

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ผลการวิจัย เป็นผลจากการทดลองการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบเศษส่วน เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อความโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อนแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้คือ

- 4.1. การวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อความโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อน โดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเศษส่วน
- 4.2. การทดสอบยืนยันผลการปรับปรุงปัจจัยที่มีผลต่อความโค้งงอ

4.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อน โดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเศษส่วน

การวิเคราะห์ผลการทดลอง การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเศษส่วน 2^{7-3} โดยใช้ดีไซน์เจนเนอเรเตอร์ $E=ABC$, $F=BCD$, $G=ACD$ เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อน ปัจจัยที่สนใจศึกษาคือ

1. ทิศทางการตัดแผ่นเคลือบด้านบน (Coverfilm; A)
2. แรงดึงในการผลิตแบบม้วน (Tension; B)
3. แผ่นรองรับแรงดึง (Back up Film; C)
4. จำนวนชั้นแผ่นกระจายแรงกดในกระบวนการเคลือบอย่างรวดเร็ว (Black Rubber; D)
5. วิธีการวางแผ่นเคลือบด้านบน (Placement; E)
6. การจับงานเพื่อตรวจสอบคุณภาพ (Handling; F)
7. แบบของถาดใส่งาน (Tray; G)

แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ทำการทดลองจำนวน 16 การทดลองทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง ลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่มผลตอบที่ใช้ในการทดลองคือระยะความโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อน โดยสามารถเขียนคู่แฝดการทดลอง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงโครงสร้างคู่แฝดของการออกแบบ 2^{7-3}

$$A = B^*C^*E = B^*F^*G = C^*D^*G = D^*E^*F$$

$$B = A^*C^*E = A^*F^*G = C^*D^*F = D^*E^*G$$

$$C = A^*B^*E = A^*D^*G + B^*D^*F = E^*F^*G$$

$$D = A^*C^*G = A^*E^*F = B^*C^*F = B^*E^*G$$

$$E = A^*B^*C = A^*D^*F = B^*D^*G = C^*F^*G$$

$$F = A^*B^*G = A^*D^*E = B^*C^*D = C^*E^*G$$

$$G = A^*B^*F = A^*C^*D = B^*D^*E = C^*E^*F$$

$$A^*B = C^*E = F^*G$$

$$A^*C = B^*E = D^*G$$

$$A^*D = C^*G = E^*F$$

$$A^*E = B^*C = D^*F$$

$$A^*F = B^*G = D^*E$$

$$A^*G = B^*F = C^*D$$

$$B^*D = C^*F = E^*G$$

$$A^*B^*D = A^*C^*F = A^*E^*G = B^*C^*G = B^*E^*F = C^*D^*E = D^*F^*G$$

สามารถอธิบายโครงสร้างคู่แฝดการทดลอง เช่น ถ้าในการวิเคราะห์ผลปรากฏว่าปัจจัย A มีผลต่อค่าที่สนใจ และเป็นไปได้ว่า อันตรกิริยา 3 ปัจจัย BCE, BFG, CDG หรือ DEF อาจมีผลด้วย ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเศษส่วน 2^{7-3} ได้ตัดผลจากอันตรกิริยา 3 ปัจจัยออกไป เพื่อลดจำนวนชุดการทดลอง

การควบคุมการทดลองใช้พนักงานผู้เชี่ยวชาญที่ปฏิบัติงานในกระบวนการผลิตที่ทำการทดลองนั้น โดยทำการอบรมเพิ่มเติมในส่วนการเก็บข้อมูล และการปรับตั้งระดับของปัจจัยในการทดลอง โดยในการทดลองแต่ละกระบวนการจะใช้พนักงานเพียงคนเดียว และทำการทดลองในเวลาทำงานช่วงกลางวันเท่านั้น (Day Shift) ข้อมูลผลการทดลอง แสดงแสดงรายละเอียดดังตาราง

4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองหาระยะความโค้งจากกระบวนการผลิตแผงวงจรแบบอ่อน

ลำดับ มาตรฐาน	ปัจจัยที่ศึกษา							ผลตอบ	
								การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2
	A	B	C	D	E	F	G	ระยะโค้ง (มม.)	ระยะโค้ง (มม.)
1,17	-	-	-	-	-	-	-	0.8369	1.1766
2,18	+	-	-	-	-	-	+	0.8678	0.5240
3,19	-	+	-	-	-	+	-	0.6996	0.9871
4,20	+	+	-	-	-	+	+	0.8200	0.8190
5,21	-	-	+	-	+	+	+	0.4339	0.4540
6,22	+	-	+	-	-	+	-	0.8859	0.8762
7,23	-	+	+	-	-	-	+	0.5320	0.4280
8,24	+	+	+	-	+	-	-	1.2116	0.8311
9,25	-	-	-	+	-	+	+	0.3940	0.4050
10,26	+	-	-	+	+	+	-	0.6160	0.6582
11,27	-	+	-	+	+	-	+	0.3230	0.4180
12,28	+	+	-	+	-	-	-	0.5534	0.5927
13,29	-	-	+	+	+	-	-	0.6439	0.6529
14,30	+	-	+	+	-	-	+	0.4350	0.3750
15,31	-	+	+	+	-	+	-	0.4740	0.4988
16,32	+	+	+	+	+	+	+	0.4316	0.3356

นำข้อมูลระยะความโค้งของแผงวงจรแบบอ่อนมาวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ และหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยเพื่อหาสัมประสิทธิ์ในแต่ละเทอมของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระยะความโค้งของแผงวงจรแบบอ่อน การวิเคราะห์ข้อมูลปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

- 1). การประมาณผลกระทบปัจจัยหลักและอันตรกิริยาร่วม (Estimate Factor Effects)
- 2). สร้างแบบจำลองเริ่มต้น (Form Initial Model)
- 3). วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล
- 4). วิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residuals Analysis)

1). การประมาณผลกระทบปัจจัยหลักและอันตรกิริยาร่วม (Estimate Factor Effects)

การประมาณผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาร่วมทำให้ทราบเบื้องต้นว่าปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาใดมีความสำคัญ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตาราง 4.3 โดยการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95

ตารางที่ 4.3 การประมาณผลกระทบ และค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการทดลอง (Estimated Effects and Coefficients for Response; Code Units) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$)

Term	Effect	Coef	SE Coef	t	p
Constant		0.631	0.02206	28.60	0.000
A	0.0922	0.0461	0.02206	2.09	0.053
B	-0.0175	-0.0087	0.02206	-0.40	0.697
C	-0.0745	-0.0372	0.02206	-1.69	0.111
D	-0.286	-0.143	0.02206	-6.48	0.000
E	-0.0009	-0.0004	0.02206	-0.02	0.984
F	-0.0383	-0.0191	0.02206	-0.87	0.398
G	-0.2624	-0.1312	0.02206	-5.95	0.000
A*B	0.0621	0.031	0.02206	1.41	0.179
A*C	0.0659	0.0329	0.02206	1.49	0.155
A*D	-0.0687	-0.0344	0.02206	-1.56	0.139
A*E	0.0157	0.0079	0.02206	0.36	0.726
A*F	0.0448	0.0224	0.02206	1.02	0.325
A*G	0.0603	0.0301	0.02206	1.37	0.191
B*D	-0.0516	-0.0258	0.02206	-1.17	0.259
A*B*D	-0.0357	-0.0179	0.02206	-0.81	0.430

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระยะความโค้งของแผงวงจรแบบอ่อนที่ระดับนัยสำคัญ $p < 0.05$ มี 2 ปัจจัย ได้แก่

1. ปัจจัยแผ่นกระจายแรงกดในกระบวนการเคลือบอย่างรวดเร็ว (D)

2. ปัจจัยแบบของถาดใส่งานในกระบวนการผลิต (G)

นอกจากนี้พบว่ามี 2 ปัจจัยที่มีใกล้เคียงระดับนัยสำคัญที่ $p < 0.05$ ได้แก่

1. ปัจจัยทิศทางการตัดแผ่นเคลือบด้านบน (A)

2. ปัจจัยแผ่นรับแรงดึงในการผลิตแบบม้วน (C)

โดยเทอมของอันตรกิริยาร่วมไม่มีผลต่อการโค้งของแผงวงจรแบบอ่อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ดังนั้นในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความโค้งของแผงวงจรแบบอ่อนจะเก็บเฉพาะปัจจัยหลักทั้ง 4 ปัจจัยไว้ทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

2.) สร้างแบบจำลองเริ่มต้น (Form Initial Model)

แบบจำลองเบื้องต้นประกอบด้วยปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาร่วมทุกปัจจัย โดยค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละเทอมของปัจจัย หาได้จากค่าผลกระทบของแต่ละปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาร่วมหารด้วยสอง สร้างแบบจำลองเต็มรูปแบบได้ดังสมการที่ 4.1

จากสมการ y คือ ค่าระยะความโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อน โดยมีสมการทำนายผลแบบเข้ารหัส (Code Units) จากการทดลอง ดังนี้

$$y = 0.631 + 0.0461*A - 0.0087*B - 0.0372*C - 0.143*D - 0.0004*E - 0.0191*F - 0.1312*G + 0.0621*A*B + 0.0659*A*C - 0.0687*A*D + 0.0157*A*E + 0.0448*A*F + 0.0603*A*G - 0.0516*B*D - 0.0357*A*B*D \quad (4.1)$$

3.) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

การทดสอบทางด้านสถิติใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลัก และอันตรกิริยาร่วม แสดงดังตาราง 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อไม่แปลงค่าข้อมูล (Analysis of Variance for Response)

แหล่งความแปรปรวน	DF	SS	MS	F	p
ผลจากปัจจัยหลัก	7	1.33215	0.19031	12.220	0.000
ผลจากอันตรกิริยาร่วม 2 ปัจจัย	7	0.17177	0.02454	1.580	0.213
ผลจากอันตรกิริยาร่วม 3 ปัจจัย	1	0.01022	0.01022	0.660	0.430
ค่าผิดพลาดของส่วนตกค้าง (Residual Error)	16	0.24918	0.01557		
Pure Error	16	0.24918	0.01557		
ผลรวม	31	1.76331			

จากตารางที่ 4.4 ค่า p ของผลจากปัจจัยหลักมีค่าเท่ากับ 0.000 โดยมีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้คือ ผลจากปัจจัยหลักมีผลต่อระยะความโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 โดยมีประสิทธิภาพของสมการทำนายระยะความโค้งงอจำนวนได้ดังสมการที่ 4.2

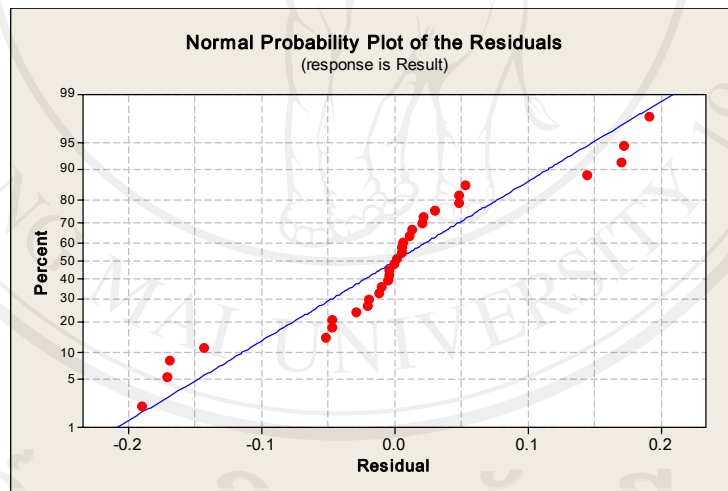
$$R^2 = \frac{SS(Model)}{SS(Total)} \quad (4.2)$$

$$R^2 = 0.7262 \text{ หรือเท่ากับร้อยละ } 72.62$$

จากประสิทธิภาพของสมการของแบบจำลองเริ่มต้นทำนายผลการโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อนมีค่า ร้อยละ 72.62 ซึ่งสามารถนำสมการที่ได้จากการทดลองไปทำนายระยะความโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อนได้

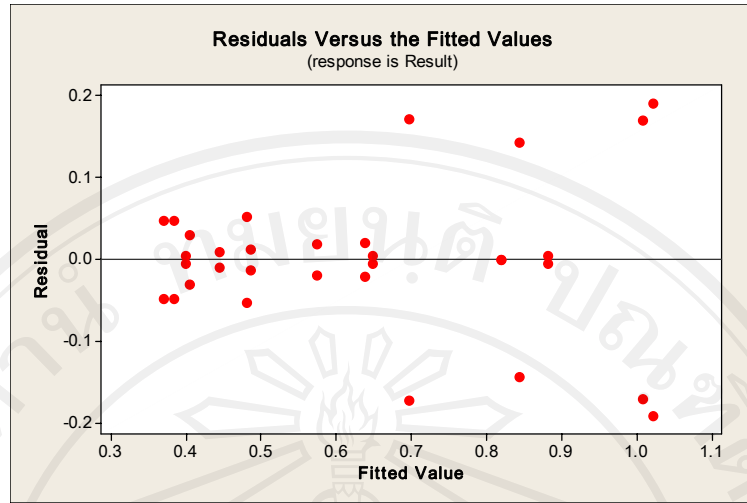
4). วิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residuals Analysis)

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติโดยการนำส่วนตกค้างของข้อมูลมาสร้างกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Plot of Residuals) ดังรูปที่ 4.1 การแจกแจงของส่วนตกค้างของระยะความโค้งงอมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่ปกติ (ค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างไม่อยู่ที่ค่าศูนย์)



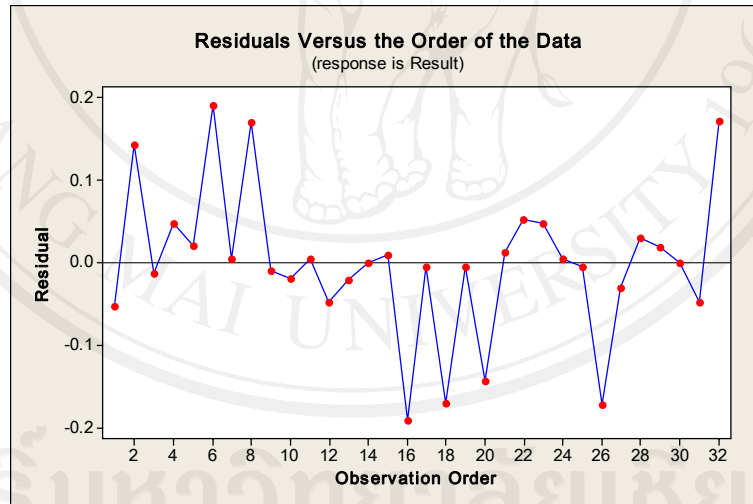
รูปที่ 4.1 กราฟการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้างของระยะความโค้งงอ

รูปที่ 4.2 การตรวจสอบความคงที่ของความแปรปรวน โดยใช้แผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละระดับของปัจจัยพบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอค่าของส่วนตกค้างมีแนวโน้มขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย โดยเมื่อค่าที่ทำนายเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าของส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามไปด้วยอาจมีผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการทดลอง



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าระหว่างส่วนตกค้างกับค่าทำนาย

การพล็อตกราฟของส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (I Chart of Residuals) จากกราฟพบว่าค่าของส่วนตกค้างไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง มีการกระจายตัวเป็นอิสระ แสดงดังรูป 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงส่วนตกค้างของระยะความโค้งงอกับลำดับการทดลอง

จากกราฟ 4.1 และ 4.2 แสดงว่าข้อมูลส่วนตกค้างจากการทดลองมีการแจกแจงที่ไม่ปกติ และความแปรปรวนของส่วนตกค้างไม่คงซึ่งไม่สอดคล้องกับการคำนวณในการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียลเชิงเศษส่วน ดังนั้นต้องหาวิธีในการแปลงข้อมูลก่อนนำมาวิเคราะห์

Ricahrd E DeVor (2007) แนะนำการจัดการข้อมูลที่มีความแปรปรวนไม่คงที่ลักษณะนี้ โดยให้แปลงความแปรปรวนของส่วนตักข้างให้คงที่ (Variance Stabilizing Transformation) จากข้อมูลในการวิจัยเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อความโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อนนี้ใช้การแปลงโดยใช้วิธีแปลงข้อมูลบ็อกค็อก (Box Cox Transformation) โดยใช้การแปลงดังสมการที่ 4.3

$$Y_t = \frac{y^\lambda - 1}{\lambda} \quad ; \text{เมื่อ } \lambda \neq 0 \quad (4.3)$$

โดยค่าแลมดา (λ) ได้มาจากการคำนวณแลมดาที่เหมาะสมจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยค่าแลมดาที่เหมาะสม คือ -0.37 โดยมีข้อมูลที่แปลงแล้วแสดงดังตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองที่ผ่านการแปลงข้อมูลด้วยบ็อกค็อก

ลำดับ มาตรฐาน	ปัจจัยที่ศึกษา							ผลตอบ			
								การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2	
	A	B	C	D	E	F	G	ระยะโค้ง (มม.)	ค่าแปลง (Y_t)	ระยะโค้ง (มม.)	ค่าแปลง (Y_t)
1,17	-	-	-	-	-	-	-	0.83687	1.06811	1.17664	0.94159
2,18	+	-	-	-	-	-	+	0.86777	1.05388	0.524	1.06811
3,19	-	+	-	-	-	+	-	0.69959	1.14132	0.9871	1.00482
4,20	+	+	-	-	-	+	+	0.82	1.07619	0.819	1.07668
5,21	-	-	+	-	+	+	+	0.43389	1.36197	0.454	1.33934
6,22	+	-	+	-	-	+	-	0.8859	1.04585	0.8762	1.05011
7,23	-	+	+	-	-	-	+	0.532	1.26303	0.428	1.36888
8,24	+	+	+	-	+	-	-	1.2116	0.93144	0.83113	1.07083
9,25	-	-	-	+	-	+	+	0.394	1.41145	0.405	1.39715
10,26	+	-	-	+	+	+	-	0.61604	1.19631	0.65824	1.16734
11,27	-	+	-	+	+	-	+	0.323	1.51913	0.418	1.38091
12,28	+	+	-	+	-	-	-	0.55335	1.24477	0.59267	1.21355
13,29	-	-	+	+	+	-	-	0.64387	1.17691	0.65286	1.17089
14,30	+	-	+	+	-	-	+	0.435	1.36069	0.375	1.4375
15,31	-	+	+	+	-	+	-	0.47403	1.31812	0.49881	1.29349
16,32	+	+	+	+	+	+	+	0.43163	1.36461	0.33556	1.49784

จากผลตอบของข้อมูลหลังการแปลงข้อมูลทำการวิเคราะห์ผลตามขั้นตอนดังนี้

- 1). การประมาณผลกระทบปัจจัยหลักและอันตรกิริยาร่วม (Estimate Factor Effects)
- 2). สร้างแบบจำลองเริ่มต้น (Form Initial Model)
- 3). วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล
- 4). การแก้ไขแบบจำลอง (Refine Model)

5). วิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residuals Analysis)

1). การประมาณผลกระทบปัจจัยหลักและอันตรกิริยาร่วม (Estimate Factor Effects)

การประมาณผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาร่วมทำให้ทราบเบื้องต้นว่า ปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาใดมีความสำคัญ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตาราง 4.6 โดยการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95

ตารางที่ 4.6 การประมาณผลกระทบ และค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการทดลอง (Estimated Effects and Coefficients for Response; Code Units) ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$)

Term	Effect	Coef	SE Coef	t	p
Constant		1.32156	0.01789	73.88	0.00
A	-0.09963	-0.04981	0.01789	-2.78	0.033
B	0.02972	0.01486	0.01789	0.83	0.418
C	0.08036	0.04018	0.01789	2.25	0.042
D	0.27819	0.1391	0.01789	7.78	0.00
E	0.00812	0.00406	0.01789	0.23	0.823
F	0.02342	0.01171	0.01789	0.65	0.522
G	0.28619	0.14309	0.01789	8.00	0.00
A*B	-0.04661	-0.02331	0.01789	-1.30	0.211
A*C	0.00959	0.00479	0.01789	0.27	0.792
A*D	0.06519	0.0326	0.01789	1.82	0.087
A*E	0.00224	0.00112	0.01789	0.06	0.951
A*F	-0.04313	-0.02157	0.01789	-1.21	0.245
A*G	-0.06422	-0.03211	0.01789	-1.79	0.092
B*D	0.06555	0.03277	0.01789	1.83	0.086
A*B*D	0.01031	0.00516	0.01789	0.29	0.777

จากผลการทดลองจากข้อมูลแปลงสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระยะเวลาโค้งของแผงวงจรแบบอ่อนที่ระดับนัยสำคัญ $p < 0.05$ มี 4 ปัจจัย ได้แก่

1. ปัจจัยทิศทางการตัดแผ่นเคลือบด้านบน (A)
2. ปัจจัยแผ่นรับแรงดึงในการผลิตแบบม้วน (C)
3. ปัจจัยแผ่นกระจายแรงกดในกระบวนการเคลือบอย่างรวดเร็ว (D)
4. ปัจจัยแบบของถาดใส่งานในกระบวนการผลิต (G)

การวิเคราะห์ผลการทดลองจากข้อมูลแปลงมีผลให้สามารถสรุปการมีนัยสำคัญของปัจจัยได้ชัดเจนมากขึ้น ในการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลที่ยังไม่ผ่านการแปลงพบว่าปัจจัย A และ C มีค่า

ใกล้เคียงกับระดับนัยสำคัญที่ $p < 0.05$ แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยข้อมูลหลังการแปลงพบว่ามีสองปัจจัย A และ C มีผลเพิ่มเข้ามาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95

2.) สร้างแบบจำลองเริ่มต้น (Form Initial Model)

แบบจำลองเบื้องต้นประกอบด้วยปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาร่วมทุกปัจจัย โดยค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละเทอมของปัจจัย หาได้จากค่าผลกระทบของแต่ละปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาร่วมหารด้วยสอง สร้างแบบจำลองเต็มรูปแบบได้ดังสมการที่ 4.4

จากสมการ y_i คือ ค่าระยะความโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อนของข้อมูลแปลง โดยมีสมการทำนายผลแบบเข้ารหัส (Code Units) จากการทดลอง ดังสมการ 4.4

$$y_i = 1.32156 - 0.0498*A + 0.01486*B + 0.4018*C + 0.1391*D \quad (4.4)$$

$$+ 0.0046*E + 0.01171*F + 0.14309*G - 0.02331*A*B + 0.00479*A*C$$

$$+ 0.0326*A*D + 0.0112*A*E - 0.02157*A*F - 0.03211*A*G$$

$$+ 0.03277*B*D + 0.00516*A*B*D$$

3). วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

การทดสอบทางด้านสถิติใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลัก และอันตรกิริยาร่วม แสดงดังตาราง 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อแปลงค่าข้อมูล (Analysis of Variance for Response)

แหล่งความแปรปรวน	DF	SS	MS	F	p
ผลจากปัจจัยหลัก	7	1.33215	0.19031	12.220	0.000
ผลจากอันตรกิริยาร่วม 2 ปัจจัย	7	0.17177	0.02454	1.580	0.213
ผลจากอันตรกิริยาร่วม 3 ปัจจัย	1	0.01022	0.01022	0.660	0.430
ค่าผิดพลาดของส่วนตกค้าง (Residual Error)	16	0.24918	0.01557		
Pure Error	16	0.24918	0.01557		
ผลรวม	31	1.76331			

จากตารางที่ 4.4 ค่า p ของผลจากปัจจัยหลักมีค่าเท่ากับ 0.000 โดยมีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้คือ ผลจากปัจจัยหลักมีผลต่อระยะความโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 การตรวจสอบประสิทธิภาพของสมการทำนายผลพบว่าหลังการ

แปลงข้อมูลประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 72.25 เป็น ร้อยละ 82.57 ส่งผลให้สมการมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น คำนวณได้ดังสมการที่ 4.2

$$R^2 = \frac{SS(Model)}{SS(Total)} \quad (4.2)$$

$$R^2 = 0.8257 \text{ หรือเท่ากับร้อยละ } 82.57$$

4). การแก้ไขแบบจำลอง (Refine Model)

เป็นการดึงตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ การวิเคราะห์ความแปรปรวนเบื้องต้นทราบว่าปัจจัยหลัก 4 ปัจจัยที่มีผลต่อความโค้งของแผงวงจรแบบอ่อนอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ 1). ปัจจัยทิศทางการตัดแผ่นเคลือบด้านบน (A) 2). ปัจจัยแผ่นรับแรงดึงในการผลิตแบบม้วน (C) 3). ปัจจัยแผ่นกระจายแรงกดในกระบวนการเคลือบอย่างรวดเร็ว (D) 4). ปัจจัยแบบของภาคใส่งานในกระบวนการผลิต (G) ซึ่งอันตรกิริยาร่วมที่ไม่มีผลกระทบต่อระยะความโค้งจะต้องถูกเอาออกจากแบบจำลอง จาก 4 ปัจจัยหลักที่มีผลพบว่ามี 2 ปัจจัยที่มีข้อกำหนดในการนำผลการวิเคราะห์ไปปรับปรุงกระบวนการได้แก่

1.) ปัจจัยทิศทางการตัดแผ่นเคลือบด้านบน (A) จากการทดลองเบื้องต้นการตัดแผ่นเคลือบด้านบนจะทำการตัดเป็นแบบขนาด 1 นิ้ว x 2 นิ้ว แสดงในรูป 4.4 ทีมงานพัฒนาเทคโนโลยีบริษัทวิจัยมีแผนในการเปลี่ยนวิธีการตัดแผ่นเคลือบด้านบนไปเป็นขนาด 1 นิ้ว x 250 มม. โดยเครื่องตัดอัตโนมัติ แสดงในรูป 4.5 ทำให้กระบวนการติดแผ่นเคลือบด้านบนจะเปลี่ยนไปจากเดิมไม่สามารถนำการปรับปรุงการตัดไปใช้กับเทคโนโลยีใหม่ได้



รูปที่ 4.4 แสดงแผ่นเคลือบด้านบนขนาด 1 นิ้ว x 2 นิ้ว



รูปที่ 4.5 แสดงแผ่นเคลือบด้านบนขนาด 2 นิ้ว x 250 มม.ตัดด้วยเครื่องอัตโนมัติ

2.) ปัจจัยแผ่นรับแรงดึงในกระบวนการผลิตแบบม้วน (C) จากจากการวิเคราะห์ด้านต้นทุนพบว่าการใช้แผ่นรับแรงดึงในกระบวนการผลิตแบบม้วนมีต้นทุนเพิ่มขึ้น 33.27 บาท ต่อ การผลิต 100 ชิ้นหรือเพิ่มขึ้น 22.94% แสดงดังตารางที่ 4.8 มีผลให้ทางผู้บริหารยังไม่อนุมัติให้ใช้แผ่นรับแรงดึงในกระบวนการผลิต แต่จะเก็บไว้ศึกษาจุดคุ้มทุนในอนาคต

ตารางที่ 4.8 แสดงต้นทุนการใช้แผ่นรับแรงดึงในกระบวนการผลิตแบบม้วน

	ราคาค่าต้นทุนการผลิตแบบม้วน (Roll to Roll) / 100 ชิ้น	ผลต่าง \$	อัตราผลต่าง %
แบบปกติ	\$4.4 (136.4 บาท)	\$1.31 (33.27บาท)	+22.94%
แบบใช้แผ่นรับแรงดึง	\$5.71(177.01 บาท)		

ดังนั้นจากข้อกำหนดในการวิจัยดังกล่าวมาแล้วทำให้มีเฉพาะปัจจัยหลัก D และ G เท่านั้นที่มีผลกระทบต่อระยะความโค้งของแผงวงจรแบบอ่อนอย่างมีนัยสำคัญ ดังตาราง 4.9

ตารางที่ 4.9 การประมาณการผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยหลัก D และ G

Term	Effect	Coef	SE Coef	t	p
Constant		1.3216	0.02183	60.54	0.00
D	0.2782	0.1391	0.02183	6.37	0.033
G	0.2862	0.1431	0.02183	6.56	0.418

จากตารางข้อสรุปข้างต้นแก้ไขแบบจำลองใหม่ โดยใช้เพียงปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อระยะความโค้งของแผงวงจรแบบอ่อน แสดงสมการทำนายผลระยะความโค้งด้วยข้อมูลแปลงแบบเข้ารหัส ดังสมการ 4.5

$$y_i = 1.3216 + 0.1391*(+)*D + 0.1431*(+)*G \quad (4.5)$$

การแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลองแบบใหม่ ดังตารางที่ 4.10 เพื่อเป็นการยืนยันความมีนัยสำคัญของปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อระยะความโค้งของแผงวงจรแบบอ่อน การพิจารณาค่าสัดส่วนของความพอเพียงของสมการ (Lack of Fit) ซึ่งเป็นตัวบอกความพอเพียงของตัวแปรในสมการ ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.831 สรุปได้ว่าสมการมีความพอเพียงของตัวแปร

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลอง (Analysis of Variance for Response)

แหล่งความแปรปรวน	DF	SS	MS	F	p
ผลจากปัจจัยหลัก	2	1.27437	0.63719	41.79	0.00
ค่าผิดพลาดของส่วนตกค้าง (Residual Error)	29	0.44215	0.01525		
ความไม่เหมาะสมของสมการ (Lack of Fit)	1	0.00074	0.00074	0.05	0.831
Pure Error	16	0.16385	0.01024		
ผลรวม	31	1.71652			

ในสมการค่าสัดส่วนความแปรปรวนที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4.10 จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสมการในการทำนายระยะความโค้งคิดเป็นร้อยละ 74.2 จากค่าประสิทธิภาพที่ไม่สูงดังกล่าวมาจากการตัดปัจจัย ทิศทางการตัดแผ่นเคลือบด้านบน และ ปัจจัยการใช้ปัจจัยการใช้แผ่นรับแรงดึงในการผลิตแบบม้วน

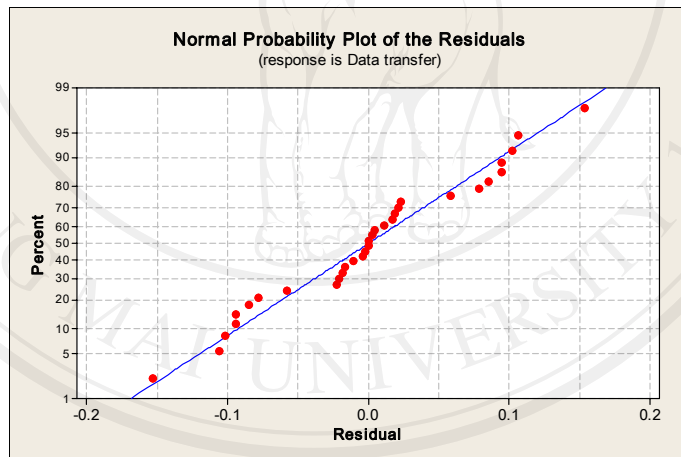
$$R^2 = \frac{SS(Model)}{SS(Total)} \tag{4.2}$$

$$R^2 = 0.742 \text{ คิดเป็นร้อยละ } 74.2$$

จากสมการทำนายผลเนื่องด้วยได้มีการแปลงข้อมูลด้วยสมการ 4.2 ทำให้ระยะความโค้งที่ต้องการจากสมการข้อมูลแปลงจะต้องมีค่ามากที่สุดเพื่อจะได้ระยะความโค้งจริงที่น้อยที่สุด โดยจากสมการ 4.2 สามารถแปลงกลับเป็นระยะความโค้งงอที่ถูกทำนายเท่ากับ 0.387 มม.

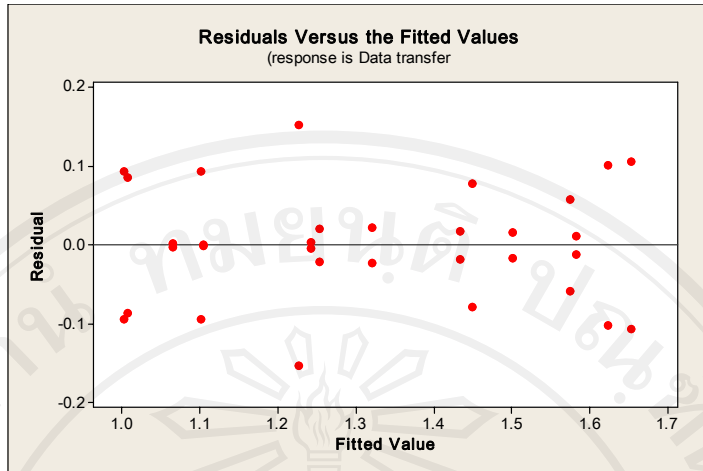
4). วิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residuals Analysis)

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติโดยการนำส่วนตกค้างของข้อมูลมาสร้างกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Plot of Residuals) ดังรูปที่ 4.6 จากลักษณะของส่วนตกค้างของระยะความโค้งงอมีลักษณะการกระจายตัวเป็นปกติ



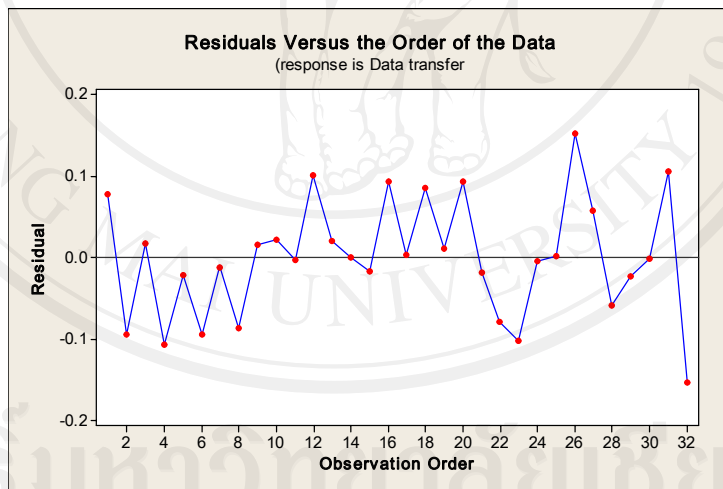
รูปที่ 4.6 กราฟการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง

รูปที่ 4.7 การตรวจสอบความคงที่ของความแปรปรวน โดยใช้แผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละระดับของปัจจัยพบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวสม่ำเสมอค่าของส่วนตกค้างไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนาย



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าระหว่างส่วนตกค้างกับค่าทำนาย

การพล็อตกราฟของส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (I Chart of Residuals) จากกราฟพบว่าค่าของส่วนตกค้างไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง มีการกระจายตัวเป็นอิสระไม่อยู่ด้านใดด้านหนึ่งของกราฟ แสดงดังรูป 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง

สรุปว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลแปลงค่าเพราะมีความสอดคล้องในการใช้ทำนายระยะโค้งของแผงวงจรแบบอ่อน โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อระยะความโค้งงอ ได้แก่ 1).จำนวนชั้นแผ่นกระจายแรงกดในกระบวนการเคลือบอย่างรวดเร็ว 2).แบบของภาคใส่งานแผงวงจรแบบอ่อนมีผลต่อระยะความโค้งงออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95

4.2. การทดสอบยืนยันผลการปรับปรุงปัจจัยที่มีผลต่อความโค้งงอ

หลังจากทราบค่าของปัจจัยหลักที่ให้ค่าระยะความโค้งที่น้อยที่สุดแล้ว ทำการตั้งค่าของปัจจัยหลักเหล่านั้น คือ

ปัจจัยที่ไม่มีผลต่อการโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อนปรับตั้งตามปัจจุบัน

1. ปรับตั้งปัจจัย ทิศทางการตัดแผ่นเคลือบด้านทิศทางเดิมคือ X
2. ปรับตั้งปัจจัยแรงดึงในการผลิตแผงวงจรอ่อนแบบม้วน 12 นิวตันต่อตารางเมตร
3. ปรับตั้งปัจจัยไม่ใช้แผ่นช่วยรับแรงดึงในการผลิตแบบม้วน
4. ปรับตั้งปัจจัยวิธีการวางแผ่นเคลือบด้านบนในขบวนการติดแผ่นเคลือบด้านปกโดยวาง

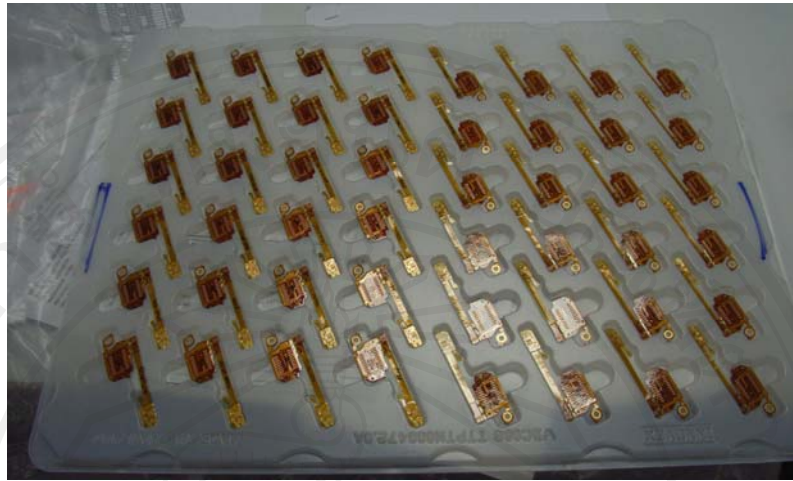
แบบปกติ

5. ปรับตั้งปัจจัยวิธีตรวจสอบชิ้นงานไม่ต้องใช้กระดาษแข็งรองขณะทำการตรวจสอบการปรับตั้งค่าปัจจัยที่มีผลต่อการโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อนจำนวนสองปัจจัย

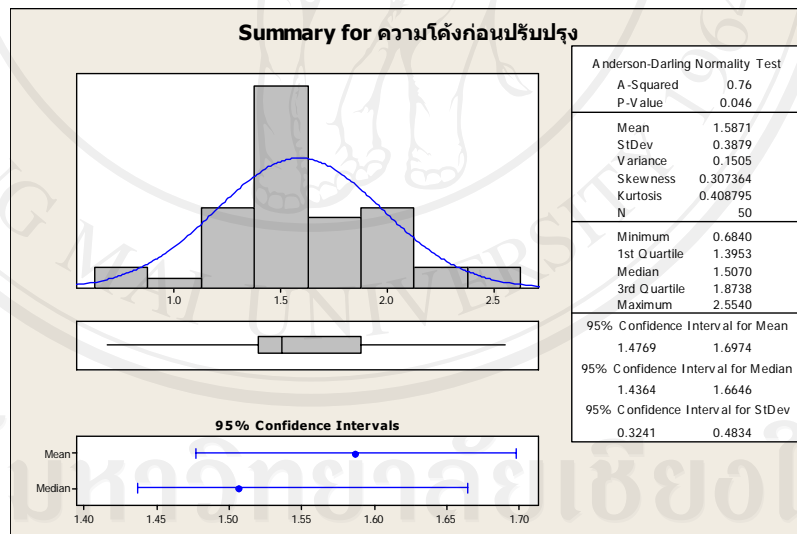
1. ปรับตั้งปัจจัย การใช้แผ่นกระจายแรงกดในขบวนการเคลือบอย่างรวดเร็ว จากเดิมใช้ด้านล่างด้านเดียว ปรับมาใช้สองด้าน บน-ล่าง

2. ปรับตั้งปัจจัย การใช้ถาดบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการผลิต เปลี่ยนมาใช้แบบใหม่ซึ่งมีร่องควบคุมการจับผลิตภัณฑ์

การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองใช้งานผลิตภัณฑ์ WDC จำนวน 1,008 ชิ้น (เท่ากับมาตรฐานในการผลิต 1 หน่วยการผลิต) ในการผลิตจะทำการแบ่งจากมาตรฐานหน่วยการผลิตเป็น 3 หน่วยย่อย จำนวนต่อหน่วยย่อยประมาณ 330 ชิ้น การวัดระยะการโค้งงอจะทำการสุ่มวัด 30 ตัว จาก 330 ชิ้น โดยการสุ่มจะทำการสุ่มวัด 5 ชิ้นงานจาก 1 ถาดผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 4.9

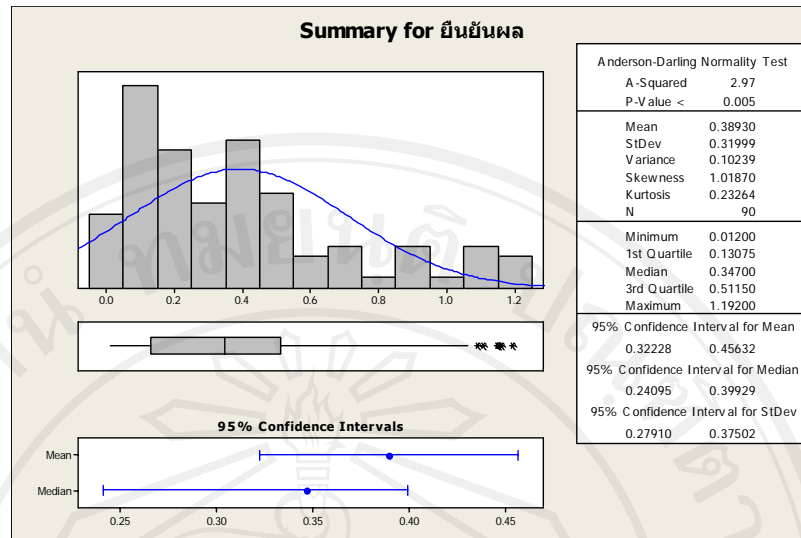


รูปที่ 4.9 แสดงผลิตภัณฑ์ในถาดใส่เพื่อตรวจวัดระยะความโค้ง



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความถี่ของระยะการ โค้งงอกก่อนปรับปรุงขบวนการผลิต

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright © by Chiang Mai University
 All rights reserved



รูปที่ 4.11 กราฟแท่งแสดงระยะการโค้งงอจากการยืนยันผลการทดลอง

การเก็บข้อมูลเพื่อนำมาประเมินผล โดยทำการเปรียบเทียบระยะการโค้งงอก่อนและหลังการปรับปรุง จากการรูป 4.10 แสดงระยะความโค้งงอก่อนปรับปรุง คือ 1.4-1.7 มม. ที่ 95% ความเชื่อมั่น และหลังการปรับปรุงระยะความโค้งงอ 0.3-0.46 มม.ที่ 95% ความเชื่อมั่น ดังรูปที่ 4.11 สรุปได้ว่าการออกแบบการทดลองและหาปัจจัยที่มีผลต่อความโค้งงอของแผงวงจรแบบอ่อน สามารถลดระยะความโค้งงอจากระยะความโค้งงอที่เกิน 0.75 มม. ก่อนทำการปรับปรุง