

บทที่ 4

การออกแบบการทดลอง

4.1 การเลือกตัวแปรตอบสนอง

แนวทางการพิจารณาเลือกตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในการออกแบบการทดลองที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ที่ต้องการปรับปรุงความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกนั้น จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เพื่อหาตัวแปรตอบสนองที่มีความสำคัญและเป็นตัวชี้วัดความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกได้ดี หรืออาจกล่าวได้ว่าตัวแปรตอบสนองนั้นสามารถที่จะเป็นตัวแทนของกระบวนการที่ต้องการปรับปรุง ซึ่งการวิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปรตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกได้มีการวิเคราะห์ไว้ในบทที่ 3 ในเรื่องของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองของแผ่นกระดาษลูกฟูก ผลจากการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรตอบสนองที่มีความสำคัญมากที่สุดที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกนั้น คือ ค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) และตัวแปรตอบสนองที่มีความสำคัญรองลงมา คือ ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของลอนลูกฟูก (Edge Crush) ดังนั้นเพื่อการออกแบบการทดลองที่มีสารสนเทศที่น่าเชื่อถือนั้น มีการพิจารณาการเลือกตัวแปรตอบสนอง อยู่ 2 วิธี คือ

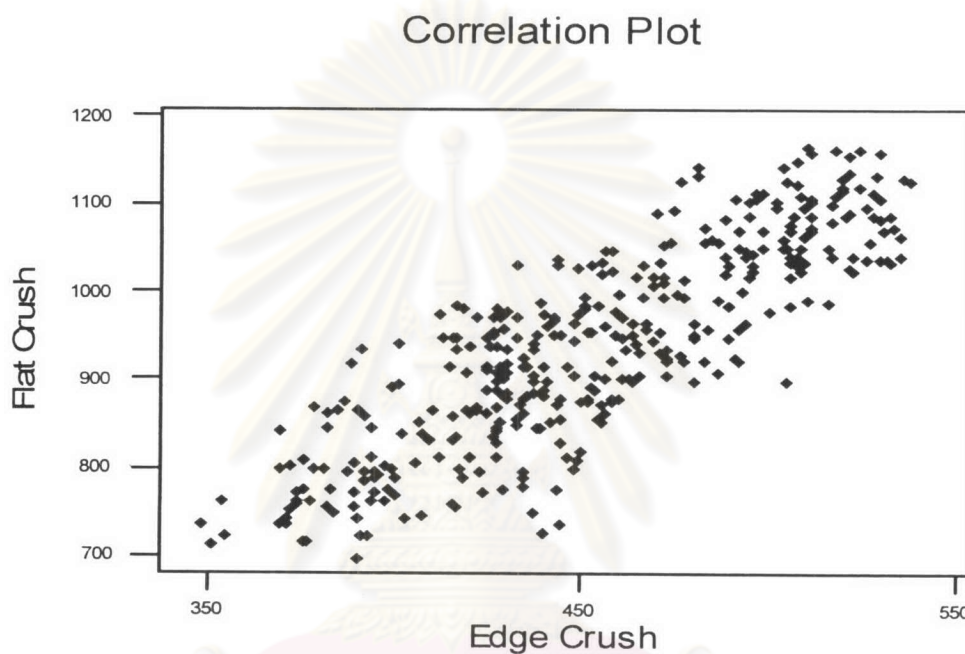
1. เลือกตัวแปรตอบสนองเพียง 1 ตัวแปร (Single Response Variable) คือค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush)
2. เลือกตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ตัวแปร (Multiple Response Variable) คือ ค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) และค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของลอนลูกฟูก (Edge Crush)

หากเลือกในวิธีที่ 2 จะทำให้การวิเคราะห์ค่อนข้างยุ่งยาก แต่ถ้าเลือกในวิธีที่ 1 อาจทำให้สูญเสียสารสนเทศที่ควรสนใจไปบางประการในส่วนที่ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ ดังนั้นจึงทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ตัว คือ ค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) และ ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของลอนลูกฟูก (Edge Crush) ว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ อย่างไร

ในการพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถดำเนินการได้โดยการทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient - ρ) ซึ่งมีสมมติฐานในการทดสอบ ดังนี้

$$H_0 : \text{ตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กัน} \quad | \quad H_0 : \rho = 0$$

$$H_1 : \text{ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน} \quad | \quad H_1 : \rho \neq 0$$



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) และ ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของลอนลูกฟูก (Edge Crush)

จากรูปที่ 4.1 พบว่าค่า Pearson Correlation ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) และ ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของลอนลูกฟูก (Edge Crush) เท่ากับ 0.932 และมีทั้งค่า P-Value เท่ากับ 0.001 หมายความว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีความแตกต่างจากศูนย์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % จึงสรุปได้ว่าค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) มีความสัมพันธ์กับค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของลอนลูกฟูก (Edge Crush) จริง ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลอง จึงเลือกค่าตัวแปรตอบสนองเพียงค่าเดียว คือ ค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาข้างต้น

4.2 การออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัย

จากการวิเคราะห์หาสาเหตุและปัจจัยที่ซ่อนเร้นของกระบวนการผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูก ในบทที่ 3 ที่ผ่านมาพบว่า มีปัจจัยสำคัญที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกทั้งหมด 9 ปัจจัยและตัวแปรตอบสนองที่มีความสำคัญที่สุดและนำมาวิเคราะห์ในการออกแบบการทดลองคือค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) เพียงค่าเดียว โดยค่าระดับของปัจจัยที่นำมาออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัยนั้นเป็นค่าที่ใช้ในการผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูกปัจจุบันที่อยู่ในช่วงที่คาดว่าจะผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูกให้มีคุณภาพดีที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่จะนำไปทำการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		หน่วย
	-1	1	
1. สัดส่วนแป้งแห้งSF (Solid Content of SF)	21	21.5	เปอร์เซ็นต์
2. สัดส่วนแป้งแห้งDF (Solid Content of DF)	23	23.5	เปอร์เซ็นต์
3. แรงลมดูด (Suction Fan)	400	500	mm.Aq.
4. ระยะห่างระหว่างลูกปาดกับลูกแป้งของSF (Gap Glue Roll & Doctor Roll: Single Facer)	0.28	0.4	มิลลิเมตร
5. ระยะห่างระหว่างลูกปาดกับลูกแป้งของDF (Gap Glue Roll & Doctor Roll: Double Facer)	0.18	0.45	มิลลิเมตร
6. อัตราส่วนความเร็วลูกแป้งกับลูกลอนล่างของDF (G/L Speed Ratio: Double Facer)	97	99	เปอร์เซ็นต์
7. อุณหภูมิแผ่นความร้อน (Temperature of Heating Plate)	190	230	องศาเซลเซียส
8. ระยะการกดระหว่างลูกกลิ้งทับผ้าใบกับแผ่นความร้อน (Gap Weight Roll)	3.5	4.5	มิลลิเมตร
9. ระยะการกดระหว่างลูกกลิ้งทับผ้าใบกับแผ่นระบายความร้อน (Gap Cooling Part)	3.5	4.5	มิลลิเมตร

4.2.1 ตัวแปรตอบสนอง

ค่าตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง คือ ค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) มีหน่วยเป็น $\text{kg}/33.2\text{cm}^2$ โดยน้ำหนักกระทำตั้งฉากกับกระดาษทำผิวกล่อง (Liner Board) จนกระทั่งลอนลูกฟูกยุบลงจนแบน ถ้าแรงกดกระทำตั้งฉากกับแผ่นลูกฟูกอย่างแท้จริงแล้ว ลอนที่ดีจะอยู่ในลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมมุมฉากก่อนจะยุบตัวลงในแนวแรงไม่เอนไปข้างใดข้างหนึ่งลักษณะดังกล่าวจะทำให้ได้ค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) สูงสุด แต่ถ้าหากลอนเอียงไปด้านใดด้านหนึ่งแล้วค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) จะต่ำลง นอกจากนี้แนวลูกฟูกที่มีลอนไม่ดี ในลักษณะดังกล่าวจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อเอาน้ำหนักที่กดออก แม้ว่าลอนจะยังไม่ล้มก็ตาม

4.2.2 การออกแบบการทดลอง

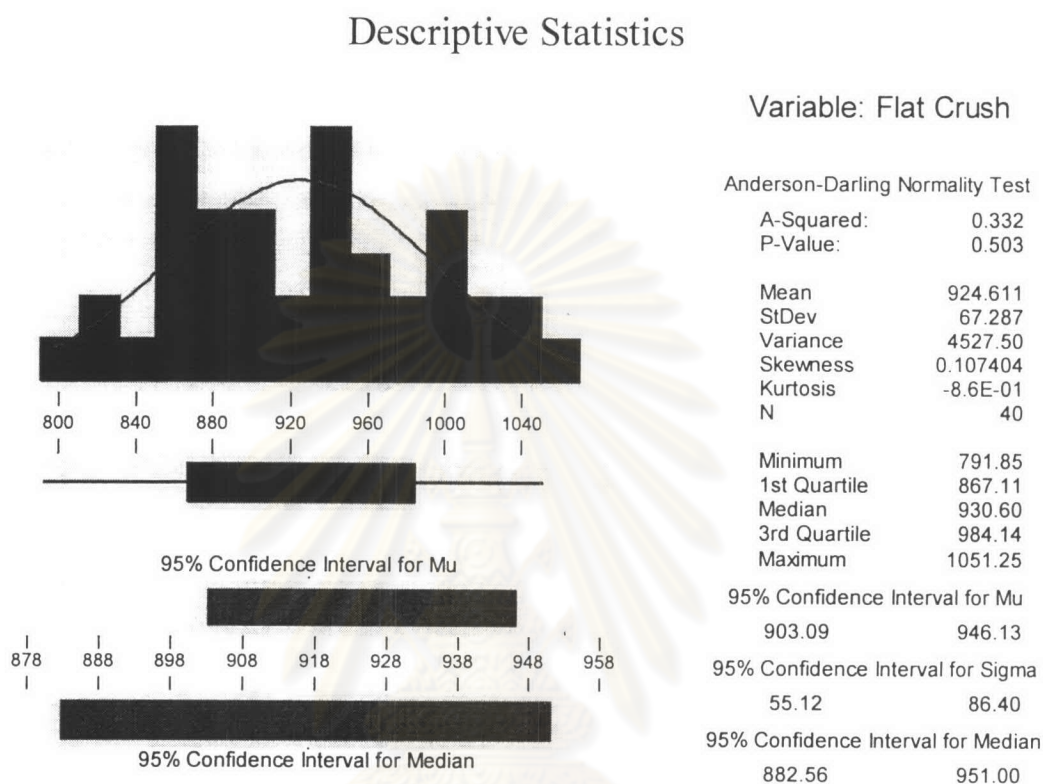
การออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ใช้การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Center Points) โดยที่ k คือ จำนวนของปัจจัยที่นำมาทดลอง และ 2 คือ จำนวนระดับของแต่ละปัจจัย และกำหนดให้ที่แต่ละระดับของแต่ละปัจจัยเป็น ต่ำ (-) กับ สูง (+) ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง ดังนั้นสรุปได้ว่าการออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ เป็นการออกแบบการทดลองแบบ 2^{9-4} Fractional Factorial Design ที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลางเข้าไป 8 จุด (การออกแบบมิติ IV) มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 40 การทดลอง โดยแสดงรายละเอียดของการออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัยไว้ในภาคผนวก ข (ตารางที่ ข.1 และ ข.2) เหตุผลที่เลือกการทดลองแบบนี้เนื่องจาก ปัจจัยที่นำมาทำการออกแบบการทดลอง ทั้ง 9 ปัจจัยนั้นมีความสำคัญเท่าๆกัน จึงไม่สามารถละเลยปัจจัยบางปัจจัยได้ รวมทั้งมีข้อจำกัดในการทดลองซึ่งในการทดลอง 1 การทดลองนั้นจำเป็นต้องใช้เวลานาน ซึ่งแสดงภาพของทั้ง 9 ปัจจัยไว้ในภาคผนวก ง โดยผลของการทดลองที่ได้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 แสดงค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกของการออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัยไว้ในภาคผนวก ข (ตารางที่ ข.3) ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการทดลองเพื่อกรองปัจจัย

Run Order	Solid Content(SF)	Solid Content(DF)	Suction Fan	Glue Gap SF	Glue Gap DF	G/L Speed Ratio	Temp. Hot Plate	Gap Weight Roll	Gap Cooling Part	Flat Crush
1	21.5	23.5	300	0.4	0.18	99	230	3.5	4.5	1040.85
2	21	23	300	0.28	0.45	98	190	3.5	3.5	933.25
3	21	23.5	300	0.28	0.18	98	230	3.5	3.5	972.85
4	21.5	23	450	0.4	0.45	98	230	3.5	3.5	876.7
5	21	23.5	300	0.28	0.45	99	190	4.5	4.5	890.4
6	21.5	23	300	0.28	0.18	99	190	3.5	3.5	865.45
7	21	23	450	0.4	0.18	99	230	3.5	3.5	932.95
8	21.25	23.25	375	0.34	0.315	98.5	210	4	4	912.8
9	21.25	23.25	375	0.34	0.315	98.5	210	4	4	860.1
10	21.25	23.25	375	0.34	0.315	98.5	210	4	4	906.5
11	21.5	23.5	450	0.4	0.45	99	230	4.5	4.5	791.85
12	21	23.5	300	0.4	0.45	98	230	3.5	4.5	877.1
13	21	23	450	0.4	0.45	98	190	4.5	4.5	839.35
14	21.25	23.25	375	0.34	0.315	98.5	210	4	4	942.75
15	21.5	23.5	450	0.28	0.18	99	230	4.5	3.5	993.95
16	21.5	23	450	0.4	0.18	99	190	4.5	4.5	933.75
17	21	23	300	0.4	0.45	99	230	4.5	3.5	1002.45
18	21	23	300	0.28	0.18	99	230	4.5	4.5	995.4
19	21.5	23	300	0.4	0.18	98	230	4.5	3.5	875.25
20	21	23.5	450	0.28	0.45	98	230	4.5	3.5	854
21	21	23	300	0.4	0.18	98	190	3.5	4.5	961.25
22	21.5	23.5	300	0.28	0.18	98	190	4.5	4.5	928.25
23	21.25	23.25	375	0.34	0.315	98.5	210	4	4	852.3
24	21	23.5	450	0.4	0.45	99	190	3.5	3.5	907.6
25	21.25	23.25	375	0.34	0.315	98.5	210	4	4	821.2
26	21.5	23.5	450	0.4	0.18	98	190	3.5	3.5	954.1
27	21.5	23	300	0.28	0.45	98	230	4.5	4.5	1051.25
28	21	23.5	450	0.4	0.18	98	230	4.5	4.5	1016.6
29	21	23	450	0.28	0.45	99	230	3.5	4.5	897.1
30	21.5	23	450	0.28	0.18	98	230	3.5	4.5	857.85
31	21	23.5	300	0.4	0.18	99	190	4.5	3.5	872.1
32	21.25	23.25	375	0.34	0.315	98.5	210	4	4	859.75
33	21	23.5	450	0.28	0.18	99	190	3.5	4.5	945.2
34	21	23	450	0.28	0.18	98	190	4.5	3.5	994.3
35	21.5	23	450	0.28	0.45	99	190	4.5	3.5	1010.2
36	21.5	23	300	0.4	0.45	99	190	3.5	4.5	946.55
37	21.25	23.25	375	0.34	0.315	98.5	210	4	4	821.6
38	21.5	23.5	300	0.4	0.45	98	190	4.5	3.5	1043.8
39	21.5	23.5	300	0.28	0.45	99	230	3.5	3.5	957.85
40	21.5	23.5	450	0.28	0.45	98	190	3.5	4.5	987.9

4.2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ผลของการทดลองที่ได้จากการทดลองทั้ง 40 การทดลองนั้น สามารถสรุปผลค่าตัวแปรตอบสนอง (Flat Crush) ได้ดังรูปที่ 4.2



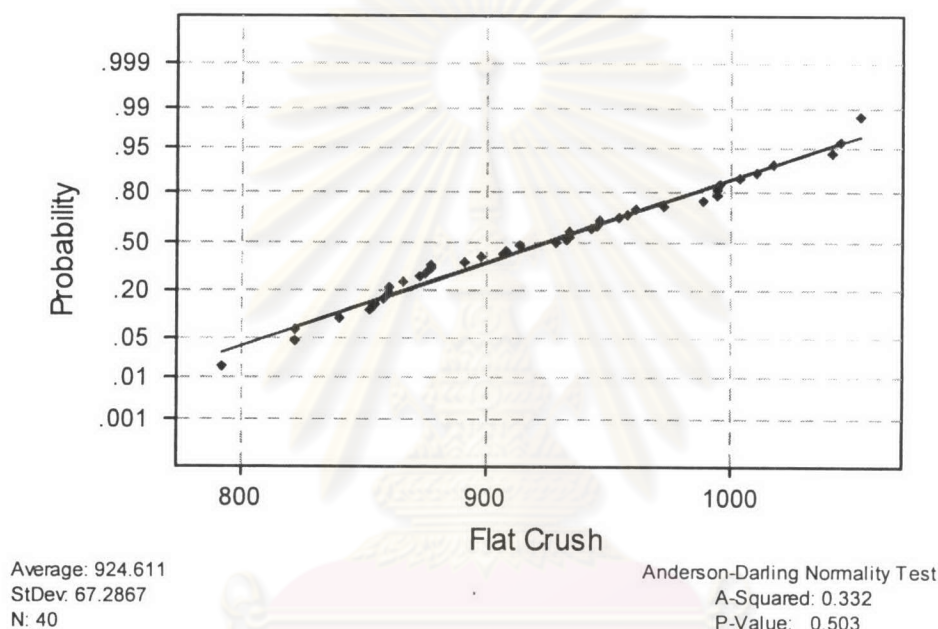
รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงสถิติเชิงพรรณนาของค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) จากการออกแบบการทดลองเพื่อรองรับปัจจัย

ในการออกแบบการทดลองนั้น จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่สำคัญ คือ NID ($0, \sigma^2$) จึงต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ว่าเป็นไปตามเงื่อนไขของ NID ($0, \sigma^2$) หรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ประกอบด้วย การทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของการทดลองภายในเงื่อนไข 3 ประการ คือ ข้อมูลเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์และสรุปผลของการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

4.2.3.1 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นปกติ (Normality Assumption)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นปกติ (Normality Assumption) สามารถตรวจสอบได้ด้วยการทดสอบการกระจายของค่าส่วนตกค้างของค่าตัวแปรตอบสนอง ซึ่งกราฟการกระจายของค่าส่วนตกค้างค่าตัวแปรตอบสนอง ที่ได้เป็นเส้นตรงและมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 สรุปได้ว่า ข้อมูลเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ แสดงดังรูปที่ 4.3

Normality Checking of Flat Crush Testing

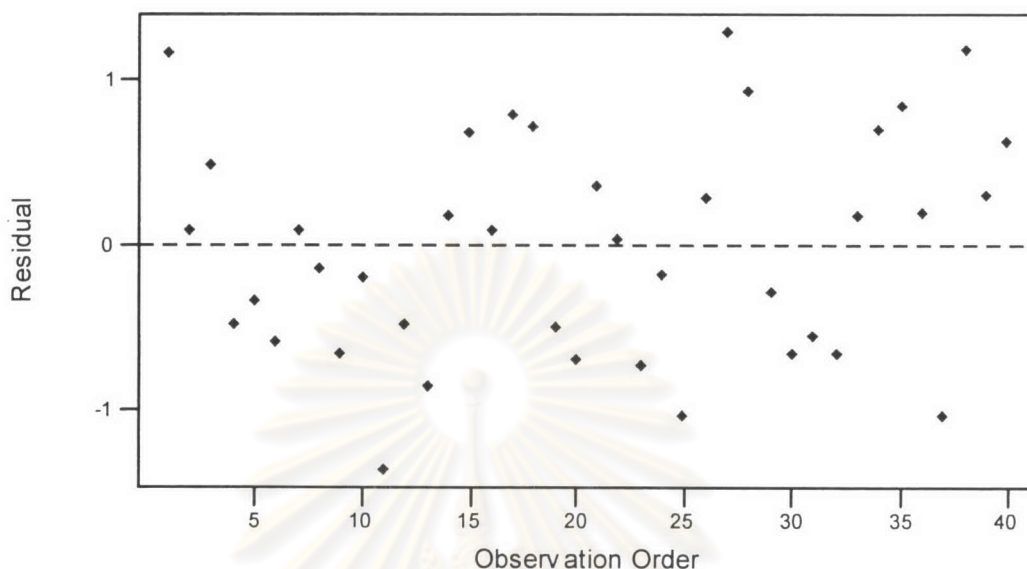


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการกระจายของค่าส่วนตกค้าง

4.2.3.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent) สามารถตรวจสอบโดยการสร้างแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับความต่อเนื่องในการเก็บข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยแผนภาพการกระจายไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบใดๆ ควรที่จะมีการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

Residuals Versus the Order of the Data
(response is Flat Crush)

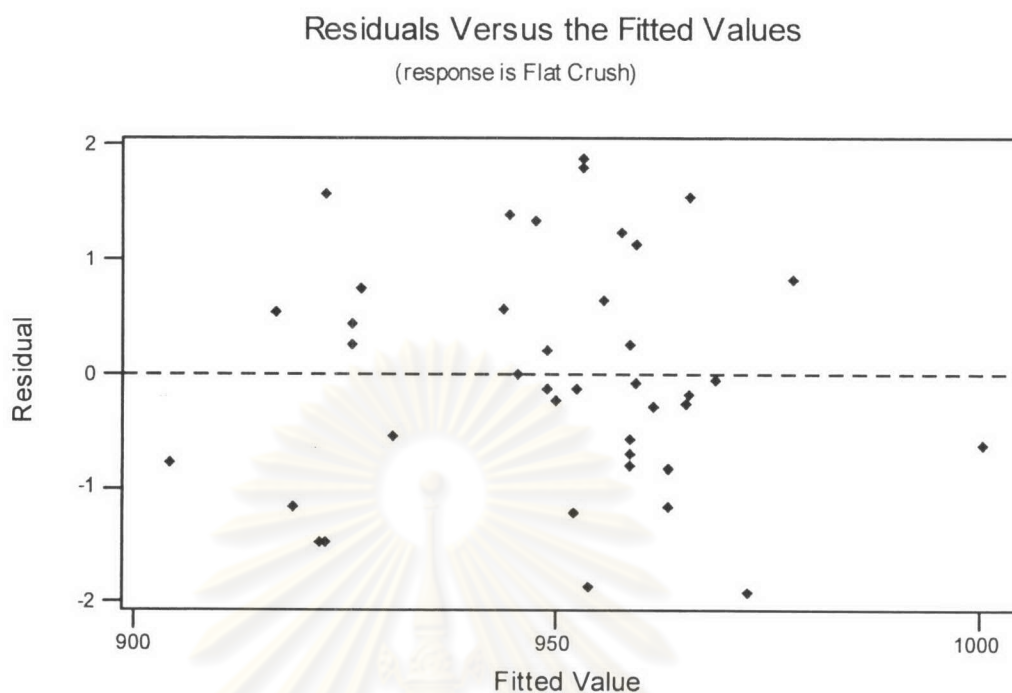


รูปที่ 4.4 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของข้อมูล

จากกราฟสังเกตเห็นได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบ ดังนั้นสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.2.3.3 ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability)

ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) สามารถตรวจสอบได้ โดยการสร้างแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย แสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งแผนภาพการกระจายไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม และมีการกระจายของค่าส่วนตกค้างรอบค่าศูนย์เท่าๆกัน ซึ่งถือได้ว่าตัวแปรตอบสนองนี้มีความเสถียรของค่าความแปรปรวน



รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต

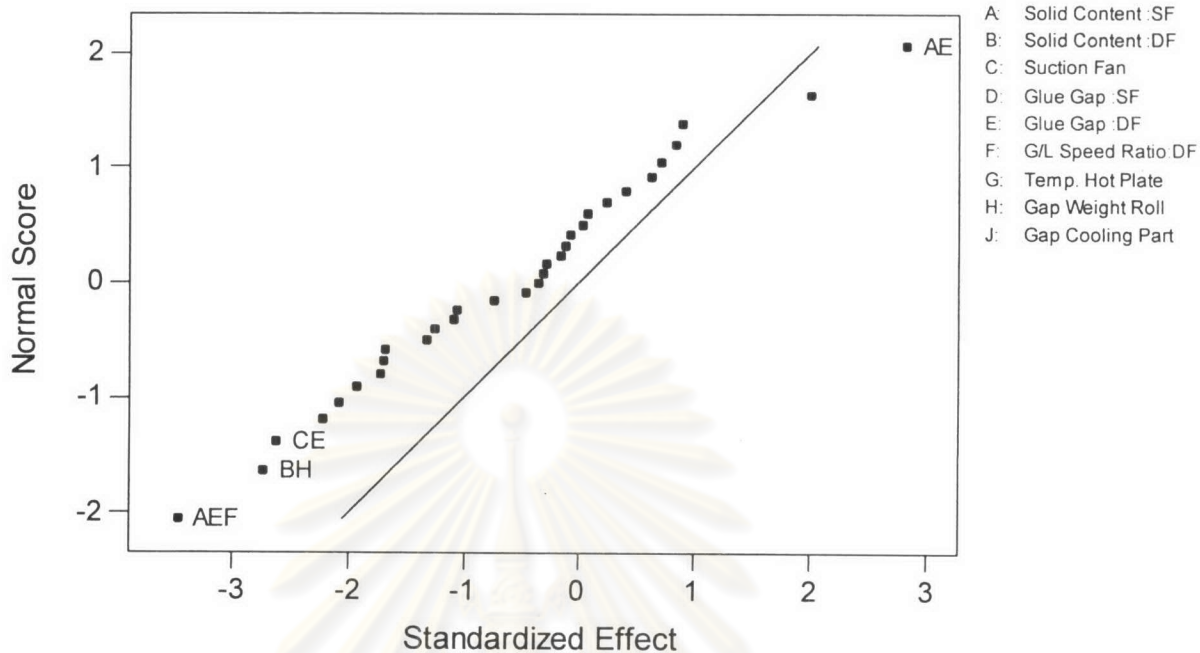
จากกราฟสังเกตได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบและมีการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างบนและล่างค่าศูนย์เท่าๆกัน ดังนั้น สรุปได้ว่า ข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

สรุปผลจากการทดสอบความถูกต้องของตัวแบบของตัวแปรตอบสนอง ที่นำมาทดลองนี้ พบว่า ข้อมูลมีสมมติฐานตรงตามข้อกำหนดทั้ง 3 ข้อ คือ มีการกระจายเป็นแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขที่สำคัญของการออกแบบการทดลองคือ $NID(0, \sigma^2)$

4.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ทำการวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีนัยสำคัญออกมาในรูปของกราฟ Normal Probability Plot และแผนภูมิพาเรโต แสดงดังรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 ตามลำดับ รวมถึงการแสดงผลของการออกแบบการทดลองของผลหลักของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 4.8 และผลของอันตรกิริยาของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 4.9 รวมถึงการแสดงผลภาพข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังรูปที่ 4.10

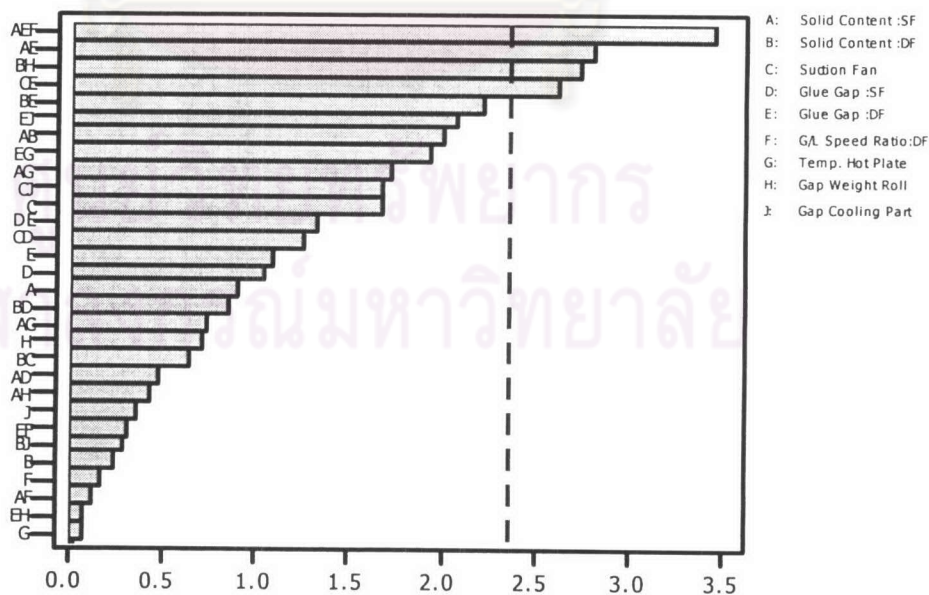
Normal Probability Plot of the Standardized Effects
(response is Flat Crush, Alpha = 0.05)



รูปที่ 4.6 กราฟ Normal Probability Plot แสดงปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีนัยสำคัญของการออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัย

Pareto Chart of the Standardized Effects

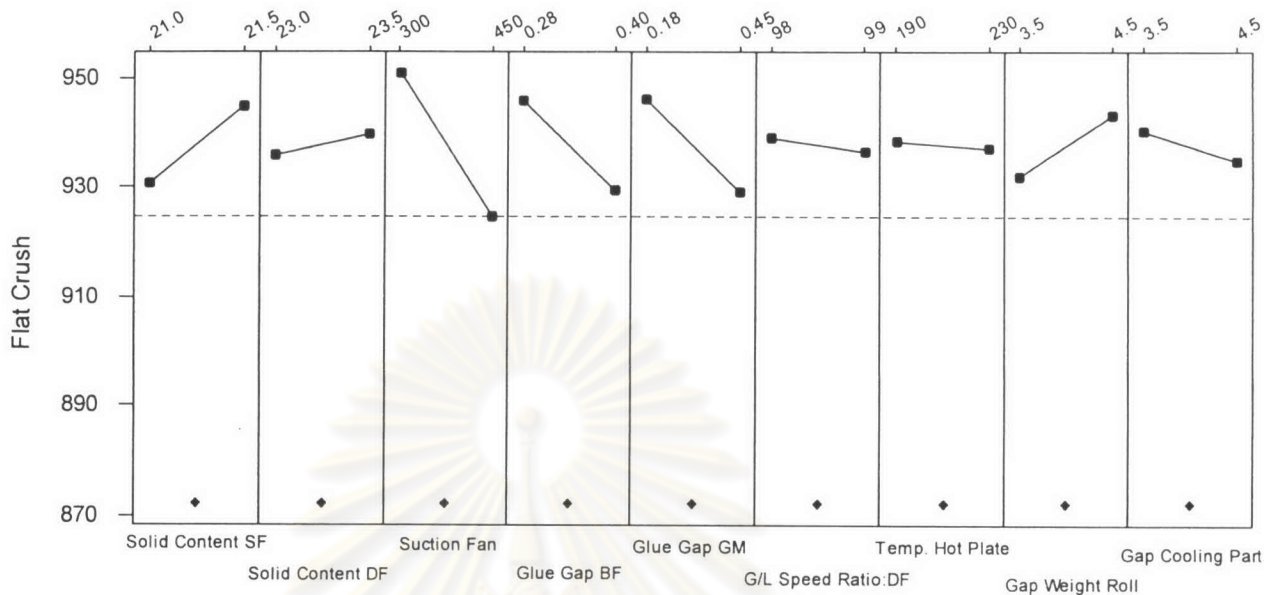
(response is Flat Crush, Alpha = 0.05, only 30 largest effects shown)



รูปที่ 4.7 แผนภูมิพาเรโต แสดงปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีนัยสำคัญของการออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัย

Main Effects Plot for Flat Crush

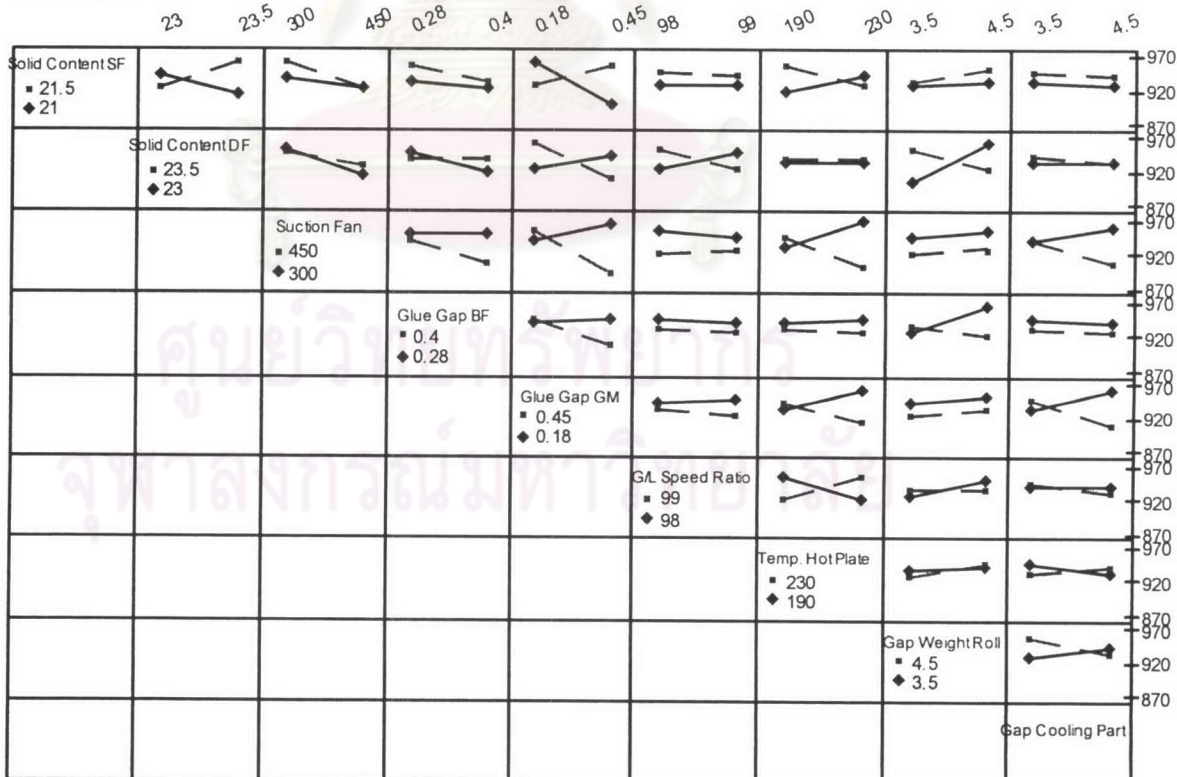
◆ Centerpoint



รูปที่ 4.8 แสดงภาพผลหลักของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของการออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัย

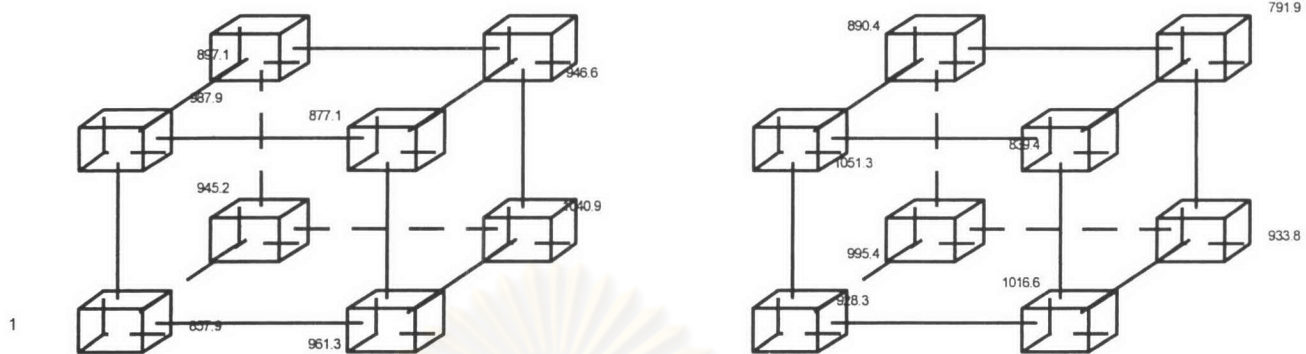
Interaction Plot for Flat Crush

◆ Centerpoint

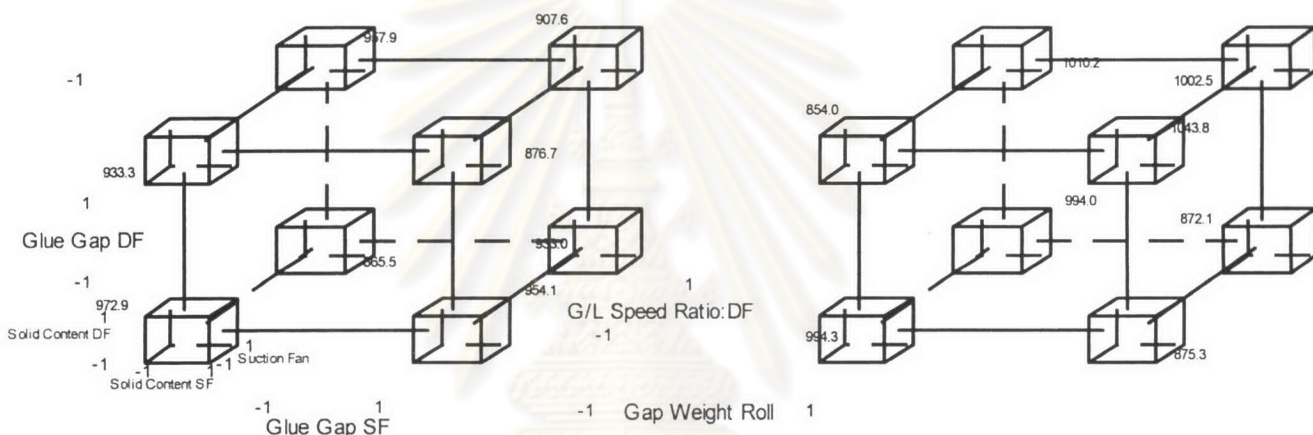


รูปที่ 4.9 ภาพอันตรกิริยาของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของการออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัย

Cube Plot for Flat Crush



Gap Cooling Part



รูปที่ 4.10 แสดงภาพข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองเพื่อกรองบัจฉัย

จากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง (Coded Units) ได้ดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ในส่วนของตารางที่ 4.5 จะแสดงค่าของสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของการออกแบบการทดลอง (Un-coded Units) ได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง(Coded Units)

Estimated Effects and Coefficients for Flat Crush (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		937.73	7.809	120.08	0.000
Solid Content(SF)	13.98	6.99	7.809	0.89	0.401
Solid Content(DF)	3.83	1.92	7.809	0.25	0.813
Suction Fan	-26.29	-13.15	7.809	-1.68	0.136
Glue Gap SF	-16.43	-8.22	7.809	-1.05	0.328
Glue Gap DF	-17.05	-8.52	7.809	-1.09	0.311
G/L Speed Ratio	-2.51	-1.25	7.809	-0.16	0.877
Temp. Hot Plate	-1.22	-0.61	7.809	-0.08	0.940
Gap Weight Roll	11.15	5.57	7.809	0.71	0.499
Gap Cooling Part	-5.38	-2.69	7.809	-0.34	0.740
Solid Content(SF)* Solid Content(DF)	31.36	15.68	7.809	2.01	0.085
Solid Content(SF)* Suction Fan	-11.58	-5.79	7.809	-0.74	0.483
Solid Content(SF)* Glue Gap SF	-7.30	-3.65	7.809	-0.47	0.655
Solid Content(SF)* Glue Gap DF	44.13	22.06	7.809	2.83	0.026
Solid Content(SF)* G/L Speed Ratio	-1.82	-0.91	7.809	-0.12	0.910
Solid Content(SF)* Temp. Hot Plate	-26.84	-13.42	7.809	-1.72	0.129
Solid Content(SF)* Gap Weight Roll	6.48	3.24	7.809	0.42	0.690
Solid Content(SF)* Gap Cooling Part	0.50	0.25	7.809	0.03	0.975
Solid Content(DF) * Suction Fan	9.79	4.90	7.809	0.63	0.551
Solid Content(DF) * Glue Gap SF	13.13	6.57	7.809	0.84	0.428
Solid Content(DF) * Glue Gap DF	-34.63	-17.31	7.809	-2.22	0.062
Solid Content(DF)* Gap Weight Roll	-42.71	-21.35	7.809	-2.73	0.029
Solid Content(DF)* Gap Cooling Part	-4.38	-2.19	7.809	-0.28	0.787
Suction Fan * Glue Gap SF	-19.52	-9.76	7.809	-1.25	0.252
Suction Fan * Glue Gap DF	-40.95	-20.48	7.809	-2.62	0.034
Suction Fan * Gap Cooling Part	-26.39	-13.20	7.809	-1.69	0.135
Glue Gap SF * Glue Gap DF	-20.63	-10.32	7.809	-1.32	0.228
Glue Gap SF * G/L Speed Ratio	-4.91	-2.45	7.809	-0.31	0.762
Glue Gap SF * Temp. Hot Plate	-30.13	-15.06	7.809	-1.93	0.095
Glue Gap SF * Gap Weight Roll	1.26	0.63	7.809	0.08	0.938
Glue Gap SF * Gap Cooling Part	-32.66	-16.33	7.809	-2.09	0.075
Solid Content(SF)*Glue Gap* G/L Speed Ratio	-54.06	-27.03	7.809	-3.46	0.011
Ct Pt		-65.61	17.462	-3.76	0.007

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA ของการออกแบบการทดลอง
(Coded Units)

Analysis of Variance for Flat Crush (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	9	12984	12984	1443	0.74	0.671
2-Way Interactions	21	99000	99000	4714	2.42	0.117
3-Way Interactions	1	23379	23379	23379	11.98	0.011
Curvature	1	27548	27548	27548	14.12	0.007
Residual Error	7	13661	13661	1952		
Pure Error	7	13661	13661	1952		
Total	39	176573				

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA ของการออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัยแบบ 2^{9-4} Fractional Factorial Design ที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลางเข้าไป 8 จุด (การออกแบบมิติ IV) ในการที่เพิ่มจุดศูนย์กลางเข้าไปถึง 8 จุดนั้นมีเหตุผลมาจากการความต้องการความถูกต้องและแม่นยำจาก ผลการกำหนดระดับของค่าระดับกลางในแต่ละปัจจัยว่าจะส่งผลอย่างไรต่อค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ ไม่มีปัจจัยหลัก (Main Effects) ใดเลยที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ($\alpha = 0.05$) แต่จะมีอันตรกิริยา (Interaction Effects) ที่มีปัจจัยร่วม 2 ปัจจัยและ 3 ปัจจัย ที่มีนัยสำคัญเนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ดังสามารถสรุปได้ต่อไปนี้

อันตรกิริยา(Interaction Effects) ที่มีปัจจัยร่วม 3 ปัจจัย ได้แก่

- สัดส่วนแบ่งแห้งSF กับ ระยะห่างระหว่างลูกปาดกับลูกแบ่งของ DF และ อัตราส่วนความเร็วลูกแบ่งกับลูกลอนล่างของ DF

อันตรกิริยา(Interaction Effects) ที่มีปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย ได้แก่

- สัดส่วนแบ่งแห้งSF กับ ระยะห่างระหว่างลูกปาดกับลูกแบ่งของ DF
- สัดส่วนแบ่งแห้งDF กับ ระยะการกดระหว่างลูกกลิ้งทับผ้าใบกับแผ่นความร้อน
- แรงลมดูด กับ ระยะห่างระหว่างลูกปาดกับลูกแบ่งของ DF

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงสัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยของการออกแบบการทดลองเพื่อ
กรองปัจจัย (Uncoded units)

Estimated Coefficients for Flat Crush using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	1137367
Solid Content(SF)	-54341.3
Solid Content(DF)	-4655.19
Suction Fan	3.0973
Glue Gap SF	-3933.1
Glue Gap	-3347835
G/L Speed Ratio	-10558.0
Temp. Hot Plate	58.7634
Gap Weight Roll	3429.01
Gap Cooling Part	567.17
Solid Content(SF)* Solid Content(DF)	250.875
Solid Content(SF)* Suction Fan	-0.308750
Solid Content(SF)* Glue Gap SF	-243.229
Solid Content(SF)* Glue Gap DF	158427
Solid Content(SF)* G/L Speed Ratio	497.267
Solid Content(SF)* Temp. Hot Plate	-2.68406
Solid Content(SF)* Gap Weight Roll	25.9375
Solid Content(SF)* Gap Cooling Part	2.0125
Solid Content(DF) * Suction Fan	0.261083
Solid Content(DF) * Glue Gap SF	437.813
Solid Content(DF) * Glue Gap DF	-513.009
Solid Content(DF)* Gap Weight Roll	-170.837
Solid Content(DF)* Gap Cooling Part	-17.5125
Suction Fan * Glue Gap SF	-2.16840
Suction Fan * Glue Gap DF	-2.02238
Suction Fan * Gap Cooling Part	-0.351875
Glue Gap SF * Glue Gap DF	-1273.73
Glue Gap SF * G/L Speed Ratio	34001.0
Glue Gap SF * Temp. Hot Plate	-5.57928
Glue Gap SF * Gap Weight Roll	9.329
Glue Gap SF * Gap Cooling Part	-241.921
Solid Co*Glue Gap* G/L Speed Ratio	-1601.76
Ct Pt	-65.607

จากการพิจารณา ค่า P-Value ของจุดศูนย์กลาง (Center Points) ของการออกแบบการทดลอง ซึ่งใช้ในการทดสอบลักษณะของส่วนโค้ง (Curvature) ของการทดลองว่ารูปแบบการทดลอง จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ นั้น มีลักษณะของส่วนโค้งเกิดขึ้นหรือไม่ จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่า P-value ของจุดศูนย์กลางเท่ากับ 0.007 จึงสรุปได้ว่า จุดศูนย์กลางมีนัยสำคัญและสามารถหาสมการตัวแปรถดถอยของการทดลองได้ดังนี้

สมการตัวแปรถดถอยของการทดลอง (Coded) ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 4.3 ได้สมการดังนี้

$$Y = 933.73 - 27.03 \text{ Solid Content (SF)} * \text{Glue Gap:DF} * \text{G/L Speed Ratio} + 22.06 \text{ Solid Content(SF)} * \text{Glue Gap DF} - 21.35 \text{ Solid Content(DF)} * \text{Gap Weight Roll} - 20.48 \text{ Suction Fan} * \text{Glue Gap DF}$$

ส่วนสมการตัวแปรถดถอยของการทดลอง (Uncoded) ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 4.5 จะได้สมการดังนี้

$$Y = 1137367 - 1601.76 \text{ Solid Solid Content (SF)} * \text{Glue Gap:DF} * \text{G/L Speed Ratio} + 158427 \text{ Solid Content(SF)} * \text{Glue Gap DF} - 170.837 \text{ Solid Content(DF)} * \text{Gap Weight Roll} - 2.02238 \text{ Suction Fan} * \text{Glue Gap DF}$$

เนื่องจากการทดลองนี้ มีลักษณะของส่วนโค้ง (Curvature) เกิดขึ้นจึงไม่สามารถที่จะสรุปผลการวิเคราะห์ด้วยของการออกแบบการทดลองเพื่อรองรับปัจจัยแบบ 2^{9-4} Fractional Factorial Design ที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลางเข้าไป 8 จุดได้ (การออกแบบมิติ IV) ทำให้สมการตัวแปรถดถอยของการทดลองดังกล่าวนี้ ไม่สามารถที่จะเป็นตัวแทนรูปแบบสมการ (Model) ที่ถูกต้องได้

ดังนั้นจึงต้องนำปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัยที่อันตรกิริยามีนัยสำคัญจากการวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสม ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยดังต่อไปนี้

- สัดส่วนแป้งแห้ง SF (Solid Content of SF)
- สัดส่วนแป้งแห้ง DF (Solid Content of DF)
- อัตราส่วนความเร็วลูกแป้งกับลูกกลอนล่างของ DF (G/L Speed Ratio:DF)
- แรงลมดูด (Suction Fan)
- ระยะห่างระหว่างลูกปาดกับลูกแป้งของ DF (Gap Glue Roll & Doctor Roll: Double facer)
- ระยะการกดรระหว่างลูกกลิ้งทับผ้าใบกับแผ่นความร้อน (Gap Weight Roll)

โดยการออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมนั้นจะนำปัจจัย ทั้ง 6 ปัจจัยดังกล่าว มาทำการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองที่มีลักษณะของส่วนโค้ง (Curvature) ใหม่โดยใช้วิธีการของพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Method) แบบส่วน ประสมกลางที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Central Composite Design with Center Points) ซึ่งมี ขั้นตอนในการวิเคราะห์ต่อไปนี้

4.3 การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

4.3.1 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง (Central Composite Design with Center Points)

การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสม ของกระบวนการ ผลิตแผ่นลูกฟูก จะใช้การออกแบบการทดลองแบบ Face-Centered Central Composite หรือ Face Center Cube ที่มี ค่า $\alpha = 1$ ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบนี้ เป็นการวางจุดของ แนวแกนอยู่บนจุดศูนย์กลางของหน้ารูปทรงลูกบาศก์ เนื่องจากการทดลองนี้มีความคล้ายคลึง กับการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ แต่มีจำนวนของการทดลองน้อยกว่า จึง เหมาะสมที่จะนำมาใช้ออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมของ ทั้ง 6 ปัจจัยดังตารางที่ 4.6 เพราะความสามารถในการทดลองมีขีดจำกัดซึ่งมีสาเหตุมาจาก การปรับ ระดับของปัจจัยบางปัจจัยที่ต้องใช้เวลานาน

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงปัจจัยที่จะนำไปออกแบบการทดลอง แบบ Face-Centered Central Composite

ปัจจัย	ระดับ		หน่วย
	-1	1	
1. สัดส่วนแห้งแห้งSF (Solid Content of SF)	21.00	21.50	เปอร์เซ็นต์
2. สัดส่วนแห้งแห้งDF (Solid Content of DF)	23.00	23.50	เปอร์เซ็นต์
3. แรงลมดูด (Suction Fan)	400	500	mm.Aq.
4. ระยะห่างระหว่างลูกปาดกับลูกแบ่งของDF (Gap Glue Roll & Doctor Roll: DF)	0.18	0.45	มิลลิเมตร
5. อัตราส่วนความเร็วลูกแบ่งกับลูกลอนล่างของDF (G/L Speed Ratio: DF)	97	99	เปอร์เซ็นต์
6. ระยะการกดระหว่างลูกกลิ้งทับผ้าใบกับแผ่น ความร้อน (Gap Weight Roll)	3.5	4.5	มิลลิเมตร

ในการทดลองเพื่อกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมของทั้งหมด 6 ปัจจัยนี้ เป็นการออกแบบการทดลองแบบ Half Face-Centered Central Composite เนื่องจากมีข้อจำกัดในการทดลองด้วยเหตุผลของการปรับค่าของสูตรกาวซึ่งมีปัจจัยอยู่ 2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือสัดส่วนแห้งแห้งSF (Solid Content of SF) และสัดส่วนแห้งแห้งDF (Solid Content of DF) ต้องใช้เวลาในการปรับนํานซึ่งใช้เวลาประมาณ 9-10 ชั่วโมง ถึงจะสามารถทำการทดลองในครั้งต่อไปได้ ซึ่งจำนวนการทดลองทั้งหมดมีจำนวนเท่ากับ 53 การทดลอง โดยจะแสดงตารางและผลการทดลองดังตารางที่ 4.7 ในส่วนข้อมูลของค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกของการออกแบบการทดลองกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมแสดงไว้ในภาคผนวก ข (ตารางที่ ข. 4) และแสดงภาพของทั้ง 6 ปัจจัยไว้ในภาคผนวก ง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงผลการทดลองเพื่อกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

StdOrder	RunOrder	Solid Content(SF)	Solid Content(DF)	Suction Fan	Glue Gap :DF	G/L Speed Ratio	Gap Weight Roll	Flat Crush
17	1	21	23	400	0.18	99	4.5	926.50
5	2	21	23	500	0.18	97	4.5	931.75
2	3	21.5	23	400	0.18	97	4.5	984.50
21	4	21	23	500	0.18	99	3.5	891.00
33	5	21	23.25	450	0.315	98	4	856.00
46	6	21.25	23.25	450	0.315	98	4	948.25
29	7	21	23	500	0.45	99	4.5	923.88
48	8	21.25	23.25	450	0.315	98	4	963.63
32	9	21.5	23.5	500	0.45	99	4.5	1126.50
14	10	21.5	23	500	0.45	97	4.5	956.25
20	11	21.5	23.5	400	0.18	99	4.5	852.63
18	12	21.5	23	400	0.18	99	3.5	1060.38
30	13	21.5	23	500	0.45	99	3.5	1058.63
49	14	21.25	23.25	450	0.315	98	4	984.50
6	15	21.5	23	500	0.18	97	3.5	937.25
15	16	21	23.5	500	0.45	97	4.5	988.88
27	17	21	23.5	400	0.45	99	4.5	996.88
25	18	21	23	400	0.45	99	3.5	943.00
43	19	21.25	23.25	450	0.315	98	3.5	991.38
1	20	21	23	400	0.18	97	3.5	994.13
26	21	21.5	23	400	0.45	99	4.5	1146.13
4	22	21.5	23.5	400	0.18	97	3.5	888.50
38	23	21.25	23.25	500	0.315	98	4	928.50
28	24	21.5	23.5	400	0.45	99	3.5	1137.13
34	25	21.5	23.25	450	0.315	98	4	827.00
19	26	21	23.5	400	0.18	99	3.5	1006.75
39	27	21.25	23.25	450	0.18	98	4	1016.63
16	28	21.5	23.5	500	0.45	97	3.5	1134.50
35	29	21.25	23	450	0.315	98	4	873.50
53	30	21.25	23.25	450	0.315	98	4	974.25

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ตารางแสดงผลการทดลองเพื่อกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

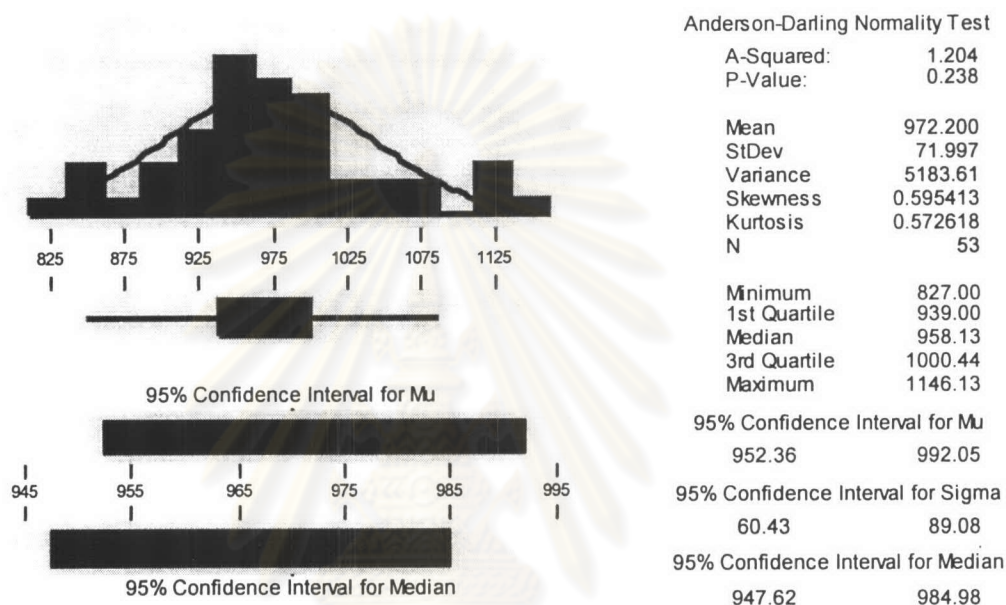
StdOrder	RunOrder	Solid Content(SF)	Solid Content(DF)	Suction Fan	Glue Gap :DF	G/L Speed Ratio	Gap Weight Roll	Flat Crush
40	31	21.25	23.25	450	0.45	98	4	946.00
11	32	21	23.5	400	0.45	97	3.5	955.00
41	33	21.25	23.25	450	0.315	97	4	1004.13
42	34	21.25	23.25	450	0.315	99	4	952.13
37	35	21.25	23.25	400	0.315	98	4	965.25
12	36	21.5	23.5	400	0.45	97	4.5	1084.38
3	37	21	23.5	400	0.18	97	4.5	1004.00
23	38	21	23.5	500	0.18	99	4.5	1027.88
51	39	21.25	23.25	450	0.315	98	4	950.75
50	40	21.25	23.25	450	0.315	98	4	940.75
10	41	21.5	23	400	0.45	97	3.5	953.50
44	42	21.25	23.25	450	0.315	98	4.5	986.63
36	43	21.25	23.5	450	0.315	98	4	944.13
9	44	21	23	400	0.45	97	4.5	962.13
45	45	21.25	23.25	450	0.315	98	4	958.13
7	46	21	23.5	500	0.18	97	3.5	984.88
31	47	21	23.5	500	0.45	99	3.5	985.88
47	48	21.25	23.25	450	0.315	98	4	947.75
24	49	21.5	23.5	500	0.18	99	3.5	851.00
13	50	21	23	500	0.45	97	3.5	944.00
22	51	21.5	23	500	0.18	99	4.5	1087.00
8	52	21.5	23.5	500	0.18	97	4.5	896.00
52	53	21.25	23.25	450	0.315	98	4	946.50

4.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากผลของการทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบ Half Face-Centered Central Composite ของการทดลองทั้งหมด 53 การทดลองข้างต้น สามารถสรุปผลของค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) ได้ดังรูปที่ 4.11

Descriptive Statistics

Variable: Flat Crush

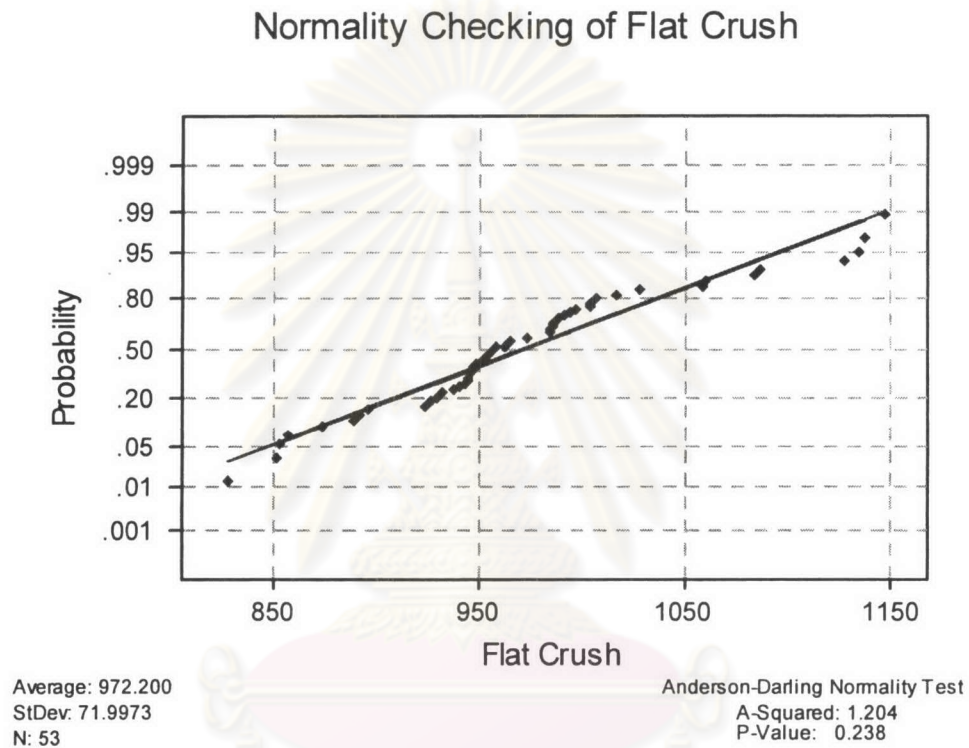


รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงสถิติเชิงพรรณนาของค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) จากการออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม

เงื่อนไขที่สำคัญของการออกแบบการทดลองนั้น คือ NID $(0, \sigma^2)$ ดังนั้น จึงต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ว่าเป็นไปตามเงื่อนไขของ NID $(0, \sigma^2)$ หรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ประกอบด้วย การทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของการทดลองภายในเงื่อนไข 3 ประการ คือ ข้อมูลเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์และสรุปผลของการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

4.3.2.1 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นปกติ (Normality Assumption)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นปกติ (Normality Assumption) สามารถตรวจสอบได้ด้วยการทดสอบการกระจายของค่าส่วนตกค้างของค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) ซึ่งกราฟการกระจายของค่าส่วนตกค้างค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) ที่ได้เป็นเส้นตรงและมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 นั่นคือ ข้อมูลเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

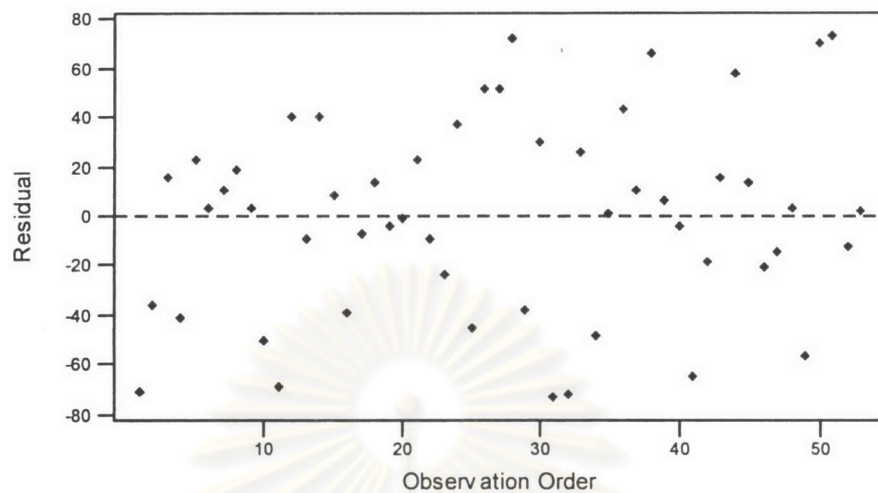


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการกระจายของค่าส่วนตกค้าง

4.3.2.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นความเป็นอิสระ (Independent)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent) สามารถตรวจสอบโดยการสร้างแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับความต่อเนื่องในการเก็บข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.13 โดยแผนภาพการกระจายไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบใดๆ ควรที่จะมีการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

Residuals Versus the Order of the Data
(response is Flat Crush)



รูปที่ 4.13 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของข้อมูล

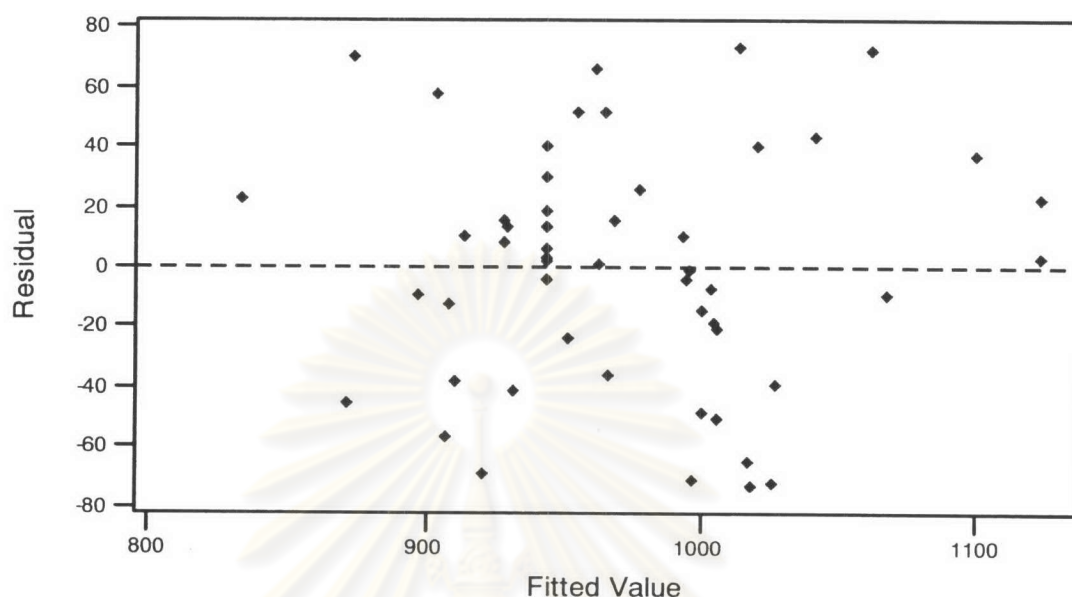
จากกราฟสังเกตได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบ ดังนั้นสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.3.2.3 ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability)

ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) สามารถตรวจสอบได้ โดยการสร้างแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย แสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งแผนภาพการกระจายไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม ควรที่จะมีการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างอยู่บนและล่าง ค่า 0 เท่าๆ กันอย่างสม่ำเสมอ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Residuals Versus the Fitted Values
(response is Flat Crush)



รูปที่ 4.14 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต

จากกราฟสังเกตได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบและมีการกระจายของค่าส่วนตกค้างบนและล่างของค่า 0 มีความสม่ำเสมอ ดังนั้นสรุปได้ว่า ข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

สรุปผลจากการทดสอบความถูกต้องของตัวแบบของค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) พบว่า ข้อมูลมีสมมติฐานตรงตามข้อกำหนดทั้ง 3 ข้อคือ มีการกระจายเป็นแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกันและมีความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของการออกแบบการทดลองที่ว่า $NID(0, \sigma^2)$

จากการออกแบบการทดลองแบบ Half Face-Centered Central Composite ของทั้ง 6 ปัจจัย สามารถวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab และแสดงผลจากการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ (Coded Units) ได้ดังตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9 ในส่วนของตารางที่ 4.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของการออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม (Uncoded Units)

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงผลจากการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ(Coded Units)

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Flat Crush

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	944.89	13.667	69.137	0.000
Solid Content(SF)	19.37	9.734	1.990	0.058
Solid Content(DF)	8.57	9.734	0.880	0.387
Suction Fan	-6.09	9.734	-0.625	0.537
Glue Gap :DF	26.53	9.734	2.725	0.012
G/L Speed Ratio	10.87	9.734	1.117	0.275
Gap Weight Roll	4.85	9.734	0.499	0.622
Solid Content(SF)*Solid Content(SF)	-92.35	36.753	-2.513	0.019
Solid Content(DF)*Solid Content(DF)	-25.03	36.753	-0.681	0.502
Suction Fan *Suction Fan	13.03	36.753	0.355	0.726
Glue Gap :DF *Glue Gap :DF	47.47	36.753	1.292	0.208
G/L Speed Ratio*G/L Speed Ratio	44.28	36.753	1.205	0.240
Gap Weight Roll*Gap Weight Roll	55.16	36.753	1.501	0.146
Solid Content(SF)*Solid Content(DF)	-20.21	10.034	-2.014	0.055
Solid Content(SF)*Suction Fan	1.57	10.034	0.156	0.877
Solid Content(SF)*Glue Gap :DF	34.59	10.034	3.448	0.002
Solid Content(SF)*G/L Speed Ratio	17.11	10.034	1.705	0.101
Solid Content(SF)*Gap Weight Roll	1.73	10.034	0.172	0.865
Solid Content(DF)*Suction Fan	9.71	10.034	0.968	0.342
Solid Content(DF)*Glue Gap :DF	25.70	10.034	2.562	0.017
Solid Content(DF)*G/L Speed Ratio	-10.14	10.034	-1.011	0.322
Solid Content(DF)*Gap Weight Roll	-3.21	10.034	-0.320	0.752
Suction Fan*Glue Gap :DF	1.59	10.034	0.159	0.875
Suction Fan *G/L Speed Ratio	-2.03	10.034	-0.202	0.841
Suction Fan *Gap Weight Roll	4.13	10.034	0.412	0.684
Glue Gap :DF*G/L Speed Ratio	8.04	10.034	0.801	0.431
Glue Gap :DF*Gap Weight Roll	-0.72	10.034	-0.072	0.944
G/L Speed Ratio*Gap Weight Roll	4.30	10.034	0.428	0.672

S = 56.76 R-Sq = 70.1% R-Sq(adj) = 37.9%

ตารางที่ 4.9 ตารางANOVA แสดงผลจากการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ (Coded Units)

Analysis of Variance for Flat Crush						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	27	189009	189009	7000.3	2.17	0.027
Linear	6	45261	45261	7543.5	2.34	0.062
Square	6	51624	51624	8603.9	2.67	0.038
Interaction	15	92124	92124	6141.6	1.91	0.074
Residual Error	25	80539	80539	3221.6		
Lack-of-Fit	17	78864	78864	4639.1	22.17	0.000
Pure Error	8	1674	1674	209.3		
Total	52	269547				

จากตารางที่ 4.9 เป็นการวิเคราะห์ผล ANOVA ของการออกแบบการทดลองเพื่อ กำหนดค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสม พบว่า รูปแบบสมการถดถอยกำลังสอง มีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.038 ซึ่งต่ำกว่าค่า $\alpha=0.05$ แสดงว่าตัวแบบสมการถดถอย ที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองมีความเหมาะสมและสามารถเชื่อถือได้ ในส่วนของค่า R-Square ที่มีค่าเท่ากับ 70.1 % และค่า R-Square (Adjusted) เท่ากับ 37.9 % ซึ่งทั้ง 2 ค่านี้ค่อนข้าง แตกต่างกัน อาจจะมีสาเหตุมาจากการวิเคราะห์ผลมีการนำบางปัจจัยที่ไม่ค่อยมีผลเข้าไป รวมอยู่ในรูปแบบสมการถดถอย จึงส่งผลให้ค่าทั้ง 2 ค่านี้มีความแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ดีในการ พิจารณา ค่า R-Square กับค่า R-Square (Adjusted) ของการวิเคราะห์ผลเกี่ยวกับการ ออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบนั้นมีความสำคัญในระดับหนึ่ง แต่สิ่งที่มีความสำคัญ ไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าการพิจารณาค่าดังกล่าวก็คือ ผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการนำไปปฏิบัติงานจริง ซึ่งพบว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ และในทางปฏิบัตินั้นสามารถสรุปผลของการออกแบบ การทดลองเพื่อกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้นี้โดยอ้างอิงจาก Montgomery, D.C.2001. Design and Analysis of Experiment. 5 th ed. USA. : John Wiley and Sons. (P: 481) และ Stephan R. Schmidt. and Robert G. Launsby. 1998. Understanding Industrial Experiments Designed. USA. : Colorado Springs, Colorado. (P: 7-15)

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยจากการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ
(Uncoded Units)

Estimated Regression Coefficients for Flat Crush using data in uncoded units	
Constant	-541521
Solid Content(SF)	63249.3
Solid Content(DF)	29017.1
Suction Fan	-22.298
Glue Gap :DF	-46832
G/L Speed Ratio	-9215
Gap Weight Roll	-2364.9
Solid Content(SF)*Solid Content(SF)	-1477.5
Solid Content(DF)*Solid Content(DF)	-400.49
Suction Fan *Suction Fan	0.00521
Glue Gap :DF *Glue Gap :DF	2604.64
G/L Speed Ratio*G/L Speed Ratio	44.2845
Gap Weight Roll*Gap Weight Roll	220.638
Solid Content(SF)*Solid Content(DF)	-323.38
Solid Content(SF)*Suction Fan	0.12555
Solid Content(SF)*Glue Gap :DF	1025
Solid Content(SF)*G/L Speed Ratio	68.44
Solid Content(SF)*Gap Weight Roll	13.81
Solid Content(DF)*Suction Fan	0.7769
Solid Content(DF)*Glue Gap :DF	761.574
Solid Content(DF)*G/L Speed Ratio	-40.563
Solid Content(DF)*Gap Weight Roll	-25.685
Suction Fan*Glue Gap :DF	0.23611
Suction Fan *G/L Speed Ratio	-0.0406
Suction Fan *Gap Weight Roll	0.1653
Glue Gap :DF*G/L Speed Ratio	59.5509
Glue Gap :DF*Gap Weight Roll	-10.639
G/L Speed Ratio*Gap Weight Roll	8.59375

ผลจากตารางที่ 4.9 พบว่า รูปแบบของการทดลองนี้มีลักษณะของพจน์ที่เป็นสมการกำลังสอง (Second Order) ร่วมด้วย แสดงว่ารูปแบบของการทดลองนี้เป็นลักษณะของส่วนโค้ง (Curvature) ซึ่งสามารถหาสมการถดถอยที่เป็นตัวแทนของการทดลองได้ดังนี้

สมการตัวแปรถดถอยของการทดลอง (Coded) ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 4.8 ได้สมการดังนี้

$$Y = 944.89 + 26.53 \text{ Glue Gap :DF} - 92.35 \text{ Solid Content(SF)*Solid Content(SF)} - 20.21 \text{ Solid Content(SF)*Solid Content(DF)} + 34.59 \text{ Solid Content(SF)*Glue Gap :DF} + 17.11 \text{ Solid Content(SF)*G/L Speed Ratio} + 25.70 \text{ Solid Content(DF)*Glue Gap :DF}$$

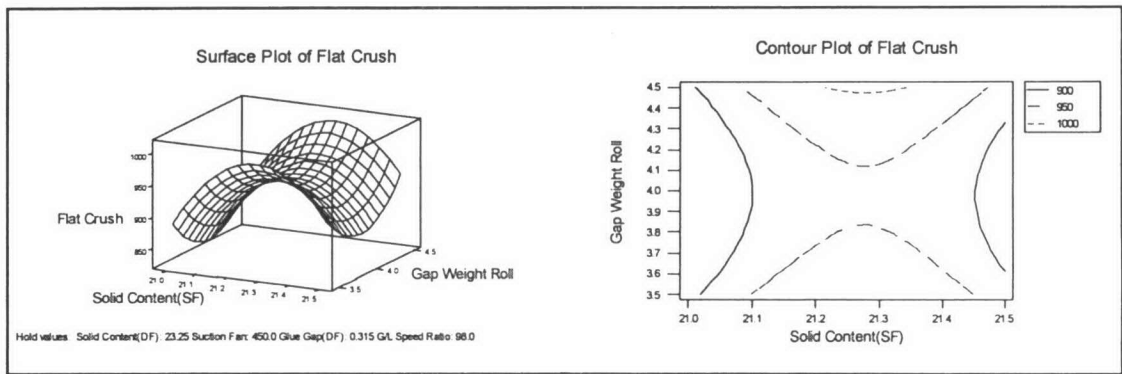
ส่วนสมการตัวแปรถดถอยของการทดลอง (Uncoded) ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 4.10 จะได้สมการดังนี้

$$Y = - 541521 - 46832 \text{ Glue Gap :DF} - 1477.5 \text{ Solid Content(SF)*Solid Content(SF)} - 323.38 \text{ Solid Content(SF)*Solid Content(DF)} + 1025 \text{ Solid Content(SF)*Glue Gap :DF} + 68.44 \text{ Solid Content(SF)*G/L Speed Ratio} + 761.574 \text{ Solid Content(DF)*Glue Gap :DF}$$

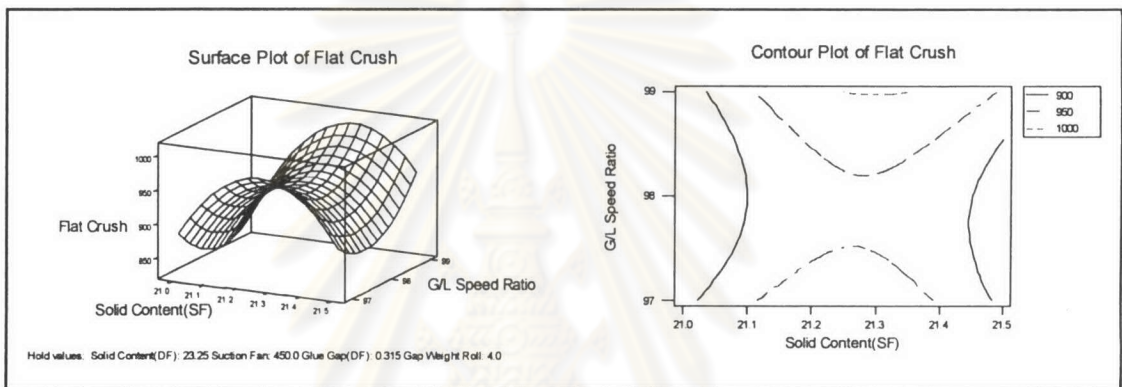
จากสมการดังกล่าวสามารถคำนวณหาค่าผลลัพธ์ที่เหมาะสมตามต้องการโดยโปรแกรม Minitab ที่มีการคำนวณและประมวลผลในลักษณะของวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent) ซึ่งแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นกราฟโครงร่างและพื้นผิวผลตอบ

4.3.3 กราฟโครงร่างและพื้นผิวผลตอบ

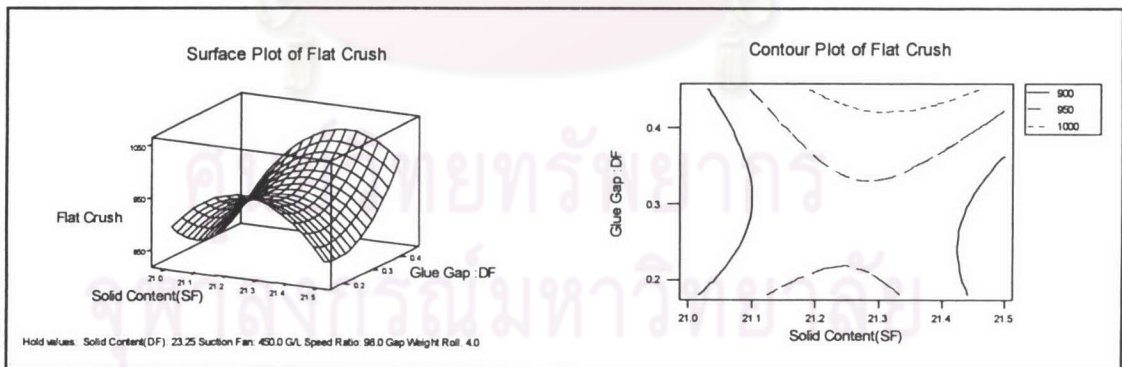
ในการวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลองที่มีลักษณะของส่วนโค้ง (Curvature) ด้วยโปรแกรม Minitab สามารถฉายลักษณะของส่วนโค้งของรูปแบบ (Model) การทดลองลงบนแกนของแต่ละปัจจัยออกมาในรูปแบบกราฟโครงร่างและพื้นผิวผลตอบ สำหรับการออกแบบการทดลองนี้ สามารถแสดงกราฟพื้นผิวผลตอบแสดงลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับของปัจจัยกับค่าความสามารถในด้านทานแรงกดลอนลูกฟูกออกมาในรูปแบบสามมิติกับกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัยต่างๆ โดยที่เส้นโครงร่าง (Contour Line) เส้นเดียวกันจะให้ค่าผลลัพธ์ค่าเดียวกัน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละคู่ของปัจจัย ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ถึง รูปที่ 4.29 ตามลำดับ



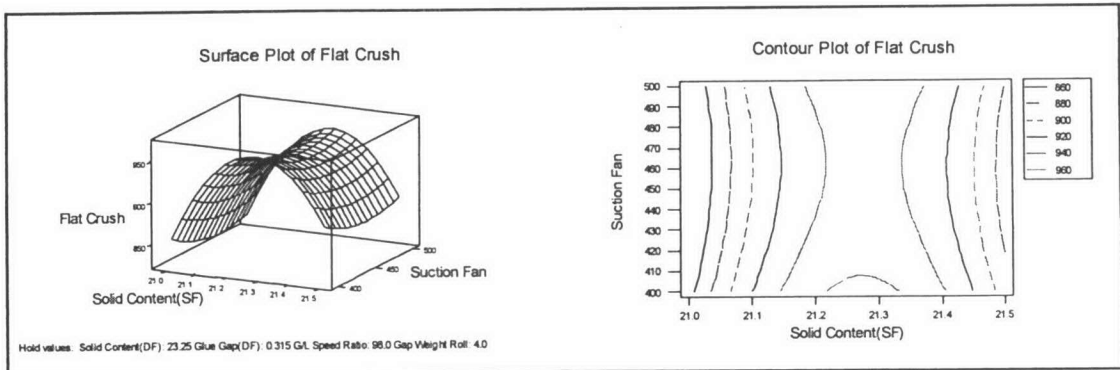
รูปที่ 4.15 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย Solid Content (SF) กับ Gap Weight Roll



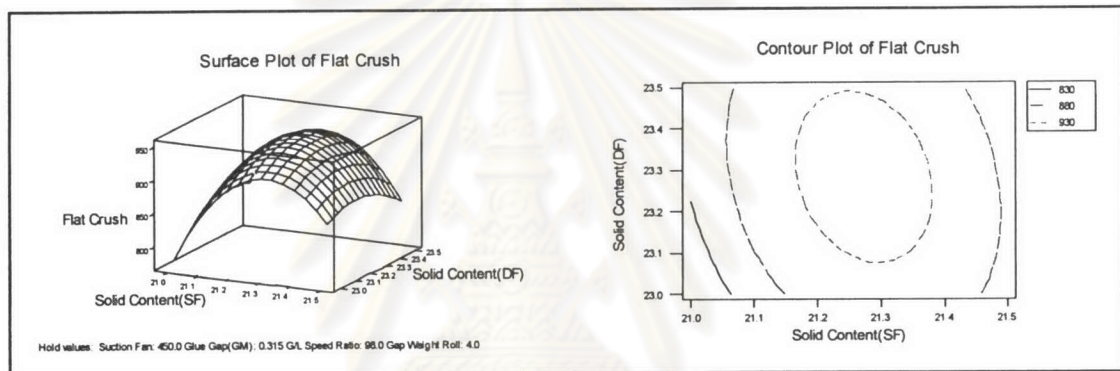
รูปที่ 4.16 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย Solid Content(SF) กับ G/L Speed Ratio



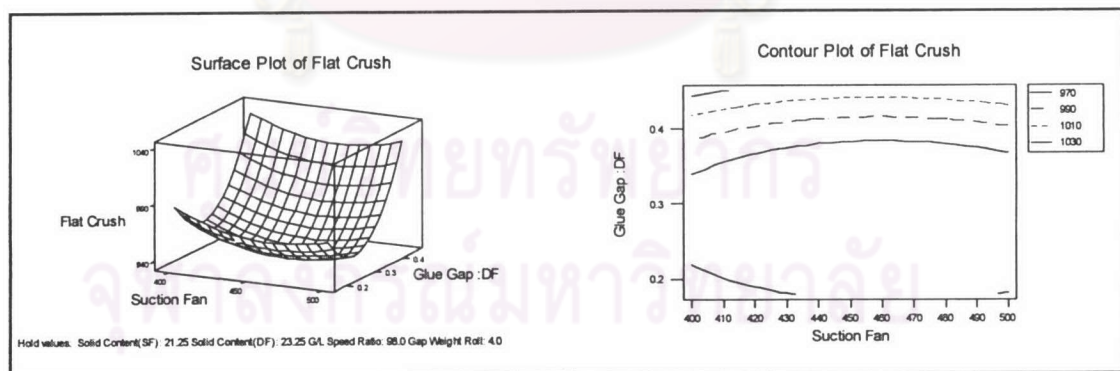
รูปที่ 4.17 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย Solid Content (SF) กับ Glue Gap :DF



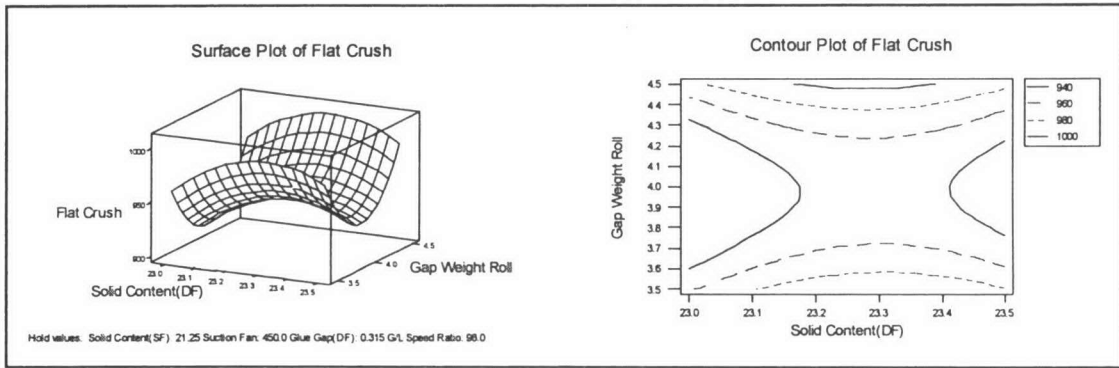
รูปที่ 4.18 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย
Solid Content (SF) กับ Suction Fan



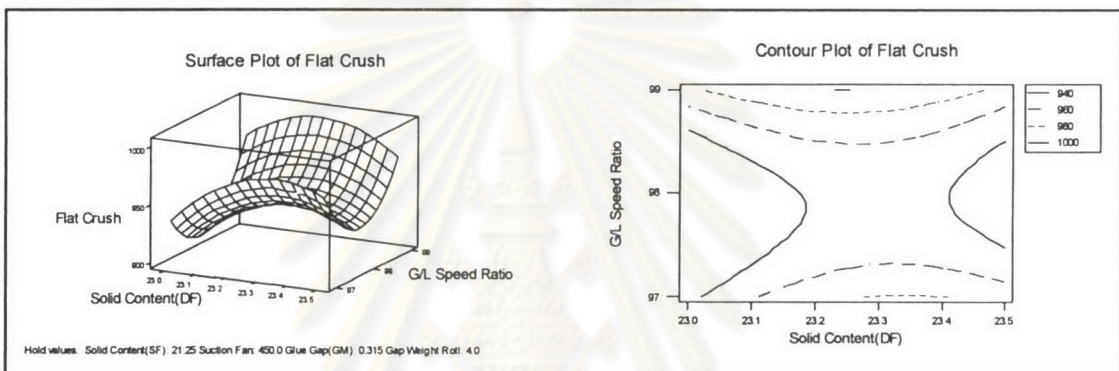
รูปที่ 4.19 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย
Solid Content (SF) กับ Solid Content (DF)



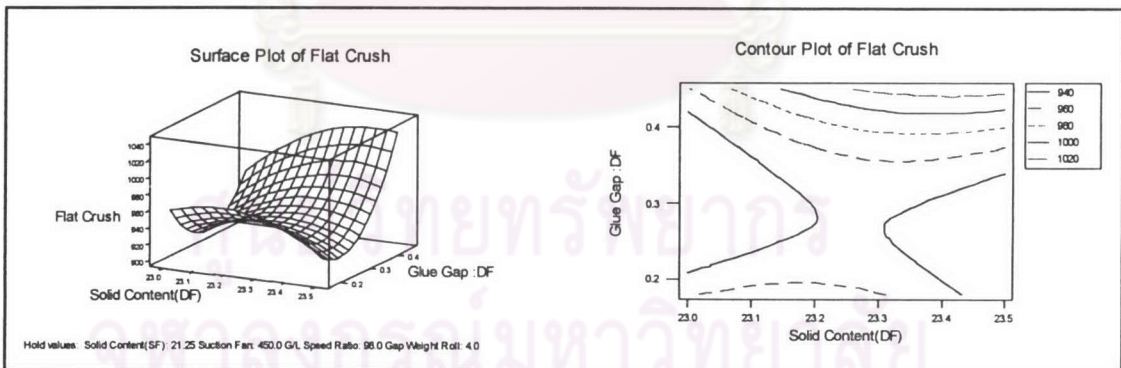
รูปที่ 4.20 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย
Suction Fan กับ Glue Gap:DF



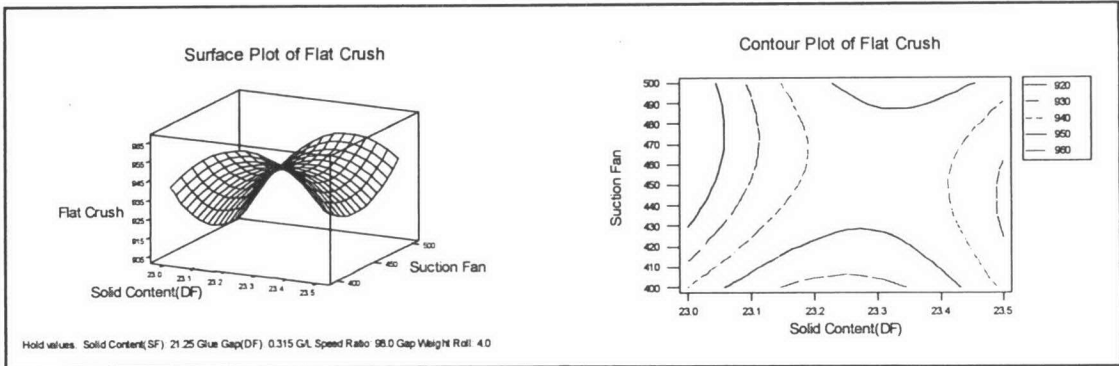
รูปที่ 4.21 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย Solid Content (DF) กับ Gap Weight Roll



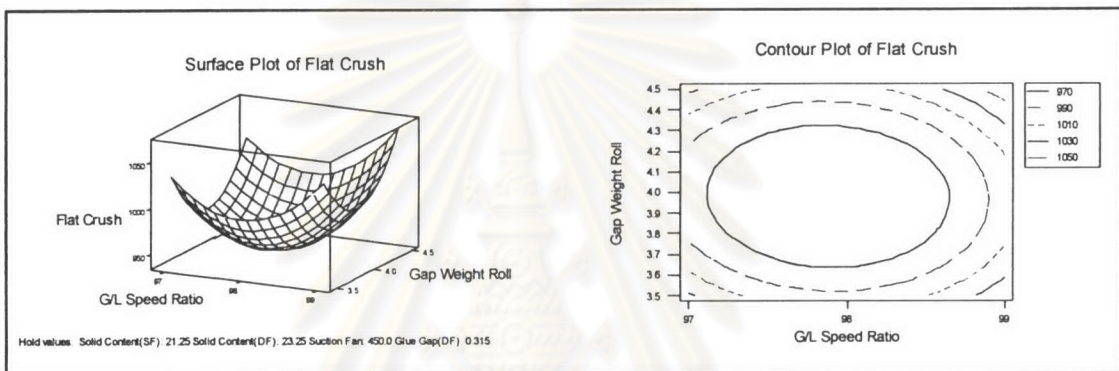
รูปที่ 4.22 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย Solid Content (DF) และ G/L Speed Ratio



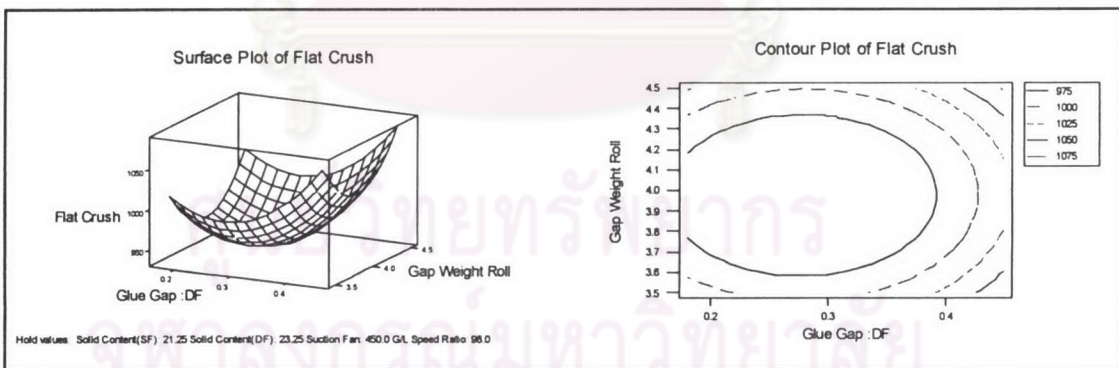
รูปที่ 4.23 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย Solid Content (DF) กับ Glue Gap:DF



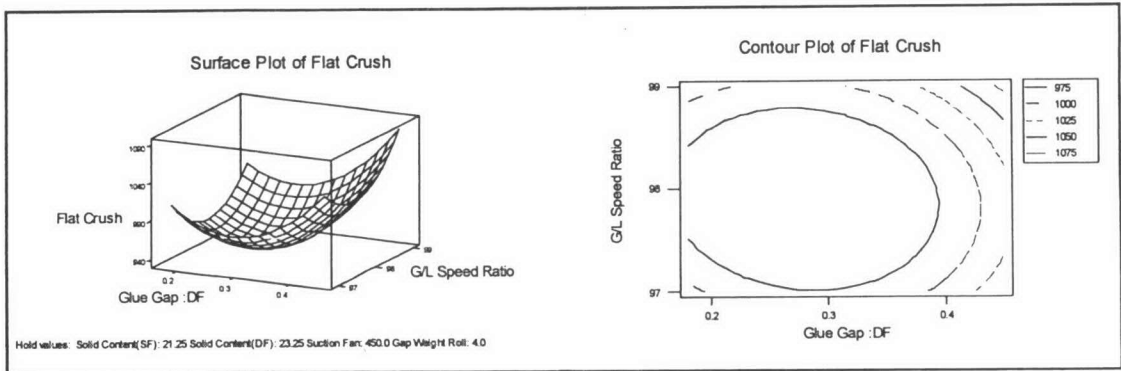
รูปที่ 4.24 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย Solid Content (DF) กับ Suction Fan



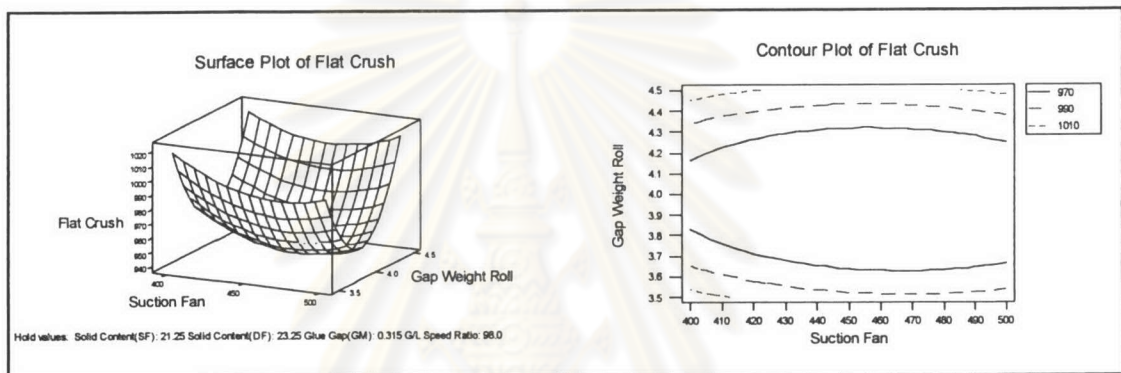
รูปที่ 4.25 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย G/L Speed Ratio กับ Gap Weight Roll



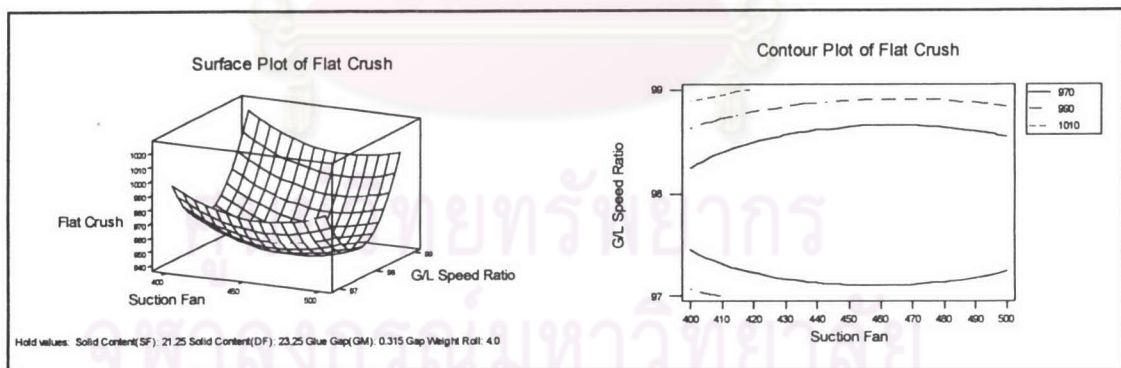
รูปที่ 4.26 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย Glue Gap:DF กับ Gap weight Roll



รูปที่ 4.27 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย
Glue Gap:DF กับ G/L Speed Ratio



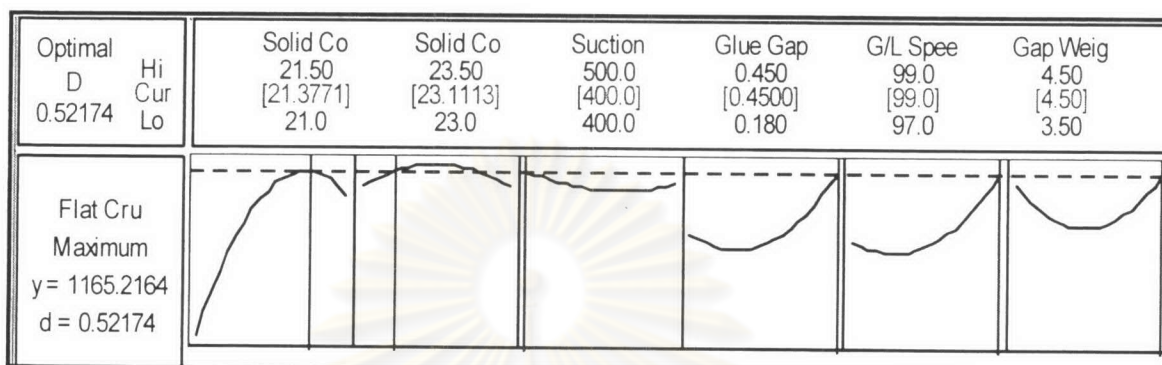
รูปที่ 4.28 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย
Suction Fan กับ Gap Weight Roll



รูปที่ 4.29 กราฟพื้นผิวผลตอบและกราฟโครงร่างระหว่างปัจจัย
Suction Fan กับ G/L Speed Ratio

4.3.4 ค่าเงื่อนไขของปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง

จากตัวแบบถดถอยข้างต้น สามารถพยากรณ์หาระดับที่เหมาะสมของการปรับค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานในการกดลอนลูกฟูกที่สูงที่สุดของกระบวนการผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูก ซึ่งผลจากการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของทั้ง 6 ปัจจัย

จากรูปที่ 4.30 สามารถสรุประดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยนำเข้าไปที่สำคัญได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงปัจจัยและการกำหนดค่าที่เหมาะสมของระดับ

ปัจจัย	การกำหนดค่าที่เหมาะสมของปัจจัย
สัดส่วนแห้งแห้งSF (Solid Content of SF)	21.38 เปอร์เซ็นต์
สัดส่วนแห้งแห้งDF (Solid Content of DF)	23.11 เปอร์เซ็นต์
แรงลมดูด (Suction Fan)	400 mm.Aq.
ระยะห่างระหว่างลูกปาดกับลูกแห้งของDF (Glue Gap: Double facer)	0.45 มิลลิเมตร
อัตราส่วนความเร็วลูกแห้งกับลูกลอนล่างของDF (G/L Speed Ratio:DF)	99 เปอร์เซ็นต์
ระยะการกดระหว่างลูกกลิ้งทับผ้าใบกับแผ่นความร้อน(Gap Weight Roll)	4.5 มิลลิเมตร

เมื่อกำหนดค่าระดับของปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัย ดังตารางที่ 4.10 จากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab จะสามารถทำให้ค่าความต้านทานในการกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) สูงที่สุดมีค่าประมาณ 1165.22 kg/33.2 cm² แต่ค่าดังกล่าวนี้จะสามารถเชื่อถือได้นั้นจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลของการทดลองอีกครั้งซึ่งจะได้แสดงผลของการทดสอบยืนยันผลการเดินเครื่องผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูกที่มีการกำหนดค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมตามที่วิเคราะห์ได้ในบทต่อไป