



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การลดปริมาณของเสียในกระบวนการเชื่อมวงจร โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบ
การทดลอง : กรณีศึกษา โรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์

Defect Reduction in Wire Bond Process by Applying the Design of Experiment : A Case
Study in a Semiconductor Factory

นามผู้วิจัย นางสาวประภาภรณ์ แดงบรรจง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์รุ่งรัตน์ กิษฐ์เพ็ญ, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การลดปริมาณของเสียในกระบวนการเชื่อมวงจรมงจรโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบ
การทดลอง : กรณีศึกษา โรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์

Defect Reduction in Wire Bond Process by Applying the Design of Experiment : A Case Study
in a Semiconductor Factory

โดย

นางสาวประภากรณ์ แดงบรรจง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2553

ประกาศนียบัตร แดงบรรจง 2553: การลดปริมาณของเสียในกระบวนการเชื่อมวงจรโดยการ
ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง : กรณีศึกษา โรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์
ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D. 161 หน้า

จากการศึกษาปัญหาในโรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์ พบว่ามีของเสียเป็นจำนวนมากใน
กระบวนการเชื่อมวงจร งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง
(Design and Analysis of Experiment) ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียในผลิตภัณฑ์
UTLP เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีของเสียสูงที่สุด หลังจากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่าของเสีย
ลักษณะ BNS (Bump ball non-stick on bond pad) มีจำนวนมากที่สุดถึง 3,500 ppm โดยมีเป้าหมาย
ในการปรับปรุงเพื่อลดของเสียลักษณะ BNS ให้เหลือต่ำกว่า 1,000 ppm ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการ
ทดลองเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการเพื่อให้ค่าแรงเฉือนของลูกบอลในขั้นตอน
การเชื่อมวงจรมีค่าสูงสุดภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ โดยใช้วิธีการของทากูชิในการกรองปัจจัยใน
เบื้องต้น ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลของการทดลองชี้ให้เห็นว่าปัจจัย Force Base, Loop Base, Power
Base, Ball Offset และ Time Base มีผลต่อค่าแรงเฉือนของลูกบอลอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงนำ
ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงเฉือนของลูกบอลมาทำการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^5 เพื่อหาระดับ
ปัจจัยที่เหมาะสม

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง พบว่าค่าเฉลี่ยแรงเฉือนลูกบอลมี
ค่าเท่ากับ 53.261 grams โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพคืออยู่ภายใต้ข้อกำหนด และมีจำนวนของเสีย
ลดลงจาก 2,150 ppm เหลือเพียง 747 ppm ซึ่งบรรลุตามเป้าหมาย

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Prapagorn Dangbunjong 2010: Defect Reduction in Wire Bond Process by Applying the Design of Experiment : A Case Study in a Semiconductor Factory.

Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prapaisri Sudasna-na-Ayudhya, Ph.D. 161 pages.

According to the semiconductor factory, there are a lot of defects in the wire bond process. The objective of the paper is to apply the design and analysis of experiment for studying factors that cause a rejection of UTLP product. At present, the UTLP product has the highest rejection rate. After the preliminary analysis of rejection products, we found that damage caused by BNS (Bump ball non-stick on bond pad) has the highest rejection about 3,500 ppm. The target of the improvement is to be lower than 1,000 ppm. The design of experiment was conducted to find the most appropriate parameter setting to gain the higher value of bond shear strength in wire bond process by the Taguchi method at significance level of 0.05. The result indicated that factors affect bond shear strength are Force Base, Loop Base, Power Base, Ball Offset and Time Base. The 5 factor significant factors are then investigated further using 3^5 Factorial Design to find the optimal factors values.

The new parameter settings result in the real production improvement and the new mean of bond shear strength is 53.261 grams which can produce the quality product within the specification. From the result of this study, the rejection of BNS was reduced from 2,150 ppm to 747 ppm.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายๆ ฝ่าย ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหาในการทำวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.รุ่งรัตน์ กิตฺติเพ็ญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้งคณะกรรมการในการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้ายทุกท่านที่เสียสละเวลาในการควบคุมการสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณวิศวกร ช่างเทคนิค และพนักงาน QA ในกระบวนการเชื่อมวงจรทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนพนักงานฝ่ายผลิตที่กรุณาให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุนทั้ง กำลังทรัพย์และกำลังใจด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

ประกาศณั้ แดงบรรจง

มีนาคม 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	7
การตรวจเอกสาร	8
อุปกรณ์และวิธีการ	46
อุปกรณ์	46
วิธีการ	47
ผลและวิจารณ์	62
สรุปและข้อเสนอแนะ	93
สรุป	93
ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	96
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก แสดงข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าแรงเดือน ลูกบอด	100
ภาคผนวก ข แสดงข้อมูลแผนการทดลอง 3 ¹ แฟคทอเรียล	106
ภาคผนวก ค แสดงข้อมูลยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล	117
ภาคผนวก ง แสดงข้อมูลยืนยันผลการทดลองเพื่อหาจำนวน BNS ในกระบวนการ เชื่อมวงจรตั้งแต่วันที่ 4 มกราคม 2553 จนถึงวันที่ 13 มกราคม 2553	121
ภาคผนวก จ แสดงการคำนวณค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง	133
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	161

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^k (Analysis of Variance for 2^k)	18
2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 3^k (Analysis of Variance for 3^k)	20
3	แสดงการเปรียบเทียบจำนวนการทดลองโดยใช้ตารางออกทอกอนอล อะเรย์ของวิธีการทากูชิ กับจำนวนการทดลองแบบแฟคทอเรียล	24
4	แสดงการสุ่มสมบูรณ์	28
5	แสดงการสุ่มซ้ำอย่างง่าย	29
6	แสดงการสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก	30
7	แสดงมาตรฐานของตารางออกทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐานของวิธีการทากูชิแบบ L_{12} (L_{12} Orthogonal Array)	34
8	ปัจจัยและระดับที่ได้ทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยด้วยวิธีทากูชิ	56
9	ผลการ Calibration เครื่อง Wire Bond รุ่น AB 339	62
10	แสดงค่าแรงเฉือนลูกบอล (Y), อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งมามากยิ่งดีและค่าเฉลี่ยของแต่ละการทดลอง	65
11	ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งมามากยิ่งดีในแต่ละระดับของปัจจัยโดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป 15.1.1	66
12	แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป 15.1.1 พิจารณาตัวแปรตอบสนองคือค่าแรงเฉือนของลูกบอล	71
13	แสดงระดับของปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการทดลอง 3^3 แฟคทอเรียล	73
14	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของการทดลองแบบ 3^3 แฟคทอเรียล	77
15	Unusual Observations ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 3^3 แฟคทอเรียล	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของ การทดลองแบบ 3 ¹ แฟกทอเรียล เมื่อตัดค่าสังเกตที่ผิดปกติออกแล้ว	81
17	เงื่อนไขที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย	91
18	แสดงผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด Force Base = 30 grams, Loop Base = 4 step, Power Base = 75, Ball Offset = 18 และ Time Base = 25 msec	92
19	แสดงผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด Force Base = 30 grams, Loop Base = 4 step, Power Base = 65, Ball Offset = 22 และ Time Base = 25 msec	92
20	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง 3 ¹ แฟกทอเรียล	94
ตารางผนวกที่		
ก1	แผนการทดลองเพื่อกรองปัจจัย โดยใช้วิธีทากูชิ รอบการทดลองที่ 1	101
ก2	แผนการทดลองเพื่อกรองปัจจัย โดยใช้วิธีทากูชิ รอบการทดลองที่ 2	102
ก3	แผนการทดลองเพื่อกรองปัจจัย โดยใช้วิธีทากูชิ รอบการทดลองที่ 3	103
ก4	แผนการทดลองเพื่อกรองปัจจัย โดยใช้วิธีทากูชิ รอบการทดลองที่ 4	104
ก5	แผนการทดลองเพื่อกรองปัจจัย โดยใช้วิธีทากูชิ รอบการทดลองที่ 5	105
ข1	แผนการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสม โดยใช้วิธี 3 ^k แฟกทอเรียล	107
ค1	ข้อมูลยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้แผนการทดลอง 3 ^k แฟกทอเรียล กำหนด Force Base = 30 grams, Loop Base = 4 step, Power Base = 75, Ball Offset = 18 และ Time Base = 25 msec	118
ค2	ข้อมูลยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้แผนการทดลอง 3 ^k แฟกทอเรียล กำหนด Force Base = 30 grams, Loop Base = 4 step, Power Base = 65, Ball Offset = 22 และ Time Base = 25 msec	119

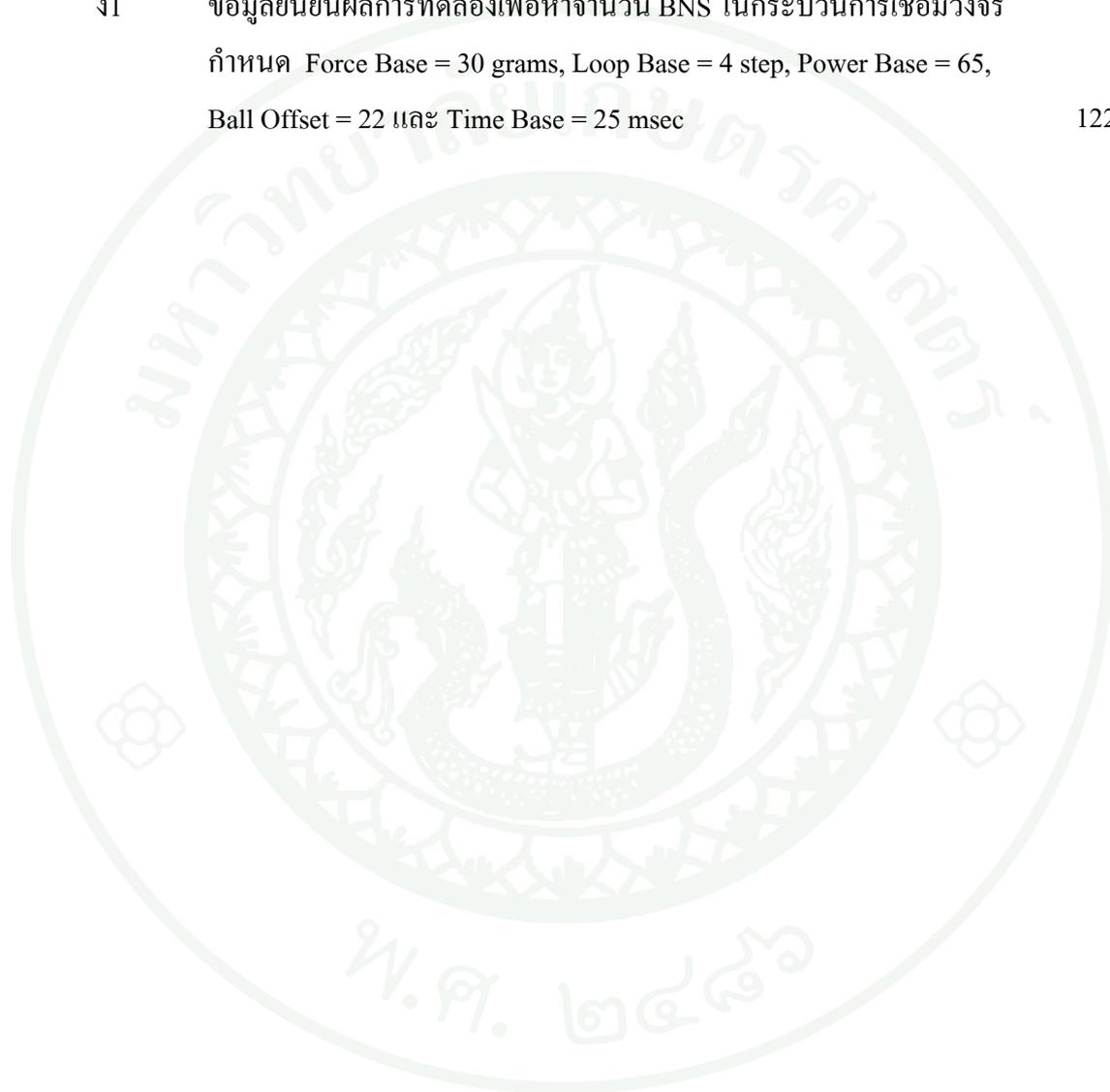
สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่

หน้า

- ง1 ข้อมูลยืนยันผลการทดลองเพื่อหาจำนวน BNS ในกระบวนการเชื่อมวงจร กำหนด Force Base = 30 grams, Loop Base = 4 step, Power Base = 65, Ball Offset = 22 และ Time Base = 25 msec

122



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ผลิตภัณฑ์เซมิคอนดักเตอร์ที่โรงงานตัวอย่างผลิตทั้งหมด	2
2	ลักษณะการเชื่อมวงจรของผลิตภัณฑ์ UTLP	3
3	กระบวนการผลิต UTLP	4
4	ลักษณะของเสียที่พบในผลิตภัณฑ์ UTLP	5
5	ลักษณะการเกิด BNS ในผลิตภัณฑ์ UTLP	5
6	ผังแสดงเหตุและผล	11
7	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล	15
8	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล	16
9	แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติ	23
10	เครื่อง Wire Bonder ที่ใช้ทดลอง	46
11	เครื่องทดสอบแรงเหวี่ยงลูกบอลรุ่น Dage BT 2400A Series 4000	46
12	Lead frame ที่ผ่านการติดหน้า Die แล้ว	47
13	จำนวน BNS ของผลิตภัณฑ์ UTLP ในแต่ละสายการผลิต	49
14	จำนวน BNS ของผลิตภัณฑ์ UTLP ในแต่ละเครื่องจักร	50
15	ระยะยกของเข็มจาก Pad Aluminum ก่อนแปดลูกบอลลูกที่ 1 (Loop Base)	53
16	ระยะแปดลูกบอลลูกที่ 1 (Ball Offset)	53
17	ความหนาในการกดตัดลูกบอลลูกที่ 1 (Ball Thickness)	53
18	ความยาวของลวดทองที่ปล่อยออกมาจากปลายเข็มเพื่อสร้างลูกบอล (Tail Length)	54
19	แรงกดและแรงขี้นที่ใช้ในการสร้างลูกบอลช่วงที่ 2 (Force Base และ Power Base)	55
20	ขนาดลูกบอลก่อนจะสัมผัสหน้า Die (Ball Size)	56
21	จำนวนของเสียลักษณะ BNS ของเครื่องจักรหมายเลข 119 ก่อนและหลัง Calibration	64
22	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของปัจจัยการทดลองกรณีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือค่า แรงเหวี่ยงของลูกบอล	67

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับการทดลองแบบ 3^5 แฟลคทอเรียล	83
24	Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับการทดลองแบบ 3^5 แฟลคทอเรียล โดยใช้การทดสอบ Kolmogorov - Smirnov	84
25	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล สำหรับการทดลองแบบ 3^5 แฟลคทอเรียล	85
26	กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าที่ถูกฟิต สำหรับการทดลองแบบ 3^5 แฟลคทอเรียล	85
27	กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Force Base และ Loop Base	86
28	กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Force Base และ Power Base	87
29	กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Force Base และ Ball Offset	87
30	กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Loop Base และ Power Base	88
31	กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Loop Base และ Ball Offset	89
32	กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Power Base และ Ball Offset	89
33	กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Power Base และ Time Base	90
34	กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Ball Offset และ Time Base	91

การลดปริมาณของเสียในกระบวนการเชื่อมวงจรโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบ
การทดลอง : กรณีศึกษา โรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์

**Defect Reduction in Wire Bond Process by Applying the Design of
Experiment : A Case Study in a Semiconductor Factory**

คำนำ

ในปัจจุบันได้มีการแข่งขันกันมากในด้านผลิตภัณฑ์และงานบริการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบัน อัตราการแข่งขันยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากการลดกำแพงภาษีลง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่จะสามารถแข่งขันได้นั้นต้องมีองค์ประกอบในแง่ของราคาและคุณภาพ โดยคุณภาพที่ดีนั้นต้องตรงตามความต้องการและความคาดหวังของลูกค้า แต่อย่างไรก็ตาม ก็ต้องอยู่ภายใต้พื้นฐานของราคา ซึ่งผู้ผลิตที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงและราคาถูกลงก็จะได้เปรียบกว่าผู้ผลิตรายอื่นๆ

เซมิคอนดักเตอร์เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญมากในทุกวงการ ไม่ว่าจะเป็นระบบการสื่อสาร คอมพิวเตอร์ วงการทหาร และในวงการอื่นๆอีกมากมายหลายแขนงซึ่งไม่สามารถที่จะปฏิเสธเซมิคอนดักเตอร์ได้ ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ได้มีการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง แต่มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงขึ้น

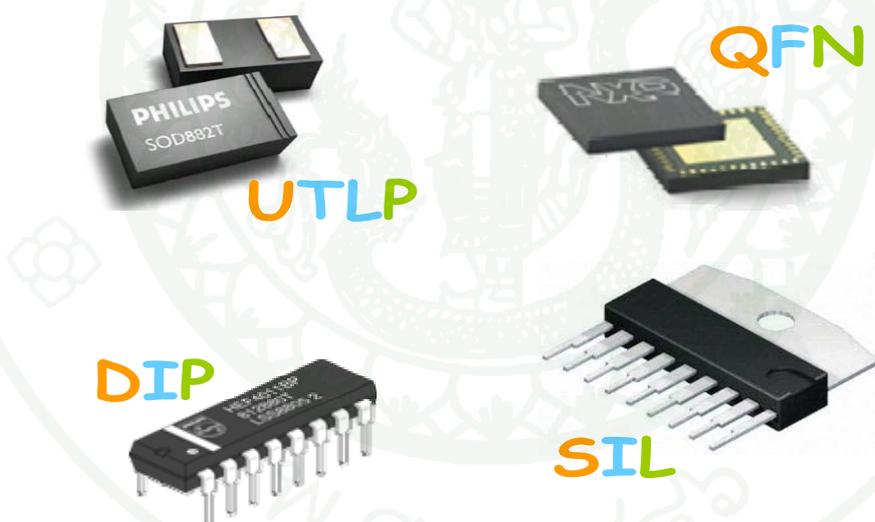
โรงงานอุตสาหกรรมประเภทอุตสาหกรรมผลิตเซมิคอนดักเตอร์จึงมีการแข่งขันกันในระดับที่สูงมาก ทำให้ผู้ผลิตเซมิคอนดักเตอร์ต้องมีการควบคุมในกระบวนการผลิตเพื่อทำให้มีประสิทธิภาพในการผลิตสูงสุด และลดจำนวนของเสียลงให้ได้มากที่สุด รวมทั้งเพิ่มคุณภาพของตัวเซมิคอนดักเตอร์เพื่อจะมีส่วนในการครองตลาดมากขึ้น

การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตจึงเป็นหัวใจสำคัญอย่างยิ่งในทุกๆอุตสาหกรรมที่จะทำให้เกิดการแข่งขันทางการตลาดในภาคอุตสาหกรรมประสบความสำเร็จ ซึ่งการที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีคุณภาพนั้น นอกจากจะช่วยลดค่าใช้จ่ายของผู้ผลิตแล้ว ยังทำให้สินค้าที่ผลิตออกมาสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างเต็มที่อีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงนำเอาวิธีการออกแบบการทดลองมาใช้ โดยอาศัยหลักสถิติต่างๆ มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน เพื่อทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยและระดับต่างๆ ที่มีผลทำให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิต โดยนำเอาโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดเวลาได้มากขึ้น

ความเป็นมาและปัญหาของโรงงานตัวอย่าง

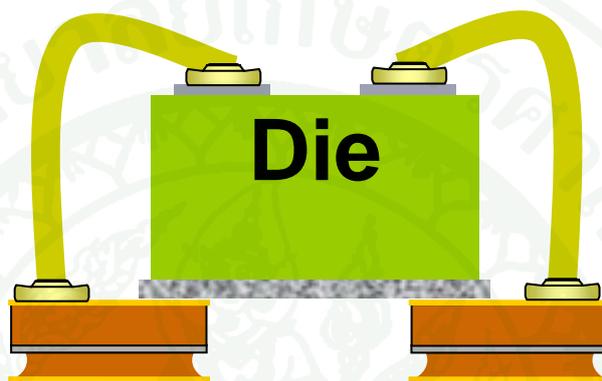
โรงงานตัวอย่างเป็นหนึ่งในผู้ผลิตเซมิคอนดักเตอร์ ทำการประกอบและทดสอบแผงวงจรรวม (IC: Integrated Circuit) ซึ่งแบ่งออกเป็นผลิตภัณฑ์เซมิคอนดักเตอร์หลากหลายชนิดที่มีลักษณะและการใช้งานที่แตกต่างกันไป โดยในส่วนของงานวิจัยที่ทำการศึกษานั้นจะอยู่ในแผนก LPD ซึ่งทำการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ แยกเป็นชนิดใหญ่ๆ ได้ 4 ชนิดคือ 1) UTLP 2) QFN 3) DIP และ 4) SIL



ภาพที่ 1 ผลิตภัณฑ์เซมิคอนดักเตอร์ที่โรงงานตัวอย่างผลิตทั้งหมด

จากการศึกษากระบวนการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ พบว่าผลิตภัณฑ์ UTLP มีการเชื่อมวงจรที่แตกต่างผลิตภัณฑ์อีกสามตัวที่เหลือ คือ มีการเชื่อมวงจรแบบ Reverse Bond จะมีลูกบอลสองลูกในการเชื่อมวงจร ลูกบอลลูกที่หนึ่งติดอยู่บน PAD Aluminum ซึ่งติดอยู่กับหน้า Die ส่วนลูกที่สองติดอยู่บน Lead Frame ดังภาพที่ 2 โดยเมื่อสร้างลูกบอลลูกที่หนึ่งเสร็จจะตัดลวดให้ขาดก่อน แล้วจึงสร้างลูกบอลลูกที่สองจากนั้นโยงเส้นลวดย้อนกลับไปเชื่อมกับลูกบอลลูกที่หนึ่ง ในขณะที่

ผลิตภัณฑ์ตัวอื่นมีการเชื่อมวงจรแบบ Forward Bond ซึ่งมีลูกบอลลูกเดียวอยู่บน Pad Aluminum เมื่อสร้างลูกบอลเสร็จก็จะโยงเส้นลวดไปเชื่อมกับ Lead Frame เลย และยิ่งพบอีกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีของเสียมากที่สุด คือ ผลิตภัณฑ์ UTLP ซึ่งมีของเสียมากที่สุดถึง 4,000 ppm ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ตัวอื่นๆ มีของเสียแค่เพียง 300 ppm เท่านั้น เพราะฉะนั้นงานวิจัยฉบับนี้จะขอก้าวถึงเฉพาะผลิตภัณฑ์ UTLP เท่านั้น



ภาพที่ 2 ลักษณะการเชื่อมวงจรของผลิตภัณฑ์ UTLP

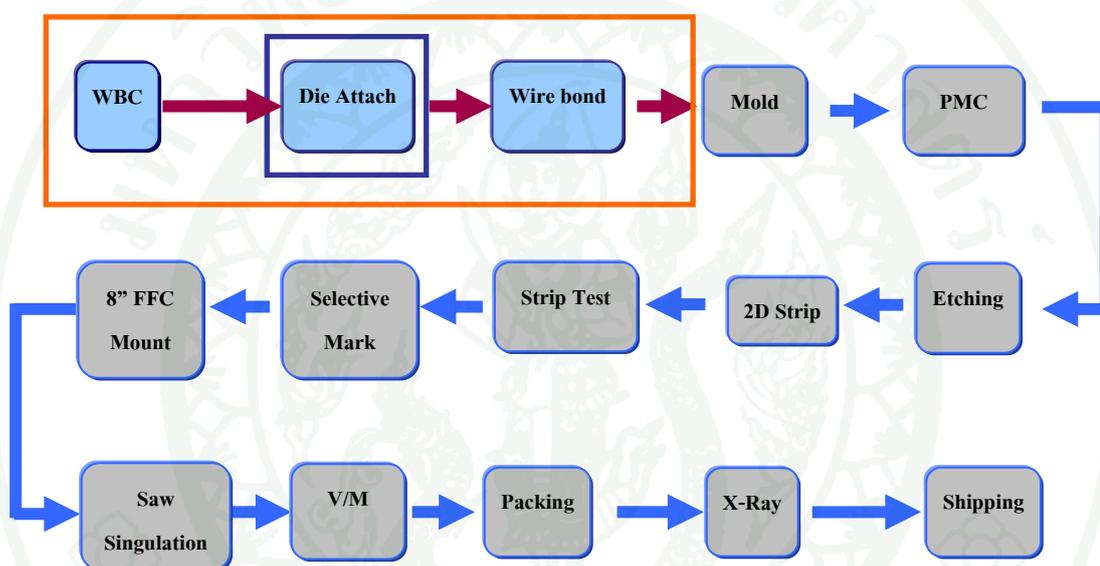
กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ UTLP

การผลิตผลิตภัณฑ์ UTLP มีขั้นตอนในการผลิตดังนี้

1. การติดกาวที่หลังผ่านเวเฟอร์ (WBC: Wafer Back Close)
2. การติด Die (Die Attach)
3. การเชื่อมลวดทอง (Wire Bond)
4. การหุ้มตัวงานด้วยพลาสติกเพื่อทำการปิดหน้าวงจร (Mold)
5. การอบเพื่อให้พลาสติกแข็งตัว (PMC: Post Mold Cure)
6. การติดเวเฟอร์บนแผ่นพลาสติกเพื่อนำไปตัดตัวงาน (8" FFC Mount)
7. การเขียนอักษรบนตัวงาน (Selective Mark)
8. การตรวจสอบคุณภาพของงาน (Strip Test)
9. การระบุตำแหน่งของตัวงานเพื่อใช้อ้างอิงในการทดสอบ (2D Strip)
10. การกัดทองแดงในส่วนที่ไม่ต้องการออก (Etching)

11. การตัดตัวงานในรูปของ Unit (Saw Singulation)
12. การตรวจงานด้วยสายตา (V/M)
13. การบรรจุผลิตภัณฑ์ (Packing)
14. การตรวจงานครั้งสุดท้ายด้วยเครื่อง X-Ray (X-Ray)
15. การส่งงานให้ลูกค้า (Shipping)

ดั่งภาพที่ 3

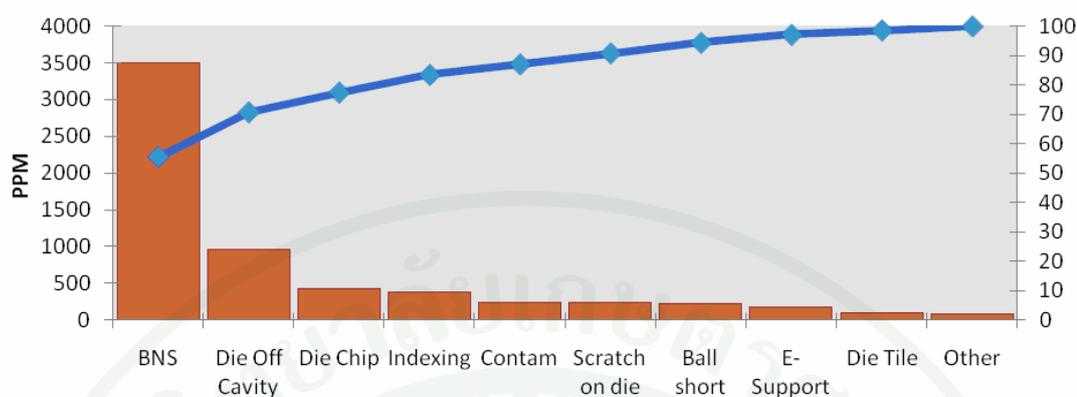


ภาพที่ 3 กระบวนการผลิต UTLP

ในทุกขั้นตอนการประกอบจะมีฝ่ายผลิตทำหน้าที่ในการผลิตตัวงานเซมิคอนดักเตอร์ และมีฝ่ายช่างดูแลเรื่องการซ่อมบำรุงเครื่องจักร นอกจากนี้ยังมีฝ่ายวิศวกรรมการผลิตทำหน้าที่ในการควบคุมการผลิต และฝ่ายประกันคุณภาพทำหน้าที่ในการตรวจสอบกระบวนการผลิตและตัวงานเซมิคอนดักเตอร์

จากการเก็บข้อมูลของลักษณะของเสียของผลิตภัณฑ์ UTLP ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง เดือน มีนาคม พ.ศ.2552 ดั่งภาพที่ 4 พบว่าลักษณะของเสียที่พบมากที่สุดคือ การเกิด BNS (Bump ball non-stick on bond pad) มีอยู่ประมาณ 3,500 ppm ซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมวงจรด้วยลวดทอง โดยจะเกิดเฉพาะลูกบอลลูกที่หนึ่ง ซึ่งติดอยู่บน PAD Aluminum เท่านั้น ส่วนอีกลูกหนึ่งที่ติดอยู่บน Lead Frame ไม่พบว่ามีเกิดการเกิด BNS หรือหลุดออกจาก Lead Frame เลย

Pareto Chart



ลักษณะของเสีย

ภาพที่ 4 ลักษณะของเสียที่พบในผลิตภัณฑ์ UTLP



ภาพที่ 5 ลักษณะการเกิด BNS ในผลิตภัณฑ์ UTLP

และปัญหาที่พบอีกอย่างหนึ่งก็คือ กระบวนการผลิตในปัจจุบันมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากไม่มีการตั้งค่า (Setting) ที่กำหนดชัดเจน การตั้งค่ากำหนดเป็นช่วง

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) มาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียในลักษณะ BNS ดังภาพที่ 5 และเลือกสภาวะค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการปฏิบัติงาน เพื่อปรับปรุงคุณภาพและลดของเสียที่เกิดจากการเชื่อมวงจร เป็นการป้องกันปัญหาของงานที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อส่งไปถึงมือลูกค้า

จากการศึกษากระบวนการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ในขั้นตอนการเชื่อมวงจรของผลิตภัณฑ์ UTLP ขนาดลวดที่ใช้ในการเชื่อมวงจรเป็น $20\ \mu\text{m}$. (0.8 mil) พบว่าการตรวจสอบคุณภาพของการเชื่อมวงจรโดยวิธีการทดสอบ Bond Shear Strength นั้น ค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบคือ ค่าแรงที่ใช้ในการเลื่อนลูกบอล และนอกจากนี้ยังมีตัวเลข (Code) ที่ได้จากฝ่ายประกันคุณภาพซึ่งทำการสังเกตลักษณะของฐานด้านล่างที่รองรับลูกบอลหลังจากที่ลูกบอลถูกเลื่อนออกไปแล้ว หรือเรียกว่า การตรวจสอบการประสานของลวดทองและโลหะที่ฐาน (Intermetallic) และได้ทำการป้อนค่าตัวเลข (Code) ลงไปในเครื่องทดสอบ ซึ่งแบ่งได้เป็น 5 ลักษณะ คือ

1. Bond Lift (Code 1) ลูกบอลถูกเลื่อนด้านล่างใกล้กับฐาน แต่ไม่มีเนื้อทองติดอยู่ที่ฐาน ซึ่งเป็นลักษณะที่พบบ่อยที่สุด ลักษณะนี้ถือว่าเป็นลักษณะที่ปกติ ไม่มีผลต่อคุณภาพของการเชื่อมวงจร

2. Bond Shear Strength (Code 2) ลูกบอลถูกเลื่อนด้านล่างใกล้กับฐาน แต่เมื่อเลื่อนแล้วมีเนื้อทองติดอยู่ที่ฐาน ซึ่งเป็นลักษณะที่ถือว่าดีที่สุด เนื่องจากลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเชื่อมวงจรมีประสิทธิภาพ และโอกาสที่วงจรเปิดจะมีน้อย เพราะลูกบอลที่สร้างได้ติดแน่นอยู่กับฐาน

3. Pad Lift (Code 3) เมื่อเลื่อนลูกบอลแล้วที่ฐานมีรอยกลม ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะที่ไม่ดี เนื่องจากแสดงให้เห็นว่าการสร้างลูกบอลในกระบวนการเชื่อมวงจรมัน ก่อให้เกิดความเสียหายต่อฐานด้านล่าง อาจเป็นผลให้การตรวจสอบวงจรในขั้นสุดท้ายไม่ผ่านและเกิดความเสียหายในขณะที่ถูกใช้งานได้

4. Cratering (Code 4) เมื่อเลื่อนลูกบอลแล้วที่ฐานกระเทาะแตกได้ง่าย ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ดี เนื่องจากแสดงให้เห็นว่าการสร้างลูกบอลในกระบวนการเชื่อมวงจรมัน ก่อให้เกิดความเสียหายต่อฐานด้านล่างเป็นอย่างมาก ลักษณะนี้อาจส่งผลให้วงจรเปิดและก่อให้เกิดความเสียหายเมื่อสินค้าถูกส่งไปถึงมือลูกค้า

5. Wire Shear Strength (Code 5) ลูกบอลถูกเลื่อนที่ส่วนบนเท่านั้น ถือว่าเป็นลักษณะที่ปกติ ลักษณะนี้อาจเกิดขึ้นจากการที่ผู้ตรวจสอบเลื่อนเข็มที่ใช้ในการเลื่อนลูกบอลสูงเกินไป ทำให้เลื่อนได้แค่ส่วนบนของลูกบอล วิธีการแก้ไขคือทำการเลื่อนใหม่อีกครั้งให้ใกล้กับฐานด้านล่างมากที่สุด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อลดของเสียในผลิตภัณฑ์ UTLP
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงเดือนของลูกบอล ในกระบวนการเชื่อมวงจร
3. เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้การเกิดของเสียในลักษณะ BNS มีค่าน้อยกว่า 1,000 ppm

ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาผลิตภัณฑ์ UTLP
2. ศึกษาของเสียลักษณะ BNS
3. ขนาดลวดในการเชื่อมวงจรเป็น 20 μm . (0.8 mil)
4. ศึกษากระบวนการเชื่อมวงจร ซึ่งเป็นการเชื่อมวงจรด้วยลวดทอง 99.99% และวิธีการทดสอบ Bond Shear Strength ซึ่งเป็นการทดสอบวงจรวิธีหนึ่ง ทำโดยการเชื่อมลูกบอล

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงสาเหตุที่เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความบกพร่องขณะทำการเชื่อมวงจร
2. ทราบเงื่อนไขและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในขั้นตอนการเชื่อมวงจร
3. ลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่บกพร่องหลังจากการผลิต
4. กระบวนการเชื่อมวงจรมีประสิทธิภาพมากขึ้น
5. เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตอื่นๆ

การตรวจเอกสาร

1. เซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor)

เซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) หรือสารกึ่งตัวนำ หมายถึง สารชนิดหนึ่งที่เป็นสื่อนำที่ไม่ดี เป็นฉนวนก็ไม่ดี แต่ก็เป็นตัวนำและฉนวนกั้นกระแสไฟฟ้าในตัว สารกึ่งตัวนำนี้ใช้ทำทรานซิสเตอร์หรือวงจรรวม ซึ่งธาตุที่รู้จักกันดีในการนำมาทำเป็นสารกึ่งตัวนำในปัจจุบันคือซิลิคอน (Silicon: Si) และเจอร์มาเนียม (Germanium: Ge)

เมื่อวิทยาการไฟฟ้าได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในสมัยแรกๆ วัสดุไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ มักได้แก่ตัวนำไฟฟ้า เช่น โลหะชนิดต่างๆ และฉนวนไฟฟ้า เช่น ยาง ลูกถ้วยเซรามิก เมื่อมีการพัฒนาหลอดสุญญากาศขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถขยายสัญญาณไฟฟ้า กำเนิดความถี่ ฯลฯ วัสดุไฟฟ้ายังคงเป็นพวกตัวนำและฉนวนอยู่เช่นเดิม สารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน มีการค้นพบมานานพร้อมกับวัสดุชนิดอื่นๆ แต่มิได้นำมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง จนกระทั่งปี พ.ศ. 2490 ซึ่งมีการคิดค้นทรานซิสเตอร์ได้สำเร็จเป็นครั้งแรก สารกึ่งตัวนำจึงได้รับความสนใจ และมีบทบาทในการพัฒนาวิทยาการด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างมาก เพราะสามารถทำงานทดแทนหลอดสุญญากาศได้เกือบทั้งหมด ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา กินไฟน้อย และมีราคาถูก

ปัจจุบันจะพบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอยู่ในอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิดที่ใช้งานกันในชีวิตประจำวัน เช่น วิทยุ โทรทัศน์ โทรศัพท์ เครื่องซักผ้า เต้าไมโครเวฟ รถยนต์ เครื่องคอมพิวเตอร์ ฯลฯ ดังนั้น สารกึ่งตัวนำจึงกลายเป็นวัสดุไฟฟ้าที่มีความสำคัญต่อการใช้ชีวิตในโลกยุคปัจจุบันและต่อไปในอนาคต สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากตัวนำและฉนวน คือการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิ แสงที่ตกกระทบ ปริมาณสารเจือปน และปริมาณของจุดบกพร่องในเนื้อสารจึงทำให้สารกึ่งตัวนำมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก

อะตอมของสารกึ่งตัวนำในรูปผลึกจะเรียงตัวกันเป็นระเบียบ ในกรณีที่ไม่มีสารเจือปน เมื่ออุณหภูมิต่ำๆ จะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรนอกสุดของแต่ละอะตอม จะทำหน้าที่เป็นแขนเชื่อมระหว่างอะตอม ซึ่งความร้อนหรือแสงสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนที่ทำ

หน้าที่เป็นแขนเชื่อมเหล่านี้หลุดออกมาเป็นอิเล็กทรอนิกส์อิสระได้ จึงเป็นอิเล็กทรอนิกส์ที่เคลื่อนที่ได้ ทำให้สารกึ่งตัวนำเริ่มนำไฟฟ้าได้

2. ไอซี (Integrated Circuit)

วงจรรวม หรือ วงจรเบ็ดเสร็จ (อังกฤษ: integrated circuit; IC) หมายถึง วงจรที่นำเอา ไดโอด, ทรานซิสเตอร์, ตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ และองค์ประกอบวงจรต่าง ๆ มาประกอบรวมกัน บนแผ่นวงจรมินิเจอร์ ในปัจจุบันแผ่นวงจรมินิเจอร์นี้ทำด้วยแผ่นซิลิคอน บางทีอาจเรียก ชิพ (Chip) และสร้างองค์ประกอบวงจรต่าง ๆ ฝังอยู่บนแผ่นผลึกนี้ ส่วนใหญ่เป็นชนิดที่เรียกว่า Monolithic การสร้างองค์ประกอบวงจรมินิเจอร์นี้จะใช้กรรมวิธีทางด้านการถ่ายภาพอย่างละเอียดผสมกับ ขบวนการทางเคมีทำให้หลายวงจรมีความละเอียดสูงมาก สามารถบรรจุองค์ประกอบวงจรได้จำนวนมาก ภายในไอซี จะมีส่วนของลอจิกมากมาย ความหนาแน่นขององค์ประกอบวงจรที่บรรจุลงใน IC นี้มีตั้งแต่หลายสิบตัวซึ่งเรียกว่า SSI (Small Scale Integrated) จนกระทั่งถึงหลายสิบล้านตัว ซึ่งเรียกว่า ULSI (Ultra Large Scale Integrated) ภายในไอซีจะมีส่วนของลอจิกมากมาย ในบรรดา วงจรเบ็ดเสร็จที่ซับซ้อนสูง เช่น ไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งใช้ทำงานควบคุมคอมพิวเตอร์จนถึง โทรศัพท์มือถือ แม้กระทั่งเตาอบไมโครเวฟแบบดิจิทัล สำหรับชิพหน่วยความจำ (RAM) เป็นอีกประเภทหนึ่งของวงจรมินิเจอร์ที่มีความสำคัญมากในยุคปัจจุบัน

ไอซีกำเนิดขึ้น โดย Geoffrey W.A. Dummer นักวิทยาศาสตร์เรดาร์จากอังกฤษต่อมาได้ย้ายไปทำการค้นคว้าต่อที่สหรัฐอเมริกา โดยสามารถสร้างไอซีจากเซรามิกส์ตัวแรกได้ในปี ค.ศ. 1956 แต่ยังไม่ประสบความสำเร็จนัก ต่อมาในปี ค.ศ. 1957 กองทัพอากาศสหรัฐอเมริกานำโดย Jack Kilby ได้ทำการค้นคว้าทดลองต่อในวันที่ 6 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 1959 Kilby ได้จดสิทธิบัตรไอซีที่ทำจากเจอร์มาเนียม และในพัฒนาการสุดท้ายของไอซี Robert Noyce ได้จดสิทธิบัตรไอซีที่ทำจากซิลิคอน ในวันที่ 25 เมษายน ค.ศ. 1961

ข้อดีของ IC คือ ไอซีจะรวมวงจรที่ซับซ้อนเข้ามาเป็นวงจรเดียวกันทำให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะทำให้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กและเบาลงมาก วงจรในเครื่องจะถูกแบ่งเป็นบล็อกที่มีหน้าที่หลักเฉพาะวงจรในแต่ละบล็อกจะถูกทำเป็น IC ทำให้การประกอบวงจรทั้งหมดทำได้ง่าย โดยเพียงต่อบล็อกหรือ IC เหล่านี้เข้าด้วยกันเท่านั้น จึงทำให้การต่อสายน้อยลง จุดบัดกรีน้อยลง และจุดเสียที่จะเกิดขึ้นน้อยลงด้วย การผลิต IC ชนิด Monolithic ซึ่งสร้างองค์ประกอบวงจรทั้งหมด

ลงบนแผ่นผลึกแผ่นเดียวก็สามารถทำได้พร้อมกันหลายร้อยหลายพันตัวบนแผ่นผลึกเวเฟอร์ (Wafer) แผ่นเดียว โดยการสร้างแบบ IC ที่เหมือน ๆ กันลงบนแผ่นเวเฟอร์ทีเดียว แล้วจึงตัดแบ่งเป็น IC แต่ละตัวในภายหลัง ทำให้สามารถผลิต IC ได้เป็นจำนวนมากในเวลาเดียวกันและราคาของ IC ก็จะถูกลงมาก IC อาจจะยังไม่สามารถรวมเอาองค์ประกอบวงจรทุกชนิดเข้ามาในตัวมันได้หมด วงจรที่มีองค์ประกอบของวงจรมิติใหญ่ เช่น คอยล์ หรือ ทรานซิสเตอร์ตัวใหญ่ที่ใช้ในการขับเคลื่อนขนาดใหญ่ก็ยังคงต้องนำมาต่อที่ด้านนอกของ IC อีกครั้งเพื่อให้วงจรทั้งหมดทำงาน

IC แต่ละตัวจะมีพื้นที่ในการสร้างวงจรประมาณ 20-200 ตารางมิลลิเมตร บน IC นี้จะรวมเอาไดโอด ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ บีบรวมกันบนพื้นที่ขนาดเล็ก ๆ นี้จำนวนองค์ประกอบของวงจรจะเพิ่มขึ้นตามการพัฒนาของเทคโนโลยี ถ้าวงจรมีจำนวนตั้งแต่ 1,000 ถึง 100,000 ตัว ก็เป็น LSI ถ้าจำนวนตั้งแต่ 100,000 ถึง 10,000,000 ตัวก็เป็น VLSI ซึ่งเป็นหน่วยความจำที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ ถ้าจำนวนมากกว่า 10 ล้านตัวก็เป็น ULSI

IC หน่วยความจำชนิด D-RAM ขนาด 16 M bit จะมีจำนวนองค์ประกอบ ของวงจรประมาณ 3.5 ล้านตัว และชนิด D-RAM ขนาด 64 M bit ซึ่งมีความหนาแน่นที่สุดในปัจจุบัน จะมีจำนวนองค์ประกอบประมาณ 140 ล้านตัว

สำหรับโทรศัพท์มือถือ IC ที่ประกอบในโทรศัพท์มือถือเราเรียกว่า BGA/CSP หรือ BGA Ball Grid Array/Chip Scale Packaging (BGA/CSP) หรือที่เรียกกันง่ายๆ ว่า IC บอล เวลาทำขาใหม่ เราจะเรียกกันว่า การบอลขา ซึ่งลักษณะของ IC จะมีขาอยู่ด้านล่างของตัว IC มีลักษณะของขาคลาย ลูกฟุตบอลครึ่งลูก เวลาถอดออกจากแผงวงจรต้องใช้ลมร้อนเป่าออกไม่สามารถใช้หัวแร้งถอดออกได้เพราะขา IC จะอยู่ด้านล่าง

3. ฟังแสดงเหตุและผล

3.1 แนวความคิดของฟังแสดงเหตุและผล

ความหมายของฟังแสดงเหตุและผล ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น คือฟังแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางคุณภาพกับปัจจัยต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง

จากแนวความคิดเกี่ยวกับกระบวนการของ ชิ่วฮาร์ท (Shewhart) ที่ว่า กระบวนการสามารถแยกเป็นสาเหตุหลักๆ ได้ 4 ประการ กล่าวคือ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วิธีการ (Method) และวัตถุดิบ (Material) นั้น ศาสตราจารย์คาโอรุ อิชิกาวา (Kaoru Ishikawa) ได้นำแนวความคิดของชิ่วฮาร์ทมาพัฒนาโดยการสร้างเป็นผังแสดงสาเหตุของปัญหา ซึ่งมีลักษณะคล้ายก้างปลาหรือที่เรียกว่า ผังก้างปลา โดยผังนี้มีส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนโครงกระดูกของปลาที่รวบรวมปัจจัยที่เป็นสาเหตุของปัญหา และส่วนหัวปลาที่เป็นข้อสรุปสาเหตุที่กลายเป็นปัญหา

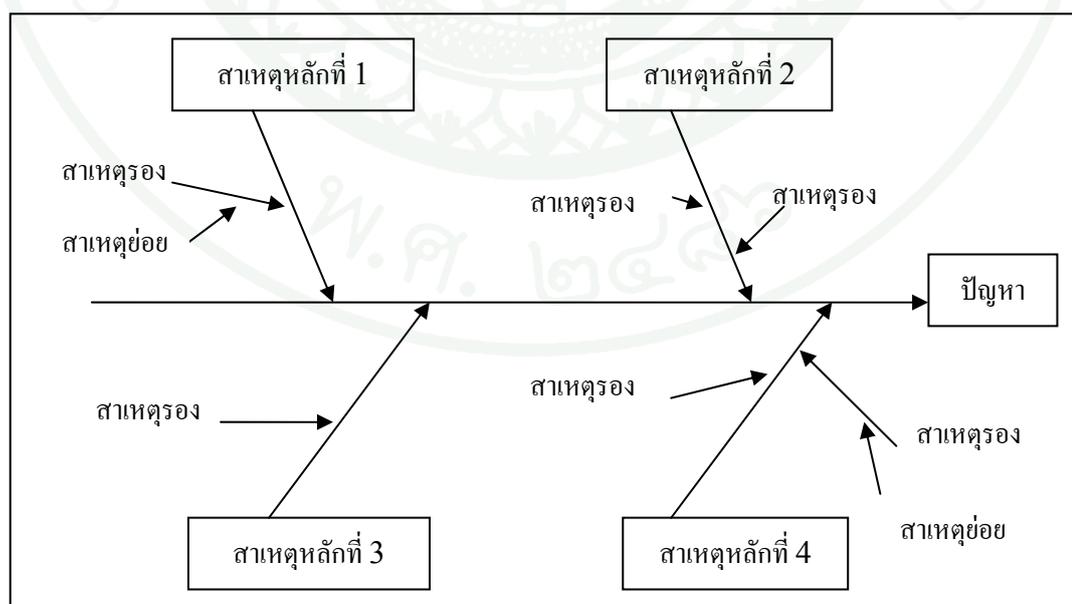
3.2 วิธีการสร้างผังแสดงเหตุและผล

3.2.1 ทำการเลือกปัญหาที่เราให้ความสนใจ และต้องการทราบที่มาของปัญหานั้น โดยทำการระบุในส่วนของหัวปลา ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ระบุปัญหา

3.2.2 ระบุสาเหตุหลักของปัญหา

3.2.3 ระบุสาเหตุรอง ซึ่งเป็นดังรายละเอียดปลีกย่อยของสาเหตุหลัก

3.2.4 ระบุสาเหตุย่อย



ภาพที่ 6 ผังแสดงเหตุและผล

4. ทฤษฎีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ

การออกแบบการทดลองเป็นสาขาหนึ่งของสถิติ เป็นกระบวนการในการวางแผนการทดลอง เกี่ยวข้องกับการจัดการเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อเท็จจริงหรือข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำได้หาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้

4.1 การออกแบบการทดลอง (Experimental Design)

การออกแบบการทดลอง คือ การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการทดลองที่จะทำให้สามารถตีความหมายถึงสาเหตุและผลที่ต้องตัดสินใจได้ โดยพิจารณาความแตกต่างของข้อมูลจากสาเหตุที่สามารถควบคุมได้ ซึ่งจุดประสงค์ของการทดลอง คือ การยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) และการค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) การทดลองสามารถทำได้ด้วยวิธีการทดลองปฏิบัติงานจริง (Physical Experiment) หรือการทดลองด้วยการจำลองผล (Simulation)

4.1.1 หลักการเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นระเบียบวิธีที่จำลองสภาพความเป็นจริงให้มาอยู่ในสภาพที่เราควบคุมปัจจัยต่างๆ ได้ และสามารถตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยเหล่านั้นได้ด้วยระเบียบวิธีทางสถิติที่เหมาะสม สาเหตุที่ต้องมีการออกแบบการทดลองก็คือ ต้องการแยกอิทธิพลที่เกิดขึ้นต่อสิ่งที่ต้องการวัด ตัวอย่างเช่น การใส่ปุ๋ย 2 ชนิด ก และ ข ทดลองกับต้นข้าวที่มีอายุ 3 กับ 15 วัน ถ้าเราไม่จำแนกต้นข้าวตามอายุก่อนที่จะให้ปุ๋ยทั้ง 2 ชนิดแล้ว เราก็จะไม่สามารถทราบได้เลยว่าผลที่ได้ เช่น ความสูงของต้นข้าว เกิดจากปุ๋ย หรืออายุของต้นข้าว

4.1.2 ขั้นตอนโดยทั่วไปของการออกแบบการทดลอง โดยการออกแบบการทดลองที่ได้ เรียกว่า แผนแบบการทดลอง แบ่งออกได้ดังนี้

1) กำหนดวัตถุประสงค์ของการทดลอง เป็นการรับรู้และนิยามปัญหาที่สนใจ โดยผู้ทดลองกำหนดถึงสิ่งที่อยากทราบและกำหนดว่าต้องการอะไร และต้องการทำการศึกษาสິงที่เกี่ยวข้องอย่างรอบคอบ

2) กำหนดปัจจัยที่ต้องการศึกษาอิทธิพล อาจเป็นปัจจัยเดียว, 2 ปัจจัย หรือ 3 ปัจจัย ฯลฯ

3) กำหนดตัวแปรหรือลักษณะที่ต้องการวัดผลที่ได้จากการทดลอง เป็นการกำหนดตัวแปรตอบสนอง โดยต้องพิจารณาถึงความสามารถในการวัดได้ และความถูกต้องแม่นยำ

4) กำหนดกระบวนการที่ใช้ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา เป็นการเลือกรูปแบบการทดลองที่เหมาะสม โดยต้องให้ความสนใจถึงความมีประสิทธิภาพทางสถิติและความมีประสิทธิภาพทางเศรษฐศาสตร์

5) ดำเนินการทดลอง โดยต้องให้ความสนใจถึงการสุ่ม ความถูกต้องในการวัด และความสม่ำเสมอในการทดลอง

6) ทำการวิเคราะห์ข้อมูล โดยทฤษฎีการอนุมานทางสถิติ

7) ทำการสรุปผลและให้ข้อเสนอแนะ

4.1.3 ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลอง

1) ทริทเมนต์ (Treatments) หรือปัจจัย (Factor) เป็นวิธีการต่างๆ ซึ่งกระทำต่อหน่วยทดลองหรือเกิดขึ้นกับหน่วยทดลอง เพื่อวัดผลเปรียบเทียบตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ตัวอย่างเช่น การทดลองทางการเกษตร ทริทเมนต์อาจแบ่งออกเป็น ชนิดของปุ๋ย พันธุ์พืช และอาหารสูตรต่างๆ เป็นต้น

2) หน่วยทดลอง (Experimental Unit) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของวัสดุทดลองที่ได้รับทริทเมนต์ใดๆ ในครั้งหนึ่งๆ หน่วยทดลองอาจเป็นหน่วยเดียว เช่น ต้นพืช 1 ต้นที่ปลูกในกระถาง หรือหน่วยกลุ่มซึ่งการทดลองด้านพืช เรียกว่า แปลงย่อย (Plot) หน่วยทดลองแต่ละหน่วยจะให้ค่าสังเกตเพียง 1 ค่า

3) ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง (Experimental Error) เป็นความแตกต่างระหว่างหน่วยทดลองที่ได้รับทริทเมนต์เดียวกัน หรือความผันแปรของหน่วยทดลองที่ได้รับทริทเมนต์เดียวกัน ซึ่งความผันแปรนั้นมีอยู่ในหน่วยทดลองหรือเกิดขึ้นขณะทดลอง

4) การสุ่ม (Randomization) เป็นการจับทริทเมนต์ให้กับหน่วยทดลองโดยวิธีสุ่ม ซึ่งเป็นการทำให้หน่วยการทดลองมีโอกาสได้รับทริทเมนต์ใดทริทเมนต์หนึ่งเท่าๆ กัน แผนแบบการทดลองที่ต่างกันจะมีวิธีการสุ่มที่แตกต่างกัน

5) การทำซ้ำ (Replication) คือ การที่ทริทเมนต์หนึ่งๆ ปรากฏในหน่วยทดลองมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงและความแน่นอนของการทดลอง ทำให้สามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้ และทำให้สรุปผลการทดลองได้กว้างขึ้น

6) การบล็อก (Blocking) เป็นการจับกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วง เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดอิทธิพลแทรกซ้อนออกไป เป็นการสร้างข้อมูลให้มีความแม่นยำมากขึ้น

7) ความเป็นเอกรูปของหน่วยทดลอง (Uniformly) กล่าวคือ ในการเลือกสิ่งทดลอง ผู้ทำการทดลองจะพยายามหาหน่วยทดลองที่มีความเป็นเอกรูปมากที่สุด เพื่อขจัดปัจจัยอื่นที่จะมีอิทธิพลต่อผลที่วัดหรือค่าสังเกต (Observation) นอกจากทริทเมนต์ และเพื่อให้ผลตอบสนองของแต่ละหน่วยทดลองต่อทริทเมนต์เดียวกันเหมือนกัน การเลือกสิ่งทดลองที่มีความเป็นเอกรูปคือเลือกหน่วยทดลองที่มีปัจจัยต่างๆ ซึ่งมีอิทธิพลต่อค่าสังเกตที่ศึกษาเหมือนกัน

8) ตัวแปรสุ่ม (Random Variable) คือ ตัวแปรหรือลักษณะที่ใช้ศึกษาผลที่ได้จากการทดลอง

9) ค่าสังเกต (Observed Value) คือ ค่าของตัวแปรหรือของลักษณะที่ศึกษา ที่วัดได้จากการทดลอง

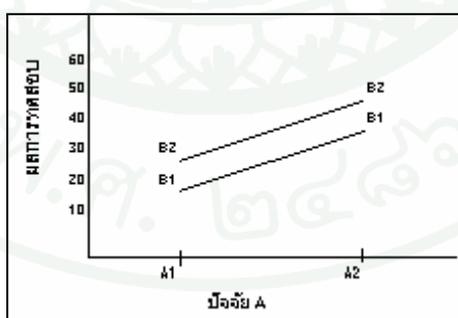
การทดลอง (Experiment) เป็นการจำลองสภาพความเป็นจริงให้มาอยู่ในสภาพที่เราสามารถควบคุมได้ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อเท็จจริงอันเป็นผลจากการปฏิบัติในการศึกษาทดลอง โดยที่การทดลองจะแบ่งเป็นการทดลองเบื้องต้นคือ การทดลองเพื่อให้ทราบผลอย่างกว้างๆ ซึ่งผลการ

ทดลองที่ได้จะนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป และการทดลองขั้นต้นตัดสินใจจะเป็นขั้นตอนการนำสิ่ง ที่คัดเลือกได้จากการทดลองเบื้องต้นมาทำการทดลองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบหรือหาสิ่ง ที่ดีที่สุดในกลุ่ม โดยจะมีการใช้แผนการทดลองแบบต่างๆ

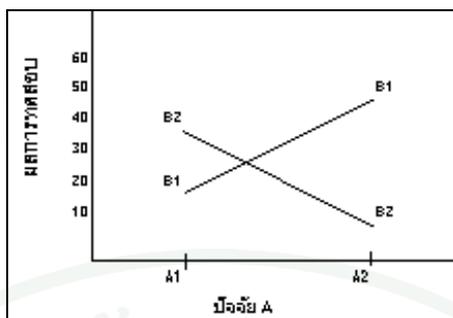
5. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Designs)

เป็นการทดลองที่มีลักษณะเฉพาะคือ ทริทเมนต์ประกอบด้วย การรวมกันของระดับของ ปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ขึ้นไป เรียกว่า ทริทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment Combination) ใช้กับการ ทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ซึ่งเป็นการทดลองที่มีหลายปัจจัย (Multiple Factor Experiment) กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 Replicate จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเนื่องจากมีปัจจัย (Factor) มากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพล ของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้ด้วย

อิทธิพลของปัจจัยร่วม คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้ อิทธิพล (Effect) ของปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วมหรือ ปฏิสัมพันธ์ แสดงดังรูป ซึ่งเมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพที่ 7 และเมื่อมีอิทธิพลของ ปัจจัยร่วมแสดงดังภาพที่ 8 โดย A และ B คือปัจจัย 2 ปัจจัย



ภาพที่ 7 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล



ภาพที่ 8 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล

แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลทั่วไปมีรูปแบบต่างๆ ไป คือ $A \times B \times C \times \dots$ แฟคทอเรียล เช่น $3 \times 2 \times 2$ แฟคทอเรียล รูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่สำคัญ ได้แก่

แผนการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับเท่านั้น ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย เช่น 2^2 แฟคทอเรียล

แผนการทดลองแบบ 3^k แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 3 ระดับใน k ปัจจัย เช่น 3^2 แฟคทอเรียล 3^3 แฟคทอเรียล

เนื่องจากการออกแบบ 2^k แฟคทอเรียล เหมาะสมกับรูปแบบที่มีความเป็นเส้นตรง จึงจะมีความถูกต้องในการตีความข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นหากว่าอิทธิพลของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองมีความเป็นเส้นตรงไม่ดีแล้วจะหันมาใช้แบบ 3^k แฟคทอเรียล แทนจะเหมาะสมกว่า

ตัวอย่างการทดลองแฟคทอเรียลของปัจจัย 3 ปัจจัย A B และ C โดยให้

$i = 1, 2, \dots, a$ คือ ระดับของปัจจัย A

$j = 1, 2, \dots, b$ คือ ระดับของปัจจัย B

$k = 1, 2, \dots, c$ คือ ระดับของปัจจัย C

$l = 1, 2, \dots, n$ คือ จำนวนซ้ำ

สมการตัวแบบของแหล่งความผันแปรต่อตัวแปรตอบสนอง คือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \dots\dots\dots (1)$$

- โดยที่ y คือ ค่าตัวแปรตอบสนองของการทดลอง
 μ คือ ค่าเฉลี่ย
 τ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย A
 β คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย B
 γ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย C
 $\tau\beta$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ τ กับ β
 $\tau\gamma$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ τ กับ γ
 $\beta\gamma$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ β กับ γ
 $\tau\beta\gamma$ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของ τ กับ β กับ γ

5.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ

5.1.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งระดับเหล่านี้จะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักรหรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับ ที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับสูงหรือต่ำของปัจจัยเหล่านั้น ใน 1 เพลทเคด ที่ บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล

5.1.2 แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบด้วยผลหลัก k ชนิด, $\binom{k}{2}$ อันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย, $\binom{k}{3}$ อันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย, ..., และ 1 อันตรกิริยาของ k ปัจจัย ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบ 2^k มีดังนี้

- 1) Estimate Factor Effects
- 2) Form Initial Model
- 3) Perform Statistical Testing
- 4) Refine Model

5) Analyze Residual

6) Interpret Results

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ ดังนั้น การออกแบบการทดลองชนิดนี้จะทำให้สามารถรองรับปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียล (Analysis of Variance for 2^k factorial)

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)
K Main Effects		
A	SS_A	1
B	SS_B	1
⋮	⋮	⋮
K	SS_K	1
Two-Factor Interactions		
AB	SS_{AB}	1
AC	SS_{AC}	1
⋮	⋮	⋮
JK	SS_{JK}	1
Three-Factor Interactions		
ABC	SS_{ABC}	1
ABD	SS_{ABD}	1
⋮	⋮	⋮
IJK	SS_{IJK}	1

ตารางที่ 1 (ต่อ)

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)
K-Factor Interactions		
ABC...K	$SS_{ABC...K}$	1
Error	SSE	$2^k(n-1)$
Total	SST	2^k-1

5.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ

ปารเมศ (2545) ได้ให้ความหมายของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^k ไว้ว่า การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^k หมายถึง การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ กำหนดให้สัญลักษณ์ของปัจจัยและอันตรกิริยาแทนด้วยตัวอักษรตัวใหญ่ และระดับทั้งสามของปัจจัยมีค่าเป็น ต่ำ ปานกลาง และสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามอาจจะเป็นตัวเลข 0 (ต่ำ), 1 (ปานกลาง), 2 (สูง) การทดลองร่วมปัจจัยในการออกแบบ 3^k จะแทนด้วยตัวเลข k ตัว โดยที่ตัวเลขตัวแรกแทนระดับของปัจจัย A, ตัวเลขตัวที่สองแทนระดับของปัจจัย B, ..., และตัวเลขตัวที่ k แทนระดับของปัจจัย k ตัวอย่างเช่น ในการออกแบบ 3^2 ตัวเลข 00 หมายถึง การทดลองร่วมปัจจัย ซึ่ง ทั้ง A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ, 01 หมายถึง การทดลองร่วมปัจจัย ที่ A อยู่ที่ระดับต่ำ และ B อยู่ที่ระดับปานกลาง

ในการออกแบบ 3^k เมื่อปัจจัยมีลักษณะเป็นเชิงปริมาณ เราจะแทนระดับต่ำ, ปานกลาง และสูงด้วย -1, 0 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งการใช้สัญลักษณ์เช่นนี้จะทำให้ง่ายในการสร้างแบบจำลอง การถดถอยของผลที่เกิดจากแต่ละระดับของปัจจัย ตัวอย่าง เช่น การออกแบบ 3^2 ให้ X_1 แทนปัจจัย A และ X_2 แทนปัจจัย B แบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่าง y กับ X_1 และ X_2 สามารถแสดงได้โดย

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{11}x_1 + \beta_{22}x_2 + \varepsilon \dots\dots\dots (2)$$

สังเกตว่าจะมีระดับที่ 3 ของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลองซึ่งทำให้เราสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและปัจจัยที่สนใจในลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติก (Quadratic)

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 3^k แฟกทอเรียล (Analysis of Variance for 3^k factorial)

แหล่งความผันแปร	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)
K Main Effects		
A	SS_A	2
B	SS_B	2
⋮	⋮	⋮
K	SS_K	2
Two-Factor Interactions		
AB	SS_{AB}	4
AC	SS_{AC}	4
⋮	⋮	⋮
JK	SS_{JK}	4
Three-Factor Interactions		
ABC	SS_{ABC}	8
ABD	SS_{ABD}	8
⋮	⋮	⋮
IJK	SS_{IJK}	8
K-Factor Interactions		
ABC...K	$SS_{ABC...K}$	2^k
Error	SSE	$3^k(n-1)$
Total	SST	$n3^k-1$

รูปแบบทั่วไปของการออกแบบ 3^k

แนวความคิดของการออกแบบ 3^2 และ 3^3 สามารถขยายไปสู่กรณีของปัจจัย k ตัว แต่ละตัวประกอบด้วย 3 ระดับ นั่นคือ การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^k สัญลักษณ์แบบดิจิตัลถูกนำมาใช้แทนการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้น เช่น 0120 หมายถึง การทดลองร่วมปัจจัยในการออกแบบ 3^4 ที่มี A และ D อยู่ในระดับต่ำ B อยู่ในระดับกลาง และ C อยู่ในระดับสูง การออกแบบ 3^k นี้ จะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งสิ้น 3^k การทดลอง และมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ $3^k - 1$ จากการทดลองร่วมปัจจัยเหล่านี้ จะทำให้เกิดผลรวมของกำลังสองของผลหลัก k ตัว ที่แต่ละตัวมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ 2; อัตรากิริยาแบบ 2 ปัจจัยจำนวน C_2^k ซึ่งมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ 4; ...; และอัตรากิริยาแบบ k ปัจจัย ซึ่งมีระดับชั้นความเสรีทั้งหมดเท่ากับ $n^k - 1$ และค่าผิดพลาดของระดับชั้นความเสรีเท่ากับ $3^{k(n-1)}$

ค่าผลรวมของกำลังสองสำหรับผลหลักและอัตรากิริยา สามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีตามปกติของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล ธรรมดาแล้วอัตรากิริยาแบบสามปัจจัยและสูงกว่าจะไม่ถูกแยกอีกต่อไป อย่างไรก็ตามอัตรากิริยาแบบ h ปัจจัย จะมีส่วนประกอบแบบเชิงตั้งฉากจำนวน 2^{h-1} ตัว ซึ่งแต่ละตัวจะมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ 2 ตัวอย่างเช่น อัตรากิริยาสี่ปัจจัย ABCD จะมีส่วนประกอบแบบเชิงตั้งฉาก จำนวน $2^{4-1} = 8$ ตัว ซึ่งเขียนได้คือ $ABCD^2, ABC^2D, AB^2CD, ABCD, ABC^2D^2, AB^2C^2D, AB^2CD^2$ และ $AB^2C^2D^2$ ในการเขียนส่วนประกอบเหล่านี้ สังเกตว่าตัวเลขยกกำลังของตัวอักษรแรกมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ ถ้าตัวเลขยกกำลังนี้ไม่เท่ากับ 1 แล้ว ให้นำพจน์นี้มายกกำลังสอง และตัวเลขยกกำลังจะลดลงโดยใช้มอดุส 3 ดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$A^2BCD = (A^2BCD)^2 = A^4B^2C^2D^2 = AB^2C^2D^2 \dots\dots\dots (3)$$

อัตรากิริยาของส่วนประกอบเหล่านี้ไม่มีความหมายในทางกายภาพแต่ประการใด และจะมีประโยชน์ในการสร้างการออกแบบที่ซับซ้อน

จะเห็นได้ว่าขนาดของการออกแบบจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาดของ k ตัวอย่างเช่น การออกแบบ 3^3 จะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งสิ้น 27 ตัวต่อ 1 เพรริเคด, การออกแบบ 3^4 จะมี 81 ตัว, การออกแบบ 3^5 จะมี 243 ตัว, ..., เช่นนี้เรื่อยไป ดังนั้น บ่อยครั้งที่เราจะทำการทดลองแบบ 3^k เพียง 1 เพรริเคดเท่านั้น และนำอัตรากิริยาขั้นสูงมารวมกันเพื่อให้ได้ค่าประมาณของค่า

ความผิดพลาด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ถ้าอันตรกิริยาแบบ 3 ปัจจัย หรือมากกว่า สามารถละลายได้ ดังนั้นการออกแบบ 3^3 ที่มี 1 เรพริเคต จะให้ค่าระดับขั้นความเสริสำหรับความผิดพลาดเท่ากับ 8 และสำหรับการออกแบบ 3^4 ที่มี 1 เรพริเคต จะให้ค่าระดับขั้นความเสริสำหรับความผิดพลาดเท่ากับ 48 ซึ่งการออกแบบเช่นนี้ ยังคงใหญ่เกินไปสำหรับปัจจัย $k \geq 3$ ดังนั้น ไม่ค่อยมีประโยชน์เท่าใดนัก

6. วิธีการทาคุชิ (Taguchi's Method)

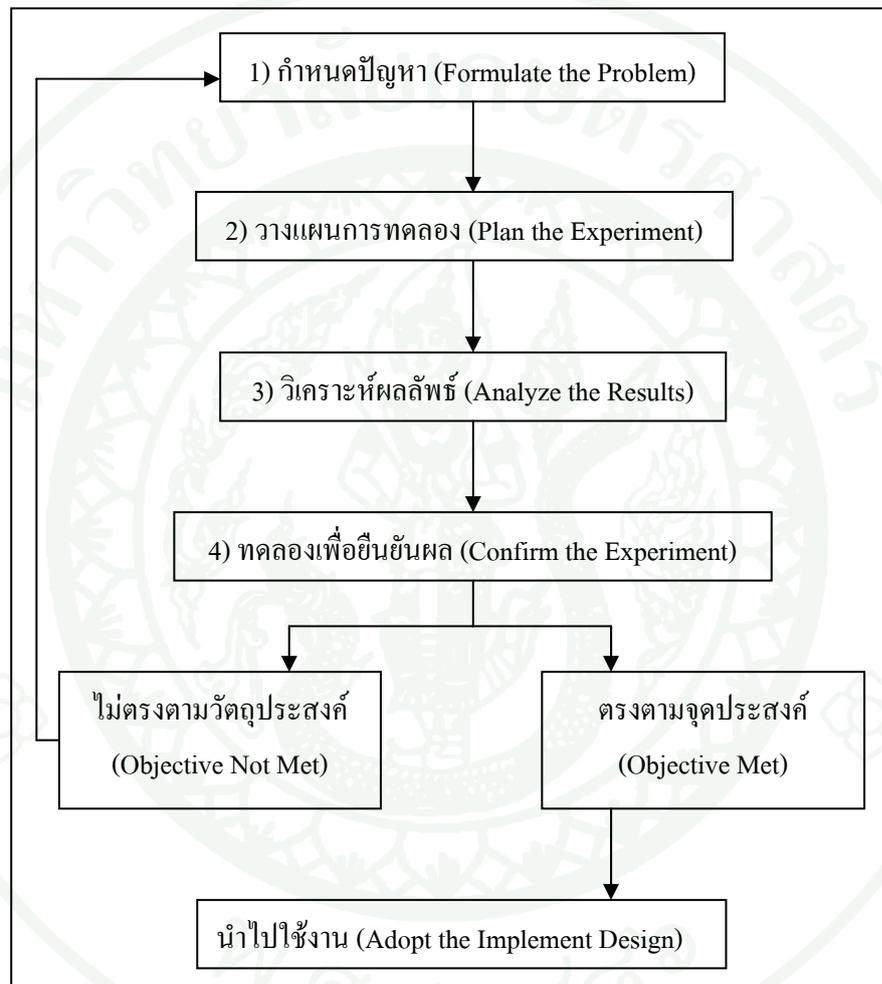
แนวคิดของวิธีการทาคุชิเป็นแนวคิดที่จะรวมคุณภาพให้อยู่ในผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ แทนที่จะใช้การสุ่มตรวจสอบคุณภาพที่ขบวนการสุดท้ายซึ่งได้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการสุ่มตรวจสอบแบบทั่วไป ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพจะถูกแยกออกแต่คุณภาพของกระบวนการยังคงเหมือนเดิม ซึ่งอันที่จริงแล้วกระบวนการต่างหากที่ก่อให้เกิดคุณภาพ และสำคัญกว่าการสุ่มตัวอย่าง วิธีการทาคุชิได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสร้างคุณภาพให้กับผลิตภัณฑ์ แต่โดยทั่วไปแล้วคุณภาพจะลดลงโดยการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนของสิ่งแวดล้อม วิธีการทาคุชิจะพยายามทำให้กระบวนการสามารถทำงานได้ตามที่ถูกออกแบบ โดยมีภูมิคุ้มกันต่อสิ่งรบกวน หรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน

6.1 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทาคุชิ

เป็นการประยุกต์การออกแบบการทดลองปัจจัยควบคุม (Control Factor) เช่น ขนาดของชิ้นส่วนซึ่งสามารถควบคุมได้โดยผู้ทำการออกแบบ และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor or Noise Factor) เช่น ตัวแปรทางด้านสภาพแวดล้อม การเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ กรรมวิธีการผลิตที่ไม่สมบูรณ์ เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ยังเป็นแหล่งของความผันแปรอีกด้วย ซึ่งอิทธิพลที่เกิดจากตัวแปรเหล่านี้ไม่สามารถที่จะกำจัดได้ เพราะฉะนั้นหน้าที่หลักของ การออกแบบกระบวนการที่มีความเข้มแข็ง (Robust Design, RD) เป็นการลดความผันแปรของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ โดยทำการลดความไวของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่มีต่อแหล่งความผันแปร และทำการควบคุมแหล่งผันแปรเหล่านี้ หรืออีกนัยหนึ่งคือ การออกแบบกระบวนการที่มีความเข้มแข็งจะลดความผันแปรของค่าตอบสนอง โดยทำการเลือกปรับตั้งที่ปัจจัยควบคุม เพื่อลดอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมได้ยาก (Hard-to-Control Noise)

6.2 ขั้นตอนการทดลองด้วยวิธีการทางทฤษฎี

วิธีการทางทฤษฎีสำหรับสนับสนุนการออกแบบกระบวนการที่มีความเข้มแข็ง มีขั้นตอนในการปฏิบัติที่สำคัญ 4 ขั้นตอน ดังนี้



ภาพที่ 9 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองด้วยวิธีการทางทฤษฎี

6.2.1 กำหนดปัญหา

ในขั้นตอนนี้ผู้ทำการทดลองจะต้องจัดการกับปัญหาของการออกแบบกระบวนการที่เข้มแข็งให้แน่นอน โดยการกำหนดวัตถุประสงค์เริ่มต้นของกระบวนการให้ชัดเจน

และกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของค่าตอบสนองของกระบวนการ (Process Response) แล้วทำการ ไตร่ตรองวัตถุประสงค์เหล่านี้

6.2.2 วางแผนการทดลอง สามารถแยกออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

1) ขั้นตอนที่ 1 คือ การออกแบบตารางการทดลอง (Design the Matrix Experiment) ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการศึกษาปัจจัยหลายๆ ปัจจัยพร้อมกัน โดยใช้การ กำหนดตารางแผนการทดลองที่เรียกว่า ออกทอกอนอล อะเรย์ (Orthogonal Array) เป็นตาราง มาตรฐานที่ใช้ในการลดจำนวนการทดลอง การนำตารางมาตรฐานนี้ไปใช้ในการออกแบบการ ทดลองนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัย โดยการกำหนดตารางแผนการทดลอง วิธีนี้มีประโยชน์ กล่าวคือ ผลสรุปที่ได้จากการทดลองแต่ละการทดลองจะครอบคลุมกับขอบเขต ของการทดลองทั้งหมด โดยมีการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง

การใช้ตารางออกทอกอนอล อะเรย์ มีข้อดีคือ ทำให้สามารถลดการทดลองให้ น้อยลง และเป็นผลให้ลดเวลาและต้นทุนในการทดลองได้อย่างมาก โดยสามารถเปรียบเทียบจำนวน การทดลองโดยใช้ตารางออกทอกอนอล อะเรย์ กับ จำนวนการทดลองแบบแฟคทอเรียล ดังนี้

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนการทดลองโดยใช้ตารางออกทอกอนอล อะเรย์ ของวิธีการ ทากูชิ กับจำนวนการทดลองแบบแฟคทอเรียล

ตารางออกทอกอนอล อะเรย์	จำนวน ปัจจัย	ระดับของ ปัจจัย	จำนวนการทดลองโดยใช้ ตารางออกทอกอนอล อะเรย์	จำนวนการทดลอง แบบแฟคทอเรียล
L ₄	3	2	4	8
L ₈	7	2	8	128
L ₉	4	3	9	81
L ₁₂	11	2	12	2,048
L ₁₆	15	2	16	32,768
L ₁₆	5	4	16	1,024

ที่มา: Bandurek *et al.* (1988)

การเลือกใช้ตารางออกทอกอนอลอะเรย์ จำเป็นต้องมีการพิจารณาในหลายๆ ส่วนประกอบกันดังต่อไปนี้

(1) ส่วนที่ 1 ระดับขั้นความอิสระ (Degree of Freedom) โดยระดับขั้นความอิสระ คือ ตัวเลขที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างปัจจัยหลัก หรือปัจจัยร่วม ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในการกำหนดระดับให้ได้ค่าเฉพาะที่ถูกต้องที่สุด การพิจารณาค่าระดับขั้นความอิสระในการทดลองจะขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัย โดยจำแนกประเภทของปัจจัยได้ดังนี้

ค่าระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลัก ทำการคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลัก} = \text{จำนวนระดับของปัจจัย} - 1 \dots (4)$$

ในส่วนของปัจจัยร่วม เรียกระดับขั้นความอิสระว่า ค่าองศาอิสระ ซึ่งทำการคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าองศาอิสระ} = \text{ผลคูณของระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลัก} \dots\dots (5)$$

(2) ส่วนที่ 2 การเลือกตารางออกทอกอนอล อะเรย์ โดยทำการพิจารณาระดับขั้นความอิสระของปัจจัย แล้วนำมาเปรียบเทียบกับระดับขั้นความอิสระของตารางออกทอกอนอลอะเรย์ มาตรฐาน โดยมีวิธีการดังนี้

ระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลัก ทำการคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลัก} = (\text{ระดับของปัจจัยหลัก} - 1) \times \text{จำนวนปัจจัยหลัก} \dots\dots\dots (6)$$

ระดับขั้นความอิสระของปัจจัยร่วม ทำการคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าระดับขั้นความอิสระของปัจจัยร่วม} = (\text{ระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลักที่ 1}) \times (\text{ระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลักที่ 2}) - \text{จำนวนปัจจัยร่วม} \dots\dots\dots (7)$$

ระดับชั้นความอิสระโดยรวม หาได้จาก

$$\text{ค่าระดับชั้นความอิสระโดยรวม} = \text{ระดับชั้นความอิสระของปัจจัยหลัก} + \text{ระดับชั้นความอิสระของปัจจัยร่วม} \dots\dots\dots (8)$$

การเลือกตารางออกทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐานนั้น ให้นำเอาระดับชั้นความอิสระโดยรวม เปรียบเทียบกับระดับชั้นความอิสระของตารางออกออกทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐาน โดยต้องเลือกตารางมาตรฐานที่มีระดับชั้นความอิสระที่มากกว่าหรือเท่ากับระดับชั้นความอิสระโดยรวมที่คำนวณได้

(3) ส่วนที่ 3 การลดค่าอคติในการทดลองสามารถแบ่งได้ เป็นสองชนิดคือ

ค่าความคลาดเคลื่อนหลัก เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้มักจะเกิดเมื่อมีการเปลี่ยนกรรมวิธีการทดลอง สามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนนี้ได้โดยการลดจำนวนครั้งในการเปลี่ยนรูปแบบการทดลองให้น้อยที่สุด หรือให้ปัจจัยที่มีความยุ่งยากในการเปลี่ยนรูปแบบการทดลองอยู่ในลำดับต้นๆของการทดลอง

การลดค่าความคลาดเคลื่อนรอง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความคลาดเคลื่อนภายในการทดลอง ซึ่งเกิดจากการทำการทดลองหลายครั้งในรูปแบบการทดลองเดิม โดยค่าความคลาดเคลื่อนรองนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยของความคลาดเคลื่อนของระบบการวัดและค่าความคลาดเคลื่อนตามธรรมชาติของการวัด โดยที่ธรรมชาติของการวัดแก้ไขโดยการหาค่าเฉลี่ยจากการทำการวัดหลายๆครั้ง ในส่วนของความคลาดเคลื่อนของระบบ สามารถแก้ไขได้โดยการฝึกฝนการทำการทดลอง และเครื่องมือในการทำการทดลองที่มีความเที่ยงตรงสูง

(4) ส่วนที่ 4 การสุ่มการทดลอง โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนในการทดลองเกิดจากลำดับการทดลองที่มีค่าเสื่อมสภาพในตัวเอง ซึ่งเกิดจากการทำการทดลองหลายๆครั้ง หรือเกิดการรวมตัวเมื่อมีการทดลองหลายๆครั้ง โดยไม่สามารถแก้ไขทางกายภาพได้ เราสามารถลดปัญหาความคลาดเคลื่อนนี้โดยทำการสุ่มการทดลองเพื่อกระจายความคลาดเคลื่อนออกไปอย่างทั่วถึงได้ ทั้งนี้ในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ สามารถแบ่งลักษณะการสุ่มการทดลองได้ดังนี้

การสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization) กล่าวคือ ในกรณีที่มีการทำซ้ำจะทำการสุ่มเฉพาะการทดลองของการทำซ้ำรอบนั้นๆ โดยทุกการทดลองมีโอกาสเท่ากันที่จะถูกเลือกทดลองเป็นลำดับแรก และเลือกทดลองในลำดับต่อไปตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4

การสุ่มซ้ำอย่างง่าย (Simple Repetition) การสุ่มชนิดนี้ใช้ในกรณีที่มีความยุ่งยากในการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง (Setup) และการทดลองต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในกรณีที่มีการเปลี่ยนรูปแบบการทดลอง จึงต้องทำการทดลองให้เสร็จสิ้นที่รอบการทำซ้ำ ดังแสดงในตารางที่ 5

การสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization within Block) การสุ่มชนิดนี้ใช้ในกรณีที่มีความยุ่งยากในการเปลี่ยนระดับของตัวแปรตัวใดตัวหนึ่ง จึงต้องทำการบล็อกระดับของตัวแปรนั้นเสียก่อน แล้วจึงทำการสุ่มภายในบล็อก ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 4 แสดงการสุ่มสมบูรณ์

Trial Number	Factors							y data		
	A	B	C	D	E	F	G			
	Column Number									
	1	2	3	4	5	6	7			
1	1	1	1	1	1	1	1	*	*	*
2	1	1	1	2	2	2	2	*	*	*
3	1	2	2	1	1	2	2	*	*	*
4	1	2	2	2	2	1	1	*	*	*
5	2	1	2	1	2	1	2	*	*	*
6	2	1	2	2	1	2	1	*	*	*
7	2	2	1	1	2	2	1	*	*	*
8	2	2	1	2	1	1	2	*	*	*

Randomized within first round

Randomized within second round

Randomized within third round

ที่มา: Ross (1989)

ตารางที่ 5 แสดงการสุ่มซ้ำอย่างง่าย

Trial Number	Factors							y data		
	A	B	C	D	E	F	G			
	Column Number									
	1	2	3	4	5	6	7			
1	1	1	1	1	1	1	1	*	*	*
2	1	1	1	2	2	2	2	*	*	*
3	1	2	2	1	1	2	2	*	*	*
4	1	2	2	2	2	1	1	*	*	*
5	2	1	2	1	2	1	2	*	*	*
6	2	1	2	2	1	2	1	*	*	*
7	2	2	1	1	2	2	1	*	*	*
8	2	2	1	2	1	1	2	*	*	*

Random order of trials do all repetition for a trial

ที่มา: Ross (1989)

ตารางที่ 6 แสดงการสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก

Trial Number	Factors							y data		
	A	B	C	D	E	F	G			
	Column Number									
	1	2	3	4	5	6	7			
1	1	1	1	1	1	1	1	*	*	*
2	1	1	1	2	2	2	2	*	*	*
3	1	2	2	1	1	2	2	*	*	*
4	1	2	2	2	2	1	1	*	*	*
5	2	1	2	1	2	1	2	*	*	*
6	2	1	2	2	1	2	1	*	*	*
7	2	2	1	1	2	2	1	*	*	*
8	2	2	1	2	1	1	2	*	*	*

Random order of trials in block 1 (indicated by arrows pointing to trials 3, 4, 5, 6, 7, 8)
 Random order of trials in block 2 (indicated by arrows pointing to trials 1, 2)

ที่มา: Ross (1989)

(5) ส่วนที่ 5 การกำหนดจำนวนรอบการทำซ้ำของการทดลอง โดยจำนวนการทดลองซ้ำนั้นขึ้นอยู่กับช่วงความเชื่อมั่นของผลลัพธ์ที่ต้องการ เริ่มต้นต้องทำการทดลองคร่าวๆ ก่อนเพื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูล โดยสามารถประมาณค่าได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง ดังสมการที่ 9 (Montgomery, 2005)

$$e = \frac{(t_{\alpha/2, n-1}) \times s}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (9)$$

- เมื่อ e หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ
 α หมายถึง ระดับนัยสำคัญ
 n หมายถึง จำนวนรอบการทดลอง
 s หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ทำการกำหนดความคลาดเคลื่อนของระบบขึ้นใหม่ ให้อยู่ในช่วงที่ต้องการซึ่งปกติจะมีค่าน้อยกว่าผลของความคลาดเคลื่อนของระบบที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 9 แล้วนำไปหาจำนวนรอบทำซ้ำของการทดลองที่เหมาะสมได้จากสมการที่ 10

$$n' = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \cdot s}{e} \right)^2 \dots\dots\dots (10)$$

เมื่อ n' หมายถึงจำนวนของการทดลองซ้ำที่เหมาะสม

2) ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดลองและรวบรวมข้อมูล (Conduct the Experiment and Collect Data) การทดลองจริงนั้นเป็นการทำให้บรรลุผลสำเร็จ และการปฏิบัติการทดลองนี้เป็นการหาค่าตอบสนองของกระบวนการ ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำไปใส่ในตาราง ตัวชี้วัดการปฏิบัติสำหรับการทดลองทั้งหมด แล้วจะทำการแปลงข้อมูลที่ได้ให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratio or S/N Ratio) ซึ่งอัตราส่วนนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในการหาเป้าหมายที่ถูกต้องเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (Optimum) ของปัญหา แต่ถ้าหากเกิดความล้มเหลวในการหาเป้าหมาย ก็จะนำไปสู่การสรุปผลที่ผิดพลาดได้ในเรื่องของระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยที่คุณลักษณะของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

(1) ชนิดที่ 1 ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเป็นศูนย์ หรือกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller the Better Type Problem) เช่น ความต้องการให้เกิดข้อบกพร่องน้อยที่สุดในการผลิตคอมพิวเตอร์ ความต้องการให้เกิดมลภาวะเป็นพิษน้อยที่สุดจากโรงงาน ความต้องการให้เกิดการรั่วของกระแสไฟฟ้าที่น้อยที่สุด เป็นต้น ซึ่งมีสูตรในการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเป็นดังนี้

$$S/N_{LB} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \dots\dots\dots (11)$$

เมื่อ S/N_{LB} คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของกระบวนการ
ที่ดีที่สุดมีค่าเป็นศูนย์ หรือใช้สัญลักษณ์ η_{LB} โดยมี
หน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

n คือ จำนวนครั้งของการสังเกต

y_i คือ ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตในแต่ละครั้ง

(2) ชนิดที่ 2 ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของกระบวนการที่ดีที่สุด
โดยมีค่าเท่ากับค่าที่ได้กำหนดไว้หรือจำกัดไว้ หรือค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Nominal the Best Type
Problem) เช่น ความต้องการให้ความหนาของโพลีซิติโคนมีค่าตามที่กำหนดไว้ในลักษณะที่มี
คุณภาพ สำหรับปัญหาในกรณีนี้เมื่อค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ความแปรปรวนก็จะเป็นศูนย์ด้วย และพบว่า
ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนแบบนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จาก
การทดลองครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ n

$$S/N_{NB} = -10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n \bar{y}^2}{s^2} \right) \dots\dots\dots (12)$$

เมื่อ S/N_{NB} คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกระบวนการที่ดี
ที่สุดต้องมีค่าเท่ากับที่ได้กำหนดไว้หรือจำกัดไว้ หรือ
ใช้สัญลักษณ์ η_{NB} โดยมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

s^2 คือ ค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้ง
ที่ 1 ถึงครั้งที่ n

\bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ n

(3) ชนิดที่ 3 ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือ
กระบวนการที่ดีที่สุดต้องมีค่ามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ หรือกรณีค่ายิ่งยวด (Larger the Better
Type Problem) เช่น ความต้องการให้ความแข็งแรงของสายไฟต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดมีค่ามาก
ที่สุด ความต้องการให้น้ำมันของรถบรรทุกสามารถขับเคลื่อนรถบรรทุกได้จำนวนระยะทางมาก
ที่สุด เป็นต้น

$$S/N_{HB} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \dots\dots\dots (13)$$

เมื่อ S/N_{HB} คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกระบวนการที่ดี
ที่สุดต้องมีค่ามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ หรือใช้
สัญลักษณ์ η_{HB} โดยมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)
 n คือ จำนวนครั้งของการสังเกต
 y_i คือ ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตในแต่ละครั้ง

ในการกำหนดตารางแผนการทดลอง (Matrix Experiment) โดยใช้ตารางมาตรฐานของวิธีการทากูจิจะประกอบด้วยเขตของการทดลอง ซึ่งมีปัจจัยของกระบวนการที่เราต้องการศึกษา หลังจากทำการกำหนดตารางแผนการทดลองเรียบร้อยแล้ว จะทำการดำเนินการทดลอง โดยกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองตามตารางแผนการทดลองที่ได้กำหนดไว้ และเมื่อดำเนินการทดลองเสร็จแล้วจะต้องนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมด ไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆในการทดลอง

การสร้างตารางแผนการทดลองโดยใช้ตารางมาตรฐานของวิธีการทากูจิ ทำให้สามารถหาอิทธิพลของปัจจัยหลายๆ ปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือ ผู้ออกแบบการทดลองทราบจำนวนของปัจจัยควบคุม และระดับของปัจจัยควบคุม (Control Factor Level) ที่ได้ออกแบบไว้ โดยนำค่าทั้งสองนี้มาทำการพิจารณาเลือกตารางมาตรฐานของวิธีการทากูจิที่เหมาะสม เช่น สมมติว่าต้องการศึกษาเพื่อประเมินอิทธิพลของปัจจัยควบคุม 11 ปัจจัย ที่มีผลต่อค่าตอบสนองของกระบวนการ ผู้ออกแบบการทดลองได้เลือกระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัยไว้ 2 ระดับเท่ากันทุกปัจจัย ตารางแผนการทดลองที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างนี้คือ ตาราง รูปแบบ L_{12} ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงมาตรฐานของตารางออกทอกอนอล อะเรย์ มาตรฐานของวิธีการทางสถิติแบบ L_{12} (L_{12} Orthogonal Array)

ลำดับ การทดลอง	สดมภ์										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	3	1	1	2	1	2	1	2	2	1

ที่มา: Ross (1989)

6.2.3 วิเคราะห์ผลลัพธ์

หลังจากที่ได้ตารางผลลัพธ์ของการทดลองที่ถูกต้องแล้ว การสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของอิทธิพลของปัจจัยหลายๆ ปัจจัย ขั้นตอนหลักในการวิเคราะห์ผลลัพธ์คือ วิเคราะห์ข้อมูลจากตารางผลลัพธ์ของการทดลองโดยใช้ผลลัพธ์นี้ ทำนายค่าที่เหมาะสมที่สุดของการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัย (Optimal Factor Level Combination) ซึ่งจะให้การปฏิบัติที่ดีที่สุด ขั้นตอนนี้เรียกว่า การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Analysis of Mean, ANOM)

โดยทำการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของความแปรปรวน และหาความสัมพันธ์ที่สำคัญของปัจจัยหลายๆ ปัจจัยโดยวิธีการแยกความแปรปรวน หรือที่เรียกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) โดยพิจารณาค่ากำลังสองเฉลี่ย (Mean Square, MS) สำหรับปัจจัยควบคุม ดังนี้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน สามารถทำการประมาณอิทธิพลของแต่ละปัจจัยโดยใช้การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย สำหรับการเลือกใช้ตารางออกทอกอนอด อะเรย์ มาตรฐาน ดังนี้ (Bagchi, 1993)

1) ขั้นที่ 1 เริ่มจากการพิจารณาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน กล่าวคือ

$$\overline{S/N} = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N S/N_i \right] \dots\dots\dots (14)$$

เมื่อ $\overline{S/N}$ คือ ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการทดลอง
 S/N_i คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละลำดับการทดลอง
 N คือ จำนวนการทดลองทั้งหมด
 i คือ ลำดับการทดลอง โดย $i=1, 2, 3, \dots, N$

จากนั้นทำการพิจารณาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของปัจจัยควบคุม โดยสมมติว่าปัจจัยควบคุมที่เราต้องการพิจารณาคือปัจจัย A

$$\overline{S/N}_{A_j} = \frac{\text{ผลรวมของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ } j}{n} \dots (15)$$

เมื่อ $\overline{S/N}_{A_j}$ คือ ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย A
 ระดับที่ j
 n คือ จำนวนการทดลองในระดับที่ j ของปัจจัย

อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยทำการพิจารณาผลรวมกำลังสอง (Sum of Square) คือ การนำข้อมูลที่อยู่ในระดับเดียวกันมารวมกัน โดยใช้การยกกำลังสองทั้งนี้เพื่อหักล้างผลกระทบเรื่องเครื่องหมาย โดยคำนวณหาผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละการทดลองที่เบี่ยงเบนออกไปจากค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนต่อสิ่งรบกวนของการทดลอง

เริ่มจากพิจารณาหาผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของแต่ละปัจจัยที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนต่อสิ่งรบกวนของการทดลอง

$$SS_A = n \sum_{j=1}^k (\overline{S/N}_{A_j} - \overline{S/N})^2 \dots\dots\dots (16)$$

เมื่อ k คือ จำนวนระดับของปัจจัย A

j คือ ระดับของปัจจัย โดย j = 1, 2, ..., k

จากนั้นพิจารณาผลรวมกำลังสองโดยรวม (Total Sum of Square, SS_T) ของการทดลองจากสมการ

$$SS_T = \sum_{i=1}^N (S/N_i - \overline{S/N})^2 \dots\dots\dots (17)$$

ทั้งนี้ความแตกต่างของผลรวมกำลังสองของปัจจัยทั้งหมดกับผลรวมกำลังสองของแต่ละปัจจัย คือ ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน SS_E

2) ขั้นที่ 2 ทำการพิจารณาระดับชั้นความอิสระของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน โดยระดับชั้นความอิสระของปัจจัยหลักคือ จำนวนระดับของปัจจัยหลัก-1 และระดับชั้นความอิสระรวมคือ (จำนวนการทดลองทั้งหมด-1)*(จำนวนกลุ่ม-1) ดังนั้น ระดับชั้นความอิสระของความคลาดเคลื่อนคือ ระดับชั้นความอิสระรวม-ระดับชั้นความอิสระของปัจจัยหลักของแต่ละปัจจัย

3) ขั้นที่ 3 ทำการพิจารณาค่ากำลังสองเฉลี่ย (Mean Sum Square, MS) โดยที่ค่ากำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับผลรวมกำลังสองหารด้วยระดับขั้นความอิสระ ดังนี้ (Montgomery, 2005)

$$MS_{\text{Factor}} = \frac{\text{Factor Effect Sum of the Square}}{\text{Factor Degree of Freedom}} \dots\dots\dots (18)$$

เมื่อ MS_{Factor} คือ ค่าความแปรปรวนเฉลี่ยสำหรับปัจจัยควบคุม
 Factor Effect Sum of the Square คือ ผลรวมกำลังสองแต่ละค่าของ
 ปัจจัย
 Factor Degree of Freedom คือ ระดับขั้นความเสรีสำหรับผลรวมของ
 กำลังสองแต่ละปัจจัย

และความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับความผิดพลาด มีนิยามว่า

$$MS_E = \frac{\text{Error Sum of the Square}}{\text{Error Degree of Freedom}} \dots\dots\dots (19)$$

เมื่อ MS_E คือ ค่าความแปรปรวนของความผิดพลาด
 Error Sum of the Square คือ ผลรวมกำลังสองของความผิดพลาด
 Error Degree of Freedom คือ ระดับขั้นความเสรีของความผิดพลาด

4) ขั้นที่ 4 ทำการทดสอบอัตราส่วนของความแปรปรวน โดยในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน มีพจน์หนึ่งที่เรียกว่า อัตราส่วนของความแปรปรวน (Variance Ratio or F-Ratio) ซึ่งอัตราส่วนนี้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบนัยสำคัญอิทธิพลของปัจจัย ค่าอัตราส่วนความแปรปรวนดังแสดงในสมการที่ 20

$$F = \frac{MS_{\text{Factor}}}{MS_E} \dots\dots\dots (20)$$

เมื่อ F คือ อัตราส่วนของความแปรปรวน

นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยควบคุมที่มีผลต่อค่าตอบสนอง ได้จากการคำนวณหาร้อยละของอิทธิพลหลัก (Percentage Contribution) ว่ามีอิทธิพลต่อค่าตอบสนอง อยู่ในระดับใดได้ ดังนี้ (Bagchi, 1993)

$$\text{Percentage Contribution of Factor} = \left(\frac{SS_{\text{Factor}}}{SS_T - SS_E} \right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (21)$$

เราใช้แนวทางนี้ในการตัดสินใจเลือกปัจจัยซึ่งนำมาใช้ในการพยากรณ์สมการทางคณิตศาสตร์ โดยอีกนัยหนึ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของอิทธิพลของปัจจัยควบคุม ซึ่งถือว่าเป็นชนิดหนึ่งของสัญญาณ (Signal) และกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองถือว่าเป็นชนิดหนึ่งของสิ่งรบกวน (Noise) ดังนั้น การใช้สัดส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเป็นส่วนไม่อิสระในกรณีกายภาพเช่นนี้ และแสดงออกมาได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับชนิดของค่าตอบสนอง (Response) ที่วัดค่าได้

การทำนายอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด เพื่อการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกับการทดลองเพื่อการยืนยันผลในขั้นตอนสุดท้ายของวิธีการทากูชิ พิจารณาดังนี้ (Jenson *et al*, 1988)

$$\eta_{opt} = m + \sum (m_i - m) \quad \dots\dots\dots (22)$$

เมื่อ η_{opt} คือ ค่าทำนายอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการรวมกัน

ระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด

m คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ยของการทดลองทั้งหมด

m_i คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่ i

6.2.4 การทดลองเพื่อยืนยันผล

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการทดลองในกระบวนการที่เข้มแข็ง เป็นขั้นตอนเกี่ยวกับการพิสูจน์ค่าที่ดีที่สุดของการรวมกันของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างมี

เหตุผล โดยการกำหนดตารางแผนการทดลองให้สอดคล้องกับโครงการที่จะทำการปรับปรุง ในการกำหนดแผนการทดลองเพื่อยืนยันผลจะใช้การรวมกันของปัจจัยที่ให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด ซึ่งการรวมกันของปัจจัยได้จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ถ้าค่าตอบสนองมีค่าตรงตามที่ได้ทำนายไว้ ก็แสดงว่าการรวมกันของปัจจัยที่ให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจริง สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking)

การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบในการทดลองจะทดสอบถึงการกระจายของข้อมูลว่ามีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ตามสมมติฐานหรือไม่ ทดสอบความอิสระของข้อมูล ทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน

7.1 การตรวจสอบการกระจายว่ามีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยใช้การทดสอบไคร์แควร์ (χ^2 - Goodness of Fit Test) การทดสอบแบบโคโมโกรอฟ-สเมอ์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov Test) หรือการตรวจสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติ การกระจายข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ หมายความว่า ข้อมูลแต่ละตัวเป็นตัวแปรสุ่มจะต้องมีแนวโน้มที่ค่าจะเข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่ง แล้วมีการกระจายรอบค่าดังกล่าวในลักษณะสมมาตร หากข้อมูลไม่มีการแจกแจงแบบปกติแล้วทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ จึงต้องค้นหาสาเหตุก่อนการวิเคราะห์

7.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent) จะตรวจสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจายของจุดที่แทนบนแผนภูมิ ว่ามีรูปแบบอิสระหรือไม่ ข้อมูลมีความอิสระหมายถึงข้อมูลแต่ละตัวที่ใช้ในการสร้างแบบการถดถอยจะต้องเป็นอิสระต่อกัน อันเนื่องมาจากการสุ่ม ทั้งนี้ถ้าหากข้อมูลไม่มีการสุ่มแล้วจะทำให้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ ค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหมายก็ไม่ได้เป็นตัวแทนของข้อมูล แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความเอนเอียง (Bias) จำเป็นต้องค้นหาสาเหตุการวิเคราะห์

7.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) จะตรวจสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายความคลาดเคลื่อน (Residual Plot) ในแต่ละระดับของปัจจัย ถ้าลักษณะการกระจายของข้อมูลไม่เป็นลักษณะที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน การที่ข้อมูลมีความเสถียรของความ

แปรปรวน (Variance Stability) หมายความว่าข้อมูลที่เก็บมานั้น ได้จากกระบวนการที่ได้มาตรฐานแล้ว ความแตกต่างของข้อมูลที่เกิดขึ้นมาจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Chance Cause) จากกระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูลเท่านั้น หากข้อมูลไม่มีความเสถียรของความแปรปรวน แสดงว่าเกิดจากสาเหตุที่สามารถควบคุมได้ แต่ไม่มีการควบคุมต้องมีการค้นหาสาเหตุเพื่อแก้ไขก่อนทำการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อนุชา (2538) ได้ทำการวิเคราะห์หาจุดเหมาะสมในการปรับเครื่องเชื่อมลวดตัวนำในการผลิตหัวอ่านข้อมูลคอมพิวเตอร์ เพื่อลดปัญหาการเชื่อมลวดตัวนำไม่ติดกับหัวอ่านข้อมูลให้น้อยลง โดยใช้เทคนิควิธีการออกแบบการทดลอง และวิธีการของทากูชิ ปัจจัยที่ใช้พิจารณา คือกำลังไฟฟ้าของเครื่องเชื่อมลวดตัวนำ เวลาในการเชื่อมของเครื่องเชื่อมลวดตัวนำ รุนของเครื่องเชื่อมลวดตัวนำ การผ่านกระบวนการอบ อุณหภูมิปฏิบัติงาน และแรงดันไฟฟ้าสำหรับเครื่องเชื่อมลวดตัวนำ จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า ค่าเวลาในการเชื่อมและกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 5.0 วัตต์ และ 500 มิลลิวัตต์ ตามลำดับ เมื่อนำผลการวิเคราะห์ไปปฏิบัติจริงในการผลิตสามารถลดปัญหาการไม่ติดของหัวอ่านข้อมูล ที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมลวดตัวนำจากเดิม 1,420 ชิ้นในล้านชิ้น ลดลงเหลือ 560 ชิ้นในล้านชิ้น

สามารถ (2539) ทำวิจัยปรับปรุงคุณภาพกระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่มีกำลังอัดไม่สม่ำเสมอ โดยใช้เทคนิควิธีการออกแบบการทดลองและวิธีการของทากูชิ ปัจจัยที่พิจารณาคือขนาดคละของหิน ขนาดคละของทราย อัตราส่วนของทรายต่อมวลรวม ผลการวิจัยสรุปได้ว่าทั้ง 3 ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมระหว่างขนาดคละของหินและขนาดคละของทราย มีผลกระทบต่อกำลังอัดคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% และจากผลการนำไปผลิตจริงพบว่าสามารถทำให้กำลังอัดคอนกรีตไม่ต่ำกว่าข้อกำหนดมากกว่าเดิม 3.8%

วิชัย (2540) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงเทป และหาค่าของปัจจัยเหล่านั้นที่จะต้องให้ได้ค่าแรงดึงเทปใกล้เคียง 70 gramf. ซึ่งเป็นความต้องการของลูกค้า การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ทฤษฎีการทดลองแบบแฟคทอเรียล และการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับสร้างแบบจำลองพร้อมทั้งทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งหลาย ซึ่งผลการวิจัยพบว่าความหนาใบมีด ความดันหรือแรงกดใบมีด และอุณหภูมิ มีความสัมพันธ์กับแรงดึงเทปอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ จากการ

วิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ สามารถที่จะสร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ของแรงดึงเทปในรูปฟังก์ชันของความหนาใบมีด ความดันหรือแรงกดใบมีด และอุณหภูมิ พร้อมทั้งสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้อีกด้วย จากการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมบนเครื่องปิดผนึกเทปจะพบว่าได้ค่าแรงดึงเทปที่ 71.2 gramf.

สงวนศักดิ์ (2542) ได้ศึกษาถึงจุดที่เหมาะสมของกระบวนการในการผลิตอลูมิเนียมที่ผลิตจากกรรมวิธีการผลิตแบบลูกรีดขั้วคู่ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ 2 วิธีคือ การถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุ และการทดลองแบบแฟคทอเรียล เพื่อเปรียบเทียบผลในการปรับปรุงคุณภาพขนาดความโต โครงสร้างเม็ดเกรนที่ขนาดความโตไม่เกิน 0.03 มิลลิเมตร ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุมีตัวแปรอิสระ 2 ตัว ที่มีผลต่อขนาดความโต โครงสร้างเม็ดเกรนคือเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมของธาตุเหล็ก และอุณหภูมิน้ำโลหะที่หล่อหุ้มกะโหลก นอกจากนี้ยังพบว่า ตัวแบบจากการวิเคราะห์การถดถอยมีความเหมาะสมกว่าแบบสมการที่ได้จากการทดลองแฟคทอเรียลแบบ 3^2 เนื่องจากมีค่าเฉลี่ยขนาดความโตเท่ากับ 0.0291 มิลลิเมตร ซึ่งน้อยกว่ารูปแบบสมการที่ได้จากการทดลองแฟคทอเรียลแบบ 3^2 มีค่าเฉลี่ยขนาดความโตเท่ากับ 0.0294 มิลลิเมตร และมีรูปแบบสมการที่ง่ายต่อการนำไปใช้ในการทำนายหรือคาดคะเนขนาดความโต โครงสร้างเม็ดเกรนอลูมิเนียม

สมพร (2544) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแนวเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนทนแรงดึงสูง DIN St 52-3 และหาเงื่อนไขที่เหมาะสม เพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพดี โดยใช้การออกแบบการทดลองของนายทาคุชิ ซึ่งปัจจัยที่นำมาศึกษา คือ ชนิดกระแสไฟ ปริมาณกระแสไฟการอบลวดเชื่อม และการอุ่นชิ้นงาน โดยได้ทำการทดสอบหาคุณภาพทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยา โดยมีการทดสอบ ค่าด้านแรงดึง ค่าความต้านทานการกระแทก ค่าความแข็งและ โครงสร้างทางโลหะวิทยา และได้ทำการประเมิน โดยใช้ทฤษฎีนายทาคุชิ วิเคราะห์ผลค่าด้านแรงดึง ค่าความต้านทานการกระแทก จากผลการทดลองได้เงื่อนไขที่เหมาะสมของค่าด้านแรงดึง ดังนี้คือ ไม่อุ่นชิ้นงาน ปริมาณกระแสไฟที่ 150 แอมป์ ชนิดกระแสไฟสลับ และไม่อบลวดเชื่อม และเงื่อนไขที่เหมาะสมของค่าความต้านทานการกระแทก คือ อุณหภูมิที่ 125°C ปริมาณกระแสไฟที่ 150 แอมป์ ชนิดกระแสไฟสลับ และอบลวดเชื่อมที่ 300°C

ดวงกมล (2545) ทำการวิจัยเพื่อทดสอบหาปัจจัยที่ใช้ และจุดเหมาะสมในการผลิตแผ่นยางพื้นรองเท้าเพื่อลดการเกิดรูพรุน และได้คุณสมบัติที่ลูกค้าต้องการที่แผ่นยางพื้นรองเท้า โดยปัจจัยที่ทำการทดสอบคือ วิธีการผสมยาพอง วิธีการผสมยาสุก และหาจำนวนที่เหมาะสมของปริมาณ

Scrap ปริมาณแป้ง และปริมาณเม็ดพลาสติกที่ใช้ในการผลิต จากผลการทดลองบ่งชี้ว่า การใส่ยาสุก และยาพองหลักจากที่ส่วนผสมอื่นๆ เข้ากันแล้วทำให้เกิดรูพรุนน้อยกว่าการผสมแบบอื่นอย่างมีนัยสำคัญ และปริมาณ Scrap ต่อปริมาณแป้งต่อปริมาณเม็ดพลาสติกที่ทำให้ได้คุณสมบัติของยางพื้นรองเท้าที่ดี คือ 20:21:25, 20:24:27 และ 20:19:27 ทำให้ลดของเสียที่เกิดจากรูพรุนของแผ่นยางรองพื้นรองเท้าได้ 4.25% คิดเป็นจำนวนเงินได้ 222,250 บาท/เดือน

ปณัยกรณ์ (2545) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึงในแนวตะเข็บและความเบี่ยงเบนมาตรฐานในกระบวนการผลิตถุงหิ้วรูปตัวยู โดยพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลการทนแรงดึงในแนวตะเข็บ โดยใช้แผนภูมิเหตุและผล สามารถเลือกปัจจัยได้ 4 ปัจจัย คือ ความเร็วป้อนฟิล์ม อุณหภูมิบาร์กดบน อุณหภูมิบาร์กดล่าง และการปรับระยะกด โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial Design พบว่า อุณหภูมิบาร์กดล่าง และการปรับระยะการกดมีนัยสำคัญต่อผลต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึงในแนวตะเข็บ และความเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อนำไปทำการทดลองต่อโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 3^k Factorial Design เพื่อหาจุดที่เหมาะสมจากผลการวิจัยพบว่า ค่าของการทนแรงดึงเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น 50.7 % ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลง 52.12 ดัชนีความสามารถในการผลิตเพิ่มขึ้น 101.14 % สามารถลดสัดส่วนของเสียได้ 7.68 % คิดเป็นเงินที่สามารถประหยัดได้ประมาณ 1,880,064 บาท/ปี

ปรเมศ (2545) ได้กล่าวไว้ว่า การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการ รวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เรพลีเกต (Replicate) จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล จะกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลมีรูปแบบทั่วไป คือ $A*B*C*...$ แฟคทอเรียล รูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่สำคัญ ได้แก่

1) 2^k แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับเท่านั้น ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย

2) 3^k แฟกทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 3 ระดับ ใน k ปัจจัย

นวรรตน์ (2548) ศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการ เพื่อให้ค่าแรงเดือนลูกบอลในขั้นตอนการเชื่อมวงจรมีค่าสูงที่สุดภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ และปรับปรุงค่า C_{pk} ให้เพิ่มขึ้น รวมทั้งลดความผันแปรในกระบวนการผลิต โดยใช้วิธีการออกแบบการ 2 วิธีคือ แผนการทดลองเช่นทรัลคอม โพลิตหรือ CCD และวิธีการของทากูชิไปพร้อมๆกัน พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงเดือนลูกบอลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือปัจจัยระยะเวลาในการสร้างลูกบอล แรงกดที่ใช้ในการสร้างลูกบอล และแรงยี้ที่ใช้ในการสร้างลูกบอล เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในกระบวนการจริง ทั้งสองแผนการทดลองสามารถเพิ่มค่าเฉลี่ยของแรงเดือนลูกบอล ลดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเพิ่มค่า C_{pk} ได้ทั้งคู่

ปาณิกา (2549) ศึกษาปัญหาในโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องประดับ พบว่าของเสียที่เกิดจากการเกิดผื่นบนผิวชิ้นงานเป็นจำนวนมากถึง 54.18% ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาการเกิดผื่นบนผิวชิ้นงานเครื่องประดับ และคาดว่า มี 5 ปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการเกิดผื่นบนผิวชิ้นงานเครื่องประดับ คือ อุณหภูมิการหล่อ เวลาอบเบ้า อุณหภูมิน้ำโลหะ มุมเอียงชิ้นงาน และขนาดทางเดินน้ำโลหะ จึงนำปัจจัยดังกล่าวไปทำการทดลอง Screen Factor เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดผื่นอย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ด้วยวิธีทากูชิ ผลของการทดลองชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิการหล่อ และอุณหภูมิน้ำโลหะ มีผลต่อการเกิดผื่นบนผิวชิ้นงานหล่อเครื่องประดับเงินอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงนำปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการหล่อมาทำการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3^2 เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธี พื้นผิวตอบสนอง จากผลการทดลองพบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของอุณหภูมิการหล่อคือ 545 องศาเซลเซียส และปัจจัยที่เหมาะสมของอุณหภูมิน้ำโลหะคือ 900 องศาเซลเซียส จากการนำปัจจัยที่เหมาะสมไปหล่อชิ้นงานตัวอย่างจำนวน 200 ชิ้น ซึ่งชิ้นงานนี้เคยเกิดผื่นสูงถึง 78.21% พบว่าสามารถลดจำนวนการเกิดผื่นลงเหลือ 24.50% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อได้ถึง 53.71 %

วิทยา (2550) งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียในขบวนการผลิตชิ้นส่วน C/M/C P-CAR เพื่อลดของเสียอาการ Shrinkage จาก 28.57% ให้เหลือ ต่ำกว่า 14 % จึงได้ออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสีย โดยใช้ Factorial Design (2^3) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสม

ของปัจจัยในการผลิตของทั้ง 3 ปัจจัย จากผลการวิจัย เสนอแนะที่เหมาะสมสำหรับขบวนการผลิต C/M/C P-CAR คือ % Chemical Composition Si เท่ากับ 7 %, % Chemical Composition Na เท่ากับ 0.005 % และอุณหภูมิอุณหภูมิ 710 °C ที่ระดับความชื้นร้อยละ 95 โดยมี % ของเสียที่เกิดขึ้น 10.13 % ซึ่งบรรลุตามเป้าหมาย ทำให้สามารถลดต้นทุนจากของเสียลง 6,798,750 บาท/ปี รวมทั้งทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นจาก 680 ชิ้นต่อวัน เป็น 870 ชิ้นต่อวัน

Fisher (1953) คิดค้นการใช้วิธีการทางสถิติสำหรับการออกแบบการทดลองขึ้น เป็นผู้พัฒนาและเป็นบุคคลแรกที่น่าเอาการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) มาใช้เป็นวิธีการเบื้องต้นในการวิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง เพื่อใช้ในการดำเนินการเกษตร ทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น สายพันธุ์มีความคงทนมากขึ้น

Sudasna-na-Ayudhya (1992) ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการทาภูเขาและแผนการทดลอง CCD โดยใช้อนุกรมของเทอร์เพื่อหาตัวแบบกำลังสองของความแปรปรวนและมีตัววัดประสิทธิภาพทางสถิติคือค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง ค่าความลำเอียงและค่าความแปรปรวน ซึ่งผลสรุปจากการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองวิธีจากการใช้ปัญหาทดสอบ โพลีโนเมียลแบบต่างๆ 8 ตัวแบบ ซึ่ง 4 ตัวแบบมีความสัมพันธ์เป็นแบบบวก อีก 4 ตัวแบบมีความเป็นแบบคูณ พบว่าแผนการทดลอง CCD ใช้จำนวนการทดลองต่ำกว่าวิธีการทาภูเขาถึง 61.11% (28 ต่อ 72 การทดลอง) และโดยสรุปคือแผนการทดลอง CCD มีประสิทธิภาพเหนือกว่าวิธีการทาภูเขา กับทุกตัวแบบทดสอบที่นำมาศึกษา

Leon and Cabrera (1997) นำการออกแบบการทดลองมาใช้ในการผลิต Electrical Igniter ในการทดลองได้ทำการเก็บข้อมูลการทดลองเพียงครั้งหนึ่งของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล และจากการทดลองพบว่าอิทธิพลจากการขนส่ง Igniter ทางเรือเพื่อทำให้ตกผลึก (ซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้) และอุณหภูมิในการอบ มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของ Igniter มากกว่า อัตราการไหลของไนโตรเจน

Wilkins (1997) ได้ทำการศึกษาและออกแบบการทดลองเพื่อหาจุดที่เหมาะสมของค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหล่ออะลูมิเนียมแบบการหล่อแบบลึก (Dept Mould) โดยใช้การทดลองแบบ 3⁷ แฟคทอเรียล มีการแบ่งระดับของปัจจัยออกเป็น 3 ระดับ และมีจำนวนปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 7 ตัวผลปรากฏว่าตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของการหล่ออะลูมิเนียม มีผลทั้งหมด 7 ปัจจัย

ได้แก่ ความเร็วในการรีด (Cast Speed) อัตราการไหลของน้ำ (Water Flow) ระดับน้ำโลหะในราง (Launder Metal Level) ระดับน้ำโลหะในจานแม่พิมพ์ (Mould Metal Level) เวลาในการเติม (Fill Time) ระยะในการตั้งแบบแม่พิมพ์ (Cast Length) และระยะการเริ่มต้น (Platen Start)

Balasubramanian and Guha (1999) ได้นำเอาวิธีการของการออกแบบแผนการทดลองมาใช้เพื่อทดสอบปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความล้าบริเวณจุดที่ทำการเชื่อมเหล็ก โดยทำการศึกษานี้ใช้เหล็กกล้า ASTM 517 เกรด F หนา 8 mm. โดยใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่มีปัจจัยละ 2 ระดับ คือ ระดับต่ำและระดับสูง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองทำให้ทราบว่าปัจจัย LOP (Ratio Between Initial Lack of Penetration) มีผลต่อความล้าบริเวณจุดที่ทำการเชื่อมเหล็ก ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

Rocak *et al.* (2002) ใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลในการศึกษาถึงผลกระทบของส่วนผสมต่างๆ ในเซรามิกที่ใช้สำหรับหล่อเทปซึ่งใช้ในการผลิตชิพที่มีต่อลักษณะของเทป ซึ่งส่วนผสมนี้ประกอบไปด้วยออกไซด์, ตัวทำละลาย เช่น น้ำ, ตัวประสานและสารที่ใช้ทำพลาสติกต่างๆ ทำให้ทราบถึงประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง คือช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและเป็นวิธีที่มีความแม่นยำ นอกจากนี้ยังใช้ Normal Probability Plot เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของแต่ละปัจจัยและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยอีกด้วย ซึ่งเป็นการบอกถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตได้เป็นอย่างดี

Montgomery (2005) ได้กล่าวไว้ว่า ถ้าต้องการให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด จะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง คำว่า “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ” หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อที่จะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำได้หาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ ถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมาย จากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการ สำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองคือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่อง Wire Bond (รุ่น AB339) 1 เครื่อง



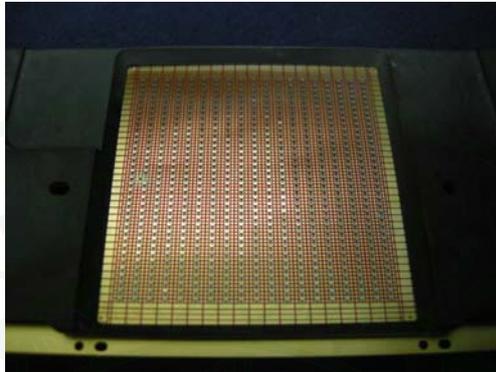
ภาพที่ 10 เครื่อง Wire Bond ที่ใช้ทดลอง

2. เครื่องทดสอบแรงเฉือนลูกบอลรุ่น Dage BT2400A Series 4000 1 เครื่อง



ภาพที่ 11 เครื่องทดสอบแรงเฉือนลูกบอลรุ่น Dage BT 2400A Series 4000

3. เซมิคอนดักเตอร์ Package UTLP (Product 74LVC2G125GT/S500) ที่ผ่านการติด Die กับ Lead frame เข้าด้วยกันแล้ว



ภาพที่ 12 Lead frame ที่ผ่านการติดหน้า Die แล้ว

4. ลวดทอง 99.99% ขนาด $20 \mu m$. (0.8 mil)
5. เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
6. เครื่องพิมพ์ 1 เครื่อง
7. โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (Minitab 15.1.1)
8. โปรแกรม Microsoft Word
9. โปรแกรม Microsoft Excel

วิธีการ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ คือ การลดของเสียในกระบวนการเชื่อมวงจร และหาระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของแรงเหนือนลูกบอลมีค่าสูงที่สุด โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้

1. วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

เมื่อได้ทำการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีของเสียมากที่สุดคือผลิตภัณฑ์ UTLP ลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นมากที่สุด คือ การเกิด BNS (Bump ball non-stick on bond pad) ซึ่งสามารถแยกสาเหตุของการเกิดปัญหา BNS ได้ดังนี้

1.1 พารามิเตอร์ที่ให้ไม่เหมาะสม มีสาเหตุมาจากเครื่องจักรไม่ทำงานตามที่สั่ง เกิดจากการสึกหรอของเครื่องจักร เนื่องจากขาดการบำรุงรักษา และการ Calibration

1.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมหรือพารามิเตอร์ที่ตั้งไม่ใช่ว่าที่ดีที่สุด

1.3 Pad Aluminum มีการปนเปื้อน ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากกระบวนการตัด (Sawing Process)

1.4 Pad Aluminum แข็งเกินไป เนื่องจากส่วนผสมของ Pad Aluminum ไม่เหมาะสม

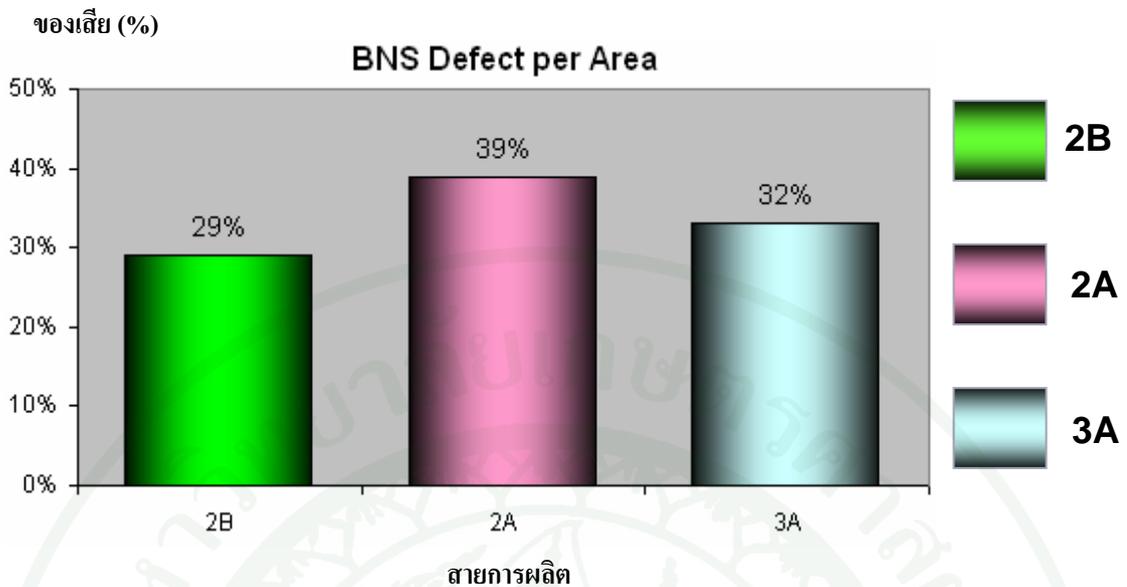
1.5 Pad Aluminum เอียง มีสาเหตุมาจาก หน้า Die เอียง เพราะ Lead Frame กระดกเนื่องจาก Heater Plate และ Top Clamp ยึดติดกันไม่แนบสนิท

1.6 Pad Aluminum เอียง มีสาเหตุมาจาก หน้า Die เอียง สืบเนื่องมาจากกระบวนการติดหน้า Die

เนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้ศึกษาเฉพาะกระบวนการเชื่อมวงจร ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดปัญหา BNS เฉพาะข้อ 1 และ ข้อ 2 เท่านั้น

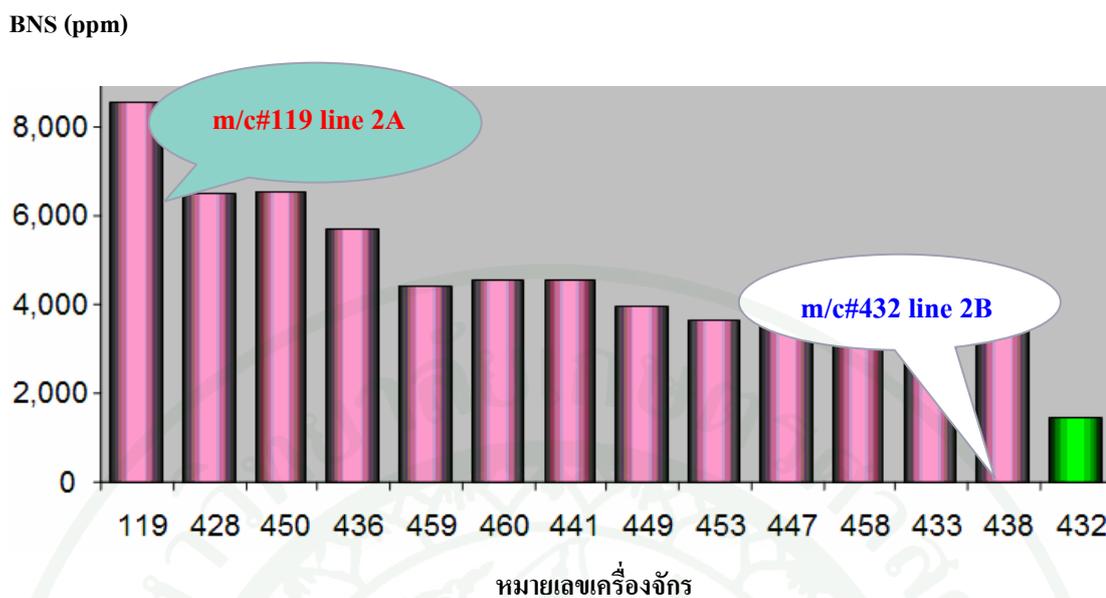
2. ทำการ Calibration เครื่อง Wire Bond รุ่น AB 339

ในปัจจุบันกระบวนการเชื่อมวงจรของผลิตภัณฑ์ UTLP จะแบ่งสายการผลิตออกเป็น 3 สายการผลิต คือ สายการผลิต 2A, 2B และ 3A จากการเก็บข้อมูลจำนวนของเสียพบว่า สายการผลิต 2A มีจำนวนของเสียลักษณะ BNS มากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 จำนวน BNS ของผลิตภัณฑ์ UTLP ในแต่ละสายการผลิต

จากนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลของเครื่อง Wire Bond แต่ละเครื่อง ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึง มีนาคม 2552 พบว่าเครื่องที่มีปัญหาการเกิด BNS มากที่สุดคือเครื่อง 119 (Machine 119 line 2A) และเครื่องที่มีปัญหาการเกิด BNS น้อยที่สุด คือเครื่อง 432 (Machine 432 line 2B) ดังภาพที่ 14 เนื่องจากเครื่องจักรทั้งหมดในสายการผลิตมีจำนวนมาก จึงขอเสนอเฉพาะบางเครื่องจักรเพื่อที่จะให้เห็นเครื่องที่มีปัญหามากที่สุดและน้อยที่สุดเท่านั้น



ภาพที่ 14 จำนวน BNS ของผลิตภัณฑ์ UTLP ในแต่ละเครื่องจักร

จากข้อมูลทั้งหมดที่มีอยู่ ทำให้ทราบว่า เครื่องจักรบางเครื่องมีความผิดปกติต่างๆ ที่เครื่องจักรทุกเครื่องมีอายุการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงทำการ Calibration เครื่อง Wire Bond รุ่น AB 339 ทุกเครื่อง โดยฝ่ายช่างที่ดูแลเรื่องการซ่อมบำรุงเครื่องจักร โดยจะมีค่าที่ใช้วัดความเที่ยงตรงของเครื่อง Wire Bond อยู่ 2 ค่า คือ ค่า Pull up force และค่า Push down force ในการ Calibration เครื่อง Wire Bond จะต้องปรับให้ค่า Pull up force มีค่าเท่ากับ 31 ± 3 กรัม และค่า Push down force มีค่าเท่ากับ 36 ± 3 กรัม

3. การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีของทากูชิ เพื่อกรองปัจจัยในการทดลอง (Screening Factor)

3.1 ทำการออกแบบตารางการทดลอง

3.1.1 การกำหนดปัจจัยที่จะนำมาพิจารณา

ศึกษาและรวบรวมปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนลูกบอล ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่อง โดยจะแบ่งตัวแปรหรือปัจจัยออกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ คือ ตัวแปรผลตอบสนอง (Response Variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามค่าของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งตัวแปรผลตอบสนองนี้เป็นตัวแปรที่สนใจจะวิเคราะห์ โดยในที่นี้คือค่าแรงเฉือนลูกบอล (Bond Shear

Strength) แทนด้วย Y (gramf.) เนื่องจากค่าแรงเหวี่ยงลูกบอลเป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของลูกบอลในการเชื่อมวงจร ถ้าค่าแรงเหวี่ยงลูกบอลยังมีค่าสูง แสดงลูกบอลยึดติดแน่นอยู่กับ Pad Aluminum ย่อมทำให้ปัญหาการเกิด BNS ลดลงได้ และปัจจัยที่ควบคุมได้ (Contra Variable) หมายถึง ปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ค่าของตัวแปรผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการกำหนดปัจจัยรวมถึงค่าของระดับแต่ละปัจจัย กำหนดจากการระดมสมองระหว่างผู้ทำการวิจัย ผู้เชี่ยวชาญซึ่งเป็นวิศวกรแผนก Wire Bond การรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และพิจารณาตามเอกสารคำแนะนำของผู้ผลิตเครื่อง Wire Bond ในส่วนของการตั้งค่าพารามิเตอร์การใช้งาน จากนั้นทดลองเชื่อมวงจรเพื่อปรับค่าที่สามารถใช้งานได้ โดยชิ้นงานทดสอบมีคุณภาพดี อยู่ภายใต้ข้อกำหนด สามารถนำไปใช้งานได้จริง พบว่าปัจจัยที่สนใจในการทดลองเพื่อลดของเสียลักษณะ BNS ในกระบวนการเชื่อมวงจรมันจะทำการศึกษปัจจัยควบคุมจำนวน 13 ปัจจัย คือ

- 1) Loop Base (LB) มีหน่วยการเคลื่อนที่เป็น step โดยจะเคลื่อนที่ step ละ $10 \mu\text{m}$
- 2) Ball Offset (BO) มีหน่วยการเคลื่อนที่เป็น step โดยจะเคลื่อนที่ step ละ $10 \mu\text{m}$
- 3) Ball Thickness (BT) มีหน่วยการเคลื่อนที่เป็น step โดยจะเคลื่อนที่ step ละ $10 \mu\text{m}$
- 4) Tail Length (TL) มีหน่วยเป็น mil
- 5) Time Base (TB) มีหน่วยเป็น msec
- 6) Power Base (PB) มีหน่วยเป็น DAC (Digital Analog Conversion)
- 7) Force Base (FB) มีหน่วยเป็น gramf.
- 8) Standby Power (SP) มีหน่วยเป็น DAC (Digital Analog Conversion)
- 9) Power Delay (PD) มีหน่วยเป็น msec

10) Contact Time (CT) มีหน่วยเป็น msec

11) Contact Power (CP) มีหน่วยเป็น DAC (Digital Analog Conversion)

12) Contact Force (CF) มีหน่วยเป็น gramf.

13) Ball Size (BS) มีหน่วยเป็น mil

ส่วนปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้จะไม่นำมาพิจารณา เช่น อุณหภูมิอากาศ ความชื้น ฯลฯ

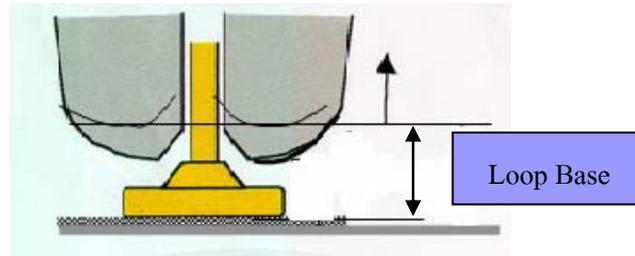
3.1.2 การจำแนกปัจจัย

การจำแนกปัจจัยหลักและปัจจัยสัญญาณรบกวนจะพิจารณาจากความสามารถในการควบคุมได้ในกระบวนการเชื่อมวงจร โดยปัจจัยทั้งหมดที่นำมาพิจารณาในการทดลองทั้ง 13 ปัจจัยสามารถทำการควบคุมได้ทุกปัจจัย จึงจัดได้ว่าเป็นปัจจัยหลักทั้งหมด

3.1.3 การกำหนดระดับของปัจจัย

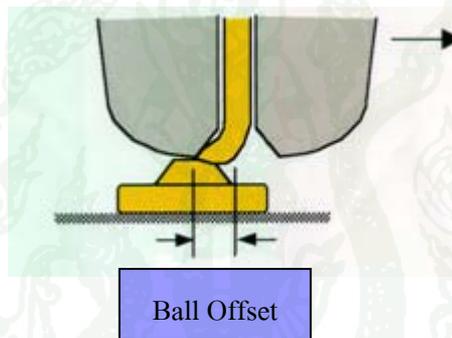
เนื่องจากการทดลองมีจุดประสงค์เพื่อกรองปัจจัย และมีปัจจัยหลายปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณา นอกจากนี้การทดสอบแรงเสียดของลูกบอลเป็นการทดสอบแบบทำลาย หากมีการกำหนดปัจจัยหลายระดับอาจทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายสูง จึงกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองของทุกๆ ปัจจัย ให้มีปัจจัยละ 2 ระดับ โดยระดับปัจจัยที่ใช้จะพิจารณาจากค่าที่ใช้งานปกติ

1) ระยะยกของเข็มจาก Pad Aluminum ก่อนปาดลูกบอลลูกที่ 1 (Loop Base; LB) การกำหนดระดับของปัจจัยจะทำการกำหนดระดับต่ำที่ 4 step และกำหนดระดับสูงที่ 6 step



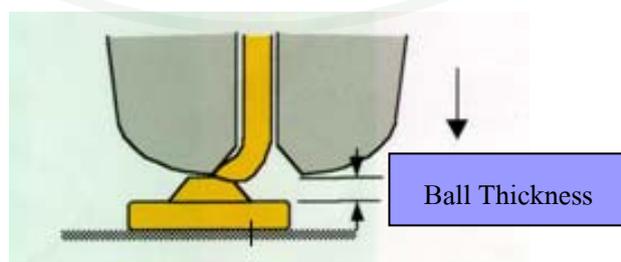
ภาพที่ 15 ระยะยกของเข็มจาก Pad Aluminum ก่อนปาดลูกบอลลูกที่ 1 (Loop Base)

2) ระยะปาดลูกบอลลูกที่ 1 (Ball Offset; BO) การกำหนดระดับของปัจจัย จะกำหนดระดับต่ำที่ 18 step และกำหนดระดับสูงที่ 21 step



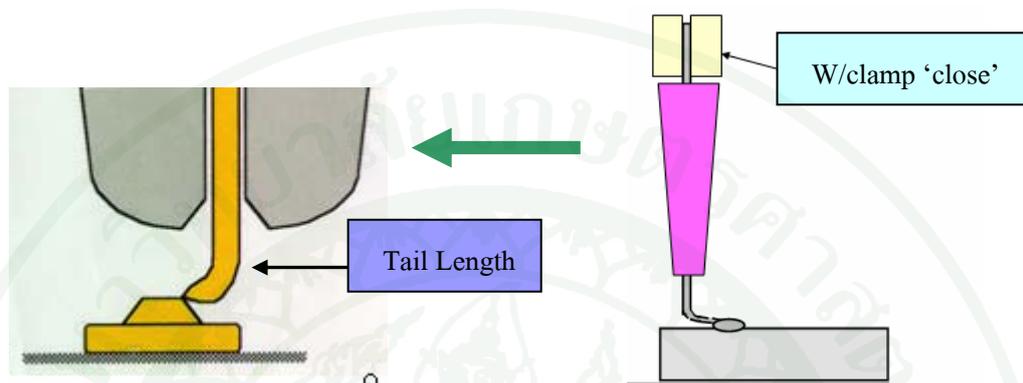
ภาพที่ 16 ระยะปาดลูกบอลลูกที่ 1 (Ball Offset)

3) ความหนาในการกดตัดลูกบอลลูกที่ 1 (Ball Thickness; BT) การกำหนดระดับของปัจจัย ทำการกำหนดระดับต่ำที่ 0 step และกำหนดระดับสูงที่ 5 step



ภาพที่ 17 ความหนาในการกดตัดลูกบอลลูกที่ 1 (Ball Thickness)

4) ความยาวของลวดทองที่ปล่อยออกมาจากปลายเข็มเพื่อสร้างลูกบอล (Tail Length; TL) โดยมี Clamp ที่จะเปิดปิดเพื่อปล่อยลวดทอง กำหนดระดับของปัจจัย ทำการกำหนดระดับต่ำที่ 30 mil และกำหนดระดับสูงที่ 40 mil

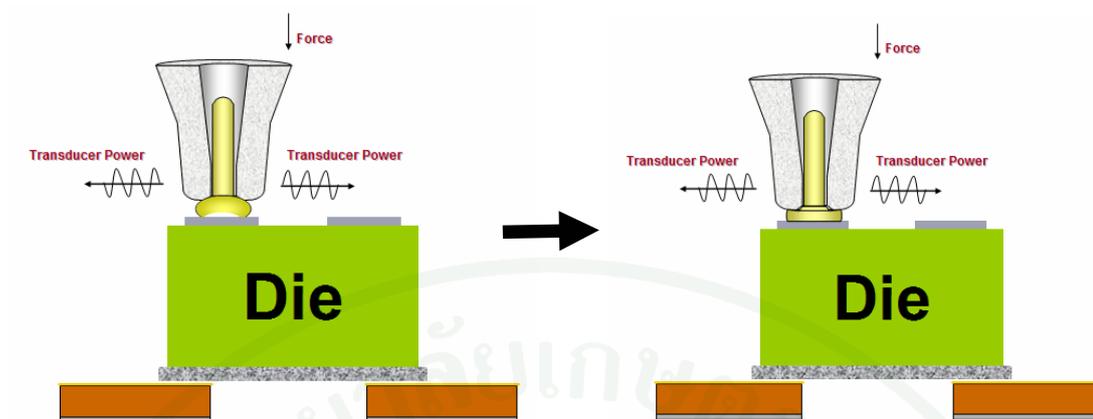


ภาพที่ 18 ความยาวของลวดทองที่ปล่อยออกมาจากปลายเข็มเพื่อสร้างลูกบอล (Tail Length)

5) ระยะเวลาในการสร้างลูกบอลช่วงที่ 2 (Time Base; TB) การกำหนดระดับของปัจจัยจะทำการกำหนดระดับต่ำที่ 10 msec และกำหนดระดับสูงที่ 20 msec

6) แรงขีที่ใช้ในการสร้างลูกบอลช่วงที่ 2 (Power Base; PB) การกำหนดระดับของปัจจัยจะทำการกำหนดระดับต่ำที่ 70 DAC และกำหนดระดับสูงที่ 80 DAC

7) แรงกดที่ใช้ในการสร้างลูกบอลช่วงที่ 2 (Force Base; FB) การกำหนดระดับของปัจจัยจะทำการกำหนดระดับต่ำที่ 15 gramf. และกำหนดระดับสูงที่ 25 gramf.



ภาพที่ 19 แรงกดและแรงขี้ที่ใช้ในการสร้างลูกบอลช่วงที่ 2 (Force Base และ Power Base)

8) แรงขี้ก่อนที่จะสัมผัสหน้า Die (Stand by Power; SP) การกำหนดระดับของปัจจัยจะทำการกำหนดระดับต่ำที่ 0 DAC และกำหนดระดับสูงที่ 20 DAC

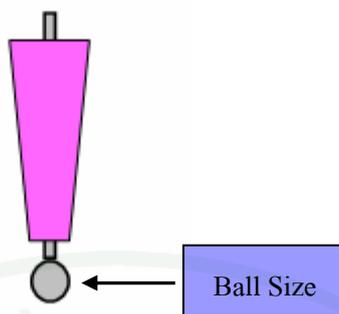
9) ระยะเวลาที่ให้ Stand by Power ค้างอยู่บนหน้า Die ก่อนสร้างลูกบอล (Power Delay; PD) การกำหนดระดับของปัจจัยจะทำการกำหนดระดับต่ำที่ 0 msec และกำหนดระดับสูงที่ 3 msec

10) ระยะเวลาในการสร้างลูกบอลช่วงที่ 1 (Contact Time; CT) การกำหนดระดับของปัจจัยจะทำการกำหนดระดับต่ำที่ 2 msec และกำหนดระดับสูงที่ 5 msec

11) แรงขี้ที่ใช้ในการสร้างลูกบอลช่วงที่ 1 (Contact Power; CP) การกำหนดระดับของปัจจัยจะทำการกำหนดระดับต่ำที่ 30 DAC และกำหนดระดับสูงที่ 50 DAC

12) แรงกดที่ใช้ในการสร้างลูกบอลช่วงที่ 1 (Contact Force; CF) การกำหนดระดับของปัจจัยจะทำการกำหนดระดับต่ำที่ 30 gramf. และกำหนดระดับสูงที่ 50 gramf.

13) ขนาดลูกบอลก่อนจะสัมผัสหน้า Die (Ball Size; BS) บางครั้งอาจเรียกว่า Free Air Ball (FAB) การกำหนดระดับของปัจจัยจะทำการกำหนดระดับต่ำที่ 16 mil และกำหนดระดับสูงที่ 18 mil



ภาพที่ 20 ขนาดลูกบอลก่อนจะสัมผัสหน้า Die (Ball Size)

ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางแสดงระดับของแต่ละปัจจัยการทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ 8 ปัจจัยและระดับที่ได้ทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยด้วยวิธีทากูจิ

ปัจจัยควบคุม	หน่วย	ระดับของปัจจัย	
		ต่ำ (-1)	สูง (+1)
Loop Base (LB)	step	4	6
Ball Offset (BO)	step	18	21
Ball Thickness (BT)	step	0	5
Tail Length (TL)	mil	30	40
Time Base (TB)	msec	10	20
Power Base (PB)	DAC	70	80
Force Base (FB)	gramf.	15	25
Standby Power (SP)	DAC	0	20
Power Delay (PD)	msec	0	3
Contact Time (CT)	msec	2	5
Contact Power (CP)	DAC	30	50
Contact Force (CF)	gramf.	30	50
Ball Size (BS)	mil	16	18

3.1.4 การเลือกตารางทดลอง

ในการออกแบบการทดลองที่มีผลการทดลองที่เที่ยงตรงที่สุด คือ การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) แต่การทดลองดังกล่าวเหมาะสมกับการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยในการทดลองไม่มากนัก และระดับของแต่ละปัจจัยมีน้อย เช่น การทดลองที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ ดังนั้นจำนวนแบบการทดลองเท่ากับ 2^3 หรือเท่ากับ 8 การทดลอง แต่ถ้าหากมี 13 ปัจจัยตามที่เรากำลังศึกษา จะมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 2^{13} หรือเท่ากับ 8,192 การทดลอง ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่า การทดสอบแรงเหวี่ยงของลูกบอลเป็นการทดสอบแบบทำลาย หากทำการทดลอง 8,192 การทดลอง จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการทดลองค่อนข้างสูง และใช้เวลาในการทำการทดลองเป็นเวลานาน เพื่อแก้ปัญหาการออกแบบการทดลองนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทากูชิ โดยใช้ตารางออกทอกอนอล อะเรย์ ซึ่งสามารถลดจำนวนการทดลองลงได้ อีกทั้งสามารถลดเวลาในการทดลองและลดค่าใช้จ่ายได้มาก โดยสามารถทำการเลือกตารางออกทอกอนอล อะเรย์ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ระดับขั้นความอิสระของปัจจัยหลัก} &= (\text{ระดับของปัจจัย} - 1) \times \text{จำนวนปัจจัย} \\ &= (2-1) \times 13 \\ &= 13 \end{aligned}$$

เนื่องจากการทดลองนี้ไม่ทำการพิจารณาปัจจัยร่วม ดังนั้น ระดับขั้นความอิสระรวม คือ 13 และในการเลือกตารางออกทอกอนอล อะเรย์ จะต้องเลือกตารางออกทอกอนอล อะเรย์ที่มีระดับขั้นความอิสระของตารางมากกว่าหรือเท่ากับระดับขั้นความอิสระของปัจจัย ดังนั้นจากการคำนวณระดับขั้นความอิสระรวมของปัจจัยเท่ากับ 13 จึงเลือกตารางมาตรฐานออกทอกอนอล อะเรย์ $L_{16}(2^{15})$ ซึ่งมีระดับขั้นความอิสระเท่ากับ 15

3.1.5 การกำหนดจำนวนรอบการทำซ้ำของการทดลอง

จำนวนการทดลองซ้ำนั้นขึ้นอยู่กับช่วงความเชื่อมั่นของผลลัพธ์ที่ต้องการ เริ่มต้นต้องทำการทดลองคร่าวๆ ก่อนเพื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูล โดยสามารถประมาณค่าได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

ทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของการทดลองเริ่มต้นที่ 2 รอบ โดยอ้างอิงข้อมูลตามตารางผนวกที่ ก ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N}$$

โดย

N คือ จำนวนสมาชิกเซตข้อมูลการทดลอง

x_i คือ ค่าสังเกตที่ได้จากการทดลอง

\bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยของการทดลอง

$$\bar{x} = \frac{(47.08 + 47.61 + 52.11 + 48.95 + \dots + 52.89)}{32}$$

$$\bar{x} = \frac{1538.57}{32} = 48.0803$$

จากนั้นทำการคำนวณหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง ได้จากสูตร

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

โดย

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

N คือ จำนวนสมาชิกเซตข้อมูลการทดลอง

x_i คือ ค่าสังเกตที่ได้จากการทดลอง

\bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยของการทดลอง

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 &= (47.08 - 48.0803)^2 + (47.61 - 48.0803)^2 + (52.11 - 48.0803)^2 + \\ &\dots + (52.89 - 48.0803)^2 = 1972.9719 \end{aligned}$$

แทนค่า $\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 = 1972.9719$ ที่ได้ลงในสมการข้างต้น ได้ดังนี้

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{32} \times 1972.9719}$$

$$\sigma = 7.8521$$

จากข้อมูลการทดลองกำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ทำการทดลองเริ่มต้นที่ 2 รอบ ได้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองเท่ากับ 7.8521 gramf. เพราะฉะนั้นจะได้รับความคลาดเคลื่อนของระบบเท่ากับ

$$e = \frac{(t_{0.025,1}) \cdot 7.8521}{\sqrt{2}} = \frac{12.706 \times 7.8521}{1.414} = 70.5578 \text{ gramf.}$$

กำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของระบบที่ต้องการให้มีค่าเท่ากับ 10% ของค่าความคลาดเคลื่อนของระบบที่คำนวณได้ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนของระบบที่ต้องการจะมีค่าเท่ากับ 7.05578 gramf.

นำผลของความคลาดเคลื่อนของระบบที่ต้องการไปทำการคำนวณหาจำนวนรอบทำซ้ำของการทดลองที่เหมาะสมได้จากสมการที่ 10 ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 7.8521 และความคลาดเคลื่อนของระบบที่ต้องการเท่ากับ 7.05578 gramf. จะได้จำนวนรอบทำซ้ำเท่ากับ

$$n' = \left(\frac{1.96 \cdot 7.8521}{7.05578} \right)^2 = 4.7577$$

ได้จำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสม คือ 5 รอบ ซึ่งจำนวนการทดลองดังกล่าวนี้เน้นเพียงพื่อความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ของผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองในด้านของความถูกต้องแม่นยำและความเชื่อมั่นของผลลัพธ์

3.2 วิธีการทำการทดลอง

โดยเลือกคุณลักษณะของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเป็นแบบค่าความ ต้องการของค่าตอบสนองของกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่ามากที่สุด โดยเลือกจากระดับของตัวแปรที่ควบคุมได้ที่ทำให้ค่า S/N Ratio (กรณีมากกว่าดีกว่า: Larger The Bester) สูงที่สุด เพราะ ค่าแรงเฉือนลูกบอลยังมีค่ามากขึ้นแสดงว่าชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าชิ้นงานมีโอกาส เกิดเป็นของเสียลักษณะ BNS ลดลงนั่นเอง

4. ทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการทดลองเพื่อกรองปัจจัย

ทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมมินิแทป รุ่น 15.1.1

5. การทดลอง 3^k Factorial Design เพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ในขั้นตอนนี้เป็น การพิจารณาแบบ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 สำหรับ k ปัจจัยซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงเฉือนลูกบอลที่วิเคราะห์ได้จากแผนการทดลองโดยใช้วิธีของทากูชิ โดยแบ่งปัจจัย ออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ กลางและสูง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ได้ค่าแรงเฉือนลูกบอลสูงที่สุด ภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้

6. ทำการทดลอง

ทำการทดลองกับกระบวนการผลิตจริงตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้และทำการบันทึก ข้อมูล ในขั้นตอนนี้ต้องติดตามดูการทำงานของกระบวนการอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการ ดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกี่ยวกับการทดลองในขั้นนี้ จะทำให้การ ทดลองนี้ใช้ไม่ได้

7. วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน และตรวจสอบความถูกต้องของ ข้อมูลที่ได้ ซึ่งหลังจากที่ได้มีการตรวจสอบรูปแบบจะทำให้ผลของการวิเคราะห์มีความถูกต้องและ ความน่าเชื่อถือมากขึ้น ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ โดยพิจารณาจาก Factorial Plots

8. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้กำหนดสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการคร่าวต่อไป



ผลและวิจารณ์

1. ผลการ Calibration เครื่อง Wire Bond รุ่น AB 339

จากการ Calibration เครื่อง Wire Bond ทุกเครื่องในสายการผลิตให้ผลดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการ Calibration เครื่อง Wire Bond รุ่น AB 339

Line	M/C No.	Pull up force (31 +/-3 gramf.)		Push down force (36 +/-3 gramf.)	
		Before	After	Before	After
2A	452	28	30.9	40	36.9
2A	418	25	32.9	45	37.9
2A	435	26	31.9	40	36.9
2A	421	22	31	45	37
2A	450	26	32	44	37
2A	447	28	31	42	38
2A	446	34	33	45	36
2A	434	31	32	37	37
2A	431	45	30	28	35
2A	451	29	31	42	39
2A	442	40	31	30	36
2A	444	44	34	28	36
2A	445	32	31	36	37
2A	436	40	30	31	38
2A	441	40	32	42	39
2A	119	25	30	44	37
2B	432	29	31	36	36
2B	428	28	31.5	40	36.5
2B	449	48	30	34	39

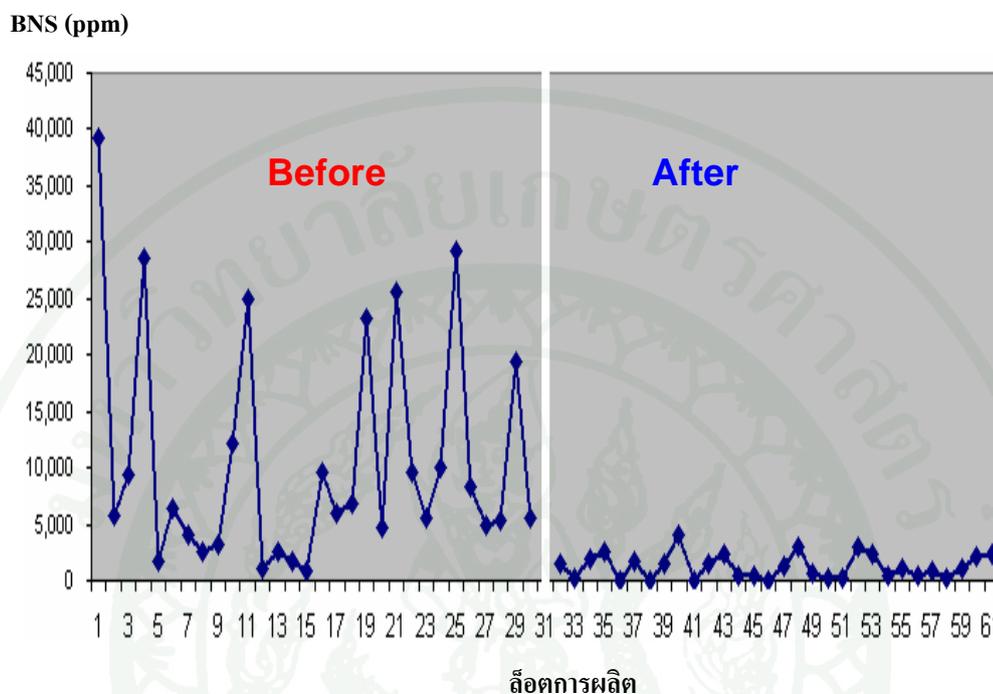
ตารางที่ 9 (ต่อ)

Line	M/C No.	Pull up force (31 +/-3 gramf.)		Push down force (36 +/-3 gramf.)	
		Before	After	Before	After
2B	457	32	31	37	38
2B	438	36	30	45	39
2B	220	38	32	41	39
2B	458	26	30	48	38
2B	433	34	32	40	37
2B	459	25	31	42	36
2B	460	29	33	38	36
3A	409	25	30	48	38
3A	443	33	31	41	38
3A	403	26	30	48	37
3A	404	28	31	37	36
3A	448	25	31	45	36
3A	455	25	31	45	37
3A	443	34	32	40	39
3A	453	37	30	36	37
3A	454	40	31	30	38
3A	456	26	31	37	36

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าก่อน Calibration เครื่อง Wire Bond หมายเลข 119 มีค่า Pull up force และ Push down force ออกนอกช่วงทั้งสองค่า ส่วนเครื่อง Wire Bond หมายเลข 432 มีค่า Pull up force และ Push down force อยู่ในช่วงทั้งสองค่า และหลัง Calibration เครื่อง Wire Bond ทุกเครื่อง มีค่า Pull up force และ Push down force อยู่ในช่วงที่กำหนด

หลังจาก Calibration เครื่องจักรจึงทำการเก็บข้อมูลของเสียจากเครื่องจักรหมายเลข 119 จำนวน 30 ล็อต (ล็อตละ 5,040 ตัว) เปรียบเทียบกับก่อน Calibration พบว่าก่อน Calibration มีของ

เสียงประมาณ 8,500 ppm และหลัง Calibration มีของเสียลดลงเหลือประมาณ 750 ppm ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 จำนวนของเสียลักษณะ BNS ของเครื่องจักรหมายเลข 119 ก่อนและหลัง Calibration

จากนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลจากเครื่องจักรทุกเครื่องในทุกสายการผลิต ปรากฏว่าหลังการ Calibration เครื่องจักรทำให้มีของเสียลดลง จากเดิม 3,500 ppm เหลือประมาณ 2,150 ppm

2. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยในกระบวนการเชื่อมวงจร (วิธีการทางทฤษฎี L_{16} ออกทอกอนอล อะเรย์) โดยพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ค่าแรงเฉือนลูกบอล (Y)

2.1 การวิเคราะห์การรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการเชื่อมวงจร และเลือกคุณลักษณะของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งยวดยิ่งดี ตามสมการที่ 13 ในหน่วยกรัม

ตัวอย่างการคำนวณของการทดลองที่ 1

$$S/N_{HB} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{47.08^2} + \frac{1}{46.92^2} + \frac{1}{45.66^2} + \frac{1}{46.34^2} + \frac{1}{46.75^2} \right) \right] = 33.3568$$

ซึ่งสามารถแสดงตารางการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งมามากยิ่งดี ได้ดังนี้

ตารางที่ 10 แสดงค่าแรงเฉือนลูกบอล (Y), อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งมามากยิ่งดีและค่าเฉลี่ยของแต่ละการทดลอง

การทดลอง	Y1 (gramf.)	Y2 (gramf.)	Y3 (gramf.)	Y4 (gramf.)	Y5 (gramf.)	S/N (dB)	Mean (gramf.)
1	47.08	46.92	45.66	46.34	46.75	33.3568	46.55
2	47.61	47.56	45.88	43.42	46.12	33.2626	46.118
3	52.11	51.11	54.35	53.8	53.98	34.4892	53.07
4	48.95	47.08	52	48.43	53.12	33.9382	49.916
5	50.55	55.06	49.34	56.75	48.79	34.2886	52.098
6	53	56.44	54.87	55.63	54.03	34.7684	54.794
7	58.16	57.58	57.89	58.98	60.54	35.3582	58.63
8	53.25	53.01	55.03	54.22	53.36	34.6089	53.774
9	52.69	51.49	51.76	49.71	51.63	34.224	51.456
10	51.46	52.81	51.17	53.6	51.9	34.3476	52.188
11	31.22	31.03	32.56	30.8	31.11	29.9181	31.344
12	31.56	28.56	31.64	30.18	31.76	29.7321	30.74
13	39.77	37.78	42.9	39.17	42.64	32.107	40.452
14	49.72	47.19	50.76	50.03	49.09	33.8591	49.358
15	50.91	49.28	52.78	54.22	53.79	34.336	52.196
16	54.74	52.89	50.84	52.42	53.09	34.4447	52.796

ตารางที่ 11 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีสัญญาณค่ายิ่งมากยิ่งดีในแต่ละระดับของปัจจัย โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป 15.1.1

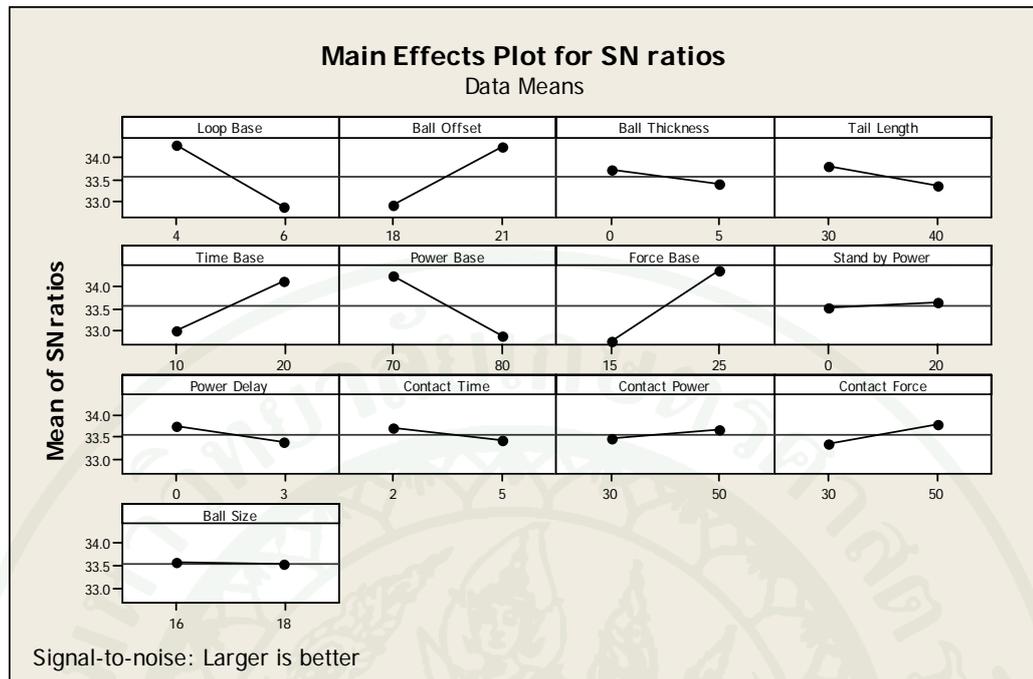
Response Table for Signal to Noise Ratios Larger is better								
Level	LP	BO	BT	TL	TB	PB	FB	SP
1	34.26	32.91	33.72	33.78	33.01	34.24	32.78	33.51
2	32.87	34.22	33.41	33.35	32.12	32.89	34.35	33.62
Delta	1.39	1.31	0.32	0.42	1.1	1.35	1.58	0.11
Rank	2	4	9	7	5	3	1	12

Level	PD	CT	CP	CF	BS
1	33.73	33.71	33.47	33.34	33.58
2	33.4	33.42	33.66	33.79	33.55
Delta	0.34	0.29	0.19	0.45	0.03
Rank	8	10	11	6	13

ผลต่างของค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีสัญญาณค่ายิ่งมากยิ่งดีระหว่างระดับของแต่ละปัจจัย ตัวอย่างการคำนวณผลกระทบของปัจจัย Loop Base สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ผลกระทบของ Loop Base} &= |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}| \\
 &= |34.26 - 32.87| \\
 &= 1.39
 \end{aligned}$$

จากผลต่างของค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีสัญญาณค่ายิ่งมากยิ่งดี พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบมากต่อค่าแรงเหวี่ยงของลูกบอล ได้แก่ Force Base, Loop Base, Power Base, Ball Offset และ Time Base และสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีสัญญาณค่ายิ่งมากยิ่งดีระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยได้ดังนี้



ภาพที่ 22 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของปัจจัยการทดลอง กรณีพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ค่าแรงเหวี่ยงของลูกบอล

การประเมินผลจากกราฟแสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งมามากยิ่งดีในแต่ละระดับของปัจจัยโดยพิจารณาตัวแปรตอบสนองคือ ค่าแรงเหวี่ยงของลูกบอล พบว่าระดับของปัจจัยการทดลองที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมวงจรถือ Force Base 25 gramf., Loop Base 4 step, Power Base 70 DAC, Ball Offset 21 step และ Time Base 20 msec สำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไปได้กำหนดค่าปัจจัยที่ไม่มีผลไว้ที่ค่าที่ให้ค่าแรงเหวี่ยงลูกบอลสูงสุดที่ได้จากการกรองปัจจัยด้วยวิธีการทากูชิ คือ Ball Thickness 0 step, Tail Length 30 mil, Stand by Power 20 DAC, Power Delay 0 msec, Contact Time 2 msec, Contact Power 50 DAC, Contact Force 50 gramf. และ Ball Size 16 mil

2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งมามากยิ่งดีของแต่ละปัจจัยการทดลอง (Analysis of Variance for S/N Ratio) ในการทดสอบความมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ได้ดังนี้

พิจารณาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของการทดลอง โดยใช้สมการที่ 14 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\overline{S/N} &= \frac{1}{16}(S/N_1+S/N_2+S/N_3\dots+S/N_{16}) \\ &= \frac{1}{16}(33.3568+33.2626+34.4892+\dots+34.4447) = 33.5650\end{aligned}$$

จากนั้นทำการพิจารณาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของปัจจัยควบคุม โดยใช้สมการที่ 15

ตัวอย่างการคำนวณค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Loop Base

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของ Loop Base

$$\begin{aligned}\overline{S/N}_{LB_1} &= \frac{33.3568+33.2626+34.4892+33.9382+34.2886+34.7684+35.3582+34.6089}{8} \\ &= 34.2589\end{aligned}$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Loop Base

$$\begin{aligned}\overline{S/N}_{LB_2} &= \frac{34.2240+34.3476+29.9181+29.7321+32.1070+33.8591+34.3360+34.4447}{8} \\ &= 32.8711\end{aligned}$$

จากนั้นพิจารณาหาผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของแต่ละปัจจัยที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนต่อสิ่งรบกวนของการทดลอง โดยใช้สมการที่ 16

ตัวอย่างการคำนวณผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Loop Base

$$\begin{aligned}
 SS_{LB} &= 8(S/N_{LB_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{LB_2} - \overline{S/N})^2 \\
 &= 8(34.2589 - 33.5650)^2 + 8(32.8711 - 33.5650)^2 = 7.7040
 \end{aligned}$$

จากนั้นทำการพิจารณาหาผลรวมกำลังสองโดยรวม โดยใช้สมการที่ 17 ดังนี้

$$\begin{aligned}
 SS_T &= \sum_{i=1}^{16} (S/N_i - \overline{S/N})^2 \\
 &= (33.3568 - 33.5650)^2 + (33.2626 - 33.5650)^2 \\
 &\quad + (34.4892 - 33.5650)^2 + \dots + (34.4447 - 33.5650)^2 = 40.0236
 \end{aligned}$$

ทั้งนี้ความแตกต่างของผลรวมกำลังสองโดยรวมกับผลรวมกำลังสองของแต่ละปัจจัย คือ ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Sum Square of Error, SS_E) สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 SS_E &= SS_T - SS_{\text{Factors}} \\
 &= 40.0236 - (7.7040 + 6.8930 + 0.4058 + \dots + 0.0045) \\
 &= 0.2974
 \end{aligned}$$

จากนั้นทำการพิจารณาค่ากำลังสองเฉลี่ย โดยที่ค่ากำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับผลรวมกำลังสองหารด้วยระดับขั้นความอิสระ และระดับขั้นความอิสระของทุกปัจจัยมีค่าเท่ากับ 1 โดยใช้สมการที่ 18

ตัวอย่างการคำนวณค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Loop Base

$$\begin{aligned}
 MS_{\text{Loop Base}} &= \frac{SS_{\text{Loop Base}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Loop Base}}} \\
 &= \frac{7.7040}{1} = 7.7040
 \end{aligned}$$

19 คั้งนี้ และความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับความผิดพลาด โดยใช้สมการที่

$$\text{Degree of Freedom}_{\text{Total}} = (\text{Number of } L_{16}\text{'s Experiments} - 1) = 16 - 1 = 15$$

$$\begin{aligned} \text{Degree of Freedom}_{\text{Error}} &= (\text{Degree of Freedom}_{\text{Total}} - \sum \text{Degree of Freedom}_{\text{Factors}}) \\ &= 15 - 13 = 2 \end{aligned}$$

คั้งนี้

$$\begin{aligned} MS_E &= \frac{SS_{\text{Error}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Error}}} \\ &= \frac{0.2974}{2} = 0.1487 \end{aligned}$$

จากนั้น ทำการทดสอบอัตราส่วนของความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยจากสมการที่ 20

ตัวอย่างการคำนวณอัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Loop Base

$$F_{\text{Loop Base}} = \frac{MS_{\text{Loop Base}}}{MS_E} = \frac{7.7040}{0.1487} = 51.81$$

ตารางที่ 12 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป 15.1.1 พิจารณาตัวแปรตอบสนองคือค่าแรงเนียนของลูกบอล

Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P-Value
Loop Base	1	7.7046	0.70456	51.91	0.019
Ball Offset	1	6.8930	6.89296	46.45	0.021
Ball Thickness	1	0.4058	0.40583	2.73	0.240
Tail Length	1	0.7175	0.71752	4.83	0.159
Time Base	1	4.8681	4.86808	32.80	0.029
Power Base	1	7.3410	7.34101	49.46	0.020
Force Base	1	9.9763	9.97631	67.22	0.015
Stand by Power	1	0.0488	0.04875	0.33	0.624
Power Delay	1	0.4602	0.46019	3.10	0.220
Contact Time	1	0.3304	0.33045	2.23	0.274
Contact Power	1	0.1496	0.14958	1.01	0.421
Contact Force	1	0.8278	0.82779	5.58	0.142
Ball Size	1	0.0044	0.00444	0.03	0.879
Error	2	0.2968	0.14841		
Total	15	40.0243			

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน พบว่า ปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ Loop Base, Ball Offset, Time Base, Power Base, Force Base มีค่า P-Value เท่ากับ 0.019, 0.021, 0.029, 0.020 และ 0.015 ตามลำดับ ดังนั้นทำให้สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัย Loop Base, Ball Offset, Time Base, Power Base และ Force Base มีอิทธิพลต่อค่าแรงเนียนของลูกบอลอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปัจจัยหลักตัวอื่นๆ ได้แก่ Ball Thickness, Tail Length, Stand by Power, Power Delay, Contact Time, Contact Power, Contact force และ Ball size มีค่า P-Value เท่ากับ 0.240, 0.159, 0.220, 0.274, 0.421, 0.142 และ 0.879 ตามลำดับ ดังนั้น

จึงเป็นปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญต่อการทดลอง ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งมามากยิ่งดีในแต่ละระดับของปัจจัย (ตารางที่ 11)

นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยควบคุมที่มีผลต่อค่าตอบสนองได้จากการ คำนวณหาร้อยละของอิทธิพลหลัก (Percentage Contribution) ว่ามีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองอยู่ในระดับใด โดยใช้สมการที่ 21

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Loop Base

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{LB} &= \left(\frac{SS_{LB}}{SS_T - SS_E} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{7.7046}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 19.39\% \end{aligned}$$

จากการคำนวณหาร้อยละของอิทธิพลหลักเพื่อต้องการทราบว่าปัจจัยแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองอยู่ในระดับใดพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อผลการทดลองการในกระบวนการเชื่อมวงจรเรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ Force Base, Loop Base, Power Base, Ball Offset, Time Base, Contact Force, Tail Length, Power Delay, Ball Thickness, Contact Time, Contact Power, Stand by Power และ Ball Size

3. ผลการวิเคราะห์โดยใช้แผนการทดลอง 3^k Factorial Design เพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม

จากผลการทดลองเบื้องต้น ซึ่งเป็นการกรองปัจจัย (Screening Factor) เพื่อขจัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อสิ่งที่ทำการศึกษาออกไป ทำให้เราทราบถึงปัจจัยหลัก 5 ปัจจัย ที่มีนัยสำคัญ หรือมีอิทธิพลต่อค่าแรงเหวี่ยงของลูก นั่นคือ Force Base, Loop Base, Power Base, Ball Offset และ Time Base ส่วนปัจจัยอื่นๆ ที่เหลือคือ Contact Force, Tail Length, Power Delay, Ball Thickness, Contact Time, Contact Power, Stand by Power และ Ball Size ไม่มีนัยสำคัญต่อการทดลอง ซึ่งสามารถละเลยได้ แต่ในการกรองปัจจัยที่ผ่านมานั้นมีระดับปัจจัยแค่ 2 ระดับ ดังนั้นจึงเลือกวิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ (3^k Factorial Design) เนื่องจากถ้าเลือกระดับปัจจัยมากกว่านี้จะเป็นการสิ้นเปลืองลวดทองซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีราคาสูงเป็นการเพิ่มต้นทุนในการทดลองอย่างมาก ในการ

ทดลองนี้ได้กำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพล คือ Force Base, LoopBase, Power Base, Ball Offset และ Time Base โดยแบ่งออกเป็นปัจจัยละ 3 ระดับ และมีการปรับค่าระดับของปัจจัยต่างๆให้ออกนอกช่วงที่ทำการทดลองและผลิตรจริง โดยสิ่งสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาด้วยก็คือ ผลที่ได้จากการทดลองนั้นต้องสอดคล้องกับคุณภาพของงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มค่าพารามิเตอร์เข้าไปมากๆ นั้นอาจทำให้ค่าของแรงเฉือนลูกบอลมากขึ้นตามไปด้วยก็จริง แต่ลูกบอลที่ได้มีรูปร่างผิดแปลกไป เช่น มีลักษณะแบนเกินไป ใหญ่เกินไปจนลูกบอลออกนอก Pad Aluminum บางครั้งอาจเกิดการช็อคกันของขาลวดทำให้ลวดทองขาด และนอกจากนี้อาจทำให้เกิดการร้าวบริเวณใต้ Die ได้ ดังนั้นผู้ทดลองจึงทำการทดลองเพิ่มค่าพารามิเตอร์ออกไปนอกช่วงที่ใช้จริงเล็กน้อย รวมทั้งประสานงานกับฝ่ายตรวจสอบคุณภาพ เพื่อทำการตรวจสอบลักษณะของลูกบอลที่ได้และตรวจสอบรอยร้าวบริเวณใต้ Die ด้วย ซึ่งระดับต่างๆที่ได้ทำการทดลองแสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 แสดงระดับของปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการทดลอง 3⁵ แฟคทอเรียล

ปัจจัย	ระดับปัจจัย			หน่วย
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)	
Force Base (A)	20	25	30	gramf.
Loop Base (B)	4	5	6	step
Power Base (C)	65	70	75	DAC
Ball Offset (D)	18	20	22	step
Time Base (E)	15	20	25	msec

การทดลอง 3⁵ แฟคทอเรียลนี้ กำหนดจำนวนครั้งในการทำซ้ำ (replication) 3 ครั้ง โดยลำดับการทดลองทำอย่างสุ่ม ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังภาคผนวกที่ ข

3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง 3⁵ แฟคทอเรียล

หลังจากที่ได้ออกแบบการทดลองและทำการทดลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติต่อไป โดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ผลการทดลองของการออกแบบการทดลอง โดยวิธีแฟคทอเรียลเมื่อระดับของปัจจัยมี 3ระดับ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน

3.1.1 กำหนดรูปแบบจำลอง (Model)

$$\begin{aligned}
 y_{ijklm} = & \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \alpha_m + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\tau\delta)_{il} + (\tau\alpha)_{im} + (\beta\gamma)_{jk} \\
 & + (\beta\delta)_{jl} + (\beta\alpha)_{jm} + (\gamma\delta)_{kl} + (\gamma\alpha)_{km} + (\delta\alpha)_{lm} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + (\tau\beta\delta)_{ijl} \\
 & + (\tau\beta\alpha)_{ijm} + (\tau\gamma\delta)_{ikl} + (\tau\gamma\alpha)_{ikm} + (\tau\delta\alpha)_{ilm} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + (\beta\gamma\alpha)_{jkm} \\
 & + (\beta\delta\alpha)_{jlm} + (\gamma\delta\alpha)_{klm} + (\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl} + (\tau\beta\gamma\alpha)_{ijkm} + (\tau\beta\delta\alpha)_{ijlm} + (\tau\gamma\delta\alpha)_{iklm} \\
 & + (\beta\gamma\delta\alpha)_{jklm} + (\tau\beta\gamma\delta\alpha)_{ijklm} + \varepsilon_{ijklm}
 \end{aligned}$$

โดยที่ i	=	1, 2, 3
j	=	1, 2, 3
k	=	1, 2, 3
l	=	1, 2, 3
m	=	1, 2, 3
μ	หมายถึง	ผลเฉลี่ยทั้งหมด (Overall Mean)
τ_i	หมายถึง	อิทธิพลของปัจจัย Force Base ที่ระดับ i
β_j	หมายถึง	อิทธิพลของปัจจัย Loop Base ที่ระดับ j
γ_k	หมายถึง	อิทธิพลของปัจจัย Power Base ที่ระดับ k
δ_l	หมายถึง	อิทธิพลของปัจจัย Ball Offset ที่ระดับ l
α_m	หมายถึง	อิทธิพลของปัจจัย Time Base ที่ระดับ m
$(\tau\beta)_{ij}$	หมายถึง	อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i และปัจจัย Loop Base ระดับที่ j
$(\tau\gamma)_{ik}$	หมายถึง	อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i และปัจจัย Power Base ระดับที่ k
$(\tau\delta)_{il}$	หมายถึง	อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i และปัจจัย Ball Offset ระดับที่ l
$(\tau\alpha)_{im}$	หมายถึง	อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i และปัจจัย Time Base ระดับที่ m
$(\beta\gamma)_{jk}$	หมายถึง	อิทธิพลร่วมของปัจจัย Loop Base ระดับที่ j และปัจจัย Power Base ระดับที่ k

- $(\beta\delta)_{jl}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Loop Base ระดับที่ j และปัจจัย Ball Offset ระดับที่ 1
- $(\beta\alpha)_{jm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Loop Base ระดับที่ j และปัจจัย Time Base ระดับที่ m
- $(\gamma\delta)_{kl}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Power Base ระดับที่ k และปัจจัย Ball Offset ระดับที่ 1
- $(\gamma\alpha)_{km}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Power Base ระดับที่ k และปัจจัย Time Base ระดับที่ m
- $(\delta\alpha)_{lm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Ball Offset ระดับที่ 1 และปัจจัย Time Base ระดับที่ m
- $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i ปัจจัย Loop Base ระดับที่ j และปัจจัย Power Base ระดับที่ k
- $(\tau\beta\delta)_{ijl}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i ปัจจัย Loop Base ระดับที่ j และปัจจัย Ball Offset ระดับที่ 1
- $(\tau\beta\alpha)_{ijm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i ปัจจัย Loop Base ระดับที่ j และปัจจัย Time Base ระดับที่ m
- $(\tau\gamma\delta)_{ikl}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i ปัจจัย Power Base ระดับที่ k และปัจจัย Ball Offset ระดับที่ 1
- $(\tau\gamma\alpha)_{ikm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i ปัจจัย Power Base ระดับที่ k และปัจจัย Time Base ระดับที่ m
- $(\tau\delta\alpha)_{ilm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i ปัจจัย Ball Offset ระดับที่ 1 และปัจจัย Time Base ระดับที่ m
- $(\beta\gamma\delta)_{jkl}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Loop Base ระดับที่ j ปัจจัย Power Base ระดับที่ k และปัจจัย Ball Offset ระดับที่ 1
- $(\beta\gamma\alpha)_{jkm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Loop Base ระดับที่ j ปัจจัย Power Base ระดับที่ k และปัจจัย Time Base ระดับที่ m
- $(\beta\delta\alpha)_{jlm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Loop Base ระดับที่ j ปัจจัย Ball Offset ระดับที่ 1 และปัจจัย Time Base ระดับที่ m
- $(\gamma\delta\alpha)_{klm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Power Base ระดับที่ k ปัจจัย Ball Offset ระดับที่ 1 และปัจจัย Time Base ระดับที่ m

$(\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i ปัจจัย Loop Base ระดับที่ j ปัจจัย Power Base ระดับที่ k และ ปัจจัย Ball Offset ระดับที่ l

$(\tau\beta\gamma\alpha)_{ijkm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i ปัจจัย Loop Base ระดับที่ j ปัจจัย Power Base ระดับที่ k และ Time Base ระดับที่ m

$(\tau\beta\delta\alpha)_{ijlm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i ปัจจัย Loop Base ระดับที่ j ปัจจัย Ball Offset ระดับที่ l และ ปัจจัย Time Base ระดับที่ m

$(\tau\gamma\delta\alpha)_{iklm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i ปัจจัย Power Base ระดับที่ k ปัจจัย Ball Offset ระดับที่ l และปัจจัย Time Base ระดับที่ m

$(\beta\gamma\delta\alpha)_{jklm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Loop Base ระดับที่ j ปัจจัย Power Base ระดับที่ k ปัจจัย Ball Offset ระดับที่ l และปัจจัย Time Base ระดับที่ m

$(\tau\beta\gamma\delta\alpha)_{ijklm}$ หมายถึง อิทธิพลร่วมของปัจจัย Force Base ระดับที่ i ปัจจัย Loop Base ระดับที่ j ปัจจัย Power Base ระดับที่ k ปัจจัย Ball Offset ระดับที่ l และปัจจัย Time Base ระดับที่ m

ε_{ijklm} หมายถึง ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการทดลอง

3.1.2 ตั้งสมมติฐานการทดสอบ (Hypothesis Test)

1) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

H_0 : ไม่มีความแตกต่างระหว่างระดับของปัจจัยหลักที่ x ;

$x = 1, 2, \dots, 5$

H_1 : มีอย่างน้อย 1 ตัวที่แตกต่างกัน

2) การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยร่วม

H_0 : ไม่มีความแตกต่างระหว่างระดับของปัจจัยร่วมที่ x และ y ;

$x, y = 1, 2, \dots, 5$

H_1 : มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน

3.1.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 3^5 แฟกทอเรียลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 15.1.1 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบอยู่ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ผลตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของการทดลองแบบ 3^5 แฟกทอเรียล

แหล่งความ ผันแปร	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า P-Value
A	7738.75	2	3869.37	900.12	0.000
B	1343.89	2	671.95	156.31	0.000
C	20.73	2	10.37	2.41	0.091
D	20.62	2	10.31	2.40	0.092
E	418.01	2	209.01	48.62	0.000
A*B	992.43	4	248.11	57.72	0.000
A*C	352.47	4	88.12	20.50	0.000
A*D	549.88	4	137.47	31.98	0.000
A*E	16.43	4	4.11	0.96	0.432

ตารางที่ 14 (ต่อ)

แหล่งความ ผันแปร	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า P-Value
B*C	525.15	4	131.29	30.54	0.000
B*D	382.46	4	95.62	22.24	0.000
B*E	36.12	4	9.03	2.10	0.080
C*D	268.21	4	67.05	15.60	0.000
C*E	44.96	4	11.24	2.61	0.035
D*E	127.60	4	31.90	7.42	0.000
A*B*C	1796.33	8	224.54	52.23	0.000
A*B*D	1032.71	8	129.09	30.03	0.000
A*C*D	423.91	8	52.99	12.33	0.000
A*B*E	431.05	8	53.88	12.53	0.000
A*C*E	166.69	8	20.84	4.85	0.000
A*D*E	122.99	8	15.37	3.58	0.000
B*C*D	629.65	8	78.71	18.31	0.000
B*C*E	287.1	8	35.89	8.35	0.000
B*D*E	227.35	8	28.42	6.61	0.000
C*D*E	183.82	8	22.98	5.35	0.000
A*B*C*D	667.19	16	41.70	9.70	0.000
A*B*C*E	523.82	16	32.74	7.62	0.000
A*B*D*E	144.42	16	9.03	2.10	0.008
A*C*D*E	107.24	16	6.70	1.56	0.076
B*C*D*E	234.43	16	14.65	3.41	0.000
A*B*C*D*E	419.65	32	13.11	3.05	0.000
Error	2089.18	486	4.30		
Total	22325.24	728			

ตารางที่ 15 Unusual Observations ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 3⁵
แฟกทอเรียล

ค่าสังเกตที่	ค่าแรงเฉือนลูกบอล (Bond Shear Strength)	ค่าที่ถูกฟิต	ค่าคลาดเคลื่อน (Residual)
31	39.36	43.680	-4.320
36	33.67	38.260	-4.590
43	33.80	37.233	-3.433
46	52.64	48.640	4.000
101	44.16	47.843	-3.683
106	35.95	40.913	-4.963
120	32.71	37.267	-4.557
135	34.94	39.080	-4.140
149	36.15	40.050	-3.900
185	55.60	51.600	4.000
187	40.42	45.067	-4.647
199	50.51	46.487	4.023
208	39.69	43.137	-3.447
229	34.78	39.190	-4.410
241	46.80	42.547	4.253
253	43.34	39.587	3.753
371	43.00	39.453	3.547
378	43.71	39.080	4.630
396	49.58	45.743	3.837
439	41.97	46.763	-4.793
456	54.47	50.170	4.300
496	34.96	39.587	-4.627
532	43.87	48.640	-4.770

ตารางที่ 15 (ต่อ)

ค่าสังเกตที่	ค่าแรงเฉือนลูกบอล (Bond Shear Strength)	ค่าที่ถูกฟิต	ค่าคลาดเคลื่อน (Residual)
642	40.44	36.937	3.503
671	46.94	51.600	-4.660
673	49.50	45.067	4.433
681	48.94	52.613	-3.673
690	44.23	48.020	-3.790
700	44.77	49.020	-4.250
701	46.65	50.303	-3.653
715	44.80	39.190	5.610

จากตารางที่ 15 เนื่องจากเป็นค่าสังเกตที่มีค่าคลาดเคลื่อนต่ำหรือสูงมาก จึงทำการตรวจสอบว่าเป็นค่าที่ผิดปกติ (Outlier) หรือไม่ โดยการแปลงให้อยู่ในรูปค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residual) ดังนี้

$$d_{ij} = \frac{e_{ij}}{\sqrt{MSE}}$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าสังเกตที่ 31

$$d_{31} = \frac{e_{31}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-4.320}{\sqrt{4.30}} = -2.0833$$

จากการตรวจสอบพบว่าค่าสังเกตที่ 715 มีค่าอยู่นอกช่วง $\pm 2.576 *$ ถือว่าเป็นค่าที่ผิดปกติ (Outlier) จึงทำการตัดค่าสังเกตที่ 715 ออก แล้วทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนใหม่ ส่วนค่าสังเกตตัวอื่นๆที่เหลือ มีค่าตกอยู่ในช่วง $\pm 2.576 *$ สามารถสรุปได้ว่าไม่เป็นค่าผิดปกติ (หมายเหตุ * ทดสอบแบบสองทางที่ระดับนัยสำคัญ 1% ค่าวิกฤตของ Z คือ $Z_{0.005} = 2.576$)

ตารางที่ 16 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของการทดลองแบบ 3⁵ แฟกทอเรียล เมื่อตัดค่าสังเกตที่ผิดปกติออกแล้ว

แหล่งความ ผันแปร	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า P-Value
A	7634.45	2	3817.23	906.65	0.000
B	1369.13	2	684.56	162.59	0.000
C	22.68	2	11.34	2.69	0.069
D	24.09	2	12.05	2.86	0.058
E	432.79	2	216.40	51.40	0.000
A*B	1006.91	4	251.73	59.79	0.000
A*C	355.58	4	88.90	21.11	0.000
A*D	554.79	4	138.70	32.94	0.000
A*E	14.12	4	3.53	0.84	0.501
B*C	511.75	4	127.94	30.39	0.000
B*D	399.55	4	99.89	23.72	0.000
B*E	37.95	4	9.49	2.25	0.062
C*D	258.93	4	64.73	15.37	0.000
C*E	41.60	4	10.40	2.47	0.044
D*E	123.53	4	30.88	7.34	0.000
A*B*C	1812.87	8	226.61	53.82	0.000
A*B*D	1029.81	8	128.73	30.57	0.000
A*C*D	423.56	8	52.94	12.58	0.000
A*B*E	438.87	8	54.86	13.03	0.000
A*C*E	164.52	8	20.56	4.88	0.000
A*D*E	127.11	8	15.89	3.77	0.000
B*C*D	628.95	8	78.62	18.67	0.000
B*C*E	282.80	8	35.35	8.40	0.000

ตารางที่ 16 (ต่อ)

แหล่งความ ผันแปร	ผลบวกกำลังสอง (SS)	องศาเสรี (d.f.)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS)	อัตราส่วน F	ค่า P-Value
B*D*E	221.44	8	27.68	6.57	0.000
C*D*E	186.79	8	23.35	5.55	0.000
A*B*C*D	662.29	16	41.39	9.83	0.000
A*B*C*E	548.47	16	34.28	8.14	0.000
A*B*D*E	149.40	16	9.34	2.22	0.004
A*C*D*E	117.29	16	7.33	1.74	0.036
B*C*D*E	238.08	16	14.88	3.53	0.000
A*B*C*D*E	435.95	32	13.62	3.24	0.000
Error	2041.98	485	4.21		
Total	22298.03	727			

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในตารางที่ 16 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงเหวี่ยงของลูกบอล ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยดังนี้ คือ AB, AC, AD, BC, BD, CD, CE และ DE

3.2 ตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

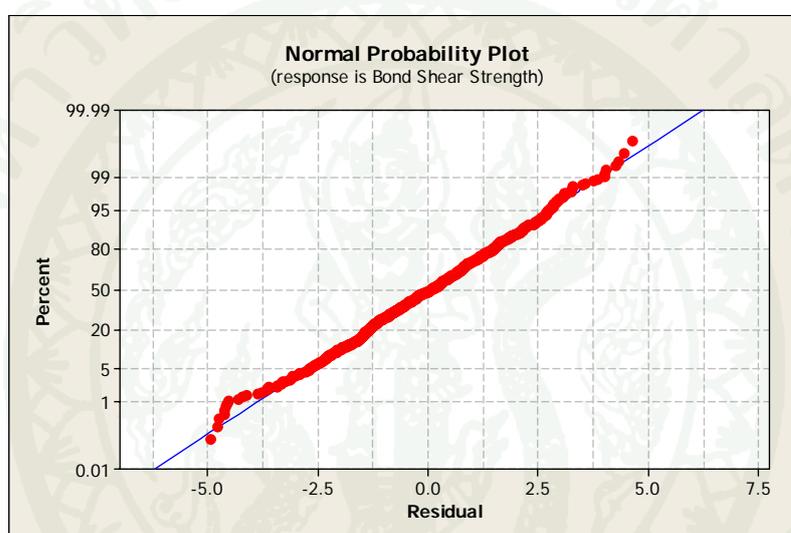
เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยมีสมมติฐานที่ว่า รูปแบบของค่าคลาดเคลื่อนเป็นไปตามหลัก $\varepsilon_{ijklm} \sim NID(0, \sigma^2)$ จึงทำให้ข้อมูลที่ได้อาจมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยมีการตรวจสอบคุณสมบัติของค่าคลาดเคลื่อน 3 ข้อดังนี้

3.2.1 ตรวจสอบการกระจายของค่าคลาดเคลื่อนว่ามีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่

3.2.2 ตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าคลาดเคลื่อน โดยใช้แผนภาพการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างลำดับที่ของข้อมูลกับค่าคลาดเคลื่อน

3.2.3 ตรวจสอบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) หรือไม่ โดยใช้แผนภาพการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าที่ถูกฟิตกับค่าคลาดเคลื่อน

1) สมมติฐานของความเป็นปกติ



ภาพที่ 23 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับการทดลองแบบ 3^5 แฟคทอเรียล

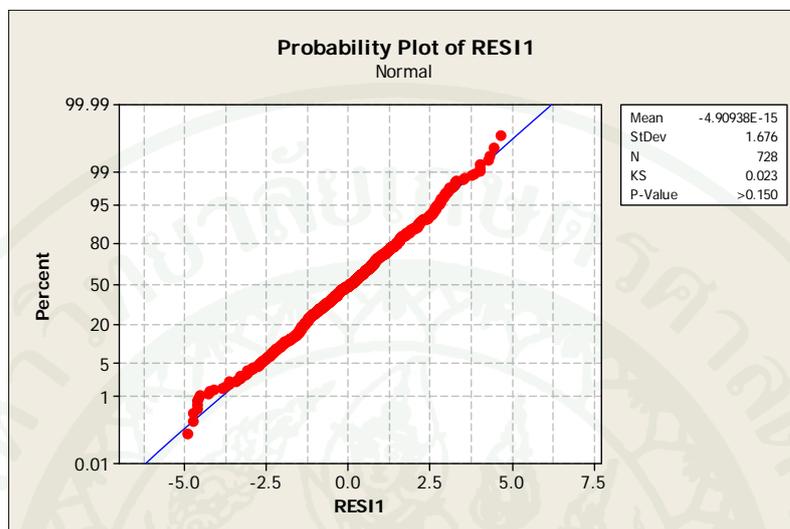
จากภาพข้างต้นพบว่าเทอมของความผิดปกติ น่าจะมีการแจกแจงแบบปกติ เนื่องจากลักษณะจุดที่ปรากฏบนแผนภาพส่วนใหญ่มีการกระจายอยู่ในแนวเส้นตรง แต่เพื่อความมั่นใจจึงทำการทดสอบสมมติฐานโดยใช้การทดสอบแบบ Kolmogorov - Smirnov ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีสมมติฐานดังนี้

H_0 : ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ความคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

คำนวณค่าสถิติทดสอบ (Test Statistic) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab

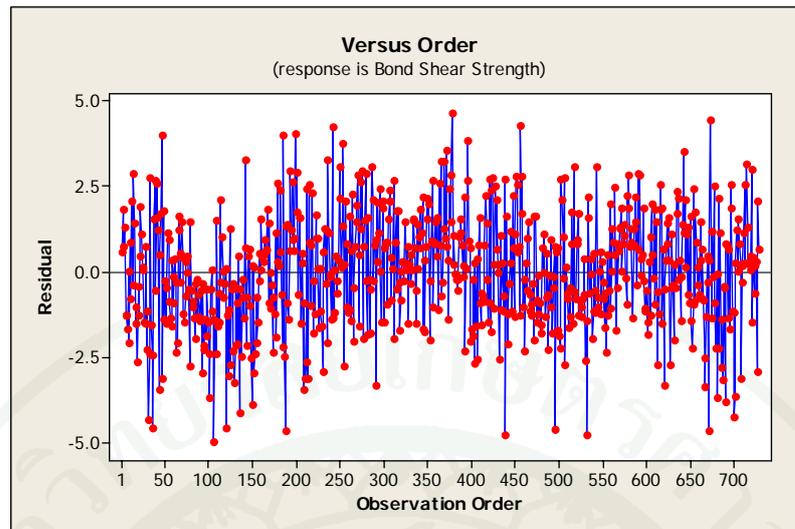
15.1.1 ผลลัพธ์ที่ได้ดังแสดง ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับการทดลองแบบ 3^5 แฟคทอเรียล โดยใช้การทดสอบ Kolmogorov - Smirnov

เมื่อพิจารณาค่า P-Value ที่ได้จากภาพที่ 24 พบว่าค่า P-Value > 0.15 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

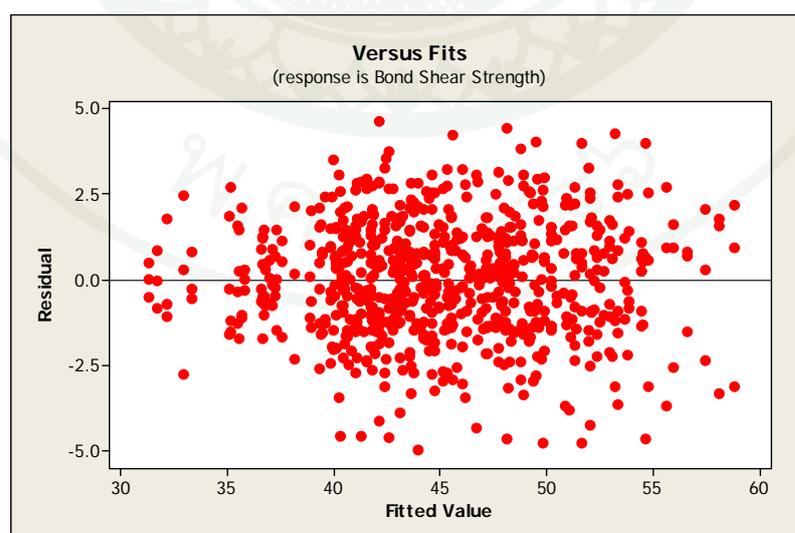
2) สมมติฐานของความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน



ภาพที่ 25 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล สำหรับการทดลองแบบ 3^3 แฟคทอเรียล

จากภาพที่ 25 จะเห็นได้ว่าข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกนและไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกันและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

3) สมมติฐานของความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน



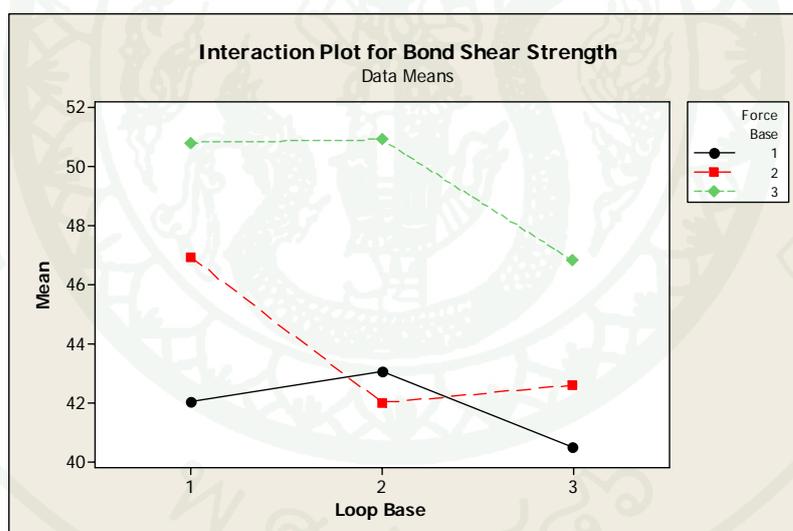
ภาพที่ 26 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าที่ถูกฟิต สำหรับการทดลองแบบ 3^3 แฟคทอเรียล

จากภาพที่ 26 จะเห็นได้ว่าข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกนและไม่มีรูปแบบ แสดงว่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

3.3 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแผนการทดลอง 3⁵ แฟคทอเรียล โดยพิจารณาจาก Factorial Plots

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง 3⁵ แฟคทอเรียลข้างต้น ดังตารางที่ 16 เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อแรงเชื่อมลูกบอล (Bond Shear Strength) ทั้งหมด มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละระดับของปัจจัยและค่าแรงเชื่อมลูกบอลได้ผลดังนี้

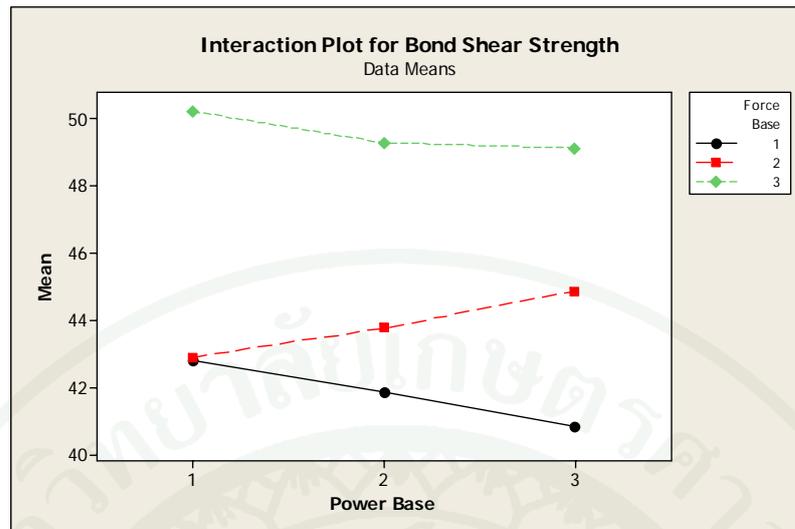
3.3.1 ปัจจัยร่วมระหว่าง Force Base และ Loop Base (AB)



ภาพที่ 27 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Force Base และ Loop Base

จากภาพที่ 27 พบว่าการกำหนดค่าที่ Force Base (ระดับสูง) = 30 gramf. และ Loop Base (ระดับกลาง) = 5 msec จะส่งผลให้ค่าแรงเชื่อมลูกบอลสูงขึ้น

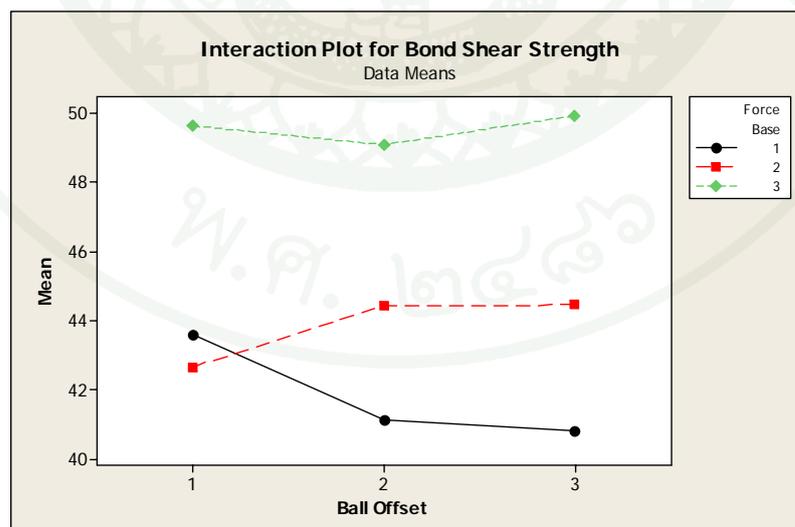
3.3.2 ปัจจัยร่วมระหว่าง Force Base และ Power Base (AC)



ภาพที่ 28 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Force Base และ Power Base

จากภาพที่ 28 พบว่าการกำหนดค่าที่ Force Base (ระดับสูง) = 30 gramf. และ Power Base (ระดับต่ำ) = 65 DAC จะส่งผลให้ค่าแรงเฉือนลูกบอลสูงขึ้น

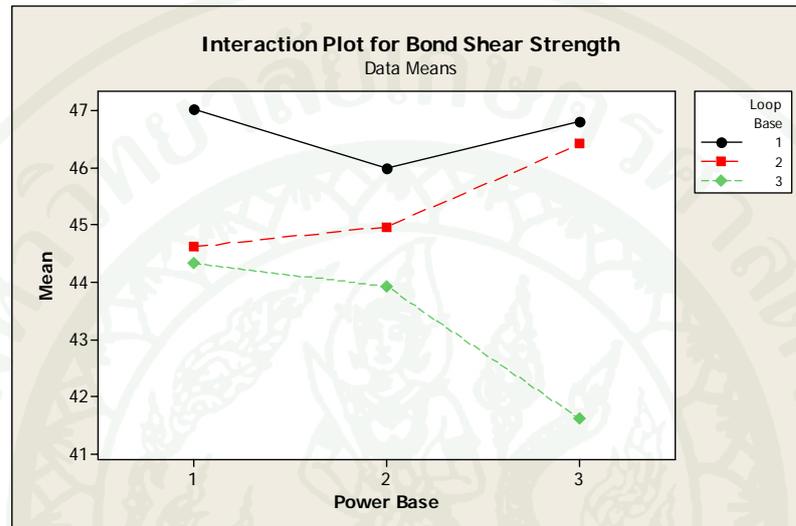
3.3.3 ปัจจัยร่วมระหว่าง Force Base และ Ball Offset (AD)



ภาพที่ 29 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Force Base และ Ball Offset

จากภาพที่ 29 พบว่าการกำหนดค่าปัจจัยทั้งสองที่ระดับสูงคือ Force Base = 30 gramf. และ Ball Offset = 22 Step จะส่งผลให้ค่าแรงเฉือนลูกบอลสูงขึ้น

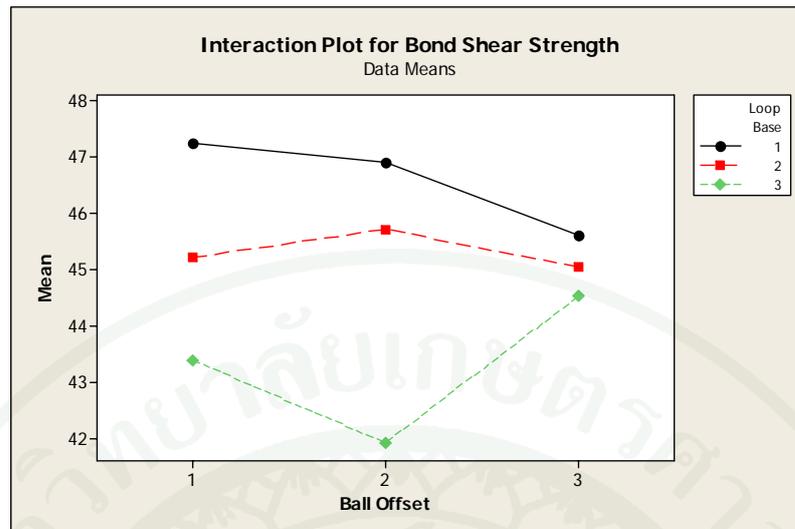
3.3.4 ปัจจัยร่วมระหว่าง Loop Base และ Power Base (BC)



ภาพที่ 30 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Loop Base และ Power Base

จากภาพที่ 30 พบว่าการกำหนดค่าปัจจัยทั้งสองที่ระดับต่ำคือ Loop Base = 4 Step และ Power Base = 65 DAC จะส่งผลให้ค่าแรงเฉือนลูกบอลสูงขึ้น

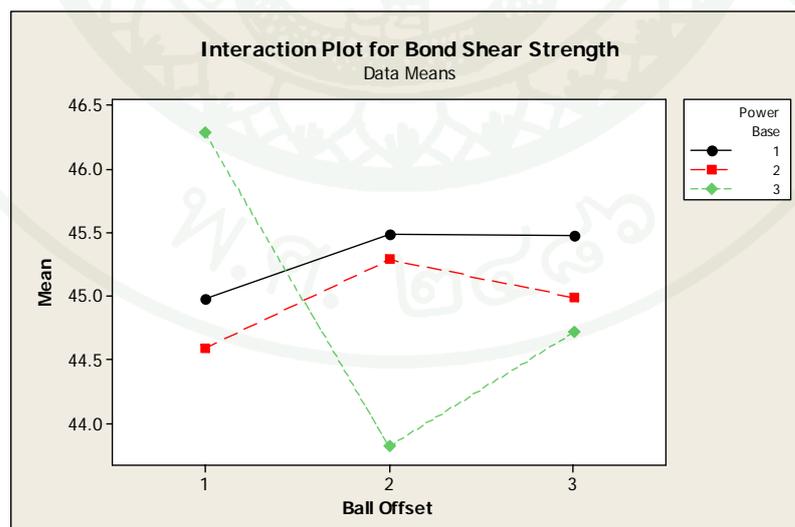
3.3.5 ปัจจัยร่วมระหว่าง Loop Base และ Ball Offset (BD)



ภาพที่ 31 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Loop Base และ Ball Offset

จากภาพที่ 31 พบว่าการกำหนดค่าปัจจัยทั้งสองที่ระดับต่ำคือ Loop Base = 4 Step และ Ball Offset = 18 Step จะส่งผลให้ค่าแรงเฉือนลูกบอลสูงขึ้น

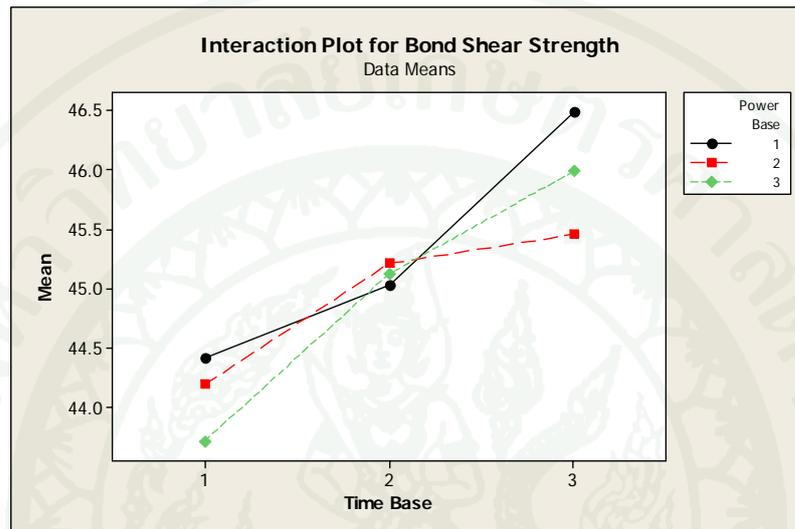
3.3.6 ปัจจัยร่วมระหว่าง Power Base และ Ball Offset (CD)



ภาพที่ 32 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Power Base และ Ball Offset

จากภาพที่ 32 พบว่าการกำหนดค่าที่ Power Base (ระดับสูง) = 75 DAC และ Ball Offset (ระดับต่ำ) = 18 Step จะส่งผลให้ค่าแรงเชื่อมลูกบอลสูงขึ้น

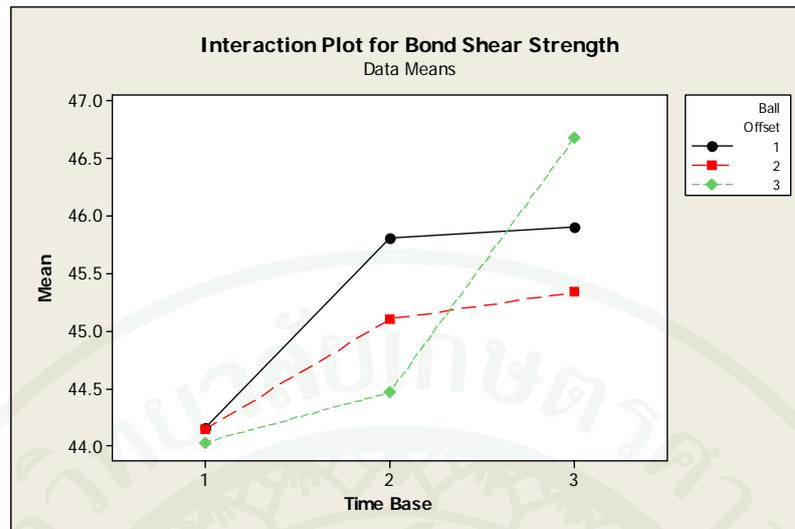
3.3.7 ปัจจัยร่วมระหว่าง Power Base และ Time Base (CE)



ภาพที่ 33 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Power Base และ Time Base

จากภาพที่ 33 พบว่าการกำหนดค่าที่ Power Base (ระดับต่ำ) = 65 DAC และ Time Base (ระดับสูง) = 25 msec จะส่งผลให้ค่าแรงเชื่อมลูกบอลสูงขึ้น

3.3.8 ปัจจัยร่วมระหว่าง Ball Offset และ Time Base (DE)



ภาพที่ 34 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Ball Offset และ Time Base

จากภาพที่ 34 พบว่าการกำหนดค่าปัจจัยทั้งสองที่ระดับสูงคือ Ball Offset = 4 Step และ Time Base = 25 msec จะส่งผลให้ค่าแรงเฉือนลูกบอลสูงขึ้น

จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ปัจจัยที่ให้ค่าแรงเฉือนที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ผลของแรงเฉือนของลูกบอลมีค่าสูงที่สุด แสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 เงื่อนไขที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

เงื่อนไข	Force Base (gramf.)	Loop Base (step)	Power Base (DAC)	Ball Offset (step)	Time Base (msec)
1	30	4	75	18	25
2	30	4	65	22	25

จากนั้นทำการทดลองที่เงื่อนไขดังกล่าวเพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ผลด้วยการทดสอบ T หนึ่งตัวอย่าง ที่ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval: CI) เท่ากับ 95% ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 18 และ 19

ตารางที่ 18 แสดงผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด Force Base = 30 gramf., Loop Base = 4 step, Power Base = 75 DAC, Ball Offset = 18 step และ Time Base = 25 msec

ตัวแปร	จำนวน ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย (gramf.)	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	SE Mean	ช่วงความ เชื่อมั่นที่ 95%
ค่าแรงเหวี่ยงลูกบอล	30	47.876	1.425	0.26	(47.344, 48.408)

ตารางที่ 19 แสดงผลการทดสอบยืนยันที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม กำหนด Force Base = 30 gramf., Loop Base = 4 step, Power Base = 65 DAC, Ball Offset = 22 step และ Time Base = 25 msec

ตัวแปร	จำนวน ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย (gramf.)	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	SE Mean	ช่วงความ เชื่อมั่นที่ 95%
ค่าแรงเหวี่ยงลูกบอล	30	53.261	1.313	0.24	(52.770, 53.751)

จากการทดลองยืนยันผลที่เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสมทั้งสองกรณี จะเห็นได้ว่า ที่ Force Base = 30 gramf., Loop Base = 4 step, Power Base = 65 DAC, Ball Offset = 22 step และ Time Base = 25 msec ให้ค่าเฉลี่ยแรงเหวี่ยงลูกบอลที่สูงกว่า และนอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีคุณภาพดี ซึ่งตรวจสอบได้จากตัวเลข (Code) ที่ได้จากฝ่ายประกันคุณภาพ ซึ่งทำการสังเกตลักษณะการประสานของลวดทองและโลหะที่ฐานรองรับลูกบอล (Intermetallic) หลังจากที่ลูกบอลถูกเหวี่ยงออกไปแล้ว โดย Code ที่ได้คือ Ball Lift (Code 1) ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะที่ปกติและ Ball Shear (Code 2) ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะของการเชื่อมวงจรมงจรที่ดีจึงนำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงเพื่อหาจำนวน BNS ต่อไป

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง โดยเก็บข้อมูลของเสียลักษณะ BNS ของเครื่อง Wire Bond รุ่น AB339 ซึ่งเป็นรุ่นที่ทำการผลิตผลิตภัณฑ์ UTLP แสดงดังตารางผนวกที่ 1 พบว่า จำนวนของเสียลดลงจาก 2,150 ppm เหลือ 747 ppm ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียในกระบวนการเชื่อมวงจร โดยมุ่งเน้นไปที่ของเสียลักษณะ BNS คือ การที่ลูกบอลไม่ยึดติดกับ Pad Aluminum ซึ่งเป็นลักษณะที่พบบ่อยที่สุดด้วยการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยตัวแปรผลตอบสนองที่สนใจจะวิเคราะห์ในที่นี่คือ ค่าแรงเฉือนลูกบอล (Bond Shear Strength) เนื่องจากเป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของลูกบอลในการเชื่อมวงจร ถ้าค่าแรงเฉือนลูกบอลยังมีค่าสูง แสดงลูกบอลยึดติดแน่นอยู่กับ Pad Aluminum ย่อมทำให้ปัญหาการเกิด BNS ลดลงได้ เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงเฉือนของลูกบอล ในกระบวนการเชื่อมวงจร และหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ค่าแรงเฉือนของลูกบอลมีค่าสูงที่สุด

ในการวิจัยครั้งนี้ได้มีการออกแบบการทดลองและดำเนินการทดลองพร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น ซึ่งเป็นการกรองปัจจัย (Screening Factor) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงเฉือนลูกบอลด้วยวิธีการของทากูชิ โดยใช้ตารางออกทอกอนอล อะเรย์ $L_{16}(2^{15})$ จากการระดมสมองระหว่างผู้ทำการวิจัย ผู้เชี่ยวชาญซึ่งเป็นวิศวกรแผนก Wire Bond การรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และพิจารณาตามเอกสารคำแนะนำของผู้ผลิตเครื่อง Wire Bond ในส่วนของการตั้งค่าพารามิเตอร์การใช้งาน พบว่าปัจจัยที่นำมาศึกษามีทั้งหมด 13 ปัจจัย คือ ปัจจัย Loop Base, Ball Offset, Ball Thickness, Tail Length, Time Base, Power Base, Force Base, Stand by Power, Power Delay, Contact Time, Contact Power, Contact Force และ Ball Size ใช้การวิเคราะห์เพื่อให้ได้ค่า S/N Ratio (กรณีมากกว่าดีกว่า : Larger The Better) สูงที่สุด พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบมากต่อค่าแรงเฉือนลูกบอล ได้แก่ Force Base, Loop Base, Power Base, Ball Offset และ Time Base จึงนำปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดลองทั้ง 5 ปัจจัยนี้มาทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3 ระดับ (3^5 Factorial Design) เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าแรงเฉือนลูกบอลมีค่าสูงสุด ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อแรงเฉือนลูกบอล คือ ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยดังนี้ คือ

1. Force Base และ Loop Base
2. Force Base และ Power Base

3. Force Base และ Ball Offset
4. Loop Base และ Power Base
5. Loop Base และ Ball Offset
6. Power Base และ Ball Offset
7. Power Base และ Time Base
8. Ball Offset และ Time Base

เมื่อพิจารณาจากกราฟค่าเฉลี่ย (Factorial Plots) จะได้ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง 3³ แฟกทอเรียล

ปัจจัย	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
Force Base	30 gramf.
Loop Base	4 step
Power Base	65 DAC
Ball Offset	22 step
Time Base	25 msec

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงพบว่า ได้ค่าเฉลี่ยแรงเฉือนของลูกบอลเท่ากับ 53.261 gramf. ที่ 95% ช่วงความเชื่อมั่นมีค่าอยู่ระหว่าง 52.770 gramf. และ 53.751 gramf. และจำนวนของเสียลักษณะ BNS ลดลงจาก 2,150 ppm เหลือเพียง 747 ppm เท่านั้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีและอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของโรงงาน

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเฉพาะในขั้นตอนการเชื่อมวงจรถ่านั้น ซึ่งในกระบวนการผลิตจริงนั้น ยังมีอีกบางกระบวนการที่ประสบปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของงานไม่ได้มาตรฐาน เช่น กระบวนการ Molding กระบวนการคัดและตัดขางาน เป็นต้น ดังนั้นจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนอื่นๆ ที่เกิดปัญหาในลักษณะเช่นนี้ได้ และควรมีการศึกษาถึงปัจจัยของประเภทของของเสีย

อื่นๆ ที่ยังคงเกิดขึ้น เช่น ปัญหาหน้า Die สกปรก ปัญหาขาลวดช็อตกันทำให้ลวดทองขาด ปัญหาหน้า Die เอียงและปัญหาอื่นๆ จะทำให้ปัญหาที่เกิดขึ้นลดลงและลดการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ได้มาก และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้เพื่อพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้ตรงตามข้อกำหนดและหาจุดเหมาะสมที่ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีที่สุด



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ดวงกมล เรื่องธุรกิจ. 2545. พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยางพื้นรองเท้า โดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- นวัฒน์ จันทร์กระเวน. 2548. การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเนียนลูกบอล ในกระบวนการเชื่อมวงจร: กรณีศึกษา โรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปณัฏกรณ์ อังกรากินันท์. 2545. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทนแรงดึงในแนวตะเข็บในกระบวนการผลิตถุงพลาสติกหิ้วรูปตัวยู. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ปาณิกา เสนาะคนตรี. 2549. การพัฒนาประสิทธิภาพงานหล่อเครื่องประดับด้วยการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษา: โรงงานเครื่องประดับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ปารเมศ ชุตินา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- วิชัย รวิพันธ์. 2550. การออกแบบแผนการทดลอง และการควบคุมการผลิตในแผนกบรรจุภัณฑ์: กรณีศึกษา บริษัท ฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิทยา รุ่งเจริญวัฒนา. 2550. การใช้การออกแบบการทดลองในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียในขบวนการผลิตชิ้นส่วน C/M/C P-CAR. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สงวนศักดิ์ แสวงหา. 2542. การใช้ตัวแปรผิวสะท้อนควบคุมโครงสร้างเม็ดเกรนอะลูมิเนียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมพร พรหมดวง. 2544. การศึกษาปัจจัยและเงื่อนไขที่เหมาะสมของงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน
ทนแรงดึงสูงชนิด DIN St 52-3. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ.

สามารถ จินดาพรพิทักษ์. 2539. ปรับปรุงคุณภาพกระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

อนุชา พงษ์ทองหล่อ. 2538. วิเคราะห์หาจุดเหมาะสมในการปรับเครื่องเชื่อมลวดตัวนำในการผลิต
หัวอ่านข้อมูลคอมพิวเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระ
นครเหนือ.

Bagchi. 1992. **Taguchi Methods Explained: Practical Steps to Robust Design**. Prentice-Hall
India Ltd., India.

Balasubramanian, V. and B. Guha. 1999. Assessment of some factors affecting fatigue
endurance of welded cruciform joints using statistical techniques. **International
Journal of Fatigue** 21: 873–877.

Bandurek, G.R., J. Disney and A. Bendell. 1988. Application of Taguchi Methods to Surface
Mount Processes. **Quality and Reliability Engineering International** 4: 171-181.

Borror, C.M. and D.C. Montgomery. 2002. Evaluation of statistical designs for experiments
involving noise variable. **Journal of Quality Technology** 34: 54-69.

Fisher R.A. 1953. **The Design of Experiments**. Hafner Publishing Company, New York.

Ishikawa, K. 1990. **Introduction to Quality Control**. J. H. Loftus (trans.), Tokyo.

Jenson, F. D.T. Patrik O’Conner and K.L. Wong. 1988. **Quality and Reliability Engineering
International**. A Wiley-Interscience Publication, Sussex, England.

- Leon, N.A. and F.M. Cabrera. 1997. Improvement of igniter quality characteristic using experimental design. **Computers and Industrial Engineering** 33: 145–148.
- Montgomery, D.C. 2005. **Introduction to Statistical Quality Control**. 5th ed. John Wiley and Son, Inc., New York.
- Rocak, D., M. Kosec and A. Degen. 2002. Ceramic suspension optimization using factorial design of experiments. **Journal of the European Ceramic Society** 22: 391–395.
- Ross, P.J. 1989. **Taguchi Techniques for Quality Engineering**. 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
- Shewhart, W. A. 1980. **Economic Control of Quality of Manufactured Product/50th Anniversary Commemorative Issue**. American Society for Quality, New York.
- Sudasna-na-Ayudhya, P. 1992. **Comparison of Response Surface Model and Taguchi Methodology for Robust Design**. Ph.D. thesis, Oregon State University.
- Wilkins, B. 1997. **Direct Chill Casting Defects**. 3rd ed. The Minerals Metal & Material Publ., Pennsylvania.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

แสดงข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าแรงเดือนลูกบอล

ตารางผนวกที่ ก1 แผนการทดลองเพื่อกรองปัจจัย โดยใช้วิธีทากูจิ รอบการทดลองที่ 1

การทดลองที่	LP	BO	BT	TL	TB	PB	FB	SP	PD	CT	CP	CP	BS	Bond Shear Strength1
1	4	18	0	30	10	70	15	0	0	2	30	30	16	47.08
2	4	18	0	30	10	70	15	20	3	5	50	50	18	47.61
3	4	18	0	40	20	80	25	0	0	2	30	50	18	52.11
4	4	18	0	40	20	80	25	20	3	5	50	30	16	48.95
5	4	21	5	30	10	80	25	0	0	5	50	30	16	50.55
6	4	21	5	30	10	80	25	20	3	2	30	50	18	53
7	4	21	5	40	20	70	15	0	0	5	50	50	18	58.16
8	4	21	5	40	20	70	15	20	3	2	30	30	16	53.25
9	6	18	5	30	20	70	25	0	3	2	50	30	18	52.69
10	6	18	5	30	20	70	25	20	0	5	30	50	16	51.46
11	6	18	5	40	10	80	15	0	3	2	50	50	16	31.22
12	6	18	5	40	10	80	15	20	0	5	30	30	18	31.56
13	6	21	0	30	20	80	15	0	3	5	30	30	18	39.77
14	6	21	0	30	20	80	15	20	0	2	50	50	16	49.72
15	6	21	0	40	10	70	25	0	3	5	30	50	16	50.91
16	6	21	0	40	10	70	25	20	0	2	50	30	18	54.74

ตารางผนวกที่ ก2 แผนการทดลองเพื่อกรองปัจจัย โดยใช้วิธีทากูจิ รอบการทดลองที่ 2

การทดลองที่	LP	BO	BT	TL	TB	PB	FB	SP	PD	CT	CP	CP	BS	Bond Shear Strength2
1	4	18	0	30	10	70	15	0	0	2	30	30	16	46.92
2	4	18	0	30	10	70	15	20	3	5	50	50	18	47.56
3	4	18	0	40	20	80	25	0	0	2	30	50	18	51.11
4	4	18	0	40	20	80	25	20	3	5	50	30	16	47.08
5	4	21	5	30	10	80	25	0	0	5	50	30	16	55.06
6	4	21	5	30	10	80	25	20	3	2	30	50	18	56.44
7	4	21	5	40	20	70	15	0	0	5	50	50	18	57.58
8	4	21	5	40	20	70	15	20	3	2	30	30	16	53.01
9	6	18	5	30	20	70	25	0	3	2	50	30	18	51.49
10	6	18	5	30	20	70	25	20	0	5	30	50	16	52.81
11	6	18	5	40	10	80	15	0	3	2	50	50	16	31.03
12	6	18	5	40	10	80	15	20	0	5	30	30	18	28.56
13	6	21	0	30	20	80	15	0	3	5	30	30	18	37.78
14	6	21	0	30	20	80	15	20	0	2	50	50	16	47.19
15	6	21	0	40	10	70	25	0	3	5	30	50	16	49.28
16	6	21	0	40	10	70	25	20	0	2	50	30	18	52.89

ตารางผนวกที่ ก3 แผนการทดลองเพื่อกรองปัจจัย โดยใช้วิธีทากูจิ รอบการทดลองที่ 3

การทดลองที่	LP	BO	BT	TL	TB	PB	FB	SP	PD	CT	CP	CP	BS	Bond Shear Strength3
1	4	18	0	30	10	70	15	0	0	2	30	30	16	45.66
2	4	18	0	30	10	70	15	20	3	5	50	50	18	45.88
3	4	18	0	40	20	80	25	0	0	2	30	50	18	54.35
4	4	18	0	40	20	80	25	20	3	5	50	30	16	52
5	4	21	5	30	10	80	25	0	0	5	50	30	16	49.34
6	4	21	5	30	10	80	25	20	3	2	30	50	18	54.87
7	4	21	5	40	20	70	15	0	0	5	50	50	18	57.89
8	4	21	5	40	20	70	15	20	3	2	30	30	16	55.03
9	6	18	5	30	20	70	25	0	3	2	50	30	18	51.76
10	6	18	5	30	20	70	25	20	0	5	30	50	16	51.17
11	6	18	5	40	10	80	15	0	3	2	50	50	16	32.56
12	6	18	5	40	10	80	15	20	0	5	30	30	18	31.64
13	6	21	0	30	20	80	15	0	3	5	30	30	18	42.9
14	6	21	0	30	20	80	15	20	0	2	50	50	16	50.76
15	6	21	0	40	10	70	25	0	3	5	30	50	16	52.78
16	6	21	0	40	10	70	25	20	0	2	50	30	18	50.84

ตารางผนวกที่ ก4 แผนการทดลองเพื่อกรองปัจจัย โดยใช้วิธีทากูจิ รอบการทดลองที่ 4

การทดลองที่	LP	BO	BT	TL	TB	PB	FB	SP	PD	CT	CP	CP	BS	Bond Shear Strength4
1	4	18	0	30	10	70	15	0	0	2	30	30	16	46.34
2	4	18	0	30	10	70	15	20	3	5	50	50	18	43.42
3	4	18	0	40	20	80	25	0	0	2	30	50	18	53.8
4	4	18	0	40	20	80	25	20	3	5	50	30	16	48.43
5	4	21	5	30	10	80	25	0	0	5	50	30	16	56.75
6	4	21	5	30	10	80	25	20	3	2	30	50	18	55.63
7	4	21	5	40	20	70	15	0	0	5	50	50	18	58.98
8	4	21	5	40	20	70	15	20	3	2	30	30	16	54.22
9	6	18	5	30	20	70	25	0	3	2	50	30	18	49.71
10	6	18	5	30	20	70	25	20	0	5	30	50	16	53.6
11	6	18	5	40	10	80	15	0	3	2	50	50	16	30.8
12	6	18	5	40	10	80	15	20	0	5	30	30	18	30.18
13	6	21	0	30	20	80	15	0	3	5	30	30	18	39.17
14	6	21	0	30	20	80	15	20	0	2	50	50	16	50.03
15	6	21	0	40	10	70	25	0	3	5	30	50	16	54.22
16	6	21	0	40	10	70	25	20	0	2	50	30	18	52.42

ตารางผนวกที่ ก5 แผนการทดลองเพื่อกรองปัจจัย โดยใช้วิธีทากูจิ รอบการทดลองที่ 5

การทดลองที่	LP	BO	BT	TL	TB	PB	FB	SP	PD	CT	CP	CP	BS	Bond Shear Strength5
1	4	18	0	30	10	70	15	0	0	2	30	30	16	46.75
2	4	18	0	30	10	70	15	20	3	5	50	50	18	46.12
3	4	18	0	40	20	80	25	0	0	2	30	50	18	53.98
4	4	18	0	40	20	80	25	20	3	5	50	30	16	53.12
5	4	21	5	30	10	80	25	0	0	5	50	30	16	48.79
6	4	21	5	30	10	80	25	20	3	2	30	50	18	54.03
7	4	21	5	40	20	70	15	0	0	5	50	50	18	60.54
8	4	21	5	40	20	70	15	20	3	2	30	30	16	53.36
9	6	18	5	30	20	70	25	0	3	2	50	30	18	51.63
10	6	18	5	30	20	70	25	20	0	5	30	50	16	51.9
11	6	18	5	40	10	80	15	0	3	2	50	50	16	31.11
12	6	18	5	40	10	80	15	20	0	5	30	30	18	31.76
13	6	21	0	30	20	80	15	0	3	5	30	30	18	42.64
14	6	21	0	30	20	80	15	20	0	2	50	50	16	49.09
15	6	21	0	40	10	70	25	0	3	5	0	50	16	53.79
16	6	21	0	40	10	70	25	20	0	2	50	30	18	53.09



ภาคผนวก ข
แสดงข้อมูลแผนการทดลอง 3⁵ แฟกทอเรียล

ตารางผนวกที่ ข1 แผนการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสม โดยใช้วิธี 3^k แฟกทอเรียล

การทดลองที่	FB	LB	PB	BO	TB	BondShear1	BondShear2	BondShear3
1	20	4	65	18	15	37.53	37	36.28
2	20	4	65	18	20	44.91	43.52	40.8
3	20	4	65	18	25	45.21	43.86	44.4
4	20	4	65	20	15	43.02	41.45	40.69
5	20	4	65	20	20	41.55	43.17	43.75
6	20	4	65	20	25	43.35	47.66	42.81
7	20	4	65	22	15	38.9	42.74	40.1
8	20	4	65	22	20	40.34	40.47	40.16
9	20	4	65	22	25	42.61	46.04	45.43
10	20	4	70	18	15	43.46	46.34	37.96
11	20	4	70	18	20	41.98	42.96	43.33
12	20	4	70	18	25	46.64	41.82	45.25
13	20	4	70	20	15	43.78	46.24	42.45
14	20	4	70	20	20	45.02	41.1	40.27
15	20	4	70	20	25	44.99	44.36	41.33
16	20	4	70	22	15	33.62	33.94	37.83
17	20	4	70	22	20	34.63	34.56	37.77
18	20	4	70	22	25	39.13	43.39	42.79
19	20	4	75	18	15	44.26	45.33	44.52
20	20	4	75	18	20	44.03	43.87	48.06
21	20	4	75	18	25	44.19	46.02	41.03
22	20	4	75	20	15	43.72	39.78	41.93
23	20	4	75	20	20	42.27	40.73	40.55
24	20	4	75	20	25	41.73	42.43	40.87
25	20	4	75	22	15	40.68	41.99	38.91

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

การทดลองที่	FB	LB	PB	BO	TB	BondShear1	BondShear2	BondShear3
26	20	4	75	22	20	40.3	43.72	41.32
27	20	4	75	22	25	40.54	44.89	40.77
28	20	5	65	18	15	44.94	42.6	45.02
29	20	5	65	18	20	38.15	40.93	42.18
30	20	5	65	18	25	39.86	43.63	39.5
31	20	5	65	20	15	42.36	47.93	49.75
32	20	5	65	20	20	39.13	44.49	40.95
33	20	5	65	20	25	44.54	39.81	40.97
34	20	5	65	22	15	37.86	40.19	40.25
35	20	5	65	22	20	37.35	41.28	40.75
36	20	5	65	22	25	36.67	44.15	42.96
37	20	5	70	18	15	40.83	39.01	38.01
38	20	5	70	18	20	45.22	40.74	41.71
39	20	5	70	18	25	42.34	44.44	41.84
40	20	5	70	20	15	42.53	40.72	39.64
41	20	5	70	20	20	51.74	47.33	48.34
42	20	5	70	20	25	37.84	36.11	35.95
43	20	5	70	22	15	36.8	43.29	40.61
44	20	5	70	22	20	39.76	41.38	36.69
45	20	5	70	22	25	42.84	40.88	39.69
46	20	5	75	18	15	55.64	52.41	46.87
47	20	5	75	18	20	55.65	59.7	60.97
48	20	5	75	18	25	59.85	54.74	59.66
49	20	5	75	20	15	37.54	40.96	38.3
50	20	5	75	20	20	43.01	43.57	43.22
51	20	5	75	20	25	40.45	43.09	42.36

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

การทดลองที่	FB	LB	PB	BO	TB	BondShear1	BondShear2	BondShear3
52	20	5	75	22	15	39.43	42.34	37.92
53	20	5	75	22	20	41.91	40.75	39.59
54	20	5	75	22	25	41.55	39.15	41.16
55	20	6	65	18	15	40.87	43.84	40.55
56	20	6	65	18	20	41.37	44.59	42.18
57	20	6	65	18	25	47.27	47.42	51.95
58	20	6	65	20	15	40.4	40.74	39.01
59	20	6	65	20	20	40.29	41.3	39.69
60	20	6	65	20	25	42.2	43.96	43.13
61	20	6	65	22	15	42.49	41.15	42.69
62	20	6	65	22	20	43.85	45.72	42.94
63	20	6	65	22	25	55.07	59.49	57.75
64	20	6	70	18	15	42.34	46.82	44.12
65	20	6	70	18	20	46.53	44.11	44.13
66	20	6	70	18	25	43.46	42.66	40.63
67	20	6	70	20	15	44.2	43.77	43.06
68	20	6	70	20	20	41.16	44.16	39.14
69	20	6	70	20	25	43.14	39.72	42.18
70	20	6	70	22	15	43.45	43.89	41.79
71	20	6	70	22	20	39.86	42.85	40.52
72	20	6	70	22	25	42.26	43.21	45.69
73	20	6	75	18	15	31.43	33.91	31.04
74	20	6	75	18	20	36.05	35.46	35.77
75	20	6	75	18	25	37.11	34.94	37.9
76	20	6	75	20	15	31.62	30.82	32.53
77	20	6	75	20	20	30.78	31.3	31.76

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

การทดลองที่	FB	LB	PB	BO	TB	BondShear1	BondShear2	BondShear3
78	20	6	75	20	25	30.15	33.22	35.4
79	20	6	75	22	15	36.95	35.76	33.77
80	20	6	75	22	20	32.74	33.03	34.12
81	20	6	75	22	25	35.63	38.14	36.21
82	25	4	65	18	15	42.25	43.38	43.72
83	25	4	65	18	20	45.94	47.34	48.6
84	25	4	65	18	25	44.03	46.73	47.26
85	25	4	65	20	15	41.03	39.85	43.25
86	25	4	65	20	20	47.92	48.35	48.15
87	25	4	65	20	25	46.44	48.25	48.57
88	25	4	65	22	15	42.68	43	44.42
89	25	4	65	22	20	45.54	47	48.35
90	25	4	65	22	25	48.85	51.77	50
91	25	4	70	18	15	46.42	48.44	45.99
92	25	4	70	18	20	46.38	50.03	51.57
93	25	4	70	18	25	48.12	46.93	50.34
94	25	4	70	20	15	38.79	40.5	43.9
95	25	4	70	20	20	45.06	48.6	47.95
96	25	4	70	20	25	45.78	47.27	48.42
97	25	4	70	22	15	43.62	46.52	46.36
98	25	4	70	22	20	46.67	49.01	45.83
99	25	4	70	22	25	46.55	48.75	48.81
100	25	4	75	18	15	45.33	48.88	48.99
101	25	4	75	18	20	47.16	53.05	52.32
102	25	4	75	18	25	50.61	49.42	53.29
103	25	4	75	20	15	46.39	46.7	45.96

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

การทดลองที่	FB	LB	PB	BO	TB	BondShear1	BondShear2	BondShear3
104	25	4	75	20	20	45.61	45.01	49.62
105	25	4	75	20	25	47.86	49.98	49.92
106	25	4	75	22	15	38.95	46.05	46.74
107	25	4	75	22	20	46.82	49.77	48.13
108	25	4	75	22	25	45.86	50.26	48.65
109	25	5	65	18	15	41.56	38.07	40.58
110	25	5	65	18	20	33.47	34.8	36.92
111	25	5	65	18	25	35.94	37.48	36.29
112	25	5	65	20	15	41.28	45.43	41.6
113	25	5	65	20	20	45.68	42.52	42.48
114	25	5	65	20	25	45.39	46.53	45.14
115	25	5	65	22	15	45.73	45.52	42.84
116	25	5	65	22	20	37.31	38.74	35.84
117	25	5	65	22	25	36.02	37.2	37.05
118	25	5	70	18	15	35.13	37.06	34.19
119	25	5	70	18	20	38.91	37.7	39.86
120	25	5	70	18	25	35.71	42.85	42.24
121	25	5	70	20	15	42.57	44.63	44.33
122	25	5	70	20	20	42.97	49.23	45.81
123	25	5	70	20	25	44.4	44.8	47.33
124	25	5	70	22	15	41.67	40.08	39.43
125	25	5	70	22	20	38.24	42.25	42.42
126	25	5	70	22	25	44.75	48.5	42.55
127	25	5	75	18	15	39.48	40.82	39.24
128	25	5	75	18	20	40.13	46	41.23
129	25	5	75	18	25	41.42	45.4	47.21

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

การทดลองที่	FB	LB	PB	BO	TB	BondShear1	BondShear2	BondShear3
130	25	5	75	20	15	44.95	47.47	48.95
131	25	5	75	20	20	44.98	44.08	47.34
132	25	5	75	20	25	45.33	48.65	44.7
133	25	5	75	22	15	41.39	44.96	44.16
134	25	5	75	22	20	44.1	46.47	40.31
135	25	5	75	22	25	37.94	46.71	41.59
136	25	6	65	18	15	46.94	47.66	47.78
137	25	6	65	18	20	38.18	41.71	42.06
138	25	6	65	18	25	39.6	40.31	41.16
139	25	6	65	20	15	44.52	44.65	45.08
140	25	6	65	20	20	42.66	43.82	45.62
141	25	6	65	20	25	45.6	41.79	39.64
142	25	6	65	22	15	37.92	36.97	36.75
143	25	6	65	22	20	39.77	42.96	43.03
144	25	6	65	22	25	42.16	44.05	42.54
145	25	6	70	18	15	40.54	41.63	38.11
146	25	6	70	18	20	40.28	42.06	41.49
147	25	6	70	18	25	40.64	39.83	39.51
148	25	6	70	20	15	41.09	43.77	45.96
149	25	6	70	20	20	39.15	45.23	44.77
150	25	6	70	20	25	38.33	35.81	40.29
151	25	6	70	22	15	44.33	44.28	43.96
152	25	6	70	22	20	42.11	47.74	45.4
153	25	6	70	22	25	46.36	52.58	47.29
154	25	6	75	18	15	36.35	38	36.95
155	25	6	75	18	20	38.72	41.49	42.18

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

การทดลองที่	FB	LB	PB	BO	TB	BondShear1	BondShear2	BondShear3
157	25	6	75	20	15	38.1	35.87	38.69
158	25	6	75	20	20	40.2	38.6	42.59
159	25	6	75	20	25	44.32	44.04	44.41
160	25	6	75	22	15	46.64	42.41	46.18
161	25	6	75	22	20	46.86	46.68	45.75
162	25	6	75	22	25	52.6	50.72	53.6
163	30	4	65	18	15	52.14	52.03	50.73
164	30	4	65	18	20	56.84	53.36	57.55
165	30	4	65	18	25	51.96	52.13	49.92
166	30	4	65	20	15	52.99	53.94	50.11
167	30	4	65	20	20	53.94	51.21	51.17
168	30	4	65	20	25	52.4	51.76	55.75
169	30	4	65	22	15	55.29	53.24	53.04
170	30	4	65	22	20	51.88	52.25	54.69
171	30	4	65	22	25	52.18	51.34	53.07
172	30	4	70	18	15	50.42	51.57	50.39
173	30	4	70	18	20	48.93	53.49	51.4
174	30	4	70	18	25	47.07	49.23	47.13
175	30	4	70	20	15	51.24	52.27	53.93
176	30	4	70	20	20	51.36	48.71	50.53
177	30	4	70	20	25	49.36	53.98	50.5
178	30	4	70	22	15	48.32	47.12	48.69
179	30	4	70	22	20	46.9	42.53	43.44
180	30	4	70	22	25	52.15	54.37	49.45
181	30	4	75	18	15	49.45	51.63	45.52
182	30	4	75	18	20	53.32	49.85	49.62

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

การทดลองที่	FB	LB	PB	BO	TB	BondShear1	BondShear2	BondShear3
183	30	4	75	18	25	47.73	48.63	48.85
184	30	4	75	20	15	51.55	56.25	53.42
185	30	4	75	20	20	58.6	55.26	49.94
186	30	4	75	20	25	45.48	50.07	48.28
187	30	4	75	22	15	43.42	48.28	52.5
188	30	4	75	22	20	51.55	50.19	48.86
189	30	4	75	22	25	47.15	43.22	46.95
190	30	5	65	18	15	48.47	50.45	49.27
191	30	5	65	18	20	46.21	46.49	50.09
192	30	5	65	18	25	55.06	54.69	53.53
193	30	5	65	20	15	52.49	48.84	47.3
194	30	5	65	20	20	54.82	52.44	53.56
195	30	5	65	20	25	56.57	58.33	51.94
196	30	5	65	22	15	52.41	44.97	51.91
197	30	5	65	22	20	53.66	54.66	50.83
198	30	5	65	22	25	53.9	50.83	54.07
199	30	5	70	18	15	53.51	48.27	46.68
200	30	5	70	18	20	51.33	49.22	48.17
201	30	5	70	18	25	51.06	48.4	44.99
202	30	5	70	20	15	49.77	51.62	49.98
203	30	5	70	20	20	52.75	50.04	50.76
204	30	5	70	20	25	52.59	53.24	47.23
205	30	5	70	22	15	55.05	57.26	57.36
206	30	5	70	22	20	55	53.15	55.25
207	30	5	70	22	25	54.66	55.52	53.07
208	30	5	75	18	15	42.69	48.92	46.8

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

การทดลองที่	FB	LB	PB	BO	TB	BondShear1	BondShear2	BondShear3
209	30	5	75	18	20	48.29	51.76	47.53
210	30	5	75	18	25	51.65	55.33	57.31
211	30	5	75	20	15	40.57	43.94	45.07
212	30	5	75	20	20	41.97	38.27	38.37
213	30	5	75	20	25	50.06	57.47	51.98
214	30	5	75	22	15	54.57	53.72	47.77
215	30	5	75	22	20	54.17	56.09	49.65
216	30	5	75	22	25	53.45	51.65	52.94
217	30	6	65	18	15	44.96	45.74	47.17
218	30	6	65	18	20	52.04	47.41	49.74
219	30	6	65	18	25	46.53	48.56	49.87
220	30	6	65	20	15	42.77	42.49	43.88
221	30	6	65	20	20	41.84	44.07	43.3
222	30	6	65	20	25	44	43.79	39.2
223	30	6	65	22	15	46.37	44.73	45.11
224	30	6	65	22	20	48.67	46.55	47.87
225	30	6	65	22	25	48.88	47.53	49.94
226	30	6	70	18	15	42.97	43.65	47.15
227	30	6	70	18	20	47.78	47.32	47.92
228	30	6	70	18	25	46.58	45.71	50.87
229	30	6	70	20	15	37.78	40.99	47.8
230	30	6	70	20	20	45.82	50.34	50.01
231	30	6	70	20	25	47.67	46.28	47.36
232	30	6	70	22	15	46.43	43.73	45.4
233	30	6	70	22	20	45.05	45.27	45.85
234	30	6	70	22	25	49.23	46.77	48.06

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

การทดลองที่	FB	LB	PB	BO	TB	BondShear1	BondShear2	BondShear3
235	30	6	75	18	15	47.76	48.95	52.82
236	30	6	75	18	20	55.22	50.14	50.46
237	30	6	75	18	25	49.58	46.87	48.87
238	30	6	75	20	15	47.8	48.58	47.27
239	30	6	75	20	20	46.63	46.75	46.94
240	30	6	75	20	25	46.69	49.22	48.4
241	30	6	75	22	15	49.8	44.23	42.61
242	30	6	75	22	20	44.02	44.62	47.45
243	30	6	75	22	25	48.66	50.36	50.5



ภาคผนวก ค
แสดงข้อมูลยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางผนวกที่ ค1 ข้อมูลขั้นต้นผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้แผนการทดลอง 3^k แฟคทอเรียล
กำหนด Force Base = 30 gramf., Loop Base = 4 step, Power Base = 75,
Ball Offset = 18 และ Time Base = 25 msec

ลูกบอลลูกที่	ค่าแรงเฉือนของลูกบอล
1	48.34
2	47.17
3	49.19
4	48.53
5	47.14
6	46.83
7	46.19
8	48.62
9	45.71
10	49.38
11	47.26
12	49.3
13	47.68
14	48.32
15	46.55
16	46.42
17	48.29
18	47.98
19	46.03
20	45.37
21	50.76
22	51.04
23	47.66

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

ลูกบอลลูกที่	ค่าแรงเหวี่ยงของลูกบอล
24	47.01
25	48.29
26	48.32
27	50.56
28	47.83
29	46.98
30	47.52

ตารางผนวกที่ ค2 ข้อมูลขั้นต้นผลการวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้แผนการทดลอง 3^k แฟคทอเรียล กำหนด Force Base = 30 gramf., Loop Base = 4 step, Power Base = 65, Ball Offset = 22 และ Time Base = 25 msec

ลูกบอลลูกที่	ค่าแรงเหวี่ยงของลูกบอล
1	52.38
2	55.19
3	52.45
4	52.61
5	53.7
6	50.27
7	54.34
8	52.43
9	53.62
10	53.17
11	54.37
12	54.4
13	49.97

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลูกบอลลูกที่	ค่าแรงเหวี่ยงของลูกบอล
14	55.24
15	53.16
16	51.57
17	54.76
18	52.85
19	53.25
20	53.12
21	52.87
22	54.27
23	55.03
24	53.27
25	52.57
26	52.89
27	51.71
28	53.26
29	54.38
30	54.72



ภาคผนวก

แสดงข้อมูลยืนยันผลการทดลองเพื่อหาจำนวน BNS ในกระบวนการเชื่อมวงจรตั้งแต่วันที่ 4 มกราคม 2553 จนถึงวันที่ 13 มกราคม 2553

ตารางผนวกที่ ง1 ข้อมูลยืนยันผลการทดลองเพื่อหาจำนวน BNS ในกระบวนการเชื่อมวงจร

กำหนด Force Base = 30 gramf., Loop Base = 4 step, Power Base = 65,

Ball Offset = 22 และ Time Base = 25 msec

Date	Product	Quantity	line	Machine	BNS (Unit)	BNS (ppm)
4/1/2010	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	452	4	752
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	432	16	1504
	IP42530CZ8-4	9152	2A	435	0	0
	GTL2002GM	4232	2B	220	7	1654
	IP4254CZ12-6	1170	3A	409	0	0
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	428	5	470
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	451	24	2256
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	431	3	282
5/1/2010	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	119	3	564
	GTL2002GM	4232	3A	443	0	0
	74AUP2G126GT/S500	5320	3A	453	4	752
	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	441	3	564
	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	436	5	940
	GTL2002GM	4232	2B	428	0	0
	74AUP2G126GT/S500	5320	2B	438	2	376
	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	445	17	3195
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	444	2	188
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	449	12	1128
	74AUP2G126GT/S500	5320	3A	456	3	564
	74AUP2G126GT/S500	5320	3A	450	8	1504
	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	442	9	1692
	74AUP2G126GT/S500	5320	3A	448	4	752

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

Date	Product	Quantity	line	Machine	BNS (Unit)	BNS (ppm)
	74AUP2G126GT/S500	5320	2B	449	2	376
	GTL2002GM	4232	2A	451	19	4490
	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	431	3	564
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	458	2	188
	74AUP2G126GT/S500	2660	3A	403	0	0
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	456	4	376
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	438	11	1034
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	431	3	282
	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	434	2	376
	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	447	1	188
	GTL2002GM	4232	2B	457	21	4962
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	403	2	188
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	404	17	1598
	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	446	8	1504
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	409	13	1222
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	453	3	282
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	455	11	1034
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	421	33	3102
	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	450	14	2632
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	435	1	94
6/1/2010	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	448	4	376
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	428	13	1222
	74AUP2G126GT/S500	5320	2B	432	7	1316
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	443	11	1034

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

Date	Product	Quantity	line	Machine	BNS (Unit)	BNS (ppm)
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	453	9	846
	74AUP2G126GT/S500	4232	2B	428	5	1181
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	409	12	1128
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	457	0	0
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	418	15	1410
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	452	13	1222
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	444	0	0
	74AUP2G126GT/S500	5320	3A	443	9	1692
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	220	0	0
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	451	19	1786
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	434	0	0
	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	435	1	188
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	433	1	94
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	119	6	564
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	432	2	188
	74LVC1G74GM	4232	2B	438	0	0
	74LVC1G74GM	4232	2B	220	0	0
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	119	17	1598
	74LVC1G74GM	4232	3A	443	2	473
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	453	15	1410
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	441	6	564
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	431	15	1410
	74LVC1G74GM	4232	2B	459	0	0
	74LVC1G74GM	74232	2B	428	3	40

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

Date	Product	Quantity	line	Machine	BNS (Unit)	BNS (ppm)
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	451	5	470
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	438	5	470
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	460	6	564
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	450	8	752
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	436	5	470
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	432	1	94
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	442	8	752
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	441	2	188
7/1/2010	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	409	5	470
	74AUP2G126GT/S500	9975	3A	403	4	401
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	418	7	658
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	452	8	752
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	460	6	564
	GTL2002GM	4232	2B	433	15	3544
	74AUP2G08GM	4232	3A	443	7	1654
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	459	7	658
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	450	16	1504
	IP425HCZ12-6	9360	2A	421	4	427
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	435	4	376
	74AUP2G125G1/S500	10640	2B	457	9	846
	74LVC1G74GM	4232	2B	449	2	473
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	404	0	0
	74LVC1G74GM	2116	2B	432	0	0
	74AUP2G125G1/S500	10640	2B	428	15	1410

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

Date	Product	Quantity	line	Machine	BNS (Unit)	BNS (ppm)
	74LVC1G74GM	4232	2B	449	0	0
	74LVC1G74GM	4232	2A	446	17	4017
	IP425HCZ12-6	9360	2A	447	4	427
	74AUP2G125G1/S500	10640	2A	434	13	1222
	74AUP2G125G1/S500	10640	2B	438	5	470
	74AUP2G125G1/S500	10640	2B	220	0	0
	74AUP2G125G1/S500	10640	3A	456	2	188
	74AUP2G125G1/S500	7980	3A	443	4	501
	74AUP2G125G1/S500	10640	3A	455	12	1128
	74LVC1G74GM	4232	2B	458	3	709
	74AUP2G125G1/S500	10640	2A	119	3	282
8/1/2010	74AUP2G125G1/S500	10640	2B	432	2	188
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	459	0	0
	74AUP2G125G1/S500	10640	3A	409	1	94
	IP425HCZ12-6	6240	3A	403	5	801
	74AUP2G125G1/S500	10640	2B	428	4	376
	74AUP2G125G1/S500	10640	2B	449	23	2162
	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	119	16	3008
	IP425HCZ12-6	9360	2A	442	12	1282
	IP425HCZ12-6	6240	2A	452	7	1122
	74AUP2G126GT/S500	7980	2B	449	5	627
	IP425HCZ12-6	9360	3A	455	19	2030
	IP425HCZ12-6	9360	3A	404	0	0
	GTL2002GM	4232	2B	220	6	1418

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

Date	Product	Quantity	line	Machine	BNS (Unit)	BNS (ppm)
	IP425HCZ12-6	9360	2A	444	0	0
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	445	22	2068
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	451	11	1034
	IP425HCZ12-6	9152	3A	454	7	765
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	443	5	470
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	441	7	658
	IP4253CZ8-4	9152	2A	435	0	0
	74LVCH1T45GT	2660	2B	449	0	0
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	434	17	1598
	IP4253CZ8-4	9152	2A	445	4	437
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	441	13	1222
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	443	2	188
	74LVCHT45GM	2116	2B	459	0	0
	74AUP2G08GT	2660	2B	449	0	0
	IP4253CZ8-4	9150	2A	445	5	546
	IP4253CZ8-4	9150	2A	444	5	546
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	441	4	376
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	432	7	658
	IP4253CZ8-4	9152	3A	448	0	0
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	455	5	470
	74LVCH2145GM	4232	2B	460	0	0
	74LVC1G74GM	4232	2A	442	0	0
9/1/2010	74LVC1G74GM	4232	2A	431	0	0
	74LVC1G74GM	4232	2A	451	16	3781

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

Date	Product	Quantity	line	Machine	BNS (Unit)	BNS (ppm)
	74LVC1G74GM	4232	3A	454	5	1181
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	455	32	3008
	74AUP2G126GT/S500	5320	2A	450	10	1880
	74AUP2G125GT/S500	5320	2A	447	15	2820
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	449	5	470
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	441	3	282
	74LVC1G74GM	4232	2A	445	0	0
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	453	5	470
	74LVC1G74GM	4232	3A	403	0	0
	74LVC1G74GM	4232	2B	432	15	3544
	IP4253CZ8-4	9152	2A	452	5	546
	74LVC1G74GM	4232	2A	418	4	945
	74AUP2G125GT/S500	5320	2A	435	0	0
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	432	11	1034
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	435	8	752
	74LVC1G74GM	4136	2A	421	10	2418
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	449	1	94
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	409	3	282
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	404	16	1504
	IP4253CZ8-4	9152	2A	446	2	219
	74LVCG86GT	5320	2A	447	0	0
	74LVC1G74GM	4232	2A	119	3	709
	74LVC1G74GM	4232	3A	443	4	945
	74LVC1G74GM	4232	3A	453	17	4017
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	441	17	1598

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

Date	Product	Quantity	line	Machine	BNS (Unit)	BNS (ppm)
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	403	0	0
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	453	12	1128
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	442	13	1222
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	436	11	1034
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	220	6	564
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	447	0	0
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	418	9	846
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	456	0	0
	74AUP2G126GD/S500	4560	2B	458	0	0
	74LVC1G74GM	4323	2A	444	31	7171
	74AUP2G126GD/S500	5320	2A	445	0	0
	74AUP2G126GD/S500	10640	2A	451	3	282
	74AUP2G126GD/S500	10640	2B	459	12	1128
	74LVC1G74GM	4232	3A	443	4	945
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	448	4	376
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	449	3	282
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	434	6	564
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	451	5	470
	74LVC1G74GM	4232	2A	119	4	945
	74LVC1G74GM	4232	3A	454	4	945
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	403	10	940
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	458	5	470
	SA58672TK	4928	2B	433	2	406
	74LVC1G74GM	4232	2A	444	0	0

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

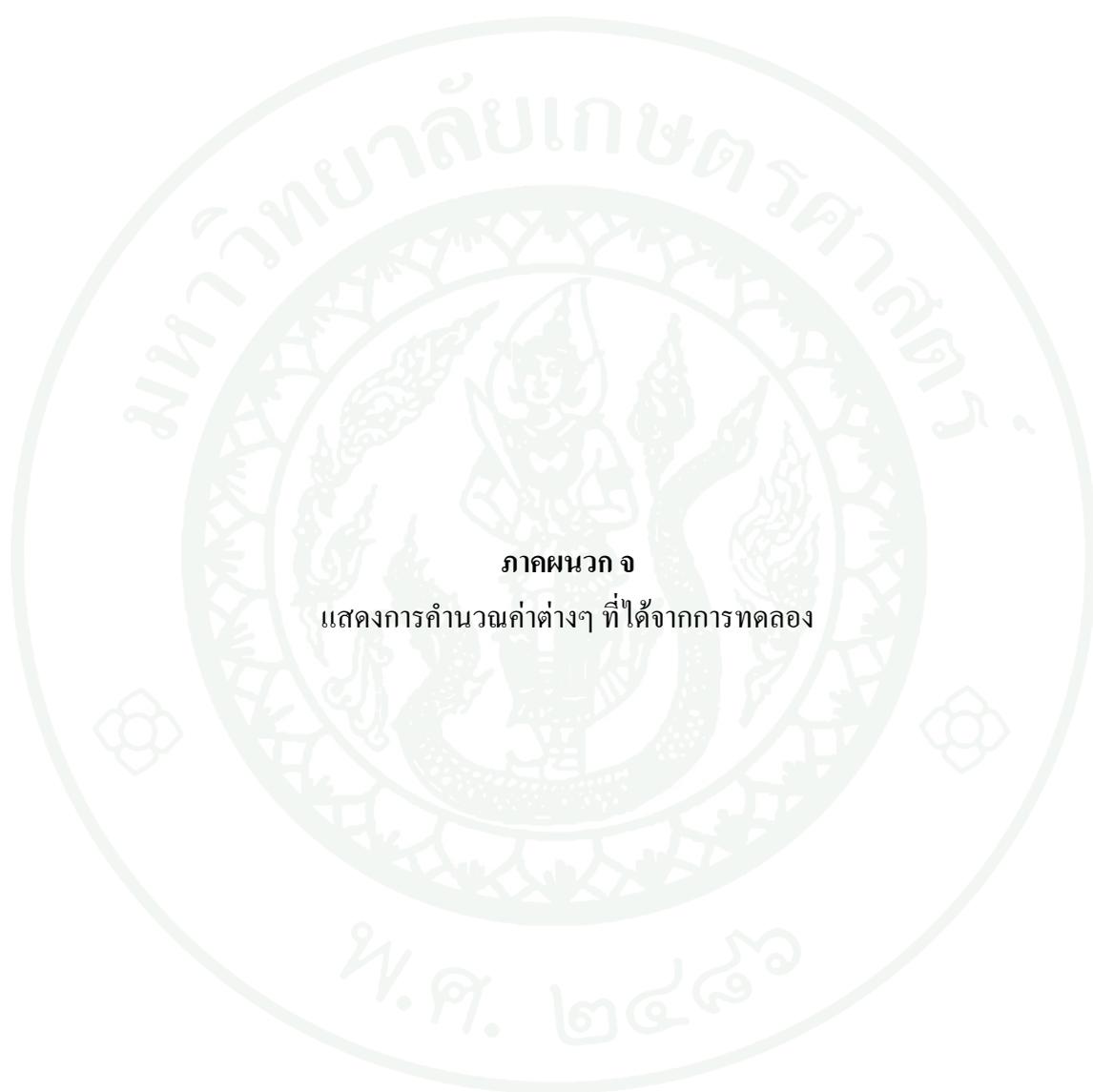
Date	Product	Quantity	line	Machine	BNS (Unit)	BNS (ppm)
10/1/2010	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	441	10	940
	74LVC1G74GM	4232	2A	418	1	236
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	431	4	376
	74AUP2G126GT/S500	10640	3A	455	4	376
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	460	9	846
	74LVC1G74GM	4232	2A	436	3	709
	74AUP2G125GT/S500	4232	2A	445	7	1654
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	119	0	0
	74AUP2G125GT/S500	5320	3A	443	0	0
	74AUP2G126GT/S500	10640	2B	438	0	0
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	434	12	1128
	74LVC1G74GM	4232	2A	446	5	1181
	74LVC1G74GM	4232	2A	442	0	0
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	403	6	564
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	404	6	564
11/1/2010	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	447	7	658
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	451	14	1316
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	448	2	188
	74LVC1G74GM	4232	2A	452	4	945
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	431	3	282
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	443	1	94
	IP4254CZ8-4	8580	2A	447	4	466
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	119	17	1598
	74LVC1G74GM	4232	2A	441	5	1181
	IP4254CZ8-4	10640	2A	442	7	658

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

Date	Product	Quantity	line	Machine	BNS (Unit)	BNS (ppm)
	74AUP2G125GT/S500	8294	3A	456	2	241
12/1/2010	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	409	2	188
	IP4254CZ8-4	8380	3A	403	1	119
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	432	8	752
	74LVC1G74GM	4232	2A	421	3	709
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	450	5	470
	IP4253CZ8-4	9152	3A	443	0	0
	IP4253CZ8-4	9152	3A	404	5	546
	74LVC1G74GM	4232	2B	438	4	945
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	455	5	470
	74LVC1G74GM	4232	2A	434	0	0
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	441	3	282
	74LVC1G74GM	4232	2A	119	0	0
13/1/2010	IP4254CZ12-6	9360	2A	452	0	0
	IP4253CZ8-4	2288	2B	432	0	0
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	449	6	564
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	428	13	1222
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	409	12	1128
	IP4253CZ8-4	9252	3A	455	2	216
	74LVC1G74GM	4232	2B	449	9	2127
	74LVC1G74GM	4232	2B	220	7	1654
	74LVC1G74GM	4232	2B	438	4	945
	74LVC1G74GM	4232	2A	431	7	1654
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	451	4	376
	74LVC1G74GM	4232	2A	442	0	0

ตารางผนวกที่ ง1 (ต่อ)

Date	Product	Quantity	line	Machine	BNS (Unit)	BNS (ppm)
	74LVC1G74GM	4232	2B	458	6	1418
	74LVC1G74GM	3135	2B	422	1	319
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	459	5	470
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	434	5	470
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	442	5	470
	IP4253CZ8-4	9152	2A	445	12	1311
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	443	15	1410
	IP4253CZ8-4	9152	3A	448	4	437
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	436	0	0
	74AUP2G125GT/S500	10640	3A	443	18	1692
	IP4254CZ12-6	5850	3A	454	6	1026
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	441	12	1128
	IP4253CZ8-4	9152	2B	449	7	765
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	441	7	658
	74AUP2G125GT/S500	10640	2B	458	19	1786
	IP4253CZ8-4	8580	2A	447	14	1632
	IP4253CZ8-4	9152	3A	443	8	874
	74LVC1G74GM	4232	2B	460	0	0
	74LVCH2145GT	5220	2B	454	0	0
	74AUP2G125GT/S500	10640	2A	457	18	1692
	74LVCH2145GT	2660	2B	433	0	0
	IP4254CZ12-6	7800	2A	444	6	769
	74AUP2G126GT/S500	10640	2A	445	5	470
	Total	2233963			1669	747



ภาคผนวก จ
แสดงการคำนวณค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง

1. การรวมกันระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการเชื่อมวงจร และเลือกคุณลักษณะของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งมายิ่งดี ตามสมการที่ 13 ในหน่วย gramf. สามารถทำการคำนวณได้ดังนี้

การทดลองที่ 1

$$S/N_{HB} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{47.08^2} + \frac{1}{46.92^2} + \frac{1}{45.66^2} + \frac{1}{46.34^2} + \frac{1}{46.75^2} \right) \right] = 33.3568$$

การทดลองที่ 2

$$S/N_{HB} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{47.61^2} + \frac{1}{47.56^2} + \frac{1}{45.88^2} + \frac{1}{43.42^2} + \frac{1}{46.12^2} \right) \right] = 33.2626$$

การทดลองที่ 3

$$S/N_{HB} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{52.11^2} + \frac{1}{51.11^2} + \frac{1}{54.35^2} + \frac{1}{53.8^2} + \frac{1}{53.98^2} \right) \right] = 34.4892$$

การทดลองที่ 4

$$S/N_{HB} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{48.95^2} + \frac{1}{47.08^2} + \frac{1}{52^2} + \frac{1}{48.43^2} + \frac{1}{53.12^2} \right) \right] = 33.9382$$

การทดลองที่ 5

$$S/N_{HB} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{50.55^2} + \frac{1}{55.06^2} + \frac{1}{49.34^2} + \frac{1}{56.75^2} + \frac{1}{48.79^2} \right) \right] = 34.2886$$

การทดลองที่ 6

$$S/N_{HB} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{53^2} + \frac{1}{56.44^2} + \frac{1}{54.87^2} + \frac{1}{55.63^2} + \frac{1}{54.03^2} \right) \right] = 34.7684$$

การทดลองที่ 7

$$S/N_{HB} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{58.16^2} + \frac{1}{57.58^2} + \frac{1}{57.89^2} + \frac{1}{58.98^2} + \frac{1}{60.54^2} \right) \right] = 35.3582$$

การทดลองที่ 8

$$S/N_{HB} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{53.25^2} + \frac{1}{53.01^2} + \frac{1}{55.03^2} + \frac{1}{54.22^2} + \frac{1}{53.36^2} \right) \right] = 34.6089$$

การทดลองที่ 9

$$S/N_{HB} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{52.69^2} + \frac{1}{51.49^2} + \frac{1}{51.76^2} + \frac{1}{49.71^2} + \frac{1}{51.63^2} \right) \right] = 34.2240$$

การทดลองที่ 10

$$S/N_{HB} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{51.46^2} + \frac{1}{52.81^2} + \frac{1}{51.17^2} + \frac{1}{53.6^2} + \frac{1}{51.9^2} \right) \right] = 34.3476$$

การทดลองที่ 11

$$S/N_{HB} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{31.22^2} + \frac{1}{31.03^2} + \frac{1}{32.56^2} + \frac{1}{30.8^2} + \frac{1}{31.11^2} \right) \right] = 29.9181$$

การทดลองที่ 12

$$S/N_{\text{HB}} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{31.56^2} + \frac{1}{28.56^2} + \frac{1}{31.64^2} + \frac{1}{30.18^2} + \frac{1}{31.76^2} \right) \right] = 29.7321$$

การทดลองที่ 13

$$S/N_{\text{HB}} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{39.77^2} + \frac{1}{37.78^2} + \frac{1}{42.9^2} + \frac{1}{39.17^2} + \frac{1}{42.64^2} \right) \right] = 32.1070$$

การทดลองที่ 14

$$S/N_{\text{HB}} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{49.72^2} + \frac{1}{47.19^2} + \frac{1}{50.76^2} + \frac{1}{50.03^2} + \frac{1}{49.09^2} \right) \right] = 33.8591$$

การทดลองที่ 15

$$S/N_{\text{HB}} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{50.91^2} + \frac{1}{49.28^2} + \frac{1}{52.78^2} + \frac{1}{54.22^2} + \frac{1}{53.79^2} \right) \right] = 34.3360$$

การทดลองที่ 16

$$S/N_{\text{HB}} = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{54.74^2} + \frac{1}{52.89^2} + \frac{1}{50.84^2} + \frac{1}{52.42^2} + \frac{1}{53.09^2} \right) \right] = 34.4447$$

2. ผลต่างของค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกรณีค่ายิ่งมามากยิ่งดีระหว่างระดับของแต่ละปัจจัย สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ผลกระทบของ Loop Base} = |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}|$$

$$= |34.26 - 32.87|$$

$$= 1.39$$

$$\text{ผลกระทบของ Ball Offset} = |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}|$$

$$= |32.91 - 34.22|$$

$$= 1.31$$

$$\text{ผลกระทบของ Ball Thickness} = |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}|$$

$$= |33.72 - 33.41|$$

$$= 0.32$$

$$\text{ผลกระทบของ Tail Length} = |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}|$$

$$= |33.78 - 33.35|$$

$$= 0.42$$

$$\text{ผลกระทบของ Time Base} = |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}|$$

$$= |33.01 - 34.12|$$

$$= 1.10$$

$$\begin{aligned}
 \text{ผลกระทบของ Power Base} &= |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}| \\
 &= |34.24 - 32.89| \\
 &= 1.35
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ผลกระทบของ Force Base} &= |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}| \\
 &= |32.78 - 34.35| \\
 &= 1.58
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ผลกระทบของ Standby Power} &= |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}| \\
 &= |33.51 - 33.62| \\
 &= 0.11
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ผลกระทบของ Power Delay} &= |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}| \\
 &= |33.73 - 33.40| \\
 &= 0.34
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ผลกระทบของ Contact Time} &= |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}| \\
 &= |33.71 - 33.42| \\
 &= 0.29
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ผลกระทบของ Contact Power} &= |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}| \\
 &= |33.47 - 33.66| \\
 &= 0.19
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ผลกระทบของ Contact Force} &= |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}| \\
 &= |33.34 - 33.78| \\
 &= 0.45
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ผลกระทบของ Ball Size} &= |\text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 1} - \text{ค่าเฉลี่ย S/N Ratio ระดับที่ 2}| \\
 &= |33.58 - 33.55| \\
 &= 0.03
 \end{aligned}$$

3. ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละระดับของปัจจัยควบคุม โดยใช้สมการที่ 15 คำนวณได้ดังนี้

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของ Loop Base

$$\begin{aligned}
 \overline{S/N}_{LB_1} &= \frac{33.3568 + 33.2626 + 34.4892 + 33.9382 + 34.2886 + 34.7684 + 35.3582 + 34.6089}{8} \\
 &= 34.2589
 \end{aligned}$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Loop Base

$$\begin{aligned}
 \overline{S/N}_{LB_2} &= \frac{34.2240 + 34.3476 + 29.9181 + 29.7321 + 32.1070 + 33.8591 + 34.3360 + 34.4447}{8} \\
 &= 32.8711
 \end{aligned}$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของ Ball Offset

$$\overline{S/N}_{BO_1} = \frac{33.3568+33.2626+34.4892+33.9382+34.2240+34.3476+29.9181+29.7321}{8}$$

$$= 32.9086$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Ball Offset

$$\overline{S/N}_{BO_2} = \frac{34.2886+34.7684+35.3582+34.6089+32.1070+33.8591+34.3360+34.4447}{8}$$

$$= 34.2214$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของ Ball Thickness

$$\overline{S/N}_{BT_1} = \frac{33.3568+33.2626+34.4892+33.9382+32.1070+33.8591+34.3360+34.4447}{8}$$

$$= 33.7242$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Ball Thickness

$$\overline{S/N}_{BT_2} = \frac{34.2886+34.7684+35.3582+34.6089+34.2240+34.3476+29.9181+29.7321}{8}$$

$$= 33.4057$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของ Tail Length

$$\overline{S/N}_{TL_1} = \frac{33.3568+33.2626+34.2886+34.7684+34.2240+34.3476+32.1070+33.8591}{8}$$

$$= 33.7768$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Tail Length

$$\overline{S/N}_{TL_2} = \frac{34.4892+33.9382+35.3582+34.6089+29.9181+29.7321+34.3360+34.4447}{8}$$

$$= 33.3532$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของ Time Base

$$\overline{S/N}_{TB_1} = \frac{33.3568+33.2626+34.2886+34.7684+29.9181+29.7321+34.3360+34.4447}{8}$$

$$= 33.0134$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Time Base

$$\overline{S/N}_{BS_2} = \frac{33.2626+34.4892+34.7684+35.3582+34.2240+29.7321+32.1070+34.4447}{8}$$

$$= 34.1165$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของ Power Base

$$\overline{S/N}_{PB_1} = \frac{33.3568+33.2626+35.3582+34.6089+34.2240+34.3476+34.3360+34.4447}{8}$$

$$= 34.2424$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Power Base

$$\overline{S/N}_{PB_2} = \frac{34.4892+33.9382+34.2886+34.7684+29.9181+29.7321+32.1070+33.8591}{8}$$

$$= 32.8876$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของ Force Base

$$\overline{S/N}_{FB_1} = \frac{33.3568+33.2626+35.3582+34.6089+29.9181+29.7321+32.1070+33.8591}{8}$$

$$= 32.7754$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Force Base

$$\overline{S/N}_{FB_2} = \frac{34.4892+33.9382+34.2886+34.7684+34.2240+34.3476+34.3360+34.4447}{8}$$

$$= 34.3546$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของ Stand by Power

$$\overline{S/N}_{SP_1} = \frac{33.3568+34.4892+34.2886+35.3582+34.2240+29.9181+32.1070+34.3360}{8}$$

$$= 33.5097$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Stand by Power

$$\overline{S/N}_{SP_2} = \frac{33.2626+33.9382+34.7684+34.6089+34.3476+29.7321+33.8591+34.4447}{8}$$

$$= 33.6202$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 Power Delay

$$\overline{S/N}_{PD_1} = \frac{33.3568+34.4892+34.2886+35.3582+34.3476+29.7321+33.8591+34.4447}{8}$$

$$= 33.7345$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Power Delay

$$\overline{S/N}_{PD_2} = \frac{33.2626+33.9382+34.7684+34.6089+34.2240+29.9181+32.1070+34.3360}{8}$$

$$= 33.3954$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของ Contact Time

$$\overline{S/N}_{CT_1} = \frac{33.3568+34.4892+34.7684+34.6089+34.2240+29.9181+33.8591+34.4447}{8}$$

$$= 33.7087$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Contact Time

$$\overline{S/N}_{CT_2} = \frac{33.2626+33.9382+34.2886+35.3582+34.3476+29.7321+32.1070+34.3360}{8}$$

$$= 33.4213$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของ Contact Power

$$\overline{S/N}_{CP_1} = \frac{33.3568+34.4892+34.7684+34.6089+34.3476+29.7321+32.1070+34.3360}{8}$$

$$= 33.4683$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Contact Power

$$\overline{S/N}_{CP_2} = \frac{33.2626+33.9382+34.2886+35.3582+34.2240+29.9181+33.8591+34.4447}{8}$$

$$= 33.6617$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของ Contact Force

$$\overline{S/N}_{CF_1} = \frac{33.3568+33.9382+34.2886+34.6089+34.2240+29.7321+32.1070+34.4447}{8}$$

$$= 33.3375$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Contact Force

$$\overline{S/N}_{CF_2} = \frac{33.2626+34.4892+34.7684+35.3582+34.3476+29.9181+33.8591+34.3360}{8}$$

$$= 33.7924$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 1 ของ Ball Size

$$\overline{S/N}_{BS_1} = \frac{33.3568+33.9382+34.2886+34.6089+34.3476+29.9181+33.8591+34.3360}{8}$$

$$= 33.5817$$

ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในระดับที่ 2 ของ Ball Size

$$\overline{S/N}_{BS_2} = \frac{33.2626+34.4892+34.7684+35.3582+34.2240+29.7321+32.1070+34.4447}{8}$$

$$= 33.5483$$

4. ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของแต่ละปัจจัยที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนต่อสิ่งรบกวนของการทดลอง โดยใช้สมการที่ 16 ดังนี้

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Loop Base

$$\begin{aligned} SS_{LB} &= 8(S/N_{LB_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{LB_2} - \overline{S/N})^2 \\ &= 8(34.2589 - 33.5650)^2 + 8(32.8711 - 33.5650)^2 = 7.7040 \end{aligned}$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Ball Offset

$$\begin{aligned} SS_{BO} &= 8(S/N_{BO_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{BO_2} - \overline{S/N})^2 \\ &= 8(32.9086 - 33.5650)^2 + 8(34.2214 - 33.5650)^2 = 6.8930 \end{aligned}$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Ball Thickness

$$\begin{aligned} SS_{BT} &= 8(S/N_{BT_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{BT_2} - \overline{S/N})^2 \\ &= 8(33.7424 - 33.5650)^2 + 8(33.4057 - 33.5650)^2 = 0.4058 \end{aligned}$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Tail Length

$$\begin{aligned} SS_{TL} &= 8(S/N_{TL_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{TL_2} - \overline{S/N})^2 \\ &= 8(33.7768 - 33.5650)^2 + 8(33.3532 - 33.5650)^2 = 0.7177 \end{aligned}$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Time Base

$$\begin{aligned} SS_{TB} &= 8(S/N_{TB_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{TB_2} - \overline{S/N})^2 \\ &= 8(33.0134 - 33.5650)^2 + 8(34.1165 - 33.5650)^2 = 4.8673 \end{aligned}$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Power Base

$$\begin{aligned} SS_{PB} &= 8(S/N_{PB_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{PB_2} - \overline{S/N})^2 \\ &= 8(34.2424 - 33.5650)^2 + 8(32.8876 - 33.5650)^2 = 7.3419 \end{aligned}$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Force Base

$$\begin{aligned} SS_{FB} &= 8(S/N_{FB_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{FB_2} - \overline{S/N})^2 \\ &= 8(32.7754 - 33.5650)^2 + 8(34.3546 - 33.5650)^2 = 9.9755 \end{aligned}$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Stand by Power

$$\begin{aligned} SS_{SP} &= 8(S/N_{SP_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{SP_2} - \overline{S/N})^2 \\ &= 8(33.5097 - 33.5650)^2 + 8(33.6202 - 33.5650)^2 = 0.0488 \end{aligned}$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Power Delay

$$\begin{aligned} SS_{PD} &= 8(S/N_{PD_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{PD_2} - \overline{S/N})^2 \\ &= 8(33.7345 - 33.5650)^2 + 8(33.3954 - 33.5650)^2 = 0.4600 \end{aligned}$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Contact Time

$$\begin{aligned} SS_{CT} &= 8(S/N_{CT_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{CT_2} - \overline{S/N})^2 \\ &= 8(33.7087 - 33.5650)^2 + 8(33.4213 - 33.5650)^2 = 0.3304 \end{aligned}$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Contact Power

$$\begin{aligned} SS_{CP} &= 8(S/N_{CP_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{CP_2} - \overline{S/N})^2 \\ &= 8(33.4683 - 33.5650)^2 + 8(33.6617 - 33.5650)^2 = 0.1496 \end{aligned}$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Contact Force

$$\begin{aligned} SS_{CF} &= 8(S/N_{CF_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{CF_2} - \overline{S/N})^2 \\ &= 8(33.3375 - 33.5650)^2 + 8(33.7924 - 33.5650)^2 = 0.8277 \end{aligned}$$

ผลรวมกำลังสองของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัย Ball Size

$$\begin{aligned} SS_{BS} &= 8(S/N_{BS_1} - \overline{S/N})^2 - 8(S/N_{BS_2} - \overline{S/N})^2 \\ &= 8(33.5817 - 33.5650)^2 + 8(33.5483 - 33.5650)^2 = 0.0045 \end{aligned}$$

5. การคำนวณค่ากำลังสองเฉลี่ย โดยใช้สมการที่ 18 ดังนี้

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Loop Base

$$\begin{aligned} MS_{\text{Loop Base}} &= \frac{SS_{\text{Loop Base}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Loop Base}}} \\ &= \frac{7.7040}{1} = 7.7040 \end{aligned}$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Ball Offset

$$\begin{aligned} MS_{\text{Ball Offset}} &= \frac{SS_{\text{Ball Offset}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Ball Offset}}} \\ &= \frac{6.8930}{1} = 6.8930 \end{aligned}$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Ball Thickness

$$MS_{\text{Ball Thickness}} = \frac{SS_{\text{Ball Thickness}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Ball Thickness}}}$$

$$= \frac{0.4058}{1} = 0.4058$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Tail Length

$$MS_{\text{Tail Length}} = \frac{SS_{\text{Tail Length}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Tail Length}}}$$

$$= \frac{0.7177}{1} = 0.7177$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Time Base

$$MS_{\text{Time Base}} = \frac{SS_{\text{Time Base}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Time Base}}}$$

$$= \frac{4.8673}{1} = 4.8673$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Power Base

$$MS_{\text{Power Base}} = \frac{SS_{\text{Power Base}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Power Base}}}$$

$$= \frac{7.3419}{1} = 7.3419$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Force Base

$$MS_{\text{Force Base}} = \frac{SS_{\text{Force Base}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Force Base}}}$$

$$= \frac{9.9755}{1} = 9.9755$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Stand by Power

$$MS_{\text{Stand by Power}} = \frac{SS_{\text{Stand by Power}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Stand by Power}}}$$

$$= \frac{0.0488}{1} = 0.0488$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Power Delay

$$MS_{\text{Power Delay}} = \frac{SS_{\text{Power Delay}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Power Delay}}}$$

$$= \frac{0.4600}{1} = 0.4600$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Contact Time

$$MS_{\text{Contact Time}} = \frac{SS_{\text{Contact Time}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Contact Time}}}$$

$$= \frac{0.3304}{1} = 0.3304$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Contact Power

$$MS_{\text{Contact Power}} = \frac{SS_{\text{Contact Power}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Contact Power}}} \\ = \frac{0.1496}{1} = 0.1496$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Contact Force

$$MS_{\text{Contact Force}} = \frac{SS_{\text{Contact Force}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Contact Force}}} \\ = \frac{0.8277}{1} = 0.8277$$

ค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย Ball Size

$$MS_{\text{Ball Size}} = \frac{SS_{\text{Ball Size}}}{\text{Degree of Freedom}_{\text{Ball Size}}} \\ = \frac{0.0045}{1} = 0.0045$$

6. การคำนวณการทดสอบอัตราส่วนของความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยจากสมการที่ 20 ดังนี้

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Loop Base

$$F_{\text{Loop Base}} = \frac{MS_{\text{Loop Base}}}{MS_E} = \frac{7.7040}{0.1487} = 51.81$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Ball Offset

$$F_{\text{Ball Offset}} = \frac{MS_{\text{Ball Offset}}}{MS_E} = \frac{6.8930}{0.1487} = 46.36$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Ball Thickness

$$F_{\text{Ball Thickness}} = \frac{MS_{\text{Ball Thickness}}}{MS_E} = \frac{0.4058}{0.1487} = 2.73$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Tail Length

$$F_{\text{Tail Length}} = \frac{MS_{\text{Tail Length}}}{MS_E} = \frac{0.7177}{0.1487} = 4.83$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Time Base

$$F_{\text{Time Base}} = \frac{MS_{\text{Time Base}}}{MS_E} = \frac{4.8673}{0.1487} = 32.73$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Power Base

$$F_{\text{Power Base}} = \frac{MS_{\text{Power Base}}}{MS_E} = \frac{7.3419}{0.1487} = 49.37$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Force Base

$$F_{\text{Force Base}} = \frac{MS_{\text{Force Base}}}{MS_E} = \frac{9.9755}{0.1487} = 67.08$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Stand by Power

$$F_{\text{Standby Power}} = \frac{MS_{\text{Standby Power}}}{MS_E} = \frac{0.0488}{0.1487} = 0.33$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Power Delay

$$F_{\text{Power Delay}} = \frac{MS_{\text{Power Delay}}}{MS_E} = \frac{0.4600}{0.1487} = 3.09$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Contact Time

$$F_{\text{Contact Time}} = \frac{MS_{\text{Contact Time}}}{MS_E} = \frac{0.3304}{0.1487} = 2.22$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Contact Power

$$F_{\text{Contact Power}} = \frac{MS_{\text{Contact Power}}}{MS_E} = \frac{0.1496}{0.1487} = 1.0$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Contact Force

$$F_{\text{Contact Force}} = \frac{MS_{\text{Contact Force}}}{MS_E} = \frac{0.8277}{0.1487} = 5.57$$

อัตราส่วนความแปรปรวนจากปัจจัย Ball size

$$F_{\text{Ball Size}} = \frac{MS_{\text{Ball Size}}}{MS_E} = \frac{0.0045}{0.1487} = 0.03$$

7. คำนวณหาร้อยละของอิทธิพลหลัก (Percentage Contribution) ว่ามีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองอยู่ในระดับใด โดยใช้สมการที่ 21 ได้ดังนี้

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Loop Base

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{\text{LB}} &= \left(\frac{\text{SS}_{\text{LB}}}{\text{SS}_{\text{T}} - \text{SS}_{\text{E}}} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{7.7046}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 19.39\% \end{aligned}$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Ball Offset

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{\text{BO}} &= \left(\frac{\text{SS}_{\text{BO}}}{\text{SS}_{\text{T}} - \text{SS}_{\text{E}}} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{6.8930}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 17.35\% \end{aligned}$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Ball Thickness

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{\text{BT}} &= \left(\frac{\text{SS}_{\text{BT}}}{\text{SS}_{\text{T}} - \text{SS}_{\text{E}}} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{0.4058}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 1.02\% \end{aligned}$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Tail Length

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{\text{TL}} &= \left(\frac{\text{SS}_{\text{TL}}}{\text{SS}_{\text{T}} - \text{SS}_{\text{E}}} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{0.7175}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 1.81\% \end{aligned}$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Time Base

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{\text{TB}} &= \left(\frac{\text{SS}_{\text{TB}}}{\text{SS}_{\text{T}} - \text{SS}_{\text{E}}} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{4.8681}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 12.25\% \end{aligned}$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Power Base

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{\text{PB}} &= \left(\frac{\text{SS}_{\text{PB}}}{\text{SS}_{\text{T}} - \text{SS}_{\text{E}}} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{7.3410}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 18.48\% \end{aligned}$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Force Base

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{\text{FB}} &= \left(\frac{\text{SS}_{\text{FB}}}{\text{SS}_{\text{T}} - \text{SS}_{\text{E}}} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{9.9763}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 25.11\% \end{aligned}$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Stand by Power

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{SP} &= \left(\frac{SS_{SP}}{SS_T - SS_E} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{0.0488}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 0.12\% \end{aligned}$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Power Delay

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{PD} &= \left(\frac{SS_{PD}}{SS_T - SS_E} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{0.4602}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 1.16\% \end{aligned}$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Contact Time

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{CT} &= \left(\frac{SS_{CT}}{SS_T - SS_E} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{0.3304}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 0.83\% \end{aligned}$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Contact Power

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{CP} &= \left(\frac{SS_{CP}}{SS_T - SS_E} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{0.1496}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 0.38\% \end{aligned}$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Contact Force

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{CF} &= \left(\frac{SS_{CF}}{SS_T - SS_E} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{0.8278}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 2.08\% \end{aligned}$$

ร้อยละของอิทธิพลหลักในปัจจัย Ball Size

$$\begin{aligned} \text{Percentage Contribution}_{BS} &= \left(\frac{SS_{BS}}{SS_T - SS_E} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{0.0044}{40.0243 - 0.2968} \right) \times 100\% = 0.01\% \end{aligned}$$

8. การคำนวณค่าที่ผิดปกติ (Outlier) โดยการแปลงให้อยู่ในรูปค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residual) ดังนี้

$$d_{ij} = \frac{e_{ij}}{\sqrt{MSE}}$$

$$d_{31} = \frac{e_{31}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-4.320}{\sqrt{4.30}} = -2.0833$$

$$d_{36} = \frac{e_{36}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-4.590}{\sqrt{4.30}} = -2.2135$$

$$d_{43} = \frac{e_{43}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-3.433}{\sqrt{4.30}} = -1.6555$$

$$d_{46} = \frac{e_{46}}{\sqrt{4.30}} = \frac{4.000}{\sqrt{4.30}} = 1.9290$$

$$d_{101} = \frac{e_{101}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-3.683}{\sqrt{4.30}} = -1.776$$

$$d_{106} = \frac{e_{106}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-4.963}{\sqrt{4.30}} = -2.3934$$

$$d_{120} = \frac{e_{120}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-4.557}{\sqrt{4.30}} = -2.1976$$

$$d_{135} = \frac{e_{135}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-4.140}{\sqrt{4.30}} = -1.9965$$

$$d_{149} = \frac{e_{149}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-3.900}{\sqrt{4.30}} = -1.8807$$

$$d_{185} = \frac{e_{185}}{\sqrt{4.30}} = \frac{4.000}{\sqrt{4.30}} = 1.9290$$

$$d_{187} = \frac{e_{187}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-4.647}{\sqrt{4.30}} = -2.2410$$

$$d_{199} = \frac{e_{199}}{\sqrt{4.30}} = \frac{4.023}{\sqrt{4.30}} = 1.9401$$

$$d_{208} = \frac{e_{208}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-3.447}{\sqrt{4.30}} = -1.6623$$

$$d_{229} = \frac{e_{229}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-4.410}{\sqrt{4.30}} = -2.1267$$

$$d_{241} = \frac{e_{241}}{\sqrt{4.30}} = \frac{4.253}{\sqrt{4.30}} = 2.0510$$

$$d_{253} = \frac{e_{253}}{\sqrt{4.30}} = \frac{3.753}{\sqrt{4.30}} = 1.8010$$

$$d_{371} = \frac{e_{371}}{\sqrt{4.30}} = \frac{3.547}{\sqrt{4.30}} = 1.7105$$

$$d_{378} = \frac{e_{378}}{\sqrt{4.30}} = \frac{4.630}{\sqrt{4.30}} = 2.2328$$

$$d_{396} = \frac{e_{396}}{\sqrt{4.30}} = \frac{3.837}{\sqrt{4.30}} = 1.8504$$

$$d_{439} = \frac{e_{439}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-4.793}{\sqrt{4.30}} = -2.3114$$

$$d_{456} = \frac{e_{456}}{\sqrt{4.30}} = \frac{4.300}{\sqrt{4.30}} = 2.0736$$

$$d_{496} = \frac{e_{496}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-4.627}{\sqrt{4.30}} = -2.2313$$

$$d_{532} = \frac{e_{532}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-4.770}{\sqrt{4.30}} = -2.3001$$

$$d_{642} = \frac{e_{642}}{\sqrt{4.30}} = \frac{3.503}{\sqrt{4.30}} = 1.6893$$

$$d_{671} = \frac{e_{671}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-4.660}{\sqrt{4.30}} = -2.2473$$

$$d_{673} = \frac{e_{673}}{\sqrt{4.30}} = \frac{4.433}{\sqrt{4.30}} = -2.1378$$

$$d_{681} = \frac{e_{681}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-3.673}{\sqrt{4.30}} = -1.7713$$

$$d_{690} = \frac{e_{690}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-3.790}{\sqrt{4.30}} = -1.8277$$

$$d_{700} = \frac{e_{700}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-4.250}{\sqrt{4.30}} = -2.0495$$

$$d_{701} = \frac{e_{701}}{\sqrt{4.30}} = \frac{-3.653}{\sqrt{4.30}} = -1.7616$$

$$d_{715} = \frac{e_{715}}{\sqrt{4.30}} = \frac{5.610}{\sqrt{4.30}} = 2.7054$$

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวประภากรณ์ แดงบรรจง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 3 เมษายน 2526
สถานที่เกิด	จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (การอาหาร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

