

## บทที่ 6

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 1. ผลการทดสอบการออกแบบการทดลองส่วนผสม

การออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าสัดส่วนที่เหมาะสมของส่วนผสมแบบหล่อทรายที่ประกอบไปด้วย ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 เบนโทไนต์และน้ำ ซึ่งมีการเตรียมส่วนผสมที่แตกต่างกันตามแผนการทดลอง และทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ ตามมาตรฐานของสมาคม A.F.S. (American Foundrymen's Society)

ตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2 แสดงอัตราส่วนผสมในการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม D-Optimal และอัตราส่วนผสมแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษาที่ใช้เป็นส่วนผสมอยู่ในปัจจุบัน พร้อมข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ได้แก่ ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ ตามลำดับ โดยแต่ละตัวอย่างการทดสอบจะทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 6.1 อัตราส่วนผสมและผลการทดลองของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

อัตราส่วน ผสมที่	ผลการทดลอง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)			ค่าเฉลี่ย ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	2.8	3.0	3.1	2.96
2	7.2	7.6	8.0	7.60
3	4.5	4.4	4.7	4.53
4	5.6	5.8	6.0	5.80
5	7.1	7.0	6.9	7.00
6	3.2	2.8	3.0	3.00
7	6.8	6.2	6.6	6.53
8	5.5	5.2	5.2	5.30
9	7.1	7.2	6.8	7.03
10	8.8	8.7	9.2	8.90
11	4.7	4.8	4.6	4.70

ตารางที่ 6.1 อัตราส่วนผสมและผลการทดลองของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (ต่อ)

อัตราส่วน ผสมที่	ผลการทดลอง (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)			ค่าเฉลี่ย ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
12	6.7	6.9	6.8	6.80
13	2.3	2.1	2.2	2.20
14	2.8	2.7	2.6	2.70
อัตราส่วนแบบเดิม	6.1	6.3	6.2	6.20

ตารางที่ 6.2 อัตราส่วนผสมและผลการทดลองของความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ

อัตราส่วน ผสมที่	ผลการทดลอง (ตัวเลขการปล่อยซิม)			ค่าเฉลี่ย ความสามารถในการปล่อยซิม อากาศ (ตัวเลขการปล่อยซิม)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	55	55	56	55.3
2	30	33	34	32.3
3	50	53	51	51.3
4	62	63	64	63.0
5	20	18	20	19.3
6	62	60	63	61.6
7	37	38	40	38.3
8	46	48	50	48.0
9	48	48	46	47.3
10	32	33	35	33.3
11	50	48	51	49.6
12	55	54	56	55.0
13	65	63	64	64.0
14	69	67	68	68.0
อัตราส่วนแบบเดิม	37	39	38	38.0

## 2. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการทดสอบความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซีเมนต์ของแบบหล่อทรายในตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2 จะถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติ ด้วยโปรแกรม Design-Expert เวอร์ชัน 7.0 ซึ่งทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองแต่ละตัวดังต่อไปนี้

### 2.1 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง

การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก แสดงในตารางที่ 6.3 ซึ่งแสดงการคำนวณเชิงลำดับหรือผลรวมของกำลังสองแบบพิเศษ (Sequential Model Sum of Squares) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 พบว่ารูปแบบสมการถดถอยที่ได้รับการยอมรับสำหรับค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกตามผลลัพธ์ที่แนะนำ คือรูปแบบเชิงเส้นตรง (Linear) เนื่องจากมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 (p-value = 0.0002) ในขณะที่ผลการทดสอบ Lack of Fit เพื่อยืนยันว่ารูปแบบจำลองการถดถอยนี้เป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้อมาหรือไม่ พบว่ารูปแบบเชิงเส้นตรงมีความเหมาะสมกับข้อมูล ซึ่งมีค่า p-value ของ Lack of Fit Tests มากกว่า 0.05 (p-value = 0.4355) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

ตารางที่ 6.3 การคำนวณเชิงลำดับหรือผลรวมของกำลังสองแบบพิเศษและการทดสอบ Lack of Fit Tests สำหรับค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

Sequential Model Sum of Squares [Type I]						
Source	Sum Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
Mean vs Total	402.32	1	402.32			
<i>Linear vs Mean</i>	<i>44.32</i>	<i>2</i>	<i>22.16</i>	<i>20.54</i>	<i>0.0002</i>	<i>Suggested</i>
Quadratic vs Linear	1.82	3	0.61	0.48	0.7040	
Sp Cubic vs Quadratic	1.67	1	1.67	1.39	0.2763	
Cubic vs Sp Cubic	5.83	3	1.94	3.04	0.1552	
Residual	2.55	4	0.64			
Total	458.50	14	32.75			
Lack of Fit Tests						
	Sum Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
<i>Linear</i>	<i>9.33</i>	<i>8</i>	<i>1.17</i>	<i>1.38</i>	<i>0.4355</i>	<i>Suggested</i>
Quadratic	7.51	5	1.50	1.77	0.3377	
Special Cubic	5.84	4	1.46	1.73	0.3411	
Cubic	0.014	1	0.014	0.017	0.9044	
Pure Error	2.54	3	0.85			

ตารางที่ 6.4 แสดงการคำนวณเชิงลำดับหรือผลรวมของกำลังสองแบบพิเศษ (Sequential Model Sum of Squares) ของค่าความสามารถในการปล่อยซีมอากาศ พบว่ารูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมที่ได้รับการยอมรับตามผลลัพธ์ที่โปรแกรมแนะนำคือ รูปแบบเชิงเส้นโค้งที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เนื่องจากมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ( $p\text{-value} = 0.0022$ ) แต่ในกรณีนี้พบว่ารูปแบบเชิงเส้นตรง (Linear model) ก็ได้รับการยอมรับเป็นรูปแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่ารูปแบบจำลองการถดถอยจะต้องมีทอมของสมการเชิงเส้นตรงอยู่ในสมการ และผลจากการทดสอบ Lack of Fit เพื่อยืนยันว่ารูปแบบจำลองการถดถอยนี้เป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ พบว่ารูปแบบเชิงเส้นตรงและเชิงเส้นโค้งมีความเหมาะสมกับข้อมูล ซึ่งมีค่า p-value ของ Lack of Fit Tests มากกว่า 0.05 คือ เท่ากับ 0.1962 และ 0.8515 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาค่า p-value ของ Lack of Fit ของรูปแบบเชิงเส้นโค้งมีค่ามากกว่ารูปแบบเชิงเส้นตรง ดังนั้นผลลัพธ์ที่โปรแกรมแนะนำให้เลือกคือ รูปแบบเชิงเส้นโค้ง เนื่องจากค่าของ Lack of fit ควรที่จะมีค่ามากหรือไม่มีนัยสำคัญ (Not significant) จึงจะถือว่ารูปแบบสมการถดถอยนั้นมีความเหมาะสม (Design Expert 7 User's Guide, 2005)

ตารางที่ 6.4 การคำนวณเชิงลำดับหรือผลรวมของกำลังสองแบบพิเศษและการทดสอบ Lack of Fit Tests สำหรับค่าความสามารถในการปล่อยซีมอากาศ

Sequential Model Sum of Squares [Type I]					
Source	Sum Squares	df	Mean Square	F Value	p-value
Mean vs Total	33643.41	1	33643.41		
Linear vs Mean	1886.55	2	943.28	15.69	0.0006
<i>Quadratic vs Linear</i>	<i>545.02</i>	<i>3</i>	<i>181.67</i>	<i>12.49</i>	<i>0.0022</i> <i>Suggested</i>
Sp Cubic vs Quadratic	21.93	1	21.93	1.63	0.243
Cubic vs Sp Cubic	16.53	3	5.51	0.28	0.8361
Residual	77.91	4	19.48		
Total	36191.35	14	2585.10		
Lack of Fit Tests					
	Sum Squares	df	Mean Square	F Value	p-value
Linear	588.49	8	73.56	3.03	0.1962
<i>Quadratic</i>	<i>43.47</i>	<i>5</i>	<i>8.69</i>	<i>0.36</i>	<i>0.8515</i> <i>Suggested</i>
Pure Error	72.91	3	24.30		

## 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง เพื่อทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถทดสอบได้จาก F-test โดยมีการทดสอบสมมติฐานคือ

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta, \quad \beta_{12} = \beta_{13} = \beta_{23} = \beta_{123} = 0$$

$H_1$ : At least one equality is false

ถ้าสมมติฐาน  $H_0$  เป็นจริง หมายถึงค่าสัมประสิทธิ์  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  มีค่าเท่ากันและค่าสัมประสิทธิ์ที่เหลือมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบสมการนี้เป็นค่าคงที่ ซึ่งหมายความว่าค่าผลตอบสนองนี้ไม่ได้ขึ้นกับองค์ประกอบของส่วนผสมของแบบหล่อทรายทั้ง 3 ส่วนผสมเลย

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก ในตารางที่ 6.5 พบว่ารูปแบบสมการเส้นตรง (Linear Model) ของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกที่สร้างขึ้นมามีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลนี้ เนื่องจากค่า  $F=20.54$  ( $p\text{-value}=0.0002$ ) เป็นผลให้ปฏิเสธ  $H_0$  และสรุปว่ามีอย่างน้อยหนึ่งค่าสัมประสิทธิ์ส่วนที่แสดงความเป็นระบบไม่เท่ากับ  $\beta$  และยังแสดงให้เห็นว่า ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกขึ้นกับองค์ประกอบของส่วนผสมของแบบหล่อทรายทั้ง 3 ส่วนผสมนี้ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ), Adjusted  $R^2$  และ Predicted  $R^2$  มีค่าค่อนข้างสูง ยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบทางสถิตินี้เหมาะสมกับข้อมูล

ตารางที่ 6.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

ANOVA for Mixture Linear Model						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob >F	
Model	44.32	2	22.16	20.54	0.0002	significant
Linear Mixture	44.32	2	22.16	20.54	0.0002	
Residual	11.86	11	1.08			
Lack of Fit	9.33	8	1.17	1.38	0.4355	
Pure Error	2.54	3	0.85			
Cor Total	56.18	13				
Std. Dev.	1.04		R-Squared	0.7888		
Mean	5.36		Adj R-Squared	0.7504		
C.V. %	19.37		Pred R-Squared	0.6379		
PRESS	20.34		Adeq Precision	12.812		

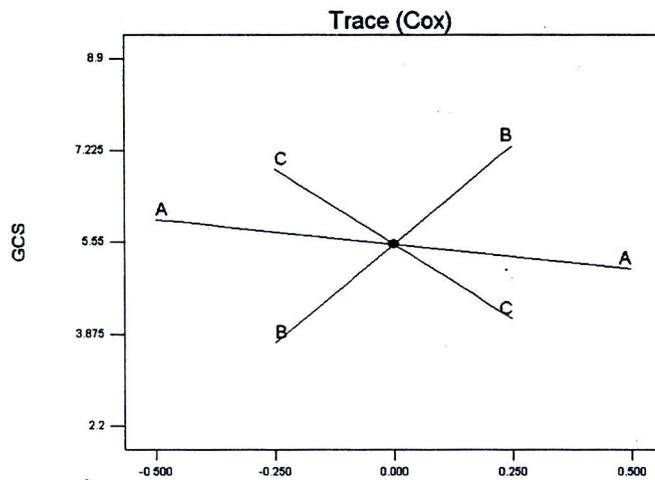
ตารางที่ 6.6 เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ เนื่องจากค่า  $F=33.43$  ( $p\text{-value} < 0.0001$ ) เป็นผลให้ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่ารูปแบบเส้นโค้ง (Quadratic Model) มีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลนี้ โดยมีอย่างน้อยหนึ่งค่าสัมประสิทธิ์ส่วนที่แสดงความเป็นระนาบไม่เท่ากับ  $\beta$  และมีอย่างน้อยหนึ่งค่าสัมประสิทธิ์ส่วนที่แสดงความเป็นเส้นโค้งที่ไม่เท่ากับศูนย์ นอกจากนี้ค่า  $R^2=0.95$ , Adjusted  $R^2=0.93$  และ Predicted  $R^2=0.85$  ยังยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบทางสถิตินี้เหมาะสมกับข้อมูล อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าพจน์ AB และ AC มีค่า  $p\text{-value}$  มากกว่า 0.05 แต่ก็ไม่สามารถตัดพจน์เหล่านั้นได้ แต่ยังคงพจน์ทั้งคู่ไว้ในสมการเพื่อรักษาความสอดคล้องตามลำดับชั้น (hierarchy)

ตารางที่ 6.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ

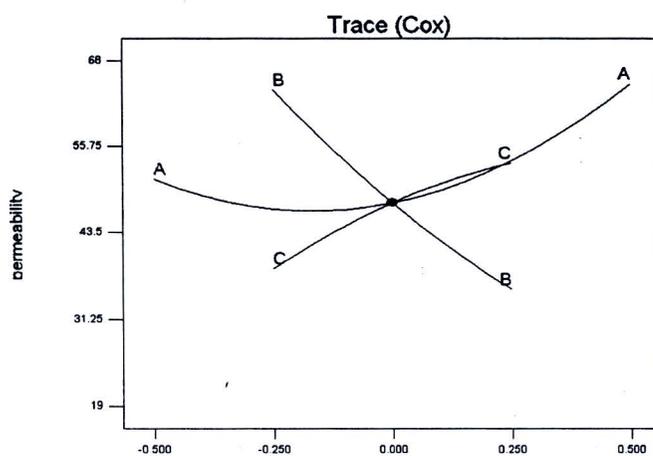
ANOVA for Mixture Quadratic Model						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	2431.57	5	486.31	33.43	< 0.0001	significant
Linear Mixture	1886.55	2	943.28	64.85	< 0.0001	
AB	12.9	1	12.9	0.89	0.374	
AC	6.98	1	6.98	0.48	0.5082	
BC	94.98	1	94.98	6.53	0.0339	
Residual	116.37	8	14.55			
Lack of Fit	43.47	5	8.69	0.36	0.8515	
Pure Error	72.91	3	24.30			
Cor Total	2547.94	13				
Std. Dev.	3.81		R-Squared	0.9543		
Mean	49.02		Adj R-Squared	0.9258		
C.V. %	7.78		Pred R-Squared	0.8457		
PRESS	393.24		Adeq Precision	18.846		

การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะไม่แสดงค่า  $p\text{-value}$  ของส่วนผสมหลักทั้ง 3 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดลอง แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าส่วนผสมหลักทั้ง 3 ส่วนผสมนั้นจะไม่มีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนอง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟ Trace ของค่าผลตอบสนองว่าส่วนผสมหลักนั้นมีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนองหรือไม่ โดยพิจารณาจากเส้นกราฟถ้าเส้นกราฟของ

ส่วนผสมใด มีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งซึ่งมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง แสดงว่าส่วนผสมนั้นมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าผลตอบแทน ภาพที่ 6.1 (ก) แสดงกราฟ Trace ของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) พบว่าส่วนผสม B และ C มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก เนื่องจากเส้นกราฟเป็นเส้นตรงที่เพิ่มขึ้นและลดลง แต่ส่วนผสม A ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก เนื่องจากเส้นกราฟมีลักษณะเกือบเป็นแนวราบ และภาพที่ 6.1 (ข) แสดงกราฟ Trace ของค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ พบว่าส่วนผสม A, B และ C มีอิทธิพลต่อค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ เนื่องจากกราฟมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างชัดเจน



(ก)



(ข)

ภาพที่ 6.1 กราฟ Trace ของ (ก) ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก และ (ข) ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำส่วนผสมทั้งหมดไปคำนวณค่าความสัมพันธ์ของสมการถดถอยที่เหมาะสมกับข้อมูลแล้ว ส่วนที่เป็นเส้นตรงของส่วนผสมนั้นไม่สามารถตัดส่วนผสมที่ไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองออกจากสมการได้ เนื่องจากแม้ว่าทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 จะไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก แต่ไม่ได้หมายความว่าจะไม่ใส่ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 ลงในส่วนผสม หากแต่ว่าสามารถใส่ในปริมาณเท่าใดก็ได้ที่หลีกเลี่ยงการหักส่วนผสมอื่นๆแล้ว ดังนั้น การทดลองแบบส่วนผสมในทอมที่เป็นรูปเชิงเส้นตรงจะต้องใส่พจน์ของส่วนผสมนั้นไว้ในสมการถดถอยเสมอ ถึงแม้ว่าส่วนผสมนั้นจะไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญก็ตาม

จากการวิเคราะห์เลือกรูปแบบและผลการวิเคราะห์การถดถอย นำมาหาค่าความสัมพันธ์ของสมการถดถอย โดยรูปแบบจำลองการถดถอยที่ใช้เป็นรูปแบบจำลองการถดถอยแบบพหุ (Multiple Regression) ที่เป็นรูปแบบสมการโพลิโนเมียลอันดับสอง (second-order polynomial) ซึ่งนำเสนอโดย Scheffe ซึ่งรูปแบบสมการนี้ไม่มีจุดตัดหรือค่าคงที่และส่วนกำลังสอง เนื่องจากผลรวมของส่วนผสมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 100% ดังนั้น รูปแบบจำลองการถดถอยของสมบัติแบบหล่อทรายคือ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมอากาศในรูปของตัวแปรส่วนประกอบเทียม (pseudo components) แสดงดังสมการที่ (35) และสมการที่ (36) ตามลำดับ

$$\text{ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก} = 5.07A + 12.13B - 0.19C \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \text{ความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ} = & 64.70A - 11.95B + 42.25C - \\ & 34.92AB + 25.48AC + 143.48BC \end{aligned} \quad (36)$$

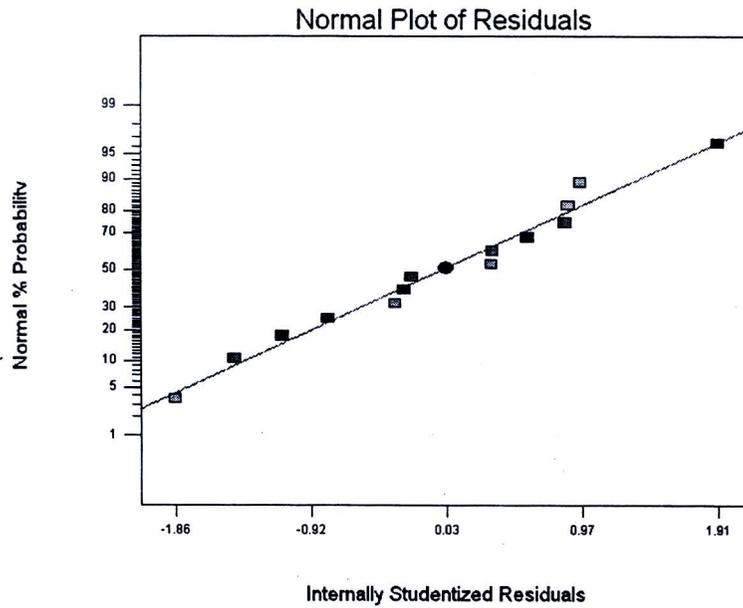
### 2.3 การตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบ

เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูล จะต้องทำการตรวจสอบว่ารูปแบบของข้อมูลมีรูปแบบของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม (Residuals) เป็นไปตามสมมติฐาน  $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  หรือไม่ ถ้าหากข้อมูลที่เก็บได้เป็นไปตามสมมติฐานดังกล่าว แสดงว่าข้อมูลที่เก็บได้นั้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ โดยมีการตรวจสอบตามสมมติฐาน 3 แบบคือ 1.การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล 2.การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล 3.การตรวจสอบความแปรปรวนที่คงที่ของข้อมูลในแต่ละระดับ

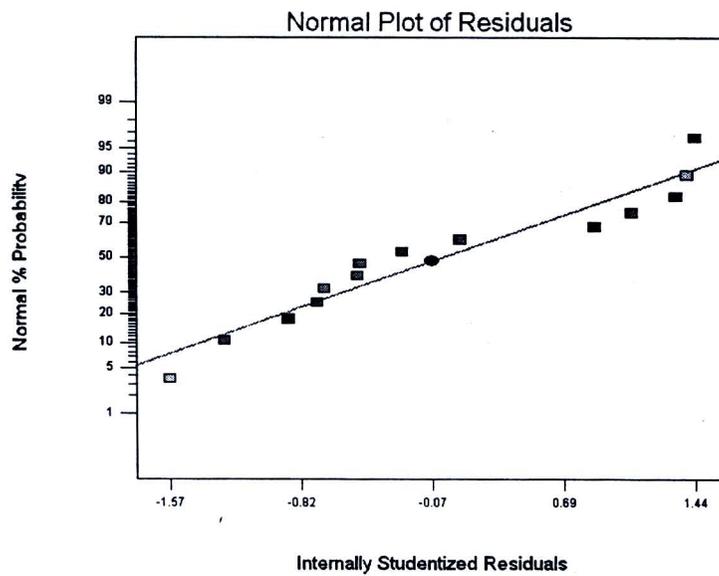
#### 2.3.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล

การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลจะพิจารณารูปแบบโดยอาศัยการสร้างกราฟระหว่างค่าความน่าจะเป็นสะสมและค่าคลาดเคลื่อนสุ่มลงบนกราฟ โดยให้ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่ในแกนตั้งและค่าคลาดเคลื่อนสุ่มอยู่ในแกนนอน ถ้าแนวโน้มของกราฟเป็น

เส้นตรงแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่คาดไว้



ภาพที่ 6.2 การแจกแจงแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อนสุ่มของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

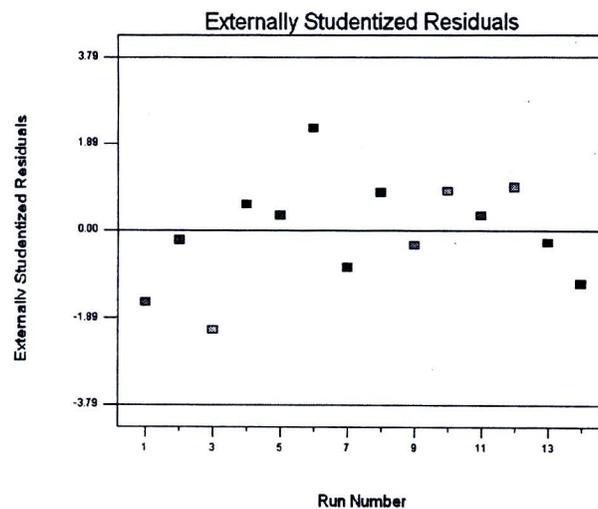


ภาพที่ 6.3 การแจกแจงแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อนสุ่มของค่าความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศ

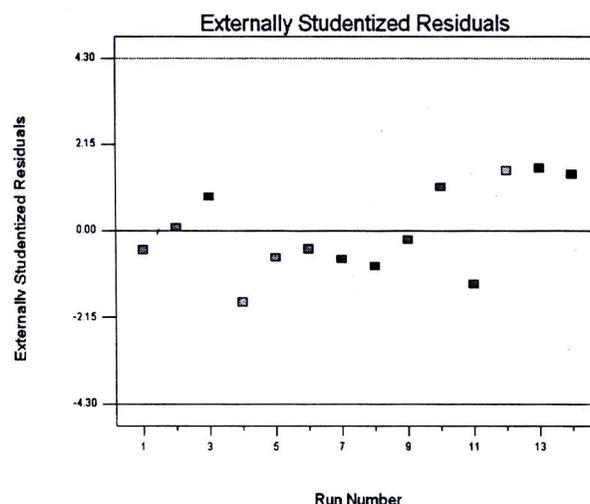
เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.2 และภาพที่ 6.3 จะเห็นว่าแนวโน้มของกราฟทั้งสอง มีลักษณะการกระจายตัวมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง สรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศมีการแจกแจงแบบปกติ

### 2.3.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลทำได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและลำดับที่ในการทดสอบ (time sequence) ตามหลักการการสุ่ม (randomization) เพื่อใช้ทดสอบความเป็นอิสระต่อกันของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม ถ้าแนวโน้มกราฟไม่มีลักษณะเป็นรูปแบบ (pattern) แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้มีความเป็นอิสระต่อกันและเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้



ภาพที่ 6.4 ค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและลำดับที่ของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

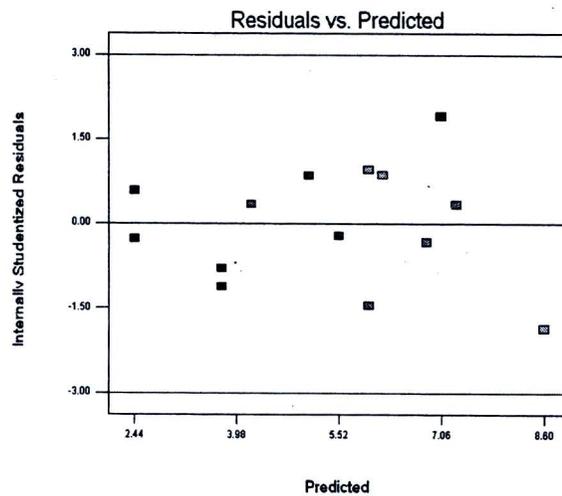


ภาพที่ 6.5 ค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและลำดับที่ของค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ

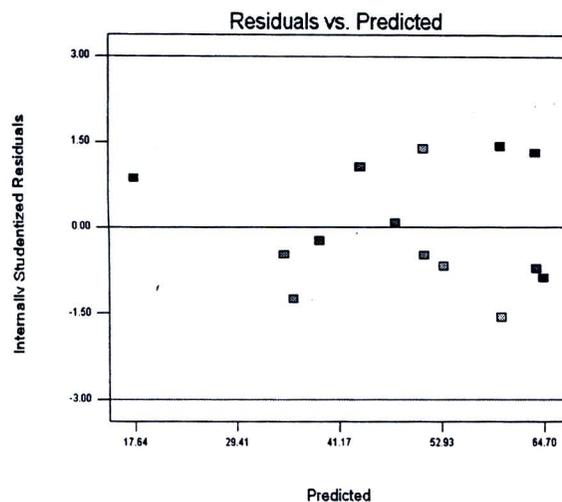
เมื่อพิจารณาภาพที่ 6.4 และภาพที่ 6.5 พบว่ากราฟทั้งสองมีลักษณะการกระจายของข้อมูลไม่เป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบ (pattern) สรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับที่ใช้ในการทดลอง

### 2.3.3 การตรวจสอบความแปรปรวนที่คงที่ของข้อมูลในแต่ละระดับ

การตรวจสอบนี้เป็นการสร้างกราฟระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและค่าประมาณของข้อมูล จากสมมติฐานที่ว่าความแปรปรวนเท่ากับค่าคงที่ โดยพิจารณาจากการกระจายของข้อมูลในแต่ละระดับมีการกระจายที่ไม่แตกต่างกัน แสดงว่ามีความคงที่ของความแปรปรวนของข้อมูลในแต่ละระดับ



ภาพที่ 6.6 ค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและค่าประมาณการของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก



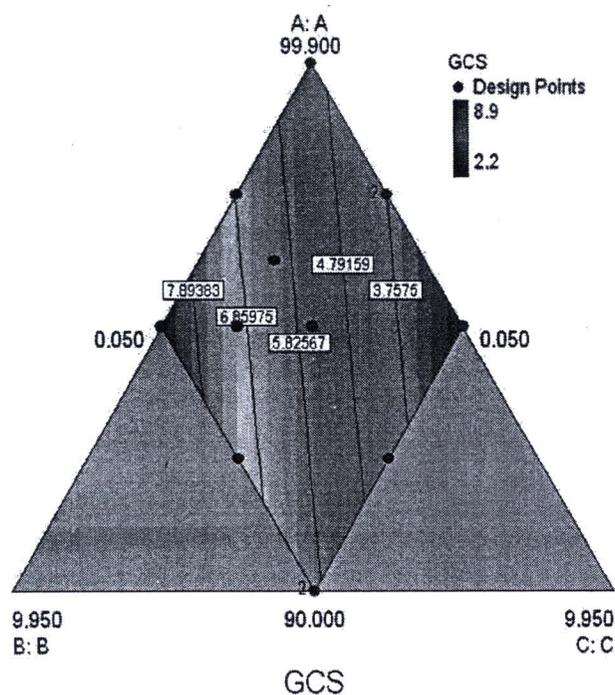
ภาพที่ 6.7 ค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและค่าประมาณการของค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ

การตรวจสอบความคงที่ของความแปรปรวนในภาพที่ 6.6 และภาพที่ 6.7 พบว่ากราฟทั้งสองมีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่ไม่แตกต่างกันและไม่เกิดลักษณะการกระจายตัวที่เป็นรูปร่างแบบใด ๆ แสดงให้เห็นว่ารูปแบบสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลและมีความคงที่ของความแปรปรวนของข้อมูลในแต่ละระดับ

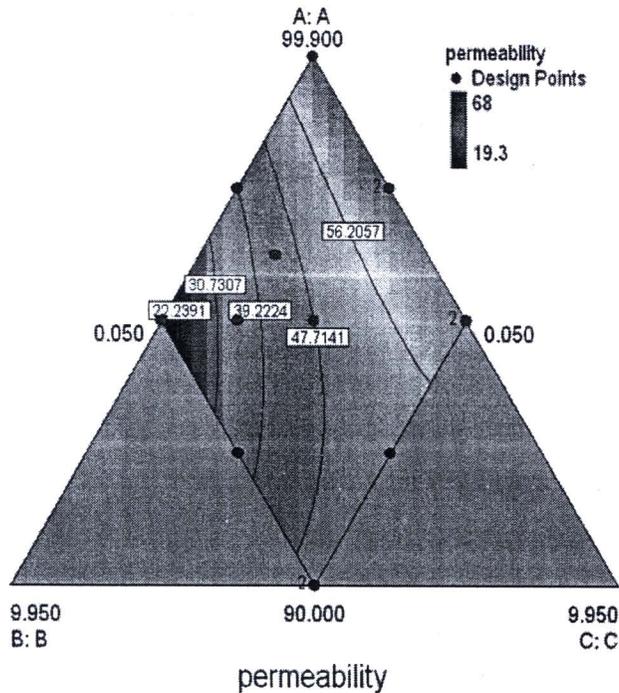
จากการพิจารณาความเพียงพอของรูปแบบ พบว่ารูปแบบของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม (Residual) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลอง เป็นไปตามหลักการ  $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  ทุกประการ ดังนั้นสรุปได้ว่า ข้อมูลในการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำรูปแบบสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมานำไปใช้ในการประมาณค่าของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศได้

#### 2.4 การวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง

สมการถดถอยในสมการที่ (35) และสมการที่ (36) ถูกนำมาทำการสร้างกราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (contour plot) ของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ จากการพิจารณาพื้นผิวผลตอบสนองในภาพที่ 6.8 และภาพที่ 6.9 พบว่า เมื่อส่วนผสมเบนโทไนด์ (B) อยู่ในระดับที่สูงและส่วนผสมน้ำ (C) อยู่ในระดับที่ต่ำ จะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกมีค่าสูงชัน แต่เมื่อส่วนผสมเบนโทไนด์ (B) อยู่ในระดับที่ต่ำและส่วนผสมน้ำ (C) อยู่ในระดับที่สูง จะทำให้ค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศมีค่าที่สูงชัน ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีและงานวิจัยของ Paluszkievicz et al. ในปี ค.ศ. 2008

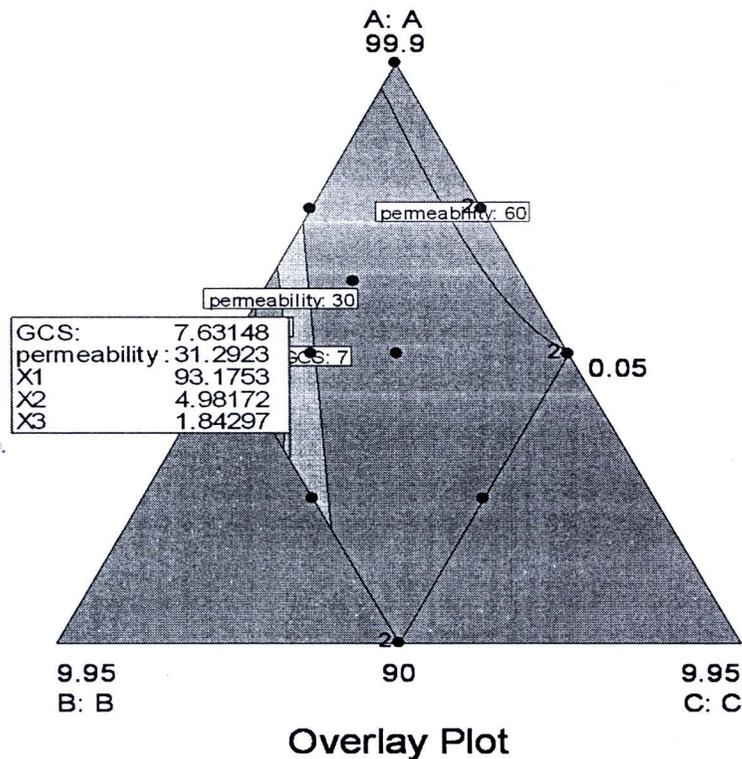


ภาพที่ 6.8 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก



ภาพที่ 6.9 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองของค่าความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศ

การหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยให้ผลตอบสนองของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศมีค่าผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดร่วมกัน โดยการใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงร่าง (Overlay Plot) ของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกันภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดส่วนผสมคือ  $90.00 \leq A \leq 99.9$ ,  $0.05 \leq B \leq 5.0$ ,  $0.05 \leq C \leq 5.0$  และมีการกำหนดเงื่อนไขของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกต้องมีค่ามากที่สุดที่อยู่ในช่วงประมาณ 7 - 8 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (คมสัน จิรภัทรศิลป์, 2548) และค่าความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศอยู่ในช่วง 30-68 ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานของแบบหล่อทรายที่ใช้สำหรับหล่อชิ้นงานที่ผลิตเป็นประจำของโรงงานกรณีศึกษา จากการศึกษพบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ระดับของส่วนผสมทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 ( $x_1$ ) ร้อยละ 93.2 ส่วนผสมเบนโทไนต์ ( $x_2$ ) ร้อยละ 5 และส่วนผสมของน้ำ ( $x_3$ ) ร้อยละ 1.8 ซึ่งทำให้ได้ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) ประมาณ 7.6 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และค่าความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศประมาณ 31.3 ซึ่งแสดงดังภาพที่ 6.10



ภาพที่ 6.10 โครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองวางซ้อนทับกันของทั้ง 2 ผลตอบสนอง

## 2.5 การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของทั้ง 2 ผลตอบสนอง

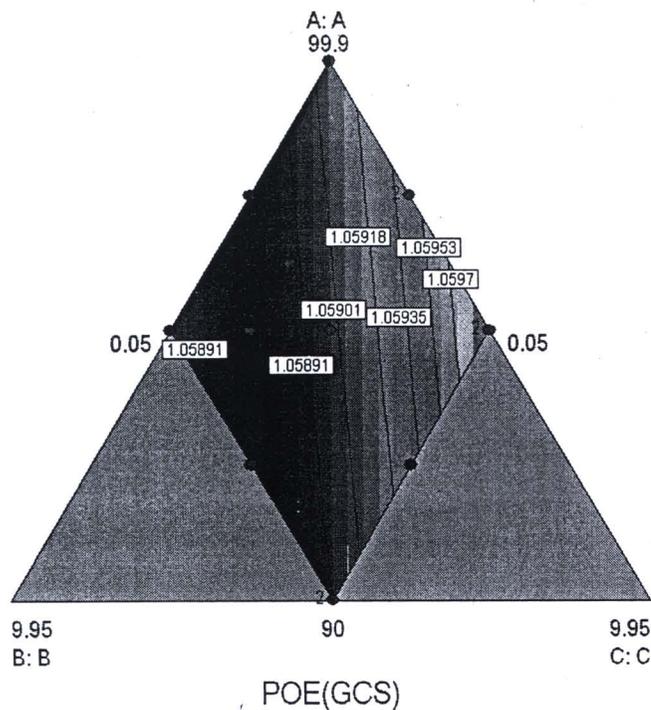
การหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง บางครั้งอาจจะไม่ใช่จุดที่ดีที่สุด โดยเฉพาะในการกระบวนการผลิตที่ผลตอบสนองมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับของปัจจัยหรือตัวแปร (ส่วนผสม) เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อความผันแปรในผลตอบสนองและความคลาดเคลื่อนของข้อมูลน้อยที่สุด การวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในลักษณะนี้สามารถดำเนินการได้โดยการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (Propagation of error, POE) โดยใช้ร่วมกับวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ (desirability function) ซึ่งเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุด (ชาญณรงค์ สายแก้ว, 2553)

การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน สามารถวิเคราะห์ได้จากความผันแปรของความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละระดับของส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 6.7 โดยการกำหนดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของแต่ละส่วนผสม เพื่อดูความผันแปรของส่วนผสมที่มีความสามารถส่งผ่านไปยังผลตอบสนองได้มากน้อยเพียงใด แล้วจึงคำนวณหาความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลตอบสนองที่มีค่าน้อยที่สุด ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 (A) เบนโทไนต์ (B) และน้ำ (C) กำหนดให้เป็น 1, 0.25, 0.20 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.7 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสมที่กำหนด

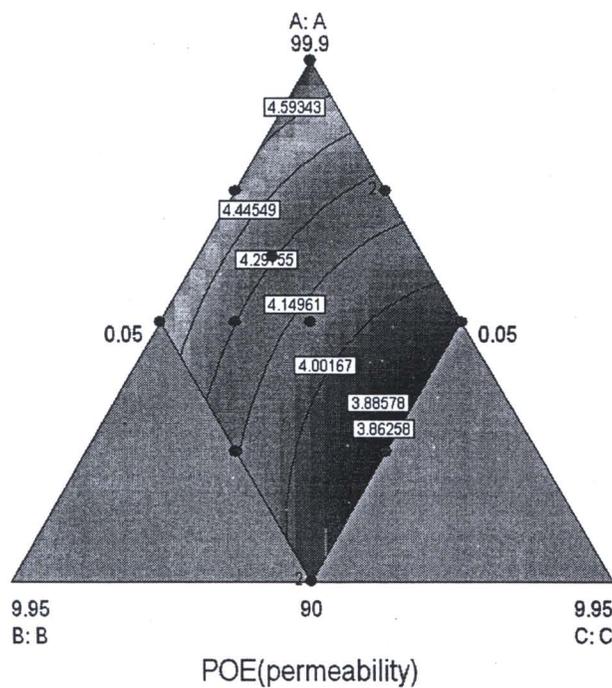
Name	Unit	Type	Std.Dev.	Low	High
A	%	Component	1.00	90.00	99.9
B	%	Component	0.25	0.05	5.0
C	%	Component	0.20	0.05	5.0

ผลจากการกำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละส่วนผสม โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน ซึ่งเมื่อนำมาสร้างกราฟพื้นผิวผลตอบสนองแบบเส้นโครงร่างของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสำหรับค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกแสดงภาพที่ 6.11 พบว่าพื้นผิวผลตอบสนองแบบเส้นโครงร่างมีการค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 1.058-1.06 และเมื่อพิจารณาพื้นที่ที่มีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดจะอยู่ในบริเวณกึ่งกลางไปจนถึงทางด้านซ้ายของเส้นโครงร่าง



ภาพที่ 6.11 เส้นโครงร่างของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสำหรับค่าความแข็งแรงอัดสภาพเปียก

ภาพที่ 6.12 แสดงเส้นโครงร่างของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสำหรับค่าความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศ พบว่าพื้นผิวผลตอบสนองแบบเส้นโครงร่างมีค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 3.85-4.74 และเมื่อพิจารณาพื้นที่ที่มีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดจะอยู่ในบริเวณทางด้านขวาส่วนล่างของส่วนผสม C



ภาพที่ 6.12 เส้นโครงร่างของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสำหรับค่าความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศ

การวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ที่มีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของผลตอบสนองของค่าความแข็งแรงอัดสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศมีค่าน้อยที่สุดร่วมกัน สามารถหาได้โดยใช้วิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ โดยการกำหนดเงื่อนไขให้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศมีค่าน้อยที่สุดลงในโปรแกรมแสดงดังตารางที่ 6.8

จากการประมวลผลของโปรแกรมในการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนร่วมกับวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ประกอบไปด้วย ส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 (A) ร้อยละ 93.3 ส่วนผสมของเบนโทไนต์ (B) ร้อยละ 5 และส่วนผสมของน้ำ (C) ร้อยละ 1.7 โดยให้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและ

ความสามารถในการปล่อยซีมาอากาศที่น้อยที่สุดที่ทำนายได้เท่ากับ 1.059 และ 4.28 ตามลำดับ โดยให้ค่าความพึงพอใจสูงสุดเท่ากับ 0.724 หรือ 72.4 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 6.13

ตารางที่ 6.8 การกำหนดค่าฟังก์ชันความพึงพอใจของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนทั้ง 2 ผลตอบสนอง

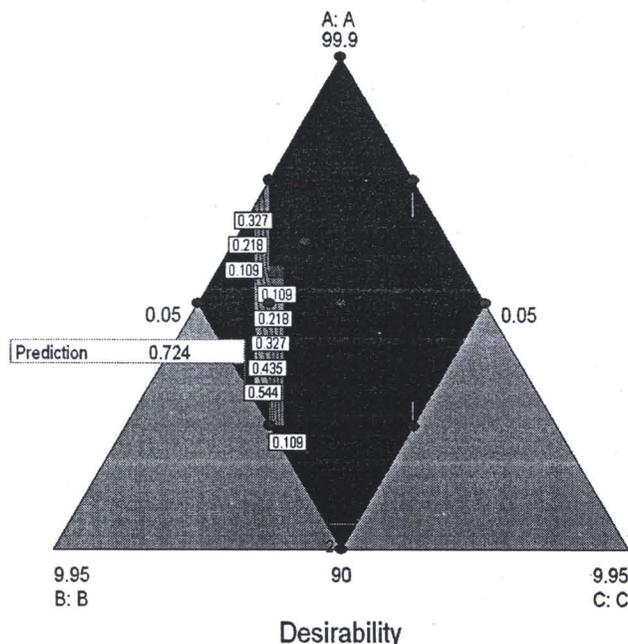
Constraints						
		Lower	Upper	Lower	Upper	Importance
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	
A	is in range	90	99.9	1	1	3
B	is in range	0.05	5	1	1	3
C	is in range	0.05	5	1	1	3
GCS	maximize	7	8	1	1	5
<i>POE(GCS)</i>	<i>minimize</i>	<i>1.058</i>	<i>1.06</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>3</i>
permeability	is in range	30	68	1	1	3
<i>POE(permeability)</i>	<i>minimize</i>	<i>3.85</i>	<i>4.74</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>3</i>

Solutions									
Number	A	B	C	GCS	POE(GCS)	permeability	POE(permeability)	Desirability	
1	93.325	5.000	1.675	7.73397	1.05886	30	4.2798	0.724	Selected
2	93.137	5.000	1.863	7.6341	1.05885	31.3407	4.25128	0.690	
3	96.432	3.511	0.057	7.53237	1.05885	30	4.53713	0.502	
4	96.600	3.350	0.050	7.42128	1.05884	31.387	4.53906	0.451	

Solutions found

ภาพที่ 6.13 ผลของโปรแกรมในการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนร่วมกับฟังก์ชันความพึงพอใจทั้ง 2 ผลตอบสนอง

เมื่อนำมาสร้างกราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองของฟังก์ชันความพึงพอใจพบว่า บริเวณที่มีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่ทำนายได้เป็นบริเวณเดียวกันกับที่ได้ทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมดังแสดงในภาพที่ 6.14



ภาพที่ 6.14 เส้นโครงร่างของฟังก์ชันความพึงพอใจร่วมกับการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนทั้ง 2 ผลตอบสนอง

อย่างไรก็ตาม ในทางอุตสาหกรรมผู้ประกอบการจะให้ความสำคัญในด้านต้นทุนหรือกำไรเป็นหลัก โดยจากการพิจารณาราคาต้นทุนวัตถุดิบของแบบหล่อทรายในปัจจุบัน (พ.ศ. 2553) แสดงดังตารางที่ 6.9 พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของแบบหล่อทรายที่ได้จากการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดมีราคาต้นทุนของวัตถุดิบ สูงกว่าอัตราส่วนผสมแบบเดิมของโรงงาน แสดงดังตารางที่ 6.10 ดังนั้น การหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทราย นอกจากจะเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดทำให้สมบัติของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศดีที่สุดแล้ว ยังต้องพิจารณาค่าต้นทุนที่ผู้ประกอบการยอมรับได้ส่วนมากจะหมายถึงต้นทุนต่ำที่สุดอีกด้วย ซึ่งจะได้พิจารณาในส่วนของต้นทุนต่อไป

ตารางที่ 6.9 ราคาต้นทุนวัตถุดิบของส่วนผสมแบบหล่อทราย

วัตถุดิบของแบบหล่อทราย	ราคาวัตถุดิบ (บาท/กิโลกรัม)
ทราย (A)	2.24
เบนโทไนต์ (B)	8
*น้ำ (C)	0.015

\*หมายเหตุ น้ำมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1 ดังนั้น น้ำ 1 ลิตร มีค่าเท่ากับ 1 กิโลกรัม

ตารางที่ 6.10 ต้นทุนวัตถุดิบของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดและอัตราส่วนแบบเดิม

อัตราส่วนผสม	A	B	C	ต้นทุนวัตถุดิบ (บาท/กิโลกรัม)
อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (POE)	93.3	5.0	1.7	2.50
อัตราส่วนแบบเดิม	94.0	3.5	2.5	2.39

### 3. การวิเคราะห์ราคาต้นทุนของวัตถุดิบ (cost)

จากการคำนวณราคาต้นทุนของวัตถุดิบแต่ละอัตราส่วนผสมตามแผนการออกแบบการทดลองส่วนผสม เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 6.11

ตารางที่ 6.11 ราคาต้นทุนวัตถุดิบของแต่ละอัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสม	A (%)	B (%)	C (%)	ต้นทุนวัตถุดิบ (บาทต่อกิโลกรัม)
1	94.95	0.05	5.00	2.13
2	92.48	5.00	2.53	2.47
3	92.48	2.53	5.00	2.27
4	99.90	0.05	0.05	2.24
5	94.95	5.00	0.05	2.53
6	97.42	0.05	2.53	2.19
7	97.43	2.53	0.05	2.38
8	94.95	2.53	2.53	2.33
9	96.18	2.53	1.28	2.36
10	94.95	3.76	1.28	2.43
11	90.00	5.00	5.00	2.42
12	90.00	5.00	5.00	2.42
13	94.95	0.05	5.00	2.13
14	97.43	0.05	2.53	2.19

### 3.1 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมของต้นทุนวัตถุดิบ

การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยของค่าต้นทุนวัตถุดิบ ดังแสดงในตารางที่ 6.12 แสดงการคำนวณเชิงลำดับหรือผลรวมของกำลังสองแบบพิเศษ (Sequential Model Sum of Squares) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 พบว่ารูปแบบสมการถดถอยที่ได้รับการยอมรับสำหรับค่าต้นทุนวัตถุดิบตามผลลัพธ์ที่โปรแกรมแนะนำคือ รูปแบบเชิงเส้นตรง (Linear) เนื่องจากมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ( $p\text{-value} < 0.0001$ ) ในขณะที่ผลการทดสอบ Lack of Fit เพื่อยืนยันว่ารูปแบบจำลองการถดถอยนี้เป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มาหรือไม่นั้นไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากราคาต้นทุนวัตถุดิบคำนวณจากราคาของแต่ละส่วนผสมที่มีค่าคงที่ ดังนั้นการทดลองส่วนผสมเดียวกันจึงมีราคาต้นทุนวัตถุดิบที่เท่ากันเสมอ จึงทำให้ไม่สามารถทดสอบ Lack of Fit ได้

ตารางที่ 6.12 การคำนวณเชิงลำดับหรือผลรวมของกำลังสองแบบพิเศษสำหรับค่าต้นทุนวัตถุดิบ

Sequential Model Sum of Squares [Type I]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
Mean vs Total	75.4	1	75.4			
<i>Linear vs Mean</i>	<i>0.22</i>	<i>2</i>	<i>0.11</i>	<i>11362</i>	<i>&lt;0.0001</i>	<i>Suggested</i>
Quadratic vs Linear	3.52E-005	3	1.17E-005	1.33	0.3314	
Sp Cubic vs Quadratic	2.82E-005	1	2.82E-005	4.64	0.0682	
Cubic vs Sp Cubic	3.04E-005	3	1.01E-005	3.34	0.1370	
Residual	1.21E-005	4	3.03E-006			
Total	75.62	14	5.40			

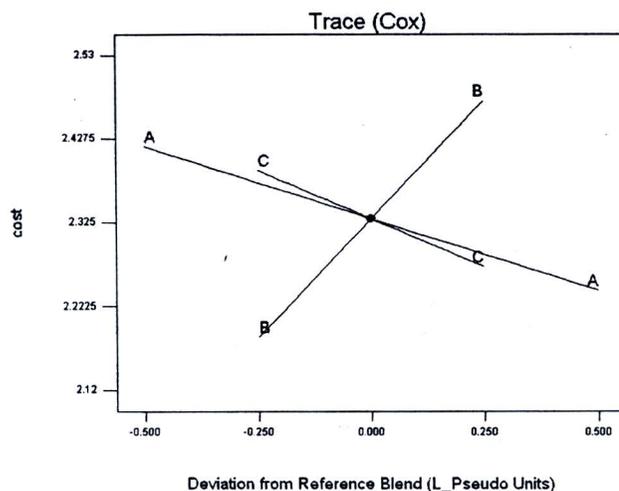
### 3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าต้นทุนวัตถุดิบ

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าต้นทุนวัตถุดิบ ในตารางที่ 6.13 พบว่ารูปแบบสมการเส้นตรง (Linear Model) ของค่าต้นทุนวัตถุดิบที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลนี้เนื่องจากค่า  $F=11362.74$  ( $p\text{-value} < 0.0001$ ) สรุปว่ามีอย่างน้อยหนึ่งค่าสัมประสิทธิ์ส่วนที่แสดงความเป็นระนาบไม่เท่ากัน และยังแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมทุกอย่าง มีอิทธิพลต่อราคาต้นทุนในการผลิตแบบหล่อทราย นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ), Adjusted  $R^2$  และ Predicted  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 0.9995 0.9994 และ 0.9992 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบทางสถิตินี้เหมาะสมกับข้อมูล

ตารางที่ 6.13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าต้นทุนวัตถุดิบ

ANOVA for Mixture Linear Model						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	0.22	2	0.11	11363	< 0.0001	significant
Linear Mixture	0.22	2	0.11	11363	< 0.0001	
Residual	1.06E-004	11	9.63E-006			
Lack of Fit	1.06E-004	8	1.32E-005			
Pure Error	0	3	0			
Cor Total	0.22	13				
Std. Dev	3.1E-003		R-Squared	0.9995		
Mean	2.32		Adj R-Squared	0.9994		
C.V. %	0.13		Pred R-Squared	0.9992		
PRESS	1.67E-004		Adeq Precision	276.443		

ภาพที่ 6.15 แสดงกราฟ Trace ของค่าต้นทุนวัตถุดิบ พบว่าส่วนผสม A B และ C มีอิทธิพลต่อค่าต้นทุนวัตถุดิบ เนื่องจากเส้นกราฟเป็นเส้นตรงที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาเส้นกราฟส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 (A) และน้ำ (C) จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของส่วนผสมทั้งสองแล้วมีผลทำให้ค่าต้นทุนวัตถุดิบมีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณส่วนผสมของเบนโทไนต์ (B) มีผลทำให้ค่าต้นทุนวัตถุดิบมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 6.15 กราฟ Trace ของ ค่าต้นทุนของวัตถุดิบ

เมื่อนำมาสร้างสมการของแบบจำลองการถดถอยของต้นทุนวัตถุดิบในรูปของตัวแปรส่วนประกอบเทียม (pseudo components) แสดงดังสมการที่ (37)

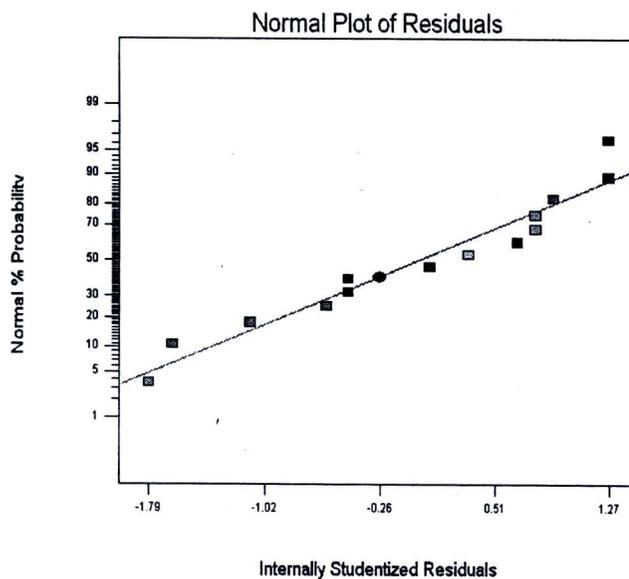
$$\text{ต้นทุนวัตถุดิบ} = 2.24A + 2.82B + 2.02C \quad (37)$$

### 3.3 การตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบ

เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูล จะต้องทำการตรวจสอบว่ารูปแบบของข้อมูลมีรูปแบบของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม (Residuals) เป็นไปตามสมมติฐาน  $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$  หรือไม่ ถ้าหากข้อมูลที่เก็บได้เป็นไปตามสมมติฐานดังกล่าว แสดงว่าข้อมูลที่เก็บได้นั้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ โดยมีการตรวจสอบ 3 แบบคือ 1. การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล 2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล 3. การตรวจสอบความแปรปรวนที่คงที่ของข้อมูลในแต่ละระดับ

#### 3.3.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล

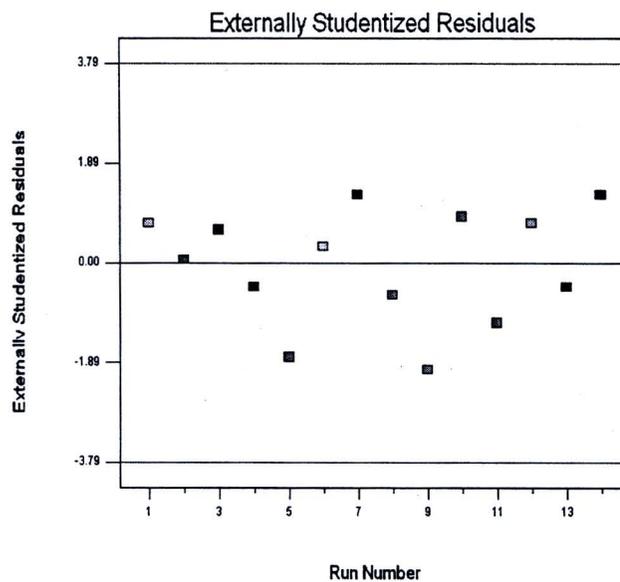
จากการสร้างกราฟระหว่างค่าความน่าจะเป็นสะสมและค่าคลาดเคลื่อนสุ่มโดยให้ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่ในแกนตั้งและค่าคลาดเคลื่อนสุ่มอยู่ในแกนนอน โดยพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟถ้าเป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่คาดไว้ จากการพิจารณาภาพที่ 6.16 พบว่า ข้อมูลส่วนใหญ่มีแนวโน้มการกระจายตัวเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่คาดไว้



ภาพที่ 6.16 การแจกแจงแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อนสุ่มของค่าต้นทุนวัตถุดิบ

### 3.3.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

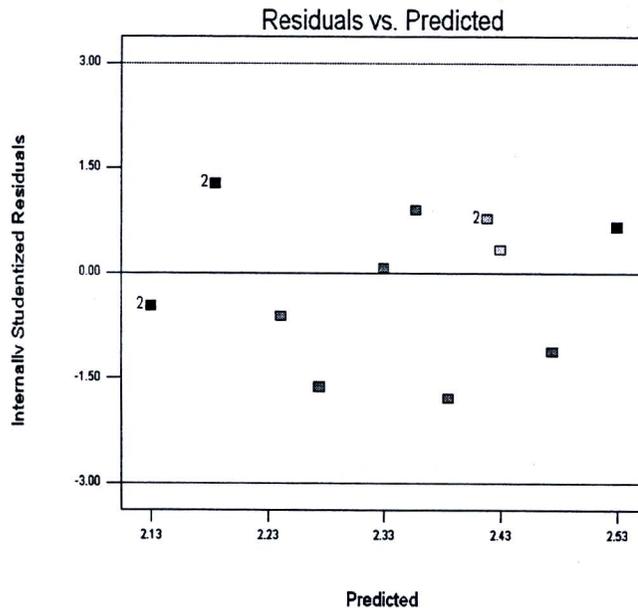
จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและลำดับที่ในการทดสอบ (time sequence) ตามหลักการสุ่ม (randomization) เพื่อใช้ทดสอบความเป็นอิสระต่อกันของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม แสดงดังภาพที่ 6.17 พบว่าแนวโน้มของกราฟที่ได้ไม่มีลักษณะเป็นรูปแบบ (pattern) ใดๆ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้มีความเป็นอิสระต่อกันและเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้



ภาพที่ 6.17 ค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและลำดับที่ของค่าต้นทุนวัตถุดิบ

### 3.3.3 การตรวจสอบความแปรปรวนที่คงที่ของข้อมูลในแต่ละระดับ

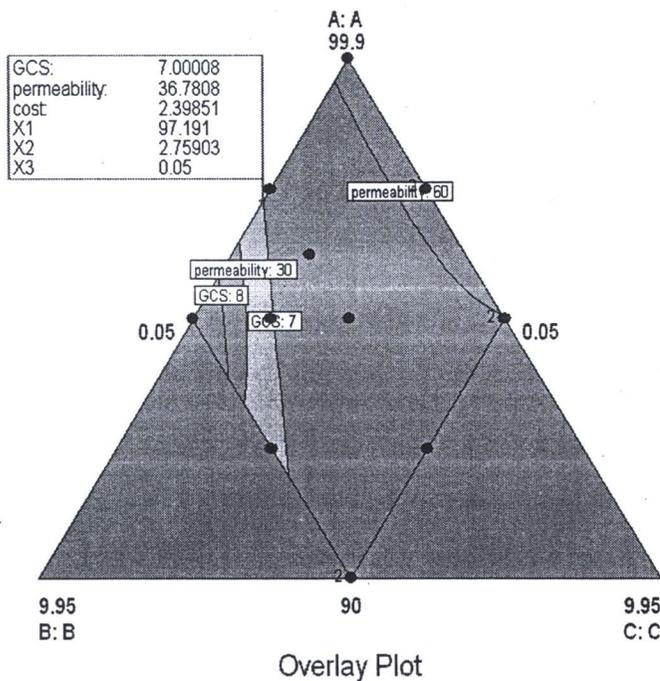
จากการสร้างกราฟระหว่างค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและค่าประมาณการของข้อมูล แสดงดังภาพที่ 6.18 พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลในแต่ละระดับมีการกระจายที่ไม่แตกต่างกัน แสดงว่ามีความคงที่ของความแปรปรวนของข้อมูลในแต่ละระดับ



ภาพที่ 6.18 ค่าคลาดเคลื่อนสุ่มและค่าประมาณการของค่าต้นทุนวัตถุดิบ

#### 4. การวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมทั้ง 3 ผลตอบสนอง

การหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดทั้ง 3 ผลตอบสนองได้แก่ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก ความสามารถในการปล่อยซิมอากาศและต้นทุนวัตถุดิบ ให้มีค่าผลตอบสนองอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานที่กำหนดและมีต้นทุนต่ำที่สุด ในการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงร่างของทุกผลตอบสนอง โดยมีการกำหนดเงื่อนไขของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกอยู่ในช่วงประมาณ 7 – 8 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศอยู่ในช่วงระหว่าง 30-68 ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดที่ใช้สำหรับงานหล่อของโรงงานกรณีศึกษา และค่าต้นทุนวัตถุดิบมีค่าต่ำที่สุด พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ระดับของส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 ( $x_1$ ) ร้อยละ 97.2 ส่วนผสมของเบนโทไนต์ ( $x_2$ ) ร้อยละ 2.76 และส่วนผสมของน้ำ ( $x_3$ ) ร้อยละ 0.05 ซึ่งทำให้ได้ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) ประมาณ 7 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศประมาณ 36.78 และมีค่าต้นทุนวัตถุดิบ 2.40 บาทต่อกิโลกรัม แสดงดังภาพที่ 6.19



ภาพที่ 6.19 โครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองทั้ง 3 ผลตอบสนองวางซ้อนทับกัน

##### 5. การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของทั้ง 3 ผลตอบสนอง

ในการดำเนินกระบวนการผลิตหรือกระบวนการทดลองใดๆ อาจเกิดค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเนื่องจากการทดลองซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลนี้ควรที่จะมีค่าน้อยที่สุด การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสามารถทำได้จากการกำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละระดับของส่วนผสม ตารางที่ 6.14 แสดงการกำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนผสมของ A B และ C เป็น 1 0.25 และ 0.20 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.14 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสมที่กำหนด

Name	Unit	Type	Std. Dev.	Low	High
A	%	Component	1.00	90	99.9
B	%	Component	0.25	0.05	5
C	%	Component	0.20	0.05	5

การวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ที่มีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของผลตอบสนองของค่าความแข็งแรงอัดสภาพเปียก ค่าความสามารถในการปล่อยซีมอากาศ และค่าต้นทุนวัตถุดิบมีค่าน้อยที่สุดร่วมกัน สามารถหาได้โดยใช้วิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ โดยการกำหนดเงื่อนไขให้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (POE) ทั้ง 3 ผลตอบสนองให้มีค่าน้อยที่สุดลงในโปรแกรมแสดงดังตารางที่ 6.15

ตารางที่ 6.15 การกำหนดค่าฟังก์ชันความพึงพอใจของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนทั้ง 3 ผลตอบสนอง

Constraints <sup>๑</sup>						
		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weigh	Importance
A	is in range	90	99.9	1	1	3
B	is in range	0.05	5	1	1	3
C	is in range	0.05	5	1	1	3
GCS	is in range	7	8	1	1	3
POE(GCS)	<i>minimize</i>	1.058	1.06	1	1	3
permeability	is in range	30	68	1	1	3
POE(permeability)	<i>minimize</i>	3.854	4.74	1	1	3
cost	minimize	2.13	2.53	1	1	5
POE(cost)	<i>minimize</i>	0.0153	0.0157	1	1	5

Solutions											
Number	A	B	C	GCS	POE(GCS)	permeability	POE(permeability)	cost	POE(cost)	Desirability	
1	<u>94.580</u>	<u>3.874</u>	<u>1.545</u>	7	<u>1.05884</u>	<u>35.6096</u>	<u>4.25906</u>	<u>2.42975</u>	<u>0.0152582</u>	<u>0.574</u>	<b>Selected</b>
2	94.812	3.776	1.412	7.00062	1.05884	35.5084	4.27983	2.42702	0.0152584	0.574	
3	94.041	4.105	1.855	7.00001	1.05884	35.9816	4.21494	2.43621	0.0152557	0.573	
4	93.767	4.221	2.011	7	1.05884	36.2506	4.19472	2.43948	0.0152545	0.571	
5	97.191	2.759	0.050	7	1.05884	36.7819	4.54817	2.3985	0.0152747	0.520	
5 Solutions found											

ภาพที่ 6.20 ผลของโปรแกรมในการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนร่วมกับฟังก์ชันความพึงพอใจของทั้ง 3 ผลตอบสนอง

จากผลเฉลยระดับของส่วนผสมที่เหมาะสมในการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนร่วมกับการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจแสดงดังภาพที่ 6.20 พบว่าระดับของส่วนผสมที่เหมาะสมคือทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 (A) เท่ากับร้อยละ 94.6 เบนโทไนต์ (B) เท่ากับร้อยละ 3.9 และน้ำ (C) เท่ากับร้อยละ 1.5 ซึ่งทำให้ได้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกเท่ากับ 1.059 ค่าความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศเท่ากับ 4.26 และค่าต้นทุนวัตถุดิบเท่ากับ 0.015 ขณะที่ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกเท่ากับ 7 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่าความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศเท่ากับ 35.6 และค่าต้นทุนวัตถุดิบเท่ากับ 2.43 บาทต่อกิโลกรัม โดยให้ค่าความพึงพอใจสูงสุดเท่ากับ 0.574 หรือเท่ากับ 57.4 เปอร์เซ็นต์ แม้ค่าความพึงพอใจที่ได้จะมีค่าไม่สูงมากนัก ซึ่งอาจมีผลทำให้เมื่อนำอัตราส่วนผสมที่ได้นำไปใช้งานจริงทำให้สมบัติของค่าการทดสอบที่ได้มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูล อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนาย มีสมบัติตรงตามการทดสอบจริงหรือไม่ จำเป็นต้องทำการยืนยันผลการทดลอง

#### 6. การยืนยันผลการทดลอง (Confirmation Experiments)

อัตราส่วนผสมที่นำมาทดลองเพื่อยืนยันผลมี 2 อัตราส่วนผสม คือ อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนอง ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 ร้อยละ 93.3 ส่วนผสมของเบนโทไนต์ ร้อยละ 5 และส่วนผสมของน้ำ ร้อยละ 1.7 และอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ของ 3 ผลตอบสนอง (ต้นทุนต่ำที่สุด) ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 ร้อยละ 94.6 เบนโทไนต์ ร้อยละ 3.9 และน้ำ ร้อยละ 1.5

อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนองและ 3 ผลตอบสนอง ถูกนำมาทำการทดลองยืนยันผลการทดลอง โดยทำการทดลองซ้ำเป็นจำนวนทั้งสิ้น 10 ครั้ง พร้อมคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่น (confidence interval) ที่ระดับ 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 6.16 และในตารางที่ 6.17

การคำนวณหาค่าของช่วงของความเชื่อมั่นที่ระดับ 95 เปอร์เซ็นต์ ของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศ สามารถคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นของค่า  $\mu$  ได้จากสมการที่ (38)

$$\bar{y} - t_{0.025,9} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{y} + t_{0.025,9} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (38)$$



ตารางที่ 6.16 ผลการทดสอบอัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด  
ของ 2 ผลตอบสนอง

การทดสอบ	ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก	ความสามารถในการปล่อยซีมอากาศ
1	7.9	30
2	7.9	29
3	8.1	32
4	7.6	29
5	7.8	31
6	7.8	32
7	7.6	30
8	7.6	30
9	7.9	31
10	7.8	32
ค่าเฉลี่ย	7.8	30.6
S.D.	0.16	1.17

ตารางที่ 6.17 ผลการทดสอบอัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด  
ของ 3 ผลตอบสนอง

การทดสอบ	ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก	ความสามารถในการปล่อยซีมอากาศ
1	7	37
2	7.2	38
3	7.3	36
4	7.1	35
5	7.2	36
6	7.4	35
7	7.1	36
8	7.4	34
9	7.3	35
10	7.2	37
ค่าเฉลี่ย	7.22	35.9
S.D.	0.13	1.2

จากการทดลองยืนยันผลของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนองและ 3 ผลตอบสนอง เมื่อทำการคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ 95 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นสามารถแสดงดังในตารางที่ 6.18 และตารางที่ 6.19

ตารางที่ 6.18 ผลการยืนยันผลการทดลองและหาช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 % ของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนอง

ผลตอบสนอง	ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95%		ค่าเฉลี่ย ผลการทดสอบ
	ช่วงต่ำ	ช่วงสูง	
ความแข็งแรงอัดใน สภาพเปียก	7.68	7.92	7.8
ความสามารถในการ ปล่อยซึมอากาศ	29.76	31.44	30.6

ตารางที่ 6.19 ผลการยืนยันผลการทดลองและหาช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 % ของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 3 ผลตอบสนอง

ผลตอบสนอง	ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95%		ค่าเฉลี่ย ผลการทดสอบ
	ช่วงต่ำ	ช่วงสูง	
ความแข็งแรงอัดใน สภาพเปียก	7.13	7.32	7.22
ความสามารถในการ ปล่อยซึมอากาศ	35	36.76	35.9

เมื่อนำอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนองและ 3 ผลตอบสนอง มาทำการแปลงค่าของส่วนประกอบจริง (actual components) ให้อยู่ในรูปของตัวแปรส่วนประกอบเทียม สามารถหาได้โดยสมการที่ (39)

$$x_i^* = \frac{x_i - L_i}{1 - L_i} \quad (39)$$

โดยที่

$$L = \sum_{i=1}^q L_i < 1$$

ซึ่ง  $L$  เป็นตัวบ่งบอกให้ทราบค่าผลรวมขอบเขตล่างของส่วนแบบผสมแบบหล่อทราย

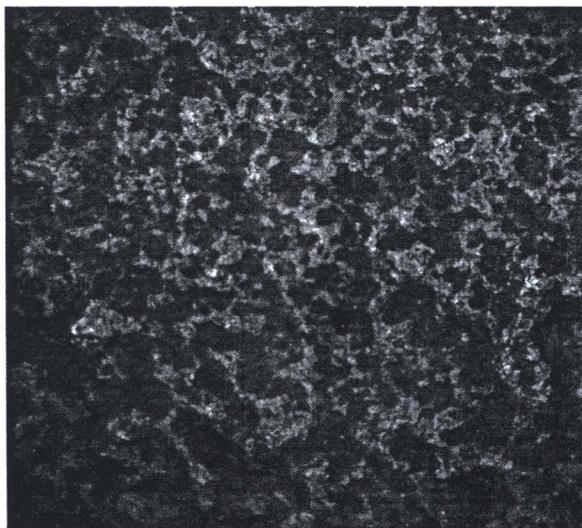
ดังนั้น เมื่อนำอัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนองมาทำการแปลงค่าให้อยู่ในรูปของส่วนประกอบเทียบจะได้ส่วนผสมของ A เท่ากับ 0.34 B เท่ากับ 0.5 และ C เท่ากับ 0.164 เมื่อแทนค่าในสมการถดถอยของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศของส่วนประกอบเทียบในสมการที่ (35) และ (36) พบว่าค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกที่ทำนายได้มีค่าเท่ากับ 7.75 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศมีค่าเท่ากับ 30.2 ซึ่งเมื่อนำมาเทียบในตารางที่ 6.18 ค่าที่ทำนายได้ของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศมีค่าอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์

อัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 3 ผลตอบสนองมาทำการแปลงค่าให้อยู่ในรูปของส่วนประกอบเทียบจะได้ส่วนผสมของ A เท่ากับ 0.46 B เท่ากับ 0.39 และ C เท่ากับ 0.15 เมื่อแทนค่าในสมการถดถอยของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศของส่วนประกอบเทียบในสมการที่ (35) และ (36) พบว่าค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกที่ทำนายได้มีค่าเท่ากับ 7 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศมีค่าเท่ากับ 35.6 ซึ่งเมื่อนำมาเทียบในตารางที่ 6.19 พบว่าค่าที่ทำนายได้ของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกอยู่นอกช่วงความเชื่อมั่น อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับช่วงความเชื่อมั่น และค่าที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าสูงกว่าค่าที่ทำนายและอยู่ในช่วงค่าที่กำหนด ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ จึงสามารถยอมรับได้และค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศที่ทำนายมีค่าอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์

จากการทดลองยืนยันผลจึงเป็นการยืนยันได้เป็นอย่างดีว่าอัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนอง และ 3 ผลตอบสนอง ที่ทำนายได้เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่ทำให้สมบัติของแบบหล่อทรายคือ ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศตรงตามเกณฑ์ค่ามาตรฐานของแบบหล่อทรายที่ใช้สำหรับงานหล่อของโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งมีความสำคัญทำให้คุณภาพของชิ้นงานหล่อดีมีคุณภาพที่ดีขึ้น เพื่อเป็นการยืนยันถึงคุณภาพที่ดีขึ้นของชิ้นงานหล่อในแบบหล่อทรายที่มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ผู้วิจัยจึงได้นำอัตราส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่ทำการปรับปรุงแล้วมาทำการผลิตชิ้นงานหล่อเพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงคุณภาพของชิ้นงานหล่อ และเปรียบเทียบกับชิ้นงานหล่อของโรงงานกรณีศึกษา

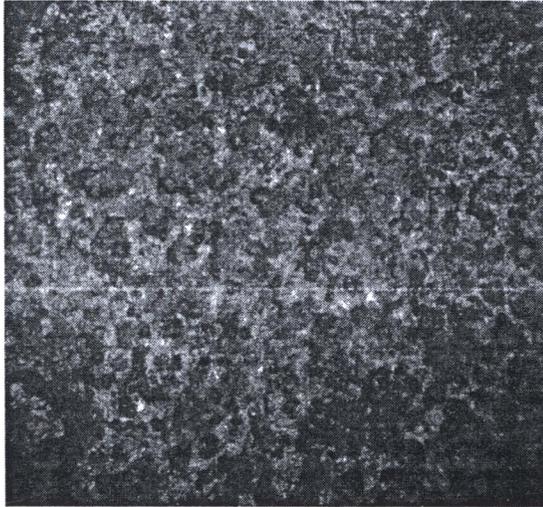
## 7. การวิเคราะห์ลักษณะสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานหล่อ

ในส่วนของการตรวจสอบสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานหล่อที่ได้จากการหล่อในแบบหล่อทรายที่มีอัตราส่วนผสมของแบบหล่อทราย 3 อัตราส่วนผสมคือ อัตราส่วนผสมแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษา อัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนอง และอัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 3 ผลตอบสนอง การตรวจสอบลักษณะสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานหล่อสามารถกระทำภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ แบบกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอซูม (Zoom Steriomicroscope) รุ่น SZX 9 กำลังขยายที่เลนส์วัตถุ 10 เท่า จากการพิจารณาถึงสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานที่ได้จากอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษา แสดงดังภาพที่ 6.21 พบว่าสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานมีลักษณะผิวที่ไม่ราบเรียบและผิวของชิ้นงานมีลักษณะรอยนูนหรือเรียกว่า การเกิดสะเก็ดแผล (Scabbing) ซึ่งมีสาเหตุมาจากแบบหล่อทรายมีความแข็งแรงต่ำเมื่อถูกความร้อนของน้ำเหล็กที่เติมลงไปแบบหล่อเป็นผลทำให้ผิวทรายเกิดการขยายตัวและทำให้น้ำเหล็กไหลซึมไปตามรอยนั้นๆ (Pearce และคณะ, 2544) จากการตรวจสอบสภาพผิวภายนอกเป็นการยืนยันให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษามีค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด



ภาพที่ 6.21 ลักษณะผิวภายนอกชิ้นงานหล่อของอัตราส่วนผสมแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษา

เมื่อพิจารณาถึงสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานที่ได้จากอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนอง และ 3 ผลตอบสนอง แสดงดังภาพที่ 6.22 และ 6.23 ตามลำดับ พบว่าสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานทั้ง 2 มีลักษณะผิวที่ราบเรียบกว่าชิ้นงานที่ได้จากอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายแบบเดิมของโรงงาน



ภาพที่ 6.22 ลักษณะผิวภายนอกชิ้นงานหล่อของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของ  
การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนอง



ภาพที่ 6.23 ลักษณะผิวภายนอกชิ้นงานหล่อของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของ  
การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 3 ผลตอบสนอง

#### 8. การทดลองเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานหล่อ

การทดลองเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานเป็นการทดลองเพื่อวิเคราะห์ว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานในแต่ละระดับของอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายที่ใช้ในการหล่อชิ้นงานต่างๆ กัน ว่าอัตราส่วนผสมใดมีผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานมากที่สุด การทดลองนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely

randomized design, CRD) ซึ่งเป็นการทดลองภายใต้การสุ่มลำดับการทดลอง การทดลองในงานวิจัยนี้มีจำนวนชิ้นงานทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ชิ้นงาน และมีปัจจัยที่ทำการศึกษามีจำนวน 1 ปัจจัย โดยแบ่งเป็น 3 ระดับ โดยมีรายละเอียดการออกแบบการทดลองดังต่อไปนี้

### 8.1 ปัจจัย (Factors) และระดับที่พิจารณาในการทดลอง

ปัจจัยที่พิจารณาในการทดลองนี้มีจำนวน 1 ปัจจัย คือ ประเภทของส่วนผสมแบบหล่อทราย โดยแบ่งเป็น 3 ระดับคือ

(1) อัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของ 2 ผลตอบสนอง

(POE 2 Response)

(2) อัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของ 3 ผลตอบสนอง

(POE 3 Réponse)

(3) อัตราส่วนผสมเดิมของโรงงานกรณีศึกษา

### 8.2 ผลตอบสนองที่ทำการศึกษา

ผลตอบสนองสำหรับการทดลองนี้คือ ค่าความแข็งของชิ้นงานหล่อ

### 8.3 การเตรียมชิ้นงานหล่อในการทดลอง

การทดสอบความแข็งของชิ้นงานหล่อในแต่ละประเภทของส่วนผสมแบบหล่อทราย จะต้องเตรียมชิ้นงานทดสอบให้มีขนาดเท่ากัน (ขนาดชิ้นงานทดสอบแสดงในไว้ในภาคผนวก ค.) นำมาทำการเจียรนัยให้ผิวชิ้นงานทดสอบเรียบสม่ำเสมอ และทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Tester) โดยการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานใช้การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลสเกล C มีหน่วยเป็น HRC

การทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานหล่อในแต่ละประเภทของส่วนผสมมีจำนวนชิ้นงานหล่อทั้งสิ้น 5 ชิ้นงาน และในแต่ละชิ้นงานหล่อจะทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยความแข็งของแต่ละชิ้นงาน ซึ่งข้อมูลการทดลองซ้ำของค่าความแข็งของแต่ละชิ้นงานหล่อจะแสดงไว้ในภาคผนวก ข. ผลการทดสอบค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานแสดงดังตารางที่ 6.20

ตารางที่ 6.20 ผลการทดสอบของค่าความแข็งเฉลี่ยในแต่ละชิ้นงานหล่อ

ประเภทส่วนผสม ชิ้นงานที่	ค่าเฉลี่ยความแข็งแต่ละชิ้นงาน (HRC)					ค่าเฉลี่ยรวม
1) การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของ 2 ผลตอบสนอง	18.53	18.70	17.57	18.90	18.30	18.40
2) การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของ 3 ผลตอบสนอง	17.30	17.10	17.87	18.00	17.50	17.55
3) โรงงานกรณีศึกษา	16.57	17.00	17.57	17.80	16.63	17.11

## 9. ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานหล่อ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองจากตารางที่ 6.20 ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (one-way analysis of variance) และทำการทดสอบการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparison) โดยใช้โปรแกรมทดสอบทางสถิติ SPSS เวอร์ชัน 16 ซึ่งผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมแสดงดังต่อไปนี้

### 9.1 การตรวจสอบความเพียงพอของตัวแบบทางสถิติ

ก่อนการทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวจำเป็นต้องทำการทดสอบความเพียงพอของตัวแบบก่อน โดยกำหนดให้ประเภทของส่วนผสมหมายเลข 1 คือ อัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนอง หมายเลข 2 คือ อัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 3 ผลตอบสนอง และ หมายเลข 3 คือ อัตราส่วนผสมแบบเดิมของโรงงาน การตรวจสอบความเพียงพอของตัวแบบทางสถิติแสดงดังต่อไปนี้

#### 9.1.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล

การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติเป็นการตรวจสอบว่าตัวแปรตามในแต่ละข้อมูลหรือระดับมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ด้วยการทดสอบ Kolmogorov-Smirnov โดยมีสมมติฐานของการทดสอบ คือ

$H_0$  : ประเภทของส่วนผสมแต่ละระดับมีการแจกแจงแบบปกติ

$H_1$  : ประเภทของส่วนผสมแต่ละระดับมีการแจกแจงแบบไม่ปกติ

จากการพิจารณาค่า Sig. ของการทดสอบ Kolmogorov-Smirnov ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในตารางที่ 6.21 พบว่า ค่าความแข็งของประเภทของส่วนผสมหมายเลข 1 2 และ 3 มีค่า Sig. มากกว่า 0.05 (Sig. > 0.200) ซึ่งยอมรับ  $H_0$  สรุปได้ว่า ค่าความแข็งของประเภทของส่วนผสมทั้ง 3 ระดับ ต่างมีการแจกแจงแบบปกติ

ตารางที่ 6.21 ผลการตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ

Tests of Normality

mixture type	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
hardness 1	.223	5	.200*	.911	5	.471
2	.198	5	.200*	.946	5	.708
3	.209	5	.200*	.893	5	.371

### 9.1.2 การตรวจสอบความเท่ากันของความแปรปรวน

การตรวจสอบความเท่ากันของความแปรปรวนเป็นการทดสอบความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวนของข้อมูลหลายระดับ ด้วยการทดสอบสถิติเลเวนเน (Levene Statistic) โดยมีสมมติฐานในการทดสอบคือ

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 \quad \text{หรือ} \quad \text{ข้อมูลทุกระดับมีความแปรปรวนเท่ากัน}$$

$$H_1 : \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2 \quad \text{อย่างน้อย 1 คู่ เมื่อ } i \neq j$$

ตารางที่ 6.22 ผลการตรวจสอบความเท่ากันของความแปรปรวน

Test of Homogeneity of Variances

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.535	2	12	.599

จากการพิจารณาค่า Sig. ด้วยการทดสอบสถิติเลเวนเน (Levene) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในตารางที่ 6.22 พบว่ามีค่า Sig. มากกว่า 0.05 (Sig. = 0.559) ซึ่งยอมรับ  $H_0$  สรุปได้ว่าค่าความแข็งของประเภทของส่วนผสมทั้ง 3 ระดับ มีความแปรปรวนเท่ากัน จากการตรวจสอบความเพียงพอของตัวแบบทางสถิติ พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความแข็งของประเภทของส่วนผสมมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยที่ไม่มีความจำเป็นต้องทำการแปลงข้อมูล ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จึงมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

### 9.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งในแต่ละระดับของประเภทของส่วนผสม โดยมีสมมติฐานในการทดสอบคือ

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1 : \mu_i = \mu_j \text{ for at least one pair } (i,j)$$

หรือ

$$H_0 : \text{ประเภทของส่วนผสมมีค่าเฉลี่ยความแข็งไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05}$$

$$H_1 : \text{ประเภทของส่วนผสมอย่างน้อย 1 คู่ มีค่าเฉลี่ยความแข็ง แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05}$$

ตารางที่ 6.23 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน

## ANOVA

hardness	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4.272	2	2.136	8.994	.004
Within Groups	2.850	12	.237		
Total	7.122	14			

จากการพิจารณาค่า Sig. ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในตารางที่ 6.23 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.004 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า ประเภทของส่วนผสมอย่างน้อย 1 คู่ มีค่าเฉลี่ยความแข็งแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

## 9.3 การเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparison Test)

หลังจากทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว และสรุปผลได้ว่า ค่าเฉลี่ยความแข็งของข้อมูลในแต่ละระดับแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า ประเภทของส่วนผสมแบบหล่อทรายมีผลต่อความแข็งของชิ้นงาน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทดสอบต่อไปว่าค่าเฉลี่ยความแข็งของข้อมูลของระดับคู่ใดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณแบบ Duncan

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งของประเภทของส่วนผสมตามวิธี Duncan จะแยกกลุ่มของทริทเมนต์ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากันไว้ในกลุ่มเดียวกัน และต่างกลุ่มจะมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan ได้ผลดังตารางที่ 6.24

ตารางที่ 6.24 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานในแต่ละประเภทของส่วนผสม

hardness				
mixture type	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	
Duncan <sup>a</sup>	3	5	17.1140	
	2	5	17.5540	
	1	5		18.4000
Sig.			.179	1.000

จากตารางที่ 6.24 พบว่าค่าเฉลี่ยความแข็งขันงานของประเภทของส่วนผสมหมายเลข 3 คือ อัตราส่วนผสมแบบเต็มของโรงงานกรณีศึกษา และประเภทของส่วนผสมหมายเลข 2 คือ อัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 3 ผลตอบสนองไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 17.11 HRC และ 17.55 HRC ตามลำดับ แต่ประเภทของส่วนผสมหมายเลข 1 คือ อัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนอง มีค่าเฉลี่ยความแข็งแตกต่างและมากกว่าประเภทของส่วนผสมอื่นๆ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18.4 HRC