

การวิเคราะห์ปัจจัยในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิค
การออกแบบการทดลอง

**FACTOR ANALYSIS FOR DRILLING PRINTED CIRCUIT BOARD
BY DESIGN OF EXPERIMENT TECHNIQUE**



จาตุรนต์ จันทร์ดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์ปัจจัยในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิค
การออกแบบการทดลอง



จตุรนต์ จันทร์ดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ปัจจัยในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคการ ออกแบบการทดลอง
	Factor Analysis for Drilling Printed Circuit Board by Design of Experiment Technique
ชื่อ - นามสกุล	นายจาตุรนต์ จันทร์ดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐา คุปต์ชัยเชียร
ปีการศึกษา	2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....	ประธานกรรมการ
(ดร.ระพี กาญจนะ)	
.....	กรรมการ
(ดร.กรกฎ เหมสถาปัตยกรรม)	
.....	กรรมการ
(ดร.สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐา คุปต์ชัยเชียร)	

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ศิวสอาด)
วันที่ 18 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2555

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ปัจจัยในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง
ชื่อ – นามสกุล	นายจาตุรงค์ จันทร์ดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐา คุปต์ชัยเชียร
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงการนำเทคนิคการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการลดปัญหาคุณภาพในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Board: PCB) ที่พบในโรงงานกรณีศึกษา จากการเก็บข้อมูลผลิตภัณฑ์ใหม่ในปี พ.ศ. 2553 โรงงานได้ผลิตแผ่น PCB ตัวอย่าง 669 งาน คิดเป็นจำนวน 78,303.08 ตารางฟุต พบปัญหาคุณภาพที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ 12 งาน คิดเป็นจำนวน 977.52 ตารางฟุต ความสูญเสียคิดเป็นมูลค่า 157,845 บาท หรือโดยเฉลี่ย 81.46 ตารางฟุตต่อเดือน หรือ 13,153.75 บาทต่อเดือน ปัญหาที่พบบมากที่สุดคือ การเจาะสล็อตสั้นรูปร่างเบี้ยวผิดไปจากข้อกำหนด

ระเบียบวิธีวิจัยประกอบด้วยการนำแผนภูมิฟิชเร โดมาใช้ในการเรียงลำดับปัญหาของกระบวนการเจาะที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ การใช้แผนผังแสดงเหตุและผลในการหาปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อปัญหา แล้วทำการกำหนดและหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ที่ก่อให้เกิดของเสียน้อยที่สุด โดยใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองแบบเศษส่วนของแฟกทอเรียล (2^{4-1})

ผลการดำเนินงานพบว่าระดับปัจจัยในการเจาะที่เหมาะสมคือ 1) ดอกเจาะสล็อตควรใช้ความยาวเกลียวส่วน 7 มิลลิเมตร 2) วิธีกำหนดตำแหน่งการเจาะแบบ In-line 3) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ 10 นิ้วต่อนาที และ 4) ความเร็วในการหมุนของดอกเจาะ 20,000 รอบต่อนาที โดยเทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหการที่นำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาในอุตสาหกรรมพบว่า สามารถลดปัญหาคุณภาพการเจาะแผ่น PCB ที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ เหลือโดยเฉลี่ย 40 ตารางฟุตต่อเดือน หรือ 6,398.17 บาทต่อเดือน ค่าใช้จ่ายคุณภาพลดลงคิดเป็นร้อยละ 54

คำสำคัญ: แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การออกแบบการทดลอง การลดค่าใช้จ่ายคุณภาพ

Thesis Title	Factor Analysis for Drilling Printed Circuit Board by Design of Experiment Technique
Name - Surname	Mr. Jaturon Chandee
Program	Industrial Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Natha Kuptasthien
Academic Year	2011

ABSTRACT

This research had an objective to apply Design of Experiment technique to reduce quality problems in a drilling process of electronic printed circuit boards (PCB) at the case studied factory. From the new project data in 2010, the firm had produced 669 PCB samples which equaled 78,303.08 square feet. Twelve samples had drilling quality problem accounted for 977.52 square feet. The loss equaled 157,845 Baht. On average, the problem occurred at 81.46 square feet per month or 13,153.75 Baht per month. The most found problem was a shorter slot drilled out of shape which was not conformed to the customer requirement.

The research methodology composed of a problem prioritization of the drilling process with Pareto chart, a main effects definition by using a cause and effect diagram and level factors determinations in order to reduce scrap and quality problem with the design and analysis of a fractional factorial design (2^{4-1}) experiment.

The result showed that the appropriate level factor were 1) a slot drill bit flute length 7 mm., 2) an in-line method for CNC program, 3) an in-feed rate 10 inch per minute and 4) a spindle speed 20,000 round per minute. These industrial engineering techniques had proved to solve the quality problem. The defect has reduced to 40 square feet per month or 6,398.17 Baht per month accounted for 54% reduction in quality cost.

Keywords: printed circuit board, design of experiment, cost of quality reduction

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร. สมศักดิ์ อธิธิโสภณกุล ประธานกรรมการ ดร. กรรกฎ เหมสถาปัติ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ดร. ระพี กาญจนะ กรรมการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐา คุปต์ชัยธร กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนสละเวลาอันมีค่าตอบข้อสัมภาษณ์อันเป็นผลให้งานวิจัยมีความชัดเจน ครบถ้วน และสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริงเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษาที่ได้ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยนี้ ขอขอบคุณบุคลากรบัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษา นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนพัฒนาองค์ประกอบการเรียนรู้ตลอดระยะเวลาในการศึกษาของผู้วิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

จาตุรนต์ จันทร์ดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	8
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	8
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	8
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	9
1.6 แผนการดำเนินการวิจัย.....	9
1.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย.....	10
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	10
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 การออกแบบโปรแกรมสำหรับการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	11
2.2 ค่าใช้จ่ายคุณภาพ (Cost of Quality).....	19
2.3 เครื่องมือควบคุมคุณภาพเชิงวิศวกรรม (7 QC Tools).....	21
2.4 การนำข้อมูลทางสถิติมาใช้ในการวิจัย.....	27
2.5 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง.....	29
2.6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Designs).....	34
2.7 การทบทวนวรรณกรรมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	53
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	56
3.1 การกำหนดขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	56

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2 การศึกษาขั้นตอนการเขียน โปรแกรมเจาะและกระบวนการเจาะแผ่น PCB.....	57
3.3 การเก็บข้อมูลของปัญหาที่เกิดจาก โปรแกรมเจาะ.....	62
3.4 วิเคราะห์ปัญหาการเจาะ โดยใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ	63
3.5 การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม.....	66
3.6 การอภิปรายและสรุปผล	75
4 ผลการวิจัย.....	77
4.1 ผลการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)	77
4.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม	87
4.3 การดำเนินการปรับปรุง	91
4.4 ผลการนำแนวทางการวิจัยไปแก้ปัญหารับปรุงการผลิต.....	93
4.5 การทดสอบสมมุติฐานการวิจัย	96
4.6 การกำหนดระเบียบวิธีการปฏิบัติงาน	98
5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	100
5.1 สรุปผลการวิจัย	100
5.2 อภิปรายผล.....	102
5.3 ข้อเสนอแนะ	103
รายการอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	109
ก ขั้นตอนกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board: PCB)	110
ข การออกแบบการทดลอง โดย Minitab 15	116
ค เอกสารการปฏิบัติงาน	129
ง ตารางความน่าจะเป็นแบบนอร์มอล.....	133
ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	135
ประวัติผู้เขียน.....	151

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ประเภทผลิตภัณฑ์ที่เขียน โปรแกรมเจาะในปี พ.ศ. 2553.....	5
1.2 งานตัวอย่างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พบปัญหาจาก โปรแกรมเจาะในปี พ.ศ. 2553.....	5
1.3 การเจาะสล็อตประเภทต่างๆ ที่ใช้ในการเจาะแผ่น PCB.....	6
1.4 แผนการดำเนินการวิจัย.....	9
2.1 ขนาดดอกสำหรับเจาะสล็อตและความยาวเกลียวสว่าน	15
2.2 รูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย.....	35
2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ตัวแปร.....	39
2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบ 2^k	41
2.5 อัตรส่วนของผลจากปัจจัยหลักต่อจำนวนปัจจัยรวมทั้งหมดในการทดลอง.....	43
2.6 เศษส่วน 2^{k-1} ของการออกแบบ 2^3 ทั้งสองแบบ.....	45
2.7 โครงสร้างคู่แฝดแฝงของการออกแบบ 2_{IV}^{6-2} ซึ่งมี $I = ABCE = BCDF = ADEF$	47
2.8 โครงสร้างคู่แฝดแฝงของการออกแบบ 2_{IV}^{6-2} ซึ่งมีตัวกำหนด $I=ABCD$ และ $I=BCDF$...	48
3.1 รายละเอียดปัญหาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พบในปี พ.ศ. 2553	63
3.2 ระดับปัจจัยหลัก (Factor) ของปัญหา.....	68
3.3 การเปรียบเทียบการทดลองแบบ Factorial Design	70
3.4 การออกแบบการทดลอง 2^{4-1} และความสัมพันธ์แฝดแฝง โดยใช้ Minitab 15.....	71
3.5 การออกแบบการทดลอง (2_{IV}^{4-1}) ที่มีตัวกำหนดความสัมพันธ์ $I = ABCD$	72
3.5 แผนผังการออกแบบการทดลอง (2_{IV}^{4-1}) โดยใช้ Minitab 15	73
4.1 บันทึกผลการทดลอง (2_{IV}^{4-1}) ที่มีตัวกำหนดความสัมพันธ์ $I = ABCD$	78
4.2 ผลการออกแบบการทดลอง (2_{IV}^{4-1}) โดยใช้ Minitab 15	79
4.3 การวิเคราะห์ Estimated Effects and Coefficients for Yield	82
4.4 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA).....	82
4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างคู่แฝดแฝง (Alias Structure).....	87
4.6 การควบคุมระดับปัจจัยที่เหมาะสม.....	90
4.7 ประเภทผลิตภัณฑ์ที่เขียน โปรแกรมเจาะในเดือน มี.ค.-พ.ค. พ.ศ. 2554.....	93
4.8 รายละเอียดปัญหาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พบหลังการปรับปรุงในเดือน มี.ค.-พ.ค. พ.ศ. 2554	94
4.9 งานตัวอย่างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พบปัญหาหลังการปรับปรุงในเดือน มี.ค.-พ.ค. พ.ศ. 2554 ...	95
4.10 เปรียบเทียบสัดส่วนของเสียในการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง	95

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 สัดส่วนผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ PCB เป็นส่วนประกอบ.....	2
1.2 ขั้นตอนการออกแบบการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่ของฝ่ายวิศวกรรม.....	4
1.3 ปัญหาของการเจาะสล็อตสั้น	7
2.1 การออกแบบแผ่น PCB เป็น Panel	11
2.2 เครื่องเจาะ CNC แบบ 6 หัวเจาะ (6 Spindle Head).....	13
2.3 ดอกเจาะและดอกกัดแผ่น PCB.....	14
2.4 ดอกปกติสำหรับเจาะรูบนแผ่น PCB	14
2.5 ดอกสำหรับเจาะสล็อต (Slot Drill Bit) บนแผ่น PCB.....	15
2.6 Non Plate Through Hole (NPTH)	16
2.7 Plate Through Hole (PTH)	16
2.8 วิธีการเจาะสล็อตแบบ In-line และ End-point	18
2.9 ตัวอย่างใบตรวจสอบสำหรับการบันทึกข้อมูลประเภทเงงนับ	22
2.10 ตัวอย่างแผนภูมิพารโต (Pareto Chart).....	23
2.11 ตัวอย่างแผนผังสาเหตุและผลของผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐาน.....	24
2.12 ตัวอย่างกราฟประเภทต่างๆ	25
2.13 ฮิสโตแกรม (Histogram).....	26
2.14 ผังการกระจาย (Scatter Diagram).....	27
2.15 แผนภูมิควบคุม (Control Chart)	27
2.16 ตัวอย่าง ปัจจัย กระบวนการ และตัวแปรตอบสนอง.....	31
2.17 องค์ประกอบของ Design of Experiment.....	33
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	56
3.2 แผนผังขั้นตอนการจัดทำโปรแกรมเจาะ	58
3.3 แผนผังขั้นตอนการเจาะแผ่น PCB	59
3.4 วิธีการเจาะแผ่น PCB	60
3.5 การใช้เครื่อง Optical Measurement วัดขนาด Multi-hit Slot.....	61
3.6 แผนภูมิพารโตของปัญหาที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ	64
3.7 แผนผังสาเหตุและผลของปัญหาที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ.....	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.8 แผนผังขั้นตอนการวางแผนออกแบบการทดลอง	66
4.1 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (4 in 1 Graphs from Minitab).....	81
4.2 แผนภูมิพาเรโตของปัจจัยตอบสนอง	84
4.3 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ผลกระทบของปัจจัยตอบสนอง	85
4.4 การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยหลัก (Main Effects Plot)	88
4.5 การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยร่วม (Interaction Plot)	88
4.6 การกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Plot).....	90
4.7 ระยะเวลาขยวเกลียวส่วนนของคอกส่วน	91
4.8 วิธีการกำหนดลำดับการเจาะสลีตแบบ In-line.....	92
4.9 การใช้ซอฟต์แวร์ CAD/CAM ในการกำหนดลำดับการเจาะสลีต	92
4.10 กราฟแห่งเปรียบเทียบอัตราส่วนแผ่น PCB ตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพก่อนและหลัง ปรับปรุงวิธีการทำงาน	96
4.11 การเปรียบเทียบค่า Z_0 ที่ได้จากการคำนวณ และค่า $Z_{0.05}$ จากตาราง	98



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AHI	Automatic Hole Inspection
ANOVA	Analysis of Variance
AOI	Automatic Optical Inspection
B/C	Board Cut
B/O	Inner Brown Oxide / Black Oxide
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CCS	Cleaning Coating Surface
C/M	Component Mark Printing / Silk Legend
CNC	Computer Numeric Control
D/F	Inner Dry Film
E/T	Etching
FL	Flute Length
FR-4	Fiberglass Reinforced Material Type 4
Hit	Number of Drilling
IMG	Immersion Gold
IMS	Immersion Silver
IMT	Immersion Tin
OPE	Optical Punch Edge
OSC	Organic Solderability Coating
PCB	Printed Circuit Board
P/P	Pattern / Plating
PTH	Plate Through Hole
SCI	Sterling Corrosion Inhibitor
SCL	Solder Coat Leveling / Hot Air leveling / Lead-free Coating
S/M	Solder Mark
V/S	Visual Inspection

บทที่ 1

บทนำ

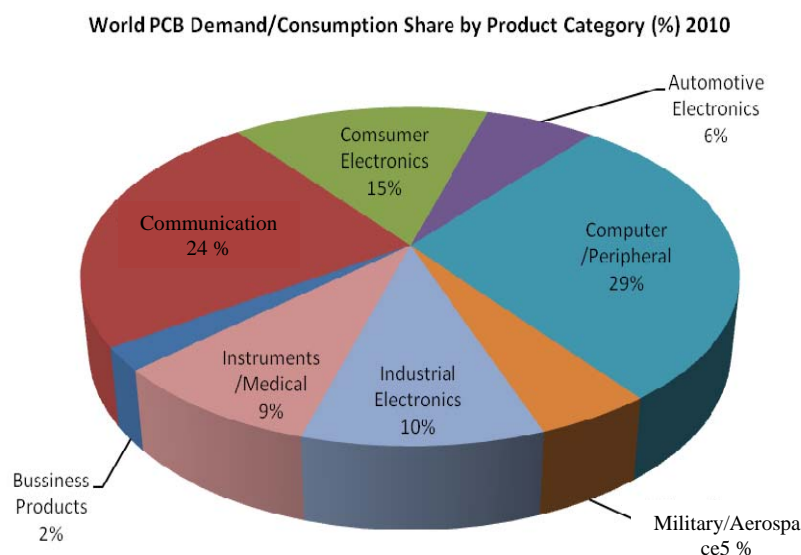
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (PCB: Printed Circuit Board) แบบ Plate Through Holes ชนิดหลายชั้น (Multilayer Printed Circuit Board) มีการขยายตัวขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งปัจจุบันมีการแข่งขันกันในด้านคุณภาพ (Quality) การส่งมอบให้ทันตามกำหนดเวลา (On-time Delivery) ความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ (Reliability) ต้นทุนการผลิต (Cost) กำลังการผลิต (Capability) และเทคโนโลยีการผลิต โดยความต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพด้วยความรวดเร็ว (Lead Time & Quality) เป็นปัจจัยการแข่งขันอันดับต้นๆ ในอุตสาหกรรมนี้ ซึ่งจะส่งผลต่อการได้รับคำสั่งซื้อ ความน่าเชื่อถือ และภาพลักษณ์ของบริษัท บริษัทที่ทำธุรกิจประเภทนี้ต้องพัฒนาศักยภาพด้านผลิตภัณฑ์และเทคโนโลยี เพื่อรองรับการเติบโตของตลาดสินค้าในกลุ่ม High Technology ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว วงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างสั้นลง (Short Product Life Cycle) สอดคล้องกับสถานะในปัจจุบันที่ลูกค้ามีความต้องการสินค้าที่เร็วขึ้นกว่าเดิม ทั้งนี้ก็เพราะการที่ลูกค้าสามารถพัฒนาสินค้าของตัวเองออกสู่ตลาดได้เร็วกว่า จะทำให้ได้เปรียบคู่แข่งอย่างมากในด้านการค้า

จากข้อมูลในปี พ.ศ.2553 พบว่ามีผู้ผลิต PCB จากประเทศญี่ปุ่นและไต้หวันที่มีโรงงานผลิตทั้งในประเทศและต่างประเทศ รวมทั้งในประเทศไทย มีปริมาณการผลิตสูงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิต PCB ทั้งหมดของโลก จากมูลค่าตลาดประมาณ 51 พันล้านเหรียญสหรัฐ โดยจะแบ่งตามหมวดหมู่ของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์แสดงในภาพที่ 1.1 คือ คอมพิวเตอร์ 29 เปอร์เซ็นต์ อุปกรณ์สื่อสาร 24 เปอร์เซ็นต์ เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป 15 เปอร์เซ็นต์ อิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม 10 เปอร์เซ็นต์ อุปกรณ์เครื่องมือทางการแพทย์ 9 เปอร์เซ็นต์ อุตสาหกรรมรถยนต์ 6 เปอร์เซ็นต์ ทางทหารและอวกาศ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยผลผลิตในแต่ละปีทุกผลิตภัณฑ์จะมีการขยายตัวมากขึ้นและคาดว่าจะสูงขึ้นในปี พ.ศ. 2554 [1]

ดังนั้นเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่ต้องการผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์รุ่นใหม่ๆ อยู่เสมอด้วยความรวดเร็ว ผู้ผลิต PCB ในประเทศไทยโดยมากเน้นการผลิต PCB สำหรับเครื่องมือสื่อสารโทรคมนาคม ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ และเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งมีการแข่งขันทางด้านราคาสูง โดยผู้ผลิต PCB หลายรายอาจได้รับผลกระทบจากการผลิต PCB จากโรงงานในประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีนและไต้หวัน โดยหากเป็นกลุ่มผู้ผลิต PCB ที่ใช้เทคโนโลยีการผลิตไม่สูงมากนัก และ

ต้องนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศเพราะจะถูกกดดันด้านราคาขาย ขณะที่ผู้ผลิต PCB ที่ใช้เทคโนโลยีสูงและสามารถควบคุมต้นทุนการผลิตได้ดีกว่า เนื่องจากอุตสาหกรรมนี้เป็นการแข่งขันที่เน้นด้านคุณภาพและความน่าเชื่อถือมากกว่าการแข่งขันทางด้านราคา [2]



ภาพที่ 1.1 สัดส่วนผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ PCB เป็นส่วนประกอบ [1]

แต่เนื่องจากขีดจำกัดด้านทรัพยากรในส่วนต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น จึงส่งผลสืบเนื่องให้บริษัทผู้ผลิต PCB ที่เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดในการผลิตสูง ต้องประสบปัญหาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และพบของเสียในการผลิตเป็นจำนวนมาก ดังนั้นผู้ผลิตจำเป็นต้องปรับปรุงเทคนิคผลิตเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพ (Efficiency) มากที่สุด โดยมีรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) น้อยที่สุด เพื่อที่จะส่งผลิตภัณฑ์ให้ลูกค้าให้ทันตามตารางการผลิต ซึ่งลูกค้าบางบริษัทมีการจัดตั้งสายการผลิตเพื่อรอ PCB มาประกอบตามกำหนดเวลาที่วางแผนไว้ ส่งผลให้ชิ้นงาน PCB ตัวอย่างจำเป็นต้องมีคุณภาพตามข้อกำหนดของลูกค้า เพื่อให้ได้คำสั่งซื้อปริมาณมาก (Mass Production) จากลูกค้า อีกทั้งเมื่อผลิตในปริมาณมากแล้ว บริษัทต้องสามารถควบคุมกระบวนการปริมาณของเสีย และต้นทุนการผลิตได้ เพื่อให้เกิดกำไรในเชิงธุรกิจ

โรงงานตัวอย่างที่ผู้วิจัยทำการศึกษา เป็นบริษัทผู้ผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดใหญ่แห่งหนึ่งในประเทศไทย มีผลิตภัณฑ์หลักคือแผ่น PCB แบบหลายชั้น สำหรับลูกค้ามีทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยมีกำลังการผลิตมากกว่า 900,000 ตารางฟุตต่อเดือน หรือประมาณ 11 ล้านตารางฟุตต่อปีในปี พ.ศ. 2553

ในการผลิตแผ่น PCB มีขั้นตอนในผลิตยาวที่สุดประมาณ 30 กระบวนการ ดังแสดงในภาคผนวก ก หน้า 110 ซึ่งในแต่ละกระบวนการจะมีขั้นตอนย่อยจำนวนมาก และสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลักประมาณ 10 กระบวนการ [3] ดังนี้คือ

- 1) การสร้างลายวงจรชั้นใน และกัดลายวงจร (Inner Layer and Etching Process)
- 2) การเจาะรู (Drilling Process)
- 3) การชุบทองแดงในรู (PTH Process)
- 4) การสร้างลายวงจรชั้นนอก (Dry Film Process)
- 5) การชุบเพิ่มความหนาทองแดง และกัดลายวงจร (Pattern Plating and Etching Process)
- 6) การพิมพ์สีเคลือบลายวงจร (Solder Mask Process)
- 7) การพิมพ์สีระบุตำแหน่งอุปกรณ์ (Component Mask Process)
- 8) การกัดแผ่น PCB เป็นรูปร่าง (Routing / Punching Process)
- 9) การเคลือบผิวสัมผัสอุปกรณ์ (Surface Finish)
- 10) การตรวจสอบด้วยไฟฟ้า และด้วยตา (Electrical Test & Final Inspection)

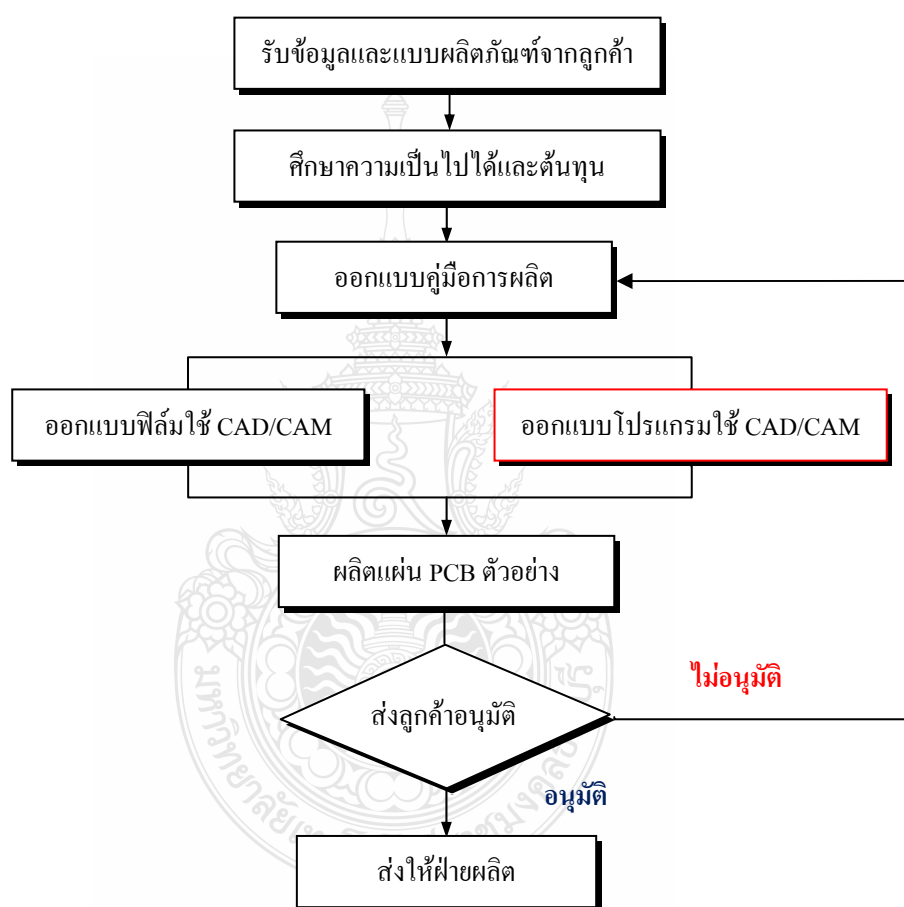
โดยบางขั้นตอนก็เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนยุ่งยาก จะใช้ความละเอียดรอบคอบในการทำงานสูง และต้องใช้เครื่องมือในการช่วยในการผลิต (Tooling Support) ซึ่ง Tooling ที่ใช้ในการผลิตแผ่น PCB ดังกล่าว จะมีอยู่ 2 ประเภทหลักคือ

- 1) โปรแกรม CNC สำหรับกระบวนการเจาะ (Drilling) และการกัด PCB (Routing)
- 2) ฟิล์ม (Artwork) สำหรับกระบวนการ Inner Layer, Dry Film, Solder Mask และ

Component Mask

ฝ่ายวิศวกรรม (PE: Product Engineering) จะมีหน้าที่ในการทำออกแบบและจัดทำ Tooling ทั้งสองประเภทที่เป็นส่วนสำคัญอย่างมากในการผลิต เพราะจะเป็นตัวกำหนดความถูกต้องตามแบบของลูกค้า (Drawing) และไฟล์ต้นฉบับ (Master Gerber File) ซึ่งต้องออกแบบภายใต้ Process Capacity Product Capacity และข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ 1) คู่มือผลิตภัณฑ์ (MI: Manufacturing Instruction) 2) ฟิล์ม (CAD/CAM Artwork Section) 3) โปรแกรม (CAD/CAM Program Section) สามารถเขียนขั้นตอนการออกแบบการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่ ดังภาพที่ 1.2

แผนกโปรแกรม (CAD/CAM Program Section) จะเป็นหน่วยงานที่ต้องรับผิดชอบ ออกแบบโปรแกรมและเทคนิคสำหรับการเจาะแผ่น PCB ในแต่ละผลิตภัณฑ์ โดยการใช้เครื่อง CNC เจาะแผ่น PCB ให้ได้ตำแหน่งและขนาดรูตามที่ได้ออกแบบไว้ ในการเขียนโปรแกรมเจาะจะทำโดยอ้างอิงจากแบบของลูกค้า (Customer Drawing) เป็นหลัก ภายใต้ความเหมาะสมกับความสามารถในการผลิต (Process Capability) ของโรงงานกรณีศึกษา



ภาพที่ 1.2 ขั้นตอนการออกแบบการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่ของฝ่ายวิศวกรรม

จากการเก็บข้อมูลการผลิตงานตัวอย่างในปี พ.ศ. 2553 พบว่ามีปริมาณโปรแกรมเจาะสำหรับแผ่น PCB ที่ถูกเขียนสำหรับงานแต่ละชนิด โดยแบ่งประเภทของโปรแกรมเจาะที่ผลิต รวมทั้งสิ้น 1,331 งาน ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ประเภทผลิตภัณฑ์ที่เขียนโปรแกรมเจาะในปี พ.ศ.2553

ประเภทโปรแกรมเจาะ	จำนวนงาน (งาน)
1) ผลิตภัณฑ์ใหม่	669
2) ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับคำสั่งซื้อปริมาณมาก	252
3) ผลิตภัณฑ์ที่ลูกค้าขอเปลี่ยนแปลงแบบ	43
4) ผลิตภัณฑ์ที่ขอเปลี่ยนแปลงภายใน	367
รวม	1,331

จากตารางที่ 1.1 ประเภทโปรแกรมเจาะสามารถแบ่งได้คือ 1) ผลิตภัณฑ์ใหม่ (New Project) 2) ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับคำสั่งซื้อปริมาณมาก (Sample to Mass Project) 3) ผลิตภัณฑ์ที่ลูกค้าขอเปลี่ยนแปลงแบบ (Customer Change Project) 4) ผลิตภัณฑ์ที่ขอเปลี่ยนแปลงภายในโดยที่ไม่กระทบต่อการใช้งานของลูกค้า (Internal Change Project) รวมข้อมูลการผลิตทั้งหมด 1,331 งาน ที่กล่าวมา ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาในเฉพาะส่วนผลิตภัณฑ์ใหม่จำนวน 669 งาน พบว่าปัญหาในการผลิตแบ่งเป็น 2 ด้าน คือปัญหาด้านคุณภาพ (Quality) และปัญหาด้านประสิทธิภาพการผลิต (Output) โดยแสดงรายละเอียดของปัญหาที่พบในปี พ.ศ. 2553 ในตารางที่ 3.1 และสามารถสรุปออกมาเป็นข้อมูลสำหรับการวิจัยในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 งานตัวอย่างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พบปัญหาจากโปรแกรมเจาะในปี พ.ศ. 2553

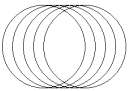
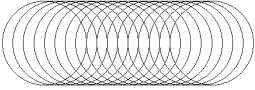
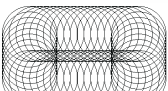
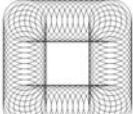
โปรแกรมเจาะ CNC	จำนวนงาน (งาน)	ปริมาณที่พบ (ตารางฟุต)
งานตัวอย่างผลิตภัณฑ์ใหม่	669	78,303.08
ปัญหาด้านคุณภาพ	12	977.52
ปัญหาด้านประสิทธิภาพ	8	N/A

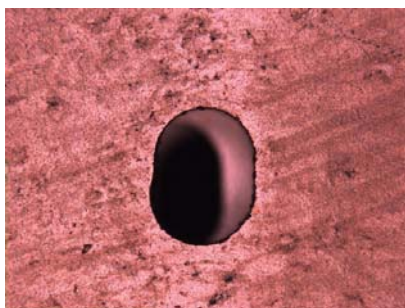
จากตารางที่ 1.2 แสดงปริมาณการผลิตงานตัวอย่างแผ่น PCB จากข้อมูลข้างต้นพบปัญหาด้านประสิทธิภาพจะส่งผลต่อกำล้างการผลิต 8 งาน และปัญหาด้านคุณภาพที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ 12 งาน รวม 977.52 ตารางฟุต ถ้าผลิตเป็นแผ่น PCB คิดเป็นมูลค่า 157,845 บาท (ที่มา: อัตราราคาขายเฉลี่ย 5.3825 USD/Sq.ft. อัตราแลกเปลี่ยน 30 บาท/USD) จากข้อมูลปัญหาด้านคุณภาพ 12 งานที่มีการร้องเรียนจากแผนกควบคุมคุณภาพ แผนกประกันคุณภาพและลูกค้ามากที่สุดคือ ปัญหาการเจาะ

สล๊อตแล้วรูปร่างเบี้ยวผิดไปจากข้อกำหนดคลุกค้ำ (Multi-hit Slot Out of Shape) จำนวน 9 งานคิดเป็น 45 เปอร์เซ็นต์ จากปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมด 20 งาน

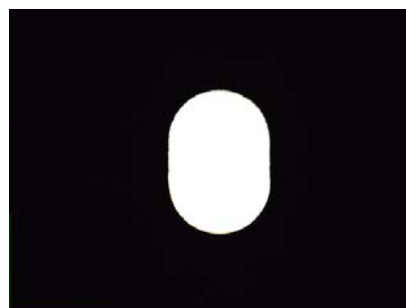
สล๊อตในแผ่น PCB คือช่องสำหรับประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Assembly) โดยจะมีระยะขนาด (Dimension: Width, Length, Radian) ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ และค่าเผื่อ (Tolerance) กำหนดในแบบของผลิตภัณฑ์ สำหรับโรงงานผลิตแผ่น PCB นอกจากนี้จะเขียนโปรแกรมให้เครื่อง CNC เจาะแผ่นบอร์ดเป็นรูที่ต้องการแล้ว แต่ยังสามารถเขียนคำสั่งโปรแกรมให้เจาะเป็นช่อง (Multi-hit Slot Drill) ได้โดยเจาะซ้ำๆ ตำแหน่งตติๆ กันต่อเนื่องกันไป สามารถแบ่งประเภทการเจาะสล๊อตแบบต่างๆ ดังตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 การเจาะสล๊อตประเภทต่างๆ ที่ใช้ในการเจาะแผ่น PCB

รูปสล๊อตแต่ละประเภท	ประเภทของการเจาะ Multi-hit Slot Drill
	สล๊อตสั้น (Short Slot) (Slot Length Shorter than 2 Time of Diameter Drill Bit)
	สล๊อตยาว (Long Slot) (Slot Length Longer than 2 Time of Diameter Drill Bit)
	สล๊อตสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Slot)
	สล๊อตสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square slot)



QC Rejected



QC Accepted

ภาพที่ 1.3 ปัญหาของการเจาะสล๊อตสั้น

ภาพที่ 1.3 แสดงการเจาะสล๊อตที่ลูกค้าไม่ยอมรับ และยอมรับในการผลิต เมื่อทำการวิเคราะห์ปัญหาการเจาะสล๊อตแล้ว พบว่ารูปร่างสล๊อตเบี้ยวผิดไปจากข้อกำหนดลูกค้า ที่เกิดขึ้นเป็นการเจาะประเภท “สล๊อตสั้นแล้วรูปร่างเบี้ยวผิดไปจากข้อกำหนดลูกค้าทั้งหมด” ส่งผลให้ขนาดสล๊อต (Dimension) ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า (Out of Specification) อาจเกิดปัญหาเมื่อลูกค้านำแผ่น PCB ไปใส่ขาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในกระบวนการประกอบ (Assembly) ไม่ได้

ผู้บริหารขององค์กรได้เล็งเห็นและตระหนักอยู่เสมอว่า การลดปัญหาในการผลิตเป็นสิ่งสำคัญอย่างมาก และสนับสนุนให้มีการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นตอนการผลิต โดยเฉพาะกระบวนการผลิต Tooling ที่เป็นต้นแบบ ซึ่งการจัดทำโปรแกรมเจาะเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งในการผลิตที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพ ประสิทธิภาพ และต้นทุนการผลิตโดยตรง การลดปัญหาที่เกิดขึ้นและการทำให้ถูกต้องตั้งแต่ครั้งแรก จึงเป็นเป้าหมายของฝ่ายวิศวกรรม ที่สอดคล้องกับนโยบายคุณภาพของทางบริษัท จะเห็นว่าการดำเนินงานในปัจจุบันยังไม่บรรลุตามนโยบายที่กำหนด เนื่องจากไม่ได้มีการแก้ไขปัญหาให้ถูกต้องตามหลักวิชาการอย่างแท้จริง การแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า และขาดมาตรฐานในการปฏิบัติงาน ซึ่งสิ่งเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหามากมายเป็นวงจรที่เกิดขึ้นซ้ำ เช่น ของเสีย การผลิตที่ล่าช้า ชิ้นงานที่ผลิตมีจำนวนไม่พอส่งมอบ ต้นทุนในการผลิต การส่งงานตัวอย่างที่มีคุณภาพต่ำผิดไปจากข้อกำหนดไปให้ลูกค้า และอาจจะส่งผลเสียต่อความน่าเชื่อถือขององค์กรได้

ในจุดนี้จึงเป็นเหตุ ทำให้ผู้วิจัยต้องการที่จะศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปัญหาคุณภาพการเจาะของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นกระบวนการหลักอย่างหนึ่งในการผลิต เพื่อแก้ไขปรับปรุงก่อนการได้รับคำสั่งซื้อปริมาณมาก และลดค่าใช้จ่ายคุณภาพที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาสาเหตุของปัญหาการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

1.2.2 เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม ในการเจาะที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการผลิต โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

1.2.3 เพื่อลดปัญหาและค่าใช้จ่ายคุณภาพจากการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ลงอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะมีผลต่อคุณภาพในการผลิตมากขึ้นแตกต่างกัน ซึ่งหากมีการศึกษาและควบคุมระดับของปัจจัยได้ ก็จะทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพการเจาะลดลงอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการปรับปรุงแก้ไขอย่างมุ่งมั่นและเป็นระบบ ซึ่งส่งผลให้ค่าใช้จ่ายคุณภาพที่จะลดลงตามไปด้วย

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาปัญหาคุณภาพที่เกิดขึ้นและทำการแก้ไข ณ บริษัทผู้ผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ กรณีศึกษา โดยเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง ธันวาคม ปี พ.ศ. 2553 ทำการกำหนดปัญหาในการเจาะจากแผนภูมิฟิชเรโต แล้ววิเคราะห์สาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนผังสาเหตุและผล

1.4.2 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของการเจาะในแต่ละตัว ที่จะทำให้เกิดปัญหาน้อยที่สุด โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบจากโปรแกรม Minitab 15

1.4.3 ทำการทดลองกับแผ่นบอร์ดตัวอย่างที่ใช้ในการผลิต โดยการควบคุมปัจจัยให้ต่างๆ ของแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับการผลิตจริงทุกประการ

1.4.4 ตัวแปรตอบสนองที่มีคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการยอมรับคุณภาพ อ้างอิงจากมาตรฐานตรวจสอบคุณภาพจากโรงงานตัวอย่าง และค่าระยะเผื่อ (Tolerance) ตามแบบของลูกค้า

1.4.5 ค่าใช้จ่ายคุณภาพที่นำมาคิด ทางผู้วิจัยคิดเฉพาะค่าใช้จ่ายทางตรงเนื่องจากความล้มเหลวภายใน (Internal Failure Cost) ในการผลิต เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบความสามารถในการแก้ไขปัญหา

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการ ในกระบวนการผลิต ตลอดจนขั้นตอนการเจาะแผ่น PCB

1.5.2 ศึกษาสภาพปัญหาการเจาะที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพแผ่น PCB รวบรวมปัญหาที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2553 เพื่อจัดเรียงลำดับความสำคัญ และคัดเลือกปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพ โดยใช้แผนภูมิพารโต

1.5.3 วิเคราะห์หาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อปัญหาการเจาะ โดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล

1.5.4 ทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) แบบเศษส่วนแฟกทอเรียล

1.5.5 ทำการทดลอง และวิเคราะห์ระดับของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเจาะ

1.5.6 ทำการปรับปรุง กำหนดวิธีการทำงาน และเก็บข้อมูลหลังการปรับปรุง

1.5.7 อภิปรายและสรุปผล พร้อมข้อเสนอแนะ

1.5.8 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ เพื่อเผยแพร่งานวิจัยต่อสาธารณะ

1.6 แผนการดำเนินการวิจัย

สถานที่ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย และรวบรวมข้อมูลคือ โรงงานผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ตัวอย่าง เป็นที่ทำการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล โดยจัดทำแผนในการดำเนินการวิจัย เพื่อใช้ในการติดตามการปฏิบัติงานต่างๆ เพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่กำหนด ดังตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.4 แผนการดำเนินการวิจัย

รายการ แผน (Plan) ปฏิบัติ (Actual)	ระยะเวลาการดำเนินการวิจัย								
	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย	ธ.ค	
	53	54	54	54	54	54	54	54	54
1.ศึกษากระบวนการเจาะ ทฤษฎีและหลักการ	←.....→								
2.เก็บข้อมูลและกำหนดปัญหาในการเจาะ.	←.....→								
3.วิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัญหา		←.....→							
4.การออกแบบการทดลอง (DOE)			←.....→						
5.ทำการทดลอง และวิเคราะห์ระดับปัจจัย				←.....→					
6.การปรับปรุงวิธีการและเก็บข้อมูล					←.....→				
7.อภิปรายและสรุปผล						←.....→			
8.จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ เพื่อเผยแพร่							←.....→		

1.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

1.7.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ และโปรแกรม Microsoft Excel, Microsoft Word, Microsoft Power Point, Minitab 15 เป็นต้น

1.7.2 เครื่อง HP Work Station และซอฟต์แวร์สำหรับงานออกแบบ PCB (CAD/CAM)

1.7.3 เครื่องเจาะ CNC และอุปกรณ์ เช่น แผ่นบอร์ด FR-4, Slot Drill Bit, PIN Gage

1.7.4 อุปกรณ์ช่วยในการเก็บข้อมูล เช่น นาฬิกาจับเวลา เวเนียร์ เครื่อง Optical Measurement (Optek) ช่วยในการวัด เป็นต้น

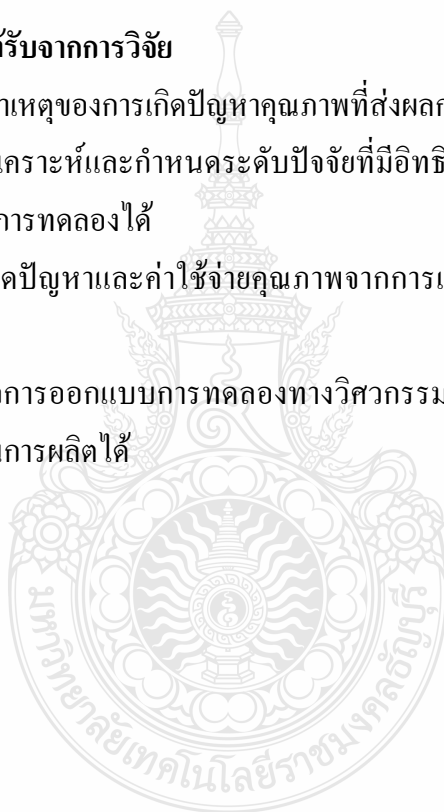
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.8.1 ทำให้เข้าใจถึงสาเหตุของการเกิดปัญหาคุณภาพที่ส่งผลกระทบต่อ การเจาะแผ่น PCB

1.8.2 ทำให้สามารถวิเคราะห์และกำหนดระดับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพการเจาะแผ่น PCB โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองได้

1.8.3 ทำให้สามารถลดปัญหาและค่าใช้จ่ายคุณภาพจากการเจาะแผ่น PCB ลงอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์

1.8.4 สามารถนำหลักการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม มาใช้ในการกำหนดระดับปัจจัยของปัญหาอื่นๆ ในกระบวนการผลิตได้



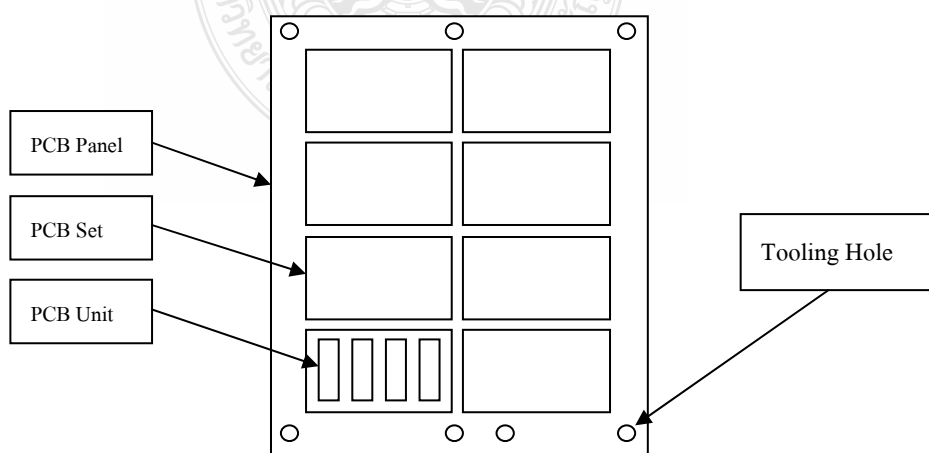
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบโปรแกรมสำหรับเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ในการผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ปริมาณมากในระดับโรงงาน จะใช้เครื่องจักรเป็นเครื่องมือการผลิตในแทบจะทุกขั้นตอน โดยการออกแบบจะเริ่มจากนำแผ่นลามิเนต (FR-4) ขนาดใหญ่มาคิดคำนวณพื้นที่ทั้งหมดและเผื่อขอบไว้ให้ เครื่องจักรจับชิ้นงานโดยไม่สัมผัสเข้าไปในชิ้นงาน และต้องใช้พื้นที่ทั้งหมดอย่างคุ้มค่าที่สุด เหลือเศษขอบบอร์ดน้อยที่สุด เพื่อลดการสูญเสีย และลดต้นทุนการผลิต การผลิตแผ่น PCB จะทำเป็นแผ่นใหญ่ (Panel) เพื่อที่จะได้ทำงานสะดวก ตั้งแต่การตัด การเจาะ การขึ้นลายวงจร การพิมพ์สี ก่อนจะส่งงานที่เป็นชิ้น (Set or Unit) ให้กับลูกค้า

ฝ่ายวิศวกรรมจะเป็นผู้เตรียมการผลิต ทำการคิดเรียงรูปงานของลูกค้าเป็นแผ่น PCB (Panel) ที่เหมาะสมก่อน แล้วจึงส่งให้ฝ่ายผลิตดำเนินการเจาะ ขึ้นลายวงจร พิมพ์สี จนครบขั้นตอน และส่งผลิตภัณฑ์เป็นแผ่น PCB (Set) ตาม Drawing ของลูกค้า เมื่อลูกค้ารับแผ่น PCB (Set) ก็นำไปใส่ตัวอุปกรณ์ต่างๆ (PCBA: Printed Circuit Board Assembly) จากนั้นนำมาตัดออกเป็นชิ้นเล็กๆ เป็นแผ่น PCB (Unit) เพื่อประกอบเป็นสินค้าสำเร็จรูป ดังนั้นจะเห็นว่าที่ขอบบอร์ดตอนเป็นแผ่นใหญ่ (Panel) จะมีรูและตำแหน่งต่างๆเพื่อไปตรงกับ เข็ม (Pin) ที่ยึดขณะทำการผลิตในทุกขั้นตอน เรียกว่า รูเครื่องมือ (Tooling Hole) ทำให้ทุกแผ่นที่ทำเสร็จออกมาจึงเหมือนกันหมด แต่ถ้าเกิดข้อผิดพลาดก็จะผิดเหมือนกันหมดเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างการออกแบบแผ่น PCB เป็น Panel

2.1.1 คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบการผลิต (CAD/CAM)

คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบการผลิต คือ สถานีคอมพิวเตอร์ (Work Station) กราฟฟิกความละเอียดสูงระบบยูนิกซ์ (Unix System) ผ่านซอฟต์แวร์เจเนซิส (Genesis Software) ในการออกแบบลายวงจร (Artwork File) และโปรแกรมเจาะ (NC Drill) ซึ่งจะมี Gerber File จากลูกค้า เป็นไฟล์พื้นฐานซึ่งแปลงได้จากไฟล์ PCB ที่ฝ่ายวิศวกรรมออกแบบ มาเป็นไฟล์ที่โปรแกรม CAD และเครื่องพล็อตฟิล์ม (Photo Plotter) สามารถอ่านได้ เพื่อนำมาถ่ายเป็นแบบลายวงจรใช้ในการทำแผ่น PCB ต่อไป โดยโปรแกรมออกแบบ PCB เกือบทุกโปรแกรมจะสามารถสร้าง (Generate) เป็น Gerber File ได้ โครงสร้างของ Gerber File จะประกอบด้วยค่าพิกัด X, Y และค่าซึ่งระบุว่าลายเส้นนั้นๆ เริ่มและสิ้นสุดที่จุดไหน รวมถึงส่วนของ Aperture Data ซึ่งเป็นตัวระบุรูปร่างและขนาดของเส้น รูและส่วนประกอบอื่นๆ และ Extended Gerber Format (RS274X) เป็นรูปแบบของไฟล์ Gerber ซึ่งจะรวมส่วนของรายการ Aperture เข้าไปด้วย ทำให้เราไม่ต้องกรอกค่า Aperture เข้าไปในตารางใหม่เมื่อเปลี่ยนจากระบบหนึ่งไปสู่อีกระบบหนึ่ง [4] โดยทั่วไปจะทำการออกแบบ PCB Unit หลายๆ ตัวรวมกันเป็น Set ตาม Drawing และหลายๆ Set เป็น Panel ดังที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้สามารถสร้างโปรแกรมเจาะและกัด จากระบบนี้

2.1.2 ระบบคำสั่ง CNC (Computer Numeric Control)

ระบบคำสั่ง CNC คือ ระบบโปรแกรมที่ถูกเขียนขึ้นในรูปแบบไฟล์ CNC เพื่อจะกำหนดมิติของการทำงาน (X,Y,Z) กำหนดคำสั่งการทำงานของแกนต่างๆ ทั้งนี้มาตรฐานการหมุนของแกนและการเคลื่อนที่ต่างๆ กำหนดด้วย DIN 66271 และ ISO Recommendation R 841 (เป็นระบบที่กำหนดค่ามาตรฐานในเครื่อง CNC) โดยกำหนดจากกฏนิ้วมือขวาที่ตั้งฉากกัน เป็นจุดเริ่ม (Zero) ซึ่งเป็นที่มาของแกน X, Y และ Z ที่เป็นตัวกำหนดทิศทางการทำงาน โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่อง CNC จะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมควบคุมซึ่งจะมีหลายโปรแกรมให้เลือกใช้ (ปัจจุบันใช้ประเภท Format: Excellon2) เพื่อให้ทำงานตามแบบที่ต้องการ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องขนาด ระยะ ตำแหน่ง โดยการสั่งงานจะสั่งผ่านคอมพิวเตอร์ให้เครื่อง CNC เริ่มเจาะงาน จนกระทั่งสิ้นสุดการทำงานได้ชิ้นงาน [5]

2.1.3 เครื่องเจาะ CNC (Computer Numerical Control Drilling Machine)

เครื่องเจาะ CNC เป็นเครื่องเจาะที่ทำงานโดยใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยควบคุมการทำงานตามชุดคำสั่งโปรแกรมเจาะ โดยจะเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y, Z ตาม NC Drill Program ที่เขียนขึ้นเป็น Panel ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.2 เครื่องเจาะ CNC แบบ 6 หัวเจาะ (6 Spindle Head)

ในการเขียนโปรแกรมเจาะ นอกจากจะกำหนดตำแหน่ง X, Y, Z โดยใช้คำสั่ง M Code และ G Code แล้ว ยังมีค่าที่ต้องกำหนดใน โปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของหัวเจาะหลัก ดังภาพที่ 2.2 อยู่ 2 แบบคือ

ก. ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ (F: In-Feed Rate) เป็นค่าที่กำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ (Spindle Head) มีหน่วยเป็น ipm (Inch Per Minute หรือ นิ้วต่อนาที) เช่น F075 หมายถึง หัวเจาะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 75 นิ้วต่อนาที [6]

ข. ความเร็วการหมุนของดอกเจาะ (S: Spindle Speed) เป็นค่าที่กำหนดการหมุนของหัวเจาะ ซึ่งจะทำให้ดอกเจาะหมุนด้วยความเร็วรอบมีหน่วยเป็น krpm (1,000 Round Per Minute หรือ 1,000 รอบต่อนาที) เช่น S010 หมายถึง สั่งให้หัวเจาะหมุนด้วยความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที [6]

2.1.4 ดอกสว่านเจาะ (Drill bit)

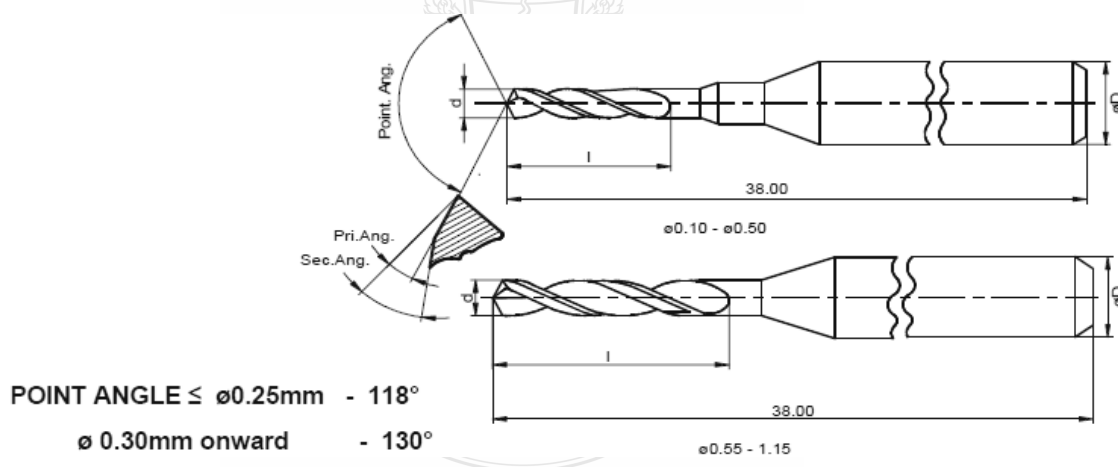
ดอกสว่านที่ใช้ในงานเจาะ PCB จะเป็นส่วนผสมของเหล็กและคาร์บอน (Carbide) มีความแข็งแรงแต่เปราะและหักง่าย เพราะถูกออกแบบมาให้ใช้งานกับเครื่องเจาะที่มีความเร็วสูงมากๆ ซึ่งสว่านทั่วไปไม่สามารถใช้งานได้ ภาพที่ 2.3 แสดงประเภทของดอกสว่านที่ใช้อยู่ในโรงงานผลิต PCB ซึ่งมีสองประเภทคือ ดอกเจาะ (Drill Bit) คมดอกจะอยู่ตรงปลายดอก โดยมีช่วงเกลียวสว่านจะเป็นตัวคลายเศษที่เจาะ และ ดอกกัด (Router Bit) คมดอกจะอยู่ด้านข้างรอบเกลียวสว่าน

การใช้งานดอกเจาะจะใช้เจาะงานเพื่อเป็นรูเท่านั้น แต่สามารถเขียนคำสั่งให้เจาะขึ้นงานเป็นช่อง (Multi-Hit Slot Drill) ได้โดยเจาะซ้ำๆ ตำแหน่งติดๆ กันต่อเนื่องกันไปแต่จะเสียเวลาและจะสิ้นเปลืองดอกมากเมื่อใช้ดอกเจาะปกติ เพราะจะพบปัญหาดอกหักและเสียคมดอกอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในทางผู้ผลิตดอกจึงมีการออกแบบดอกที่ใช้เจาะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ



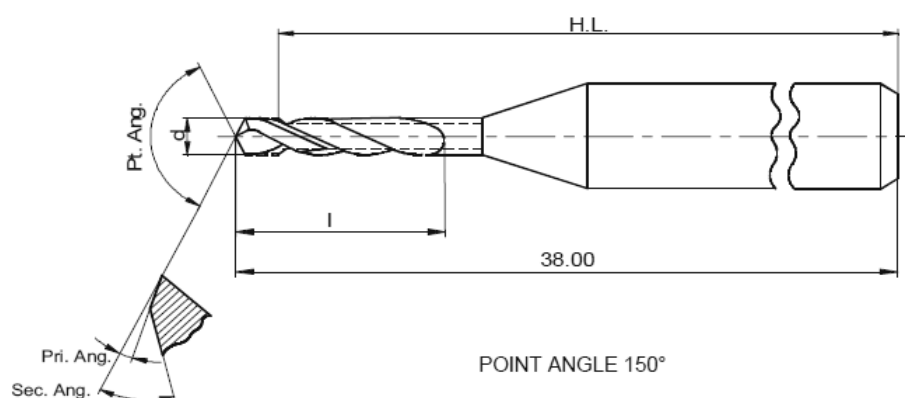
ภาพที่ 2.3 ดอกเจาะและดอกกัดแผ่น PCB [7]

ก. ดอกสำหรับเจาะรู (Drill Bit) ใช้สำหรับเจาะรูทั่วไป ในโรงงานตัวอย่างจะมีขนาด (Diameter) ดอกเจาะตั้งแต่ 0.25–6.50 มิลลิเมตร รวม 115 ขนาด ซึ่งการออกแบบปลายดอกปกติหัวดอกจะทำมุม 130 องศา สามารถเจาะได้ประมาณ 6,000 รู และสามารถนำมาลับคมได้ (Reshape) ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ดอกปกติสำหรับเจาะรูบนแผ่น PCB [8]

ข. ดอกสำหรับการเจาะสล็อต (Slot Drill Bit) ใช้สำหรับเจาะสล็อตโดยเฉพาะซึ่งปลายดอกเจาะชนิดนี้จะมีลักษณะการทำมุม 150 องศา มากกว่าดอกเจาะปกติ และไม่สามารถนำมาลับคมได้ ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ดอกสำหรับเจาะสลีต (Slot Drill Bit) บนแผ่น PCB [8]

จากการศึกษาดอกสำหรับเจาะสลีต (Slot Drill Bit) จากผู้ผลิตดอกรายหนึ่ง ในโรงงานผลิตแผ่น PCB ตัวอย่าง พบว่ามี 34 ขนาดดอก (ΦD : Diameter) ตั้งแต่ 0.50 มิลลิเมตร ถึง 2.15 มิลลิเมตร โดยเพิ่มทีละ 0.05 มิลลิเมตร โดยจะมีความยาวของเกลียวสว่าน (l: Flute Length) ขึ้นกับขนาดของดอก มีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดดอกสำหรับเจาะสลีตและความยาวเกลียวสว่าน

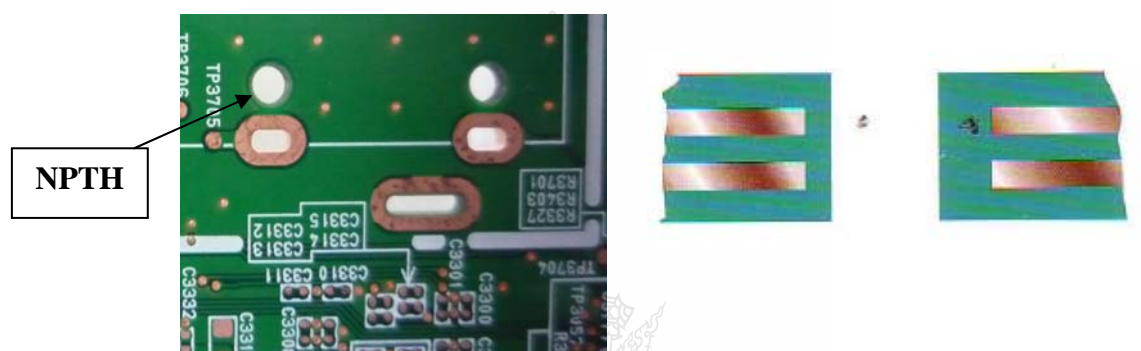
ขนาดดอก (มม.)	ความยาวเกลียวสว่าน (มิลลิเมตร)	
	ความยาวปกติ	ความยาวพิเศษ
0.50	5.50	7.00
0.55-0.95	7.00	8.50
1.00-2.15	8.50	7.00

จากตารางที่ 2.1 ในโรงงานกรณีศึกษามีผลิตภัณฑ์ที่ใช้ดอกเจาะสลีตขนาด 0.8 – 2.15 มิลลิเมตร จะใช้ความยาวเกลียวสว่านปกติ มากที่สุดถึง 80 เปอร์เซ็นต์ (ข้อมูลในปี พ.ศ. 2553) และส่วนดอกเจาะสลีตที่มีความยาวเกลียวสว่านยาวเป็นพิเศษ เป็นเพราะว่าในบางผลิตภัณฑ์ต้องการได้ผลผลิตเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้จำนวนแผ่นต่อชั้น (Panel per Stack) ที่มากขึ้น แต่ก็มีข้อเสียคือว่าจะเกิดการลื่นไถลของดอก (Overlap) ทำให้เกิดปัญหาตำแหน่งรูเคลื่อนออกจากระยะเพื่อลูกค้าสูง (Drill Shift Defect) และอีกทั้งอาจมีปัญหาดอกหักอีกด้วย หรือความยาวเกลียวสว่านที่สั้นเป็นพิเศษ ใช้สำหรับปรับปรุงด้านคุณภาพในบางผลิตภัณฑ์

2.1.5 ประเภทของรูในการเจาะ (Hole Type)

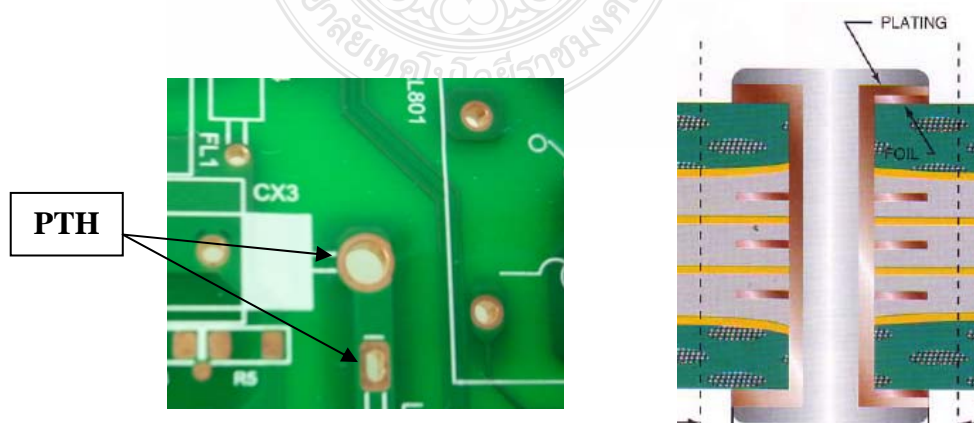
การศึกษาประเภทรูในการเจาะแผ่น PCB สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ รูที่มีทองแดง และรูที่ไม่มีทองแดง ซึ่งในแต่ละประเภทจะมีวัตถุประสงค์ในการใช้งานต่างกัน

ก. รูที่ไม่มีทองแดง (NPTH: Non Plate Through Hole) เป็นรูที่เจาะแล้วผ่านกระบวนการ PTH และ Plating แล้วจะถูก Etching ทองแดงในรูออก โดยสามารถไม่นำกระแสไฟฟ้าระหว่างชั้น (Layer) ของทองแดงได้ ส่วนใหญ่ใช้เป็นรูสำหรับจับยึดชิ้นงานในการทำงาน (Tooling Hole) แสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 Non Plate Through Hole (NPTH) [9]

ข. รูที่มีทองแดง (PTH: Plate Through Hole) เป็นรูที่เจาะแล้ว เมื่อแผ่นกระบวนการ PTH และ Plating ทองแดงในรู แล้วไม่ถูก Etching ทองแดงออก เพราะต้องการให้กระแสไฟฟ้าเชื่อมระหว่างชั้น (Layer) ของทองแดง แสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 Plate Through Hole (PTH) [9]

2.1.6 หลักการเขียนโปรแกรมเจาะสล๊อต โดยใช้ดอกเจาะสล๊อต (Slot Drill Bit)

ก. การคำนวณจำนวนรูต่อสล๊อต (Hit per Slot) การเขียนโปรแกรม CNC สำหรับเจาะ Mutli-hit Slot จะออกแบบโดยเริ่มจากกำหนดขนาดของดอกที่ใช้ก่อน (Diameter Slot Drill) แล้วทำการกำหนดความยาวของสล๊อตในการเจาะ บนเครื่องคอมพิวเตอร์ (CAD) เพื่อสร้างจำนวนรูในการเจาะต่อสล๊อตออกมา ซึ่งจำนวน Hit จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความยาวของสล๊อต (ปัจจุบันคอมพิวเตอร์สามารถคำนวณ จำนวน Hit และกำหนดระยะห่างในการเจาะแต่ละรูให้เท่ากันโดยอัตโนมัติ) โดยใช้สูตรในการคำนวณคือ

$$\text{จำนวน Hit Per Slot} = \frac{L - \phi D}{\sqrt{(0.002x\phi D) - 10^{-6}}} \quad (2.1)$$

โดย L = Slot Length (Inch)

ϕD = Diameter Drill Bit (Inch)

จากสูตรดังกล่าวค่าที่คำนวณได้จะถูกปัดขึ้น ไปหนึ่งชั้นของจำนวน Hit per Slot คือ 3 5 9 17 33 65 และ 129 ตามลำดับ ซึ่งจะตรงกับการใช้ซอฟต์แวร์ CAD จำนวน ในทางอุตสาหกรรมการผลิต PCB แล้วจะทำการเจาะสล๊อตที่มีจำนวนการเจาะไม่มากไปกว่านี้ เพราะไม่เกิดความคุ้มค่าในการผลิต สำหรับกรณีที่สล๊อตยาวมากๆ จะไปย้ายกระบวนการ ไปผลิตที่แผนกกัดแทน (Routing)

ข. การคำนวณตัวแปรในการเจาะ (Formulas for Calculating Drilling Conditions) [7]

$$\text{Velocity (V)} = \frac{\pi \phi D N}{1000} \quad [\text{m/min}] \quad (2.2)$$

$$\text{Spindle speed (S)} = \frac{1000V}{\pi \phi D} \quad [\text{rpm}] \quad (2.3)$$

$$\text{Chip load (f)} = \frac{F}{N} \times 1,000 \quad [\mu\text{m/rev}] \quad (2.4)$$

$$\text{In-feed rate (F)} = \frac{fN}{1000} \quad [\text{mm/min}] \quad (2.5)$$

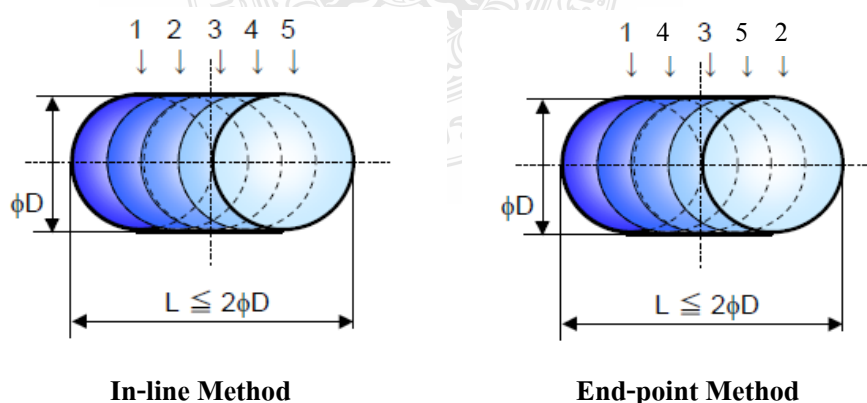
โดย $\pi = 3.14$
 $N = \text{Hit Per Slot}$
 $\phi D = \text{Diameter Drill}$

การแปลงหน่วย
 $1 \text{ inch} = 25.4 \text{ mm} = 1000 \text{ mil}$
 $1 \text{ m/min} = 16.67 \text{ mm/sec} = 39.37 \text{ Inch/min}$
 $1 \mu\text{m/rev} = 0.0393 \text{ mil/rev}$
 $1 \text{ mil/rev} = 25.4 \mu\text{m/rev}$

ค. วิธีในการเจาะสล๊อต (Method of Multi-hit Slot Drilling) จากประสบการณ์ของผู้วิจัยและการศึกษาจากคู่มือการเจาะของผู้ผลิตดอก การเจาะสล๊อตทำได้ 2 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.8

1) วิธีการเจาะสล๊อตแบบเรียง (In-line Method) จะเป็นการเจาะตำแหน่งรูที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 เรียงกันตามลำดับ โดยมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรูเท่าๆ กัน จนได้ความยาวที่ต้องการ

2) วิธีการเจาะสล๊อตแบบสลับหว่าง (End-point Method) จะเป็นการเจาะตำแหน่งรูที่ 1 ที่ปลายสล๊อตด้านหนึ่งก่อน แล้วเจาะตำแหน่งรูที่ 2 ที่ปลายสล๊อตอีกด้าน จึงทำการเจาะรูที่ 3 ตรงกลางระหว่างความยาวสล๊อต ตำแหน่งรูที่ 4 จะเจาะตรงกลางระหว่างรูที่ 1 กับรูที่ 3 และตำแหน่งรูที่ 5 จะเจาะตรงกลางระหว่างรูที่ 3 กับรูที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรูเท่าๆ กัน จนได้ความยาวที่ต้องการ



ภาพที่ 2.8 วิธีการเจาะสล๊อตแบบ In-line และ End-point [7]

หมายเหตุ: เพื่อความสะดวกในการเขียนโปรแกรม จะใช้ซอฟต์แวร์ CAD ฟังก์ชัน “Auto Drill Manager” ในการสร้าง Multi-Hit Slot สำหรับการเจาะ โดยฟังก์ชันจะกำหนดจำนวนรูต่อสล็อต และตำแหน่งการเจาะให้เสร็จจากรูปร่างที่เราได้วาดจาก CAD เป็น NC File

2.2 ค่าใช้จ่ายคุณภาพ (Cost of Quality)

ต้นทุน คือลมหายใจของธุรกิจ วันนี้ทุกอุตสาหกรรมจำเป็นต้องทำการลดต้นทุนเพื่อความอยู่รอด และเพื่อเพิ่มโอกาสในการเพิ่มผลกำไร นอกจากนี้ลูกค้าต่างเรียกร้องให้ผู้ผลิตทำการลดราคาขายลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้ผู้ผลิตหลายรายต้องหันมามองต้นทุนอย่างละเอียดอย่างไรก็ตามระบบบัญชีปกติขององค์กร (Financial Accounting) จะไม่สามารถให้รายละเอียดของสาเหตุของการเกิดต้นทุน โดยเฉพาะความเสียหายต้นทุน/ความเสียหายอันเนื่องมาจากความด้อยคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น Joseph M. Juran ปรมาจารย์ด้านคุณภาพของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้คิดค้นระบบต้นทุนความด้อยคุณภาพ (Cost of Poor Quality) ขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ฝ่ายบริหารสามารถเฝ้าติดตามต้นทุนความเสียหายอันเนื่องมาจากความด้อยคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และนำไปพิจารณาเพื่อสร้างสรรคัลโลกไปสู่ระบบบริหารคุณภาพที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นในองค์กรที่ต้องการลดต้นทุนด้านคุณภาพต้องทราบรายละเอียดและโครงสร้างต้นทุนคุณภาพ แนวคิดเบื้องต้นของวิธีการติดตั้งต้นทุนคุณภาพ การวางระบบ การประสานงาน รวมถึงการเก็บข้อมูลเพื่อจัดทำรายงานต้นทุนคุณภาพ [10]

ค่าใช้จ่ายที่จะทำให้งานเกิดคุณภาพ เป็นค่าใช้จ่ายค่าดำเนินการขณะปัจจุบันเทียบกับค่าดำเนินการขณะที่ทุกๆ คนในองค์กรงานเต็มที หรือ รายรับขณะปัจจุบันเทียบกับรายรับขณะที่ลูกค้าทุกคนยอมรับและพึงพอใจสินค้า ซึ่งปัจจุบันบริษัททุกบริษัทนั้นต้องมีค่าใช้จ่ายคุณภาพทั้งสิ้น เพื่อให้บริษัทดำเนินกิจการต่อไปได้ และเพื่อความพึงพอใจของลูกค้าและถ้ามีเกณฑ์ การควบคุมคุณภาพ ราคา และเวลาที่เหมาะสม การจัดการนี้จะเป็นช่องทางในการลดต้นทุน โดยไม่กระทบต่อผลผลิตและยอดขายอีกด้วย [11]

ค่าใช้จ่ายคุณภาพไม่ได้ประกอบด้วยการผลิต เพื่อผลผลิตเพียงอย่างเดียวแต่ต้องทำการประเมินระดับคุณภาพทั่วทั้งองค์กร โดยผ่านการวิเคราะห์ต้นทุนแห่งคุณภาพ ซึ่งการที่จะทำการประเมินค่าใช้จ่ายคุณภาพทั้งองค์กรได้นั้นก็ต้องได้รับความร่วมมือจากทุกฝ่าย รวมไปถึงความร่วมมือของฝ่ายบริหารด้วย และจะต้องคิดถึงเรื่องคุณภาพเป็นหลัก มากกว่าที่จะเอาเรื่องเงินหรือเรื่องกำไรเป็นหลัก ค่าใช้จ่ายคุณภาพนั้นหากเรามีการเพิ่มความตระหนักในคุณภาพและการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง ก็ทำให้ลดค่าใช้จ่ายของคุณภาพได้ในทุกๆ ส่วนขององค์กรคุณภาพเป็นสิ่งที่ดีและเป็นปัจจัย

ที่มีความสำคัญต่อความสำเร็จของธุรกิจ แต่ผลงานคุณภาพไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ คุณภาพจะเกิดขึ้นจากความรู้ ความเข้าใจ ความซาบซึ้ง การทุ่มเทในการปฏิบัติและการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เราสามารถทำงานให้มีคุณภาพในทุกขั้นตอนและส่งมอบงานที่มีคุณภาพแก่ลูกค้า ซึ่งจะสร้างความพอใจกระตุ้นการซื้อซ้ำและการทำธุรกิจอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้สินค้าหรือบริการที่มีคุณภาพ ก็ยังสามารถขายได้ในราคาที่สูงกว่าสินค้าชนิดเดียวกันอย่างไรก็ดีการสร้างสินค้าหรือบริการที่มีคุณภาพคงที่อย่างสม่ำเสมอ จะต้องอาศัยการดำเนินงานที่ละเอียดอ่อนซึ่งการดำเนินงานที่มีคุณภาพและไม่มีคุณภาพต่างก็มีค่าใช้จ่ายของตน เราสามารถแบ่งค่าใช้จ่ายของการจัดการคุณภาพออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ค่าใช้จ่ายคุณภาพทางตรง (Direct Quality Cost) และค่าใช้จ่ายทางอ้อม (Indirect Quality Cost) โดยในการวิจัยนี้วิเคราะห์ผลกระทบเฉพาะค่าใช้จ่ายคุณภาพทางตรง

ค่าใช้จ่ายคุณภาพทางตรง คือค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการจัดการคุณภาพ เพื่อให้การดำเนินงานและการสร้างสินค้าหรือบริการมีคุณภาพ ซึ่งเราสามารถรวบรวมและวัดผลออกมาในรูปของค่าใช้จ่ายเพื่อนำมาคำนวณค่าใช้จ่ายในการบริหาร เราสามารถจำแนกค่าใช้จ่ายคุณภาพทางตรงออกเป็นค่าใช้จ่ายต่างๆ คือ [11,12]

2.2.1 ค่าใช้จ่ายการป้องกัน (Prevention Cost)

เป็นค่าใช้จ่ายจากความพยายามที่จะป้องกันความสูญเสียในการผลิตหรือการดำเนินงาน ความบกพร่อง และความล้มเหลวหรืองานที่ไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งต้องมีการวางแผนและคิดก่อนที่จะดำเนินงานจริง โดยการป้องกันจะประกอบด้วยหลายๆ ปัจจัย ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายที่สำคัญ เช่น คุณภาพของผลิตภัณฑ์และบริการ การประกันคุณภาพ เครื่องมือตรวจเช็คผลิตภัณฑ์ การวางแผนคุณภาพ วิศวกรรมคุณภาพ การออกแบบกระบวนการ การปรับปรุงเครื่องจักรและอุปกรณ์ และการฝึกอบรมพนักงานในองค์กร เป็นต้น รวมไปถึงทรัพยากรที่นำมาผลิตด้วย

2.2.2 ค่าใช้จ่ายการประเมินผล (Appraisal Cost)

เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการกำหนดมาตรฐาน เกณฑ์ และแนวทางการประเมิน โดยจะทำการประเมินในจุดที่อาจสร้างความผิดพลาดขึ้น ซึ่งต้องประเมินทั้งวัตถุดิบ กระบวนการ และผลลัพธ์ในการดำเนินงาน เป็นค่าใช้จ่ายที่สำคัญเกิดจากการให้ความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์และกระบวนการ เพื่อประกันคุณภาพและยืนยันว่าสิ่งเหล่านั้นจะเป็นไปตามข้อกำหนด เช่น การตรวจสอบและทดสอบวัตถุดิบ การตรวจสอบงานระหว่างการผลิต การทดสอบผลิตภัณฑ์ก่อนส่งมอบให้กับลูกค้า เครื่องมือตรวจสอบ ค่าซ่อมบำรุงรักษา การตรวจสอบราคาและสินค้า ค่าเสื่อมราคา ค่าใช้จ่ายและเวลาในการเก็บข้อมูลงานคุณภาพ เป็นต้น โดยต้องดำเนินการด้วยความเข้าใจและอาศัยหลักการทางสถิติศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็น

2.2.3 ค่าใช้จ่ายเนื่องจากความล้มเหลว (Failure Costs)

เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเมื่อการดำเนินงาน หรือผลิตภัณฑ์และบริการมีความบกพร่องหรือเกิดความสูญเสียขึ้น ซึ่งอาจจะต้องเสียเวลา แรงงาน และค่าใช้จ่ายในการแก้ไข และหยุดการดำเนินงานที่สร้างผลผลิต ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะมีค่าใช้จ่ายที่สำคัญ เช่น งานที่ต้องแก้ไขใหม่ งานที่เป็นของเสียและใช้ประโยชน์ไม่ได้ การศึกษาสาเหตุของความผิดพลาดและค่าใช้จ่ายอื่นๆ เป็นต้น โดยที่เราสามารถแบ่งการพิจารณาค่าใช้จ่ายของความผิดพลาดแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

ก. ค่าใช้จ่ายเนื่องจากความล้มเหลวภายใน (Internal Failure Cost) เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดที่พบในการดำเนินงาน ทำให้ต้องหยุดการดำเนินงาน เสียเวลาแก้ไข และก่อให้เกิดความล่าช้าในงาน ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพ ประสิทธิผลและผลตอบแทนขององค์กรลดลง เกิดขึ้นเมื่อการดำเนินการในบางกระบวนการในองค์กรล้มเหลว ไม่เป็นไปตามระบบงานคุณภาพที่มีในองค์กร และเกิดขึ้นก่อนที่จะส่งมอบงานให้กับลูกค้า สาเหตุหลักเกิดขึ้นจาก แบบแปลนที่เปลี่ยนไป ทำให้เสียหายเป็นลูกโซ่ ทั้งเสียเวลาในการรอแก้ไขแบบใหม่ คนงาน วัสดุดิบและเครื่องจักรที่เตรียมมาล่วงหน้า เสียทั้งเงินและเวลา การทำงานที่ไม่จำเป็น ผลการทำงานผิดพลาด การจัดองค์กรที่ไม่ดี การติดต่อสื่อสารที่ไม่มีประสิทธิภาพ การนำเข้าวัสดุที่ผิด หรือนำเข้าวัสดุมาเกินความจำเป็น ของเหลือจากการผลิตที่ไม่สามารถ ซ่อมใช้ใหม่ การแก้ไขงาน ทำงานซ้ำ เนื่องจากงานเสีย มีของเสีย ของที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

ข. ค่าใช้จ่ายเนื่องจากความล้มเหลวภายนอก (External Failure Cost) เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นภายหลังจากส่งมอบสินค้า หรือบริการให้แก่ลูกค้า ทำให้ธุรกิจต้องจัดตั้งหน่วยงานหรือบุคคลที่คอยรับคำร้องเรียน ติดตามแก้ไข และสร้างความเข้าใจให้ลูกค้า เพื่อจะรักษาลูกค้าให้ยังคงใช้สินค้า หรือบริการต่อไป เกิดขึ้นเมื่อการดำเนินการในบางกระบวนการในองค์กรล้มเหลว ไม่เป็นไปตามระบบงานคุณภาพที่มีในองค์กร เกิดเมื่อของส่งมอบถึงลูกค้าแล้ว จึงปรากฏความผิดพลาด ความล้มเหลวภายนอกประกอบด้วย การซ่อมงาน (Rework) หรือต้องให้บริการหลังการส่ง การส่งคืน (Return) หรือเปลี่ยนให้ใหม่จากการรับประกัน การร้องเรียนจากลูกค้า (Complain) การส่งกลับไปให้ใหม่ผลสืบเนื่องจากความรับผิดชอบ จากภาวะ หรือหนี้สิน การสูญเสีย ภาพลักษณ์/ภาพพจน์องค์กร

2.3 เครื่องมือควบคุมคุณภาพเชิงวิศวกรรม (7 QC tools)

ในปี ค.ศ. 1954 Dr. J. M. Juran ได้สร้างความรู้ความเข้าใจแก่ผู้บริหารระดับสูงภายในองค์กรในการนำเทคนิคเหล่านี้มาใช้งาน โดยได้รับความร่วมมือจากพนักงานทุกคน นับเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาและรวบรวมเครื่องมือที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพรวม 7 ชนิด ที่เรียกว่า QC 7

Tools มาใช้ เครื่องมือควบคุมคุณภาพทั้ง 7 ชนิดนี้ ตั้งชื่อตามนักรบในตำนานของชาวญี่ปุ่นที่ชื่อ "เบงเค" (Ben-ke) ผู้ซึ่งมีอาวุธอันร้ายกาจแตกต่างกัน 7 ชนิด พกอยู่ที่หลังและสามารถเลือกดึงมาใช้ สยบคู่ต่อสู้ที่มีฝีมือร้ายกาจ [13]

ด้านคุณภาพถือว่าเป็นจุดมุ่งหมายสูงสุด และเป็นหัวใจทางด้านการผลิต เพราะเมื่อใดที่ผลิตสินค้าที่ไม่ได้มาตรฐาน ปัญหาต่างๆ ก็จะตามมามากมาย เช่น ผู้รับมอบสินค้าไม่รับมอบต้องเสียค่าใช้จ่ายในการแก้ไขสินค้า ระยะเวลาการส่งมอบล่าช้าต่างๆ เหล่านี้ ล้วนขึ้นอยู่กับคุณภาพสินค้าทั้งสิ้น ดังนั้นจึงต้องมีแนวทางในการวางแผน หรือกำหนดแนวทางในการปฏิบัติไว้อย่างชัดเจน เพื่อให้พนักงานได้รู้ขอบเขตของการควบคุมและง่ายต่อการวิเคราะห์ แก้ไขปัญหา ที่เกิดขึ้นในการผลิต โดยแนวทางการวิเคราะห์จะเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ [14] สำหรับเครื่องมือทั้ง 7 ชนิด สามารถแจกแจงได้ดังนี้

2.3.1 ใบตรวจสอบ (Check Sheet) เป็นแบบฟอร์มที่มีการออกแบบช่องว่างต่างๆ ไว้เพื่อใช้บันทึกข้อมูลได้ง่าย และสะดวก หรือเป็นตารางที่แสดงรายการรายละเอียดต่างๆ ของข้อมูลโดยออกแบบให้ง่ายต่อการจดบันทึกข้อมูลสะดวกต่อการจำแนกข้อมูลและสะดวกต่อการวิเคราะห์ผล ซึ่งมักจะมีช่องให้พนักงานผู้ตรวจสอบสามารถทำเครื่องหมายลงได้เลย [15] ตัวอย่างใบตรวจสอบแสดงดังภาพที่ 2.9

ใบตรวจสอบข้อบกพร่องของเครื่องรับโทรทัศน์

Model : 1013

ผู้ตรวจสอบ : กิรดี

หมายเลขเครื่อง : CS-002

ช่างเทคนิคผู้แก้ไข : ชุมพล

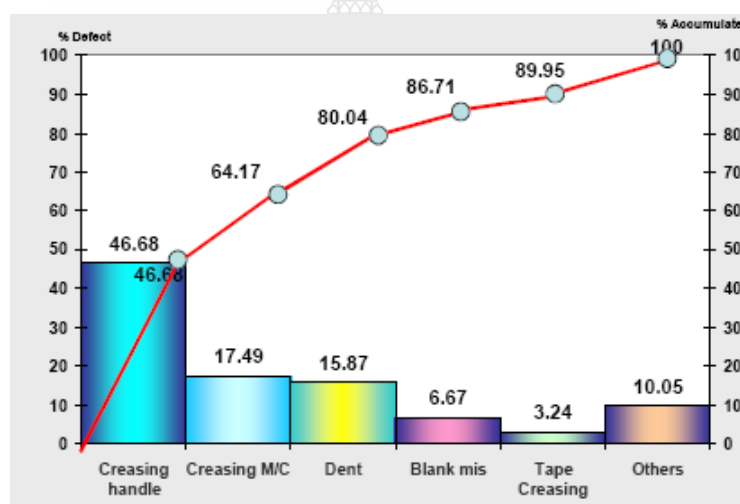
วันที่ตรวจสอบ : 18 - 22 เม.ษ. 43

อุปกรณ์	จำนวนข้อบกพร่อง	รวม	%
IC	III II	7	28
Capacitors	III III II	12	48
Transformers	II	2	8
ชุดคำสั่ง			0
จอภาพ (CRT)	III	3	12
อื่นๆ	I	1	4
รวมจำนวนข้อบกพร่อง		25	100

ภาพที่ 2.9 ตัวอย่างใบตรวจสอบสำหรับการบันทึกข้อมูลประเภท Jennings [16]

2.3.2 แผนภูมิพารेटโต (Pareto Chart) เป็นแผนภูมิที่ใช้สำหรับแสดงปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยเรียงลำดับปัญหาเหล่านั้นตามความถี่ที่พบจากมากไปหาน้อย และแสดงขนาดความถี่มากน้อยด้วยกราฟแท่งควบคู่ไปกับการแสดงค่าสะสมของความถี่ด้วยกราฟเส้น ซึ่งแกนนอนของ แผนภูมิกราฟ เป็นประเภทของปัญหาและแกนตั้งเป็นค่าร้อยละของปัญหาที่พบ แผนภูมิพารेटโตใช้เลือกปัญหาที่จะลงมือทำ เพราะปัญหาสำคัญในเรื่องคุณภาพมีอยู่ไม่กี่ประการ [17]

แผนภูมิพารेटโตจะใช้กราฟแท่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ ระหว่างสาเหตุของความบกพร่อง กับปริมาณความสูญเสียที่เกิดขึ้น โดยสาเหตุของความบกพร่องอาจเป็นไปได้ในรูปชนิดของความบกพร่อง ตำแหน่งที่พบความบกพร่อง หรือเครื่องจักรที่ก่อให้เกิดความบกพร่อง ในขณะที่ปริมาณของเสียอาจเป็นจำนวนชิ้นงานเสีย มูลค่าความเสียหายจากของเสีย ความถี่ของการเกิด โดยทั่วไปแผนภูมิพารेटโต จะมีส่วนประกอบและลักษณะดังนี้ [14] ตัวอย่างของแผนภูมิพารेटโตความสูญเสียรวมในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ตัวอย่างแผนภูมิพารेटโต (Pareto Chart) [17]

2.3.3 แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) หรือแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) หรือผังอิชิกาวาเรียกตามชื่อผู้คิดค้นว่า อิชิกาวา ไดอะแกรม (Ishikawa Diagram) เป็นแผนผังที่ใช้ต่อจากแผนภูมิพารेटโต แสดงให้เห็นสาเหตุที่แท้จริงในการทำให้เกิดปัญหาโดยพิจารณาทุกปัจจัยที่จะมีผลต่อคุณลักษณะทางคุณภาพ บางครั้งแผนผังก้างปลา ก็นำปัญหานั้นมาแจกแจงสาเหตุของปัญหาแบ่งเป็น 4 ประการ คือ คน (Man) เครื่องจักร (Machines) วิธีการ (Method) วัสดุดิบ (Material) ซึ่งโครงสร้างแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้ [17]

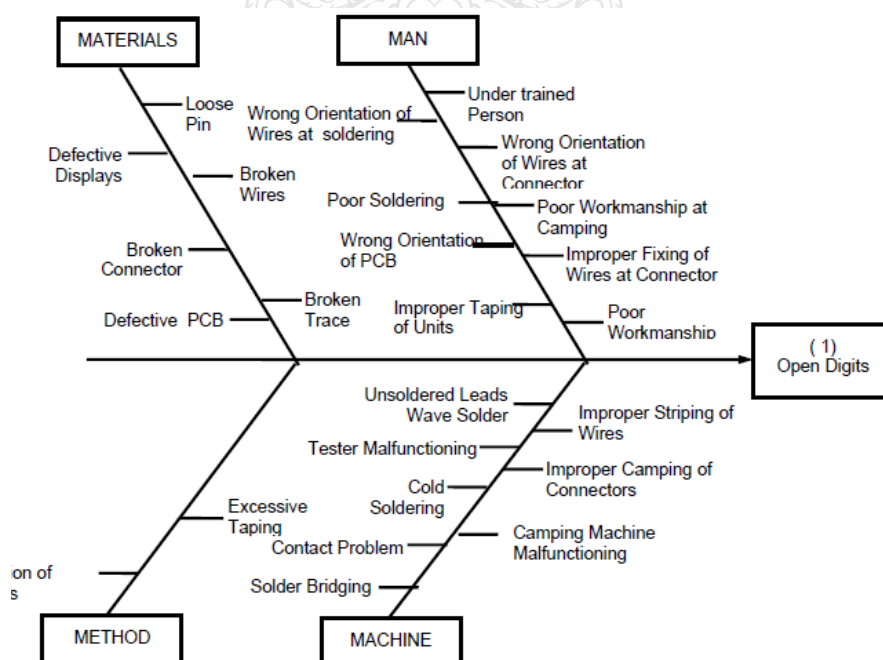
ก. ส่วนที่เป็นตัวปลา เป็นส่วนที่รวมปัจจัยทั้งหมดที่อาจส่งผลกระทบต่อประเด็นปัญหาทั้งหมดในหัวปลา จะถูกแยกออกเป็นสาเหตุหลักสาเหตุย่อย จนถึงต้นเหตุที่แท้จริง [18]

1) สาเหตุหลัก มาจากสิ่งที่เป็นองค์ประกอบหลักในการทำงาน เช่น พนักงานเครื่องจักรสิ่งแวดล้อม

2) สาเหตุรอง คือสาเหตุที่ทำให้สาเหตุหลักผิดปกติ ตัวอย่างเช่น ถ้าสาเหตุหลักคือเครื่องจักร สาเหตุรองคือน้ำมันรั่วซึมออกจากห้องเครื่อง เป็นต้น

3) สาเหตุย่อย เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาในสาเหตุรอง และสาเหตุย่อยๆ มีได้อีกหลายสาเหตุ ซึ่งมักเป็นจุดเริ่มต้นของปัญหา เช่น ถ้าตัวอย่างคือ น้ำมันรั่วซึมออกจากห้องเครื่อง เป็นสาเหตุรอง สาเหตุย่อยน่าจะเกิดจาก ซิลกันน้ำมันขาด สาเหตุที่ซิลกันน้ำมันขาดอาจเนื่องมาจากการใช้น้ำมันผิดประเภท หรือซิลคุณภาพต่ำ หรือซิลอาจจะหมดอายุก็ได้หลายสาเหตุ การวิเคราะห์ลงในระดับสาเหตุย่อยจะทำให้ขจัดปัญหาที่แหล่งกำเนิดปัญหาหรือต้นตอ (Root Cause) ได้ และทำให้ปัญหาซ้ำๆ ซากๆ ลดลงหรือไม่เกิดขึ้นอีกหรือแม้ว่าเกิดขึ้นอีกก็สามารถแก้ไขได้

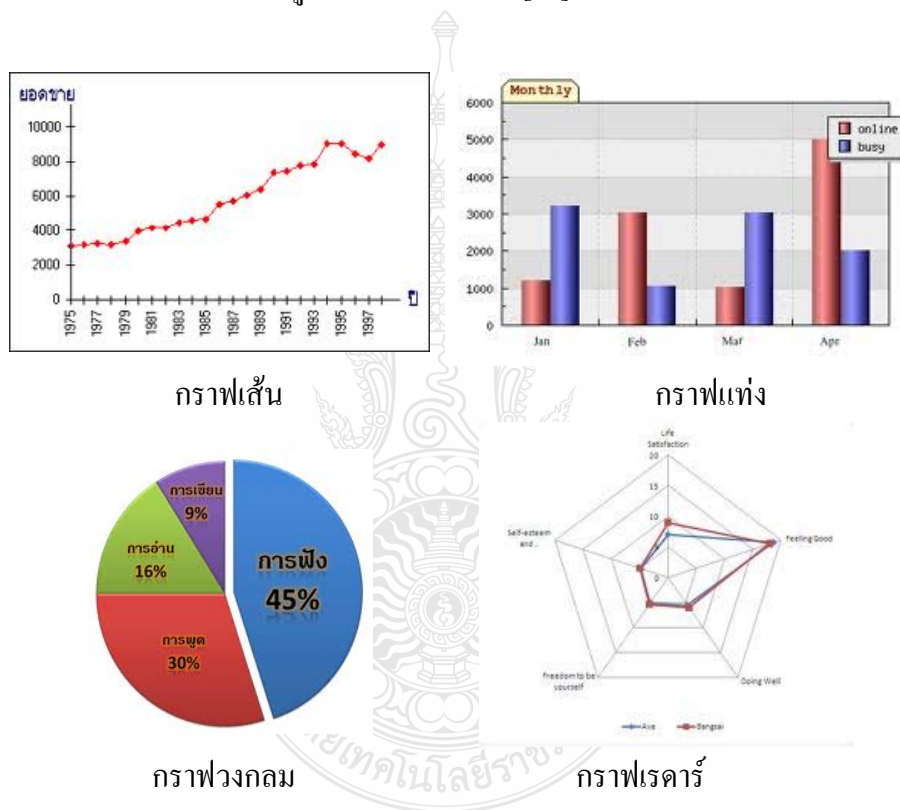
ข. ส่วนที่เป็นหัวปลา คือส่วนที่ระบุปัญหา ซึ่งโดยทั่วไปในการแก้ปัญหาคุณภาพด้วยเครื่องมือคุณภาพ มักจะเลือกปัญหามาจากแผนภูมิพาเรโต ตัวอย่างแผนผังแสดงเหตุและผลของผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐานแสดงดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างแผนผังแสดงเหตุและผลของผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐาน [19]

ข้อเสนอแนะในการทำแผนผังแสดงเหตุและผลคือ สาเหตุต่างๆ ในตัวปลา ควรเกิดจากการระดมสมองในกรณีแก้ปัญหาเป็นกลุ่ม คัดเลือกการจับกลุ่มของสาเหตุที่ได้จากการระดมสมอง ปัญหาในหัวปลาต้องละเอียดและชัดเจน หลีกเลี่ยงการใช้ความรู้สึก ก่อนสรุปสาเหตุแห่งปัญหา ควรให้น้ำหนักปัจจัยต่าง ๆ เพื่อลำดับความสำคัญ

2.3.4 กราฟ (Graph) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการแสดงนำเสนอข้อมูลให้ผู้อ่านเข้าใจข้อมูลต่างๆ ได้ง่ายและชัดเจนขึ้น และสามารถวิเคราะห์แปลความหมาย ตลอดจนให้รายละเอียดของการเปรียบเทียบได้ดี โดยเฉพาะเมื่อข้อมูลมีจำนวนมาก และการนำเสนอข้อมูลด้วยกราฟสามารถใช้กราฟเส้น กราฟแท่ง กราฟวงกลม กราฟรูปภาพ กราฟเรดาร์ [17] ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ตัวอย่างกราฟประเภทต่างๆ [20]

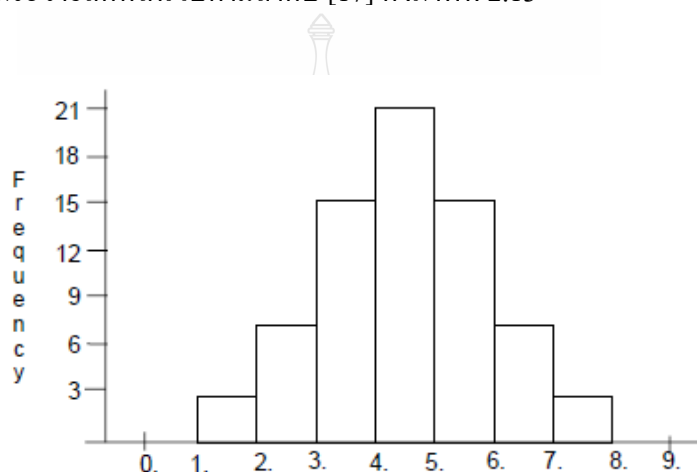
2.3.5 ฮิสโตแกรม (Histogram)

ข้อมูลทางสถิติจะอยู่ภายใต้ความผันแปรเสมอในการวิเคราะห์ จึงมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์ข้อมูลก่อนว่า ข้อมูลมีความผันแปรในลักษณะใด ซึ่ง Jurun Institute ได้เสนอแนวความคิดสำคัญในการวิเคราะห์ไว้คือ [16]

- ก. ค่าของข้อมูลทางสถิติจะแสดงถึงความผันแปรเสมอ
- ข. ความผันแปรจะปรากฏเป็นตัวเลขหนึ่งที่น่าอนเสมอ
- ค. ตัวแบบของความผันแปรจะพิจารณาจากมาก หากดูจากตัวเลขของข้อมูล
- ง. ตัวแบบของความผันแปรจะพิจารณาได้อย่างง่าย หากสรุปข้อมูลให้อยู่ในรูปของฮิสโตแกรม

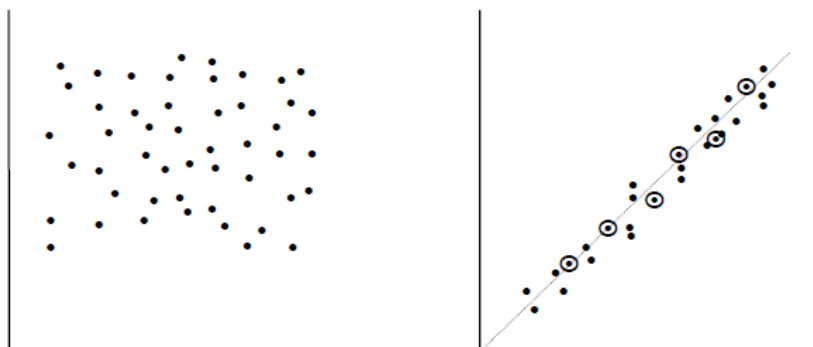
แกรม

เป็นกราฟแท่งที่ใช้แสดงความถี่ของข้อมูลที่จัดเป็นหมวดหมู่ โดยที่แท่งกราฟมีความกว้างเท่ากัน และมีด้านข้างติดกัน ซึ่งจัดตัวอย่างให้ศูนย์กลางของฮิสโตแกรมเป็นค่าความถี่สูงสุด ส่วนความถี่รองลงมาจะกระจายลดหลั่นไปตามลำดับ [17] ดังภาพที่ 2.13



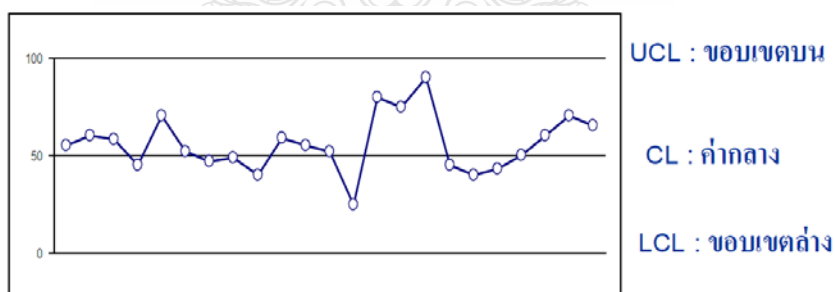
ภาพที่ 2.13 ฮิสโตแกรม (Histogram) [19]

2.3.6 ฟังแสดงการกระจาย (Scatter Diagram) เป็นแผนผังที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ว่าสัมพันธ์กันในลักษณะใด ซึ่งจะสามารถหาสหพันธ์ (Correlation) ของตัวแปรทั้งสองตัวที่แสดงด้วยแกน x และแกน y ของกราฟ ว่าสหพันธ์เป็นบวก คือ ตัวแปรมีความสัมพันธ์แปรตามกัน หรือมีสหพันธ์เป็นลบคือตัวแปร มีความสัมพันธ์แปรผกผันต่อกัน [17] ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 ผังการกระจาย (Scatter Diagram) [19]

2.3.7 แผนภูมิควบคุม (Control Chart) เป็นแผนภูมิกราฟที่ใช้เพื่อการควบคุมกระบวนการผลิต โดยมีการแสดงให้เห็นถึงขอบเขตในการควบคุมทั้งขอบเขตควบคุมบน (Upper Control Limit, UCL) และขอบเขตล่าง (Lower Control Limit, LCL) แล้วนำข้อมูลด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการมาเขียนเทียบกับขอบเขตที่ตั้งไว้เพื่อจะรู้ว่า ในกระบวนการผลิต ณ เวลาใดมีปัญหา ด้านคุณภาพ จะได้รับแก้ไขปรับปรุงกระบวนการให้กลับสู่สภาพปกติโดยเร็ว [17] แผนภูมิควบคุม แสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 แผนภูมิควบคุม (Control Chart) [15]

2.4 การนำข้อมูลทางสถิติมาใช้ในการวิจัย

การนำหลักการและทฤษฎีสถิติมาประยุกต์ใช้กับการวิจัย ซึ่งทำให้การทำวิจัยแต่ละขั้นตอนลดเวลาลงได้มากโดยเฉพาะการคำนวณเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ทำให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้น

2.4.1 ข้อมูล (Data) หมายถึง ข้อเท็จจริงเกี่ยวกับเรื่องที่จะศึกษา ซึ่งอาจอยู่ในรูปตัวเลข เช่น คะแนน น้ำหนัก ความสูง ระยะทาง หรืออาจเป็นข้อเท็จจริงที่อยู่ในรูปคุณลักษณะ หรือ คุณสมบัติ เช่น เชื้อ เพศ ที่อยู่ สถานภาพสมรส ระดับการศึกษา อาชีพ ศาสนา [21]

การแบ่งประเภทของข้อมูล มีวิธีการแบ่งได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการพิจารณามีดังนี้

ก. จำแนกตามลักษณะการเก็บข้อมูล สามารถแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) ข้อมูลที่ได้จากการนับ (Counting Data) เป็นข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ โดยใช้วิธีการนับ เช่น การนับจำนวนชิ้นงานทั้งสิ้น 50 ชิ้น เป็นจำนวนชิ้นงานที่ได้มาตรฐาน 45 ชิ้น จำนวนชิ้นงานที่ไม่ได้มาตรฐาน 5 ชิ้น ซึ่งจำนวนตัวเลข 45 และ 5 เป็นข้อมูลที่ได้จากการนับ ลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการนับนี้โดยทั่วไปตัวเลขเป็นจำนวนเต็ม

2) ข้อมูลที่ได้จากการวัด (Measurement Data) เป็นข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้โดยใช้วิธีการวัด เช่น การวัดขนาดของชิ้นงาน การชั่งน้ำหนักปริมาณสินค้า จำนวนตัวเลขที่ได้จากวิธีการวัดจะเป็นตัวเลขต่อเนื่อง ซึ่งอาจจะเป็นตัวเลขทศนิยมหรือเศษส่วนก็ได้ เช่น ขนาดชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.23 เซนติเมตร

ข. จำแนกตามการจัดกระทำข้อมูล สามารถแบ่งข้อมูลออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) ข้อมูลดิบ (Raw Data) เป็นข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยยังไม่ได้นำข้อมูลเหล่านั้นมาจัดกระทำหรือจัดระเบียบ ข้อมูลเหล่านี้ยังคงปะปนกันอยู่ ไม่มีการจัดแบ่งประเภทหรือหมวดหมู่

2) ข้อมูลที่จัดเป็นหมวดหมู่ (Group Data) เป็นข้อมูลที่มีการจัดกระทำให้เป็นหมวดหมู่ อย่างเป็นระเบียบ มีการแจกแจงความถี่ ซึ่งจะช่วยให้ข้อมูลเหล่านี้ง่ายต่อการคำนวณ หรือการนำไปใช้

ค. จำแนกตามลักษณะข้อมูล สามารถแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative Data) เป็นข้อมูลที่แสดงปริมาณหรือขนาดในลักษณะของตัวเลขโดยตรง เช่น อายุ น้ำหนัก ส่วนสูง คะแนน

2) ข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative Data) เป็นข้อมูลที่แสดงถึงคุณลักษณะไม่ได้อยู่ในรูปตัวเลขโดยตรง

2.4.2 ตัวแปร (Variable) หมายถึง สิ่งที่มีความผันแปรทางด้านปริมาณ เช่น น้ำหนัก ความสูง อายุ ความเร็ว หรืออาจเป็นทางด้านคุณภาพ เช่น เพศ เชื้อชาติ ศาสนา สีม สีนัยน์ตา ตัวแปรเหล่านี้จะประกอบด้วยต่างๆ กัน เช่น ในกลุ่มนักศึกษากลุ่มหนึ่ง นักศึกษาแต่ละคนย่อมมีความสูงแตกต่างกัน

ดังนั้นความสูงจึงถือว่าเป็นตัวแปร ถ้าให้ X แทนความสูงของนักศึกษา n คือ ตัวแปร X จะประกอบด้วยค่าต่างๆ คือ $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$

สำหรับการผันแปรทางด้านคุณภาพ เช่น สีนัยน์ตาของนักศึกษานานาชาติแห่งหนึ่งสีนัยน์ตาของนักศึกษาอาจแตกต่างกันออกไปเป็นสีฟ้า สีดำ สีน้ำตาล ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรด้านคุณภาพ แต่ในบางกรณี ถ้าวัดสีนัยน์ตาจากสีอ่อนไปจนถึงสีเข้มออกมาเป็นตัวเลข ตัวแปรในลักษณะนี้ถือเป็นตัวแปรด้านปริมาณ ถ้าพิจารณาตามคุณสมบัติสามารถแบ่งตัวแปรเป็น 2 ประเภทคือ

ก. ตัวแปรต่อเนื่อง (Continuous Variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีค่าต่อเนื่องกันระหว่างค่าสองค่าที่กำหนดให้ จะมีค่าที่อยู่ระหว่างค่าสองค่านั้นมากมาย เช่น ความสูง น้ำหนัก อายุ ระยะทาง ในด้านตัวแปรความสูง ช่วงความสูงระหว่าง 160-165 เซนติเมตร มีค่าความสูงที่เป็นไปได้มากมายนับไม่ถ้วน

ข. ตัวแปรไม่ต่อเนื่อง (Discrete Variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีค่าไม่ต่อเนื่องเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถกำหนดให้มีความอยู่ระหว่างค่าสองค่าได้ เช่น จำนวนนักศึกษา จำนวนสมาชิกในครัวเรือน จำนวนครัวเรือน จำนวนรถยนต์ในกรุงเทพมหานคร ค่าตัวเลขของตัวแปรเหล่านี้ไม่มีทศนิยม จะไม่มีจำนวนสมาชิกในครัวเรือน 5.5 คน หรือจำนวนครัวเรือน 134.2 หลัง และระหว่างครัวเรือนที่ 1 และ ครัวเรือนที่ 2 จะไม่มีตัวเลขอยู่ระหว่าง 1 และ 2 [22]

2.4.3 ประชากรและตัวอย่าง การทำวิจัยแต่ละครั้งได้นำวิชาสถิติมาช่วยในการจำแนกตัวอย่างหรือกลุ่มตัวอย่างออกจากประชากร คือ

ก. ประชากร (Population) เป็นหน่วยที่ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษา ฉะนั้นประชากรจึงหมายถึงบุคคล องค์กร สัตว์ สิ่งของต่างๆ ที่นำมาเป็นหน่วยศึกษาหรือปัญหาการวิจัย

ข. ตัวอย่าง (Sample) เป็นส่วนหนึ่งของประชากร ซึ่งอาจเป็น 5% 10% หรือ 50% ของจำนวนประชากรทั้งหมด โดยทั่วไปการทำวิจัยมักจะใช้ตัวอย่างหรือข้อมูลบางส่วน เพราะถ้าเก็บข้อมูลจากทุกหน่วยในประชากร จะทำให้เสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายสูง ทำให้ไม่ทันเวลาที่กำหนดไว้ด้วย

2.5 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง

การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiment: DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่ต้องการ ซึ่งมีข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการ โดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือวิธีการโดยทั่วไปมักเป็นแบบลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One Factor

at a Time) ทำซ้ำวงจรนี้ไปเรื่อยๆ เพื่อที่จะหาจุดที่ดีที่สุดของกระบวนการ โดยทั่วไปแล้วการทดลองแบบ One Factor at a Time นี้ จะให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่ต้องการ ได้ช้ามาก และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์ รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมาก และยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีผลของความสัมพัทธ์ร่วม (Interaction Effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยกันเอง

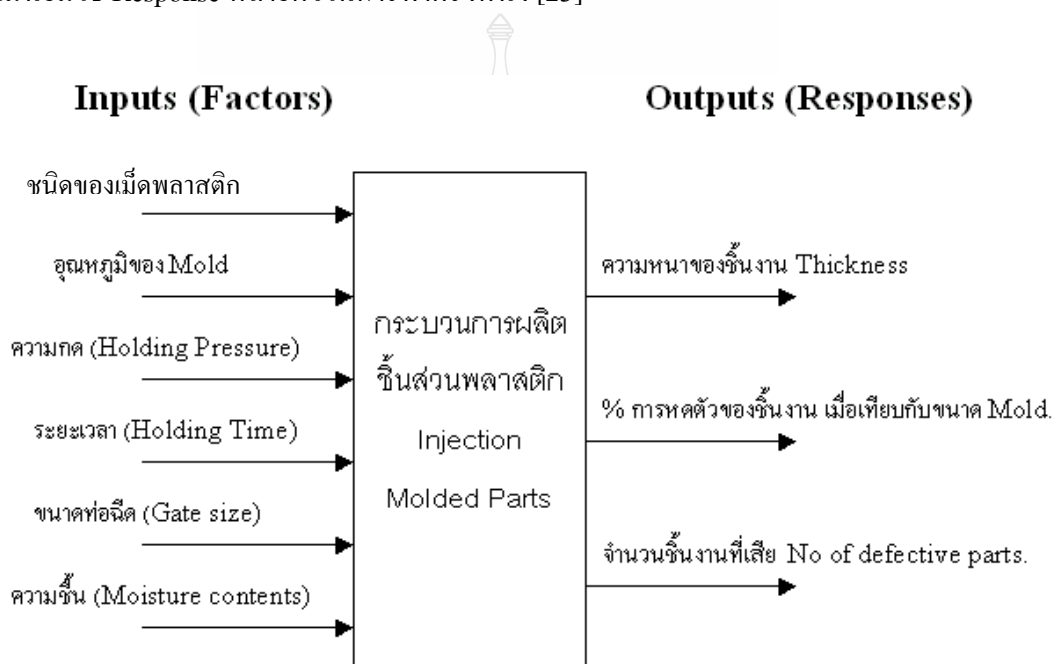
ข้อดีของการออกแบบการทดลอง คือให้ผลของความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ นอกจากนี้ยังมี ความรวดเร็วในการดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหา โดยทั่วไปแล้ว เช่น ถ้าหากเรามีปัจจัยในการทดสอบอยู่ประมาณ 10 ปัจจัย ซึ่งในการดำเนินการทดสอบว่าปัจจัยใดบ้าง ที่ส่งผลจริงต่อกระบวนการด้วยวิธีแบบ One Factor at a Time จะใช้เวลานานถึง 1 ปี ในการตรวจสอบให้ได้ทุกปัจจัย แต่ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองจะใช้เวลาเพียงแค่ 1-3 อาทิตย์เท่านั้นในการตรวจสอบปัจจัยดังกล่าว [22]

การออกแบบการทดลอง มีจุดประสงค์ที่จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าปัจจัย (Factors) ของกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง แล้วดูผลที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนอง (Response) ของกระบวนการนั้น กระบวนการ (Process) คือการทำงานร่วมกัน ผสมผสานกันของ เครื่องจักร (Machine) วัตถุดิบ (Material) มนุษย์ (People) กรรมวิธีการทำงาน (Methods) สภาพแวดล้อมในการทำงาน (Environment) และกระบวนการวัดค่า (Measurement) เพื่อให้เกิดเป็นผลผลิตหรือการบริการ ภาพที่ 2.16 เป็นตัวอย่างกระบวนการหนึ่งที่อยู่ในหมวดการผลิตสินค้าอุตสาหกรรม เพื่อชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ของปัจจัย กระบวนการ และตัวแปรตอบสนอง

ในกระบวนการหนึ่งๆอาจจะมีปัจจัยมากมาย บางตัวก็ไม่อาจจะควบคุมได้และถึงแม้จะเป็นเหตุให้เกิดผลกระทบต่อกระบวนการก็ตาม ก็จำเป็นต้องละเลยหรือปล่อยให้ตัวแปรเหล่านี้เป็นไปตามธรรมชาติของมัน ในการออกแบบการทดลองจะเรียกตัวแปรเหล่านี้ว่า Noise แต่ตัวแปรบางตัวไม่สามารถปล่อยให้มันเปลี่ยนไปตามธรรมชาติของมันได้ เพราะมันมีผลกระทบต่อกระบวนการมากกว่าตัวแปร Noise ซึ่งจะต้องควบคุมตัวแปรเหล่านี้ให้เปลี่ยนแปลงอยู่ในตำแหน่งและช่วงใดช่วงหนึ่งที่มีผลเสียต่อกระบวนการน้อยที่สุด เรียกตัวแปรเหล่านี้ว่า Key Process Input Variable หรือ KPIV ในขณะที่เดียวกันจะรู้ประสิทธิภาพหรือความเป็นไปของกระบวนการได้ ก็โดยการวัดด้วยตัวชี้วัด เช่นเดียวกันกระบวนการหนึ่งๆอาจจะวัดด้วยตัวชี้วัดเพียงตัวเดียว หรือมากกว่า 1 ตัวก็ได้ วิธีวัดก็มีได้ทั้งวัดด้วยเครื่องมือวัดซึ่งจะได้ค่าเป็นค่าต่อเนื่อง (Continuous Data) หรือเรียกว่าตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative Variable) ถ้าวัดได้ด้วยการนับ การสังเกต ซึ่งจะได้ค่าเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) หรือเรียกว่าตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative Variable) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นจะไม่สามารถวัดตัวแปร Output

ของกระบวนการได้ทุกตัว จำเป็นจะต้องวัดเฉพาะตัวแปรที่เห็นว่าบอกรหรือสื่อถึงประสิทธิภาพหรือผลที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ดีที่สุดหรือมากที่สุดเท่านั้น เรียกตัวแปรที่เราคัดเลือกมานี้ว่า Key Process Output Variable หรือ KPOV

จากภาพที่ 2.16 เป็นตัวอย่าง ตัวแปรเข้า Input Factors ที่เห็นนั่นคือตัวแปรที่พิสูจน์แล้วว่า เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการมาก และ Output Factors ที่ปรากฏก็เป็นตัวชี้วัดที่จะบ่งบอกถึงกระบวนการได้ดีที่สุด ซึ่งมีทั้งที่วัดด้วยเครื่องมือวัดได้คือความหนา การหดตัวของชิ้นงาน และที่นับหรือสังเกตด้วยคนเท่านั้น คือจำนวนชิ้นงานที่ไม่ผ่านเกณฑ์หรือมีตำหนินั่นเอง เมื่อต้องใช้ DOE นั้น จะไม่นิยมใช้ Response หลายตัวในการทำครั้งหนึ่ง [23]



ภาพที่ 2.16 ตัวอย่าง ปัจจัย กระบวนการและตัวแปรตอบสนอง [23]

2.5.1 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

ก. กำหนดหัวข้อปัญหา (Problem Statement) ควรมีความชัดเจน เข้าใจได้ง่ายและเป็นรูปธรรม ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 อย่าง ได้แก่ อะไรที่กำลังเป็นปัญหา (What) ลักษณะของปัญหาเป็นอย่างไร (How) และพบปัญหานั้นที่ไหนช่วงเวลาใด (Where and When)

ข. การเลือกปัจจัย (Factor) และการกำหนดระดับของปัจจัย (Treatment) จำเป็นที่จะต้องเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างแท้จริง ซึ่งสามารถเลือกจากกรรมวิธีคัดกรองโดยเครื่องมือทาง

สถิติ จำพวก Uni-variance เช่น T-Test เป็นต้น ผู้ที่มีความรู้หรือเชี่ยวชาญในกระบวนการนั้นๆ ก็เป็นผู้ที่สามารถให้คำแนะนำที่ดีในการเลือกปัจจัย และการกำหนดระดับของปัจจัยด้วย

ค. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response) จะต้องเน้นตัวแปรที่สามารถวัดได้ ทั้งที่วัดด้วยเครื่องมือวัดและวัดด้วยกระบวนการวัดอื่นๆ เช่น การนับ และจะต้องเป็นตัวแปรที่สื่อถึงกระบวนการที่ต้องการศึกษานั้นได้ดียิ่ง

ง. เลือกแบบทดลอง (Experiment Design) เช่น การกำหนดจำนวนสิ่งตัวอย่าง วิธีการเลือกสิ่งตัวอย่าง วางแผนการทำการทดลอง วิธีการบันทึกผลการทดลอง และการกำหนดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เป็นต้น

จ. ดำเนินการทดลอง (Perform the Experiment) ให้เป็นไปตามแผนการ ทั้งวิธีการดำเนินการ ความถูกต้องในการวัด การควบคุมตัวแปรในการทดลอง และเก็บผลการทดลอง

ฉ. การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) ไม่ใช่แค่การใส่ข้อมูลให้ประมวลผลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป เพื่อให้ได้ผลออกมาเท่านั้น แต่รวมถึงการตรวจสอบ ลักษณะและคุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง การตรวจสอบความถูกต้องของ Model ที่ได้ (Model Adequacy Checking) หาการะดับนัยสำคัญของอิทธิพลของแต่ละปัจจัย โดยปกติ DOE จะใช้ ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนั้นผู้วิเคราะห์ก็ต้องเข้าใจเงื่อนไขของ ANOVA ด้วย

ช. สรุปผลการทดลองและให้คำแนะนำ ผู้ดำเนินการทดลองเป็นผู้ที่เข้าใจที่มาของข้อมูลเป็นอย่างดี และมองออกว่าผลที่ได้เป็นเช่นนั้นเพราะอะไร การดำเนินการมีข้อบกพร่องที่จุดใด มีสาระสำคัญอะไรที่ผู้อ่านรายงานควรรับรู้ เพื่อว่าหากในอนาคตมีแผนการดำเนินการทดลอง ก็สามารถนำไปเป็นบรรทัดฐานได้ นอกจากนั้นผู้บริหารหน่วยงานอาจสนใจข้อวิเคราะห์ ความคิดเห็นของผู้ดำเนินการนอกเหนือไปจากผลที่ปรากฏ

2.5.2 การดำเนินการการออกแบบการทดลอง

ก. กำหนดเป้าหมาย เพื่อให้มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลให้น้อยที่สุด ให้ได้สาระสำคัญของตัวปัจจัยที่กำลังพิจารณาให้มากที่สุด โดยใช้ต้นทุนและเวลาดำเนินการน้อยที่สุด

ข. กลยุทธ์และวิธีการดำเนินการที่ดี ควรจะเริ่มจากเข้าใจสภาพปัญหาอย่างถ่องแท้ และรู้ว่าผู้ดำเนินการหรือผู้บริหารต้องการสิ่งใด

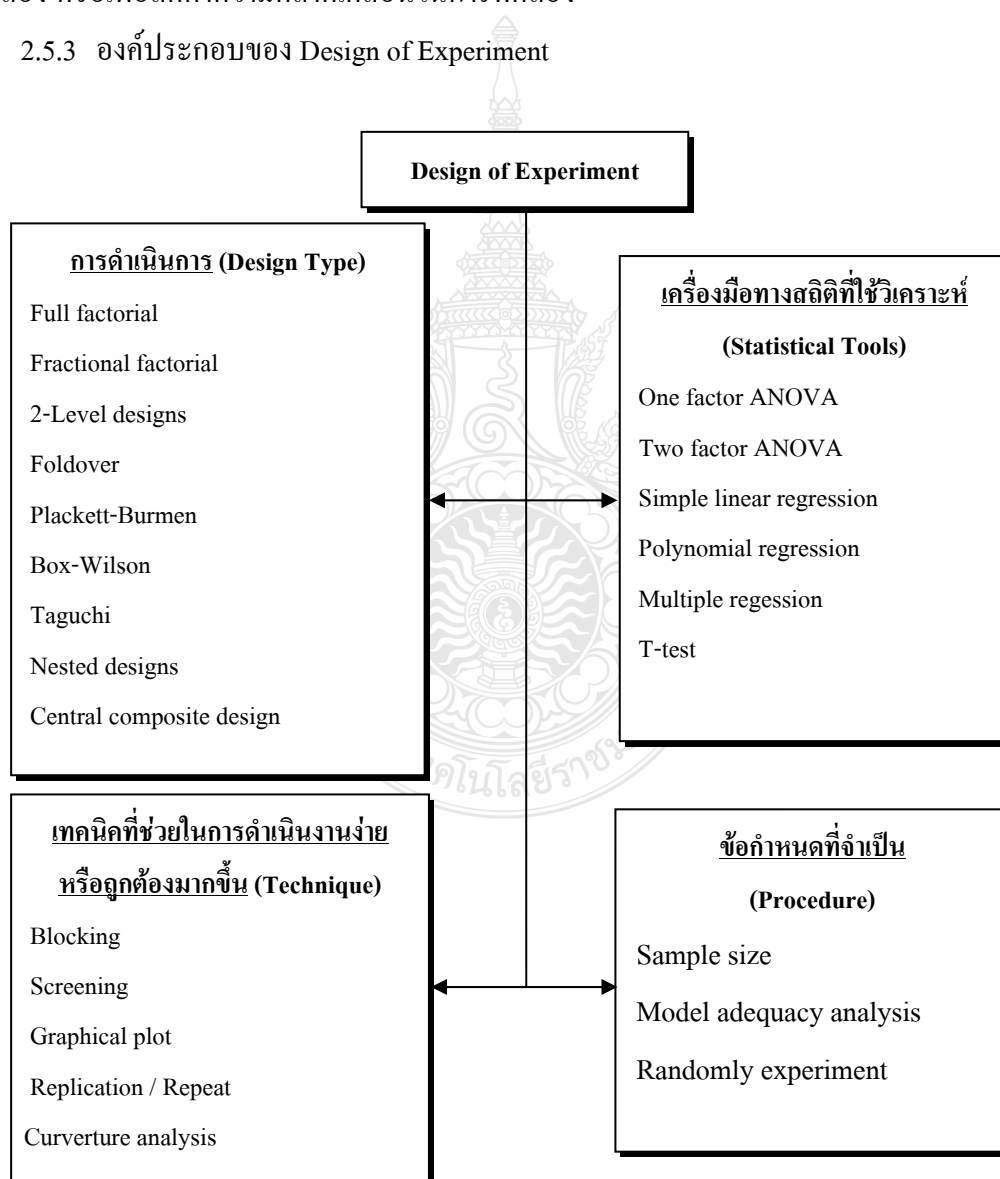
ค. สิ่งที่ต้องยึดถือและต้องทำให้ได้ 3 ประการ คือ

1) การสุ่ม (Randomization) การดำเนินการใดๆกับปัจจัยจะต้องอิสระ เพื่อให้ข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน นอกจากนั้นต้องคำนึงถึง หลักการกระจายอย่างทั่วถึงสมดุลย์ (Balance Out) สำหรับปัจจัยอื่นที่ไม่อาจควบคุมได้

2) การทำซ้ำ (Replication) หมายถึงการดำเนินการทดลองซ้ำอีกครั้ง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่างที่สำคัญคือ 1) เพื่อให้สามารถมองเห็นและประเมินค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้ การดำเนินการวิเคราะห์จะนำเอาค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวไปประเมินว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อกระบวนการบ้าง และ 2) เพื่อกำจัดทิ้งความคลาดเคลื่อน (Average Out) อิทธิพลที่ไม่สามารถควบคุมได้ ที่มีต่อปัจจัย เปรียบดังเช่นการหาค่าเฉลี่ยนั่นเอง เป็นวิธีการในการประเมินค่าอิทธิพลของปัจจัยอีกอย่างหนึ่ง

3) การบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มความแม่นยำ (Precision) ของการทดลอง หรือเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

2.5.3 องค์ประกอบของ Design of Experiment



ภาพที่ 2.17 องค์ประกอบของ Design of Experiment [23]

ก. ชนิดของการดำเนินการ (Design Type) หมายถึงรูปแบบมาตรฐานที่จะใช้ในการดำเนินการ ผู้ทำการทดลองจะต้องตัดสินใจเลือกตั้งแต่อยู่ในขั้นตอนวางแผน เพราะชนิดของการดำเนินการจะนำไปสู่วิธีการดำเนินการทดลอง วิธีเก็บบันทึกข้อมูล และเครื่องมือทางสถิติที่จะใช้ในการวิเคราะห์ในที่สุด การจะตัดสินใจเลือกชนิดของการดำเนินการใดนั้น มีองค์ประกอบคือ ผลหรือเป้าหมายที่ต้องการได้รับ ความซับซ้อนของการทำการทดลอง และข้อจำกัดของทรัพยากรต่างๆ นักสถิติในยุคที่ผ่านมาได้คิดค้นชนิดของการดำเนินการต่างๆ ไว้มากมาย จำเป็นที่ผู้ต้องการใช้จะต้องศึกษารายละเอียดของแต่ละชนิดของการดำเนินการเพิ่มเติมด้วย ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเฉพาะ Full factorial และ Fractional factorial design เพราะสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้แม่นยำและมีความน่าเชื่อถือสูง [24,25] ดังภาพที่ 2.17

ข. เครื่องมือทางสถิติ (Statistical Tools) หมายถึงกรรมวิธีในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ เช่นเดียวกันที่ผู้ทำการทดลองจะต้องเลือกตั้งแต่อยู่ในขั้นตอนการวางแผนการทดลอง และที่สำคัญผู้ใช้จะต้องเข้าใจเครื่องมือทางสถิติเหล่านี้ให้ดีพอ เมื่อผลการวิเคราะห์ปรากฏบนหน้าจอคอมพิวเตอร์แล้ว สามารถแปลความหมายได้ ทราบว่าเกิดข้อผิดพลาดหรือไม่ และตรวจพบหาที่ผิดได้

ค. เทคนิคหรือกลยุทธ์ (Technique) หมายถึงวิธีการที่จะทำให้การดำเนินการทดลองง่าย สะดวก และประหยัดทรัพยากรมากขึ้น โดยที่ผลการวิเคราะห์ยังเป็นที่ยอมรับได้ เช่นเดียวกันผู้ทำการทดลองจะต้องกำหนดเทคนิคหรือกลยุทธ์พร้อมกับการเลือกชนิดของการดำเนินการ เพราะบางชนิดของการดำเนินการก็มีข้อห้ามข้อกำหนดหรือข้อยืดหยุ่นที่แตกต่างกันไป

ง. ข้อกำหนดที่จำเป็น (Fundamental Procedure) เป็นสิ่งที่ผู้ทำการทดลองจะต้องคำนึงถึงอยู่เสมอ หากไม่แล้วผลการวิเคราะห์และข้อสรุปที่ได้ก็อาจจะไร้ความหมาย

2.6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล หมายถึงการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 ครั้ง (Replicate) จะประกอบด้วยผลการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เราจะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้ มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน [24]

ตัวอย่างกรณีการออกแบบการทดลอง 2 ปัจจัย กำหนดให้ y_{ijk} คือผลตอบสนองที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย B อยู่ที่ระดับ j ($j = 1, 2, 3, \dots, b$) สำหรับเรพลิเคตที่ k ($k = 1, 2, 3, \dots, n$) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย แสดงดังตารางที่ 2.2 เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง abn ครั้งถูกเลือกมาอย่างสุ่ม ดังนั้นการออกแบบการทดลองเช่นนี้เรียกว่า การออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized Design) [25]

ตารางที่ 2.2 รูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย [25]

ปัจจัย A	ปัจจัย B			รวม	เฉลี่ย
	1	2 b			
1	y_{111}	$y_{121} \dots$	y_{1b1}	x_1	y_1
				
	y_{11n}	$y_{12n} \dots$	y_{1bn}		
2	y_{211}	$y_{221} \dots$	y_{2b1}	x_2	y_2
				
	y_{21n}	$y_{22n} \dots$	y_{2bn}		
.				
.				
a	y_{a11}	$y_{a21} \dots$	y_{ab1}	x_a	y_a
				
	y_{a1n}	$y_{a2n} \dots$	y_{abn}		
รวม	$y_{.1.}$	$y_{.2.}$	$y_{.b.}$	$x_{...}$	
ค่าเฉลี่ย	$y_{.1.}$	$y_{.2.}$	$y_{.b.}$		$y_{...}$

จากข้อมูลการทดลองอาจเขียนในรูปแบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) คือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2.6)$$

โดยที่ μ หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด : τ_i หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของแถว (Row) ของปัจจัย A : β_j หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของคอลัมน์ (Column) ของปัจจัย B : $(\tau\beta)_{ij}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ β_j : ε_{ijk} หมายถึง องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม

สมมติว่าปัจจัยทั้งคู่มีค่าตายตัว (Fixed) และผลจากการทดลอง (Treatment Effect) หมายถึงส่วนเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมด ดังนั้น $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ และ $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ ในทำนองเดียวกัน สมมติว่าผลที่เกิดจากอันตรกิริยามีค่าตายตัว และกำหนดว่า $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$ เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้มีจำนวน เปรูเกิด n ครั้ง ดังนั้นจำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ abn

ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัยทั้งปัจจัยที่เกิดจาก A (แถว) และ B (คอลัมน์) มีความสำคัญเท่ากัน ดังนั้น เราต้องการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย A หรือกล่าวได้ว่า

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \text{at least one } \tau_i \neq 0$$

และความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย B

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1 : \text{at least one } \beta_j \neq 0$$

นอกจากนั้นแล้ว เรายังสนใจผลที่จะทราบว่า อันตรกิริยาที่เกิดระหว่างปัจจัย A และ B มีนัยสำคัญหรือไม่ หรือกล่าวได้ว่า

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \text{for all } i, j$$

$$H_1 : \text{at least one } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

2.6.1 การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับ Fixed Effects Model

กำหนดให้ $y_{i..}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่ i ของปัจจัย A; $y_{.j}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่ j ของปัจจัย B; y_{ij} เป็นค่าผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้เซลล์ตำแหน่งที่ ij ; และ y เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดที่ได้กำหนดให้ $\bar{y}_{i..}$, $\bar{y}_{.j}$, \bar{y}_{ij} และ \bar{y} เป็นค่าเฉลี่ยของแถว คอลัมน์ เซลล์ และผลรวมทั้งหมดซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
y_{i..} &= \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{i..} &= \frac{y_{i..}}{bn} & i &= 1, 2, \dots, a \\
y_{.j.} &= \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{.j.} &= \frac{y_{.j.}}{bn} & j &= 1, 2, \dots, b \\
y_{ij.} &= \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{ij.} &= \frac{y_{ij.}}{n} & i &= 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b \\
y_{...} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{...} &= \frac{y_{...}}{abn}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

ค่าของผลรวมแก้ไขแล้วทั้งหมดของกำลังสองสามารถเขียนได้เป็นสังเกตได้เป็น

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n [(\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...}) \\
&\quad + (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...}) + (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})]^2 \\
&= bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + an \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 \\
&\quad + n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 \\
&\quad + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2
\end{aligned} \tag{2.8}$$

สังเกตได้ว่า ค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองจะถูกแบ่งออกเป็นผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากแถว (ปัจจัย A); ผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากคอลัมน์ (ปัจจัย B); ผลรวมของกำลังสองที่เกิดขึ้นจาก อันตรกิริยาระหว่าง A และ B (SS_{AB}); และผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาด (SS_E) และจากพจน์สุดท้ายของสมการ จะเห็นได้ว่า จะต้องมียังน้อย 2 ค่าการทดลองที่จะเป็นผลทำให้เราสามารถคำนวณค่าของผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการข้างต้น ได้ใหม่เป็น

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \tag{2.9}$$

จำนวนของระดับขั้นความเสรีสำหรับผลรวมของกำลังสองแต่ละค่าคือ

<u>Effect</u>	<u>Degrees of Freedom</u>
A	a-1
B	b-1
AB interaction	(a-1)(b-1)
Error	ab(n-1)
-----	-----
Total	abn-1

เมื่อนำค่าของผลรวมของกำลังสองมาหารด้วยระดับขั้นความเสรีก็จะได้ค่าของค่ากำลังสองเฉลี่ย โดยที่ค่าคาดหวัง (Expected Value) ของค่ากำลังสองเฉลี่ยคือ

$$E(MS_A) = E\left(\frac{SS_A}{a-1}\right) = \sigma^2 + \frac{bn \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1}$$

$$E(MS_B) = E\left(\frac{SS_B}{b-1}\right) = \sigma^2 + \frac{an \sum_{j=1}^b \beta_j^2}{b-1}$$

$$E(MS_{AB}) = E\left(\frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}\right) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$$

$$E(MS_E) = E\left(\frac{SS_E}{ab(n-1)}\right) = \sigma^2$$

สังเกตว่า ถ้าสมมติฐานว่าง (Null Hypothesis) ที่ว่า ไม่มีผลเนื่องจากปัจจัยของแถว คอลัมน์ และอันตรกิริยามีค่าเป็นจริง ดังนั้น MS_A , MS_B , MS_{AB} และ MS_E จะมีค่าประมาณเท่ากับ σ^2 อย่างไรก็ตาม ถ้ามีความแตกต่างเนื่องจากปัจจัยของแถวจะได้ว่า MS_A จะมีค่ามากกว่า MS_E เหตุการณ์ทำนองเดียวกันจะเกิดขึ้นกับ MS_B และ MS_{AB} เช่นกัน ดังนั้นในการทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา เราก็เพียงหารค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกี่ยวข้องด้วยค่า MS_E และถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามาก หมายความว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองไม่สนับสนุนสมมติฐานว่าง

ถ้าสมมติว่าแบบจำลองตามสมการ $y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \tau\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}$ เป็นแบบจำลองที่เหมาะสม และพจน์ของความผิดพลาด ε_{ijk} มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ โดยมีค่าความ

แปรปรวนคงที่เท่ากับ σ^2 ดังนั้น อัตราส่วนของค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจาก MS_A/MS_E , MS_B/MS_E , และ MS_{AB}/MS_E จะมีการกระจายแบบ F ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีของตัวตั้งเป็น $a-1$, $b-1$ และ $(a-1)(b-1)$ และมีระดับขั้นความเสรีของตัวหารคือ $ab(n-1)$ ค่าบริเวณวิกฤติ (Critical Region) คือปลายทางด้านบนของการกระจายแบบ F วิธีการทดสอบจะทำโดยใช้ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ตัวแปร [25]

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_o
A treatments	SS_A	$a-1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_o = \frac{MS_A}{MS_E}$
B treatments	SS_B	$b-1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_o = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interaction	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_o = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$ab(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Total	SS_T	$abn-1$		

เพื่อให้คำนวณได้ง่าย เราสามารถหาค่า SS_T , SS_A , SS_B และ SS_E ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{Subtotals} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{jk.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

$$SS_{AB} = SS_{Subtotals} - SS_A - SS_B$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B$$

หรือ $SS_E = SS_T - SS_{Subtotals}$

2.6.2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k (Full Factorial Design)

การออกแบบที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แบบจำลองทางสถิติ สำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบด้วยผลหลัก k ชนิด, $\binom{k}{2}$ อันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย, $\binom{k}{3}$ อันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย, ... และ 1 อันตรกิริยาของ k ปัจจัย นั่นคือ แบบจำลองบริบูรณ์สำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบด้วยผลทั้งสิ้น 2^k-1 ชนิด เครื่องหมายสำหรับการทดลองร่วมปัจจัยที่กำหนดให้ก่อนหน้านี้ยังใช้ในรูปแบบทั่วไปได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น abd ในการออกแบบ 2³ หมายถึง การทดลองร่วมปัจจัยที่ A, B และ D อยู่ที่ระดับสูง และ C และ E อยู่ที่ระดับต่ำ การทดลองร่วมปัจจัยสามารถเขียนให้อยู่ในลำดับมาตรฐานได้โดยการเพิ่มปัจจัยเข้าไปทีละตัว และให้ปัจจัยใหม่ที่เพิ่มขึ้นมารวมกับปัจจัยที่อยู่ก่อนหน้านี้ เช่น ลำดับมาตรฐานของการออกแบบ 2⁴ คือ (1), a, b, ab, c, ac, bc, abc, d, ad, bd, abd, cd, acd, bcd และ abcd ตามลำดับ วิธีการทั่วไปในการวิเคราะห์เชิงสถิติของการออกแบบ 2^k สรุปได้ดังนี้

- 1) Estimate factor effects
- 2) Form initial model
- 3) Perform statistical testing
- 4) Refine model
- 5) Analyze residual
- 6) Interpret results

ในขั้นแรกจะต้องประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ และตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลที่เกิดขึ้น ข้อมูลเช่นนี้จะทำให้ผู้ทดลองทราบโดยเบื้องต้นว่า ปัจจัยและอันตรกิริยาตัวใดที่มีความสำคัญ และปัจจัยเหล่านี้ควรจะถูกรับให้อยู่ในทิศทางใดเพื่อที่จะปรับปรุงผลตอบ ในการสร้างแบบจำลองเริ่มต้น ควรจะเลือกแบบจำลองแบบเต็มรูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยผลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมด ในขั้นตอนที่สามจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อที่จะทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา ตารางที่ 2.4 แสดงรูปแบบทั่วไปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่มี n replicate ขั้นตอนที่จะเป็นการจัดกลาแบบจำลอง ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกี่ยวกับการดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ ขั้นตอนที่ห้าจะเป็นการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การจัดกลาแบบจำลองเกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ทั้งนี้ เนื่องจากพบว่าแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอ หรือสมมติฐานที่กำหนดให้มันไม่ถูกต้องอย่างรุนแรง ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยจะสร้างกราฟและผลหลักและอันตรกิริยาขึ้น

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบ 2^k [25]

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom
k main effects		
A	SS_A	1
B	SS_B	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
K	SS_k	1
$\binom{k}{2}$ two factor interactions		
AB	SS_{AB}	1
AC	SS_{AC}	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
JK	SS_{JK}	1
$\binom{k}{3}$ three factor interactions		
ABC	SS_{ABC}	1
ABD	SS_{ABD}	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
LJK	SS_{LJK}	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$\binom{k}{k}$ 1k factor interactions		
ABC...K	$SS_{ABC...K}$	1
Error	SS_E	$2^k(n-1)$
Total	SS_T	$n2^k-1$

เพื่อที่จะประมาณค่าของผล หรือผลรวมของกำลังสองของผล ซึ่งจะต้องกำหนดค่าคอนแทรสต์ ที่เกี่ยวข้องกับผลตัวนั้นก่อน ซึ่งทำได้โดยการใชตารางของเครื่องหมายบวกและลบ อย่างไรก็ตามสำหรับ k ที่มีค่ามาก วิธีการเช่นนี้จะทำให้เกิดความซับซ้อนในการใช้งาน ดังนั้นควรใช้วิธีการหนึ่งคือ ขยายทางด้านขวามือของสมการคอนแทรสต์

$$Contrast_{AB\dots K} = (a \pm 1)(b \pm 1)\dots(k \pm 1) \quad (2.10)$$

ในการขยายสมการ 2.10 จะใช้พีชคณิตเบื้องต้นเข้ามาช่วย และแทนค่า 1 ในสูตรที่คำนวณได้ครั้งสุดท้ายด้วย (1) สัญลักษณ์ในวงเล็บแต่ละชุดจะเป็นค่าลบ ถ้าปัจจัยนั้นได้ถูกรวมไว้ในคอนแทรกต์และเป็นค่าบวก ถ้าปัจจัยนั้นไม่ได้ถูกรวมเอาไว้

เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นถึงการใช้สมการ 2.10 พิจารณาการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ค่าคอนแทรกต์ของ AB หาได้จาก

$$\begin{aligned} Contrast_{AB} &= (a-1)(b-1)(c+1) \\ &= abc + ab + c + (1) - ac - bc - a - b \end{aligned}$$

ตัวอย่างถัดมา ในการออกแบบ 2^5 ค่าคอนแทรกต์ของ ABCD คือ

$$\begin{aligned} Contrast_{ABCD} &= (a-1)(b-1)(c-1)(d-1)(e+1) \\ &= abcde + cde + bde + ade + bce + ace + abe + e + abcd + cd + \\ &\quad bd + ad + bc + ac + ab + (1) - a - b - c - abc - d - abd - acd - \\ &\quad bcd - ae - be - ce - abce - de - abde - acde - bcde \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดค่าคอนแทรกต์สำหรับผลต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว สามารถที่จะประมาณค่าผลต่าง ๆ และคำนวณหาค่าของผลรวมของกำลังสองได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$AB\dots K = \frac{2}{n2^k} (Contrast_{AB\dots K}) \quad (2.11)$$

$$SS_{AB\dots K} = \frac{2}{n2^k} (Contrast_{AB\dots K})^2 \quad (2.12)$$

ตามลำดับ โดยที่ n แทนจำนวนของ Replicate

การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) มีข้อดีของการออกแบบปัจจัยเต็มรูปแบบ คือ 1) ไม่มีการเกิดอิทธิพลแฝง (Alias) 2) สามารถวิเคราะห์อิทธิพลหลักและบางปฏิสัมพันธ์ได้ทั้งหมด และมีข้อด้อยของการออกแบบปัจจัยเต็มรูปแบบ คือ 1) ต้องทำการทดลองให้ครบทุกการดำเนินการ ทำให้ต้องสิ้นเปลืองทรัพยากรมากใช้เวลาดำเนินการมาก 2) เมื่อ

จำนวนดำเนินการมากๆ อาจจะประสบปัญหาในการป้องกันความคลาดเคลื่อนของการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยใดๆได้ [24]

2.6.3 การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1} (Fractional Factorial Design)

เป็นวิธีที่ผู้ทำการทดลองไม่ต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไข การเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย เนื่องจากจะมีจำนวนปัจจัยใช้ดำเนินการ (Run) มากจนเกินไปจนไม่สามารถดำเนินการได้เนื่องจากมีข้อจำกัดบางประการ แน่่อนว่าความแม่นยำของผลการทดลองไม่เท่ากับใช้การทดลองเต็มรูปแบบ (Full Factorial) ในเชิงทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติถึงจะสามารถดำเนินการทดลองด้วยวิธีการทดลองเต็มรูปแบบ แต่อาจจะได้ผลที่แย่กว่าใช้การทดลองด้วยปัจจัยบางส่วน (Fractional Factorial) ก็เป็นไปได้ เนื่องจากปัจจัย (Factor) ยิ่งมากการดำเนินการก็ยิ่งควบคุมการทดลองได้ยาก ความผิดพลาดก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงไม่มีประโยชน์ที่จะคงยืนยันใช้การทดลองแบบเต็มรูปแบบ เมื่อเรามีปัจจัยหลายตัว นักสถิติประยุกต์ในยุคแรกๆ ได้ค้นพบว่าในความเป็นจริงเมื่อดำเนินการทดลองจะมีเพียงปัจจัยหลัก (Main Effects) และปัจจัยร่วม (Interaction) เท่านั้นที่มีความสำคัญ ยิ่งลำดับของบางปฏิสัมพันธ์ สูงขึ้นก็ยังมีโอกาสจะมีนัยสำคัญน้อยลง จึงได้นำเอาหลักการนี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อลดขนาดของการทดลองลง [26]

ตารางที่ 2.5 อัตราส่วนของผลจากปัจจัยหลักคือจำนวนปัจจัยรวมทั้งหมดในการทดลอง [26]

จำนวน Main Effects	จำนวน Interaction Effects	จำนวนรวม Effects	อัตราร้อยละของ Main Effects
1	0	1	100
2	1	3	66.7
3	4	7	42.9
4	11	15	26.7
5	26	31	16.1
6	57	63	9.5
7	120	127	5.5
8	247	255	3.1
9	502	511	1.8
10	1013	1023	1

จากตารางที่ 2.5 จะพบว่าสัดส่วนของปัจจัยหลักต่อปัจจัยทั้งหมดจะยิ่งลดลงเรื่อยๆ เมื่อการทดลองนั้นมีปัจจัยมากขึ้น เช่น หากการทดลองนั้นมี 6 ปัจจัยสัดส่วนผลที่มาจากปัจจัยหลักจะมีเพียงแค่ 9.5 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนปัจจัยรวมที่เหลืออีก 90.5 เปอร์เซ็นต์ เป็นอิทธิพลปัจจัยร่วมซึ่งส่วนใหญ่ก็ไม่มีนัยสำคัญเชิงสถิติต่อการทดลองนั้นด้วย

การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล ถูกนำมาใช้มากในการกรอง เพื่อหาปัจจัยที่มีผล กล่าวคือ ในการทดลองหนึ่งอาจจะมีปัจจัยมากมายที่กำลังอยู่ในความสนใจ จะใช้การออกแบบเช่นนี้เพื่อค้นหาว่าปัจจัยตัวใดบ้าง (ถ้ามี) เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ การทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ส่วนมากจะใช้ในตอนเริ่มต้นโครงการ เนื่องจากโดยมากแล้วในขณะนั้นจะมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลต่อผลตอบที่กำลังพิจารณาอยู่หลังจากทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเสร็จ สิ้นแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อไป ที่จะตามมาในอนาคต ความสำเร็จของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลขึ้นอยู่กับแนวคิดที่สำคัญ 3 ประการคือ [25]

ก. หลักการที่ว่าปัจจัยจำนวนน้อยที่มีผล เมื่อมีตัวแปรหลายตัว การดำเนินการต่างๆ ของระบบหรือกระบวนการมีแนวโน้มที่จะถูกกำหนด โดยปัจจัยหลักและอันตรกิริยาขั้นต่ำเพียงบางตัวเท่านั้น

ข. คุณสมบัติการฉายการออกแบบ การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลสามารถถูกฉายไปสู่การออกแบบที่ดีกว่า (ใหญ่กว่า) ในเซตย่อยของปัจจัยที่มีผล

ค. การทดลองต่อเนื่อง เป็นไปได้ที่จะรวมการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล 2 การทดลองหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะทำให้เกิดการทดลองอย่างต่อเนื่องที่มีการออกแบบที่ใหญ่กว่า และสามารถประมาณผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่อยู่ในความสนใจได้ดียิ่งขึ้น

การทดลองแบบ 2^{k-1} ความหมาย คือ เมื่อออกแบบเสร็จจะได้จำนวนดำเนินการเท่ากับ การทดลองเต็มรูปแบบ ของการออกแบบเมื่อจำนวนปัจจัยน้อยกว่าอยู่ 1 ตัว ($k-1$) หรือจำนวนดำเนินการจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบนั่นเอง หลักการนี้ยังอันดับปัจจัยร่วมสูงเท่าใดก็จะมีค่านัยสำคัญน้อยเท่านั้นและจะเอาปัจจัยหลักบางตัวเข้าแทนที่ปัจจัยร่วมดังกล่าว ตัวอย่างหนึ่งมีปัจจัย 4 ตัวคือ A, B, C, D ถ้าออกแบบโดยใช้วิธี 2^k Full Factorial จะมีจำนวนรอบการทดลองหรือดำเนินการทั้งหมด $2^4 = 16$ การทดลอง แต่ถ้าใช้แบบ 2^{k-1} จะเหลือแผนการทดลองเพียง $2^{4-1} = 8$ การทดลองเท่านั้น

การออกแบบ 2^{k-1} ที่มีมิติสูงสุด อาจจะสามารถสร้างได้จากการเขียนการออกแบบเบื้องต้น (Basic Design) ซึ่งประกอบไปด้วย แฟกทอเรียลแบบบริบูรณ์ของ 2^{k-1} แล้วเติมปัจจัยตัวที่ k ลงไป โดย

กำหนดให้เครื่องหมายบวก และลบของปัจจัยที่ k นี้มีค่าเหมือนกันกับเครื่องหมายของอันตรกิริยาขั้นสูงสุด $ABC\dots(k-1)$ ดังนั้น เศษส่วนแฟกทอเรียลแบบ 2^{3-1}_{III} จะหาได้จากการเขียนแฟกทอเรียลแบบ 2^2 ให้เป็นการออกแบบเบื้องต้น และหาค่า C จากอันตรกิริยา AB เศษส่วนอีกชุดหนึ่งหาได้โดยให้ C เท่ากับ $-AB$ วิธีการนี้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.6 สังเกตว่าการออกแบบเบื้องต้นจะมีจำนวนการทดลองรวมปัจจัย (แถว) ที่ครบถูกต้อง แต่จะขาดอยู่ 1 คอลัมน์ เราจะใช้ $I = ABC\dots K$ ในการหาคอลัมน์ที่ k ขาดหายไป ดังนั้น เราจะใช้ $K = ABC\dots(k-1)$ ในการกำหนดเครื่องหมายบวกและลบที่จะใช้กับปัจจัยตัวที่ k

ผลของอันตรกิริยาตัวใดๆสามารถมาใช้ในการสร้างคอลัมน์สำหรับปัจจัยตัวที่ k ก็ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าใช้ผลของอันตรกิริยาตัวอื่นๆ นอกเหนือจาก $ABC\dots(k-1)$ แล้ว การออกแบบนี้จะไม่ก่อให้เกิดการออกแบบที่มีมิติสูงสุดที่เป็นไปได้ อีกวิธีหนึ่งในการสร้างการออกแบบเศษส่วน 2^{k-1} ก็คือ แบ่งการทดลองทั้งหมดเป็น 2 บล็อกโดยใช้ $ABC\dots k$ เป็นตัวคอนฟิวต์ ซึ่งในแต่ละบล็อกคือการออกแบบเศษส่วนแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1} ซึ่งมีมิติสูงสุด

ตารางที่ 2.6 เศษส่วน 2^{k-1} ของการออกแบบ 2^3 ทั้งสองแบบ [25]

Run	Full 2^2 Factorial (Basic Design)		$2^{3-1}_{III} = ABC$			$2^{3-1}_{III} = ABC$		
	A	B	A	B	C=AB	A	B	C=-AB
1	-	-	-	-	+	-	-	-
2	+	-	+	-	-	+	-	+
3	-	+	-	+	-	-	+	+
4	+	+	+	+	+	+	+	-

2.6.4 การทดลองแบบ 2^{k-2} ระดับที่จำนวนแฟกเตอร์ใดๆ (2^{k-2} Factorial Design)

สำหรับการออกแบบการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยจำนวนมาก เศษส่วนที่เล็กกว่าของการออกแบบ 2^k น่าจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่า พิจารณาเศษส่วน $1/4$ ของการออกแบบ 2^k ซึ่งประกอบด้วย การทดลองทั้งสิ้น 2^{k-2} และเรียกการออกแบบเช่นนี้ว่า การออกแบบเศษส่วนแบบ 2^{k-2}

การออกแบบ 2^{k-2} อาจสร้างโดยการเขียนการออกแบบเบื้องต้นซึ่งประกอบด้วย การทดลองที่เกี่ยวข้องกับแฟกทอเรียลบริบูรณ์ของ $k-2$ ปัจจัย และเติมคอลัมน์ที่เหลืออีก 2 คอลัมน์ด้วยอันตรกิริยาที่เหมาะสมที่เกี่ยวข้องกับปัจจัย $k-2$ ตัวแรก ดังนั้นเศษส่วน $1/4$ ของการออกแบบ 2^k จะมีตัว

ก่อนำเนิคอยู่สองตัว ถ้า P และ Q เป็นตัวก่อนำเนิคที่เลือกมา ดังนั้น $I=P$ และ $I=Q$ เรียกว่าความสัมพันธ์ก่อนำเนิคสำหรับการออกแบบนี้ เครื่องหมายของ P และ Q (ทั้ง + และ -) จะเป็นตัวกำหนดว่าเศษส่วน $\frac{1}{4}$ ชุดใดถูกสร้างขึ้นมา เศษส่วนทั้งสี่จะเกี่ยวข้องกับการเลือกตัวก่อนำเนิค $+P$ และ $+Q$ เป็นสมาชิกในครอบครัวเดียวกัน เศษส่วนทั้ง P และ Q เป็นบวกจะเป็นเศษส่วนหลัก

ตัวกำหนดความสัมพันธ์ที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบ จะประกอบด้วยคอลัมน์ทั้งหมดที่มีค่าเท่ากับคอลัมน์เอกลักษณ์ 1 คอลัมน์เหล่านี้จะประกอบด้วย P และ Q และอันตรกิริยาทางนัยทั่วไปแล้วของ PQ ซึ่งหมายความว่า ตัวกำหนดความสัมพันธ์คือ $I=P=Q=PQ$ เราจะเรียก PQ และ PQ ในตัวความสัมพันธ์นี้ว่า “เวิร์ค” คู่แฝดแฝงของผลต่างๆ สร้างได้จากการคูณคอลัมน์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยนั้นกับเวิร์คในตัวกำหนดความสัมพันธ์ แน่แน่นอนว่าผลแต่ละตัวจะมีคู่แฝดแฝงอยู่ 3 ตัว ผู้ทดลองจะต้องให้ความระมัดระวังกับการเลือกตัวก่อนำเนิค เพื่อผลที่สำคัญๆ จะไม่คู่แฝดแฝงซึ่งกันและกัน

ตัวอย่างเช่น สำหรับการออกแบบ 2^{6-2} สมมติว่าเลือก $I=ABCD$ และ $I=BCDF$ เป็นตัวก่อนำเนิคการออกแบบ จะได้ว่าอันตรกิริยาทางนัยทั่วไปแล้วของตัวก่อนำเนิค ABCD และ BCDF คือ ADEF ดังนั้น ตัวกำหนดความสัมพันธ์ที่บริบูรณ์ของการออกแบบนี้คือ

$$I = ABCE = BCDF = ADEF$$

ผลก็คือ การออกแบบนี้มีมิติ IV เพื่อที่จะหาคู่แฝดแฝงของผลตัวใดๆ (ตัวอย่างเช่น A) ให้คูณผลตัวนั้นด้วยเวิร์คที่อยู่ในตัวกำหนดความสัมพันธ์ สำหรับ A จะได้ว่า

$$A = BCE = ABCDF = DEF$$

มันเป็นการง่ายที่จะตรวจสอบว่าผลหลักทุกตัวจะคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยาแบบสาม และห้าปัจจัย โดยที่อันตรกิริยาแบบสองปัจจัยจะคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกัน และคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยาชั้นสูงอีกด้วย ดังนั้นเมื่อต้องการประมาณค่า A หมายความว่า กำลังจะประมาณค่าของ $A+BCE+ABCDF+DEF$ ด้วย โครงสร้างของคู่แฝดแฝงที่บริบูรณ์ของการออกแบบนี้แสดงดังตารางที่ 2.7 ถ้าอันตรกิริยาแบบสามปัจจัยและมากกว่าที่จะละลายได้ การออกแบบเช่นนี้จะให้ค่าประมาณของผลหลัก

เพื่อสร้างการออกแบบลักษณะนี้ ให้เขียนการออกแบบเบื้องต้นมาเป็นอย่างแรก ซึ่งประกอบด้วยทดลอง 16 การทดลองสำหรับการออกแบบ $2^{6-2} = 24$ ของ A B C และ D หลังจากนั้นเติม 2 ปัจจัย E และ F ที่เหลือลงไป โดยกำหนดให้ระดับของเครื่องหมายบวกและลบของมันให้

เหมือนกับเครื่องหมายบวกและลบของอันตรกิริยา ABC และ BCD ตามลำดับ วิธีการเช่นนี้แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 โครงสร้างคู่แฝดแฝงของการออกแบบ 2^{6-2}_{IV} ซึ่งมี $I = ABCE = BCDF = ADEF$ [25]

A = BCE = DEF = ABCDF	AB = CE = ACDF = BDEF
B = ACE = CDF = ABDEF	AC = BE = ABDF = CDEF
C = ABE = BDF = ACDEF	AD = EF = BCDE = ABCF
D = BCF = AEF = ABCDE	AE = BC = DF = ABCDEF
E = ABC = ADF = BCDEF	AF = DE = ACEF = ABCDE
F = BCD = ADE = ABCEF	BD = CF = ACDE = ABEF
	BF = CD = ACEF = ABDE
ABD = CDE = ACF = BEF	
ACD = BDE = ABF = CEF	

วิธีอื่นที่สามารถสร้างการออกแบบนี้ขึ้นได้คือ หาบล็อกทั้งของการออกแบบ 2^6 ที่มี ABCE และ BCDF ถูกคอนฟิวต์ และเลือกบล็อกที่มีการทดลองร่วมปัจจัยที่มีค่าของ ABCE และ BCDF เป็นบวก จะกลายเป็นการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^{6-2} ที่มีความสัมพันธ์ก่อกำเนิด $I=ABCE$ และ $I=BCDF$ และเนื่องจากตัวก่อกำเนิด ABCE และ BCDF เป็นบวกทั้งคู่ ดังนั้นเศษส่วนนี้คือเศษส่วนหลัก

จะเห็นว่ายังมีทางเลือกอีก 3 ทางสำหรับการออกแบบ 2^{6-2}_{IV} นี้ นั่นคือ มีเศษส่วนที่มีความสัมพันธ์ก่อกำเนิดเท่ากับ $I=ABCE$ และ $I=-BCDF$, $I=-ABCE$ และ $I=BCDF$ และ $I=-ABCE$ และ $I=-BCDF$ ซึ่งเศษส่วนเหล่านี้ก่อสร้างได้ง่ายๆ เช่น ต้องการหาเศษส่วนซึ่ง $I=ABCE$ และ $I=-BCDF$ ดังนั้น ในคอลัมน์สุดท้ายของตารางที่ 2.8 จะให้ $F=-BCD$ และระดับต่างๆ ในคอลัมน์ของปัจจัย F จะกลายเป็นตัวกำหนดความสัมพันธ์ที่บริบูรณ์สำหรับเศษส่วนตัวอื่นๆคือ $I = ABCE = -BCDF = -ADEF$ เครื่องหมายบางตัวของโครงสร้างคู่แฝดในที่ตารางที่ 2.7 อาจจะมีการเปลี่ยนแปลง เช่น คู่แฝดแฝงของ A คือ $A = BCE = -DEF = -ABCDF$ ดังนั้นผลรวมเชิงเส้นของข้อมูล I_A จะเป็นค่าประมาณของ $A + BCE - DEF - ABCDF$

สังเกตได้ว่าเศษส่วนแฟคทอเรียลแบบ 2^{6-2}_{IV} จะฉายไปสู่การออกแบบ 2^4 แบบ 1 เรพลิเคตภายใต้เซตย่อยที่ประกอบด้วย 4 ปัจจัยที่ไม่ได้เป็นเวิร์ดในตัวกำหนดความสัมพันธ์ มันยังสามารถถูก

กลายเป็นเศษส่วน $\frac{1}{2}$ ของการออกแบบ 2^4 แบบ 2 เรพลิเคต ภายใต้เซตย่อยที่ประกอบด้วย 4 ปัจจัยที่เป็นเวิร์คในตัวกำหนดความสัมพันธ์ ดังนั้น จะกลายเป็น 2^{4-1} แบบ 2 เรพลิเคต ภายใต้ปัจจัย ABCE BCDF และ ADEF เนื่องจากตัวเหล่านี้เป็นเวิร์คในตัวกำหนดความสัมพันธ์ ยังมีกลุ่มของ 6 ปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น ABCD, ABCF เป็นต้น ซึ่งสามารถที่จะย้ายไปสู่การออกแบบ 2^4 แบบ 1 เรพลิเคต การออกแบบเช่นนี้ยังสามารถยุบไปสู่การออกแบบ 2^3 แบบ 2 เรพลิเคต ภายใต้เซตย่อยใดๆ ของปัจจัย 3 จาก 6 ตัว หรือ 4 เรพลิเคตของ 2^2 ภายใต้เซตย่อยใดๆ ของ 2 ปัจจัย

ตามปกติแล้วการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-2} สามารถที่จะยุบไปสู่แฟกทอเรียลแบบบริบูรณ์ หรือเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลภายใต้เซตย่อยของ $r \leq k - 2$ ของปัจจัยเริ่มต้น เซตย่อยเหล่านี้ของตัวแปรที่สามารถกลายเป็นแฟกทอเรียลแบบบริบูรณ์ จะต้องไม่เวิร์คในตัวกำหนดความสัมพันธ์แบบบริบูรณ์

ตารางที่ 2.8 โครงสร้างคู่แฝดแฝงของการออกแบบ 2^{6-2}_{IV} ซึ่งมีตัวก่อกำเนิด $I=ABCD$ และ $I=BCDF$ [25]

Run	(Basic Design)					
	A	B	C	D	E=ABC	F=BCD
1	-	-	-	-	-	-
2	+	-	-	-	+	-
3	-	+	-	-	+	+
4	+	+	-	-	-	+
5	-	-	+	-	+	+
6	+	-	+	-	-	+
7	-	+	+	-	-	-
8	+	+	+	-	+	-
9	-	-	-	+	-	+
10	+	-	-	+	+	+
11	-	+	-	+	+	-
12	+	+	-	+	-	-
13	-	-	+	+	+	-
14	+	-	+	+	-	-
15	-	+	+	+	-	+
16	+	+	+	+	+	+

2.6.5 ปราบการณั้คู่แฝด (Aliases)

จากการออกแบบการทดลองข้างต้น ในกรณีที่ทำให้การทดลองเศษส่วนแฟกทอเรียล เป็นการทดลองไม่ครบ (Not full) จะมีปรากฏการณั้หนึ่งเกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเราจะเรียกว่า อันตรกิริยาของคู่แฝด (Aliases) หรือตำราบางเล่มเรียกว่า คอนฟาวด์ (Confound) แปลว่าปนกัน หรือ ดิดกัน จนแยกกันไม่ออก ซึ่งจะมีผลให้ Effect ที่ได้เป็นค่าที่ปนกัน หรือเรียกว่ามี โครงสร้างคู่แฝด (Aliases Structure) [24]

วิเคราะห์โครงสร้างแฝด (Alias Structure) ทำการแยก Aliases โดยพิจารณาจากกฎคือ

ก. ถ้าปัจจัยหลัก (Main Effect) เป็น Aliases กับ 3-Way Interaction ขึ้นไปให้ถือว่า Effect นั้นเป็นของปัจจัยหลัก

ข. ถ้าปัจจัยร่วม (Interaction) เป็น Aliases กับ Interaction ที่มี Order ไม่เท่ากัน ให้ถือว่า Effect นั้นเป็นของ Interaction ที่มี Order น้อยกว่า

ค. ถ้าปัจจัยร่วม (Interaction) เป็น Aliases กับ Interaction ที่มี Order เท่ากัน ให้ปฏิบัติดังนี้

1) ถ้ามีความรู้ก่อนหน้าจากการแยก Aliases ของ Main Effect เพียงพอ ก็สามารถแยกได้

2) ถ้ามีความรู้ก่อนหน้าไม่เพียงพอ ก็ไม่สามารถแยก Aliases ได้ ต้องทำการทดลองเพิ่มอีก 1 เท่าของการทดลองเดิม

ถ้าปัจจัยหลัก (Main Effect) เป็น Aliases กับ Interaction 2-Factor จะไม่สามารถแยก Effect ได้ (เรียกว่า Resolution III) ซึ่งไม่ควรใช้ถ้าไม่จำเป็น เช่น ถ้ามีปัจจัย $k = 4$ เมื่อทำการทดลองขั้นต้นไป $2^{4-1} = 8$ การทดลอง แต่เกิดปรากฏการณั้ Aliases และเรามีความรู้ก่อนหน้าไม่เพียงพอ ที่จะแยก Effect ได้ จึงต้องทำการทดลองเพิ่มเติมอีก 8 การทดลอง รวมกับการทดลองเดิมแล้ว จะมีการทดลองทั้งหมด $= 8 + 8 = 16$ การทดลอง ซึ่งเท่ากับทำการทดลองแบบ Full Factorial นั่นเอง

2.6.6 มิติของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบ 2^{3-1} สามารถเรียกได้ว่า การออกแบบมิติ III (Resolution III Design) ในการออกแบบเช่นนี้ ผลหลักจะคู่แฝดกับอันตรกิริยา 2 ปัจจัย การออกแบบจะมีมิติ R ก็ต่อเมื่อไม่มีผลของ p ปัจจัยใดๆ ที่คู่แฝดกับผลอื่นๆ ที่น้อยกว่า R - p ปัจจัย เราจะใช้ตัวห้อยเป็นตัวเลขโรมันแทนมิติของการออกแบบ ดังนั้นเศษส่วนของการออกแบบ 2^3 ที่มีตัวกำหนดความสัมพันธ์ $I = ABC$ (หรือ $I = -ABC$) คือการออกแบบ 2^{3-1}_{III} [25]

เนื่องจากการออกแบบที่มีมิติ III, IV และ V มีความสำคัญ เราจะให้นิยามและยกตัวอย่าง สำหรับการออกแบบเหล่านี้ ดังต่อไปนี้

ก. การออกแบบมิติ III การออกแบบเหล่านี้จะไม่มีผลหลักใด ๆ ที่จะคู่แฝดแฝงกับผลหลัก ตัวอื่น ๆ แต่ผลหลักจะคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยาสองปัจจัย และอันตรกิริยาสองปัจจัยอาจจะคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกันได้ ตัวอย่างเช่น การออกแบบ 2^{3-1} เป็นการออกแบบที่มีมิติ III (2_{III}^{3-1})

ข. การออกแบบมิติ IV การออกแบบเหล่านี้จะไม่มีผลหลักใด ๆ ที่จะคู่แฝดแฝงกับผลหลักตัวอื่น ๆ หรือกับอันตรกิริยาสองปัจจัยใด ๆ แต่อันตรกิริยาสองปัจจัยจะคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกัน ตัวอย่างเช่น การออกแบบ 2^{4-1} ที่มี I = ABCD เป็นการออกแบบมิติ IV (2_{IV}^{4-1})

ค. การออกแบบมิติ V การออกแบบเหล่านี้จะไม่มีผลหลักหรืออันตรกิริยาสองปัจจัยใดๆ ที่จะคู่แฝดแฝงกับผลหลักหรืออันตรกิริยาสองปัจจัยตัวอื่น ๆ แต่อันตรกิริยาสองปัจจัยจะคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยาสามปัจจัย ตัวอย่างเช่น การออกแบบ 2^{5-1} ที่มี I = ABCDE เป็นการออกแบบที่มีมิติ V (2_V^{5-1})

ตามปกติแล้วมิติของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ จะเป็นจำนวนตัวอักษรที่น้อยที่สุดในส่วนของตัวกำหนดความสัมพันธ์ สิ่งก็ตามมาก็คือ เราสามารถเรียกการออกแบบต่อจากนี้ว่า การออกแบบชนิดสามตัวอักษร สี่ตัวอักษร และห้าตัวอักษร ตามลำดับ โดยมากแล้วเรามักจะกำหนดให้มิติสูงสุดที่เป็นไปได้ของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล มีค่าตรงกับระดับของเศษส่วนที่ต้องการ ซึ่งจะเห็นได้ว่า การออกแบบยังมีมิติสูง ก็ยังมีข้อจำกัดน้อยลงในเรื่องสมมติฐานเกี่ยวกับว่า อันตรกิริยาตัวใดจะถูกละเลยได้เพื่อที่จะได้มาซึ่งการตีความหมายข้อมูลอย่างถูกต้อง

2.6.7 การทดสอบสมมติฐาน

สมมติฐานทางสถิติ คือ ประโยคหรือข้อความที่กล่าวเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น ซึ่งอาจจะเป็นจริงหรือเท็จก็ได้ ข้อความหรือประโยคดังกล่าวนี้ ต้องระบุกลุ่มของประชากรที่เกี่ยวข้องมาด้วยหนึ่งกลุ่มหรือมากกว่าหนึ่งกลุ่มก็ได้ [22]

สมมติฐานทางสถิติที่เขียนไว้ในเชิงปริมาณการเท่ากันของค่าสถิติเราเรียกว่า สมมติฐานที่ไม่มีความแตกต่างกัน ภาษานักวิจัยเรียกกันว่า สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) แทนด้วยสัญลักษณ์ H_0 ส่วนสมมติฐานที่มีความแตกต่างกันเรียกว่า สมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis) แทนด้วยสัญลักษณ์ H_1

การทดสอบสมมติฐานแบบทางเดียว

เป็นการตั้ง H_0 โดยกำหนด $H_0: \mu = \mu_0$
 และกำหนด H_1 ดังนี้คือ $H_1: \mu < \mu_0$ หรือ $H_1: \mu > \mu_0$
 โดยที่ μ คือค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ
 μ_0 คือค่าเฉลี่ยอ้างอิง

การทดสอบสมมติฐานแบบสองทาง

เป็นการตั้ง H_0 โดยกำหนด $H_0: \mu = \mu_0$
 และกำหนด H_1 ดังนี้คือ $H_1: \mu \neq \mu_0$
 โดยที่ μ คือค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ
 μ_0 คือค่าเฉลี่ยอ้างอิง
 หรือ เป็นการตั้ง H_0 โดยกำหนด $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$
 และกำหนด H_1 ดังนี้คือ $H_1: \mu_i \neq \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่ (i, j)
 โดยที่ μ คือค่าพารามิเตอร์ หรือเฉลี่ยของประชากรทั้งหมดที่สนใจ
 i, j คือ 1, 2, ..., a

ในการทดสอบสมมติฐานจะเกิดลักษณะของความผิดพลาดในการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐาน แบ่งเป็น 2 ประเภท ซึ่งความน่าจะเป็นของความผิดพลาดทั้ง 2 ประเภทก่อให้เกิดสัญลักษณ์พิเศษคือ α และ β คือ

$$1) \alpha = P(\text{type I error}) = P(\text{reject } H_0 / H_0 \text{ is true})$$

α หมายถึง ความเสี่ยงในการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ทั้งที่สมมติฐานหลักเป็นจริง กล่าวคือ ถ้าหากค่า H_0 ถูกปฏิเสธ ทั่วๆ ที่ H_0 ถูกต้อง สามารถเขียนได้ดังนี้

$$2) \beta = P(\text{type II error}) = P(\text{fail to reject } H_0 / H_0 \text{ is false})$$

β หมายถึง ความเสี่ยงในการยอมรับสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ทั้งที่สมมติฐานหลักไม่เป็นจริง ความผิดพลาดประเภทที่ 2 นี้กล่าวคือ ถ้า H_0 ไม่ถูกปฏิเสธ ทั่วๆ ที่ H_0 นั้นไม่ถูกต้อง สามารถเขียนได้ดังนี้

และจากความเสี่ยงของทั้งสองแบบนี้เอง จึงต้องมีการกำหนดจำนวนซ้ำของการทดลองไว้ เพื่อให้มีความเชื่อมั่นหรือมีความเสี่ยงในการยอมรับข้อมูลตามที่กำหนดไว้ และในการวิเคราะห์ก็มักจะกำหนดให้ค่าของ α มีค่าคงที่ และค่าของ β ให้มีค่าน้อยที่สุด

2.6.8 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีการของ P-Value ได้ถูกนำมาใช้อย่างมาก คือ P-Value เป็นค่าความน่าจะเป็นจากการทดสอบทางสถิติ จะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติ เมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่น ๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญ ซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ก็ได้ [26]

โดยปกติแล้วนิยามบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ ดังนั้นอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็นค่า α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อทราบค่า P-Value แล้ว ผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่าข้อมูลมีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

เมื่อทำการวิเคราะห์การทดลองแบบ Fractional Factorial Design โดยใช้ Minitab 15 นอกจากจะได้กราฟแสดงการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองแล้ว Minitab ยังแสดงส่วนสำคัญคือตารางที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบทางปฏิกริยา (Interaction) ของการออกแบบการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ [24]

สรุปคือ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ และเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองแบบที่ละปัจจัย ยิ่งกว่านั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลยังเป็นสิ่งที่จำเป็นเมื่อมีอันตรกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ นอกจากนั้นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลทำให้สามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ ทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผล (Valid) ตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้ [17]

จากนั้นนำปัจจัยที่ได้ไปหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) เป็นกระบวนการสำหรับพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นไปได้ที่ดีที่สุดในกลุ่มหรือประเภทของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ค่าที่เหมาะสมจะต้องตอบสนองหรือบรรลุถึงวัตถุประสงค์ 3 ประการดังนี้

- 1) ค่าที่เหมาะสมจะต้องเป็นค่าที่ได้รับการยอมรับสูงสุด โดยเป็นค่าที่เป็นไปได้ที่ดีที่สุด เมื่อมีการกำหนดกลุ่มของค่าตัวแปร
- 2) ค่าที่เหมาะสมจะต้องอยู่ในภายใต้ข้อจำกัดทางด้านต้นทุนที่สมเหตุสมผล
- 3) ค่าที่เหมาะสมควรมีคุณลักษณะอยู่ในระดับมาตรฐานของบริษัท

ข้อดีของการเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม มีดังนี้ คือ

- 1) เป็นวิธีการที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในด้านต้นทุน หลีกเลี่ยงการทดลองซ้ำ
- 2) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพทางสถิติ เพราะอิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปรอิสระและอิทธิพล หรือความสัมพันธ์แบบกำลังสอง ที่มีต่อค่าผลตอบสามารถคาดคะเนได้
- 3) วิธีการหาค่าที่เหมาะสม ให้ฐานข้อมูลที่ตอบคำถามหลายประการ เช่น ถ้าที่สภาวะ A มีต้นทุนการผลิตสูง การจะหาสภาวะใหม่ที่ต้นทุนลดลง ไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบเต็มรูปแบบอีกครั้ง เนื่องจากฐานข้อมูลที่มีสามารถจะให้คำตอบที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบยืนยันสมการนับว่ามีความจำเป็น
- 4) วิธีการหาค่าที่เหมาะสม สามารถให้สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการที่มีศักยภาพได้หลาย ๆ ค่า สามารถตอบสนองความต้องการของตลาดที่เปลี่ยนแปลง และให้ข้อมูลที่มีคุณภาพ
 อย่างไรก็ตาม การหาค่าที่เหมาะสมอาจคลาดเคลื่อนได้ หากไม่มีความระมัดระวัง ในระหว่างขั้นการวางแผนศึกษา ในเรื่องดังนี้
 - ไม่ได้มีการระบุปัจจัยหรือตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนองอย่างถูกต้อง ดังนั้นควรทราบถึงหน้าที่ของปัจจัยนั้น ๆ ในสภาวะที่มีผลต่อค่าตอบสนอง
 - การระบุระดับต่ำหรือระดับสูงของปัจจัยอาจไม่ถูกต้อง ดังนั้นการทดลองเบื้องต้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น หากไม่สามารถหาข้อมูลได้
 - การใช้พื้นที่การตอบสนองเกินกว่าปกติ โดยไม่มีการตรวจสอบจุดที่เหมาะสม
 - การเลือกใช้แบบการทดลองและการเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ถูกต้อง

2.7 การทบทวนวรรณกรรมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการ การแก้ไขปัญหาการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากไม่ได้มีการแก้ไขปัญหาให้ถูกต้องตามหลักวิชาการอย่างแท้จริง การแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า และขาดมาตรฐานในการปฏิบัติงาน ซึ่งสิ่งเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาตามมาเป็นวงจรที่เกิดขึ้นซ้ำแล้วซ้ำเล่า เช่น ขาดเสีย การผลิตที่ล่าช้า ชิ้นงานที่ผลิตมีจำนวนไม่พอส่งมอบและต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น เป็นต้น ดังนั้นการวิจัยนี้จะเป็นส่วนหนึ่งให้การศึกษาและการดำเนินงานปรับปรุง โดยอาศัยการประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพ เช่น การใช้แผนภูมิพาเรโตในการเก็บข้อมูลเพื่อนำมากำหนดและคัดเลือกปัญหา [17,18] แล้วทำการวิเคราะห์สาเหตุการเกิดปัญหาโดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล [22,27-28] เพื่อนำมากำหนดปัจจัยในการวิเคราะห์และกำหนดระดับปัจจัยให้

เหมาะสม โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) วิเคราะห์ผ่านค่าความแปรปรวนหรือเรียกง่าย ๆ ว่า ANOVA

การออกแบบการทดลองหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัญหาได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมีผู้วิจัยหลายท่านได้นำหลักการออกแบบการทดลองนี้ทั้งแบบแฟคทอเรียลและเศษส่วนแฟคทอเรียล เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาในอุตสาหกรรมการผลิต ลดของเสีย การปรับปรุงกระบวนการ และการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต เช่น การใช้ 2^2 Factorial Design ในการลดปัญหาการโค้งงอของการผลิตแผงวงจรแบบอ่อน สามารถลดค่าใช้จ่ายในการแก้ไขปัญหาได้ 2,691,889 บาทต่อปี [28] การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในกระบวนการอบ สามารถลดเวลาในการผลิต 70 เปอร์เซ็นต์ ลดค่าใช้จ่ายลง 30,122.73 บาทต่อเดือน [29] การศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วและความเที่ยงตรงที่ส่งผลต่อ Yield ในการผลิตเครื่องจักรแต่ละชนิด [30] การใช้ 2^3 Factorial Design ในการปรับปรุงกระบวนการล้างฟิล์มในผลิตแผงวงจรแบบอ่อน ช่วยลดของเสียจาก 1.63 เปอร์เซ็นต์ ลงเหลือ 1.33 เปอร์เซ็นต์ [31] การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของภาพพิมพ์ในการผลิตเครื่องพิมพ์ ทำให้อัตราส่วนเครื่องภาพพิมพ์ไม่ผ่านคุณภาพนั้นลดลงได้ร้อยละ 60 [17] การลดของเสียจากกระบวนการแบบแมชชีนนิ่งของการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ สามารถลดของเสียได้ 79.46 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็น 207,615 บาทต่อเดือน [32] การวิเคราะห์ปัจจัยในการ Rework Lead-Free บนพื้นผิวบนพื้นผิวแผงวงจรแบบอ่อน พบปัจจัยที่มีนัยสำคัญเพียงปัจจัยเดียวคือ Seven-zone Convection Reflow ที่ให้ Yield 100 เปอร์เซ็นต์ [33] เป็นต้น อีกทั้งมีการนำ 2^{k-1} Fractional Factorial Design มาประยุกต์ใช้ในการผลิตหลายประเภท เช่น การใช้ 2^{5-1} Factorial Design ในการลดอัตราของเสียจากการผลิตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ในการแก้ไขทำให้ไม่พบปัญหา Slider หลุดจาก Suspension อีก [27] การใช้ 2^{6-1} Factorial Design ในการปรับปรุงการพิมพ์ออฟเซตบนกล่องบรรจุภัณฑ์ สามารถลดของเสียได้ 76.49 เปอร์เซ็นต์ [22] และการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อ Thermal Via ในการลด PCB Thermal Resistant พบว่าในการออกแบบวงจรลด Thermal Via Pitch Size เพิ่มความหนา Via Cu Barrel และเพิ่มจำนวนของ PCB Metalized Cu Layers [34] การใช้ 2^{7-4} Factorial Design ในการวิเคราะห์ตัวแปรในกระบวนการพิมพ์ PCB พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแรง Shear บนแผ่น PCB มากสุดคือ Curing Temperature และ Curing Time [35] นอกจากนี้ยังมีการใช้การออกแบบการทดลองแบบทาคูชิ ในการกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมและการหาพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ในการศึกษาปัจจัยการทำความสะอาดแขนจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ แบบ L8 2 ระดับ 4 ปัจจัย พบว่าปัจจัยหลัก คืออุณหภูมิ ความถี่ ระดับพลังงาน และเวลา โดยมีค่าระดับปัจจัยที่ระดับ 35 °c, 80 kHz, 90% ของ 2,500 วัตต์และ 480 วินาที ตามลำดับ [36] การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสม

ในกระบวนการฟอสเฟอริไนเซอร์ จาก 5 ปีจจัย พบว่ามีระดับของ 2 ปีจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ คือ ความหนืดสี 10-10.5 วินาที และค่าแรงดันลม 4 บาร์ เมื่อปรับปรุงแล้วทำให้จำนวนของเสียสีเป็น ผิวส้มลดลง คิดเป็นจำนวนงานเสียลดลง 60.49 เปอร์เซนต์ และค่าใช้จ่ายในการแก้ไขงานลดลง 60.53 เปอร์เซนต์ [37]

จากการสืบค้นงานวิจัยที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า สามารถนำเครื่องมือควบคุมคุณภาพ ประยุกต์ใช้ร่วมกับหลักการออกแบบการทดลองช่วยในแก้ไขปัญหาดังกล่าว ในการวิจัยได้เป็นอย่างดี และยังไม่พบว่ามีผู้นำเทคนิคการออกแบบการทดลองมาใช้ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับการเจาะสล็อต ในการผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำทฤษฎีที่ได้กล่าวอ้างมาใช้ในการวิจัยนี้เพื่อ ลดปัญหาคุณภาพในการเจาะแผ่น PCB จากเครื่องมือควบคุมคุณภาพ 2 อย่างคือ เริ่มการค้นหาปัญหาจากการใช้แผ่นภูมิพาราโต และแผ่นผังแสดงเหตุและผลทำให้มองเห็นภาพขององค์ประกอบทั้งหมด เพื่อ วิเคราะห์สาเหตุและกำหนดปัจจัยในการทดลอง แล้วใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วน เชิงแฟกทอเรียล มาทำการทดลองค้นหาระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหาอย่างแท้จริง เพื่อเป็นแนวทาง แก้ไขปัญหาการเจาะในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้เหมาะสมตามหลักทางวิศวกรรม

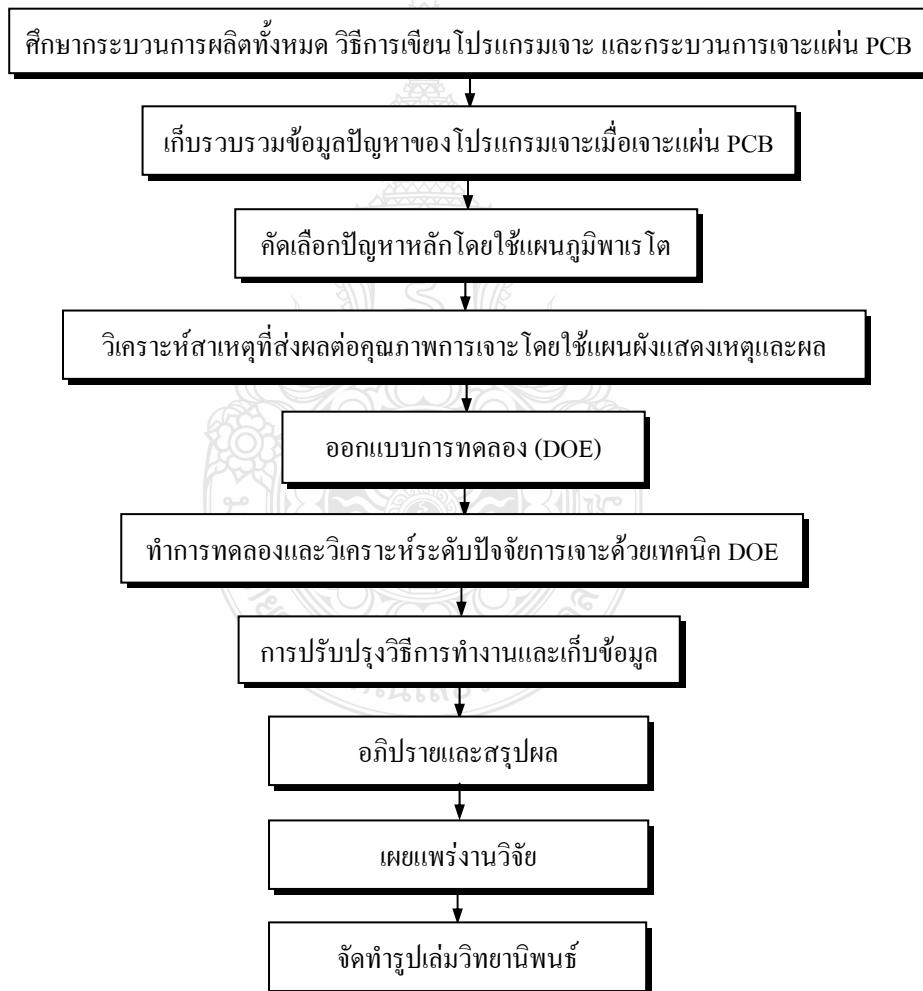


บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การกำหนดขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรที่ก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิต PCB โดยผู้ทำวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากกรณีศึกษาโรงงานตัวอย่างที่เป็นผู้ผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในแผนกวิศวกรรมผลิตภัณฑ์ ที่มีหน้าที่รับผิดชอบในการจัดทำโปรแกรมเจาะ ชิ้นงานตัวอย่างส่งให้ลูกค้า ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการผลิตแผ่น PCB โดยมีแผนผังขั้นตอนการวิจัยดังในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยจะเริ่มจากการศึกษาขั้นตอนการผลิต PCB ทั้งหมดดังแสดงในภาคผนวก ก หน้า 110 และกรรมวิธีการผลิตโปรแกรมเจาะแผ่น PCB โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลปัญหาในการเจาะในปี พ.ศ. 2553 จากที่ได้กล่าวมา เมื่อทราบถึงปัญหาที่พบในการผลิต แล้วจึงทำการจำแนกปัญหาโดยใช้แผนภูมิพาเรโต จากนั้นทำการศึกษาสาเหตุและทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปัญหานี้ เพื่อกำหนดระดับของตัวแปรที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบการทดลอง (DOE) ที่จะช่วยในการอภิปรายสรุปผลเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง สุดท้ายจะนำไปกำหนดวิธีแก้ไขปัญหามาเป็นมาตรฐานในการทำงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ต่อไป

3.2 การศึกษาขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเจาะและกระบวนการเจาะแผ่น PCB

การผลิตแผ่น PCB หนึ่งในกระบวนการหลักที่สำคัญคือ กระบวนการเจาะ (Drilling Process) ผ่านเครื่องเจาะ CNC ที่จำเป็นต้องใช้โปรแกรมเจาะสั่งให้เครื่องทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้ในแต่ละผลิตภัณฑ์ (Part Number) ที่ต่างกัน ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.1 แล้ว ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเพื่อให้สามารถเข้าใจขั้นตอนการเจาะ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ขั้นตอนการเขียน โปรแกรมเจาะ และขั้นตอนการเจาะ

3.2.1 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเจาะ (CNC Programming)

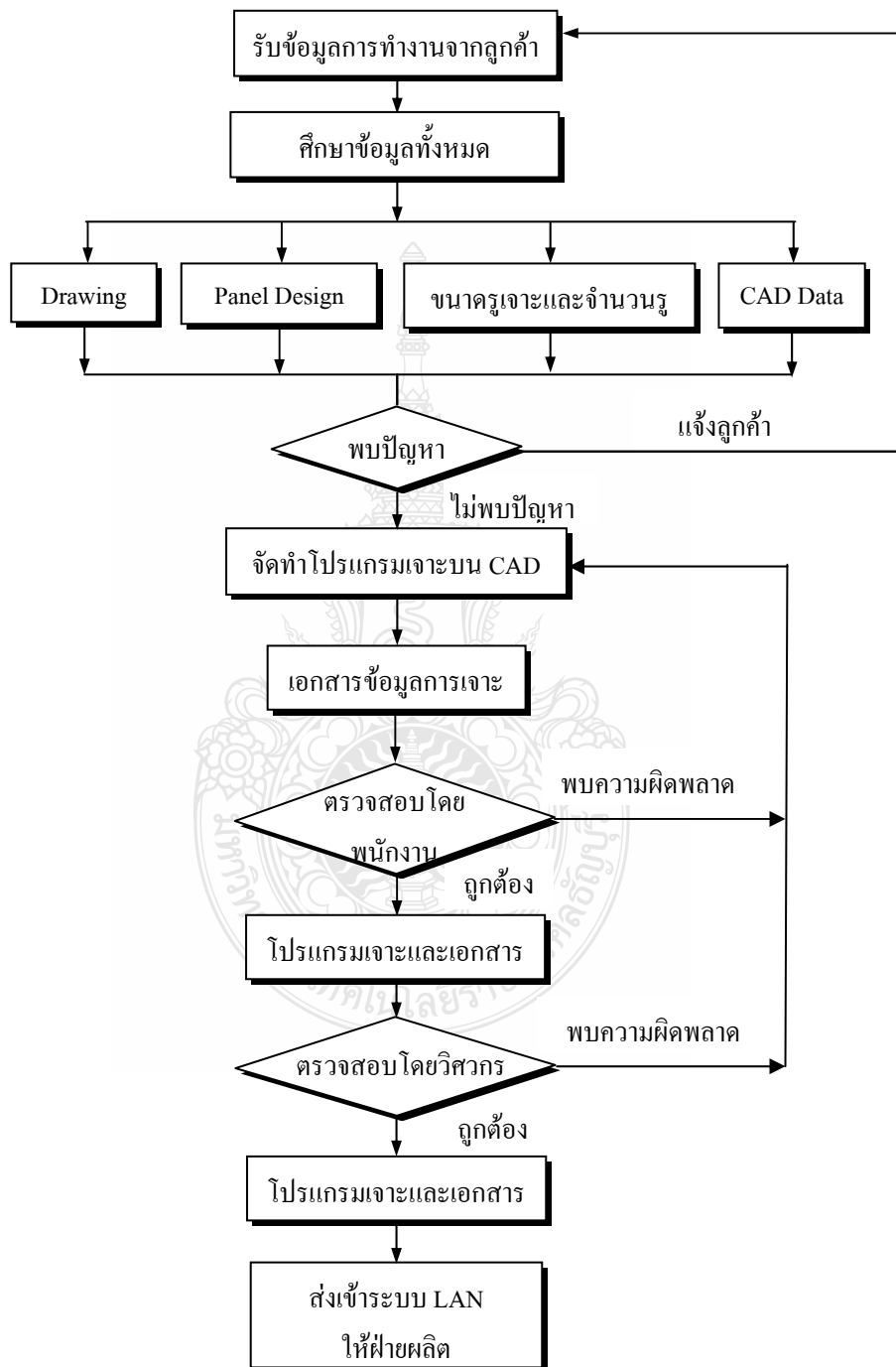
ในกระบวนการเขียนโปรแกรมจะต้องกำหนดขั้นตอนในการทำงาน เพื่อให้โปรแกรมเจาะเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า โดยมีกระบวนการย่อยดังแผนผังใน ภาพที่ 3.2

ก. รับข้อมูลจากลูกค้า จะประกอบไปด้วย Drawing Panel Design CAD Data และเอกสารขนาดรูเจาะ ซึ่งจะมีตำแหน่งและขนาดรูประเภทต่างๆ ที่ลูกค้าต้องการ โดยนำมาศึกษาข้อมูลผลิตภัณฑ์จากข้อกำหนดของลูกค้า (Customer Specification Requirement) เมื่อพบปัญหาของข้อมูลให้แจ้งลูกค้า

ข. จัดทำโปรแกรมเจาะ การสร้าง NC file (CAD Data) จากโปรแกรม CAD ให้เป็น Panel โดยการจัดวางตามตำแหน่งและกำหนดขนาดรู Tooling ที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ ทั้งในตัวงานและขอบบอร์ด ตามที่ออกแบบไว้ในคู่มือการผลิต (MI) และ Drawing ลูกค้า พร้อมทั้งกำหนดตำแหน่งการวาง Zero (พิกัด $X=0, Y=0$) ให้ฝ่ายผลิต

ค. จัดทำเอกสารข้อมูลโปรแกรม (Program data sheet) เป็นการเขียนเอกสารระบุการจัดวางชิ้นงานและขนาดของดอกที่ใช้ในการเจาะ โดยเรียงจากขนาดรูเล็กไปจนถึงรูใหญ่สุด พร้อมจำนวนรูในแต่ละขนาดดอก (Tools) นั้นๆ ตาม โปรแกรมที่เขียน

ง. ทำการตรวจสอบความถูกต้องด้วยตนเอง (Self Inspection) ขั้นตอนนี้ช่างเทคนิคที่เป็นคนเขียนโปรแกรม จะทำการตรวจโปรแกรมบน CAD กับเอกสารด้วยตนเองตามใบตรวจสอบ (Check List Inspection) เมื่อตรวจสอบแล้วพบข้อผิดพลาดให้ทำการแก้ไข

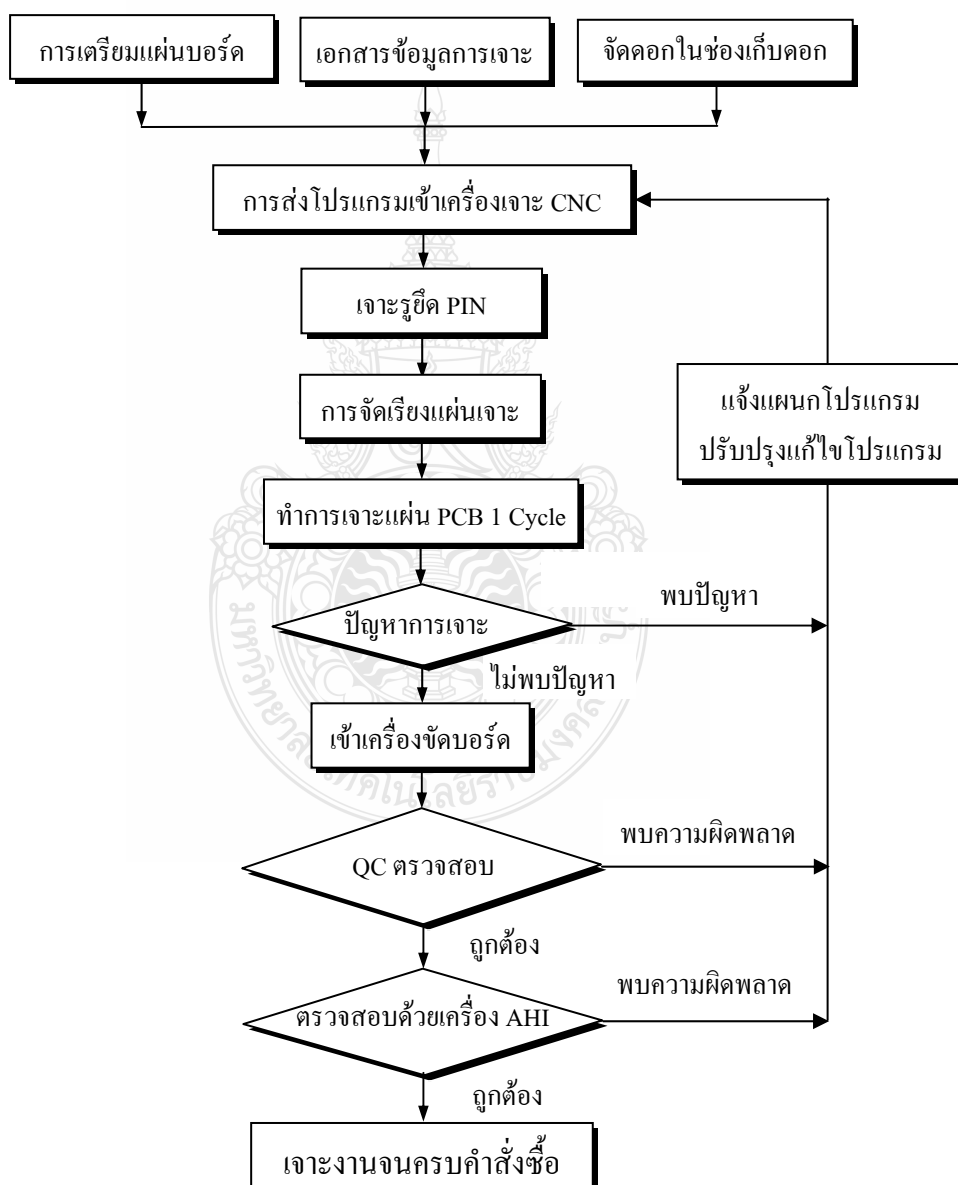


ภาพที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการจัดทำโปรแกรมเจาะ

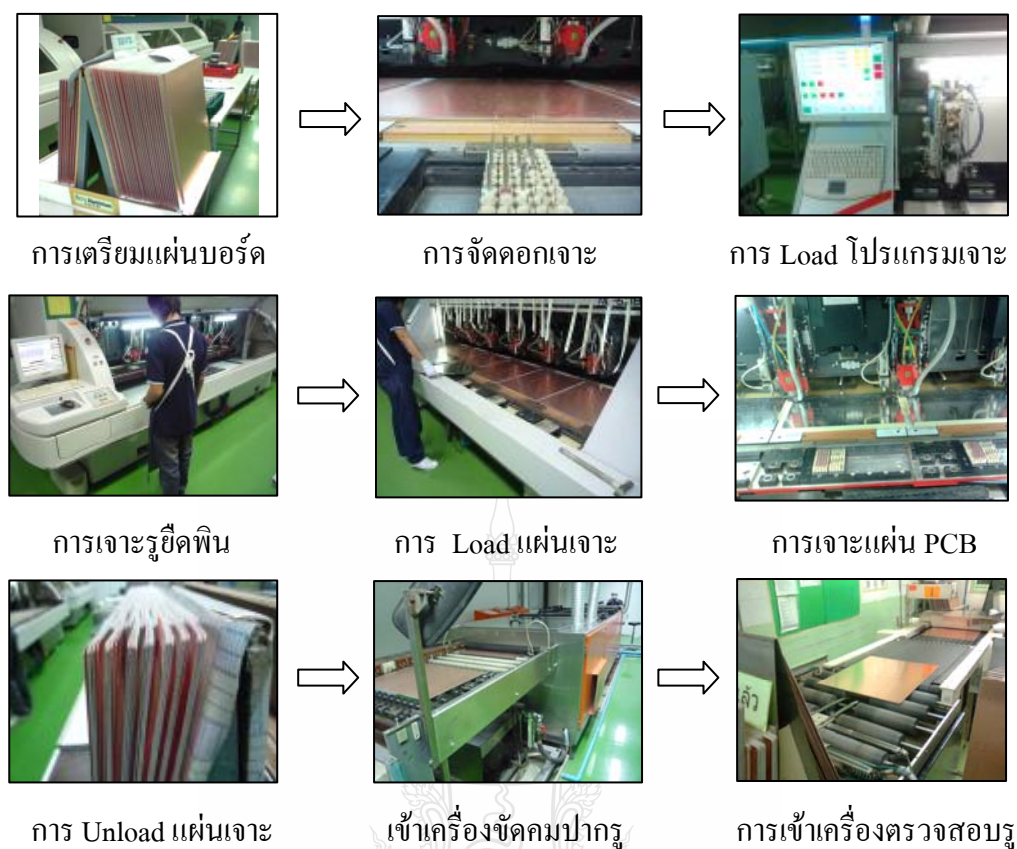
จ. ทำการตรวจสอบโดยวิศวกร (Rechecking by Engineer) หัวหน้าแผนกโปรแกรมจะทำการตรวจสอบโปรแกรมและเอกสารข้อมูลการเจาะ ในขั้นตอนสุดท้ายก่อนส่งโปรแกรมเข้าระบบ LAN (Local Area Network) ไปยังเครื่องเจาะ CNC

3.2.2 ขั้นตอนการเจาะแผ่น PCB (Drilling Process)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นกระบวนการเจาะบนเครื่อง CNC ควบคุมโดยฝ่ายผลิต จะมีขั้นตอนย่อยในการทำงานให้เป็นไปตามที่โปรแกรมเจาะกำหนด ดังแผนผังขั้นตอนการเจาะในภาพที่ 3.3 และวิธีการเจาะในภาพที่ 3.4 โดยจะกล่าวถึงการเจาะแผ่น PCB แบบ 4 Layer ขึ้นไป



ภาพที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการเจาะแผ่น PCB



ภาพที่ 3.4 วิธีการเจาะแผ่น PCB

ก. การเตรียมแผ่นบอร์ด เป็นการนำแผ่นบอร์ดที่ถูกเจาะรูเป้าหมาย 3 รู (Target Hole) มาจากกระบวนการ X-Ray Drill (ภาคผนวก ก) ให้พร้อมก่อนการเจาะ

ข. จัดดอกในช่องเก็บดอก (Magazine Drill Bit Setup) เป็นการเรียงขนาดดอกที่จะใช้ในงาน บนช่องเก็บดอกของเครื่อง CNC ให้ครบทั้ง 6 หัว (Spindle Head) ตามเอกสารข้อมูลการเจาะ

ค. การส่งโปรแกรมเข้าเครื่อง CNC (Load Program from LAN) ตรวจสอบเอกสารการเจาะ และทำการ Load โปรแกรมตาม Part Number และ Revision ตามที่เอกสารระบุ ถ้าเป็นงาน 2 Layer จะมีแค่โปรแกรมเจาะอย่างเดียว และถ้าเป็นงาน 4 Layer ขึ้นไปจะมีโปรแกรมเจาะรูยึด และโปรแกรมเจาะงาน เข้าไปเก็บไว้ในหน่วยความจำของเครื่องเจาะ CNC

ง. การเจาะรูยึดพิน (Pin) ทำการกำหนด Zero ตามเอกสารข้อมูลการเจาะ บนโต๊ะเครื่องจักร (Table Machine) ตั้งเครื่องจำตำแหน่ง Zero แล้วใช้ดอกเจาะ (Drill Bit) ขนาด 122 mil (1000 mil = 1 inch) เจาะบนแผ่นรอง (Backup sheet) ตามความลึกที่กำหนด (ค่าแกน Z) ตามโปรแกรมเจาะรูยึด จากนั้นให้ดอกพินขนาด 122 mil ที่เตรียมไว้ สำหรับยึดแผ่น PCB ตรงรูเป้าหมาย

3 รู โดยตำแหน่งรูเป้าหมายจะตรงกับโปรแกรมเจาะรูอีดีพิน (รูเป้าหมายบนแผ่นบอร์ด 3 รูจะถูกเจาะมาจากกระบวนการ X-Ray Drill)

จ. การจัดเรียงแผ่นเจาะ (Stack up) เป็นการนำแผ่นบอร์ดมาซ้อนกัน ตามเอกสารข้อมูลการเจาะที่กำหนด วางบนแผ่นรองโดยสวมกับพินที่เจาะไว้ในช่อง แล้วปิดด้วยแผ่นอลูมิเนียมหนา 0.5 มิลลิเมตร (Aluminum entry sheet 0.5 mm) เพื่อกันหัว Spindle กระแทกชิ้นงานเป็นรอย

ข. ทำการเจาะ ทำการ Load โปรแกรมเจาะ แล้วให้เครื่อง CNC อ่านจำนวนรู (Dry Run) โดยตรวจสอบจำนวนรูที่เครื่องอ่านได้กับเอกสารข้อมูลการเจาะตรงกับโปรแกรม แล้วทำการเจาะแผ่น PCB จำนวน 1 รอบการทำงาน (Cycle)

ค. ขัดแผ่น (Deburr/Scrubbing/Desmear) เป็นการป้อนแผ่นบอร์ดที่เจาะแล้วเข้าเครื่องล้างฝุ่นในรูที่เกิดจากการเจาะ และขัดคมทองแดงปากรูให้เรียบ

ด. ตรวจสอบโดยแผนกควบคุมคุณภาพ ทำการส่งแผ่น PCB ที่เจาะแล้วจากทุกหัวเจาะในรอบการผลิตแรก (First Setup) แผนกตรวจสอบคุณภาพจะทำการตรวจสอบ 3 ขั้นตอนดังนี้

1) การตรวจสอบสภาพแผ่นบอร์ดด้วยตาเปล่า ผ่านกล้อง 10X ดูรูปร่างและความสวยงาม พร้อมทั้งทาบฟิล์มที่พล็อตมาจากโปรแกรมเจาะ สุ่มวัดขนาดรูด้วย Pin Gage เพื่ออนุมัติการเจาะ

2) การตรวจเช็คขนาดและจำนวนรู (รูหาย/รูเกิน) ด้วยเครื่อง AHI โดยการนำแผ่นบอร์ดที่เจาะแล้วเข้าเครื่อง โดยใช้ลำแสงสแกนแผ่นบอร์ดทุกจุด เปรียบเทียบกับไฟล์เจาะต้นฉบับ (ถ้าแสงส่องผ่านได้ตามความเข้มของแสงที่กำหนด แสดงว่ามีรูผ่านการเจาะ)



ภาพที่ 3.5 การใช้เครื่อง Optical Measurement วัดขนาด Multi-hit Slot

3) การวัดขนาดสล๊อต (Slot Drill Dimension Check) การใช้เครื่อง Optical Measurement ในการวัดแผ่นบอร์ดตัวอย่างที่เจาะแล้ว เพื่อการยืนยันความถูกต้องว่าผ่านเกณฑ์ที่กำหนด จากค่าระยะเผื่อ (Tolerance) ใน Drawing ของลูกค้ำ ซึ่งปกติจะอยู่ที่ ± 0.004 Inch (± 4 mil) สำหรับทั้งความกว้างและความยาวของสล๊อต รวมทั้งส่วนโค้งของสล๊อต (Arc) ดังภาพที่ 3.5 เช่น

Multi-Hit Slot:	1.0 x 1.5 mm (0.0394 x 0.0591 Inch)
Specification:	Width $\phi 0.0394 \pm 0.004$ Inch (0.0390 – 0.0398 Inch)
	Length 0.0591 ± 0.004 Inch (0.0551 – 0.0631 Inch)

3.3 การเก็บข้อมูลของปัญหาที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ

จากโปรแกรมเจาะสำหรับผลิตภัณฑ์ในปี พ.ศ.2553 และรวบรวมปัญหาที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1 และจากตารางนี้ พบผลิตภัณฑ์ที่มีปัญหาจำนวน 20 งาน แบ่งเป็น ด้านคุณภาพ 12 งานและด้านประสิทธิภาพการผลิตจำนวน 8 งาน ซึ่งด้านประสิทธิภาพนั้นส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาของตัวแปรในการเจาะไม่เหมาะสมทำให้เจาะนาน หรือดอกหัก จะส่งผลกระทบต่อปริมาณการผลิต (Output) โดยตรง แต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อของเสีย (Scrap) โดยในที่นี้ผู้วิจัยจะไม่ขอกล่าวถึง

เนื่องจากข้อมูลปัญหาด้านคุณภาพที่กล่าวมาที่พบข้อร้องเรียนจากแผนกควบคุมคุณภาพ แผนกประกันคุณภาพ ในบางกรณีต้องกำหนดให้เป็นของเสีย (Scrap) หรือต้องแจ้งลูกค้ำเพื่อนำไปใช้ก่อน (UAI: Use As It) และที่ส่งผลกระทบต่อบริษัทมากที่สุดคือการพบปัญหาจากชิ้นงานตัวอย่างที่ลูกค้ำ ซึ่งต้องทำการตอบข้อร้องเรียนให้ลูกค้ำ (CAR: Corrective Action Request สำหรับลูกค้ำทั่วไป และ 8D Report สำหรับกลุ่มอุตสาหกรรมรถยนต์)

จากตารางที่ 3.1 สามารถจำแนกรายละเอียดปัญหาผลิตภัณฑ์ใหม่ que พบ ได้ดังนี้

- 1) ปัญหา A หมายถึงปัญหาการเจาะสล๊อตสั้นแล้วรูปร่างเบี้ยวผิดไปจากข้อกำหนดลูกค้ำ
- 2) ปัญหา B หมายถึงปัญหาการกำหนดคำสั่งโปรแกรมผิดพลาด
- 3) ปัญหา C หมายถึงปัญหาการกำหนดตำแหน่งการเจาะผิดไปจาก Drawing
- 4) ปัญหา D หมายถึงปัญหาการกำหนดพารามิเตอร์ในโปรแกรมไม่เหมาะสม
- 5) ปัญหา E หมายถึงปัญหารอบการเจาะนานกว่า 5 ชั่วโมง
- 6) ปัญหา F หมายถึงปัญหาอื่นๆ

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดปัญหาการผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พบในปี พ.ศ. 2553

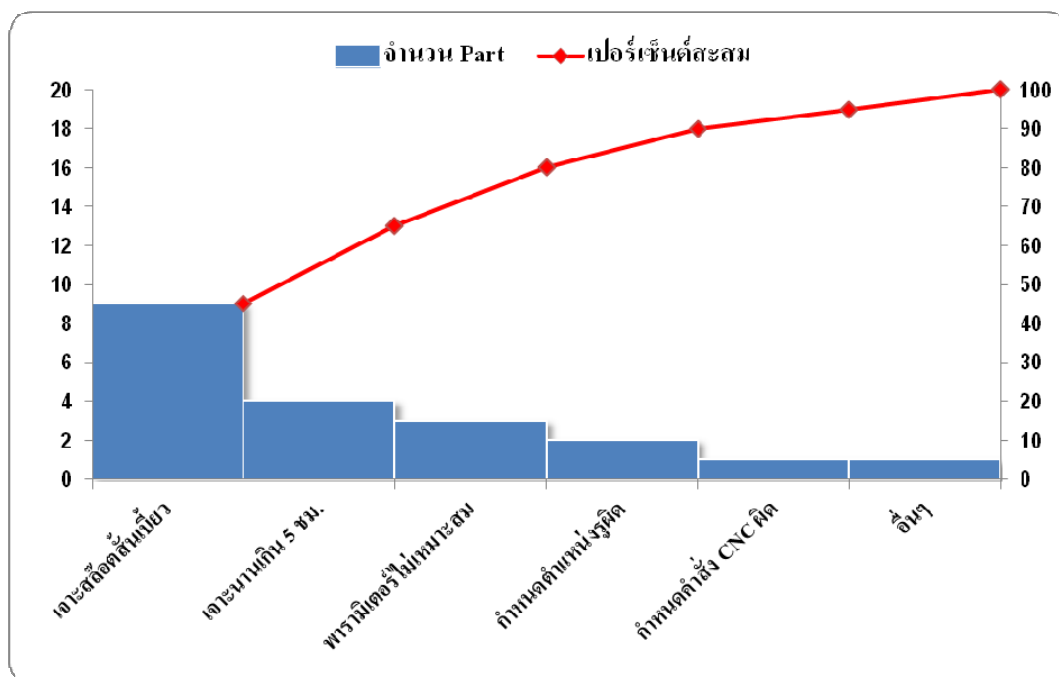
เดือน	จำนวนงาน ที่มีปัญหา	Part	ด้านคุณภาพ			ด้านประสิทธิภาพ			จำนวนที่พบ (ตารางฟุต)
			A	B	C	D	E	F	
มกราคม	0	0						0	
กุมภาพันธ์	0	0						0	
มีนาคม	1	S6XXXX		1				24.26	
เมษายน	0	0						0	
พฤษภาคม	3	P4XXXX				1		0	
		S4XXXX	1					71.01	
		S4XXXX	1					72.59	
มิถุนายน	2	P2XXXX				1		0	
		S4XXXX	1					71.01	
กรกฎาคม	4	S2XXXX					1	0	
		S2XXXX				1		0	
		Q4XXXX			1			81.37	
		P8XXXX			1			270.31	
สิงหาคม	2	P4XXXX					1	0	
		P4XXXX					1	0	
กันยายน	1	P2XXXX	1					52.73	
ตุลาคม	1	S2XXXX	1					76.01	
พฤศจิกายน	2	S4XXXX	1					63.29	
		S2XXXX	1					72.62	
ธันวาคม	4	S2XXXX					1	0	
		S4XXXX					1	0	
		P4XXXX	1					42.19	
		S4XXXX	1					80.13	
			9	1	2	3	4	1	977.52

3.4 วิเคราะห์ปัญหาการเจาะโดยใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ

งานวิจัยนี้ นำเครื่องมือควบคุมคุณภาพและเครื่องควบคุมคุณภาพมาใช้ 2 เครื่องมือคือ แผนภูมิพารेटโต และแผนผังแสดงเหตุและผล

3.4.1 คัดเลือกปัญหาโดยใช้แผนภูมิพารेटโต (Pareto Chart)

จากการจำแนก Part Number ที่พบปัญหาของโปรแกรมเจาะในตารางที่ 3.1 ทำการจัดเรียงลำดับความสำคัญ โดยใช้แผนภูมิพารेटโต เพื่อกำหนดปัญหาหลักของการทำโปรแกรมเจาะที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตมากที่สุด ดังในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แผนภูมิพารโตของปัญหาที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ

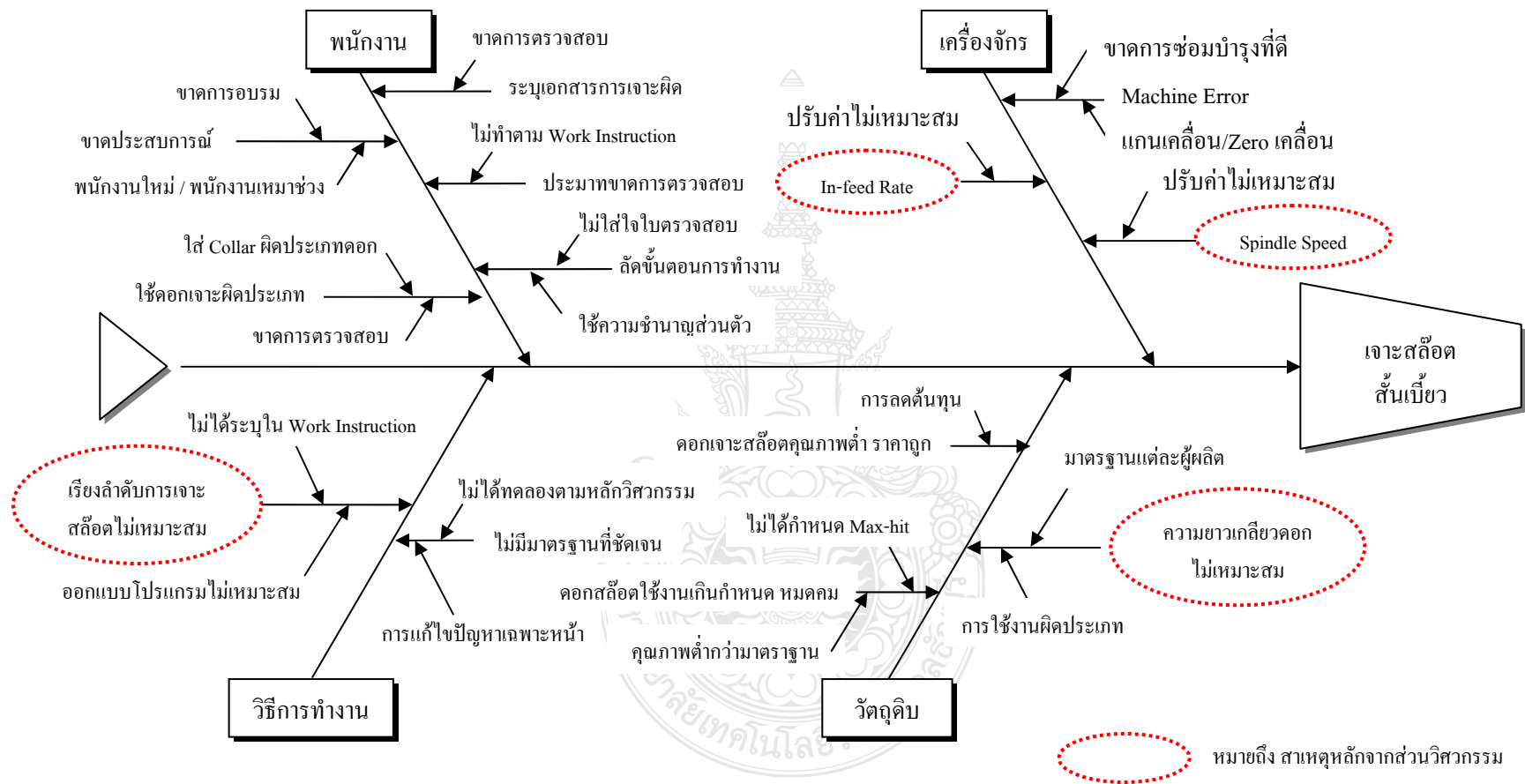
จากแผนภูมิพารโตข้างต้นจะพบว่าปัญหา A (ปัญหาการเจาะสลอตสั้นแล้วรูปร่างเบี้ยวผิดไปจากข้อกำหนดลูกค้า) ซึ่งเป็นปัญหาด้านคุณภาพการเจาะที่มีจำนวน Part Number ที่พบปัญหามากที่สุด ผู้วิจัยจึงคัดเลือกมาทำการศึกษา ตามวัตถุประสงค์การวิจัย

3.4.2 วิเคราะห์ปัจจัยโดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

จากปัญหาด้านคุณภาพที่ได้จากการใช้แผนภูมิพารโตในข้อ 3.4.1 นำมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดปัญหาการเจาะสลอตสั้นเบี้ยว โดยผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลสาเหตุของปัญหาจากประสบการณ์ คู่มือทางเทคนิค และทีมงานการทำโปรแกรม (วิศวกร 1 ท่าน ช่างเทคนิคอาวุโส 2 ท่าน และช่างเทคนิค 3 ท่าน) นำมาพิจารณาเขียนแผนผังแสดงเหตุและผล ดังในภาพที่ 3.7

ก. ส่วนที่ระบุปัญหาที่ใช้ในการวิจัย โดยเลือกปัญหาจากแผนภูมิพารโต คือ ปัญหาการเจาะสลอตสั้นเบี้ยว

ข. ส่วนที่บอกสาเหตุ คือ พนักงาน (Man) เครื่องจักร (Machine) วัสดุดิบ (Material) วิธีการทำงาน (Method) ซึ่งในแต่ละสาเหตุหลัก ก็จะถูกแยกออกเป็นสาเหตุย่อยๆ ก่อให้เกิดสาเหตุหลัก

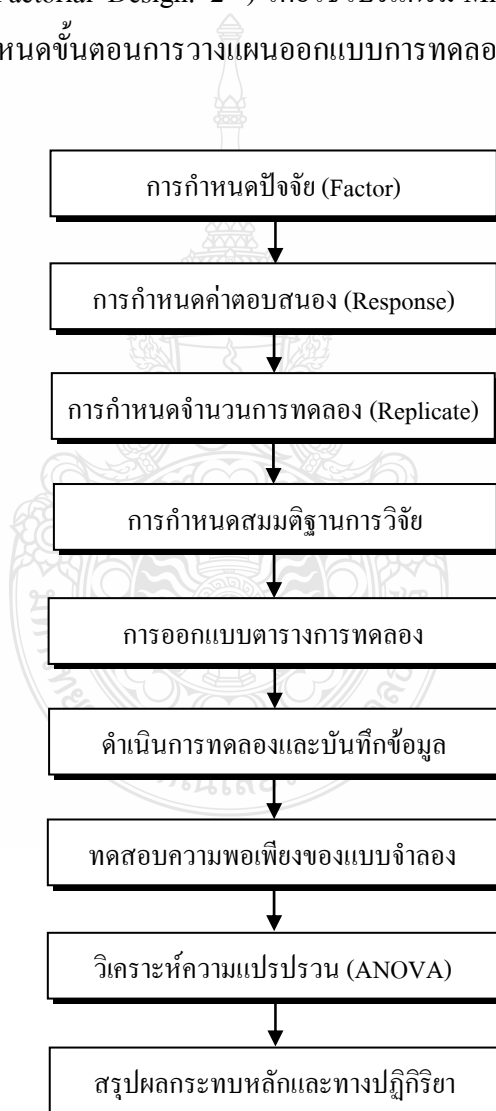


ภาพที่ 3.7 แผนผังแสดงเหตุและผลของปัญหาที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ

3.5 การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม

การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม เป็นการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการทางสถิติคือ การวิเคราะห์แบบ ANOVA นั้นสามารถวิเคราะห์ได้ผลเฉพาะผลลัพธ์ที่เป็นข้อมูลแบบผันแปร (Variable Data) แต่ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลองที่เป็นสัดส่วนของเสียแบบจำนวนนับ (Attribute Data) ซึ่งต้องทำการหาตัวแปรทดแทนในการทดลอง ที่เป็นข้อมูลผันแปรและมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของเสีย

ในการวิจัยนี้จะทำการคัดกรองปัจจัยทุกตัวในการออกแบบการทดลอง แบบเศษส่วนของแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design: 2^{k-1}) โดยใช้โปรแกรม Minitab 15 ด้วยระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 95% จึงกำหนดขั้นตอนการวางแผนออกแบบการทดลองดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 แผนผังขั้นตอนการวางแผนออกแบบการทดลอง

3.5.1 การกำหนดปัจจัยในการออกแบบทดลอง

จากแผนผังสาเหตุและผลของปัญหาในการเจาะ ซึ่งเป็นข้อมูลในการผลิตของโรงงาน จะสามารถกำหนดระดับของปัจจัย (Factor) ตามมาตรฐานการผลิตที่ใช้อยู่ภายในโรงงานผลิตแผ่น PCB ตัวอย่าง เพื่อทำการออกแบบการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยปัจจัยชนิดอื่นที่อยู่นอกเหนือการควบคุมนั้นจะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ (Constant Value) สามารถกำหนดระดับปัจจัยได้ดังนี้

ก. ความยาวเกลียวสว่านของดอกเจาะสล็อต (Flute Length) ดอกเจาะสล็อตที่ใช้โรงงาน ภาณุศึกษาจะมีความยาวเกลียวสว่านตามมาตรฐานของผู้ผลิตดอกเจาะ และมีขนาดตั้งแต่ 0.50–2.15 มิลลิเมตร โดยขนาดจะเพิ่มทีละ 0.05 มิลลิเมตร ทั้งหมด 33 ขนาดดอกสล็อต ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 2.1 จะแบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ 1) ดอกขนาด 0.50 มิลลิเมตร จากการศึกษาของผู้วิจัยพบว่าเป็นดอกเจาะสล็อตที่มีปริมาณการใช้เนื้อมาก ใช้งบงานที่มีลักษณะพิเศษ จึงไม่ขอกล่าวถึง 2) ดอกขนาด 0.55-0.95 มิลลิเมตร เกลียวสว่านปกติยาว 7.00 มิลลิเมตร และเกลียวสว่านยาวสังพิเศษที่ 8.5 มิลลิเมตร สำหรับงานบางประเภทที่ต้องการเพิ่มจำนวนแผ่นบอร์ดในการเจาะต่อหัวให้มากขึ้น 3) ส่วนดอกขนาด 1.00-2.15 มิลลิเมตร เกลียวสว่านปกติยาว 8.5 มิลลิเมตร และเกลียวสว่านยาวสังพิเศษที่ 7.0 มิลลิเมตร สำหรับการทดลองในงานวิจัย ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดระดับปัจจัยเป็น 2 ระดับ คือ 7.0 และ 8.5 มิลลิเมตร

ข. วิธีการเจาะสล็อต (Method of Multi-hit Slot Drilling) จากประสบการณ์ของผู้วิจัยและการศึกษาจากคู่มือการเจาะของผู้ผลิตดอก การเจาะสล็อตทำได้ 2 วิธี ดังแสดงในภาพที่ 2.8 คือ 1) วิธีการเจาะสล็อตแบบเรียง (In-line Method) จะเป็นการเจาะตำแหน่งรูที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 เรียงกันตามลำดับ โดยมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรูเท่าๆ กัน จนได้ความยาวที่ต้องการ 2) วิธีการเจาะสล็อตแบบสับหว่าง (End-point Method) จะเป็นการเจาะตำแหน่งรูที่ 1 ที่ปลายสล็อตด้านหนึ่งก่อน แล้วเจาะตำแหน่งรูที่ 2 ที่ปลายสล็อตอีกด้าน จึงทำการเจาะรูที่ 3 ตรงกลางระหว่างความยาวสล็อต ตำแหน่งรูที่ 4 จะเจาะตรงกลางระหว่างรูที่ 1 กับรูที่ 3 และตำแหน่งรูที่ 5 จะเจาะตรงกลางระหว่างรูที่ 3 กับรูที่ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรูเท่าๆ กัน จนได้ความยาวที่ต้องการ

ค. ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ (F: In-feed Rate) เป็นพารามิเตอร์คำสั่งเครื่องจักรที่กำหนดความเร็วในการปักดอกเจาะ สามารถระบุในโปรแกรมเจาะ มีหน่วยเป็น ipm (Inch per Minute หรือ นิ้วต่อนาที) กำหนดให้มี 2 ระดับคือ 1) ความเร็ว 10 นิ้วต่อนาที คือระดับความเร็วต่ำสุดที่ทางโรงงานทดสอบแล้วว่าไม่เกิดความเสียหายต่อแกนเครื่อง 2) ความเร็ว 44 นิ้วต่อนาที คือความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะจากมาตรฐานของผู้ผลิตดอก

ง. ความเร็วการหมุนของดอกเจาะ (S: Spindle Speed) เป็นพารามิเตอร์คำสั่งเครื่องจักรที่กำหนดความเร็วในการหมุนของหัวเจาะ สามารถระบุในโปรแกรมเจาะ ความเร็วรอบมีหน่วยเป็น krpm (1,000 Round per Minute หรือ 1000 รอบต่อนาที) กำหนดให้มี 2 ระดับคือ 1) ความเร็ว 20,000 รอบ คือความเร็วต่ำสุดที่โรงงานทดสอบแล้วว่าสามารถเจาะแล้วเกิดดอกหักน้อยและลดปัญหาฝุ่นในรู 2) ความเร็ว 90,000 รอบต่อนาที คือความเร็วการหมุนดอกจากมาตรฐานของผู้ผลิตดอก

ตารางที่ 3.2 ระดับปัจจัยหลัก (Factor) ของปัญหา

ปัจจัยหลัก (Factor)	ระดับปัจจัย		หน่วย
	Low (-)	High (+)	
A: Flute Length Slot Drill Bit	7.00	8.50	mm
B: วิธีการเจาะสล็อต	In-Line	End-Point	-
C: In-Feed Rate	10	44	ipm
D: Spindle Speed	20	90	krpm

3.5.2 ค่าตอบสนอง (Response) ในการออกแบบทดลอง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่เป็นสัดส่วนของจำนวนนับ (Attribute Data) ของจำนวนสล็อตที่ยอมรับได้ ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพเชิงคุณภาพ (Qualitative) ซึ่งจะระบุได้ว่าแผ่น PCB นี้เจาะสล็อตแล้วรูปร่างสล็อตนั้นยอมรับ (Accept) หรือไม่ยอมรับ (Reject) จะใช้มาตรฐานการตรวจสอบจากฝ่ายตรวจสอบคุณภาพของโรงงานตัวอย่าง ข้อกำหนดผลิตภัณฑ์และค่าความเผื่อ (Tolerance) ในแบบของลูกค้า โดยแผ่นบอร์ดที่ผ่านการเจาะทุกแผ่นต้องผ่านการตรวจสอบคุณภาพ 100 เปอร์เซ็นต์ จึงต้องทำการหาตัวแปรทดแทนในการทดลองที่เป็นข้อมูลผันแปร และมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของเสีย ค่าตอบสนองที่ใช้จึงมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์สัดส่วนจำนวนสล็อตที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ (Yield) ซึ่งยิ่งมากยิ่งดี (Larger is better)

3.5.3 การกำหนดจำนวนการทดลอง (Replicate)

ก่อนที่จะทำการออกแบบการทดลอง ต้องทำการกำหนดจำนวนการทดลอง (Replicate) ที่เหมาะสมเพื่องานตัวอย่างที่ใช้ในวิจัยนี้ เนื่องจากว่าในช่วงเดือนที่ผู้วิจัยเก็บข้อมูลไม่พบงานที่ใช้ขนาดดอกเจาะ 0.50 มิลลิเมตร จึงไม่ขอกล่าวถึงในงานวิจัย จากข้อมูลในปี พ.ศ. 2553 ดังตารางที่ 3.1 ผู้วิจัยพบว่ามี 3 งานที่พบปริมาณของเสียในการเจาะสูงจากปัญหาสล็อตสั้นเบี้ยว จึงเลือกเป็นตัวแทนในการทดลอง ซึ่งจะมีขนาดของดอกเจาะสล็อตแตกต่างกันจากตารางที่ 2.1 คือ ตัวแทนกลุ่มแรกขนาด 0.80

มิลลิเมตร และ ตัวแทนกลุ่มที่สองขนาด 1.40 และ 1.55 มิลลิเมตร อีกทั้งผู้วิจัยพบว่าในโรงงานการใช้ดอกเจาะสล็อตขนาด 1.00-2.15 มิลลิเมตร ต่อเดือนมีปริมาณการใช้งานมากที่สุด จึงทำการทดลองซ้ำเพื่อความเชื่อมั่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะกำหนดการออกแบบการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (Replicate)

3.5.4 การตั้งสมมติฐานการวิจัย (Test of Hypothesis)

- 1) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัย A มีผลต่อคุณภาพการเจาะสล็อตของแผ่น PCB (β)
สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0A}: \beta_i = 0$ ทุกค่า i
 $H_{1A}: \beta_i \neq 0$ บางค่า i
- 2) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัย B มีผลต่อคุณภาพการเจาะสล็อตของแผ่น PCB (τ)
สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0B}: \tau_j = 0$ ทุกค่า j
 $H_{1B}: \tau_j \neq 0$ บางค่า j
- 3) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัย C มีผลต่อคุณภาพการเจาะสล็อตของแผ่น PCB (γ)
สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0C}: \gamma_k = 0$ ทุกค่า k
 $H_{1C}: \gamma_k \neq 0$ บางค่า k
- 4) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัย D มีผลต่อคุณภาพการเจาะสล็อตของแผ่น PCB (δ)
สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0D}: \delta_m = 0$ ทุกค่า m
 $H_{1D}: \delta_m \neq 0$ บางค่า m
- 5) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัยร่วม AD มีผลต่อคุณภาพการเจาะสล็อตของแผ่น PCB ($\beta\delta$)
สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0AD}: \beta\delta_{im} = 0$ ทุกค่า i, m
 $H_{1AD}: \beta\delta_{im} \neq 0$ บางค่า i, m
- 6) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัยร่วม BD มีผลต่อคุณภาพการเจาะสล็อตของแผ่น PCB ($\tau\delta$)
สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0BD}: \tau\delta_{jm} = 0$ ทุกค่า j, m
 $H_{1BD}: \tau\delta_{jm} \neq 0$ บางค่า j, m
- 7) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัยร่วม AB มีผลต่อคุณภาพการเจาะสล็อตของแผ่น PCB ($\beta\tau$)
สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0AB}: \beta\tau_{ij} = 0$ ทุกค่า i, j
 $H_{1AB}: \beta\tau_{ij} \neq 0$ บางค่า i, j
- 8) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัยร่วม CD มีผลต่อคุณภาพการเจาะสล็อตของแผ่น PCB ($\gamma\delta$)
สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0CD}: \gamma\delta_{km} = 0$ ทุกค่า k, m
 $H_{1CD}: \gamma\delta_{km} \neq 0$ บางค่า k, m

- 9) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัยร่วม AC มีผลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB ($\beta\gamma$)
 สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0AC}: \beta\gamma_{ik} = 0$ ทุกค่า i, k
 $H_{1AC}: \beta\gamma_{ik} \neq 0$ บางค่า i, k
- 10) สมมติฐานการวิจัย: ปัจจัยร่วม BC มีผลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB ($\tau\gamma$)
 สมมติฐานทางสถิติ: $H_{0BC}: \tau\gamma_{jk} = 0$ ทุกค่า j, k
 $H_{1BC}: \tau\gamma_{jk} \neq 0$ บางค่า j, k

เมื่อ

- β คือ อิทธิพลที่เกิดจาก Flute Length Slot Drill Bit
 τ คือ อิทธิพลที่เกิดจาก วิธีการเจาะสล๊อต
 γ คือ อิทธิพลที่เกิดจาก In-feed Rate
 δ คือ อิทธิพลที่เกิดจาก Spindle Speed

3.5.5 วิธีการออกแบบการทดลอง

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design เป็นการออกแบบการทดลองที่ให้ความน่าเชื่อถือมากที่สุด ผู้วิจัยจึงเลือกการออกแบบการทดลองชนิดนี้ ในการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัย (Screening Factors) ที่สำคัญ แล้วจึงนำปัจจัยที่ได้ไปใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ขั้นละเอียดต่อไป

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบการทดลองแบบ Factorial Design

รายละเอียด	Full Factorial Design	Fractional Factorial Design
การทดลอง 4 ปัจจัย	$2^4 = 16$ การทดลอง	$2^{4-1} = 8$ การทดลอง
การทดลองซ้ำ 3 ครั้ง	$16 \times 3 = 48$ การทดลอง	$8 \times 3 = 24$ การทดลอง
3 แผ่นบอร์ดต่อหัว	$48 \times 3 \times 6 = 864$ แผ่น (Panel)	$24 \times 3 \times 6 = 432$ แผ่น (Panel)
6 หัวเจาะต่อเครื่อง		

จากตารางที่ 3.3 ถ้าทำการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design ก็จะสิ้นเปลืองทรัพยากร วัสดุดิบ งบประมาณและเวลาในการทำการทดลองมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial Design เมื่อมีปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ซึ่งจะได้รูปแบบการทดลองเป็นแบบ 2^{4-1} Factorial Design เป็นการออกแบบมิติ IV

(Resolution IV Design) รูปแบบของ (2^{4-1}) จะได้ Design Generators คือ $F = \pm ABCD$ ทำให้จำนวนครั้งในการทดลอง (Runs) เท่ากับ 8 การทดลอง และเมื่อมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (Replicates) จาก 3 Part Number กำหนด Number of Blocks = 1 เลือกการออกแบบ Randomize Runs เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่น จะมีจำนวนครั้งที่ต้องทำการทดลองทั้งหมด 24 การทดลอง

จำนวนการทดลอง (Cycle) ที่ผู้วิจัยกำหนด ในแต่ละการทดลองจะใช้แผ่นบอร์ด 3 แผ่นต่อหัว (3 Panel/Stack) จำนวน 6 หัวเจาะ รวมใช้แผ่นบอร์ด $6 \times 3 = 18$ Panel/Cycle เมื่อทำการทดลองทั้งหมด 24 Cycle จะใช้แผ่นบอร์ดในการวิจัยทั้งหมด $18 \times 24 = 432$ Panel จะเห็นได้ว่าการออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial Design จะช่วยให้เราประหยัดเวลาและแผ่นบอร์ดทดลองได้ครึ่งหนึ่ง จากเงื่อนไขดังกล่าว หากเราทำการทดลองแบบ Full Factorial Design จะต้องมีจำนวนครั้งของการทดลองถึง 48 Cycle และต้องใช้แผ่นบอร์ดทองแดงในการทดลองเป็นจำนวนถึง 864 Panel ในการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จาก 3 Part Number ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายจำนวนมาก

เมื่อใช้ Minitab 15 ออกแบบการทดลองแบบ 2^{4-1} Factorial Design จะเกิดคู่แฝดแฝง (Alias) ของแต่ละปัจจัย เพราะการออกแบบที่ไม่เต็มรูปแบบ ที่จะต้องพิจารณาควบคู่กัน ดังตารางที่ 3.4 ซึ่งผลของการออกแบบขั้นต้นบอกได้ว่า แต่ละปัจจัยหลักจะแฝงอยู่กับ 3 ปัจจัยร่วมทุกๆ ปัจจัย แต่ละ 2 ปัจจัยร่วม จะแฝงอยู่กับอีก 2 ปัจจัย

ตารางที่ 3.4 การออกแบบการทดลอง 2^{4-1} และความสัมพันธ์แฝดแฝง โดยใช้ Minitab 15

Fractional Factorial Design

Factors: 4	Base Design: 4, 8	Resolution: IV
Runs: 24	Replicates: 3	Fraction: 1/2
Blocks: 1	Center pts (total): 0	
Design Generators: D = ABC		

Alias Structure

I + ABCD
 A + BCD
 B + ACD
 C + ABD
 D + ABC
 AB + CD
 AC + BD
 AD + BC

3.5.6 รูปแบบการออกแบบการทดลอง

สำหรับการจัดลำดับการทดลอง การดำเนินการวิจัยนี้มิได้จัดลำดับการทดลองแบบสุ่ม (Randomize) เนื่องจากในการปรับระดับจากบางปัจจัยต้องใช้เวลานาน เพื่อให้เป็นการประหยัดเวลาในการทดลอง จึงกำหนดให้ทำการทดลองที่ระดับเดียวกันให้เสร็จก่อน คือ การกำหนดให้เจาะงานให้ครบรอบการทดลองในระดับเดียวกันให้เสร็จก่อนจึงเปลี่ยนดอกเจาะไปอีกระดับหนึ่ง และใช้โปรแกรมเจาะในระดับเดียวกันก่อนจึงจะเปลี่ยนชุดโปรแกรม ในการทดลอง

จากตารางที่ 3.5 แสดงแบบการทดลอง ซึ่งเป็นการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ผลการทดลองหรือค่าตอบสนองจะถูกบันทึกในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ของสล็อตที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ (Yield) โดยยิ่งเปอร์เซ็นต์ผลที่ได้รับสูงขึ้น หมายถึง สัดส่วนของเสียลดลง ยกตัวอย่าง เช่น Yield 98% หมายถึง มีจำนวนสล็อตเบี้ยว 2 สล็อต จากการเจาะ 100 สล็อต เป็นต้น

ตารางที่ 3.5 การออกแบบการทดลอง (2^{4-1}_{IV}) ที่มีตัวกำหนดความสัมพันธ์ I = ABCD

Run	Treatment Combination	Treatment				Diameter Slot Drill (mm.)		
		A	B	C	D	0.8	1.4	1.55
1	(1)	-1	-1	-1	-1			
2	ad	1	-1	-1	1			
3	bd	-1	1	-1	1			
4	ab	1	1	-1	-1			
5	cd	-1	-1	1	1			
6	ac	1	-1	1	-1			
7	bc	-1	1	1	-1			
8	abcd	1	1	1	1			

ทำการทดลองตามตารางข้างต้น โดยเจาะแผ่นบอร์ดตัวอย่างตามระดับปัจจัยที่วางไว้ โดยผู้วิจัยจะทำการกำหนดแผ่นบอร์ดที่ใช้ในการทดลอง มีความหนาบอร์ดปกติ 1.6 มิลลิเมตร และความหนาทองแดง 1.0 ออนซ์ (Oz.) ตามคู่มือการผลิตของผลิตภัณฑ์ (Manufacturing Instruction) ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น บันทึกผลการทดลอง (Result: Y_1, Y_2, Y_3) ลงในตารางที่ 3.5

กำหนดให้ Y_1 = การทดลองที่ 1-8 กับ Part Number 1 ที่เจาะสล็อตเส้นขนาดดอก 0.80 มิลลิเมตร

Y_2 = การทดลองที่ 9-16 กับ Part Number 2 ที่เจาะสล็อตเส้นขนาดดอก 1.40 มิลลิเมตร

Y_3 = การทดลองที่ 17-24 กับ Part Number 3 ที่เจาะสล็อตเส้นขนาดดอก 1.55 มิลลิเมตร

3.5.7 การดำเนินการทดลองและบันทึกข้อมูลลง Minitab

เมื่อทำการเจาะแผ่นบอร์ดตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้แล้วนำผลการทดลองทั้งหมด 24 การทดลอง ที่ได้จากตารางที่ 3.4 มาวิเคราะห์โดยบันทึกข้อมูลการทดลองลงใน Minitab 15 แล้วออกแบบการทดลองโดยใช้ Function: Stat>DOE>Factorial>Create Factorial Design จะได้แผนการทดลองแบบสุ่ม (Randomize) จึงต้องจัดลำดับการทดลอง (Standard Order) เพื่อสะดวกในการทดลอง ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แผนผังการออกแบบการทดลอง (2^{4-1}_{IV}) โดยใช้ Minitab 15

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	Yield
1	6	1	1	-1	-1	-1	-1	
2	23	1	1	1	-1	-1	1	
3	10	1	1	-1	1	-1	1	
4	7	1	1	1	1	-1	-1	
5	17	1	1	-1	-1	1	1	
6	2	1	1	1	-1	1	-1	
7	1	1	1	-1	1	1	-1	
8	21	1	1	1	1	1	1	
9	3	1	1	-1	-1	-1	-1	
10	15	1	1	1	-1	-1	1	
11	4	1	1	-1	1	-1	1	
12	18	1	1	1	1	-1	-1	
13	14	1	1	-1	-1	1	1	
14	5	1	1	1	-1	1	-1	
15	19	1	1	-1	1	1	-1	
16	13	1	1	1	1	1	1	
17	16	1	1	-1	-1	-1	-1	
18	8	1	1	1	-1	-1	1	
19	22	1	1	-1	1	-1	1	
20	11	1	1	1	1	-1	-1	
21	12	1	1	-1	-1	1	1	
22	20	1	1	1	-1	1	-1	
23	9	1	1	-1	1	1	-1	
24	24	1	1	1	1	1	1	

3.5.8 การทดสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

เลือกการวิเคราะห์จาก Minitab Function: Stat>DOE>Factorial>Analysis Factorial Design อ่านผลการทดสอบความพอเพียงจากกราฟ (4 in 1 in Minitab) แปลงส่วนที่เหลือสำหรับผล (Residual Plots for Result) ทั้ง 4 ชนิดเพื่อทดสอบแบบพารามตริก ข้อมูลต้องมีลักษณะการแจกแจงแบบปกติ เพื่อความสมบูรณ์ของเงื่อนไขการทดสอบ เพื่อการทดสอบแบบ Parametric โดยข้อมูลต้องมีลักษณะการแจกแจงแบบปกติ ดัง 4 เงื่อนไข

ก. ความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) ของส่วนตกค้าง (Residual) ต้องเป็นกราฟเส้นตรง ข้อมูลอยู่ในแนวเส้น แสดงว่าค่า y มีการแจกแจงแบบปกติ

ข. ฮิสโตแกรม (Histogram) คือกราฟแสดงการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นแบบปกติจะมีลักษณะทรงระฆังคว่ำ หรือเป็นส่วนตกค้างต้องการกระจายแบบปกติหรือแบบสุ่ม

ค. ระดับเหมาะสมต่อด้านส่วนตกค้าง (Residual Plot Versus Fitted Value) กราฟที่ชี้บ่งถึงการกระจายของข้อมูลเป็นแบบสุ่ม (อยู่นเหนือและใต้เส้นกึ่งกลางพอๆ กัน) เพื่อตรวจสอบความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มต้องไม่แตกต่างกัน

ง. ลำดับต่อด้านส่วนตกค้าง (Residual Plot Versus the Order (time)) ค่าความคาดเคลื่อนของข้อมูลเป็นกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน ใช้เพื่อตรวจสอบความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มมีค่าคงที่

3.5.9 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

เมื่อทำการวิเคราะห์การทดลองแบบ Fractional Factorial Design โดยใช้ Minitab 15 นอกจากจะได้กราฟแสดงการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองแล้ว Minitab ยังแสดงส่วนสำคัญคือตารางที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบทางปฏิกริยา (Interaction) ของการออกแบบการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$

ก. วิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ จากค่า P-Value ที่ได้จากราย ANOVA ของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมเพื่อพิสูจน์ความแตกต่างกันของแต่ละปัจจัยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 หรือไม่ได้ ดังนี้

1) ถ้าค่า P-Value ของปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใด มีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าปัจจัยตัวนั้นมีอิทธิพลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB

2) ถ้าค่า P-Value ของปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใด มีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าปัจจัยตัวนั้นไม่มีอิทธิพลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB

ข. วิเคราะห์โครงสร้างแฝดแฝง (Alias Structure) การแยก Aliases พิจารณาจากกฎคือ

1) ถ้าปัจจัยหลัก (Main Effect) เป็น Aliases กับ 3-Way Interaction ขึ้นไปให้ถือว่า Effect นั้นเป็นของปัจจัยหลัก

2) ถ้าปัจจัยร่วม (Interaction) เป็น Aliases กับ Interaction ที่มี Order ไม่เท่ากัน ให้ถือว่า Effect นั้นเป็นของ Interaction ที่มี Order น้อยกว่า

3) ถ้าปัจจัยร่วม (Interaction) เป็น Aliases กับ Interaction ที่มี Order เท่ากัน ให้ปฏิบัติดังนี้

- ถ้ามีความรู้ก่อนหน้าจากการแยก Aliases ของ Main Effect เพียงพอ ก็สามารถแยกได้

- ถ้ามีความรู้ก่อนหน้าไม่เพียงพอ ก็ไม่สามารถแยก Aliases ได้ ต้องทำการทดลองเพิ่มอีก 1 เท่าของการทดลองเดิม

ค. วิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2_{adj}) สามารถวิเคราะห์ได้จากการ Runs ใน Minitab ที่แสดงให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ที่มีระดับเป็นเปอร์เซ็นต์ความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

3.5.10 ขั้นตอนสรุปผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ ANOVA ผู้วิจัยจะทราบว่าปัจจัยหลักทั้ง 4 และปัจจัยร่วมปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB แล้วเลือกระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าความพึงพอใจ (Desirability) เข้าใกล้ 1 มากที่สุด ซึ่งจะสามารถพยากรณ์ (Response Optimizer) ได้ค่า Y (Yield) ที่เหมาะสม จากกราฟทดสอบความเหมาะสมระดับปัจจัย

3.6 การอภิปรายและสรุปผล

3.6.1 ดำเนินการปรับปรุง โดยนำเสนอชี้แจงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองต่อผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรมและผู้เกี่ยวข้องถึงระดับปัจจัยที่ต้องควบคุม ในการกำหนด Tooling ที่ใช้ในการผลิต เพื่อขออนุมัติการดำเนินการปรับปรุงแก้ไขปัญหาการเจาะตามผลการทดลองในการผลิตงานตัวอย่างจริง

3.6.2 เก็บข้อมูลหลังการปรับปรุง ระหว่างดำเนินการปรับปรุงมีการเก็บข้อมูลเป็นระยะๆ เมื่อครบแผนการปรับปรุง 3 เดือนจึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบผลระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง

3.6.3 กำหนดเป็นมาตรฐานการทำงานหลังจากทำการแก้ไขและปรับปรุงแล้วลดลง จึงจะนำไปกำหนดเป็นระเบียบวิธีการปฏิบัติงาน (Work Instruction) เพื่อใช้เป็นแนวทางปฏิบัติในการกำหนดเขียน โปรแกรมเจาะ และกำหนดเอกสารควบคุมการผลิต

3.6.4 เสนอข้อเสนอแนะในการวิจัย เพื่อให้สามารถพัฒนางานวิจัยในระดับต่อไป



บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

จากปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพการเจาะสลอตสั้นของแผ่น PCB ที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น ได้สรุปมาจากแผนผังแสดงเหตุและผลจากภาพที่ 3.7 ในบทที่ 3 ซึ่งจะใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยใดที่มีอิทธิพล (Significant) ต่อการเจาะมากที่สุด และควรกำหนดค่าของแต่ละปัจจัยอย่างไร จึงจะมีความเหมาะสมมากที่สุด และข้อสรุปจากการทำการทดลองแบบ 2^{4-1} แฟกทอเรียล ได้อาศัยโปรแกรม Minitab โดยนำมากำหนดระดับความมีนัยสำคัญของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 3.2 คือ

ปัจจัย A คือความยาวเกลียวสว่านของดอกเจาะสลอตที่ใช้ในโรงงานตัวอย่างมีความยาว 2 ขนาดคือ 7.0 มิลลิเมตร และ 8.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นมาตรฐานจากผู้ผลิตดอกสำหรับเจาะแผ่น PCB

ปัจจัย B คือวิธีเรียงลำดับในการเจาะสลอตในแต่ละ Hit แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ เจาะแบบเรียงลำดับ (In-Line) และเจาะแบบสับหว่างกัน (End Point) ดังได้กล่าวในข้อ 2.1.5

ปัจจัย C คือการกำหนดระดับความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ (In-feed Rate) เป็น 2 ระดับ คือระดับต่ำ (Low) เจาะช้าอยู่ที่ 10 นิ้วต่อนาที และระดับสูง (High) เจาะเร็วอยู่ที่ประมาณ 44 นิ้วต่อนาที (เป็นความเร็วสูงสุดที่ใช้เฉพาะดอกเจาะสลอตตามคำแนะนำของผู้ผลิต)

ปัจจัย D คือการกำหนดความเร็วในการหมุนของหัวเจาะ ซึ่งจะทำได้ดอกเจาะหมุนตามไปด้วย แบ่งเป็น 2 ระดับ คือ หมุนด้วยความเร็วรอบต่ำที่ประมาณ 20,000 รอบต่อนาที และความเร็วรอบระดับสูงอยู่ที่ประมาณ 90,000 รอบต่อนาที

เมื่อเราได้ปัจจัยที่ต้องการแล้ว จึงทำการเขียน โปรแกรมเจาะสลอตสั้นตามแต่ละระดับปัจจัยที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 3.5 แล้วจัดเตรียมดอกเจาะสลอต แผ่นบอร์ด และเครื่องเจาะ CNC แล้วทำการทดลองที่ละโปรแกรมเจาะ หลังจากเจาะสลอตแล้วรูปร่างสลอตนั้นยอมรับ (Accept) หรือไม่ยอมรับ (Reject) จะใช้มาตรฐานการตรวจสอบจากฝ่ายตรวจสอบคุณภาพของโรงงานตัวอย่างตามที่ได้อธิบายมาในบทที่ 3 ค่าตอบสนองที่ใช้จึงมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์สัดส่วนจำนวนสลอตที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ

4.1.1 ผลการออกแบบการทดลอง (DOE)

จาก 4 ปัจจัยข้างต้น ประกอบด้วย 2 ระดับและทำการทดลองซ้ำ (Replicates) 3 ครั้ง จาก ใช้การทดลองแบบ 2^{k-1} โดยการทดลองกำหนดขนาดดอกเงาะ 3 ขนาดคือ 0.80 1.40 และ 1.55 มิลลิเมตร เนื่องจากต้องการความมั่นใจในการกำหนดระดับปัจจัยให้ถูกต้อง ได้ผลการทดลองจำนวน 24 ครั้ง บันทึกในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดลอง (2^{4-1}_{IV}) ที่มีตัวกำหนดความสับสน I = ABCD

Run	Treatment Combination	A	B	C	D	Yield (Replicate)		
						0.80	1.40	1.55
1	(1)	-1	-1	-1	-1	100	100	92
2	ad	1	-1	-1	1	83	100	100
3	bd	-1	1	-1	1	0	46	33
4	ab	1	1	-1	-1	0	25	17
5	cd	-1	-1	1	1	33	58	54
6	ac	1	-1	1	-1	0	0	0
7	bc	-1	1	1	-1	0	0	0
8	abcd	1	1	1	1	0	29	33

จากตารางที่ 4.1 เมื่อวิเคราะห์โดยกรอกข้อมูลการทดลองลงใน Minitab 15 ออกแบบการทดลองให้โดยใช้ Function: Stat>DOE>Factorial>Create Factorial Design จะได้แผนการทดลองแบบสุ่ม (Randomize) แต่เนื่องจากการทดลองนี้ไม่ได้ทดลองแบบสุ่มเพราะข้อจำกัดในการปรับค่า ดังนั้น จึงต้องจัดลำดับการทดลอง (Standard Order) เพื่อสะดวกในการทดลอง ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้น แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการออกแบบการทดลอง (2^{4-1}_{IV}) โดยใช้ Minitab 15

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	Yield
1	6	1	1	-1	-1	-1	-1	100
2	23	1	1	1	-1	-1	1	83
3	10	1	1	-1	1	-1	1	0
4	7	1	1	1	1	-1	-1	0
5	17	1	1	-1	-1	1	1	33
6	2	1	1	1	-1	1	-1	0
7	1	1	1	-1	1	1	-1	0
8	21	1	1	1	1	1	1	0
9	3	1	1	-1	-1	-1	-1	100
10	15	1	1	1	-1	-1	1	100
11	4	1	1	-1	1	-1	1	46
12	18	1	1	1	1	-1	-1	25
13	14	1	1	-1	-1	1	1	58
14	5	1	1	1	-1	1	-1	0
15	19	1	1	-1	1	1	-1	0
16	13	1	1	1	1	1	1	29
17	16	1	1	-1	-1	-1	-1	92
18	8	1	1	1	-1	-1	1	100
19	22	1	1	-1	1	-1	1	33
20	11	1	1	1	1	-1	-1	17
21	12	1	1	-1	-1	1	1	54
22	20	1	1	1	-1	1	-1	0
23	9	1	1	-1	1	1	-1	0
24	24	1	1	1	1	1	1	33

4.1.2 การทดสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้ทำการทดลอง ซึ่งมีสมมติฐานว่า รูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูล ที่ได้ทำการทดลอง ต้องเป็นไปตามหลักการ $\mathcal{E}_y \sim NID(0, \sigma^2)$ คือ ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และ σ^2 มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้

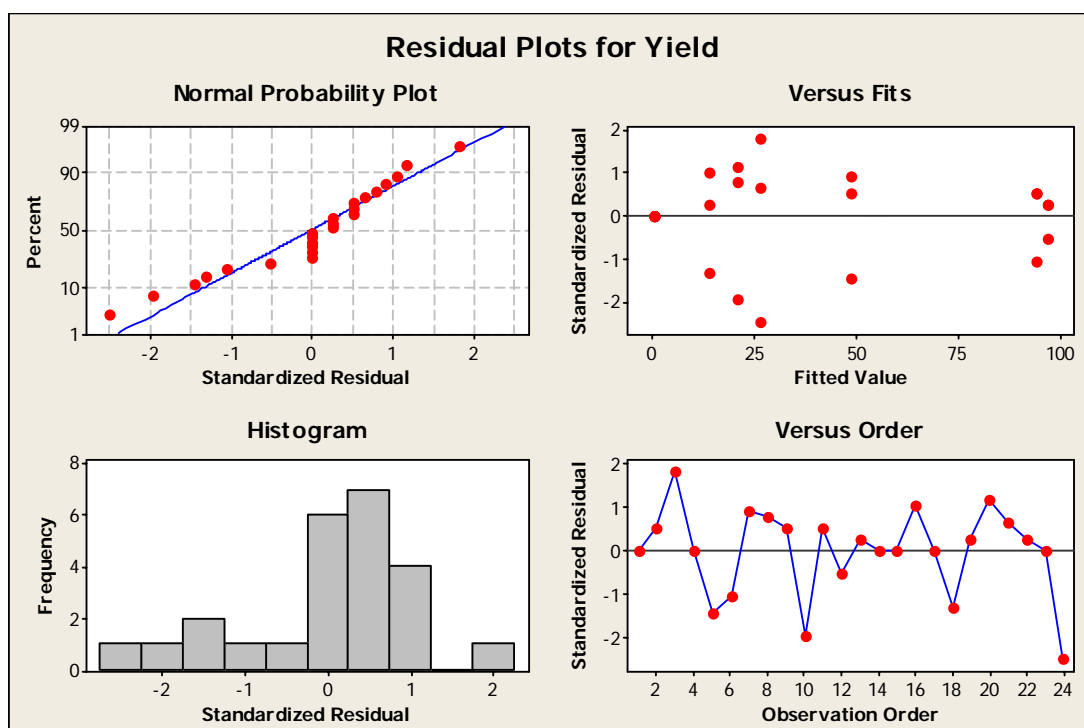
เลือกการวิเคราะห์จาก Minitab Function: Stat>DOE>Factorial>Analysis Factorial Design อ่านผลการทดสอบความพอเพียงจากกราฟ (4 in 1 Graphs from Minitab) แปลงส่วนที่เหลือ สำหรับผล (Residual Plots for Result) ทั้ง 4 ชนิดเพื่อการทดสอบแบบพารามตริก โดยข้อมูลทั้ง 4 เงื่อนไข จะใช้ตรวจสอบ \mathcal{E}_y และความเป็นไปได้ตามข้อสมมติฐานแสดงได้ดังต่อไปนี้

ก. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้างจากการพิจารณาจากการกระจายของค่าส่วนตกค้าง ซึ่งใช้การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plots) ในภาพที่ 4.1 พบว่าค่าส่วนตกค้าง มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ข้อมูลอยู่ในแนวเส้น ทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

ข. ฮิสโตแกรม (Histogram) หมายถึงกราฟแสดงการแจกแจงของข้อมูลเป็นแบบปกติหรือไม่ จากภาพที่ 4.1 จะมีลักษณะเป็นทรงระฆังคว่ำ หรือค่าส่วนตกค้าง กระจายตัวแบบปกติ ดังนั้นกราฟจากข้อ ก การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ และข้อ ข ฮิสโตแกรม สามารถสรุปได้เหมือนกันว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

ค. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายของค่าความคาดเคลื่อนของส่วนตกค้าง จากภาพที่ 4.1 เมื่อพิจารณาความเสถียรของ σ^2 (Variance Stability) โดยพิจารณาแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้าง เทียบกับ Fitted Value พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่ สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent) มีการกระจายแบบสุ่มทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบสม่ำเสมอพอๆกัน แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน ดังนั้นระดับเหมาะสมต่อด้านส่วนตกค้าง (Residual Plot Versus Fitted Value) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลอง มีความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มต้องไม่แตกต่างกัน เป็นไปตามหลักการ $\mathcal{E}_y \sim NID(0, \sigma^2)$ ทุกประการอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของ Residuals เข้าข่ายลักษณะแบบกรวยปลายเปิด หรือรูปแบบลำโพง (Outward Opening Funnel or Megaphone) แต่อย่างใด

ง. ลำดับต่อต้านส่วนตกค้าง (Residual Plot Versus the Order) ค่าความคาดเคลื่อนของข้อมูลเป็นกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน คุณลักษณะการกระจายของจุดในด้านบวกและด้านลบที่มีความสมดุลกัน ใช้ร่วมกับกราฟในข้อ ค เพื่อตรวจสอบความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มมีค่าคงที่ การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง จึงประมาณได้ว่ามีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 0 แทนข้อมูลบนแผนภูมิเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่จากภาพที่ 4.1 กราฟ Versus Order มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ



ภาพที่ 4.1 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (4 in 1 Graphs from Minitab)

4.1.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

เมื่อทำการวิเคราะห์การทดลองแบบ Fractional Factorial Design (2_{IV}^{4-1}) โดยใช้ Minitab 15 นอกจากจะได้กราฟแสดงการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองแล้ว Minitab ยังแสดงส่วนสำคัญคือ ตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมทางปฏิกริยา (Interaction) ของการออกแบบการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ Estimated Effects and Coefficients for Yield

Term	Effect	Coefficients	SE Coef.	T	P
Constant		37.67	2.650	14.22	0.000
A	-10.76	-5.38	2.650	-2.03	0.059
B	-44.79	-22.40	2.650	-8.45	0.000
C	-40.63	-20.31	2.650	-7.67	0.000
D	19.79	9.89	2.650	3.73	0.002
A*B	14.93	7.47	2.650	2.82	0.012
A*C	-3.12	-1.56	2.650	-0.59	0.564
A*D	30.90	15.45	2.650	5.83	0.000

S = 12.9824

PRESS = 6067.54

R-Sq = 92.25%

R-Sq. (pred.) = 82.57%

R-Sq. (adj.) = 88.86%

ตารางที่ 4.4 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Source	DF	Seq. SS	Adj. MS	Adj. MS	F	P
Main Effects	4	24,985.1	24,985.1	6246.3	37.06	0.000
2-Way Interactions	3	7,126.4	7,126.4	2375.5	14.09	0.000
Residual Error	16	2696.7	2696.7	168.5		
Pure Error	16	2696.7	2696.7	168.5		
Total	23	34808.2				

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ จากตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ค่า P-Value ที่ได้จาก ตาราง ANOVA ของผลกระทบหลัก (Main Effect) และปัจจัยร่วม (Interaction) จะนำมาใช้เพื่อพิสูจน์ ความแตกต่างกันของแต่ละปัจจัยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 หรือไม่ (Significant) ได้ดังนี้

- ถ้าค่า P-Value ของปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใด มีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่า ปัจจัยตัวนั้นมีอิทธิพลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB
- ถ้าค่า P-Value ของปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมใด มีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่า ปัจจัยตัวนั้นไม่มีอิทธิพลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB

สามารถอ่านผลการทดลองจากตารางที่ 4.3 ตามสมมติฐานการวิจัยที่ตั้งไว้ได้ดังนี้

1) ปัจจัย A มีค่า P-Value = 0.059 มีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ จึงยอมรับสมมติฐานว่าง H_{0A} และปฏิเสธสมมติฐาน H_{1A} นั่นคือ ความยาวเกลียวสว่านไม่มีผลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของ แผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha = 0.05$

2) ปัจจัย B มีค่า P-Value = 0.000 มีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง H_{0B} และยอมรับสมมติฐาน H_{1B} นั่นคือ วิธีการเจาะมีผลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB อย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha = 0.05$

3) ปัจจัย C มีค่า P-Value = 0.000 มีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง H_{0C} และยอมรับสมมติฐาน H_{1C} นั่นคือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะมีผลต่อคุณภาพการเจาะ สล๊อตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha = 0.05$

4) ปัจจัย D มีค่า P-Value = 0.002 มีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง H_{0D} และยอมรับสมมติฐาน H_{1D} นั่นคือ ความเร็วในการหมุนของหัวเจาะมีผลต่อคุณภาพการเจาะ สล๊อตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha = 0.05$

5) ปัจจัยร่วม AB มีค่า P-Value = 0.012 มีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงปฏิเสธ สมมติฐานว่าง H_{0AB} และยอมรับสมมติฐาน H_{1AB} นั่นคือ ปัจจัยร่วมความยาวเกลียวสว่านและวิธีการ เจาะมีผลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha = 0.05$

6) ปัจจัยร่วม AC มีค่า P-Value = 0.564 มีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ จึงยอมรับ สมมติฐานว่าง H_{0AC} และปฏิเสธ H_{1AC} นั่นคือ ปัจจัยร่วมความยาวเกลียวสว่านและความเร็วการ เคลื่อนที่หัวเจาะไม่มีผลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$

7) ปัจจัยร่วม AD มีค่า P-Value = 0.000 มีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงปฏิเสธ สมมติฐานว่าง H_{0AD} และยอมรับสมมติฐาน H_{1AD} นั่นคือ ปัจจัยร่วมความยาวเกลียวสว่านและความเร็ว การหมุนหัวเจาะมีผลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$

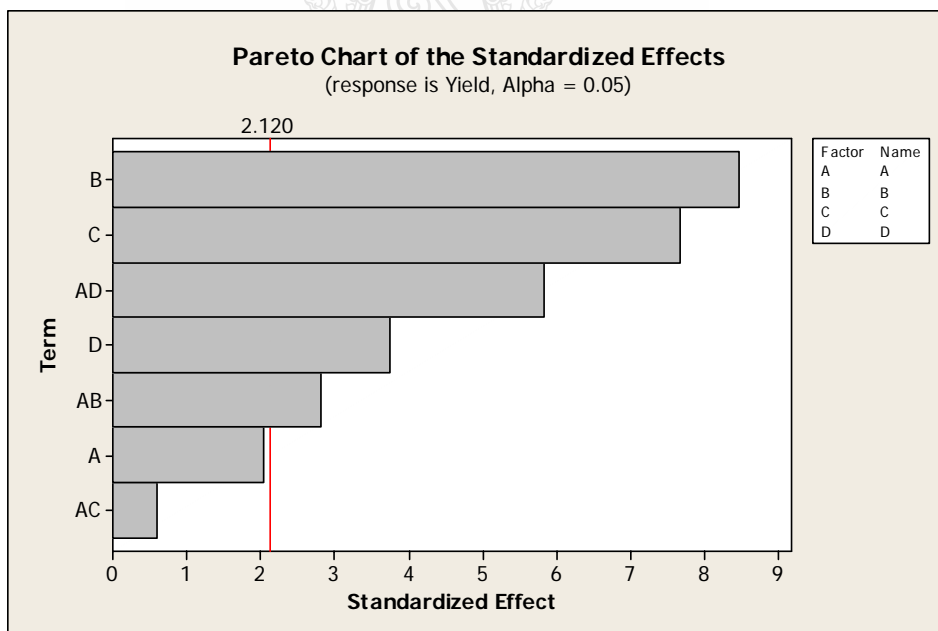
สามารถอ่านผลการทดลองจากตารางที่ 4.4 ได้ดังนี้

1) ผลกระทบหลัก (Main Effect) มีค่า P-Value = 0.000 มีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง H_0 และยอมรับสมมติฐาน H_1 นั่นคือ ปัจจัยหลักมีผลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha = 0.05$

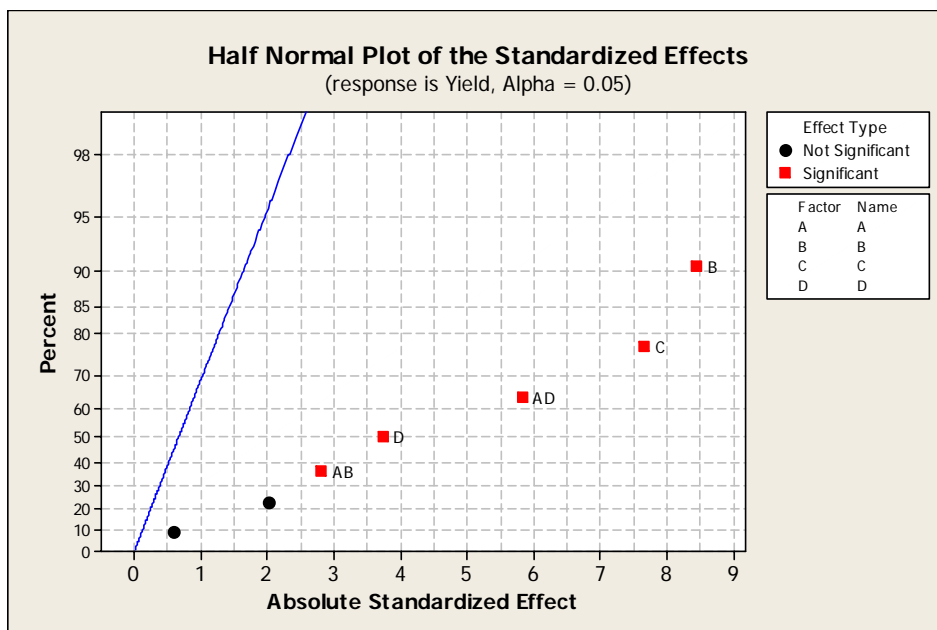
2) ปัจจัยร่วมระดับ 2 (2 Way Interaction) มีค่า P-Value = 0.000 มีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง H_0 และยอมรับสมมติฐาน H_1 นั่นคือ ปัจจัยร่วมมีผลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha = 0.05$

เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมทางปฏิกริยา (Interaction) โดยใช้ Minitab นอกจากจะแสดงผลเป็นตารางการวิเคราะห์ข้างต้นแล้ว ยังสามารถแสดงผลเป็นแผนภูมิพาร์โต (Pareto Chart of the Standardized Effects) ดังภาพที่ 4.2 และกราฟ (Half Normal Plot of the Standardized Effects) ดังภาพที่ 4.3 ได้อีกด้วย

จากภาพที่ 4.2 แผนภูมิพาร์โต สามารถแสดงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 คือ ปัจจัยที่มีค่ามากกว่าเส้นกำหนดที่ 2.120 จะพบว่า มีปัจจัย B ปัจจัย C ปัจจัยร่วม AD ปัจจัย D และปัจจัยร่วม AB ตามลำดับ



ภาพที่ 4.2 แผนภูมิพาร์โตของปัจจัยตอบสนอง



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ผลกระทบของปัจจัยตอบสนอง

จากภาพที่ 4.3 กราฟ สามารถแสดงแสดงเปอร์เซ็นต์ของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ คือ ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ (■ Significant) จะพบว่าปัจจัย B ปัจจัย C ปัจจัยร่วม AD ปัจจัย D และปัจจัยร่วม AB ตามลำดับ

4.1.4 สมการถดถอย (Regression)

ค่าความมีนัยสำคัญของการถดถอยของสมการ (Regression) คือการทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยผลตอบสนอง (ในที่นี้คือ Yield) กับเซตย่อยของตัวแปรถดถอยหรือไม่ และจากการประมวลผลของโปรแกรม Minitab ในตารางที่ 4.3 สามารถนำเขียนสมการถดถอยขั้นต้นแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลกระทบของการเจาะสล๊อตแผ่น PCB ดังนี้

4.1.5 วิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

จากการประมวลผลของโปรแกรม Minitab ในตารางที่ 4.3 สามารถแสดงให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ที่มีเปอร์เซ็นต์ความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นตัววัดจำนวนที่ลดลงในความผันแปรของค่าตอบสนอง เมื่อใช้ตัวถดถอยในสมการ เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 แสดงให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งมีความสัมพันธ์กันที่ระดับ 92.25% การที่ค่า R^2 มีค่ามากไม่ได้แปลว่า

แบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมานี้ดี เนื่องจากว่าถ้ามีการเติมตัวแปรเข้าไปในสมการ จะทำให้ R^2 เพิ่มขึ้น ไม่ว่าตัวแปรนั้นจะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าสมการที่มีค่า R^2 มีค่ามาก อาจจะเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ดีในการพยากรณ์ค่าตอบสนองก็ได้

การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจที่ปรับแล้ว R_{adj}^2 ซึ่งสามารถบอกได้ว่าปัจจัยทั้ง 4 ที่นำมาทดลอง มีอิทธิพลต่อตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งมีความสัมพันธ์กันที่ระดับ 88.86 % ส่วนที่เหลืออีก 11.14% มีอิทธิพลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ในการเจาะ เช่น การแกว่งของหัว Spindle ขณะเจาะ การคายเศษของดอก และพนักงาน เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (R_{adj}^2) ตามปกติแล้ว มักจะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของตัวแปรเพิ่มขึ้นในแบบจำลอง แต่ถ้าเพิ่มตัวแปรที่ไม่จำเป็นลงไป ในสมการ ค่าของ R_{adj}^2 จะมีค่าลดลงเสมอ

4.1.6 วิเคราะห์โครงสร้างแฝดแฝง (Alias Structure)

เมื่อทำการทดลองแบบ Fractional Factorial Design (2^{4-1}) ซึ่งเป็นการทดลองไม่ครบ ก่อให้เกิดปรากฏการณ์หนึ่งเกิดขึ้นเสมอ เรียกว่า อันตรกิริยาของกลุ่มแฝดแฝง (Aliases) หรือคอนฟาวด์ (Confound) หมายถึง ปนกันหรือติดกันจนแยกกันไม่ออก ซึ่งจะมีผลให้ Effect ที่ได้มีค่าที่ปนกัน หรือเรียกว่ามี โครงสร้างกลุ่มแฝดแฝง ดังตารางที่ 4.5 และทำการแยก Aliases โดยพิจารณาจากกฎคือ

ก. ถ้าปัจจัยหลัก (Main Effect) เป็น Aliases กับ 3-Way Interaction ขึ้นไปให้ถือว่า Effect นั้นเป็นของปัจจัยหลัก

ข. ถ้าปัจจัยร่วม (Interaction) เป็น Aliases กับ Interaction ที่มี Order ไม่เท่ากัน ให้ถือว่า Effect นั้นเป็นของ Interaction ที่มี Order น้อยกว่า

ค. ถ้าปัจจัยร่วม (Interaction) เป็น Aliases กับ Interaction ที่มี Order เท่ากัน ให้ปฏิบัติ ดังนี้

1) ถ้ามีความรู้ก่อนหน้าจากการแยก Aliases ของ Main Effect เพียงพอ ก็สามารถแยกได้

2) ถ้ามีความรู้ก่อนหน้าไม่เพียงพอ ก็ไม่สามารถแยก Aliases ได้ ต้องทำการทดลองเพิ่มอีก 1 เท่าของการทดลองเดิม

จากตารางที่ 4.5 เมื่อทำการแยกการปนกันของโครงสร้างกลุ่มแฝดแฝงตามกฎแล้ว พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพการเจาะสล๊อตของแผ่น PCB คือปัจจัย B, C, D, CD, BD, BC มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังนั้นจากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่กล่าวมาจึงสามารถสรุปขั้นต้นได้ว่า ปัจจัย B, C, D, AB, AD, CD, BD, BC มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

$$Y = 37.67 - 22.40(B) - 20.31(C) + 9.89(D) + 7.47(A*B) + 15.45(A*D) \quad (4.1)$$

หรือ
$$Y = 37.67 - 22.40(\text{Method}) - 20.31(\text{In-feed}) + 9.89(\text{Speed})$$

$$+ 7.47(\text{Flute Length} * \text{Method}) + 15.45((\text{Flute Length} * \text{Speed}))$$

$$R^2 = \frac{SS_{\text{model}}}{SS_{\text{total}}} \times 100\% = 92.25\%$$

$$R^2_{\text{adj}} = 1 - \left[\frac{SS_{\text{error}} / df_{\text{error}}}{SS_{\text{total}} / df_{\text{error}}} \right] \times 100\% = 88.86\%$$

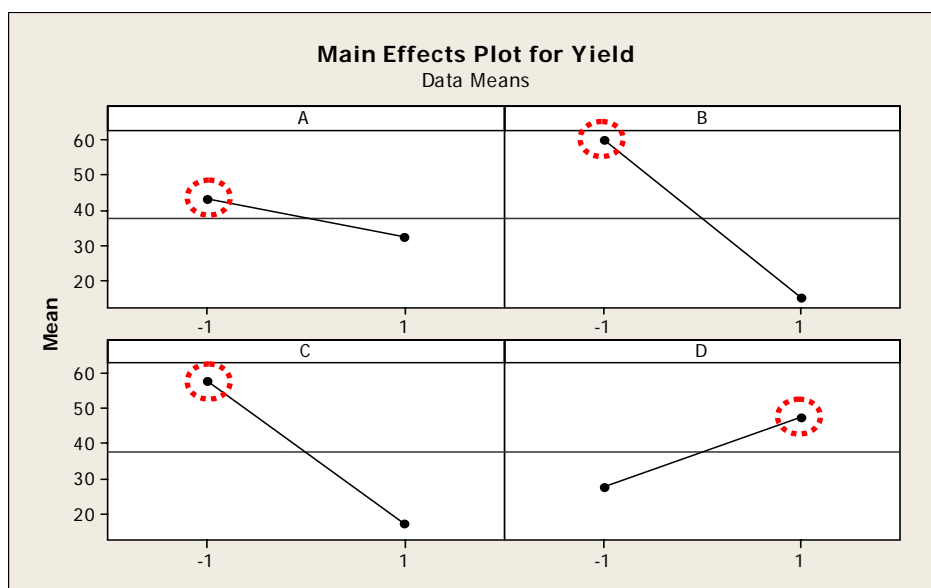
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างคู่แฝดแฝง (Alias Structure)

Alias Structure		ผลลัพธ์การแยก Alias
I	A*B*C*D	
A	B*C*D	A
B	A*C*D	B
C	A*B*D	C
D	A*B*C	D
A*B	C*D	C*D
A*C	B*D	B*D
A*D	B*C	B*C

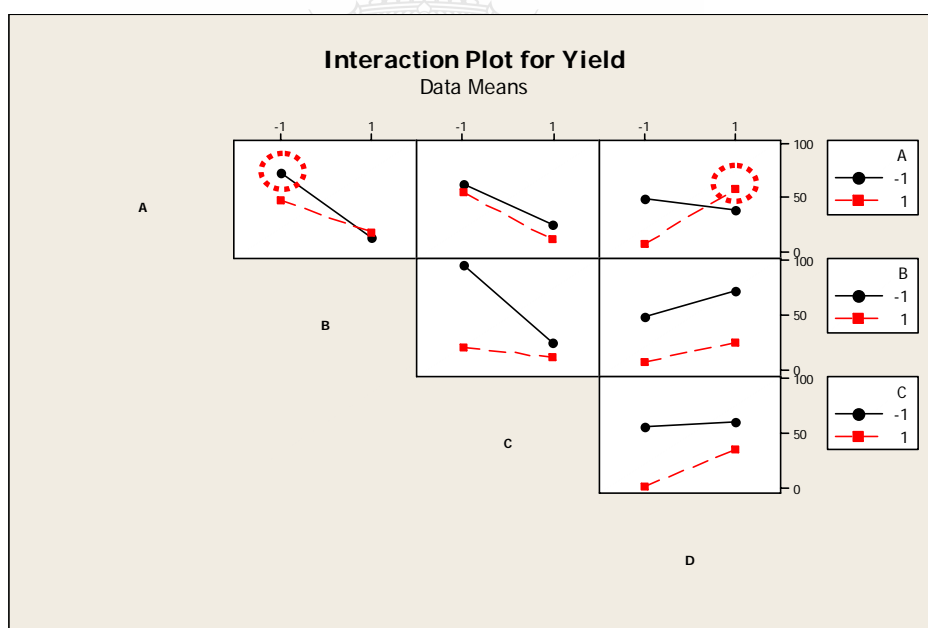
4.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

เมื่อได้ทราบปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพการเจาะสล็อตแผ่น PCB แล้วหากต้องการทราบระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในการกำหนดปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม สำหรับการเจาะสล็อตชิ้นของแผ่น PCB ที่ให้ผลตอบสนองและคุณภาพงานดีที่สุด ต้องมีการควบคุมปัจจัยดังภาพที่ 4.4 และภาพที่

4.5



ภาพที่ 4.4 การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยหลัก (Main Effects Plot)



ภาพที่ 4.5 การทดสอบความเหมาะสมของปัจจัยร่วม (Interaction Plot)

จากภาพที่ 4.4 จะพบว่าปัจจัยหลัก (Main Effects Plot) ที่มีอิทธิพลให้ค่าเฉลี่ย (Mean) ของผลตอบสนองและภาพที่ 4.5 จะเป็นอิทธิพลที่เกิดจากปัจจัยร่วม สามารถสรุปแต่ละปัจจัยได้ดังนี้

ก. ปัจจัย A ความยาวเกลียวสว่าน (Flute Length) จากการทดลองใช้ดอกสว่านสำหรับ เจาะสล็อตสั้นที่มีความยาวเกลียวสว่าน 7 และ 8.5 มิลลิเมตร เจาะแผ่นบอร์ดพบว่าดอกที่มีความยาว เกลียวสว่าน 7 มิลลิเมตร ให้เปอร์เซ็นต์ตอบสนองที่ดีกว่า

ข. ปัจจัย B การกำหนดวิธีการเจาะ (Method) จากผลการใช้การแบบจำลอง วิธีการเจาะที่ ให้เปอร์เซ็นต์คุณภาพการเจาะสล็อตดีที่สุด คือวิธีการเจาะแบบ In-line

ค. ปัจจัย C ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ (In-feed Rate) การเคลื่อนที่ของหัวเจาะ ที่ใช้ความเร็วต่ำประมาณ 10 นิ้วต่อนาที นั้นจะส่งผลให้คุณภาพของการเจาะสล็อตเบ็ญน้อยกว่าการที่ สั่งให้หัวเจาะเคลื่อนที่ปักดอกเจาะแต่ละ Hit ด้วยความเร็วระดับสูง

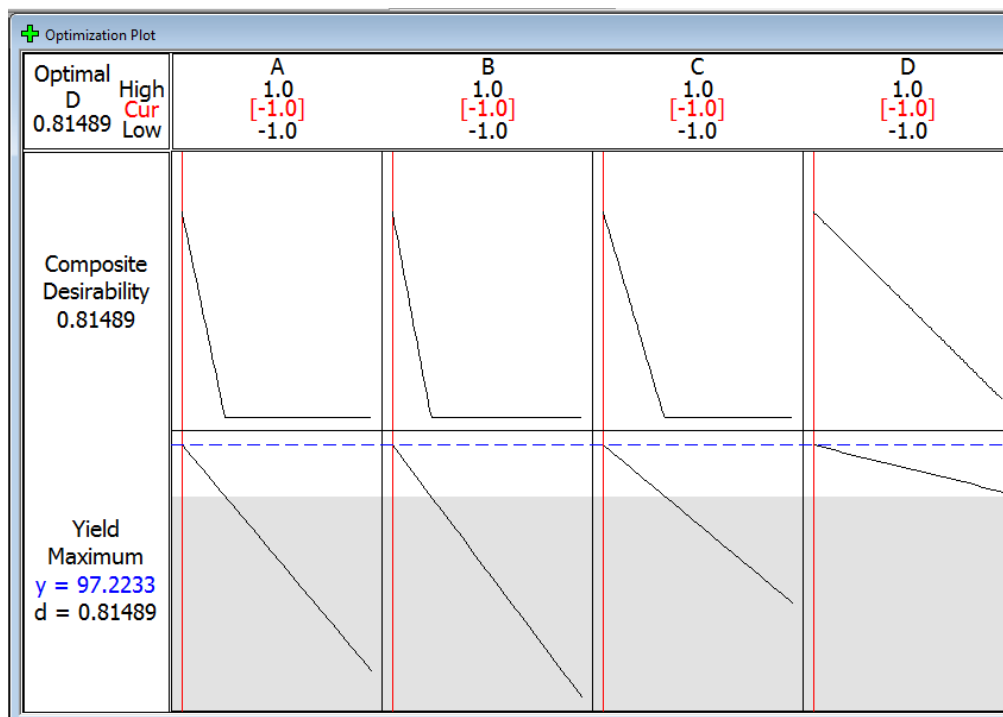
ง. ปัจจัย D ความเร็วการหมุนของดอกเจาะ (Spindle Speed) จากคำสั่งให้หัวเจาะหมุน ด้วยความเร็วรอบที่เร็วกว่าประมาณ 90,000 รอบต่อนาที จะให้คุณภาพการเจาะสล็อตสั้นที่ดีกว่าการ สั่งให้หัวเจาะหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำ

จ. ปัจจัยร่วม 2 ระดับ AB (ความยาวเกลียวสว่านและวิธีการเจาะ) จะเห็นว่าทั้งสองปัจจัย ที่ส่งผลให้คุณภาพการเจาะดีที่สุดอยู่ระดับต่ำ (Low) ทั้งคู่แสดงว่าความยาวเกลียวสว่าน 7 มิลลิเมตร และการเจาะแบบ In-line เหมาะสมที่สุด

ฉ. ปัจจัยร่วม 2 ระดับ AD (ความยาวเกลียวสว่านและความเร็วการหมุนของดอกเจาะ) สำหรับสองปัจจัยนี้ จากรูปที่ 4.5 พบว่าความยาวเกลียวสว่านอยู่ในระดับต่ำ (Low) ความเร็วการหมุน ของดอกเจาะอยู่ในระดับสูง (High) เมื่อต้องการให้คุณภาพการเจาะสล็อตที่ดีควรใช้ดอกเจาะสล็อตที่ มีความยาวเกลียวสว่าน 7 มิลลิเมตร และใช้ความเร็วรอบของหัวเจาะสูงคือ 90,000 รอบต่อนาที

ช. ปัจจัยร่วม 2 ระดับที่เกิดจากโครงสร้างคู่แฝดแฝง ปัจจัยร่วม CD (ความเร็วในการ เคลื่อนที่ของหัวเจาะและความเร็วการหมุนของดอกเจาะ) ปัจจัยร่วม BD (วิธีการเจาะและความเร็วการ หมุนของดอกเจาะ) และ BC (วิธีการเจาะและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ) จากภาพที่ 4.5 จะ เห็นว่า Interaction Plot เส้นกราฟของข้อมูลไม่ตัดกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปัจจัยร่วมที่เกิดจากคู่แฝด แฝงส่งผลกระทบต่อคุณภาพการเจาะสล็อตสั้นของแผ่น PCB ไม่ต่างจากผลสรุปข้างต้น

ในการวิเคราะห์ปัจจัยโดยใช้ Minitab ยังมีการใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ช่วยในการ กำหนดระดับของปัจจัย ถ้าต้องการผลตอบสนองที่ดีที่สุดใน การทดลองการเจาะสล็อตสั้น จากภาพที่ 4.6 พบว่า เมื่อต้องการค่า Yield มากที่สุด (Maximum) จะกำหนดค่าที่ต้องการต่ำที่สุด (Lower) ที่ 85 เปอร์เซ็นต์ และค่าเป้าหมาย (Target) ที่ 100 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.6 การกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Plot)

แต่เมื่อทำการวิเคราะห์จากฟังก์ชัน Response Optimizer ค่าผลตอบแทนที่ส่งผลให้คุณภาพการเจาะสล็อตสั้นมากที่สุด เกิดของเสียน้อยที่สุดคือได้แผ่น PCB ที่ผ่านคุณภาพมากที่สุดที่ 97.22 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต้องควบคุมปัจจัยหลักตามสภาพการทำงานจริงต้องเขียนโปรแกรมและใช้ดอกเจาะตามที่กำหนดในตารางที่ 4.6 โดยมีค่าความน่าปรารถนา (Desirability: D) มากที่สุด

ตารางที่ 4.6 การควบคุมระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ปัจจัยหลัก (Main Effect)	ระดับ (Level)	สัญลักษณ์	หน่วย (Unit)
A: Flute Length Slot Drill Bit	7.00	-1	mm
B: Slot Drilling Method	In-Line	-1	-
C: In-Feed Rate	10	-1	ipm
D: Spindle Speed	20	-1	krpm

4.3 การดำเนินการปรับปรุง

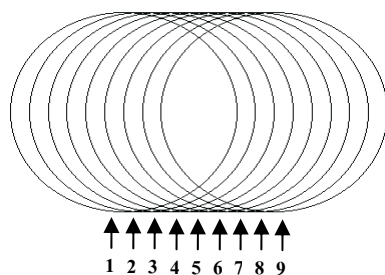
ผลการทดลองทำให้ทราบถึงระดับปัจจัยที่ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปคือการนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงแก่ผู้เกี่ยวข้อง และดำเนินการ ใช้วิธีการทำงานตามผลการทดลองที่ได้กับงานตัวอย่างที่จะทำการเจาะ เพื่อทำการเก็บข้อมูลหลังทำการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 3 เดือน ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2554 ผู้วิจัยสามารถกำหนดวิธีการแก้ไขแบ่งออกแต่ละปัจจัย ดังนี้

ก. ปัจจัย A ความยาวเกลียวสว่าน (Flute Length) ดังแสดงในภาพที่ 4.7 ปรับปรุงโดยการสั่งดอกเจาะสล็อตที่มีความยาวเกลียวสว่าน 7 และ 8.5 มิลลิเมตร ให้ครบทุกขนาดตั้งแต่ 0.55–2.15 มิลลิเมตร รวม 33 ขนาด กำหนดให้งานที่มีการเจาะสล็อตสั้นขึ้นงานได้รอบการเจาะละ 3 แผ่นต่อหัวเจาะและใช้ดอกเจาะสล็อตที่มีความยาวเกลียวสว่าน 7 มิลลิเมตรเท่านั้น สำหรับงานที่มีสล็อตยาวที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาสล็อตเบี้ยวให้ใช้ดอกเจาะสล็อตที่มีความยาวเกลียวสว่าน 8.5 มิลลิเมตร สามารถขึ้นเจาะตามคู่มือการผลิตปกติ

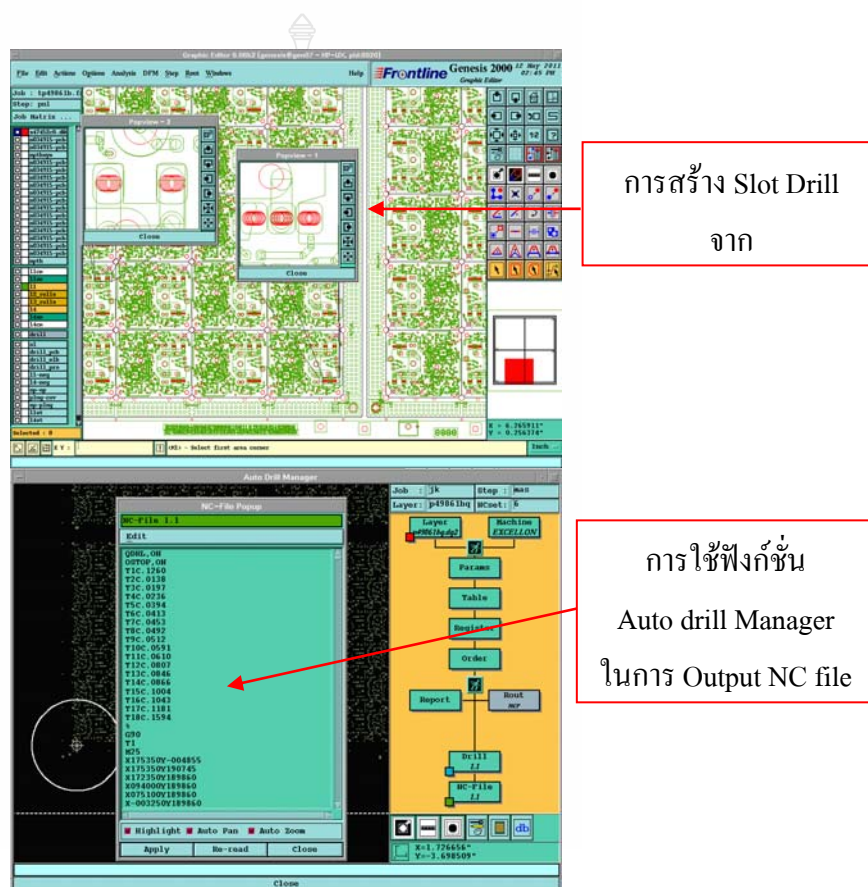


ภาพที่ 4.7 ระยะความยาวเกลียวสว่านของดอกสว่าน

ข. ปัจจัย B การกำหนดวิธีการเจาะ (Method) ทำการปรับปรุงคือกำหนดวิธีการเขียนโปรแกรมเจาะสำหรับงานที่มีสล็อตสั้นกว่า 2 เท่าของขนาดดอก (Less than 2 Time of Diameter Drill Bit) ให้เขียนโปรแกรมเจาะแบบ In-line ดังภาพที่ 4.8 โดยกำหนดตำแหน่งการเจาะแต่ละ Hit ในซอฟต์แวร์ CAD/CAM ก่อนที่จะใช้ฟังก์ชัน Auto drill Manager เพื่อทำการ Output เป็น NC file ดังแสดงในภาพที่ 4.9 และสำหรับงานที่มีสล็อตยาวกำหนดให้ใช้วิธีการเจาะแบบ End Point ปกติ



ภาพที่ 4.8 วิธีการกำหนดลำดับการเจาะสล็อตแบบ In-line



ภาพที่ 4.9 การใช้ซอฟต์แวร์ CAD/CAM ในการกำหนดลำดับการเจาะสล็อต

ค. ปัจจัย C ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ (In-feed Rate) กำหนดให้มีการควบคุมความเร็วในการเจาะสล็อตของแผ่น PCB อยู่ในระดับต่ำที่ 10 นิ้วต่อนาทีทุกขนาดดอกเจาะ โดยให้พนักงานเขียนโปรแกรมกำหนดไว้ในส่วน Header ของโปรแกรม

ง. ปัจจัย D ความเร็วการหมุนของดอกเจาะ (Spindle Speed) กำหนดความเร็วการหมุนของหัวเจาะ (Speed) ให้ดอกเจาะสลัดหมุนที่ความเร็วต่ำประมาณ 20,000 รอบต่อนาที โดยกำหนดในส่วนหัว ของโปรแกรม (Header Program) คู่กับความถี่ในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ

อนึ่งข้อกำหนดของดอกเจาะสลัด ตามมาตรฐานของผู้ผลิต ไม่สามารถนำมาลับคมดอกซ้ำ (Reshape) เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดระยะในการใช้งานของแต่ละดอก คือ จำนวนในการเจาะ (Maximum Hit) โดยทั่วไปที่ผู้ผลิตดอกกำหนดไว้ ก็สามารถใช้ได้ 6,000 Hit ฉะนั้นในการเขียนโปรแกรมเจาะสำหรับดอกเจาะนั้นๆ จะกำหนด In-feed Rate Spindle Speed และ Maximum Hit ไว้คู่กันเสมอ เช่น T01C.0394F10.S20.H6000 หมายถึง Tool 01, Diameter 0.0394 inch, In-feed Rate 10 ipm, Spindle Speed 20 krpm และ Maximum Hit 6000 Hit เป็นต้น

4.4 ผลการนำแนวทางการวิจัยไปการแก้ไขปรับปรุงการผลิต

4.4.1 ผลการเก็บข้อมูลหลังการปรับปรุง

จากการควบคุมปัจจัยในการเจาะสลัดต้นของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 4 ตัวแปรตามผลที่ได้จากการทดลองนั้น เมื่อทำการเก็บข้อมูลการผลิตงานตัวอย่างหลังการปรับปรุง ช่วงเดือน มีนาคม – พฤษภาคม พ.ศ. 2554 ดังตารางที่ 4.7 พบว่าจากงานตัวอย่างที่ผลิตได้ในระยะเวลา 3 เดือน มีจำนวน 278 งานแบ่งได้ดังนี้

- ก. ผลิตภัณฑ์ใหม่ (New project) 142 งาน
- ข. ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับคำสั่งซื้อปริมาณมาก (Sample to mass project) 72 งาน
- ค. ผลิตภัณฑ์ที่ลูกค้าขอเปลี่ยนแปลงแบบ (Customer change project) 11 งาน
- ง. ผลิตภัณฑ์ที่ขอเปลี่ยนแปลงภายใน (Internal change project) 54 งาน

ตารางที่ 4.7 ประเภทผลิตภัณฑ์ที่เขียนโปรแกรมเจาะในเดือน มี.ค.-พ.ค. พ.ศ. 2554

ประเภทโปรแกรมเจาะ	จำนวนงาน
1) ผลิตภัณฑ์ใหม่	142
2) ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับคำสั่งซื้อปริมาณมาก	72
3) ผลิตภัณฑ์ที่ลูกค้าขอเปลี่ยนแปลงแบบ	11
4) ผลิตภัณฑ์ที่ขอเปลี่ยนแปลงภายใน	54
รวม	278

จากจำนวนงานตัวอย่างสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่ 142 งาน ในช่วงเวลาหลังการปรับปรุงนั้น ใช้แผ่นบอร์ดในการผลิตคิดเป็น 20,663.38 ตารางฟุต ซึ่งในการผลิตชิ้นงานตัวอย่างพบปัญหาที่เกิดจากโปรแกรมเจาะดังรายละเอียดในตารางที่ 4.8 และนำมาสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นหลังการปรับปรุงปัจจัยในการเจาะตามที่ได้สรุปในข้อ 4.3 ดังแสดงในตารางที่ 4.9

จากข้อมูลข้างต้นพบปัญหาด้านประสิทธิภาพจะส่งผลต่อกำลังการผลิต 5 งาน และปัญหาด้านคุณภาพที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ 3 งาน รวมของเสียที่เกิดจากปัญหาโปรแกรมเจาะ 118.87 ตารางฟุต ถ้าผลิตเป็นแผ่น PCB คิดเป็นมูลค่า 19,194.53 บาท (ที่มา: อัตราราคาขายเฉลี่ย 5.3825 USD/Sq.ft. อัตราแลกเปลี่ยน 30 บาท/USD) จากข้อมูลดังกล่าวไม่พบปัญหาการเจาะสล็อตแล้วรูปร่างเบี้ยวผิดไปจากข้อกำหนดดลูกค้า (Slot out of shape)

ตารางที่ 4.8 รายละเอียดปัญหาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พบหลังการปรับปรุงในเดือน มี.ค.-พ.ค. พ.ศ. 2554

เดือน	จำนวนงาน ที่มีปัญหา	Part	ด้านคุณภาพ			ด้านประสิทธิภาพ			จำนวนของเสีย (ตารางฟุต)
			A	B	C	D	E	F	
มีนาคม	3	S24xxxC0			1				42.04
		B24xxxB0					1		0
		P48xxxB1				1			0
เมษายน	4	P29xxxA0					1		0
		S61xxxB0						1	0
		P63xxxB0			1				33.08
		B47xxxB0				1			43.75
พฤษภาคม	1	P49xxxD0				1		0	
			0	1	2	2	2	1	118.87

หมายเหตุ: ปัญหา A หมายถึง ปัญหาการเจาะสล็อตแล้วรูปร่างเบี้ยวผิดไปจากข้อกำหนดดลูกค้า

ปัญหา B หมายถึง ปัญหาการกำหนดคำสั่งโปรแกรมผิดพลาด

ปัญหา C หมายถึง ปัญหาการกำหนดตำแหน่งการเจาะผิดไปจาก Drawing

ปัญหา D หมายถึง ปัญหาการกำหนดพารามิเตอร์ในโปรแกรมไม่เหมาะสม

ปัญหา E หมายถึง ปัญหาการเจาะนานกว่า 5 ชั่วโมง

ปัญหา F หมายถึง ปัญหาอื่นๆ

ตารางที่ 4.9 งานตัวอย่างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พบปัญหาหลังการปรับปรุงในเดือน มี.ค.-พ.ค. พ.ศ. 2554

โปรแกรมเจาะ CNC	จำนวนงาน (งาน)	ปริมาณที่พบ (ตารางฟุต)
งานตัวอย่างผลิตภัณฑ์ใหม่	142	20,663.38
ปัญหาด้านคุณภาพ	3	118.87
ปัญหาด้านประสิทธิภาพ	5	N/A

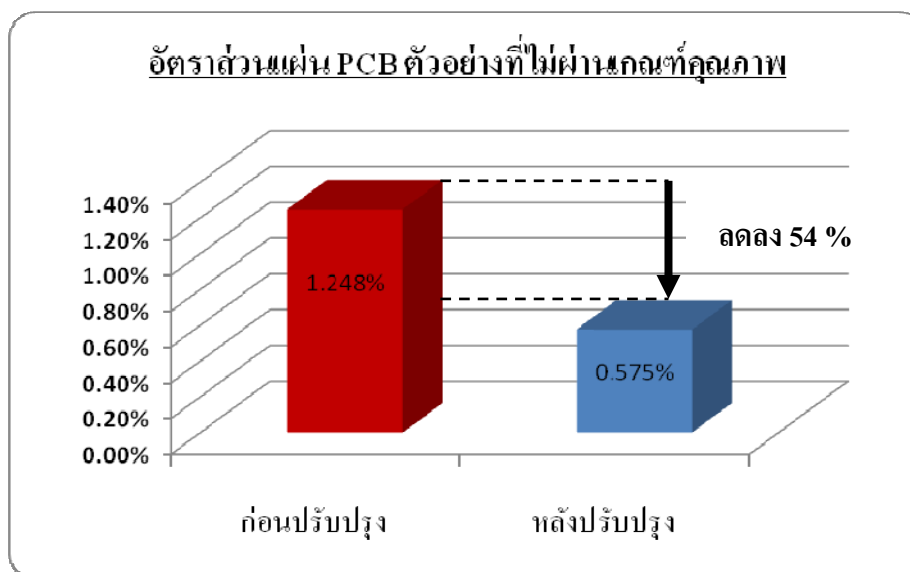
4.4.2 เปรียบเทียบผลการแก้ไข ก่อนและหลังการปรับปรุง

เมื่อทำการเปรียบเทียบสัดส่วนของปัญหาด้านคุณภาพการผลิตงานตัวอย่างจากปริมาณของเสีย (Scrap) ก่อนและหลังการปรับปรุงปัจจัยของโปรแกรมการเจาะแผ่น PCB ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบสัดส่วนของเสียในการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง

รายละเอียด	ก่อนการปรับปรุง		หลังการปรับปรุง	
	12 เดือน	เฉลี่ย/เดือน	3 เดือน	เฉลี่ย/เดือน
(1) จำนวนงานตัวอย่าง (งาน)	669	55.75	142	47.33
(2) ปริมาณงานตัวอย่างที่ผลิต (ตร.ฟุต)	78,303.08	6,525	20,663.38	6,888
(3) จำนวนงานที่พบปัญหาคุณภาพ (งาน)	12	1	3	1
(4) ปริมาณงานตัวอย่างที่เสีย (ตร.ฟุต)	977.52	81	118.87	40
(5) มูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่มีปัญหา (บาท)	157,845.00	13,153.75	19,194.53	6,398.17
(6) อัตราส่วนของเสีย (4)/(2)	1.248%	1.248%	0.575%	0.575%

จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนแผ่น PCB ที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพของการเจาะดังแสดงในตารางที่ 4.10 เมื่อนำมาคิดเป็นปริมาณปัญหาคุณภาพจากโปรแกรมเจาะต่อเดือนก่อนการปรับปรุงจะได้อยู่ที่ประมาณ 81 ตารางฟุต/เดือน และทำการปรับปรุงแล้วปริมาณลดลงเป็น 40 ตารางฟุต/เดือน หรือก่อนปรับปรุง 1.248 เปอร์เซ็นต์ ลดเหลือ 0.575 เปอร์เซ็นต์ ค่าใช้จ่ายคุณภาพทางตรงเนื่องจากความล้มเหลวภายใน ลดลงคิดเป็น 54 เปอร์เซ็นต์ จาก 13,153.75 บาทต่อเดือน เหลือ 6,398.17 บาทต่อเดือน ดังแสดงเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 กราฟแท่งเปรียบเทียบอัตราส่วนแผ่น PCB ตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพก่อนและหลังปรับปรุงวิธีการทำงาน

4.5 การทดสอบสมมติฐานการวิจัย

ขั้นตอนต่อไปคือการยืนยันผลจากการทดสอบสมมติฐาน โดยการใช้ P-test ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ เนื่องจากว่าการกำหนดสมมติฐานจาก 2 กลุ่มประชากรแบบทางเดียว สามารถกำหนดได้ 2 กรณีคือ

กรณี ก $H_0 : \hat{p}_1 = \hat{p}_2$

$H_1 : \hat{p}_1 > \hat{p}_2$

กรณี ข $H_0 : \hat{p}_1 = \hat{p}_2$

$H_1 : \hat{p}_1 < \hat{p}_2$

จากสมมติฐานในการวิจัยคือ “การกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพการเจาะลดลงอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์” กล่าวคือ ปัญหาด้านคุณภาพก่อนการปรับปรุงลดลงได้ เมื่อทำการปรับปรุงวิธีการทำงาน โดยกำหนดระดับปัจจัยในการเจาะให้เหมาะสม สามารถกำหนดการทดสอบสมมติฐานเป็นแบบทางเดียวจากกรณี ก ได้ดังนี้

สมมติฐานทางสถิติคือ

$$H_0 : \hat{p}_1 = \hat{p}_2 \quad \text{หรือ} \quad H_0 : \hat{p}_1 - \hat{p}_2 = 0$$

$$H_1 : \hat{p}_1 > \hat{p}_2 \quad \quad \quad H_1 : \hat{p}_1 - \hat{p}_2 > 0$$

กำหนดให้ :

\hat{p}_1 = อัตราส่วนปริมาณแผ่น PCB ที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพในการเจาะก่อนการปรับปรุง

\hat{p}_2 = อัตราส่วนปริมาณแผ่น PCB ที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพในการเจาะหลังการปรับปรุง

n_1 = ปริมาณแผ่น PCB ตัวอย่างที่ผลิตต่อเดือนก่อนการปรับปรุง

n_2 = ปริมาณแผ่น PCB ตัวอย่างที่ผลิตต่อเดือนหลังการปรับปรุง

\hat{p} = อัตราส่วนรวมของทั้ง \hat{p}_1 และ \hat{p}_2

เมื่อ

$$\hat{p}_1 = \frac{x_1}{n_1} = \frac{81}{6,525} = 0.0124$$

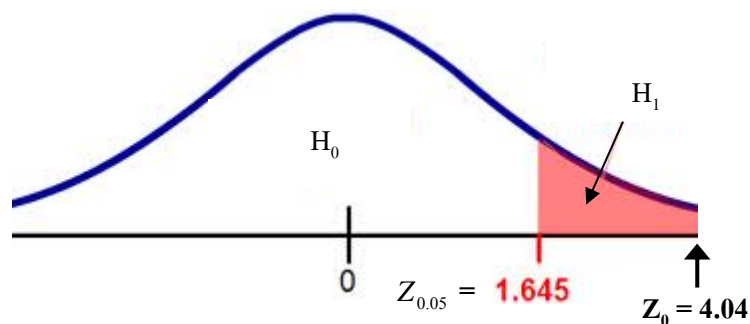
$$\hat{p}_2 = \frac{x_2}{n_2} = \frac{40}{6,888} = 0.0058$$

$$\hat{p} = \frac{x_1 + x_2}{n_1 + n_2} = \frac{81 + 40}{6,525 + 6,888} = 0.0090$$

ใช้สถิติ Z ในการทดสอบสมมติฐาน

$$\begin{aligned} Z_0 &= \frac{(\hat{p}_1 - \hat{p}_2)}{\sqrt{\hat{p}(1-\hat{p})\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \\ &= \frac{(0.0124 - 0.0058)}{\sqrt{0.009(1-0.009)\left(\frac{1}{6,525} + \frac{1}{6,888}\right)}} \\ &= \frac{0.0066}{0.00163} = 4.04 \end{aligned}$$

จากการตารางการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ Z (Normal) ในภาคผนวก ง หน้า 133 ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ จะได้ค่า $Z_{0.05} = 1.645$ แสดงดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่า Z_0 ที่ได้จากการคำนวณ และค่า $Z_{0.05}$ จากตาราง

จากภาพที่ 4.10 ค่า Z_0 ที่ได้เท่ากับ 4.04 ตกอยู่ในบริเวณวิกฤต (Critical Area) ดังนั้นจึงไม่สามารถยอมรับสมมติฐานว่าง H_0 และยอมรับสมมติฐานทางเลือก H_1 นั่นหมายความว่า ปริมาณปัญหาด้านคุณภาพของแผ่น PCB ที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพเฉลี่ยต่อเดือนก่อนการปรับปรุงลดลง เมื่อทำการปรับปรุงวิธีการทำงาน โดยกำหนดระดับปัจจัยในการเจาะที่เหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.6 การกำหนดระเบียบวิธีการปฏิบัติงาน

ผู้วิจัยได้นำวิธีการปฏิบัติแก้ไขและปรับปรุงที่ได้จากการวิเคราะห์ ทำการกำหนดเป็นแนวทางการปฏิบัติงาน โดยการจัดทำเป็นระเบียบการปฏิบัติงาน (Work Instruction) ของ การจัดทำโปรแกรมการเจาะและกัด (Drilling/Routing Program Preparation) เป็นแนวทาง (Guideline) สำหรับช่างเทคนิคปฏิบัติงานตามระเบียบที่วางไว้ เพื่อให้การกำหนดโปรแกรมเจาะงานตัวอย่างผ่านเกณฑ์คุณภาพของโรงงานตัวอย่างคือ

ก. ใบตรวจสอบการทำงาน (Checklist) กำหนดให้มีการตรวจสอบงานที่มีสล๊อตสั้นให้ทำการเจาะแบบ In-line และตรวจสอบค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ (In-feed Rate) และความเร็วการหมุนของดอกเจาะ (Spindle Speed) การก่อนส่งโปรแกรมเจาะ ดังแสดงในภาคผนวก ค หน้า 130

ข. ระเบียบการปฏิบัติงาน (Work Instruction) กำหนดวิธีการเจาะสล๊อตสั้นแบบ In-line ลงในระเบียบการปฏิบัติงาน การกำหนดค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะที่ 10 นิ้วต่อนาที และความเร็วการหมุนของดอกเจาะ 20,000 รอบต่อนาที ดังแสดงในภาคผนวก ค หน้า 131

ค. เอกสารกำกับโปรแกรมการเจาะ (Drilling Data) สำหรับดอกเจาะสล๊อตสั้นกำหนดให้มีการระบุความยาวเกลียวสว่าน 7.0 มิลลิเมตร คือ “SD* FL 7.0 mm” ต่อยู่นำยุดอกที่กำหนด (Tool

Diameter Size) หมายถึง กำหนดให้ใช้ดอกเจาะสล็อตที่มีความยาวเกลียวส่วน 7.0 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาคผนวก ค หน้า 132

เมื่อทำการปรับปรุงเอกสารการทำงานข้างต้นแล้ว จึงทำการอบรมทีมในการปฏิบัติงาน และผู้ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ตรงกัน ในปรับปรุงวิธีการทำงานแบบใหม่นี้จะพบความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนกันอยู่บ้าง ระหว่างงานที่รอการปรับปรุงการเจาะเป็นวิธีใหม่และงานที่ได้ปรับปรุงไปแล้ว ทางผู้ปฏิบัติงานจึงทำเป็นรายงานสรุปชี้แจงงานที่ได้แก้ไขแล้วให้ผู้เกี่ยวข้องรับทราบ



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยหัวข้อนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจากข้อมูลที่ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลปัญหาที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ กำหนดปัญหาในการวิจัยโดยใช้แผนภูมิพาเรโต แล้วทำการกำหนดปัจจัยที่ควบคุมได้ที่ส่งผลต่อปัญหาโดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล เพื่อหาสาเหตุของปัญหาการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และทำการทดลองตามทีออกแบบ จากการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม จะช่วยในการกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในการปฏิบัติงานได้ เพื่อนำไปสู่การลดจำนวนของเสียและค่าใช้จ่ายคุณภาพลงได้ระดับหนึ่ง

5.1.1 สรุปผลจากการออกแบบการทดลอง

เมื่อทำการคัดกรองปัญหาจากโปรแกรม CNC ที่ใช้เจาะแผ่น PCB จากข้อมูลในปี พ.ศ. 2553 จากการใช้แผนภูมิพาเรโตพบว่า “ปัญหาการเจาะสล๊อตที่มีขนาดสั้นไม่เป็นไปตามข้อกำหนดคุณภาพ” เกิดขึ้นมากที่สุด จึงนำปัญหานี้มาวิเคราะห์สาเหตุจากแผนผังแสดงเหตุและผล โดยคัดกรองปัจจัย (Screening factor) ที่คาดว่าเป็นอิทธิพลหลัก (Main factor) และอิทธิพลร่วม (Interaction) จำนวน 4 ปัจจัย มากำหนดระดับปัจจัย ที่ใช้เทคนิค 2^{k-p} Factorial Design (2^{4-1}) ที่ส่งผลต่อการเจาะสล๊อตบนแผ่น PCB ผ่านเกณฑ์คุณภาพโรงงาน ผลจากการวิจัยสามารถสรุปปัจจัยได้ดังนี้

ก. ปัจจัย A ความยาวเกลียวส่วนนของดอกเจาะสล๊อต (Flute Length) การเลือกใช้ดอกสว่านสำหรับเจาะสล๊อตจากมาตรฐานของผู้ผลิตดอก ควรเลือกใช้ความยาวเกลียวส่วน 7.0 มิลลิเมตร จะสามารถเจาะสล๊อตสั้นได้ดีกว่าคือ เมื่อเจาะที่ความหนาบอร์ดปกติ 3 แผ่นต่อหัว ความยาวเกลียวส่วนที่ยาวจะมีโอกาสในการสไลด์หรือเอียงในบางจังหวะเกลียวส่วนเจาะจนถึงแผ่นสุดท้ายมากกว่า เพราะดอกสว่านไม่ว่าจะเป็นดอกสล๊อตหรือดอกสว่านปกติที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม PCB จะมีความอ่อนของเหล็กคาร์ไบด์อยู่ โดยเฉพาะที่มีขนาดดอกเล็กมากๆ เช่น 0.55-1.00 มิลลิเมตร เมื่อหัวดอกกระทบกับแผ่น PCB ในลักษณะตรงแต่อาจจะเกิดการสไลด์หรือเอียง ในแผ่น PCB ล่างสุด ทำให้แผ่นล่างสุดมีปัญหาสล๊อตเบี้ยวได้

ข. ปัจจัย B วิธีการเจาะสล๊อต การเขียนโปรแกรมเจาะสล๊อตสั้นวิธีแบบเรียง (In-line Method) จะเป็นการกำหนดการเจาะตำแหน่งรูที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 เรียงกันตามลำดับ โดยมีระยะห่าง

ระหว่างจุดศูนย์กลางรูเท่าๆ กัน จนได้ความยาวที่ต้องการ จะเป็นวิธีที่ดีที่สุดที่จะไม่เกิดการเบี้ยวของ สล็อตต้นเกิดขึ้น

ค. ปัจจัย C ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ (F: In-feed Rate) ควรกำหนดความเร็ว ในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำประมาณ 10 นิ้วต่อนาที คือ กำหนดการหน่วง เวลาให้หัวเจาะในแต่ละ Hit ค่อยๆ ปักหัวเจาะลงในแผ่นบอร์ด ก่อนจะยกหัวขึ้นปักหัวเจาะใน Hit ถัดไปตามโปรแกรมที่เขียน ถ้าสั่งให้หัวเจาะเคลื่อนที่เร็วเราจะไม่สามารถควบคุมการสไลด์ของดอก เจาะได้

ง. ปัจจัย C ความเร็วการหมุนของดอกเจาะ (S: Spindle Speed) จะกำหนดให้หัวเจาะหมุน ความเร็วที่ต่ำประมาณ 20,000 รอบต่อนาที กล่าวคือ เป็นการกำหนดให้ดอกสว่านหมุนให้สัมพันธ์กับ การเคลื่อนที่ของหัวเจาะเพื่อให้ดอกสว่านสามารถคายเศษ Laminate ที่ติดอยู่ที่เกลียวดอกออกก่อน เจาะ Hit ถัดไป (โดยเครื่องเจาะ CNC ที่ใช้ในการทดสอบสามารถทำความเร็วการหมุนหัวเจาะสูงสุดที่ 150,000 รอบต่อนาที)

5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์เพื่อหาวิธีการแก้ไขและปรับปรุง

เมื่อผู้วิจัยได้กำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมได้แล้ว จึงทำการปรับปรุงการทำงานจากสาเหตุที่ได้ จากแผนผังแสดงเหตุและผล คือ 4 M ดังต่อไปนี้

ก. วัสดุดิบ (Material) ในที่นี้หมายถึง ดอกสำหรับเจาะสล็อต เมื่อช่างเทคนิคพบว่ามีงาน ใด ที่มีสล็อตต้นให้ กำหนดดอกเจาะลงในเอกสารควบคุมการเจาะว่า “FL 7.00 mm” เพื่อให้พนักงาน เจาะงานใช้ดอกเจาะที่กำหนดเท่านั้น

ข. เครื่องจักร (Machine) ในการเขียนโปรแกรมเจาะ จะกำหนดให้ช่างเทคนิค กำหนด ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะและความเร็วในการหมุนของหัวเจาะลงในส่วนหัว (Header) ของ โปรแกรมต่อท้ายจากคำสั่ง Tool Diameter เช่น “T02C.0394F010S020” หมายถึงให้เครื่องเจาะ CNC จับ Tool ที่ 2 จับดอกเจาะขนาด 39.4 mil, In-feed rate 10 ipm และ Spindle speed 20 krpm

ค. วิธีการทำงาน (Method) เมื่อ Drawing ถูกค้ำกำหนดให้มีสล็อตต้นในแผ่น PCB ช่าง เทคนิคต้องทำการกำหนดลำดับในการเจาะใน CAD/CAM เป็นแบบ In-line และทำการตรวจสอบ ตามแบบฟอร์มที่กำหนด

ง. พนักงาน (Man) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านเกณฑ์การควบคุมคุณภาพ จึงได้กำหนด ระเบียบการปฏิบัติงานดังนี้

1) ประชุมทีมช่างเทคนิคที่เขียน โปรแกรมชี้แจง ถึงปัญหาคุณภาพที่พบและ ความสำคัญของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้รับการยอมรับจากที่ผ่านมา อาจก่อให้เกิดการร้องเรียนจากลูกค้า

เป็นผลเสียต่อแผนกและองค์กรได้ เพื่อเป็นการย้ำให้พนักงานตระหนักและเข้าใจปัญหาคุณภาพที่อาจก่อให้เกิดปัญหากับลูกค้า

2) ทำการปรับปรุงคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Instruction) ในการทำงานให้เหมาะสมตามระดับปัจจัยข้างต้น แล้วทำการอบรมช่างเทคนิคเขียนโปรแกรมถึงวิธีการทำงานที่ปรับปรุง พร้อมที่ออกแบบฟอร์ม (Checklist Form) ให้พนักงานตรวจสอบโปรแกรมด้วยตนเองให้ถูกต้อง

3) กำหนดให้ผู้ควบคุมการปฏิบัติงานทำการตรวจสอบโปรแกรมซ้ำอีกครั้ง (Re-Audit) โดยเฉพาะตำแหน่งที่มีสต็อกสินค้าว่าพนักงานยังคงปฏิบัติงานตามวิธีการปฏิบัติงานที่กำหนดไว้ ก่อนปล่อยโปรแกรมจะงานจริงเข้าสู่ระบบ

4) ทำการประเมินและทดสอบความเข้าใจของพนักงานทุกเดือน เพื่อเป็นการเฝ้าระวังและติดตามกระบวนการ

5.2 อภิปรายผล

5.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบผลที่ได้ก่อนและหลังการปรับปรุง

จากการควบคุมปัจจัยในการทำงานของกระบวนการเจาะแผ่น PCB ในโรงงานกรณีศึกษา ตัวอย่าง หลังจากนำข้อมูลปัญหาที่เกิดจากการเขียนโปรแกรมสำหรับงานตัวอย่างมาวิเคราะห์และสรุป คือ ข้อมูลก่อนการปรับปรุงระยะเวลาตั้งแต่ เดือนมกราคม ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2553 มีปริมาณแผ่น PCB ตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพและถูกรื้อเรียน 977.52 ตารางฟุต เฉลี่ย 81.46 ตารางฟุตต่อเดือน ที่เป็นของเสีย (Scrap) คิดเป็นมูลค่า 13,153.75 บาทต่อเดือน หรือ 1.248 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณที่ผลิตงานตัวอย่างทั้งหมด เมื่อทำการปรับปรุงวิธีการและเก็บข้อมูลในระยะเวลา 3 เดือน ตั้งแต่เดือน มีนาคม ถึง พฤษภาคม พ.ศ. 2554 ปริมาณแผ่น PCB ตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพและถูกรื้อเรียนลดลงอยู่ที่เฉลี่ย 39.62 ตารางฟุตต่อเดือน ที่เป็นของเสีย (Scrap) คิดเป็นมูลค่า 6,398.17 บาทต่อเดือน หรือ 0.575 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณที่ผลิตงานตัวอย่างทั้งหมด จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับปรุงระดับปัจจัยให้เหมาะสมแล้วปัญหาคุณภาพที่ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายคุณภาพทางตรงเนื่องจากความล้มเหลวภายในจากโปรแกรมจะลดลง 54 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าบรรลุวัตถุประสงค์การวิจัย

5.2.2 อภิปรายผลโดยการทดสอบสมมุติฐาน

ผู้วิจัยได้สรุปผล จากข้อมูลปัญหาคุณภาพจากการผลิตงานตัวอย่างก่อนการปรับปรุงวิธีการกับข้อมูลหลังการปรับปรุงทำการยืนยันผลเทียบกับก่อนการปรับปรุง โดยการใช้ P-test ทดสอบสมมุติฐานที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ สามารถยืนยันผลได้ว่า “การกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะมีผลต่อคุณภาพในการผลิตมากขึ้นแตกต่าง

กัน ซึ่งหากมีการศึกษาและควบคุมระดับของปัจจัยได้ ก็จะทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพการเจาะลดลงอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์แล้วทำการปรับปรุงแก้ไขอย่างมุ่งมั่นและเป็นระบบ ซึ่งส่งผลให้ค่าใช้จ่ายคุณภาพที่จะลดลงตามไปด้วย”

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ประสบปัญหาและอุปสรรคพอสมควร ซึ่งสามารถสรุปเป็นข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่จะนำงานวิจัยไปปฏิบัติและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคตได้ดังนี้

5.3.1 ข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่นำงานวิจัยนี้ไปปฏิบัติ

ก. การนำงานวิจัยนี้ไปปฏิบัติ จะต้องเกิดจากการร่วมมือของทั้งช่างเทคนิคผู้เขียนโปรแกรมจากส่วนงานวิศวกรรมและพนักงานฝ่ายผลิตที่ทำการเจาะ ให้ทำงานตามระเบียบปฏิบัติและเอกสารกำกับการใช้โปรแกรมแต่ละ Part Number อย่างเคร่งครัด จึงจะเจาะแผ่น PCB ที่มีคุณภาพได้

ข. การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสำหรับงานเจาะที่มีสล็อตสั้น เนื่องจากดอกเจาะสล็อตที่มีความยาวเกลียวส่วน (FL) 7.00 มิลลิเมตร สามารถเจาะแผ่นบอร์ดที่มีความหนาปกติที่ 1.6 มิลลิเมตร ได้ครั้งละ 3 แผ่นต่อหัวเจาะ (Panel/Stack) ดังนั้น Output จะได้น้อยกว่าการใช้ดอกที่มีความยาวเกลียวส่วน 8.50 มิลลิเมตร ซึ่งขึ้นงานได้ 4 Panel/Stack ต่อการเจาะ 1 รอบการผลิต (Cycle) แต่เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพการเจาะแล้วดอกที่มีความยาวเกลียวส่วน 7.0 มิลลิเมตร เหมาะสมสำหรับการเจาะสล็อตสั้นมากกว่า

ค. สำหรับการเพิ่ม Type ของความยาวดอกเจาะสล็อตเป็น 2 Type คือความยาวเกลียวส่วน 7.00 มิลลิเมตร สำหรับเจาะสล็อตสั้นเท่านั้น และ 8.50 มิลลิเมตร สำหรับเจาะสล็อตทั่วไป นั้นอาจจะเพิ่มค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อและจัดเก็บวัสดุขึ้น (Inventory Cost)

ง. เนื่องจากเครื่องเจาะ CNC ใช้ผลิตตลอด 24 ชั่วโมง อาจจะมีการแกว่งของหัวเจาะและดอกเจาะก็แกว่งตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้การเจาะสล็อตสั้นอาจจะเบี้ยวได้ จึงต้องวางแผนร่วมกับส่วนงานซ่อมบำรุงเครื่องจักรให้มีการทดสอบการแกว่ง (Run Out) ทุกกะการทำงาน

จ. ในการทดสอบการเจาะเมื่อทำการเร่งความเร็วในการเจาะ (In-feed Rate) ให้เจาะได้เร็วขึ้นในโปรแกรม ปรากฏว่าที่ In-feed Rate สูง ดอกเจาะสล็อตขนาด 0.8 มิลลิเมตร จะหักค้ำบนบอร์ดทั้งหมด เพราะขณะเจาะแบบ Multi-hit นั้นจะเกิดการ Overlap ในการเจาะแต่ละ Hit ทำให้ดอกที่มีขนาดเล็ก จะมีความอ่อนของเหล็กคาร์ไบด์บริเวณเกลียวส่วนมากกว่าจึงหักได้ง่าย ไม่สามารถทำการเจาะได้

ฉ. วิธีการวัดขนาดของสล็อต (Dimension) ในแผ่น PCB ต้องมีความเที่ยงตรงสูงเครื่องมือวัดเวอร์เนียอาจไม่ละเอียดเพียงพอสำหรับการวัด และไม่สามารถวัดบริเวณส่วนโค้ง (Radian) ของสล็อตได้ ดังนั้นควรใช้เครื่อง Optical Measurement ในการวัดยืนยันผล โดยให้ความละเอียดดีกว่าถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 และสามารถถ่ายรูปซูม 100 เท่าของขนาดร่องสล็อตจริงได้ ดังนั้นการเลือกเครื่องมือวัดที่เหมาะสมจึงเป็นส่วนสำคัญ เพื่อให้สามารถใช้เครื่องมือวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์

5.3.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

ก. ในการเขียนโปรแกรมสำหรับเจาะสล็อตขึ้นเบื้องต้น จะให้ช่างเทคนิคกำหนดลำดับการเจาะสล็อตแบบ Manual ก่อน เมื่อได้ผลเป็นที่พอใจจะทำการร้องขอให้ซัพพลายเออร์ที่ดูแล License ของซอฟต์แวร์ CAD ทำการเขียนฟังก์ชันสำหรับการสร้างสล็อตให้มีการจัดเรียงแบบอัตโนมัติตามที่ต้องการ (Script Feature Support) เพื่อให้สร้างโปรแกรมเจาะสล็อตขึ้นให้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ข. เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้ได้ที่มากขึ้น (Productivity) เวลาในการเจาะต่อรอบลดลง ควรทดลองเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ (In-feed Rate) และความเร็วดอกเจาะ (Speed) ให้มากขึ้น แล้วตรวจสอบคุณภาพเปรียบเทียบกัน

ค. จากผลการทดลองการเจาะสล็อตขึ้น เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพสล็อตที่ได้สำหรับดอกที่มีขนาด Diameter ของดอกเล็ก คือน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ในจำนวนการเจาะต่อรู (Hit/Slot) ที่เท่ากัน จะพบว่าคุณภาพการเจาะน้อยกว่า (Yield ต่ำกว่า) ดอกเจาะสล็อตที่มีขนาดใหญ่ (ประมาณ 1.1 มิลลิเมตร ขึ้นไป) ซึ่งทำให้มีโอกาสในการเจาะสล็อตเบี๋ยวมากขึ้น

ง. การวิเคราะห์สาเหตุจากแผนผังแสดงเหตุและผล และเทคนิคการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมนั้น สามารถช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลจากปัญหาในการผลิตได้ตามวัตถุประสงค์ ดังนั้นเราจึงสามารถนำเทคนิคนี้มาแก้ไขปัญหาที่เกิดจากโปรแกรมเจาะอื่นๆ ที่เหลืออยู่ในอนาคตได้ และสำหรับกระบวนการผลิตอื่นๆ ที่จะนำเทคนิคการออกแบบการทดลองไปประยุกต์ใช้ควรที่จะมีการวิเคราะห์ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตว่ามีกลุ่มใดบ้าง เพื่อมองถึงภาพโดยรวมของการเกิดปัญหาที่เกิดขึ้นแล้วค้นหาสาเหตุเจาะลึกลงไป ในรายละเอียดปัญหาย่อยๆ และปรับปรุงวิธีการทำงาน โดยใช้หลักการเดียวกันนี้ตามความเหมาะสม

รายการอ้างอิง

- [1] Hayao Nakahara, “**PCB World Production and Market**”. NTI Digest. March, 2010. N.T. Information Limited. (on-line), 2010. Available: <http://www.pcdandf.com/cms/magazine/172/2799-the-pcb-melting-pot>. (April 7, 2011).
- [2] KCE Electronic Co.,Ltd., “**ภาวะอุตสาหกรรมและการแข่งขัน รายงานประจำปี 2551**”. หน้า 66. (on-line), 2551. Available: <http://www.kcethai.in.th/Uploadfile%5C2008%5CAnnual2008%.pdf>. (April 3, 2011).
- [3] Laird Technologies, “**TLAM Substrates Fabrication Guidelines**”. Global solution local support. (on-line), 2009. Available: <http://www.lairdtech.com>. (April 10, 2011).
- [4] Wara Microcircuit Co.,Ltd., “**Generate Gerber File**”. (on-line), Available: <http://www.wara.com/modules.php?name=News&file=article&sid=242>. (April 10, 2011).
- [5] เกียรติอิสระ เรื่องสกุลพัฒน์, “**คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต**”. (on-line), 2551. Available: <http://btoproduction.sitesled.com/bto07.html>. (April 2, 2011).
- [6] Hitachi Via Mechanics Limited, “**Operation and Maintenance Manual for PCB drilling Machine**”. Type: ND-N Series. Part: Programming manual, 2004.
- [7] Union Tool Company Limited, “**Carbide Cutting Tools for Electronic Printed Circuit Boards and Equipment for Service and Support**”. Japan. Page 14. (on-line), 2005. Available: http://www.uniontool.co.jp/english/tech_06.html. (April 10, 2011).
- [8] India Sphinx Precision Limited, “**Catalogue**”. (on-line), 2009. Available: http://www.indsphinx.com/dld_data/ISPL_Catalogue.pdf. (April 10, 2011).
- [9] Association Connecting Electronics Industrials, “**IPC-A-600 Revision H-2010 Acceptability of Printed Boards**”. Bannockburn. Illinois. USA. 2010. pp. 73,131.
- [10] ปรีชา ลีลานุกรม, “**เอกสารการฝึกอบรม ค่าใช้จ่ายคุณภาพ (Quality of Cost)**”. (on-line), 2552. Available: <http://www.thaitrainingzone.com/TrainingDetail.asp?id=490>. (April 9, 2011).
- [11] จักรกฤษณ์ ภูพานเพชร และณัฐา คุปต์ชัยเรียว, การลดข้อร้องเรียนจากลูกค้าและค่าใช้จ่ายคุณภาพด้วยเครื่องมือควบคุมคุณภาพยุคใหม่. การประชุมวิชาการและการแสดงผลงานทางวิชาการ พระจอมเกล้าลาดกระบัง, 31 สิงหาคม 2552.

- [12] เฉกชนก ช้วนวล, “เอกสารการเรียนรู้วิชา **Introduction to Quality in Construction** เรื่องค่าใช้จ่ายคุณภาพ (**Cost of Quality**)”. (on-line), 2551. Available: <http://learners.in.th/blog/quality-1023/181401>. (April 9, 2011).
- [13] คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, “บทความการจัดการคุณภาพ เรื่องเครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด (**7 QC Tools**)”. (on-line), 2553. Available: <http://portal.in.th/kook-kook/pages/6885>. (April 10, 2011).
- [14] รัฐกิจ ชันคำภาส รุ่งดวงดาว กองเพชร และเนติวิทย์ วรรณโชติ, “**Industrial Management**”. โครงการ E-learning. มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. (on-line), 2553. Available: <http://e-learning.mfu.ac.th/mflu/131312/IM/index.htm>. (April 10, 2011).
- [15] สัตยชัย ดังแท้, ชุดเครื่องมือการแก้ปัญหา 7 อย่าง และชุดเครื่องมือการจัดการ 7 อย่าง (**7 QC Tools & 7 New QC Tools**). เอกสารประกอบการฝึกอบรม. สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ, 2552.
- [16] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). พิมพ์ครั้งที่ 2 สิงหาคม 2540.
- [17] ชีวิน จันทรสุนทร และณฐา กุปตัษฐีธร, การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของภาพพิมพ์กรณีศึกษาการทดสอบขั้นสุดท้ายของการผลิตเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท. วารสารวิศวกรรมศาสตรราชชมงคลธัญบุรี ปี 6 ฉบับที่ 12 เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม 2551 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2551. หน้า 49-57.
- [18] อรรถพล เฉลิมพลประภา, การปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยใช้เทคนิคลีนและซิกซ์ซิกมาในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2547.
- [19] B. Girish, Dy. Director National Productivity Council Chennai. “**The 7 QC Tools**”. (on-line), 2010. Available: <http://www.productivity.in/knowledgebase/TQM/c.%20Tools%20and%20Techniques/3.1.%207QC%20Tools/7%20QC%20TOOLS.pdf>. (April 10, 2011).
- [20] สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ, “เครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด”. (on-line), 2007. Available: http://youth.ftpi.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=35&Itemid=42. (October 31, 2011).

- [21] กานดา พูนลาภทวี, สถิติเพื่อการวิจัย. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์. ภาควิชาครุศาสตร์เทคโนโลยี. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ตุลาคม 2539.
- [22] เสาวภา แซ่ซุ่น, การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการพิมพ์ออฟเซตบนกล่องบรรจุภัณฑ์ โดยการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษา: โรงงานผลิตกล่องบรรจุภัณฑ์ประเภทกระดาษ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.
- [23] ฉลอง สีแก้วสัว, “บทที่ 8 การออกแบบการทดลอง Design of Experiment”. (on-line), 2550. Available: http://www.statistics.ob.tc/why_DOE.htm. (April 3, 2011).
- [24] ศรีไร จารุกัญญา, เอกสารประกอบการบรรยายวิชาการออกแบบการทดลอง (DOE). ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2553.
- [25] ประเมศ ชูติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2545.
- [26] ฉลอง สีแก้วสัว, “Fractional Factorial Designs”. (on-line), 2553. Available: http://www.statistics.ob.tc/Fract_DOE.htm (April 6, 2011).
- [27] ปิ่นพัชร์นิค เต็มตุ้ม, การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อลดอัตราของเสียจากการผลิต หัวอ่านฮาร์ดดิสก์: กรณีศึกษา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- [28] สนิชัช ทับทิมทอง, การปรับปรุงกระบวนการผลิตแผงวงจรแบบอ่อน เพื่อลดปัญหาการโค้งงอ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551.
- [29] ดาวินท์ มานะจิตต์, การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการปรับปรุงขั้นตอนการผลิต กรณีศึกษา: บริษัท CKL Electronics Co., Ltd. (Public). การประชุมวิชาการ 40 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ เรื่องนวัตกรรมทางวิศวกรรมสำหรับการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่นภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์, 23-24 มกราคม 2547.
- [30] Tomaz Brajliah, Bogdan Valentan, Joze Balic, Igor Drstvensek, **Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines**. Rapid Prototyping Journal, 2011. Vol. 17, Issue: 1, pp. 64-75. Available: <http://www.emeraldinsight.com> (May 10, 2011).

- [31] ยรรยง เตชะวิจิตร, การลดของเสียจากกระบวนการล้างฟิล์มป้องกันการชุบทองของแผงวงจรแบบอ่อนด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต การจัดการอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2550.
- [32] ชุตินา ราชพิทักษ์, การลดของเสียจากกระบวนการผลิตแบบแมชชีนนิ่ง โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษา อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2551.
- [33] Chennagiri, G.; Iyer, S.S.; Srihari, K.H., **Rework of Lead-Free Area Array Packages Assembled on Ultrathin Flexible Substrates**. Components Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions. April 2011 Volume: 1, Issue:4, pp. 611-621. Available: IEEE organization/IEEE Xploer (May 10, 2011).
- [34] Tony A. Asghari, **PCB Thermal Via Optimization using Design of Experiments**. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems. The Tenth Intersociety Conference. May, 30 2006-June, 2 2006. IEEE. pp. 224-228. Available: IEEE organization/IEEE Xploer (May 11, 2011).
- [35] B. Salam, H.Y. Gan, B.K Lok, LCW Albert, **Optimizing Manufacturing Process of Printed**. Electronics Singapore Institute of Manufacturing Technology, 2009 11th Electronics Packaging Technology Conference, 2009. IEEE. pp. 163-167. Available: IEEE organization/IEEE Xploer (May 11, 2011).
- [36] ชีวันันท์ อมรศรีสังจะ, การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย ในกระบวนการทำความสะอาดแขนจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ใช้เทคโนโลยีคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551.
- [37] เปมิกา สุวรรณมณี, การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการฟอสเฟอโรไนเจอร์ไม้ โดยการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษา: โรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548.

ภาคผนวก

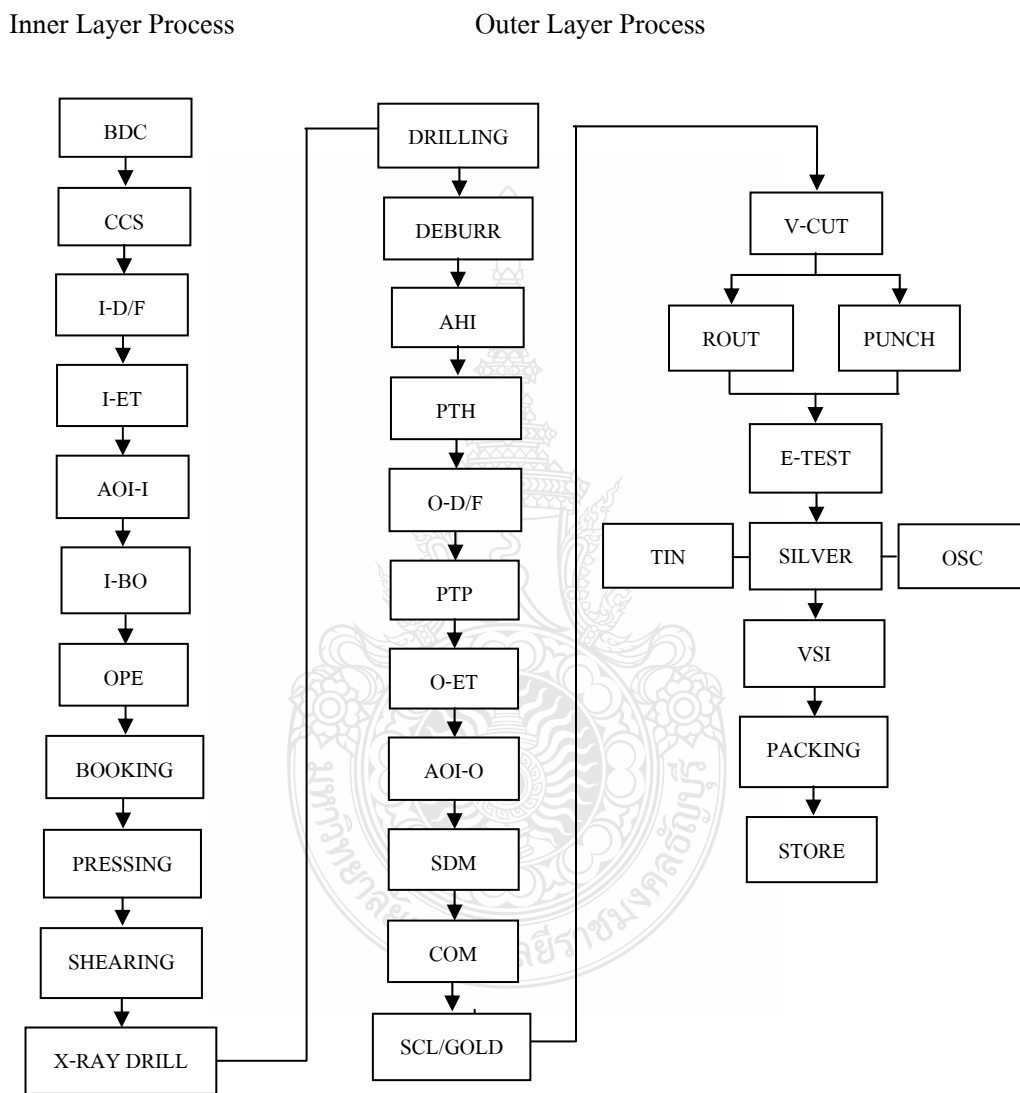




ภาคผนวก ก
ขั้นตอนกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์
(Printed Circuit Board: PCB)

ขั้นตอนกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board: PCB)

การผลิตแผ่น PCB มีกระบวนการผลิตจำนวนมากและซับซ้อน จึงต้องมีการวางแผนการผลิตให้รอบคอบ โดยสามารถแบ่งการผลิตเป็น 2 ช่วงคือ Inner Layer และ Outer Layer ดังภาพที่ ก.1 โดยมีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ ก.1 ขั้นตอนในการผลิต PCB

1 Inner Layer Process

1.1 B/C (Board Cut) เป็นกระบวนการตัดแผ่น Inner Core (เป็นแผ่นทองแดงประกบกับแผ่น Prepreg (Laminate ชนิด FR-4 Fiberglass Reinforced Material ทำจากใยแก้วยัดด้วยอีพอกซีเรซิน) สามารถใช้ได้กับงานหลายประเภท ทนต่อความชื้นและอุณหภูมิสูง จากแผ่นขนาดใหญ่ตัดให้ได้ขนาดตาม MI กำหนด

1.2 CCS (Cleaning Clothing Surface) เนื่องจาก Inner Core มีสาร Anti-tarnish เคลือบอยู่เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดออกไซด์บนผิวทองแดง จึงมีกระบวนการทำความสะอาดแผ่น Inner Core ออกก่อนเข้ากระบวนการถัดไป

1.3 I-D/F เป็นขั้นตอนการเคลือบแผ่นฟิล์มไวแสงบนแผ่น Inner Core ทั้งสองด้าน แล้วนำไปเข้าเครื่อง Exposure เพื่อฉายแสง UV ผ่าน Inner Circuit Negative Film (Silver Halide Film) โดยที่ส่วนที่โดนแสงจะเป็นลายวงจรแข็งตัวเกาะบนแผ่น กระบวนการนี้จะต้องกระทำภายใต้สภาพห้องที่ไม่มีแสง UV ซึ่งในที่นี้จะใช้หลอดไฟสีเหลือง

1.4 I-E/T มี 3 ขั้นตอนย่อยคือ

- Develop เป็นการใช้น้ำสารเคมีลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่ไม่ถูกแสงออก (ไม่ใช่ลายวงจร)
- Etching เป็นการกัดทองแดงในส่วนที่ไม่ใช่ลายวงจรออก
- Striping เป็นการใช้น้ำสารเคมีลอกน้ำยาไวแสงที่แข็งตัวคลุมลายวงจรออก

1.5 AOI (Automatic Optical Inspection) เป็นการตรวจสอบลายวงจรบนแผ่น Inner Core โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ AOI ตรวจสอบเปรียบเทียบกับ File Master ที่ใช้ทำ Inner Film เช่น Nick, Void, Island, Open Short Circuit ว่ามีข้อผิดพลาดหรือไม่

1.6 B/O (Inner Brown Oxide) เป็นกระบวนการที่ทำให้ผิวทองแดงมีออกไซด์ปกคลุม เพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง Laminate กับทองแดงในขั้นตอน Pressing โดยที่จะกัดทองแดงให้มี Gain ไม่หยابหรือละเอียดจนเกินไป

1.7 OPE (Optical Punch Edge) เป็นกระบวนการประกบแผ่น Inner Core ตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไปเข้าด้วยกัน โดยใช้แสงกำหนดตำแหน่งเป้าที่กำหนดบนขอบแผ่น Core แล้ว Punch เพื่อทำการ Bonding บริเวณขอบแผ่นวงจร Welding ในแต่ละ Core ให้ Melt ติดกันโดยใช้ความร้อน มักจะใช้สำหรับงานตั้งแต่ 6 Layer ขึ้นไปเท่านั้น เพราะมี 2 Inner Core

1.8 Booking เป็นกระบวนการประกบหรือ Ply up แผ่น Prepreg และ Copper foil เข้ากับแผ่น Inner Core ที่ทำเสร็จแล้วโดยเรียงเป็นชั้นๆ ตาม Lay up Design ที่ MI กำหนด เพื่อให้ได้ความหนาบอร์ดและค่าความหนาฉนวน (Dielectric) หลัง Pressing ตามที่ลูกค้าต้องการ

1.9 Pressing เป็นกระบวนการอัดแผ่นบอร์ดที่ถูก Booking ให้ยึดติดกัน โดยใช้เครื่องจักรระบบไฮดรอลิกส์ และความร้อนอัด ตามโปรแกรมที่กำหนด (Order List เป็นโปรแกรมในการ Pressing)

1.10 Shearing เป็นการตัดและลบคมขอบบอร์ดให้ได้ตามขนาดแผ่นบอร์ด Outer ที่กำหนด

1.11 X-ray Drill เป็นการเจาะรูโดยใช้แสง X-ray หาดำแหน่งเป้าที่อยู่บนขอบ Inner Core เพื่อใช้ในการกระบวนการเจาะ (Drilling)

2 Outer Layer Process

2.1 Drilling เป็นกระบวนการใช้ดอก Drill เจาะบนแผ่นบอร์ดให้ได้ขนาดและตำแหน่งตามเอกสารที่กำหนด โดยใช้โปรแกรม CNC ที่ถูกเขียนจาก Drawing ของลูกค้า

2.2 Deburr/Scrubbing เป็นการล้างฝุ่นในรูที่เกิดจาก Drilling และลบคมปากรูให้เรียบ

2.3 AHI (Automatic Hole Inspection) เป็นนำแผ่นบอร์ดที่เจาะแล้วเข้าเครื่องสแกนตรวจตำแหน่งและขนาดรูเปรียบเทียบกับโปรแกรมต้นฉบับ (ตำแหน่งรูหาย หรือ รูเกิน)

2.4 PTH / Panel เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการ Plate Copper บนผนังรู ให้ทองแดงเกาะบางๆ ประมาณ 0.3 mil โดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า ส่วนกระบวนการ Panel เป็น Electro Plating เพื่อเพิ่มความหนาทองแดงทั้งในผนังรูและพื้นผิว

2.5 D/F (Dry Film) เป็นขั้นตอนการสร้างลายวงจรชั้นนอก เริ่มด้วยการรีดแผ่น Dry Film (เป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ที่มีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่ บนแผ่นบอร์ดทั้งสองด้าน แล้วนำไปฉายแสง UV ที่เครื่อง Exposure ผ่าน Outer Circuit Positive Film (Silver Halide Film) โดยที่ส่วนที่ไม่ใช่ลายวงจรจะโดนแสงทำให้ Dry Film แข็งตัวเกาะบนแผ่นบอร์ด กระบวนการนี้จะต้องกระทำภายใต้สภาพห้องที่ไม่มีแสง UV แล้วทำการ Developing Dry Film ส่วนที่ไม่โดนแสงออกโดยใช้น้ำยาเคมี ซึ่งก็คือส่วนที่เป็นลายวงจรนั่นเอง

2.6 P/P (Pattern and Plating) เป็นกระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมการเพิ่มความหนาทองแดงบริเวณที่เป็นลายวงจรและผนังรู PTH ให้ได้ตามต้องการและทำการ Plate Tin (ดีบุก) คลุมลายวงจรไว้ ป้องกันกรดในการ Etching

2.7 O-E/T (Outer Etching) มี 3 ขั้นตอนย่อยคือ

- Stripping เป็นการใช้น้ำยาเคมีลอกฟิล์มไวแสงออกคือส่วนที่ไม่ใช่ลายวงจร
- Etching เป็นการใช้กรดกัดทองแดงในส่วนที่ไม่ใช่ลายวงจรออก
- Stripping เป็นการใช้น้ำยาเคมีลอก Tin ที่คลุมลายวงจรออก

2.8 AOI (Automatic Optical Inspection) เป็นการตรวจสอบลายวงจรชั้นนอกบนแผ่นบอร์ด โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ AOI ตรวจสอบเปรียบเทียบกับ File Master ที่ใช้ทำ Outer Film เช่น Nick, Void, Island, Open Short Circuit ว่ามีข้อผิดพลาดหรือไม่

2.9 S/M (Solder Mask) มี 2 ขั้นตอนหลักคือ

ก. Frame Printing เป็นการใช้ ผ้าสำหรับสกรีนอิงบนเฟรมอะลูมิเนียม แล้วถ่ายฟิล์มตำแหน่งรูที่ไม่ต้องการให้สี Solder Mask ลงไป นำเฟรมขึ้นเครื่อง S/M Printing โดยใช้สี Solder Mask ที่มีส่วนผสมของน้ำยาไวแสงตาม Type ที่ MI กำหนด กรีดสีผ่านเฟรมลงบนแผ่นบอร์ดทั้ง 2 ด้าน แล้วนำไปอบแบบให้สีแข็งหมาดๆ (Post Cure)

ข. Solder Mask Register เป็นการนำแผ่นบอร์ดที่อบหมาดๆ แล้วไปฉายแสง UV ที่เครื่อง Exposure ผ่าน Solder Mask Film (Positive film) แล้วนำไป Developing สี Solder Mask ตำแหน่งที่ไม่ถูกแสงออก คือตำแหน่งที่ Pad และรู ลูกค้านำไปเปิดเพื่อใช้ชุบ Surface Finish แล้วนำเข้าเครื่องอบสี Solder Mask ให้แห้งต่อไป

2.10 C/M (Component Mark / Silk Legend) เป็นการพิมพ์หมึกที่ใช้บ่งชี้ตำแหน่งอุปกรณ์ในการ Assembly ลงบนแผ่น PCB โดยผ่านเฟรมอะลูมิเนียมที่มีผ้าสำหรับสกรีนอิงอยู่ (ใช้ C/M Positive Film ถ่ายลงบนผ้าเฟรม) นำไปเฟรมขึ้นเครื่อง C/M Printing โดยใช้สี C/M ตาม Type ที่ MI กำหนด ส่วนใหญ่จะเป็นสีขาว ปาดสีผ่านเฟรมลงบนแผ่นบอร์ด แล้วนำไปเข้าเครื่องอบให้แห้ง

2.11 SCL/HAL (Solder Coat Leveling /Hot Air Leveling) เป็นกระบวนการ Surface Finish ชนิดหนึ่งที่ใช้ Lead Free กลุ่มบริเวณที่ ตำแหน่ง S/M Opening โดยการชุบแผ่น PCB ทั้งแผ่นในอ่างตะกั่ว – ดีบุก หลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส และจะเป่าออกด้วย Air Knife

2.12 V-cut / V-Score เป็นเครื่องตัดขีดเส้นแบ่งแผ่น PCB ออกเป็น Unit ตามระยะที่ลูกค้าต้องการหักได้สะดวกเมื่อนำไปใช้งาน ให้เป็นเส้นตรงทั้งสองด้าน ตามความลึก (Remain) ที่กำหนด

2.13 Outline Process แบ่งเป็น 2 ส่วน ตามที่ลูกค้ากำหนดคือ

ก. Routing เป็นการใช้เครื่องจักร CNC จาก โปรแกรมที่เขียนขึ้น โดยใช้ดอก Rout กัดแผ่น PCB ให้ได้ขนาด รูปร่าง ตาม Drawing ของลูกค้า โดยขอบชิ้นงานมีลักษณะเรียบ

ข. Punching เป็นการใช้ Mould ผ่านเครื่อง Punch กระแทกตัดแผ่น PCB ให้ได้ขนาดรูปร่าง ตาม Drawing ของลูกค้า คล้ายกระบวนการ Rout แต่ขอบชิ้นงานจะไม่เรียบเท่าการ Rout

2.14 E-Test (Electrical Test) เป็นการใช้เครื่องจักรที่มี Fixture Pin ทดสอบแผ่นบอร์ด PCB โดยปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่าน End Point ทุกจุดที่ต้องใส่อุปกรณ์ Assembly เพื่อตรวจสอบว่าแผ่น PCB สามารถใช้งานได้หรือไม่ (Short/ Open Circuit Test)

2.15 Surface Finish มีหลายประเภทคือ

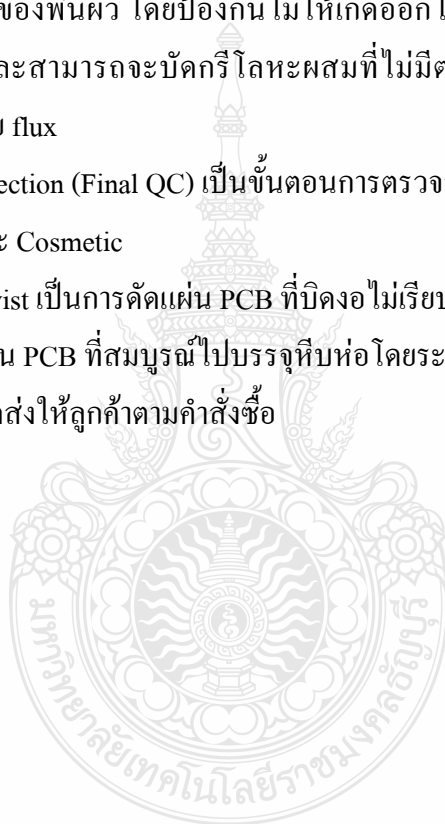
- Immersion Silver & SCI (Sterling Corrosion Inhibitor) เป็นการชุบเงินทั้งแผ่นแล้วนำไป Post Dip Plating Process by SCI
- Immersion TIN เป็นการชุบตีบูก
- Immersion Gold เป็นการชุบเคลือบสายเส้นด้วยทองทั้งแผ่น เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความนำไฟฟ้าสูงหรือเป็น Contact
- Copper Entek/OSC (Organic Solderability Coating) เป็นการเพิ่มความสามารถในการยึดติดของพื้นผิว โดยป้องกันไม่ให้เกิดออกไซด์บนทองแดง เคลือบผิวสัมผัสอุปกรณ์และสามารถจะบัดกรีโลหะผสมที่ไม่มีตะกั่วเช่นกัน มีลักษณะคล้ายการเคลือบด้วย flux

2.16 Visual Inspection (Final QC) เป็นขั้นตอนการตรวจสอบขั้นสุดท้ายด้วยสายตา โดยใช้ Loop 10X เพื่อดู Defect และ Cosmetic

2.17 Warp & Twist เป็นการดัดแผ่น PCB ที่บิดงอไม่เรียบบนหินแกรนิตมาตรฐาน

2.18 Packing แผ่น PCB ที่สมบูรณ์ไปบรรจุหีบห่อโดยระบบสุญญากาศ แล้วนำลงกล่อง

2.19 Delivery จัดส่งให้ลูกค้าตามคำสั่งซื้อ



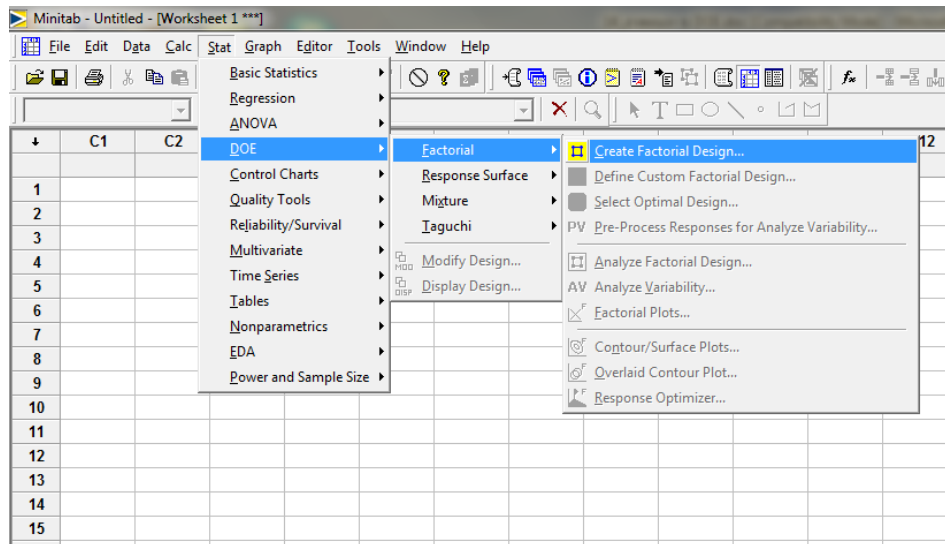
ภาคผนวก ข

การออกแบบการทดลองโดย Minitab 15



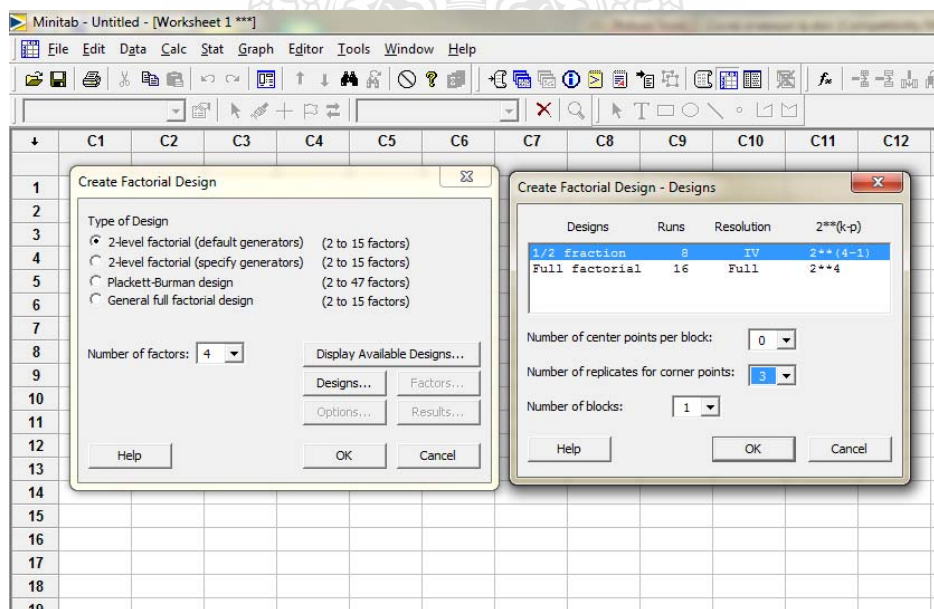
การออกแบบการทดลอง (2_{IV}^{4-1}) โดยใช้ Minitab 15

1. เริ่มต้นเปิดโปรแกรม Minitab 15 เลือก Menu: Stat > DOE > Factorial > Create factorial design ดังภาพที่ ข.1



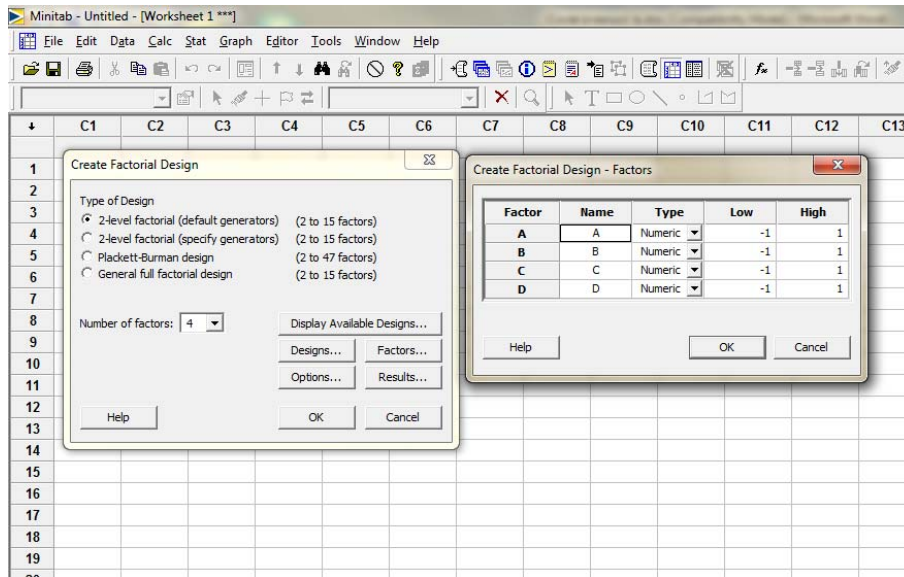
ภาพที่ ข.1 การเลือกการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล

2. จากนั้นป้อนค่าจำนวนปัจจัย (Factor) และจำนวนครั้ง (Replicate) เลือกการออกแบบการทดลองแบบ $\frac{1}{2}$ Fraction Resolution IV ในการทดลองดังภาพที่ ข.2



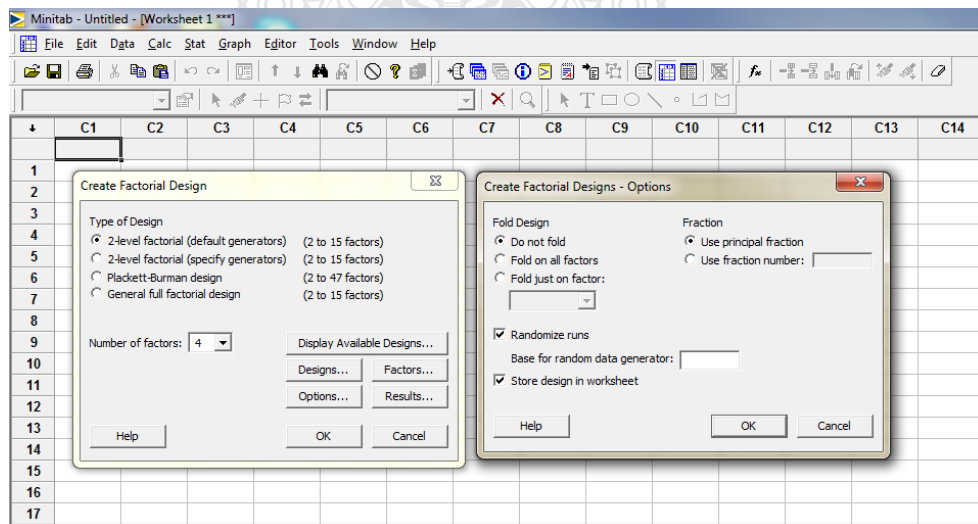
ภาพที่ ข.2 การเลือกการออกแบบการทดลองแบบ (2_{IV}^{4-1})

3. ระบุปัจจัยและเลือกระดับการทดลองดังภาพที่ ข.3



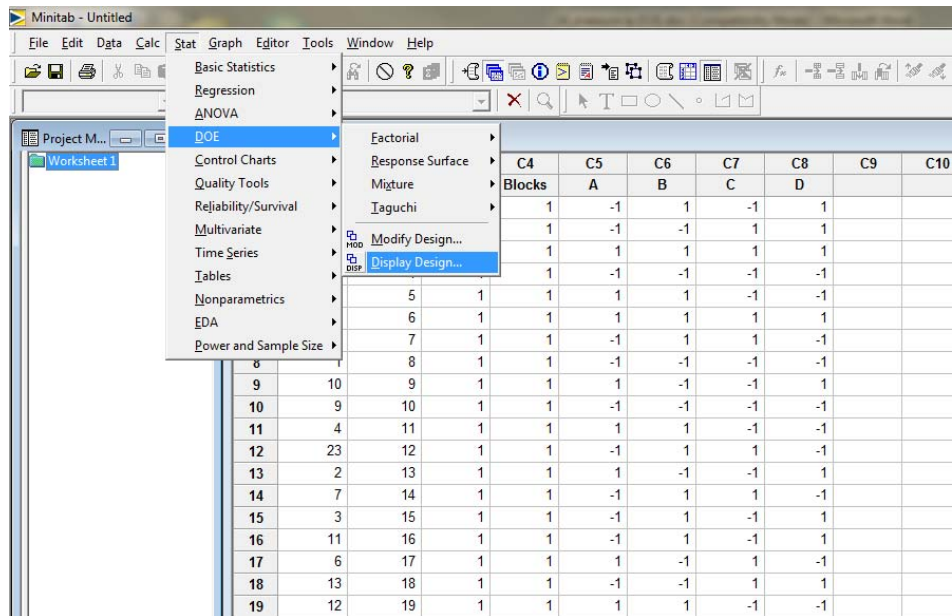
ภาพที่ ข.3 การเลือกระดับปัจจัยการออกแบบการทดลอง

4. การเลือกการทดลองแบบสุ่มดังภาพที่ ข.4

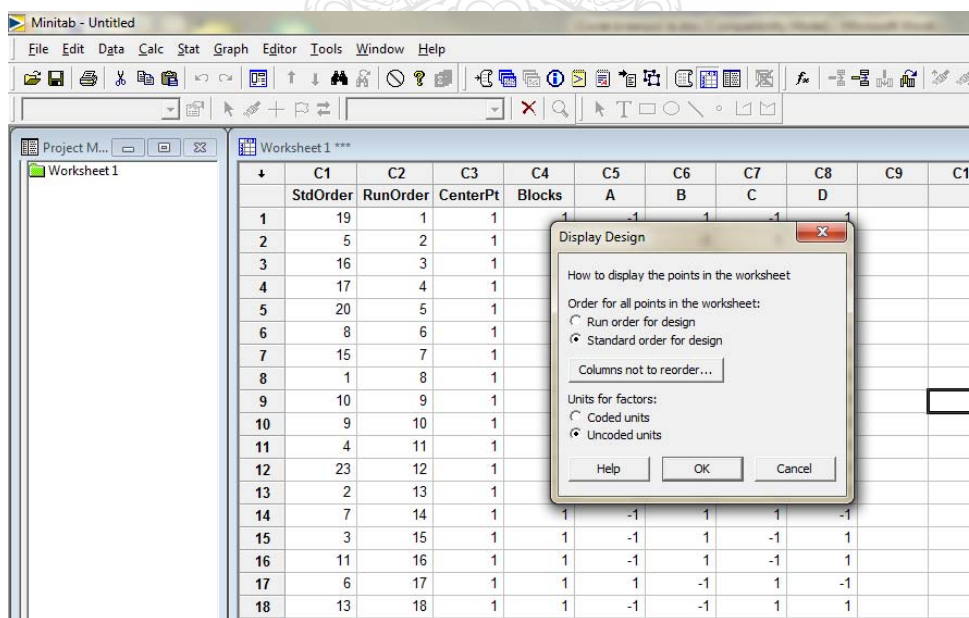


ภาพที่ ข.4 การเลือกการทดลองแบบสุ่ม

5. เลือก Stat > DOE > Display Design ให้การทดลองทำการเรียงลำดับข้อมูล Standard Order for Design ดังภาพที่ ข.5 และภาพที่ ข.6



ภาพที่ ข.5 การเลือกการเรียงลำดับการออกแบบการทดลอง



ภาพที่ ข.6 การกำหนดให้เรียงลำดับการทดลองตาม Standard Order

6. ทำการทดลองตามที่ออกแบบ แล้วบันทึกผลการทดลอง โดยป้อนข้อมูลผลตอบสนองลงในคอลัมน์ C9 บนตารางที่ออกแบบไว้ใน Minitab ดังภาพที่ ข.7

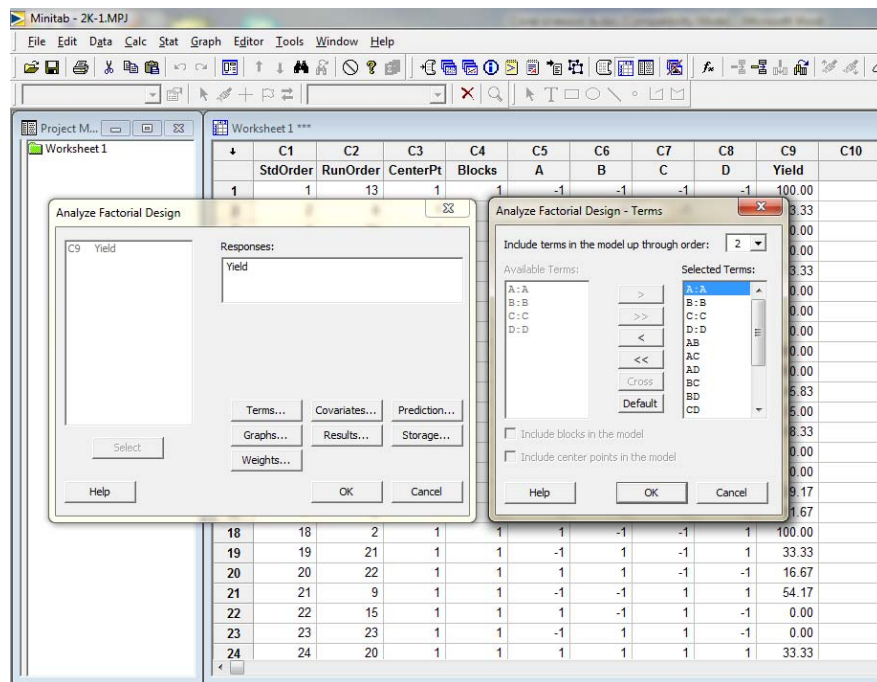
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	Yield	
1	1	13	1	1	-1	-1	-1	-1	100.00	
2	2	6	1	1	1	-1	-1	1	83.33	
3	3	24	1	1	-1	1	-1	1	0.00	
4	4	18	1	1	1	1	-1	-1	0.00	
5	5	5	1	1	-1	-1	1	1	33.33	
6	6	17	1	1	1	1	-1	-1	0.00	
7	7	1	1	1	-1	1	1	-1	0.00	
8	8	10	1	1	1	1	1	1	0.00	
9	9	19	1	1	-1	-1	-1	-1	100.00	
10	10	11	1	1	1	-1	-1	1	100.00	
11	11	3	1	1	-1	1	-1	1	45.83	
12	12	16	1	1	1	1	-1	-1	25.00	
13	13	7	1	1	-1	-1	1	1	58.33	
14	14	14	1	1	1	-1	1	-1	0.00	
15	15	4	1	1	-1	1	1	-1	0.00	
16	16	8	1	1	1	1	1	1	29.17	
17	17	12	1	1	-1	-1	-1	-1	91.67	
18	18	2	1	1	1	-1	-1	1	100.00	
19	19	21	1	1	-1	1	-1	-1	33.33	
20	20	22	1	1	1	1	-1	-1	16.67	
21	21	9	1	1	-1	-1	1	1	54.17	
22	22	15	1	1	1	-1	1	-1	0.00	
23	23	23	1	1	-1	1	1	-1	0.00	
24	24	20	1	1	1	1	1	1	33.33	

ภาพที่ ข.7 การบันทึกผลตอบสนองใน Minitab

7) เลือกเมนูการวิเคราะห์แฟคทอเรียล Stat> DOE > Factorial >Analysis Factorial Design ดังภาพที่ ข.8

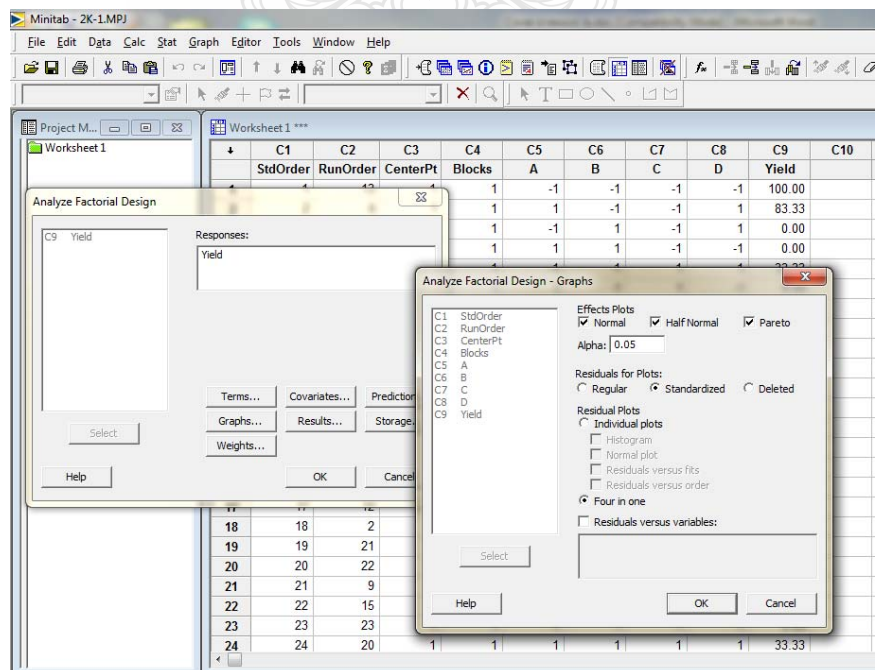
ภาพที่ ข.8 การเลือกเมนูการวิเคราะห์การทดลองแบบแฟคทอเรียล

8. เลือกผลตอบสนองและกลุ่มปัจจัยที่ต้องการวิเคราะห์ดังภาพที่ ข.9



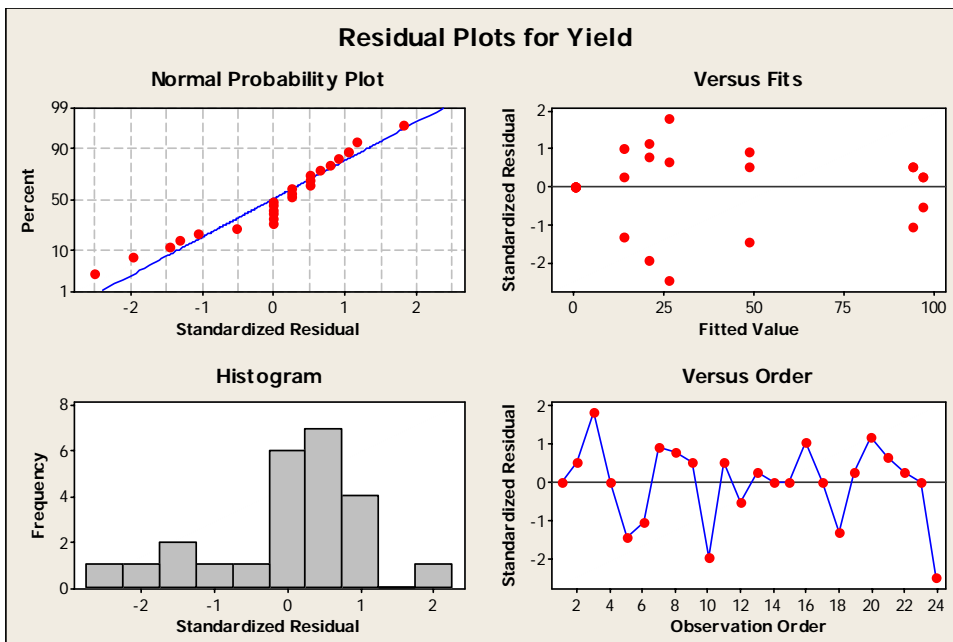
ภาพที่ ข.9 การเลือกผลตอบสนองและกลุ่มปัจจัย

9. เลือกชนิดกราฟการทดสอบความพอเพียงดังภาพที่ ข.10



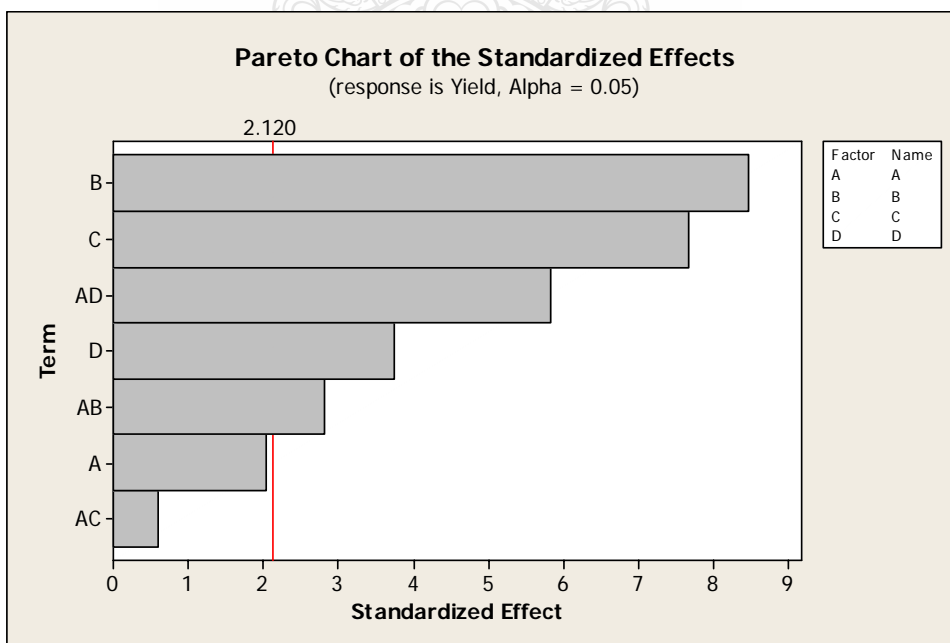
ภาพที่ ข.10 การเลือกการแสดงผลการทดสอบด้วยกราฟ

10. กราฟผลการทดสอบความพอเพียงที่ได้จาก Minitab ภาพที่ ข.11



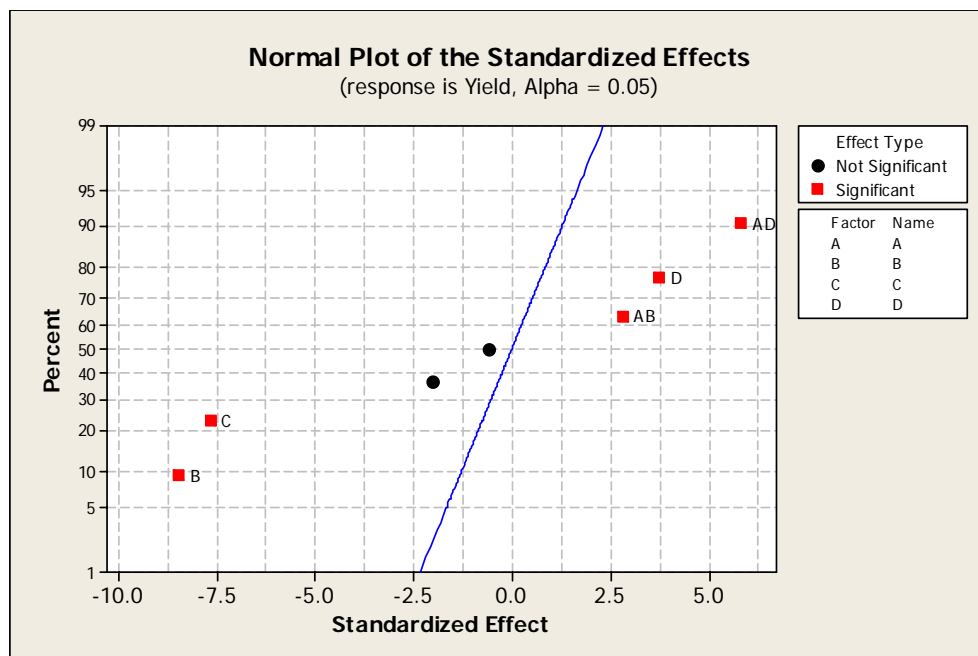
ภาพที่ ข.11 Residual Plots ของผลตอบสนอง

11. ผลการทดสอบด้วยกราฟพาร์โตดังภาพที่ ข.12

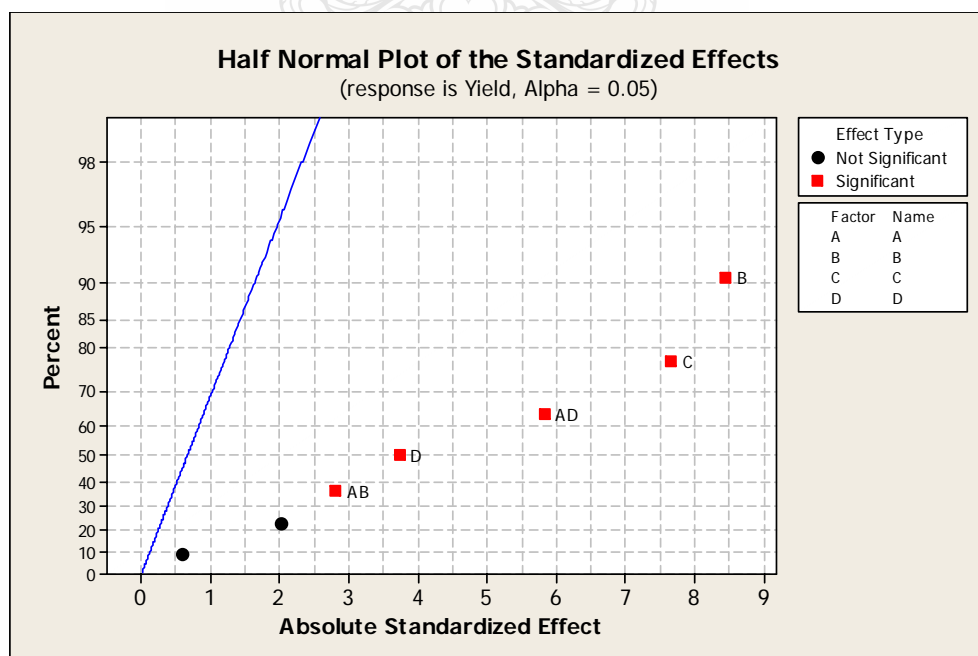


ภาพที่ ข.12 Pareto Chart of the Standardized Effects $\alpha = 0.05$

12. การทดสอบด้วยกราฟปกติและปกติครึ่งหนึ่งของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง และดังภาพที่ ข.13 และภาพที่ ข.14



ภาพที่ ข.13 Normal Plots of the Standardized Effects $\alpha = 0.05$



ภาพที่ ข.14 Half Normal Plots of the Standardized Effects $\alpha = 0.05$

13. ผลการคำนวณค่าทางสถิติที่ได้ดังภาพที่ ข.15

Factorial Fit: Yield versus A, B, C, D

Estimated Effects and Coefficients for Yield (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		37.67	2.650	14.22	0.000
A	-10.76	-5.38	2.650	-2.03	0.059
B	-44.79	-22.40	2.650	-8.45	0.000
C	-40.63	-20.31	2.650	-7.67	0.000
D	19.79	9.89	2.650	3.73	0.002
A*B	14.93	7.47	2.650	2.82	0.012
A*C	-3.12	-1.56	2.650	-0.59	0.564
A*D	30.90	15.45	2.650	5.83	0.000

S = 12.9824 PRESS = 6067.54
R-Sq = 92.25% R-Sq(pred) = 82.57% R-Sq(adj) = 88.86%

Analysis of Variance for Yield (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	24985.1	24985.1	6246.3	37.06	0.000
2-Way Interactions	3	7126.4	7126.4	2375.5	14.09	0.000
Residual Error	16	2696.7	2696.7	168.5		
Pure Error	16	2696.7	2696.7	168.5		
Total	23	34808.2				

Unusual Observations for Yield

Obs	StdOrder	Yield	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	3	0.000	26.387	7.495	-26.387	-2.49R

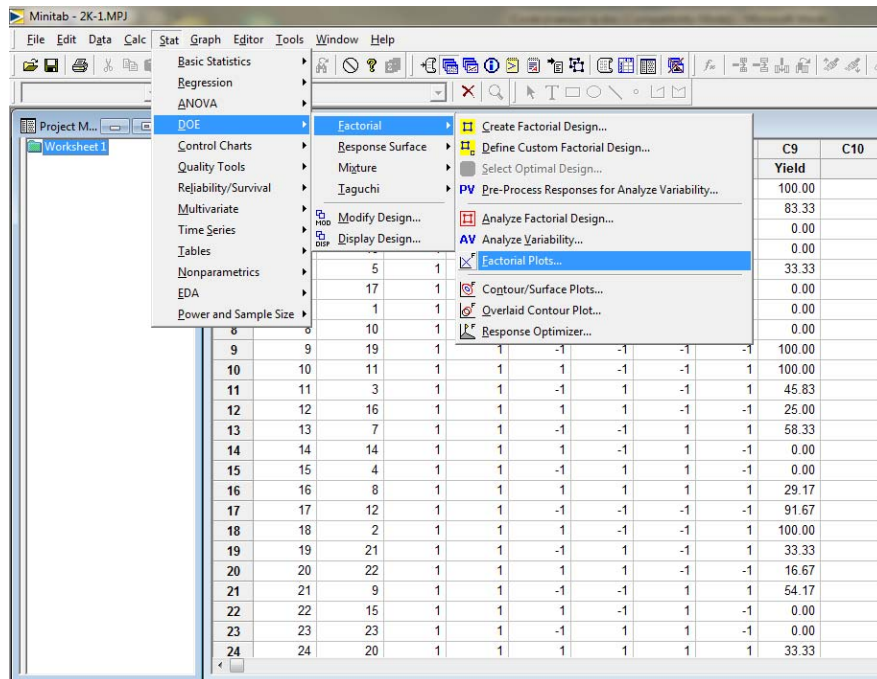
R denotes an observation with a large standardized residual.

Alias Structure

I + A*B*C*D
A + B*C*D
B + A*C*D
C + A*B*D
D + A*B*C
A*B + C*D
A*C + B*D
A*D + B*C

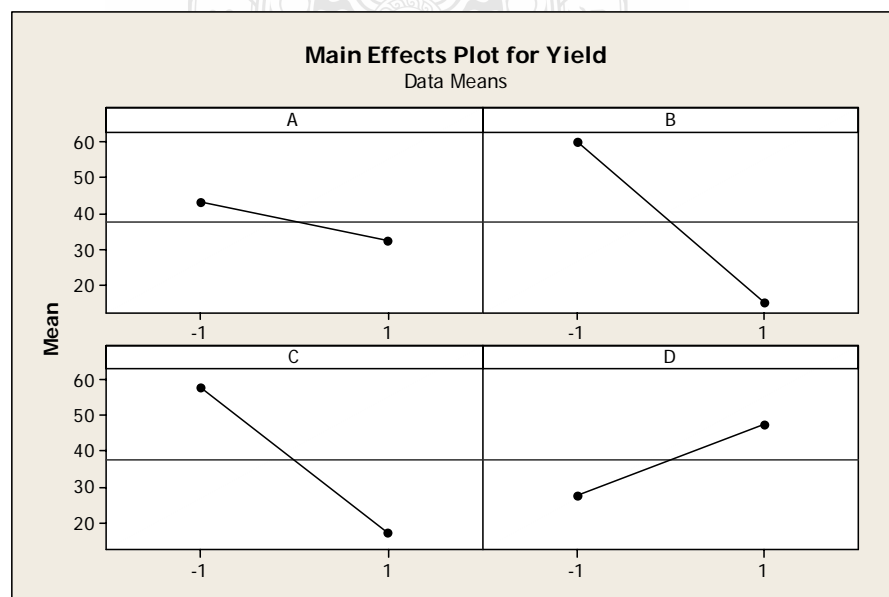
ภาพที่ ข.15 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนและโครงสร้างคู่แฝดแฝง

14. การเลือกเมนูแสดงกราฟผลของแฟกทอเรียล Stat> DOE> Factorial> Factorial Plots
 ดังภาพที่ ข.16



ภาพที่ ข.16 การเลือกเมนูแสดงกราฟผลของแฟกทอเรียล

15. กราฟผลการทดลองของแต่ละระดับปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วม ดังภาพที่ ข.17 และภาพ
 ที่ ข.18



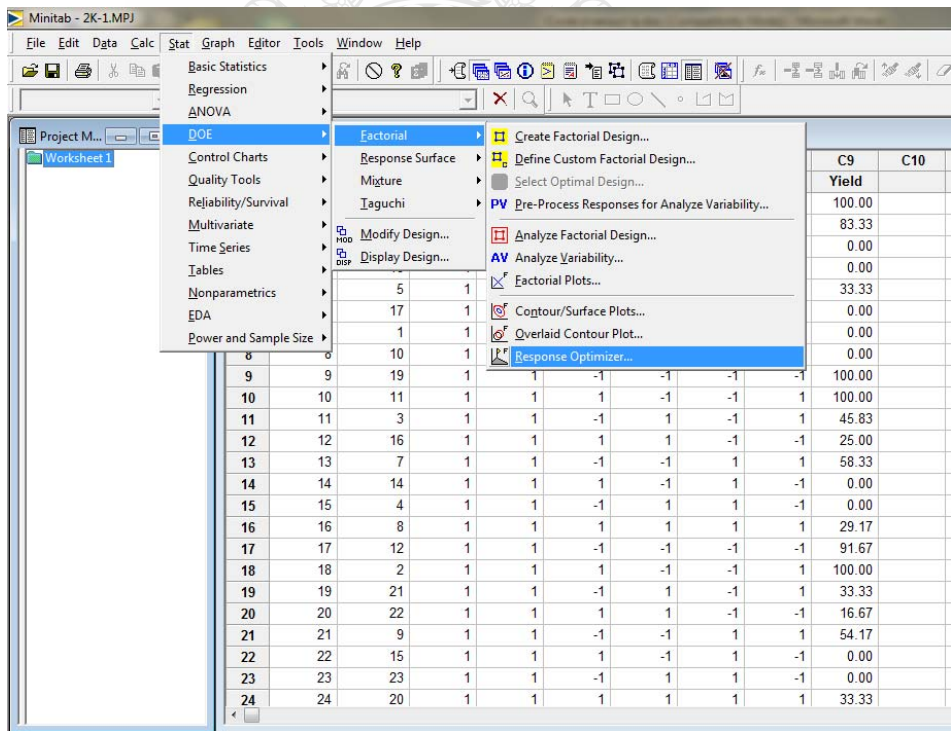
ภาพที่ ข.17 ค่าเฉลี่ยของผลกระทบแต่ละระดับของปัจจัยหลัก



ภาพที่ ข.18 ค่าเฉลี่ยของผลกระทบแต่ละระดับของปัจจัยร่วม

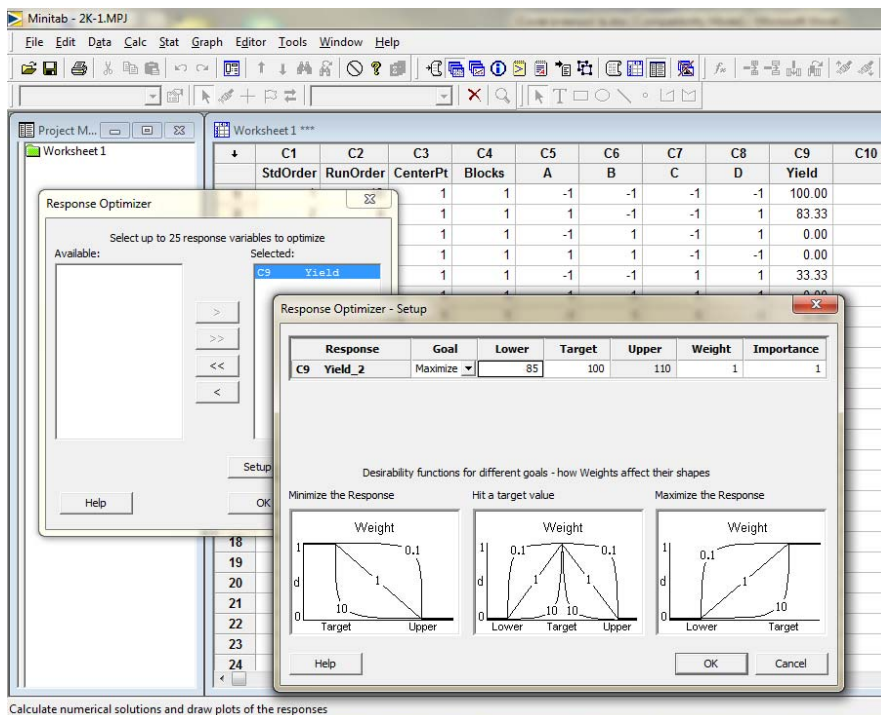
16. การเลือกเมนูหาผลตอบสนองที่ดีที่สุด Stat> DOE> Factorial> Response Optimizer ดัง

ภาพที่ ข.19



ภาพที่ ข.19 การเลือกเมนูหาผลตอบสนองที่ดีที่สุด

17. การกำหนดขอบเขต เพื่อหาค่าของผลตอบสนองที่ดีที่สุด ดังภาพที่ ข.20 และผลลัพธ์ที่ได้ ดังภาพที่ ข.21 และภาพที่ ข.22



ภาพที่ ข.20 การกำหนดขอบเขตในการหาค่าของผลตอบสนองที่ดีที่สุด

Print Out Minitab Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Yield	Maximum	85	100	100	1	1

Global Solution

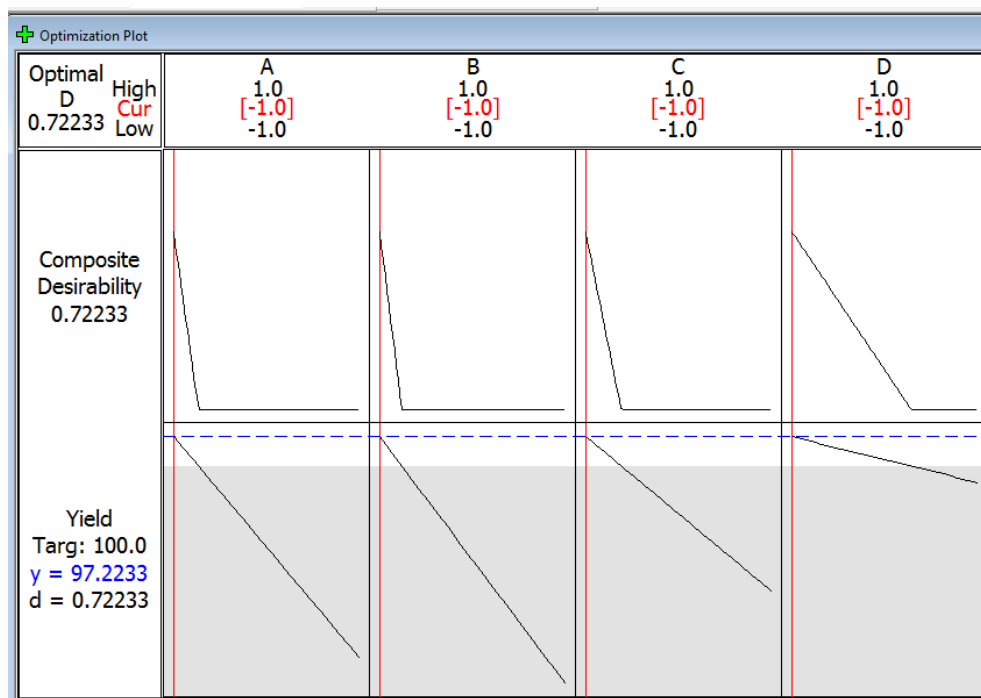
A = -1
B = -1
C = -1
D = -1

Predicted Responses

Yield = 97.2233 , desirability = 0.814889

Composite Desirability = 0.814889

ภาพที่ ข.21 ผลลัพธ์ของค่าตอบสนองที่ดีที่สุด



ภาพที่ ข.22 กราฟผลลัพธ์ของค่าตอบสนองที่ดีที่สุด



ภาคผนวก ค
เอกสารการปฏิบัติงาน



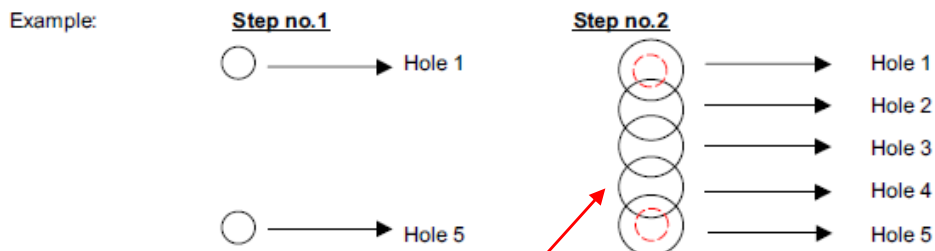
ระเบียบปฏิบัติงาน (Work Instruction)

Sample Company Limited.

WORK INSTRUCTION DIVISION : PCB No. : WI-PE-XXX Title : Outer Layer Manufacturing Capability And Material Guide Line For MI Preparation.	Issue No. : Revision No. : Effective Date : Page
---	---

การกำหนด Feed, Speed ในการเจาะ

Remark : Parameter slot multi - hit to length less than 2 times of diameter
 Drill bit size < 2.00 mm. Use feed 101PM., Speed 20 Krpm (Program key 20.)
 Drill bit size > 2.00 mm. Use feed 15 IPM. (Speed same as parameter 2 table 1).
 8.3.1.8.5 For design slot length less than 2 times of hole diameter Pre-Production must design program for drill multi hit by follow up detail as below.
 1. Slot PTH & NPTH (diameter ≤ 2.00mm.) use Feed 010 Ipm, Speed 20. Krpm and follow up pattern drill slot can see detail picture as below
 1.1 PE will add P- drill form Hole no.1 and hole no.5 by edge hole not allow overlap can see detail as below.



Remark: 1. For Slot plate less than 2 times of diameter PE must design at length enlarge 2 mil from maximum length slot at customer requirement.
 2. Slot NPTH length less than 2 times of diameter PE must design maximum length slot at Customer requirement. SD slot only.
 8.3.1.9 MIN. Slot width 0.50 mm.
 8.3.1.10 Procedure for product to have minimum Annualizing ≤ 5 mil. Pre-Production must reduce drill bit diameter by follow Up Item 1. :

วิธีการกำหนดลำดับ
การเจาะ Multi-hit Slot

ตัวอย่างเอกสารกำกับโปรแกรมในการเจาะ (Drilling Data)

SAMPLE COMPANY LIMITED

Manufacturing Instruction.		Customer : <u>ABC</u>
Division : PCB		Page : <u>of</u>
P/R : <u>SAMPLE TYPE A</u>	Rev.: <u>A00</u>	
P/N : <u>123456789</u>		

FIRST DRILLING VIEW FROM COMP. SIDE

Panel / Stack : 3

Axes : - X + Y

Dimension from stack hole to zero:

X = 00.25

Y = 00.61

Copper Base = 2.0 / 2.0 OZ.

HWTC (Min) = 10.00 mil.

Annular ring before modify (Min) = 8.65 mil.

Holes / set = 1,253 Holes.

T	Symbol	Drill Size		Q'ty	Accumulate	Estimate time (Min)	Remark
		mm	inch				
1	TOO.	3.20	0.1260	17	17	00.27	
2	8 , 54	0.55	0.0217	10474	10,491	73.59	TP.
3	55 , 57	0.95	0.0374	552	11,043	76.90	
4	5 , 6 , 7	1.00	0.0394	25	11,068	77.05	AE. , DH. , VS.
5	56	1.05	0.0413	450	11,518	79.75	
6	58	1.15	0.0453	1116	12,634	86.45	
7	75	1.20	0.0472	120	12,754	87.17	GH.
8	59	1.25	0.0492	48	12,802	87.46	
9	60	1.35	0.0531	102	12,904	88.17	
10	61	1.45	0.0571	24	12,928	88.34	
11	62	1.55	0.0610	96	13,024	89.01	
12	74	1.70	0.0669	72	13,096	89.59	GH.
13	63	1.75	0.0689	24	13,120	89.78	
14	76	1.80	0.0709	12	13,132	89.87	GH.
15	64	1.85	0.0728	96	13,228	90.74	
16	73	2.00	0.0787	18	13,246	90.90	GH.
17	65	2.05	0.0807	48	13,294	91.33	
18	66	2.55	0.1004	6	13,300	91.39	
19	67	2.65	0.1043	66	13,366	91.98	
20	68	3.05	0.1201	6	13,372	92.03	
21	69	3.25	0.1280	12	13,384	92.23	
22	71 , 72	4.05	0.1594	24	13,408	92.63	SL.
23	44	0.80	0.0315	198	13,606	95.01	SD. FL 8.5 MM.
24	41 , 48	1.05	0.0413	840	14,446	103.41	SD* FL 7.0 MM.
25	46 , 53	1.30	0.0512	870	15,316	112.11	SD* FL 7.0 MM.
26	ID.CODE	0.50	0.0197	-	-	-	ID CODE
							JATURON

การกำหนดดอกเจาะสล็อตสั้น
และระบุความยาวเกลียวส่วน



ภาคผนวก ง

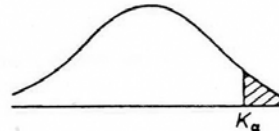
ตารางความน่าจะเป็นแบบนอร์มอล

ตารางความน่าจะเป็นแบบนอร์มอล (Cumulative Standard Normal Distribution) [25]

ตารางที่ 3

ความน่าจะเป็นแบบนอร์มอล Z

$$\int_{K_\alpha}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} dx = \alpha$$







K_α	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
0.0	.5000	.4960	.4920	.4880	.4840	.4801	.4761	.4721	.4681	.4641
0.1	.4602	.4562	.4522	.4483	.4443	.4404	.4364	.4325	.4286	.4247
0.2	.4207	.4168	.4129	.4090	.4052	.4013	.3974	.3936	.3897	.3859
0.3	.3821	.3783	.3745	.3707	.3669	.3632	.3594	.3557	.3520	.3483
0.4	.3446	.3409	.3372	.3336	.3300	.3264	.3228	.3192	.3156	.3121
0.5	.3085	.3050	.3015	.2981	.2946	.2912	.2877	.2843	.2810	.2776
0.6	.2743	.2709	.2676	.2643	.2611	.2578	.2546	.2514	.2483	.2451
0.7	.2420	.2389	.2358	.2327	.2296	.2266	.2236	.2206	.2177	.2148
0.8	.2119	.2090	.2061	.2033	.2005	.1977	.1949	.1922	.1894	.1867
0.9	.1841	.1814	.1788	.1762	.1736	.1711	.1685	.1660	.1635	.1611
1.0	.1587	.1562	.1539	.1515	.1492	.1469	.1446	.1423	.1401	.1379
1.1	.1357	.1335	.1314	.1292	.1271	.1251	.1230	.1210	.1190	.1170
1.2	.1151	.1131	.1112	.1093	.1075	.1056	.1038	.1020	.1003	.0985
1.3	.0968	.0951	.0934	.0918	.0901	.0885	.0869	.0853	.0838	.0823
1.4	.0808	.0793	.0778	.0764	.0749	.0735	.0721	.0708	.0694	.0681
1.5	.0668	.0655	.0643	.0630	.0618	.0606	.0594	.0582	.0571	.0559
1.6	.0548	.0537	.0526	.0516	.0505	.0495	.0485	.0475	.0465	.0455
1.7	.0446	.0436	.0427	.0418	.0409	.0401	.0392	.0384	.0375	.0367
1.8	.0359	.0351	.0344	.0336	.0329	.0322	.0314	.0307	.0301	.0294
1.9	.0287	.0281	.0274	.0268	.0262	.0256	.0250	.0244	.0239	.0233
2.0	.0228	.0222	.0217	.0212	.0207	.0202	.0197	.0192	.0188	.0183
2.1	.0179	.0174	.0170	.0166	.0162	.0158	.0154	.0150	.0146	.0143
2.2	.0139	.0136	.0132	.0129	.0125	.0122	.0119	.0116	.0113	.0110
2.3	.0107	.0104	.0102	.00990	.00964	.00939	.00914	.00889	.00866	.00842
2.4	.00820	.00798	.00778	.00755	.00734	.00714	.00695	.00676	.00657	.00639
2.5	.00621	.00604	.00587	.00570	.00554	.00539	.00523	.00508	.00494	.00480
2.6	.00466	.00453	.00440	.00427	.00415	.00402	.00391	.00379	.00368	.00357
2.7	.00347	.00336	.00326	.00317	.00307	.00298	.00289	.00280	.00272	.00264
2.8	.00256	.00248	.00240	.00233	.00226	.00219	.00212	.00205	.00199	.00193
2.9	.00187	.00181	.00175	.00169	.00164	.00159	.00154	.00149	.00144	.00139

K_α	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
3	.00135	.0*968	.0*687	.0*483	.0*337	.0*233	.0*159	.0*108	.0*723	.0*481
4	.0*317	.0*207	.0*133	.0*854	.0*541	.0*340	.0*211	.0*130	.0*793	.0*479
5	.0*287	.0*170	.0*996	.0*579	.0*333	.0*190	.0*107	.0*599	.0*332	.0*182
6	.0*987	.0*530	.0*282	.0*149	.0*777	.0*402	.0*206	.0*104	.0*523	.0*260

ภาคผนวก จ
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





รวมบทความ
การประชุมวิชาการย้ายงาน
วิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554
IE NETWORK CONFERENCE 2011

20 - 21 ตุลาคม 2554
โรงแรมแอมบาสเตอร์ซิตี จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี

สารบัญ (ต่อ)

MPM27	Preparation of Nanofibers from Natural Ilmenite Mineral by Simple Hydrothermal Method Athapon Simpraditpan Thanakorn Wirunmongkol Sorapong Pavasupree Wisanu Pecharapa	160
MPM28	การเตรียมผงซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ธนกร วิรุฬห์มงคล วิชัย ผดุงศิลป์ พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล ณรงค์ชัย โอเจริญ สรพงษ์ ภาวสุปรีย์	161
MPM29	อิทธิพลความเร็วรอบและความเร็วเดินต่อสมบัติของรอยต่อการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียม 5052 และเหล็กกล้าไร้สนิม 430 นรา บุรีพันธ์ สมชาย วนไทยสงค์ ประจักษ์ อ่างบุญตา บุญส่ง จงกลณี กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	162
MPM30	การเชื่อมต้านทานแบบจุดอลูมิเนียมและเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี ศักดิ์ชัย จันทศรี ไพบุลย์ แยมเพื่อน สมชาย วนไทยสงค์ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	163
MPM31	การขึ้นรูปวัสดุไฮดรอกซิดรอกซิอะปาไทต์จากเปลือกหอยสำหรับเป็นชิ้นส่วนทางการแพทย์ พูนธนะ ศรีสระคู วัสสนัย วรธน์จรรย์ยา	164
MPM32	อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่ออัตราความเครียดโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด ธงชัย เพ็งจันทร์ดี ศิริชัย ต่อสกุล	165
MPM33	การวิเคราะห์ปัจจัยในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง จาตุรนต์ จันทรดี ฐธา คุปต์ชเรีเยอร์	166
MPM34	การออกแบบแม่พิมพ์ปั๊มโลหะด้วยเทคนิคการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล	167
MPM35	อิทธิพลของความเร็วในการทดสอบแรงดึงต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียมเกรด 6063 พงษ์พันธ์ ราชภัคดี เอกรัตน์ โภคสวัสดิ์ ประเสริฐ คงแก้ว ศุภเวทย์ สงคง	168

การวิเคราะห์ปัจจัยในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง
Drilling Factor Analysis on Print Circuit Board by Design of Experiment Technique

จาตุรนต์ จันทรดี^{1*} ณฐา คุปต์ช้อย²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

E-mail: jack_esy@hotmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อแสดงการนำเทคนิคการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการลดสัดส่วนปัญหาคุณภาพในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Print Circuit Board: PCB) ที่พบในโรงงานกรณีศึกษา จากการเก็บข้อมูลการผลิตแผ่น PCB ตัวอย่าง 669 งาน เป็นจำนวน 78,303.08 ตารางฟุต พบปัญหาคุณภาพที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ 12 งาน เป็นจำนวน 977.52 ตารางฟุต ความสูญเสียคิดเป็นมูลค่า 157,845 บาท หรือโดยเฉลี่ย 81.46 ตารางฟุตต่อเดือน หรือ 13,153.75 บาทต่อเดือน ปัญหาที่พบมากที่สุดคือ การเจาะสลอตสั้นรูปร่างเบี้ยวผิดไปจากข้อกำหนด ซึ่งการดำเนินการแก้ไขปัญหานั้นจะนำแผนภูมิพาเรโตมาใช้ในการคัดเลือกปัญหาของกระบวนการเจาะที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ และใช้แผนผังแสดงเหตุและผลในการหาปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อปัญหา แล้วทำการกำหนดและหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ที่ก่อให้เกิดของเสียหรือการทำซ้ำให้น้อยที่สุด โดยใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองแบบเศษส่วนของแฟคทอเรียล (2^{4-1}) ผลการดำเนินงานพบว่าระดับปัจจัยในการเจาะที่เหมาะสมคือ ดอกเจาะสลอตควรใช้ความยาวเกลียวส่วน 7 มิลลิเมตร วิธีกำหนดตำแหน่งการเจาะแบบ In-line ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ 10 นิ้วต่อนาที และความเร็วในการหมุนของดอกเจาะ 20,000 รอบต่อนาที โดยสามารถลดสัดส่วนปัญหาคุณภาพการเจาะแผ่น PCB ที่เกิดจากโปรแกรมเจาะลง 54 เปอร์เซ็นต์

คำหลัก แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การออกแบบการทดลอง การลดปัญหาคุณภาพ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ
การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.จิตรา รู้กิจการพานิช
ผศ.ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย
ผศ.ดร.ประมวล สุธีจาร์วัฒน์

รศ.ดร.ปารเมศ ชูติมา
ผศ.ดร.ดาริชา สุธีวงศ์
ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.ปฎิภาณ จัยเจิม
ดร.สุदारัตน์ วงศ์กั๊วเกียรติ

ดร.ปุ่นณมี สัจจกมล
ดร.สุวิษกรณ์ วิชกุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง
ดร.ศิริรัตน์ หมื่นนวนิชกุล
อ.จันจิรา คงชื่นใจ

ดร.เพ็ญสุตา พันฤทธิคำ
ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ชานนท์ มุลวรรณ
อ.ประภาพรรณ เกษราพงศ์

ดร.ศักดิ์ชาย รักการ
อ.จักรินทร์ กลั่นเงิน

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รศ.ดร.พรเทพ ขอบขยายเกียรติ
ผศ.ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว
ผศ.ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐ์สมบูรณ์
ดร.ปาพจน์ เจริญอภิบาล

รศ.ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล
ผศ.ดร.दनัยพงศ์ เชษฐโชติศักดิ์
ดร.ธนา ราชภูร์ภักดี

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์
ผศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล
ผศ.ดร.สรรัฐดิษฐ์ ชิวสุทธิศิลป์
ผศ.ดร.อรรถพล สมทศุบัติ
ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์
ดร.อนิรุท ไชยจาร์วัฒน์

รศ.ดร.วิมลสิน เหล่าศิริถาวร
ผศ.ดร.วัสสนัย วรรณัจฉริยา
ผศ.ดร.อภิชาติ โสภาคแดง
ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์วงศ์
ดร.วสวัชร นาคเขียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.คมสัน จิระภัทรศิลป์

รศ.ดร.สิทธิชัย แก้วเกื้อกุล

ผศ.ดร. เจริญชัย โขมพัตราภรณ์

ผศ.พจมาน เตียวัฒนรัฐติกาล

ดร.วิศิษฎ์ศรี วิยะรัตน์

อ.ปรีชาญา เพ็ญสุระ

รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒนา

รศ.สันติรัฐ นันสะอาง

ผศ.ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์

ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์

ดร.อิศรทัต พึ่งอัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.วันชัย แผลมหลักสกุล

ดร.กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

ผศ.ดร. สกนธ์ คล่องบุญจิต

ดร. อุดม จันทร์จรัสสุข

ดร.ชุมพล ยวงโย

รศ.ดร. ฤดี มาสุจินท์

ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพัสกุล

ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผศ.พิชัย จันทรมณี

ผศ.วิชาญ ช่วยพันธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

ผศ.ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ดร.นเรศ อินตะวงค์

ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ

ดร.บรรเจิด แสงจันทร์

ผศ.মনবিগা আবিপণ্ড

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รศ.สุชาติ เย็นวิเศษ

ผศ.สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

ผศ.เดช เหมือนขาว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผศ.ดร.พรศิริ จงกล

ดร.ปภากร สุนานนท์

อ.นรา สมัตถภาพงศ์

ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย

ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.จิรรัตน์ อีระวราพฤกษ์

ผศ.ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร

ผศ.ดร.สวัสดิ์ ภาระราช

รศ.ดร.จิรศิริพงษ์ เจริญภักดิ์

ผศ.ดร.วรารัตน์ กังสัมฤทธิ์

ผศ.ดร.เสมอจิตร หอมรสสุนธ์

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผศ.ดร.อุพงษ์ พงษ์เจริญ

ดร.ขวัญนิธิ คำเมือง

ดร.ภาณุ บูรณจารุกร

อ.ศรีสัจจา วิทยศักดิ์

ผศ.ศิษญา สิมารักษ์

ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล

อ.ธนิกันต์ ธงชัย

มหาวิทยาลัยปทุมธานี

ดร. ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร็จ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป

ผศ.ดร.บพิช บุผโซติ

ดร.นิดา ชัยมูล

ผศ.ดร.สุดสาคร อินธิเดช

ดร.อรอุมา ลาสุนนท์

มหาวิทยาลัยมหิดล

รศ.ดร.ดวงพรรณ ศฤงคารินทร์

ดร.จิรพรรณ เลี้ยงโรคาพาธ

ผศ.ดร.วเรศรา วีระวัฒน์

ผศ.ศุภชัย นาทะพันธ์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ผศ.ดร.ธนวรรณ อัศวไพบูลย์

ผศ.สินี สุขกรมใส

อ.ศิลปชัย วัฒนเสย

อ.พรรคพงษ์ แก่นณรงค์

ผศ.ดร.เพียงจันทร์ จริงจิตร

ดร.พิชญ มนัสปิติ

อ.ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า

อ.สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.ดร. กฤษดา พิศลยบุตร

อ.นุกูล อุบลบาน

ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์

อ.นันทวรรณ อ้าเอี่ยม

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รศ.ดร.ธรรณ์ แต้ววัฒนา

ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์

ดร.สิริเดช ชาตินิยม

ผศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล

ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ

ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผศ.ชัยพฤกษ์ อภาเวท

อ.เจษฎา วงศ์อ่อน

ผศ.ประยูร สุรินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.ชัยยุทธ ช่างสาร

ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ผศ.ดร.ธรรมา คุปต์ชูเชียร

ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง

ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด

ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ

ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ

ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์

ผศ.สุรัตน์ ตรีวานพงศ์

รศ.มานพ ต้นตระกูลบัณฑิตย์

ผศ.ดร.จตุรงค์ ลังกาพินธุ์

ผศ.ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์

ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์

ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง

ดร.ระพี กาญจนะ

ดร.สุนนมาลย์ เนียมกลาง



การวิเคราะห์ปัจจัยในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง Drilling Factor Analysis on Print Circuit Board by Design of Experiment Technique

จาดุรนต์ จันทร์ดี¹ ธนฐา กุปตะชัย²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

E-mail: jack_esy@hotmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อแสดงการนำเทคนิคการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการลดสัดส่วนปัญหาคุณภาพในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Print Circuit Board: PCB) ที่พบในโรงงานกรณีศึกษา จากการเก็บข้อมูลการผลิตแผ่น PCB ตัวอย่าง 669 งาน เป็นจำนวน 78,303.08 ตารางฟุต พบปัญหาคุณภาพที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ 12 งาน เป็นจำนวน 977.52 ตารางฟุต ความสูญเสียคิดเป็นมูลค่า 167,845 บาท หรือโดยเฉลี่ย 81.46 ตารางฟุตต่อเดือน หรือ 13,153.75 บาทต่อเดือน ปัญหาที่พบมากที่สุดคือ การเจาะสลอตสั้นรูปร่างเบี้ยวผิดไปจากข้อกำหนด ซึ่งการดำเนินการแก้ไขปัญหานี้จะนำแผนภูมิพาเรโตมาใช้ในการคัดเลือกปัญหาของกระบวนการเจาะที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ และใช้แผนผังแสดงเหตุและผลในการหาปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อปัญหา แล้วทำการกำหนดและหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ที่ก่อให้เกิดของเสียหรือการล่าช้าให้น้อยที่สุด โดยใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองแบบเศษส่วนของแฟคทอเรียล (2^{4-1}) ผลการดำเนินงานพบว่าระดับปัจจัยในการเจาะที่เหมาะสมคือ ดอกเจาะสลอตควรใช้ความยาวเกลียวส่วน 7 มิลลิเมตร วิธีกำหนดตำแหน่งการเจาะแบบ In-line ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ 10 นิ้วต่อนาที และความเร็วในการหมุนของดอกเจาะ 20,000 รอบต่อนาที โดยสามารถลดสัดส่วนปัญหาคุณภาพการเจาะแผ่น PCB ที่เกิดจากโปรแกรมเจาะลง 54 เปอร์เซ็นต์

คำหลัก แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การออกแบบการทดลอง การลดปัญหาคุณภาพ

1. บทนำ

จากข้อมูลในปี พ.ศ.2553 พบว่ามีผู้ผลิตแผ่น PCB สัญชาติญี่ปุ่นและไต้หวัน ที่มีโรงงานผลิตทั้งในประเทศและต่างประเทศ รวมถึงในประเทศไทย มีปริมาณการผลิตสูงถึง 60% ของผลผลิต PCB ทั้งหมดของโลก จากมูลค่าตลาดประมาณ 51 พันล้านเหรียญสหรัฐ [1]

เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่ต้องการผลิตแผ่นอิเล็กทรอนิกส์รุ่นใหม่ ๆ อยู่เสมอด้วยความรวดเร็ว ผู้ผลิต PCB ในประเทศไทยโดยมากเน้นการผลิต PCB สำหรับเครื่องมือสื่อสาร

โทรคมนาคม ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ และเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งมีการแข่งขันทางด้านราคาสูง โดยหากเป็นกลุ่มผู้ผลิต PCB ที่ใช้เทคโนโลยีการผลิตไม่สูงมากนัก และต้องนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศเพราะจะถูกกดดันด้านราคาขาย ขณะที่ผู้ผลิต PCB ที่ใช้เทคโนโลยีสูงและสามารถควบคุมต้นทุนการผลิตได้ดีกว่าเนื่องจากอุตสาหกรรมนี้เน้นด้านคุณภาพและความน่าเชื่อถือมากกว่าการแข่งขันทางด้านราคา จึงส่งผลให้บริษัทผู้ผลิต PCB ที่เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดในการผลิตสูงจำเป็นต้องปรับปรุงเทคนิคการผลิตเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพ (Efficiency) มากที่สุด โดยมีรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) น้อยที่สุด และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามข้อกำหนด

การเจาะแผ่น PCB เป็นกระบวนการหลักอย่างหนึ่งในการผลิต ซึ่งมีความซับซ้อนยุ่งยากและมีขั้นตอนย่อยจำนวนมาก ซึ่งต้องใช้เครื่องมือในการช่วยในการผลิต (Tooling Support) นั่นคือ CNC Program ในการออกแบบโปรแกรมสำหรับเจาะแผ่น PCB จาก CAD/CAM ของแต่ละผลิตภัณฑ์ ในการเขียนโปรแกรมจะทำให้ได้อย่างอิงจากแบบของลูกค้า (Customer Drawing) ภายใต้ความเหมาะสมกับความสามารถในการผลิต (Process Capability)

จากข้อมูลผลิตภัณฑ์ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ตัวอย่างที่ทำการศึกษาในปี 2553 พบว่ามีปริมาณโปรแกรมเจาะที่ถูกเขียนสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่ 669 งาน มีปัญหาการเจาะสลอตแล้วรูปร่างเบี้ยวผิดไปจากข้อกำหนดลูกค้า (Multi-hit Slot out of shape) จำนวน 9 งาน คิดเป็น 45 เปอร์เซ็นต์ จากปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมด 20 งาน ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่ของปัญหาการเจาะแผ่น PCB ตัวอย่าง เนื่องมาจากไม่ได้มีการแก้ไขให้ถูกต้องตามหลักวิชาการอย่างแท้จริง เป็นเพียงการแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า และขาดมาตรฐานในการปฏิบัติงาน สิ่งเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหามากมายเป็นวงจรที่เกิดขึ้นซ้ำ เช่น ของเสีย (Scrap) การผลิตที่ล่าช้า ชิ้นงานที่ผลิตมีจำนวนไม่พอส่งมอบ และต้นทุนในการผลิตสูง ดังนั้นการลดปัญหาในการผลิต จาก Tooling ต้นแบบ โดยเฉพาะการจัดทำโปรแกรมเจาะเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อตรง ทำให้ต้องทำการศึกษา แก้ไขก่อนการได้รับคำสั่งซื้อปริมาณมาก เพราะอาจจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิต เกิดค่าใช้จ่ายทางคุณภาพขึ้น ทำให้ผู้วิจัยต้องการที่จะใช้หลักทาง



วิศวกรรมศาสตร์ศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปัญหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และลดค่าใช้จ่ายคุณภาพที่เกิดขึ้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องมือควบคุมคุณภาพ (7 QC tools)

กิตติศักดิ์ [2] Thomas [3] และจักรกฤษณ์ [4] กล่าวว่าคุณภาพถือว่าเป็นจุดมุ่งหมายสูงสุด และเป็นหัวใจของการผลิต เพราะเมื่อใดที่องค์กรผลิตสินค้าที่ไม่ได้มาตรฐาน ปัญหาต่างๆ ก็จะมาตามมามากมาย เครื่องมือควบคุมคุณภาพทั้ง 7 ประกอบด้วย 1) ไบโตรตรวจสอบ 2) แผนภูมิพาเรโตใช้สำหรับแสดงปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยเรียงลำดับปัญหาเหล่านั้นตามความถี่ที่พบจากมากไปหาน้อย 3) แผนผังแสดงเหตุและผล แสดงให้เห็นสาเหตุที่แท้จริงในการทำให้เกิดปัญหา โดยแจกแจงแบ่งเป็น 4 ประการ คือ คน (Man) เครื่องจักร (Machines) วิธีการ (Method) วัสดุ (Material) 4) กราฟ 5) ฮิสโตแกรม 6) แผนผังการกระจาย 7) แผนภูมิควบคุม

2.2 การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลอง เป็นเทคนิคที่ให้ผลที่มีความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ [5]

ปารเมต [6] และซีวิน [7] กล่าวว่า การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล หมายถึงการทดลองถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 ครั้ง (Replicate) จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล สามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้ มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่มี n replicate จะเกี่ยวกับการตั้งเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ แล้ววิเคราะห์ส่วนตกค้าง (residue) เพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การขัดเกลาแบบจำลองเกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ทั้งนี้ เนื่องจากพบว่าแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอ หรือสมมติฐานที่กำหนดให้มันไม่ถูกต้องอย่างรุนแรง เพื่อจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยจะสร้างกราฟและผลหลัก (Main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) ขึ้น

สำหรับการทดลองแบบ 2^{k-1} Fractional Factorial Design หมายถึง เมื่อออกแบบเสร็จจะได้จำนวนการทดลองเท่ากับการทดลองเต็มรูปแบบของการออกแบบ เมื่อจำนวนปัจจัยน้อยกว่าอยู่ 1 ตัว (k-1) หรือจำนวนดำเนินการจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบนั่นเอง เราเอาหลักการที่ง่ายอันดับปัจจัยร่วมสูงเท่าใดก็จะมีค่าน้อยเท่านั้นและจะเอา

ปัจจัยหลักบางตัวเข้าแทนที่ปัจจัยร่วมดังกล่าว ตัวอย่างเช่นมีปัจจัย 4 ตัวคือ A, B, C, D ถ้าออกแบบโดยใช้วิธี 2^k Full Factorial จะมีจำนวนรอบการทดลองหรือดำเนินการทั้งหมด 16 การทดลอง แต่การทดลองแบบ 2^{k-1} จะมี 8 การทดลอง

ศรีโร [8] กล่าวว่า ในกรณีที่ทำการทดลองเศษส่วนแฟกทอเรียล เป็นการทดลองไม่ครบ (Not Full) จะมีปรากฏการณ์หนึ่งเกิดขึ้นเสมอ ซึ่งจะเรียกว่า อันตรกิริยาของคู่แฝดแฝง (Aliases) หรือตำราบางเล่มเรียกว่า คอนฟาวด์ (Confound) แปลว่าปนกัน หรือติดกัน จนแยกกันไม่ออก ซึ่งจะมีผลให้ Effect ที่ได้เป็นค่าที่ปนกันหรือเรียกว่ามี โครงสร้างคู่แฝดแฝง (Aliases Structure) ทำการแยก Aliases โดยพิจารณาจากกฎคือ 1) ถ้าปัจจัยหลัก (Main Effect) เป็น Aliases กับ 3-Way Interaction ขึ้นไปให้ถือว่า Effect นั้นเป็นของปัจจัยหลัก 2) ถ้าปัจจัยร่วม (Interaction) เป็น Aliases กับ Interaction ที่มี Order ไม่เท่ากัน ให้ถือว่า Effect นั้นเป็นของ Interaction ที่มี Order น้อยกว่า 3) ถ้าปัจจัยร่วม (Interaction) เป็น Aliases กับ Interaction ที่มี Order เท่ากัน ให้ปฏิบัติดังนี้

ก.ถ้ามีความรู้ก่อนหน้าจากการแยก Aliases ของ Main Effect เพียงพอ ก็สามารถแยกได้

ข.ถ้ามีความรู้ก่อนหน้าไม่เพียงพอ ก็ไม่สามารถแยก Aliases ได้ ต้องทำการทดลองเพิ่มอีก 1 เท่าของการทดลองเดิม ถ้าปัจจัยหลัก (Main Effect) เป็น Aliases กับ Interaction 2-Factor จะไม่สามารถแยก Effect ได้ (เรียกว่า Resolution III) ซึ่งไม่ควรใช้ถ้าไม่จำเป็น เช่น ถ้ามี factor; k = 4 เราทำการทดลองขั้นต้นไป $2^{4-1} = 8$ การทดลอง แต่เกิดปรากฏการณ์ Aliases และมีความรู้ก่อนหน้าไม่เพียงพอ ที่จะแยก Effect ได้ จึงต้องทำการทดลองเพิ่มเดิมอีก 8 การทดลอง รวมกับการทดลองเดิมแล้ว จะมีการทดลองทั้งหมด = 8 + 8 = 16 การทดลอง ซึ่งเท่ากับเมื่อทำการทดลองแบบ Full Factorial นั่นเอง

2.3 การทบทวนวรรณกรรมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบการทดลองหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัญหาได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมีผู้วิจัยหลายท่านได้นำหลักการออกแบบการทดลอง เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาในอุตสาหกรรมการผลิต ลดของเสีย การปรับปรุงกระบวนการ และการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต เช่น การใช้ 2^2 Factorial Design ในการลดปัญหาการโค้งงอของการผลิตแผงวงจรแบบอ่อน สามารถลดค่าใช้จ่ายในการแก้ปัญหาได้ 2,691,889 บาทต่อปี [9] การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในกระบวนการอบ ลดเวลาในการผลิต 70 เปอร์เซ็นต์ ลดค่าใช้จ่ายลง 30,122.73 บาทต่อเดือน [10] การศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วและความเที่ยงตรงที่ส่งผลต่อ Yield ในการผลิตเครื่องจักรแต่ละชนิด [11] การใช้ 2^3 Factorial Design ในการปรับปรุงกระบวนการล้างฟิล์มในผลิตแผงวงจรแบบอ่อน โดยลดของเสียจาก 1.63 เปอร์เซ็นต์ ลงเหลือ 1.33 เปอร์เซ็นต์ [12] การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของภาพพิมพ์ในการผลิตเครื่องพิมพ์ ทำให้อัตราส่วนเครื่องภาพพิมพ์ไม่ผ่านคุณภาพนั้นลดลงได้ร้อยละ 60

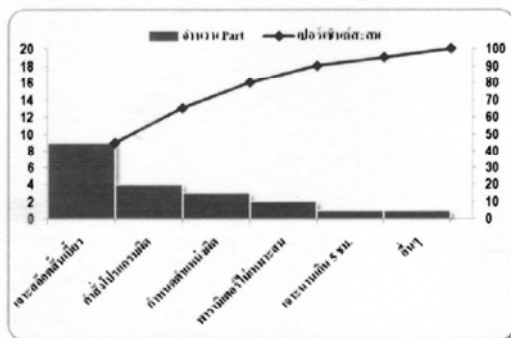


[7] การลดของเสียจากกระบวนการแบบแมชชีนนิ่งของการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ สามารถลดของเสียได้ 79.46 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็น 207,615 บาทต่อเดือน [13] การวิเคราะห์ปัจจัยในการ Rework Lead-free บนพื้นผิวแผงวงจรแบบย้อนพบปัจจัยที่มีนัยสำคัญเพียงปัจจัยเดียวคือ Seven-zone Convection Reflow ที่ให้ Yield 100 เปอร์เซ็นต์ [14] เป็นต้น อีกทั้งมีการนำ 2^{k-1} Fractional Factorial Design มาประยุกต์ใช้ในการผลิตหลายประเภท เช่น การใช้ 2^{5-1} Fractional Design ในการลดอัตราของเสียจากการผลิตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในการแก้ไขทำให้ไม่พบปัญหา Slider หลุดจาก Suspension อีก [15] การใช้ 2^{6-1} Fractional Design ในการปรับปรุงการพิมพ์เฟสบนกล่องบรรจุภัณฑ์ สามารถลดของเสียได้ 76.49 เปอร์เซ็นต์ [16] และการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อ Thermal Via ในการลด PCB Thermal Resistant พบว่าในการออกแบบวงจรลด Thermal Via Pitch Size เพิ่มความหนา Via Cu Barrel และเพิ่มจำนวนของ PCB Metalized Cu Layers [17] การใช้ 2^{7-4} Fractional Design ในการวิเคราะห์ตัวแปรในกระบวนการพิมพ์ PCB พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแรง Shear บนแผ่น PCB มากที่สุดคือ Curing Temperature และ Curing Time [18]

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

3.1 คัดเลือกปัญหาที่เกิดจากโปรแกรมเจาะจากแผนภูมิพาเรโต เพื่อกำหนดปัญหาหลักของการทำโปรแกรมเจาะที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตมากที่สุด ดังในรูปที่ 1

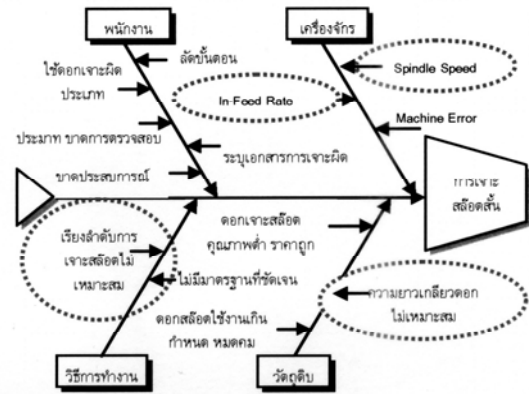


รูปที่ 1 แผนภูมิพาเรโตของปัญหาที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ

จากแผนภูมิพาเรโตจะพบว่าปัญหาการเจาะสล็อตสั้นแล้วรูปร่างเบี้ยวผิดไปจากข้อกำหนดลูกค่า ซึ่งเป็นปัญหาด้านคุณภาพการเจาะที่พบปัญหามากที่สุด

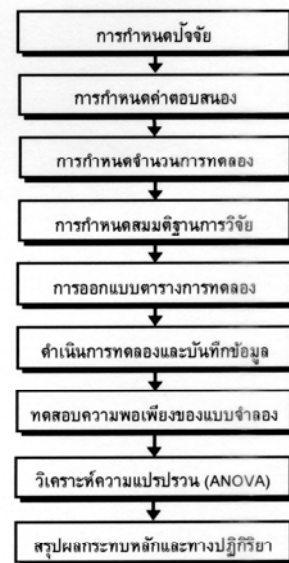
3.2 วิเคราะห์ปัจจัยโดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ดังรูปที่ 2 พบว่าสาเหตุของปัญหาที่พบมาจาก พนักงาน เครื่องจักร วิธีการ และวัตถุดิบ เมื่อทำการวิเคราะห์จากเหตุและผลที่สามารถควบคุมได้ สามารถคัดกรองปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาคือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ (In-Feed Rate) ความเร็วในการหมุนของหัวเจาะ (Spindle Speed Rate) วิธีการ

สร้างลำดับการเจาะสล็อต (Program Method) และความยาวเกลียวสว่านของดอกสล็อต (Flute Length) ที่ใช้ในโรงงาน



รูปที่ 2 แผนผังแสดงเหตุและผลของปัญหาที่เกิดจากโปรแกรมเจาะ

3.3 การออกแบบการทดลอง ในการวิจัยนี้จะทำการคัดกรองปัจจัยทุกตัวในการออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial Design โดยใช้โปรแกรม Minitab 15 ด้วยระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 95% จึงกำหนดขั้นตอนการวางแผนออกแบบการทดลองดังรูปที่ 3 ดังนี้



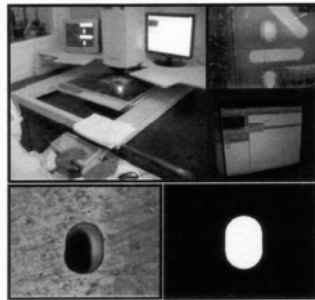
รูปที่ 3 ขั้นตอนการวางแผนออกแบบการทดลอง

1) การกำหนดจำนวนปัจจัยของปัญหาที่นำมาวิเคราะห์ จากแผนผังแสดงเหตุและผลดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งการวิจัยนี้จะมี 4 ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยจะกำหนดให้มี 2 ระดับ ของการทดลอง

2) กำหนดค่าตอบสนอง (Response) เป็นสัดส่วนของเสีย



แบบจำนวนนับ (Attribute Data) เชิงคุณภาพ (Qualitative) ซึ่งจะระบุได้ว่าแผ่น PCB นี้จะเสล็ดแล้วรูปร่างเสล็ดนั้นยอมรับ (Accept) หรือไม่ยอมรับ (Reject) ดังรูปที่ 4 จะใช้มาตรฐานการตรวจสอบจากฝ่ายตรวจสอบคุณภาพของโรงงานตัวอย่าง ค่าตอบสนองที่ใช้จึงมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์สัดส่วนจำนวนเสล็ดที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ (Yield)



รูปที่ 4 การใช้เครื่อง Optical Measurement วัด Multi-hit Slot

3) กำหนดจำนวนการทดลอง (Replicate) ที่เหมาะสมเพื่อ งานตัวอย่างที่ใช้ในวิจัยนี้ จะทำการเลือกมาออกแบบการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (Replicate) มาจาก 3 Part Number ที่พบปัญหาเสล็ดสั้น เบี้ยวในปี 2553 เป็นตัวแทนในการทดลอง ซึ่งจะมีขนาด 0.80 1.40 และ 1.55 มิลลิเมตร

4) ทำการกำหนดสมมติฐานการทดลองจากทั้ง 4 ปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วมระดับ 2 ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการเจาะเสล็ด

5) ออกแบบตารางการทดลองจาก Minitab 15 และทำการเขียนโปรแกรม NC Drill โดยใช้ CAD/CAM ตามพารามิเตอร์ใน ตารางการทดลอง แล้วเตรียมดอกเจาะเสล็ด

6) ทำการทดลองจะใช้แผ่นบอร์ด 3 แผ่นต่อหัว (3 Panel / Stack) จำนวน 6 หัวเจาะ รวมใช้แผ่นบอร์ด 6x3 = 18 Panel / Cycle เมื่อทำการทดลองทั้งหมด 24 Cycle จะใช้แผ่นบอร์ดในการ วิจัยทั้งหมด 18x24 = 432 Panel จะเห็นได้ว่า การออกแบบการ ทดลองแบบ Fractional Factorial Design จะช่วยให้เรา ประหยัดเวลา และแผ่นบอร์ดทดลองได้ครั้งหนึ่ง ดำเนินการเจาะ งานตามโปรแกรมที่ได้ออกแบบการทดลอง บันทึกผลค่าตอบสนอง

7) นำผลการทดลองที่ได้มาสร้างกราฟจาก Minitab 15 เพื่อ ทดสอบความพอเพียงของแบบจำลอง แล้วทำการวิเคราะห์

8) วิเคราะห์ความแปรปรวนจากตาราง ANOVA และเลือก ระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าความพึงพอใจ (Desirability) เข้าใกล้ 1 มาก ที่สุด ซึ่งจะสามารถพยากรณ์ (Response Optimizer) ได้ค่า Y ที่ เหมาะสม จากกราฟทดสอบความเหมาะสมระดับปัจจัย

9) ทำการสรุปผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม

4. ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 กำหนดระดับความมีนัยสำคัญของแต่ละปัจจัยที่ใช้ใน การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การกำหนดระดับปัจจัยหลัก (Main Effect) ของปัญหา

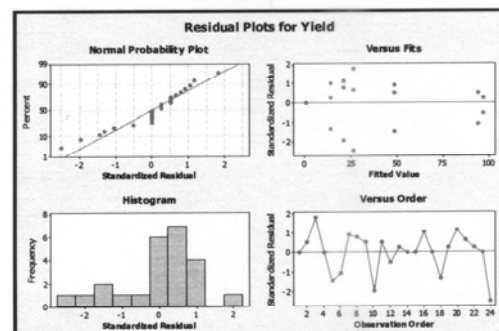
Main Effect	Level		Unit
	Low (-)	High (+)	
A: Flute Length	7.00	8.50	mm.
Slot Drill Bit			
B: Program Method	In-Line	End-Point	-
C: In-Feed Rate	10	44	ipm
D: Spindle Speed	20	90	Krpm

4.2 จาก 4 ปัจจัยหลักประกอบด้วยปัจจัยละ 2 ระดับ และทำ การทดลองซ้ำ (Replicates) 3 ครั้ง จากการออกแบบการทดลอง แบบ 2⁴⁻¹ ได้ผลการทดลองจำนวน 24 ครั้ง บันทึกในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดลอง 2⁴⁻¹ ที่กำหนดความสัมพันธ์ I = ABCD

Run	Treatment	Yield (Replicate)						
		A	B	C	D			
	Combine				0.8	1.4	1.55	
1	(1)	-1	-1	-1	-1	100	100	91.7
2	ad	1	-1	-1	1	83.3	100	100
3	bd	-1	1	-1	1	0	45.8	33.3
4	ab	1	1	-1	-1	0	25	16.7
5	cd	-1	-1	1	1	33.3	58.3	54.2
6	ac	1	-1	1	-1	0	0	0
7	bc	-1	1	1	-1	0	0	0
8	abcd	1	1	1	1	0	29.2	33.3

4.3 การทดสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) วารูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ต้องเป็นไปตามหลักการ $\epsilon_i \sim NID(0, \sigma^2)$ คือ Residuals มีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และ σ^2 มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้



รูปที่ 5 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองจาก Minitab 15



จากรูปที่ 5 กราฟที่ 1 ซ้ายบน เป็นการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของ Residuals มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ข้อมูลอยู่ในแนวเส้น ทำให้ประมาณได้ว่า Residuals มีการแจกแจงแบบปกติ กราฟที่ 2 ซ้ายล่าง ฮิสโตแกรม จะมีลักษณะเป็นทรงระฆังคว่ำ หรือค่า Residual กระจายตัวแบบปกติเหมือนกราฟแรก กราฟที่ 3 ขวาบน เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) จากแผนภูมิการกระจายของค่าความคาดเคลื่อนของค่า Residual เทียบกับ Fitted Value พบว่าการกระจายตัวของ Residual มีรูปแบบที่เป็นอิสระ มีการกระจายแบบสุ่มทั้งทางด้านบวกและด้านลบสม่ำเสมอๆกัน ข้อมูลมีความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มไม่แตกต่างกัน กราฟที่ 4 ขวาล่าง คือลำดับต่อต้านส่วนตกค้าง (Residual Plot Versus the Order) ค่าความคาดเคลื่อนของข้อมูลเป็นกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน การกระจายของจุดในด้านบวกและลบที่มีความสมดุลกัน ใช้ร่วมกับกราฟที่ 3 เพื่อตรวจสอบความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มมีค่าคงที่

4.4 การวิเคราะห์การทดลองจากโปรแกรม Minitab 15

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง
Estimated Effects and Coefficients for Yield

Term	Effect	Coef.s	SE Coef.	T	P
Const.		37.67	2.650	14.22	0.000
A	-10.76	-5.38	2.650	-2.03	0.059
B	-44.79	-22.40	2.650	-8.45	0.000
C	-40.63	-20.31	2.650	-7.67	0.000
D	19.79	9.89	2.650	3.73	0.002
A*B	14.93	7.47	2.650	2.82	0.012
A*C	-3.12	-1.56	2.650	-0.59	0.564
A*D	30.90	15.45	2.650	5.83	0.000

S = 12.9824 PRESS = 6067.54

R-Sq = 92.25% R-Sq(pred) = 82.57% R-Sq(adj) = 88.86%

ตารางที่ 4 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Analysis of Variance for Yield

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	24985.1	24985.1	6246.3	37.06	0.000
2-Way Interactions	3	7126.4	7126.4	2375.5	14.09	0.000
Residual Error	16	2696.7	2696.7	168.5		
Pure Error	16	2696.7	2696.7	168.5		
Total	23	34808.2				

จากการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยและการแยกกลุ่มแฝดแฝงสามารถสรุปได้ดังนี้ โดยพิจารณาถึงปัจจัยร่วมระดับ 2 เท่านั้น

1) ปัจจัย B มีผลต่อคุณภาพการเจาะสลิตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

2) ปัจจัย C มีผลต่อคุณภาพการเจาะสลิตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์โครงสร้างคู่แฝดแฝง (Alias Structure)

Alias Structure		ผลลัพธ์การแยก Alias
I	A*B*C*D	
A	B*C*D	A
B	A*C*D	B
C	A*B*D	C
D	A*B*C	D
A*B	C*D	C*D
A*C	B*D	B*D
A*D	B*C	B*C

3) ปัจจัย D มีผลต่อคุณภาพการเจาะสลิตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

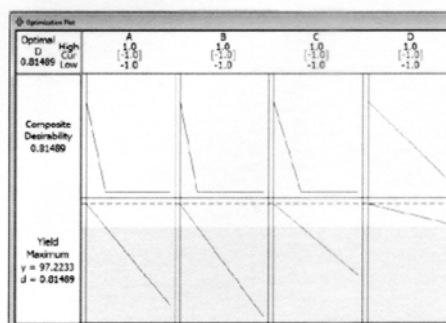
4) ปัจจัยร่วม A, B มีผลต่อคุณภาพการเจาะสลิตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

5) ปัจจัยร่วม A, D มีผลต่อคุณภาพการเจาะสลิตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

6) ปัจจัยร่วม C, D มีผลต่อคุณภาพการเจาะสลิตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

7) ปัจจัยร่วม B, D มีผลต่อคุณภาพการเจาะสลิตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

8) ปัจจัยร่วม B, C มีผลต่อคุณภาพการเจาะสลิตของแผ่น PCB อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05



รูปที่ 6 การกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสม (Optimization Plot)

ตารางที่ 6 การควบคุมระดับปัจจัยที่เหมาะสม

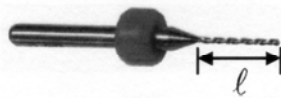
Main Effect	Level	Symbol	Unit
A: Flute Length	7.00	-1	mm.
B: Program Method	In-Line	-1	-
C: In-Feed Rate	10	-1	ipm
D: Spindle Speed	20	-1	Krpm



4.5 การวิเคราะห์ Response Optimizer เพื่อกำหนดระดับของปัจจัย ถ้าต้องการผลตอบแทนที่ดีที่สุด ในการทดลองการเจาะสล็อตสั้น จากรูปที่ 6 พบว่า เมื่อต้องการค่า Yield มากที่สุด จะกำหนดค่าที่ต้องการต่ำที่สุดที่ 85 เปอร์เซ็นต์ และค่าเป้าหมายที่ 100 เปอร์เซ็นต์ คือได้แผ่น PCB ที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพมากที่สุดที่ 97.22 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าความน่าปรารถนา (Desirability: D) มากที่สุด จะต้องควบคุมปัจจัยหลักตามสภาพการทำงานจริงตามที่กำหนดในตารางที่ 6

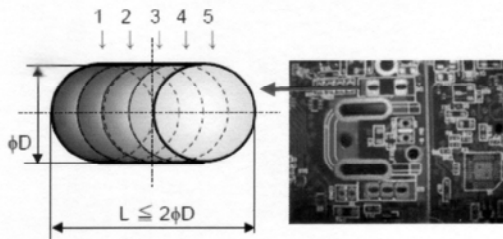
จากผลการทดลองผู้วิจัยนำผลการทดลองมากำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาแบ่งออกแต่ละปัจจัยดังนี้

1) ปัจจัย A ความยาวเกลียวสว่าน (Flute Length: l) ในการกำหนดโรงงานที่มีการเจาะสล็อตสั้นชิ้นงานได้รอบการเจาะละ 3 แผ่นต่อหัวเจาะ และใช้ดอกเจาะสล็อต (SD: Slot Drill) ที่มี Flute Length 7 มิลลิเมตรเท่านั้น ดังรูปที่ 7 สำหรับงานที่มีสล็อตยาวที่ไม่เกิดปัญหาสล็อตเบี้ยวให้ใช้ดอกเจาะสล็อตที่มี Flute Length 8.5 มิลลิเมตร สามารถขึ้นเจาะตามคู่มือการผลิตปกติ



รูปที่ 7 ระยะเกลียวสว่านดอก Slot Drill ที่ใช้กับเครื่อง CNC

2) ปัจจัย B วิธีการเขียนโปรแกรมเจาะ (Method) กำหนดให้ลำดับการเจาะแบบ In-line ดังรูปที่ 8 สำหรับงานที่มีสล็อตสั้นกว่า 2 เท่าของขนาดดอก (Less than 2 Time of Diameter Drill Bit) โดยกำหนดตำแหน่งแต่ละ Hit ในซอฟต์แวร์ CAD/CAM ก่อนที่จะใช้ฟังก์ชัน Auto Drill Manager ทำการ Output เป็น NC File และสำหรับงานที่มีสล็อตยาวกำหนดให้ใช้วิธีการแบบ End Point ปกติ



รูปที่ 8 วิธีการกำหนดลำดับการเจาะสล็อตสั้นแบบ In-line

3) ปัจจัย C In-Feed Rate กำหนดให้มีการควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ ในการเจาะสล็อตสั้นอยู่ในระดับต่ำที่ 10 ipm ทุกขนาดดอก โดยกำหนดไว้ในส่วน Header ของโปรแกรม

4) ปัจจัย D Spindle Speed จะกำหนดความเร็วการหมุนของหัวเจาะ ให้ดอกเจาะสล็อตหมุนที่ความเร็วต่ำประมาณ 20 Krpm หรือประมาณ 20000 รอบต่อนาที โดยกำหนดในส่วน Header ของโปรแกรมคู่กับ In-Feed Rate

4.6 การทดลองเพื่อยืนยันผล เป็นการทดลองเพื่อยืนยันผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมา โดยเก็บข้อมูลจากการควบคุมปัจจัยในการทำงานของการเจาะแผ่น PCB ในโรงงานกรณีศึกษาตัวอย่าง

ตารางที่ 7 ข้อมูลผลการทดลองเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์

รายละเอียด (ตารางฟุต)	ก่อนการปรับปรุง		หลังการปรับปรุง	
	12 เดือน	เฉลี่ย	3 เดือน	เฉลี่ย
งานตัวอย่าง	78,303	6,525	20,663	6,888
Defect	977	81	119	40
มูลค่า Defect	157,845	13,154	19,194	6,398
คิดเป็น	1.25%	1.25%	0.58%	0.58%

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ เมื่อผู้วิจัยได้กำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมได้แล้ว จึงทำการปรับปรุงการทำงานจาก 4 M ดังต่อไปนี้

1) วัตถุดิบ (Material) ในที่นี้หมายถึง ดอกสำหรับเจาะสล็อต เมื่อช่างเทคนิคพบว่ามันงาใด ที่มีสล็อตสั้น ให้กำหนดดอกเจาะลงในเอกสารควบคุมการเจาะว่า "FL 7.00 mm" เพื่อให้พนักงานงานใช้ดอกเจาะชนิดที่กำหนดเท่านั้น

2) เครื่องจักร (Machine) ในการเขียนโปรแกรมเจาะจะกำหนด In-Feed Rate และ Spindle Speed ใน Program Header ต่อท้ายจากคำสั่ง Tool Diameter เช่น "T02C.0394F010S020" หมายถึงให้เครื่องเจาะ CNC จับ Tool ที่ 2 จับดอกเจาะขนาด 39.4 mil, In-feed rate 10 ipm, Spindle speed 20 Krpm

3) วิธีการทำงาน (Method) เมื่อ Drawing ลูกค้ากำหนดให้มีสล็อตสั้นในแผ่น PCB ช่างเทคนิคต้องทำการกำหนดลำดับในการเจาะใน CAD/CAM เป็นแบบ In-line

4) พนักงาน (Man) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านเกณฑ์การควบคุมคุณภาพ จึงได้กำหนดระเบียบการปฏิบัติงานดังนี้

ก. ประชุมทีมช่างเทคนิคที่เขียนโปรแกรม ชี้แจงถึงปัญหาคูณภาพที่พบและความสำคัญของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้รับการยอมรับจากที่ผ่านมา เพื่อเป็นการย้ำให้พนักงานตระหนักและเข้าใจปัญหาคูณภาพที่อาจก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับลูกค้า

ข. ทำการปรับปรุงคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Instruction) ในการทำงานให้เหมาะสมตามระดับปัจจัยข้างต้น แล้วทำการอบรมช่างเทคนิคเขียนโปรแกรมถึงวิธีการทำงานที่ปรับปรุง พร้อมทั้งออกแบบฟอร์ม (Checklist form) ให้พนักงานตรวจสอบโปรแกรมด้วยตนเองให้ถูกต้อง

ค. กำหนดให้ผู้ควบคุมการปฏิบัติงานทำการตรวจสอบโปรแกรมซ้ำอีกครั้ง (Re-Audit) โดยเฉพาะตำแหน่งที่มีสล็อตสั้นว่าพนักงานยังคงปฏิบัติงานตามวิธีการปฏิบัติงานที่กำหนดไว้ ก่อนปล่อยโปรแกรมเจาะงานจริงเข้าสู่ระบบ

ง. ทำการประเมินและทดสอบความเข้าใจของพนักงานทุกคน เพื่อเป็นการเฝ้าระวังและติดตามกระบวนการ



5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ สามารถสรุปได้คือ ข้อมูลก่อนการปรับปรุงระยะเวลาตั้งแต่เดือน ม.ค. - ธ.ค. 2553 มีปริมาณแผ่น PCB ตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ 977.52 ตารางฟุต เฉลี่ย 81.46 ตารางฟุตต่อเดือน ที่เป็นของเสีย (Scrap) คิดเป็นมูลค่า 13,153.75 บาทต่อเดือน หรือ 1.248 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณที่ผลิตงานตัวอย่างทั้งหมด เมื่อทำการปรับปรุงวิธีการและเก็บข้อมูลในระยะเวลา 3 เดือน ตั้งแต่เดือน มี.ค.-พ.ค. 2554 ปริมาณแผ่น PCB ตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพอยู่ที่เฉลี่ย 39.62 ตารางฟุตต่อเดือน ที่เป็นของเสีย (คิดเป็นมูลค่า 6,398.17 บาทต่อเดือน หรือ 0.575 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณที่ผลิตงานตัวอย่างทั้งหมด ซึ่งพบว่าปัญหาการเจาะสลอตสั้นเบี้ยวไม่พบอีกเลย แต่ของเสียที่เกิดมาจากปัญหาอื่นๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับปรุงระดับปัจจัยให้เหมาะสมแล้ว ปัญหาคุณภาพการเจาะที่เกิดจากโปรแกรมเจาะลดลงประมาณ 54 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าบรรลุวัตถุประสงค์งานวิจัย และสามารถนำหลักการวิจัยนี้ไปแก้ปัญหาการผลิตอื่นต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hayao Nakahara, 2010. PCB World Production and Market. NTI Digest. March, 2010. N.T. Information, Ltd.
- [2] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2540. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [3] S. Thomas Foster, Jr. 2001. Managing Quality: An Integrative Approach. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey. USA.
- [4] จักรกฤษณ์ ภูพานเพชร และณฐา คุปต์ชะเอียง, 2552. การลดข้อร้องเรียนจากลูกค้าและค่าใช้จ่ายคุณภาพด้วยเครื่องมือควบคุมคุณภาพยุคใหม่. การประชุมวิชาการและการแสดงผลงานทางวิชาการ พระจอมเกล้าลาดกระบัง. 31 สิงหาคม 2552.
- [5] กานดา พูนลาภทวี, 2539. สถิติเพื่อการวิจัย. สำนักพิมพ์ฟิลิสส์เซ็นเตอร์. ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [6] ปรมศ ชูติมา, 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- [7] ชีวิน จันทร์สุนทร และณฐา คุปต์ชะเอียง, 2551. การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของภาพพิมพ์ กรณีศึกษาการทดสอบขั้นสุดท้ายของการผลิตเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏจันทรบุรี ปี 6 ฉบับที่ 12 : 49-57.
- [8] ศรีโร จารุกัญญา, 2553. เอกสารประกอบรายวิชาการออกแบบการทดลอง (DOE). ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [9] ศนิรัช ทับทิมทอง, 2551. การปรับปรุงกระบวนการผลิตแผงวงจรแบบอ่อน เพื่อลดปัญหาการโค้งงอ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [10] ดาวินทร์ มานะจิตต์, 2547. การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการปรับปรุงขั้นตอนการผลิต กรณีศึกษา: บริษัท CKL Electronics Co., Ltd. (Public). การประชุมวิชาการ 40 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ เรื่อง นวัตกรรมทางวิศวกรรมสำหรับการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [11] Tomaz Brajlilh, Bogdan Valentan, Joze Balic, Igor Drstvensek, 2010. Speed and Accuracy Evaluation of Additive Manufacturing Machines. Rapid Prototyping Journal, Vol. 17 Iss: 1, Emerald: 64-75.
- [12] ยรรยง เตชะวิจิตร, 2550. การลดของเสียจากกระบวนการล้างฟิล์มป้องกันการชุบทองของแผงวงจรแบบอ่อนด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต การจัดการอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [13] ชูติมา ราชพิทักษ์, 2551. การลดของเสียจากกระบวนการผลิตแบบแมชชีนนิ่ง โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษา อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [14] Chennagiri, G. Iyer, S.S. Srihari, K.H., 2011. Rework of Lead-Free Area Array Packages Assembled on Ultrathin Flexible Substrates. Components Packaging and Manufacturing Technology Volume 1 Issue 4, April 2011. IEEE: 611-621
- [15] ปิ่นศรีชนิด เต็มตุ้ม, 2551. "การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อลดอัตราของเสียจากการผลิตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์: กรณีศึกษา". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [16] เสาวภา แซ่ซัน, 2549. "การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการพิมพ์ออฟเซตบนกล่องบรรจุภัณฑ์โดยการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษา โรงงานผลิตกล่องบรรจุภัณฑ์ประเภทกระดาษ". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [17] Asghari, Tony A. 2006. PCB Thermal Via Optimization using Design of Experiments. The Tenth Intersociety Conference May 30 - June 2, 2006. IEEE: 224-228.
- [18] Salam, B. Gan, H.Y. Lok, B.K. Albert. LCW. 2009. Optimizing Manufacturing Process of Printed Electronics.

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554
20-21 ตุลาคม 2554



The 11th Electronics Packaging Technology Conference.
IEEE: 163-167.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายจตุรนต์ จันทร์ดี
วัน เดือน ปีเกิด	30 มีนาคม 2519
ที่อยู่	84/34 หมู่บ้านเดอะลิฟวิ่ง หมู่ 5 ถ.เลียบบคลองรังสิต ต.บางพูน อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2539
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2548 – ปัจจุบัน	วิศวกรฝ่ายวิศวกรรมผลิตภัณฑ์ บริษัท เอลเดคแอนด์เอลเทค (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2545 – 2548	วิศวกรฝ่ายวิศวกรรม บริษัท เคซีอี เทคโนโลยี จำกัด
พ.ศ. 2542 – 2544	วิศวกรฝ่ายกระบวนการผลิต บริษัท สมาร์ทแทค เทคโนโลยี จำกัด
พ.ศ. 2539 – 2541	วิศวกรประจำห้องกระจายสัญญาณ บริษัทยูนิเวอร์แซล เคเบิล เน็ตเวิร์ค (มหาชน) จำกัด