0	0	0.0686

## 6.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อได้รวบรวมข้อมูลจากการทดลองทั้งหมด และนำมาใส่ในโปรแกรมMINITAB แล้ว โปรแกรมจะแสดงผลดังตารางที่ 6.4 โดยในการวิเคราะห์ผลจะใช้ระดับนัยสำคัญที่ 0.05

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง (Code Unit)

Fractional Factorial Fit: Circuit Edith versus Oscillation, Angle, ...						
Estimated Effects and Coefficients for Circuit (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		0.065563	0.000228	288.15	0.000	
Oscillat	-0.004625	-0.002313	0.000228	-10.16	0.000	
Angle	-0.002875	-0.001437	0.000228	-6.32	0.000	
Pressure	-0.005625	-0.002813	0.000228	-12.36	0.000	
Speed	0.005250	0.002625	0.000228	11.54	0.000	
Oscillat*Angle	-0.002125	-0.001062	0.000228	-4.67	0.000	
Oscillat*Pressure	0.000125	0.000062	0.000228	0.27	0.787	
Oscillat*Speed	0.000500	0.000250	0.000228	1.10	0.286	
Angle*Pressure	0.000375	0.000187	0.000228	0.82	0.421	
Angle*Speed	-0.002750	-0.001375	0.000228	-6.04	0.000	
Pressure*Speed	-0.002750	-0.001375	0.000228	-6.04	0.000	
Oscillat*Angle*Pressure	0.002125	0.001062	0.000228	4.67	0.000	
Oscillat*Angle*Speed	0.003000	0.001500	0.000228	6.59	0.000	
Oscillat*Pressure*Speed	-0.001000	-0.000500	0.000228	-2.20	0.041	
Angle*Pressure*Speed	0.000750	0.000375	0.000228	1.65	0.117	
Oscillat*Angle*Pressure*Speed	-0.000500	-0.000250	0.000228	-1.10	0.286	
Ct Pt		0.002037	0.000777	2.62	0.017	
Analysis of Variance for Circuit (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	0.00071087	0.00071087	0.00017772	107.27	0.000
2-Way Interactions	6	0.00016037	0.00016037	0.00002673	16.13	0.000
3-Way Interactions	4	0.00012062	0.00012062	0.00003016	18.20	0.000
4-Way Interactions	1	0.00000200	0.00000200	0.00000200	1.21	0.286
Curvature	1	0.00001139	0.00001139	0.00001139	6.87	0.017
Residual Error	18	0.00002982	0.00002982	0.00000166		
Pure Error	18	0.00002982	0.00002982	0.00000166		
Total	34	0.00103508				

จากตารางที่ 6.4 เมื่อพิจารณาเทอมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อค่าความกว้างของขนาดเส้นลายวงจรมิมพ์ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปัจจัยหลักทั้ง 4 มีผลกระทบต่อค่าความกว้างของขนาดเส้นลายวงจรมิมพ์ แต่ผลการวิเคราะห์พบว่าอิทธิพลเนื่องมาจากความโค้งมีค่า



เท่ากับ 0.017 ดังนั้นจึงไม่สามารถอธิบายอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ของการออกแบบการทดลองนี้ ด้วยตัวแบบเชิงเส้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการทดลองเพิ่มโดยการออกแบบการทดลองแบบ ส่วนประสมกลาง ( Central Composite Design, CCD) เพื่อที่จะอธิบายอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ด้วย วิธีการพื้นผิวตอบ (Response Surface Method)

#### 6.8 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Central Composite Design with Center Point)

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Central Composite Design with Center Point) เข้าไป 7 จุด เนื่องจากสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล  $2^k$  เป็น  $2^4$  Full Factorial Design ที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลางเข้าไป 3 จุดข้างต้นนั้น ไม่สามารถวิเคราะห์ผลที่ถูกต้องของรูปแบบการทดลองนี้ได้ เพราะจากรูปแบบการทดลองมีลักษณะของส่วนโค้ง (Curvature) เกิดขึ้น จึงทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการแบบส่วนประสมกลางที่มีการเพิ่มลักษณะกำลังสอง (Second Order) ได้ โดยการทดลองเป็นการทดลองแบบสุ่มรวมทั้งหมด 31 การทดลอง ดังแสดงดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ตารางแสดงผลการทดลอง

StdOrder	RunOrder	Blocks	Oscillation	Angle	Pressure	Speed	Circuit Width
7	1	1	25	64	0.12	2.2	0.058
17	2	1	20	60	0.1	2.4	0.07
30	3	1	30	60	0.1	2.4	0.067
6	4	1	35	56	0.12	2.2	0.056
10	5	1	35	56	0.08	2.6	0.079
26	6	1	30	60	0.1	2.4	0.065
19	7	1	30	52	0.1	2.4	0.068
28	8	1	30	60	0.1	2.4	0.066
13	9	1	25	56	0.12	2.6	0.074
1	10	1	25	56	0.08	2.2	0.064
29	11	1	30	60	0.1	2.4	0.066
11	12	1	25	64	0.08	2.6	0.079
12	13	1	35	64	0.08	2.6	0.077
16	14	1	35	64	0.12	2.6	0.072
9	15	1	25	56	0.08	2.6	0.082
3	16	1	25	64	0.08	2.2	0.062
25	17	1	30	60	0.1	2.4	0.065
23	18	1	30	60	0.1	2	0.05
18	19	1	40	60	0.1	2.4	0.068



8	20	1	35	64	0.12	2.2	0.058
2	21	1	35	56	0.08	2.2	0.059
22	22	1	30	60	0.14	2.4	0.062
15	23	1	25	64	0.12	2.6	0.069
21	24	1	30	60	0.06	2.4	0.074
5	25	1	25	56	0.12	2.2	0.06
4	26	1	35	64	0.08	2.2	0.061
27	27	1	30	60	0.1	2.4	0.065
24	28	1	30	60	0.1	2.8	0.079
20	29	1	30	68	0.1	2.4	0.066
14	30	1	35	56	0.12	2.6	0.07
31	31	1	30	60	0.1	2.4	0.064

## 6.9 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

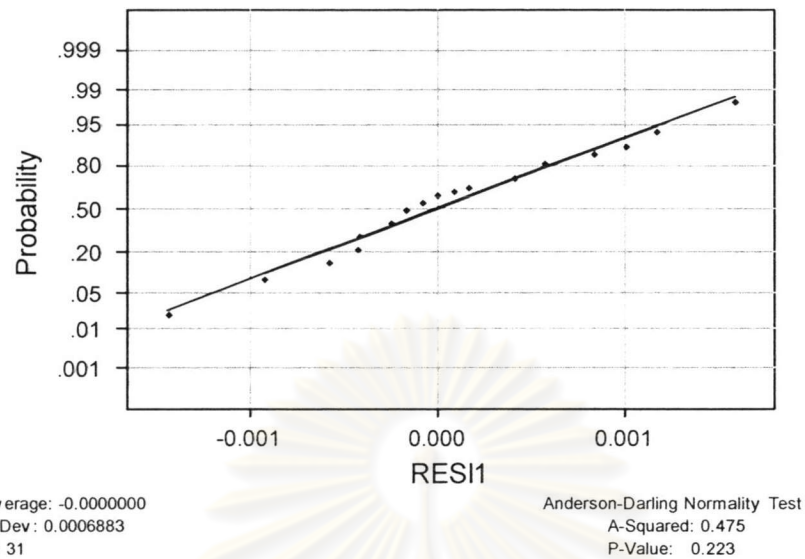
ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองประกอบด้วย การทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของการทดลองภายใต้เงื่อนไข 3 ประการ คือ ข้อมูลเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันและมีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ และสรุปผลการออกแบบการทดลอง

### 6.9.1 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นปกติ

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นปกติ (Normality Assumption) สามารถตรวจสอบด้วยการกระจายของค่าส่วนตกค้างของค่าตัวแปรตอบสนอง (Circuit Width) ซึ่งกราฟแสดงการกระจายของค่าส่วนตกค้างค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้เป็นเส้นตรง และมีค่ามากกว่า 0.05 นั่นคือข้อมูลเป็นตัวแปรแบบปกติ ดังรูปที่ 6.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Normal Probability Plot



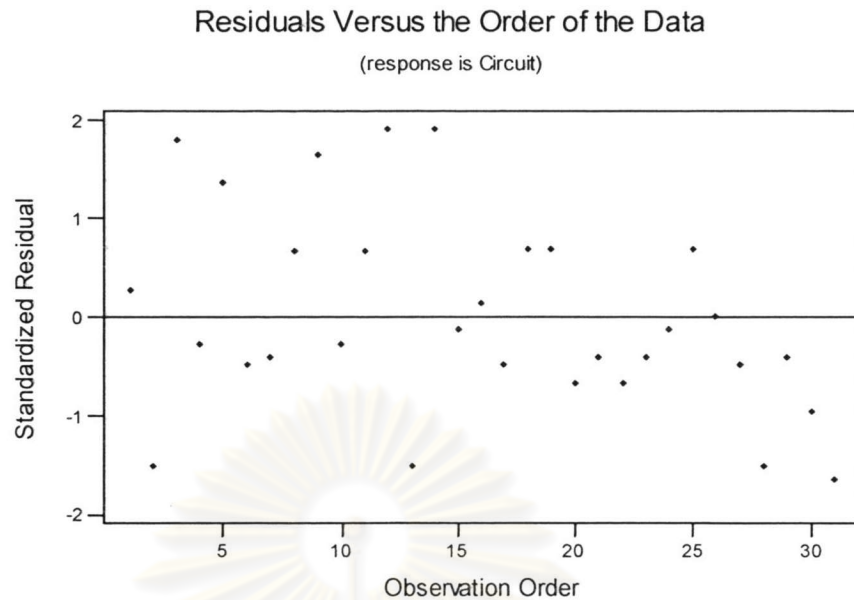
รูปที่ 6.2 กราฟแสดงการกระจายของค่าส่วนตกค้าง

## 6.9.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent)

การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระ (Independent) สามารถตรวจสอบโดยการสร้างแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับความต่อเนื่องในแนวนอนหรือมีรูปแบบใด ๆ ควรที่จะมีการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

จากรูปที่ 6.3 ค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบ ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



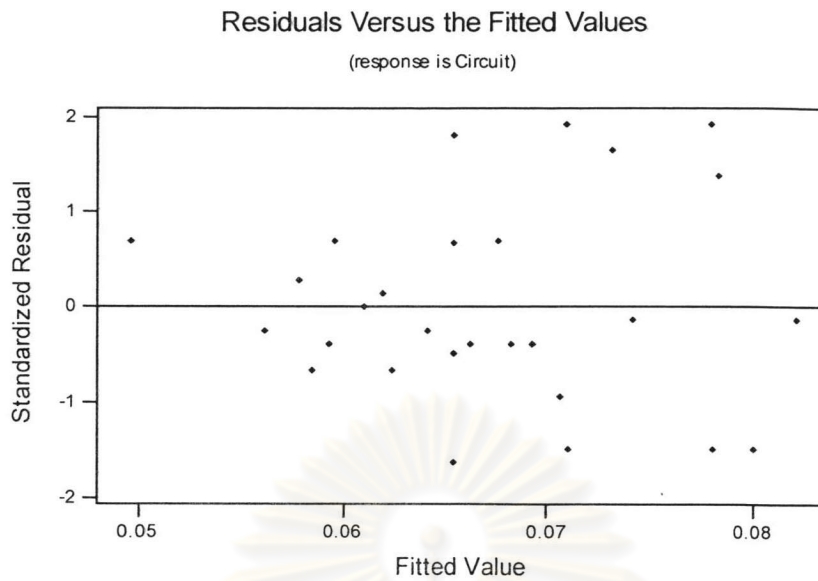
รูปที่ 6.3 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของข้อมูล

### 6.9.3 ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability)

ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) สามารถตรวจสอบได้โดยการสร้างแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย แสดงในรูปที่ 6.4 ซึ่งแผนภาพการกระจายไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม และไม่มีการกระจายตัวเป็นรูปที่แน่นอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 6.4 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6.10 การวิเคราะห์ผลการทดลองการออกแบบส่วนประสมกลาง

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Code Unit) ของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ดังตารางที่ 6.6 จากตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า เทอมของปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความกว้างของขนาดเส้นลายวงจรมีที่ระดับ 0.05 ได้แก่ เทอมที่มีค่า P-Value มากกว่า 0.05 (ดังในตารางที่ 6.6)

ตารางที่ 6.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Code Unit) ของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

Response Surface Regression: Circuit Width versus Oscillation, Angle, ...						
The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for Circuit						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	0.065429	0.000356	183.660	0.000		
Oscillat	-0.000833	0.000192	-4.331	0.001		
Angle	-0.000500	0.000192	-2.599	0.019		
Pressure	-0.002917	0.000192	-15.160	0.000		
Speed	0.007583	0.000192	39.415	0.000		
Oscillat*Oscillat	0.000955	0.000176	5.420	0.000		
Angle*Angle	0.000455	0.000176	2.583	0.020		
Pressure*Pressure	0.000705	0.000176	4.002	0.001		
Speed*Speed	-0.000170	0.000176	-0.962	0.350		
Oscillat*Angle	0.001000	0.000236	4.244	0.001		
Oscillat*Pressure	0.000375	0.000236	1.591	0.131		
Oscillat*Speed	0.000250	0.000236	1.061	0.304		
Angle*Pressure	0.000125	0.000236	0.530	0.603		
Angle*Speed	-0.000500	0.000236	-2.122	0.050		
Pressure*Speed	-0.001125	0.000236	-4.774	0.000		
S = 0.0009425    R-Sq = 99.2%    R-Sq(adj) = 98.4%						
Analysis of Variance for Circuit						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	0.001694	0.001694	0.000121	136.17	0.000
Linear	4	0.001607	0.001607	0.000402	452.22	0.000
Square	4	0.000043	0.000043	0.000011	12.07	0.000
Interaction	6	0.000044	0.000044	0.000007	8.21	0.000
Residual Error	16	0.000014	0.000014	0.000001		
Lack-of-Fit	10	0.000008	0.000008	0.000001	0.89	0.584
Pure Error	6	0.000006	0.000006	0.000001		
Total	30	0.001708				

จากตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า เทอมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญคือ คือ ค่าอัตราการแกว่งของสเปร์ย์  $\text{CuCl}_2$  Solution ค่ามุมในการแกว่งของสเปร์ย์  $\text{CuCl}_2$  Solution และ ค่าความเร็วของสายพานใน  $\text{CuCl}_2$  Chamber และแรงดันของ  $\text{CuCl}_2$  Solution อิทธิพลอันดับสอง

ของ คือ ค่าอัตราการแกว่งของสเปรย์  $\text{CuCl}_2$  Solution ค่ามุมในการแกว่งของสเปรย์  $\text{CuCl}_2$  Solution ค่าความเร็วของสายพานใน  $\text{CuCl}_2$  Chamber และแรงดันของ  $\text{CuCl}_2$  Solution รวมทั้งอิทธิพลร่วมระหว่างอัตราการแกว่งของสเปรย์  $\text{CuCl}_2$  Solution กับ มุมในการแกว่งของสเปรย์  $\text{CuCl}_2$  Solution มุมในการแกว่งของสเปรย์  $\text{CuCl}_2$  Solution กับ ความเร็วของสายพานใน  $\text{CuCl}_2$  Chamber และแรงดันของ  $\text{CuCl}_2$  Solution กับ ความเร็วของสายพานใน  $\text{CuCl}_2$  Chamber

ทุกเทอมของปัจจัยมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 นั่นคือทุกเทอมของปัจจัยข้างต้นมีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของค่าความกว้างของขนาดเส้นลายวงจรมิมพ์

จากตารางที่ 6.6 พบว่า รูปแบบของการทดลองนี้มีลักษณะของพจน์ที่เป็นสมการกำลังสอง (Second Order) หรือควอดราติก (Quadratic) ร่วมด้วย แสดงว่ารูปแบบของการทดลองนี้เป็นลักษณะของเส้นโค้ง (Curvature) ซึ่งสามารถหาสมการถดถอยที่เป็นตัวแทนของตัวแบบของความกว้างของขนาดเส้นลายวงจรมิมพ์ในกระบวนการสร้างเส้นลายวงจรมิมพ์ดังนี้คือ

$$\begin{aligned}
 Y &= 0.065429 - 0.000833 (\text{Oscillation}) - 0.0005 (\text{Angle}) - 0.002917 (\text{Pressure}) + \\
 &0.007583 (\text{Speed}) + 0.00955 (\text{Oscillation} * \text{Oscillation}) + 0.000455 (\text{Angle} * \text{Angle}) \\
 &+ 0.000705 (\text{Pressure} * \text{Pressure}) + 0.0010 (\text{Oscillation} * \text{Angle}) \\
 &- 0.0050 (\text{Angle} * \text{Speed}) - 0.001125 (\text{Pressure} * \text{Speed})
 \end{aligned}$$

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนตัวแบบถดถอย พบว่าค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าเทอมของตัวแปรอิสระภายในตัวแบบถดถอยมีความสามารถในการอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นในตัวแปรตอบสนองได้ และจากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ หรือ  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 99.2 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือ ความผันแปรจำนวน 99.2 เปอร์เซ็นต์จะสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ ส่วนปริมาณความผันแปรอีก 0.8 เปอร์เซ็นต์ไม่สามารถอธิบายได้ เนื่องจากมาจากความคลาดเคลื่อน ดังนั้นตัวแบบถดถอยนี้มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือที่นำไปใช้ในการพยากรณ์ล่วงหน้าได้

ในการทดสอบว่าตัวแบบถดถอยดังกล่าวมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองหรือไม่ จึงมีความจำเป็นต้องทดสอบเทียบความกลมกลืนกันของตัวแบบถดถอยว่ามีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งสมมติฐานที่ต้องการตรวจสอบคือ

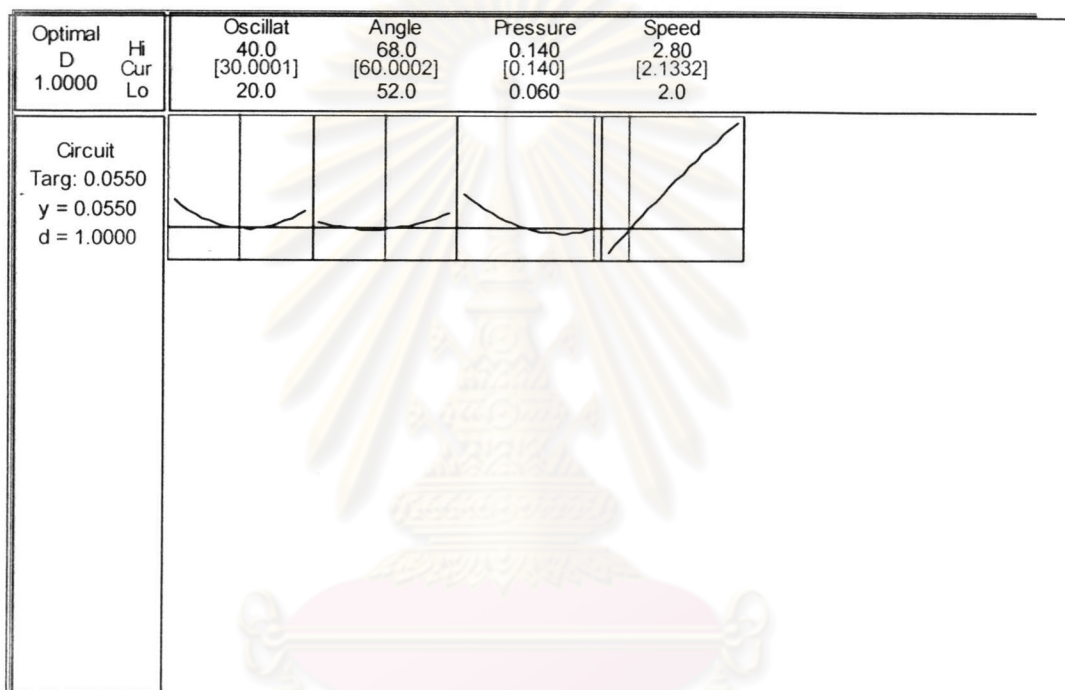
$H_0$  : ตัวแบบถดถอยมีความสมรูป(Fit) กับข้อมูล

$H_1$  : ตัวแบบถดถอยไม่มีความสมรูปกับข้อมูล



จากตารางการวิเคราะห์พบว่าส่วนตกค้างจากความไม่สมบูรณ์ของตัวแบบของข้อมูลมีค่าไม่มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาจากค่า P-Value ของ Lack-of-Fit มีค่าเท่ากับ 0.584 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานหลักและถือว่าตัวแบบมีความสมบูรณ์กับข้อมูลระดับนัยสำคัญ 0.05

จากตัวแบบถดถอยข้างต้น สามารถพยากรณ์หาระดับที่เหมาะสมของการปรับค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้ค่าความกว้างของขนาดเส้นลายวงจรมิพพ์ที่ดีที่สุด ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ผลการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ

จากรูปที่ 6.5 สรุปได้ระดับปัจจัยนำเข้าสำคัญที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของความกว้างของขนาดเส้นลายวงจรมิพพ์เท่ากับ 0.0550 มิลลิเมตร ดังนี้คือ

- ค่าอัตราการแกว่งของสเปรย์  $\text{CuCl}_2$  Solution ระดับ 30.00 รอบ/นาที
- ค่ามุมในการแกว่งของสเปรย์  $\text{CuCl}_2$  Solution ระดับ 60.00 องศา
- ค่าแรงดันของสเปรย์  $\text{CuCl}_2$  Solution และ ระดับ 0.140 เมกกะปาสกาล
- ค่าความเร็วของสายพานใน  $\text{CuCl}_2$  Chamber ระดับ 2.1332 เมตร/นาที

## 6.11 สรุปขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้ได้นำปัจจัยสำคัญทั้ง 4 ปัจจัยมาทำการวิเคราะห์ที่มีอิทธิพลต่อค่าความกว้างของขนาดเส้นลายวงจรมิพพ์ และระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยทำการออกแบบการทดลองเป็น  $2^4$  Full Factorial Design ที่การทำซ้ำ 2 ครั้งและมีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Center of Point) เข้าไป 3 จุด แต่ไม่สามารถวิเคราะห์ผลที่ถูกต้องจากรูปแบบการทดลองนี้ เนื่องจากรูปแบบของการทดลองมีลักษณะเป็นส่วนโค้งเกิดขึ้น จึงได้ใช้การทดลองด้วยวิธีการแบบส่วนประสมกลางที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลางเข้าไป 7 จุด ซึ่งสามารถสรุปผลของขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการได้เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญส่งผลต่อค่าความกว้างของขนาดเส้นลายวงจรมิพพ์ จากนั้นนำปัจจัยเหล่านั้นไปหา ระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย เพื่อให้ได้ค่าความกว้างของขนาดเส้นลายวงจรมิพพ์ที่ดีที่สุดและต้องทำการยืนยันผลการทดลองดังกล่าวก่อนนำไปใช้งานในกระบวนการผลิตจริง ซึ่งจะดำเนินงานในขั้นตอนต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย