



การลดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลอในกระบวนการชิงกูเรชั่นโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการ
ทดลอง

นางสาววิศรา พานเทียน

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การลดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลอในกระบวนการชิงกูเรชั่นโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการ
ทดลอง



นางสาววิศรา พานเทียน

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การลดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลอในกระบวนการชิงกูเรชั่นโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง

โดย นางสาววิศรา พานเทียน

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ มีถม)

คณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สันต์ โอฬาริยกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนสาร อินทรกำธรชัย)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา อัครรุ่งแสงกุล)

ชื่อ : นางสาววิศรา พานเทียน
 ชื่อการค้นคว้าอิสระ : การลดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลอในกระบวนการชิง
 กูเรชั่นโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง
 สาขาวิชา : วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนสาร อินทรกำธรชัย
 ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

สารนิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดอัตราการเกิดของเสียที่เกิดจากกระบวนการชิง กูเรชั่นหรือตัดแยกชิ้นงาน ในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการ ทดลอง การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยหลักในกระบวนการ และ กำหนดระดับที่เหมาะสมที่สุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต จากการศึกษาสภาพปัจจุบันของ กระบวนการตัดแยกชิ้นงานพบว่า ประเภทของของเสียที่พบบ่อยที่สุดในกระบวนการตัดแยก ชิ้นงานคือ เทอร์มินอลเบลอ โดยมีอัตราของเสียเฉลี่ยอยู่ที่ 0.16% หรือคิดเป็น 1624.58 PPM ของ การผลิตทั้งหมด จึงมีการนำปัญหานี้มาทำการศึกษาโดยการสร้างแผนภาพแสดงเหตุและผลของ ปัญหา เพื่อระบุปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในกระบวนการตัดแยกชิ้นงาน และหา สาเหตุที่คาดว่าส่งผลกระทบมากที่สุด นำมาวิเคราะห์หาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม จากการ วิเคราะห์พบว่ามี 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ความเร็วรอบ, อัตราเร่ง และแรงดันน้ำ ในการวิจัยได้นำ ปัจจัยดังกล่าวมาทำการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k โดยไม่มีการทำซ้ำ เพื่อประเมินผลของแต่ละ ปัจจัย จากผลลัพธ์พบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการลดของเสียคือ ความเร็วรอบ (Spindle speed) 30,000 RPM , อัตราเร่งในการเคลื่อนที่แนวแกน X (Feed rate speed) 3 IPS และ แรงดันน้ำ (Washing pressure) 10 MPa เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้ไปใช้ในกระบวนการ ผลิตจริง อัตราของเสียลดลงจาก 0.16% เหลือ 0.12% ซึ่งสามารถลดเทอร์มินอลเบลอได้ 0.04% การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึง ประสิทธิภาพของการออกแบบการทดลอง ในการปรับปรุงกระบวนการ ผลิตและลดของเสียในกระบวนการชิงกูเรชั่นได้อย่างมีนัยสำคัญ

(สารนิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 125 หน้า)

คำสำคัญ : การลดของเสีย, การออกแบบการทดลอง, เซมิคอนดักเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก

Name : Miss Waritsara Pantean
Independent Study Title : Reducing terminal burr defect in singulation process
by applying design of experiment
Major Field : Industrial Management Engineering
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok
Independent Study Advisor : Assistant Professor Thanasan Intharakumthonchai
Academic Year : 2024

ABSTRACT

The objective of this master's project is to reduce the defect rate in the singulation process of the semiconductor industry by applying the Design of Experiments (DOE) methodology. This study aims to analyze the effects of factors and determine their optimal levels to enhance production efficiency. An initial assessment of the singulation process identified terminal burr as the most prevalent defect, with an average defect rate of 0.16%, equivalent to 1,624.58 PPM of total production. To investigate this issue, a cause-and-effect diagram was utilized to analyze failure modes and identify the most significant contributing factors. The analysis revealed three key parameters influencing defect formation: spindle speed, feed rate speed, and washing pressure. A 2^k factorial experimental design without replication was employed to evaluate these factors. The results indicated that the optimal process conditions for minimizing defects were a spindle speed of 30,000 RPM, a feed rate speed 3 IPS, and a washing pressure of 10 MPa. When these optimized process parameters were implemented in mass production, the defect rate decreased from 0.16% to 0.12%, achieving a 0.04% reduction in terminal burr defects. This study demonstrates the effectiveness of DOE in process optimization and defect minimization within semiconductor manufacturing.

(Total 125 pages)

Keywords: Defect Reduction, Design of Experiment, Semiconductor

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

สารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยผู้วิจัยได้รับการอนุเคราะห์และคำแนะนำ รวมถึงความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.ธนสาร อินทรกำธรชัย อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์ รวมถึง คณะกรรมการการสอบ ซึ่งให้คำแนะนำแนวทางในการดำเนินการวิจัยและข้อคิดต่างๆ ตลอดจน แก่ไขส่วนที่บกพร่องและผิดพลาดต่างๆ ของสารนิพนธ์ฉบับนี้จนลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้จัดทำขอขอบคุณพนักงานจากส่วนงานที่เกี่ยวข้องในแผนกวิศวกรรมของบริษัทธนีสึกษา ที่ให้ความร่วมมือและให้ความช่วยเหลือในการให้ข้อมูลต่างๆ ตลอดจนประสานงานดำเนินการ ทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ จนทำให้สารนิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ตามวัตถุประสงค์

ในท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน รวมถึงกำลังใจ ในการศึกษาต่อผู้จัดทำเสมอมา ขอขอบคุณคณะอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ให้แก่ผู้จัดทำ จนสามารถทำให้สารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี และขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษา ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม รุ่น 33 ทุกๆ ท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา จนทำให้ผู้จัดทำประสบความสำเร็จตาม วัตถุประสงค์ที่ตั้งใจไว้

วริศรา พานเทียน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	17
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	17
1.2 วัตถุประสงค์.....	22
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	22
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	22
1.5 ระยะเวลาในการดำเนินงาน	23
1.6 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ	23
บทที่ 2 การทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
2.1 ความรู้เบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับเซมิคอนดักเตอร์ประเภทวงจรรวม (Integraed Circuit(IC)).....	24
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการตัดแยกยูนิท (Singulation process).....	28
2.3 เครื่องมือควบคุมคุณภาพ (7 QC Tools).....	33
2.4 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)	40

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5 ทฤษฎีการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง(Design and Analysis of Experiment: DOE)	45
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	62
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	68
3.1 ศึกษาลักษณะของชิ้นงานและงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบล (Terminal burr) และรวบรวมข้อมูลของเสีย(Defective) ย้อนหลัง 6 เดือน.....	68
3.2 ศึกษารายละเอียดของพารามิเตอร์ของเครื่องจักรในกระบวนการตัดชิ้นงาน (Singulation).....	72
3.3 วิเคราะห์สาเหตุและหาปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาการเกิดของเสียกรณีศึกษา.....	73
3.4 การกำหนดความสัมพันธ์ ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลอง (DOE).....	82
3.5 ทำการทดลอง, เก็บรวบรวมผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล โดยใช้หลัก 2^k Full Factorial Experiment.....	83
3.6 การตรวจสอบอำนาจการทดสอบข้อมูล.....	86
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	90
4.1 ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k Full Factorial Design	90
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k Full Factorial Design	91
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	92
4.4 การวิเคราะห์หาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม	104
4.5 ยืนยันผลการทดลอง	105

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	108
5.1 สรุปผลงานวิจัย	108
5.2 ข้อเสนอแนะ	109
บรรณานุกรม	110
ภาคผนวก ก.....	113
ภาคผนวก ข.....	113
ประวัติผู้เขียน	125



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 แสดงขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	23
2-1 ตัวอย่างการตั้ง H_0 และ H_1 ของกลุ่มประชากร 1 กลุ่ม	42
2-2 ตัวอย่างการตั้ง H_0 และ H_1 ของกลุ่มประชากร 2 กลุ่ม	42
2-3 เทอมหรือแหล่งความผันแปรที่เป็นไปได้ทั้งหมดของ Full Factorial Design.....	52
2-4 การออกแบบแผนการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับ กรณีสามปัจจัย	54
2-5 สมมติฐานสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับสามปัจจัย	54
2-6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ 2^3 Factorial Design.....	55
2-7 เครื่องหมายคอนทราสต์ของการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^3	56
2-8 ตารางแทนค่าของปัจจัยและ Interaction ด้วยรหัส	58
2-9 จำนวน Run เทียบจำนวน Factor ของแต่ละ Design.....	58
2-10 ผลการออกแบบโดยวิธี 2^{7-3}	59
2-11 รูปแบบการทดลองที่นิยมใช้ในปัจจุบัน	61
2-12 บทความที่เกี่ยวข้อง	65
3-1 รายละเอียดการ Reject งานเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal Burr)	71
3-2 แสดงพารามิเตอร์ก่อนปรับปรุง.....	72
3-3 สรุปเหตุผลที่ใช้ในการเลือกปัจจัยต่างๆ.....	81
3-4 สรุปเหตุและผลที่ใช้ในการเลือกปัจจัยโดยอ้างอิง 4M	82
3-5 ปัจจัยกับค่าผลตอบสนองที่ปรับตั้งได้ของแต่ละปัจจัย	82
3-6 แสดงค่า parameter ที่สามารถปรับได้	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3-7 แสดงรูปแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 ปัจจัย 2 ระดับ โดยใช้โปรแกรม Minitab ver.19	88
4-1 แสดงผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2k Full Factorial Design.....	90
4-2 ค่า P-Value ของแต่ละปัจจัยจากมากไปน้อย	98
4-3 เปรียบเทียบ Model Summary ก่อน(model1) และหลัง(model2) การทำ แบบจำลองการถดถอย	100
4-4 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของเสียก่อน-หลัง ปรับปรุง.....	106
4-5 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณงานเสียที่เกิดขึ้นก่อนและหลังปรับปรุง.....	106

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 แสดงข้อมูลการนำเข้า-ส่งออก ของสถาบันไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ คาดการปี 2561-2566 โดนสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม และสถาบันไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์.....	18
1-2 Intergrated Curcuit Package Developmemt Trend.....	19
1-3 แสดงเปอร์เซ็นต์ที่พบงานเสียทั้งหมด ของแผนกซิงกูเรชั่น (Singulation) ตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์-กรกฎาคม 2024	20
1-4 แสดงเปอร์เซ็นต์ที่พบงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal Burr) ตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์-กรกฎาคม 2024	20
1-5 กระบวนการเกิดเทอร์มินอลเบลล (Terminal Burr).....	21
1-6 แสดงตัวอย่างการเกิดเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr).....	21
1-7 วงจรรวม หรือ IC Package ประเภท QFN (Quad Flat No-Lead).....	21
2-1 วงจรรวม.....	25
2-2 ลักษณะวงจรรวมเหมือนกันหลายๆตัวบนแผ่นเวเฟอร์โดยกระบวนการผลิตแบบโมโน ลิติก(Monolithic).....	25
2-3 ลักษณะทั่วไปของวงจรรวมชนิดคิวเอฟเอ็น (Quad flat no lead, QFN)	26
2-4 โครงสร้างภาคตัดขวางของบรรจุภัณฑ์คิวเอฟเอ็น (Quad flat no lead, QFN).....	26
2-5 กระบวนการส่วนของการผลิตส่วนหน้า (Front of Line, FOL).....	27
2-6 กระบวนการส่วนของการผลิตส่วนหลัง (End of Line, EOL).....	28
2-7 (ก) ใบมีดหรือ blade ที่ใช้ในกระบวนการตัดแยกยูนิต (ข) เครื่องจักรในการตัดแยกยูนิต..	29
2-8 ไดอะแกรมแสดงลักษณะการตัดแยกสตรีปของผลิตภัณฑ์ออกเป็นยูนิตเดี่ยว.....	29
2-9 กระบวนการตัดแยกยูนิต (Singulation).....	29

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-10 ขั้นตอนและอุปกรณ์ในกระบวนการเมาส์.....	30
2-11 ขั้นตอน อุปกรณ์ และเครื่องมือในขั้นตอนการตัดแยกยูนิต	31
2-12 การเกิดช่องว่างในการแบ่งแยกยูนิต	31
2-13 การฉีดน้ำความดันสูงเพื่อลดสถานะการสะสมความร้อนในการตัดแยกยูนิต.....	32
2-14 ลักษณะของแต่ละยูนิตในการตัดแบ่ง.....	32
2-15 ตัวอย่างลักษณะความบกพร่องเนื่องจากการตัดแบ่งยูนิต.....	33
2-16 ลักษณะการกระจายของฮิสโตแกรม	36
2-17 พาเรโต (Pareto).....	37
2-18 ลักษณะแผนภาพก้างปลา.....	38
2-19 ลักษณะของแผนภาพการกระจาย	38
2-20 ลักษณะของแผนภูมิควบคุม.....	39
2-21 ลักษณะจุดบ่งบอกกระบวนการผลิตที่เกิดปัญหา	40
2-22 การทดสอบทางเดียวที่มีบริเวณวิกฤตอยู่ทางขวา.....	44
2-23 การทดสอบทางเดียวที่มีบริเวณวิกฤตอยู่ทางซ้าย	44
2-24 การทดสอบสองทางที่มีบริเวณวิกฤตอยู่ทั้งสองข้าง	45
2-25 แสดงรูปแบบการทดลององค์ประกอบของกระบวนการ.....	45
2-26 รูปแบบการออกแบบการทดลอง	50
2-27 แสดงอิทธิพลของปัจจัย	51
2-28 กล้องความสัมพันธ์สำหรับแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับสามปัจจัย กรณีไม่พิจารณาปัจจัยที่รบกวนระบบ	53

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-29 โครงสร้างของคู่แฝดแฝง (Alias)	60
3-1 แสดงตัวอย่างภาพ intergated circuits (IC).....	69
3-2 แสดงลักษณะของหลิตเฟลม เทอร์มินอลเบลอ	69
3-3 แสดงลักษณะของชิ้นงานดี ชิ้นงานเสีย	70
3-4 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายงานเสียประเภทเสี้ยนบนขาหลิต (Terminal Burr)	71
3-5 แสดงการวัดเทอร์มินอลเบลอ (Terminal Burr)	71
3-6 เครื่องจักรที่ใช้ SAW DISCO MIDEL DFD6340.....	72
3-7 แผนภูมิแสดงของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงเดือนกุมภาพันธ์-สิงหาคม 2024	73
3-8 แผนภูมิพาเรโตจำแนกตามลักษณะอาการของปัญหา	74
3-9 แผนภูมิแท่งแสดงของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลอ (Terminal Burr) ที่เกิดขึ้นระหว่าง ช่วงเดือนกุมภาพันธ์-สิงหาคม 2024 เทียบกับกระบวนการผลิตทั้งหมด.....	75
3-10 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประเภท SEM&EDX ของงานเสียประเภทเทอร์มินอล เบลอ (Terminal Burr).....	76
3-11 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประเภท SEM&EDX ของหลิตเฟรม (Lead Frame).....	76
3-12 แผนผังกระบวนการซิงกูเรชั่น (Singulation).....	77
3-13 แผนภาพแสดงเหตุและผลของของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลอ (Terminal Burr).....	78
3-14 แสดงถึงเส้นตัดบนเทปที่ความเร็วรอบที่ต่างกัน.....	85
3-15 แสดงภาพกาวที่ติดบริเวณชิ้นงาน	85
3-16 แสดงการหาจำนวนตัวอย่างด้วยวิธี Power and Sample Size ด้วย Program Minitab 19	87

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-17 แสดงจำนวนการทดลองด้วย Program Minitab19	88
4-1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล	92
4-2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม	94
4-3 แผนภูมิการกระจายของส่วนที่ตกค้าง ความเป็นอิสระของส่วนที่ตกค้าง	94
4-4 แผนภูมิการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองของปริมาณของเสีย	95
4-5 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนองของปริมาณของเสีย	96
4-6 ผลการวิเคราะห์ Variances หลังจากการทำแบบจำลองการถดถอย	99
4-7 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมหลังจากการทำแบบจำลองการถดถอย	101
4-8 แผนภูมิการกระจายตัวของส่วนที่ตกค้าง ความเป็นอิสระของส่วนที่ตกค้าง หลังจากการทำแบบถดถอย	101
4-9 แผนภูมิการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองของปริมาณของเสีย หลังจากการทำแบบถดถอย	102
4-10 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนองของปริมาณของเสีย หลังจากการทำแบบถดถอย	103
4-11 ค่าปัจจัยที่เหมาะสม	104
4-12 การเปรียบเทียบของเสียก่อน-หลังปรับปรุง	106
ก-1 สัญลักษณ์โปรแกรม Minitab19	114
ก-2 หน้าต่างโปรแกรม Minitab19	114
ก-3 การเลือกแถบข้อมูล	114
ก-4 ใส่ข้อมูลสำหรับการหาจำนวนตัวอย่าง	115

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ก-5 การเลือกแถบข้อมูล.....	115
ก-6 ฟังก์ชันการออกแบบการทดลองในงานวิจัย	116
ก-7 ฟังก์ชันการออกแบบการทดลองและจำนวนทำซ้ำ.....	116
ก-8 เลือกฟังก์ชัน.....	117
ก-9 เลือกใส่ประเภทและค่าควบคุมปัจจัย	117
ก-10 หน้าต่างแผนการทดลองงานวิจัย	117
ก-11 หน้าต่างบันทึกผลการทดลองงานวิจัย	118
ก-12 การเลือกแถบเมนู.....	118
ก-13 การเลือกฟังก์ชันตอบสนอง (Responses)	119
ก-14 การเลือกฟังก์ชัน Teams ของปัจจัย	119
ก-15 การเลือกฟังก์ชัน Graphs.....	119
ก-16 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน.....	120
ก-17 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์.....	120
ก-18 การเลือกฟังก์ชัน	121
ก-19 การแสดงผลการวิเคราะห์ Main Effect Plot และ Inteaction Plot	121
ก-20 การเลือกฟังก์ชัน	122
ก-21 แสดงการหา Response Optimizer และ แสดงผล Response Optimize	122
ข-1 แสดงลักษณะของหลีดเฟรม (Lead Frame).....	124
ข-2 แสดงลักษณะรูปแบบของงานในกระบวนการและชื่อเรียกของแต่ละรูป	124

บทที่ 1

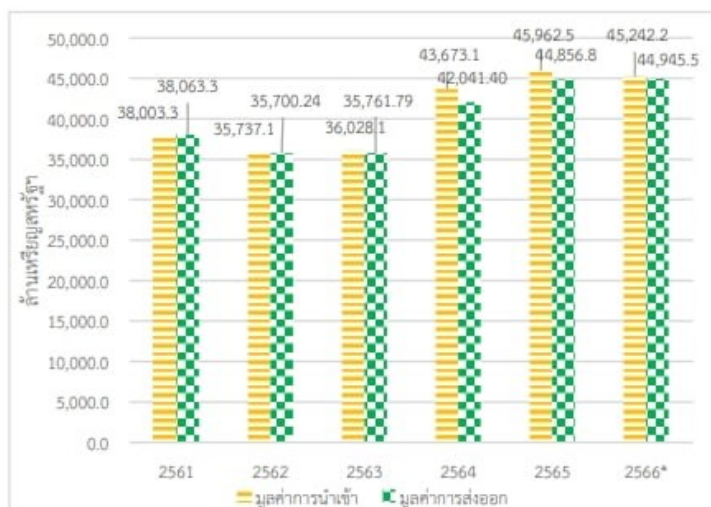
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจ ของประเทศ โดยมีรายได้จากการส่งออกให้กับประเทศเป็นจำนวนมาก อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจึงทำให้เป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศมากขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญในการรองรับแรงงานในภาคอุตสาหกรรม เพราะเป็นอุตสาหกรรมที่มีการจ้างแรงงานเป็นจำนวนมาก

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (สศอ.) ระบุสถานการณ์ของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ไทยพบว่า การผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ในปี 2566 หดตัวร้อยละ 17.5 เมื่อเทียบกับปี 2565 โดยปรับตัวลดลงในสินค้า Printer, HDD, Semiconductor devices transistors, PWB, PCBA และ IC เป็นผลจากการขาดแคลนวัตถุดิบในการผลิตและราคาต้นทุนที่สูงขึ้น ในขณะที่มีการส่งออกสินค้าเครื่องคอมพิวเตอร์ และวงจรรวมเพิ่มขึ้นจากความต้องการพัฒนาเทคโนโลยีโครงสร้างพื้นฐานทาง IT และอุปกรณ์นวัตกรรมใหม่ ๆ ทำให้มีความต้องการสินค้าชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เป็นไปอย่างต่อเนื่อง สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปี 2567 คาดว่า จะมีการผลิตและการส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 1.0 -5.0 เมื่อเทียบกับปีก่อน เนื่องจากความต้องการใช้สินค้าอิเล็กทรอนิกส์ในการพัฒนาประเทศยังคงเติบโตอย่างต่อเนื่อง ทั้งด้านโครงสร้างพื้นฐาน และการพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ

จากภาพ 1-1 แสดงการส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ในปี 2566 มีการส่งออกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์รวมมูลค่า 44,945.5 ล้านบาทหรือ 1.1 ล้านล้านเหรียญสหรัฐ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ร้อยละ 0.2 จากการส่งออกสินค้าเครื่องคอมพิวเตอร์ และวงจรรวม เนื่องจากความต้องการพัฒนาเทคโนโลยี โครงสร้างพื้นฐานทาง IT และอุปกรณ์ นวัตกรรมใหม่ๆ ทำให้มีความต้องการสินค้าชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่องในตลาดโลก



ภาพที่ 1-1 แสดงข้อมูลการนำเข้า-ส่งออก ของสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คาดการณ์ปี 2561-2566 โดยสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม และสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

เซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและทำหน้าที่เป็นฉนวนสื่อไฟฟ้าได้ในเวลาเดียวกัน โดยอยู่ในรูปแบบอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนเนื้อแข็ง ที่มีขนาดเล็ก ที่มีคุณภาพสูง สามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมได้หลายรูปแบบ เพื่อเป็นสมองส่วนสำคัญ ที่ช่วยควบคุมการทำงาน เพิ่มประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนอุปกรณ์และเทคโนโลยีให้ดียิ่งขึ้น ดังนี้

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์: ใช้สำหรับเป็นส่วนประกอบสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ ที่ช่วยพัฒนาอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น สมาร์ทโฟน คอมพิวเตอร์ และโทรทัศน์

อุตสาหกรรมพลังงาน: เป็นชิ้นส่วนในอุปกรณ์โซลาร์เซลล์ ใช้ในการเปลี่ยนแสงแดดเป็นพลังงานไฟฟ้า รวมถึงเป็นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในระบบกักเก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุ เป็นต้น

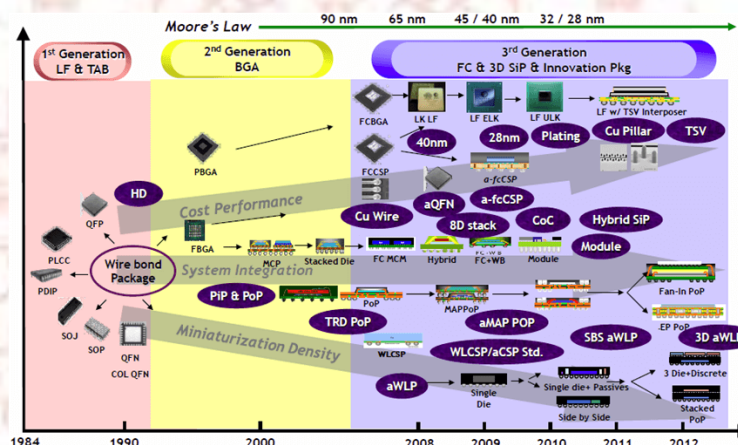
อุตสาหกรรมยานยนต์: นิยมนำไปใช้ในงานด้านยานยนต์ต่าง ๆ เช่น ระบบการจัดการเครื่องยนต์ ระบบความบันเทิง และระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ รวมถึงใช้ในการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างแบตเตอรี่ มอเตอร์ และส่วนประกอบอื่น ๆ

อุตสาหกรรมการแพทย์: สารกึ่งตัวนำสามารถใช้ในอุปกรณ์การแพทย์ต่าง ๆ ได้ เช่น อุปกรณ์สร้างภาพจำลอง เครื่องกระตุ้นหัวใจ และอุปกรณ์วินิจฉัย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจหาผลลัพธ์อย่างแม่นยำ และการตรวจสอบที่รวดเร็ว

อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ: นำไปใช้ในงานด้านการบินและอวกาศ ตั้งแต่ระบบสื่อสารและระบบนำทาง รวมถึงระบบควบคุมและตรวจสอบเพื่อประมวลผลให้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

ในปัจจุบันอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพด้านการทำงานที่ฉลาดและรวดเร็วมากขึ้น ด้วยการใช้ชิปวงจรรวม (Integrated Circuit: IC) ซึ่งเป็นผลผลิตจากความก้าวหน้าทางวิศวกรรม จนทำให้วงจรรีเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลง มีประสิทธิภาพมากขึ้น ประหยัดพลังงานและทรัพยากร ในบรรดาวงจรรีเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนสูง ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมเล็กๆ ส่วนหนึ่งของ Semiconductor อีกทั้งยังเป็นอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญ เพราะนำไปสู่สิ่งอำนวยความสะดวกจำนวนมากในโรงงานอุตสาหกรรมและครัวเรือน

การวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ท่ามกลางตลาดที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ภาพแสดงวิวัฒนาการและการพัฒนาของวงจรรวม โดยจะถูกแบ่งออกเป็น 3 generation ซึ่งสื่อถึงความก้าวหน้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ดังภาพที่ 1-2

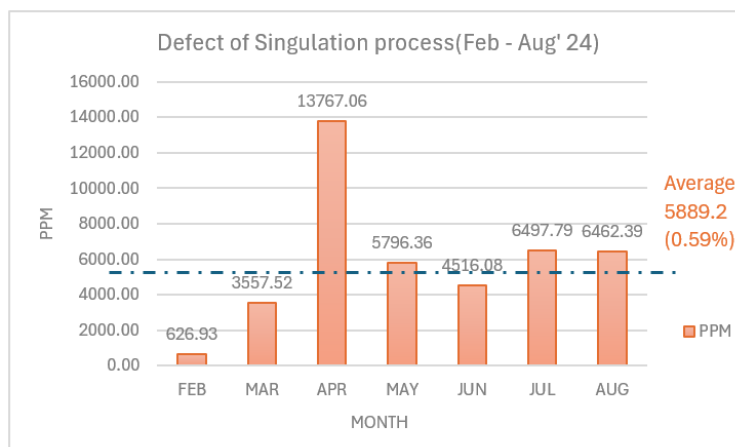


ภาพที่ 1-2 Integrated Circuit Package Development Trend

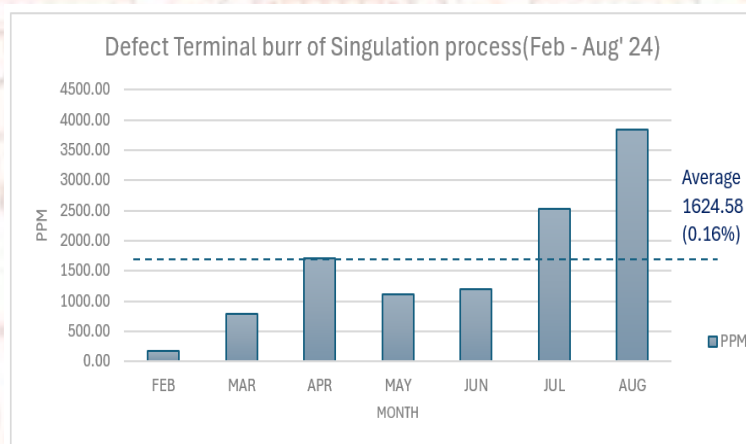
จากการศึกษากระบวนการตัดชิ้นงานหรือที่เรียกว่า Singulation Process พบว่าเกิดสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ (Defect) เกิดขึ้นกับชิ้นงานหลังการตัดงาน ที่เรียกว่า เทอร์มินอลเบลล์ (Terminal Burr) ซึ่งสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นนั้น จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขปรับปรุงมีปริมาณที่น้อยลง เพราะสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ดังกล่าวส่งผลถึงคุณภาพของอุปกรณ์ที่นำประกอบเพื่อใช้งาน ถ้าสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก จะแสดงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตอยู่ในระดับต่ำ และส่งผลถึงต้นทุนการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้น ด้วย การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นเฉพาะกระบวนการตัดชิ้นงาน และพบว่าสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้น ณ ขณะตัดชิ้นงานน่าจะได้รับการปรับปรุงต่อไป

เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตในปัจจุบัน จากภาพที่ 1-3 ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ถึง กรกฎาคม ค.ศ. 2024 เป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่าเกิดของเสียขึ้นใน

กระบวนการชิงกูเรชั่น คิดเป็น 0.59% เทียบกับปริมาณการผลิตในขั้นตอนนี้ ซึ่งพบว่าเกิดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลอเฉลี่ยอยู่ที่ 0.16% เทียบกับปริมาณการผลิตดังภาพที่ 1-4



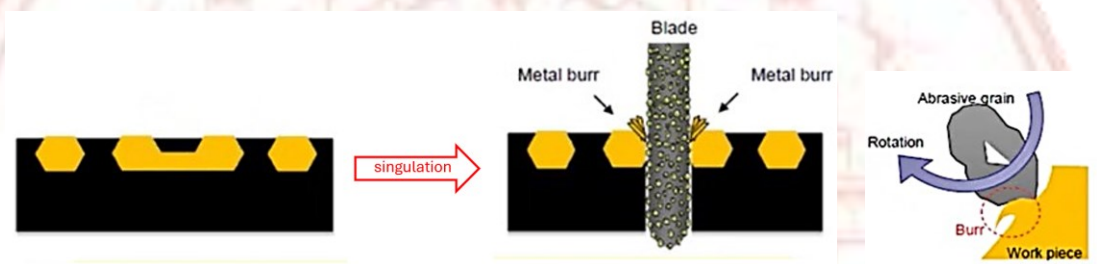
ภาพที่ 1-3 แสดงเปอร์เซ็นต์ที่พบงานเสียทั้งหมด ของแผนกชิงกูเรชั่น (Singulation) ตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์-กรกฎาคม 2024



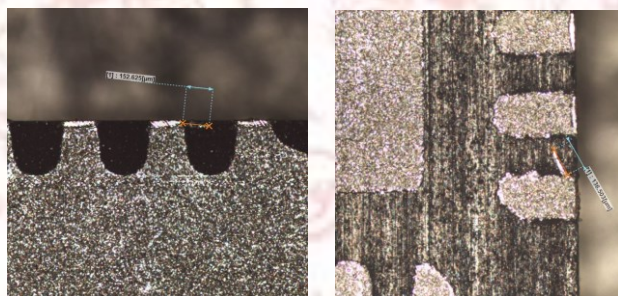
ภาพที่ 1-4 แสดงเปอร์เซ็นต์ที่พบงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบลอ (Terminal Burr) ตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์-กรกฎาคม 2024

เนื่องจากปัญหานี้เกิดขึ้นในปริมาณที่สูง อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงาน และกระทบโดยตรงต่อต้นทุนการผลิตและผลกำไรของบริษัท ด้วยเหตุนี้ส่วนงานชิงกูเรชั่นจึงควรได้รับการปรับปรุงและแก้ไขปัญหาของการเกิดสิ่งบกพร่องประเภทเทอร์มินอลเบลอ โดยนำหลักการการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) มาประยุกต์ใช้ ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่อิทธิพลต่อการเกิดจุดบกพร่องในกระบวนการ และพัฒนากระบวนการให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

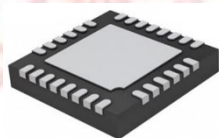
จากบริษัทกรณีศึกษา ผู้วิจัยได้หยิบยกปัญหาเทอร์มินอลเบลล หรือเส้นบริเวณขาหลัด ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญและอัตราของเสียที่เกิดขึ้นสูง โดยของเสียประเภทนี้ เกิดจากกระบวนการตัดชิ้นงาน (Singulation) ซึ่งกระบวนการเกิดเทอร์มินอลเบลลแสดงดังภาพที่ 1-5 จะเห็นได้ว่า เส้นหรือเทอร์มินอลเบลล (Terminal Burr) เกิดจากกระบวนการตัดด้วยใบมีด โดยส่วนประกอบของใบมีด (Blade) นั้น จะประกอบไปด้วย Abrasive Grain ซึ่งจะเป็นตัวขูดเนื้อชิ้นงานให้ขาดออกจากกัน อาจทำให้เบลลเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัด หากมีพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสม ในส่วนของภาพที่ 1-6 แสดงตัวอย่างการเกิดเทอร์มินอลเบลล (Terminal Burr) จะมีลักษณะเป็นเส้นเส้นโผล่ออกมาจากตัวงานโดยไม่ขาดออกจากกัน เกิดขึ้นบริเวณเทอร์มินอล และภาพที่ 1-7 แสดงลักษณะภายนอกของ IC Package ประเภท QFN(Quad Flat No-lead)



ภาพที่ 1-5 กระบวนการเกิดเทอร์มินอลเบลล(Terminal Burr)



ภาพที่ 1-6 แสดงตัวอย่างการเกิดเทอร์มินอลเบลล (Terminal Burr)



ภาพที่ 1-7 วงจรรวม หรือ IC Package ประเภท QFN (Quad Flat No-lead)

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อลดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล์ (Terminal Burr)

1.2.2 เพื่อปรับปรุงกระบวนการตัด (Singulation) โดยหาระดับปัจจัยที่ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงกระบวนการเฉพาะกระบวนการตัดชิ้นงาน (Singulation) จากเครื่องจักรเท่านั้น

1.3.2 งานวิจัยนี้ทำเฉพาะวงจรรวมหรือ IC package ประเภท QFN

1.3.3 งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อลดปัญหาการเกิดความบกพร่องประเภทเทอร์มินอลเบลล์

1.3.4 เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบจะมีการสอบเทียบเพื่อให้ใช้งานได้ตามมาตรฐานกำหนด (Calibration) ตามระยะเวลาที่กำหนด

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการเกิดขึ้น กำหนดหัวข้อปัญหา กำหนดขอบเขตของปัญหา

1.4.1.2 ศึกษางานวิจัย หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยได้

1.4.1.3 ศึกษารายละเอียดของกระบวนการผลิต และการทำงานของเครื่องจักรที่ใช้ในการตัดงาน

1.4.1.4 วิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาการเกิดของเสียกรณีศึกษา

1.4.1.5 ออกแบบการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหากรณีศึกษาและหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

1.4.1.6 ดำเนินงานทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.1.7 สรุปผลการวิจัยและจัดทำข้อเสนอแนะ

1.4.2 สถานที่ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย และรวบรวมข้อมูล

สถานที่ที่ใช้ในการดำเนินการศึกษา และรวบรวมข้อมูล คือ โรงงานอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วน Integrated circuits หรือแผงวงจรรวม ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร ได้ซึ่งมีการนำวิธีการออกแบบการทดลอง มาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต

1.4.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการศึกษา

1.4.3.1 โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab

1.4.3.2 Disco fully automatic dicing saw machine 6340, 6560

1.4.3.3 Low power scope Olympus SZ61

1.4.3.4 Diamond blade (DISCO)

1.5 ระยะเวลาในการดำเนินงาน

สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดแผนการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนการวิจัย ตั้งแต่ขั้นตอนการสำรวจงานวิจัย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ออกแบบการทดลอง เก็บรวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ผลจนถึงการสรุปผลและจัดทำข้อเสนอแนะ ซึ่งรายละเอียดเป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1-1 แสดงขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน									
	2567					2568				
	ส.ค.	ก.ย.	ค.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการเกิดขึ้น	←	→								
2. ศึกษางานวิจัย หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง		←	→							
3. ศึกษารายละเอียดของกระบวนการผลิต		←	→	→						
4. วิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาการเกิดของเสียกรณีศึกษา			←	→						
5. ออกแบบการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัญหากรณีศึกษาและหาค่าที่เหมาะสมที่สุด			←	→						
6. ดำเนินงานทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง					←	→	→	→		
7. สรุปผลการวิจัยและจัดทำข้อเสนอแนะ								←	→	→

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการตัด เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการลดอัตราการเกิดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal Burr) จากกระบวนการตัด (Singulation)

1.6.2 เพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการตัด

1.6.3 ทราบข้อมูลที่ต้องการนำมาทำการออกแบบการทดลองเพื่อพัฒนากระบวนการผลิตในหัวข้ออื่นๆต่อไป

1.6.4 ทราบถึงพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน

บทที่ 2

การทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

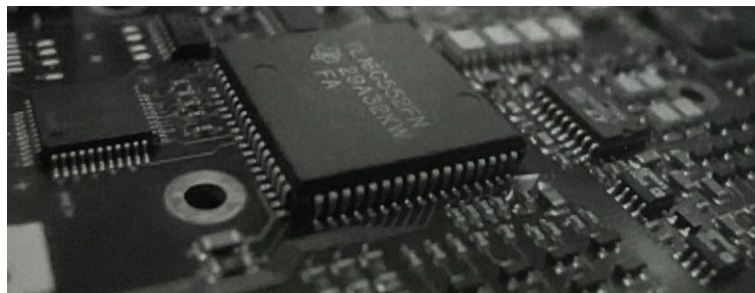
ในงานวิจัยบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการวิจัย โดยในการทดลองครั้งนี้ ผู้วิจัยจำเป็นต้องเข้าใจถึงผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิต ปัญหาที่เกิดขึ้น และต้องเลือกแผนการทดลอง เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองที่เหมาะสม และสามารถนำผลการทดลองไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในบทนี้จะนำไปสู่การนำเสนอกลยุทธ์ในแบบต่างๆ และอธิบายถึงแผนการทดลองโดยสังเขป ส่วนท้ายของบทความจะประกอบไปด้วยทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

- 2.1 ความรู้เบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับเซมิคอนดักเตอร์ประเภทวงจรรวม (Integrated circuit (IC))
- 2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการตัดแยกเป็นยูนิต (Singulation Process)
- 2.3 เครื่องมือควบคุมคุณภาพ (7 QC Tools)
- 2.4 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)
- 2.5 ทฤษฎีการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiment: DOE)
- 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับเซมิคอนดักเตอร์ประเภทวงจรรวม (Integrated circuit (IC))

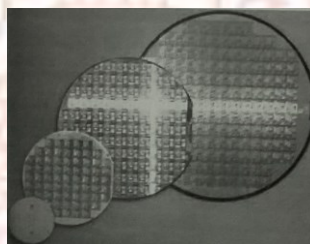
2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวงจรรวม (Fundamental of integrated circuit, IC)

วงจรรวม (Integrated circuit, IC) หมายถึง วงจรที่นำเอาไดโอด ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และองค์ประกอบวงจรต่างๆ มาประกอบรวมกันบนแผ่นฐานรอง (Substrate) ซึ่งในปัจจุบันจะนิยมใช้ซิลิกอนเป็นฐานรอง เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูกกว่าวัสดุชนิดอื่น เช่นเจอร์มาเนียม และแกลเลียมอาร์เซไนด์ เป็นต้น มีความหนาแน่นต่ำ ง่ายต่อการทำเป็นชั้นฟิล์ม และองค์ประกอบของความบริสุทธิ์สามารถควบคุมได้โดยทั่วไปนิยมเรียกว่า ไอซี และแผ่นวงจรขนาดเล็กนี้บางครั้งเรียกว่า ชิพ (Chip) โดยการสร้างองค์ประกอบวงจรต่างๆ อยู่บนผลึกซิลิกอนนี้ วิธีการสร้างองค์ประกอบวงจรทั้งหมดลงบนแผ่นผลึกแผ่นเดียวนี้ เรียกว่า โมโนลิทิก (Monolithic) โดยใช้กรรมวิธีการถ่ายภาพอย่างละเอียดและมีการสร้างลวดลายวงจรโดยอาศัยกระบวนการที่เรียกว่า ลิโทกราฟี (Lithography) ซึ่งมีความละเอียดสูงมาก และกระบวนการทางเคมีจึงสามารถบรรจุองค์ประกอบวงจรได้จำนวนมากต่อหน่วยพื้นที่โดยความหนาแน่นขององค์ประกอบของวงจรที่บรรจุลงในวงจรรวมนี้ มีตั้งแต่หลายสิบล้านตัวเรียกว่า SSI (Small Scale Integration) จนถึงหลายร้อยล้านตัวเรียกว่า ULST (Ultra Large Scale Integration) แสดงลักษณะของวงจรรวมดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 วงจรรวม

ข้อดีของวงจรรวม คือ สามารถรวมวงจรที่ซับซ้อนเข้ามาเป็นวงจรเดียว ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มีขนาดเล็ก และเบาลงใช้พลังงานน้อยลง และในการผลิตวงจรรวมแบบโมโนลิทิก ก็สามารถสร้างวงจรรวมที่เหมือนกัน ได้พร้อมกันหลายร้อยล้านตัวบนแผ่นผลึก หรือเวเฟอร์ (Wafer) แผ่นเดียวแสดงดังภาพที่ 2-2 โดยการสร้างแบบวงจรรวมที่เหมือนกันลงบนแผ่นเวเฟอร์แผ่นเดียวนี้ จะทำการตัดแบ่งวงจรรวมแต่ละตัวภายหลังทำให้สามารถผลิตวงจรรวมได้เป็นจำนวนมากในเวลาเดียวกัน ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตวงจรรวมได้มาก

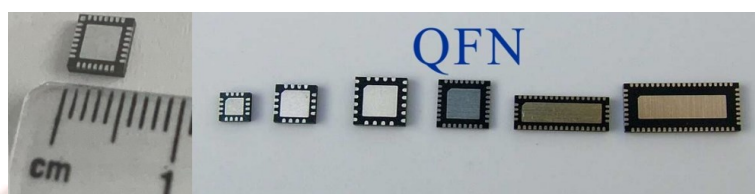


ภาพที่ 2-2 ลักษณะวงจรรวมเหมือนกันหลายๆตัวบนแผ่นเวเฟอร์ โดยกระบวนการผลิตแบบโมโนลิทิก(Monolithic)

2.1.2 ลักษณะทั่วไปของบรรจุภัณฑ์คิวเอฟเอ็น (Quad flat no lead, QFN)

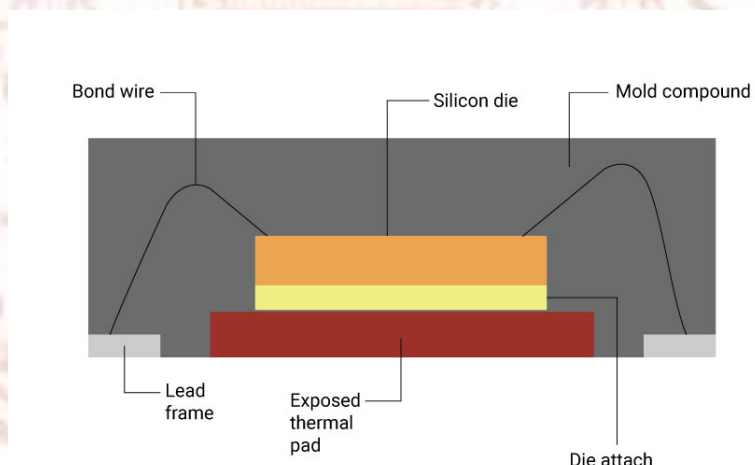
วงจรรวมชนิดคิวเอฟเอ็น (QFN) เป็นวงจรรวมประเภทไม่มีขายื่นออกจากบรรจุภัณฑ์ในการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างวงจรรวมกับแผ่นพรี้นท์ (Print Circuit Board, PCB) โดยจะใช้เทคโนโลยีเซอร์เฟซเมาท์ (Surface Mount Technology) ซึ่งแตกต่างจากวงจรรวมประเภทมีขายื่นออกจากบรรจุภัณฑ์ซึ่งจะใช้วิธีการบัดกรีเชื่อมต่อระหว่างขาของวงจรรวม และแผ่นพรี้นท์ให้ทะลุ ซึ่งเรียกว่าเทคโนโลยีทูลโฮล (Through Hole Technology) จึงทำให้วงจรรวมประเภทนี้มีขนาดเล็กและบางลงได้ตามลักษณะการออกแบบ และมีน้ำหนักเบาสามารถนำไปออกแบบผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่มีแนวโน้มว่าต้องการให้มีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เช่น โทรศัพท์มือถือขนาดเล็ก เป็นต้นนอกจากนี้ลักษณะการออกแบบของบรรจุภัณฑ์ชนิดคิวเอฟเอ็นยังมีส่วนของ

แพด (Pad) ที่ช่วยในการกระจายของความร้อน (Heat transfer) ออกสู่ด้านนอกของบรรจุภัณฑ์อีกด้วย ลักษณะทั่วไปของบรรจุภัณฑ์วงจรรวมชนิดคิวเอฟเอ็น แสดงดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 ลักษณะทั่วไปของวงจรรวมชนิดคิวเอฟเอ็น (Quad flat no lead, QFN)

ลักษณะทั่วไปของวงจรรวม QFN จะมีลักษณะคล้ายกับวงจรรวมชนิด QFP (Quad Flat Package) และ BGA (Ball Grid Array) โดยนิยมใช้ฐานรองหรือที่เรียกว่า ลีดเฟรมเป็นทองแดง (Copper Lead Frame) และใช้ตัวยึดติด (Adhesive) เชื่อมระหว่างตัวได (Die Attach Pad, Pad) ของลีดเฟรม และมีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrical Connection) ระหว่างซิลิกอนไดกับลีดเฟรม โดยนิยมใช้ลวดทอง (Gold Wire) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 มิล (mill inch, mil) และมีการห่อหุ้มบรรจุภัณฑ์ด้วยพลาสติก (Plastic Encapsulated Package) โดยลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวางของบรรจุภัณฑ์คิวเอฟเอ็นแสดงดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 โครงสร้างภาคตัดขวางของบรรจุภัณฑ์คิวเอฟเอ็น (Quad flat no lead, QFN)

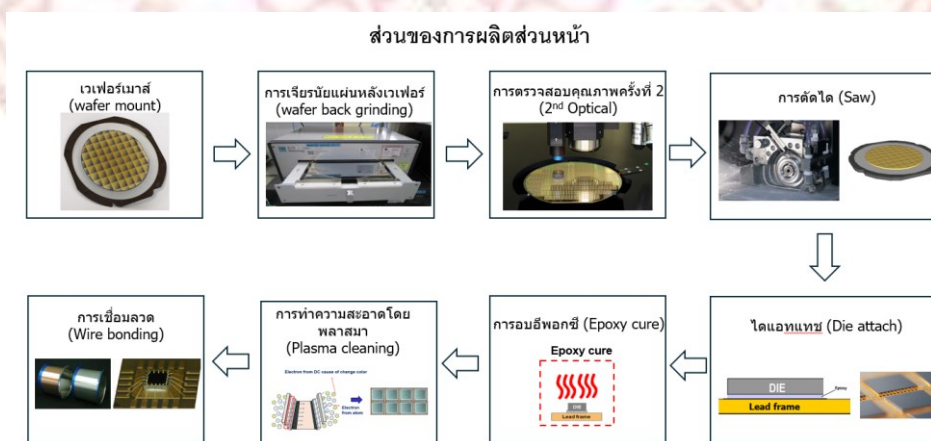
2.1.3 กระบวนการประกอบไอซี (IC Assembly)

ตามที่เราได้ศึกษาถึงกระบวนการผลิตแผ่นเวเฟอร์ (Wafer) มาแล้วต่อไปเราจะได้ศึกษาถึงกระบวนการประกอบ (Assembly) และกระบวนการบรรจุไอซี (IC Packaging) ในกระบวนการประกอบตัวไอซีสามารถแบ่งการทำงานเป็นสองส่วนคือ

- ส่วนของการผลิต FOL (Front of Line)
- ส่วนของการผลิต EOL (End of Line)

2.1.3.1 ส่วนของการผลิต FOL (Front of Line)

ส่วนของการผลิตส่วนหน้าจะเริ่มต้นจากการนำแผ่นเวเฟอร์ที่ได้จากกระบวนการประดิษฐ์แผ่นเวเฟอร์เรียบร้อยแล้ว ทำการวัดความหนา และติดแผ่นพลาสติกเหนียวซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าเวเฟอร์เมาท์ (Wafer mount) เพื่อเตรียมแผ่นเวเฟอร์สำหรับการเจียรนัยด้านหลังแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Back Grinding) เพื่อให้ได้ขนาดความหนาตามต้องการ จากนั้นนำไปทดสอบคุณภาพครั้งที่ 2 (Second Optical Process) เพื่อตรวจสอบคุณภาพของได (Die) หลังจากเจียรนัยแผ่นหลังว่ามีการชำรุดเสียหายหรือไม่ หลังจากนั้นจะนำแผ่นเวเฟอร์ไปติดกับเฟรมริง (Frame Ring) โดยใช้แผ่นพลาสติกเหนียวติด ด้านหลังแผ่นเวเฟอร์เพื่อเข้าสู่กระบวนการตัด (Saw) จากนั้นนำแผ่นเวเฟอร์ที่ตัดแยกเป็นตัวไดแล้วซึ่งไดแต่ละตัวยังคงติดอยู่บนเฟรมริง เข้าสู่กระบวนการติดไดแต่ละตัวลงบนลีดเฟรม (Leadframe) ซึ่งใช้เป็นฐานรอง (Substrate) หรือที่เรียกกระบวนการนี้ว่า ไดแอตแทช (Die Attach) โดยการติดไดจะใช้ตัว ยึดติดโดยทั่วไปนิยมใช้กาวอีพอกซี (Epoxy) หลังจากนั้นจะนำ ไดที่ติดบนลีดเฟรมเรียบร้อยแล้วไปทำการอบ (Epoxy Cure) และในบางครั้งในกระบวนการของการผลิตส่วนหน้ายังมีการใช้กระบวนการทำความสะอาดโดยพลาสมา (Plasma Cleaning) เพื่อทำความสะอาดลีดเฟรมก่อนนำไปผ่านกระบวนการเชื่อมลวด (Wire Bonding) ต่อไป โดยกระบวนการเชื่อมลวดเป็นกระบวนการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างตัวไดและลีดเฟรมออกสู่ภายนอกบรรจุภัณฑ์ โดยเมื่อถึงกระบวนการนี้ถือเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการของการผลิตส่วนหน้า ซึ่งสามารถแสดงแผนผังของกระบวนการดังกล่าวในภาพที่ 2-5

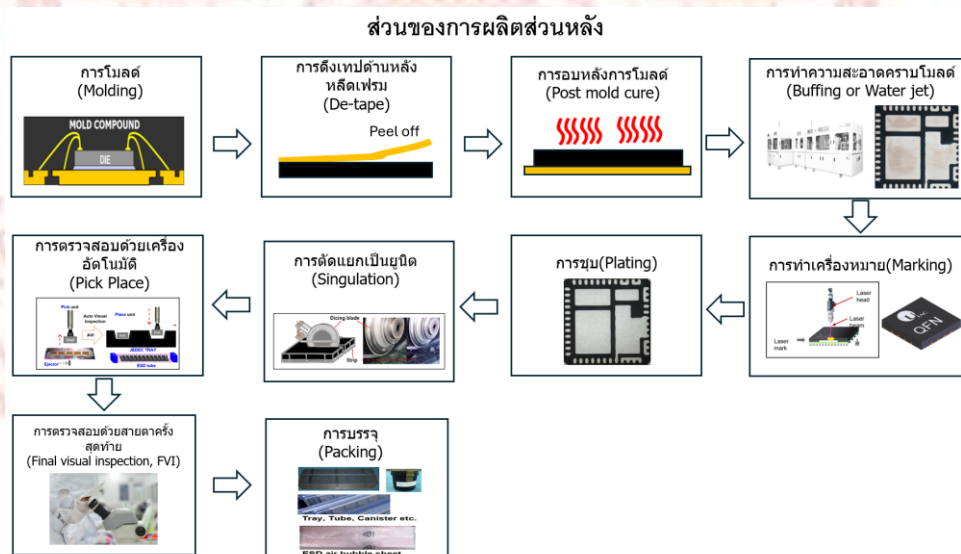


ภาพที่ 2-5 กระบวนการของส่วนการผลิตส่วนหน้า (Front of Line, FOL)

2.1.3.2 ส่วนของการผลิต EOL (End of Line,EOL)

การผลิตไอซีส่วนหลัง (Back – End) เป็นกระบวนการสุดท้ายของการ ประกอบ ไอซีเป็นส่วนสำคัญที่จะต้องควบคุมคุณภาพผลิตที่ส่งลูกค้าของทางบริษัท ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่ กระบวนการโมลด์ (Mold) จนถึงกระบวนการบรรจุภัณฑ์

ส่วนของสายการผลิตส่วนหลังจะเริ่มต้นจากการนำเอาสไตรป์(Strip) ที่ผ่าน กระบวนการเชื่อมลวดในกระบวนการผลิตส่วนหน้าเข้าสู่กระบวนการโมลด์ (Molding)โดยการหล่อหุ้ม ไตและลวดด้วย อีพอกซีโมลด์คัมพาวนด์ (Epoxy Mold Compound, EMC) โดยการขึ้นรูปตาม ลักษณะของบรรจุภัณฑ์ (Package) จากนั้นทำการดึงเทป (De-tape) ที่ด้านหลังลิตเฟรมออก ทำการ อบหลังการโมลด์ (Post Mold Cure) จากนั้นทำความสะอาดคราบโมลด์ โดยวิธีบัพฟิง (Buffing) หรือวอเตอร์เจ็ต (Water jet) และทำเครื่องหมายผลิตภัณฑ์ (Marking) ทำการชุบ (Plating) ด้วย ดีบุกในกรณีของลิตเฟรมทองแดงหลังจากนั้นจะทำการตัดเป็นแบ่งเป็นยูนิต (Singulation) และทำ การตรวจสอบข้อบกพร่องต่างๆ โดยทำการตรวจสอบคุณภาพด้วยสายตาครั้งสุดท้าย (Final Visual Inspection) หรือด้วยเครื่องตรวจสอบอัตโนมัติ (Pick and Place) ก่อนนำเข้าสู่การบรรจุ (Packing) เพื่อส่งให้ลูกค้าต่อไป ซึ่งสามารถแสดงแผนผังของกระบวนการดังกล่าวในรูปที่ 2-6

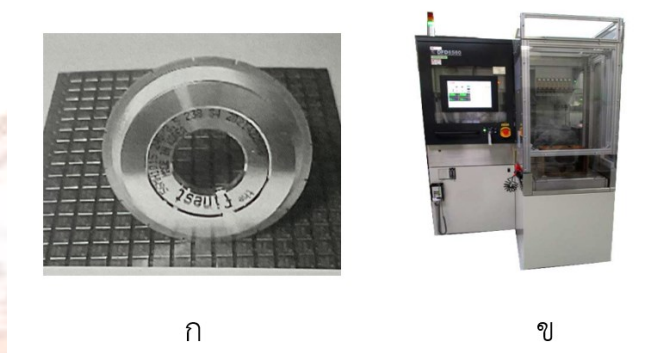


ภาพที่ 2-6 กระบวนการของส่วนการผลิตส่วนหลัง (End of Line, EOL)

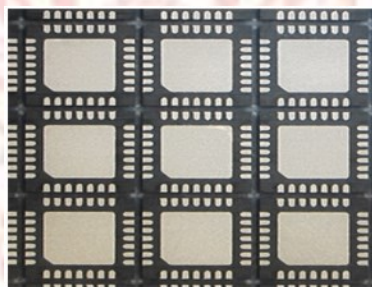
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการตัดแยกเป็นยูนิต (Singulation Process)

กระบวนการตัดแยกเป็นยูนิตเป็นกระบวนการตัดแยกสไตรป์ (Strip) ของลิตเฟรมออกเป็น ยูนิตเดี่ยว (Single Unit) โดยการใช้ใบมีด (Blade) ในการตัด (Dicing blade) และเครื่องจักรในการ

ตัดแยก ยูนิต (Singulation Machine) ดังรูปที่ a และ b ตามลำดับ และไดอะแกรมแสดงลักษณะตัดแยกสตริปของลิตเฟรมออกเป็นยูนิตเดี่ยว แสดงดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-7 (ก) ใบมีดหรือ blade ที่ใช้ในกระบวนการตัดแยกยูนิต (ข) เครื่องจักรในการตัดแยกยูนิต



ภาพที่ 2-8 ไดอะแกรมแสดงลักษณะการตัดแยกสตริปของลิตเฟรมออกเป็นยูนิตเดี่ยว

Singulation หรือ กระบวนการตัดแยกเป็นยูนิตสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้



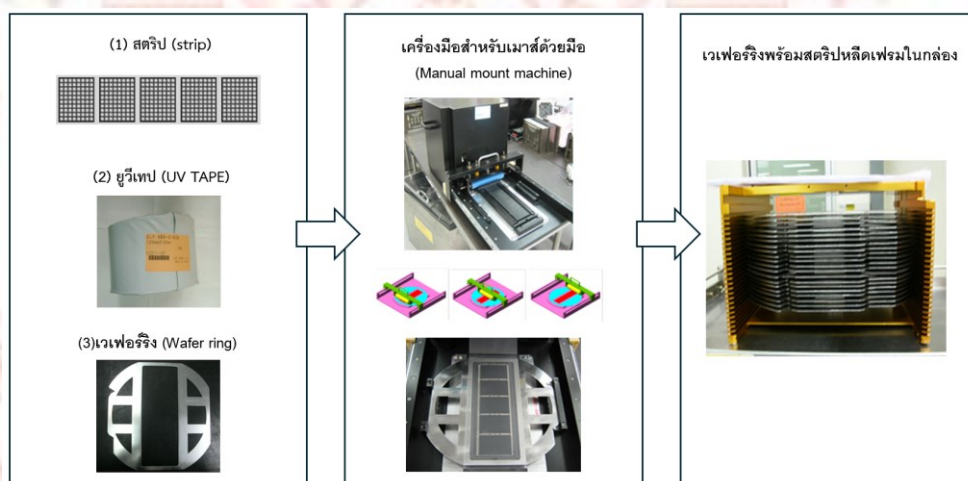
ภาพที่ 2-9 กระบวนการตัดแยกยูนิต (Singulation)

2.2.1 ขั้นตอนการเมาท์สตริปด้วยมือ (Manual strip mount process)

กระบวนการเมาท์ (Mounting Process) เป็นกระบวนการติดสตริปของลิตเฟรมด้วยยูวีเทป เพื่อให้ยูวีเทปทำการยึดสตริปของลิตเฟรมให้แน่น เพื่อทำการตัดแยกออกเป็นยูนิต โดยขั้นตอนเริ่มต้น

จากการนำสตริปของลิตเฟรมวางลงบนเวเฟอร์ริง (Wafer ring) จากนั้นนำไปติดยูวีเทปโดยใช้เครื่องมือด้วยมือ และทำการโหลดเวเฟอร์ริงพร้อมสตริปลิตเฟรมและใส่ลงในกล่องเวเฟอร์ริง (Cassette Box) เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการตัดแยกออกเป็นยูนิตต่อไป แสดงขั้นตอนและอุปกรณ์ในกระบวนการเม้าต์ดังภาพที่ 2-10

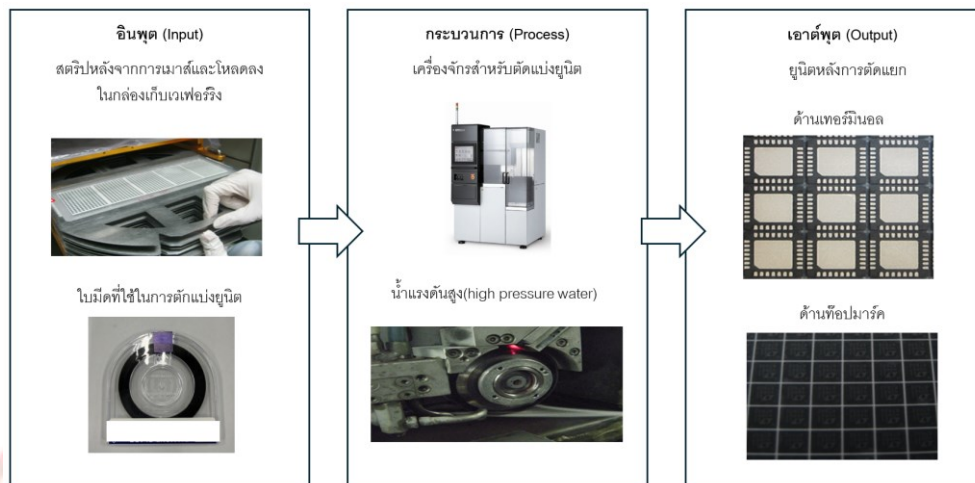
ในกระบวนการเม้าต์สตริปด้วยมือเพื่อเตรียมพร้อมเข้าสู่กระบวนการตัดแยกยูนิต ต้องมีการควบคุมพารามิเตอร์ แรงที่ใช้ในการเม้าต์ (Mounting Force) เพื่อควบคุมคุณภาพการเม้าต์ (Mounting Quality) ของแผ่นสตริปโดยหลังจากการเม้าต์แล้ว ผู้ปฏิบัติงาน (Operator) จะต้องทำการตรวจสอบ คุณภาพของทุกสตริปที่ทำการเม้าต์ โดยจะต้องตรวจไม่พบฟองอากาศ (Bubble) ระหว่างยูวีเทปกับคอมปาว์น การเม้าต์ที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete mounting) เส้นบางๆ ของเทป (Tape Filament) บนขอบของเวเฟอร์ริง และการหย่อนของเทป (Tape Winkle) เป็นต้น เมื่อตรวจสอบคุณภาพของการเม้าต์แล้วไม่พบสิ่งผิดปกติใด แผ่นสตริปของลิตเฟรมบนเวเฟอร์ริง สามารถนำเข้าสู่ขั้นตอนการตัดออกเป็น ยูนิตต่อไป



ภาพที่ 2-10 ขั้นตอนและอุปกรณ์ในกระบวนการเม้าต์

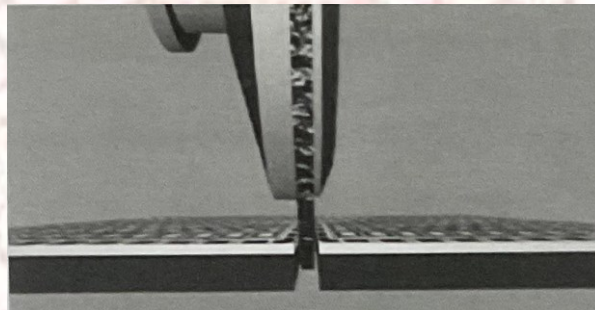
2.2.2 ขั้นตอนการตัดแยกเป็นยูนิต (Singulation Process)

การตัดแยกเป็นยูนิต (Singulation) เป็นขั้นตอนการตัดแยกยูนิตออกจากสตริปของลิตเฟรมโดยใช้ใบมีดในการตัดแยกยูนิต (Singulation Blade) โดยปกติแล้วจะตัดลงลึกประมาณครึ่งหนึ่งของความหนาของยูวีเทป ซึ่งถือว่าจะได้การตัดแบ่งยูนิตโดยสมบูรณ์ โดยสามารถแสดงขั้นตอน อุปกรณ์ และเครื่องมือในขั้นตอนการตัดแยกยูนิต ดังภาพที่ 2-11



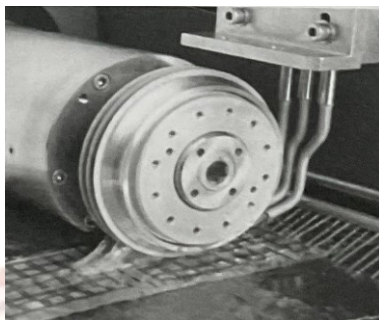
ภาพที่ 2-11 ขั้นตอน อุปกรณ์และเครื่องมือในขั้นตอนการตัดแยกยูนิต

ใบมีดที่ใช้ในการตัดแบ่งยูนิตจะประกอบไปด้วยกริทของเพชร (Diamond Grit) และนิเกิล (Nickel) ซึ่งช่วยในการยึดติดกริทเข้าไว้ด้วยกัน การเลือกขนาดของกริทให้เหมาะสมกับบรรจุภัณฑ์วงจรรวม เพื่อให้การตัดมีคุณภาพดี โดยการตัด (Cut) ส่วนของวัสดุในบรรจุภัณฑ์เป็นยูนิต แสดงการเกิดช่องว่างในการตัดแยกยูนิตดังภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 การเกิดช่องว่างในการแบ่งแยกยูนิต

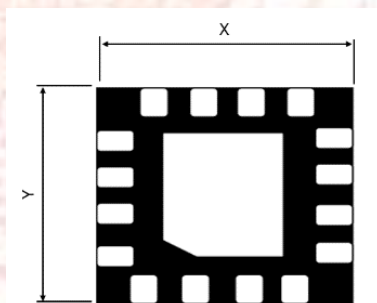
การใช้ใบมีดในการตัดยูนิตบนสตริปลิตเฟรมซึ่งถือเป็นการเกิดแรงเชิงกล (Mechanical Force) กระทำระหว่างใบมีดและสตริปลิตเฟรม ส่งผลให้เกิดการสะสมความร้อน (Heat Accumulation) ขึ้นในระหว่างการตัดและจะทำให้เกิดความเสียหายต่อบรรจุภัณฑ์วงจรรวมได้ ดังนั้น ในระหว่างการตัดแยกยูนิตจึงมีการฉีดน้ำแรงดันสูง (High Pressure Water) ผ่านหัวฉีด (Nozzle) ของเครื่องจักรที่ใช้ในการตัดแบ่งยูนิตตลอดเวลา เพื่อลดการสะสมความร้อน แสดงดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 การฉีดน้ำความดันสูงเพื่อลดการสะสมความร้อนในการตัดแยกยูนิต

ในการควบคุมคุณภาพในการตัดแบ่งยูนิตเพื่อให้ได้ขนาดของบรรจุภัณฑ์ (Package Dimension) และคุณภาพในการตัด (Cutting Quality) ตามความต้องการ จึงต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการตัด เช่น ความเร็วในการตัด (Feed Speed) ความเร็วในการหมุนใบพัด (Spindle Speed) และชนิดของใบมีด (Blade Type) เป็นต้น

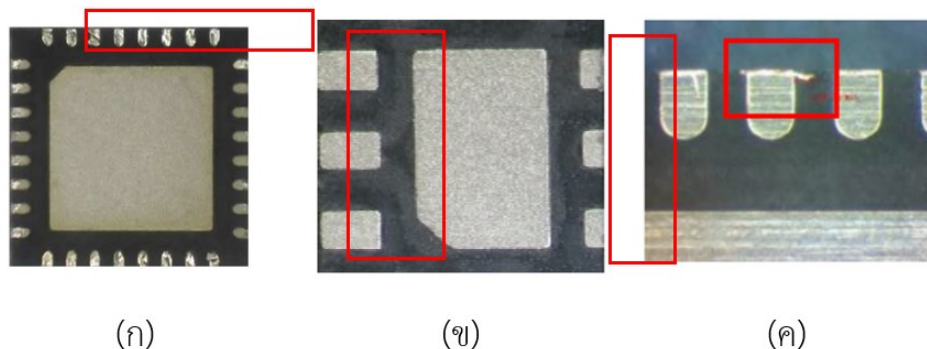
การควบคุมขนาดบรรจุภัณฑ์จะมีการกำหนดขนาดความกว้างและความยาวแต่ละยูนิตโดยการวัดจากกล้องสโคป (Smart Scope) จากเครื่องตัดแบ่งยูนิต ลักษณะของยูนิตในการตัดแบ่งแสดงดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 ลักษณะของแต่ละยูนิตในการตัดแบ่ง

นอกจากจะมีการควบคุมขนาดในการตัดแบ่งยูนิตแล้ว หลังจากการตัดแบ่งเรียบร้อยแล้ว จะทำการควบคุมคุณภาพของแต่ละยูนิตของบรรจุภัณฑ์วงจรรวม โดยการตรวจสอบด้วยสายตา โดยการใช้กล้องกำลังขยายต่ำ 10-40 เท่าโดยตรวจสอบสตริปแรกของทุกๆ ล็อต (Lot) เพื่อยืนยันคุณภาพในการตัดก่อนที่จะทำการตัดแยกยูนิตในสตริปถัดไป

ในการตรวจสอบคุณภาพในการตัดแบ่งยูนิตจะต้องตรวจสอบแล้วไม่พบความบกพร่อง (Defect) ตัวอย่างลักษณะความบกพร่องเนื่องจากการตัดแบ่งยูนิตแสดงดังภาพที่ 2-15 (ก) การละลายของโซลเดอร์ (Solder Melt) (ข) เทอร์มินอลยาว หรือสั้นกว่าปกติ (Long-short terminal) และ (ค) ส่วนเกินที่ยื่นออกหรือรอยเปื้อน (Murr or Smear) เป็นต้น



ภาพที่ 2-15 ตัวอย่างลักษณะความบกพร่องเนื่องจากการตัดแบ่งยูนิต (ก) โซลเดอร์ (solder melt) (ข) เทอร์มินอลยาว หรือสั้นกว่าปกติ (Long-short Terminal) (ค) ส่วนเกินที่ยื่นออก หรือรอยเปื้อน (burr or smear)

2.2.3 กระบวนการลบความเหนียวของเทปด้วยยูวี (UV erase process)

หลังจากการตัดแบ่งยูนิตบนสตริปเรียบร้อยแล้ว จะได้ยูนิตเดี่ยวที่แยกออกจากกันแต่ยังติดอยู่บนเทปยูวี ในขั้นตอนนี้จึงเป็นขั้นตอนในการลดแรงยึดติด (Adhesion) ระหว่างคอมปาว์นของสตริป หลีดเฟรม และเทปยูวีโดยการใช้หลอดแบล็คไลท์ (Black Light Lamp) ฉายลงบนสตริปของลิตเฟรมซึ่งจะทำให้ยูนิตของบรรจุภัณฑ์จางจรรวมง่ายต่อการเอาออกจากเทป ในกระบวนการลบยูวีเพื่อให้แต่ละยูนิตบนสตริปหลุดออกจากเทปยูวี ได้โดยง่ายจะต้องมีการควบคุมความเข้มของแสงยูวี (UV Intensity) ซึ่งจะแสดงอยู่บน ตัวเครื่องลบยูวี (UV Erase Machine) ผู้ปฏิบัติงานจะต้องตรวจสอบความเข้มแสงยูวีในขณะที่ปฏิบัติงานนอกจากนั้นจะต้องมีการควบคุมเวลาในการให้แสงยูวี (UV time) ต่อชิ้นงานด้วย ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญของเครื่องลบยูวี จะกำหนดให้คงที่และเหมาะสมในแต่ละกระบวนการบรรจุภัณฑ์จางจรรวมหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการลบยูวีในแต่ละยูนิต พร้อมทั้งจะนำไปตรวจสอบด้วยกระบวนการตรวจสอบด้วยเครื่องมือ (Pick and Place Process) หรือด้วยสายตาครั้งสุดท้าย (Final Visual Inspection) ต่อไป

2.3 เครื่องมือควบคุมคุณภาพ (7 QC Tools)

เครื่องมือคุณภาพทั้ง 7 ประการ (7 QC tools) ได้ทำการรวบรวมและพัฒนาเครื่องมือคุณภาพทั้ง 7 ชนิด ถือว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญในกาแก้ไขปัญหาทางด้านคุณภาพของกระบวนการผลิต ซึ่งช่วยศึกษาสภาพทั่วไปของปัญหา คัดเลือกหรือจัดลำดับความสำคัญของปัญหา การสำรวจสภาพ ปัจจุบันของปัญหา การค้นหาและวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่แท้จริง เพื่อให้สามารถแก้ไขได้อย่างถูกต้องรวมทั้งติดตามผลอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนช่วยในการจัดทำมาตรฐาน ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพที่สำคัญมี 7 ชนิด โดยเครื่องมือแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 ใบตรวจสอบ (Check Sheet)

ใบตรวจสอบ เป็นแบบฟอร์มที่อยู่ในรูปตารางหรือรูปภาพ ใช้สำหรับกรอรายละเอียดของข้อมูล เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุและติดตามผลการดำเนินงาน ซึ่งลักษณะของใบตรวจสอบต้องคำนึงถึงคือการกำหนดรายละเอียดที่ชัดเจน เช่น รายละเอียดของผลิตภัณฑ์ ผู้ตรวจสอบ วันและเวลาที่ตรวจ เป็นต้น มีการจัดรูปแบบของแบบฟอร์มให้สะดวกต่อการบันทึกข้อมูล ง่ายต่อการจำแนกข้อมูล และวิเคราะห์ผล และที่สำคัญควรกำหนดและใช้ใบตรวจสอบให้ตรงกับวัตถุประสงค์ของการตรวจสอบด้วย ทั้งนี้ใบตรวจสอบในอุตสาหกรรมการผลิตมีหลายแบบในที่นี้จะกล่าวถึง 6 แบบ ซึ่งในแต่ละแบบแบ่งตามวัตถุประสงค์การใช้งาน มีดังนี้

ใบตรวจสอบการผลิต เป็นใบตรวจสอบที่ใช้ในการบันทึกคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ ซึ่งลักษณะของข้อมูลที่ได้จะเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ ทั้งนี้ในการใช้ใบตรวจสอบการผลิตเริ่มต้น ผู้ตรวจสอบจะทำการวัดผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ก่อน หลังจากนั้นจะทำการบันทึกค่าของผลิตภัณฑ์ที่วัดได้ ซึ่งค่าที่วัดได้ในแต่ละชิ้นอาจจะมีค่าไม่เท่ากัน จึงทำให้เราทราบว่าผลิตภัณฑ์แต่ละชิ้นมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานหรือไม่

ใบตรวจสอบข้อบกพร่อง เป็นใบตรวจสอบที่ใช้ในการบันทึกคล้ายกับใบตรวจสอบการผลิต แต่จะแยกตามลักษณะของข้อบกพร่องและลักษณะของข้อมูลที่ได้จะเป็นข้อมูลเชิงคุณลักษณะ ผู้ตรวจสอบจะบันทึกโดยทำเครื่องหมายรอยขีด ตามจำนวนผลิตภัณฑ์ที่มีข้อบกพร่องที่เก็บรวบรวมได้ ใบตรวจสอบชนิดนี้จะทำให้ทราบถึงจำนวนของเสียและจำนวนของดี หรือจำนวนทั้งหมดที่ตรวจพบข้อบกพร่อง

ใบตรวจสอบตำแหน่งข้อบกพร่อง เป็นใบตรวจสอบที่ใช้บันทึกคล้ายกับใบตรวจสอบการผลิตและใบตรวจสอบข้อบกพร่อง แต่ใบตรวจสอบชนิดนี้จะบอกตำแหน่งบริเวณที่มีข้อบกพร่อง โดยแสดงรูปภาพบริเวณของผลิตภัณฑ์ที่มีข้อบกพร่อง ผู้ตรวจสอบจะบันทึกโดยทำเครื่องหมายตามตำแหน่งที่พบข้อบกพร่องหากพบข้อบกพร่องมากกว่า 1 ประเภท จะใช้เครื่องหมายอื่นเพื่อแสดงความแตกต่างของข้อบกพร่อง ใบตรวจสอบชนิดนี้จะทำให้ทราบถึงตำแหน่งที่เกิดข้อบกพร่องและหาสาเหตุของปัญหาได้

ใบตรวจสอบสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง เป็นใบตรวจสอบที่ใช้บันทึกคล้ายกับใบตรวจสอบการผลิต ใบตรวจสอบข้อบกพร่อง และใบตรวจสอบตำแหน่งข้อบกพร่อง แต่จะบันทึกความสัมพันธ์ของคนเครื่องจักร และข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นผู้ตรวจสอบจะบันทึกโดยทำเครื่องหมายแทนลักษณะข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ ถ้าหากมีลักษณะข้อบกพร่องมากกว่า 1 ประเภท จะเปลี่ยนไปใช้เครื่องหมายอื่นแทนเพื่อแสดงความแตกต่าง ใบตรวจสอบชนิดนี้จะทำให้ทราบถึงต้นเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องได้

ใบตรวจสอบสุดท้าย เป็นใบตรวจสอบที่ใช้บันทึกคล้ายกับใบตรวจสอบการผลิต ใบตรวจสอบข้อบกพร่อง ใบตรวจสอบตำแหน่งข้อบกพร่อง และใบตรวจสอบสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง แต่เป็นใบตรวจสอบที่ใช้ในการบันทึกหลายรายการ อาจเป็นการซ่อมบำรุงเครื่องจักร หรือผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป รูปแบบของใบตรวจสอบต้องสอดคล้องกับขั้นตอนการตรวจสอบตามสภาพความเป็นจริง ใบตรวจสอบชนิดนี้ใช้เพื่อ ป้องกันข้อผิดพลาดในการตรวจสอบและยืนยันการตรวจสอบ

ใบตรวจสอบอื่นๆ เป็นใบตรวจสอบนอกเหนือจากที่กล่าวมา ในอุตสาหกรรมอาจพบใบตรวจสอบในลักษณะอื่นๆได้อีก ซึ่งใบตรวจสอบอาจมีลักษณะเฉพาะ โดยอาจมีความจำเป็นที่จะต้องดัดแปลงใบตรวจสอบให้เหมาะสมกับการใช้งานของแต่ละอุตสาหกรรม

2.3.2 กราฟ (Graph)

กราฟเป็นแผนภาพที่อธิบายความแตกต่างของข้อมูลจากการเก็บบันทึก กราฟใช้สำหรับนำเสนอข้อมูลที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจโดยอาศัยการพิจารณาด้วยตาเปล่าได้ สามารถให้รายละเอียดของการเปรียบเทียบได้ดีกว่าการนำเสนอข้อมูลด้วยวิธีอื่น กราฟที่สำคัญได้แก่ กราฟเส้น กราฟแท่ง และกราฟวงกลมโดยรายละเอียดของกราฟแต่ละชนิดมีดังนี้

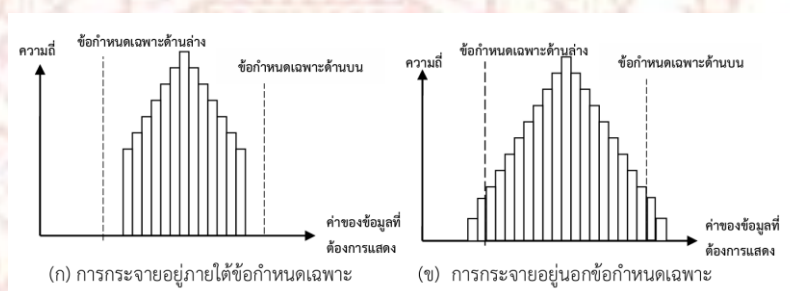
กราฟเส้น เป็นเส้นกราฟที่ใช้แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของข้อมูลเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ลักษณะของกราฟเส้นจะมีแกนตั้งเป็นค่าข้อมูล และแกนนอนเป็นช่วงเวลา กราฟเส้นใช้สำหรับการนำเสนอข้อมูลในกรณีที่ต้องการทราบแนวโน้มของข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา หรือใช้สำหรับการดูการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปเช่น ราคาขายปลีกน้ำมันดีเซลระหว่างปี พ.ศ. 2555-2559 เป็นต้น

กราฟแท่ง เป็นกราฟรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความกว้างเท่ากัน โดยจะใช้ขนาดความยาวหรือความสูงของแท่งกราฟเปรียบเทียบจำนวนข้อมูล การนำเสนอข้อมูลคล้ายกับกราฟเส้น โดยที่กราฟแท่งสามารถนำเสนอได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน กราฟแท่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ กราฟแท่งเชิงเดี่ยว กราฟแท่งเชิงซ้อน และกราฟแท่งเชิงประกอบ โดยกราฟแท่งเชิงเดี่ยวใช้แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลชุดเดียว และแสดงลักษณะของข้อมูลที่สนใจเพียงลักษณะเดียว เช่น ปริมาณการจำหน่ายน้ำมันของบริษัทแห่งหนึ่งในแต่ละวันในหนึ่งสัปดาห์ เป็นต้น ส่วนกราฟแท่งเชิงซ้อนใช้แสดงการเปรียบเทียบของข้อมูล 2 ชุดขึ้นไป เช่น จำนวนอุบัติเหตุทางอากาศกับจำนวนอุบัติเหตุทางเรือระหว่างเดือนมกราคมถึงเดือนพฤษภาคมในปี พ.ศ. 2558 เป็นต้น และกราฟแท่งเชิงประกอบใช้เปรียบเทียบข้อมูลในช่วงเวลาต่างกัน โดยในแต่ละแท่งจะแสดงรายละเอียดหรือส่วนย่อยของข้อมูลที่เรียงต่อกันในแนวตั้ง เช่น สินค้าส่งออก 3 ประเภทในปี พ.ศ. 2555 - 2560 เป็นต้น

กราฟวงกลม มีลักษณะเป็นวงกลมที่มีการแบ่งส่วนของข้อมูลจากจุดศูนย์กลางของวงกลม ออกเป็นกลุ่มๆ ใช้สำหรับเปรียบเทียบสัดส่วนของข้อมูลชนิดเดียวกันในรูปแบบร้อยละ ซึ่งการนำเสนอ ข้อมูลคล้ายกับกราฟเส้นและกราฟแท่ง เช่น สัดส่วนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง 3 ประเภทในประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2559 ยอดขายของห้างสรรพสินค้าแห่งหนึ่งที่มี 3 สาขาในปี พ.ศ. 2558 เป็นต้น

2.3.3 ฮิสโตแกรม (Histogram)

ฮิสโตแกรม เป็นแผนภูมิใช้ในการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของข้อมูลกับข้อกำหนด เฉพาะเพื่อตรวจสอบความผิดปกติหรือติดตามการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการผลิต ฮิสโตแกรมมี ลักษณะเป็นกราฟแท่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างเท่ากัน และในแต่ละแท่งจะเรียงชิดติดกัน โดยแกนตั้งเป็นความถี่และแกนนอนเป็นค่าของข้อมูลที่ต้องการแสดง เมื่อพิจารณาระหว่าง ฮิสโตแกรมกับข้อกำหนดเฉพาะหากพบว่า ฮิสโตแกรมมีการกระจายของข้อมูลอยู่ภายใต้ข้อกำหนด เฉพาะ แสดงว่ากระบวนการผลิตดำเนินไปด้วยดี ไม่ต้องมีการแก้ไขกระบวนการผลิต ดังภาพที่ 2-16(ก) แต่ถ้าการกระจายอยู่นอกภายใต้ข้อกำหนดเฉพาะจะต้องปรับให้ค่าความแปรปรวนของ ข้อมูลการผลิตต่ำลง เพื่อให้การกระจายของข้อมูลนั้นแคบลงอยู่ภายใต้ข้อกำหนดเฉพาะดังภาพ 2-16 (ข)

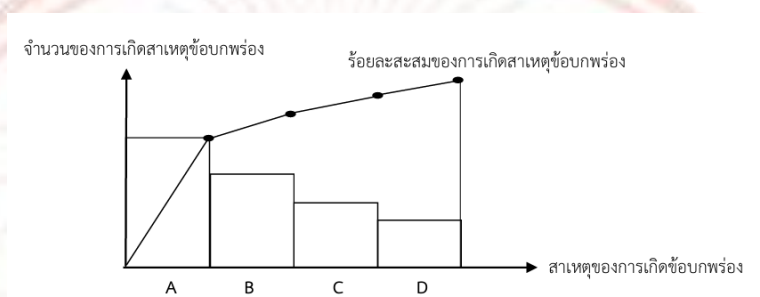


ภาพที่ 2-16 ลักษณะการกระจายของฮิสโตแกรม

2.3.4 แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram)

แผนภูมิพาเรโต เป็นแผนภูมิใช้แสดงสาเหตุของปัญหาที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดข้อบกพร่อง โดยแสดงสาเหตุหลักและสาเหตุรองตามลำดับ เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจว่าควรปรับปรุงสาเหตุใด ก่อนและใช้ตรวจสอบผลที่เกิดขึ้นหลังจากการแก้ไขปรับปรุง แผนภูมิพาเรโตมีลักษณะคล้ายกับ ฮิสโตแกรม คือ เป็นกราฟแท่งรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างเท่ากัน และในแต่ละแท่งจะเรียงชิดติดกัน แต่แผนภูมิพาเรโตจะประกอบด้วยแกนตั้ง 2 แกนและแกนนอน 1 แกน คือ แกนตั้งด้านซ้าย เป็นจำนวนของการเกิดสาเหตุข้อบกพร่อง แกนตั้งด้านขวาเป็นร้อยละสะสมของการเกิดสาเหตุ ข้อบกพร่อง ส่วนแกนนอนเป็นสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องโดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย และมี เส้นแสดงร้อยละสะสม ดังภาพที่ 2-17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผนภูมิพาเรโตในบทความนี้ คือเรื่อง

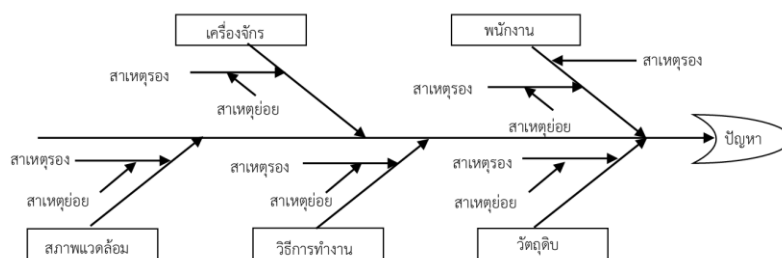
การลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกของเสียประเภท จุดดำ (ธนภุช ชุ่นเซ่ง, 2557) งานวิจัยเรื่องนี้ นำแผนภูมิพาเรโตมาใช้ในการควบคุมคุณภาพในการลด ข้อบกพร่องในกระบวนการฉีดพลาสติก พบว่าจำนวนของเสียทั้งหมด 5,325 ชิ้น มีลักษณะจุดดำซึ่งมีจำนวนของเสียของชิ้นงานมากที่สุดเท่ากับ 2,844 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 53.41 ของปริมาณของเสียทั้งหมด จึงเลือกแก้ปัญหาประเภทจุดดำและหลังปรับปรุงพบว่าจำนวนของเสียประเภทจุดดำเท่ากับ 1,294 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 45.49 ของจำนวนของเสียประเภทจุดดำก่อนการปรับปรุง



ภาพที่ 2-17 พาเรโต (Pareto)

2.3.5 แผนภาพก้างปลา (Fish-bone Diagram)

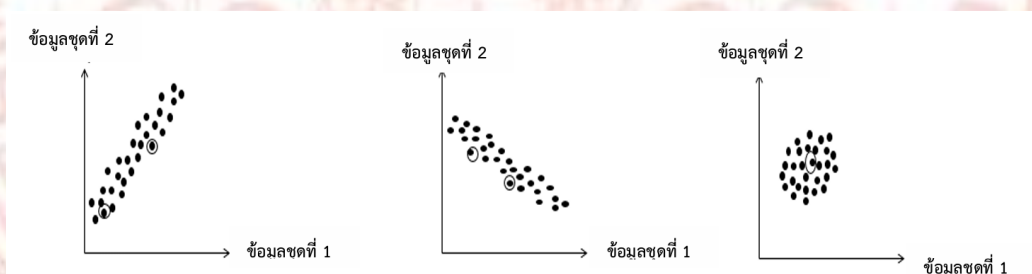
แผนภาพก้างปลา เป็นแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหาที่ต้องการแก้ไขกับสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหา ซึ่งผู้วิเคราะห์สามารถมองภาพรวมของปัญหาและสาเหตุทั้งหมดได้ง่ายขึ้น แผนภาพก้างปลา มีลักษณะคล้ายกับก้างปลา โดยส่วนหัวของก้างปลาจะแสดงปัญหาที่เกิดขึ้น ส่วนก้างปลาหลักจะแสดงสาเหตุหลัก และก้างปลาย่อยแสดงสาเหตุย่อย ซึ่งการหาสาเหตุหลักของปัญหาจะใช้หลักการของ 4M 1E ได้แก่ พนักงาน (Man), เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ (Machine), วัตถุดิบ (Material), วิธีการทำงาน (Method) และสภาพแวดล้อม (Environment) ดังภาพที่ 2-18 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผนภาพก้างปลาในบทความนี้คือ เรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิตเสื้อฟุตบอลของบริษัท เอ็นเค แอปพาวเรล จำกัด ด้วยเทคนิคสถิติ (บุษราคัม พลายม่วง และ ศุภรัตน์ วิริยะไพบูลย์, 2558) งานวิจัยเรื่องนี้ นำแผนภาพก้างปลาเพื่อจำแนกหาสาเหตุของชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพในกระบวนการตัด พบว่าสาเหตุหลักประกอบด้วย พนักงาน วัตถุดิบ เครื่องจักร วิธีการทำงาน และสภาพแวดล้อม โดยด้านพนักงานมีสาเหตุย่อยมาจากไม่มีความชำนาญและมีความเหนื่อยล้า ด้านเครื่องจักรมีสาเหตุย่อยมาจากใบมีดไม่คมและเครื่องจักรไม่พร้อมใช้งาน ด้านวัตถุดิบมีสาเหตุย่อยมาจากวัตถุดิบไม่เป็นไปตามใบสั่งซื้อและวัตถุดิบไม่มีคุณภาพ ด้านวิธีการทำงานมีสาเหตุย่อยมาจากการเร่งรีบในการทำงานและไม่มีการตรวจสอบชิ้นงาน ส่วนด้านสภาพแวดล้อมมีสาเหตุย่อยมาจากสถานที่ทำงานและบรรยากาศในการทำงานไม่เหมาะสม



ภาพที่ 2-18 ลักษณะแผนภาพก้างปลา

2.3.6 แผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram)

แผนภาพการกระจาย เป็นแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล 2 ชุด ที่เป็นข้อมูลเชิงปริมาณโดยแกนตั้งเป็นค่าของข้อมูลชุดที่ 1 และแกนนอนเป็นค่าของข้อมูลชุดที่ 2 โดยลักษณะความสัมพันธ์และ ทิศทางของความสัมพันธ์จะพิจารณาได้จากแนวของจุดที่พล็อตลงในแผนภาพ ถ้าจุดมีลักษณะเป็นแนวโน้มขึ้นตลอดหรือลงตลอดด้วยอัตราคงที่ แสดงว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุด น่าจะมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง ถ้ามีลักษณะขึ้นขึ้นแสดงว่ามีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันและค่าความชันจะเป็นบวก (ดังภาพที่ 2-19 (ก)) แต่ถ้ามีลักษณะชันลงแสดงว่ามีความสัมพันธ์ไปในทิศทางตรงกันข้ามและค่าความชันจะเป็นลบ (ดังภาพที่ 2-19 (ข)) ถ้าจุดมีลักษณะกระจัดกระจายไม่เป็นรูปแบบแสดงว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุดไม่มีความสัมพันธ์กัน (ดังภาพที่ 2-19 (ค))



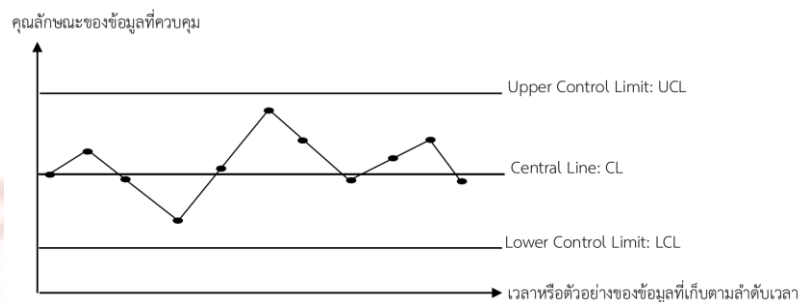
(ก) มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน (ข) มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางตรงกันข้าม (ค) ไม่มีความสัมพันธ์กัน

ภาพที่ 2-19 ลักษณะของแผนภาพการกระจาย

2.3.7 แผนภูมิควบคุม (Control Chart)

แผนภูมิควบคุม เป็นแผนภูมิที่ใช้สำหรับควบคุมกระบวนการผลิต ติดตามการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการผลิตได้อย่างรวดเร็ว และปรับปรุงกระบวนการผลิตให้กลับเข้าสู่สภาพปกติ โดยลักษณะของแผนภูมิจะเป็นกราฟ โดยมีแกนตั้งเป็นคุณลักษณะของข้อมูลที่ควบคุม และแกนนอนเป็นเวลาหรือตัวอย่างของข้อมูลที่เก็บมาตามลำดับเวลา แผนภูมิควบคุมจะประกอบด้วยเส้นควบคุม 3 เส้น ได้แก่ เส้นควบคุมบน (Upper Control Limit: UCL) เส้นควบคุมล่าง (Lower Control Limit: LCL) และเส้นกลาง (Central Line: CL) โดย CL จะอยู่ที่ค่าเฉลี่ย และมีระยะห่างของ CL ถึง

UCL และ LCL เท่ากับ 3 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ดังภาพที่ 2-20) แผนภูมิควบคุมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แผนภูมิควบคุมเชิงปริมาณและแผนภูมิควบคุมเชิงคุณลักษณะ โดยแผนภูมิควบคุมแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังนี้



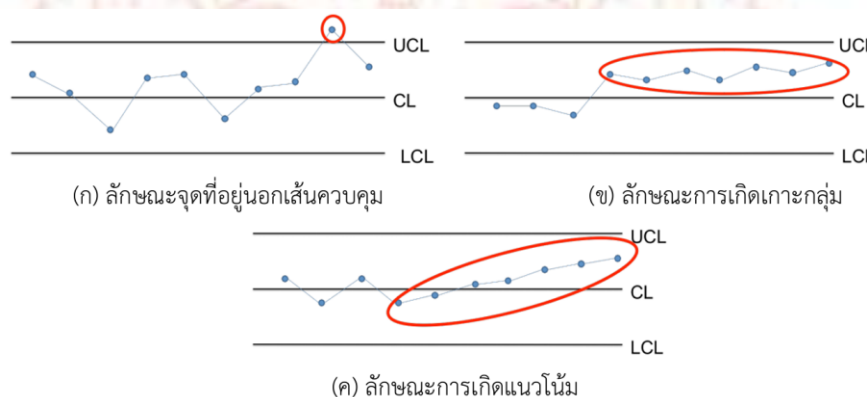
ภาพที่ 2-20 ลักษณะของแผนภูมิควบคุม

แผนภูมิควบคุมเชิงปริมาณ (Variable Control Chart) เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมคุณลักษณะของ ข้อมูลเชิงปริมาณที่สำคัญ ได้แก่ แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ย (X-Chart) และแผนภูมิควบคุมพิสัย (R-Chart) โดย X -Chart ใช้ควบคุมค่าเฉลี่ยของกระบวนการผลิต ส่วน R-Chart ใช้ควบคุมการกระจายของกระบวนการผลิต งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผนภูมิควบคุมเชิงปริมาณในบทความนี้ คือ เรื่องการควบคุมคุณภาพเชิงสถิติสำหรับกระบวนการผลิตพรมทอมือ ของโรงงานผลิตพรม (พรเทพ ขอบชายเกียรติ และศิวตล กัญญาคำ, 2548) งานวิจัยเรื่องนี้ นำแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ย และแผนภูมิควบคุมพิสัยของจำนวนฝีเข็มต่อความยาว 5 เซนติเมตร โดยตรวจวัดจำนวนฝีเข็มต่อความยาว 5 เซนติเมตร ในแต่ละชั่วโมงที่ทำการทอพรมแต่ละผืนจำนวน 5 ค่า มาใช้เป็นเครื่องมือควบคุมความหนาแน่นของพรม

แผนภูมิควบคุมเชิงคุณลักษณะ (Attribute Control Chart) เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมคุณลักษณะของข้อมูลเชิงคุณลักษณะที่สำคัญ ได้แก่ แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย (p-Chart) แผนภูมิควบคุมจำนวนของเสีย (np-Chart) แผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิ (c-Chart) แผนภูมิควบคุมจำนวนรอยตำหนิต่อหน่วย (u-Chart) ซึ่ง p-Chart และ np-Chart เป็นแผนภูมิที่ใช้ตรวจสอบจำนวนของเสียของกระบวนการผลิตแต่ p-Chart ใช้สำหรับขนาดของกลุ่มตัวอย่างไม่คงที่ และ np-Chart ใช้กับขนาดของกลุ่มตัวอย่างคงที่ส่วน c-Chart และ u-Chart เป็นแผนภูมิที่ใช้ควบคุมจำนวนรอยตำหนิของผลิตภัณฑ์หนึ่งหน่วย แต่ c-Chart ใช้กับขนาดของตัวอย่างในหนึ่งหน่วยคงที่ และ u-Chart ใช้กับขนาดของตัวอย่างในหนึ่งหน่วยไม่คงที่ งานวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับแผนภูมิควบคุมเชิงคุณลักษณะในบทความนี้ คือ เรื่องการลดสัดส่วนของเสียในกระบวนการผลิตฝากระป๋องโดยใช้การควบคุมกระบวนการด้วยหลักการทางสถิติ (กิริตศักดิ์ กิริตอัครมเดช, 2555) งานวิจัยเรื่องนี้ นำแผนภูมิ

ควบคุมสัดส่วนของเสีย โดยตรวจสอบคุณลักษณะของฝากระป๋องที่มีข้อบกพร่อง ได้แก่ รอยขีด ข่วน คราบแลคเกอร์ จุดดำ และรอยบุบ มาใช้เป็นเครื่องมือควบคุมวิธีการปั๊มฝากระป๋อง

ในการวิเคราะห์แผนภูมิควบคุมว่าเกิดปัญหาในกระบวนการผลิตหรือไม่ จะพิจารณาจุดที่ปรากฏบนแผนภูมิควบคุม โดยลักษณะจุดในแผนภูมิควบคุมมีลักษณะหลัก ๆ ได้แก่ มีจุดอยู่นอกเส้นควบคุมการเกิดเกาะกลุ่ม (Run) และเกิดแนวโน้ม (Trend) โดยจุดอยู่นอกเส้นควบคุม คือ มีจุดอย่างน้อย 1 จุดอยู่นอก UCL หรือ LCL (ดังภาพที่ 21 (ก)) ส่วนการเกิดเกาะกลุ่ม คือ มีจุดอย่างน้อย 7 จุดเรียงติดกันอยู่ด้านบน CL หรือด้านล่าง CL (ดังภาพที่ 21 (ข)) และการเกิดแนวโน้ม คือ มีจุดอย่างน้อย 7 จุดเรียงตัวกันแนวเอียงขึ้นหรือแนวเอียงลงต่อเนื่องกันตลอดภายใต้ UCL และ LCL ดังภาพที่ 2-22 (ค) ตัวอย่างลักษณะการปรากฏจุดบนแผนภูมิควบคุม 3 ลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะสำคัญที่บ่งบอกว่ากระบวนการผลิตเกิดปัญหา ต้องค้นหาสาเหตุและปรับปรุงกระบวนการผลิต



ภาพที่ 2-21 ลักษณะจุดบ่งบอกกระบวนการผลิตที่เกิดปัญหา

2.4 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

2.4.1 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

นายซิซญู[2562] โดยทั่วไปเมื่อเกิดข้อปัญหา หรือข้อสงสัยใดๆ แล้ว ก่อนอื่นจะต้องเริ่มต้นด้วยการตั้งข้อสงสัยกับปัญหาดังกล่าวเสียก่อน แล้วค่อยนำข้อสงสัยดังกล่าว มาพิสูจน์ว่าที่เราสงสัยดังกล่าวเป็นจริงหรือไม่ ซึ่งในวิชาสถิติ เรียกข้อสงสัยดังกล่าวว่า สมมติฐาน และการพิสูจน์ข้อสงสัยเรียกว่า การทดสอบสมมติฐาน เช่นเดียวกัน การที่สามารถใช้ข้อมูลจากตัวอย่างเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของประชากรได้นั้น ไม่ได้แปลว่าเรารู้พฤติกรรมของประชากรได้ทั้งหมด เพราะยังมีปัญหาทางวิศวกรรมอีกมากมายที่ต้องการการตัดสินใจ ในทางปฏิบัติผู้ใช้สถิติจะนำเอาปัญหาดังกล่าวมาตั้งเป็นสมมติฐาน แล้วก็ทำการทดลอง เก็บข้อมูล แล้ววิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และตัดสินใจที่จะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐาน โดยอ้างอิงตามผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ซึ่งเราเรียกกระบวนการทั้งหมดนี้ว่าการทดสอบสมมติฐานซึ่งจัดว่าเป็นการประยุกต์ใช้หลักวิชาสถิติที่สำคัญ

การทดสอบสมมติฐานเป็นข้อความเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของการแจกแจง ความน่าจะเป็นหรือพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมมติฐานสะท้อนถึงการทำนายเกี่ยวกับสถานการณ์ของปัญหา การตั้งสมมติฐานจะกล่าวถึงประชากรเท่านั้น ไม่ใช่ตัวอย่างที่เก็บมาค่าคงที่ที่นำมาใช้ตั้งสมมติฐานหลักนั้นจะมีที่มาได้ 3 ทางดังนี้

2.4.1.1 ได้มาจากข้อมูลเก่า หรือค่าที่กระบวนการดังกล่าวเป็นอยู่ในอดีตหรืออาจจะได้มาจากการทดลองก่อนหน้านี้ก็ได้ ซึ่งกรณีนี้แปลว่าเรากำลังพิสูจน์ว่าค่าพารามิเตอร์หรือกระบวนการ ได้เปลี่ยนแปลงไปหรือไม่

2.4.1.2 ได้มาจากทฤษฎี ผลการวิจัย หรือผลจากแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นการทดสอบสมมติฐานในกรณีนี้จะเป็นการ พิสูจน์ทราบหรือยืนยัน ทฤษฎี หัวข้อการวิจัยหรือแบบจำลองว่าถูกต้องหรือไม่

2.4.1.3 ได้มาจากข้อกำหนดทางวิศวกรรม (Engineering Specification) ในกรณีนี้แปลว่าเราต้องการทดสอบว่ากระบวนการ ยังตรงตามข้อกำหนดหรือไม่

2.4.2 การตั้งสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานจะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ การทดสอบสมมติฐานแบบ 1 ประชากร การทดสอบสมมติฐานแบบ 2 ประชากร และการทดสอบสมมติฐานแบบหลายประชากร ขึ้นอยู่กับปัจจัยและระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลอง การตั้งสมมติฐานจะแบ่งออกเป็น 3 กรณี โดยขึ้นอยู่กับผู้ทดสอบว่าต้องศึกษาในกรณีใด แต่โดยทั่วไปจะตั้งเพื่อทดสอบค่าเฉลี่ยของประชากรในแต่ละกรณีจะต้องเขียนทั้งสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis: H_0) และสมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis: H_1) โดยมีหลักการเขียนดังนี้

H_0 จะต้องมีความหมาย $=$, $\leq$ หรือ $\geq$ เท่านั้น (หนังสือส่วนใหญ่ใช้ $=$ แทนทั้ง 3 เครื่องหมาย)

H_0 , จะต้องมีความหมาย $\neq$, $>$ หรือ $<$ ซึ่งเป็นทิศตรงกันข้ามกับ H_0 เท่านั้น

2.4.2.1 การตั้งสมมติฐานแบบ 1 ประชากร

วิศวกรท่านหนึ่งต้องการทราบว่า ถ้าใช้กระแสไฟฟ้าในกระบวนการชุบอะโนไดซ์ เท่ากับ 1.72 A/cm^2 จะได้เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของพิสตันวาล์วเป็นอย่างไรเมื่อเทียบกับ 13.5 mm . เนื่องจากปัญหานี้วิศวกรสนใจเพียงค่ากระแสไฟฟ้าที่ 1.72 A/cm^2 (1 ปัจจัย 1 ระดับ) เราสามารถตั้งสมมติฐานได้ 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 พิสตันวาล์วที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอย่างน้อย 13.5 mm .

กรณีที่ 2 พิสตันวาล์วที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 13.5 mm .

กรณีที่ 3 พิสตันวาล์วที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 13.5 mm .

สมมติฐานที่เป็นไปได้แสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างการตั้ง H_0 และ H_1 ของกลุ่มประชากร 1 กลุ่ม

ประชากร 1 กลุ่ม		
กรณีที่1	กรณีที่2	กรณีที่3
$H_0: \mu=13.5$	$H_0: \mu=13.5$	$H_0: \mu=13.5$
$H_0: \mu<13.5$	$H_0: \mu>13.5$	$H_0: \mu\neq 13.5$

ที่มา: [ธีรเดช]

2.4.2.2 การตั้งสมมติฐานแบบ 2 ประชากร

สมมติว่าวิศวกรต้องการทราบว่า ถ้าใช้กระแสไฟฟ้าในกระบวนการชุบอะโนไดซ์ เท่ากับ 1.72 และ 1.92 A/cm² จะได้เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของพิสตันวาล์วเป็นอย่างไร เนื่องจากปัญหานี้วิศวกรสนใจค่ากระแสไฟฟ้า 2 ระดับ (1 ปัจจัย 2 ระดับ) เราสามารถตั้งสมมติฐานได้ 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 พิสตันวาล์วที่ได้จากกระแสไฟฟ้า 1.72 A/cm² จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่าพิสตันวาล์วที่ได้จากกระแสไฟฟ้า 1.92 A/cm²

กรณีที่ 2 พิสตันวาล์วที่ได้จากกระแสไฟฟ้า 1.72 A/cm² จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่มากกว่าพิสตันวาล์วที่ได้จากกระแสไฟฟ้า 1.92 A/cm²

กรณีที่ 3 พิสตันวาล์วที่ได้จากกระแสไฟฟ้า 1.72 A/cm² จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เท่ากับพิสตันวาล์ว ที่ได้จากกระแสไฟฟ้า 1.92 A/cm² สมมติฐานที่เป็นไปได้แสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ตัวอย่างการตั้ง H_0 และ H_1 ของประชากร 2 กลุ่ม (1.72 คือกลุ่มที่1, 1.92 คือกลุ่มที่ 2)

ประชากร 2 กลุ่ม		
กรณีที่1	กรณีที่2	กรณีที่3
$H_0: \mu_1=\mu_2$	$H_0: \mu_1=\mu_2$	$H_0: \mu_1=\mu_2$
$H_0: \mu_1<\mu_2$	$H_0: \mu_1>\mu_2$	$H_0: \mu_1\neq\mu_2$
หรือ	หรือ	หรือ
$H_0: \mu_1-\mu_2 =0$	$H_0: \mu_1-\mu_2 =0$	$H_0: \mu_1-\mu_2 =0$
$H_1: \mu_1-\mu_2 <0$	$H_1: \mu_1-\mu_2 >0$	$H_1: \mu_1-\mu_2 \neq 0$

ที่มา: [ธีรเดช]

2.4.2.3 การตั้งสมมติฐานแบบหลายประชากร

สมมติว่าวิศวกรต้องการทราบว่า ถ้าใช้กระแสไฟฟ้าในกระบวนการชุบอะโนไดซ์ เท่ากับ 1.72, 1.82 และ 1.92 A/cm² จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของพิสตันวาล์วเป็นอย่างไร เนื่องจากปัญหานี้วิศวกรสนใจค่ากระแสไฟฟ้า 3 ระดับ (1 ปัจจัย 3 ระดับ) ในกรณีที่มีหลายปัจจัยแบบนี้ เรานิยมใช้สมมติฐานเพียงแบบเดียว คือ พิสตันวาล์วที่ได้จากกระแสไฟฟ้าทุกระดับมีความแตกต่างกันหรือไม่ ซึ่งจะตั้งสมมติฐานได้ดังนี้

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

H_1 : มีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 ระดับที่แตกต่างจากระดับอื่น

เราจะใช้สถิติ z-test และ t-test ในการทดสอบสมมติฐานของกรณี 1 และ 2 ประชากร ส่วนในกรณีหลายประชากร เราจะประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแทน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการควบคุม ค่าความผิดพลาดแบบที่ 1 ได้ดีกว่าการใช้ z-test และ t-test

2.4.3 การกำหนดค่านัยสำคัญของการทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานจะต้องมีการกำหนดค่านัยสำคัญในการทดสอบ เพื่อควบคุมค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการสรุปผิดพลาด ซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ

การปฏิเสธ H_0 ทั้งๆที่ H_0 เป็นจริง (Type 1 Error: α)

การไม่ปฏิเสธ H_0 ทั้งๆที่ H_0 เป็นเท็จ (Type I Error: β)

จะเกี่ยวข้องกับการกำหนดพื้นที่ในการปฏิเสธ H_0 (พื้นที่ใต้กราฟ Normal Distribution) โดยปกติจะกำหนดค่านี้อยู่ที่ 0.05 ซึ่งหมายความว่าในการทดสอบสมมติฐานจะยอมให้เกิด Type 1 Error เพียง 5% (บางปัญหาอาจจะใช้แค่ 1%) หรืออีกนัยหนึ่งคือจะมีความเชื่อมั่นได้เท่ากับ $(1-\alpha)100\%$ ที่จะไม่สรุปผิดเมื่อสมมติฐานเป็นจริง (Confidence Level)

ส่วนค่า β จะเกี่ยวข้องกับการกำหนดจำนวนการทำซ้ำในการทดลอง (Replicate) ถ้าการทดลองมีจำนวนการทำซ้ำมากจะทำให้ค่าความน่าจะเป็นในการสรุปผิดแบบนี้ต่ำลง หรืออีกนัยหนึ่งคือจะมีความเชื่อมั่นได้เท่ากับ $(1-\beta)100\%$ ที่จะไม่สรุปผิดเมื่อสมมติฐานเป็นเท็จ (Power of Test)

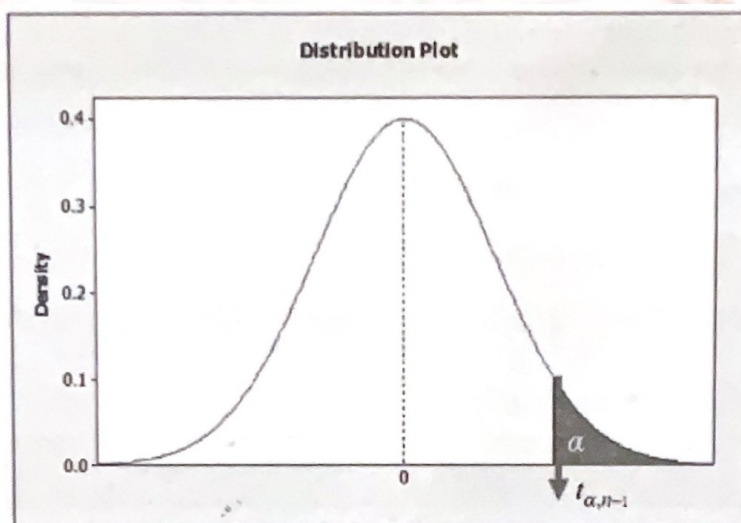
2.4.4 การกำหนดบริเวณวิกฤต

การกำหนดบริเวณวิกฤต (Critical Region) เป็นการกำหนดบริเวณของพื้นที่ใต้กราฟ Normal Distribution เพื่อใช้ในการปฏิเสธสมมติฐาน พื้นที่ดังกล่าวจะมีขนาดเท่ากับค่า α โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีขึ้นอยู่กับเครื่องหมายที่ใช้ในการตั้ง H_1 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

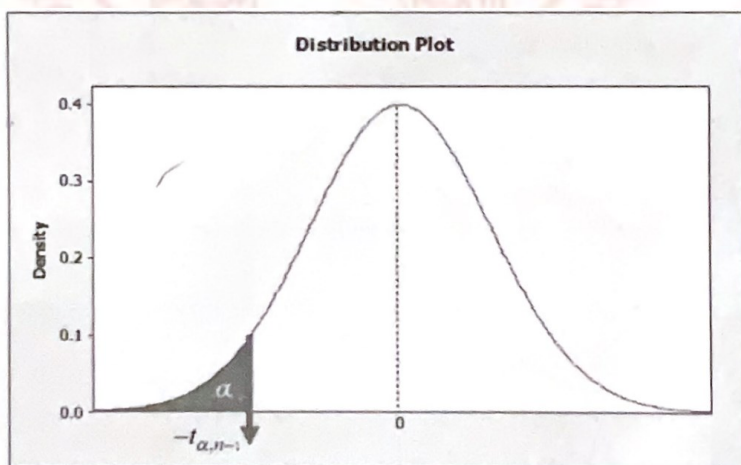
กรณีที่สมมติฐานรองใช้เครื่องหมายมากกว่า ($H_1: \mu > \mu_0$) จะเป็นการทดสอบแบบทางเดียว (One Tailed Test) ที่มีบริเวณบริเวณวิกฤตอยู่ทางขวาเท่ากับ α ดังแสดงในภาพที่ 2-22

กรณีที่สมมติฐานรองใช้เครื่องหมายน้อยกว่า ($H_1: \mu < \mu_0$) จะเป็นการทดสอบแบบทางเดียว (One Tailed Test) ที่มีบริเวณวิกฤตอยู่ทางซ้ายเท่ากับ α ดังแสดงในภาพที่ 2-23

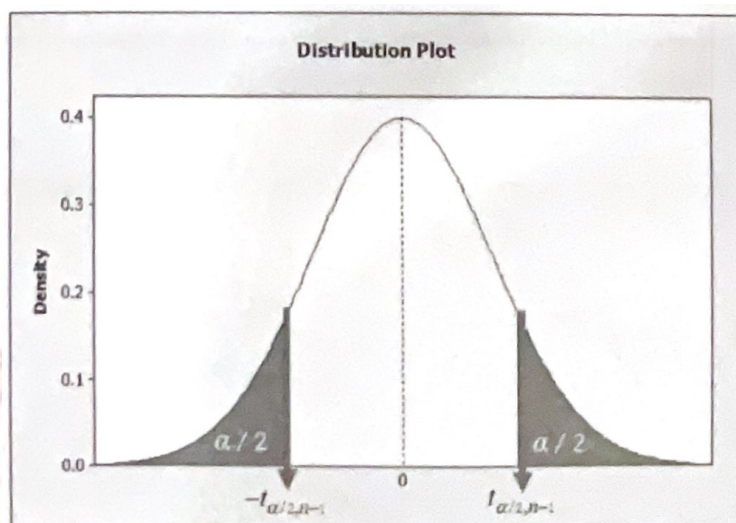
กรณีที่สมมติฐานรองใช้เครื่องหมายไม่เท่ากับ ($H_1: \mu \neq \mu_0$) จะเป็นการทดสอบแบบสองทาง (Two- Tailed Test) ที่มีบริเวณบริเวณวิกฤตอยู่ทั้งทางซ้ายและขวาข้างละ $\alpha/2$ ดังแสดงในภาพที่ 2-24 ค่าที่แสดงอยู่บนแกนของภาพที่ 2-22 ถึง 2-24 เรียกว่า ค่าวิกฤต (Critical Value) ซึ่งเป็นค่าสถิติที่ใช้แบ่งพื้นที่ใต้กราฟออกเป็นพื้นที่ของการปฏิเสธและไม่ปฏิเสธ H_0 โดยจะใช้ตัวสถิติแบบใดจะขึ้นอยู่กับสถานการณ์ในการทดสอบ ซึ่งจะกล่าวถึงการเลือกสถิติในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 2-22 การทดสอบทางเดียวที่มีบริเวณวิกฤตอยู่ทางขวา



ภาพที่ 2-23 การทดสอบทางเดียวที่มีบริเวณวิกฤตอยู่ทางซ้าย



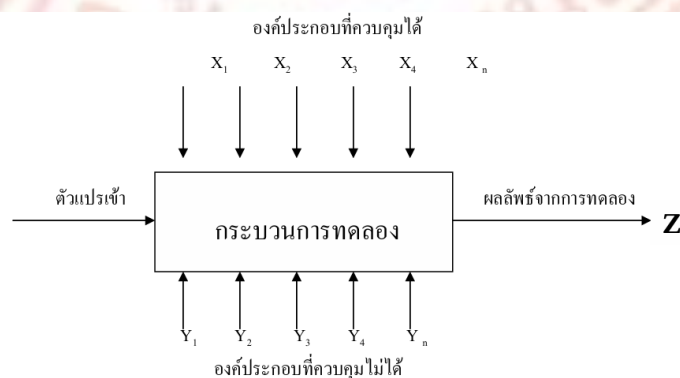
ภาพที่ 2-24 การทดสอบสองทางที่มีบริเวณวิกฤตอยู่ทั้งสองข้าง

2.5 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

2.5.1 ออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การทดลอง (Experiment) คือ การจำลองสภาพความเป็นจริงให้มาอยู่ในสภาพที่เราสามารถควบคุมได้ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อเท็จจริงอันเป็นผลจากการปฏิบัติในการศึกษาทดลอง โดยการทดลองจะแบ่งเป็นการทดลองเบื้องต้น คือ การทดลองเพื่อให้ทราบผลอย่างกว้างๆ ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป และการทดลองขั้นตัดสินใจ เป็นขั้นตอนการนำสิ่งที่คัดเลือกได้จากการทดลองเบื้องต้นมาทำการทดลองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบหรือหาสิ่งที่ดีที่สุดในกลุ่ม โดยจะมีการใช้แผนการทดลองแบบต่างๆ

ตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนได้ด้วยแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 2-25



ภาพที่ 2-25 แสดงรูปแบบการทดลองและองค์ประกอบของกระบวนการ

จากภาพที่ 2-25 การทดลองโดยทั่วไปจะมียุทธศาสตร์ประกอบในการทดลองที่มีผลต่อกระบวนการทดลองนอกเหนือจาก ตัวแปรเข้าและผลการทดลอง ซึ่งทั้งหมดจะเป็นอะไรนั้นขึ้นอยู่กับปัญหาหรือการออกแบบการทดลองที่พัฒนาขึ้น โดยส่วนใหญ่จะผสมผสานกันจากระบบเช่น เครื่องจักร วิธีการผลิต คนควบคุมและวัสดุต่างๆ ซึ่งทั้งหมดนี้หมายถึงตัวแปรและองค์ประกอบ วัสดุจะเป็นตัวแปรเข้าเมื่อผ่านกระบวนการแล้วจะเป็นผลลัพธ์ที่ได้ อาจจะเป็นอย่างเดียวกันหรือ หลายอย่างในเวลาเดียวกันแล้วแต่ตัวแปรเข้ามีจำนวนกี่ชนิด ในกระบวนการจะมียุทธศาสตร์ประกอบที่เกี่ยวข้องคือ $X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ควบคุมไม่ได้และ $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, \dots, Y_n$, เป็นองค์ประกอบที่ควบคุมไม่ได้

วัตถุประสงค์ของการทดลองอาจเขียนรวมได้ดังนี้

1. ต้องการตัดสินใจว่าตัวแปรใดที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลลัพธ์ Z
2. ต้องการตัดสินใจในตัวแปรที่ควบคุมได้ใน $X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n$ ซึ่งว่าตัวใดมีอิทธิพลหรือส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างไร?
3. ต้องการทราบว่าตัวแปรที่ควบคุม $X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n$ ตัวใดที่ทำให้เกิดความแปรปรวนในผลลัพธ์น้อยที่สุด
4. ต้องการตัดสินใจว่าอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, \dots, Y_n$ ตัวใดที่มีผลกระทบ น้อยที่สุด

2.5.2 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

2.5.2.1 การทำซ้ำ (Replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ประการแรกเรพลีเคชันทำให้สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ซึ่งเป็นหน่วยวัดขั้นพื้นฐาน สำหรับพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง นั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลองเรพลีเคชันทำให้สามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบ

2.5.2.2 (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การแรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมติฐาน นี้เป็นจริงและสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะมีปรากฏในการทดลองได้

2.5.2.3 บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลองบล็อกกิ้งหนึ่งอาจหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควร

จะมีความเป็น อันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่าง ๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดจากการบล็อกกิ้ง

2.5.3 ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลอง

2.5.3.1 ทรีทเมนต์ (Treatment)

คือ สิ่งหรือวิธีปฏิบัติต่อสิ่งทดลอง เพื่อวัดผลเปรียบเทียบตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.5.3.2 หน่วยทดลอง (Experiment unit)

เป็นมาตรฐานหรือหน่วยที่ใช้วัดอิทธิพลของทรีทเมนต์ ซึ่งโดยคำจำกัดความ หมายถึง สิ่งหนึ่งหรือกลุ่มหนึ่งของการทดลอง ซึ่งได้รับจากทรีทเมนต์เดียวกันในการกระทำครั้งใดครั้งหนึ่ง หน่วยทดลองมีขนาดไม่จำกัดอาจผันแปรได้จากการทดลองหนึ่งไปสู่อีกการทดลองหนึ่ง ถึงแม้จะใช้สิ่งทดลองเหมือนกันก็ตามในการทดลองแต่ละครั้งจึงต้องให้คำจำกัดความของหน่วยทดลองให้ชัดเจน

2.5.3.3 ปัจจัย (Factor)

ได้แก่ กลุ่มของทรีทเมนต์ทั้งหลายที่มีความเกี่ยวข้องกัน (A particular class of related treatment) อาจใช้คำว่าตัวแปรอิสระก็ได้ ปัจจัยนั้นอาจเป็นไปได้ทั้งข้อมูลเชิง คุณภาพและเชิงปริมาณ ปัจจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น

2.5.3.3.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการดำเนินการทดลอง

2.5.3.3.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ อาจเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุน ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แบ่งออกเป็น

ก) ตัวแปรรบกวน (Noise variable) หรือ Background variable เป็นตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Response variable) ในการทดลองแต่ไม่ใช่ปัจจัยที่เรา กำลังทำการศึกษา ส่วนใหญ่มักเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม ในธรรมชาติ เช่น ลม ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ภายนอกเวลาและอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุม เป็นต้น

ข) Nuisance variable คือ ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองแต่เราไม่ทราบมาก่อน เราสามารถกำจัดอิทธิพลของ Nuisance variable ได้โดยการสุ่ม

2.5.3.4 ตัวแปรตอบสนอง (Response variable)

คือ ตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลองเรียกอีกอย่างว่า ตัวแปร ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระในการทดลองหนึ่ง ๆ อาจวัดค่าตัวแปรตามมากกว่า 1 ก็ได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (Sensitivity) ความเชื่อถือได้ (Reliability)

การแจกแจงของตัวแปรและความเป็นไปได้ทั้งปฏบัติส่วนการเลือกตัวแปรตามจะต้องพิจารณาว่าค่าสังเกตที่ได้รับจากพหิตเม้นต์หนึ่ง ๆ ควรมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสมมติฐานความปกติ (Normality) เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบการทดลอง อาจจะใช้การแปลงข้อมูล (Transformation) ค่าสังเกตที่มีการแจกแจงไม่ปกติเป็นแบบปกติ

2.5.4 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 : เข้าใจปัญหาที่เกิดขึ้น

ผู้ทดลองจะต้องทราบว่า ในกระบวนการที่สนใจเกิดปัญหาลักษณะใด เพราะการเข้าใจถึงปัญหาที่ชัดเจนจะทำให้สามารถกำหนดค่าตอบสนองได้อย่างถูกต้อง และยังสามารถทำให้มองเห็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างรวดเร็ว

ขั้นตอนที่ 2 : กำหนดวัตถุประสงค์

การกำหนดวัตถุประสงค์ เป็นการวางเป้าหมายอย่างชัดเจนว่าต้องการอะไรจากการทดลอง หรือหมายถึงการกำหนดทิศทางหรือกำหนดค่าตอบสนองที่ต้องการนั่นเอง

ขั้นตอนที่ 3 : เลือกปัจจัยและกำหนดระดับปัจจัย

การเลือกปัจจัยและกำหนดระดับปัจจัย เป็นการกำหนดว่ามีปัจจัยใดที่ส่งผลต่อค่าตอบสนอง จากนั้น พิจารณาว่าในแต่ละปัจจัยจะทดลองที่ค่าใดบ้าง (ระดับ)

ขั้นตอนที่ 4 : เลือกรูปแบบการทดลอง

การเลือกรูปแบบการทดลอง เป็นขั้นตอนที่ผู้ทดลองตัดสินใจว่าควรใช้การทดลองแบบใด จึงจะเหมาะสมกับปัญหาที่เกิดขึ้นมากที่สุด โดยสามารถพิจารณาได้จากเวลาที่มีในการทำการทดลอง และต้นทุนของการทดลองที่ตั้งไว้

ขั้นตอนที่ 5 : ดำเนินตามแผนการทดลอง

ขั้นตอนนี้เป็นการดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ผู้ทดลองควรให้ความสนใจต่อ ทุกขั้นตอนในการทดลอง เนื่องจากถ้าทดลองผิดพลาดอาจทำให้ผลการทดลองที่เกิดขึ้นเกิดความคลาดเคลื่อนและควรมีการทำการทดลองซ้ำเพื่อให้แน่ใจว่าได้ผลเช่นนั้นจริง

ขั้นตอนที่ 6 : วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ขั้นตอนนี้เป็นการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ โดยมีขั้นตอนหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

1. เลือกโมเดลที่จะใช้ในการวิเคราะห์ (Mean or Effect Models)
2. ตั้งสมมติฐานในการทดลองจากโมเดลที่เลือก
3. เลือกระดับนัยสำคัญที่ต้องการ
4. สร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)
5. หาโมเดลที่เหมาะสม (Reduced Model)

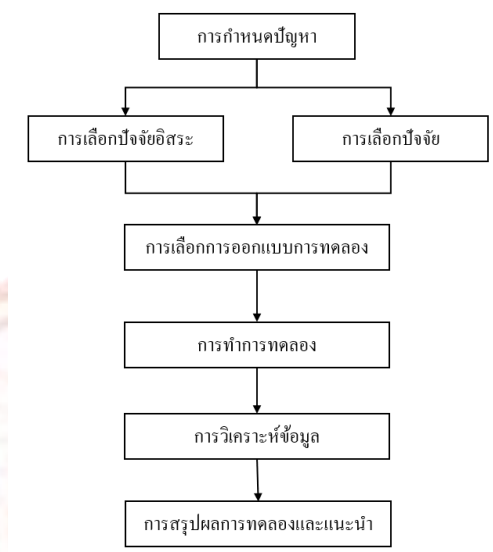
6. ตรวจสอบความถูกต้องของโมเดล (Model Adequacy Checking)
7. หากำลังของการทดสอบและจำนวนการทำซ้ำที่เหมาะสม (Power of Test and Sample Size)
8. สรุพอธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้
9. เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเป็นคู่ (Comparison Test)
10. หาความสัมพันธ์ในการทำนายค่าตอบสนอง (Regression Model)
11. หาค่าปรับตั้งปัจจัยเพื่อให้ได้ค่าตอบสนองที่ต้องการ (Response Optimizer)
12. การทดสอบเพื่อยืนยันผล (Confirm Run)

ข้อที่ 7, 9, 10, 11 อาจจะไม่จำเป็นต้องทำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลการทดลองที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 7 : สรุปผลการทดลอง

การออกแบบการทดลอง คือการสร้างชุดการทดลองเพื่อที่จะศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อ ค่าตอบสนอง โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการทดลองจะแบ่งออกเป็น ปัจจัยหลัก และปัจจัยรบกวน ซึ่งปัจจัยแต่ละชนิดจะมีวิธีการจัดการในการทดลองแตกต่างกัน การออกแบบการทดลองมีหลักการพื้นฐานที่สำคัญอยู่ 3 ประการ ได้แก่ การทดลองแบบสุ่ม (Randomization) การทดลองซ้ำ (Replication) และการบล็อก (Blocking) ซึ่งในการทดลองใด ๆ ควรจะมีการพิจารณาถึงหลักการทั้ง 3 ข้อนี้อย่างครบถ้วน เพื่อที่จะทำให้การสรุปผลการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ การออกแบบการทดลองมีอยู่หลายชนิด การเลือกแบบการทดลองที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ โดยใช้งบประมาณที่ไม่สูงมาก ในบทต่อไปจะอธิบายถึง พื้นฐานการทดสอบสมมติฐานทางสถิติที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบการทดลอง เพื่อให้ผู้เรียนสามารถ ตั้งสมมติฐานสำหรับการออกแบบการทดลองได้อย่างถูกต้อง

สิทธิกร [2556] รูปแบบของการออกแบบการทดลองในเฟสนี้ดังแสดง ในภาพที่ 2-26 โดยมีขั้นตอนหลักๆ ที่ควรคำนึงถึง 6 ขั้นตอนคือ การกำหนดปัญหาการกำหนดตัวแปร การเลือกการออกแบบการทดลอง การทำการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูล และการสรุปผลการทดลอง และแนะนำ



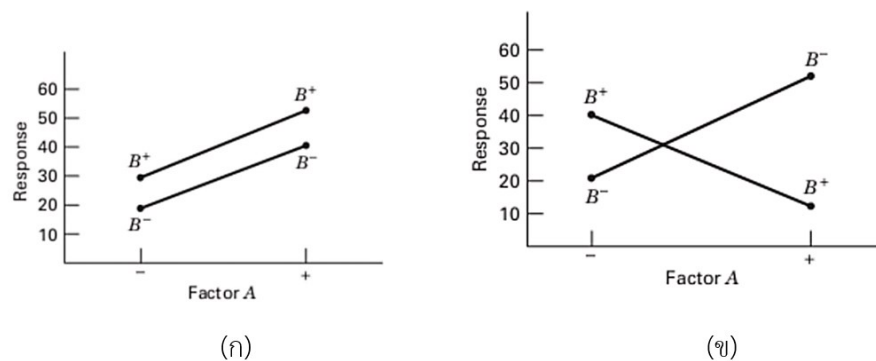
ภาพที่ 2-26 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง

2.5.5 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design

ฉลอง [2552]การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งเรา ต้องการศึกษาร่วมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลหมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปเรียกว่า ทรีทเมนต์คอมบินเนชัน (Treatment Combination) ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ซึ่งเป็นการทดลองที่มีหลายปัจจัย (Multiple Factor Experiment) และเนื่องจากมีปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้น นอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้ด้วย

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลมีประโยชน์หลายประการและเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัยยิ่งกว่านั้น การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลยังเป็นสิ่งจำเป็นเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุป ที่ผิดพลาดได้นอกจากนั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยอื่นได้ ทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้

อิทธิพลของปัจจัยร่วม คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้อิทธิพล (Effect) ของปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม ซึ่งเมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพที่ 2-27(ก) และเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพที่ 2-27(ข) โดย A และ B คือ ปัจจัย 2 ปัจจัย



ภาพที่ 2-27 (ก) แสดงอิทธิพลของปัจจัยร่วมไม่มีผล , (ข) แสดงอิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลจะมีรูปแบบทั่ว ๆ ไป คือ ในกรณีที่ปัจจัย A มีจำนวนระดับเท่ากับ a ปัจจัย B มีจำนวนระดับเท่ากับ b ปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c ต่อไปเช่นนี้เรื่อย ๆ และทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในลักษณะของการทดลองเชิงแฟคทอเรียล ซึ่งจะมีจำนวนข้อมูลที่ได้ทั้งหมดในการทดลองเท่ากับ $ab\dots$ และจะต้องมีเรพลิเคตอย่างน้อย 2 เรพลิเคต ($n > 2$) เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ถ้าอันตรกิริยาที่เป็นไปได้ทั้งหมดถูกนำไปพิจารณาในแบบจำลอง

โดยทั่วไปผู้ทดลองจะให้ความสำคัญแก่การศึกษา ผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยเท่านั้น เนื่องจากผลกระทบตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยมากจึงไม่นิยมนำมาพิจารณาการทดลองแฟคทอเรียลยังสามารถศึกษาผลกระทบร่วมในกรณีที่สองปัจจัยใด ๆ อาจไม่เป็นอิสระต่อกันด้วย แต่ต้องพึงระวังเสมอว่าจำนวนทดลองที่ทำมีค่าน้อยเท่ากับ ผลคูณระหว่างค่าระดับ ปัจจัยของทุกปัจจัย ถ้าจำนวนปัจจัย (k) มีจำนวนมาก จำนวนการทดลอง (Runs: N) จะมีค่าสูงตามไป

การทดลองแฟคทอเรียลแบ่งออกเป็น 2 กรณีหลัก คือ การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment) และการทดลองแฟคทอเรียลเชิงเศษส่วน (Fractional Factorial Experiment) เนื่องจากที่กล่าวไว้แล้วว่า จำนวนการทดลองแปรผันตามผลคูณของจำนวนระดับปัจจัยทุกปัจจัย หรือเท่ากับผลคูณของระดับปัจจัยทุกปัจจัยคูณกับจำนวนครั้งที่ทำซ้ำ ถ้าทำการศึกษา 10 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จำนวนการทดลองเท่ากับ 1,024 การทดลองโดยทั่วไปจึงนิยมใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเชิงเศษส่วน เนื่องจากสามารถประหยัดเวลาและต้นทุน การทดลองแบบนี้มีความสำคัญอย่างมากในการทดลองเพื่อคัดปัจจัยเพราะว่ามีการลดจำนวนการทดลองลงจนเหลือขนาดการทดลองที่สามารถทำได้จริง เงื่อนไขการทดลองที่ถูกเลือกมาทำการทดลอง จะเป็นเงื่อนไขที่อยู่ในชุดของการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ซึ่งในกรณีที่ไม่ได้ทำการทดลองครบทุกเงื่อนไขของทุกปัจจัยจะทำให้เกิดผลอย่างหนึ่งเรียกว่าคอนฟาวด์ (Confounded) ซึ่งคอนฟาวด์นี้

หมายถึงอิทธิพลของปัจจัยที่ไม่สามารถทำการประเมินค่าแยกออกมาได้ซึ่งจะทำให้อิทธิพลบางตัวไม่สามารถหาค่าได้ทำให้การเลือกทำการทดลองแฟคทอเรียลเชิงเศษส่วนจะต้องเลือกส่วนที่จะมาทำให้ถูกต้องเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้งานได้ซึ่งบางครั้งอาจจะต้องใช้ความรู้เฉพาะเกี่ยวกับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เพื่อมาตัดสินใจด้วย

ตารางที่ 2-3 เทอมหรือแหล่งความผันแปรที่เป็นไปได้ทั้งหมดของ Full Factorial Design

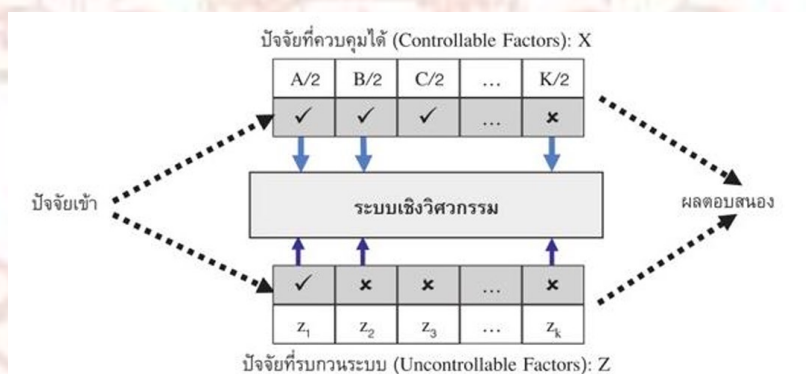
Main Effects	2-Way Interaction	3-Way Interaction
A	AB	ABC
B	AC	-
C	BC	-

ที่มา : ฉลอง (2552)

2.5.6 ทฤษฎีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ (Two-Level Factorial Design, 2^k)

พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ (2562) กล่าวว่าแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลถูกใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากจำนวนปัจจัยที่คาดการณ์ว่ามีอิทธิพลต่อระบบมักมีมากกว่าหนึ่งปัจจัย หากการทดลองเกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย (Factor) ต้องทำการศึกษาผลกระทบหลัก (Response) ที่ระดับปัจจัยต่างๆที่เกิดขึ้นด้วย แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล เป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ในการตรวจสอบอิทธิพลของหลายๆปัจจัยพร้อมกัน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบบทีละปัจจัยโดยกำหนดให้ปัจจัยอื่น ๆ มีค่าคงตัว (One Factor at a Time, OFAT) เนื่องจากการทดลองอย่างสมบูรณ์จะมีการใช้ระดับของปัจจัยต่างๆร่วมกัน เป็นแต่ละวิธีปฏิบัติในทุกๆกรณี จึงสามารถตรวจสอบอิทธิพลได้พร้อมกัน แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสามารถจำแนกได้หลายกรณี ทั้งนี้ แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ หรือ 2^k เป็นกรณีเฉพาะของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่ประกอบด้วย k ปัจจัย โดยในแต่ละปัจจัยมีเพียง 2 ระดับ มักเรียกว่าระดับสูงและระดับต่ำ อาจเป็นระดับเชิงปริมาณ (Quantitative Level) หรือระดับเชิงคุณภาพ (Qualitative Level) ก็ได้ แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับที่สมบูรณ์ จะประกอบไปด้วยจำนวนทั้งหมด 2^k วิธีปฏิบัติ ในแต่ละวิธีปฏิบัติอาจมีการกระทำซ้ำได้ n ครั้งเท่าๆกัน หรือต่างกันก็ได้ ขึ้นอยู่กับความต้องการ หรือความจำกัดของระบบ ในบางกรณีแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับอาจมีจำนวนการทำซ้ำเพียง 1 ครั้ง (Single Replicate) โดยมีเป้าหมายในการคัดกรองปัจจัยที่สำคัญ (Screening Experiment) จากปัจจัยที่มีเป็นจำนวนมากที่ได้รับการคาดการณ์จากระบบผู้เชี่ยวชาญ ดังนั้น หากทำการทดลองที่สมบูรณ์จะมีจำนวนทดลอง (Runs) ที่มากจนกระทั่งเกินขีดจำกัดของ

ระบบ หากพิจารณาข้อมูลที่ได้รับจากแผนการทดลองแบบการทำซ้ำเพียงครั้งเดียวพบว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนไม่สามารถดำเนินการได้เนื่องจากองศาเสรี (Degree of Freedom) มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของผลกระทบหลัก (Normal Plot of Effect) จึงเป็นทางเลือกในการบ่งชี้ถึงปัจจัยที่มีโอกาสมากที่สุด หรือมีผลกระทบต่อผลตอบสนองมากที่สุด (Montgomery, 2013; Montgomery and Runger, 2003; Peck, Olsen and Devore, 2002; Walpole and Myers, 1993) เพื่อใช้ในการวางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลให้มีความเหมาะสมนอกจากนี้ แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับยังสามารถลดจำนวนการทดลองได้ โดยผ่านกระบวนการวิเคราะห์จากแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับชนิดบางส่วน (2^k Fractional Factorial Designs) โดยแผนการทดลองนี้เป็นการออกแบบการทดลองที่เลือกทำการทดลองเพียงบางส่วนจากรูปแบบเต็มของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ เมื่อปัจจัยมีเป็นทรัพยากรหรืองบประมาณสำหรับการทดลองที่จำกัด อย่างไรก็ตามภายใต้จำนวนการทดลองที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้นี้ไม่สามารถวิเคราะห์อิทธิพลจากปัจจัยหลัก และอิทธิพลร่วมของปัจจัยได้แต่สามารถวิเคราะห์อิทธิพลจากปัจจัยได้โดยอาศัยหลักการทางด้านสถิติอื่นๆทดแทน ตัวอย่างสำหรับแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับสำหรับกระบวนการตัวอย่าง กรณีไม่พิจารณาปัจจัยที่รบกวนระบบ สำหรับกระบวนการที่มีปัจจัยมากกว่าหนึ่งปัจจัย ในแต่ละปัจจัยประกอบด้วยจำนวน 2 ระดับสามารถแสดงดังภาพที่ 2-28



ภาพที่ 2-28 กล้องความสัมพันธ์สำหรับแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับสามปัจจัย กรณีไม่พิจารณาปัจจัยที่รบกวนระบบ

แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ กรณีพิจารณาจำนวน 3 ปัจจัย (Factors) คือ ปัจจัย A B และ C แต่ละปัจจัยจะประกอบไปด้วย 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ (Low, -, -1) และระดับสูง (High, +, +1) เท่านั้น นอกจากนี้ในการกำหนดสัญลักษณ์มาตรฐานสำหรับวิธีการปฏิบัติพิจารณาผ่านตัวอักษรตัวเล็ก ถ้าพบว่าวิธีปฏิบัตินั้นมีการกำหนดปัจจัยในระดับสูง (High) แต่จะไม่มีแสดงเป็นตัวอักษรหากปัจจัยอยู่ในระดับต่ำ (Low) นอกจากนี้สัญลักษณ์มาตรฐานนี้ยังแสดงถึงผลรวมใน

ทุกๆ ครั้งของการทดลอง (n) ในแต่ละวิธีปฏิบัติอีกทางหนึ่งด้วย ดังนั้นวิธีปฏิบัติ (Treatment) สำหรับแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ สำหรับสามปัจจัยประกอบด้วยวิธีปฏิบัติ (1), a, b, c, ab, ac, bc และสามารถเขียนวิธีปฏิบัติได้ในตารางด้านล่าง

ตารางที่ 2-4 การออกแบบแผนการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับ กรณีสามปัจจัย

วิธีปฏิบัติ	ปัจจัย		
	A	B	C
(1)	–	–	–
a	+	–	–
b	–	+	–
ab	+	+	–
c	–	–	+
ac	+	–	+
bc	–	+	+
abc	+	+	+

ตัวแปรสถิติเชิงเส้นตรงของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับในกรณีที่มี 3 ปัจจัย หรือ (2^3) สามารถจำลองข้อมูลการทดลอง (y_{ijkl}) สำหรับแบบแฟคทอเรียลสองระดับด้วยตัวแบบทางสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) ได้ดังต่อไปนี้

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad \begin{cases} i = 1, 2 \\ j = 1, 2 \\ k = 1, 2 \\ l = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2-1)$$

ตารางที่ 2-5 สมมติฐานสำหรับแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับสามปัจจัย

อิทธิพลของปัจจัยหลัก	อิทธิพลของสองปัจจัยร่วม	อิทธิพลของสามปัจจัยร่วม
$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = 0$ $H_1 : \tau_i \neq 0$, อย่างน้อย 1 ค่า i	$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$, ทุกๆ ค่า i, j $H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0$, อย่างน้อย 1 ค่า	$H_0 : (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0$, ทุกๆ ค่า i, j, k $H_1 : (\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0$, อย่างน้อย 1 ค่า
$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$ $H_1 : \beta_j \neq 0$, อย่างน้อย 1 ค่า j	$H_0 : (\tau\gamma)_{ik} = 0$, ทุกๆ ค่า i, k $H_1 : (\tau\gamma)_{ik} \neq 0$, อย่างน้อย 1 ค่า	
$H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = 0$ $H_1 : \gamma_k \neq 0$, อย่างน้อย 1 ค่า k	$H_0 : (\beta\gamma)_{jk} = 0$, ทุกๆ ค่า j, k $H_1 : (\beta\gamma)_{jk} \neq 0$, อย่างน้อย 1 ค่า	

2.5.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

[กฤษฎา, 2559] ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล เราสามารถที่จะทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับปัจจัยหลัก และปัจจัยรวมได้โดยใช้การวิเคราะห์อิทธิพลของเทอมต่างๆ ดังตัวอย่างวิธีการคำนวณการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^3 ในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ 2^3 Factorial design

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom (df)	Mean Square	F ₀
A	SS_A	a-1	$MS_A = \frac{SS_A}{df_A}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	b-1	$MS_B = \frac{SS_B}{df_B}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	c-1	$MS_C = \frac{SS_C}{df_C}$	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{df_{AB}}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	(a-1)(c-1)	$MS_{AC} = \frac{SS_{AC}}{df_{AC}}$	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	(b-1)(c-1)	$MS_{BC} = \frac{SS_{BC}}{df_{BC}}$	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	(a-1)(b-1)(c-1)	$MS_{ABC} = \frac{SS_{ABC}}{df_{ABC}}$	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
ERROR	SS_E	abc(n-1)	$MS_E = \frac{SS_E}{df_E}$	
TOTAL	SS_T	abcn-1		

จากตารางที่ 2-6 กำหนดให้ a คือจำนวนระดับปัจจัยของปัจจัย A, b คือจำนวนระดับปัจจัยของ ปัจจัย B, c คือจำนวนระดับปัจจัยของปัจจัย C และ n คือจำนวนซ้ำ (Replicate) ค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองในตารางที่ 2-4 มีสูตรในการคำนวณดังสมการที่ (2-2)

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{....}^2}{abcn} \quad (2-2)$$

ค่าผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนสามารถคำนวณดังสมการที่ (2-3)

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} - SS_C - SS_{AC} - SS_{BC} - SS_{ABC} \quad (2-3)$$

สามารถใช้คอนทราสต์เพื่อคำนวณค่า Effect และผลรวมกำลังสองของเทอมใดๆ (SS) ของการทดลอง จากตารางที่ 2-7 และสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2-4) และสมการที่ (2-5)

ตารางที่ 2-7 เครื่องหมายคอนทราสต์ของการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^3

Treatment Combination	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
(1)	-	-	+	-	+	+	-
a	+	-	-	-	-	+	+
b	-	+	-	-	+	-	+
ab	+	+	+	-	-	-	-
c	-	-	+	+	-	-	+
ac	+	-	-	+	+	-	-
bc	-	+	-	+	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าคอนทราสต์ของเทอมต่างๆ เช่น

$$\text{Contrast A} = [a+ab+ac+abc-(1)-b-c-bc]$$

$$\text{Contrast AB} = [a+ab+ac+abc-(1)-b-c-bc]$$

$$\text{Contract ABC} = [a+b+c+abc-(1)-ab-ac-bc]$$

การคำนวณค่าผลกระทบ (Effect) จากคอนทราสต์จะใช้สูตรดังนี้

$$\text{Effect} = \frac{\text{Contrast}}{n2^{k-1}} \quad (2-4)$$

การคำนวณค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of square) สามารถใช้สูตรได้ดังนี้

$$SS = \frac{[\text{Contrast}]^2}{n2^k} \quad (2-5)$$

จากนั้นใช้สูตรในการคำนวณหาค่า Effect และ Contrast แล้วทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนรวมถึงการสร้างสมการถดถอยต่อไปในการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับสามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังตัวอย่างในสมการที่ (2-6)

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (2-6)$$

กำหนดให้ปัจจัย A แทนค่าด้วย x_1 , ปัจจัย B แทนค่าด้วย x_2 , และสัมประสิทธิ์การถดถอยแทนด้วย β ในส่วนของสัมประสิทธิ์การถดถอย β_0 จะเป็นค่าเฉลี่ยรวม (Overall Mean) ของค่าสังเกต มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยข้อมูลทั้งหมด N ตัว ส่วนของสัมประสิทธิ์การถดถอย β_1, β_2 , และ β_3 , จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าประมาณผลกระทบ (Effect) ของอิทธิพลหลักที่เกิดขึ้น และ $\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{123}$ จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าประมาณผลกระทบของอิทธิพลร่วม ด้วยสามารถเขียนเป็นสูตรตามสมการที่ (2-7)

$$\beta_i = \frac{\text{Effect}_i}{2} \quad \text{โดยที่ } i \text{ คือ เทอม A, B, AB, C, AC, BC, ABC} \quad (2-7)$$

จากสมการที่ 2-6 จะพบว่า B, เปรียบเสมือนค่าความชันในระบบของการคำนวณแบบเข้ารหัส (Code Unit) ซึ่ง x_1, x_2 และ x_3 จะมีค่าเป็น -1 เมื่อเป็นระดับต่ำ และ + เมื่อเป็นระดับสูง ต้องระมัดระวังในการกำหนดค่า x_1, x_2 และ x_3

2.5.8 การใช้รหัส (Coded)

(ฉลอง, 2552) การใช้รหัส (Coded) เป็นการปรับเปลี่ยนหน่วยสเกล ของแต่ละปัจจัยให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน (Standardize) เพื่อให้ง่ายในการออกแบบและวิเคราะห์ เพราะหากใส่ค่าจริงแล้วจะเสียเวลา และยุ่งยากในการเขียนโดยเฉพาะ Interaction อย่างมาก โดยกำหนดให้ -1 แทนกรณีที่ตั้งค่าปัจจัยนั้นเป็น Low และ ให้ 1 แทนกรณีที่ตั้งค่าปัจจัยนั้นเป็น High ดังตารางที่ 2-8 ที่ใช้ค่าจากตารางที่ 2-8 โดยแทนค่าของทุกปัจจัยด้วยรหัส

ตารางที่ 2-8 ตารางแทนค่าของปัจจัยและ Interaction ด้วยรหัส

Run	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	-1	-1	1	1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	-1	1	1	-1	-1	1	-1
5	1	-1	-1	-1	-1	1	1
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	1	1	-1	1	-1	-1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1

2.5.9 การออกแบบการทดลองแบบ 2^{k-p} Fractional Factorial Design

(ฉลอง, 2552) เมื่อเรามีปัจจัย (Factor) อยู่ 3-5 ตัว เราอาจจะสามารถใช้วิธี Half Factorial Design หรือ 2^{k-1} Design ได้ แต่ถ้าจำนวนปัจจัยเพิ่มมากขึ้นกว่านั้นอีก ก็ยากที่เราจะสามารถทำการทดลองตามแบบที่ออกแบบไว้ได้ เพราะจำนวน Run ก็ยังมากเกินไปกว่าจะทำตามได้

ตารางที่ 2-9 จำนวน Run เทียบกับจำนวน Factor ของแต่ละ Design

จำนวน Factor	จำนวน Run Full factorial design	จำนวน Run 2^{k-1} design	จำนวน Run 2^{k-2} design	จำนวน Run 2^{k-3} design
3	8	4	N/A	N/A
4	16	8	N/A	N/A
5	32	16	8	N/A
6	64	32	16	8
7	128	64	32	16
8	256	128	64	32
9	512	256	128	64

จากตารางที่ 2-9 จะพบว่าผู้ออกแบบการทดลองจำเป็นต้องใช้ค่า p ที่มากกว่า 1 ในการออกแบบเมื่อมี Factor ตั้งแต่ 6 ตัวขึ้นไป โดยข้อกำหนดง่ายๆ คือ เมื่อมีการออกแบบ ควรจะให้จำนวน Run เริ่มต้นที่ 8 และไม่ควรมากเกิน 32

ตัวอย่างเช่นมีปัจจัยทั้งหมด 7 ตัว (A,B,C,D,E,F,G) และในการทดลองแต่ละปัจจัยปรับได้ 2 ค่า (Level) จากตารางที่ 2-9 หากเราออกแบบโดยใช้วิธี Full factorial จะมีจำนวน Run เท่ากับ $2^7=128$ ซึ่งเป็นไปไม่ได้เลยที่เราจะทำการทดลองให้ได้ตามนั้น แม้แต่ Half factorial design ก็ยังมีถึง 64 Run ซึ่งก็ยังถือว่ามากอยู่ดี ถ้าต้องการออกแบบการทดลองโดยให้เหลือจำนวน Run เพียง 16 เท่ากับ Full factorial ของ 4 ปัจจัย นั่นคือ $7-p = 4$ ดังนั้น $p=3$ นั่นคือเราเลือกการออกแบบ 2^{7-3} นั่นเอง

ขั้นตอนก็คล้ายกับวิธี 2^{k-1} เริ่มจากการเขียน Full factorial design ของ Main effect A,B,C,D และใช้เป็นตัวกำเนิด Main effect E,F,G ที่เหลือ โดยเราจะเลือก $E=ABC$, $F=BCD$, $G=ACD$ แสดง ดังตารางที่ 2-10

ตารางที่ 2-10 ผลการออกแบบโดยวิธี 2^{7-3}

Run	A	B	C	D	E=ABC	F=BCD	G=ACD
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	1	-1	1
3	-1	1	-1	-1	1	1	-1
4	1	1	-1	-1	-1	1	1
5	-1	-1	1	-1	1	1	1
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1	-1	-1	1
8	1	1	1	-1	1	-1	-1
9	-1	-1	-1	1	-1	1	1
10	1	-1	-1	1	1	1	-1
11	-1	1	-1	1	1	-1	1
12	1	1	-1	1	-1	-1	-1
13	-1	-1	1	1	1	-1	-1
14	1	-1	1	1	-1	-1	1
15	-1	1	1	1	-1	1	-1
16	1	1	1	1	1	1	1

โดยมีโครงสร้างของคู่แฝดแฝง (Alias) ดังภาพที่ 2-29

Fractional Factorial Design			
Factors: 7	Base Design:	7, 16	Resolution: IV
Runs: 16	Replicates:	1	Fraction: 1/8
Blocks: 1	Center pts (total):	0	
Design Generators: E = ABC, F = BCD, G = ACD			
Alias Structure			
I + ABCE + ABFG + ACDG + ADEF + BCDF + BDEG + CEFG			
A + BCE + BFG + CDG + DEF + ABCDF + ABDEG + ACEFG			
B + ACE + AFG + CDF + DEG + ABCDG + ABDEF + BCEFG			
C + ABE + ADG + BDF + EFG + ABCFG + ACDEF + BCDEG			
D + ACG + AEF + BCF + BEG + ABCDE + ABDGF + CDEFG			
E + ABC + ADF + BDG + CFG + ABDEF + ACDEG + BCDEF			
F + ABG + ADE + BCD + CEG + ABCEF + ACDFG + BDEFG			
G + ABF + ACD + BDE + CEF + ABCEG + ADEFG + BCDFG			
AB + CE + FG + ACDF + ADEG + BCDG + BDEF + ABCEFG			
AC + BE + DG + ABDF + ACFG + BCFG + CDEF + ABCDEG			
AD + CG + EF + ABCF + ABEG + BCDE + BDFG + ACDEFG			
AE + BC + DF + ABDG + ACFG + BEFG + CDEG + ABCDEF			
AF + BG + DE + ABCD + ACEG + BCEF + CDFG + ABDEFG			
AG + BF + CD + ABDE + ACEF + BCFG + DEFG + ABCDFG			

ภาพที่ 2-29 โครงสร้างของคู่แฝดแฝง (Alias)

โดยใช้กราฟ Pareto Chart of the Effects จากโปรแกรม Minitab เขามาช่วยตัดสินใจในการ เลือกเทอม แล้วทำการวิเคราะห์ตามหลักสถิติ

ตารางที่ 2-11 รูปแบบการทดลองที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน

รูปแบบการทดลอง	ลักษณะการทดลอง	เวลาในการวิเคราะห์	ความถูกต้อง	งบประมาณ
Single Factor	การทดลองสำหรับหนึ่งปัจจัย โดยปัจจัยดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญที่คาดว่าจะมีผลกระทบสูงสุดต่อปัญหา	รวดเร็ว	ปานกลาง	น้อย
Factorial Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัย และเป็นการทดลองเต็มรูปแบบ	ใช้เวลานาน	มากที่สุด	มาก
2^k Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัย และเป็นการทดลองเต็มรูปแบบ แต่กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ที่ปัจจัยละ 2 ระดับเท่านั้น	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
2^{k-p} Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัย แต่ไม่เต็มรูปแบบทั้งหมด (ลดรูป)	รวดเร็ว	น้อย	น้อย

2.5.11 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square)

เป็นสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ว่าแผนการทดลองที่ใช้มีความผันแปรส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากปัจจัยที่กำหนดหรือเกิดจากธรรมชาติของกระบวนการ

$$R^2 = \frac{SS_{Model}}{SS_{Total}} \quad (2-8)$$

โดยที่ R^2 คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square)

SS_{Model} คือ ผลรวมกำลังสองของรูปแบบ (Model)

SS_{Total} คือ ผลรวมกำลังสองของทั้งหมด

ถ้าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) สูง แสดงว่าความผันแปรส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นมาจากปัจจัยที่กำหนด แต่ถ้าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ต่ำ แสดงว่าความผันแปรเกิดขึ้นจากธรรมชาติของกระบวนการแสดงว่าแผนการทดลองที่ใช้ไม่เหมาะสม และต้องกลับไปพิจารณาถึงปัจจัยที่ใช้ในการทดลองว่ามีอิทธิพลจริงหรือไม่ตลอดจนตรวจสอบการเก็บรวบรวมข้อมูลว่ามีข้อผิดพลาดหรือไม่

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อภิชาติ[2557] ได้ศึกษาการปรับปรุงกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยเลเซอร์ โดยศึกษาระดับปัจจัยการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^k เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์กรณีศึกษา และให้ค่าตอบสนองที่แตกต่างกันในระดับปัจจุบันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เนื่องจากผลการทดลองที่ให้ค่าทางสถิติในด้านค่าเฉลี่ย (Average) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และการวิเคราะห์สมรรถภาพของกระบวนการ (Cpk) รวมทั้งคุณภาพงานหลังจากการตัดอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของลูกค้า และให้ผลค่าตอบสนองน้อยลงจากปัจจุบัน โดยสามารถลดค่าตอบสนองจาก 1.023% เป็น 0.323% คิดเป็น 31.57 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ลดต้นทุนในการผลิตได้ เพราะปริมาณของเสียนั้นลดลง

สุรัชัย[2560] การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อลดปริมาณของเสียประเภทฉีดไม่เต็มแบบ ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนรถยนต์ จากปัญหาของเสียประเภทฉีดขึ้นงานไม่เต็มแบบของชิ้นงานพลาสติก COVER ENG UNDER 2SV ซึ่งมีสัดส่วนของเสียอยู่ที่ 6.78 เปอร์เซ็นต์ โดยประยุกต์ใช้การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ 2^k เพื่อลดจำนวนของเสียจากปัญหาประเภทฉีดขึ้นงานไม่เต็มแบบ โดยวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องฉีดพลาสติกให้เกิดปัญหาของเสียประเภทฉีดขึ้นงานไม่เต็มแบบได้น้อยที่สุด ซึ่งมี 4 ปัจจัย คือ อุณหภูมิช่องทางการไหลในแม่พิมพ์ไซน 16 ความดันด้านการถอยของเกลียวหนอน ความดันในการฉีดพลาสติก และความเร็วในการฉีด โดยค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสามารถลดสัดส่วนของเสีย ฉีดขึ้นงานไม่เต็มแบบได้เหลือ 0.4 เปอร์เซ็นต์ จากก่อนปรับปรุงสัดส่วนของเสียฉีดขึ้นงานไม่เต็มอยู่ที่ 6.78 เปอร์เซ็นต์ จากการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ 2^{4-1} สามารถลดของเสียจากปัญหาของเสียประเภทฉีด ชิ้นงานไม่เต็มแบบของชิ้นงานพลาสติก COVER ENG UNDER 2SV ได้จริง

ชยาภรณ์[2557] การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อลดผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทฉีดไม่เต็มแบบ ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ กรณีศึกษา : โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3^k จากการพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทฉีดขึ้นรูปไม่เต็มแบบ โดยเลือกพิจารณาปัจจัย อุณหภูมิในการฉีดพลาสติก แรงดันในการฉีดพลาสติก และ ความเร็วในการฉีดพลาสติก พบว่าที่สภาวะ อุณหภูมิในการฉีดพลาสติก และความเร็วในการฉีดพลาสติกต่างๆ มีอิทธิพลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์บกพร่อง ปริมาณผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทฉีดขึ้นรูปไม่เต็มแบบ ลดลงจากเดิม 30.40% เหลือเพียง 0.68%

วิชญ์[2562] การลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติของเตาอบเหล็กที่ร้อนระหว่างช่วงการอุ่นเตาเพื่อหยุดบำรุงรักษาเชิงป้องกันโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง ปรับปรุงโดยใช้วิธีการดับเตาและหลังปรับปรุงได้เปลี่ยนเป็น วิธีการอุ่นเตา ผู้วิจัยได้ทำการการทดลองปรับตั้งค่าปัจจัยที่ใช้ควบคุมการทำงานของเตาอบเหล็ก ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราส่วนอากาศ: ก๊าซธรรมชาติ และความดันในเตาอบเหล็กโดยอาศัยหลักการทดลอง เชิงแฟคทอเรียล 3^k พบว่าการปรับเปลี่ยนนี้สามารถที่จะช่วยลด ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติได้ในช่วงระหว่างการอุ่นเตาเพื่อหยุดบำรุงรักษาเชิงป้องกันได้ โดยปัจจัย ที่ใช้ควบคุมการทำงานของเตาอบเหล็กที่เหมาะสมที่สุด คือการปรับตั้งค่าที่อุณหภูมิภายในเตาอบ เหล็ก เท่ากับ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, อัตราส่วนอากาศ:ก๊าซภายในเตาอบเหล็ก เท่ากับ 1.05 และความดันภายใน เตาอบเหล็ก เท่ากับ 2.7 บาร์ ซึ่งสามารถที่จะลดปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติลงได้มากที่สุดที่ปริมาณ $1,506\text{ Nm}^3/\text{ครั้ง}$ และคิดเป็นค่าใช้จ่ายที่สามารถลดต้นทุนลงได้ เท่ากับ $18,825\text{ บาท/ครั้ง}$

วรรณภา[2558] การลดของเสียในกระบวนการผลิตแผงวงจรไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้ โดยเทคนิคซิกซ์ ซิกม่า เพื่อใช้ในการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการผลิตเพื่อลดปริมาณของเสียอันเนื่องมาจากกระบวนการฉีดอีพอกซี ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการประกอบแผงวงจรไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้ โดยผลจากการปรับปรุงกระบวนการผลิต สามารถที่จะลดของเสียเนื่องจากการประกอบแผงวงจรจากร้อยละ 4.60 ให้เหลือร้อยละ 0.54 อย่างมีนัยสำคัญ

อภิวิชญ์[2555] การลดของเสียจากกระบวนการผลิตเฟืองตาม โดยใช้หลักการของการออกแบบการทดลอง พาเรโตไดอะแกรม ผังก้างปลา และ Why Why Analysis มาช่วยในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา ซึ่งเข้าไปศึกษากระบวนการผลิตและ มีการนำข้อมูลของเสียในการผลิตมาทำการวิเคราะห์ ตลอดจนถึงการนำไปสู่การแก้ไขปรับปรุงดังนี้เพิ่มเครื่องรีด (Leveling machine) ก่อนทำการกัดฟันเฟือง,เปลี่ยนฝาประกบชิ้นงานใหม่ (Cover Chart),เปลี่ยนฝาประกบชิ้นงานใหม่ (Cover Chart), กำหนดหัวข้อสำหรับการตรวจสอบฝาประกบชิ้นงาน ก่อนเริ่มปฏิบัติงาน,กำหนดค่าพารามิเตอร์ของความเรียบของชิ้นงานที่ 20.15 mm และค่าแรงกด ชิ้นงานที่ $\geq 70\text{ Kg}$.หลังการปรับปรุง พบว่าของเสียที่เป็นรอยฉีกบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน จากเดิมอยู่ที่ 56เปอร์เซ็นต์ ลดลงเหลือ 0 เปอร์เซ็นต์และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตได้เฉลี่ยเดือนละ $517,250\text{ บาทต่อเดือน}$ หรือประมาณ $6,207,000\text{ บาทต่อปี}$

สรารุฐ[2553] การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตวาล์วสปริง โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^k คิดเป็น 27 การทดลอง (ทำซ้ำ 5 ครั้ง) พาเรโตไดอะแกรม ผังก้างปลา มาวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาเพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิต ผู้วิจัย กำหนดค่าตอนสนองการทดลองครั้งนี้คือ จำนวนของเสียประเภทความสูงของสปริงไม่ได้มาตรฐาน

โดยกำหนด 3 ปัจจัยได้แก่ แรงดันลม ความเร็วและการปรับตั้งระยะสตัท ซึ่งสรุปผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab ver.19

ชัชวาล[2553] การลดของเสียจากกระบวนการผลิตหลังการถยนต์โดยประยุกต์ใช้วิธีซิก ชิกซ์ ม่า กรณศึกษา บริษัทในอุตสาหกรรมรถยนต์ โดยใช้พาเรโต, แผนภาพก้างปลา, FMEA และ MSA ช่วยในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต พบว่าเปอร์เซ็นต์โดยเฉลี่ยลดลงจากเดิม 125,000 PPM ลดลงเหลือ 35,100 PPM หรือลดลง 70.87% ตามเป้าหมายที่กำหนดไว้

ธวัชชัย[2565] การลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประกอบขดลวดนำ โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง โดยศึกษาระดับปัจจัยการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^k ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบคือ อุณหภูมิ, ระยะเวลา และ ความดัน ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญคือ อุณหภูมิในการอบ และ ระยะเวลาในการอบ จากนั้น response optimization โดยใช้โปรแกรม Minitab พบว่า อุณหภูมิในการอบที่ปัจจัย 540°C ระยะเวลาในการอบที่ระดับปัจจัย 50 นาที และความดัน 1.2kpa เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด พบว่าจำนวนของเสียลดลง 73.07%

เสกฐวุฒิ[2556] การออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยการกลึง สำหรับกำหนดชนิดมีดกลึงที่เหมาะสมกับเครื่องกลึง โดยศึกษาระดับปัจจัยการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^k โดยปัจจัยที่นำมาใช้ในการทดลองคือ ชนิดของใบมีด และ ความเร็วรอบเครื่องกลึง ซึ่งหลักการของการออกแบบการทดลอง พาเรโตไดอะแกรม ผังก้างปลา มาช่วยในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา

สุชานันท์[2563] การประยุกต์ใช้วิธีการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อตรวจสอบข้อบกพร่องประเภทรอยพับของชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k 5 ปัจจัย จำนวน 16 การทดลอง และไม่มีการทำซ้ำ โดยผู้วิจัยนำหลักสถิติประยุกต์มาใช้กับงานวิจัยเพื่อหา ระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน ซึ่งต้องมีความถูกต้องมากกว่า 90% และการตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานจะต้องมีข้อบกพร่องน้อยที่สุด

พรสวรรค์[2559] การลดของเสียในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก กรณศึกษาโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์เครื่องสำอางโดยผู้วิจัยนำหลักสถิติประยุกต์มาใช้กับงานวิจัย และใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เพื่อหา ระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยกำหนดปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย การทดลอง 3 ครั้ง เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูล โดยหลังจากนำค่าที่ได้จากการวิจัยมาใช้ ทำให้ได้ค่าของเสียลดลงร้อยละ 34.23

ตารางที่ 2-12 บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	เรื่อง	ประเภทปัญหา		ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง			
		การลดของเสียในกระบวนการผลิต	การเพิ่ม, พัฒนาประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2k	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3k	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบพิเศษ	ซิก ชิกซ์มา
อภิวินัย (2555)	การลดของเสียจากกระบวนการผลิตเฟืองตาม	○		○			
สรารุธ (2553)	การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตวาล์วสปริง		○		○		
ชัชวาล (2553)	การลดของเสียจากกระบวนการผลิตหลังการถยนต์ โดยประยุกต์ใช้วิธีซิก ชิกซ์มา กรณีศึกษา บริษัทในอุตสาหกรรมรถยนต์	○					○
อภิชาติ (2557)	การปรับปรุงกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยเลเซอร์		○	○			

ตารางที่ 2-12 (ต่อ) บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	เรื่อง	ประเภท ปัญหา		ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง			
		การลดของเสียในกระบวนการผลิต	การเพิ่ม, พัฒนาประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2k	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3k	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบพิเศษ	ซิก ซิกซ์มา
ธวัชชัย (2565)	การลดของเสียในกระบวนการผลิต ชิ้นส่วนประกอบขดลวดนำ โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการ ทดลอง	○		○			
วรรณภา (2558)	การลดของเสียในกระบวนการผลิต แผ่นวงจรไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้ โดยเทคนิคซิกซ์ ซิกมา	○				○	○
ศิษณุ (2562)	การลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงก๊าซ ธรรมชาติของเตาอบเหล็กรีดร้อน ระหว่างช่วงการอุ่นเตาเพื่อหยุด บำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยการ ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง		○		○		
เสฏฐวุฒิ (2556)	การออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัย การกลึง สำหรับกำหนดชนิดมีดกลึงที่ เหมาะสมกับเครื่องกลึง		○				

ตารางที่ 2-12 (ต่อ) บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	เรื่อง	ประเภท ปัญหา		ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง			
		การลดของเสียในกระบวนการผลิต	การเพิ่ม, พัฒนาประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2k	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3k	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเศษส่วน	ซิก ซิกซ์มา
ชยาภรณ์ (2557)	การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อลดผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทผิดไม่เต็มแบบในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ กรณีศึกษา : โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์	○			○		
สุรัชย์ (2560)	การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อลดปริมาณของเสียประเภทผิดไม่เต็มแบบ ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนรถยนต์	○					
สุชานันท์ (2563)	การประยุกต์ใช้วิธีการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อตรวจสอบข้อบกพร่องประเภทรอยพับของชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์		○	○			

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

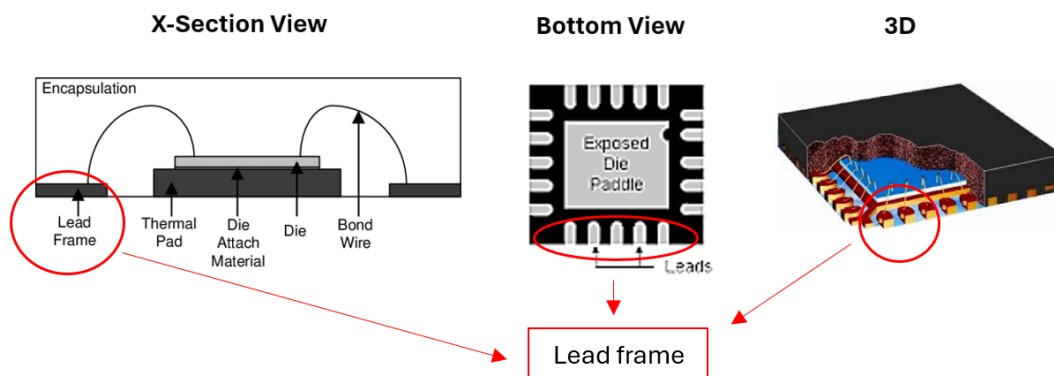
จากปัญหาเทอร์มินอลเบลล (Turrminal burr) หรือเสี้ยนบริเวณขาหลิ็ด ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญและมีอัตราการเกิดของเสียสูง ของเสียประเภทนี้เกิดจากกระบวนการตัดชิ้นงาน (Singulation) ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน และเกิดความเสียหายของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยงานวิจัยนี้ได้เก็บรวบรวมข้อมูลงานเสีย ของผลิตภัณฑ์ประเภทวงจรรวม QFN ย้อนหลัง 6 เดือนจากปัจจุบัน โดยเริ่มตั้งแต่ เดือนกุมภาพันธ์-สิงหาคม พ.ศ.2567 และนำมาวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆที่ก่อให้เกิดของเสียในกระบวนการ โดยประยุกต์ใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ (QC 7 Tool) , การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and analysis of Experiment) แบบ 2^k full factorial design ซึ่งจะทำให้การหาปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อนำมาดำเนินการแก้ไขปัญหา และนำความรู้มาจากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษาลักษณะของชิ้นงานและงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบลลและ รวบรวมข้อมูลของเสีย (Defect) ย้อนหลัง 6 เดือน
2. ศึกษารายละเอียดของพารามิเตอร์ของเครื่องจักรในกระบวนการตัดชิ้นงาน (Singulation)
3. วิเคราะห์สาเหตุและหาปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาการเกิดของเสียกรณีศึกษา
4. การกำหนดความสัมพันธ์ ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลอง (DOE)
5. ทำการทดลอง, เก็บรวบรวมผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล โดยใช้หลัก 2^k Full Factorial Experiment
6. การตรวจสอบอำนาจและทดสอบข้อมูล

3.1 ศึกษาลักษณะของชิ้นงานและงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบลลและ รวบรวมข้อมูลของเสีย (Defect) ย้อนหลัง 6 เดือน

3.1.1 ลักษณะของวงจรรวม หรือ integrated circuits (IC) และส่วนประกอบ

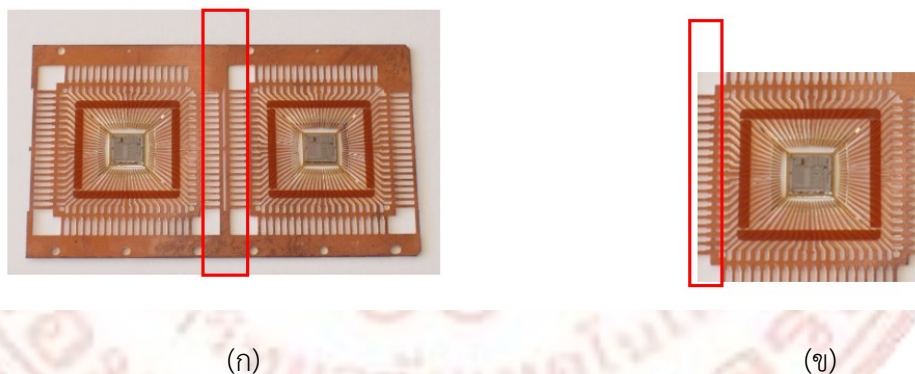
จากภาพที่ 3-1 แสดงถึงภาพชิ้นงานแต่ละแนวแกน โดยภาพชิ้นงานซ้าย แสดงแนวตัดขวางของชิ้นงาน ภาพชิ้นงานกลาง แสดงถึงภาพแนวสองมิติจากด้านล่างชิ้นงาน และภาพทางขวาแสดงแนวแกนสามมิติ โดยจากทั้งสามภาพ มีการระบุตำแหน่งของหลิ็ดเฟรม ซึ่งเป็นส่วนประกอบของชิ้นงาน และเป็นจุดที่เกิดปัญหาเทอร์มินอลเบลล ซึ่งส่งผลกระทบต่อชิ้นงานในกระบวนการตัดชิ้นงาน จะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 3-1 แสดงตัวอย่างภาพ integrated circuits (IC)

3.1.2 ลักษณะของงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr)

เทอร์มินอลในบริบทของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หมายถึงจุดเชื่อมต่อที่ใช้สำหรับเชื่อมสายไฟหรือส่วนประกอบต่าง ๆ โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นขั้วที่สามารถต่อสายไฟหรืออุปกรณ์อื่น ๆ ได้ ซึ่งในที่นี้เทอร์มินอลมาจาก lead frame ภาพที่ 3-2 ที่ถูกตัดแล้วเป็นขาหลิ็ด จากภาพ 3-2 ในกรอบสี่เหลี่ยมแสดงลักษณะของ ก) หลัคเฟรม (Lead frame) ที่ถูกตัดเป็นชิ้นงาน ข) เทอร์มินอล (Terminal)



ภาพที่ 3-2 แสดงลักษณะของ ก. หลัคเฟรม (Lead frame) ข.เทอร์มินอล (Terminal)

เทอร์มินอล (Terminal burr) คือเสี้ยนที่เกิดขึ้นจากการตัดชิ้นงานด้วยใบมีด (blade) โดยเป็นเศษโลหะจากหลัคเฟรม (Lead frame) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของวงจรรวมหรือ integrated circuits (IC) เมื่อถูกติดตั้งบน PCB หรือบอร์ดอื่น ๆ อาจทำให้เกิดกระบวนการผลิตไม่สมบูรณ์หรือการติดตั้งที่ไม่เหมาะสม เมื่อเกิดเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) เกิดขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อ

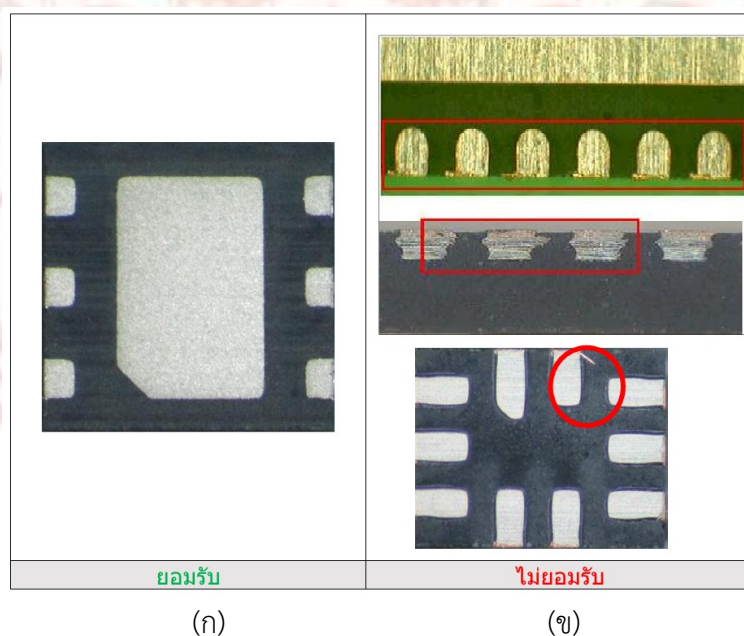
1.การเชื่อมต่อที่ไม่แน่นหนา : อาจทำให้การเชื่อมต่อไม่แน่นหนา ส่งผลให้สัญญาณไฟฟ้าหรือการจ่ายไฟไม่เสถียร

2. ความเสียหายต่อ PCB : ถ้าเทอร์มินอลเบลอยื่นออกมา อาจทำให้เกิดการชุดขีดหรือความเสียหายกับ PCB หรือส่วนอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียง

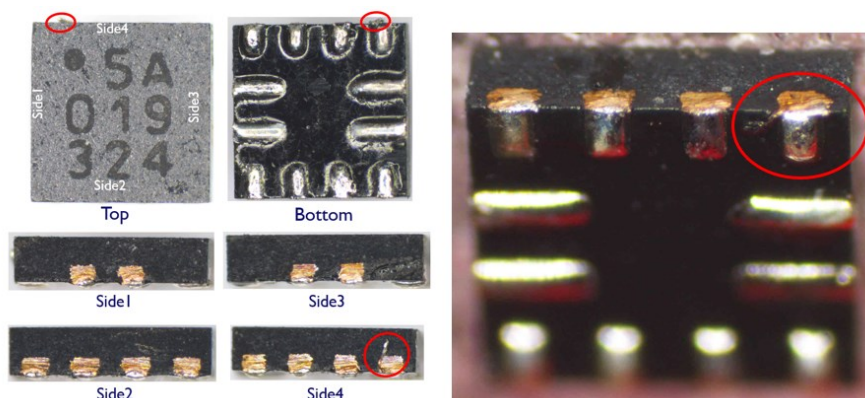
3. การเกิดความร้อน : การเชื่อมต่อที่ไม่ดีอาจทำให้เกิดความต้านทานสูง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความร้อนสูงขึ้น

4. ความเสี่ยงต่อการลัดวงจร : เบลออาจทำให้มีการสัมผัสกับส่วนอื่น ๆ ในระบบ ส่งผลให้เกิดการลัดวงจรได้

ในกระบวนการตัดงาน (Singulation) เกิดของเสียเป็นจำนวนมากสืบเนื่องมาจากปัจจัยหลาย ๆ อย่าง ซึ่งหนึ่งในนั้นคืองานเสียประเภทเทอร์มินอลเบล (Terminal burr) มีลักษณะเป็นเศษโลหะยื่นจากเทอร์มินอลหลังจากกระบวนการตัดเสร็จสิ้น และถูกแยกออกเป็นตัวชิ้นงาน การจัดการกับเทอร์มินอลเบล (Terminal burr) จึงมีความสำคัญในการผลิตและการนำไปติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้มั่นใจว่าอุปกรณ์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน จากภาพที่ 3-3 เป็นภาพแสดงการเกิดลักษณะของเทอร์มินอลเบล (Terminal burr) ซึ่งจากภาพที่ ก เป็นภาพชิ้นงานดีที่ได้รับการยอมรับในกระบวนการตัดงาน และภาพที่ ข เป็นภาพชิ้นงานเสียซึ่งไม่ถูกยอมรับ และเป็นงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบล (Terminal burr) ในส่วนของภาพที่ 3-4 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบล (Terminal burr) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดชิ้นงาน



ภาพที่ 3-3 แสดงลักษณะของ (ก) งานดี (ข) งานเสียประเภทเทอร์มินอลเบล

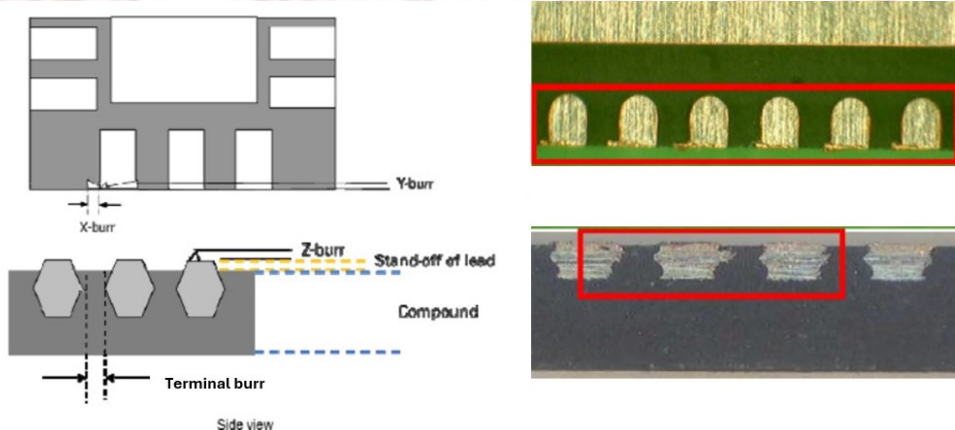


ภาพที่ 3-4 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายงานเสียประเภทเส้นบนขาหลัด(Terminal burr)

จากตารางที่ 3-1 บ่งบอกรายละเอียดในการตัดสินงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล ของ ชิ้นงานประเภท QFN ซึ่งเบลลจะต้องมีขนาดมากกว่าขนาดที่กำหนด ดังนี้

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดการตรวจชิ้นงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal Burr)

รายละเอียดการตรวจ	package	Reject
เทอร์มินอลเบลล (Terminal burr)	QFN	เส้นตามแนวแกน X หรือ Y มีขนาดมากกว่า 3 mil หรือความหนาเส้น (แกน Z) มีขนาดมากกว่า 2 mil
		ด้านข้าง: Reject เส้นหลังจากที่ทำการตัดเป็นตัวยู นิคความยาวของเส้นลกระยะระหว่าง Terminal แต่ละ Terminal มากกว่า ½ ของระยะเดิม



ภาพที่ 3-5 แสดงการวัดเทอร์มินอลเบลล (Terminal Burr) ตามแนวแกน

3.2 ศึกษารายละเอียดของพารามิเตอร์ของเครื่องจักรในกระบวนการตัดชิ้นงาน (Singulation)

3.2.1 เครื่องจักรที่ใช้ในการตัดงาน



ภาพที่ 3-6 เครื่องจักร SAW DISCO MODEL DFD6340

3.2.2 พารามิเตอร์ก่อนปรับปรุงของ package IC ประเภท QFN

ตารางที่ 3-2 แสดงพารามิเตอร์ก่อนปรับปรุง

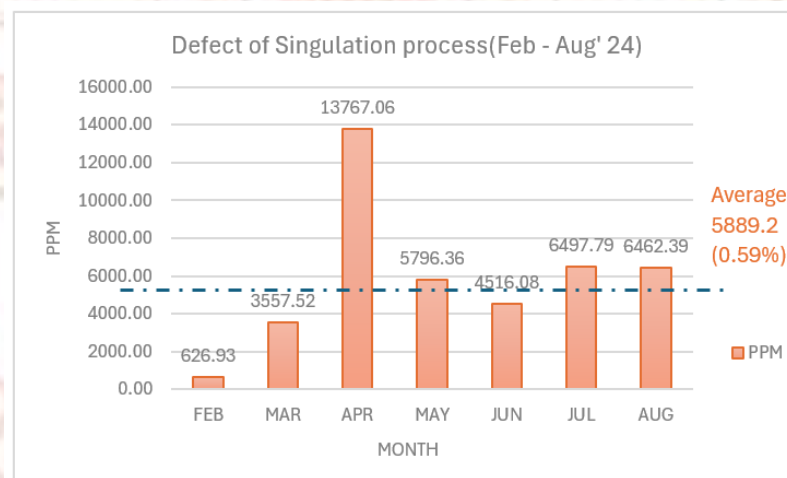
Parameter	Control
Lead frame type	Copper
Spindel speed (RPM)	30,000
Feed rate speed (IPS)	3 max
Cutting water flow rate(L/minute)	1.6 min
Washing time (Sec)	10 +/- 5
Blade grid size	SDC280
Washing pressure(MPa)	5

3.3 วิเคราะห์สาเหตุและหาปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาการเกิดของเสียกรณีศึกษา

จากการศึกษากระบวนการผลิตในบริษัทกรณีศึกษาพบว่า กระบวนการตัดชิ้นงาน (Singulation) เป็นกระบวนการที่มีของเสียเป็นจำนวนมาก และปัญหาที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือปัญหาเทอร์มินอลเบลลอป เนื่องจากกระบวนการตัดชิ้นงาน(singulation) ทางผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์สาเหตุที่เกิดของเสียโดยใช้วิธีดังต่อไปนี้

3.3.1 การระบุปัญหา

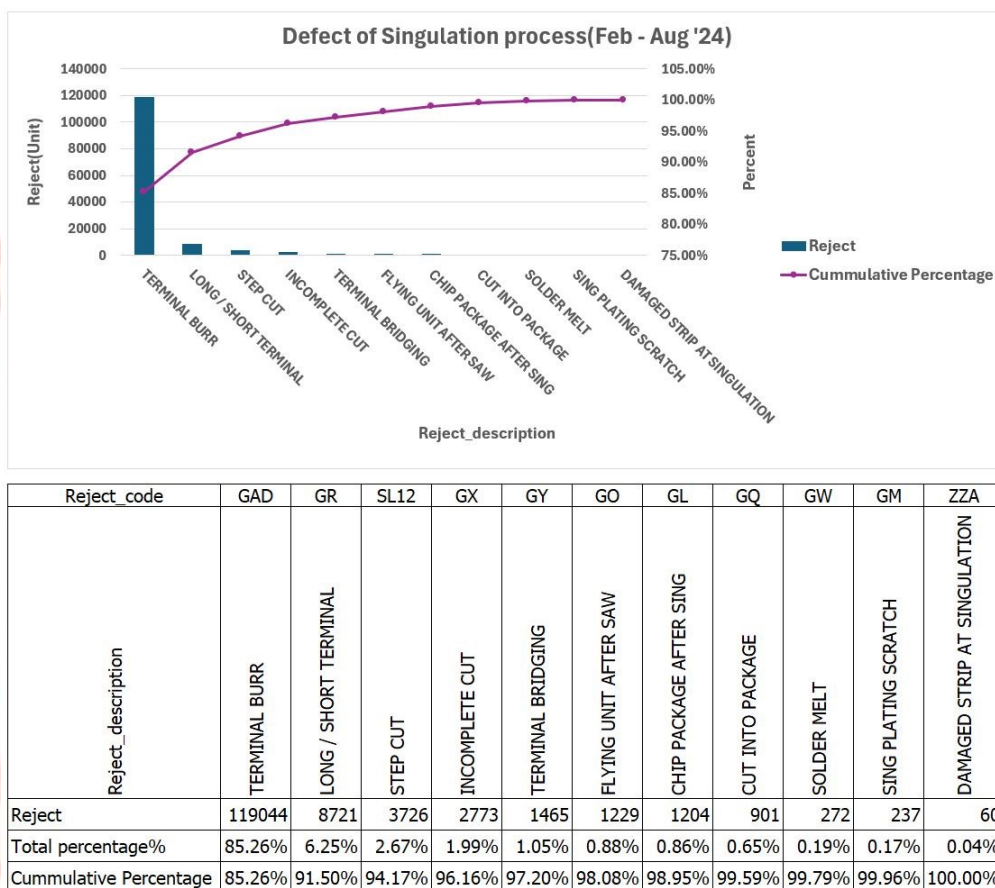
กระบวนการตัดงานหรือ Singulation Process เป็นกระบวนการที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดของเสีย ซึ่งจากภาพ 3-7 แสดงของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงเดือน กุมภาพันธ์- สิงหาคม 2024 เป็นช่วงของการสำรวจกระบวนการตัดชิ้นงาน (Singulation) โดยพบของเสียภายในกระบวนการเป็นจำนวนมาก จะเห็นได้ว่ามีค่าเฉลี่ยของเสียในกระบวนการอยู่ที่ 5889.2 PPM หรือคิดเป็น 0.59% ของการผลิตทั้งหมด อันมีสาเหตุหลายประการ ซึ่งจากการวิเคราะห์เบื้องต้น คาดว่าเกิดจากการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องจักร และกระบวนการทำงาน จึงทำให้เสี่ยงที่มีโอกาสเกิดของเสียเกิดขึ้น ซึ่งควรที่จะถูกนำมาวิเคราะห์และแก้ไขปรับปรุงกระบวนการเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



ภาพที่ 3-7 แผนภูมิแท่งแสดงของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงเดือน กุมภาพันธ์- สิงหาคม 2024

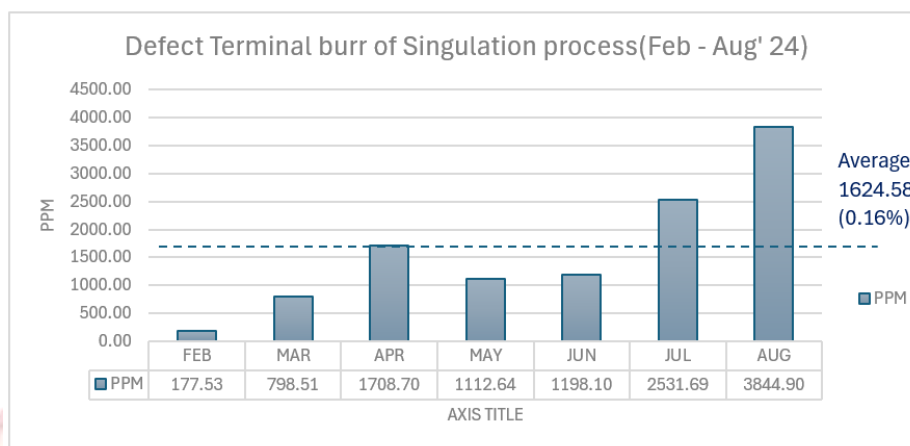
จากการศึกษาสภาพปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในเดือน กุมภาพันธ์- สิงหาคม 2024 มีการนำของเสียทั้งหมดมากระจายชนิดของของเสีย เพื่อดูแนวโน้มชนิดของของเสียที่เกิดขึ้น โดยใช้แผนภูมิพาเรโต ดังภาพที่ 3-8

3.3.1.1 แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart)



ภาพที่ 3-8 แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) จำแนกตามลักษณะอาการของปัญหา

จากภาพ 3-8 แผนภูมิพาเรโต จะจำแนกตามลักษณะชนิดของงานเสีย ที่พบภายในกระบวนการตัดหรือ Singulation เท่านั้น กล่าวได้ว่า เทอร์มินอลเบลล์ (Terminal Burr) พบการเกิดปัญหามากที่สุดถึง 85.26% ของของเสียทั้งหมด ซึ่งควรได้รับการปรับปรุงเป็นอันดับแรก ดังนั้นนักศึกษาจึงเลือกวิเคราะห์สาเหตุที่แท้จริงของของเสียประเภทนี้เพื่อป้องกันและลดของเสียที่จะเกิดขึ้นในลำดับถัดไป

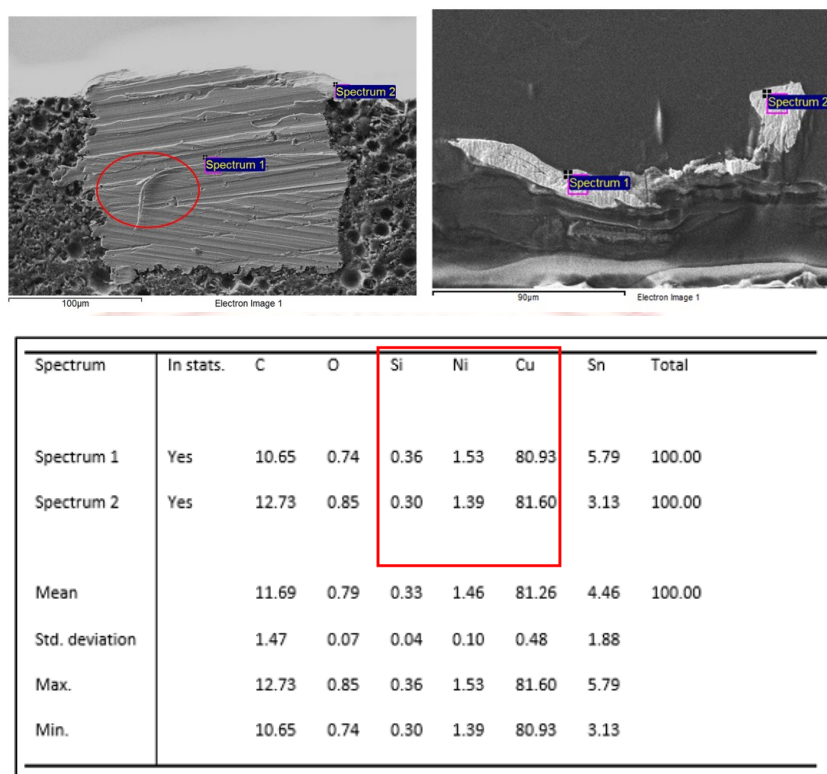


ภาพที่ 3-9 แผนภูมิแท่งแสดงของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล์ (Terminal Burr) ที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงเดือน กุมภาพันธ์- สิงหาคม 2024 เทียบกับการกระบวนผลิตทั้งหมด

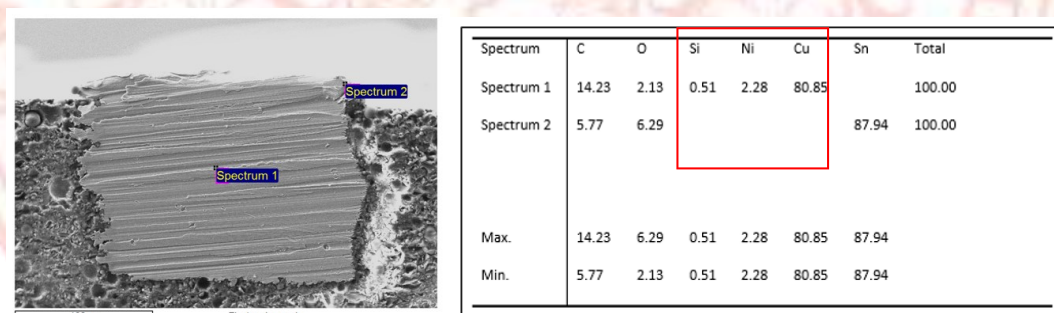
จากภาพที่ 3-9 แสดงของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล์(Terminal burr) ที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงเดือน กุมภาพันธ์- สิงหาคม 2024 พบค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1624.58 PPM หรือคิดเป็น 0.16% ของการผลิตทั้งหมด ทำให้เกิดต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำไรในการผลิตลดลง ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถดำเนินการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องมีการระบุหัวข้อของปัญหาที่จะทำการแก้ไข โดยอาศัยเครื่องมือทางด้านการควบคุมคุณภาพ ดังนี้

3.3.2 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของวัสดุของงานเสีย ด้วยวิธี SEM & EDX

งานเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล์(Terminal burr)นั้น จะต้องถูกนำมาวิเคราะห์ เพื่อหาข้อมูลของวัสดุ โดยในที่นี้ได้ใช้การวิเคราะห์งานเสียจากวิธีการพิสูจน์เอกลักษณ์ชนิด SEM(scanning electron microscope) & EDXหรือ EDS(Energy Dispersive Spectroscopy) เพื่อยืนยันว่า งานเสียที่เกิดขึ้น เกิดจากกระบวนการตัดหรือไม่และเกิดจากวัสดุชนิดใด จากผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของวัสดุ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์(Laead frame)ที่ใช้ จากภาพที่ 3-10 แสดงผลการทดสอบการพิสูจน์เอกลักษณ์ของงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล์(Terminal burr) พบว่าในส่วนบริเวณงานเสีย พบธาตุ Cu, Si , Ni และ จากภาพที่ 3-11 แสดงผลการทดสอบการพิสูจน์เอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์(Laead frame) พบธาตุ Cu, Si , Ni เช่นเดียวกัน ซึ่งกล่าวได้ว่า การเกิดงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล์นั้น เกิดจากแม่พิมพ์รีลของผลิตภัณฑ์(Laead frame) จริง ไม่ใช่การผสมของสารหรือสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ บ่งบอกได้ว่า เกิดจากกระบวนการตัดแยกชิ้นงาน จากนั้นจึงมีการนำมาวิเคราะห์การแก้ไขปัญหาโดยใช้วิธีต่างๆในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 3-10 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประเภท SEM&EDX ของงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบล (Terminal burr)



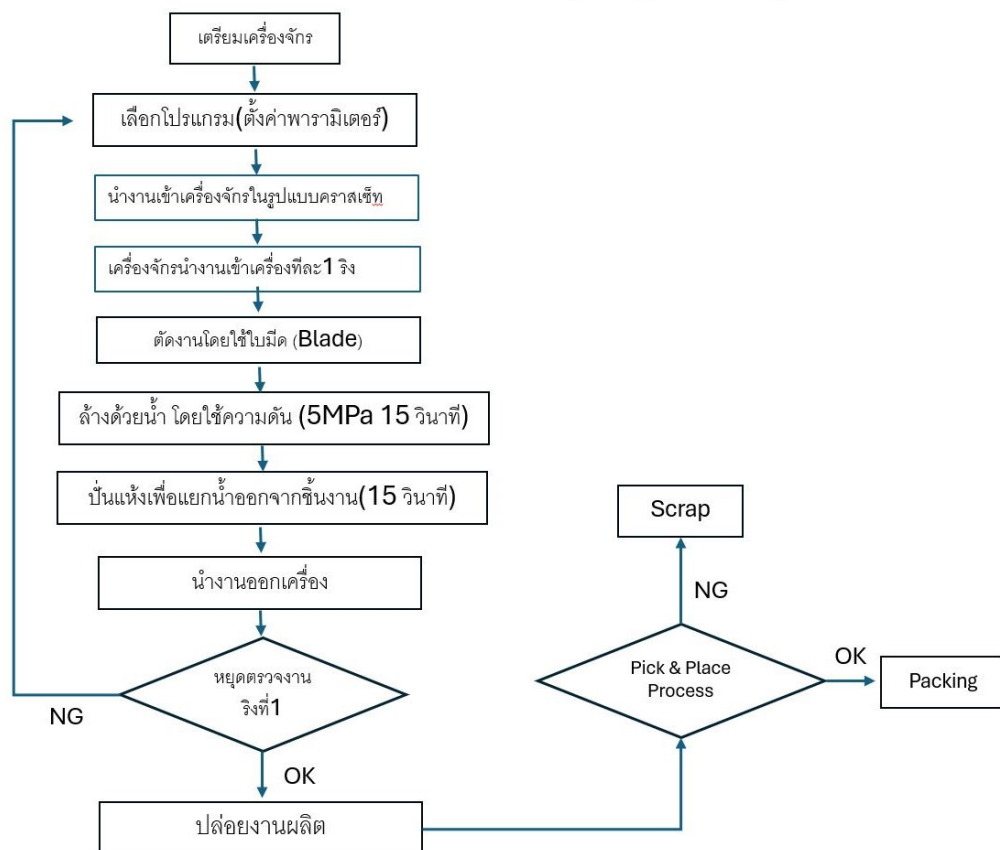
ภาพที่ 3-11 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประเภท SEM & EDX ของหลิตเฟรม (Lead frame)

3.3.3 แผนผังกระบวนการผลิตในกระบวนการตัดงานหรือซิงกูเรชั่น (Singulation)

ภาพที่ 3-12 แสดงถึงกระบวนการผลิตในกระบวนการตัดงานหรือซิงกูเรชั่น (Singulation) ซึ่งกล่าวได้ว่าการผลิตจะเริ่มต้นจากการเตรียมเครื่องจักร จากนั้นทำการเลือกโปรแกรมตัดโดยมีการตั้งพารามิเตอร์ซึ่งสามารถเลือกได้จากชนิดงานดังกล่าว จากนั้นนำงานเข้าเครื่องจักร โดยจะเข้าไปในรูปแบบคราสเซ่ หรือที่เราเรียกกันว่าหม้อ ใน 1 หม้อจะประกอบไปด้วยริงสามารถบรรจุได้ 1-25 ริง ขึ้นอยู่กับจำนวนงานของแต่ละล็อตที่นำมาผลิต จากนั้น เครื่องจักรจะทำการนำงานเข้าเครื่องจักรเพื่อทำการตัดงาน โดยการตั้งเข้าทีละ 1 ริง หลังจากตัดเรียบร้อยแล้วตามพารามิเตอร์ที่ได้ตั้งค่าไว้แล้ว จะมีการ

เคลื่อนย้ายริงเพื่อนำไปล้างเศษจากการตัดออก เป็นระยะเวลา 15 วินาที โดยการล้างนั้น จะใช้น้ำที่มีความดันอยู่ที่ระดับ 5 MPa โดยมีความห่างจากชิ้นงานประมาณ 7 mm. เมื่อทำการล้างเรียบร้อยแล้ว นำเข้าสู่กระบวนการปั่นแห้งเพื่อไล่น้ำออกจากชิ้นงานเป็นระยะเวลา 15 วินาที จากนั้นนำงานออกจากเครื่อง เป็นอันเสร็จกระบวนการ จะทำการตรวจชิ้นงานที่ริงที่1 เท่านั้น หากปกติจะทำการปล่อยผลิตจนหมดล็อตนั้นๆ จากนั้นจะทำงานที่ตัดเรียบร้อยแล้ว ส่งไปแผนกถัดไป คือ Pick and Place ซึ่งเป็นแผนกตรวจจ้างงานเสีย และการแพ็คส่งลูกค้า หากเกิดงานเสียจะถูกจัดออกที่แผนกนี้ ดังนั้นทางผู้ดำเนินการทดลอง จะมีเก็บผลในการเกิดของเสียที่แผนกดังกล่าว

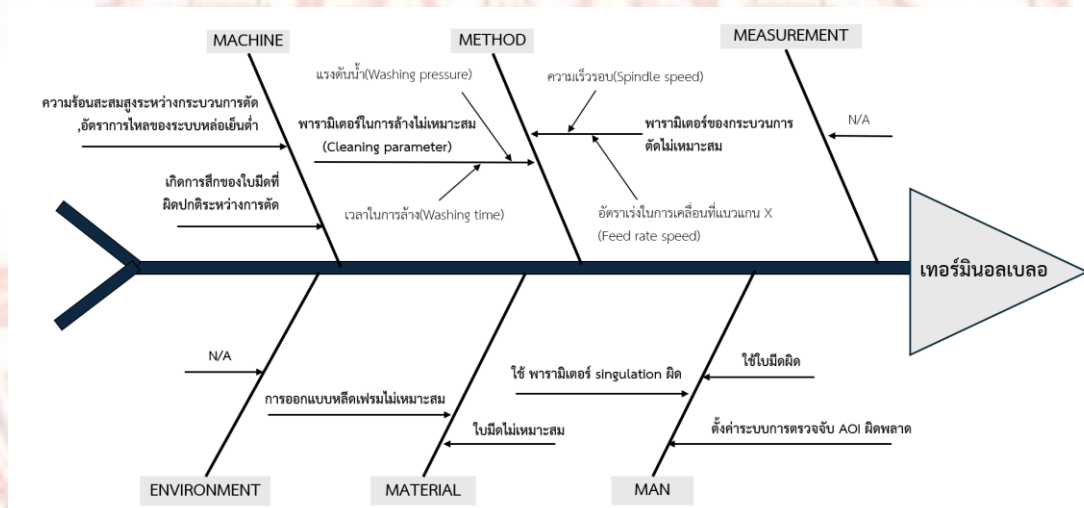
กระบวนการตัดงาน(Singulation)



ภาพที่ 3-12 แผนผังกระบวนการซิงกูเรชั่น (Singulation)

3.3.4 การวิเคราะห์โดยใช้แผนภาพเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

หลังจากศึกษากระบวนการแล้ว จะพอทราบตัวแปรสำหรับของกระบวนการต่างๆ จึงจำเป็นต้องทำการระดมสมอง เพื่อค้นหาสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยจะนำเสนอในรูปแบบแผนผังก้างปลา (Fish Bone Diagram) จากภาพที่ 3-13 แผนภาพแสดงเหตุและผลของของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal Burr) ซึ่งใช้หลักการ 5M 1E นำไปสู่การระบุปัจจัยเพื่อใช้ในการออกแบบการทดลอง โดยทางผู้วิจัยได้ระดมความคิดจากผู้เชี่ยวชาญในแต่ละฝ่าย คือ ฝ่ายวิศวกรรม ฝ่ายผลิต และฝ่ายควบคุมคุณภาพ เพื่อนำมาวิเคราะห์ปัญหาตามหลักข้อเท็จจริงและหาปัจจัยหลัก (main) ที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง โดยวิเคราะห์ตามกระบวนการผลิต เริ่มต้นการจาก พนักงาน (man), เครื่องจักร(machine), วัตถุดิบ(material), การทำงาน(method), การวัด(Measurement) และ สิ่งแวดล้อม(Environment) รวมถึงขั้นตอนการผลิตและของเสียที่เกิดขึ้น สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้



ภาพที่ 3-13 แผนภาพแสดงเหตุและผลของของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal Burr)

หลักการที่ใช้พิจารณาเลือกปัจจัยที่นำมาทำการทดลอง และกำหนดระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การเลือกปัจจัยที่จะนำมาทำการทดลองนั้น จะพิจารณาเลือกปัจจัยที่สามารถปรับค่าได้ เพราะในการทดสอบจะมีการปรับค่าของปัจจัยเปลี่ยนค่าไป แล้ววัดค่าผลตอบสนองที่ออกมาหลังจากนั้นก็ทำการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการทางสถิติ ดังนั้นในการเลือกปัจจัยดังกล่าวจะพยายามเลือกปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนองอย่างมาก โดยอาจใช้ข้อมูลการทดลองที่ได้ทำแล้วในอดีต หรือความรู้ทางด้านวิศวกรรม เข้าช่วยในการเลือกเพื่อให้ได้ปัจจัยที่เหมาะสม

มีหลักการที่ใช้ในการเลือกปัจจัยดังนี้

1. ปัจจัยที่จะถูกเลือกนั้นจะต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้
2. ปัจจัยเกี่ยวข้องกับคนจะเลือกใช้พนักงานที่มีความชำนาญ ทำงานได้ถูกต้องเพื่อลดข้อผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น และจะกำหนดเป็นปัจจัยควบคุม
3. ปัจจัยที่ถูกเลือกนั้น จะต้องไม่มีผลกระทบต่อรอบเวลาในการผลิต (Cycle Time)
4. ปัจจัยที่นอกเหนือความรับผิดชอบจากหน่วยงานที่รับผิดชอบจะไม่นำมาพิจารณา
5. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักร และเป็นลักษณะที่เกี่ยวกับความสามารถของเครื่องจักรจะไม่นำมาพิจารณา เพราะไม่ต้องการวัดความสามารถของเครื่องจักรหรือเครื่องมืออื่น และจะกำหนดปัจจัยนั้นเป็นปัจจัยควบคุม
6. ปัจจัยที่จะเลือกจะพิจารณาโดยใช้ความรู้ในเชิงวิศวกรรม

แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทำการทดลองค่อนข้างนานจึงมีความจำเป็น ต้องเลือกปัจจัยเพียง 3 ปัจจัยมาทำการทดลอง ซึ่งเป็นเหตุผลที่ใช้ในการเลือก ปัจจัยหรือตัดปัจจัยทิ้ง โดยพิจารณาตามหลักการ 4M ที่กล่าวไว้ดังนี้

3.3.4.1 การพิจารณาเลือกปัจจัยด้านคน (Man)

3.3.4.1.1 พนักงานใช้ พารามิเตอร์ singulation ผิด

ทำการลดสาเหตุการผิดพลาดจากปัจจัยนี้ โดยการเลือกพนักงานที่มีประสบการณ์มาเพียงหนึ่งคน และมีเอกสารให้ลงบันทึกพารามิเตอร์ที่ใช้ขณะทำการปฏิบัติงาน เพื่อป้องกันการผิดพลาด ดังนั้นปัจจัยนี้จึงไม่ถูกนำมาพิจารณา

3.3.4.1.2 พนักงานใช้ใบมีดผิด

ทำการลดสาเหตุการผิดพลาดจากปัจจัยนี้ โดยการเลือกพนักงานที่มีประสบการณ์มาเพียงหนึ่งคน และมีเอกสารให้ลงบันทึกพารามิเตอร์ที่ใช้ขณะทำการปฏิบัติงาน เพื่อป้องกันการผิดพลาด ดังนั้นปัจจัยนี้จึงไม่ถูกนำมาพิจารณา

3.3.4.1.3 ตั้งค่าระบบการตรวจจับ AOI ผิดพลาด

ปัจจัยนี้จะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากเป็นส่วนงานที่อยู่นอกเหนือแผนกที่ทำการศึกษาถือเป็นปัจจัยที่ไม่ควบคุม

3.3.4.2 การพิจารณาเลือกปัจจัยด้านวัสดุ (Material)

การพิจารณาปัจจัยด้านวัสดุว่าเหมาะสมที่จะเลือกเป็นปัจจัยที่ใช้ในการทดลองหรือไม่นั้น ได้แสดงผลในการเลือกปัจจัยต่างๆดังนี้

3.3.4.2.1 ใบมีดไม่เหมาะสม

เนื่องจากใบมีดที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้ซื้อมาจากบริษัทผู้ผลิตภายนอก การกำหนด ซึ่งคุณสมบัติของส่วนประกอบในใบมีดนั้นทำได้ยากที่จะกำหนด ขึ้นอยู่กับการออกแบบ

ของบริษัทผู้ผลิต ดังนั้นจึงกำหนดเป็นปัจจัยควบคุมโดยใช้ใบมีดชนิดที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จึงไม่สามารถนำปัจจัยนี้มาพิจารณาได้

3.3.4.2.2 การออกแบบหลิตเฟรมไม่เหมาะสม

เนื่องจากหลิตเฟรมที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้ซื้อมาจากบริษัทผู้ผลิตภายนอกการกำหนด ซึ่งคุณสมบัติของส่วนประกอบนั้นทำได้ยากที่จะกำหนด ขึ้นอยู่กับการออกแบบของบริษัทผู้ผลิต ดังนั้นจึงกำหนดเป็นปัจจัยควบคุมโดยจะใช้ชนิดที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จึงไม่สามารถนำปัจจัยนี้มาพิจารณาได้

3.3.4.3 การพิจารณาเลือกปัจจัยด้านเครื่องจักร (Machine)

เหตุผลในการเลือกปัจจัยด้านเครื่องจักรหรืออุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดลองมีดังนี้

3.3.4.3.1 ความร้อนสะสมสูงระหว่างกระบวนการตัด, อัตราการไหลของระบบหล่อเย็นต่ำ

ปัจจัยนี้จะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากเป็นส่วนงานที่อยู่นอกเหนือแผนกที่ทำการศึกษา และมีการตรวจสอบอุปกรณ์และความถูกต้องของระบบหล่อเย็นด้วยการกำหนด preventive maintenance ตามรอบกำหนด จึงเป็นปัจจัยที่ไม่ควบคุม

3.3.4.3.2 เกิดการสึกของใบมีดที่ผิดปกติระหว่างการตัด

ปัจจัยนี้จะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจาก และมีการตรวจสอบกำหนดค่า ของอายุใบมีดภายในเครื่องจักร ซึ่งมีระบบเตือนเมื่อหมดอายุการใช้งาน และมีการลงข้อมูลของอายุใบมีดก่อนปฏิบัติงาน เพื่อย้ำเตือนการใช้งานใบมีดที่ใกล้กำหนดหมดอายุ ดังนั้นปัจจัยนี้จึงเป็นปัจจัยที่ไม่ควบคุม

3.3.4.4 การพิจารณาเลือกปัจจัยด้านวิธีการ (Methods)

เหตุผลในการเลือกปัจจัยการทดลองมีดังนี้

3.3.4.4.1 พารามิเตอร์ของกระบวนการตัดไม่เหมาะสม

ก) ความเร็วรอบ (Spindle speed)

เนื่องจากกระบวนการตัดเป็นกระบวนการทางกล มีแรงที่ใช้ในการตัดเข้ามาเกี่ยวข้อง ความเร็วรอบในการตัดจะเป็นปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อแรงตัดที่เกิดขึ้น ในการตัดวัสดุนั้นจะต้องใช้แรงกระทำที่เหมาะสม ซึ่งแต่ละวัสดุก็จะใช้แรงในการตัดที่ต่างกัน ดังนั้นจึงเห็นว่าควรจะนำปัจจัยความเร็วรอบในการตัดเป็นตัวแปรที่ใช้ในการทดลองเพื่อพิจารณาว่าเมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเร็วรอบจะมีผลต่อการเกิดปัญหาเสียนบนขาหลิตหรือไม่

ข) อัตราแรงในการเคลื่อนที่แนวแกน X (Feed rate speed)

อัตราการเร่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ถูกเลือกใช้ในการทดลอง เพราะอัตราการเร่งในการเคลื่อนที่แนวแกน x คือระยะทางที่ใบมีดเดินตัดขึ้นงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา ถ้าอัตรา

การเร่งตัดสูง จะทำให้เวลาในการตัดลดลง แต่จะเกิดผลเสียคือ ใบมีดรับภาระหนัก ความร้อนสะสม บริเวณตำแหน่งตัดสูงเศษการตัดไม่สามารถเคลื่อนออกมาได้ทัน หรืออาจจะส่งผลถึงเสียในการตัดที่เพิ่มหรือน้อยลง ถ้าอัตราการป้อนตัดต่ำจะทำให้เสียเวลาในการตัดมาก ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ ดังนั้น จึงต้องหาค่าอัตราการตัดที่เหมาะสมในการตัด จึงได้นำปัจจัยนี้ใช้ในการทดลองด้วย

3.3.4.4.2 พารามิเตอร์ในการล้างไม่เหมาะสม (Cleaning parameter)

ก) แรงดันน้ำ (Washing pressure)

แรงดันน้ำเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ถูกเลือกมาใช้ในการทดลอง เนื่องจากแรงดันน้ำมีอิทธิพลในการชะล้างสิ่งตกค้างในการตัด ซึ่งถ้าใช้แรงดันน้ำที่สูง ส่งผลให้มีแรงกระทำต่อเสี้ยนได้มากขึ้น จึงได้นำปัจจัยนี้มาใช้ในการทดลองด้วย

ข) เวลาในการล้าง (Washing time)

เวลาในการล้างไม่ถูกนำมาพิจารณาในการทดลอง ถึงแม้ว่าการล้างที่มีเวลาเพิ่มมากขึ้น อาจจะช่วยชะล้างของเสียได้มากขึ้น แต่เนื่องด้วยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นด้วย จึงส่งผลกระทบต่อความสามารถในการผลิตที่ลดลง

ซึ่งจากการวิเคราะห์ปัจจัยข้างต้น ผู้วิจัยได้มุ่งเน้นเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) โดยสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้งานกับเครื่องจักรได้ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 สรุปเหตุผลที่ใช้ในการเลือกปัจจัยต่างๆ

ปัจจัย	เหตุผลที่ใช้เลือกปัจจัย
1. ความเร็วรอบ (Spindle speed)	ความเร็วในการตัดส่งผลต่อแรงที่กระทำต่อชิ้นงานโดยตรง
2. อัตราเร่ง (Feed rate speed)	อัตราเร่งแนวแกน X ส่งผลต่อชิ้นงานโดยตรง ถ้าตัดเร็วไปจะเกิดแรงกระทำสูง มีการสะสมของความร้อนสูง แต่ถ้าช้าเกินไปจะทำให้เสียระยะเวลาในการตัดงาน
3. แรงดันน้ำ (Washing pressure)	แรงดันของน้ำมีผลต่อการชะล้างสิ่งต่างๆ ในกระบวนการตัด อีกทั้งมีแรงกระทำโดยตรงต่อชิ้นงาน

ตารางที่ 3-4 สรุปเหตุผลที่ใช้ในการไม่เลือกปัจจัยต่างๆ

ด้านปัจจัย	ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัย	วิธีการควบคุม
1. คน(Man)	1.1 พนักงานใช้ พารามิเตอร์ singulation ผิด	ปัจจัยนี้เกิดจากความผิดพลาดของพนักงาน ซึ่งสามารถลดความผิดพลาดได้โดยการฝึกอบรมให้เกิดความชำนาญ และมีเอกสารลงบันทึก	กำหนดให้พนักงานที่มีความชำนาญเป็นผู้ดูแลงานที่รับผิดชอบการทดลอง
	1.2 พนักงานใช้ใบมีดผิด	ปัจจัยนี้เกิดจากความผิดพลาดของพนักงาน ซึ่งสามารถลดความผิดพลาดได้โดยการฝึกอบรมให้เกิดความชำนาญ และมีเอกสารลงบันทึก	-
	1.3 ตั้งค่าระบบการตรวจจับ AOI ผิดพลาด	เป็นส่วนของงานที่อยู่นอกเหนือแผนกที่ทำการศึกษา	-
2. วัสดุ(Material)	2.1 ใบมีด(Blade)	ใบมีดที่ใช้ในกระบวนการผลิต ทำให้ควบคุมคุณภาพยาก จึงทำการกำหนดให้ใช้เหมือนการทำงานปัจจุบัน	-
	2.2 หลักรีม(Lead frame)	ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตภายนอกการกำหนด ซึ่งคุณสมบัติของส่วนประกอบนั้นทำได้ยากที่จะกำหนด จึงกำหนดให้ใช้ชนิดที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน	-
3. เครื่องจักร(Machine)	3.1 ความร้อนสะสมสูงระหว่างกระบวนการตัด, อัตราการไหลของระบบหล่อเย็นต่ำ	เป็นส่วนของงานที่อยู่นอกเหนือแผนกที่ทำการศึกษา และมีการตรวจสอบอุปกรณ์และความถูกต้องของระบบหล่อเย็น	กำหนดให้มีการ preventive maintenance ตามระยะเวลาดำหนด
	3.2 เกิดการสึกของใบมีดที่ผิดปกติระหว่างการตัด	มีการตรวจสอบกำหนดค่า ของอายุใบมีดภายในเครื่องจักร ซึ่งมีระบบเตือนเมื่อหมดอายุการใช้งาน	-
4. วิธีการ(Methods)	4.1 เวลาในการล้าง(Washing time)	เวลาเพิ่มมากขึ้น อาจจะช่วยชะล้างของเสียได้มากขึ้น แต่เนื่องด้วยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นด้วย จึงส่งผลกระทบต่อความสามารถในการผลิตที่ลดลง	-

จากการพิจารณาปัจจัยข้างต้นนั้น สามารถสรุปได้ว่า มีปัจจัยที่ถูกเลือกและต้องควบคุม 3 ปัจจัย ดังนี้ ความเร็วรอบ (Spindle Speed), อัตราเร็วในการเคลื่อนที่แนวแกน X (Feed Rate Speed) และ แรงดันน้ำ (Washing Pressure) ซึ่งในขั้นตอนต่อไปจะทำการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยและค่าที่สามารถปรับตั้งได้เพื่อนำมาทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในกระบวนการผลิต

3.4 การกำหนดความสัมพันธ์ ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลอง (DOE)

ตารางที่ 3-5 ปัจจัยกับค่าผลตอบสนองที่ปรับตั้งได้ของแต่ละปัจจัย

Parameter	Control	ลักษณะของปัจจัย	ค่าที่ปรับตั้งได้	ผลการตอบสนอง
Spindel speed (RPM)	30,000	เชิงปริมาณ	20,000-40,000	พบเทอมินอลเบล
Feed rate speed (IPS)	3 max	เชิงปริมาณ	2-5	พบเทอมินอลเบล
Washing pressure (MPa)	5	เชิงปริมาณ	5-10	พบเทอมินอลเบล

3.5 ทำการทดลอง, เก็บรวบรวมผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล โดยใช้หลัก 2^k Full Factorial Experiment

เนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียจากระบวนการผลิต ดังนั้นค่าตอบสนองที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการทดลองครั้งนี้ จึงเป็นจำนวนของเสียต่อ 1 การทดลองเป็นหน่วยขึ้น โดยงานวิจัยจะมีสมมติฐานการวิจัยดังนี้

3.5.1 การกำหนดสมมติฐานการวิจัย

กำหนดให้

τ = อิทธิพลจากการปรับ Spindel speed

β = อิทธิพลจากการปรับ Feed rate speed

γ = อิทธิพลจากการปรับ Washing pressure

3.5.1.1 สมมติฐานกรณีทดสอบปัจจัยหลัก (Test of Main Factor)

ก). Spindel speed

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า } i$$

ข). Feed rate speed

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า } j$$

ค). Washing pressure

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0$$

$$H_1: \gamma_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า } k$$

3.5.1.2 สมมติฐานกรณีทดสอบปัจจัยร่วม (Test of Interaction Factors)

3.5.1.2.1 สมมติฐานกรณีทดสอบอิทธิพล 2 ปัจจัยร่วม (Interaction

2 Factors)

$$H_0: (\tau \beta)_{ij} = 0$$

$$H_1: (\tau \beta)_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

$$H_0: (\tau \gamma)_{ik} = 0$$

$$H_1: (\tau \gamma)_{ik} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

$$H_0: (\beta \gamma)_{jk} = 0$$

$$H_1: (\beta \gamma)_{jk} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่าเมื่อ}$$

3.5.1.2.2 สมมติฐานกรณีทดสอบอิทธิพล 3 ปัจจัยร่วม (Interaction 3 Factors)

$$H_0: (\tau \beta \gamma)_{ijk}=0$$

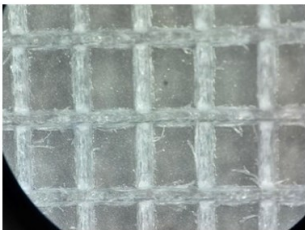
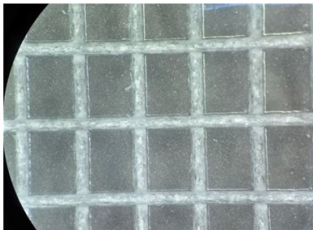
$$H_1: (\tau \beta \gamma)_{ijk} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

3.5.2 การออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k (2^k Factorial Experiment Design)

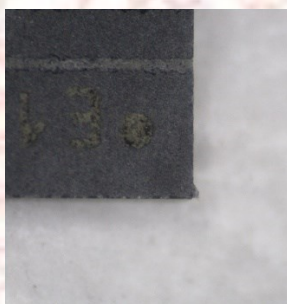
เนื่องจากปัจจัยที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 3 ปัจจัยและใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ เพื่อศึกษาการมีอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความตอบสนอง ทางผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องการรู้ถึงผลหลัก (Main Effect) และผลอันตรกิริยา (Interaction Effect) ดังนั้น จึงทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) ซึ่งจากการพิจารณาพบว่าแต่ละปัจจัยควรมีระดับของปัจจัยเพียง 2 ระดับเพราะถ้าใช้ระดับของปัจจัยมากกว่านี้ จะทำให้การเก็บข้อมูลใช้เวลานานมาก ซึ่งการกำหนดระดับปัจจัยจะต้องพิจารณาช่วง (Range) ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน และเครื่องจักรสามารถรับได้ต่อการผลิต อีกทั้งไม่ส่งผลเสียต่อชิ้นงาน จึงต้องอาศัยความรู้ในกระบวนการตัดงานจากผู้มีประสบการณ์ รวมถึงทฤษฎีทางวิศวกรรม เข้าช่วยตัดสินใจกำหนดระดับของปัจจัย ซึ่งสามารถพิจารณาการทดลอง โดยอ้างอิงถึงตารางที่ 3-5 และสามารถกำหนดระดับค่าของปัจจัยได้ดังนี้

3.5.2.1 ความเร็วรอบ (Spindle Speed)

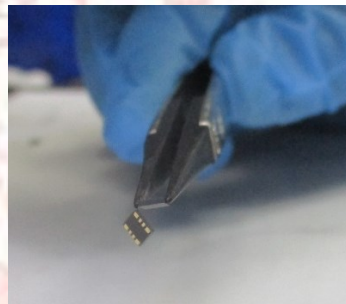
ความเร็วรอบหรือ Spindle speed คือความเร็วของแกนเพลลาที่ยึดใบมีด ซึ่งจะสื่อถึงความเร็วของใบมีดนั่นเอง โดยจากตารางที่ 3-5 นั้นระบุว่า ในปัจจุบันใช้ความเร็วรอบอยู่ที่ 3,000 รอบต่อนาที ซึ่งเครื่องจักรมีความสามารถในการรับได้อยู่ที่ 20,000-40,000 รอบต่อนาทีหรือ RPM แต่เนื่องด้วยในระดับความเร็วที่ต่ำที่สุดคือ 20,000 รอบต่อนาทีนั้น จากการวิเคราะห์ประสบการณ์ในการผลิต พบว่าเครื่องจักรสามารถทำได้จริง แต่เกิดปัญหาทางด้านคุณภาพ ดังนี้ เบื้องต้นกล่าวถึงการตัดงานจะต้องตัดเทพที่ใช้ติดตัวชิ้นงาน ลึกลงไปครึ่งหนึ่งของความหนาเทพ จากภาพที่ 3-14 แสดงถึงเส้นตัดบนเทพที่โดนตัดจากความเร็วรอบที่ต่างกัน ภาพด้านซ้ายเป็นภาพเทพจากความเร็วรอบใบมีดที่ 20,000 รอบต่อนาที ด้านขวา เป็นภาพเทพจากความเร็วรอบใบมีดที่ 30,000 รอบต่อนาที เห็นได้ว่าในความเร็วรอบที่ 20,000 รอบต่อนาทีนั้น เกิดเส้นใยหรือฟิลาเมน เป็นเส้นขรุขระ, เส้นตัดไม่เรียบเนียนบนเส้นตัด ทำให้เกิดการติดขึ้นของเส้นใยฟิลาเมนระหว่างการตัดงาน ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาการติดอยู่บริเวณตัวชิ้นงาน ดังภาพที่ 3-15 (ก) ภาพการติดอยู่บริเวณมุมขอบชิ้นงาน และ(ข) ภาพชิ้นงานติดกันเนื่องจากกาวบนเทพติดขึ้นระหว่างการตัดงาน จึงจำเป็นจะต้องใช้ ความเร็วรอบที่ 30,000 รอบต่อนาที เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาทางด้านคุณภาพอื่น ๆ ร่วมในการทดลอง

ความเร็วรอบ(รอบต่อนาที)	
20,000	30,000
	

ภาพที่ 3-14 แสดงถึงเส้นตัดบนเทปที่ความเร็วรอบที่ต่างกัน



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3-15 ภาพการติดบนชิ้นงานโดย(ก) อยู่บริเวณมุมขอบชิ้นงาน และ(ข)ภาพชิ้นงาน

ดังนั้น จึงทำการกำหนดระดับของปัจจัยได้ดังต่อไปนี้

ระดับต่ำ(-1): ความเร็วรอบในการตัดงานเท่ากับ 30,000 รอบต่อนาที

ระดับสูง(+1): ความเร็วรอบในการตัดงานเท่ากับ 40,000 รอบต่อนาที

3.5.2.2 อัตราเร็วในการเคลื่อนที่แนวแกน X (Feed rate speed)

อัตราเร็วในการเคลื่อนที่แนวแกน X (Feed rate speed) คือความเร็วของ chuck table ซึ่งเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของชิ้นงานในแนวแกน X โดยค่านี้จะเป็นค่าที่กำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการตัดงาน ซึ่งจากตารางที่ 3-5 นั้นระบุว่า ในปัจจุบันใช้อัตราเร็วอยู่ที่ 3 นิ้วต่อนาที หรือ IPS ซึ่งเครื่องจักรมีความสามารถในการรับได้อยู่ที่ 2-5 นิ้วต่อนาที แต่เนื่องด้วยการกำหนดค่าอัตราการเร่งที่ตัดจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าอัตราการเร่งตัดในปัจจุบัน ซึ่งหากน้อยกว่าปัจจุบันจะส่งผลกระทบต่อค่าความสามารถในการผลิตเดิม จึงจำเป็นต้องใช้ค่าต่ำสุด 3 IPS ซึ่งพิจารณาถึงระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

ดังนั้น จึงทำการกำหนดระดับของปัจจัยได้ดังต่อไปนี้

ระดับต่ำ(-1): อัตราเร่ง (Feed rate speed) ในการตัดงานเท่ากับ 3 นิ้วต่อนาที

ระดับต่ำ(+1): อัตราเร่ง (Feed rate speed) ในการตัดงานเท่ากับ 5 นิ้วต่อนาที

3.5.2.3 ในส่วนของแรงดันน้ำ(Washing pressure)

จะช่วยในการจัดสิ่งที่เกี่ยวข้องกับการตัดชิ้นงาน ยกตัวอย่างเช่น คราบตะกอน และเสี้ยนที่เกิดจากการตัดงานเป็นต้น ซึ่งจะใช้น้ำที่มีแรงดัน ฉีดเข้าไปบริเวณตัวชิ้นงานทำให้สิ่งต่างๆ หลุดออกจากตัวชิ้นงานได้ โดยแรงดันน้ำนี้จะต้องไม่ทำให้เกิดการเสียหายของตัวชิ้นงานขณะฉีด จากตารางที่ 3-6 นั้นระบุว่า ในปัจจุบันใช้แรงดันน้ำอยู่ที่ 5 MPa ซึ่งเครื่องจักรความสามารถปรับค่าได้อยู่ที่ 5-10 MPa ดังนั้น จึงทำการกำหนดระดับของปัจจัยได้ดังต่อไปนี้

ระดับต่ำ(-1): แรงดันน้ำ(Washing pressure) เท่ากับ 5 MPa

ระดับต่ำ(+1): แรงดันน้ำ(Washing pressure) เท่ากับ 10 MPa

ดังนั้นสามารถสรุปปัจจัยและระดับของปัจจัยต่างๆได้ดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 แสดงค่า parameter ที่สามารถปรับได้

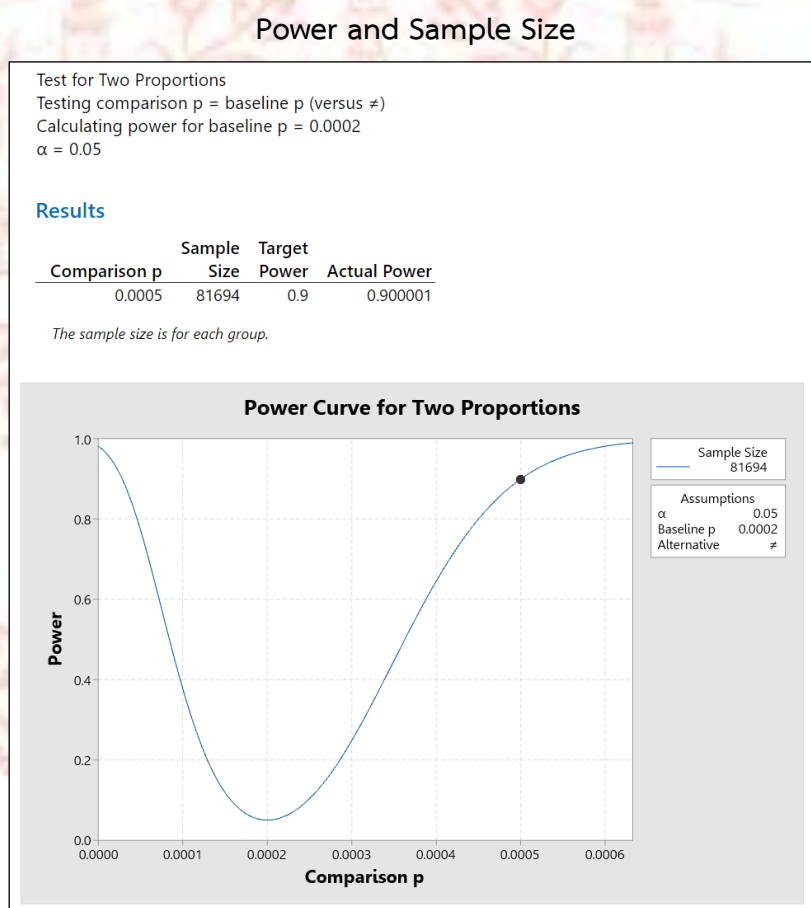
ปัจจัย	ระดับการใช้งานปัจจุบัน	ค่าระดับของปัจจัยในการทดลอง		หน่วยวัด
		ระดับต่ำ(-1)	ระดับสูง(1)	
Spindel speed	30,000	30000	40000	RPM
Feed rate speed	3 max	3	5	IPS
Washing pressure	5	5	10	Mpa

3.6 การตรวจสอบอำนาจการทดสอบข้อมูล

จากการศึกษาทดลองนี้ โดยปกติแล้วจะต้องใช้การตรวจสอบอำนาจการทดสอบข้อมูล (Power Of Test) กล่าวคือเป็นการหาความน่าจะเป็นที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก เมื่อสมมติฐานหลักไม่เป็นจริง โดยการใช้ข้อมูลเส้นโค้งโอซี (Operation Characteristic) ซึ่งจะเป็นการพล็อตระหว่างค่าความน่าจะเป็นที่เกิดจากความผิดพลาดประเภทที่2 (Type II Error: β) เมื่อนำข้อมูลจากการกำหนดปัจจัยมาทำการทดสอบหาจำนวนตัวอย่างจะได้ดังภาพที่ 3-7 ซึ่งในการทดลองนี้ ผู้วิจัยจะต้องทำการตัดชิ้นงาน และทำการตรวจสอบชิ้นงานเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในแต่ละการทดลองจะทำการทดลองเพียงครั้งเดียว ไม่มีการทำซ้ำ(Replication) แต่ต้องใช้ในการหาจำนวนตัวอย่างแบบ Power and

Sample Size แบบ Test for Two Proportions ใน Program Minitab จึงจะได้จำนวนการทดลองที่เหมาะสม

โดยจากการทดลอง ตั้งเป้าหมายในการลดลงของจำนวนของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลอ เป็นค่า 0.05% ซึ่ง จากภาพที่ 3-16 ได้กำหนด Comparison Proportions (สมมติฐานหรือสัดส่วนในกลุ่มที่ต้องการเปรียบเทียบ): 0.0005, Baseline Proportion (สมมติฐานหรือสัดส่วนในกลุ่มควบคุม): 0.0002 โดยให้ Power Value (โอกาสในการตรวจจับ) ซึ่งค่ามาตรฐานอยู่ที่ 0.9 หรือความแตกต่างที่เป็นจริงอยู่ที่ 90% จะเห็นได้ว่า จะต้องใช้จำนวนตัวอย่างอย่างน้อย เท่ากับ 81,694 ขึ้นต่อการทดลอง และ จะได้ Actual Power ≈ 0.900001 (ได้ค่าตามที่ตั้งเป้าไว้ 0.90 หรือ 90%) แสดงดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 3-16 แสดงการหาจำนวนตัวอย่างด้วยวิธี Power and Sample Size ด้วย Program Minitab 19

3.6.1 กำหนดรูปแบบการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองโดยใช้วิธี ออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) 3 ปัจจัยในการทดลอง และไม่มีการทำซ้ำ (replicate) โดยมีการใช้ โปรแกรม Minitab ver.19 ในการออกแบบการทดลอง และจากการตรวจสอบอำนาจการทดสอบข้อมูล ในภาพที่ 3-16 กล่าวได้ว่า จะต้องใช้จำนวน sample size ไม่น้อยกว่าค่า 81,694 ขึ้น ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะทำการทดลองละ 84,640 ขึ้น เนื่องจากในการดำเนินงาน 1 ครั้งจะได้ชิ้นงาน 3,680 ชิ้น เพราะฉะนั้น จะทำการตั้งงานการทดลองละ 23 ครั้ง จากภาพที่ 3-17 กล่าวได้ว่า มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง และแสดงเงื่อนไขการทดลองแต่ละครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 3-7



ภาพที่ 3-17 แสดงจำนวนการทดลอง ด้วย Program Minitab 19

ตารางที่ 3-7 แสดงรูปแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3ปัจจัย 2ระดับ โดยใช้โปรแกรม Minitab ver.19

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Spindel speed (RPM)	Feed rate speed (IPS)	Washing pressure (MPa)	Terminal burr (PPM)
1	1	1	1	30000	3	5	
2	2	1	1	40000	3	5	
3	3	1	1	30000	4	5	
4	4	1	1	40000	4	5	
5	5	1	1	30000	3	10	
6	6	1	1	40000	3	10	
7	7	1	1	30000	4	10	
8	8	1	1	40000	4	10	

ในบทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยได้ทำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ โดยการคิดวิเคราะห์สาเหตุปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นใช้ทฤษฎีก้างปลา เพื่อกำหนดปัจจัยและสภาวะในการทดลอง รวมถึงระดมความคิดในการกำหนดปัจจัยในการออกแบบทดลอง ซึ่งนำไปสู่วิธีการบันทึกผลการทดลอง ซึ่งในบทถัดไปผู้วิจัย จะกล่าวถึง การดำเนินการทดลองและแผนการทดลอง บันทึกผลการทดลอง วิเคราะห์ผล และหาปัจจัยที่เหมาะสม เพื่อลดปัญหาของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลอ (Terminal burr) ในกระบวนการผลิต



บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

จากวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วย การศึกษากระบวนการ ในปัจจุบัน การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลอง การกำหนดสมมติฐานการทดลอง วิธีการดำเนินการทดลอง การเก็บรวบรวมข้อมูล และการกำหนดรูปแบบการทดลอง ในบทนี้ผู้วิจัยนั้นได้ทำการทดลองตามที่ได้กล่าวมาได้บทที่ 3 ซึ่งใช้วิธี 2^k Full Factorial Design โดยในที่นี้จะประกอบไปด้วย 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบไปด้วย 2 ระดับ ไม่ทำซ้ำ ซึ่งในแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์จะต้องทำการทดลองเท่ากับ $2^3 = 8$ การทดลอง โดยการทดลองจะต้องวิเคราะห์ผลกระทบทั้งตัวแปรตอบสนองให้ครบทุกการทดลอง เพื่อที่จะรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลอง นำมาวิเคราะห์ผลการวิจัย เพื่อหาค่าที่เหมาะสม และนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งจะประกอบด้วยหัวข้อต่างๆดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k Full Factorial Design

จากบทที่ 3 ได้มีการออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสม ซึ่งใช้วิธี 2^k Full Factorial Design ซึ่งในแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์จะต้องทำการทดลองเท่ากับ $2^3 = 8$ การทดลอง โดยจะได้ผลการทดลองในตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4-1 แสดงผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k Full Factorial Design

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Spindel speed (RPM)	Feed rate speed (IPS)	Washing pressure (MPa)	Terminal burr (PPM)
1	1	1	1	30000	3	5	1900.99
2	2	1	1	40000	3	5	2700.85
3	3	1	1	30000	4	5	4002.83
4	4	1	1	40000	4	5	2201.08
5	5	1	1	30000	3	10	1201.559
6	6	1	1	40000	3	10	2002.599
7	7	1	1	30000	4	10	3100.189
8	8	1	1	40000	4	10	1501.65

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k Full Factorial Design

4.2.1 ผลการวิเคราะห์จากการออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD)

ในการดำเนินการวิจัยในบทที่ 3 ได้แสดงการสุ่มแบบสมบูรณ์อย่างละเอียด โดยแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์(Completely Randomized Design, CRD) นั้นเป็นแผนที่ถูกนำมาวิเคราะห์ โดยการทำการทดลองครั้งละ 1 ปัจจัยในทุกๆระดับ และกำหนดระดับของปัจจัยอีกสองตัวไว้ในระดับการทำงานปัจจุบัน ซึ่งในการทดลองในครั้งนี้จะไม่มีการทำซ้ำ

4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k Full Factorial Design

หลังจากเก็บข้อมูลการทดลองครบถ้วนแล้ว ผู้วิจัยจะใช้วิธีวิเคราะห์ผลการออกแบบการทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลกับของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha=0.050$) ซึ่งจะใช้การคิดวิเคราะห์จากค่า P-Value, แผนภูมิการกระจายตัวของส่วนตกค้าง, ความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยเบื้องต้นจะใช้ด้วยโปรแกรม MINITAB ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งจะสามารถแสดงผลของปัจจัยหลัก (Main Factor) และ อิทธิพลปัจจัยร่วม (Interaction Factor) ที่มีนัยสำคัญออกมาในรูปแบบข้อมูลและกราฟ แสดงไว้ดังต่อไปนี้

ในการทดลองครั้งนี้มีการกำหนดอักษรของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมดังนี้

A คือ ความเร็วรอบ (Spindle speed)

B คือ อัตราเร็วในการเคลื่อนที่แนวแกน X (Feed rate speed)

C คือ แรงดันน้ำ (Washing pressure)

AB คือ ปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย A และ B

AC คือ ปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย A และ C

BC คือ ปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย B และ C

ABC คือ ปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย A และ B และ C

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

Factorial Regression: Terminal burr (PPM) versus Spindel speed, Feed rate speed, Washing pressure

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	5791283	965214	189.18	0.056
Linear	3	2654353	884784	173.42	0.056
Spindel speed	1	404725	404725	79.33	0.071
Feed rate speed	1	1124813	1124813	220.46	0.043
Washing pressure	1	1124815	1124815	220.46	0.043
2-Way Interactions	3	3136930	1045643	204.95	0.051
Spindel speed*Feed rate speed	1	3126486	3126486	612.79	0.026
Spindel speed*Washing pressure	1	5222	5222	1.02	0.496
Feed rate speed*Washing pressure	1	5222	5222	1.02	0.496
Error	1	5102	5102		
Total	7	5796385			

Regression Equation in Uncoded Units	
Terminal burr(PPM)	= -28231 + 0.8149 Spindel speed + 9655 Feed rate speed - 150 Washing pressure - 0.2501 Spindel speed*Feed rate speed + 0.00204 Spindel speed*Washing pressure - 20.4 Feed rate speed*Washing pressure

Alias Structure	
Factor	Name
A	Spindel speed
B	Feed rate speed
C	Washing pressure
Aliases	
I	
A	
B	
C	
AB	
AC	
BC	

ภาพที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

4.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน(Analysis of Variance: ANOVA) เพื่อทดสอบสมมติฐานที่ผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยไว้ โดยในการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทาง

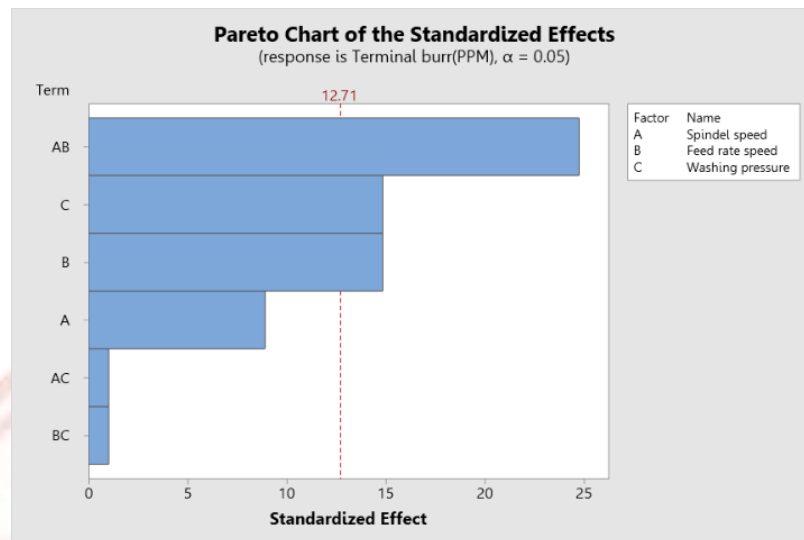
สถิติ ดังภาพที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลอง โดยพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-Value} < 0.050$) พบว่าค่า ซึ่งพบ $P\text{-Value}$ ของปัจจัยมีผลดังนี้

- Feed rate speed(B) $\rightarrow P\text{-Value} = 0.043$
- Washing pressure(C) $\rightarrow P\text{-Value} = 0.043$
- Spindle speed(A) * Feed rate speed(B) $\rightarrow P\text{-Value} = 0.026$
- Spindle speed(A) * Washing pressure(C) $\rightarrow P\text{-Values} = 0.496$
- Feed rate speed(B) * Washing pressure(C) $\rightarrow P\text{-Values} = 0.496$

จากข้อมูลข้างต้นพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-Value} < 0.050$) กล่าวได้ว่า มี 2 ปัจจัยหลักมีนัยสำคัญ คือ Feed rate speed(B) ,Washing pressure(C) และ 1 ปัจจัยร่วมมีนัยสำคัญ คือ Spindle speed(A) * Feed rate speed(B) ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเชิงสถิติ ในส่วนของปัจจัยอื่นๆที่มีค่า $P\text{-Value} < 0.05$ นั้น แสดงถึงค่าที่ไม่อิทธิพลต่อการเกิดของเสียอย่างมีนัยสำคัญ แต่เนื่องจาก Spindle speed(A) มีค่า $P\text{-Value} = 0.071$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่า 0.05 สามารถอธิบายได้ว่าไม่มีนัยสำคัญเชิงสถิติ แต่มีผลกระทบบางอย่างต่อการเกิดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr)

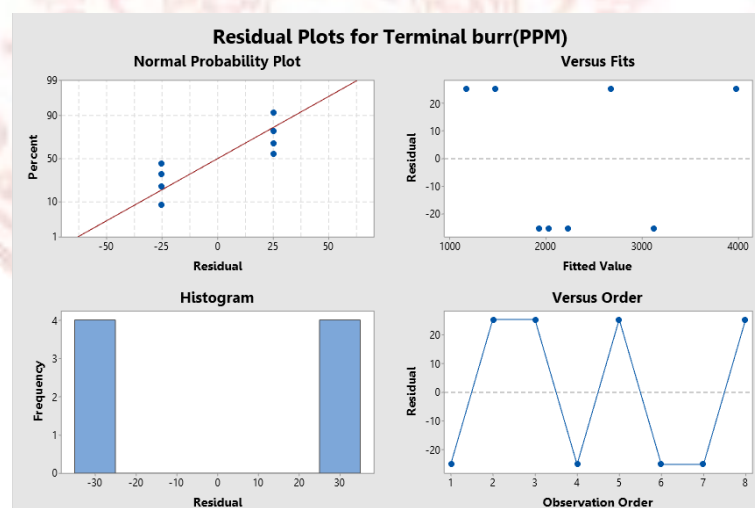
- Spindle speed(A) $\rightarrow P\text{-Value} = 0.071$

เมื่อพิจารณาค่า Model Summary (สรุปโมเดล) สามารถอธิบายได้ดังนี้ โมเดลการทดลองมีความแม่นยำสูง สังเกตได้จาก $R\text{-sq} = 99.91\%$ ซึ่งบ่งบอกความแปรปรวนที่เกิดจากปัจจัยการทดลองได้ถึง 99.91% และค่า $R\text{-sq(adj)} = 99.38\%$ ซึ่งเป็นการปรับข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูล และ $R\text{-sq(pred)} = 94.37\%$ บ่งบอกถึงโมเดลมีประสิทธิภาพดีในเชิงการทำนาย นอกจากนี้จำเป็นจะต้องใช้การวิเคราะห์แบบอื่นๆรวมเพื่อให้มีความแม่นยำในการทดลองมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์อื่นๆ ในขั้นตอนถัดไป



ภาพที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม

จากภาพที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมแบบ Pareto Chart ลักษณะนี้ใช้เพื่อระบุว่าปัจจัยหลัก (Main effects) หรือปัจจัยร่วม (Interaction effects) ว่าตัวใดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนองหรือการเกิดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบล (Terminal burr) โดยดูจาก “ความยาวของแท่ง (Standardized Effect)” เทียบกับเส้นประสีแดง (Critical Value) ซึ่งเป็นเกณฑ์ตัดสินว่ามีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha=0.05$ หรือไม่ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ภาพ แสดงให้เห็นได้ว่าสำหรับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ หรือ P-Value<0.05 จะมีกราฟแท่งที่ผ่านเส้นประแดง ซึ่งบ่งบอกถึงมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียอย่างมีนัยสำคัญ คือปัจจัยดังนี้ AB,B และ C

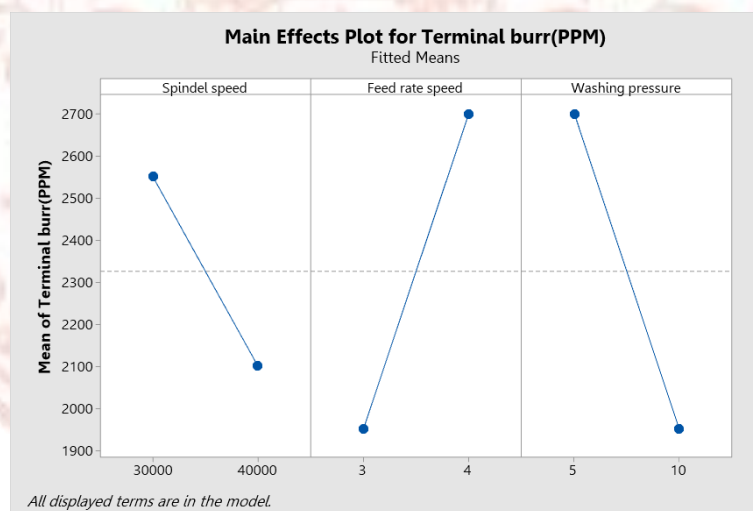


ภาพที่ 4-3 แผนภูมิการกระจายตัวของส่วนที่ตกค้าง ความเป็นอิสระของส่วนที่ตกค้าง

จากภาพที่ 4-3 แผนภูมิการกระจายตัวของส่วนที่ตกค้าง ความเป็นอิสระของส่วนที่ตกค้าง จากกราฟทั้ง 4 สามารถกล่าวได้ดังนี้

- Normal Probability Plot (กราฟด้านบนซ้าย): จะเห็นได้ว่าจุดบางจุดมีการเบี่ยงเบนค่อนข้างมาก อาจถูกรบกวนจากปัจจัยอื่นๆโดยรอบ แต่ก็ยังมีการเรียงตัวตามเส้นทแยงมุม ซึ่งสรุปได้ว่าการแจกแจงเป็นปกติแต่อาจมีผลต่อความถูกต้องของค่าพยากรณ์
- Residuals vs Fits (กราฟด้านบนขวา): เป็นกราฟตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนซึ่ง จะเห็นได้ว่าจุดมีการกระจายตัว แต่บางจุดกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และอาจมีบางจุดที่เป็น outliers ซึ่งความเป็นไปได้ที่โมเดลยังไม่เหมาะสมเพียงพอ
- Histogram of Residuals (กราฟด้านล่างซ้าย): เป็นกราฟตรวจสอบการแจกแจงของ Residuals จะเห็นได้ว่า Residuals มีการกระจายตัวทั้งบวกทั้งลบแบบเป็นกลุ่มก้อนทั้งสองทาง ไม่มีค่าเข้าสู่ค่ากลางซึ่งแสดงถึงสิ่งรบกวนทำให้มีปัญหาค่าผิดปกติ
- Residuals vs Observation Order (กราฟด้านล่างขวา): เป็นตรวจสอบว่ามีรูปแบบแฝงใน Residuals หรือไม่ จะเห็นได้ว่า กราฟมีรูปแบบที่ชัดเจนสังเกตจากการแกว่งขึ้น-ลงเป็นลักษณะซ้ำๆ กล่าวได้ว่า Residuals มีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากมีตัวแปรอื่นๆรบกวน

Factorial Plots for Terminal burr(PPM)

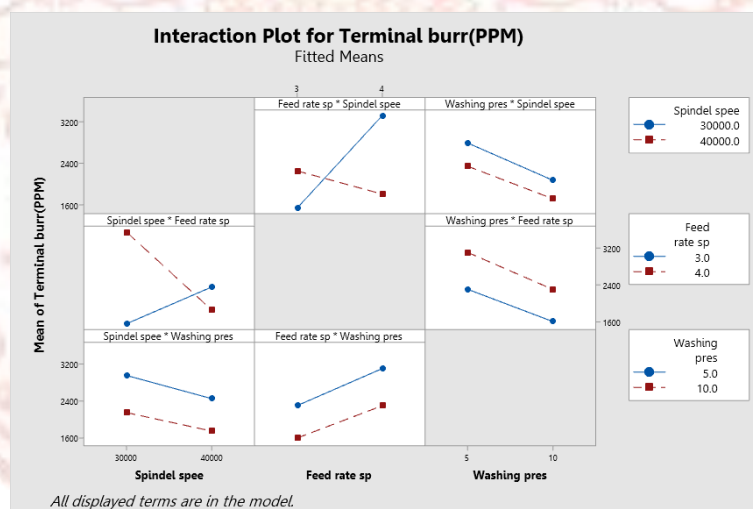


ภาพที่ 4-4 แผนภูมิการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองของปริมาณของเสีย

จากภาพ 4-4 Main Effects Plot for Terminal burr (PPM) หรือ แผนภูมิการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองของปริมาณของเสีย จะเห็นได้ว่ามีปัจจัย 3 ตัวที่นำมาศึกษา Spindle speed (30,000 และ 40,000), Feed rate speed (3 และ 4) และ Washing pressure (5 และ 10) โดยแกนตั้ง (Y-axis) คือค่าของ Mean of Terminal burr (PPM) ซึ่งยังมีค่าสูง จะ

หมายถึงปริมาณหรือความรุนแรงที่พบของเสียประเภทเทอร์มินอลเบล (Terminal burr) มากขึ้น จากภาพที่ 4-4 สรุปได้ดังนี้

- Spindle speed: เมื่อมีการเพิ่มค่า Spindle speed (RPM) สูงขึ้น จาก 30,000 เป็น 40,000 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของการพบของเสียประเภทเทอร์มินอลเบล (Terminal burr) ลดลงอยู่ที่ประมาณ 2551.39, 2501.54 PPM ตามลำดับ
- Feed rate speed: เมื่อเพิ่ม Feed rate speed (IPS) สูงขึ้น จาก 3 เป็น 4 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของการพบของเสียประเภทเทอร์มินอลเบล (Terminal burr) มากขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยคือ 1951.50, 2701.44 PPM ตามลำดับซึ่งกล่าวได้ว่า ความเร็วใบมีดที่เร็วขึ้น (Feed rate สูง) อาจจะทำให้เกิดการก่อตัวของของเสียประเภทเทอร์มินอลเบล (Terminal burr) ที่เพิ่มขึ้นได้
- Washing pressure: เมื่อเพิ่ม Washing pressure (MPa) จาก 5 เป็น 10 ค่าเฉลี่ยของการพบของเสียประเภทเทอร์มินอลเบล (Terminal burr) ลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยคือ 2701 PPM และ 1,951 PPM ตามลำดับ กล่าวได้ว่า การเพิ่มแรงดันน้ำล้างที่สูงขึ้น จะช่วยลดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบล (Terminal burr) ได้ค่อนข้างมากอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4-5 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนองของปริมาณของเสีย

สำหรับภาพที่ 4-5 แสดงปฏิสัมพันธ์ร่วม (Interaction) ของปัจจัย โดยจะสังเกตจากเส้นที่ตัดกันระหว่างปัจจัย ซึ่งจากภาพมีการแสดงปฏิสัมพันธ์ร่วม(interaction)ของปัจจัยกล่าวได้ดังนี้

- Spindle speed * Feed rate speed: มี interaction ซึ่งพบเส้นที่ตัดกัน

- Spindle speed * Washing pressure: มี interaction เล็กน้อย เส้นค่อนข้างไปทิศทางเดียวกันแต่ไม่ขนาน
- Feed rate speed * Washing pressure: มี interaction เล็กน้อย มีแนวโน้มลดของเสียไปในทิศทางเดียวกันเมื่อเพิ่ม Washing pressure

สรุปได้จากการวิเคราะห์ปัจจัยทั้งหมดนั้น จะบ่งบอกถึงมีสิ่งรบกวนในกระบวนการทดลอง ทำให้ Residuals อาจไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ จากข้อมูล Model Summary ที่ได้มา พบว่าค่า R-sq(adj): 99.38% และ R-sq(pred): 94.37% ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันต่ำ ซึ่งในทางทฤษฎี หาก R-sq และ R-sq(pred) มีค่าที่ใกล้เคียงกัน จะกล่าวได้ว่าโมเดลมีความสามารถในการทำนายที่ดี ซึ่งจากผลการทดลอง ค่า R-sq(pred) ต่ำกว่า R-sq(adj) ประมาณ 5% อาจจะทำให้ โมเดลมีแนวโน้ม Overfitting เล็กน้อย ซึ่งเป็นสาเหตุต้องมีการวิเคราะห์เพิ่มเติม โดยวิธีการวิเคราะห์แบบการจำลองแบบถดถอย

4.3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอย เป็นวิธีการทางสถิติอย่างหนึ่ง ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะของความ สัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยแบ่งเป็นตัวแปรอิสระ (Independent variable) และตัวแปรตาม (Dependent variable) ด้วยเทคนิคทางสถิติ จากนั้นจึงใช้แบบจำลองนั้นในการ “จำลอง” หรือ “คาดการณ์” ค่าของตัวแปรตาม

4.3.2.1 สมการการถดถอยแบบเต็มรูป (Full Factorial)

$$y = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_C C + \beta_{AB}(AB) + \beta_{AC}(AC) + \beta_{BC}(BC) + \beta_{ABC}(ABC) + \epsilon \quad (4-1)$$

โดย

y คือ จำนวนงานเสียประเภท Terminal burr

A = ระดับปัจจัยของ Spindle speed (RPM)

B = ระดับปัจจัยของ Feed rate speed (IPS)

C = ระดับปัจจัยของ Washing pressure (MPa)

β_0 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

β_A = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยของ Spindle speed (RPM)

β_B = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยของ Feed rate speed (IPS)

β_C = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยของ Washing pressure (MPa)

β_{AB} = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ Spindle speed (RPM) และ Feed rate speed (IPS)

β_{AC} = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ Spindle speed (RPM) และ Washing pressure (MPa)

β_{BC} = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ Feed rate speed (IPS) และ Washing pressure (MPa)

β_{ABC} ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ Spindle speed (RPM) , Feed rate speed (IPS) และ Washing pressure (MPa)

ϵ = ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) หรือ Residual

สมการที่ 4-1 แสดงแบบจำลองการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ (Full Regression Model) ซึ่งโดยปกติแล้วการสร้างแบบจำลองแบบถดถอยนั้น ผู้วิจัยจะเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญมาสร้างแบบจำลองเท่านั้น โดยจะสร้างแบบจำลองการถดถอยแบบเต็มรูปแบบก่อน จากนั้นจะตัดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองน้อยที่สุดออกทีละปัจจัย จนเหลือปัจจัยที่มีนัยสำคัญในแบบจำลองถดถอยเท่านั้น

ตารางที่ 4-2 ค่า P-Value ของแต่ละปัจจัยเรียงจากมากไปน้อย

Factor	P-Value
A*C	0.496
B*C	0.496
A	0.071
B	0.043
C	0.043
A*B	0.026

โดยจากตาราง 4-2 แสดงค่า P-Value ของแต่ละปัจจัยโดยเรียงจากมากไปน้อย ซึ่งปัจจัยที่มีค่า P-Value มากนั้น แสดงปัจจัยมีอิทธิพลต่อการตอบสนองน้อย ในทางกลับกัน P-Value น้อยนั้น จะแสดงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตอบสนองมาก การปรับปรุงการทดลองโดยใช้แบบจำลองการถดถอย จะโดยทำการตัดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองน้อยที่สุดออก จนเหลือปัจจัยที่มีนัยสำคัญในแบบจำลองการถดถอยเท่านั้น โดยใช้หลักการในการตัดปัจจัยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ผล จะเลือกได้จากตัดปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลน้อยออกจากกระบวนการทดลอง ตาราง 4-2 จะทำการตัด A*C และ B*C ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลน้อยที่สุด โดยมีค่า P-Value= 0.496 และ 0.496 ตามลำดับ จากนั้น นำวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม MINITAB ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองหลังจากการทำแบบจำลองการถดถอย

4.3.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Factorial Regression: Terminal burr (PPM) versus Spindel speed, Feed rate speed, Washing pressure

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
71.9858	99.73%	99.37%	98.09%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	5780840	1445210	278.89	0.000
Linear	3	2654353	884784	170.74	0.001
Spindel speed	1	404725	404725	78.10	0.003
Feed rate speed	1	1124813	1124813	217.06	0.001
Washing pressure	1	1124815	1124815	217.06	0.001
2-Way Interactions	1	3126486	3126486	603.34	0.000
Spindel speed*Feed rate speed	1	3126486	3126486	603.34	0.000
Error	3	15546	5182		
Total	7	5796385			

Regression Equation in Uncoded Units

Terminal burr(PPM) = -28231 + 0.8302 Spindel speed + 9502 Feed rate speed
- 150.0 Washing pressure - 0.2501 Spindel speed*Feed rate speed

Alias Structure

Factor	Name
A	Spindel speed
B	Feed rate speed
C	Washing pressure

Aliases

I
A
B
C
AB

ภาพที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์Variances หลังจากการทำแบบจำลองการถดถอย

จากภาพที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์Variances หลังจากการทำแบบจำลองการถดถอย ได้ค่า P-Value ดังนี้

- Spindle speed(A) → P-Value = 0.003
- Feed rate speed(B) → P-Value = 0.001
- Washing pressure(C) → P-Value = 0.001
- Spindle speed(A) * Feed rate speed(B) → P-Value = 0.000

จากข้อมูลข้างต้นพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-Value} < 0.050$) กล่าวได้ว่าทุกปัจจัยมีนัยสำคัญ ดังนี้ ปัจจัยหลักคือ Spindle speed(A) ,Feed rate speed(B) ,Washing pressure(C) และ ปัจจัยร่วม คือ Spindle speed(A) * Feed rate speed(B) ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียประเภท Terminal burr ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเชิงสถิติ

ตารางที่ 4-3 เปรียบเทียบ Model Summary ก่อน(model1)และหลัง(model2)การทำแบบจำลองการถดถอย

Model	Model	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1	$A + B + C + (A*B) + (A*C) + (B*C)$	71.4287	99.91%	99.38%	94.37%
2	$A+B+C+(A*B)$	71.9858	99.73%	99.37%	98.09%

จากการสร้างแบบจำลองแบบถดถอยนั้น ผู้วิจัยจะสร้างแบบจำลองการถดถอยแบบเต็มรูปแบบแสดงได้ดังตารางที่ 4-3 ใน Model1 ซึ่งจะประกอบไปด้วยปัจจัยหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย จากนั้นโดยผู้วิจัยจะทำการสร้างแบบจำลองการถดถอยโดยตัดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองน้อยที่สุด สังเกตจากค่า P-Value มากที่สุด ดังนั้นจะได้ model2 ดังในตาราง ซึ่งจากค่าที่ได้นำมาสร้างสมการแบบจำลองการถดถอยได้ดังสมการ 4-2

$$y = -28231 + 0.8302 A + 9502 B - 150.0 C - 0.2501(A*B) \quad (4-2)$$

โดย y คือ จำนวนงานเสียประเภท Terminal burr

A = ระดับปัจจัยของ Spindle speed (RPM)

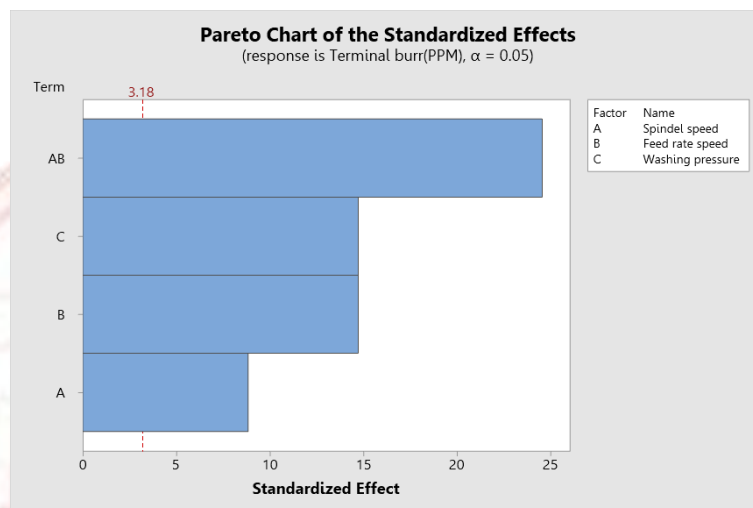
B = ระดับปัจจัยของ Feed rate speed (IPS)

C = ระดับปัจจัยของ Washing pressure (MPa)

ซึ่งจากสมการ (4-2) ผู้วิจัยสามารถใช้ทำนายผลของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ หรือใช้กำหนดระดับปัจจัยเพื่อให้เกิดจำนวนของเสียในกระบวนการ แต่จะมีข้อจำกัดระดับปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์จะต้องอยู่ในช่วงระดับที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

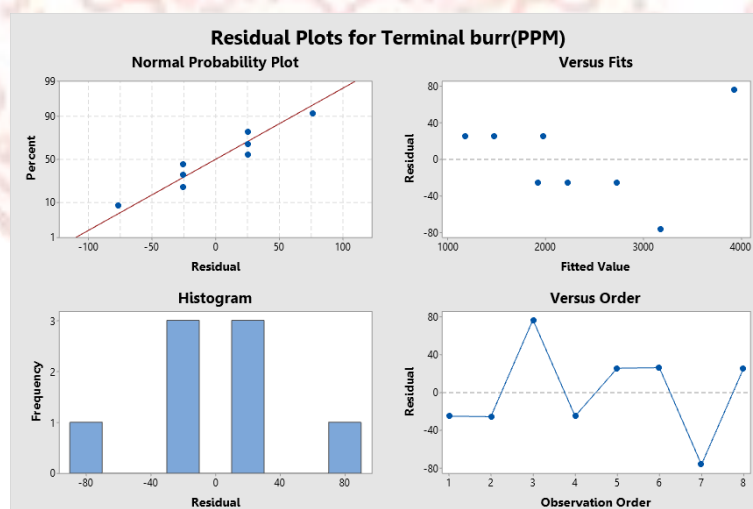
จากตาราง 4-3 สามารถวิเคราะห์ Model Summary ที่เปรียบเทียบก่อน(model1)และหลัง(model2) การทำแบบจำลองการถดถอย จะเห็นค่าตัวชี้วัดหลัก 4 ตัว ได้แก่ S, R-sq R2(adj), R-sq(adj) และ R-sq(pred) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้ ค่า S มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยไม่ส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลง, R-sq ลดลงจาก 99.91% เหลือ 99.73% ซึ่งเป็นการลดลงเล็กน้อย ไม่ส่งผลกระทบต่อรูปแบบการทดลอง , R-sq(adj) มีค่าใกล้เคียงแทบที่จะเท่ากัน ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง และในส่วน of ค่า R-sq(pred) หลังการทำแบบจำลองการถดถอย สูงขึ้นเป็น 98.09% จาก 94.37% บ่ง

บอกว่าโมเดลหลังการทำแบบจำลอง มีความสามารถในการทำนาย (predictive power) ที่ดีกว่า อีกทั้งเชิงทฤษฎี การทำการจำลองการถดถอย จะทำให้ค่า R-sq มีค่าลดลง แต่หากจะทำให้ R-sq และ R-sq(pred) มีค่าที่ใกล้เคียงกัน จะกล่าวได้ว่าโมเดลมีความสามารถในการทำนายที่ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมหลังจากการทำแบบจำลองการถดถอย

จากภาพที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมหลังจากการทำแบบจำลองการถดถอย ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ภาพ แสดงให้เห็นได้ว่าสำหรับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ หรือ P-Value < 0.05 จะมีกราฟแท่งที่ผ่านเส้นปะสีแดง ซึ่งบ่งบอกถึงมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียอย่างมีนัยสำคัญ ทุกปัจจัย คือดังนี้ AB, C, B และ A

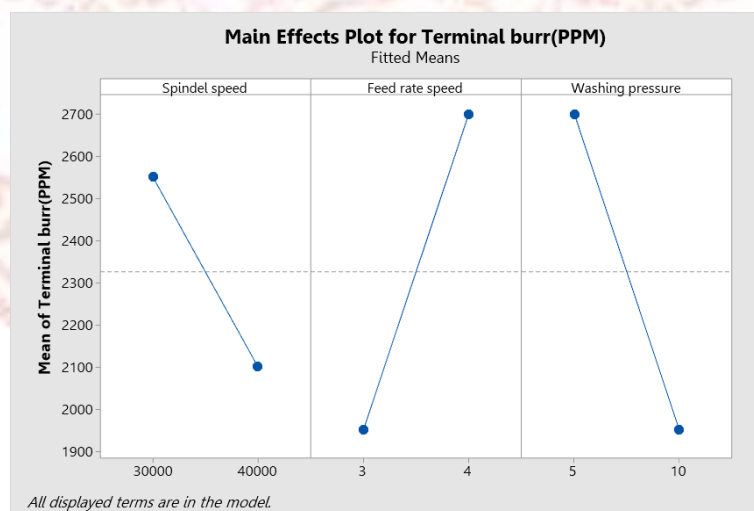


ภาพที่ 4-8 แผนภูมิการกระจายตัวของส่วนที่ตกค้าง ความเป็นอิสระของส่วนที่ตกค้าง หลังจากการทำแบบจำลองการถดถอย

จากภาพที่ 4-8 แผนภูมิการกระจายตัวของส่วนที่ตกค้าง ความเป็นอิสระของส่วนที่ตกค้าง หลังจากการทำแบบจำลองการถดถอย จากกราฟทั้ง 4 สามารถกล่าวได้ดังนี้

- Normal Probability Plot (กราฟด้านบนซ้าย): จะเห็นได้ว่าจุดส่วนใหญ่มีการเรียงตัวใกล้เคียงเส้นทแยง และ ไม่มีจุดใดที่หลุดออกจากแนวเส้นอย่างชัดเจน บ่งบอกถึง Residuals มีการแจกแจงใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติ (Normal Distribution)
- Residuals vs Fits (กราฟด้านบนขวา): จุดไม่เรียงเป็นลักษณะ Pattern ที่ชัดเจน, Residuals กระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอรอบ ๆ แกนศูนย์ แสดงว่า ไม่มีความสัมพันธ์เชิงระบบระหว่างค่าพยากรณ์ (Fitted) กับ Residual
- Histogram of Residuals (กราฟด้านล่างซ้าย): รูปร่างของ Histogram ค่อนข้างเป็นรูประฆัง (bell shape) หรือใกล้เคียงการกระจายตัวรอบศูนย์ ไม่ได้เห็นการเบ้ของกราฟที่ชัดเจน จึงสอดคล้องกับการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot)
- Residuals vs Observation Order (กราฟด้านล่างขวา): รูปร่างของจุด ถือว่าจุดมีความขึ้นลง แต่ไม่ปรากฏ Pattern ต่อเนื่องหรือแนวโน้มชัดเจน ซึ่งบ่งบอกได้ถึงการเป็นอิสระของ Residuals ข้อมูลถือว่าค่อนข้างสุ่ม (random) และเป็นไปตามสมมติฐานเรื่อง Independence ของ Residuals

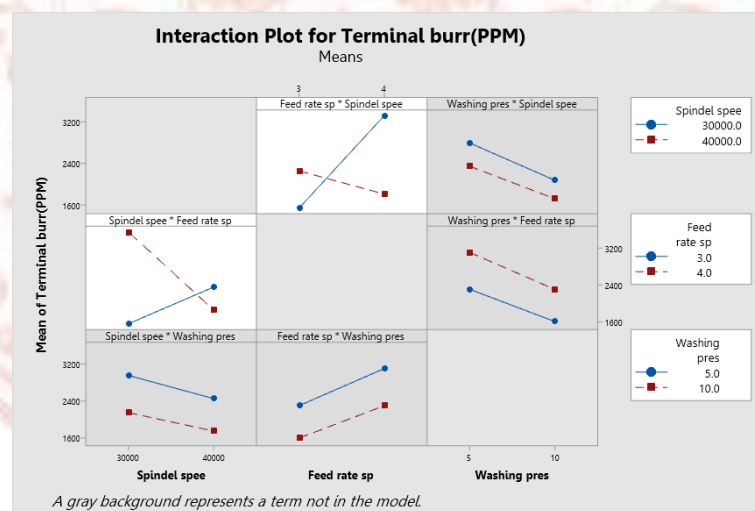
Factorial Plots for Terminal burr(PPM)



ภาพที่ 4-9 แผนภูมิการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองของปริมาณของเสีย หลังจากการทำแบบจำลองการถดถอย

จากภาพที่ 4-10 แผนภูมิการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองของปริมาณของเสียจะเห็นได้ว่าการทำแบบจำลองการถดถอย จะเห็นได้ว่า กราฟมีลักษณะไม่แตกต่างจากก่อนการทำแบบจำลองแบบถดถอยมากนัก ซึ่งการทำนายยังคงเป็นไปตามรูปแบบเดิม แต่มีความแม่นยำในการทำนายมากยิ่งขึ้น สามารถอธิบายผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

- Spindle speed: เมื่อมีเพิ่มค่า Spindle speed (RPM) จาก 30,000 เป็น 40,000 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของการพบของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) ลดลงอยู่ที่ประมาณ 2551.36, 2501.54 PPM ตามลำดับ
- Feed rate speed: เมื่อเพิ่ม Feed rate speed (IPS) จาก 3 เป็น 4 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของการพบของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยคือ 1951.50, 2701.44 PPM ตามลำดับซึ่งกล่าวได้ว่า ความเร็วใบมีดที่เร็วขึ้น (Feed rate สูง) อาจจะทำให้เกิดการก่อตัวของของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) ได้
- Washing pressure: เมื่อเพิ่ม Washing pressure (MPa) จาก 5 เป็น 10 ค่าเฉลี่ยของการพบของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) ลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยคือ 2701.44, 1951.50 PPM ตามลำดับ กล่าวได้ว่า การเพิ่มแรงดันน้ำล้างที่สูงขึ้น จะช่วยลดของเสียประเภท Terminal Burr ได้ค่อนข้างมากอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4-10 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนองของปริมาณของเสีย
หลังจากการทำแบบจำลองการถดถอย

สำหรับภาพที่ 4-11 แสดงปฏิกริยาร่วม(interaction)ของปัจจัย โดยจะสังเกตจากเส้นที่ตัดกันระหว่างปัจจัย ซึ่งจากภาพมีการแสดงปฏิกริยาร่วม(interaction)ของปัจจัยกล่าวได้ดังนี้

- Spindle speed * Feed rate speed: มี interaction ไม่รุนแรง ซึ่งพบเส้นที่ตัดกันเล็กน้อย
- Spindle speed * Washing pressure: มี interaction เล็กน้อย เส้นค่อนข้างไปทิศทางเดียวกันแต่ไม่ขนาน
- Feed rate speed * Washing pressure: มี interaction เล็กน้อย มีแนวโน้มลดของเสียไปในทิศทางเดียวกันเมื่อเพิ่ม Washing pressure

จากการสังเกตเส้นกราฟการวิเคราะห์ผลการทดลอง กล่าวได้ว่า Spindle speed * Feed rate speed เกิด interaction ถึงแม้ว่าภาพที่ 4-10 จะบ่งบอกถึง Spindel speed มีค่าสูงขึ้นจะทำให้เกิดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) ที่ลดต่ำลง แต่จากภาพ 4-11 เมื่อ Spindel speed เกิดการ interaction กับ Feed rate speed นั้น จะส่งผลให้เกิด ของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากการอิทธิพลการเกิดปฏิกริยาของทั้งสองปัจจัยที่กระทำร่วมกัน

4.4 การวิเคราะห์หาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม

จากผลการทดลองข้างต้น ได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาทำการวิเคราะห์โดยใช้ MINITAB ซึ่งได้กำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อลดจำนวนของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) ต่ำที่สุด และหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ได้ค่าดังภาพต่อไปนี้

Response Optimization: Terminal burr(PPM)

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Terminal burr(PPM)	Minimum		1201.56	4002.83	1	1

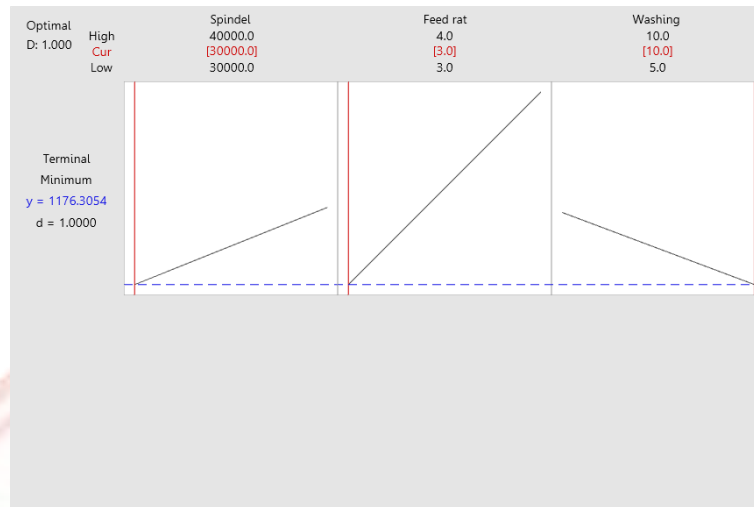
Solution

Solution	Spindel speed	Feed rate speed	Washing pressure	Terminal burr(PPM) Fit	Composite Desirability
1	30000	3	10	1176.31	1

Multiple Response Prediction

Variable	Setting			
Spindel speed	30000			
Feed rate speed	3			
Washing pressure	10			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Terminal burr(PPM)	1176.3	56.9	(995.2, 1357.4)	(884.3, 1468.3)

ภาพที่ 4-11 ค่าปัจจัยที่เหมาะสม



ภาพที่ 4-11 (ต่อ) ค่าปัจจัยที่เหมาะสม

จากภาพ 4-11 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้จำนวนชิ้นงานเสียปริมาณต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,176.305 PPM โดยจะพบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของ Spindel Speed, Feed Rate และ Washing pressure เท่ากับ 30,000 rpm, 3 ips และ 10 MPa ตามลำดับ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ค่า มีความพึงพอใจ(d) ของการวิจัยอยู่ที่ 1.000 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด โดย $d(\text{Desirability}) = 1.000$ บ่งบอกว่าค่าที่ได้ มีผลลัพธ์เป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ได้ดีที่สุด และสมบูรณ์แบบในขอบเขตของปัจจัย

4.5 ยืนยันผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต คือ ความเร็วรอบ (Spindle speed) 30,000 RPM , อัตราเร่งในการเคลื่อนที่แนวแกน X (Feed Rate Speed) 3 IPS และ แรงดันน้ำ (Washing Pressure) 10 MPa เมื่อนำค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมไปใช้ในกระบวนการผลิต พบว่าสามารถเปรียบเทียบพารามิเตอร์และการเกิดของเสียก่อนและหลังปรับปรุงได้ดังตารางที่ 4-4

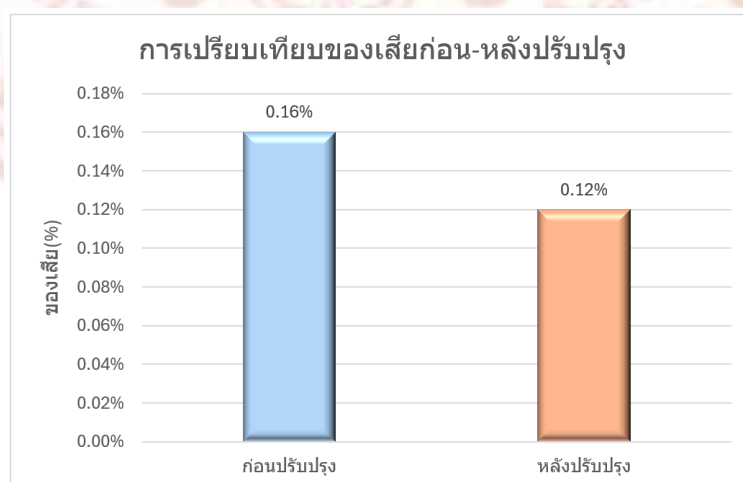
ตารางที่ 4-4 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์และของเสียก่อน-หลัง ปรับปรุง

ปัจจัย	ค่าควบคุมปัจจุบัน	ค่าที่เหมาะสม
Spindel speed (RPM)	30,000	30,000
Feed rate speed (IPS)	3 max	3 max
Washing pressure (MPa)	5	10
Terminal burr (PPM)	1,624.58	1,185.46
%Terminal burr	0.16%	0.12%

ผลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial ทำได้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อที่จะให้มีปริมาณของเสียที่ต่ำที่สุด โดยทำการควบคุมค่าให้อยู่ในช่วงที่กำหนด จากนั้นนำไปทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองเพื่อให้ได้ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น ดังนี้

ตารางที่ 4-5 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณงานเสียที่เกิดขึ้นก่อนและหลังปรับปรุง

สภาวะการผลิต	จำนวนชิ้นงาน ที่ผลิต(ชิ้น)	จำนวน ชิ้นงานเสีย (ชิ้น)	จำนวนชิ้นงานเสีย (PPM)	สัดส่วนของเสีย (%)
ก่อนปรับปรุง	10,628,929	17,006	1599.97	0.16%
หลังปรับปรุง	294,400	349	1,185.46	0.12%



ภาพที่ 4-12 การเปรียบเทียบของเสียก่อน-หลังปรับปรุง

จากตารางที่ 4-5 และ ภาพที่ 4-12 กราฟแผนภูมิแท่ง กล่าวว่าก่อนทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตปริมาณของเสียคิดเป็นร้อยละ 0.16 ซึ่งหลังจากปรับปรุงกระบวนการผลิตทำให้มีปริมาณของเสียลดลงเหลือเพียง ร้อยละ 0.12 ซึ่งสามารถลดสัดส่วนของของเสียลงได้ถึง 0.04% หรือคิดเป็นจำนวน 414.51 PPM



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์ในการลดปริมาณของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ในกระบวนการตัดชิ้นงาน (Singulation) ของโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาระบวนการที่เกิดขึ้นปัญหา และค้นหาปัญหาที่เกิดขึ้นมากที่สุด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์สะสมเท่ากับ 85.26% ของงานเสียทั้งหมด หรือคิดเป็น 0.16% ของการผลิตทั้งหมด ซึ่งผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยนำวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment แบบ 2^k Full Factorial Design) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha=0.05$) เมื่อทำการทดลองตามแผนการออกแบบการทดลองแล้ว ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) อย่างมีนัยสำคัญ คือ 1. ความเร็วรอบ (Spindle speed) 2. อัตราเร็วในการเคลื่อนที่แนวแกน X (Feed rate speed) และ 3. แรงดันน้ำ (Washing pressure) จากผลการทดลองปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองของปริมาณของเสียพบว่า Spindle speed (RPM) ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) ที่ลดลง, Feed rate speed (IPS) ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) ที่เพิ่มมากขึ้น และ Washing pressure (MPa) ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) ที่ลดลง อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณการเกิดของเสียได้อย่างชัดเจน ถึงแม้ว่าอิทธิพลของปัจจัยหลักของ Spindel speed มีค่าสูงขึ้นจะทำให้เกิดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) ที่ลดต่ำลง แต่ผลของอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่าง Spindel speed (RPM) และ Feed rate speed (IPS) นั้น เกิดการ interaction จะส่งผลให้เกิดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลล (Terminal burr) ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากการอิทธิพลการเกิดปฏิกิริยาของทั้งสองปัจจัยที่กระทำร่วมกัน

ในส่วนของการใช้วิธีการ Response Optimization โดยใช้โปรแกรม Minitab ในการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิต จากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมกับการผลิตคือ ความเร็วรอบ (Spindle speed) 30,000 RPM , อัตราเร็วในการเคลื่อนที่แนวแกน X (Feed rate speed) 3 IPS และ แรงดันน้ำ (Washing pressure) 10 MPa และเมื่อนำค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมไปใช้ในกระบวนการผลิต พบว่ามีจำนวนของเสียลดลงจาก 0.16% เหลือเพียง 0.12% ซึ่งสามารถลดของเสียได้ถึง 0.04% หรือคิดเป็นจำนวน 414.51 PPM อีกทั้งยังช่วยลดมูลค่าความสูญเสียจากการเกิดของ

เสีย และส่งผลให้องค์กรมีผลกำไรที่มากขึ้น ทั้งในด้านกระบวนการผลิต และทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นอีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สามารถนำหลักการออกแบบการทดลองนี้ไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการอื่นๆ เพื่อค้นหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาของเสียและสามารถหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตที่เป็น กระบวนการตัดชิ้นงานเหมือนกัน ซึ่งจะนำมากำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์สำหรับเป็นมาตรฐานในการ ปรับตั้งเครื่องจักรได้

5.2.2 การนำพารามิเตอร์อื่นๆมาทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อบริษัทมากขึ้น



บรรณานุกรม

กาญจนา ลายวิเชียร.การลดของเสียในกระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยวิธีซิก ชิกม่า.

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาการจัดการ
ทางวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

รายงานการวิเคราะห์แนวโน้มเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม(2560) ที่มา: สถาบันทรัพย์สินทาง

ปัญญาแห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นางสาวสุจิตรา บัวผัน(2563). การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มผลผลิตในอุตสาหกรรม

ประเภทอิเล็กทรอนิกส์.วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการ
จัดการงานวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร

นางสาววรรณภา สารคำ(2558), การลดของเสียในกระบวนการผลิตแผงวงจรไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

ได้โดยเทคนิคซิก ชิกม่า, การค้นคว้าอิสระหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,

สาขาวิชาการพัฒนาอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ธัญญลักษณ์ สกลวาร(2566), แนวทางการปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้

แนวคิดลีนของบริษัท ABC. งานนิพนธ์หลักสูตรบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต, วิทยาลัยพาณิชย
ศาสตร์,มหาวิทยาลัยบูรพา

นายสรารุณ เดชวรารักษ์(2553), การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตตัว

สปริง, สารนิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมการจัดการ

อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

นายอภิวิชญ์ สวดี(2555), การลดของเสียจากกระบวนการผลิตเฟืองตาม, สารนิพนธ์หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม,มหาวิทยาลัยพระจอม
เกล้าพระนครเหนือ

นายชัชวาล ภูชนะพันธ์(2553), การลดของเสียจากกระบวนการผลิตผ้าหลังการย่นโดยการ

ประยุกต์ใช้วิธีซิก ชิกม่า กรณีศึกษา: บริษัทในอุตสาหกรรมรถยนต์, สารนิพนธ์หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม,มหาวิทยาลัยพระจอม

เกล้าพระนครเหนือ

นายอภิชาติ เชื้อนขัน(2557), การปรับปรุงกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยเลเซอร์, การค้นคว้า

อิสระ หลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม,

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

นายรัชชัย ภัทรดนัย(2565), การลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประกอบขดลวดนำโดย
ประยุกต์ใช้ การออกแบบการทดลอง, วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,
สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร

นางสาวภิญญ์สุประภา สุขะปณพันธ์(2564), การปรับปรุงประสิทธิภาพการบรรจุข้าวอบแห้งกิ่ง
สำเร็จรูปด้วยเครื่องบรรจุอัตโนมัติ, วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,
สาขาวิชาการจัดการ งานวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร

รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา วานิชย์บัญชา(2557), หลักสถิติ,พิมพ์ครั้งที่1, ศูนย์หนังสือแห่ง
จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

กฤษดา อัครรุ่งแสงกุล. (2559). สถิติประยุกต์สำหรับวิศวกร : การออกแบบการทดลองเชิง
วิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. จำนวน 500 เล่ม. กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนจำกัด
ยงพล เทรตดิ้ง.

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษรรัตน์ อักษรรัตน์(2561), เทคโนโลยีการประกอบบรรจุภัณฑ์วงจรรวม,
ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์, คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ธีรเดช วุฒิพรพันธ์(2558). เอกสารคำสอน การออกแบบการทดลองเบื้องต้น: พิมพ์ครั้งที่1, ภาควิชา
วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร
เหนือ

ปารเมศ ชูติมา(2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม: พิมพ์ครั้งที่1, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย

การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อลดผลิตภัณฑ์บกพร่องประเภทผิดไม่เต็มแบบ ใน
กระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ กรณีศึกษา : โรงงานผลิตชิ้นส่วน
อิเล็กทรอนิกส์

สุรัชย์ จันทร์เถื่อน(2560)การประยุกต์การใช้การออกแบบการทดลองเพื่อลดปริมาณของเสีย
ประเภทผิดไม่ เต็มแบบในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนรถยนต์

วรรณภา(2558)การลดของเสียในกระบวนการผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้โดยใช้เทคนิค
ซิกซ์ ซิกมา

นายเสฏฐวุฒิ สุทธะคำ(2556), การออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยการกลึง สำหรับกำหนดชนิดมีด
กลึงที่เหมาะสมกับเครื่องกลึง,สารนิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขา
วิศวกรรมการ จัดการอุตสาหกรรม,มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ฉลอง สีแก้วสัว. (2552). [ออนไลน์]. Fractional Factorial Designs.

[สืบค้นวันที่ 13 กันยายน 2567]. จาก

http://www.geocities.ws/chalong_sri/Fract_DOE.htm

ชนกฤษ ชื่นเซ่ง. (2557). การลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติก กรณีศึกษา: ของเสียประเภท

จุดดํา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.

คณะวิชาช่างไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคสิงห์บุรีแห่งที่ 1, สืบค้นจาก

sanong2003.tripod.com/icm1-04.htm

เรื่องลักษณะ บุตรพิช. จุฑาวรรณ อันสุวรรณ, จิตาเดียว มยุรีสวรรค, เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7

Click or tap here to enter text.



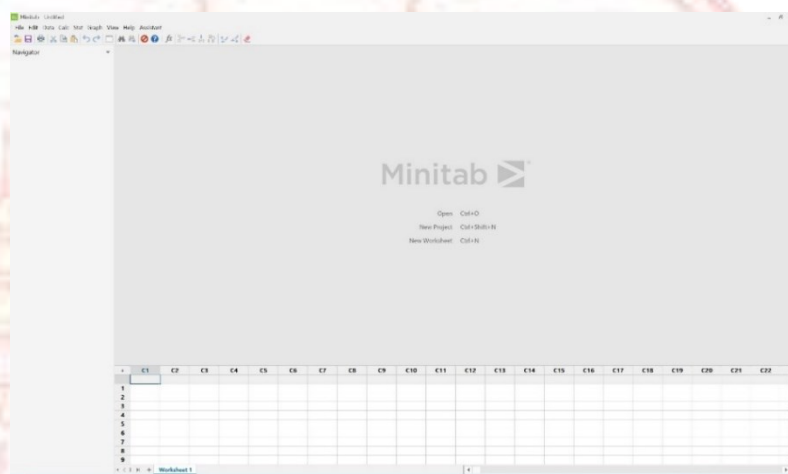


การใช้โปรแกรม Minitab19



ภาพที่ ก-1 สัญลักษณ์โปรแกรม Minitab19

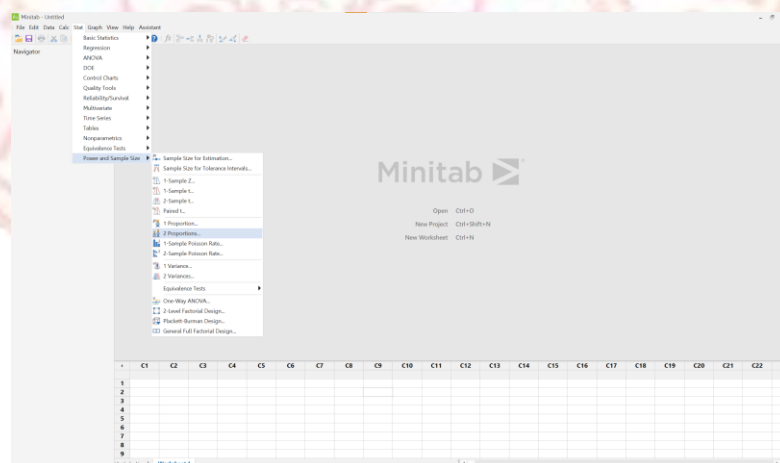
1. เปิดโปรแกรม Minitab19



ภาพที่ ก-2 หน้าต่างโปรแกรม Minitab19

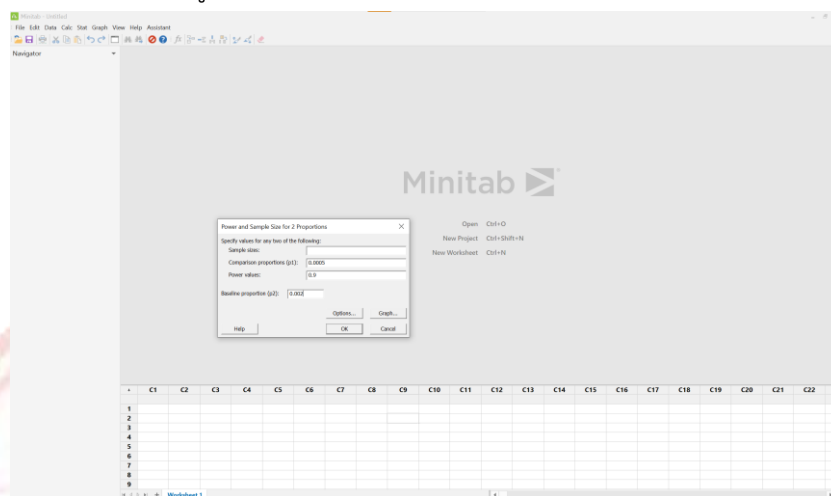
2. ทำการสร้าง Power and Sample size ทำการเลือกแถบข้อมูลดังต่อไปนี้

2.1 เลือกแถบข้อมูลดังภาพที่ ก-3 Stat> Power and Sample size>2 Proportions



ภาพที่ ก-3 เลือกแถบข้อมูล Stat> Power and Sample size>2 Proportions

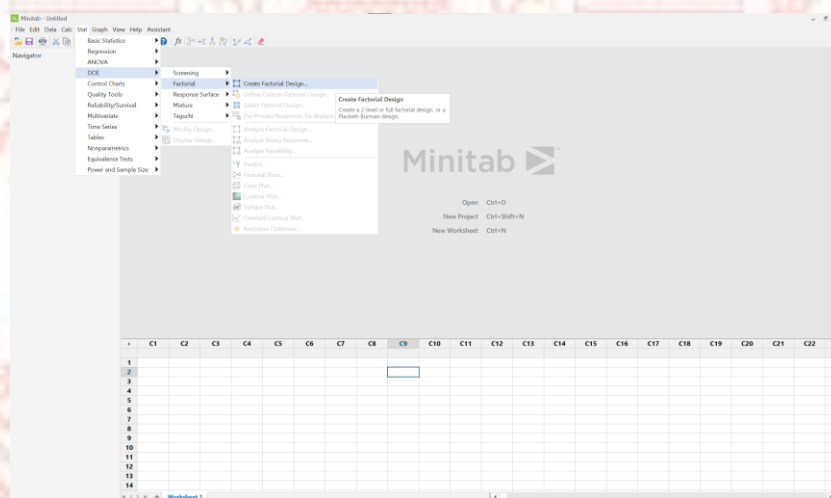
2.2 เลือกใส่ข้อมูลดังภาพที่ ก-4 เพื่อหาจำนวนตัวอย่าง



ภาพที่ ก-4 ใส่ข้อมูลสำหรับการหาจำนวนตัวอย่าง

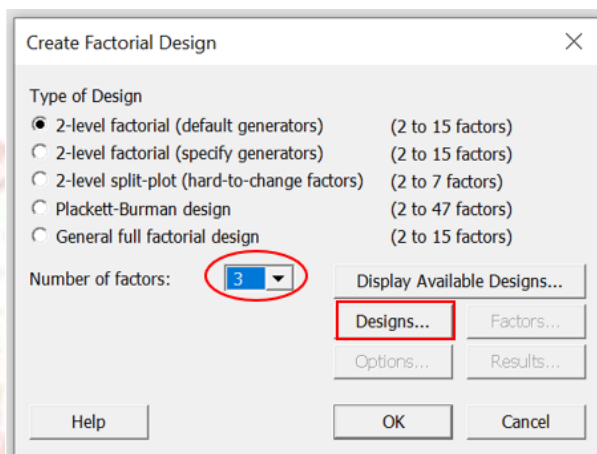
3. สร้างตารางการทดลอง(Design of Experiment) เลือกแถบข้อมูลดังภาพที่ ก-5

Stat> DOE>Factorial>Create Factorial Design



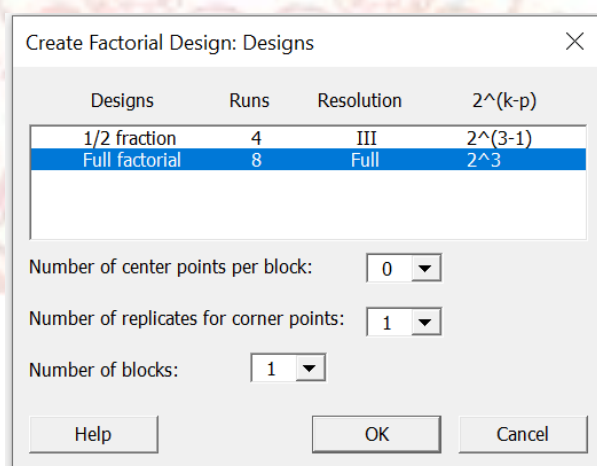
ภาพที่ ก-5 เลือกแถบข้อมูล Stat> DOE>Factorial>Create Factorial Design

4. เลือกรูปแบบการทดลอง โดยเลือกฟังก์ชันในภาพ ก-6 โดยผู้วิจัยเลือกรูปแบบการทดลอง 2-level factorial จากนั้นเลือกปัจจัยที่จะทำการวิจัย โดยจะใช้ฟังก์ชัน Number of factorial เท่ากับ 3 Factor



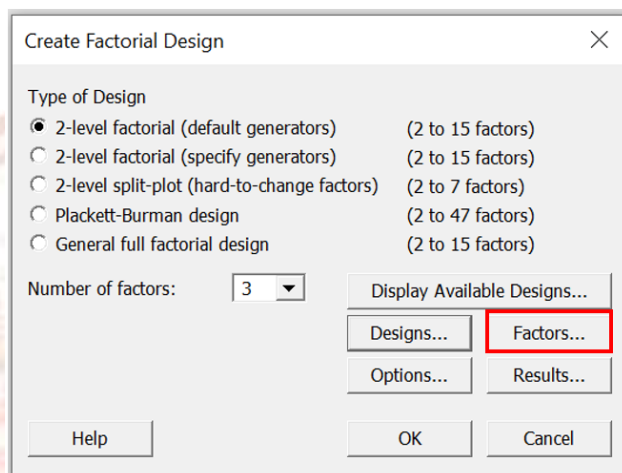
ภาพ ก-6 ฟังก์ชันการออกแบบการทดลองในงานวิจัย

4.1 เลือกฟังก์ชัน Design ดังรูปที่ ก-6 เพื่อเลือกการออกแบบการทดลองว่าจะเลือกการทดลองแบบครึ่งรูป (1/2 factorial) หรือ แบบเต็มรูป (Full factorial) ,เลือกจำนวนเซนเตอร์พ้อยต่อบล็อก (Number of center point per block), เลือกจำนวนการทำซ้ำ (Number of replicates for corner point) และ จำนวนบล็อก (Number of blocks) โดยการวิจัยจะทำการเลือกแบบ Full factorial, Number of center point per block=0, Number of replicates for corner point=1 และ Number of blocks=1 ดังภาพที่ ก-7

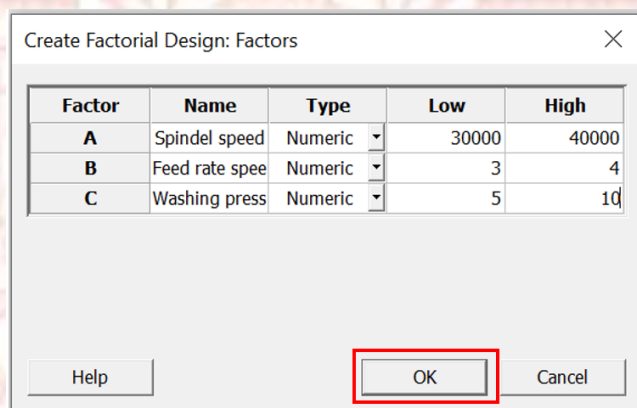


ภาพ ก-7 ฟังก์ชันการออกแบบการทดลองและจำนวนทำซ้ำ

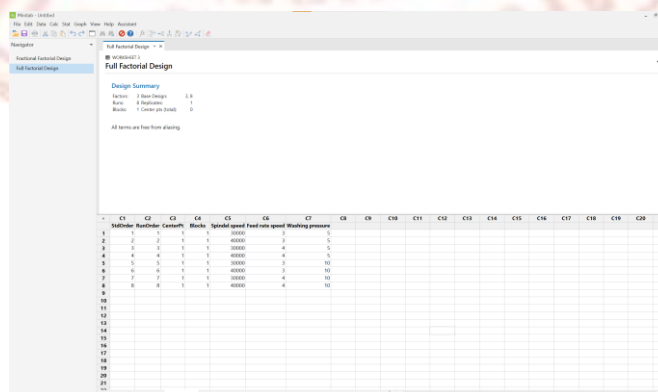
4.2 ผู้ใช้โปรแกรมทำการกด Factors ดังภาพที่ ก-8 เพื่อเลือกกำหนดชื่อของปัจจัย ระดับของปัจจัย พร้อมใส่ค่าควบคุมระดับสูง (HIGH) ต่ำ (LOW) อีกทั้งสามารถเลือกประเภทของแต่ละปัจจัยได้ คือ Type, Numeric และ Text จากนั้นกด OK ดังภาพที่ ก-9



ภาพที่ ก-8 เลือกฟังก์ชันปัจจัย

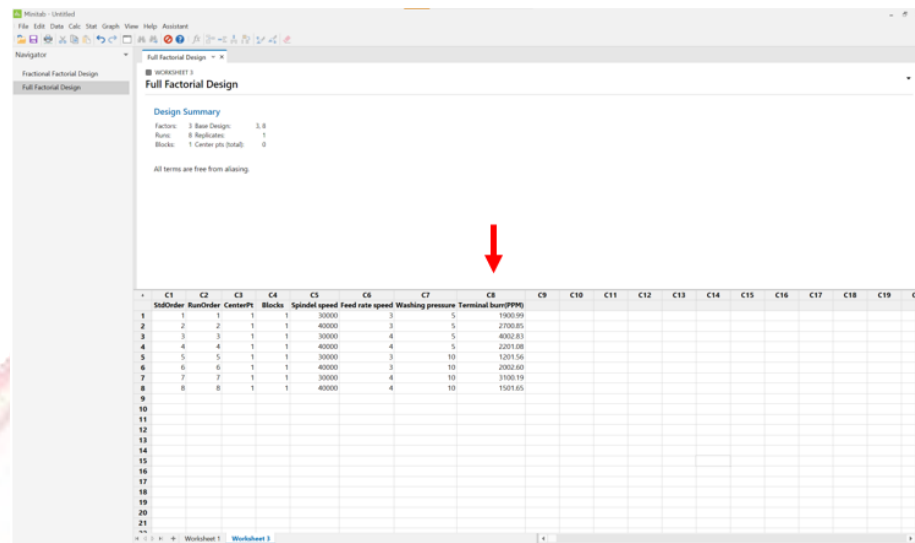


ภาพที่ ก-9 เลือกใส่ประเภทและค่าควบคุมปัจจัย



ภาพที่ ก-10 หน้าต่างแผนการทดลองในงานวิจัย

5. บันทึกข้อมูลที่ต้องการวิจัยลงในคอลัมน์ C8 (Terminal burr (PPM)) ดังภาพที่ ก-11



Full Factorial Design

Design Summary

Factors: 3 Base Design: 3,8
Runs: 8 Replicates: 1
Blocks: 1 Center pts (total): 0

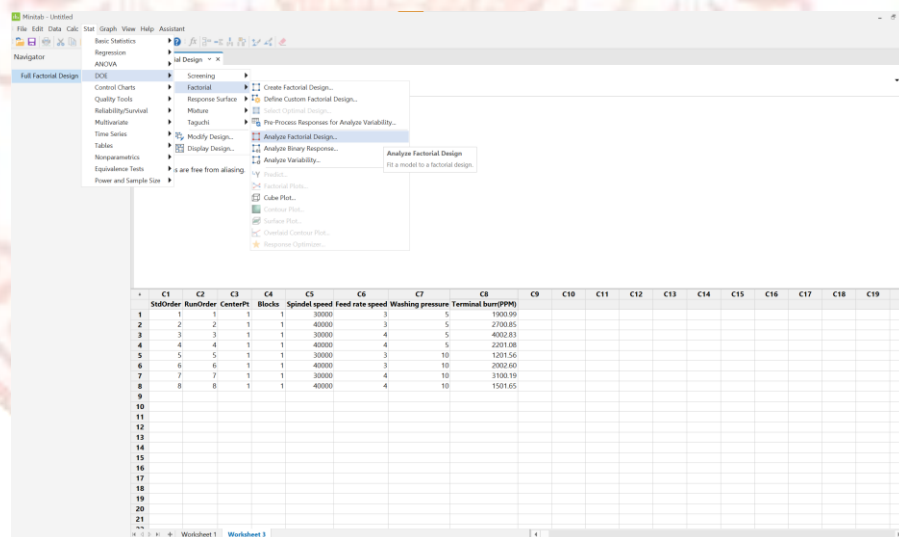
All terms are free from aliasing.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Spindel speed	Feed rate speed	Washing pressure	Terminal burr(PPM)												
1	1	1	1	1	30000	3	5	1900.99												
2	2	2	1	1	40000	3	5	2700.85												
3	3	3	1	1	30000	4	5	4002.83												
4	4	4	1	1	40000	4	5	2201.08												
5	5	5	1	1	30000	3	10	1201.56												
6	6	6	1	1	40000	3	10	2002.60												
7	7	7	1	1	30000	4	10	3100.19												
8	8	8	1	1	40000	4	10	1501.65												
9																				
10																				
11																				
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				

ภาพที่ ก-11 หน้าต่างบันทึกผลการทดลองงานวิจัย

6. วิเคราะห์ผลความแปรปรวน(Analysis of Variances) โดยเข้าสู่ฟังก์ชันดังภาพที่ ก-12

Stat > DOE > Factorial > Analysis of Variances

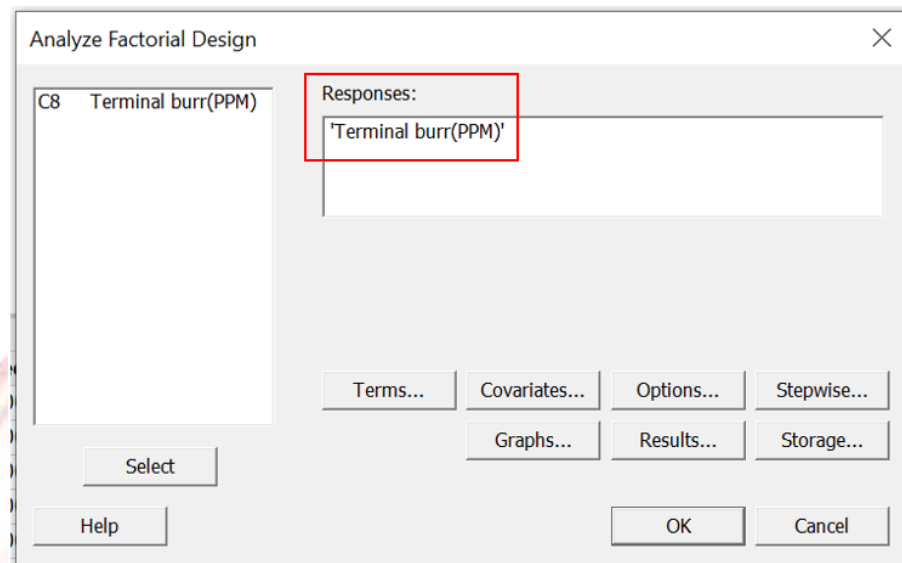


Stat > DOE > Factorial > Analysis of Variances

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Spindel speed	Feed rate speed	Washing pressure	Terminal burr(PPM)												
1	1	1	1	1	30000	3	5	1900.99												
2	2	2	1	1	40000	3	5	2700.85												
3	3	3	1	1	30000	4	5	4002.83												
4	4	4	1	1	40000	4	5	2201.08												
5	5	5	1	1	30000	3	10	1201.56												
6	6	6	1	1	40000	3	10	2002.60												
7	7	7	1	1	30000	4	10	3100.19												
8	8	8	1	1	40000	4	10	1501.65												
9																				
10																				
11																				
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				

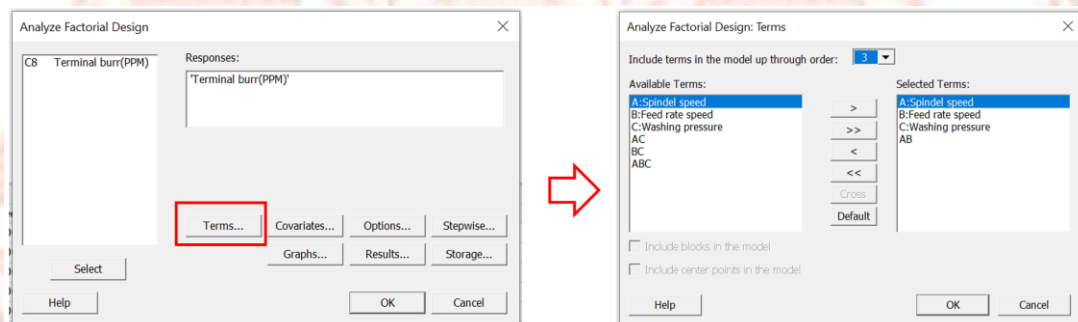
ภาพที่ ก-12 การเลือกแถบเมนู Stat > DOE > Factorial > Analysis of Variance

6.1 ทำการเลือกการตอบสนอง (Responses) ภาพที่ ก-13



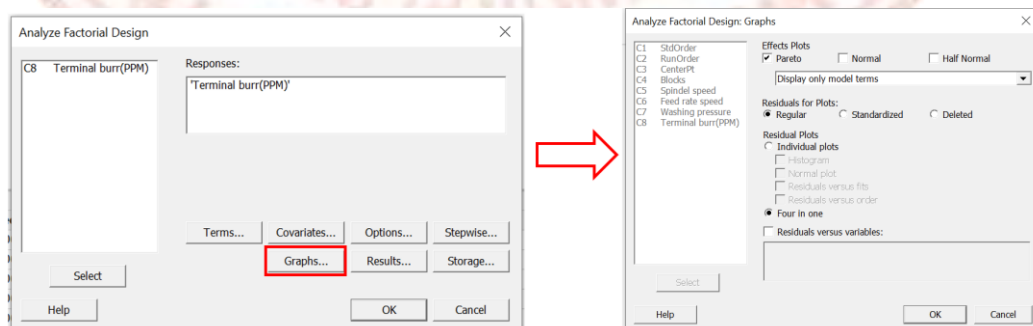
ภาพที่ ก-13 การเลือกฟังก์ชันการตอบสนอง(Responses)

6.2 เลือก Terms ของปัจจัยภาพที่ ก-14



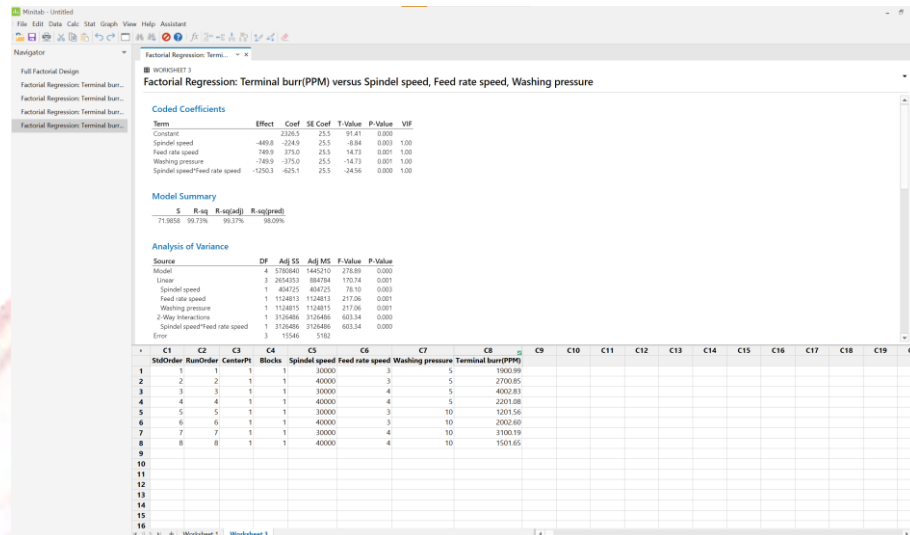
ภาพที่ ก-14 การเลือกฟังก์ชันTerms ของปัจจัย

6.3 เลือกฟังก์ชัน Graphsภาพที่ ก-15

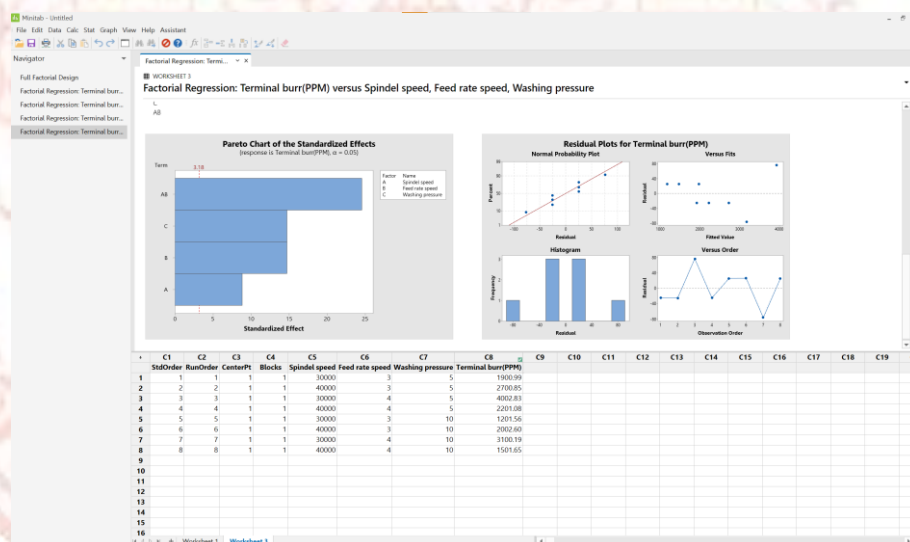


ภาพที่ ก-15 การเลือกฟังก์ชัน Graphs

6.4 โปรแกรมทำการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนดังภาพที่ ก-16 และแสดงกราฟดังภาพที่ ก-17



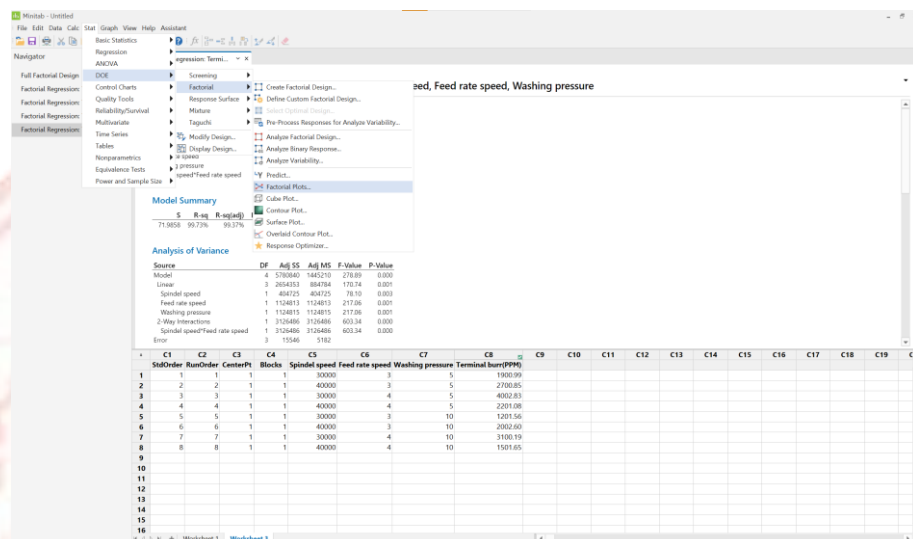
ภาพที่ ก-16 ผลวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน



ภาพที่ ก-17 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์

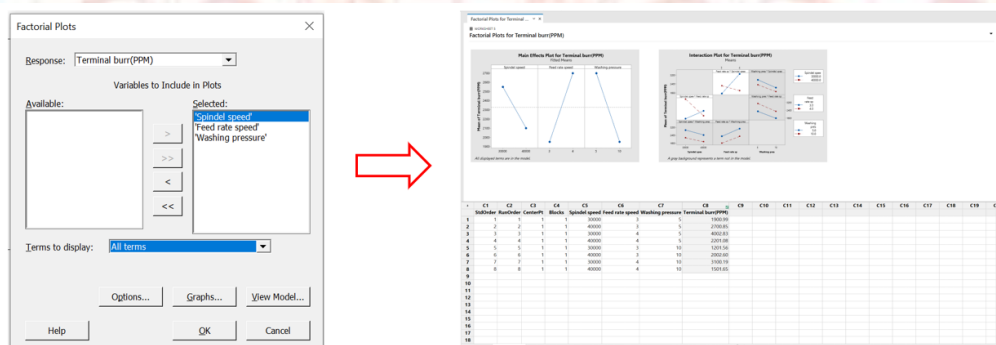
7. ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบรวม(Main Effect) และ อิทธิพลร่วมของปัจจัย(Interaction plot) โดยเข้าสู่ฟังก์ชันดังภาพที่ ก-18

Stat > DOE > Factorial > Factorial Plot



ภาพที่ ก-18 การเข้าสู่ฟังก์ชัน Stat > DOE > Factorial > Factorial Plot

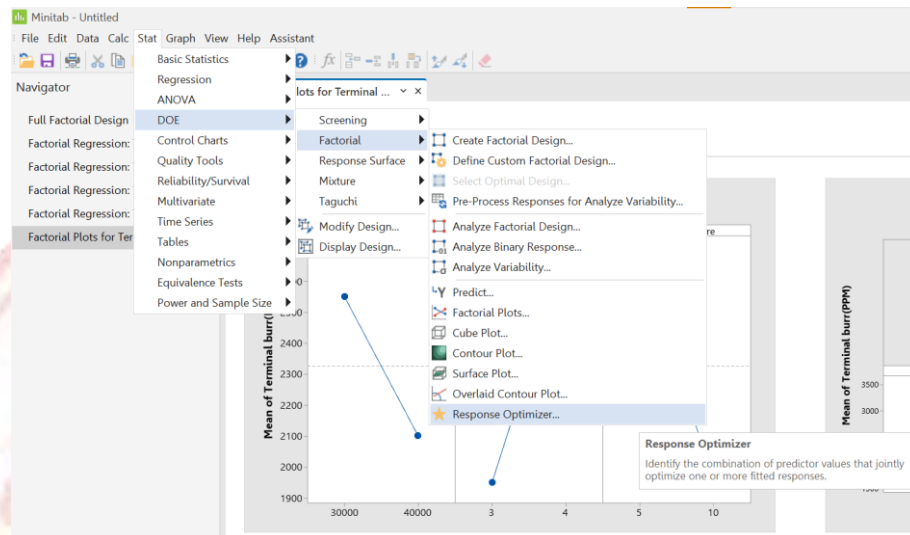
7.1 แสดงการวิเคราะห์ผลแสดง Main Effect Plot และ Interaction Plot ดังภาพที่ ก-19



ภาพที่ ก-19 แสดงผลการวิเคราะห์ Main Effect Plot และ Interaction Plot

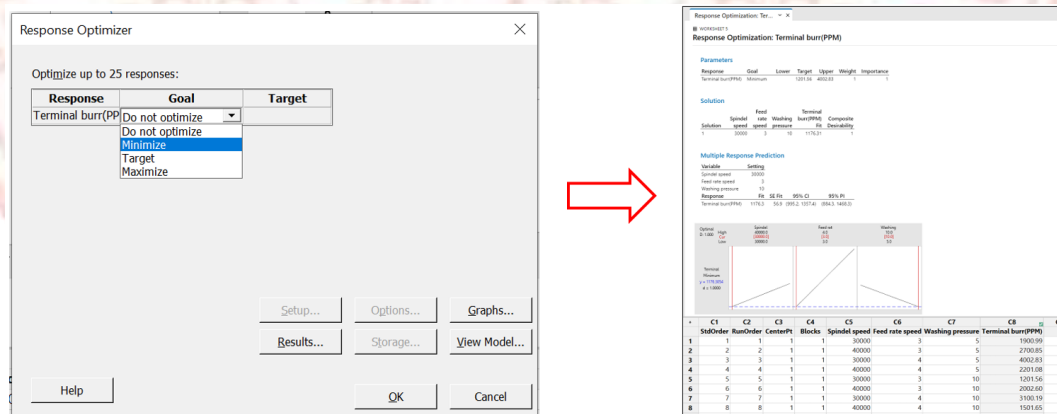
8. การวิเคราะห์หาค่าปัจจัยที่เหมาะสม (Response Optimizer) โดยเข้าสู่ฟังก์ชันดังภาพที่ ก-20

Stat > DOE > Factorial > Response Optimizer



ภาพที่ ก-20 การเข้าสู่ฟังก์ชัน Stat > DOE > Factorial > Response Optimizer

8.1 แสดงการวิเคราะห์ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม (Response Optimizer) โดยในการวิจัย จะทำการหาค่าที่เกิดของเสียน้อยที่สุด จึงเลือก Goal เป็นค่า Minimize และแสดงผลปัจจัยที่เหมาะสม (Response Optimizer) ดังภาพที่ ก-21



ภาพที่ ก-21 แสดงการหา Response Optimizer และ แสดงผล Response Optimizer

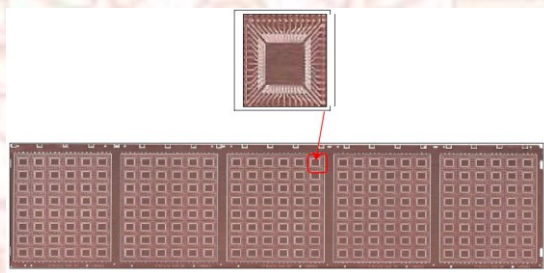


ภาคผนวก ข

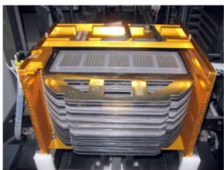
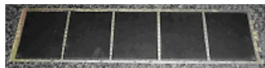
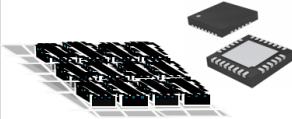
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการผลิต

1. การเรียกชื่อและความหมายของชิ้นส่วนเกี่ยวข้องในการผลิต

หลีดเฟรม (Lead frame) คือโครงสร้างโลหะที่ใช้ในการผลิตชิปอิเล็กทรอนิกส์ โดยมักจะทำจากทองแดงหรือทองเหลือง โครงสร้างนี้ช่วยในการเชื่อมต่อชิปกับขั้วต่อภายนอก เช่น PCB (Printed Circuit Board) ทำให้สามารถส่งสัญญาณและจ่ายไฟให้กับชิปได้ ซึ่ง Lead frame มีลักษณะเป็นแผ่นบางที่มีขา (leads) โผล่ออกมาจากด้านข้าง โดยการออกแบบจะช่วยให้สามารถติดตั้งและเชื่อมต่อกับส่วนประกอบอื่น ๆ ได้ง่ายขึ้น กระบวนการผลิต Lead frame รวมถึงการตัดและขึ้นรูปเพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างที่ต้องการ การใช้ lead frame ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของชิปในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้เทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งภาพที่ ข-1 แสดงลักษณะของ Lead frame และ ภาพที่ ข-2 แสดงลักษณะรูปแบบของงานในกระบวนการและชื่อเรียกของแต่ละรูปแบบ



ภาพที่ ข-1 แสดงลักษณะของหลีดเฟรม (Lead frame)

รูปแบบของงาน	ชื่อเรียก	รูปแบบของงาน	ชื่อเรียก
	Cassette		Strip
	Ring		Unit

ภาพที่ ข-2 แสดงลักษณะรูปแบบของงานในกระบวนการและชื่อเรียกของแต่ละรูปแบบ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาววิศรา พานเทียน
ชื่อการค้นคว้าอิสระ	การลดของเสียประเภทเทอร์มินอลเบลอในกระบวนการชิงกูเรชั่นโดย การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง
สาขาวิชา	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม
ประวัติ	ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2554-2558 คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิศวกรรมชั้นสูงและนาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยศิลปากร ประวัติการทำงาน พ.ศ. 2558-2559 ตำแหน่งวิศวกรประกันคุณภาพ (QA Engineer) บริษัท คัดซียาม่า ฟายเทค ไทยแลนด์ จำกัด พ.ศ. 2559-2567 ตำแหน่งวิศวกรระดับ 3 (Engineer 3) บริษัท เอ็นเอ็มบี-มินิแม ไทย จำกัด พ.ศ. 2557-ปัจจุบัน ตำแหน่งวิศวกรกระบวนการผลิต (Senior Process Engineer) บริษัท ยูแทคไทย จำกัด