บทที่ 6
การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ

หลังจากได้มีการหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองโดยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k ที่มีปัจจัย 7 ปัจจัยแบบไม่มีจุดศูนย์กลางแล้ว ได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab คือปัจจัยหลักทั้งหมดซึ่งมีอยู่ 4 ปัจจัยได้แก่ ปัจจัย A อุณหภูมิ ปัจจัย B ความชื้น ปัจจัย C ความเร็วลม และปัจจัย E วิธีในการเช็ดรถ โดยที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยใดๆ ที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนอง ในระยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการนั้นจะมีการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาค่าของปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการพ่นสีที่ทำให้ได้ตัวแปรตอบสนองซึ่งคือจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยต่ำที่สุด

6.1 การออกแบบการทดลองเพิ่มเติม

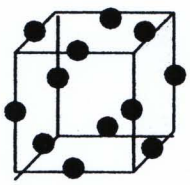
ผลจากการทดลองในขั้นตอนก่อนหน้านี้ได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองมีอยู่ 4 ปัจจัยคือ ปัจจัย A อุณหภูมิ ปัจจัย B ความชื้น ปัจจัย C ความเร็วลม และปัจจัย E วิธีในการเช็ดรถ ซึ่งแบ่งเป็นปัจจัยประเภทปรับตั้งค่าได้ 3 ปัจจัย และปัจจัยเชิงคุณลักษณะ 1 ปัจจัย โดยที่เป็นปัจจัยหลักทั้งหมดไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยใดๆ ที่มีนัยสำคัญ

ในส่วนของปัจจัยเชิงคุณลักษณะที่ทำการทดลองเดิม 4 ปัจจัยนั้นเมื่อทำการทดลองแล้วพบว่ามีเพียง 1 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ คือ วิธีในการเช็ดรถ ส่วนอีก 3 ปัจจัย ไม่มีนัยสำคัญ ผู้วิจัยได้เลือกที่จะกำหนดและควบคุมระดับของปัจจัยเชิงคุณลักษณะ 2 ตัว ได้แก่ วิธีในการเช็ดรถและวิธีในการเป่าลม เนื่องจากวิธีในการเช็ดรถมีนัยสำคัญต่อจำนวนข้อบกพร่อง ถึงแม้วิธีในการเป่าลมจะไม่มีนัยสำคัญ แต่ผู้วิจัยได้กำหนดให้ผู้ปฏิบัติงานเป่าลมแบบมีการกำหนดทิศทางเนื่องจากมีความสะดวกในทางปฏิบัติและไม่กระทบกับค่าใช้จ่าย ส่วนอีก 2 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยเรื่องคราบสกปรกบนตัวคนและปัจจัยความสะอาดของข้อต่อโรบอท ผู้วิจัยไม่ได้กำหนดให้มีการปรับปรุง เนื่องจาก 2 ปัจจัยนี้ไม่มีนัยสำคัญต่อจำนวนข้อบกพร่อง และหากกำหนดให้มีการปรับปรุง จะทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็น เช่น ปัจจัยเรื่องคราบสกปรกบนตัวคนที่ต้องมีการติดตั้งเครื่องจักรในการเป่าลมตัวและติดตั้งอ่างล้างมือเพิ่มเติม ส่วนปัจจัยเรื่องความสะอาดของข้อต่อโรบอทต้องมีการเพิ่มรอบการทำความสะอาด ซึ่งทำให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดให้ระดับของปัจจัยเชิงคุณลักษณะเป็นดังนี้

ตารางที่ 6.1 ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงคุณลักษณะ

ปัจจัย	ระดับที่เหมาะสม
วิธีในการเป่าลมรถ	กำหนดทิศทางในการเป่าลมรถ
วิธีในการเช็ดรถ	กำหนดทิศทางในการเช็ดรถ
คราบสกปรกบนตัวคน	ไม่มีข้อกำหนด
ความสะอาดของข้อต่อโรบอท	ทำความสะอาด 1 ครั้งต่อ 1 กะ

ในส่วนของปัจจัยที่ปรับตั้งค่าได้นั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการทดลองเพิ่มเติม โดยได้เลือกทำการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response surface design) แบบ Box-Behnken Design เนื่องจากเป็นแบบการทดลองที่กำหนดให้มีการทดสอบที่ระดับของปัจจัยตั้งแต่ 3 ระดับขึ้นไป ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่าของปัจจัยปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 6.1 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design

จากเหตุผลข้างต้นทางผู้วิจัยจึงมีการทดลองเพิ่มเพื่อหาระดับของค่าปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีรายละเอียดการปรับตั้งค่าในแต่ละปัจจัยดังตารางที่ 6.2 และมีรายละเอียดของตารางออกแบบการทดลองดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.2 ค่าที่ใช้ในการปรับตั้งของแต่ละปัจจัยในการออกแบบการทดลองเพิ่มเติม

ปัจจัย	**ระดับ**			**หน่วย**
	1	2	3	
อุณหภูมิ	27	28	29	องศาเซลเซียส
ความชื้น	80	85	90	เปอร์เซ็นต์
ความเร็วลม	0.25	0.30	0.35	เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 6.3 ตารางการออกแบบ (Design Matrix) เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

Design Table (randomized)

Run	Blk	A	B	C
1	1	-	-	0
2	1	-	+	0
3	1	0	0	0
4	1	+	0	-
5	1	0	+	+
6	1	+	+	0
7	1	0	+	+
8	1	0	0	0
9	1	-	0	-
10	1	0	0	0
11	1	-	-	0
12	1	-	0	+
13	1	0	+	-
14	1	-	0	-
15	1	+	+	0
16	1	+	0	-
17	1	0	-	-
18	1	0	-	-
19	1	0	-	+
20	1	0	0	0
21	1	0	+	-
22	1	+	0	+
23	1	0	0	0
24	1	+	-	0
25	1	0	-	+
26	1	+	-	0
27	1	0	0	0
28	1	-	+	0
29	1	+	0	+
30	1	-	0	+

หลังจากออกแบบการทดลองจึงได้ทำการทดลองตามลำดับของตารางออกแบบการทดลอง (Design Matrix) และเมื่อได้ผลการทดลองแล้วต้องนำข้อมูลไปทำการแปลงค่าโดยวิธีของ Freeman และ Turkey ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab โดยที่ขั้นตอนการทดลองอ้างอิงจากหัวข้อ 5.5 (ในบทที่ 5) ผลการทดลองและการแปลงค่าแสดงในตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ผลการทดลองและการแปลงข้อมูลด้วยวิธีของ Freeman และ Turkey

ลำดับการทดลอง (Run Order)	จำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยต่อรถ 1 คัน ($\hat{C}$)	วิธีมาตรฐาน ($\sqrt{\hat{C}}$)	วิธีของ Freeman และ Turkey $((\sqrt{\hat{C}}+\sqrt{\hat{C}+1})/2)$
1	0.24	0.4899	0.8017
2	0.28	0.5292	0.8303
3	0.19	0.4359	0.7634
4	0.44	0.6633	0.9317
5	0.20	0.4472	0.7713
6	0.32	0.5657	0.8573
7	0.21	0.4583	0.7791
8	0.16	0.4000	0.7385
9	0.23	0.4796	0.7943
10	0.16	0.4000	0.7385
11	0.24	0.4899	0.8017
12	0.12	0.3464	0.7024
13	0.28	0.5292	0.8303
14	0.15	0.3873	0.7298
15	0.29	0.5385	0.8371
16	0.35	0.5916	0.8768
17	0.20	0.4472	0.7713
18	0.20	0.4472	0.7713
19	0.16	0.4000	0.7385
20	0.16	0.4000	0.7385
21	0.32	0.5657	0.8573
22	0.19	0.4359	0.7634
23	0.20	0.4472	0.7713
24	0.33	0.5745	0.8639
25	0.16	0.4000	0.7385
26	0.32	0.5657	0.8573
27	0.19	0.4359	0.7634

28	0.21	0.4583	0.7791
29	0.29	0.5385	0.8371
30	0.12	0.3464	0.7024

6.2 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเพิ่มเติม

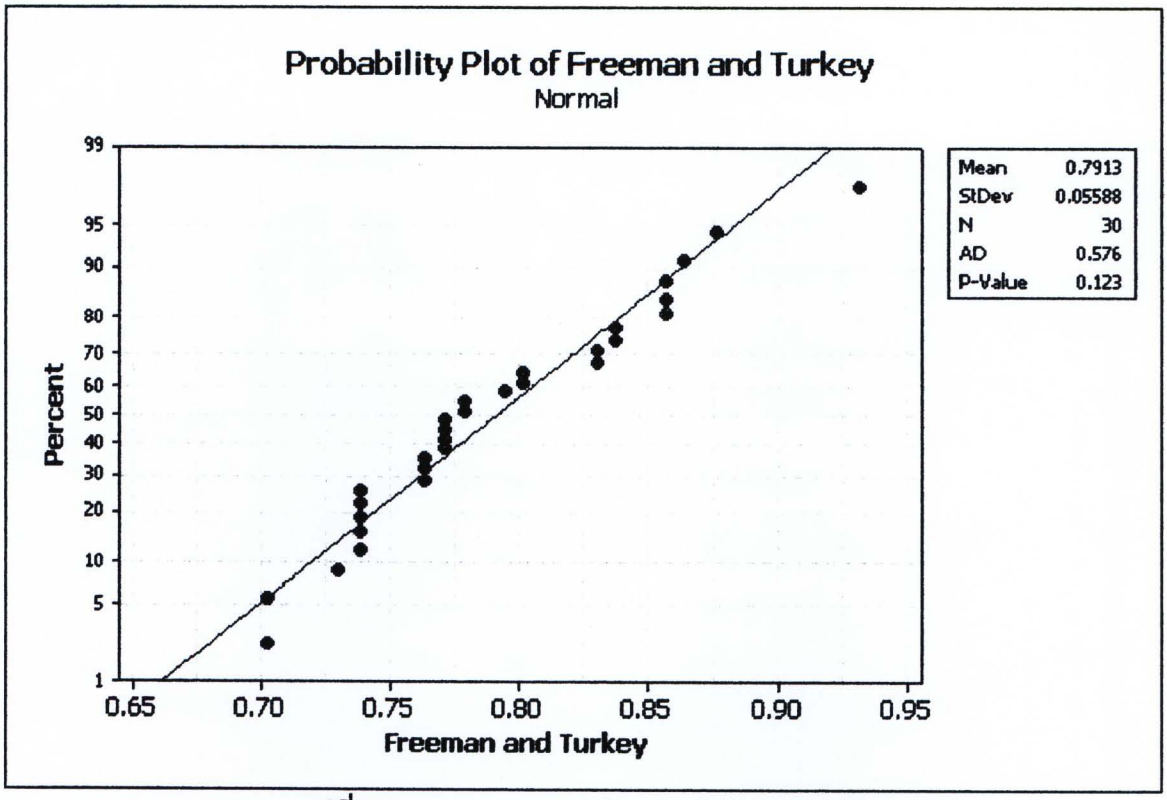
ผลการทดลองที่ได้มานั้นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยเมื่อผลการทดลองมีคุณสมบัติครบทั้ง 3 ข้อของเงื่อนไขการออกแบบการทดลองคือ NID $(0, \sigma^2)$ จึงจะทำการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

6.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลองนั้น จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) โดยตรวจสอบว่าข้อมูลมีคุณสมบัติครบทั้ง 3 ข้อของเงื่อนไขการออกแบบการทดลองคือ NID $(0, \sigma^2)$ หรือไม่ ด้วยการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของการทดลองตามสมมติฐาน ก่อนที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์และสรุปผลของการออกแบบการทดลองดังนี้

6.2.1.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

ในการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal Distribution Assumption) ทำโดยการพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของตัวแปรตอบสนองว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ซึ่งทำการพิจารณาจาก Normal Probability Plot การกระจายตัวควรเป็นตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-Value จากการทดสอบความเป็นปกติ (Normality Test) มากกว่า 0.05

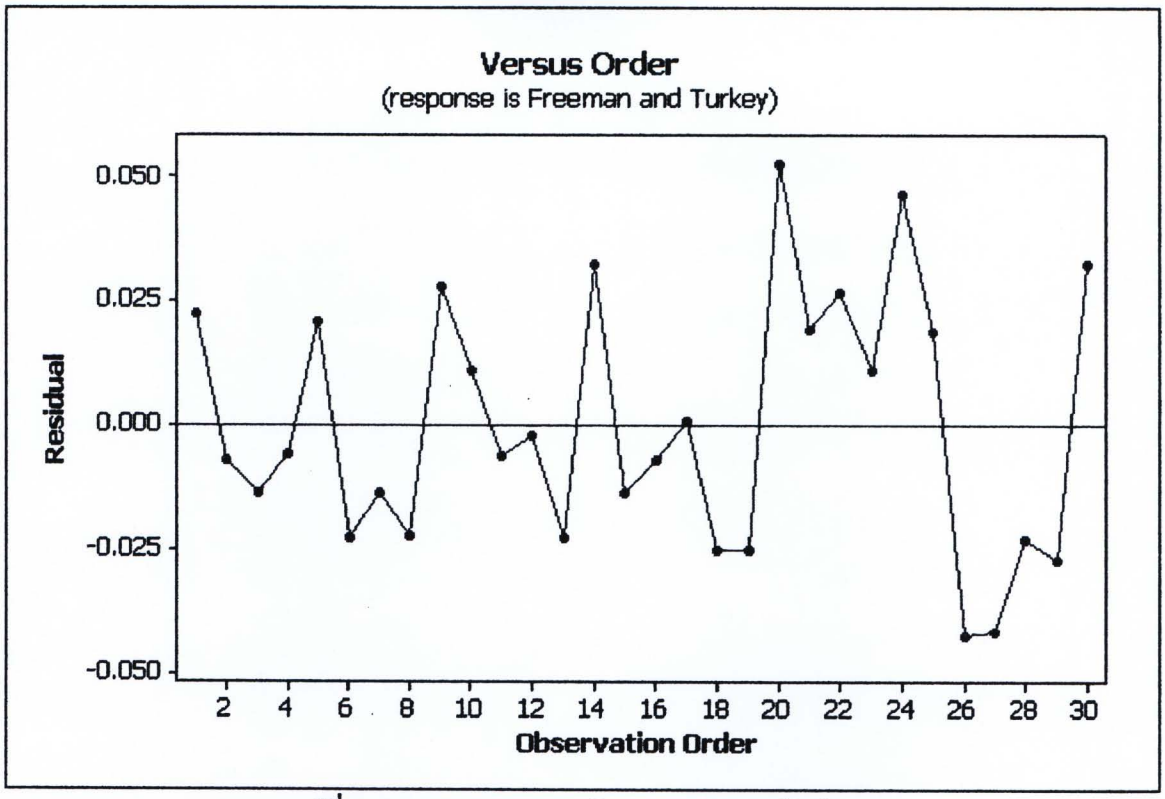


รูปที่ 6.2 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ

จากผลการทดสอบได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 คือมีค่าเท่ากับ 0.123 ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

6.2.1.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence of Residual) สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาจากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับของการเก็บข้อมูล (Observation Order)

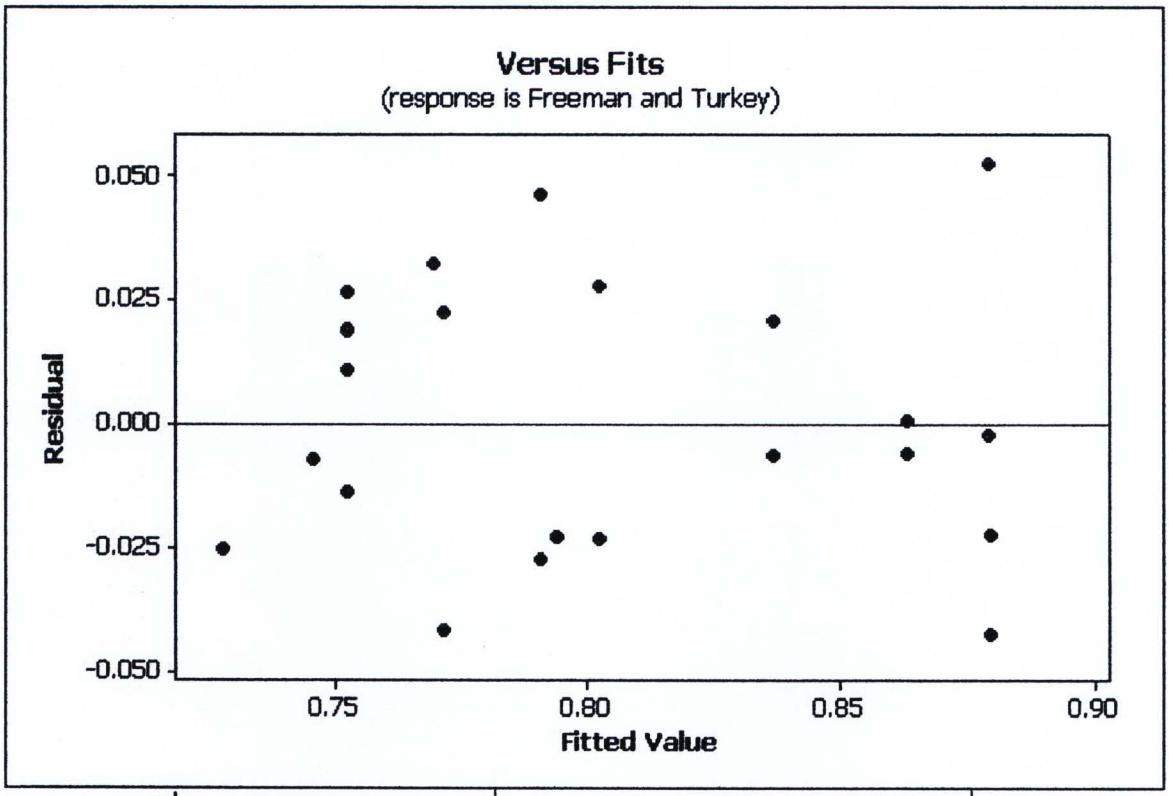


รูปที่ 6.3 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ

จากผลการทดสอบได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบอิสระต่อกันคือ ไม่มีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

6.2.1.3 **การทดสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน** (Variance Stability)

การตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนตรวจสอบได้โดยพิจารณาแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งการกระจายไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด

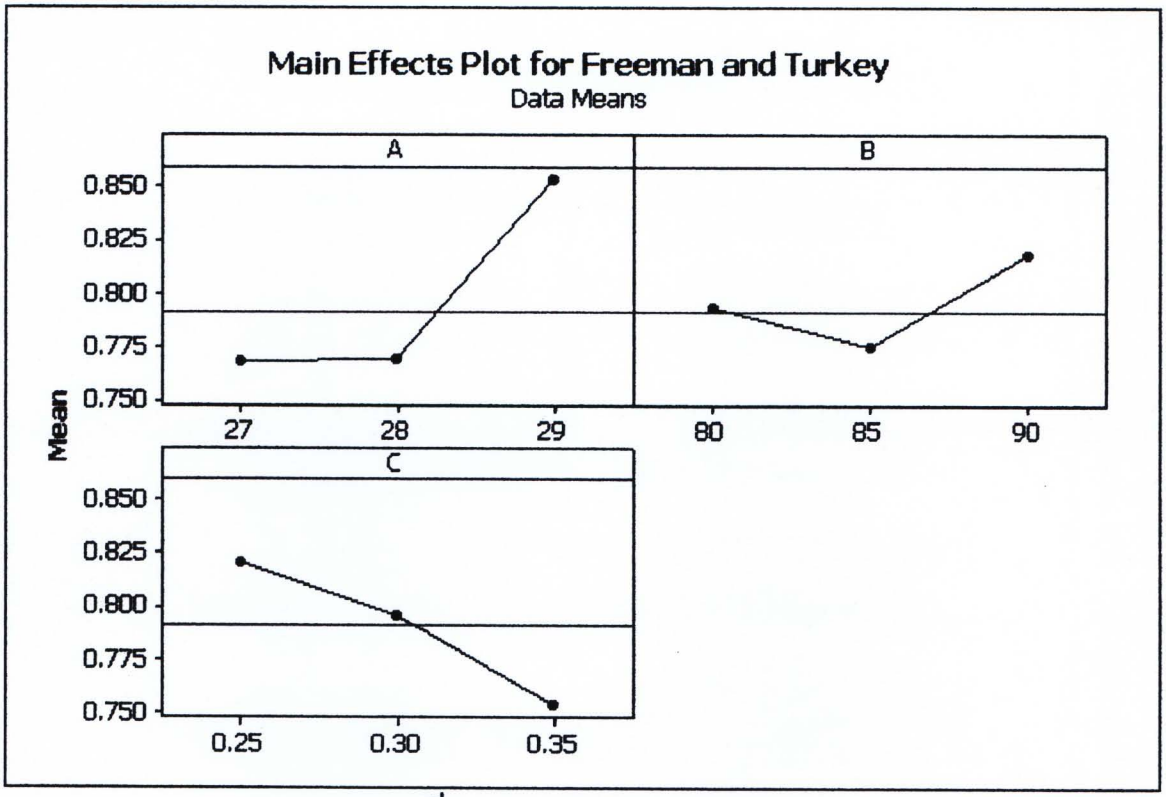


รูปที่ 6.4 แผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต

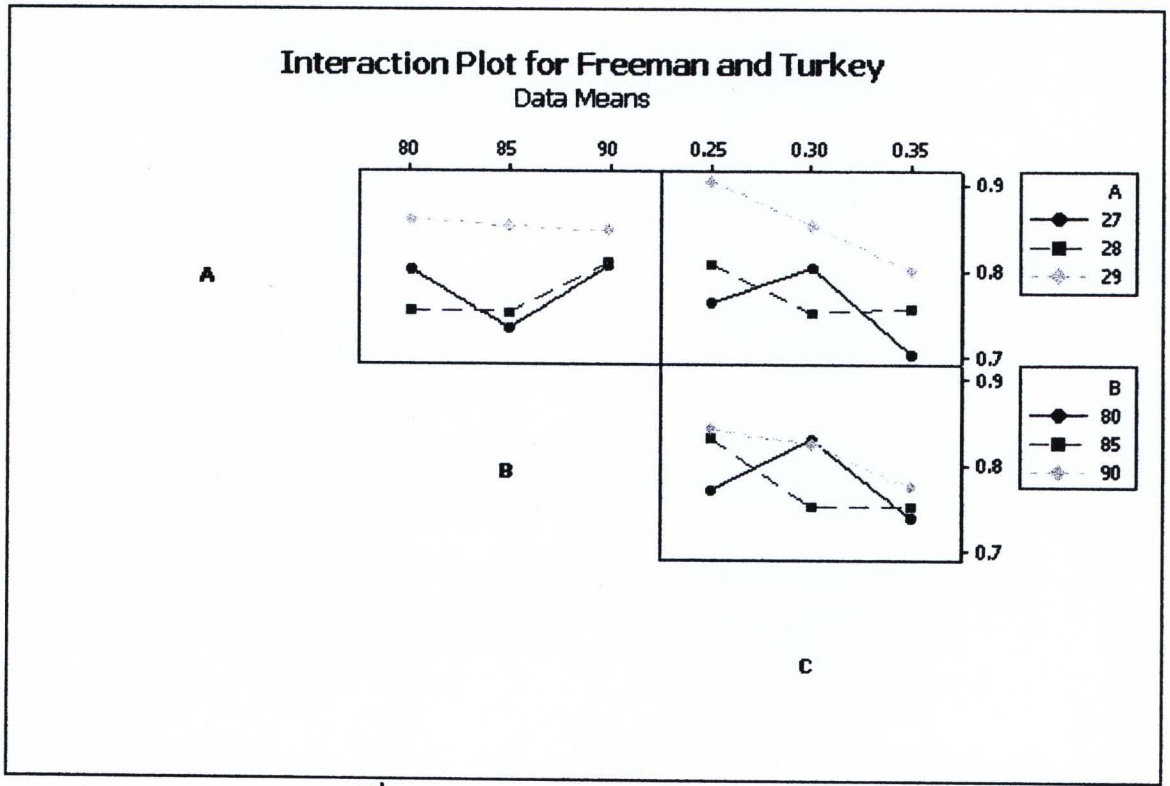
จากผลการทดสอบได้ว่าค่าส่วนตกค้างไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

6.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลของทดลองนั้น จะทำการวิเคราะห์ผลหลักและอันตรกริยาของปัจจัยทั้งสาม (Main Effects and Interaction Effects) ที่มีผลกระทบต่อสัดส่วนข้อบกพร่องหลักทั้ง 7 ข้อบกพร่องคือ เส้นใย สีเป็นคราบ เม็ดผง สีเป็นรอยขีด สีไหล เม็ดพื้น และสีเป็นหลุม ในกระบวนการพ่นสี โดยใช้กราฟผลหลัก (รูปที่ 6.5) กราฟอันตรกริยา (รูปที่ 6.6)



รูปที่ 6.5 กราฟผลหลักของปัจจัย



รูปที่ 6.5 กราฟผลของอันตรกิริยาของปัจจัย

ในการหาระดับปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย สามารถใช้หลักการ optimization โดยใช้ฟังก์ชั่น Response Optimization ของโปรแกรม Minitab พบว่าได้ระดับของปัจจัยที่มีค่าที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิที่ 27.6 องศาเซลเซียส ความชื้นที่ 84.6% และความเร็วลมที่ 0.35 เมตรต่อวินาที และได้ค่าทำนายของจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยเท่ากับ 0.71 ซึ่งเป็นค่าที่แปลงค่าโดยวิธีของ Freeman และ Turkey หากแปลงค่ากลับเป็นจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยจะได้เท่ากับ 0.13 จุดต่อคัน

ตารางที่ 6.5 ผลการหาค่าตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimization) โดยโปรแกรม Minitab

Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Freeman and	Minimum	0.702	0.702	0.802	1	1

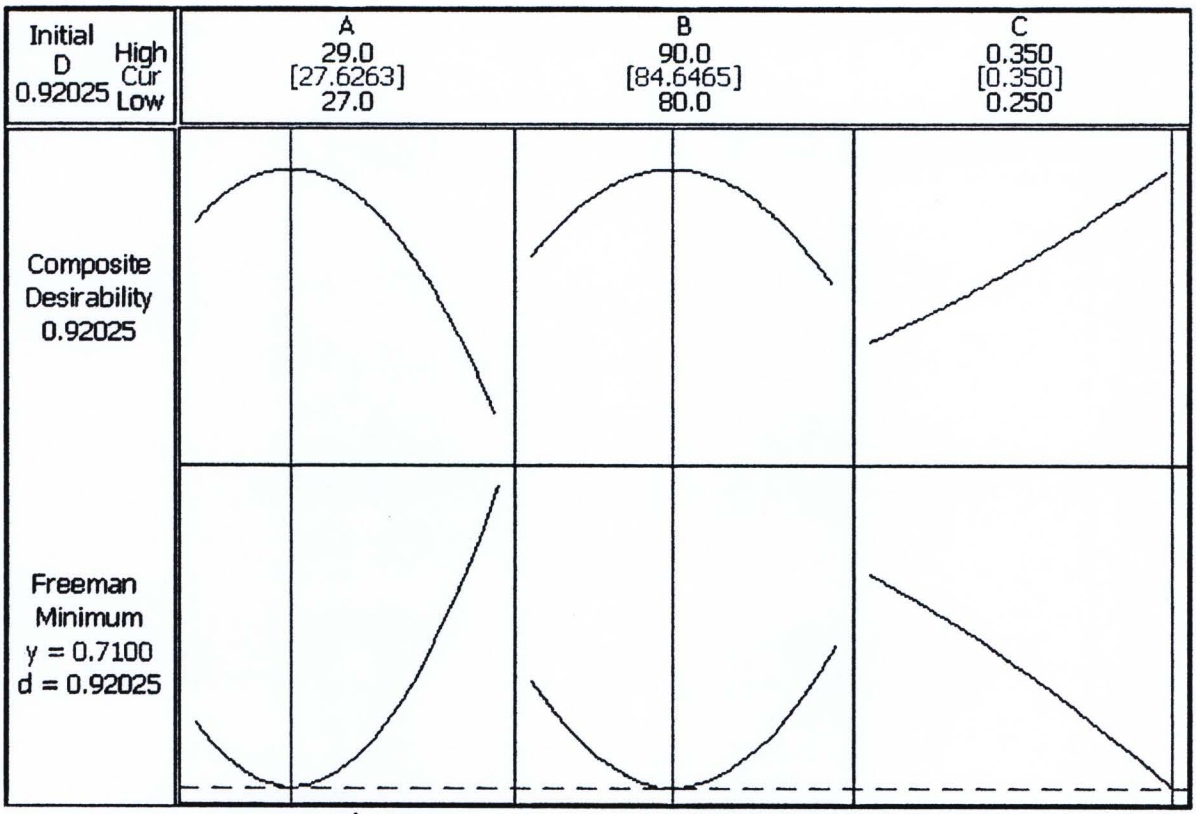
Global Solution

A = 27.6263
B = 84.6465
C = 0.35

Predicted Responses

Freeman and = 0.709975 , desirability = 0.920249

Composite Desirability = 0.920249



รูปที่ 6.6 Optimization Plot จากโปรแกรม Minitab

6.3 สรุประยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ

ในระยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการเริ่มจากการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสม ซึ่งผลจากบทที่ 5 ได้ว่าเป็นปัจจัยหลักทั้ง 4 ปัจจัยและไม่มีผลของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยคู่ใดๆ ดังนั้นจึงทำการทดลองเพิ่มเติมเฉพาะปัจจัยที่ต้องปรับตั้งค่าเนื่องทั้ง 3 ปัจจัยปรับตั้งทดสอบแล้วพบว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยได้เลือกทำการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response surface design) แบบ Box-Behnken Design ส่วนปัจจัยเชิงคุณลักษณะอีก 4 ปัจจัยนั้นทำการทดลองแล้วพบว่ามีเพียง 1 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ แต่เนื่องจากทั้ง 4 ปัจจัยเป็นขั้นตอนการทำงานที่มีความถูกต้องและน่าจะส่งผลให้กระบวนการดีขึ้นได้จึงกำหนดให้มีการปรับปรุงเป็นระดับสูง (+1) ทั้ง 4 ปัจจัย โดยได้ทำการตัดปัจจัยเรื่องคราบสกปรกบนตัวคนที่ต้องมีการติดตั้งเครื่องจักรในการเป่าลมตัวและติดตั้งอ่างล้างมือเพิ่มเติม รวมถึงปัจจัยความสะอาดของข้อต่อโรบอทที่มีการเพิ่มรอบการทำความสะอาดซึ่งทำให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม โดยจะตัดไม่ทำการปรับปรุงเรื่องคราบสกปรกบนตัวคน และความสะอาดของจ้อต่อโรบอท ดังนั้นจึงเหลือการปรับปรุงทั้งหมด 5 ปัจจัยคืออุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลม วิธีการเป่าลมรถ และวิธีในการเช็ดรถ ซึ่งในการออกแบบการทดลองเมื่อได้ผลการทดลองมาแล้วนั้นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของการทดลองว่าเป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลองคือ NID (0, σ^2) โดยตรวจสอบพบว่าเป็นไปตามเงื่อนไขทั้งหมด หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เพื่อหาระดับที่เหมาะสมในการทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าต่ำที่สุดที่ใช้วิธี

Response Optimization โดยโปรแกรม Minitab ได้ว่าค่าที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิที่ 27.6 องศาเซลเซียส ความชื้นที่ 84.6% และความเร็วลมที่ 0.35 เมตรต่อวินาที และได้ค่าทำนายของจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยท่ากับ 0.71 ซึ่งเป็นค่าที่แปลงค่าโดยวิธีของ Freeman และ Turkey หากแปลงค่ากลับเป็นจำนวนข้อบกพร่องเฉลี่ยจะได้เท่ากับ 0.13 จุดต่อคัน