บทที่ 6
ผลการทดลองและวิเคราะห์

6.1 ผลการทดลองสำหรับการทดลองเบื้องต้น

ผลการทดลองในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้นนี้ได้จากการทำการทดลองตามสภาวะและเก็บข้อมูลตามลำดับที่เป็นแบบสุ่ม (Random Order) ดังแสดงในตารางที่ 6.1 โดยมีจำนวนการทดลอง (Runs) ทั้งสิ้น 16 สภาวะที่แตกต่างกันและมีวัตถุประสงค์ของการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกับค่าสมดุลของเพลากลาง โดยจะใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลตัวแบบอิทธิพลแบบคงที่ โดยเพลากลางจะมีตัวแปรตามคือค่าสมดุล โดยในการทดลองเบื้องต้นจะใช้ค่าสมดุลด้านท้าย (Rear) และด้านหน้า (Front) เป็นตัวแปรตามมีรายละเอียดของการออกแบบการทดลองคือ ข้อมูลที่ได้จากเก็บข้อมูลในการทดลองในเบื้องต้น สามารถแสดงได้ในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Voltage	Speed	Concentricity	Torque	Bal-rear	Bal-front
15	1	1	28	23	0.3	9	12.4	11
2	2	1	32	19	0.1	3	25.5	24.5
10	3	1	32	19	0.1	9	24.9	25
6	4	1	32	19	0.3	3	31.2	35.4
1	5	1	28	19	0.1	3	16.5	17.4
12	6	1	32	23	0.1	9	12.9	13
16	7	1	32	23	0.3	9	23.5	21.2
14	8	1	32	19	0.3	9	31.2	35.9
7	9	1	28	23	0.3	3	11.8	10.5
9	10	1	28	19	0.1	9	17.1	17.9
4	11	1	32	23	0.1	3	13.2	12.5
13	12	1	28	19	0.3	9	26.5	27.3
3	13	1	28	23	0.1	3	5.5	5.2
8	14	1	32	23	0.3	3	22.9	20.7
11	15	1	28	23	0.1	9	6.1	5.7
5	16	1	28	19	0.3	3	25.9	26.8

6.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น

ภายหลังจากที่ได้ออกแบบการทดลองและทำการทดลองแล้ว งานขั้นต่อไปก็คือการนำข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติหรือหาแนวโน้มต่อไป โดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ผลการทดลองของการออกแบบการทดลองโดยวิธีแฟคทอเรียลเมื่อระดับของปัจจัยมี 2 ระดับ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสถิติช่วยในการคำนวณและใช้ข้อมูลจากตารางบันทึกผลการทดลองที่ 6.1 โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองจะใช้หลักการทางสถิติดังนี้ดังนี้

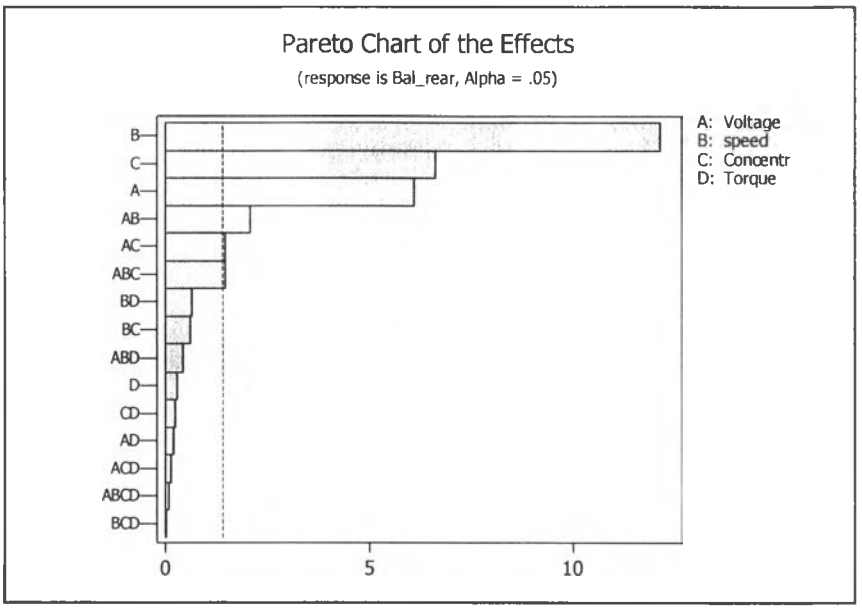
6.2.1. วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ใช้การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้นของค่าสมดุลเพื่อดูว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลกับค่าความสมดุลของเพลากลาง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นวิธีการคำนวณแบบเลขคณิต โดยการแยกผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Total Sum of Square) ออกเป็นส่วนต่างๆตามแหล่งกำเนิดหรือสาเหตุ โดยจะวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อการทดลองโดยพิจารณาความแตกต่าง โดยวัดความแตกต่างรวมออกมาในรูปของความแปรปรวนแล้วแตกออกมาเป็นความแตกต่างย่อย ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างย่อยเหล่านั้น หากความแตกต่างใดมีค่ามากกว่า แสดงว่าปัจจัยนั้นทำให้เกิดความแตกต่างโดยมีผลต่อค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square) ซึ่งเป็นตัวที่ประมาณค่าความแปรปรวนที่ดีที่สุด

6.2.2. การตรวจสอบจากกราฟของการแจกแจงปกติและค่า Effect ของแต่ละปัจจัย ใช้ในการวิเคราะห์หาปัจจัยและปัจจัยร่วมใดๆที่มีอิทธิพลต่อค่าสมดุลของเพลากลาง โดยมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาว่ามีจุดใดที่บนกราฟการแจกแจงปกติของรูปที่ 6.2 และแผนภูมิพาเรโตแสดง Effect ของแต่ละปัจจัยดังรูปที่ 6.1 ว่ามีจุดใดอยู่ห่างจากเส้นตรงอย่างชัดเจนและพิจารณาค่า P-Value ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ 6.2 ต้องน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ร่วมด้วยให้ถือว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อค่าสมดุล

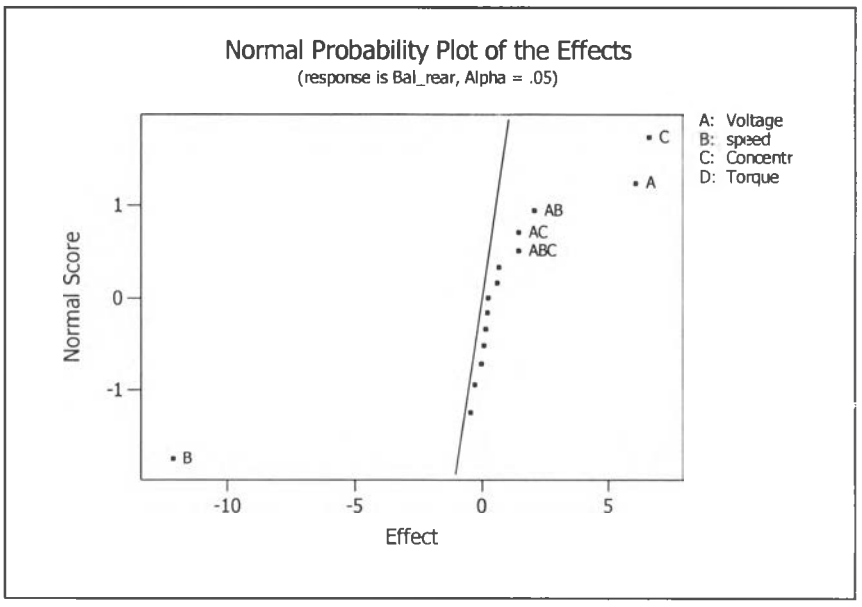
ตารางที่ 6.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น (Rear)

Analysis of Variance for Bal_rear, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Voltage	1	148.231	148.231	148.231	4840.18	0.009
speed	1	591.706	591.706	591.706	1.9E+04	0.005
Concentr	1	174.901	174.901	174.901	5711.04	0.008
Torque	1	0.331	0.331	0.331	10.80	0.188
Voltage*speed	1	17.431	17.431	17.431	569.16	0.027
Voltage*Concentr	1	8.556	8.556	8.556	279.37	0.038
Voltage*Torque	1	0.181	0.181	0.181	5.90	0.249
speed*Concentr	1	1.501	1.501	1.501	49.00	0.090
speed*Torque	1	1.756	1.756	1.756	57.33	0.084
Concentr*Torque	1	0.226	0.226	0.226	7.37	0.225
Voltage*speed*Concentr	1	8.556	8.556	8.556	279.37	0.038
Voltage*speed*Torque	1	0.766	0.766	0.766	25.00	0.126
Voltage*Concentr*Torque	1	0.076	0.076	0.076	2.47	0.361
speed*Concentr*Torque	1	0.001	0.001	0.001	0.02	0.910
Error	1	0.031	0.031	0.031		
Total	15	954.244				



รูปที่ 6.1 แสดงแผนภูมิพาเรโตของ Effect แต่ละปัจจัย



รูปที่ 6.2 แสดงกราฟ Normal Probability Plot of Effect

จากผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยหลักการทางสถิติวิศวกรรมดังแสดงในตารางที่ 6.2 และกราฟการแจกแจงแบบปกติในรูปที่ 6.2 เมื่อพิจารณาจากค่า P-Value ซึ่งเป็นระดับความเชื่อมั่นน้อยที่สุดที่จะปฏิเสธสมมุติฐานหลัก (H_0) ดังนั้นที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีค่า P-Value < 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นๆมีผลต่อค่าสมดุลโดยจะทำการพิจารณาดังนี้

1. เมื่อพิจารณาปัจจัยหลัก (Main Effect) พบว่าปัจจัย A (Supply Voltage) ปัจจัย B (Welding Speed) และปัจจัย C (Concentricity) มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และเป็นจุดที่อยู่

ห่างจากเส้นตรงในรูปที่ 6.2 อย่างชัดเจน จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยทั้ง 3 ที่มีผลกับค่าสมดุลของเพลากลางอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปัจจัย D (Torque) ที่ค่า P-Value เท่ากับ 0.188 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่า Torque ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญกับค่าสมดุลด้าน Rear ของเพลากลาง

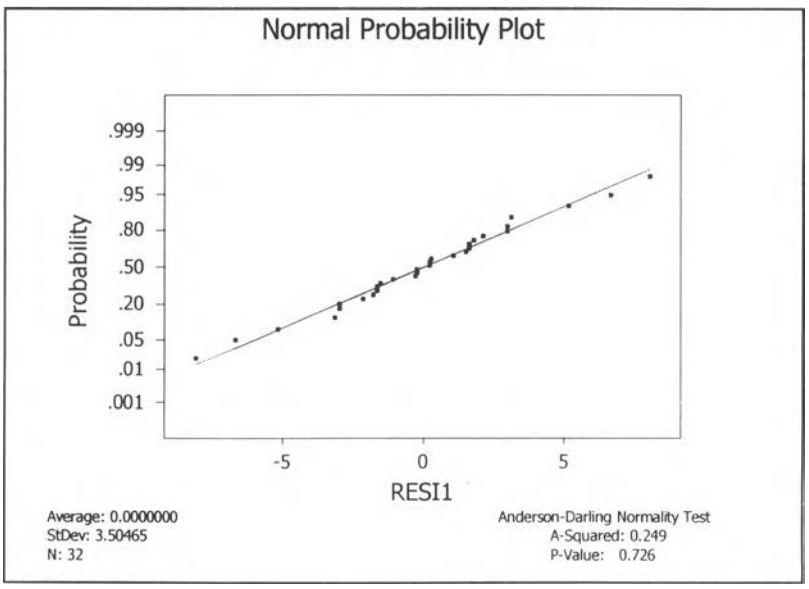
2. เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม (Interaction Effect) พบว่า ปัจจัยร่วมของ Voltage*Speed ซึ่งมีค่า P-Value 0.027 ปัจจัยร่วมของ Voltage*Concentricity มีค่า P-Value 0.038 และ Voltage*speed*Concentricity มีค่า P-Value 0.038 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยของ Interaction Effect ทั้ง 3 ปัจจัยมีผลกับค่าสมดุลของเพลากลางอย่างมีนัยสำคัญ

3. จากผลการทดลองวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิพาเรโตของ Effect แต่ละปัจจัยดังรูปที่ 6.1 เราทำให้เราทราบว่ามี 4 ปัจจัยคือ ปัจจัย A (Supply Voltage) ปัจจัย B (Welding Speed) และปัจจัย C (Concentricity) และปัจจัยร่วมของ Voltage*Speed มีค่า Effect อยู่ทางขวาของเส้นตรง ดังนั้นสรุปได้ว่าทั้ง 4 ปัจจัยมีผลต่อค่าสมดุลของเพลากลางและจะนำไปใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม ส่วนปัจจัย D (Torque) ไม่มีผลต่อค่าสมดุลของเพลากลาง

6.2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

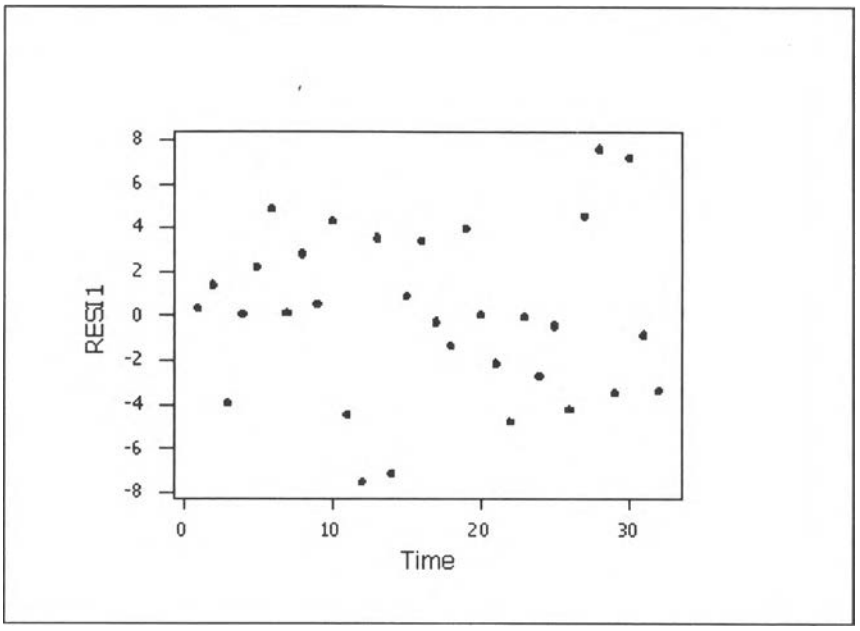
ในการออกแบบการทดลองนี้ได้ตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์จากการที่ค่าสมดุลคือตัวแปรตามให้มีการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ดังนั้นจึงต้องการให้ค่าสมดุลจะมีการกระจายแบบนี้ได้ต้องให้ ε_{ijk} มีการกระจายแบบปกติด้วยและต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระตามสมมุติฐาน ($\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$) การตรวจสอบ ε_{ij} มี 3 ขั้นตอน คือ

1. การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นแบบแจกปกติ (Normal Distribution) โดยใช้การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติ (NOPP) โดยการพิจารณาจากการกระจายของค่า Residual ในรูปที่ 6.3 พบว่ามีการกระจายแบบปกติเนื่องจากค่า P-Value มากกว่า 0.05



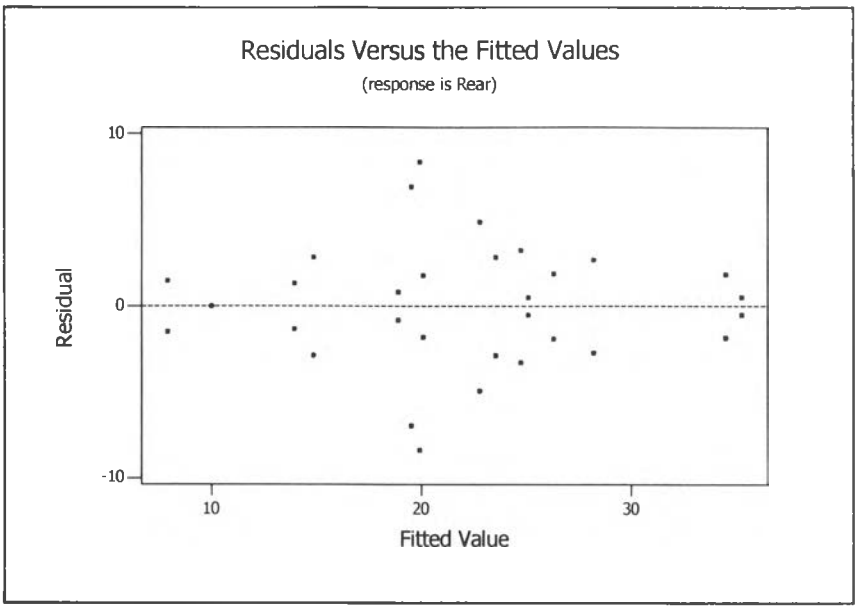
รูปที่ 6.3 แสดงกราฟ Normality Probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระข้อมูล (Independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ดังรูปที่ 6.4 จากการพิจารณาลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ พบว่ามีการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเป็นรูปแบบอิสระและที่ไม่เป็นรูปแบบ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้มีความอิสระต่อกัน



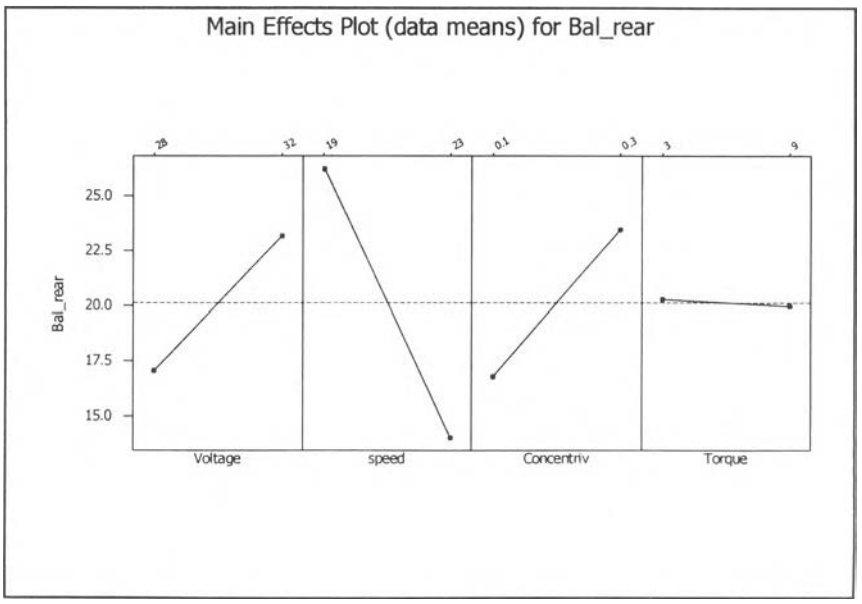
รูปที่ 6.4 กราฟแสดงการกระจายตัวของ Residual และ Time

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายรูปที่ 6.5 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) และค่า Fitted Value ในแต่ละระดับของปัจจัยพบว่ารูปร่างของการกระจายของข้อมูลที่ออกมาไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลของค่าสมดุลมีความเสถียรของความแปรปรวน

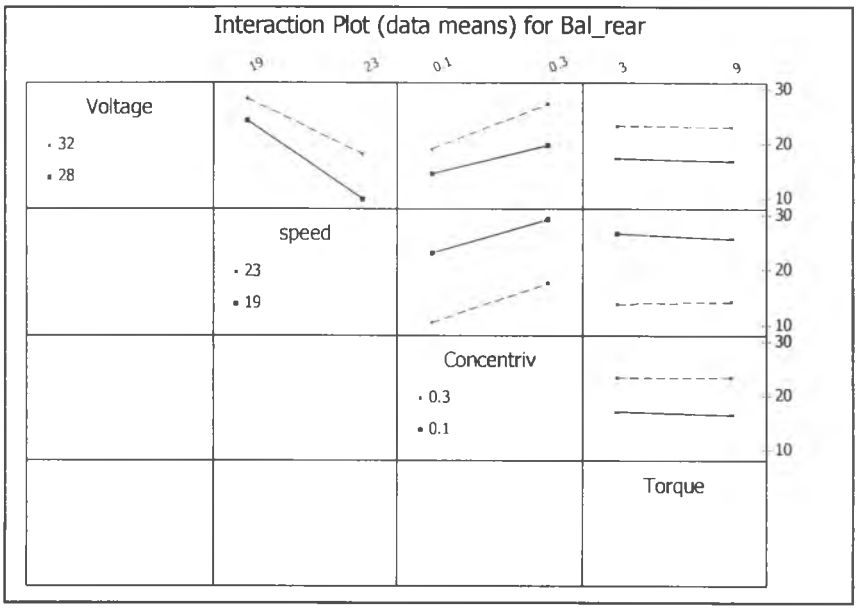


รูปที่ 6.5 แสดงความเสถียรของระหว่าง Residual และ Fitted Value

การวิเคราะห์ Main Effect Plot และ Interaction Effect ของค่าสมดุลดังแสดงในรูปที่ 6.6 และ 6.7 หมายถึงอิทธิพล (Effect) ของแต่ละปัจจัยที่มีต่อของค่าสมดุล โดยสังเกตุว่ากราฟของเมื่อ Speed เทียบกับค่าสมดุลจะมีความชันมากว่ากราฟของ Voltage และ Concentricity ส่วน Torque มีความชันของกราฟน้อยที่สุดแสดงว่ามีผลกับค่าสมดุลน้อยที่สุดซึ่งตรงกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนว่าค่าท็อร์คไม่มีผลกับค่าสมดุลอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 6.6 กราฟแสดง Main Effect Plot ของค่าสมดุล



รูปที่ 6.7 กราฟแสดง Interaction Effect Plot ของค่าสมดุล

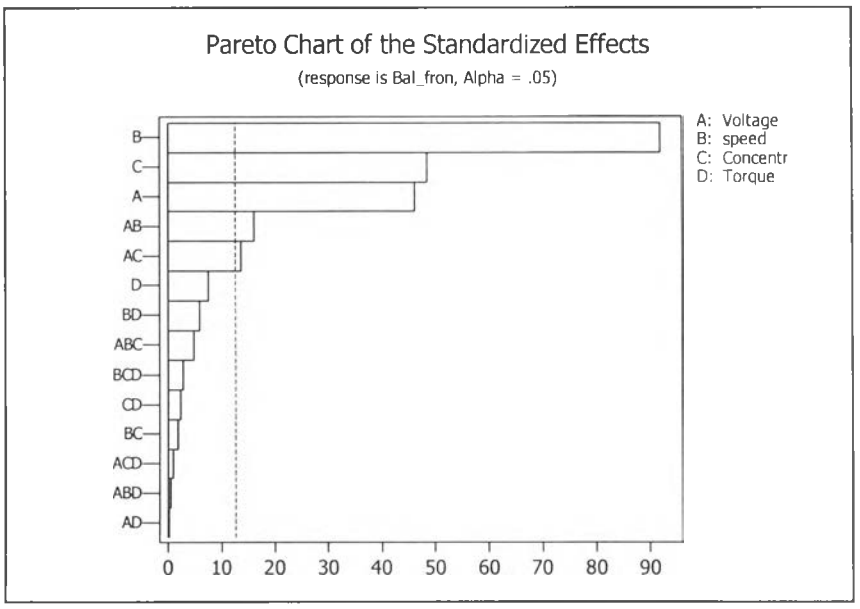
6.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้นของค่าสมดุลด้านหน้า (Front)

นำข้อมูลจากตารางบันทึกผลการทดลองที่ 6.1 เบื้องต้นเพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าสมดุลด้าน Front โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสถิติช่วยในการคำนวณได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 6.3

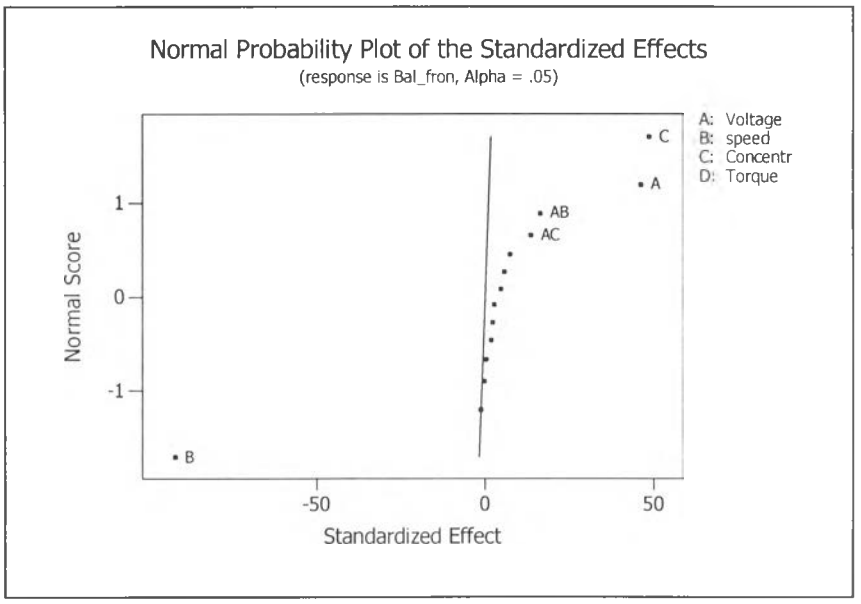
ตารางที่ 6.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเบื้องต้น (Front)

Analysis of Variance for Bal_fron, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Voltage	1	161.926	161.926	161.926	2141.17	0.014
speed	1	641.356	641.356	641.356	8480.74	0.007
Concentr	1	178.891	178.891	178.891	2365.50	0.013
Torque	1	4.306	4.306	4.306	56.93	0.084
Voltage*speed	1	20.026	20.026	20.026	264.80	0.039
Voltage*Concentr	1	14.251	14.251	14.251	188.44	0.046
Voltage*Torque	1	0.001	0.001	0.001	0.01	0.942
speed*Concentr	1	0.276	0.276	0.276	3.64	0.307
speed*Torque	1	2.641	2.641	2.641	34.92	0.107
Concentr*Torque	1	0.391	0.391	0.391	5.17	0.264
Voltage*speed*Concentr	1	1.756	1.756	1.756	23.21	0.130
Voltage*speed*Torque	1	0.016	0.016	0.016	0.21	0.728
Voltage*Concentr*Torque	1	0.076	0.076	0.076	1.00	0.500
speed*Concentr*Torque	1	0.601	0.601	0.601	7.94	0.217
Error	1	0.076	0.076	0.076		
Total	15	1026.584				



รูปที่ 6.8 แสดงแผนภูมิพาเรโตของ Effect แต่ละปัจจัย



รูปที่ 6.9 แสดงกราฟ Normal Probability Plot of Effect

จากวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยหลักการทางสถิติวิศวกรรมสามารถแสดงรายละเอียดในตารางที่ 6.3 และกราฟการแจกแจงแบบปกติในรูปที่ 6.9 เมื่อพิจารณาจากค่า P-Value ซึ่งเป็นระดับความเชื่อมั่นน้อยที่สุดที่จะปฏิเสธสมมุติฐานหลัก (H_o) ดังนั้นที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยใดที่มีค่า P-Value < 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นๆมีผลต่อค่าสมดุลโดยจะทำการพิจารณาดังนี้

1. เมื่อพิจารณาปัจจัยหลัก (Main Effect) พบว่าปัจจัย A (Supply Voltage) ปัจจัย B (Welding Speed) ปัจจัย C (Concentricity) มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และเป็นจุดที่อยู่ห่าง

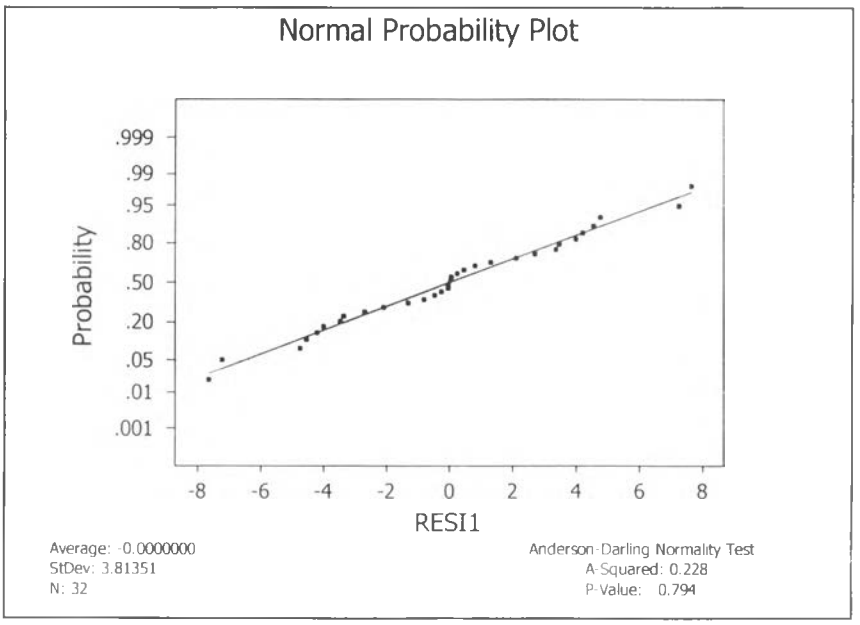
จากเส้นตรงในรูปที่ 6.9 อย่างชัดเจนจึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยทั้ง 3 ที่มีผลกับค่าสมดุลของเพลากลางอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปัจจัย D (Torque) ที่ค่า P-Value เท่ากับ 0.084 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่า Torque ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญกับค่าสมดุลด้าน Front ของเพลากลางสามารถตัดทิ้งและไม่นำไปใช้กับการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

2. เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม (Interaction Effect) พบว่า Voltage*Speed ซึ่งมีค่าP-Value เท่ากับ 0.039 และ Voltage*Concentricity มีค่า P-Value 0.46 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยร่วมของ Voltage*Speed และ Voltage*Concentricity มีผลกับค่าสมดุลของเพลากลางอย่างมีนัยสำคัญ

3. จากผลการทดลองวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิพาเรโตของ Effect แต่ละปัจจัยดังรูปที่ 6.8 เราทำให้เราทราบว่ามี 5 ปัจจัยคือ ปัจจัย A (Supply Voltage) ปัจจัย B (Welding Speed) และปัจจัย C (Concentricity) และปัจจัยร่วมของ Voltage*Speed, Voltage*Concentricity มีค่า Effect อยู่ทางขวาของเส้นตรง ดังนั้นสรุปได้ว่าทั้ง 5 ปัจจัยมีผลต่อค่าสมดุลของเพลากลาง ส่วนปัจจัย D (Torque) ไม่มีผลต่อค่าสมดุลของเพลากลาง

6.2.4 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

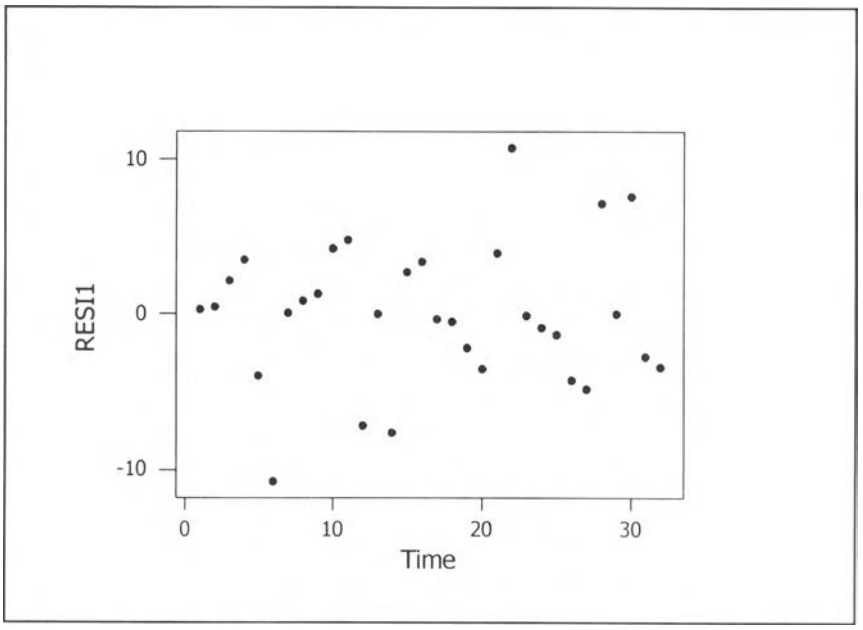
การออกแบบการทดลองเบื้องต้น ได้ตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์จากการที่ตัวแปรตามคือค่าสมดุล มีการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ดังนั้นค่าสมดุลจะมีการกระจายแบบนี้ได้ต้องให้ ε_{ijk} มีการกระจายแบบปกติด้วยและต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระตามสมมุติฐาน ($\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$) การตรวจสอบ ε_{ij} มี 3 ขั้นตอน คือ



รูปที่ 6.10 แสดงกราฟ Normality Probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน

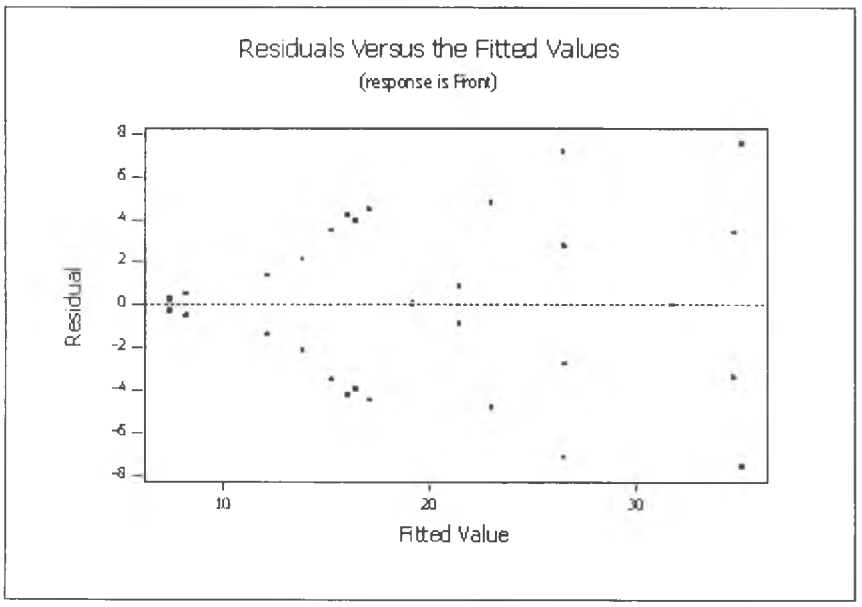
1. การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นแบบแจกปกติ (Normal Distribution) โดยใช้การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติ (NOPP) โดยการพิจารณาจากการกระจายของค่า Residual ในรูปที่ 6.10 พบว่ามีการกระจายแบบปกติเนื่องจากค่า P-Value มากกว่า 0.05

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระข้อมูล (Independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ดังรูปที่ 6.11 จากการพิจารณาลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิพบว่ามีการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเป็นรูปแบบอิสระและที่ไม่เป็นรูปแบบ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้มีความอิสระต่อกัน



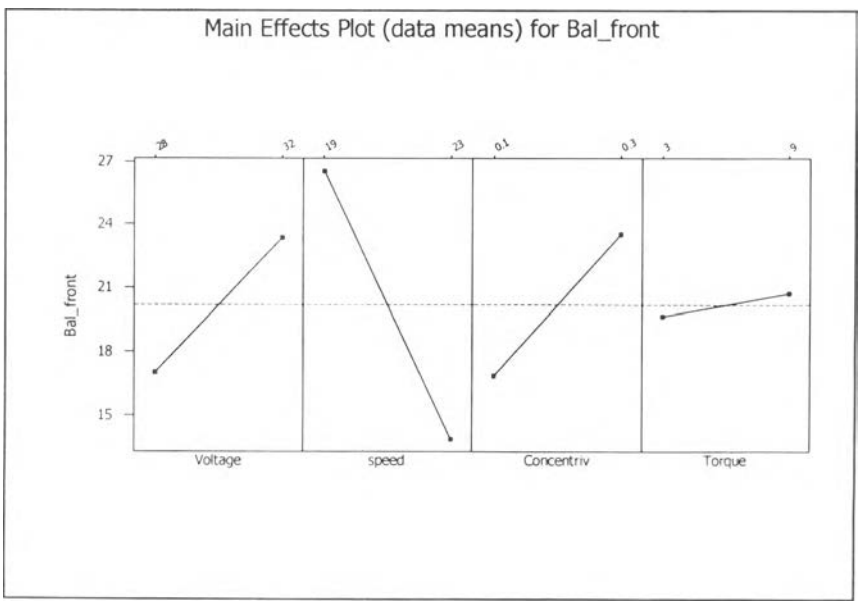
รูปที่ 6.11 กราฟแสดงการกระจายตัวของ Residual และ Time

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายรูปที่ 6.12 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) และค่า Fitted Value ในแต่ละระดับของปัจจัยพบว่ารูปร่างของการกระจายของข้อมูลที่ออกมาไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลของค่าสมดุลมีความเสถียรของความแปรปรวน

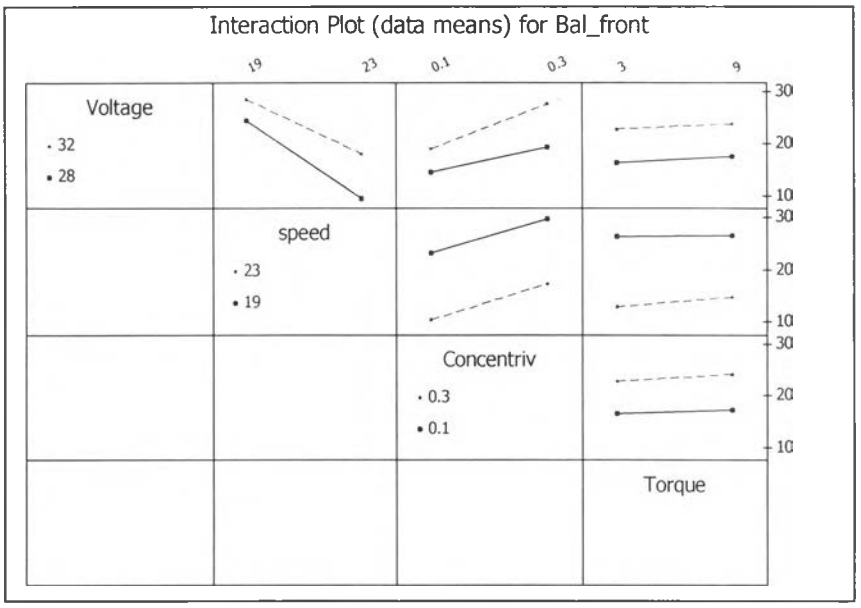


รูปที่ 6.12 แสดงความเสถียรของระหว่าง Residual และ Fitted Value

การวิเคราะห์ Main Effect Plot และ Interaction Effect ของค่าสมดุลดังแสดงในรูปที่ 6.13 และ 6.14 หมายถึงอิทธิพล (Effect) ของแต่ละปัจจัยที่มีต่อของค่าสมดุล โดยสังเกตุว่ากราฟของเมื่อ Speed เทียบกับค่าสมดุลจะมีความชันมากว่ากราฟของ Voltage และ Concentricity ส่วน Torque มีความชันของกราฟน้อยที่สุดแสดงว่ามีผลกับค่าสมดุลน้อยที่สุดซึ่งตรงกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนว่าค่าท็อร์คไม่มีผลกัค่าสมดุลอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 6.13 กราฟแสดง Main Effect Plot ของค่าสมดุล



รูปที่ 6.14 กราฟแสดง Interaction Effect Plot ของค่าสมดุล

จากผลการทดลองเบื้องต้นเราทำให้เราทราบว่ามี 3 ปัจจัยหลักคือ ปัจจัย Supply Voltage, Welding Speed, Concentricity และปัจจัยร่วมVoltage*Speed และ ที่มีผลกับค่าสมดุลของเพลากลางและจะนำไปใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม ส่วนปัจจัย D (Torque) สามารถตัดทิ้งได้เนื่องจากไม่มีผลต่อค่าสมดุลของเพลากลาง

6.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมจะใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลตัวแบบอิทธิพลคงที่โดยนำปัจจัย 3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสมดุลจากการทดลองเบื้องต้น โดยมีตัวแปรตามคือค่าสมดุล มีรายละเอียดของการออกแบบการทดลองคือ จำนวนการทดลอง 27 สภาวะ และปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง มี 3 ปัจจัยผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

Std Order	Run Order	Blocks	Concentricity	Voltage	Speed	Balance
23	1	1	0.30	30	21	25.43
4	2	1	0.10	30	19	22.90
9	3	1	0.10	32	23	10.70
1	4	1	0.10	28	19	13.34
17	5	1	0.15	32	21	20.90
14	6	1	0.15	30	21	14.78

ตารางที่ 6.4 (ต่อ) แสดงผลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

Std Order	Run Order	Blocks	Concentricity	Voltage	Speed	Balance
8	7	1	0.10	32	21	20.73
26	8	1	0.30	32	21	25.53
12	9	1	0.15	28	23	9.05
15	10	1	0.15	30	23	10.43
24	11	1	0.30	30	23	19.30
19	12	1	0.30	28	19	25.50
5	13	1	0.10	30	21	16.20
2	14	1	0.10	28	21	8.58
21	15	1	0.30	28	23	13.25
11	16	1	0.15	28	21	14.29
7	17	1	0.10	32	19	28.90
25	18	1	0.30	32	19	35.65
20	19	1	0.30	28	21	17.50
18	20	1	0.15	32	23	11.08
16	21	1	0.15	32	19	31.90
3	22	1	0.10	28	23	4.85
6	23	1	0.10	30	23	7.20
27	24	1	0.30	32	23	21.38
22	25	1	0.30	30	19	32.38
10	26	1	0.15	28	19	20.06
13	27	1	0.15	30	19	26.65

6.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของค่าสมดุล

การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของค่าสมดุล โดยนำข้อมูลจากตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมดังตารางที่ 6.4 เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าสมดุล โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสถิติช่วยคำนวณได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ANOVA TABLE (Analysis of Variance for Rear)

Analysis of Variance for Balance, using Adjusted SS for Tests

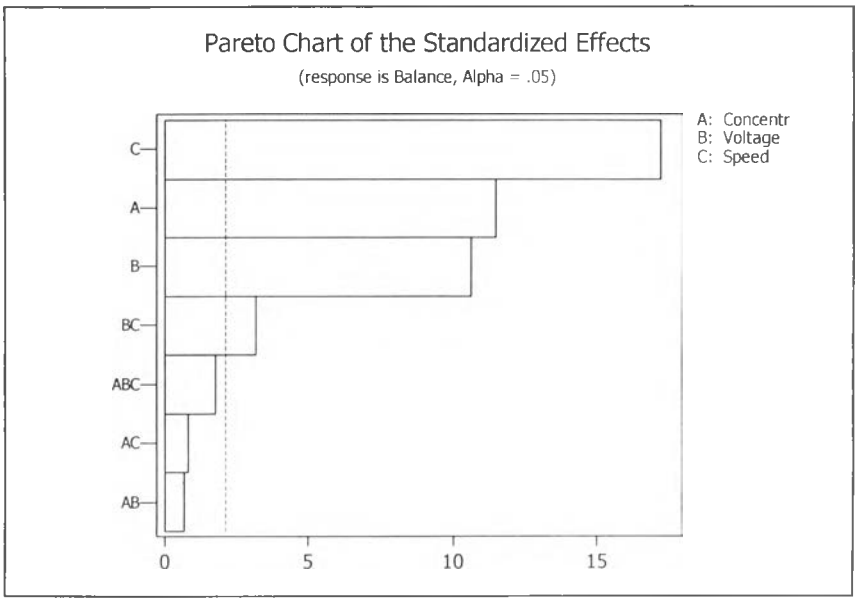
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Concentr	2	396.151	396.151	198.075	81.43	0.000
Voltage	2	364.248	364.248	182.124	74.88	0.000
Speed	2	944.594	944.594	472.297	194.17	0.000
Concentr*Voltage	4	24.316	24.316	6.079	2.50	0.126
Concentr*Speed	4	12.500	12.500	3.125	1.28	0.352
Voltage*Speed	4	39.368	39.368	9.842	4.05	0.044
Error	8	19.459	19.459	2.432		
Total	26	1800.636				

Estimated Effects and Coefficients for Balance (coded units)

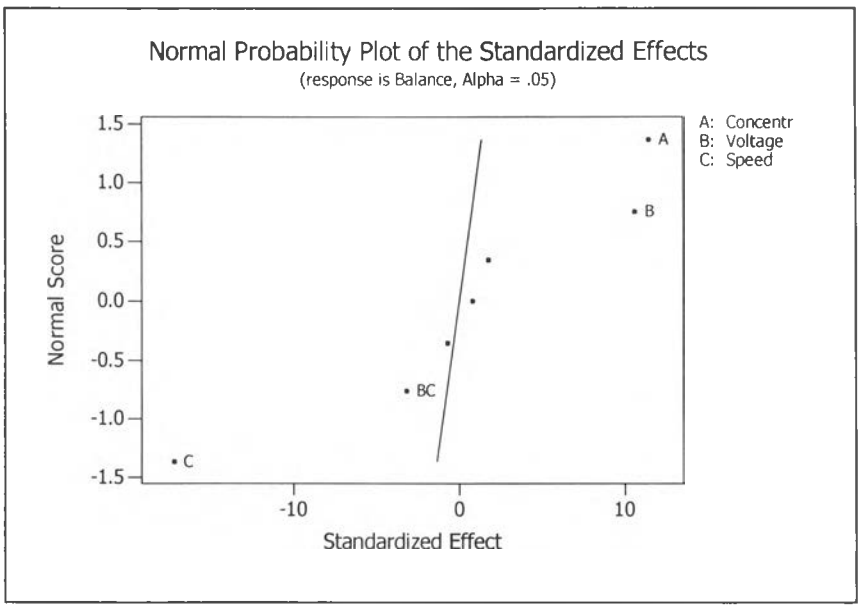
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		19.581	0.3390	57.76	0.000
Concentr	8.994	4.497	0.3915	11.49	0.000
Voltage	8.823	4.411	0.4152	10.62	0.000
Speed	-14.317	-7.159	0.4152	-17.24	0.000
Concentr*Voltage	-0.631	-0.315	0.4795	-0.66	0.519
Concentr*Speed	0.791	0.396	0.4795	0.82	0.420
Voltage*Speed	-3.244	-1.622	0.5086	-3.19	0.005
Concentr*Voltage*Speed	2.078	1.039	0.5872	1.77	0.093

Analysis of Variance for Balance (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	1692.51	1619.91	539.970	180.67	0.000
2-Way Interactions	3	41.99	33.72	11.240	3.76	0.028
3-Way Interactions	1	9.36	9.36	9.357	3.13	0.093
Residual Error	19	56.78	56.78	2.989		
Total	26	1800.64				



รูปที่ 6.15 แสดงแผนภูมิพาเรโตของ Effect แต่ละปัจจัย



รูปที่ 6.16 แสดงกราฟ Normal Probability Plot of Effect

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยหลักการทางสถิติวิศวกรรมสามารถแสดงรายละเอียดในตารางที่ 6.5 และกราฟการแจกแจงแบบปกติในรูปที่ 6.16 ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาจากค่า P-Value ของแต่ละปัจจัยซึ่งเป็นระดับความเชื่อมั่นน้อยที่สุดที่จะปฏิเสธสมมุติฐานหลัก (H_o) ดังนั้นที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยใดที่มีค่า P-Value < 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นๆมีผลต่อค่าสมดุลโดยจะทำการพิจารณาดังนี้

1. เมื่อพิจารณาปัจจัยหลัก (Main Effect) พบว่าปัจจัย ปัจจัย A (Concentricity) B (Supply Voltage) และปัจจัย C (Welding Speed) มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยทั้ง 3 ที่มีผลกับค่าสมดุลของเพลากลางอย่างมีนัยสำคัญ

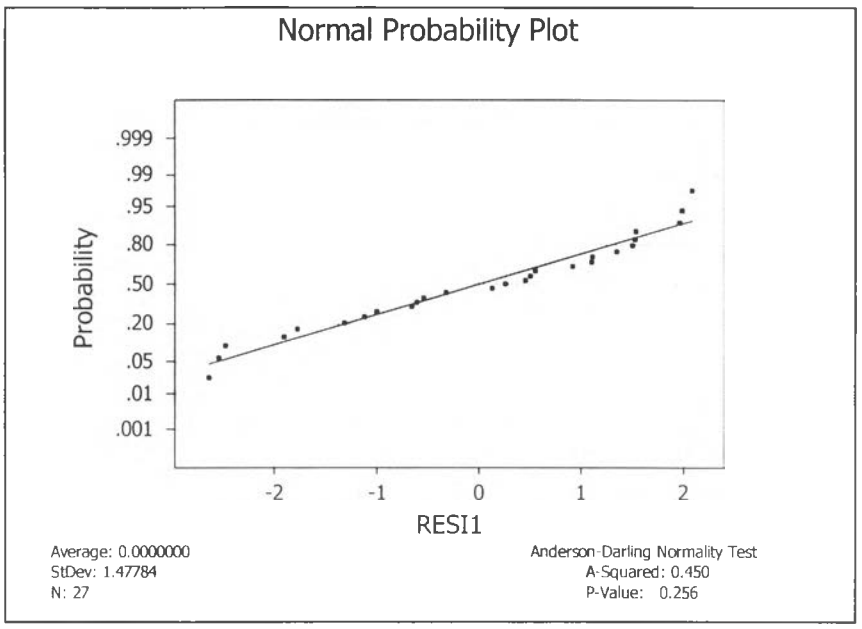
2. เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม (Interaction Effect) พบว่า ปัจจัยร่วมของ Voltage*Speed ซึ่งมีค่าP-Value เท่ากับ 0.005 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยร่วมของของ Voltage*Speed มีผลกับค่าสมดุลของเพลากลางอย่างมีนัยสำคัญ

3. จากผลการทดลองวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิพาเรโตของ Effect แต่ละปัจจัยดังรูปที่ 6.15 เราทำให้เราทราบว่ามี 4 ปัจจัยคือ ปัจจัย A (Supply Voltage) ปัจจัย B (Welding Speed) และปัจจัย C (Concentricity) และปัจจัยร่วมของ Voltage*Speed, Voltage*Concentricity มีค่า Effect อยู่ทางขวาของเส้นตรง ดังนั้นสรุปได้ว่าทั้ง 4 ปัจจัยมีผลมีผลกับค่าสมดุลของเพลากลางอย่างมีนัยสำคัญเหมือนกับการทดลองเบื้องต้น

6.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

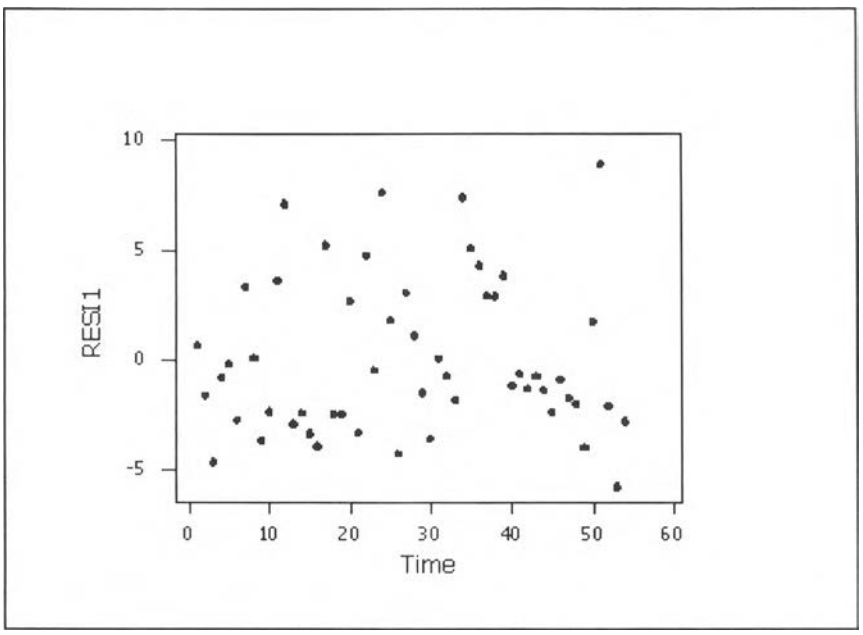
ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมการออกแบบการทดลองได้ตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์จากการที่ค่าสมดุลว่ามีการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ดังนั้นค่าสมดุลจะมีการกระจายแบบนี้ได้ต้องให้ ε_{ijk} มีการกระจายแบบปกติด้วยและต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระตามสมมุติฐาน ($\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$) การตรวจสอบ ε_{ij} มี 3 ขั้นตอน คือ _

1. การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นแบบแจกปกติ (Normal Distribution) โดยใช้การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติ (NOPP) โดยการพิจารณาจากการกระจายของค่า Residual ในรูปที่ 6.17 พบว่ามีการกระจายแบบปกติเนื่องจากค่า P-Value มากกว่า 0.05



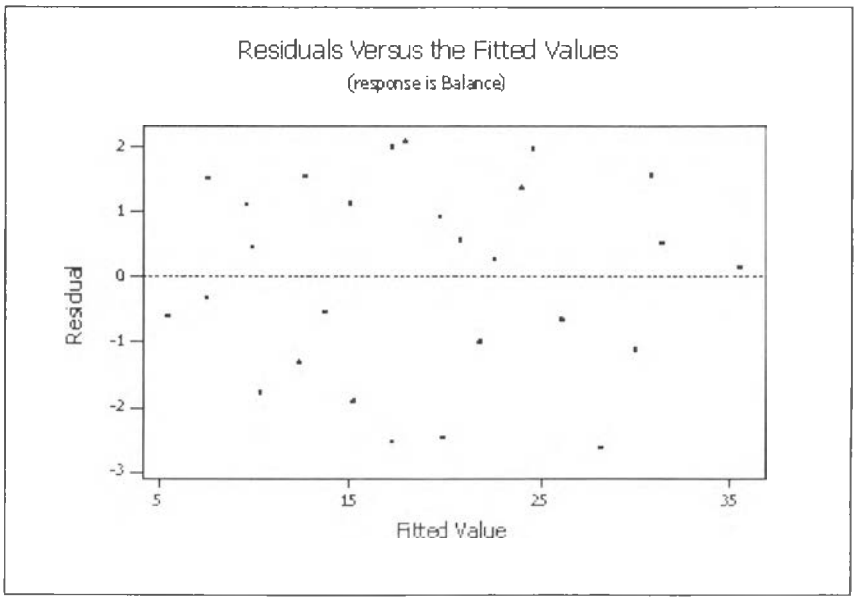
รูปที่ 6.17 แสดงกราฟ Normal Probability plot ของค่าสมดุล

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระข้อมูล (Independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ดังรูปที่ 6.18 จากการพิจารณาลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิพบว่ามีการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนเป็นรูปแบบอิสระและที่ไม่เป็นรูปแบบ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้มีความอิสระต่อกัน



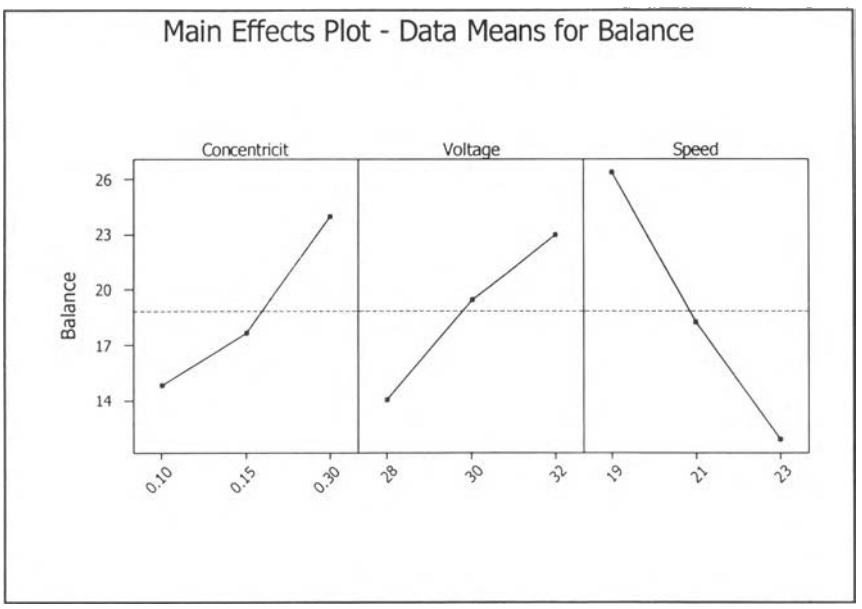
รูปที่ 6.18 กราฟแสดงการกระจายตัวของ Residual และ Time

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายดังรูปที่ 6.19 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) และค่า Fitted Value ในแต่ละระดับของปัจจัยพบว่ารูปร่างของการกระจายของข้อมูลที่ออกมาไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลของค่าสมดุลมีความเสถียรของความแปรปรวน

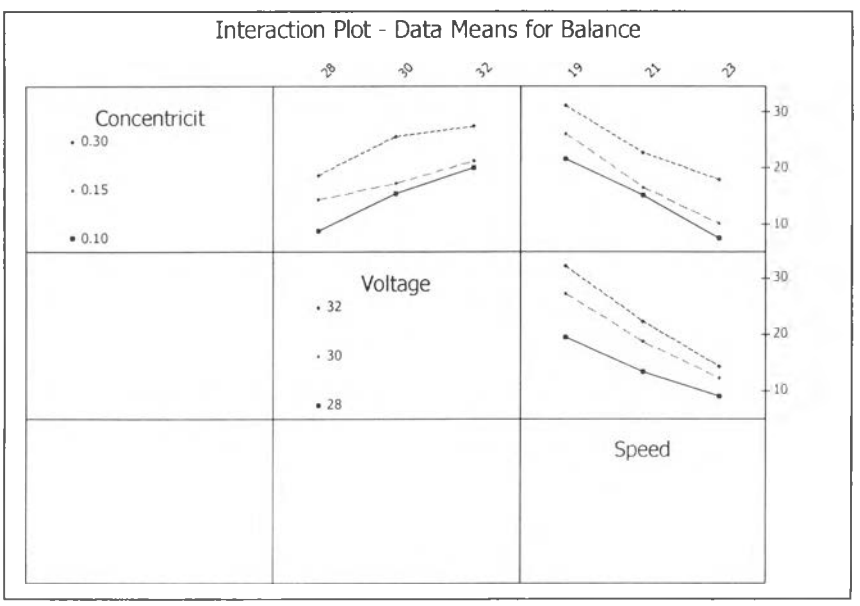


รูปที่ 6.19 แสดงความเสถียรของระหว่าง Residual และ Fitted Value

การวิเคราะห์ Main Effect Plot และ Interaction Effect ของค่าสมดุลดังแสดงในรูปที่ 6.20 และ 6.21 หมายถึงอิทธิพล (Effect) ของแต่ละปัจจัยที่มีต่อของค่าสมดุลโดยสังเกตุว่ากราฟของเมื่อ Speed เทียบกับค่าสมดุลจะมีความชันมากว่ากราฟของ Voltage และ Concentricity แสดงว่า Speed มีผลกับค่าสมดุลมากที่สุดซึ่งตรงกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนว่าค่าท็อร์คไม่มีผลกัค่าสมดุลอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 6.20 กราฟแสดงถึง Main Effect Plot ของค่าสมดุล



รูปที่ 6.21 กราฟแสดง Interaction Effect Plot ของค่าสมดุล

6.4 การหาสภาวะที่เหมาะสม

จากผลการวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมเราพบว่ามีปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย และ 1 ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าสมดุลดังแสดงในรูปที่ 6.20 และ 6.21 โดยในขั้นตอนนี้จะทำการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 4 โดยใช้วิธีการของ Regression หลังจากนั้นจะใช้สมการที่ได้ในการทำนายหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสำหรับเพลากลางรายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 6.6 และกราฟรูปที่ 6.22

ตารางที่ 6.6 แสดงการวิเคราะห์สมการถดถอย

Summary of Fit

R-Square	=	96.142%
R-Square (adj)	=	95.441%
Root Mean Square Error	=	1.7769
Mean of Response	=	18.8318
Observation	=	27

Parameter Estimate

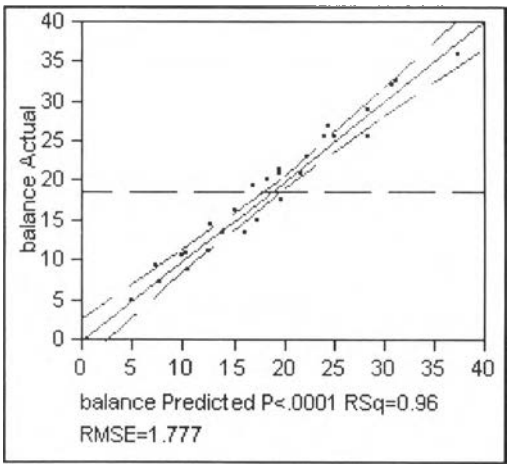
Term	Estimate	Std. Error	t Ratio	P-Value
Constant	19.486	7.712	2.53	0.0192
Concentricity	44.971	4.024	11.18	<0.0001
Voltage	2.2319	0.209	10.66	<0.0001
Speed	-3.6122	0.209	-17.25	<0.0001
Voltage*Speed	-0.4487	0.128	-3.50	0.0020

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F-Ratio	P-Value
Regression	4	1731.1697	432.792	137.0655	<0.0001
Residual Error	22	69.4663	3.158		
Total	26	1800.6360			

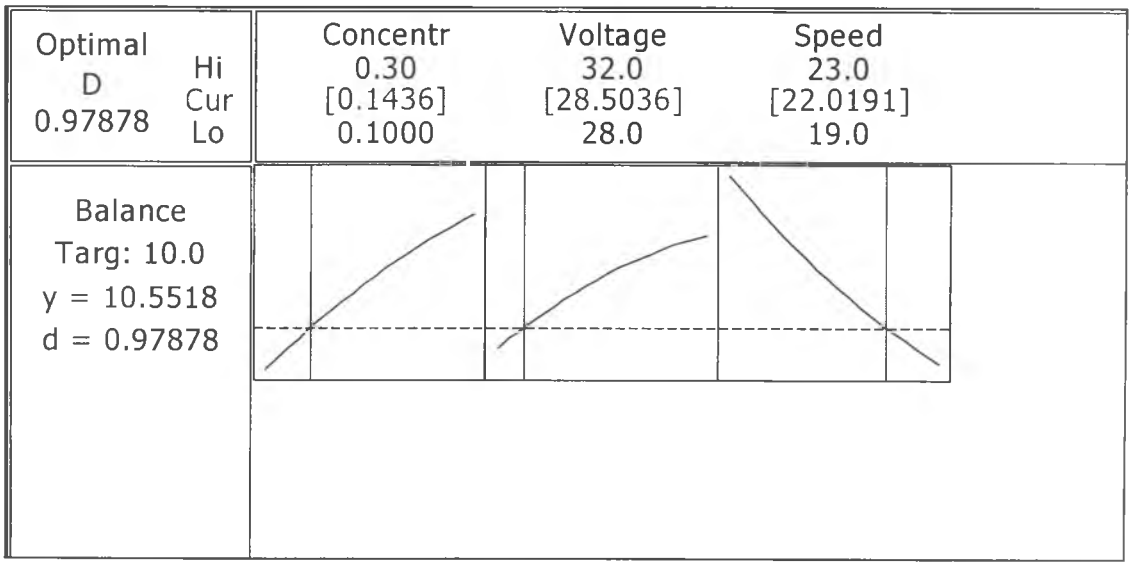
สมการถดถอย (Regression equation) ของกระบวนการคือ

Balance = 19.48 + 44.97Concentricity + 2.23Voltage - 3.61Speed - 0.44Voltage* Speed



รูปที่ 6.22 กราฟแสดง Actaul by Predicted Plot ของค่าสมดุล

การหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อค่าสมดุลของเพลากลางทั้ง 3 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า อัตราการป้อนลวด และค่าความร่วมศูนย์กลางสามารถทำได้โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปช่วยคำนวนหาสภาวะที่เหมาะสม โดยอาศัยสมการถดถอยที่คำนวณได้และทำการตั้งเป้าหมายค่าสมดุลไว้ที่ 10 กรัม ผลการคำนวณแสดงไว้ในรูปที่ 6.23



รูปที่ 6.23 กราฟสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลกับค่าสมดุล

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.23 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการผลิตเพลากลางเพื่อให้ได้ค่าสมดุล 10.5518 กรัมควรจะทำการผลิตตามสภาวะดังนี้

1. ค่าความร่วมศูนย์ Concentricity = 0.1436 mm.
2. แรงดันไฟฟ้า (Supply Voltage) = 28.5036 Volt
3. ค่าปรับการป้อนลวด Welding Speed = 22.0191 Sec/round

6.5 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

6.5.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผล

ในการทดลองเพื่อยืนยันผลผู้วิจัยได้ใช้สภาวะการผลิตที่ได้จากการทำนายจากสมการถดถอย (Regression equation) ของกระบวนการนำมาทดลองทำการผลิตจริงจำนวน 36 ตัวอย่างหลังจากนั้นนำข้อมูลมาทำการทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของประชากรปกติ โดยข้อมูลผลการทดลองเพื่อยืนยันผล แสดงดังตารางบันทึกผลที่ 6.7

การหาจำนวนตัวอย่างในการทดสอบค่าเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$N = (U_\alpha + U_\beta)^2 x(\sigma^2/\delta^2)$$

$$= (1.282 + 1.645)^2 x(\sigma^2/0.5\sigma^2)$$

$$= 35.26$$

ตารางที่ 6.7 แสดงข้อมูลการทดสอบค่าสมดุลที่ได้จากการผลิตที่ได้จากสภาวะปัจจุบันและสภาวะที่เหมาะสม

ลำดับ	**Current Condition** Concentricity 0.2 mm Supply Voltage 30 Volt Welding Speed 21 Sec/round		**Purpose Condition** Concentricity 0.1436 mm Supply Voltage 28.5036 Volt Welding Speed 22.0191 Sec/round	
	Rear	**Front**	**Rear**	**Front**
1	15.8	19.7	9.7	6.8
2	22.8	34.4	6.6	12.2
3	21.3	25.2	10.1	4.5
4	22.7	22.8	15.9	2.8
5	36.5	15.9	11.5	15.3
6	25.7	23.0	10.5	10.5
7	24.6	11.5	2.8	8.3
8	20.1	21.3	12.6	5.7
9	17.5	33.0	4.9	10.2
10	28.7	22.7	5.4	13.3
11	20.5	10.5	8.0	14.5
12	15.8	25.9	11.4	9.7
13	10.5	12.6	5.6	5.7
14	15.5	18.8	14.7	12.3
15	26.0	23.1	7.7	7.5
16	25.2	20.1	11.0	11.6

ตารางที่ 6.7 (ต่อ) แสดงข้อมูลการทดสอบค่าสมดุลที่ได้จากการผลิตที่ได้จากสภาวะปัจจุบันและสภาวะที่เหมาะสม

ลำดับ	**Current Condition** Concentricity 0.2 mm Supply Voltage 30 Volt Welding Speed 21 Sec/round		**Purpose Condition** Concentricity 0.1436 mm Supply Voltage 28.5036 Volt Welding Speed 22.0191 Sec/round	
	Rear	**Front**	**Rear**	**Front**
17	23.0	18.3	13.0	19.3
18	33.0	19.6	12.3	13.5
19	33.4	26.6	23.0	11.7
20	25.7	24.4	21.3	12.4
21	19.7	20.4	12.7	4.3
22	28.8	21.3	4.0	5.9
23	17.7	30.9	6.2	6.5
24	30.2	17.6	3.1	9.8
25	19.9	12.0	7.0	11.6
26	18.7	28.3	15.5	3.5
27	38.3	25.5	16.0	5.2
28	21.8	23.8	4.3	7.6
29	48.6	23	2.9	10.3
30	30.9	19.8	8.9	8.1
31	25.3	15.5	9.5	7.1
32	16.5	21.4	5.8	16.3
33	24.6	14.2	6.2	10.9
34	20.3	16.5	11.5	11.6
35	17.2	22.2	7.7	8.7
36	15.6	28.3	8.4	7.4

6.5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลองเพื่อยืนยันผลในการทดสอบเพื่อยืนยันผลจะทำการทดสอบใน 2 พารามิเตอร์ได้แก่

6.5.2.1 การทดสอบความมีนัยสำคัญของความแปรปรวนของประชากรปกติ

Response Balancing Test Rear

Factors Subscript

Confident Level 95.0000

Bonferroni confidence intervals for standard deviations

Lower	Sigma	Upper	N	Factor Levels
6.15531	7.97441	11.2164	36	Current
4.01352	5.19965	7.3136	36	Purpose

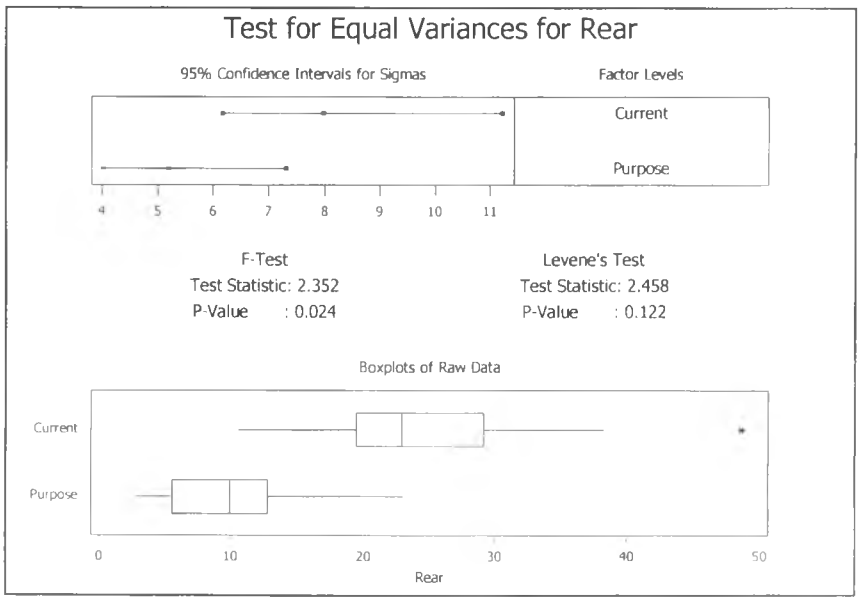
F-Test (normal distribution)

Test Statistic: 2.352 P-Value : 0.024

Levene's Test (any continuous distribution)

Test Statistic: 2.458 P-Value : 0.122

ผลการทดสอบความมีนัยสำคัญความแปรปรวนของค่าสมดุล สองประชากรคือ ที่สภาวะปัจจุบันและที่สภาวะที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสถิติ พบว่าค่า P-Value = 0.000 ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าวิกฤติคือ 0.024 พบว่าค่า P-Value มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต จึงสรุปได้ว่า ค่าความแปรปรวนของประชากรทั้งสองมีค่าแตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 6.24



รูปที่ 6.24 รูปแสดงการทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของประชากรปกติ

6.5.2 การทดสอบความมีนัยสำคัญของความค่าเฉลี่ยของประชากรปกติ

ผลการทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสถิติ พบว่าค่า P-Value = 0.000 ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าวิกฤติคือ 0.05 พบว่าค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤต จึงสรุปได้ว่าที่สภาวะปัจจุบันมีค่าสมดุลมากกว่าค่าสมดุลที่สภาวะที่เหมาะสม ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 6.25

Two-Sample T-Test and CI: Balance

Two-sample T for Balance

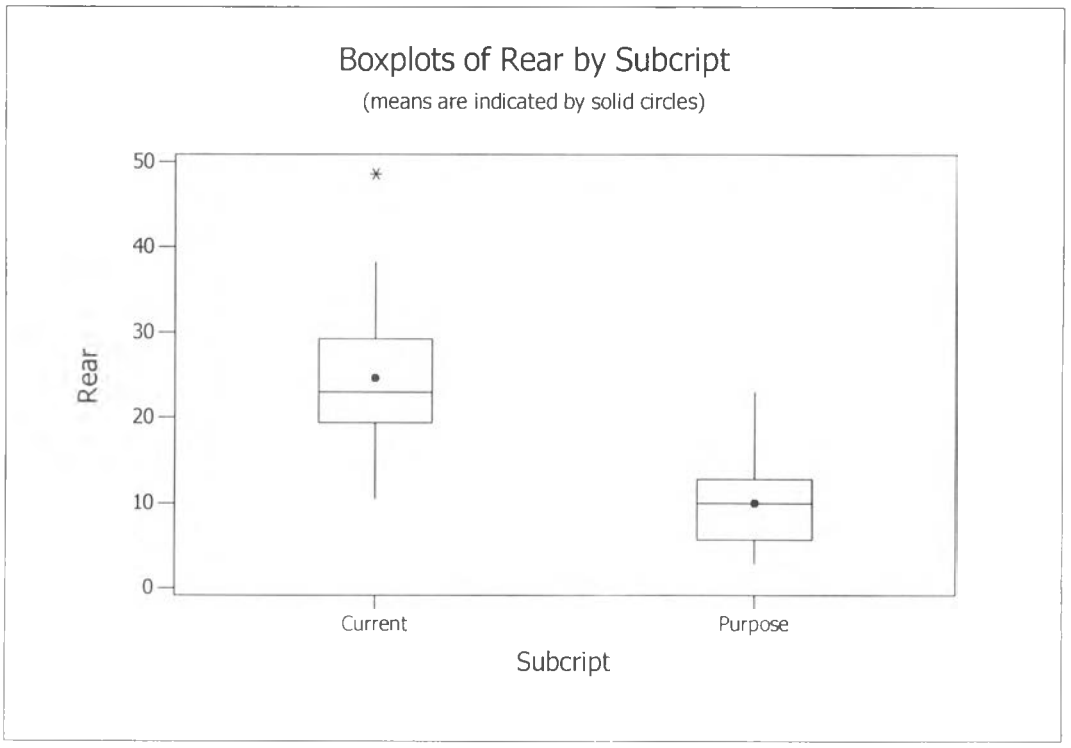
Subscript	N	Mean	StDev	SE Mean
Current	36	24.63	7.97	1.5
Purpose	36	9.65	5.20	0.95

Difference = mu (Current) - mu (Purpose)

Estimate for difference: 14.68

95% CI for difference: (11.18, 18.17)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 8.44 P-Value = 0.000 DF = 49



รูปที่ 6.25 รูปแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทั้งสองประชากร

6.6 บทสรุปท้ายบท

6.6.1 จากผลการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าสมดุลคือ

1. ค่าความร่วมศูนย์ (Concentricity)
2. แรงดันไฟฟ้า (Supply Voltage)
3. อัตราการป้อนลวดป้อนลวด (Welding Speed)
4. ปัจจัยร่วมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับอัตราการป้อนลวดป้อนลวด

6.6.2 นำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายในสมการรีเกรสชั่น ไปทดสอบยืนยันผลเปรียบกับสภาวะการผลิตเดิม จำนวน 36 ตัวอย่างพบว่าค่าเฉลี่ยของค่าสมดุลที่สภาวะการผลิตที่นำเสนอได้เท่ากับ 9.65 กรัมแต่ที่สภาวะการผลิตเดิมเท่ากับ 24.63 กรัม ซึ่งที่สภาวะการผลิตใหม่นี้จะใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ลูกค้าระบุไว้ว่าค่าสมดุลเท่ากับ 10 กรัม

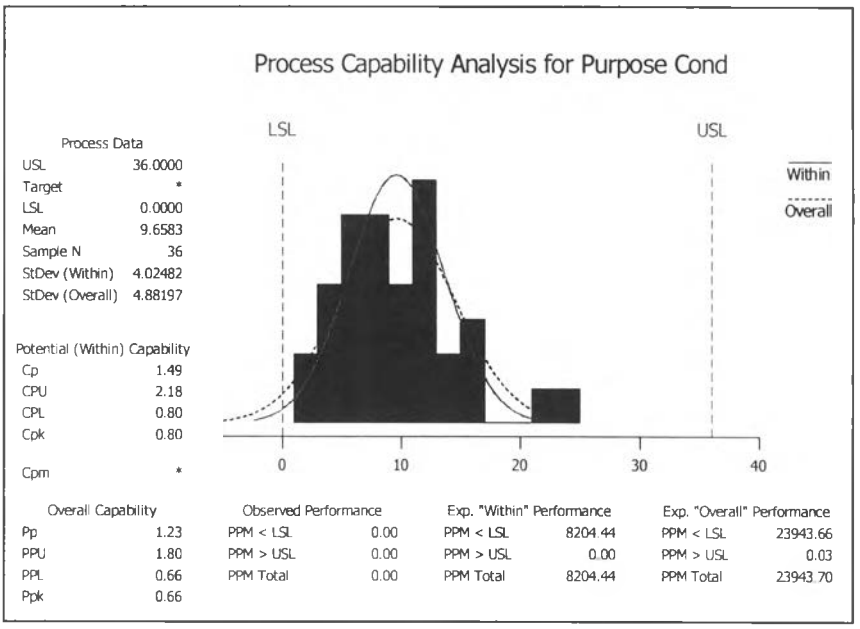
6.6.3 จากการทดสอบการทดสอบความมีนัยสำคัญของความค่าเฉลี่ยของประชากรปกติและการทดสอบความมีนัยสำคัญของความแปรปรวนของประชากรปกติพบว่าค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของทั้งประชากรที่ได้จากสภาวะการผลิตปกติและสภาวะการผลิตที่เหมาะสมมีความแตกต่างอย่งมีนัยสำคัญ

6.6.4 สรุปการวิเคราะห์ข้อบกพร่อง (FMEA) จากการนำค่า RPN ของแต่ละ Failure Mode มาทำการเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยพบว่า 4 ปัจจัยที่มีค่า RPN สูงสุด 4 ลำดับได้แก่ ความดันไฟฟ้า อัตราการป้อนลวด ค่าความร่วมศูนย์และค่าท็อร์ค คิดเป็น 55.93 % ของค่า RPN ทั้งหมดจึงนำไปใช้ทำการออกแบบการทดลอง หลังจากทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทำให้เราทราบปัจจัยที่มีผลกับค่าสมดุลและสามารถควบคุมค่าปัจจัยของ ความดันไฟฟ้า อัตราการป้อนลวด และค่าความร่วมศูนย์ได้ หลังทำการปรับปรุงด้วยการควบคุมปัจจัยทั้ง 3 ในกระบวนการผลิต จากนั้นจึงได้ทำการประเมิน Failure Mode ของปัจจัยที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว พบว่าสามารถลดค่า Detection ของทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสมดุล ดังแสดงในตารางการวิเคราะห์ข้อพกพร่องที่ 6.8 โดยค่า RPN ของทั้ง 3 ปัจจัย หลังทำการประเมินใหม่คือค่าความดันไฟฟ้ามีค่า RPN และอัตราการป้อนลวดเท่ากับ 245 และค่าความร่วมศูนย์มีค่า RPN เท่ากับ 100 โดยค่า RPN รวมของทั้ง 3 ปัจจัยเหลือ 27.96 % ของ ค่า RPN รวมทั้งหมด

ตารางที่ 6.8 แสดงการวิเคราะห์ข้อพกพร่องใหม่

กระบวนการ	สาเหตุของความล้มเหลว	Sev	Occ	Dec	RPN	การปรับปรุง	วันที่ทำงานเสร็จ	Sev	Occ	Dec	RPN
การเจาะรู	-ค่าความร่วมศูนย์	6	6	7	252	DOE	15/02/2545	6	6	5	180
การเชื่อม	- อัตราการป้อนลวด	7	7	9	441	DOE	15/02/2545	7	7	5	245
การเชื่อม	- ความดันไฟฟ้า	7	7	8	392	DOE	15/02/2545	7	7	5	245

6.6.5 จากสภาวะการผลิตใหม่ที่มีความเหมาะสมส่งผลให้มีของเสียน้อยลง ซึ่งสังเกตได้จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีชี้บ่งความสามารถในการผลิตดูรูปที่ 3.26 มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมที่เก็บข้อมูลไว้ในบทที่ 3 Cpk = 0.59เท่ากับ แต่ที่สภาวะปัจจุบัน Cpk = 0.80 ดั้งจึงสรุปได้ว่าเมื่อ Cpk เพิ่มขึ้นจะสามารถลดของเสียลงจาก 38,549.17 PPM เป็น 8204.44 PPM



รูปที่ 3.26 แสดงผลการคำนวณ Process Capability ของค่าสมดุลที่สภาวะการผลิตใหม่