

การลดขนาดรอยบันบนแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษและพื้นที่ทางตัดแคบสำหรับกระบวนการตัดแผ่นเว
เฟอร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Chipping size reduction on Ultra-Thin Wafers and Narrow Saw-Streets for Wafer
Sawing process



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดขนาดรอยบินบนแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษและพื้นที่ ทางตัดแคบสำหรับกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์
โดย	นายวรวิช สนามทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ปารเมศ ชุติมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ปารเมศ ชุติมา)	
.....	กรรมการ
(สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ชูเวช ชาญสง่าเวช)	

วรวิช สนามทอง : การลดขนาดรอยบิ่นบนแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษและพื้นที่ทางตัด
 แคมสำหรับกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์. (Chipping size reduction on Ultra-Thin
 Wafers and Narrow Saw-Streets for Wafer Sawing process) อ.ที่ปรึกษาหลัก :
 ปารเมศ ชูติมา

รอยบิ่นคือปัญหาใหญ่ของกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ เมื่อรอยบิ่นนั้นมีขนาดใหญ่และ
 กินพื้นที่เข้าไปในบริเวณพื้นที่ใช้งานของตัวไดเนื่องจากขนาดของรอยบิ่นมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณ
 พื้นที่ปลอดข้อบกพร่อง ดังนั้นคุณภาพของการตัดแผ่นเวเฟอร์ที่ดีต้องมีขนาดรอยบิ่นที่เล็ก หรือดี
 ที่สุดคือไม่เกิดรอยบิ่นขึ้นเลย ในขณะที่วงจรรวมในปัจจุบันมีราคาไม่สูงมากนัก และขนาดของตัว
 ผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเล็กลงอย่างต่อเนื่อง หลายบริษัทจึงสนใจแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ (แผ่นเว
 เฟอร์ที่มีความหนาไม่เกิน 100 ไมโครเมตร) และยังคงสนใจการเพิ่มจำนวนไดต่อแผ่นเวเฟอร์ให้มาก
 ขึ้นเพื่อเป็นการประหยัดต้นทุน แต่การตัดแผ่นเวเฟอร์จะลำบากมากขึ้นเมื่อจำนวนไดในแผ่นเว
 เฟอร์มีมากขึ้น เพราะการเพิ่มจำนวนไดในแผ่นเวเฟอร์จะส่งผลให้ขนาดของพื้นที่ทางตัดแคบลง
 สำหรับโรงงานการศึกษา ลูกค้ายาลดขนาดพื้นที่ทางตัดจาก 80 ไมโครเมตร ให้เหลือเพียง 60
 ไมโครเมตร ซึ่งชุดค่าการปรับที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่สามารถตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดนี้ได้เพราะค่าเฉลี่ย
 ของขนาดของรอยบิ่นมีขนาดใหญ่ 14 ไมโครเมตร ซึ่งมากกว่าขนาดของพื้นที่ปลอดข้อบกพร่อง
 13.5 ไมโครเมตร จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ เพื่อลดขนาดรอยบิ่นที่
 เกิดจากกระบวนการตัดให้เล็กลง ซึ่งเทคนิคการปรับปรุงที่ใช้คือวิธีของซิกซ์-ซิกม่า โดยหาปัจจัย
 นำเข้าที่ส่งผลต่อรอยบิ่นและหาชุดค่าการปรับที่เหมาะสมเพื่อที่จะทำให้ขนาดของรอยบิ่นเล็กที่สุด
 ประกอบไปด้วย ความหนาของใบมีดผงเพชร 20 ไมโครเมตร, ความเร็วรอบตัด 50,000 รอบต่อ
 นาที, และความเร็วป้อนตัด 39 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของขนาดของรอยบิ่นที่
 กระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ลดลงจาก 14 ไมโครเมตร เหลือเพียง 4.5 ไมโครเมตร หรือค่าเฉลี่ย
 ของขนาดของรอยบิ่นมีขนาดเล็กลง 67.86 เปอร์เซ็นต์

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170956221 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Ultrathin wafer, Wafer Sawing Process, Narrow Saw Streets, Six Sigma,
Design Of Experiment

Worawich Sanamthong : Chipping size reduction on Ultra-Thin Wafers and
Narrow Saw-Streets for Wafer Sawing process. Advisor: PARAMES CHUTIMA

Chipping is a big problem when it enters the guard ring or die active area, because the size of chipping is bigger than Defect-Free Zone (DFZ). Thus, the smaller of chipping size, the better the quality. At present, the selling price of semiconductor products (especially on the IC product) is not too expensive as before, while the size of the package is getting smaller and smaller with higher density. Many companies interested in ultrathin wafers (i.e. Wafers having thicknesses less than 100um). And also interested in increasing die per wafer (DPW) to have a competitive product cost. This increases the difficulty in the wafer sawing process because increasing DPW causes a narrow width of the saw-street meaning that the size of DFZ will be very narrow. For the factory in this case study, the width of saw-streets is reduced from 80um to 60um. At present, current setting parameter provides a width of chipping size around 14um, it's bigger than the new size of DFZ at 13.5um. To improve the quality, Six-Sigma is a suitable tool to make a huge improvement by finding the potential factors and optimal setting parameters to create the smallest size of chipping. This research will share the successful improvement of small chipping by optimizing critical factors such as Spindle speed, Blade thickness, Feed speed and Blade height. The result appeared that means of chipping size reduced from 14um to 4.5um or 67.86% of reduction.

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยความช่วยเหลือและเสียสละเวลาให้คำแนะนำจาก ศาสตราจารย์ ดร.ปราเมศ ชูติมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้ความรู้ทางทฤษฎี หลักการ ตลอดจนคำแนะนำและแนวทางการปรับปรุงแก้ไขในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาโดยตลอด และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชูเวช ชาญสง่าเวช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจข้อบกพร่อง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้บริหารโรงเรียนกรณิศศึกษา ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลและทำการทดลอง รวมไปถึงคณะทำงานที่ช่วยระดมความคิด คำแนะนำและข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว รวมไปถึงความช่วยเหลือจากเพื่อน นิสิตทุกท่าน ที่สนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนลุล่วงเสร็จสมบูรณ์

วรวิช สนามทอง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	7
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	8
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	8
1.5) ผลที่คาดว่าจะได้รับ	10
1.6) ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
1.7) ตารางการดำเนินงาน	10
บทที่ 2	12
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (ซิกส์ซิกมา).....	15
2.2.1) ระยะเวลาในการกำหนดปัญหา (Define phase)	16
2.2.2) ระยะเวลาในการวัดและการเก็บข้อมูลเพื่อหาสภาพของปัญหา (Measure phase).....	18
2.2.3) ระยะเวลาวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analysis phase).....	18
2.2.4) ระยะเวลาปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improvement phase)	18
2.2.5) ระยะเวลาควบคุม (Control phase).....	19
2.3 ความรู้เบื้องต้นทางกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์	19

2.3.1) แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ (Silicon wafer)	19
2.3.2) กระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Sawing process)	20
2.3.3) รอยป็นของตัวไดบนแผ่นเวเฟอร์ (Chippings)	21
บทที่ 3	22
3.1 กำหนดเหตุผลทางธุรกิจ (Business case).....	22
3.2 การบรรยายปัญหา (Problem statement).....	22
3.3 กำหนดตัวชี้วัดโครงการ (Project metrics).....	23
3.4 แถลงการณ์วัตถุประสงค์ (Objective statement)	24
3.5 ขอบเขตของงานวิจัย (Project scope)	24
3.6 ข้อจำกัดของงานวิจัย (Project constraints).....	24
3.7 การสนับสนุนที่ควรจะได้รับ (Project assumptions).....	25
3.8 สมาชิกผู้ร่วมทำการวิจัย (Team member)	25
3.9 ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย (Project timeline).....	26
3.10 สรุประยะขั้นตอนของการนิยามปัญหา	26
บทที่ 4	27
4.1 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis).....	27
4.1.1) การวิเคราะห์ความเอนเอียง (Bias)	29
4.1.1.1) การคำนวณหาความเอนเอียง (Bias)	30
4.1.1.2) การตรวจสอบสมมุติฐานทางสถิติของค่าความเอนเอียง	30
4.1.1.3) ผลการทดสอบสมมุติฐานของการทดสอบที่.....	31
4.1.2) การวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของเครื่องมือวัด (Stability)	32
4.1.2.1) ขั้นตอนการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของเครื่องมือวัด.....	33
4.1.2.2) ผลการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของเครื่องมือวัด.....	48
4.1.3) การวิเคราะห์ความเป็นเส้นตรง (Linearity).....	48

4.1.3.1) ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเป็นเส้นตรง	48
4.1.3.2) ผลการวิเคราะห์ความเป็นเส้นตรง.....	57
4.1.3.3) ผลการวิเคราะห์ความเอนเอียงและความเป็นเส้นตรงด้วย Minitab	58
4.1.4) การวิเคราะห์การทวนซ้ำและทำซ้ำ (Repeatability & Reproducibility)	59
4.1.4.1) ขั้นตอนการวิเคราะห์แปรปรวน (ANOVA)	61
4.1.4.2) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	64
4.1.4.3) การวิเคราะห์องค์ประกอบความแปรปรวน (Variance Components).....	66
4.1.4.4) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของความแปรปรวน.....	67
4.1.4.5) การประเมินผลเครื่องมือวัด (Gage Evaluation).....	67
4.1.4.6) ผลการประเมินเครื่องมือวัด.....	70
4.1.4.7) ผลการวิเคราะห์การทวนซ้ำและทำซ้ำด้วยโปรแกรม Minitab.....	71
4.2) การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis, PCA)	75
4.2.1) การทดสอบความเป็นการกระจายแบบปกติ (Normality Test)	77
4.2.2) การทดสอบความเป็นการกระจายแบบปกติด้วย Minitab	80
4.2.3) การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ.....	81
4.2.4) การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการด้วย Minitab	82
4.2.5) การทดสอบความเพียงพอของจำนวนตัวอย่าง	83
4.3) การวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุของปัญหา.....	84
4.4) สรุปผลขั้นตอนระยะการวัดและเก็บข้อมูลเพื่อหาสภาพของปัญหา	86
บทที่ 5	88
5.1) ปัจจัยนำเข้าที่ต้องการศึกษา	88
5.2) การออกแบบการทดลองในขั้นต้น	89
5.2.1) การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลที่มีการเพิ่มจุดกึ่งกลาง	89
5.2.2) มิติของการออกแบบ (Resolution design).....	90

5.2.3 จำนวนตัวอย่างของการออกแบบการทดลอง (Sample size).....	92
5.2.4 ตารางการออกแบบการทดลอง.....	94
5.2.5 ตัวแปรตอบสนอง	96
5.3 ผลการทดลองของการออกแบบการทดลองในขั้นต้น	96
5.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	99
5.4.1 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นการกระจายแบบปกติ (Normality).....	99
5.4.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence).....	100
5.4.3 ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance stability).....	100
5.5 วิเคราะห์ผลการทดลองของการออกแบบการทดลองในขั้นต้น	101
บทที่ 6	107
6.1 ปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญที่จะทำการศึกษา	107
6.2 ตัวแปรตอบสนอง.....	108
6.3 การเลือกการออกแบบการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม	108
6.3.1 การออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design).....	109
6.3.2 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design).....	111
6.3.3 สูตรวิธีการออกแบบการทดลองที่เลือกใช้	112
6.3 การออกแบบการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม.....	113
6.4 ผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม	114
6.4.1 ผลการวัดค่าความกว้างของรอยบินในระยะปรับปรุงกระบวนการ	114
6.4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางสถิติ	115
6.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	118
6.6 ค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองของแต่ละปัจจัย.....	122
บทที่ 7	125
7.1 การทดสอบยืนยันผล.....	125

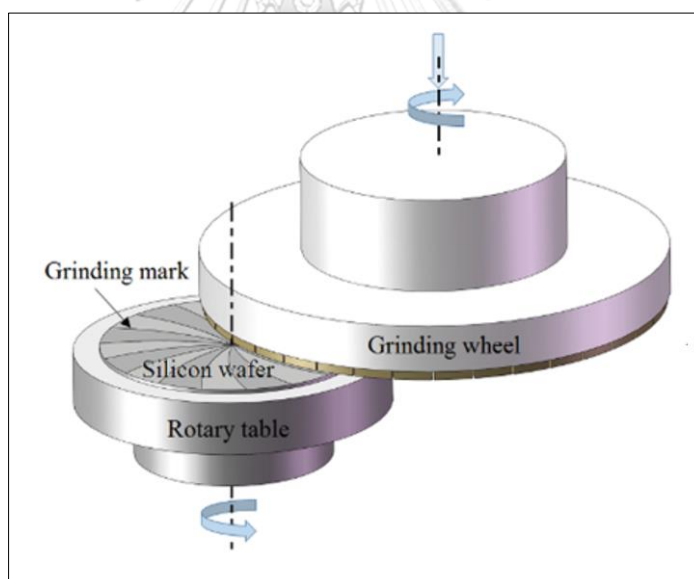
7.2 การหาความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง	126
7.2.1 ผลการวัดค่าความกว้างของรอยบินหลังจากปรับปรุงกระบวนการ	126
7.2.2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง.....	128
7.2.3 ตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลองทางสถิติ	129
7.3 การติดตามผลโดยการประยุกต์ใช้แผนภูมิควบคุม	132
บทที่ 8	135
8.1 สรุประยะนิยามปัญหา	135
8.2 สรุประยะการวัดและการเก็บข้อมูลเพื่อหาสภาพของปัญหา.....	135
8.3 สรุประยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา	136
8.4 สรุประยะการปรับปรุงแก้ไขปัญหา.....	137
8.5 สรุประยะการติดตามควบคุมผล.....	137
8.6 ผลประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยฉบับนี้.....	138
8.7 ข้อเสนอแนะ	139
ภาคผนวก.....	140
บรรณานุกรม.....	152
ประวัติผู้เขียน.....	155

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

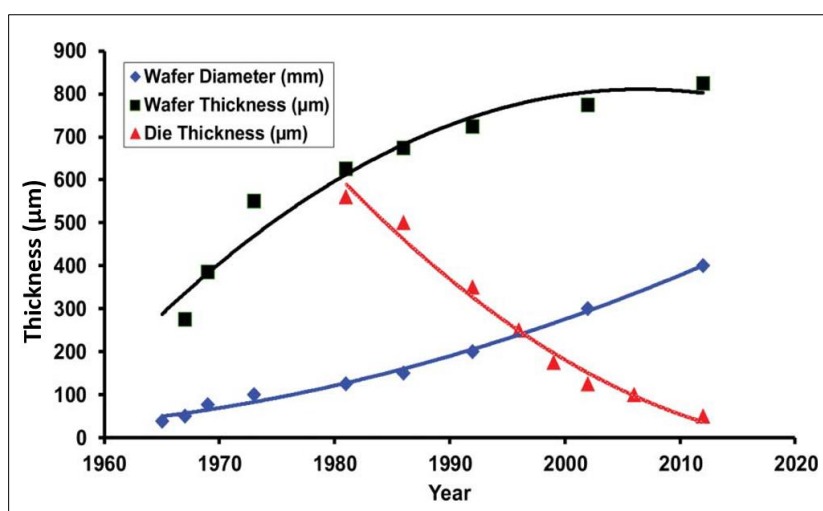
เนื่องจากแนวโน้มของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีขนาดที่บางลงอย่างต่อเนื่อง ผู้ประกอบการส่วนใหญ่จึงต้องปรับตัวเพื่อรองรับความต้องการของลูกค้า การลดความหนาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่เป็นที่นิยมและทำได้ง่ายคือการลดความหนาของตัววงจรรวม (Integrated Circuit) ซึ่งความหนาของตัววงจรรวมสามารถทำได้ด้วยการลดความหนาของตัวได (Die thickness) ซึ่งถูกตัดมาจากแผ่นเวเฟอร์ที่ผ่านกระบวนการเจียรไนที่ด้านหลัง (Wafer Back-Grinding) เรียบร้อยแล้ว การเจียรไนที่ด้านหลังของแผ่นเวเฟอร์จะเป็นการลดความหนาของแผ่นเวเฟอร์ให้มีความหนาตามที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1.1 การเจียรไนด้านหลังของแผ่นเวเฟอร์ให้มีความหนาตามที่ต้องการ

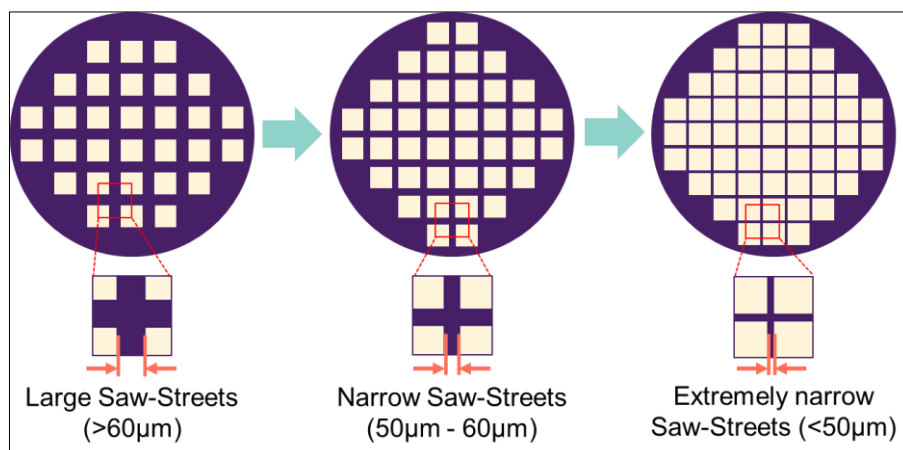
ในปัจจุบันความหนาที่ต่ำสุดของแผ่นเวเฟอร์ที่ใช้ผลิตวงจรรวมในโรงงานต่างๆในประเทศไทยคือ 100 ไมโครเมตร ซึ่งเราจะเรียกแผ่นเวเฟอร์ที่ผ่านการเจียรไนที่ด้านหลังจนเหลือความหนา 100 ไมโครเมตรว่า “เวเฟอร์แบบบาง” (Thin wafer) ซึ่งจะได้ความหนา 100 ไมโครเมตร ไปผลิตตัววงจรรวมหรือตัวไอซีต่อไป (Gambino, 2013) ซึ่งจากข้อมูลงานวิจัยดังแสดงตามรูปที่ 1.2 พบว่า

แนวโน้มความหนาของตัวไดจะมีความหนาที่น้อยลงอย่างต่อเนื่อง และความหนาล่าสุดของตัวไดที่ถูกตัดออกมาจากแผ่นเวเฟอร์ที่เจียรไนเรียบร้อยแล้ว จะมีความหนาอยู่ที่ 50 ไมโครเมตร โดยแผ่นเวเฟอร์ที่มีความหนาที่น้อยกว่า 100 ไมโครเมตร จะถูกเรียกว่าเป็นแผ่นเวเฟอร์แบบบางพิเศษ (Ultrathin wafer) ซึ่งเป็นแผ่นเวเฟอร์ที่บางมาก (Marks, 2014)



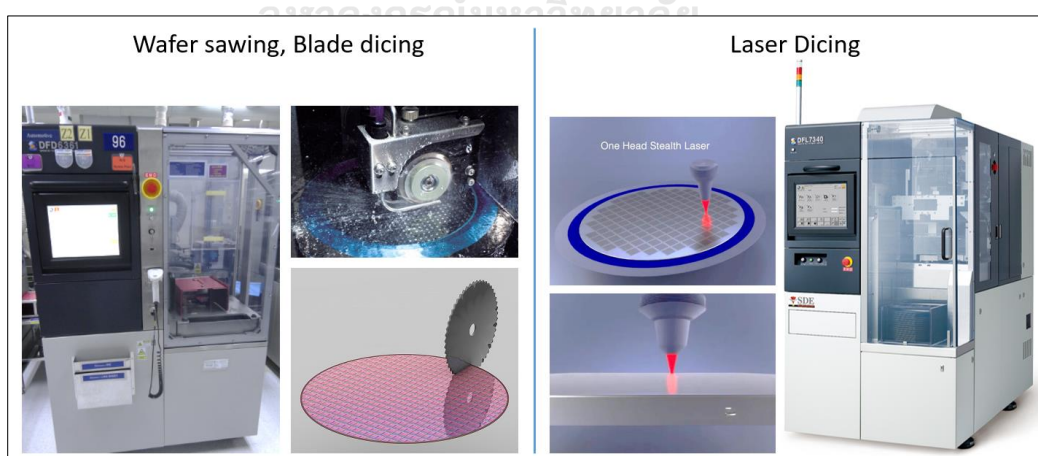
รูปที่ 1.2 แนวโน้มความหนาของตัวได (Die thickness) ที่มีขนาดบางลงอย่างต่อเนื่อง

นอกจากนี้ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ส่วนใหญ่เห็นความสำคัญถึงการลดต้นทุนในกระบวนการผลิต การเพิ่มจำนวนไดต่อแผ่นเวเฟอร์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการหลายแห่งเลือกใช้ แต่วิธีนี้ก็เพิ่มความยากลำบากในการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชร (Diamond blade) มากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มจำนวนไดต่อแผ่นเวเฟอร์จะทำให้ตัวไดเรียงชิดติดกันมากขึ้น หมายความว่าพื้นที่ทางตัด (Saw streets) จะมีขนาดที่แคบลง (Y.H. Chiew, 2018) ดังแสดงตามรูปที่ 1.3



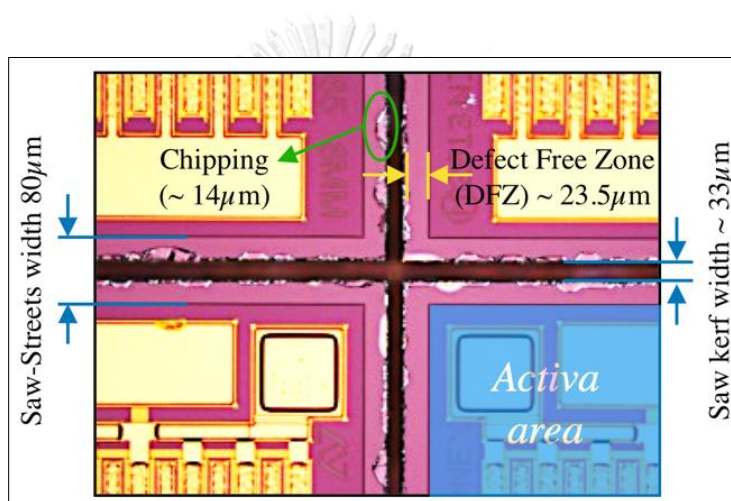
รูปที่ 1.3 จำนวนโคที่มากขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์มีผลทำให้ขนาดพื้นที่ทางตัดแคบลง

โรงงานหลายแห่งที่รับจ้างผลิตสินค้าให้กับบริษัทที่จะไปขายในแบรนด์ของตัวเอง (Original Equipment Manufacturer, OEM) รับมือกับสถานการณ์นี้ด้วยเทคโนโลยีการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยเลเซอร์ (Laser dicing) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีแบบใหม่ที่มีค่าใช้จ่ายในด้านของการลงทุนที่สูงมาก โรงงานหลายแห่งในประเทศไทยจึงยังไม่พร้อมลงทุนกับเทคโนโลยีนี้ จึงกลายเป็นที่มาว่าโรงงานที่ยังไม่พร้อมจะลงทุนกับเทคโนโลยีการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยเลเซอร์จะสามารถรับมือกับการตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษและพื้นที่ทางตัดแคบได้อย่างไร โดยใช้เครื่องจักรหรือเทคโนโลยีเดิมที่มีอยู่ ซึ่งคือการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชรที่กระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Sawing Process)



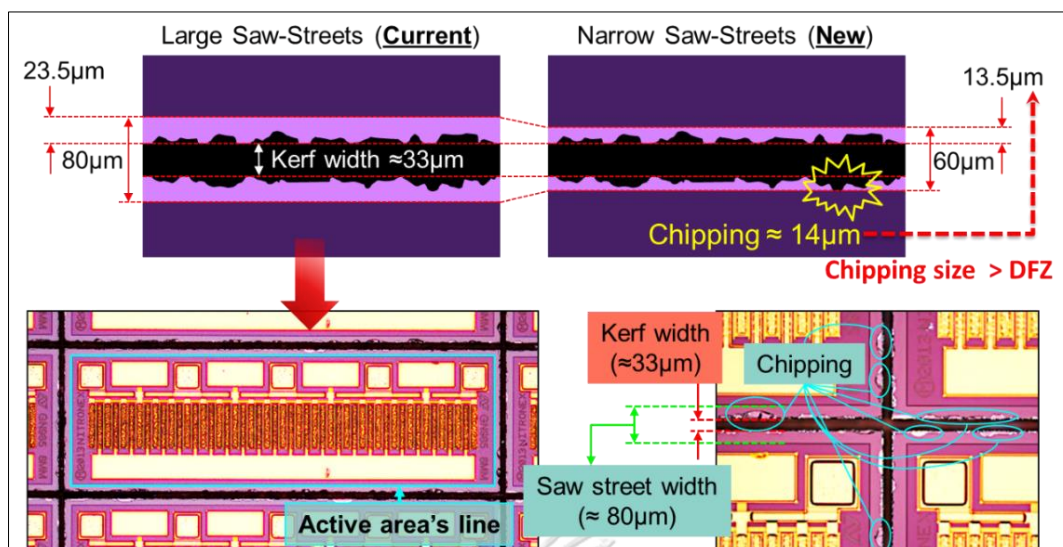
รูปที่ 1.4 เทคโนโลยีการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชรและการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยเลเซอร์

เวเฟอร์ชนิดบางพิเศษที่ถูกตัดด้วยใบมีดผงเพชรของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน มีความกว้างของพื้นที่ทางตัด (Saw streets width) อยู่ที่ประมาณ 80 ไมโครเมตร ซึ่งถือว่าเป็นพื้นที่ทางตัดขนาดกว้าง โดยมีค่าเฉลี่ย (Means) ของความกว้างรอยบิ่น (Width of Chipping) ที่ด้านผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ (Topside wafer) อยู่ประมาณ 14 ไมโครเมตร เนื่องจากค่าเฉลี่ยของความกว้างร่องตัด (Kerf width) ของใบมีดผงเพชรมีขนาดประมาณ 33 ไมโครเมตร ทำให้เหลือพื้นที่ปลอดข้อบกพร่อง (Defect Free Zone, DFZ) อยู่ประมาณ 23.5 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดกว้างกว่าความกว้างรอยบิ่น ทำให้ไม่เกิดปัญหาทางด้านคุณภาพ ดังแสดงตามรูปที่ 1.5



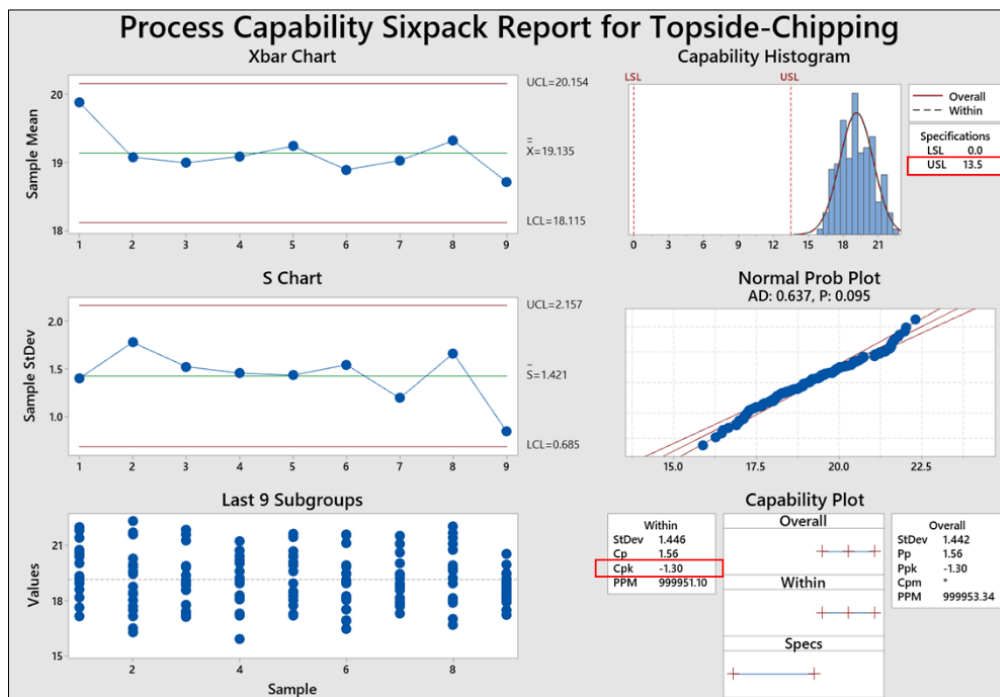
รูปที่ 1.5 ขนาดพื้นที่ทางตัดในปัจจุบันที่มีพื้นที่ปลอดข้อบกพร่องกว้างกว่าขนาดรอยบิ่น

ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นว่าบริษัทหลายแห่งมีความสนใจในการเพิ่มจำนวนไดต่อแผ่นเวเฟอร์ (Die per wafer, DPW) ให้มากขึ้น เพื่อลดต้นทุนการผลิต จึงส่งผลให้พื้นที่ทางตัดมีขนาดแคบลง โรงงานในกรณีศึกษาได้รับความท้าทายนี้เช่นกัน โดยลูกค้าจะเริ่มใช้แผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษที่ถูกลดขนาดความกว้างของพื้นที่ทางตัดให้แคบลง ซึ่งจากเดิมที่มีพื้นที่ทางตัดกว้าง 80 ไมโครเมตร จะถูกลดให้เหลือ 60 ไมโครเมตร ส่งผลให้บริเวณพื้นที่ปลอดข้อบกพร่องมีขนาดแคบลงจนเหลือเพียง 13.5 ไมโครเมตร เมื่อใช้ค่าขนาดร่องการตัด (Kerf width) เท่ากับ 33 ไมโครเมตร ทำให้ไม่สามารถใช้พารามิเตอร์ปัจจุบันที่ให้ขนาดความกว้างเฉลี่ยของรอยบิ่นประมาณ 14 ไมโครเมตร ในการตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดใหม่ได้ ดังแสดงตามรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 เปรียบเทียบขนาดพื้นที่ปลอดข้อบกพร่องและพื้นที่ทางตัดแบบเก่าและใหม่

เมื่อศึกษาดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) โดยประยุกต์ขอบเขตของข้อกำหนดด้านบน (Upper specification limit, USL) ตามขนาดพื้นที่ปลอดข้อบกพร่อง (DFZ) แบบใหม่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 13.5 ไมโครเมตร โดยจะเห็นว่าค่า C_{pk} มีค่าเท่ากับ -1.30 นั้นหมายความว่าค่า C_{pk} ของกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ในปัจจุบัน (ก่อนการปรับปรุงกระบวนการ) มีค่าต่ำกว่า 1.25 ที่เป็นเกณฑ์การยอมรับด้านเดียว (Montgomery, 2009) โดยแปลความหมายได้ว่าค่าเฉลี่ย (Means) ของขนาดความกว้างของรอยบิ่น (Width of Chipping) ที่กระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ มีความเบี่ยงเบนออกไปจากค่าเป้าหมาย (Target) และขอบเขตของข้อกำหนด (Specification) เป็นอย่างมาก จึงควรปรับปรุงกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ เพื่อให้ค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยบิ่นเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย และอยู่ในขอบเขตของข้อกำหนดมากขึ้น ดังแสดงตามรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) โดยใช้ขอบเขตของข้อกำหนดด้านบน 13.5

การประยุกต์ใช้แนวทางของเทคนิคซิกซ์ซิกมาในการปรับปรุงหรือพัฒนากระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการลดขนาดของรอยบิ่นตามขอบเขตของข้อกำหนดที่ลูกค้าต้องการ นั่นคือการปรับลดขอบเขตของข้อกำหนดด้านบน (Upper Specification Limit, USL) จาก 23.5 ไมโครเมตร ให้เหลือเพียง 13.5 ไมโครเมตร ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพการในตัดแผ่นเวเฟอร์จำเป็นต้องทำให้ขนาดความกว้างของรอยบิ่นที่ด้านหน้าของแผ่นเวเฟอร์มีขนาดเล็กมากกว่าพื้นที่ทางตัดหรือขอบเขตของข้อกำหนดด้านบน 13.5 ไมโครเมตร โดยเริ่มจากการกำหนดปัญหา, วิเคราะห์สภาพกระบวนการในปัจจุบันและระบบการวัด, วิเคราะห์ข้อมูลของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อค่าตอบสนอง, การออกแบบการทดลองที่ช่วยให้เห็นความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆเพื่อนำไปสู่การปรับปรุงอย่างมีประสิทธิภาพ, การพยากรณ์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม Minitab, และการออกแบบการควบคุมกระบวนการผลิตเพื่อไม่ให้กลับมาเจอปัญหาซ้ำเดิมได้อีก ซิกซ์ซิกมาจึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการปรับปรุงคุณภาพการผลิตของงานวิจัยฉบับนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ลดขนาดความกว้างของรอยบิ่น (Chipping) ของแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ 50 ไมโครเมตร (Ultra-Thin wafer 50 μ m) และพื้นที่ทางตัดแคบ 60 ไมโครเมตร (Narrow Saw-Streets 60 μ m) ที่กระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชร (Wafer Sawing Process) เพื่อทำการเพิ่มดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ของความกว้างจากการบิ่น โดยจะให้มีความมากกว่า 1.25 สำหรับกระบวนการที่เป็นอยู่ปัจจุบัน (Existing process) ซึ่งเป็นค่าขั้นต่ำที่แนะนำสำหรับความสามารถของกระบวนการที่มีข้อกำหนดด้านเดียว (Montgomery, 2009) ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ค่าขั้นต่ำที่แนะนำสำหรับดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ

สถานการณ์ (Situation)	ระดับ คุณภาพ (Sigma Level)	ค่าขั้นต่ำที่แนะนำสำหรับ ความสามารถของกระบวนการที่มี ข้อกำหนดสองด้าน	ค่าขั้นต่ำที่แนะนำสำหรับ ความสามารถของกระบวนการที่มี ข้อกำหนดด้านเดียว
กระบวนการที่เป็นอยู่ (Existing process)	4.0	1.33	1.25
กระบวนการใหม่ (New process)	4.5	1.50	1.45
ความปลอดภัยหรือ พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับ กระบวนการที่มีอยู่ (Safety or critical parameter for existing process)	4.5	1.50	1.45
ความปลอดภัยหรือ พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับ กระบวนการใหม่ (Safety or critical parameter for new process)	5.0	1.67	1.60
กระบวนการคุณภาพ 6 ซิกซ์ ม่า (Six Sigma quality process)	6.0	2.00	2.00

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1) งานวิจัยฉบับนี้จะศึกษาเฉพาะขนาดของรอยบิ่น ที่พื้นผิวด้านหน้าของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ (Silicon Wafer) เท่านั้น

1.3.2) งานวิจัยฉบับนี้จะศึกษาขนาดรอยบิ่นเฉพาะแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ 50 ไมโครเมตร ที่กระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ของโรงงานกรณีศึกษาเท่านั้น

1.3.3) กำหนดตัวแปรควบคุม ได้แก่ เครื่องตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีด (DISCO DFD6530), ชนิดของแผ่นเวเฟอร์ (Silicon wafer), และเทปสำหรับใช้ติดแผ่นเวเฟอร์ (Nitto SPV-224) เพื่อทำการตัดแผ่นเวเฟอร์

1.3.4) กำหนดตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความหนาของใบมีดผงเพชร (Blade thickness) มีหน่วยเป็นไมโครเมตร, ความเร็วรอบตัด (Spindle speed) มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที, ความเร็วการป้อนตัด (Feed speed) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อวินาที, และตัวแปรสุดท้ายคือความสูงใบมีดขณะตัด (Blade height) มีหน่วยเป็นไมโครเมตร

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยตามแนวทางของวิธีซิกซ์ซิกม่านั้นจะประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนที่สำคัญ หรือเป็นขั้นตอนที่รู้จักในชื่อของ DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) ซึ่งโดยแต่ละขั้นตอนนี้จะมีรายละเอียดปลีกย่อยต่างๆดังต่อไปนี้

1.4.1) ระยะเวลาในการนิยามถึงปัญหา (Define phase)

- กำหนดเหตุผลทางธุรกิจ (Business case)
- การบรรยายปัญหา (Problem statement)
- กำหนดตัวชี้วัดโครงการ (Project metrics)
- แถลงการณ์วัตถุประสงค์ (Objective statement)
- ขอบเขตของงานวิจัย (Project scope)
- ข้อจำกัดของงานวิจัย (Project constraints)
- การสนับสนุนที่ควรจะได้รับ (Project assumptions)
- สมาชิกผู้ร่วมทำการวิจัย (Team member)
- ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย (Project timeline)

1.4.2) ระยะในการวัดและการเก็บข้อมูลเพื่อหาสภาพของปัญหา (Measure phase)

- วิเคราะห์ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของระบบการวัด (MSA, 2010) โดยจะวิเคราะห์ความเอนเอียง, ความเป็นเส้นตรง, ความมีเสถียรภาพ, ความสามารถในการทวนซ้ำและทำซ้ำ
- การวิเคราะห์สาเหตุที่เป็นไปได้ของปัญหาจากกระบวนการผลิต (Potential KPIVs)
- การศึกษาความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis)

1.4.3) ระยะการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analysis phase)

- วิเคราะห์ข้อมูลของสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมดและระบุสาเหตุของปัญหาโดยใช้เครื่องมือทางสถิติ เช่น การทดสอบสมมุติฐาน, การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อการทดสอบนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้า
- ทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) สำหรับปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญ

1.4.4) ระยะการปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improvement phase)

- ทำการทดลองสำหรับปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญเพื่อหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อขนาดความกว้างที่น้อยที่สุดของรอยบิน
- สร้างผลของชุดปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ความกว้างของรอยบินมีขนาดเล็กมากที่สุด เพื่อเลือกไปทดสอบเพื่อยืนยันผลอีกครั้ง

1.4.5) ระยะการติดตามผลและการควบคุม (Control phase)

- ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง โดยใช้ค่าการปรับจากระยะการปรับปรุงแก้ไขปัญหา เพื่อยืนยันผลการทดลองว่าชุดค่าการปรับที่ได้มาสามารถตอบสนองต่อจุดประสงค์ของการทดลองครั้งนี้ได้
- สร้างแผนควบคุม (Control chart) เพื่อกำหนดมาตรฐานการตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ 50 ไมโครเมตร และพื้นที่ทางตัดแคบ 60 ไมโครเมตร
- สร้างผลการวิจัย
- จัดทำรูปเล่มงานวิจัยเพื่อเตรียมนำเสนอต่อไป

6. ระยะเวลาติดตามผลและ การควบคุม											
7. สรุปผลการวิจัย											
8. เรียบเรียงบทความ											
9. นำเสนอผลงานวิจัยใน งานประชุมวิชาการระดับ นานาชาติ											
10. เพิ่มเติมแก้ไขบทความ											
11. นำเสนอผลงานวิจัยใน การสอบป้องกัน											
12. จัดทำรูปเล่ม วิทยานิพนธ์											

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงงานวิจัยและทฤษฎีทางด้านซิกส์ซิกมาที่นำมาประยุกต์ใช้กับการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชร เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาสาเหตุของความกว้างของขนาดรอยบิ่นบนตัวโดตามหลักการของซิกส์ซิกมา และยังประกอบไปด้วยความรู้เชิงเทคนิคในกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆดังต่อไปนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการลดขนาดความกว้างของรอยบิ่นในกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์โดยใช้แนวทางของซิกส์ซิกมานั้นมีอยู่หลายงานวิจัยด้วยกัน ซึ่งจะกล่าวไปในแนวทางเดียวกันคือการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการโดยผ่าน 5 ขั้นตอนสำคัญ ซึ่งก็คือ DMAIC ดังที่ระบุไว้ดังนี้

1. D = ระยะในการนิยามถึงปัญหา (Define phase)
2. M = ระยะการวัดและการเก็บข้อมูลเพื่อหาสภาพของปัญหา (Measure phase)
3. A = ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis phase)
4. I = ระยะการปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improvement phase)
5. C = ระยะการติดตามผลและการควบคุม (Control phase)

ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะมีเครื่องมือทางสถิติเข้ามาช่วยสนับสนุนการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ, มีประสิทธิภาพ, และมีความน่าเชื่อถือ ยกตัวอย่างเช่นงานวิจัยเรื่องของ “High speed dicing of silicon wafers conducted using ultrathin blades (Hongxiu Zhou, 2012)” ที่ได้ทำการศึกษากการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชรชนิดต่างๆ โดยมีเทคนิคของการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เข้ามาช่วยสนับสนุนการดำเนินการวิจัย โดยทดลองตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชรที่มีลักษณะความแข็งของวัสดุหรือสารยึดผงเพชรให้คงรูปอยู่ได้ที่แตกต่างกัน, ระดับความลึกการตัด (Cut depth) ที่แตกต่างกัน, และระดับความเร็วป้อนตัด (Feed speed) ที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยสารยึดผงเพชรประเภทอ่อนนุ่ม (Soft bond) จะสร้างความกว้างของขนาดรอยบิ่นได้น้อยกว่าใบมีดผงเพชรที่มีสารยึดผงเพชรประเภทแข็ง (Hard bond), การตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยความเร็วรอบตัด 40,000 รอบ/นาที (Spindle speed, RPM) ของใบมีดผงเพชร จะสร้างขนาดรอยบิ่นได้น้อยกว่าการตัดด้วยความเร็วรอบตัด 30,000 รอบ/นาที โดยที่ใบมีดผงเพชรแบบสารยึดผงเพชรประเภทแข็งจะ

สร้างขนาดรอยบิ่นได้น้อยกว่าใบมีดผงเพชรแบบสารยึดผงเพชรประเภทอ่อนนุ่ม ณ ที่ความเร็วรอบสูง , และการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยความเร็วป้อนตัดสูง 10 มิลลิเมตร/วินาที (Feed speed, mm/s) จะสร้าง ความกว้างของขนาดของรอยบิ่นมากกว่าการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยความเร็วป้อนตัดต่ำ 2 มิลลิเมตร/วินาที จากงานวิจัยฉบับนี้ ทำให้บริษัทได้ทราบถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่อแผ่นเวเฟอร์ ที่ใช้อยู่ในบริษัทซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการปรับตั้งค่าในการตัดและสามารถลดโอกาสในการเกิดของเสียต่อแผ่นเวเฟอร์ได้

อีกหนึ่งตัวอย่างคืองานวิจัยเรื่อง “Mechanical Dicing Challenges and Development on 50 μ m Saw Street with Wafer Backside Coating (Y.H. Chiew, 2018)” ซึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความท้าทายในการตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดหนา 280 ไมโครเมตร โดยที่แผ่นเวเฟอร์ได้ผ่านการเคลือบสารที่ด้านหลัง (Wafer Backside Coating, WBC) มาแล้ว และมีความกว้างของพื้นที่ทางตัด (Saw street) แคบเพียง 50 ไมโครเมตร โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เข้ามาช่วยสนับสนุนการดำเนินการวิจัย โดยได้ทดลองตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชรที่มีขนาดผงเพชร (Diamond grit size / Mesh size) แตกต่างกัน, ความเข้มข้นหนาแน่นของผงเพชร (Concentration) แตกต่างกัน, และ ชนิดของสารยึดผงเพชร (Bond type) ที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการวิจัยทำให้ทราบว่าผงเพชรที่มีขนาดเล็กจะสร้าง ความกว้างของขนาดรอยบิ่นบนแผ่นเวเฟอร์ได้น้อยกว่าผงเพชรที่มีขนาดใหญ่, ความเข้มข้นหนาแน่นของผงเพชรสูง (High Concentration) จะสร้าง ความกว้างของขนาดรอยบิ่นได้น้อยกว่าความเข้มข้นหนาแน่นของผงเพชรต่ำ (Low Concentration), และการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยสารยึดผงเพชรประเภทอ่อนนุ่ม (Soft bond) จะสร้าง ความกว้างของขนาดรอยบิ่นได้น้อยกว่าใบมีดผงเพชรที่มีสารยึดผงเพชรประเภทแข็ง (Hard bond) ซึ่งผู้ทำวิจัยฉบับนี้ได้นำค่าของการปรับที่เหมาะสม (Suitable setting parameter) ที่ได้มาจากการทดลองและจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิต จนทำให้ค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการผลิตหรือเรียกว่าค่า C_{pk} มีค่าสูงมากกว่า 2 ซึ่งเกินระดับที่ได้กำหนด ($C_{pk} \geq 1.33$) ไว้ จึงถือว่าการปรับปรุงกระบวนการผลิตนี้บรรลุวัตถุประสงค์ของผู้ทำวิจัย

ผลงานวิจัยเรื่อง “การประยุกต์ใช้ซิกส์ซิกมาในการลดข้อบกพร่องจากการบิ่นของผลิตภัณฑ์ วงจรรวม (Kulpiya, 2013)” ที่ได้ใช้วิธีการทางซิกส์ซิกมาเข้ามาทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์วงจรรวม เนื่องจากเจอปัญหาค่าความกว้างของรอยบิ่นบนตัวงานมีค่าเบี่ยงเบนออกนอกค่าการยอมรับ โดยมีดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ หรือ C_{pk} เท่ากับ 0.66 ซึ่งได้ประยุกต์ใช้เทคนิคเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (2^{k-1} Fractional Factorial Design) ในการออกแบบการทดลอง

เพื่อระบุปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อความกว้างของขนาดรอยบิ่นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิของน้ำ, แรงดันของน้ำ, และความเร็วในการตัด โดยที่ในขั้นตอนของการปรับปรุงแก้ไขปัญหา ผู้ท้าววิจัยได้เลือกเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box Behnken Design) โดยที่วิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design, RSM) เพื่อระบุค่าการปรับที่ดีที่สุดของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อความกว้างของขนาดรอยบิ่น ซึ่งจะส่งผลให้ความกว้างของขนาดรอยบิ่นมีขนาดที่เล็กลง การตั้งค่าการปรับ (Setting parameter) เหล่านี้จะประกอบไปด้วย อุณหภูมิของน้ำ 10 องศาเซลเซียส, แรงดันของน้ำ 2 ลิตรต่อวินาที, และสุดท้ายคือความเร็วในการตัดที่มีค่าเท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งผลที่ได้รับหลังจากได้ผ่านการปรับปรุงตามแนวทางของซิกส์ซิกมาแล้ว ค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ได้เพิ่มสูงขึ้นมาก โดยที่ค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุงอยู่ที่ 1.44 ซึ่งมีความมากกว่าเกณฑ์การยอมรับด้านเดียวที่ 1.25 (Montgomery, 2009) จึงถือว่าการปรับปรุงในกระบวนการผลิตนี้ประสบความสำเร็จ

อีกหนึ่งผลงานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการตัดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ ก็คือผลงานวิจัยเรื่อง “อิทธิพลของปัจจัยการตัดซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีต่อรอยร้าว (Kalaphakdee, 2014)” ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้ความรู้และเทคนิคทางการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เข้ามาสนับสนุนการดำเนินการวิจัย โดยสนใจการตอบสนองของผลวิจัยคือจำนวนชิ้นงานที่มีรอยแตกร้าวหลังจากที่เสร็จสิ้นกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งทางผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 3 ปัจจัยที่แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ ความเร็วการตัด V (1,697.00, 3,394.00, และ 5,091.00 เมตร/นาที ตามลำดับ), อัตราการป้อนตัด F (0.03, 0.06, และ 0.09 เมตร/นาที), และ ความลึกในการตัด D (150, 200, และ 250 ไมโครเมตร) หลังจากนั้นทำการทดลองตัดแผ่นเวเฟอร์ตามปัจจัยข้างต้น ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัยนั้น มีผลต่อจำนวนชิ้นงานที่มีรอยแตกร้าว โดยมีสมการความสัมพันธ์ที่ว่า $Y = 2.9(D)^2 + 4.7(V)^2 + 5.29(V)(F) - 1.06(V) - 0.03(D) + 4.08(F) + 11.89$ โดยมีเงื่อนไขของการตัดที่ $V=3,394$ เมตร/นาที, $F=0.03$ เมตร/นาที, และ $D=200$ ไมโครเมตร โดยที่ผลการทดลองพบว่าส่งผลให้มีจำนวนงานที่มีรอยแตกร้าวน้อยที่สุดเท่ากับ 6.80% ของชิ้นงานตัดทั้งหมด โดยที่สามารถลดต้นทุนของวัตถุดิบของกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์มากถึง 62.62% (ลดลงเหลือ 1.94 ล้านบาท/ปี จาก 5.19 ล้านบาท/ปี) และมีสัดส่วนของชิ้นงานที่ดีเพิ่มขึ้นเป็น 92.0% จึงถือว่าประสบความสำเร็จ

จากข้อมูลงานวิจัยดังที่ได้ยกตัวอย่างไปข้างต้น พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความกว้างของรอยบิ่นในกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชรมีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก นั่นคือปัจจัยที่ส่งผลต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์จะประกอบไปด้วย ความเร็วรอบตัด (Spindle

speed), ความเร็วป้อนตัด (Feed speed), ชนิดของใบมีดผงเพชรที่ใช้ (Diamond blade), และความลึกในการตัด (Cut dept) รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันมากเช่นกัน นั่นคือ เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design Of Experiment, DOE), เทคนิควิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design, RSM), และ เทคนิคการปรับปรุงกระบวนการผลิต ด้วยแนวทางของซิกส์ซิกมา (Six Sigma Approach)

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (ซิกส์ซิกมา)

งานวิจัยฉบับนี้มีความตั้งใจที่จะศึกษาในเรื่องของการปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการผลิต โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเข้ามาสนับสนุนการดำเนินงานวิจัย ทฤษฎีและหลักการซิกส์ซิกมาจึงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมกับความตั้งใจศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้ โดยที่รายละเอียดของซิกส์ซิกมาสามารถกล่าวได้ดังนี้

ซิกส์ซิกมา คือ วิธีในการปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการใดๆที่มุ่งเน้นให้เกิดการลดลงของความไม่แน่นอนของกระบวนการ หรือ Variation และยังมุ่งเน้นให้ค่าเฉลี่ยของกระบวนการอยู่ในขอบเขตของการควบคุม ส่งผลให้การตอบสนองของกระบวนการอยู่ใกล้กับค่าเป้าหมายมากที่สุด และเกิดความไม่แน่นอนของกระบวนการน้อยที่สุด ส่งผลให้เกิดของดีในกระบวนการผลิตได้มากที่สุด อาจกล่าวได้ว่าซิกส์ซิกมาเป็นการบริหารที่มุ่งเน้นในการลดความผิดพลาด ลดความสูญเปล่า และลดการแก้ไขตัวชิ้นงาน ซึ่งวิธีการทางซิกส์ซิกมาจะเห็นผลตอบสนองได้ดีที่สุดก็ต่อเมื่อได้รับความร่วมมือที่ดีจากหลายๆฝ่ายในองค์กร โดยเริ่มตั้งแต่ทางคณะผู้บริหารระดับสูงไปจนถึงพนักงานผู้ปฏิบัติงาน เนื่องจากเป็นวิธีที่ต้องการความร่วมมือกันของพนักงานหรือจากบุคคลจากหลายๆฝ่ายให้เกิดความตั้งใจที่จะปรับปรุง จึงได้มีการกำหนดแนวทางต่างๆ เช่น การสื่อสาร, นโยบาย, การกระจายนโยบาย, แรงจูงใจ, และการจัดสรรทรัพยากรให้เหมาะสม เพื่อให้การปรับปรุงที่มีความตั้งใจจะทำได้ ดำเนินการเป็นไปอย่างมีระบบและเกิดความต่อเนื่อง โดยการใช้วิธีทางซิกส์ซิกมาค่อนข้างมีรายละเอียดที่สำคัญในแต่ละขั้นตอน การมีความรู้ที่เพียงพอต่อการปรับปรุงและการมีผู้เชี่ยวชาญคอยให้คำปรึกษาจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้การดำเนินการปรับปรุงเกิดความผิดพลาดน้อยมากที่สุด ซึ่งในตารางที่ 2.1 ได้แสดงให้เห็นถึงจำนวนของเสียในแต่ละระดับของซิกส์ซิกมาเมื่อเทียบกับหนึ่งล้านชิ้น จะเห็นว่ายิ่งกระบวนการมีความแปรปรวนน้อยมากเท่าไรจะยิ่งทำให้ของเสียมีจำนวนน้อยมากเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์การวัดระดับคะแนนของซิกส์ซิกมา

ขอบเขตของคุณสมบัติ	เปอร์เซ็นต์	จำนวนของเสีย/หนึ่งล้านชิ้น
±1 Sigma	30.23	697,700
±2 Sigma	69.13	308,700
±3 Sigma	93.32	66,810
±4 Sigma	99.379	6,210
±5 Sigma	99.9767	233
±6 Sigma	99.99966	3.4

โดยที่กลยุทธ์ในการบรรลุเป้าหมายของซิกส์ซิกมาจะประกอบไปด้วย 5 ระยะการดำเนินการที่สำคัญดังที่จะได้กล่าวในต่อไปนี้

2.2.1) ระยะในการกำหนดปัญหา (Define phase)

คือระยะในการกำหนดปัญหาหรือกระบวนการที่ต้องการจะปรับปรุง โดยจะมีการกำหนดปัญหาและเป้าหมายอย่างชัดเจนในการดำเนินงาน โดยที่ในระยะนี้จะเริ่มมีการจัดทำสัญญาโครงการ (Project Charter) ซึ่งเป็นเอกสารสำคัญที่กำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์ของโครงการ โดยจะมีระยะเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของโครงการที่แน่นอน เป็นสัญญาหลักระหว่างผู้สนับสนุนโครงการและทีมงาน โดยช่วยให้เห็นถึงสิ่งที่คาดหวังของทีม ทำให้ทีมมีจุดมุ่งหมายที่ชัดเจนและมีความเข้าใจที่ตรงกันถึงลำดับความสำคัญของกระบวนการ (Kennedy, 2019) โดยรายละเอียดของสัญญาโครงการจะประกอบไปด้วยหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.2.1.1) กำหนดเหตุผลทางธุรกิจ (Business case): คือข้อความที่จะบอกถึงความสำคัญของโครงการนี้ ว่าส่งผลดีต่อธุรกิจของบริษัทได้อย่างไร หรือว่ามีผลเสียอย่างไรถ้าหากไม่ได้ทำ

2.2.1.2) การบรรยายปัญหา (Problem statement): คือข้อความที่จะอธิบายถึงปัญหาว่า อะไรเป็นปัญหา เป็นปัญหาอย่างไร โดยในข้อความที่บรรยายควรกล่าวถึงประเด็นสำคัญๆเกี่ยวกับเรื่องว่าปัญหาคืออะไร, แล้วเป็นปัญหาได้อย่างไร, ปัญหาเกิดขึ้นที่ใดหรือช่วงเวลาใด, และ เกิดของเสียหรือค่ารับมากน้อยเพียงใด ตัวอย่างของปัญหาที่พบเห็นส่วนใหญ่ก็คือ ข้อบกพร่อง (Defect), ของเสีย (Waste), อัตรา

ผลิตผลที่ต่ำ (Low yield), ผลผลิตตลอดกระบวนการต่ำ (Low throughput), สินค้าคงคลังสูง (High inventory), เครื่องจักรที่หยุดทำงานบ่อย (Machine stoppage), ต้นทุนการผลิตที่สูง (High cost), และการตรวจสอบที่มีมากเกินไปจนความจำเป็น (Over inspection)

2.2.1.3) กำหนดตัวชี้วัดโครงการ (Project metrics): เป็นการอธิบายถึงผลกระทบต่างๆที่อาจจะเกิดขึ้นกับธุรกิจของบริษัท (Business metrics), อธิบายถึงตัววัดหลักของความคืบหน้าของโครงการ (Primary metrics) เพื่อใช้เป็นตัวที่จะบอกในตอนสุดท้ายว่าโครงการนี้ประสบความสำเร็จหรือไม่, อธิบายถึงผลพลอยได้อันเนื่องมาจากการปรับปรุงตัววัดหลักของโครงการ (Secondary metrics), อธิบายผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นกับกระบวนการหลังจากการปรับปรุงตัววัดหลักของโครงการ (Consequential metrics) เช่น ถ้าแย่งกว่าเดิม เราสามารถยอมรับได้หรือไม่ (Mikel J. Harry, 2007)

2.2.1.4) อธิบายถึงตัวชี้วัดหลักของโครงการหรืออธิบายถึงเป้าหมายของโครงการที่อยากจะทำ (Objective Statements) โดยที่การกำหนดเป้าหมายตามแนวทางของซิกส์ซิกมานั้นควรลดของเสียหรือดีขึ้นจากเดิม 70% โดยประมาณ โดยอ้างอิงจากข้อมูลเฉลี่ยในอดีต (Baseline) และจุดที่ดีที่สุดที่เราเคยทำได้ (Entitlement)

2.2.1.5) อธิบายถึงขอบเขตของโครงการ (Project scope) โดยสามารถมองได้ทั้งในแง่ของเวลาหรือสถานที่หรืออื่นๆ

2.2.1.6) ข้อจำกัดของงานวิจัย (Project constraints) เช่น คน, เงิน, เวลา

2.2.1.7) การสนับสนุนที่ควรได้รับ (Project assumptions) เช่น ผู้เชี่ยวชาญหรือผู้สนับสนุนหลักควรเข้าร่วมประชุมกับทีมงานบ่อยเพียงใด, เมื่อทีมงานเจอปัญหาผู้บริหารหรือผู้สนับสนุนหลักจะช่วยเหลือได้มากน้อยเพียงใด, อิสระของทีมงานในการปรับใช้วิธีการต่างๆ

2.2.1.8) สมาชิกผู้ร่วมทำการวิจัย (Team member)

2.2.1.9) ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย (Project timeline) เพื่อเป็นตัวบอกระยะเวลาของการดำเนินงานของโครงการให้เห็นภาพรวม

2.2.2) ระยะเวลาในการวัดและการเก็บข้อมูลเพื่อหาสภาพของปัญหา (Measure phase)

มีการวิเคราะห์สาเหตุที่เป็นไปได้ของปัญหาจากกระบวนการผลิต (Potential KPIVs) และเป็นขั้นตอนการในวัดความสามารถของกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงในปัจจุบัน (Process Capability Analysis, PCA) เพื่อให้เข้าใจถึงสภาพที่แท้จริงของกระบวนการในปัจจุบันว่าเป็นอย่างไร, การเลือกใช้เครื่องมือในการวัดที่เหมาะสมรวมถึงการทดสอบเครื่องมือวัดว่ามีความน่าเชื่อถือและไม่มีความผิดพลาดก่อนที่จะเริ่มทำงาน (Measurement System Analysis, MSA) ซึ่งสำคัญอย่างมาก โดยในส่วนของ การประเมินความสามารถของกระบวนการนั้นประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ความเสถียรภาพของกระบวนการ (Stability), การวิเคราะห์ความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการที่ศึกษา (Potential Capability, C_p), รวมไปถึงการวิเคราะห์ความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการ (Performance Capability, C_{pk}) โดยจะอ้างอิงจากค่าแนะนำขั้นต่ำของดัชนี C_{pk} ตามตารางที่ 1.1

2.2.3) ระยะเวลาการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analysis phase)

เป็นขั้นตอนการในการวิเคราะห์ข้อมูลของสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมด (Potential KPIVs) สามารถใช้เครื่องมือต่างๆเช่น แผนภูมิก้างปลา (Fish Bond Diagram), ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram หรือ C&E Diagram), และการวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis หรือ FMEA) เข้ามาช่วยระบุปัจจัยนำเข้าที่เป็นไปได้ โดยใช้เครื่องมือทางสถิติเข้ามาช่วยสนับสนุนการวิเคราะห์ เช่นการตรวจสอบสมมติฐาน (Hypothesis testing), ผังการกระจาย (Scattering diagram), และการวิเคราะห์การถดถอย (Regression) เพื่อให้ช่วยสามารถระบุสาเหตุของปัญหา (KPIVs) ที่เชื่อมผลต่อปัจจัยหลักของกระบวนการ (KPOV)

2.2.4) ระยะเวลาการปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improvement phase)

เป็นขั้นตอนการในการปรับปรุงกระบวนการ โดยปรับการตั้งค่าตัวปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่กำหนดเอาไว้ โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เข้ามาช่วยสนับสนุนการดำเนินงานเพื่อทำการระบุปัจจัยนำเข้าหลักที่ส่งผลต่อการตอบสนองของกระบวนการที่สนใจ จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้เครื่องมือทางสถิติ

2.2.5) ระยะเวลาควบคุม (Control phase)

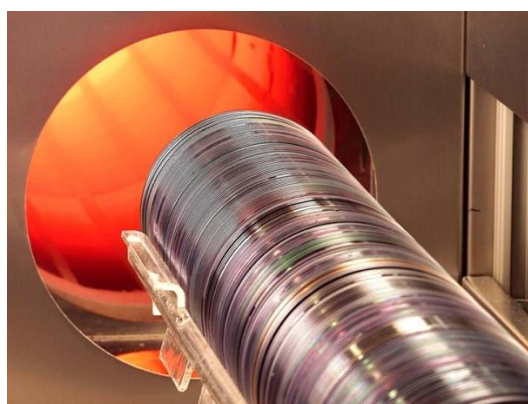
เป็นขั้นตอนการทำงานทดลองซ้ำอีกครั้งโดยใช้ค่าการปรับ (Setting Parameter) ที่ได้จากระยะที่แล้ว เพื่อยืนยันผลการทดลองว่าชุดค่าการปรับที่ได้มาสามารถตอบสนองต่อจุดประสงค์ของการทดลองครั้งนี้ได้ จากนั้นจะทำการออกแบบการควบคุมกระบวนการ (Control plan) เพื่อให้กระบวนการที่ถูกปรับปรุงขึ้นมาใหม่อยู่ในข้อจำกัดการยอมรับ และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาซ้ำเดิมเกิดขึ้น

2.3 ความรู้เบื้องต้นทางกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์

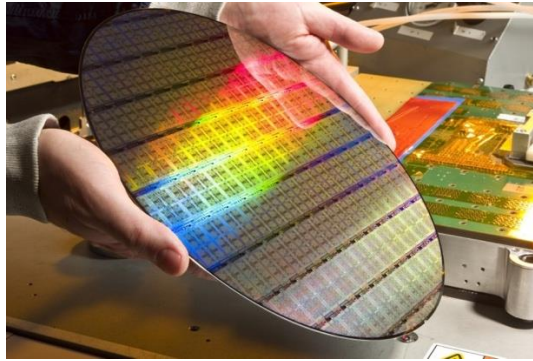
2.3.1) แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ (Silicon wafer)

คือแผ่นบางๆของธาตุสารกึ่งตัวนำ อย่างเช่น ผลึกซิลิกอน ซึ่งถูกใช้สำหรับการสร้างวงจรรวม (Integrated Circuits, IC) และใช้ในระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) โดยแผ่นเวเฟอร์ทำหน้าที่เป็นวัสดุฐานรอง (Substrate) สำหรับอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งแผ่นเวเฟอร์ได้ผ่านกระบวนการต่างๆมากมายแล้ว เช่น การโด๊ป (Doping), การยิงอะตอมที่มีประจุบวกและลบ (Ion implantation), กระบวนการเอชซิง (Etching), กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization), และ กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) จนได้มาเป็นชุดวงจรรขนาดเล็ก (Microcircuits) มากมายบนแผ่นเวเฟอร์ จากนั้นจะนำไปตัดแยกออกเป็นชิ้นในกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Sawing process) ต่อไป

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.1 ผลึกซิลิกอนที่ถูกหลอมด้วยความร้อนสูง จากนั้นนำมาตัดออกเป็นแผ่นบางๆ

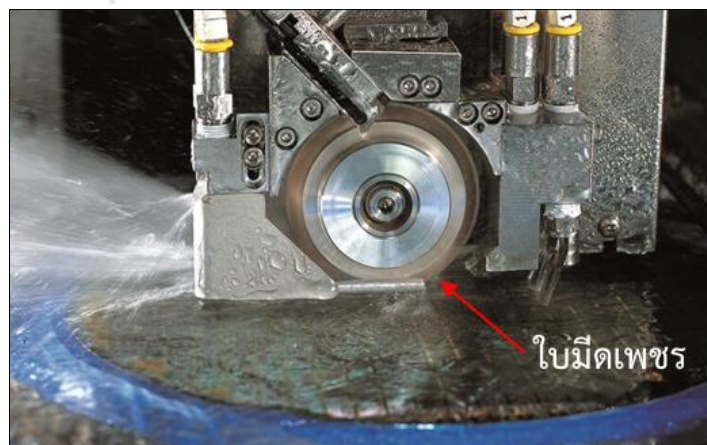


รูปที่ 2.2 แผ่นซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการต่างๆ จนเกิดเป็นชุดวงจรรวมขนาดเล็กมากมาย

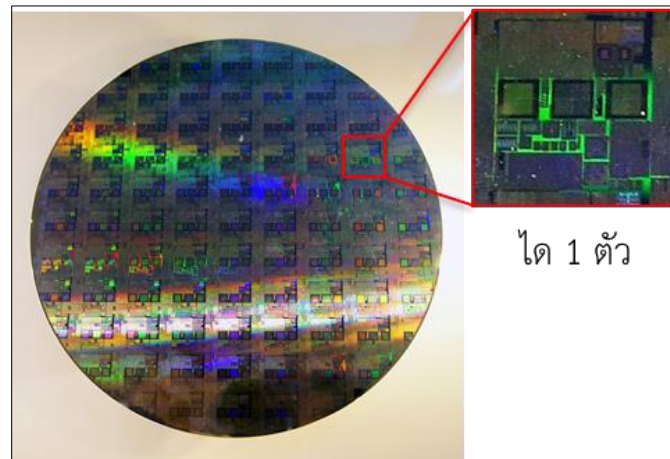
2.3.2) กระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Sawing process)

คือกระบวนการตัดแยกชุดวงจรรวมขนาดเล็ก (Microcircuits) บนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ ให้แยกจากกัน ซึ่งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์จะเรียกชุดวงจรรวมขนาดเล็กเหล่านี้ว่า “ได” (Die) ดังแสดงตามรูปที่ 2.4 ซึ่งการตัดแผ่นเวเฟอร์เพื่อให้ไดแต่ละตัวขาดออกจากกันนั้นจะใช้ใบมีดผงเพชร (Diamond blade) ในการตัด และตลอดเวลาในการตัดจะมีน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนต่างๆออกไปหมดแล้วซึ่งเรียกว่าน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized water, DI) คอยฉีดล้างทำความสะอาดอยู่บนพื้นผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ดังแสดงตามรูปที่ 2.3 จากนั้นเราจะได้อะไหล่จำนวนมากมายเพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการติดไดลงบน Lead-Frame ในขั้นตอนต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



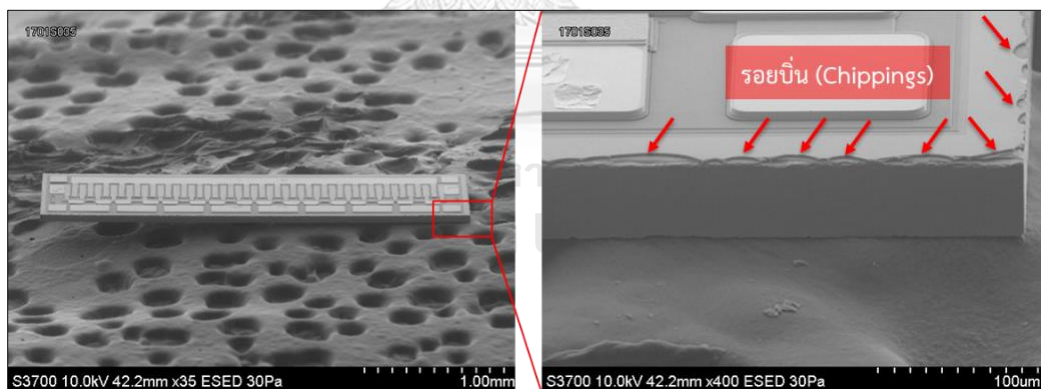
รูปที่ 2.3 แผ่นเวเฟอร์ที่กำลังถูกตัดด้วยใบมีดเพชรและมีน้ำปราศจากไอออนที่ฉีดล้างทำความสะอาด



รูปที่ 2.4 ไตจำนวนมากมายที่อยู่บนแผ่นเวเฟอร์จะถูกตัดแยกออกจากกันเป็นของใครของมัน

2.3.3) รอยบิ่นของตัวไดบนแผ่นเวเฟอร์ (Chippings)

คือร่องรอยของการบิ่นบนขอบไตทั้งสี่ด้านตรงบริเวณที่ใบมีดเพชรตัดผ่าน จากนั้นเกิดเป็นเศษชิ้นซิลิกอนขนาดเล็กที่แตกและหลุดออกจากตัวไตไป สามารถมองเห็นอย่างชัดเจนได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์หรือกล้องกำลังขยายสูงดังแสดงตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รอยบิ่นบนตัวไตความหนา 50 ไมโครเมตร จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

บทที่ 3

ระยะในการนิยามถึงปัญหา (Define Phase)

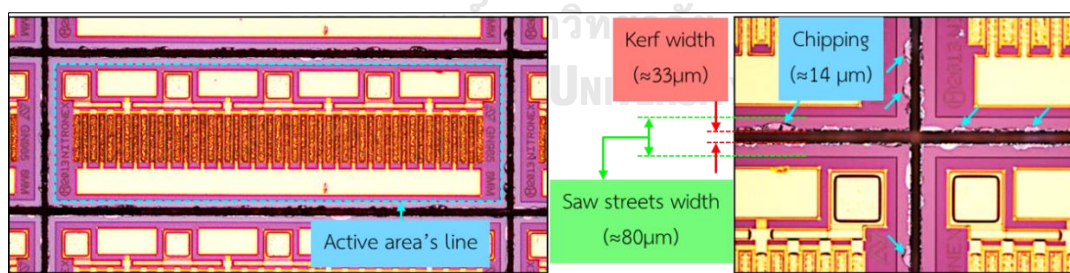
ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงขั้นตอนของการนิยามถึงสภาพปัญหา ซึ่งถือเป็นขั้นตอนแรกของการปรับปรุงคุณภาพกระบวนการผลิตตามแนววิธีการของซิกส์ซิกมา โดยจะกำหนดสัญญาโครงการ (Project Charter) ของงานวิจัยฉบับนี้ โดยที่สัญญาโครงการ คือเอกสารที่ใช้แสดงอย่างเป็นทางการถึงการเกิดขึ้นของโครงการนั้นๆ พร้อมทั้งบอกถึงทิศทางของวัตถุประสงค์และการบริหารโครงการ

3.1 กำหนดเหตุผลทางธุรกิจ (Business case)

บริษัทพลาสติกที่จะได้รับจากลูกค้าในการผลิตสินค้าแบบใหม่ ในกรณีของแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษที่มีพื้นที่ทางตัดแคบ ทำให้เกิดการสูญเสียโอกาสทางธุรกิจ

3.2 การบรรยายปัญหา (Problem statement)

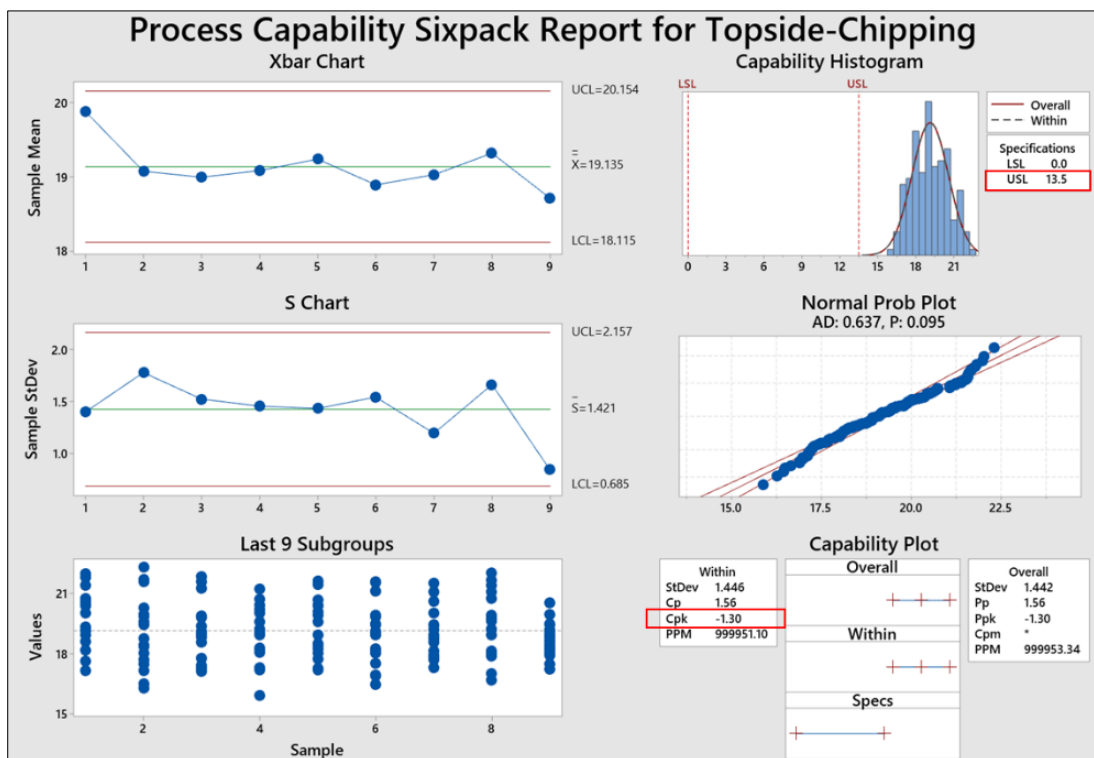
ในปัจจุบัน โรงงานในกรณีศึกษาได้มีโอกาสตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษที่มีพื้นที่ทางตัดกว้างขนาด 80 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยของขนาดความกว้างรอยบิ่นอยู่ที่ 14 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าพื้นที่ปลอดข้อบกพร่อง (Defect Free Zone, DFZ) ทำให้สามารถตัดแผ่นเวเฟอร์โดยไม่เกิดปัญหาดังแสดงตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษที่มีพื้นที่ทางตัดกว้างมากกว่าค่าเฉลี่ยของขนาดรอยบิ่น

เนื่องจากลูกค้าของบริษัทในกรณีศึกษามีความต้องการในการเพิ่มจำนวนไดต่อแผ่นเวเฟอร์ (Die Per Wafer, DPW) ให้มากขึ้น จึงส่งผลให้พื้นที่ทางตัดมีขนาดแคบลงจาก 80 ไมโครเมตร เหลือเพียง 60 ไมโครเมตร ซึ่งชุดพารามิเตอร์ปัจจุบันที่ใช้ตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษจะให้ค่าเฉลี่ยของความกว้างขนาดรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ที่ 14 ไมโครเมตร ทำให้ขนาดของรอยบิ่นมีความกว้าง

มากกว่าพื้นที่ปลอดข้อบกพร่อง (DFZ) ที่มีความกว้างเพียง 13.5 ไมโครเมตร จึงส่งผลให้ค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการมีค่าเพียง -1.30 เท่านั้นเมื่อใช้ขอบเขตของข้อกำหนดด้านบน (Upper Specification Limit, USL) ที่ 13.5 ไมโครเมตร ดังแสดงตามรูปที่ 3.2 ดังนั้นทางโรงงานการศึกษาจึงไม่สามารถประยุกต์ใช้ชุดพารามิเตอร์ปัจจุบันในการตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษที่มีความหนา 50 ไมโครเมตรและพื้นที่ทางตัดแคบ 60 ไมโครเมตร ได้อย่างมีคุณภาพ



รูปที่ 3.2 ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) โดยใช้ขอบเขตของข้อกำหนดด้านบนที่ 13.5

3.3 กำหนดตัวชี้วัดโครงการ (Project metrics)

ตัวชี้วัดของโครงการที่สำคัญ ประกอบไปด้วย 3 ตัวชี้วัดด้วยกัน ได้แก่ตัวชี้วัดหลัก (Primary metric) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่จะเป็นตัวบอกว่าโครงการนี้ประสบความสำเร็จไปตามเป้าหมายหรือไม่, ตัวชี้วัดรอง (Secondary metric) คือผลกระทบทางบวกที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อตัวชี้วัดหลักของโครงการถูกปรับปรุงไป, และตัวชี้วัดผลที่สืบเนื่อง (Consequential metric) ซึ่งเป็นผลกระทบทางลบที่อาจจะเกิดเมื่อตัวชี้วัดหลักของโครงการถูกปรับปรุง (Mikel J. Harry, 2007) โดยได้กำหนดตัวชี้วัดต่างๆดังนี้

- ตัวชี้วัดหลักของโครงการ (Primary metric) คือ ค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ของกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ โดยใช้ขีดจำกัดของข้อกำหนดพิเศษด้านบน (Upper Specification Limit, USL) ที่ 13.5 ไมโครเมตร
- ตัวชี้วัดรองของโครงการ (Secondary metric) คือ ผลกระทบทางบวกที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อทำการปรับปรุงตัวชี้วัดหลักของโครงการ โดยในงานวิจัยฉบับนี้มีตัวชี้วัดรองของโครงการคือ ค่าความแปรปรวนของกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ที่อาจจะลดลง
- ตัวชี้วัดผลที่สืบเนื่องของโครงการ (Consequential metric) คือ ผลกระทบทางลบที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อทำการปรับปรุงตัวชี้วัดหลักของโครงการ โดยในงานวิจัยฉบับนี้คือเวลาในการผลิต (Cycle time) ซึ่งในที่นี้คือเวลาที่ใช้ในการตัดแผ่นเวเฟอร์เสร็จสมบูรณ์ในหนึ่งแผ่น เนื่องจากมีปัจจัยนำเข้าบางปัจจัยที่นำมาพิจารณา (ความเร็วป้อนตัด) นั้นส่งผลต่อเวลาในการตัดแผ่นเวเฟอร์ จึงจำเป็นต้องพิจารณาเวลาในการตัดแผ่นเวเฟอร์ที่ใช้ในแต่ละแผ่นว่าใช้เวลาในการตัดต่อแผ่นมากขึ้นกว่าเดิมหรือไม่

3.4 แถลงการณ์วัตถุประสงค์ (Objective statement)

การปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการผลิต ในกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชร สำหรับเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ 50 ไมโครเมตร และพื้นที่ทางตัดแคบ 60 ไมโครเมตร เพื่อให้ค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่ามากกว่า 1.25 ตามคำแนะนำของเกณฑ์ยอมรับด้านเดียว ในกระบวนการที่มีอยู่ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ของบทที่ 1

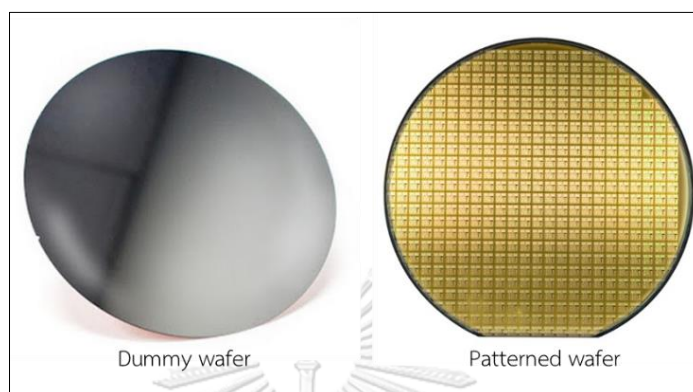
3.5 ขอบเขตของงานวิจัย (Project scope)

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาเฉพาะความกว้างของรอยบิ่นที่ด้านบน (Topside chipping) ของแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ 50 ไมโครเมตร ที่กระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชรเท่านั้น

3.6 ข้อจำกัดของงานวิจัย (Project constraints)

- งานวิจัยฉบับนี้จะศึกษารอยบิ่นเนื่องจากการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชร บนแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษที่ทำมาจากซิลิกอน โดยจะทำการทดลองบนตัวแทนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ (Dummy wafer) ที่มีความบางเท่ากับ 50 ไมโครเมตร เพื่อหาชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมก่อน จากนั้นจึงยืนยันผลด้วยแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ของจริงที่มีลายวงจรรวมเรียบร้อยแล้ว (Patterned wafer) ของลูกค้า เนื่องจากราคาของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์จริงนั้นมีมูลค่าสูงมาก

จนลูกค้าไม่สามารถลงทุนเพื่อการทดลองทั้งหมดตั้งแต่แรกเริ่มได้ จึงต้องใช้ตัวแทนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีโครงสร้างทางวัสดุเหมือนกับแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ของจริงจากลูกค้ามาทำการทดลองก่อน



รูปที่ 3.3 ตัวแทนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์และแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ของจริงที่มีลายวงจรรวมเรียบร้อยแล้ว

- การออกแบบการทดลองจะให้วัสดุที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันในโรงงานกรณีศึกษา เช่น เครื่องตัดแผ่นเวเฟอร์, เทปตัดแผ่นเวเฟอร์, และใบมีดผงเพชร โดยวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุที่มีใช้อยู่แล้วในกระบวนการผลิต ทั้งนี้ก็เพื่อหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง

3.7 การสนับสนุนที่ควรจะได้รับ (Project assumptions)

ได้รับการสนับสนุนเรื่องเครื่องมือในการทำงานวิจัยฉบับนี้จากทางโรงงานกรณีศึกษา เช่น เครื่องตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชร (Dicing saw machine), ใบมีดผงเพชร (Diamond blade), และ ตัวแทนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ (Dummy wafer) ที่มีความหนา 50 ไมโครเมตร

3.8 สมาชิกผู้ร่วมทำการวิจัย (Team member)

- ผู้จัดการฝ่ายผลิต (Production manager)
- ผู้จัดการฝ่ายซ่อมบำรุง (Maintenance manager)
- ผู้จัดการฝ่ายควบคุมกระบวนการผลิต (Process engineer manager)
- หัวหน้างานฝ่ายผลิต (Production supervisor)
- หัวหน้าช่าง (Technician supervisor)
- วิศวกรควบคุมกระบวนการผลิต (Process engineer)

- วิศวกรฝ่ายประกันคุณภาพ (QA Engineer)
- พนักงานฝ่ายผลิต (Production operator)

3.9 ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย (Project timeline)

ระยะเวลาของการดำเนินงานวิจัยในแต่ละขั้นตอนเป็นไปตามตารางที่ 1.2 ดังแสดงในบทที่ 1

3.10 สรุปประเด็นขั้นตอนของการนิยามปัญหา

ปัญหาของโรงงานในกรณีศึกษาคือ ลูกค้ามีความต้องการที่จะลดขนาดพื้นที่ทางตัด (Saw streets) ของแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ (Ultrathin wafer) ให้มีขนาดแคบลง จาก 80 ไมโครเมตร ให้เหลือเพียง 60 ไมโครเมตร โดยที่ขอบเขตของข้อกำหนดด้านบน (Upper Specification Limit) ซึ่งถูกกำหนดจากขนาดของพื้นที่ปลอดข้อบกพร่อง (Defect Free Zone) จะลดลงไปด้วย จาก 23.5 ไมโครเมตร เหลือเพียง 13.5 ไมโครเมตร จึงไม่สามารถใช้พารามิเตอร์ปัจจุบันเพื่อตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษที่มีพื้นที่ทางตัดแคบได้ เนื่องจากขนาดของค่าเฉลี่ยความกว้างของขนาดรอยบิ่นมีขนาด 14 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดของพื้นที่ปลอดข้อบกพร่อง จึงจำเป็นต้องลดขนาดของรอยบิ่นที่ผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ให้มีขนาดน้อยกว่าพื้นที่ปลอดข้อบกพร่อง และเป็นการปรับปรุงตัวดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ (C_{pk}) จากปัจจุบันที่มีค่า -1.30 ให้มีค่ามากกว่า 1.25 ซึ่งเป็นเกณฑ์ยอมรับด้านเดียว (One sided specification) ตามค่าแนะนำดังแสดงในตารางที่ 1.1

บทที่ 4

ระยะการวัดและการเก็บข้อมูลเพื่อหาสภาพของปัญหา (Measure phase)

เมื่อนิยามปัญหาเรียบร้อยแล้วจากบทที่แล้ว ในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์ปัญหาและการหาสาเหตุของปัญหาด้วยเครื่องมือคุณภาพและสถิติ โดยจะเป็นการหาสาเหตุของปัญหาที่น่าจะส่งผลกระทบต่อขนาดของรอยบินที่ผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ ซึ่งจะเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis) เพื่อให้มั่นใจว่าค่าที่วัดได้จากการทดลองในเรื่องของความกว้างของรอยบินที่ผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษจะมีค่าวัดที่มีความเที่ยงตรงและความแม่นยำ จากนั้นจะรวบรวมความคิดจากทีมผู้ชำนาญการที่มากด้วยประสบการณ์ (Expert team) ของกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่น่าจะส่งผลกระทบต่อความกว้างของรอยบินที่ผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ เพื่อคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อขนาดความกว้างของรอยบินที่พื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ไปทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมที่ระยะต่อไป

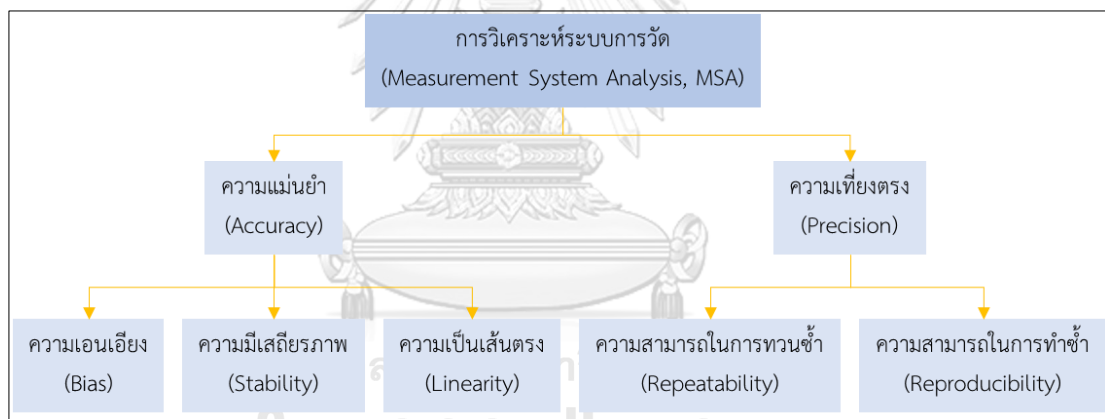
4.1 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis)

ระบบการวัดมีความสำคัญอย่างมากต่อผลการทดลอง เนื่องจากข้อผิดพลาดที่มาจากกระบวนการวัดอาจส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ข้อมูล ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลเกิดความผิดพลาดไปได้ เพื่อให้มั่นใจว่าผลการวัดที่ได้มานั้นเป็นผลการวัดที่น่าเชื่อถือ จึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบการวัด ซึ่งความคลาดเคลื่อนนั้นสามารถเกิดขึ้นได้จากค่าจริง, ค่าคลาดเคลื่อนเชิงระบบ, ค่าคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด, และค่าคลาดเคลื่อนอื่นๆ ก่อนเริ่มทำการทดลองจึงต้องวิเคราะห์ระบบการวัดเสียก่อน โดยค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดนั้นจะมีทั้งแบบที่สามารถกำจัดได้และไม่สามารถกำจัดได้ และเพื่อให้ระบบการวัดมีมาตรฐาน การกำจัดค่าคลาดเคลื่อนที่สามารถควบคุมได้จึงมีความจำเป็นอย่างมาก ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้มีตัวแปรตอบสนองคือความกว้างของรอยบิน ซึ่งเกิดขึ้นที่กระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชร โดยการวัดค่าดังกล่าวสามารถวัดได้ด้วยเครื่องวัด Nikon NEXIV VMZ-R6555 ดังแสดงตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดความกว้างรอยป็นบนแผ่นเวเฟอร์ Nikon NEXIV VMZ-R6555

การวิเคราะห์ระบบการวัดควรจะต้องมีการวิเคราะห์ทั้งความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) โดยที่การวิเคราะห์ในแต่ละปัจจัยจะมีส่วนประกอบย่อยดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบของการวิเคราะห์ระบบการวัด

โดยที่ความแม่นยำของระบบการวัดสามารถวิเคราะห์ได้จาก 3 ปัจจัย คือ ความเอนเอียงหรือไบอัส (Bias) ซึ่งคือการเข้าใกล้ค่าเฉลี่ยจากการวัดหลายๆ ครั้งเมื่อเทียบกับค่าอ้างอิง, การวิเคราะห์ความเป็นเส้นตรง (Linearity) คือค่าความแตกต่างของความโน้มเอียงตลอดช่วงการใช้งานของเครื่องมือวัด ซึ่งจะเป็นการศึกษาถึงความสามารถของเครื่องมือวัดเมื่อทำการเปลี่ยนย่านวัด, และความมีเสถียรภาพของเครื่องมือวัด (Stability) คือความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดเมื่อเวลาผ่านไปซึ่งสามารถสังเกตได้จากความนิ่งของค่าไบอัส โดย AIAG (Automotive Industry Action Group) แนะนำค่าที่ยอมรับได้สำหรับเกณฑ์การตัดสินใจตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การตัดสินใจสำหรับค่าเอนเอียงและความเป็นเส้นตรง

Accuracy	เกณฑ์ในการตัดสินใจ		
	<5%	5% - 10%	>10%
%Bias	ยอมรับได้	อาจยอมรับได้ แต่ควรพิจารณาปัจจัยอื่นๆ	ยอมรับไม่ได้
%Linearity	ยอมรับได้	อาจยอมรับได้ แต่ควรพิจารณาปัจจัยอื่นๆ	ยอมรับไม่ได้

ความเที่ยงตรงของระบบการวัด สามารถวิเคราะห์ได้จาก 2 ปัจจัย คือ ความสามารถในการทวนซ้ำ (Repeatability) ซึ่งจะเป็นการศึกษาถึงความแปรปรวนจากเครื่องมือวัด และความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) ซึ่งจะเป็นการศึกษาถึงความแปรปรวนจากพนักงานที่ทำการวัด

4.1.1) การวิเคราะห์ความเอนเอียง (Bias)

การวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัด จะใช้แผ่นสอบเทียบดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะทำการวัดทั้งหมด 5 ค่า และทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง (Craggs, 2019) ตามตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 แผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ของเครื่องมือวัด Nikon NEXIV VMZ-R6555

ตารางที่ 4.2 ผลการวัด Glass gauge calibration ด้วยเครื่อง Nikon NEXIV VMZ-R6555

แกน	ชิ้นงาน	ค่าอ้างอิง	วัดซ้ำ									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X (มม)	1	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.49	87.5	87.5	87.5	87.49	87.5
	2	175	174.98	174.99	174.99	175	174.99	174.98	175	175	174.99	174.99
	3	350	350.01	350.01	350.02	350.01	350.01	350.02	350.01	350.02	350.01	350.02
	4	700	699.96	699.99	699.96	699.97	699.97	699.96	699.99	699.96	699.67	699.99
	5	1,400	1,399.55	1,399.56	1,399.55	1,399.6	1,399.65	1,399.55	1,399.56	1,399.56	1,399.56	1,399.56
Y (มม)	1	87.5	87.5	87.49	87.49	87.5	87.5	87.49	87.49	87.5	87.5	87.5
	2	175	174.94	174.93	174.94	174.97	174.95	174.97	174.97	174.95	174.96	174.97
	3	350	350.02	350.02	350.02	350.02	350.02	350.01	350.02	350.01	350.02	350.02
	4	700	699.9	699.93	699.94	699.98	699.95	699.95	699.96	699.94	699.95	699.94
	5	1,400	1,399.63	1,399.63	1,399.64	1,399.65	1,399.66	1,399.64	1,399.64	1,399.64	1,399.63	1,399.64

4.1.1.1) การคำนวณหาความเอนเอียง (Bias)

ค่าเอนเอียง (Bias) สามารถหาได้จากสมการที่ 4.1 และเปอร์เซ็นต์ความเอนเอียง (%Bias) สามารถหาได้จากสมการที่ 4.2 (MSA, 2010) โดยใช้ค่าความแปรปรวนของกระบวนการ (Process Variation, PV) ที่มีค่าเท่ากับ 1.446 ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการเบื้องต้น (Process Capability Analysis, PCA)

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - \tau \quad (4.1)$$

$$Bias/PV (\%Bias) = 100 \left(\frac{\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - \tau}{6\sigma} \right) \quad (4.2)$$

โดย n คือ จำนวนครั้งที่วัดซ้ำ

x_i คือ ผลการวัดครั้งที่ i

τ คือ ค่าอ้างอิง

σ คือ ค่าความแปรปรวนของกระบวนการ (Process Variation)

4.1.1.2) การตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของค่าความเอนเอียง

การตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของค่าความเอนเอียงของระบบการวัดสามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีการทดสอบที (t-Test) ดังสมการที่ 4.3

$$t_0 = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (4.3)$$

โดย μ คือ ค่าวัดที่รู้ของชิ้นงานที่ใช้สอบเทียบ หรือ ค่าอ้างอิง (τ)

s คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดซ้ำ

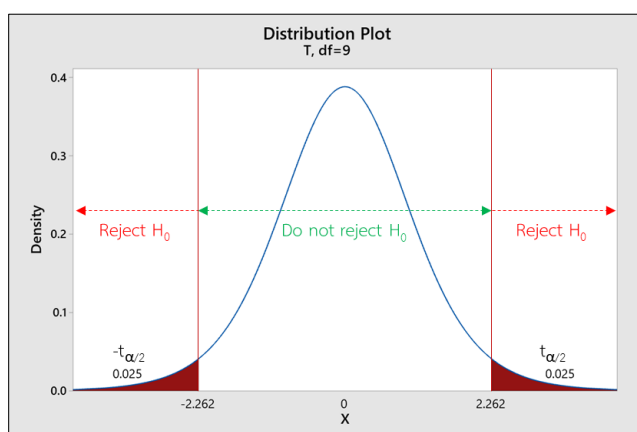
\bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดมาจากกลุ่มตัวอย่าง

การทดสอบที (t-Test) สำหรับแต่ละชิ้นงาน (Part) จากการคำนวณดังสมการที่ 4.3 จะได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งได้ใช้ค่าที่วิกฤติ (t_{Critical}) เท่ากับ $t_{(\alpha/2), n-1}$ เนื่องจากเป็นการทดสอบสมมติฐานแบบสองด้าน (2 tailed test) และมีค่าที่ใช้เพื่อชดเชยความผิดพลาดของตัวอย่าง

(Degree of Freedom, DF) เท่ากับ $n - 1$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9 ดังที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.4 โดยมีการตั้งสมมติฐานของการทดสอบที่ดังต่อไปนี้

สมมติฐานของการทดสอบที่ (t-Test Hypothesis)

- $H_0: \bar{x} = \tau$ (ค่าเฉลี่ยการวัดของกลุ่มตัวอย่างมีค่าเท่ากับค่าอ้างอิงอย่างมีนัยสำคัญ)
- $H_1: \bar{x} \neq \tau$ (ค่าเฉลี่ยการวัดของกลุ่มตัวอย่างมีค่าไม่เท่ากับค่าอ้างอิงอย่างมีนัยสำคัญ)



รูปที่ 4.4 ขอบเขตการยอมรับสมมติฐานทางสถิติ

4.1.1.3) ผลการทดสอบสมมติฐานของการทดสอบที่

ผลการทดสอบสมมติฐานของการทดสอบที่ ได้ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมมติฐานของการทดสอบที่ (t-Test Hypothesis)

แกน	ชิ้นงาน	ค่าอ้างอิง (μ หรือ τ)	\bar{x}	SD	\sqrt{n}	t_0	ผลการทดสอบขอบเขต การยอมรับสมมติฐาน	แปลความหมายผล การทดสอบ สมมติฐาน
X	1	87.5	87.5	0.00	3.16	-1.5	$-t_{0.025, 9} < t_0 < t_{0.025, 9}$	ไม่สามารถปฏิเสธ H_0
	2	175	174.99	0.01	3.16	-3.86	$-t_{0.025, 9} > t_0$	ปฏิเสธ H_0
	3	350	350.01	0.01	3.16	8.57	$t_{0.025, 9} > t_0$	ปฏิเสธ H_0
	4	700	699.94	0.10	3.16	-1.9	$-t_{0.025, 9} < t_0 < t_{0.025, 9}$	ไม่สามารถปฏิเสธ H_0
	5	1400	1399.57	0.03	3.16	-43	$-t_{0.025, 9} > t_0$	ปฏิเสธ H_0
Y	1	87.5	87.5	0.01	3.16	-2.45	$-t_{0.025, 9} > t_0$	ปฏิเสธ H_0
	2	175	174.96	0.02	3.16	-9.43	$-t_{0.025, 9} > t_0$	ปฏิเสธ H_0
	3	350	350.02	0.00	3.16	13.5	$t_{0.025, 9} > t_0$	ปฏิเสธ H_0
	4	700	699.94	0.02	3.16	-8.57	$-t_{0.025, 9} > t_0$	ปฏิเสธ H_0
	5	1400	1399.64	0.01	3.16	-120.75	$-t_{0.025, 9} > t_0$	ปฏิเสธ H_0

จากตารางที่ 4.3 จะพบว่า มีเพียงการวัดในแกน X ของชิ้นงาน 1 และ 4 เท่านั้น ที่มีค่าเฉลี่ยการวัดของกลุ่มตัวอย่างมีค่าเท่ากับค่าอ้างอิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนที่เหลือจะมีค่าเฉลี่ยการวัดของกลุ่มตัวอย่างที่ไม่เท่ากับค่าอ้างอิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงจำเป็นต้องใช้เกณฑ์การตัดสินใจของเปอร์เซ็นต์ค่าความเอนเอียงหรือเปอร์เซ็นต์ค่าไบอัสตามค่าแนะนำของ AIAG ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งผลการคำนวณค่าความเอนเอียงและเปอร์เซ็นต์ค่าความเอนเอียงดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเอนเอียงหรือเปอร์เซ็นต์ไบอัส (ค่าไบอัสเทียบกับความแปรปรวนของกระบวนการ) มีค่าที่ต่ำกว่า 5% ตามค่าแนะนำ หมายความว่าสามารถยอมรับค่าความเอนเอียงของระบบการวัดนี้ได้

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณค่าความเอนเอียง (Bias) และเปอร์เซ็นต์ค่าความเอนเอียง (%Bias)

แกน	ชิ้นงาน	ค่าอ้างอิง (T)	ผลรวม x_i	จำนวนครั้งที่วัดซ้ำ (n)	ค่าความเอนเอียง (Bias)	เปอร์เซ็นต์ค่าความเอนเอียง (%Bias, Bias / PV)
X (มม)	1	87.5	874.98	10	0.00	0.02% (<5%, ยอมรับได้)
	2	175	1,749.91	10	-0.01	0.10% (<5%, ยอมรับได้)
	3	350	3,500.14	10	0.01	0.16% (<5%, ยอมรับได้)
	4	700	6,999.42	10	-0.06	0.67% (<5%, ยอมรับได้)
	5	1,400	13,995.7	10	-0.43	4.96% (<5%, ยอมรับได้)
Average of X axis					-0.09	1.11% (<5%, ยอมรับได้)
Y (มม)	1	87.5	874.96	10	0.00	0.05% (<5%, ยอมรับได้)
	2	175	1,749.55	10	-0.04	0.52% (<5%, ยอมรับได้)
	3	350	3,500.18	10	0.02	0.21% (<5%, ยอมรับได้)
	4	700	6,999.44	10	-0.06	0.65% (<5%, ยอมรับได้)
	5	1,400	13,996.4	10	-0.36	4.15% (<5%, ยอมรับได้)
Average of Y axis					-0.09	1.03% (<5%, ยอมรับได้)

4.1.2) การวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของเครื่องมือวัด (Stability)

การพิจารณาความมีเสถียรภาพของเครื่องมือวัด (Stability) สามารถทำการตรวจสอบได้จากการประยุกต์ใช้แผนภูมิควบคุม (Control chart) โดยใช้แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ย (Xbar-Chart) และแผนภูมิควบคุมค่าพิสัย (R-Chart) ในการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพ โดยเริ่มจากการวัดตัวแผ่นสอบเทียบ (Nikon Glass gauge) เช่นเดิม แต่จะทำการวัดทั้งหมด 5 ครั้ง/ขนาด (มีทั้งหมด 5 ขนาด คือ 87.5, 175, 350, 700, และ 1,400 มิลลิเมตร) โดยจะทำการวัดวันละ 1 ครั้ง เป็นเวลาทั้งหมด 20 วัน ตามค่าแนะนำของ MSA (MSA, 2010) โดยผลการวัดทั้งหมดจะถูกแสดงในตารางที่ 4.5

และสาเหตุที่ใช้แผนภูมิควบคุมค่าพิสัย (R-Chart) แทนแผนภูมิควบคุมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S-Chart) ที่มีความแม่นยำมากกว่า เนื่องจากจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่แนะนำสำหรับแผนภูมิควบคุมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต้องมากกว่า 10 ตัวอย่าง (Montgomery, 2009) ขึ้นไป แต่สำหรับงานวิจัยฉบับนี้มีข้อจำกัดด้านจำนวนตัวอย่าง จึงใช้แผนภูมิควบคุมค่าพิสัยซึ่งให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน

4.1.2.1) ขั้นตอนการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของเครื่องมือวัด

การสร้างแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและแผนภูมิควบคุมค่าพิสัยสามารถทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. กำหนดกระบวนการและลักษณะคุณภาพที่ต้องการควบคุม: กระบวนการวัดตัวแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ที่มีขนาดย่านวัดสอบเทียบแตกต่างกัน 5 ขนาด
2. กำหนดตัวอย่างและวิธีเก็บตัวอย่าง: วัดแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge และวัดทั้งหมด 5 ครั้ง/วัน ทั้งหมด 5 ขนาด เป็นเวลา 20 วัน ตามคำแนะนำของ MSA
3. รวบรวมข้อมูล: ข้อมูลวัดทั้งแนวแกน X และ Y แสดงในตารางที่ 4.6 – 4.15

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลวัดแกน X ของแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 1

ผลการวัดแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 1 (87.5 มิลลิเมตร) ในแนวแกน X							
จำนวนวัน (m)	ตัวอย่างที่วัดหรือจำนวนครั้งที่วัด (x_i)					\bar{x}_i	R_i
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
1	87.500	87.500	87.490	87.500	87.500	87.498	0.010
2	87.490	87.500	87.500	87.490	87.500	87.496	0.010
3	87.500	87.500	87.500	87.490	87.500	87.498	0.010
4	87.500	87.490	87.500	87.500	87.500	87.498	0.010
5	87.500	87.500	87.490	87.500	87.500	87.498	0.010
6	87.490	87.500	87.500	87.500	87.490	87.496	0.010
7	87.500	87.490	87.500	87.500	87.500	87.498	0.010
8	87.500	87.500	87.490	87.500	87.500	87.498	0.010
9	87.500	87.500	87.490	87.500	87.500	87.498	0.010
10	87.490	87.490	87.500	87.500	87.500	87.496	0.010
11	87.500	87.490	87.500	87.500	87.500	87.498	0.010
12	87.500	87.500	87.500	87.500	87.490	87.498	0.010
13	87.500	87.490	87.500	87.500	87.490	87.496	0.010
14	87.500	87.490	87.500	87.500	87.490	87.496	0.010
15	87.490	87.500	87.490	87.500	87.500	87.496	0.010
16	87.500	87.490	87.500	87.500	87.500	87.498	0.010
17	87.490	87.500	87.500	87.500	87.500	87.498	0.010
18	87.500	87.490	87.500	87.500	87.500	87.498	0.010

19	87.500	87.500	87.490	87.500	87.500	87.498	0.010
20	87.500	87.500	87.500	87.490	87.500	87.498	0.010
					$\sum \bar{x}_i =$	1,749.948	$\sum R_i = 0.2$
					$\bar{\bar{x}} =$	87.4974	$\bar{\bar{R}}_i = 0.01$

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลวัดแกน X ของแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 2

ผลการวัดแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 2 (175 มิลลิเมตร) ในแนวแกน X							
จำนวนวัน (m)	ตัวอย่างที่วัดหรือจำนวนครั้งที่วัด (x_i)					\bar{x}_i	R_i
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
1	174.99	175	174.99	174.98	174.99	174.990	0.020
2	174.99	175	174.98	175	174.97	174.988	0.030
3	174.98	174.98	175	174.98	174.98	174.984	0.020
4	174.99	174.98	175	174.99	174.97	174.986	0.030
5	174.97	174.98	174.98	174.98	174.99	174.980	0.020
6	174.98	174.99	174.98	174.98	174.99	174.984	0.010
7	174.98	174.98	174.98	174.99	174.98	174.982	0.010
8	174.99	174.97	174.99	174.98	174.98	174.982	0.020
9	174.99	174.98	174.98	174.97	174.99	174.982	0.020
10	174.99	174.99	174.98	174.98	174.99	174.986	0.010
11	174.98	174.98	174.98	174.98	174.98	174.980	0.000
12	174.98	174.98	174.98	174.99	174.98	174.982	0.010
13	174.98	174.98	174.97	174.99	174.99	174.982	0.020
14	174.98	174.99	174.98	174.99	174.98	174.984	0.010
15	174.99	174.98	174.98	174.98	174.98	174.982	0.010
16	174.98	174.99	175	175	174.98	174.990	0.020
17	174.99	174.98	174.97	174.99	174.98	174.982	0.020
18	174.99	174.99	174.99	174.99	174.98	174.988	0.010
19	174.99	174.97	174.98	174.99	174.97	174.980	0.020
20	175	174.99	174.99	174.98	175	174.992	0.020
					$\sum \bar{x}_i =$	3,499.686	$\sum R_i = 0.33$
					$\bar{\bar{x}} =$	174.9843	$\bar{\bar{R}}_i = 0.0165$

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลวัดแกน X ของแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 3

ผลการวัดแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 3 (350 มิลลิเมตร) ในแนวแกน X							
จำนวนวัน (m)	ตัวอย่างที่วัดหรือจำนวนครั้งที่วัด (x_i)					\bar{x}_i	R_i
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
1	350.01	350.02	350.01	350	350	350.008	0.020
2	350.01	350.01	350	350.01	349.99	350.004	0.020
3	350.01	350	350	350.01	350.01	350.006	0.010

4	350.01	350	350	350.01	350.01	350.006	0.010
5	350	350	350.01	350	350.01	350.004	0.010
6	350	350	350.01	350.01	350.01	350.006	0.010
7	350	350.01	350	350.01	350	350.004	0.010
8	350.01	350	350.01	350.01	350.01	350.008	0.010
9	350	350	350	349.99	350.01	350.000	0.020
10	350	350	350	350.01	350	350.002	0.010
11	350	350	350.01	350.01	350.01	350.006	0.010
12	350.01	350	350	349.99	350	350.000	0.020
13	350.01	350.01	350	350.01	350	350.006	0.010
14	350	350.01	350	350.01	350.01	350.006	0.010
15	350.01	350.01	350.01	350.01	350.01	350.010	0.000
16	350	350.01	350.01	350.01	350.01	350.008	0.010
17	350	350	350.01	350.01	350.01	350.006	0.010
18	350.01	350.02	350	350.01	350.01	350.010	0.020
19	350.01	350.01	350	350	350	350.004	0.010
20	350.01	350	350	350	350	350.002	0.010

$$\begin{aligned}\sum \bar{x}_i &= 7,000.106 & \sum R_i &= 0.24 \\ \bar{\bar{x}} &= 350.0053 & \bar{\bar{R}}_i &= 0.012\end{aligned}$$

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลวัดแกน X ของแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 4

ผลการวัดแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 4 (700 มิลลิเมตร) ในแนวแกน X							
จำนวนวัน (m)	ตัวอย่างที่วัดหรือจำนวนครั้งที่วัด (x_i)					\bar{x}_i	R_i
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
1	699.94	699.85	699.83	700	699.88	699.900	0.170
2	699.92	699.99	699.88	699.82	699.94	699.910	0.170
3	700.06	699.95	700	699.91	699.8	699.944	0.260
4	699.87	699.83	700	699.92	699.83	699.890	0.170
5	699.9	700.02	700.12	699.99	700.04	700.014	0.220
6	699.92	699.89	700.07	700.02	699.87	699.954	0.200
7	700.02	699.86	699.88	699.99	699.95	699.940	0.160
8	699.98	700	699.91	699.98	700.09	699.992	0.180
9	699.92	699.74	699.87	700.11	700.1	699.948	0.370
10	700.03	699.77	699.99	700.13	699.89	699.962	0.360
11	699.99	699.86	699.88	699.95	700.1	699.956	0.240
12	700.05	700.03	699.8	699.9	699.99	699.954	0.250
13	699.84	699.81	699.93	700.03	699.9	699.902	0.220
14	699.9	700.1	699.9	699.82	699.76	699.896	0.340
15	699.97	700.03	700.07	699.89	700.12	700.016	0.230
16	700.01	699.82	699.89	699.94	700.02	699.936	0.200

17	699.98	699.89	700.07	699.95	700.01	699.980	0.180
18	699.9	699.96	699.9	700.04	700.03	699.966	0.140
19	699.9	699.98	699.97	699.8	699.92	699.914	0.180
20	699.96	700.02	699.85	699.69	699.94	699.892	0.330
$\sum \bar{x}_i =$						13,998.866	$\sum R_i = 4.57$
$\bar{x} =$						699.9433	$\bar{R}_i = 0.2285$

ตารางที่ 4.10 ข้อมูลวัดแกน X ของแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 5

ผลการวัดแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 5 (1,400 มิลลิเมตร) ในแนวแกน X							
จำนวนวัน (m)	ตัวอย่างที่วัดหรือจำนวนครั้งที่วัด (x_i)					\bar{x}_i	R_i
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
1	1,399.6	1,399.54	1,399.57	1,399.57	1,399.56	1,399.568	0.060
2	1,399.53	1,399.59	1,399.59	1,399.59	1,399.6	1,399.580	0.070
3	1,399.5	1,399.6	1,399.58	1,399.57	1,399.52	1,399.554	0.100
4	1,399.54	1,399.49	1,399.56	1,399.59	1,399.55	1,399.546	0.100
5	1,399.52	1,399.6	1,399.5	1,399.51	1,399.58	1,399.542	0.100
6	1,399.55	1,399.53	1,399.57	1,399.6	1,399.52	1,399.554	0.080
7	1,399.52	1,399.52	1,399.6	1,399.56	1,399.58	1,399.556	0.080
8	1,399.5	1,399.4	1,399.53	1,399.59	1,399.57	1,399.518	0.190
9	1,399.57	1,399.57	1,399.56	1,399.64	1,399.59	1,399.586	0.080
10	1,399.56	1,399.61	1,399.53	1,399.58	1,399.53	1,399.562	0.080
11	1,399.58	1,399.57	1,399.61	1,399.59	1,399.52	1,399.574	0.090
12	1,399.56	1,399.56	1,399.5	1,399.56	1,399.53	1,399.542	0.060
13	1,399.58	1,399.64	1,399.55	1,399.53	1,399.51	1,399.562	0.130
14	1,399.54	1,399.6	1,399.49	1,399.61	1,399.56	1,399.560	0.120
15	1,399.56	1,399.54	1,399.51	1,399.54	1,399.57	1,399.544	0.060
16	1,399.57	1,399.57	1,399.5	1,399.58	1,399.59	1,399.562	0.090
17	1,399.6	1,399.55	1,399.59	1,399.5	1,399.59	1,399.566	0.100
18	1,399.58	1,399.56	1,399.46	1,399.56	1,399.57	1,399.546	0.120
19	1,399.57	1,399.52	1,399.62	1,399.56	1,399.52	1,399.558	0.100
20	1,399.6	1,399.5	1,399.59	1,399.58	1,399.59	1,399.572	0.100
$\sum \bar{x}_i =$						27,991.152	$\sum R_i = 1.91$
$\bar{x} =$						1,399.558	$\bar{R}_i = 0.0955$

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลวัดแกน Y ของแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 1

ผลการวัดแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 1 (87.5 มิลลิเมตร) ในแนวแกน Y							
จำนวนวัน (m)	ตัวอย่างที่วัดหรือจำนวนครั้งที่วัด (x_i)					\bar{x}_i	R_i
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
1	87.5	87.5	87.5	87.5	87.49	87.498	0.010

2	87.49	87.49	87.51	87.49	87.5	87.496	0.020	
3	87.49	87.5	87.49	87.49	87.49	87.492	0.010	
4	87.49	87.49	87.5	87.5	87.5	87.496	0.010	
5	87.5	87.49	87.49	87.5	87.49	87.494	0.010	
6	87.5	87.49	87.5	87.5	87.49	87.496	0.010	
7	87.5	87.49	87.5	87.5	87.5	87.498	0.010	
8	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.500	0.000	
9	87.49	87.5	87.49	87.51	87.49	87.496	0.020	
10	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.500	0.000	
11	87.51	87.49	87.49	87.5	87.49	87.496	0.020	
12	87.49	87.5	87.5	87.49	87.49	87.494	0.010	
13	87.5	87.5	87.49	87.5	87.5	87.498	0.010	
14	87.5	87.48	87.49	87.48	87.5	87.494	0.020	
15	87.5	87.49	87.49	87.49	87.5	87.494	0.010	
16	87.49	87.5	87.5	87.49	87.48	87.492	0.020	
17	87.49	87.49	87.5	87.49	87.49	87.492	0.010	
18	87.49	87.5	87.49	87.5	87.5	87.496	0.010	
19	87.49	87.49	87.5	87.5	87.5	87.496	0.010	
20	87.49	87.5	87.49	87.48	87.5	87.492	0.020	
					$\sum \bar{x}_i =$	1,749.91	$\sum R_i =$	0.24
					$\bar{\bar{x}} =$	87.4955	$\bar{\bar{R}}_i =$	0.012

ตารางที่ 4.12 ข้อมูลวัดแกน Y ของแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 2

ผลการวัดแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 2 (175 มิลลิเมตร) ในแนวแกน Y							
จำนวนวัน (m)	ตัวอย่างที่วัดหรือจำนวนครั้งที่วัด (x_i)					\bar{x}_i	R_i
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
1	174.9	174.95	174.96	174.96	174.95	174.944	0.060
2	174.96	174.91	174.96	174.94	174.93	174.940	0.050
3	174.9	174.95	174.93	174.96	174.97	174.942	0.070
4	174.96	174.97	174.95	174.95	174.95	174.956	0.020
5	174.96	174.98	174.9	174.95	174.96	174.950	0.080
6	174.97	174.95	174.95	174.92	174.94	174.946	0.050
7	174.92	174.95	174.94	174.98	174.97	174.952	0.060
8	174.94	174.95	174.95	174.95	174.95	174.948	0.010
9	174.98	174.96	174.95	174.95	174.95	174.958	0.030
10	174.93	174.96	174.96	174.97	174.9	174.944	0.070
11	174.95	174.97	174.96	174.93	174.9	174.942	0.070
12	174.9	174.98	174.95	174.96	174.95	174.948	0.080
13	174.9	174.96	174.95	174.97	174.95	174.946	0.070
14	174.96	174.95	174.9	174.97	174.92	174.940	0.070

15	174.97	174.92	174.94	174.96	174.98	174.954	0.060
16	174.94	174.95	174.96	174.96	174.94	174.950	0.020
17	174.96	174.93	174.95	174.95	174.96	174.950	0.030
18	174.94	174.96	174.95	174.97	174.96	174.956	0.030
19	174.97	174.96	174.94	174.95	174.97	174.958	0.030
20	174.95	174.9	174.99	174.9	174.94	174.936	0.090
$\sum \bar{x}_i =$						3,498.960	$\sum R_i =$ 1.05
$\bar{\bar{x}} =$						174.948	$\bar{\bar{R}}_i =$ 0.0525

ตารางที่ 4.13 ข้อมูลวัดแกน Y ของแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 3

ผลการวัดแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 3 (350 มิลลิเมตร) ในแนวแกน Y							
จำนวนวัน (m)	ตัวอย่างที่วัดหรือจำนวนครั้งที่วัด (x_i)					\bar{x}_i	R_i
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
1	350.02	350.01	350.02	350.02	350.01	350.016	0.010
2	350.02	350.02	350.02	350.01	350	350.014	0.020
3	350	350.02	350.02	350.02	350.02	350.016	0.020
4	350.02	350.02	350.01	350.02	350.01	350.016	0.010
5	350.02	350.02	350.01	350.01	350.02	350.016	0.010
6	350.02	350	350.02	350.02	350	350.012	0.020
7	350.01	350.01	350.02	350.01	350.02	350.014	0.010
8	350.01	350.01	350.02	350.01	350.01	350.012	0.010
9	350.01	350.01	350.02	350.02	350	350.012	0.020
10	350.01	350.02	350.03	350.02	350.02	350.020	0.020
11	350.01	350.02	350.02	350.03	350.02	350.020	0.020
12	350.01	350.01	350.02	350.01	350.01	350.012	0.010
13	350	350.01	350.02	350.01	350	350.008	0.020
14	350.01	350.02	350.01	350.02	350.02	350.016	0.010
15	350.01	350.02	350.01	350.02	350.01	350.014	0.010
16	350.01	350.01	350.02	350.01	350.01	350.012	0.010
17	350.01	350.01	350.02	350.01	350.01	350.012	0.010
18	350.01	350.01	350.02	350.02	350.01	350.014	0.010
19	350.01	350.02	350.02	350.01	350.02	350.016	0.010
20	350.02	350.01	350.02	350.01	350.02	350.016	0.010
$\sum \bar{x}_i =$						7,000.288	$\sum R_i =$ 0.27
$\bar{\bar{x}} =$						350.0144	$\bar{\bar{R}}_i =$ 0.0135

ตารางที่ 4.14 ข้อมูลวัดแกน Y ของแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 4

ผลการวัดแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 4 (700 มิลลิเมตร) ในแนวแกน Y							
จำนวนวัน (m)	ตัวอย่างที่วัดหรือจำนวนครั้งที่วัด (x_i)					\bar{x}_i	R_i
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
1	699.95	699.95	699.93	699.92	699.94	699.938	0.030
2	699.9	699.91	699.91	699.92	699.9	699.908	0.020
3	699.9	699.95	699.94	699.92	699.94	699.930	0.050
4	699.94	699.93	699.9	699.94	699.94	699.930	0.040
5	699.97	699.94	699.94	699.89	699.93	699.934	0.080
6	699.92	699.91	699.98	700	699.95	699.952	0.090
7	699.93	699.94	699.94	699.93	699.94	699.936	0.010
8	699.95	699.93	699.93	699.89	699.96	699.926	0.070
9	699.91	699.9	699.94	699.9	699.9	699.910	0.040
10	699.92	699.95	699.93	699.97	699.9	699.934	0.070
11	699.96	699.93	699.94	699.95	699.9	699.936	0.060
12	699.93	699.95	699.94	699.95	699.89	699.932	0.060
13	699.93	699.94	699.92	699.94	699.92	699.930	0.020
14	699.93	699.94	699.94	699.9	700	699.942	0.100
15	699.98	699.93	699.99	699.92	699.93	699.950	0.070
16	699.93	699.92	699.9	699.93	699.98	699.932	0.080
17	699.95	699.94	699.93	699.91	699.9	699.926	0.050
18	699.93	699.92	699.96	699.96	699.94	699.942	0.040
19	699.98	699.95	699.94	699.95	699.94	699.952	0.040
20	699.92	699.95	699.91	699.93	699.95	699.932	0.040
$\sum \bar{x}_i =$						13,998.672	$\sum R_i = 1.06$
$\bar{\bar{x}} =$						699.9336	$\bar{\bar{R}}_i = 0.53$

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.15 ข้อมูลวัดแกน Y ของแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 5

ผลการวัดแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ขนาดที่ 5 (1,400 มิลลิเมตร) ในแนวแกน Y							
จำนวนวัน (m)	ตัวอย่างที่วัดหรือจำนวนครั้งที่วัด (x_i)					\bar{x}_i	R_i
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
1	1,399.60	1,399.60	1,399.60	1,399.65	1,399.64	1,399.62	0.050
2	1,399.63	1,399.63	1,399.65	1,399.63	1,399.63	1,399.63	0.020
3	1,399.63	1,399.60	1,399.62	1,399.64	1,399.66	1,399.63	0.060
4	1,399.64	1,399.61	1,399.63	1,399.62	1,399.64	1,399.63	0.030
5	1,399.64	1,399.65	1,399.63	1,399.63	1,399.62	1,399.63	0.030
6	1,399.60	1,399.63	1,399.63	1,399.65	1,399.64	1,399.63	0.050
7	1,399.65	1,399.62	1,399.63	1,399.62	1,399.64	1,399.63	0.030
8	1,399.62	1,399.64	1,399.64	1,399.65	1,399.64	1,399.64	0.030

9	1,399.64	1,399.64	1,399.63	1,399.62	1,399.60	1,399.63	0.040
10	1,399.65	1,399.63	1,399.60	1,399.62	1,399.64	1,399.63	0.050
11	1,399.65	1,399.63	1,399.63	1,399.63	1,399.61	1,399.63	0.040
12	1,399.62	1,399.65	1,399.65	1,399.64	1,399.68	1,399.65	0.060
13	1,399.63	1,399.64	1,399.63	1,399.64	1,399.65	1,399.64	0.020
14	1,399.64	1,399.65	1,399.64	1,399.63	1,399.64	1,399.64	0.020
15	1,399.62	1,399.63	1,399.63	1,399.63	1,399.64	1,399.63	0.020
16	1,399.62	1,399.64	1,399.64	1,399.64	1,399.63	1,399.63	0.020
17	1,399.63	1,399.63	1,399.66	1,399.64	1,399.65	1,399.64	0.030
18	1,399.64	1,399.64	1,399.63	1,399.64	1,399.63	1,399.64	0.010
19	1,399.60	1,399.64	1,399.64	1,399.63	1,399.63	1,399.63	0.040
20	1,399.62	1,399.63	1,399.64	1,399.64	1,399.62	1,399.63	0.020
$\sum \bar{x}_i =$					27,992.65	$\sum R_i =$	0.67
$\bar{\bar{x}} =$					1,399.63	$\bar{R}_i =$	0.0335

4. คำนวณค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยของแต่ละกลุ่มตัวอย่างย่อย: โดยอ้างอิงจากสมการที่ 4.4 และ 4.5 (Montgomery, 2009) ในการคำนวณ

$$\bar{\bar{x}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (4.4)$$

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (4.5)$$

เมื่อ x_{max} ค่าวัดที่มีค่ามากที่สุดในกลุ่มตัวอย่างย่อย

x_{min} คือ ค่าวัดที่มีค่าน้อยที่สุดในกลุ่มตัวอย่างย่อย

n คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างย่อย

5. คำนวณขีดจำกัดการควบคุมค่าเฉลี่ย (Xbar Control limits) โดยสามารถอ้างอิงจากสมการที่ 4.6 – 4.11 (Montgomery, 2009) ในการคำนวณ

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + 3\hat{\sigma}_{\bar{x}} \quad (4.6)$$

$$CL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m}{m} \quad (4.7)$$

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - 3\hat{\sigma}_{\bar{x}} \quad (4.8)$$

เมื่อ $UCL_{\bar{x}}$ คือ ขีดจำกัดการควบคุมค่าเฉลี่ยด้านบน

$CL_{\bar{x}}$ คือ เส้นกึ่งกลางของค่าเฉลี่ย

$LCL_{\bar{x}}$ คือ ขีดจำกัดการควบคุมค่าเฉลี่ยด้านล่าง

\bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยกลุ่มตัวอย่าง เฉลี่ยมาจากแต่ละกลุ่มตัวอย่างย่อย

$\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยกลุ่มตัวอย่าง

m คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่าง

เนื่องจากค่า $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ คือ $\frac{\hat{\sigma}_x}{\sqrt{n}}$ และค่า $\hat{\sigma}_x$ คือ $\frac{\bar{R}}{d_2}$ เมื่อ d_2 คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับ n จึงสามารถหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยกลุ่มตัวอย่างได้ดังสมการที่ 4.9

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\frac{\bar{R}}{d_2} \right) \quad (4.9)$$

เพราะฉะนั้น ขีดจำกัดการควบคุมทั้งทางด้านบนและด้านล่าง จะสามารถอ้างอิงได้ดังสมการที่ 4.10 และ 4.11 เมื่อค่าคงที่ A_2 มีค่าเท่ากับ $\frac{3}{d_2\sqrt{n}}$

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{x} + 3 \frac{\hat{\sigma}_x}{\sqrt{n}} = \bar{x} + 3 \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\frac{\bar{R}}{d_2} \right) = \bar{x} + A_2 \bar{R} \quad (4.10)$$

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{x} - 3 \frac{\hat{\sigma}_x}{\sqrt{n}} = \bar{x} - 3 \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\frac{\bar{R}}{d_2} \right) = \bar{x} - A_2 \bar{R} \quad (4.11)$$

และสามารถอ้างอิงค่าคงที่ซึ่งใช้ในการคำนวณสำหรับแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและแผนภูมิควบคุมค่าพิสัย (Constants for \bar{x} & R-Chart Calculation) ได้จากตารางที่ 4.16 (Montgomery, 2009)

ตารางที่ 4.16 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณสำหรับแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย

n	$A = \frac{3}{\sqrt{n}}$	$A_2 = \frac{3}{d_2\sqrt{n}}$	$D_3 = 1 - 3 \frac{d_3}{d_2}$	$D_4 = 1 + 3 \frac{d_3}{d_2}$	d_2	d_3
2	2.121	1.880	0	3.267	1.128	0.853
3	1.732	1.023	0	2.574	1.693	0.888
4	1.500	0.729	0	2.282	2.059	0.880
5	1.342	0.577	0	2.114	2.326	0.864
6	1.225	0.482	0	2.004	2.534	0.848
7	1.134	0.419	0.076	1.924	2.704	0.833
8	1.061	0.373	0.136	1.864	2.847	0.820
9	1.225	0.337	0.184	1.816	2.970	0.808
10	1.134	0.308	0.223	1.777	3.078	0.797
15	0.775	0.223	0.347	1.653	3.472	0.756
20	0.671	0.180	0.415	1.585	3.735	0.729

6. คำนวณขีดจำกัดการควบคุมค่าพิสัย (R Control Limits) โดยสามารถอ้างอิงได้จากสมการที่ 4.12 – 4.17 (Montgomery, 2009) ในการคำนวณ

$$UCL_R = \bar{R} + 3\sigma_R \quad (4.12)$$

$$CL_R = \bar{R} \quad (4.13)$$

$$LCL_R = \bar{R} - 3\sigma_R \quad (4.14)$$

เมื่อ σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการที่มีค่าเท่ากับ $\frac{\bar{R}}{d_2}$ และ σ_R คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพิสัย โดยที่ d_3 คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับ n จึงสามารถหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพิสัยได้ดังสมการที่ 4.15

$$\sigma_R = d_3\sigma = d_3\frac{\bar{R}}{d_2} \quad (4.15)$$

เพราะฉะนั้น ขีดจำกัดการควบคุมทั้งทางด้านบนและด้านล่าง จะสามารถอ้างอิงได้ดังสมการที่ 4.16 และ 4.17 เมื่อค่าคงที่ D_3 มีค่าเท่ากับ $(1 - 3\frac{d_3}{d_2})$ และค่าคงที่ D_4 มีค่าเท่ากับ $(1 + 3\frac{d_3}{d_2})$ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

$$UCL_R = \bar{R} + 3\sigma_R = \bar{R} + 3d_3\frac{\bar{R}}{d_2} = (1 + 3\frac{d_3}{d_2})\bar{R} = D_4\bar{R} \quad (4.16)$$

$$LCL_R = \bar{R} - 3\sigma_R = \bar{R} - 3d_3\frac{\bar{R}}{d_2} = (1 - 3\frac{d_3}{d_2})\bar{R} = D_3\bar{R} \quad (4.17)$$

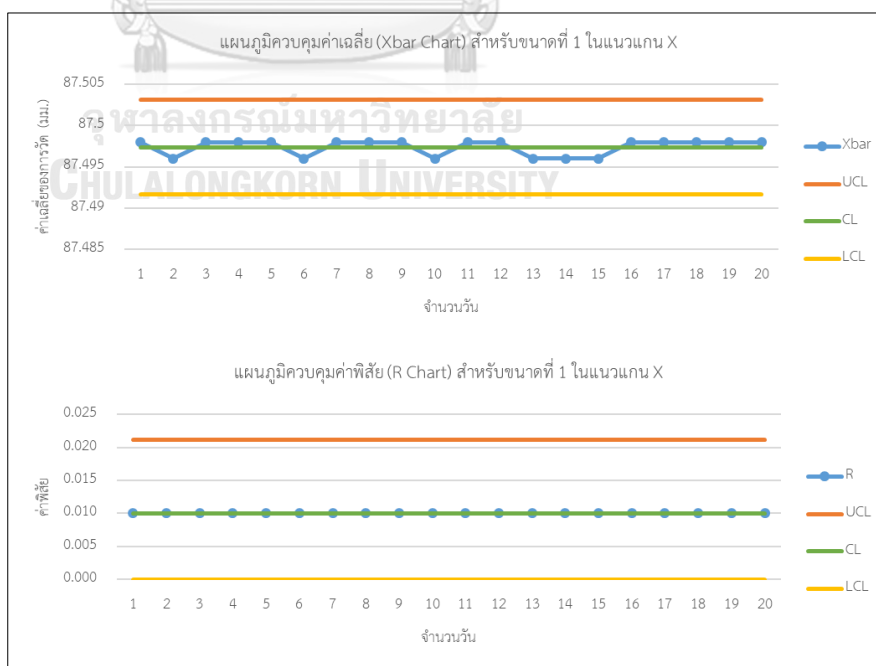
โดยที่สามารถอ้างอิงค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณสำหรับแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและแผนภูมิควบคุมค่าพิสัย (Constants for \bar{x} & R Chart Calculation) ได้จากตารางที่ 4.5 (Montgomery, 2009)

ซึ่งผลการคำนวณขีดจำกัดควบคุมด้านบน (Upper Control Limit, UCL), ขีดจำกัดควบคุมด้านล่าง (Lower Control Limit, LCL), และเส้นกึ่งกลาง (Center Line, CL) ของค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยในการวัดแผ่นสอบเทียบ Nikon Glass gauge ทั้ง 5 ขนาด ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ผลคำนวณเส้นกึ่งกลางและขีดจำกัดควบคุมของค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย

แกน	ขนาดการวัด	$UCL_{\bar{x}}$	$CL_{\bar{x}}$	$LCL_{\bar{x}}$	UCL_R	CL_R	LCL_R
X	1 (87.5 มม.)	87.5032	87.4974	87.4763	0.0211	0.0100	0
	2 (175 มม.)	174.9938	174.9843	174.9494	0.0349	0.0165	0
	3 (350 มม.)	350.0122	350.0053	349.9799	0.0254	0.0120	0
	4 (700 มม.)	700.0751	699.9433	699.4603	0.4830	0.2285	0
	5 (1,400 มม.)	1,399.6131	1,399.5580	1,399.3561	0.2019	0.0955	0
Y	1 (87.5 มม.)	87.5024	87.4955	87.4701	0.0254	0.0120	0
	2 (175 มม.)	174.9783	174.9480	174.8370	0.1110	0.0525	0
	3 (350 มม.)	350.0222	350.0144	349.9859	0.0285	0.0135	0
	4 (700 มม.)	700.2394	699.9336	698.8132	1.1204	0.5300	0
	5 (1,400 มม.)	1,399.6493	1,399.6300	1,399.5592	0.0708	0.0335	0

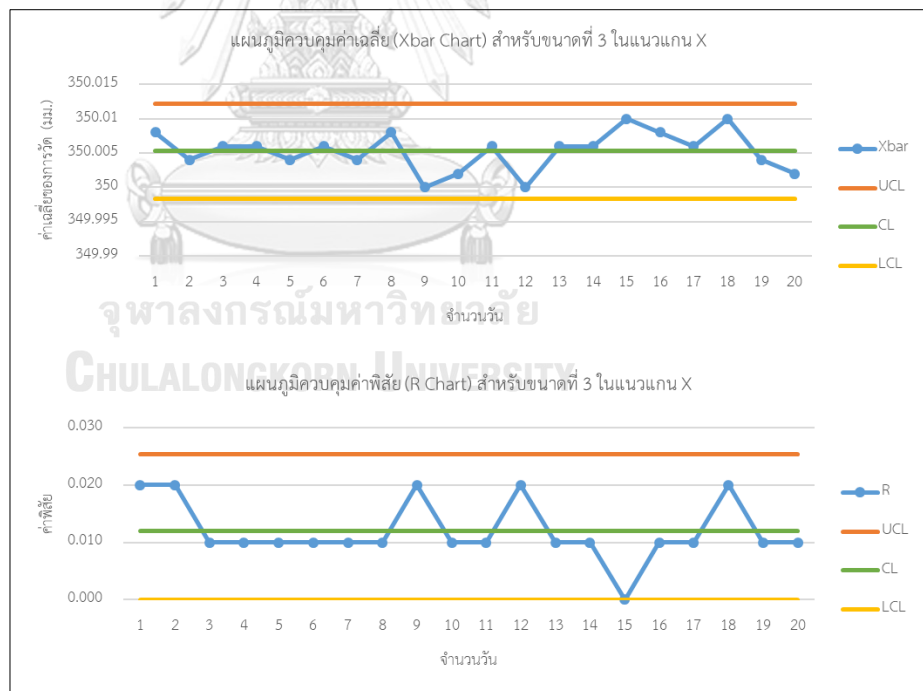
7. **พล็อตกราฟค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย:** พล็อตกราฟค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยของทุกกลุ่มตัวอย่างย่อยเทียบกับขีดจำกัดการควบคุมดังแสดงในรูปที่ 4.5 - 4.14 ซึ่งผลการพล็อตกราฟแสดงให้เห็นว่ากระบวนการวัดค่อนข้างคงที่ จึงกล่าวได้ว่าระบบการวัดมีเสถียรภาพ เนื่องจากไม่พบผลกระทบสาเหตุพิเศษ (Special cause effects) ที่เห็นได้ชัดเจนจากแผนภูมิควบคุมดังกล่าว โดยจะสังเกตเห็นว่าจุดทุกจุดในแผนภูมิควบคุมยังอยู่ในช่วงขีดจำกัดการควบคุมทั้งสองด้าน



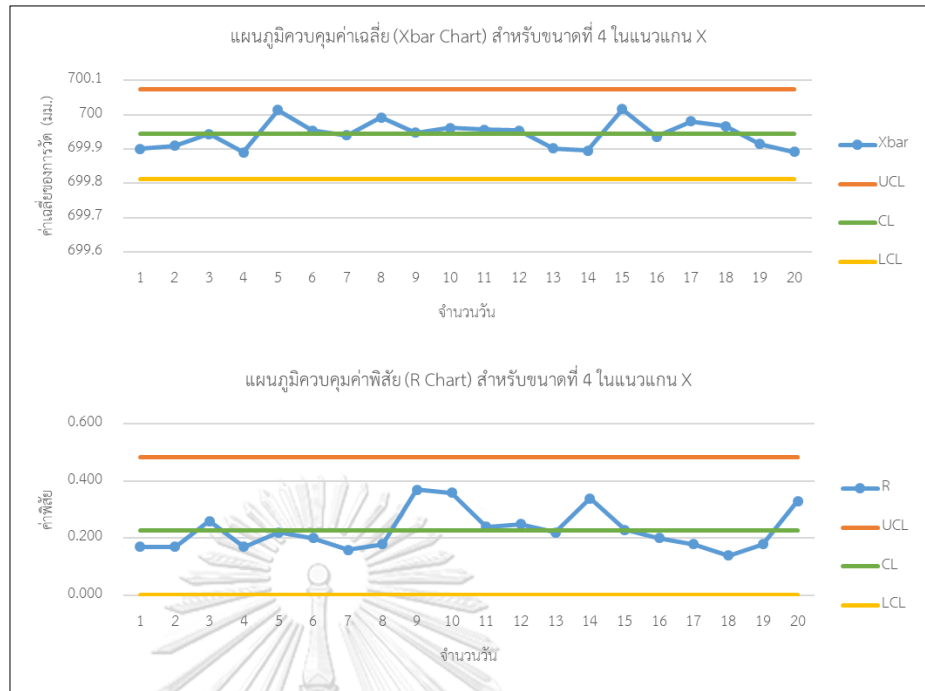
รูปที่ 4.5 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย สำหรับขนาดที่ 1 ในแนวแกน X



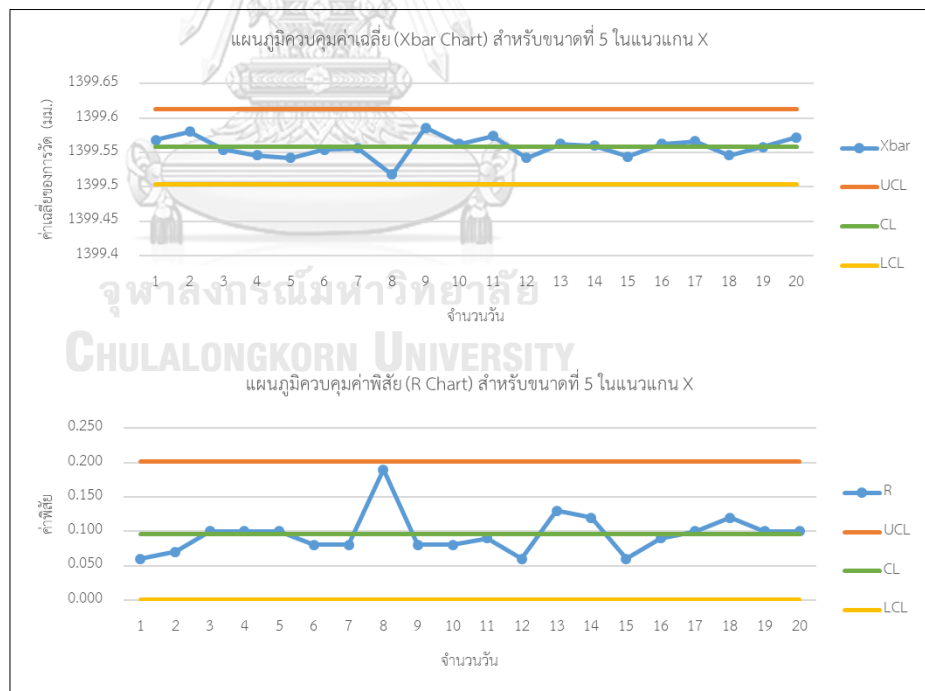
รูปที่ 4.6 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย สำหรับขนาดที่ 2 ในแนวแกน X



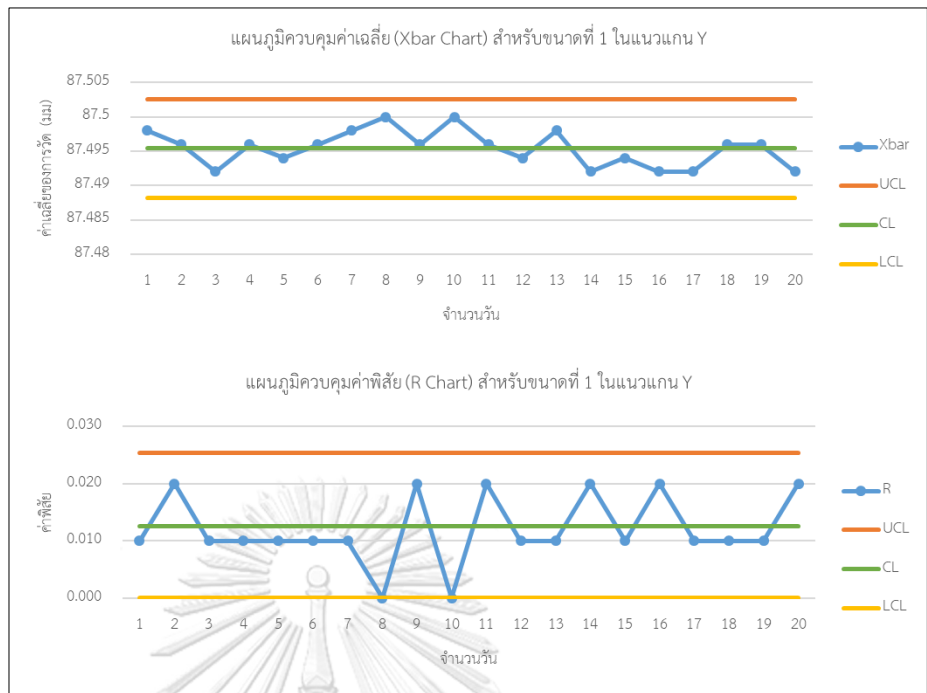
รูปที่ 4.7 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย สำหรับขนาดที่ 3 ในแนวแกน X



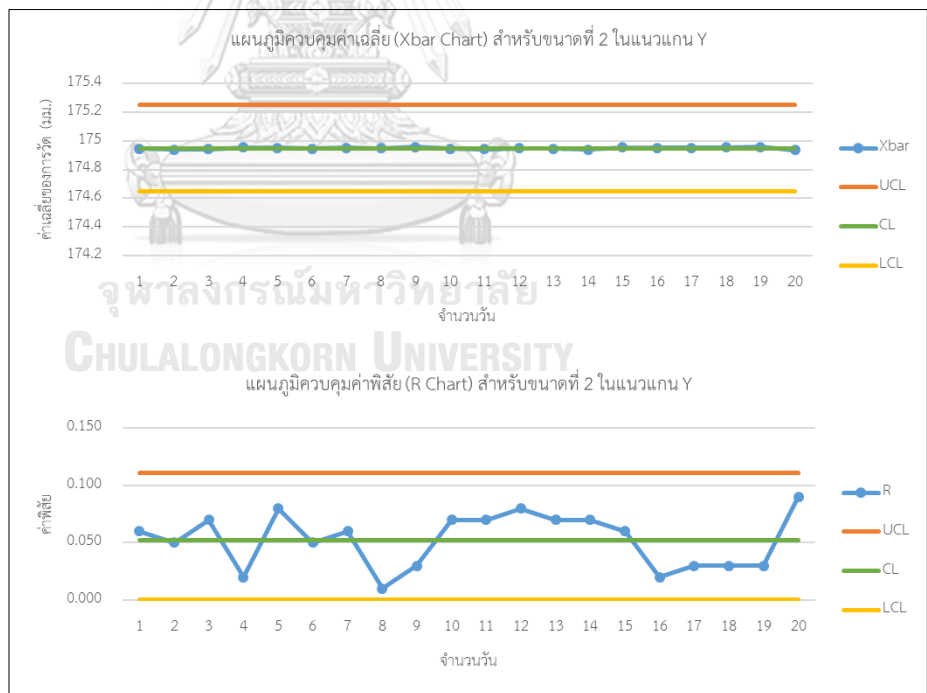
รูปที่ 4.8 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย สำหรับขนาดที่ 4 ในแนวแกน X



รูปที่ 4.9 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย สำหรับขนาดที่ 5 ในแนวแกน X



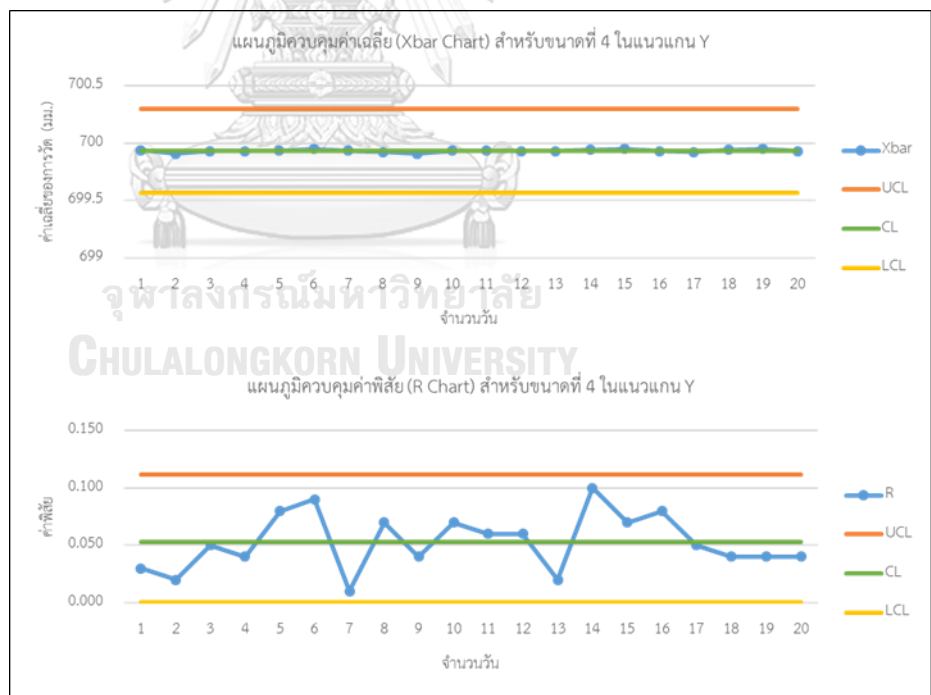
รูปที่ 4.10 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย สำหรับขนาดที่ 1 ในแนวแกน Y



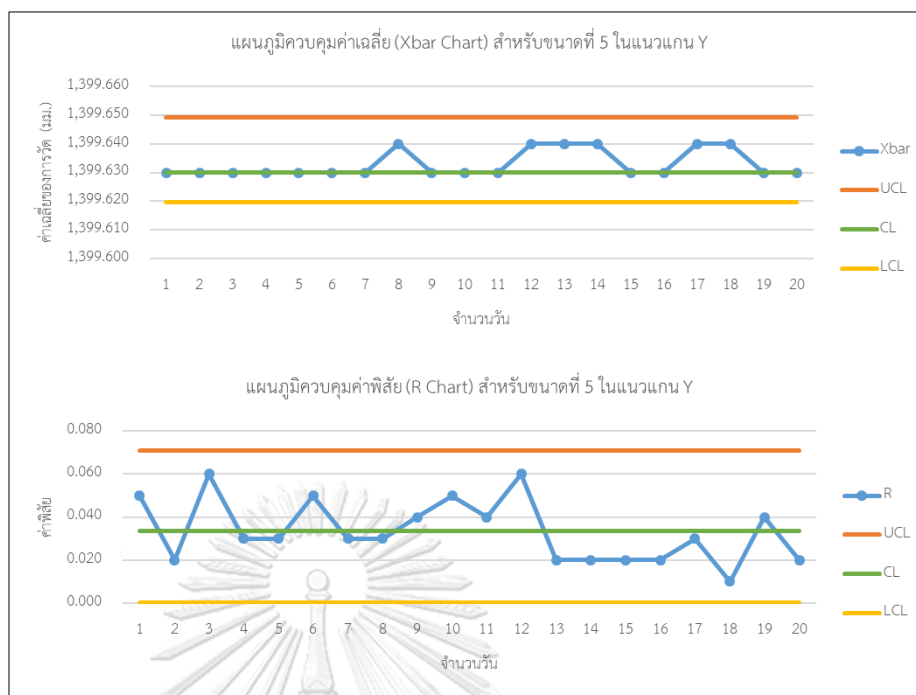
รูปที่ 4.11 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย สำหรับขนาดที่ 2 ในแนวแกน Y



รูปที่ 4.12 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย สำหรับขนาดที่ 3 ในแนวแกน Y



รูปที่ 4.13 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย สำหรับขนาดที่ 4 ในแนวแกน Y



รูปที่ 4.14 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย สำหรับขนาดที่ 5 ในแนวแกน Y

4.1.2.2) ผลการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของเครื่องมือวัด

จากกราฟค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยของทุกกลุ่มตัวอย่างย่อยเทียบกับขีดจำกัดการควบคุมดังแสดงในรูปที่ 4.5 - 4.14 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการวัดค่อนข้างคงที่ หมายถึงระบบการวัดมีเสถียรภาพ เนื่องจากไม่พบผลกระทบสาเหตุพิเศษ (Special cause effects) ที่เห็นได้ชัดเจนจากแผนภูมิควบคุมดังกล่าว โดยจะสังเกตเห็นว่าจุดทุกจุดในแผนภูมิควบคุมยังอยู่ในช่วงขีดจำกัดการควบคุมทั้งสองด้าน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.3) การวิเคราะห์ความเป็นเส้นตรง (Linearity)

การวิเคราะห์ความเป็นเส้นตรงสามารถทำได้โดยการพล็อตกราฟค่าความเอนเอียงเทียบกับค่าอ้างอิงของขนาดที่วัดทุกขนาด โดยทำการวัดแผ่นสอบเทียบทั้งหมด 5 ขนาด และวัดซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง ทั้งในแนวแกน X และในแนวแกน Y จากนั้นจึงใช้ผลการวัดและความเอนเอียงในตารางที่ 4.4 มาทำการวิเคราะห์ความเป็นเส้นตรง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ (MSA, 2010)

4.1.3.1) ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเป็นเส้นตรง

1. เลือกชิ้นงาน (Part) ที่จะนำมาวัดให้มีขนาดแตกต่างกันตั้งแต่ 5 ขนาดขึ้นไป ($g \geq 5$) เพื่อให้ความแปรปรวนของกระบวนการครอบคลุมช่วงการใช้งานของเครื่องมือวัด ซึ่งใน

งานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกแผ่นสอบเทียบ (Nikon Glass gauge) ที่มีช่วงขนาดสำหรับการวัดที่แตกต่างกันทั้งหมด 5 ขนาด

2. โดยให้แต่ละขนาดมีการวัดซ้ำตั้งแต่ 10 ครั้งขึ้นไป ($m \geq 10$) ด้วยพนักงานงานคนเดิม และได้ผลการวัดดังแสดงในตารางที่ 4.18 และ 4.19

ตารางที่ 4.18 ผลการวัดแผ่นสอบเทียบทั้ง 5 ขนาด โดยการวัดซ้ำ 10 ครั้ง ของแกน X

Part reference		1	2	3	4	5
		87.5	175	350	700	1,400
TRIALS	1	87.5	174.98	350.01	699.96	1399.55
	2	87.5	174.99	350.01	699.99	1399.56
	3	87.5	174.99	350.02	699.96	1399.55
	4	87.5	175	350.01	699.97	1399.6
	5	87.49	174.99	350.01	699.97	1399.65
	6	87.5	174.98	350.02	699.96	1399.55
	7	87.5	175	350.01	699.99	1399.56
	8	87.5	175	350.02	699.96	1399.56
	9	87.49	174.99	350.01	699.67	1399.56
	10	87.5	174.99	350.02	699.99	1399.56

ตารางที่ 4.19 ผลการวัดแผ่นสอบเทียบทั้ง 5 ขนาด โดยการวัดซ้ำ 10 ครั้ง ของแกน Y

Part reference		1	2	3	4	5
		87.5	175	350	700	1,400
TRIALS	1	87.5	174.94	350.02	699.9	1399.63
	2	87.49	174.93	350.02	699.93	1399.63
	3	87.49	174.94	350.02	699.94	1399.64
	4	87.5	174.97	350.02	699.98	1399.65
	5	87.5	174.95	350.02	699.95	1399.66
	6	87.49	174.97	350.01	699.95	1399.64
	7	87.49	174.97	350.02	699.96	1399.64
	8	87.5	174.95	350.01	699.94	1399.64
	9	87.5	174.96	350.02	699.95	1399.63
	10	87.5	174.97	350.02	699.94	1399.64

3. จากนั้นจึงเริ่มคำนวณค่าเอนเอียง (Bias) ของแต่ละการวัดดังที่ได้แสดงไปก่อนหน้านี้แล้ว โดยอ้างอิงสมการที่ 4.1 และคำนวณค่าเอนเอียงเฉลี่ย (Bias Average) ของแต่ละขนาดดังสมการที่ 4.18 เมื่อ m คือจำนวนการวัดซ้ำ และได้ผลดังตารางที่ 4.20 และ 4.21

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - \tau \quad (4.1)$$

$$Bias\ Average = \frac{\sum_{j=1}^m Bias}{m} \quad (4.18)$$

ตารางที่ 4.20 ผลการคำนวณค่าเอนเอียงและค่าเอนเอียงเฉลี่ยของแกน X

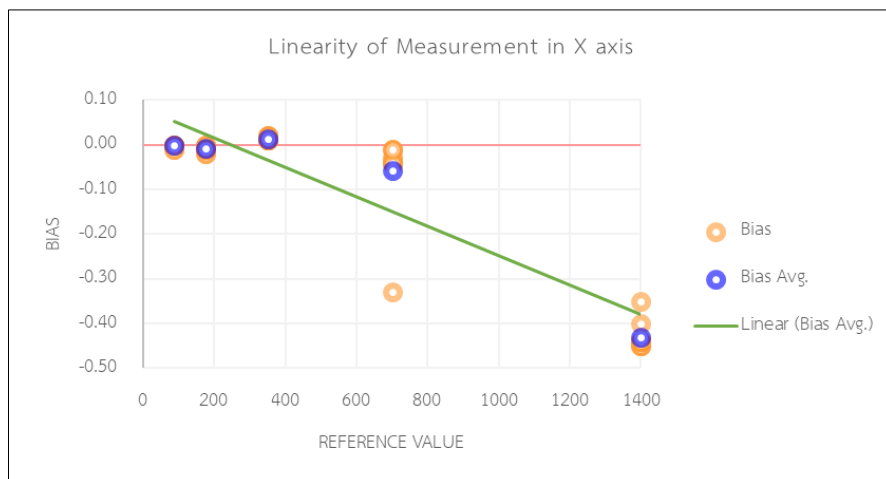
Part reference		1	2	3	4	5
		87.5	175	350	700	1,400
BIAS	1	0.00	-0.02	0.01	-0.04	-0.45
	2	0.00	-0.01	0.01	-0.01	-0.44
	3	0.00	-0.01	0.02	-0.04	-0.45
	4	0.00	0.00	0.01	-0.03	-0.40
	5	-0.01	-0.01	0.01	-0.03	-0.35
	6	0.00	-0.02	0.02	-0.04	-0.45
	7	0.00	0.00	0.01	-0.01	-0.44
	8	0.00	0.00	0.02	-0.04	-0.44
	9	-0.01	-0.01	0.01	-0.33	-0.44
	10	0.00	-0.01	0.02	-0.01	-0.44
Bias Avg.		-0.002	-0.009	0.014	-0.058	-0.430

ตารางที่ 4.21 ผลการคำนวณค่าเอนเอียงและค่าเอนเอียงเฉลี่ยของแกน Y

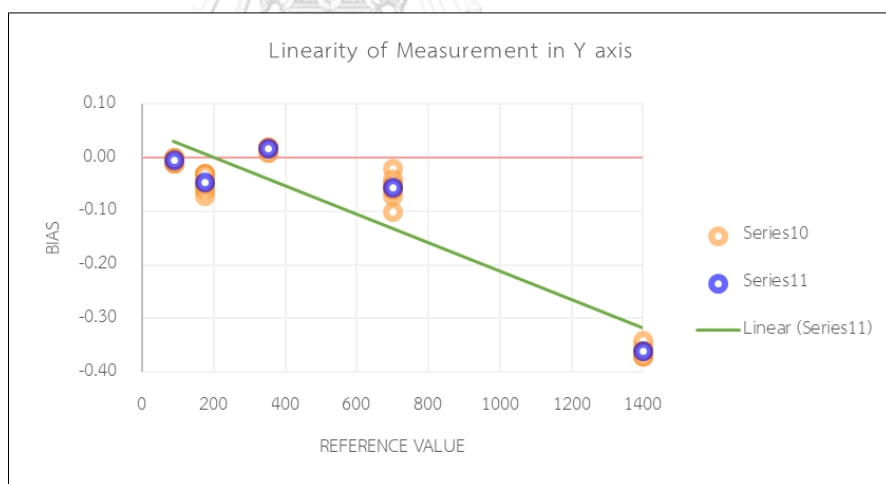
Part reference		1	2	3	4	5
		87.5	175	350	700	1,400
BIAS	1	0.00	-0.06	0.02	-0.10	-0.37
	2	-0.01	-0.07	0.02	-0.07	-0.37
	3	-0.01	-0.06	0.02	-0.06	-0.36
	4	0.00	-0.03	0.02	-0.02	-0.35
	5	0.00	-0.05	0.02	-0.05	-0.34
	6	-0.01	-0.03	0.01	-0.05	-0.36
	7	-0.01	-0.03	0.02	-0.04	-0.36
	8	0.00	-0.05	0.01	-0.06	-0.36
	9	0.00	-0.04	0.02	-0.05	-0.37
	10	0.00	-0.03	0.02	-0.06	-0.36
Bias Avg.		-0.004	-0.045	0.018	-0.056	-0.360

4. พล็อตค่าเอนเอียงแต่ละค่าและค่าเอนเอียงเฉลี่ยเทียบกับค่าอ้างอิงบนกราฟเส้นตรง จะได้ผลการพล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ซึ่งพบว่าค่าเอนเอียงจะมีค่าน้อยเมื่อชิ้นงานที่วัดมีขนาดเล็ก และเมื่อวัดชิ้นงานที่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น (ขนาดชิ้นงานตั้งแต่ 700 มิลลิเมตรเป็นต้นไป) จะยิ่งทำให้ค่าความเอนเอียงมีขนาดที่มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่ง

หมายความว่าระบบการวัดนี้จะยังมีความแม่นยำในการวัดที่ดีเมื่อชิ้นงานที่นำมาวัดมีขนาดเล็ก ยังมีขนาดเล็กยิ่งทำให้ค่าความเอนเอียงมีน้อย ส่งผลให้ค่าวัดจริงมีค่าเข้าใกล้ค่าอ้างอิงอย่างมาก



รูปที่ 4.15 ค่าเอนเอียงแต่ละค่าและค่าเอนเอียงเฉลี่ยเทียบกับค่าอ้างอิงของแกน X



รูปที่ 4.16 ค่าเอนเอียงแต่ละค่าและค่าเอนเอียงเฉลี่ยเทียบกับค่าอ้างอิงของแกน Y

- และเพื่อให้ทราบถึงการยอมรับที่สามารถยอมรับได้ของความเป็นเส้นตรงตามค่าแนะนำที่ได้กล่าวว่า “ระบบการวัดควรจะมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นเส้นตรงน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์” (Automotive Industry Action Group, AIAG) จึงต้องพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความเป็นเส้นตรงจากเส้นถดถอย (Regression line) หรือเรียกว่าเส้นที่พอดีที่สุด (Best-fit line) และค่าความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองที่สามารถอธิบายได้ (R-square) มีอยู่ใน

ตัวแบบเชิงเส้นนี้เกิน 80% ตามค่าแนะนำของ AIAG หรือไม่ โดยที่เส้นถดถอยหรือเส้นที่พอดีที่สุดสามารถอ้างอิงได้จากสมการที่ 4.18 (MSA, 2010)

$$\bar{y}_i = ax_i + b \quad (4.18)$$

โดย \bar{y}_i คือ ค่าเฉลี่ยความเอนเอียง (Bias average)

x_i คือ ค่าอ้างอิง (Reference value)

จากสมการที่ 4.18 จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของค่าอ้างอิง (a) และค่าคงที่ (b) ได้จากสมการที่ 4.19 และ 4.20 (MSA, 2010) ซึ่งได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.22

$$a = \frac{\sum xy - \left(\frac{1}{gm} \sum x \sum y\right)}{\sum x^2 - \frac{1}{gm} (\sum x)^2} = \text{slope} \quad (4.19)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} = \text{intercept} \quad (4.20)$$

โดย g คือ จำนวนขนาดตัวอย่างที่ใช้ ซึ่งในที่นี้คือ 5 ขนาดที่แตกต่างกัน

m คือ จำนวนการวัดซ้ำของแต่ละขนาด

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.22 ผลการคำนวณของค่าต่างๆในสมการถดถอยหรือเส้นที่พอดีที่สุด

ผลการคำนวณ	สำหรับแกน X	สำหรับแกน Y
$\sum xy$	-6,392.5209	-5,449.8919
gm	50	50
$\sum x$	27,120.15	27,120.53
$\sum y$	-4.85	-4.47
$\sum x^2$	26,095,025.48	26,096,911.36
$(\sum x)^2$	735,502,536	735,523,147.5
\bar{y}	-0.097	-0.0894
\bar{x}	542.403	542.4106
a (slope)	-0.000330424	-0.000265694
b (intercept)	0.082222847	0.054715504

ค่าความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองที่สามารถอธิบายได้ (R-square) ของแบบจำลองที่ได้มา สามารถหาได้จากสมการที่ 4.21 และได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.23

$$R^2 = \left(\frac{(\sum(y_i - \bar{y})^2) - (\sum(y_i - \hat{y})^2)}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \right) \times 100\% \quad (4.21)$$

โดย y_i คือค่าความเอนเอียง (Bias) ในการวัดชิ้นงานของครั้งที่ i

\bar{y} คือค่าเฉลี่ยความเอนเอียง (Bias) ในการวัดชิ้นงาน

\hat{y} คือค่าความเอนเอียงที่ได้มาจากสมการเส้นตรง

ตารางที่ 4.23 ผลการคำนวณค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองที่สามารถอธิบายได้

เทอม	ความหมาย	ค่าที่คำนวณได้	
		แกน X	แกน Y
$\sum (y_i - \bar{y})^2$	คือผลรวมของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างตัวแปรตามและค่าเฉลี่ย (SS_{Total})	1.508	0.958
$\sum (y_i - \hat{y})^2$	คือความแปรปรวนทั้งหมดในตัวแปรตามที่ไม่ได้อธิบายโดยแบบจำลองการถดถอย ซึ่งจะเรียกว่าผลรวมของข้อผิดพลาดของกำลังสอง (Error Sum of Squares) และเป็นผลรวมของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่ทำนายของข้อมูลทั้งหมด (SS_{Error})	0.265	0.155
$(\sum (y_i - \bar{y})^2) - (\sum (y_i - \hat{y})^2)$	คือความแปรปรวนทั้งหมดในตัวแปรตามที่อธิบายได้โดยแบบจำลองการถดถอย ซึ่งเป็นผลรวมของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายและค่าเฉลี่ยของค่าจุดข้อมูลทั้งหมด ($SS_{Regression}$)	1.243	0.804
R^2	คือค่าความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองที่สามารถอธิบายได้ในตัวแบบจำลอง หรือเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination)	82.4%	83.9%

จากตารางที่ 4.23 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่ามากกว่า 80% ทั้งในแนวแกน X และในแนวแกน Y ตามค่าแนะนำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้มานั้นสามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าตัวแปรตอบสนองที่กระจายอยู่รอบค่าเฉลี่ยได้มากกว่า 80%

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ได้ประยุกต์ใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% หมายความว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติคือ 0.05 ($\alpha = 0.05$) โดยสามารถหาช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติได้จากสมการที่ 4.22 และ 4.23 โดยจะใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.24 (MSA, 2010) มาใช้ในการคำนวณ โดยผลการคำนวณจะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.24

$$\text{Lower: } (b + ax_0) - \left[t_{gm-2, 1-\frac{\alpha}{2}} \left(\sqrt{\left(\frac{1}{gm} + \frac{(x_0-\bar{x})^2}{\sum(x_i-\bar{x})^2} \right)} s \right) \right] \quad (4.22)$$

$$\text{Upper: } (b + ax_0) + \left[t_{gm-2, 1-\frac{\alpha}{2}} \left(\sqrt{\left(\frac{1}{gm} + \frac{(x_0-\bar{x})^2}{\sum(x_i-\bar{x})^2} \right)} s \right) \right] \quad (4.23)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum y_i^2 - b \sum y_i - a \sum x_i y_i}{gm-2}} \quad (4.24)$$

ตารางที่ 4.24 ผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าส่วนตกค้าง

ผลการคำนวณ	สำหรับแกน X	สำหรับแกน Y
$\sum y_i$	-4.85	-4.47
$\sum (y_i)^2$	1.979	1.358
$\sum x_i y_i$	-6,392.52	-5,449.89
G	5	5
m	10	10
a (slope)	-0.00033	-0.00026
b (intercept)	0.0822	0.0547
s	0.0743	0.0567

ตารางที่ 4.25 ผลการคำนวณช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% สำหรับแกน X

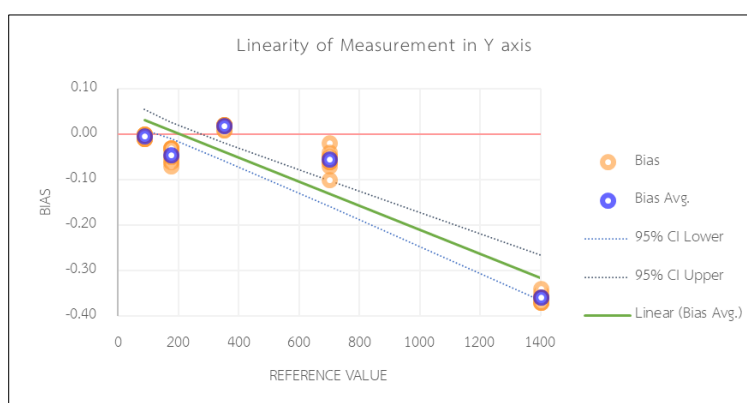
x_0	87.5	175	350	700	1,400
\bar{x}	542.410	542.410	542.410	542.410	542.410
$\hat{y}=ax_0+b$	0.031467	0.008218	-0.038277	-0.131270	-0.317256

$t_{\text{gm}-2, 1-\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$	2.0106	2.0106	2.0106	2.0106	2.0106
$(x_0 - \bar{x})^2$	206,943.6	30,625	122,500	490,000	1,960,000
$\sum(x_0 - \bar{x})^2$	11,386,448	11,386,448	11,386,448	11,386,448	11,386,448
95% CI_{Lower}	0.009173	-0.008968	-0.058288	-0.159917	-0.367271
95% CI_{Upper}	0.053760	0.025406	-0.018266	-0.102623	-0.267242

จากตารางที่ 4.24 สามารถสร้างสมการเส้นตรง $y_i = 0.0822 - 0.00033(x_i)$ สำหรับแกน X และ $y_i = 0.0547 - 0.00026(x_i)$ สำหรับแกน Y ซึ่งสามารถคำนวณช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ของทั้งสองแกนได้ผลดังตารางที่ 4.25 และ 4.26 จากนั้นจะสามารถพล็อตค่าช่วงความเชื่อมั่นเพิ่มเข้าไปในกราฟค่าเอนเอียงแต่ละค่าและค่าเอนเอียงเฉลี่ยเทียบกับค่าอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.17 ค่าเอนเอียงและค่าเอนเอียงเฉลี่ยเทียบกับค่าอ้างอิงของแกน X



รูปที่ 4.18 ค่าเอนเอียงและค่าเอนเอียงเฉลี่ยเทียบกับค่าอ้างอิงของแกน Y

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่า ค่าเอนเอียงของขนาดการวัดที่ 700 มิลลิเมตร มีสาเหตุพิเศษ (Special cause) เกิดขึ้นในแนวแกน X และถึงแม้ว่าจะตัดการวิเคราะห์ของขนาดการวัดที่ 700 มิลลิเมตรออก ก็ยังพบว่าระบบการวัดนี้มีปัญหาเรื่องความเป็นเส้นตรง เนื่องจากพบว่าเส้นความเอนเองเท่ากับศูนย์ (Bias = 0) ตัดที่ขอบเขตความเชื่อมั่น 95% แทนที่จะอยู่ในขอบเขตช่วงความเชื่อมั่น จึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ผลเชิงตัวเลข (Analysis of Numerical results) ในข้อถัดไป เพื่อยืนยันว่าระบบการวัดนี้มีความเป็นเส้นตรงที่สามารถยอมรับได้

6. ในการวิเคราะห์ผลเชิงตัวเลข สามารถใช้เทคนิคการตรวจสอบสมมติฐานเพื่อตรวจสอบว่าความเป็นเส้นตรงของระบบการวัดนี้สามารถยอมรับได้หรือไม่ โดยจะทำการทดสอบสมมติฐานทั้งค่าความชัน (Slope) และค่าคงที่ (Intercept) โดยตั้งสมมติฐานหลัก (H_0) และสมมติฐานรอง (H_1) ได้ดังตารางที่ 4.27 (MSA, 2010)

ตารางที่ 4.27 สมมติฐานที่ใช้สำหรับการตรวจสอบ

การตรวจสอบ	สมมติฐาน	หลักฐานทางสถิติที่ใช้ในการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Reject H_0)
ความชัน (a)	$H_0: a=0$ $H_1: a \neq 0$	$ t = \frac{ a }{\frac{s}{\sqrt{\sum(x_j - \bar{x})^2}}} \leq t_{gm-2, 1-\frac{\alpha}{2}}$
ค่าคงที่ (b)	$H_0: b=0$ $H_1: b \neq 0$	$ t = \frac{ b }{\sqrt{\frac{1}{gm} + \frac{\bar{x}^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}}} s \leq t_{gm-2, 1-\frac{\alpha}{2}}$

ผลการคำนวณค่าสัมบูรณ์ที่สังเกต ($|t|$ หรือ $|t_{\text{Observed}}|$) และค่าที่วิกฤติ (t_{Critical}) ของทั้งความชันและค่าคงที่ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.28 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทุกค่าของค่าสัมบูรณ์ที่สังเกตมีค่ามากกว่าค่าที่วิกฤติ หมายความว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ แสดงให้เห็นว่าความชันและค่าคงที่มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ความเชื่อมั่น 95% จึงส่งผลให้ความเอนเอียงมีค่าเป็นศูนย์ด้วย จึงยอมรับความเป็นเส้นตรงของระบบการวัดนี้ได้

ตารางที่ 4.28 ผลการคำนวณค่าสัมบูรณ์ที่ที่สังเกตและค่าที่วิกฤติ

แกน	การตรวจสอบ	ค่าสัมบูรณ์ที่ ($ t $)	ค่าที่วิกฤติ ($t_{\alpha/2, n-2}$)	สรุปผลการทดสอบสมมติฐาน
X	ความชัน (a)	4.0902	$t_{(5 \times 10) - 2, 1 - (0.05/2)} = 2.0106$	ค่า $ t > t_{\text{Critical}}$ ดังนั้นไม่สามารถปฏิเสธ H_0 ได้
	ค่าคงที่ (b)	5.1686	$t_{(5 \times 10) - 2, 1 - (0.05/2)} = 2.0106$	ค่า $ t > t_{\text{Critical}}$ ดังนั้นไม่สามารถปฏิเสธ H_0 ได้
Y	ความชัน (a)	3.7652	$t_{(5 \times 10) - 2, 1 - (0.05/2)} = 2.0106$	ค่า $ t > t_{\text{Critical}}$ ดังนั้นไม่สามารถปฏิเสธ H_0 ได้
	ค่าคงที่ (b)	4.5072	$t_{(5 \times 10) - 2, 1 - (0.05/2)} = 2.0106$	ค่า $ t > t_{\text{Critical}}$ ดังนั้นไม่สามารถปฏิเสธ H_0 ได้

4.1.3.2) ผลการวิเคราะห์ความเป็นเส้นตรง

หลังจากนั้นจะสามารถพิจารณาความเป็นเส้นตรง (Linearity) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นเส้นตรง (%Linearity) จากสมการที่ 4.25 และ 4.26 โดยใช้ค่าความแปรปรวนของกระบวนการ (Process Variation, PV) ที่ได้มาจากการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการในเบื้องต้น และได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.29 ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเส้นตรงมีค่าน้อยกว่า 5% ตามคำแนะนำของ AIAG จึงหมายความว่าระบบการวัดนี้มีความเป็นเส้นตรงที่สามารถยอมรับได้

$$\text{Linearity} = |\text{Slope}| \times 6(\text{PV}) \quad (4.25)$$

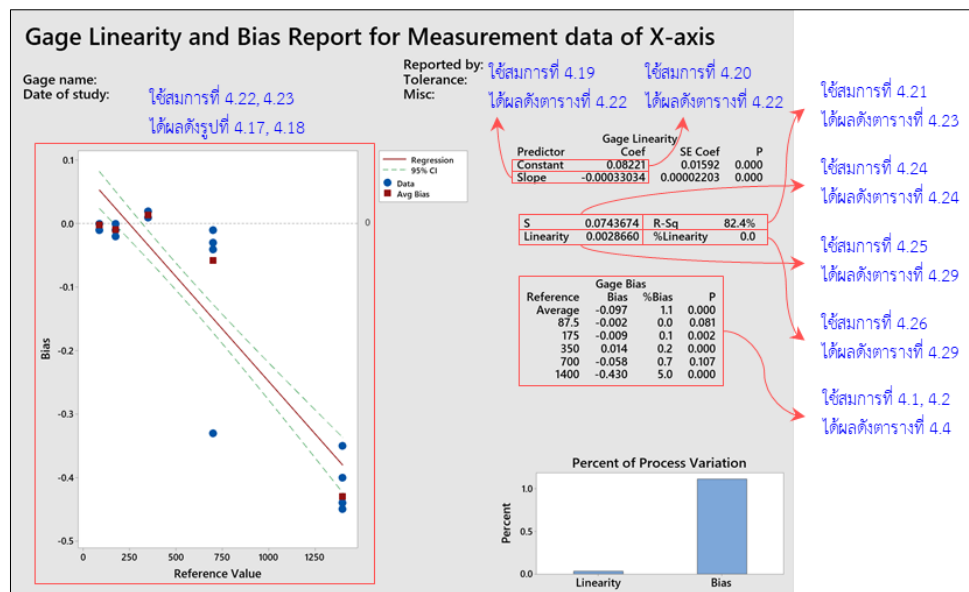
$$\% \text{Linearity} = [\text{Linearity} / 6(\text{PV})] \times 100 = |\text{Slope}| \times 100 \quad (4.26)$$

ตารางที่ 4.29 ผลการคำนวณความเป็นเส้นตรงและเปอร์เซ็นต์ความเป็นเส้นตรง

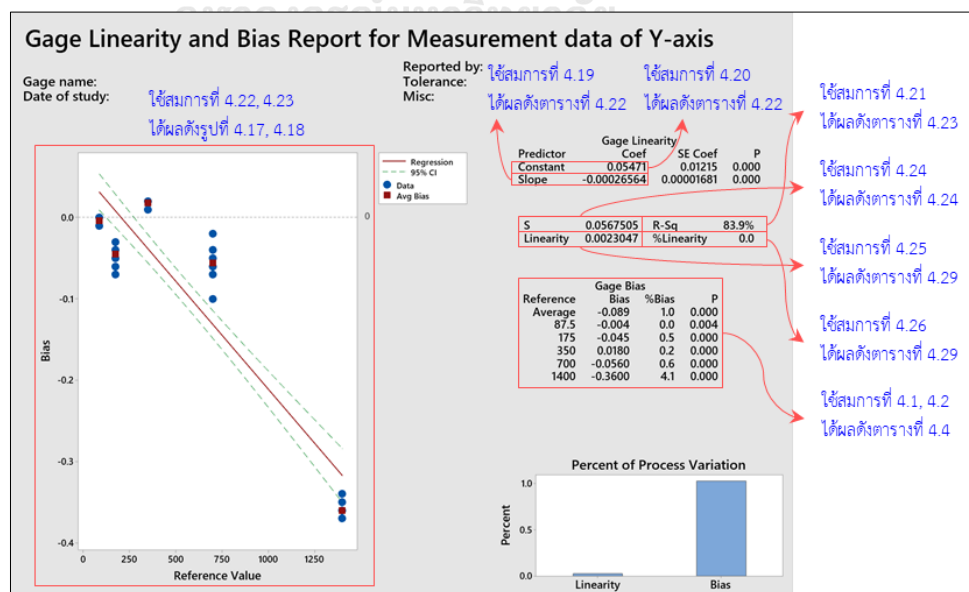
ตัวแปร	แกน X	แกน Y
PV (Process Variation)	1.446	1.446
Slope (a)	-0.00033	-0.00026
Linearity	$ -0.00033 \times 6(1.446) = 0.00286$	$ -0.00026 \times 6(1.446) = 0.00225$
%Linearity	$ -0.00033 \times 100 = 0.033$	$ -0.00026 \times 100 = 0.026$

4.1.3.3) ผลการวิเคราะห์ความเอนเอียงและความเป็นเส้นตรงด้วย Minitab

การวิเคราะห์ความเอนเอียง (Bias) และความเป็นเส้นตรง (Linearity) สามารถทำได้อย่างสะดวกด้วยโปรแกรมทางสถิติ Minitab ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการคำนวณของการวิเคราะห์ความเอนเอียงและความเป็นเส้นตรงดังที่ได้พิสูจน์มาในข้างต้น มีผลตรงกันกับผลการคำนวณและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสถิติ Minitab ทุกประการ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ความเอนเอียงและความเป็นเส้นตรงด้วย Minitab ในแกน X



รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ความเอนเอียงและความเป็นเส้นตรงด้วย Minitab ในแกน Y

4.1.4) การวิเคราะห์การทวนซ้ำและทำซ้ำ (Repeatability & Reproducibility)

ความสามารถในการทวนซ้ำ (repeatability) มีนิยามคือ ความสามารถในการทวนซ้ำของเครื่องมือวัด ซึ่งแสดงถึงระดับความถูกต้องใกล้เคียงกันของผลการวัดที่ได้จากการวัดหลายๆ ครั้งในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน โดยการวัดทั้งหมดต้องอยู่ภายใต้วิธีการวัด ผู้ทำการวัด และสภาวะแวดล้อมเดียวกัน หรือการแสดงถึงความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัด (Nunak, 2012)

ในขณะที่ความสามารถในการทำซ้ำ (reproducibility) มีนิยามคือ ระดับความใกล้เคียงค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด (equipment) ในเวลาที่แตกต่างกัน หรือค่าความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ โดยการวัดครั้งหนึ่งๆ สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขดังต่อไปนี้ได้ เช่น วิธีการวัด ผู้วัด รวมถึงสภาวะแวดล้อม ซึ่งค่าความสามารถในการทำซ้ำจะเกี่ยวข้องกับค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัด และแสดงความสัมพันธ์กับคุณลักษณะการเลื่อน (Drift) ของเครื่องมือวัด (Nunak, 2012)

โดยในงานวิจัยฉบับนี้ได้มีการฝึกอบรมผู้ทำการวัดจำนวน 2 คน เพื่อวัดความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ โดยที่ใช้เครื่องมือวัดที่ผ่านการสอบเทียบเครื่องมือแล้วเพียงเครื่องเดียวสำหรับการวัดของทั้ง 2 คน และจำนวนผลิตภัณฑ์ที่จะใช้วัดมีทั้งหมด 20 ชิ้น (ขั้นต่ำคือ 10 ชิ้น) เพื่อให้ครอบคลุมช่วงความผันแปรของกระบวนการ และจำนวนการวัดซ้ำในแต่ละผลิตภัณฑ์จะทำทั้งหมด 3 ครั้ง โดยมีค่าที่แนะนำในการวัดซ้ำคือ 2-4 ครั้ง (Ploypanichcharoen, 2006) ซึ่งผลการวัดขนาดความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ได้แสดงดังในตารางที่ 4.30 และตาราง ก-1 ในภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.30 ผลการวัดความกว้างรอยบินเพื่อใช้ประเมินความสามารถในการทวนซ้ำและทำซ้ำ

ชิ้นงาน	พนักงาน A			พนักงาน B		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	18.40	18.40	18.43	18.42	18.40	18.40
2	16.78	16.75	16.75	16.77	16.75	16.75
3	17.50	17.47	17.45	17.50	17.45	17.48
4	18.52	18.49	18.50	18.50	18.51	18.49
5	15.73	15.75	15.75	15.75	15.72	15.70
6	16.88	16.90	16.85	16.87	16.87	16.85
7	18.32	18.29	18.30	18.30	18.30	18.32
8	15.86	15.88	15.85	15.85	15.86	15.87

9	16.85	16.83	16.83	16.83	16.85	16.83
10	17.52	17.55	17.52	17.53	17.52	17.55
11	17.65	17.63	17.64	17.63	17.63	17.64
12	15.68	15.70	15.68	15.70	15.69	15.70
13	17.68	17.70	17.68	17.70	17.70	17.67
14	16.64	16.65	16.64	16.63	16.62	16.65
15	18.32	18.30	18.32	18.33	18.33	18.32
16	15.40	15.38	15.41	15.41	15.39	15.39
17	18.21	18.20	18.20	18.20	18.21	18.21
18	17.65	17.65	17.63	17.65	17.63	17.65
19	16.75	16.77	16.75	16.75	16.75	16.76
20	15.45	15.45	15.50	15.50	15.45	15.50

จากข้อมูลในตารางที่ 4.30 จะสามารถใช้วิธีในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของระบบการวัดได้อยู่ 3 วิธี ดังต่อไปนี้

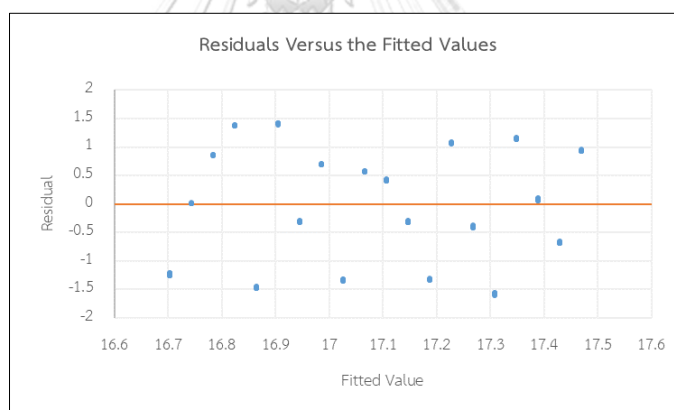
- ค่าพิสัย (Range method) วิธีนี้เป็นการศึกษาระบบการวัดแบบปรับเปลี่ยนตัวแปร ซึ่งจะให้การประมาณความแปรปรวนของการวัดอย่างรวดเร็ว วิธีนี้จะให้เฉพาะภาพรวมของระบบการวัดเท่านั้น วิธีนี้ไม่ได้แยกความแปรปรวนของระบบการวัดออกเป็นการทวนซ้ำและการทำซ้ำ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้วิธีนี้เป็นการตรวจสอบอย่างเร่งด่วนเพื่อตรวจสอบว่าระบบการวัดไม่มีการเปลี่ยนแปลง
- ค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย (Average and Range method) เป็นวิธีที่ใช้ประมาณความสามารถในการทวนซ้ำและทำซ้ำสำหรับระบบการวัด แตกต่างจากวิธีค่าพิสัยตรงที่วิธีการนี้จะสามารถแยกความแปรปรวนของระบบการวัดออกเป็นสองส่วน นั่นคือ ความสามารถในการทวนซ้ำ (Repeatability) และความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ จะไม่สามารถพิจารณาในส่วนอันตรกิริยาของชิ้นงานที่วัดและพนักงานที่วัดได้ (Interaction between Parts and Appraisers)
- การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เป็นวิธีการที่ดีในทางสถิติมาตรฐานและสามารถใช้ในการวิเคราะห์ข้อผิดพลาดในการวัดและแหล่งที่มาอื่นๆของความแปรปรวนของข้อมูลในการศึกษาระบบการวัดได้ โดยความแปรปรวนของระบบการวัดจะถูกแบ่งย่อยออกเป็นทั้งหมด 4 ประเภท คือ ชิ้นงานที่วัด (Parts), ผู้ที่ทำการวัดหรือพนักงานที่ทำการวัด (Appraisers), อันตรกิริยาระหว่างชิ้นงานและพนักงานที่ทำการวัด (Interaction

between Parts and Appraisers), และความผิดพลาดของความสามารถในการทวนซ้ำอันเนื่องมาจากเครื่องมือวัด (Replication error due to the gage, Repeatability)

โดยงานวิจัยฉบับนี้เลือกวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน เนื่องจากสามารถศึกษาอันตรกิริยาระหว่างชิ้นงานที่วัดและพนักงานที่ทำการวัดได้ ส่งผลให้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของระบบการวัดมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น (MSA, 2010)

4.1.4.1) ขั้นตอนการวิเคราะห์แปรปรวน (ANOVA)

ก่อนการวิเคราะห์ข้อมูลจำเป็นต้องมีการทดสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากแผนภาพกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (Residuals) กับความกว้างของรอยบิ่นที่ได้มาจากการถดถอย (Fitted Value) ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ที่แสดงให้เห็นว่าลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างไม่มีรูปแบบที่เป็นลักษณะกรวยปากเปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่า Fitted ของการวัดในระบบการวัด

โดยที่ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขทางสถิติของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จะต้องคำนวณค่าองศาของความเป็นอิสระ (Degree of Freedom, DF) คือค่าที่ใช้เพื่อชดเชยความผิดพลาดของตัวอย่างเมื่อนำมาคำนวณหาค่าสถิติ โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.27 – 4.31

$$DF_{\text{Part}} = a - 1 \quad (4.27)$$

$$DF_{\text{Appraiser}} = b - 1 \quad (4.28)$$

$$DF_{\text{Part*Appraiser}} = (a-1)(b-1) \quad (4.29)$$

$$DF_{\text{Repeatability}} = ab(n-1) \quad (4.30)$$

$$DF_{\text{Total}} = abn-1 \quad (4.31)$$

- โดย a คือจำนวนชิ้นงานที่นำมาวัด
 b คือจำนวนพนักงานที่ทำการวัด
 n คือจำนวนการวัดซ้ำในแต่ละชิ้นงาน

และนอกจากการคำนวณค่าองศาของความเป็นอิสระแล้ว ต้องคำนวณค่าผลรวมยกกำลังสอง (Sum Squared, SS) ที่เป็นการวัดความแปรปรวนจากแหล่งต่างๆ โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.32 – 4.36 (MSA 4th Edition, 2010)

$$SS_{\text{Part}} = bn \sum (\bar{x}_{i..} - \bar{x}_{...})^2 \quad (4.32)$$

$$SS_{\text{Appraiser}} = an \sum (\bar{x}_{.j.} - \bar{x}_{...})^2 \quad (4.33)$$

$$SS_{\text{Part*Appraiser}} = SS_{\text{Total}} - (SS_{\text{Part}} + SS_{\text{Appraiser}} + SS_{\text{Repeatability}}) \quad (4.34)$$

$$SS_{\text{Repeatability}} = \sum \sum \sum (x_{ijk} - \bar{x}_{ij.})^2 \quad (4.35)$$

$$SS_{\text{Total}} = \sum \sum \sum (x_{ijk} - \bar{x}_{...})^2 \quad (4.36)$$

- โดย $\bar{x}_{i..}$ คือค่าเฉลี่ยการวัดของแต่ละชิ้นงาน
 $\bar{x}_{...}$ คือผลเฉลี่ยรวมของข้อมูล (Grand mean)
 $\bar{x}_{.j.}$ คือค่าเฉลี่ยการวัดของพนักงานที่ทำการวัดแต่ละคน
 x_{ijk} คือข้อมูลการวัดแต่ละข้อมูล
 $\bar{x}_{ij.}$ คือค่าเฉลี่ยการวัดของชิ้นงานแต่ละระดับ

หลังจากนั้นจะเป็นการคำนวณค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง (Mean Squared, MS) ซึ่งเป็นการเอาค่าผลรวมยกกำลังสองมาหาค่าเฉลี่ยอีกโดยหารด้วยค่าองศาของความเป็นอิสระ โดยคำนวณได้ดังสมการที่ 4.37 – 4.40

$$MS_{\text{Part}} = \frac{SS_{\text{Part}}}{DF_{\text{Part}}} \quad (4.37)$$

$$MS_{\text{Appraiser}} = \frac{SS_{\text{Appraiser}}}{DF_{\text{Appraiser}}} \quad (4.38)$$

$$MS_{\text{Part*Appraiser}} = \frac{SS_{\text{Part*Appraiser}}}{DF_{\text{Part*Appraiser}}} \quad (4.39)$$

$$MS_{\text{Repeatability}} = \frac{SS_{\text{Repeatability}}}{DF_{\text{Repeatability}}} \quad (4.40)$$

จากนั้นจะสามารถคำนวณค่าสถิติ F ($F_{\text{Statistic}}$) เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในการตัดสินใจว่าความแปรปรวนจากแหล่งที่มาใด ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระบบการวัด โดยจะใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05) และสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.41 – 4.43

$$F_{\text{Part}} = \frac{MS_{\text{Part}}}{MS_{\text{Part*Appraiser}}} \quad (4.41)$$

$$F_{\text{Appraiser}} = \frac{MS_{\text{Appraiser}}}{MS_{\text{Part*Appraiser}}} \quad (4.42)$$

$$F_{\text{Part*Appraiser}} = \frac{MS_{\text{Part*Appraiser}}}{MS_{\text{Repeatability}}} \quad (4.43)$$

จากผลการวัดตามตารางที่ 4.30 และอ้างอิงสมการที่ 4.27 - 4.43 จะสามารถสร้างตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนและได้ผลดังตารางที่ 4.31 และตารางที่ 4.32 ซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าความแปรปรวนจากแหล่งที่มาใด ที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระบบการวัด

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.31 ผลการคำนวณตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เมื่อมีผลอันตรกิริยา

Source	DF	SS	MS	$F_{\text{Statistic}}$	F_{Critical}	P-Value	Result
Part	19	123.530	6.50158	59,509	$F_{(0.05,19,1)} = 247.7$	0.003	Significant
Appraiser	1	0.000	0.00001	0.069	$F_{(0.05,1,19)} = 4.381$	0.796	Insignificant
Part*Appraiser	19	0.002	0.00011	0.475	$F_{(0.05,19,80)} = 1.718$	0.966	Insignificant
Repeatability	80	0.018	0.00023	---	---	---	---
Total	119	123.550	---	---	---	---	---

ตารางที่ 4.32 ผลการคำนวณตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เมื่อไม่มีผลอันตรกิริยา

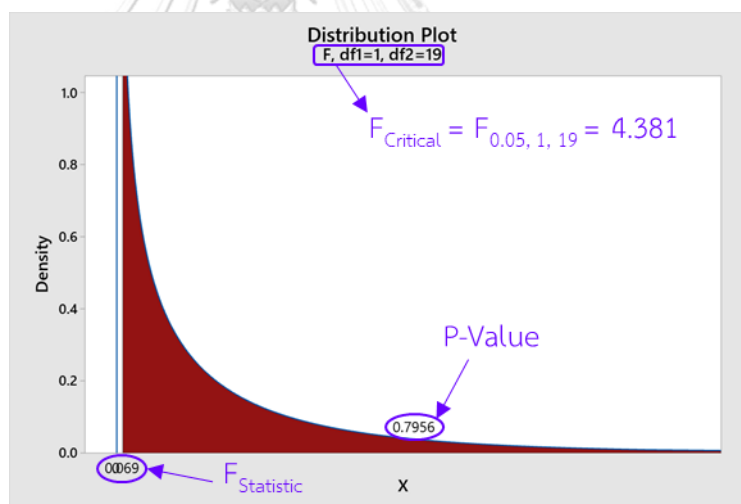
Source	DF	SS	MS	$F_{\text{Statistic}}$	F_{Critical}	P-Value	Result
Part	19	123.530	6.50158	31,435	$F_{(0.05,19,1)} = 247.7$	0.003	Significant

Appraiser	1	0.000	0.00001	0.069	$F_{(0.05,1,19)} = 4.381$	0.796	Insignificant
Repeatability	99	0.020	0.00021	---	---	---	---
Total	119	123.550	---	---	---	---	---

4.1.4.2) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

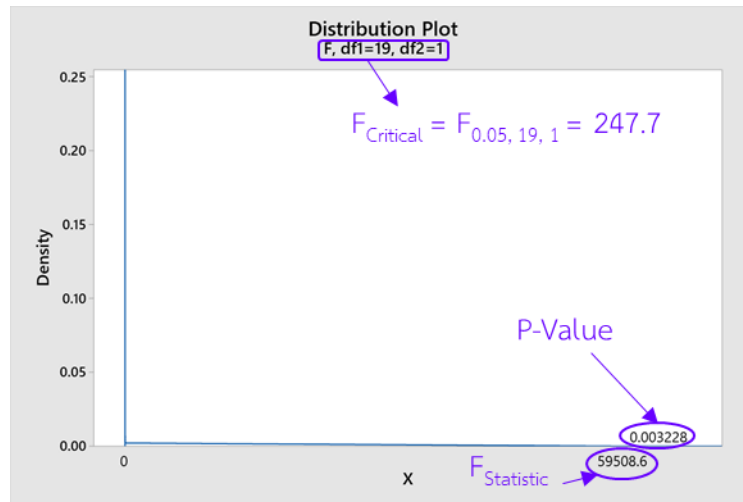
จากตารางที่ 4.31 และ 4.32 จะสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในระบบการวัดจากแหล่งที่มาของความแปรปรวนต่างๆได้ดังต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดความแปรปรวนจากพนักงานที่ทำกรวัด (Appraiser) มีค่าสถิติเอฟ ($F_{Statistic}$) เท่ากับ 0.069 ซึ่งมิต่ำกว่าค่าวิกฤติเอฟ ($F_{Critical}$) ที่มีค่าเท่ากับ 4.381 โดยมีผลสอดคล้องกันกับค่าความน่าจะเป็น (P-Value) ที่มีค่าเท่ากับ 0.796 ซึ่งมีความมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ดังแสดงในรูปที่ 4.22 แปลความหมายได้ว่าความแปรปรวนจากพนักงานที่ทำกรวัด (Appraiser) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความแปรปรวนของระบบการวัด



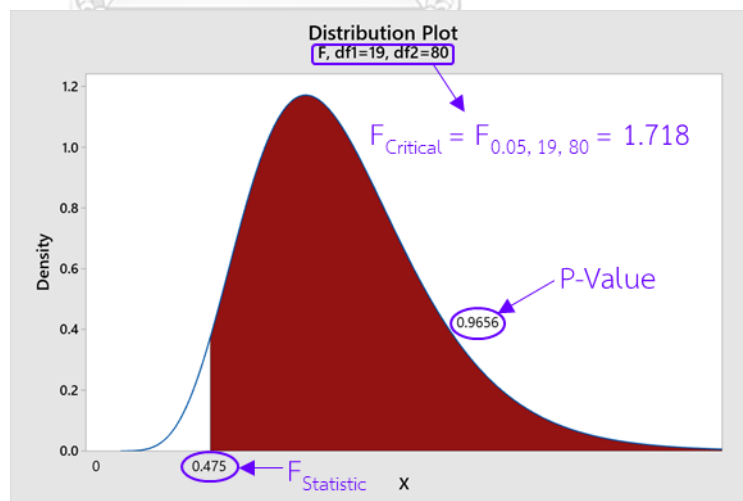
รูปที่ 4.22 แผนภาพการกระจายแบบเอฟ (F-distribution) ของพนักงานที่ทำกรวัด

2. แหล่งกำเนิดความแปรปรวนจากชิ้นงาน (Part) มีค่าสถิติเอฟ ($F_{Statistic}$) เท่ากับ 59,509 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าวิกฤติเอฟ ($F_{Critical}$) ที่มีค่าเท่ากับ 247.7 โดยมีผลสอดคล้องกันกับค่าความน่าจะเป็น (P-Value) ที่มีค่าเท่ากับ 0.003 ซึ่งมิต่ำกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ดังแสดงในรูปที่ 4.23 แปลความหมายได้ว่าความแปรปรวนจากชิ้นงาน (Part) มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความแปรปรวนของระบบการวัด



รูปที่ 4.23 แผนภาพการกระจายแบบเอฟ (F-distribution) ของชิ้นงานที่โดนวัด

3. แหล่งกำเนิดความแปรปรวนจากอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างพนักงานที่ทำกรวัดและชิ้นงาน (Part*Appraiser) จะพบว่าค่าสถิติเอฟ ($F_{Statistic}$) มีค่ามากกว่าค่าวิกฤติเอฟ ($F_{Critical}$) และค่าความน่าจะเป็น (P-Value) มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ซึ่งหมายความว่าความแปรปรวนจากอันตรกิริยาระหว่างพนักงานที่ทำกรวัดและชิ้นงาน มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติต่อความแปรปรวนของระบบการวัด



รูปที่ 4.24 แผนภาพการกระจายแบบเอฟของอันตรกิริยา (Part*Appraiser)

4.1.4.3) การวิเคราะห์องค์ประกอบความแปรปรวน (Variance Components)

นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาองค์ประกอบของความแปรปรวน (Variance Components, Var Comp) ที่เกิดขึ้นในระบบการวัดด้วย สามารถอ้างอิงได้จากสมการที่ 4.44 – 4.51 (MSA 4th Edition, 2010) และได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.33

$$\text{Var Comp}_{\text{Repeatability}} = \text{MS}_{\text{Repeatability}} \quad (4.44)$$

$$\text{Var Comp}_{\text{Appraiser}} = (\text{MS}_{\text{Appraiser}} - \text{MS}_{\text{Appraiser*Part}})/a \quad (4.45)$$

$$\text{Var Comp}_{\text{Appraiser*Part}} = (\text{MS}_{\text{Appraiser*Part}} - \text{MS}_{\text{Repeatability}})/n \quad (4.46)$$

$$\text{Var Comp}_{\text{Part-To-Part}} = (\text{MS}_{\text{Part}} - \text{MS}_{\text{Appraiser*Part}})/b \quad (4.47)$$

$$\text{Var Comp}_{\text{Reproducibility}} = \text{Var Comp}_{\text{Appraiser}} + \text{Var Comp}_{\text{Appraiser*Part}} \quad (4.48)$$

$$\text{Var Comp}_{\text{Total Gage R\&R}} = \text{Var Comp}_{\text{Repeatability}} + \text{Var Comp}_{\text{Reproducibility}} \quad (4.49)$$

$$\text{Var Comp}_{\text{Total Variation}} = \text{Var Comp}_{\text{Total Gage R\&R}} + \text{Var Comp}_{\text{Part-To-Part}} \quad (4.50)$$

$$\% \text{Contribution} = (\text{Var Comp} / \text{Total Variation}) 100 \quad (4.51)$$

โดย a คือจำนวนชิ้นงานที่นำมาวัด

b คือจำนวนพนักงานที่ทำการวัด

n คือจำนวนการวัดซ้ำในแต่ละชิ้นงาน

ตารางที่ 4.33 องค์ประกอบความแปรปรวน (Variance Components) ของระบบการวัด

Source	Var Comp	%Contribution
Total Gage R&R	0.00021	0.01937
- Repeatability	0.00021	0.01937
- Reproducibility	0.00000	0.00000
• Appraiser	0.00000	0.00000
Part-To-Part	1.08359	99.98062
Total Variation	1.08381	100.00000

4.1.4.4) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของความแปรปรวน

จากตารางที่ 4.33 พบว่าความแปรปรวนรวมที่เกิดขึ้นในระบบการวัด (Total Gage R&R) นี้ ประกอบไปด้วยความแปรปรวนอันเนื่องมาจากความสามารถในการวัดซ้ำของคนวัดหรืออุปกรณ์วัด (Repeatability) เพียงอย่างเดียว ไม่มีความแปรปรวนของความสามารถในการวัดซ้ำระหว่างคนวัด หรือระหว่างเครื่องมือวัด (Reproducibility) เกิดขึ้นในระบบการวัดนี้

เมื่อพิจารณาความแปรปรวนรวมทั้งหมดที่เกิดขึ้น (Total Variation) พบว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากเครื่องมือวัดนั้นน้อยมาก มีเพียง 0.01937% เท่านั้น

4.1.4.5) การประเมินผลเครื่องมือวัด (Gage Evaluation)

จากนั้นจะสามารถดูการประเมินผลเครื่องมือวัด (Gage Evaluation) ซึ่งสามารถอ้างอิงได้จากสมการที่ 4.52 – 4.54 สำหรับการประเมินความผันแปรจากระบบการวัดเทียบกับความผันแปรจากการผลิต (%SV) และสมการที่ 4.55 สำหรับการประเมินความผันแปรของเครื่องมือวัดเมื่อเทียบกับความกว้างของข้อกำหนดเฉพาะเมื่อทราบค่าขีดจำกัดของข้อกำหนดเฉพาะทั้งทางด้านบนและด้านล่าง และสมการที่ 4.56 เมื่อทราบค่าขีดจำกัดของข้อกำหนดเฉพาะด้านบนหรือด้านล่างเพียงด้านเดียว (MSA, 2010) ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้ขีดจำกัดของข้อกำหนดเฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว โดยได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.34

$$SD = (\text{Var Comp})^{1/2} \quad (4.52)$$

$$SV = 6(SD) \quad (4.53)$$

$$\%SV = (SV/\text{Total Variation})100 \quad (4.54)$$

$$\%Tolerance_{(\text{Tolerance is given})} = (SV / (\text{Upper spec} - \text{Lower spec}))100 \quad (4.55)$$

$$\%Tolerance_{(\text{One specification is given})} = ((SV/2) / |\text{One spec}-\bar{X}|)100 \quad (4.56)$$

โดย Upper spec คือขีดจำกัดของข้อกำหนดพิเศษด้านบน

Lower spec คือขีดจำกัดของข้อกำหนดพิเศษด้านล่าง

One spec คือขีดจำกัดของข้อกำหนดพิเศษด้านบนหรือล่างแค่ด้านเดียว

Xbar คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลวัดทุกข้อมูล

ตารางที่ 4.34 ผลการประเมินเครื่องมือวัด (Gage Evaluation) ของระบบการวัด

Source	SD (Standard Deviation)	SV (Study Variance)	%SV (%Study Variance)	%Tolerance
Total Gage R&R	0.01449	0.08695	1.39198	0.67791
Repeatability	0.01449	0.08695	1.39198	0.67791
Reproducibility	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Appraiser	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Part-To-Part	1.04096	6.24574	99.98985	48.69591
Total Variation	1.04106	6.24637	100.00000	48.70086

และเพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการแยกความแตกต่างของข้อมูลที่วัดได้ ว่าในระบบการวัดนี้มีความสามารถพอที่จะแยกแยะกลุ่มข้อมูลที่วัดได้มากกว่าค่าแนะนำหรือไม่ จึงต้องตรวจสอบจำนวนหมวดหมู่ที่แตกต่างกัน (Number of Distinct Categories, NDC) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนที่ศึกษา (%Study Variance, %SV) ได้ตามดังสมการที่ 4.57 (Donald J. Wheeler, 1990)

$$ndc = \sqrt{2} \frac{\sigma_{Part}}{\sigma_{Gage}} \quad \%SV = \frac{\sigma_{Gage}}{\sigma_{Total}} \times 100 \quad (4.57)$$

เมื่อ σ แสดงถึงรากที่สองขององค์ประกอบความแปรปรวน เมื่อใช้การแทนที่ในสมการ จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนหมวดหมู่ที่แตกต่างกัน (NDC) และเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนที่ศึกษา (%SV) ได้ดังต่อไปนี้

$$ndc = \sqrt{2} \frac{\sigma_{Part}}{\sigma_{Gage}}$$

$$ndc = \sqrt{2} \frac{\sigma_{Part}}{\sigma_{Gage}} \left(\frac{\sigma_{Gage}}{\sigma_{Total}} \times 100 \right) \left(\frac{1}{\%SV} \right)$$

$$ndc = \sqrt{2} \frac{(100)\sigma_{Part}}{\sigma_{Total}} \left(\frac{1}{\%SV} \right)$$

จากสมการข้างต้น จะเห็นว่าจำนวนหมวดหมู่ที่แตกต่างกัน (NDC) และเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนที่ศึกษา (%SV) เป็นสัดส่วนที่ผกผันกัน หมายความว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนที่ศึกษามีขนาดใหญ่จะส่งผลให้จำนวนหมวดหมู่ที่แตกต่างกันมีจำนวนน้อย แต่เมื่อเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนที่ศึกษามีขนาดเล็กจะส่งผลให้จำนวนหมวดหมู่ที่แตกต่างกันมีจำนวนมาก

และเพื่อที่จะลดความซับซ้อนของสมการและแสดงค่าจำนวนหมวดหมู่ที่แตกต่างกันเพียงค่าเดียวในฐานะฟังก์ชันของเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนที่ศึกษา จะสามารถแสดงองค์ประกอบความแปรปรวน (Variance Components) ได้อีกทางหนึ่ง เมื่อความแปรปรวนรวม (Total variance) คือผลรวมของสององค์ประกอบความแปรปรวน องค์ประกอบแรกคือความสามารถในการทวนซ้ำและทำซ้ำ (Gage Repeatability and Reproducibility, GR&R) และองค์ประกอบที่สองคือความแปรปรวนของชิ้นงานต่อชิ้นงาน (Part-To-Part Variation) จะสามารถแสดงความแปรปรวนรวมได้ดังสมการที่ 4.58

$$\sigma_{Total}^2 = \sigma_{Gage}^2 + \sigma_{Part}^2 \quad (4.58)$$

แก้สมการสำหรับ $(\sigma_{Part})^2$ และหารทั้งสองฝั่งของสมการด้วยผลของ $(\sigma_{Total})^2$ จะได้ผลของการแก้สมการดังสมการที่ 4.59

$$\frac{\sigma_{Part}^2}{\sigma_{Total}^2} = 1 - \frac{\sigma_{Gage}^2}{\sigma_{Total}^2} \quad (4.58)$$

และเนื่องจาก %SV/100 มีค่าเท่ากับ $\sigma_{Part} / \sigma_{Total}$ จะทำให้สามารถเขียนรูปแบบของสมการที่ 4.58 ได้ใหม่เป็นสมการที่ 4.59

$$\frac{\sigma_{Part}}{\sigma_{Total}} = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{Gage}^2}{\sigma_{Total}^2}} = \sqrt{1 - \left(\frac{\%SV}{100}\right)^2} \quad (4.59)$$

เมื่อแทนที่สมการที่ 4.9 ลงไปในสมการของค่าจำนวนหมวดหมู่ที่แตกต่างกัน (NDC) จะได้สมการใหม่คือสมการที่ 4.60 ที่ได้ลดความซับซ้อนลงในการหาค่าจำนวนหมวดหมู่ที่แตกต่างกัน

$$ndc = \frac{\sqrt{2}(100)}{\%SV} \sqrt{1 - \left(\frac{\%SV}{100}\right)^2} = \frac{\sqrt{2}}{\%SV} \sqrt{10000 - (\%SV)^2} \quad (4.59)$$

จากผลการคำนวณจำนวนหมวดหมู่ที่แตกต่างกัน (NDC) ตามสมการที่ 4.59 โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนที่ศึกษา (%SV) ของทั้งระบบเครื่องมือวัด (Total Gage R&R) เท่ากับ 1.39198 ตามตารางที่ 4.34 จะได้ผลการคำนวณของจำนวนหมวดหมู่ที่แตกต่างกัน (NDC) เท่ากับ 101.587 ซึ่งหมายความว่า การวัดมีความสามารถในการแยกแยะข้อมูลได้มากถึง 101.587 กลุ่ม และมีค่ามากกว่าค่าแนะนำ AIAG ตามตารางที่ 4.35 จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบการวัดนี้มีความสามารถในการแยกแยะกลุ่มข้อมูลที่มีความแตกต่างกันได้

ตารางที่ 4.35 ค่าแนะนำของจำนวนหมวดหมู่ที่แตกต่างกัน (Recommended NDC) โดย AIAG

จำนวนหมวดหมู่ที่แตกต่างกัน (NDC)	เกณฑ์การตัดสินใจที่แนะนำ
≥ 14	ระบบการวัดมีความสามารถในการแยกแยะข้อมูลที่แตกต่างกันในระดับที่สามารถยอมรับได้
4 - 13	ระบบการวัดมีความสามารถในการแยกแยะข้อมูลที่แตกต่างกันในระดับที่อาจจะสามารถยอมรับได้ ทั้งนี้อาจจะต้องพิจารณาปัจจัยอื่นเพิ่มเติม เช่น ความสำคัญของการประยุกต์ใช้งาน, ค่าใช้จ่ายของเครื่องมือวัด, ค่าใช้จ่ายในการบำรุงซ่อมแซม, และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อในด้านอื่นๆ
≤ 3	ระบบการวัดไม่มีความสามารถในการแยกแยะข้อมูลที่แตกต่างกัน อยู่ในระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้

4.1.4.6) ผลการประเมินเครื่องมือวัด

ความแปรปรวนจากระบบการวัดเทียบกับความแปรปรวนจากการผลิต (%SV หรือ P/TV) มีค่าเท่ากับ 1.38% ประกอบไปด้วยความแปรปรวนจากเครื่องมือวัด (Repeatability) เท่ากับ 1.38% และความแปรปรวนจากพนักงานที่ทำการวัด (Reproducibility) เท่ากับ 0.00% โดยที่ค่าความแปรปรวนจากระบบการวัดเมื่อเทียบกับความแปรปรวนจากการผลิต (%SV) มีค่าไม่เกินเกณฑ์การยอมรับที่ 10% (Bill McNeese, 2018) จึงสามารถสรุปได้ว่าความแปรปรวนจากระบบการวัดเมื่อเทียบกับความแปรปรวนจากการผลิต อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้

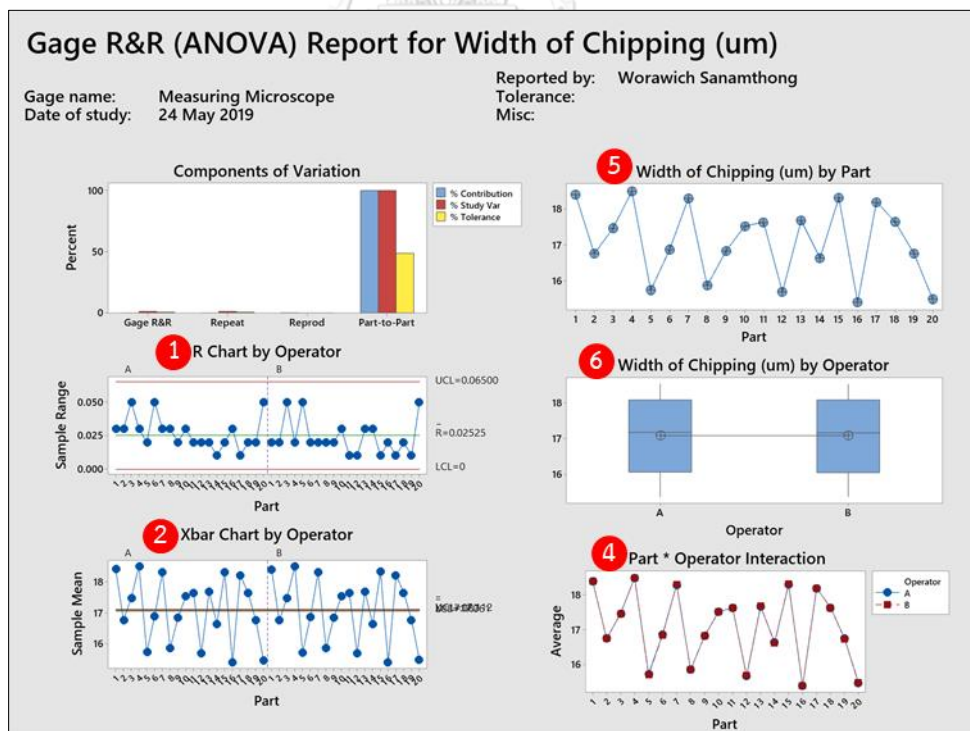
ผลของความแปรปรวนจากระบบการวัดเทียบกับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (%Tolerance หรือ SV/Tolerance) มีค่าเท่ากับ 0.67% ซึ่งพบว่า มีค่าไม่เกินเกณฑ์การยอมรับที่ 10% (McNeese,

2018) จึงสรุปได้ว่าความแปรปรวนจากระบบการวัดเมื่อเทียบกับความคลาดเคลื่อนยินยอม อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้

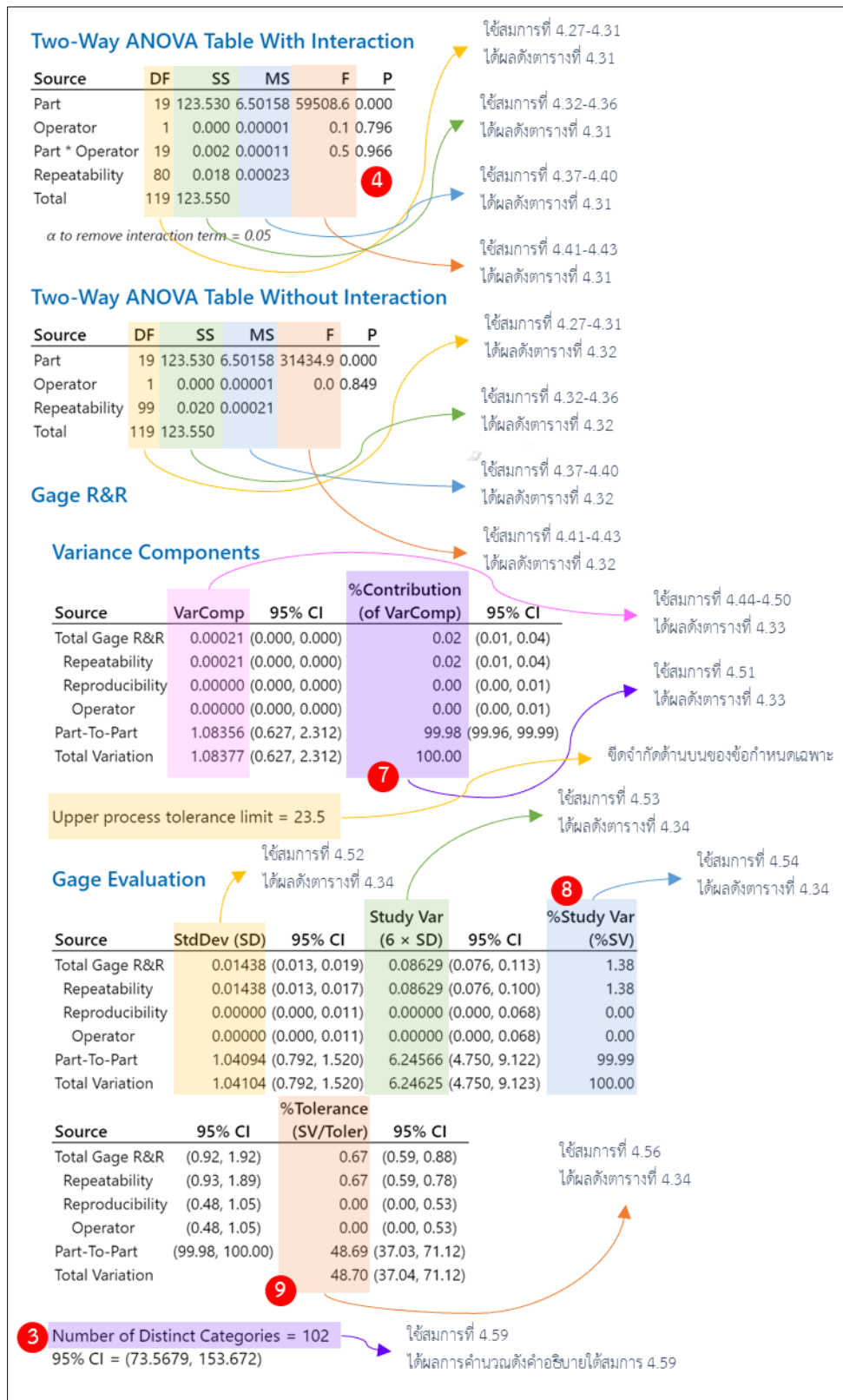
ความสามารถในการแยกความแตกต่างของข้อมูล (NDC) มีค่าเท่ากับ 102 ซึ่งมากกว่า 14 ตามคำแนะนำของ AIAG แสดงให้เห็นว่าระบบการวัดมีความสามารถในการแยกแยะข้อมูลที่แตกต่างกันในระดับที่สามารถยอมรับได้ และระบบการวัดนี้สามารถทำการแยกข้อมูลที่วัดได้ออกเป็น 102 ประเภทที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดได้

4.1.4.7) ผลการวิเคราะห์การทวนซ้ำและทำซ้ำด้วยโปรแกรม Minitab

การวิเคราะห์ความสามารถในการทวนซ้ำและทำซ้ำของระบบการวัดสามารถทำได้อย่างง่ายด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ เช่นโปรแกรม Minitab ซึ่งจะพบว่าผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Minitab มีผลตรงกันกับการคำนวณด้วยสมการ 4.27 ถึง 4.59 ดังที่ได้พิสูจน์มาในข้างต้นแล้วทุกประการ โดยสามารถวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.25 แผนภาพการประเมินความแปรปรวนของระบบการวัดด้วยโปรแกรม Minitab



รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการประเมินเครื่องมือวัดด้วยโปรแกรม Minitab

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและผลการประเมินเครื่องมือวัดด้วยโปรแกรมสถิติสำเร็จรูป Minitab ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26 สามารถสรุปผลการประเมินและผลการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

1. แผนภูมิควบคุมค่าพิสัย (R Chart by Operator) ในรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นว่าจุดที่พล็อตบนแผนภาพทุกจุดยังอยู่ในช่วงควบคุม และในแผนภาพยังแสดงให้เห็นว่าจุดที่พล็อตในแต่ละจุดมีความแตกต่างกันมากกว่า 3 จุด ซึ่งหมายความว่าระบบการวัดนี้มีความสามารถเพียงพอที่จะแยกความแตกต่างของชิ้นงานได้และเครื่องมือวัดที่ใช้มีความละเอียด (Resolution) เพียงพอ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าทุกจุดที่พล็อตบนแผนภาพของพนักงานทั้งสองคนมีความสอดคล้องกันทุกจุด หมายความว่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) ของระบบการวัดมีความแปรปรวนน้อยมาก
2. แผนภูมิค่าความกว้างของรอยบินเปรียบเทียบคนวัด (Xbar Chart by Operator) ในรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลเกือบทั้งหมดอยู่นอกเหนือเส้นควบคุม (มากกว่า 1 ใน 3 ของข้อมูลทั้งหมดถือว่ายอมรับได้ ตามคำแนะนำของ AIAG) หมายความว่าพนักงานที่ทำการวัดทั้งสองคนมีความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างของชิ้นงานได้ และสาเหตุของความแปรปรวนจากระบบการวัดนี้มีไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนของกระบวนการ (Process Variation) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลจากการวัดนี้สามารถใช้ในการประมาณความแปรปรวนของกระบวนการได้
3. ความสามารถในการแยกความแตกต่างของข้อมูล หรือ จำนวนหมวดหมู่ที่แตกต่างกัน (Number of Distinct Categories, NDC) ดังแสดงในรูปที่ 4.26 มีค่าเท่ากับ 102 แสดงให้เห็นว่าระบบการวัดนี้สามารถแยกข้อมูลที่วัดได้ออกเป็น 102 ประเภทที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการประมาณค่าความแปรปรวนของระบบการวัดได้เนื่องจากมีค่าเกิน 14 ตามคำแนะนำดังแสดงในตารางที่ 4.35 แสดงให้เห็นว่าระบบการวัดนี้มีความแปรปรวนที่ไม่สูง ดังนั้นระบบการวัดนี้สามารถประมาณความแปรปรวนของกระบวนการได้
4. จากแผนภาพอันตรกิริยาระหว่างชิ้นงานกับพนักงาน (Part*Operator Interaction) ดังแสดงในรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นว่าเส้นของกราฟทั้งสองเส้นทับซ้อนกันและไม่ตัดกัน นอกจากนี้ยังมีทิศทางที่เป็นไปในแนวเดียวกัน หมายความว่าชิ้นงานและพนักงานที่วัดไม่มีผลกระทบซึ่งกันและกัน เมื่อชิ้นงานหรือพนักงานที่ทำการวัดถูกเปลี่ยนไป ก็จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าที่วัดได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งแผนภาพอันตรกิริยาระหว่างชิ้นงานกับพนักงานแสดงผลที่สอดคล้องกันกับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในแง่ของการวิเคราะห์

ความแปรปรวนดังแสดงในรูปที่ 4.26 ที่แสดงค่าของความน่าจะเป็น (P-Value) เท่ากับ 0.966 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ($\alpha = 0.05$) หมายความว่าความแปรปรวนของอันตรกิริยาระหว่างชิ้นงานและพนักงานไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อระบบการวัด

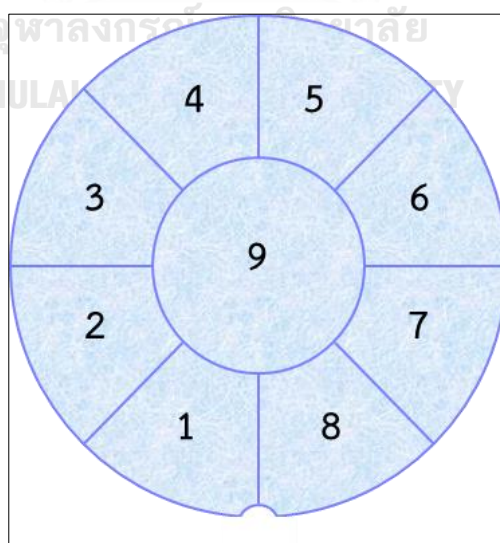
5. จากแผนภาพค่าความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์แต่ละชิ้นงาน (Width of Chipping (um) by part) ดังแสดงในรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นว่าแต่ละชิ้นงานนั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ที่แสดงให้เห็นว่าค่า P-Value ของชิ้นงาน (Part) มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ($\alpha = 0.05$) จึงหมายความว่าชิ้นงานอย่างน้อยหนึ่งชิ้นที่มีความแตกต่างจากชิ้นงานในกลุ่มตัวอย่างที่เหลือ ชิ้นงานที่นำมาวัดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
6. แผนภูมิค่าความกว้างของรอยบิ่นเมื่อเทียบกับคนวัด (Width of Chipping (um) by Operator) ดังแสดงในรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นว่าพนักงานทั้งสองคนมีความแตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังแสดงในรูปที่ 4.26 ที่แสดงค่า P-Value เท่ากับ 0.796 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 หมายความว่าค่าเฉลี่ยของการวัดจากพนักงานทั้งสองคนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พนักงานทั้งสองคนสามารถวัดชิ้นงานได้เหมือนกันโดยไม่ส่งผลต่อค่าที่วัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
7. ความแปรปรวนของระบบการวัดเทียบกับความแปรปรวนของกระบวนการ (Variance Components) แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบความแปรปรวนของระบบการวัดกับความแปรปรวนของกระบวนการในรูปแบบของอัตราร้อยละ และเมื่อค่าความแปรปรวนรวม (Total Variation) มีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นความแปรปรวนอันเนื่องมาจากสาเหตุของกระบวนการ (Process Variation, Part-To-Part) 99.98 เปอร์เซ็นต์ และจะเป็นความแปรปรวนอันเนื่องมาจากระบบการวัด (Measurement Variation, Total Gage R&R) 0.02 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบการวัดนี้มีความแปรปรวนที่น้อยมาก
8. ความแปรปรวนจากระบบการวัดเมื่อเทียบกับความแปรปรวนจากการผลิต (%SV หรือ P/TV) ดังแสดงในรูปที่ 4.26 มีค่าเท่ากับ 1.38% ซึ่งเป็นความแปรปรวนจากเครื่องมือวัด (Repeatability) เท่ากับ 1.38% และเป็นความแปรปรวนจากพนักงานผู้ทำการวัด

(Reproducibility) เท่ากับ 0.00% จะเห็นว่า %SV ยังไม่เกินเกณฑ์การยอมรับที่ 10% (Bill McNeese, 2018) จึงสามารถยอมรับความแปรปรวนจากระบบการวัดนี้ได้

9. ความแปรปรวนจากระบบการวัดเทียบกับความคลาดเคลื่อนยินยอม (%Tolerance หรือ $SV/Tolerance$) โดยมีค่าเท่ากับ 0.67% ซึ่งมีค่าไม่เกินเกณฑ์การยอมรับที่ 10% (McNeese, 2018) จึงสามารถยอมรับได้ว่าความแปรปรวนจากระบบการวัดนี้สามารถยอมรับได้

4.2 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis, PCA)

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการมีจุดประสงค์เพื่อประเมินความแปรปรวนของกระบวนการในปัจจุบันก่อนเริ่มการปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อให้เข้าใจถึงสภาวะปัจจุบันของกระบวนการที่เป็นอยู่ เพื่อนำไปสู่แนวทางในการปรับปรุงกระบวนการให้ดีขึ้นต่อไปอย่างถูกต้อง ซึ่งตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในการวัดดัชนีความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) คือค่าความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์อันเนื่องมาจากกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ (Width of Topside Chipping) ซึ่งใช้พนักงานคนเดียวในการวัดจากเครื่องวัดเพียงเครื่องเดียว โดยสุ่มวัดความกว้างของรอยบิ่นบนตัวไดจำนวน 18 ตัว จากทั้งหมด 9 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งเป็นมาตรฐานการวัดเบื้องต้นในปัจจุบันของบริษัทในกรณีศึกษา ดังนั้นจะได้จำนวนใดหรือจำนวนตัวอย่างในเบื้องต้นเท่ากับ 162 ตัวอย่าง เพื่อใช้ประเมินดัชนีชี้วัดความสามารถในเบื้องต้น และได้ผลการวัดดังแสดงในตารางที่ 4.36



รูปที่ 4.27 ตำแหน่งในการสุ่มตัวไดเพื่อทำการวัดรอยบิ่นทั้งหมด 9 ตำแหน่ง

ตารางที่ 4.36 ผลการวัดความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวหน้าแผ่นเวเฟอร์ก่อนการปรับปรุง

ผลการวัดความกว้างรอยบินบนแผ่นเวเฟอร์ก่อนการปรับปรุงกระบวนการ											
ตัวอย่าง	ค่าวัด	ตัวอย่าง	ค่าวัด	ตัวอย่าง	ค่าวัด	ตัวอย่าง	ค่าวัด	ตัวอย่าง	ค่าวัด	ตัวอย่าง	ค่าวัด
1	19.15	28	18.02	55	17.16	82	17.70	109	20.61	136	18.01
2	20.38	29	21.59	56	18.26	83	21.60	110	21.51	137	16.64
3	21.78	30	17.67	57	15.88	84	18.93	111	18.54	138	18.90
4	21.39	31	16.48	58	19.13	85	19.56	112	17.75	139	16.97
5	17.12	32	19.58	59	17.26	86	20.37	113	19.44	140	21.07
6	20.44	33	20.28	60	21.23	87	17.17	114	17.90	141	16.97
7	20.45	34	20.26	61	20.69	88	18.00	115	18.11	142	18.11
8	17.60	35	19.92	62	18.20	89	18.41	116	17.69	143	19.19
9	19.30	36	19.41	63	20.20	90	18.21	117	18.84	144	17.85
10	20.73	37	17.15	64	21.23	91	19.90	118	19.40	145	18.27
11	21.99	38	19.88	65	18.96	92	19.10	119	19.16	146	19.16
12	20.63	39	18.55	66	18.05	93	16.89	120	18.74	147	19.47
13	20.74	40	17.10	67	19.56	94	18.24	121	17.27	148	18.91
14	18.90	41	17.40	68	19.22	95	18.08	122	19.40	149	17.21
15	20.00	42	17.29	69	19.11	96	21.10	123	20.01	150	17.88
16	20.53	43	19.36	70	20.42	97	16.44	124	18.13	151	18.63
17	18.14	44	19.10	71	18.93	98	18.00	125	18.91	152	17.45
18	18.60	45	21.24	72	20.00	99	17.48	126	21.07	153	20.52
19	16.27	46	19.87	73	20.67	100	18.10	127	19.67	154	18.82
20	22.32	47	18.79	74	20.40	101	18.93	128	19.90	155	18.58
21	17.46	48	17.26	75	17.70	102	16.90	129	22.03	156	19.44
22	19.82	49	19.80	76	21.43	103	19.84	130	19.62	157	19.11
23	17.12	50	21.82	77	18.48	104	19.47	131	19.18	158	18.40
24	18.33	51	19.00	78	19.91	105	19.02	132	20.73	159	18.19
25	18.74	52	21.57	79	20.09	106	21.57	133	21.41	160	19.95
26	18.39	53	18.93	80	17.23	107	21.55	134	19.81	161	18.80
27	21.68	54	17.76	81	20.40	108	19.43	135	21.64	162	18.00

เมื่อได้ผลการวัดจากกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยสภาวะปัจจุบันมาแล้ว จะสามารถวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการในเบื้องต้นได้ โดยการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis, PCA) สามารถทำได้ด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.2.1 การทดสอบความเป็นการกระจายแบบปกติ (Normality Test)

ก่อนเริ่มทำการวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ต้องมีการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) เสียก่อน เพื่อตรวจสอบข้อมูลวัดที่ได้มาว่าสามารถใช้เครื่องมือทางสถิติสำหรับข้อมูลที่มีการกระจายตัวเป็นแบบปกติได้หรือไม่ (Normal Distribution) สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีการของสมมติฐานของการกระจายแบบปกติ (Normality) ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบการกระจายแบบปกติคือ
สมมติฐานหลัก H_0 : ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ
สมมติฐานรอง H_1 : ข้อมูลไม่มีการกระจายแบบปกติ
- เรียงข้อมูลวัดที่ได้มาจากค่าน้อยที่สุดไปหาค่าที่มากที่สุด
- การทดสอบแอนเดอร์สัน – ดาร์ลิ่ง (Anderson-Darling Test, AD) จะพิจารณาว่าชุดข้อมูลที่มาจากการวัดมีการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยใช้ฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative Distribution Function, CDF) ซึ่งค่าแอนเดอร์สัน – ดาร์ลิ่ง (AD) สามารถหาได้จากสมการที่ 4.60 (T. W. Anderson, 1952) โดยที่ผลการคำนวณอย่างย่อจะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.37 และผลการคำนวณอย่างเต็มรูปจะแสดงอยู่ในตารางที่ ก-2 ซึ่งอยู่ในภาคผนวก

$$AD = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{n-i+1}))] \quad (4.60)$$

โดย n คือจำนวนตัวอย่าง (Sample size)

$F(X)$ คือฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม (CDF) ของการกระจาย

i คือค่าครั้งที่ i^{th} เมื่อข้อมูลได้ถูกจัดเรียงจากน้อยไปหามากแล้ว

ตารางที่ 4.37 ผลการคำนวณอย่างย่อในสมการแอนเดอร์สัน – ดาร์ลิ่ง

ความกว้าง ของรอยบิน	i	เรียงลำดับ ข้อมูล	$F(X_i)$	$1 - F(X_i)$	$1 - F(X_{n+1})$
19.15	1	15.88	0.012	0.988	0.014
20.38	2	16.27	0.023	0.977	0.022
21.78	3	16.44	0.031	0.969	0.024
...
18.00	162	22.32	0.986	0.0136	0.988
$\bar{x} = 19.13$ $n = 162$ $SD = 1.44$					

- จากนั้นจะสามารถหาค่าผลรวม (Summation, S) ของสมการได้ โดยใช้สมการที่ 4.61 ซึ่งเป็นเทอมของผลรวมที่มาจากสมการแอนเดอร์สัน – ดาร์ลิ่ง โดยที่ผลการคำนวณอย่างย่อจะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.38 และผลการคำนวณอย่างเต็มรูปจะแสดงอยู่ในตารางที่ ก-2 ซึ่งอยู่ในภาคผนวก และสามารถคำนวณความน่าจะเป็น (Probability, p) ได้จากสมการที่ 4.62 จากนั้นจะสามารถหาค่า Z ได้โดยการเปิดตารางค่า Z (Z table) เพื่อทำการพล็อตกราฟได้

$$S = (2i - 1) [\ln F(X_i) + \ln (1 - F(X_{n+1}))] \quad (4.61)$$

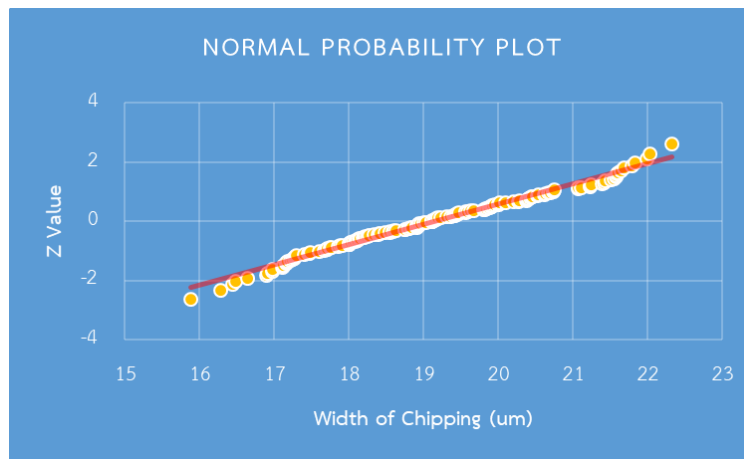
$$p = (i-0.3) / (n+0.4) \quad (4.62)$$

ตารางที่ 4.38 ผลการคำนวณอย่างย่อในสมการแอนเดอร์สัน – ดาร์ลิ่ง (มี S, p, Z)

ความกว้าง ของรอยบิน	i	เรียงลำดับ ข้อมูล	$F(X_i)$	$1 - F(X_i)$	$1 - F(X_{n+1})$	S	p	Z
19.15	1	15.88	0.012	0.988	0.014	-8.720	0.004	-2.627
20.38	2	16.27	0.023	0.977	0.022	-22.658	0.010	-2.309
21.78	3	16.44	0.031	0.969	0.024	-36.074	0.017	-2.129
...
18.00	162	22.32	0.986	0.0136	0.988	-8.323	0.996	2.627
$\bar{x} = 19.13$ $n = 162$ $SD = 1.44$						$\Sigma = -26347$		

- พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z และข้อมูลที่ได้เรียงลำดับจากน้อยไปมาก และเพิ่มสมการเส้นตรงเข้าไปในกราฟ จะทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติหรือไม่ โดยจะพิจารณาว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติเมื่อค่า Z

ที่พล็อตบนกราฟมีลักษณะเกาะกลุ่มและเรียงกันไปตามแนวเส้นตรง ซึ่งผลการพล็อตกราฟทำให้ทราบว่าข้อมูลชุดนี้มีลักษณะการกระจายที่เป็นแบบปกติดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z และข้อมูลที่เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

- ในบางครั้งต้องการความมั่นใจมากขึ้นเพื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ที่ได้ อย่างแม่นยำ จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข นั่นคือการหาค่าแอนเดอร์สัน - ดาร์ลิ่ง (AD) โดยการเปลี่ยนรูปแบบสมการที่ 4.60 ให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย ดังแสดงในสมการที่ 4.62 ซึ่งได้ผลการคำนวณเท่ากับ 0.637

$$AD = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (4.62)$$

- ค่าแอนเดอร์สัน - ดาร์ลิ่ง (AD) ที่ได้มา สามารถทำให้อยู่ในรูปของค่าแอนเดอร์สัน - ดาร์ลิ่ง อย่างง่าย (AD*) สำหรับจำนวนตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.63 และได้ผลการคำนวณเท่ากับ 0.640

$$AD^* = AD \left(1 + \frac{0.75}{n} + \frac{2.25}{n^2} \right) \quad (4.63)$$

- จากนั้นจะสามารถคำนวณหาความน่าจะเป็น (P-Value) ของการกระจายแบบปกติได้ ซึ่งค่าความน่าจะเป็นของการกระจายแบบปกติที่ขึ้นขึ้นอยู่กับค่าแอนเดอร์สัน - ดาร์ลิ่ง อย่างง่าย (AD*) โดยใช้การอ้างอิงสูตรการคำนวณจากตารางที่ 4.39 (R.B.

D'Augustino และ M.A. Stephens, 1986) และเทคนิคตัวสถิติทดสอบภาวะสารูปดี (Goodness-of-Fit Techniques) ดังต่อไปนี้

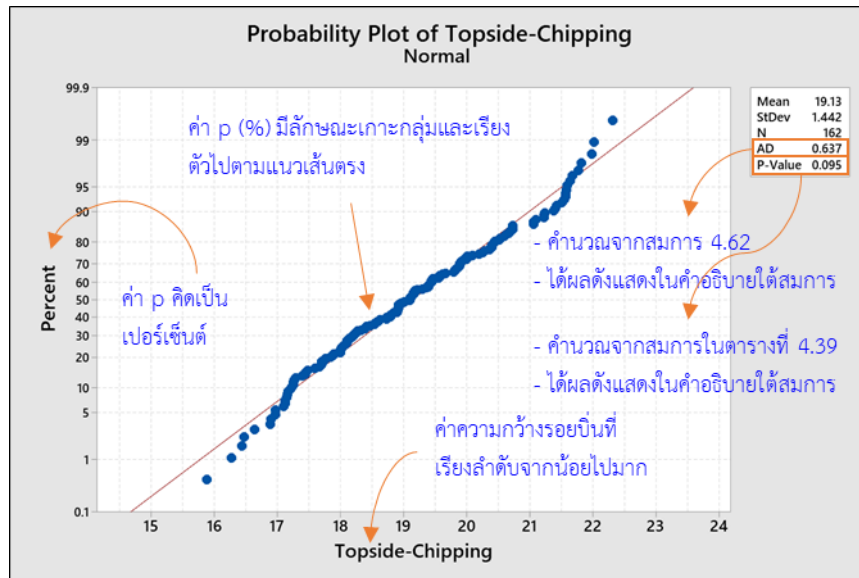
ตารางที่ 4.39 สูตรการคำนวณค่าความน่าจะเป็น (P-Value) ที่ขึ้นอยู่กับค่า AD

เงื่อนไข	สูตรการคำนวณ
1) $AD^* \geq 0.60$	$p = e^{(1.2937 - 5.709(AD^*) + 0.0186(AD^*)(AD^*))}$
2) $0.34 < AD^* < 0.60$	$p = e^{(0.9177 - 4.279(AD^*) - 1.38(AD^*)(AD^*))}$
3) $0.20 < AD^* < 0.34$	$p = 1 - e^{(-8.318 + 42.796(AD^*) - 59.938(AD^*)(AD^*))}$
4) $AD^* \leq 0.20$	$p = 1 - e^{(-13.436 + 101.14(AD^*) - 223.73(AD^*)(AD^*))}$

- เนื่องจากผลการคำนวณของค่าแอนเดอร์สัน – ดาร์ลิง อย่างง่าย (AD^*) จากสมการที่ 4.63 มีค่าเท่ากับ 0.64 ส่งผลให้การคำนวณค่าความน่าจะเป็น (P-Value) ต้องใช้สมการในเงื่อนไขที่หนึ่ง ซึ่งผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็น (P-Value) ได้เท่ากับ 0.095 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ($\alpha = 0.05$) หมายความว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลชุดนี้มีการกระจายแบบปกติ

4.2.2 การทดสอบความเป็นการกระจายแบบปกติด้วย Minitab

การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality test) สามารถทำได้โดยสะดวกด้วยโปรแกรมสถิติสำเร็จรูป Minitab ดังที่แสดงในรูปที่ 4.29 แตกต่างกันตรงที่จะเป็นการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็น (p) ที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์และข้อมูลการวัดที่ได้เรียงลำดับจากน้อยไปมากแล้ว ซึ่งสามารถใช้พิจารณาการกระจายแบบปกติได้เช่นเดียวกัน และจะเห็นได้ว่าข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม Minitab ให้ผลการคำนวณและผลการวิเคราะห์ที่ตรงกันกับการคำนวณด้วยสมการดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นทุกประการ นั่นคือข้อมูลชุดนี้มีการกระจายแบบปกติ



รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติด้วยโปรแกรม Minitab

4.2.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ

การวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4.67 สำหรับความสามารถของกระบวนการที่มีขีดจำกัดของข้อกำหนดพิเศษด้านบนและด้านล่างตามลำดับ (Arun Lavel, 2017) และได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.40

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (4.64)$$

$$C_{pU} = \frac{USL - \bar{X}}{3\sigma} \quad (4.65)$$

$$C_{pL} = \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma} \quad (4.66)$$

$$C_{pk} = \min(C_{pU}, C_{pL}) \quad (4.67)$$

โดย USL คือขีดจำกัดของข้อกำหนดพิเศษด้านบน

LSL คือขีดจำกัดของข้อกำหนดพิเศษด้านล่าง

\bar{X} คือค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยบินจากกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มมา

σ คือค่าความแปรปรวนหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของกลุ่มตัวอย่าง

และสำหรับขีดจำกัดของข้อกำหนดพิเศษด้านบน (Upper Specification Limit, USL) ของกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์สำหรับแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ 50 ไมโครเมตร และพื้นที่ทางตัดแคบ

60 ไมโครเมตร คือ 13.5 ไมโครเมตร หมายความว่าความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ต้องมีขนาดไม่เกิน 13.5 ไมโครเมตร ซึ่งข้อกำหนดนี้ถูกประมาณมาจากขนาดความกว้างของรอยตัด (Kerf width) บนพื้นที่ทางเดินตัดที่มีความกว้างโดยเฉลี่ยเท่ากับ 33 ไมโครเมตร ทำให้เหลือพื้นที่ปลอดข้อบกพร่อง (Defect Free Zone, DFZ) เท่ากับ 13.5 ไมโครเมตร ดังแสดงในสมการที่ 4.68

$$DFZ = (\text{Saw street width} - \text{Kerf width})/2 = UCL \quad (4.68)$$

ตารางที่ 4.40 ผลการคำนวณดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุง

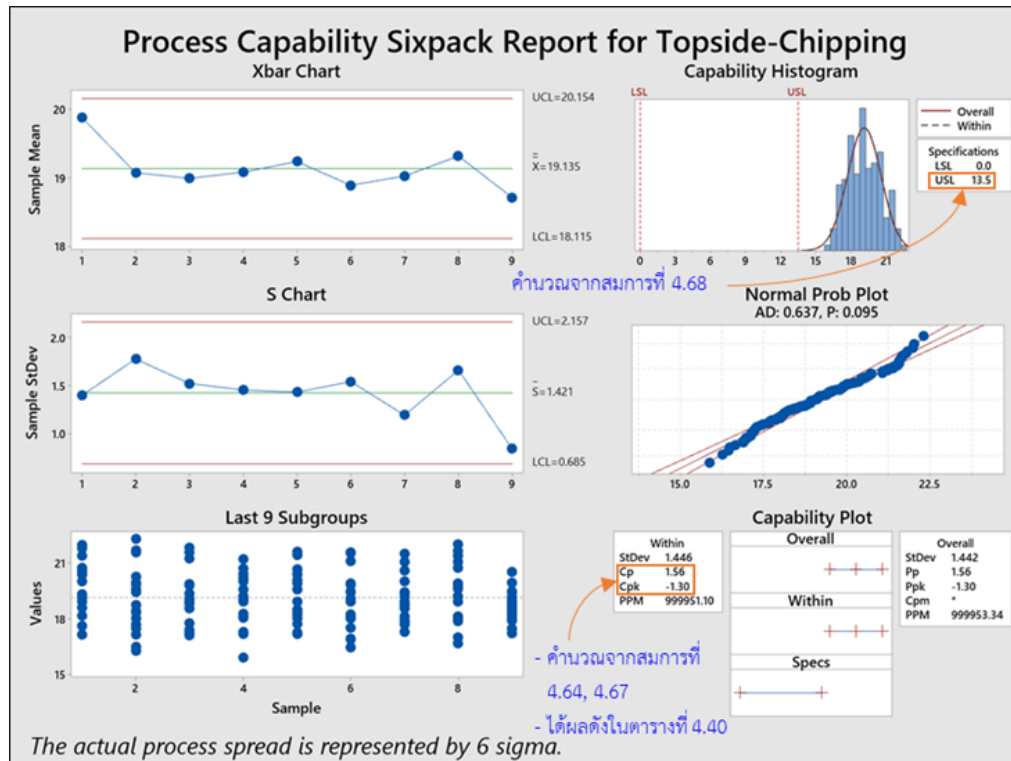
ความสามารถของกระบวนการ	ผลการคำนวณ
C_p	$(USL - LSL)/6SD = (13.5 - 0)/[6(1.442)] = 1.56$
C_{pU}	$(USL - \bar{X})/3SD = (13.5 - 19.13)/[3(1.442)] = -1.30$
C_{pL}	$(\bar{X} - LSL)/3SD = (19.13 - 0)/[3(1.442)] = 4.42$
C_{pk}	$\text{Min}(C_{pU}, C_{pL}) = \text{Min}(-1.30, 4.42) = -1.30$

จากผลตารางที่ 4.40 ทำให้ทราบว่าเมื่อปรับใช้ขีดจำกัดของข้อกำหนดพิเศษด้านบนสำหรับความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ที่ 13.5 ไมโครเมตร ส่งผลให้ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการมีค่าเท่ากับ -1.30 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์การยอมรับด้านเดียวที่ 1.25 ดังที่ได้แสดงไว้แล้วในตารางที่ 1.1 (Montgomery, 2009) แสดงว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการนี้ได้มีการเบี่ยงเบนไปจากค่าเป้าหมายมากและระดับความแปรปรวนของกระบวนการยังมีค่ามากเกินไปจนระดับที่ยอมรับได้ จึงควรปรับปรุงกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์สำหรับแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ 50 ไมโครเมตรและพื้นที่ทางตัดแคบ 60 ไมโครเมตร โดยให้มีค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากยิ่งขึ้น รวมไปถึงลดระดับความแปรปรวนให้น้อยลง

4.2.4 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการด้วย Minitab

การหาค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการสามารถทำได้ง่ายด้วยโปรแกรมทางสถิติสำเร็จรูป Minitab ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งจะพบว่าผลการคำนวณและการวิเคราะห์จะตรงกันกับการคำนวณที่ได้กล่าวมาในข้างต้นทุกประการ โดยผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ -1.30 เช่นเดียวกับผลในตารางที่ 4.40 และจาก

แผนภูมิความสามารถของกระบวนการ (Capability Histogram) ดังแสดงในรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่า ข้อมูลทั้งหมดอยู่นอกขีดจำกัดของข้อกำหนดเฉพาะด้านบนที่ 13.5 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.30 ผลของดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงด้วย Minitab

4.2.5 การทดสอบความเพียงพอของจำนวนตัวอย่าง

การตรวจสอบความพอเพียงของจำนวนตัวอย่างที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการเบื้องต้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.69 (Bothe, 1997)

$$n = Z_{\alpha}^2 \left(\frac{\left(\frac{1}{9(\hat{C}_{pk})^2} \right) + \left(\frac{1}{2} \right)}{\left(1 - \frac{C_{pk}}{\hat{C}_{pk}} \right)^2} \right) \quad (4.69)$$

โดย n คือ จำนวนตัวอย่าง

α คือ ระดับนัยสำคัญ

\hat{C}_{pk} คือ ค่าความสามารถของกระบวนการของกลุ่มตัวอย่าง

C_{pk} คือค่าความสามารถของกระบวนการ

กำหนดระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ของดัชนีค่าความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) และกำหนดให้ C_{pk}/\hat{C}_{pk} มีค่า 0.9 (ประมาณค่า C_{pk} จากจำนวนตัวอย่างนี้ โดยมีค่าคลาดเคลื่อนจาก \hat{C}_{pk} ไม่เกิน 10%) และค่า \hat{C}_{pk} ซึ่งเป็นค่าความสามารถของกระบวนการของกลุ่มตัวอย่างมีค่าเท่ากับ -1.30 ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4.40 จึงสามารถคำนวณหาจำนวนตัวอย่างที่พอเพียงได้ดังนี้

$$n = (Z_{0.05})^2 \left(\frac{\left(\frac{1}{9(-1.3)^2} \right) + \left(\frac{1}{2} \right)}{(1-0.9)^2} \right) = 153.09 \text{ ตัวอย่าง}$$

ดังนั้นจำนวนตัวอย่างขั้นต่ำที่ต้องใช้คือ 153.09 หรือประมาณ 154 ตัวอย่าง ซึ่งจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุง คือ 162 ตัวอย่าง ซึ่งมีจำนวนตัวอย่างที่มากกว่าจำนวนตัวอย่างขั้นต่ำ จึงไม่จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างเพิ่ม

4.3 การวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุของปัญหา

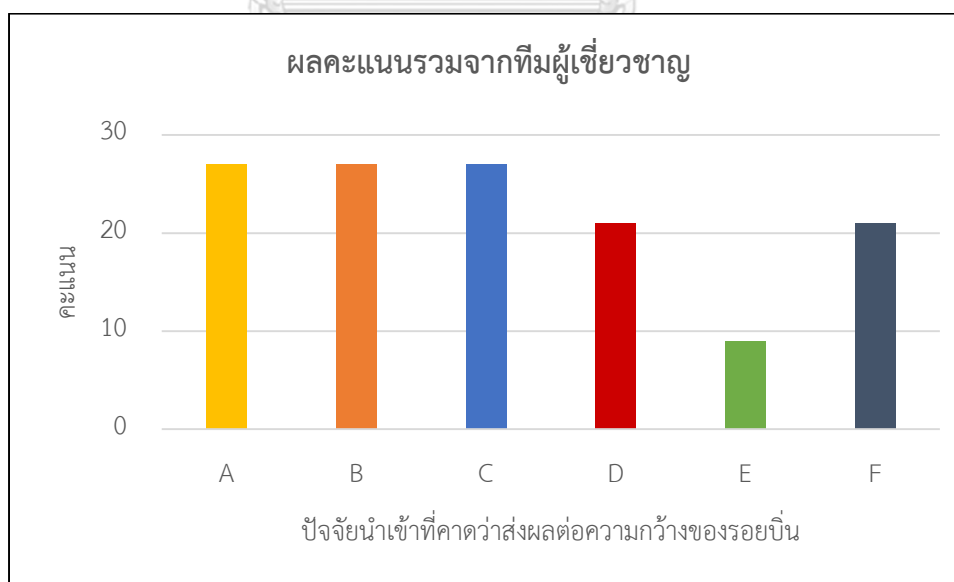
การหาสาเหตุของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองที่สนใจสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การวาดผังกระบวนการ (Process Mapping), แผนภูมิแก๊งปลา (Fish Bond Diagram), การวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) ซึ่งวิธีการเหล่านี้ใช้เพื่อคัดกรองปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองที่สนใจสำหรับปัจจัยนำเข้าหลายปัจจัย ทำให้สามารถกรองจำนวนปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบต่อค่าตอบสนองที่สนใจออกไปจากการวิเคราะห์ได้ แต่เนื่องจากปัจจัยนำเข้าสำหรับงานวิจัยฉบับนี้คือค่าปรับตั้งค่าในกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ซึ่งมีจำนวนปัจจัยหลักไม่มาก อีกทั้งผลการศึกษางานวิจัยในบทที่ 2 ได้แสดงให้เห็นถึงปัจจัยนำเข้าหลักที่ส่งผลต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์บ้างแล้ว งานวิจัยฉบับนี้จึงใช้วิธีผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) สำหรับการหาสาเหตุของปัญหาที่มีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้าที่เป็นไปได้ โดยวิธีผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) จะรวบรวมผลการวิเคราะห์จากทีมผู้เชี่ยวชาญ (Expert team) ของกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยแผนกวิศวกรกระบวนการผลิต (Process Engineer), แผนกซ่อมบำรุง (Maintenance), และแผนกผลิต (Production) โดยมีเกณฑ์การให้ 0-9 คะแนนดังแสดงในตารางที่ 4.41 (Craig Gysi, 2012) และได้ผลคะแนนดังแสดงในตารางที่ 4.42 และรูปที่ 4.31

ตารางที่ 4.41 เกณฑ์การให้คะแนนสำหรับผังแสดงเหตุและผล

คะแนน	คำอธิบาย
0	ไม่มีความสัมพันธ์ต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์
1	มีความสัมพันธ์น้อยมากต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์
3	มีความสัมพันธ์ปานกลางต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์
9	มีความสัมพันธ์อย่างมากต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์

ตารางที่ 4.42 ตารางคะแนนของผังแสดงเหตุและผลจากทีมผู้เชี่ยวชาญ

ปัจจัยนำเข้าที่มีแนวโน้มต่อความสัมพันธ์ของ ความกว้างรอยบิน	คะแนนจากทีมผู้เชี่ยวชาญ			คะแนนรวม
	แผนกวิศวกร กระบวนการ	แผนกซ่อม บำรุง	แผนก การผลิต	
A: ความหนาใบมีดผงเพชร (Blade thickness)	9	9	9	27
B: ความเร็วรอบตัด (Spindle speed)	9	9	9	27
C: ความเร็วป้อนตัด (Feed speed)	9	9	9	27
D: ความสูงใบมีดขณะตัด (Blade height)	9	9	3	21
E: ชนิดของเทป (Mounting tape)	3	3	3	9
F: น้ำหล่อเย็น (Cooling water)	9	9	3	21



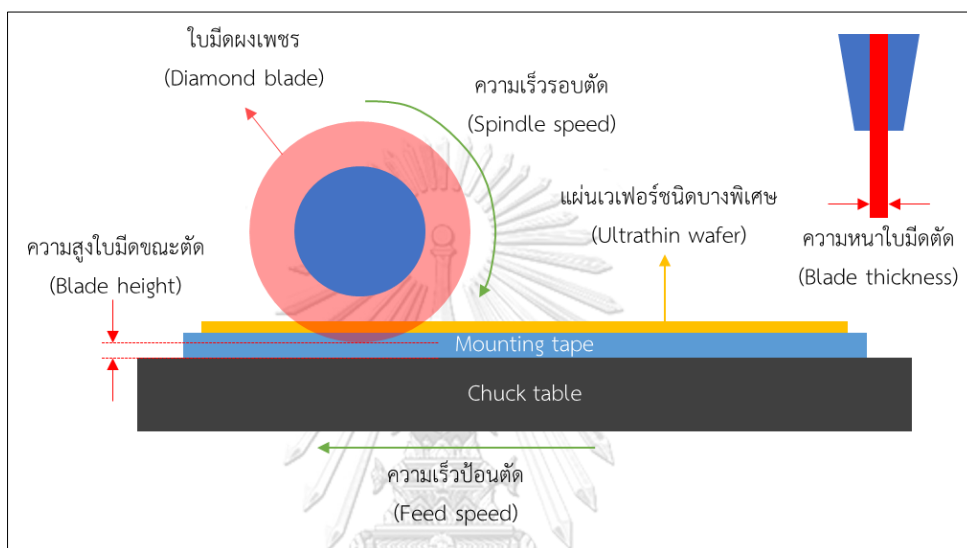
รูปที่ 4.31 แผนภูมิแสดงคะแนนจากทีมผู้เชี่ยวชาญสำหรับปัจจัยนำเข้าทั้งหมด

จากผลคะแนนที่ได้จากทีมผู้เชี่ยวชาญตามตารางที่ 4.42 และรูปที่ 4.31 พบว่าชนิดของเทป (Mounting tape) มีผลต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์น้อยที่สุด และปัจจัยที่มีผลต่อความกว้างรอยบินมากที่สุดคือ ความหนาใบมีดผงเพชร (Blade thickness), ความเร็วรอบตัด (Spindle speed), และความเร็วป้อนตัด (Feed speed) โดยปัจจัยที่มีอันดับคะแนนรองลงมาคือ ความสูงใบมีดขณะตัด (Blade height) และ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (Cooling water) ซึ่งน้ำหล่อเย็นเป็นปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนได้ลำบาก เนื่องจากส่งผลกระทบต่อการทำงานของแผ่นเวเฟอร์ทุกประเภท ทางผู้ทดลองจึงให้ปัจจัยดังกล่าวเป็นตัวแปรควบคุม ดังนั้นปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อความกว้างรอยบินที่จะต้องนำไปวิเคราะห์ในระยะเวลาต่อไป ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 4 ปัจจัย นั่นคือ ความหนาใบมีดผงเพชร, ความเร็วรอบตัด, ความเร็วป้อนตัด, และความสูงใบมีดขณะตัด

4.4 สรุปผลขั้นตอนระยะการวัดและเก็บข้อมูลเพื่อหาสภาพของปัญหา

- จากการวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis, MSA) จะเห็นว่าระบบการวัดมีความแม่นยำ (Accuracy) ซึ่งถูกพิสูจน์โดยการตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ความเอนเอียง (%Bias), ความมีเสถียรภาพของข้อมูล (Stability), และเปอร์เซ็นต์ความเป็นเส้นตรง (%Linearity) ที่แสดงค่าน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่ 5% และระบบการวัดนี้มีความเที่ยงตรง (Precision) ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการตรวจสอบความแปรปรวนจากระบบการวัดเทียบกับความแปรปรวนจากการผลิต (%SV) ซึ่งมีค่า 1.38% และมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ยอมรับที่ 10% จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบการวัดนี้มีความเที่ยงตรงและความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับความแปรปรวนจากระบบการวัดได้
- จากการศึกษาความสามารถของกระบวนการ (Process Capability) เบื้องต้น (ก่อนการปรับปรุง) โดยทำการบันทึกผลจากพนักงานวัดคนเดียวกัน ที่เครื่องวัดเครื่องเดียวกัน ด้วยจำนวนตัวอย่าง 162 ตัวอย่าง และใช้ข้อกำหนดแบบใหม่ที่ลูกค้าต้องการ นั่นคือขีดจำกัดของข้อกำหนดเฉพาะด้านบน (Upper Specification Limit, USL) ที่ 13.5 ไมโครเมตร โดยพบว่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ -1.30 เท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ยอมรับด้านเดียวที่ 1.25 จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุง
- และจากการระดมความคิดจากทีมผู้เชี่ยวชาญ โดยใช้วิธีการผังแสดงเหตุและผล เพื่อรวบรวมปัจจัยนำเข้าที่มีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อค่าความกว้างของรอยบิน พบว่าปัจจัยนำเข้าที่มีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์มากที่สุดมี 5 ปัจจัย คือ ความหนาใบมีดผงเพชร, ความเร็วรอบตัด, ความเร็วป้อนตัด, ความสูงใบมีดขณะตัด, และอุณหภูมิน้ำ

หล่อเย็น ซึ่งอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเป็นปัจจัยนำเข้าไปที่ปรับเปลี่ยนได้ยาก เนื่องจากเป็นปัจจัยนำเข้าไปที่ใช้กับทุกผลิตภัณฑ์ของโรงงาน เมื่อปรับเปลี่ยนไปแล้วทุกผลิตภัณฑ์ของโรงงานจะได้รับผลกระทบ จึงจำกัดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเป็นปัจจัยควบคุม ดังนั้นจึงเหลือปัจจัยนำเข้าไปที่ต้องนำไปวิเคราะห์ต่อในระยะถัดไปทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ความหนาใบมีดผงเพชร, ความเร็วรอบตัด, ความเร็วป้อนตัด, และความสูงใบมีดขณะตัด ดังแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ปัจจัยนำเข้าไปที่มีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อความกว้างของรอยบิ่นบนแผ่นเวเฟอร์

บทที่ 5

ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze phase)

เมื่อทราบว่าความแปรปรวนของระบบการวัดอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ นั่นคือระบบการวัดมีความเที่ยงตรงและความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และได้ทราบถึงความสามารถของกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ในเบื้องต้นแล้ว ในระยะนี้จะเป็นการวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าทั้ง 4 ปัจจัย ที่ได้มาจากผังแสดงเหตุและผลจากทีมผู้เชี่ยวชาญ ว่ามีปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งสามารถสรุปปัจจัยนำเข้าหลักที่อาจส่งผลต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ได้ทั้งหมด 4 ปัจจัย ประกอบด้วย ความหนาของใบมีดผงเพชร (Blade thickness), ความเร็วรอบตัด (Spindle speed), ความเร็วป้อนตัด (Feed speed), และความสูงของใบมีดผงเพชรขณะตัด (Blade height) โดยจะใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประเมินหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความกว้างของรอยบิ่นอย่างมีนัยสำคัญ

5.1 ปัจจัยนำเข้าที่ต้องการศึกษา

จากผลของผังแสดงเหตุและผลจากทีมผู้เชี่ยวชาญในบทที่ 4 ทำให้ทราบถึงปัจจัยนำเข้าที่อาจส่งผลต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ได้ทั้งหมด 4 ปัจจัย ดังแสดงในตาราง 5.1

ตารางที่ 5.1 ปัจจัยนำเข้าอาจจะส่งผลต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้า	หน่วย	สัญลักษณ์ที่ใช้แทน
1	ความหนาใบมีดผงเพชร (Blade thickness)	ไมโครเมตร (μm)	A
2	ความเร็วรอบตัด (Spindle speed)	รอบ/นาที (rpm)	B
3	ความเร็วป้อนตัด (Feed speed)	มิลลิเมตร/วินาที (mm/s)	C
4	ความสูงของใบมีดขณะตัด (Blade height)	ไมโครเมตร (μm)	D

ซึ่งระดับของแต่ละปัจจัยนำเข้าที่จะใช้ทำการทดลองนั้น จะถูกแบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 ระดับ คือค่าระดับสูง (High), ค่าระดับกลางหรือจุดกึ่งกลาง (Center point), และค่าระดับต่ำ (Low) โดยที่พิจารณาค่าในระดับสูงและระดับต่ำเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่เครื่องจักรจะสามารถทำงานได้ และค่าระดับกลางคือค่าที่อยู่กึ่งกลางระหว่างค่าระดับสูงและค่าระดับต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

ปัจจัยนำเข้า	สัญลักษณ์	ระดับ			หน่วย
		ต่ำ	กึ่งกลาง	สูง	
ความหนาใบมีดผงเพชร	A	20	25	30	ไมโครเมตร
ความเร็วรอบตัด	B	20,000	35,000	50,000	รอบ/นาที
ความเร็วป้อนตัด	C	25	37.5	50	มิลลิเมตร/วินาที
ความสูงใบมีดขณะตัด	D	50	60	70	ไมโครเมตร

5.2 การออกแบบการทดลองในขั้นต้น

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการออกแบบการทดลองเบื้องต้น เพื่อทำการหาปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะส่งผลต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์

5.2.1 การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลที่มีการเพิ่มจุดกึ่งกลาง

การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (Fractional Factorial Design) เป็นการออกแบบการทดลองที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการ ซึ่งสามารถใช้ช่วยในการหาแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการได้อีกด้วย เนื่องจากจำนวนการทดลองจะน้อยเมื่อเทียบกับวิธีการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2k Factorial Design) จึงเป็นที่นิยมในการใช้กรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผล กล่าวคือในการทดลองหนึ่งอาจจะมีปัจจัยมากมายที่กำลังอยู่ในความสนใจ โดยเฉพาะในตอนเริ่มต้นโครงการ เนื่องจากโดยมากแล้วในระยะนี้จะมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองที่กำลังพิจารณาอยู่ จึงใช้การออกแบบเช่นนี้เพื่อค้นหาว่าปัจจัยตัวใดบ้างเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนของการกรองปัจจัยแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อไป (Chutima, 2002)

และในการเพิ่มจุดกึ่งกลาง (Center point) ในการออกแบบการทดลองนั้น จะทำให้ได้ทราบว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างปัจจัยนำเข้าแต่ละตัวและตัวแปรตอบสนองที่สนใจนั้น มีความเป็นเส้นโค้ง (Curvature) หรือไม่ เพราะถ้าหากมีความเป็นเส้นโค้งอยู่ในแบบจำลอง ในการออกแบบการทดลองจะจำเป็นต้องใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) ทดแทนการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล เนื่องจากผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นอาจจะทำให้เกิดการวิเคราะห์และตีความที่ผิดพลาดได้

โดยที่ความสำเร็จของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลจะขึ้นอยู่กับแนวคิดที่สำคัญ 3 ประการ (Chutima, 2002) คือ

1. *หลักการที่ว่า มีปัจจัยจำนวนน้อยที่มีผล*: เมื่อมีตัวแปรหลายตัว การดำเนินการต่างๆ ของระบบหรือกระบวนการมีแนวโน้มที่จะถูกกำหนดโดยปัจจัยหลักและอันตรกิริยาขั้นต่ำเพียงบางตัวเท่านั้น
2. *คุณสมบัติการฉายการออกแบบ (Projection)*: การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลสามารถถูกฉายไปสู่การออกแบบที่ดีกว่า หรือการออกแบบที่ใหญ่กว่า ในเซตย่อยของปัจจัยที่มีผล
3. *การทดลองต่อเนื่อง*: สามารถเป็นไปได้ที่จะรวมการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล 2 การทดลองหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะทำให้เกิดการทดลองอย่างต่อเนื่องที่มีการออกแบบที่ใหญ่กว่า และสามารถประมาณผลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่อยู่ในความสนใจได้ดียิ่งขึ้น

5.2.2 มิติของการออกแบบ (Resolution design)

สำหรับการใช้มิติของการออกแบบในผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ (Resolution design, R) ของการออกแบบการทดลองนั้นขึ้นอยู่กับ 3 ระดับ คือ R_{III} , R_{IV} , และ R_V ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การออกแบบความละเอียด (Design resolution) ของการออกแบบการทดลอง

มิติ (Resolution)	ผลรวมลำดับที่เล็กที่สุดของ นามแฝงอิทธิพลหลัก (Smallest Sum of Orders of Aliased Effects)	ความหมาย (Meaning)
III	1+2	อิทธิพลหลักมีคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยาสองปัจจัย
IV	1+3, 2+2	อิทธิพลหลักมีคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยาสามปัจจัย, อันตรกิริยาสองปัจจัยมีคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยาสอง ปัจจัยด้วยตนเอง
V	1+4, 2+3	อิทธิพลหลักมีคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยาสี่ปัจจัย, อันตรกิริยาสองปัจจัยมีนามแฝงกับอันตรกิริยาสาม ปัจจัย

- R_{III} เป็นระดับมิติที่ต่ำที่สุดที่จะเลือกใช้สำหรับการออกแบบการทดลอง ซึ่งเหมาะกับการกรองปัจจัยนำเข้าที่มีจำนวนหลายปัจจัย แต่ไม่ควรนำแบบจำลองใดๆซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ในระบับนี้ไปใช้ เนื่องจากมีโอกาสสูงมากที่อิทธิพลของปัจจัยแต่ละตัวหรือที่เรียกว่าอิทธิพลหลัก (Main effect) จะมีคู่แฝดแฝง (Alias) กันกับอันตรกิริยาสองปัจจัย (2 factors interactions) ในขณะที่ไม่มีอิทธิพลหลักใดๆจะมีคู่แฝดแฝงร่วมกับอิทธิพลหลักตัวอื่นๆ
- R_{IV} เป็นระดับมิติที่ระดับปานกลางสำหรับการออกแบบการทดลอง สามารถนำแบบจำลองซึ่งได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ในการพยากรณ์ หรือใช้เปลี่ยนแปลงกระบวนการตามผลการวิเคราะห์ได้ เนื่องจากอิทธิพลหลักไม่มีคู่แฝดแฝงร่วมกับอันตรกิริยาสองปัจจัยใดๆ และไม่มีคู่แฝดแฝงร่วมกับอิทธิพลหลักตัวอื่นๆ มีเพียงอันตรกิริยาสองปัจจัยที่มีคู่แฝดแฝงร่วมกันกับอันตรกิริยาสองปัจจัยด้วยกันเอง และยังมีโอกาสที่อิทธิพลหลักจะมีคู่แฝดแฝงร่วมกันกับอันตรกิริยาสามปัจจัย (3 factors interaction) ซึ่งเป็นอันตรกิริยาที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ไม่บ่อย
- R_V เป็นระดับมิติที่ตีมากสำหรับการออกแบบการทดลอง แต่เนื่องจากมีจำนวนการทดลองที่มากกว่ามิติในระบับอื่นๆ จึงต้องใช้ทรัพยากรในการทดลองมากกว่าด้วยเช่นกัน โดยมิติที่ระดับนี้ อิทธิพลหลักจะไม่มีคู่แฝดแฝงกับอิทธิพลหลักด้วยกันเอง และจะไม่มีคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยาสองปัจจัย แต่อิทธิพลหลักมีโอกาสที่จะมีคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยาสี่ปัจจัย ซึ่งเป็นอันตรกิริยาที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ไม่บ่อย ในขณะที่อันตรกิริยาสองปัจจัยจะไม่มีคู่แฝดแฝงกันกับอันตรกิริยาสองปัจจัยด้วยกันเอง แต่อันตรกิริยาสองปัจจัยมีโอกาสที่จะเกิดคู่แฝดแฝงกันกับอันตรกิริยาสามปัจจัย จึงทำให้การวิเคราะห์อิทธิพลหลักมีความแม่นยำสูงเนื่องจากไม่มีการรบกวนผลการวิเคราะห์อิทธิพลหลักจากอันตรกิริยาสองปัจจัยที่เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่ายมากที่สุด

โดยมากแล้วการออกแบบการทดลองมักจะกำหนดให้มิติสูงสุดที่เป็นไปได้ของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลมีค่าตรงกันกับระดับของเศษส่วนที่ต้องการ ซึ่งจะเห็นได้ว่า การออกแบบยังมีมิติสูง ก็ยังมีข้อจำกัดน้อยลงในเรื่องสมมติฐานเกี่ยวกับว่า อันตรกิริยาตัวใดจะถูกกลบเกลายได้ เพื่อที่จะได้มาซึ่งการตีความหมายข้อมูลที่ถูกต้อง (Chutima, 2002)

ดังนั้นในการออกแบบมิติสำหรับการออกแบบการทดลอง จะหลีกเลี่ยงมิติที่ระดับ R_{III} ซึ่งระดับมิติของการออกแบบการทดลองที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือมิติที่ระดับ R_{IV} ที่ใช้ทรัพยากรในการทดลองน้อย โดยที่ยังสามารถใช้แบบจำลองทางสถิติเพื่อการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 5.1 โดยที่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปมาตรฐานได้ดังแสดงในรูปที่ 5.2

Available Factorial Designs (with Resolution)															
	Factors														
Runs	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Full	III													
8		Full	IV	III	III	III									
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III	
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV	

Available Resolution III Plackett-Burman Designs					
Factors	Runs	Factors	Runs	Factors	Runs
2-7	12,20,24,28,...,48	20-23	24,28,32,36,...,48	36-39	40,44,48
8-11	12,20,24,28,...,48	24-27	28,32,36,40,44,48	40-43	44,48
12-15	20,24,28,36,...,48	28-31	32,36,40,44,48	44-47	48
16-19	20,24,28,32,...,48	32-35	36,40,44,48		

รูปที่ 5.1 ระดับความละเอียดของการออกแบบการทดลองที่จำนวนปัจจัยขนาดต่างๆ

2^{4-1}_{IV} Fractional Factorial Design

รูปที่ 5.2 การเขียนชื่อการออกแบบการทดลองให้อยู่ในรูปมาตรฐาน

5.2.3 จำนวนตัวอย่างของการออกแบบการทดลอง (Sample size)

ขนาดของจำนวนตัวอย่างของการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง สามารถหาได้อย่างสะดวกด้วยโปรแกรม Minitab ดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยมีกำหนดจุดกึ่งกลาง (Center point) ให้เท่ากับ 3 และกำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เท่ากับ 1.442 ที่มาจากผลการวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการเบื้องต้น และได้กำหนดค่าที่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละอิทธิพลที่ต้องการทดสอบ (Effect) ให้มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.721 และสุดท้ายคือ การกำหนดค่ากำลังของการทดสอบ (Target Power) ที่อย่างน้อยเท่ากับ 0.95 โดยที่ผลของการคำนวณจำนวนตัวอย่าง, ค่ากำลังของการทดสอบที่แท้จริง, และจำนวนการทำซ้ำหรือจำนวนการทดลองซ้ำ จะได้ผลดังที่แสดงในรูปที่ 5.4

Power and Sample Size for 2-Level Factorial Design

Number of factors: 4 ← จำนวนปัจจัยนำเข้าทั้งหมด

Number of corner points: 8 ← จำนวนการทดลองของการออกแบบทดลอง
เศษส่วนเชิงแพททอเรียล คือ $2^{k-1} = 2^{4-1} = 8$

Specify values for any three of the following:

Replicates: ← จำนวนการทำซ้ำของการทดลองที่ต้องการหา

Effects: 0.721

Power values: 0.95 ← ค่ากำลังของการทดสอบ (Target Power) ที่อย่างน้อยเท่ากับ 95%

Number of center points per block: 3 ← จำนวนจุดกึ่งกลางที่ต้องการเพิ่มเข้าไปในการออกแบบการทดลอง

Standard deviation: 1.442 ← ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากขั้นตอนการประเมินความสามารถของกระบวนการเบื้องต้น

ค่าที่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละอิทธิพลที่ต้องการทดสอบคือ $SD/2$

Design... Options... Graph... Help OK Cancel

รูปที่ 5.3 การหาจำนวนตัวอย่างของการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

2-Level Factorial Design
 $\alpha = 0.05$ Assumed standard deviation = 1.442

Method

Factors: 4 Base Design: 4, 8
 Blocks: none

Including a term for center points in model.

Results

Center Points	Effect	Reps	Total Runs	Target Power	Actual Power
3	0.721	22	179	0.90	0.909530
3	0.721	27	219	0.95	0.955191
3	0.721	37	299	0.99	0.990015

รูปที่ 5.4 ผลการหาจำนวนตัวอย่างและค่ากำลังของการทดสอบที่แท้จริง

จากรูปที่ 5.4 จะแสดงให้เห็นถึงจำนวนตัวอย่างที่ต้องใช้ในการออกแบบการทดลองได้ดังนี้ ค่ากำลังในการทดสอบที่กำหนดไว้ (Target power) ซึ่งจะใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ 0.95 ซึ่งค่ากำลังในการทดสอบที่ได้จริง (Actual power) คือ 0.955191 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่ากำลังทดสอบที่กำหนดไว้

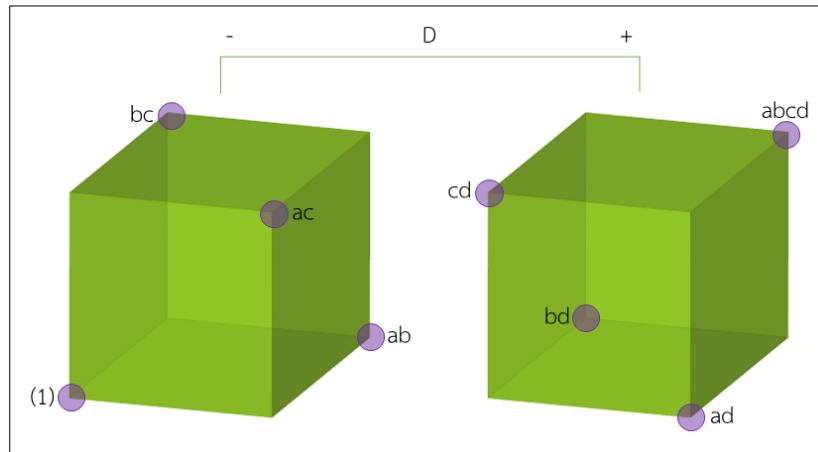
จึงหมายความว่าสามารถใช้จำนวนตัวอย่างในการทดลองที่มีค่ากำลังมากกว่า 0.95 ตามที่กำหนดไว้ได้ ซึ่งจำนวนตัวอย่างในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องใช้ทั้งหมด 2^{4-1} เท่ากับ 8 ตัวอย่าง และต้องทำซ้ำ (Replication) ทั้งหมด 27 ครั้ง ดังนั้นจะได้จำนวนตัวอย่างสำหรับการทดลองเท่ากับ $8 \times 27 = 216$ ตัวอย่าง นับรวมกับตัวอย่างที่ต้องใช้กับการทดลองของจุดกึ่งกลาง (Center point) อีก 3 ตัวอย่าง ดังนั้นจำนวนตัวอย่างขั้นต่ำสำหรับการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลที่มีการเพิ่มจุดศูนย์กลางในครั้งนี้ จะมีค่าเท่ากับ $(8 \times 27) + 3 = 219$ ตัวอย่าง ดังที่แสดงในรูปที่ 5.4

5.2.4 ตารางการออกแบบการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^{4-1} ที่มี $I = ABCD$ เนื่องจากว่าตัวก่อกำเนิด (Generator) เช่นนี้จะทำให้เกิดการออกแบบที่มีมิติที่สูงที่สุดเท่าที่จะเกิดขึ้นได้ (มิติที่ R_{IV}) เพื่อที่จะสร้างการออกแบบนี้ จึงต้องเขียนการออกแบบพื้นฐานขึ้นมาก่อน ซึ่งคือการออกแบบพื้นฐาน 2^3 ดังแสดงใน 3 คอลัมน์แรกของตารางที่ 5.4 การออกแบบเริ่มต้นนี้มีจำนวนของการทดลองร่วมปัจจัยครบถ้วนที่ 8 จำนวนการทดลอง แต่เฉพาะกับ 3 คอลัมน์ (ปัจจัย) แรกเท่านั้น เพื่อที่จะหาระดับของปัจจัยตัวที่สี่ จึงกำหนดให้ $I = ABCD$ สำหรับ D หรือ $D = ABC$ นั่นเอง เนื่องจากตัวก่อกำเนิด ABCD เป็นบวก ดังนั้นการออกแบบ 2_{IV}^{4-1} นี้จะเป็นเศษส่วนหลัก (Principle fraction) นอกจากนี้ยังได้เพิ่มจุดกึ่งกลางของการออกแบบการทดลองเพิ่มอีก 3 การทดลอง ดังนั้นตารางการออกแบบการทดลองจึงเป็นไปดังแสดงในตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.5

ตารางที่ 5.4 การออกแบบ 2_{IV}^{4-1} ที่มีตัวกำหนดความสัมพันธ์ $I=ABCD$ และเพิ่ม 3 จุดกึ่งกลาง

Run	Basic Design				Treatment combination
	A	B	C	D=ABC	
1	-	-	-	-	(1)
2	+	-	-	+	ad
3	-	+	-	+	bd
4	+	+	-	-	ab
5	-	-	+	+	cd
6	+	-	+	-	ac
7	-	+	+	-	bc
8	+	+	+	+	abcd
9	0	0	0	0	Center Point
10	0	0	0	0	Center Point
11	0	0	0	0	Center Point



รูปที่ 5.5 การออกแบบ 2_{IV}^{4-1} สำหรับการออกแบบการทดลองในงานวิจัยฉบับนี้

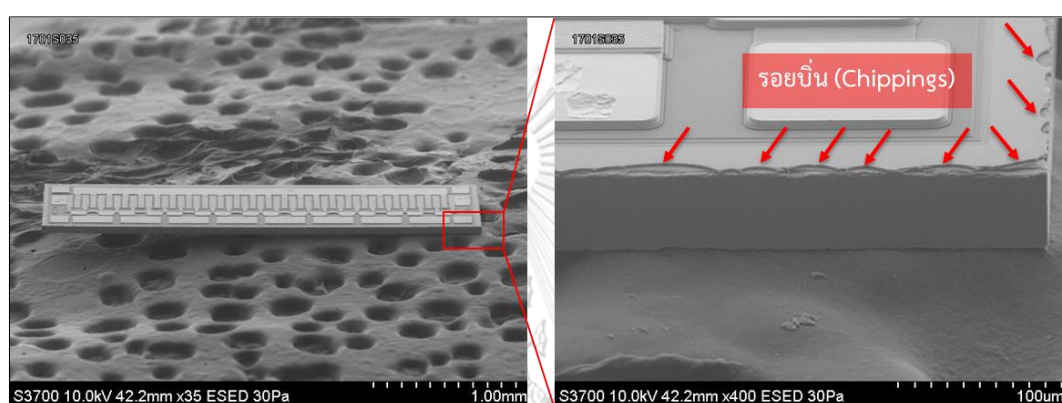
จากตารางที่ 5.2 ที่ได้กำหนดระดับในการทดลองของปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย สามารถสร้างตารางการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลที่มีการเพิ่มจุดกึ่งกลางได้ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งในการทดลองจะทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomize runs) เพื่อเป็นการกระจายตัวสิ่งรบกวน (Noises) ที่อาจเกิดขึ้นในการทดลองไปสู่ทุกๆ การทดลอง ทำให้ผลการทดลองเป็นไปอย่างยุติธรรมมากขึ้น ดังนั้นจะได้ตารางการออกแบบการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 การออกแบบ 2_{IV}^{4-1} ที่เพิ่ม 3 จุดกึ่งกลาง จากโปรแกรม Minitab

StdOrder	RunOder	CenterPt	Factor			
			A	B	C	D
4	1	1	30	50,000	25.0	50
10	2	0	25	35,000	37.5	60
7	3	1	20	50,000	50.0	50
1	4	1	20	20,000	25.0	50
9	5	0	25	35,000	37.5	60
3	6	1	20	50,000	25.0	70
11	7	0	25	35,000	50.0	60
5	8	1	20	20,000	50.0	70
6	9	1	30	20,000	50.0	50
8	10	1	30	50,000	50.0	70
2	11	1	30	20,000	25.0	70

5.2.5 ตัวแปรตอบสนอง

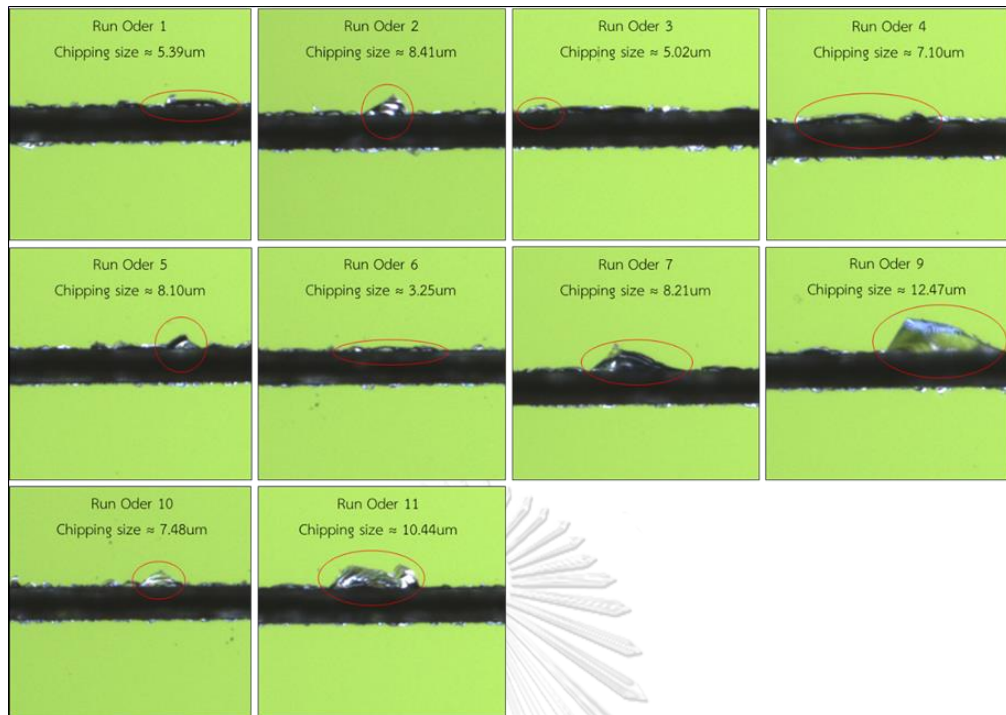
ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนของการหาปัจจัยนำเข้าที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อรอยบิ่นบนแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ ซึ่งตัวแปรตอบสนองที่ใช้สำหรับรอยบิ่นบนแผ่นเวเฟอร์จากการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชรคือความกว้างของรอยบิ่นซึ่งได้จากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ และรอยบิ่นบนแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษที่เกิดจากการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชรนั้น สามารถดูได้จากรูปที่ 5.6 ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)



รูปที่ 5.6 รูป SEM แสดงรอยบิ่นบนแผ่นเวเฟอร์ซึ่งเกิดจากการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชร

5.3 ผลการทดลองของการออกแบบการทดลองในขั้นต้น

ผลลัพธ์ของความกว้างของรอยบิ่นบนแผ่นเวเฟอร์ ได้แสดงดังที่ในตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 ซึ่งคือรอยบิ่นอันเนื่องมาจากการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชรของแต่ละการทดลอง โดยจะเห็นว่ารอยบิ่นของการทดลองที่ 9 จะมีขนาดรอยบิ่นเฉลี่ยใหญ่มากที่สุด ในขณะที่การทดลองที่ 6 จะได้ผลขนาดรอยบิ่นเฉลี่ยที่เล็กมากที่สุด



รูปที่ 5.7 รอยบิ่นอันเนื่องมาจากการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชรของแต่ละการทดลอง

ตารางที่ 5.6 ผลการวัดความกว้างของรอยบินบนแผ่นเวเฟอร์ของแต่ละการทดลอง

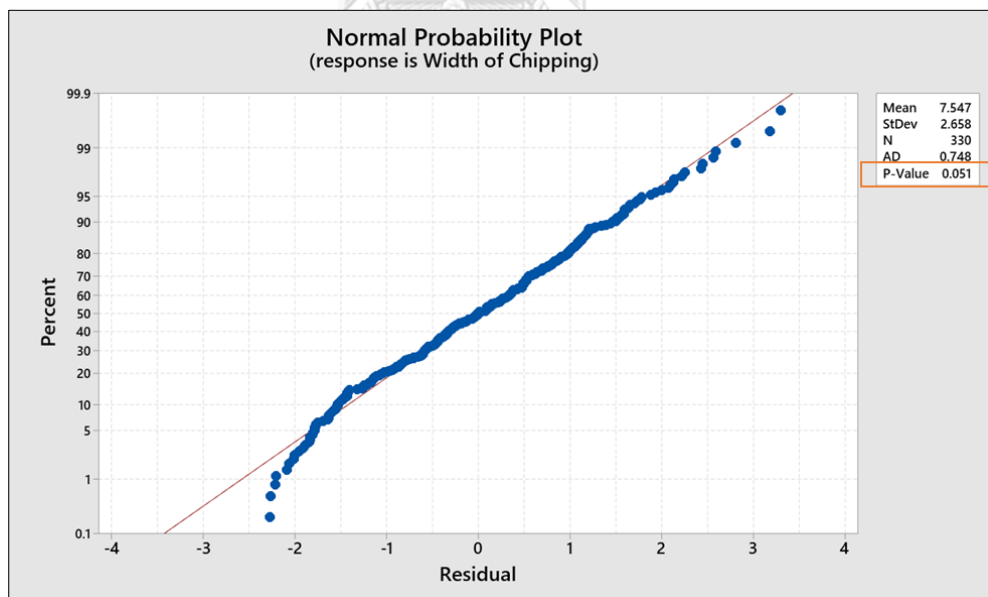
StdOrder		RunOrder	CenterPt	Width of Chipping for each order																			
				Factors				Ybar	Replicate 1-15														
				A	B	C	D		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13	Y14	Y15
4	1	1	30	50,000	25.0	50	5.39	4.81	5.12	4.78	4.28	5.72	5.34	5.82	6.22	5.49	5.35	5.73	5.90	3.96	3.39	6.94	
10	2	0	25	35,000	37.5	60	8.41	8.95	6.61	7.09	10.51	7.87	6.98	9.59	9.52	6.35	6.21	9.97	7.93	8.65	6.91	7.25	
7	3	1	20	50,000	50.0	50	5.02	5.27	6.04	5.41	6.06	4.91	4.71	4.50	4.21	4.90	6.03	4.32	5.38	4.72	4.42	5.37	
1	4	1	20	20,000	25.0	50	7.10	5.48	5.86	6.36	7.35	7.42	5.68	5.85	6.73	7.60	6.69	6.76	9.54	6.47	8.26	7.87	
9	5	0	25	35,000	37.5	60	8.10	6.64	6.57	9.44	8.95	9.23	9.08	8.91	8.59	6.67	8.60	7.84	8.09	6.49	7.95	8.80	
3	6	1	20	50,000	25.0	70	3.25	2.33	3.78	4.06	4.15	1.62	4.44	3.34	3.75	3.35	2.10	4.19	2.93	3.01	4.32	2.79	
11	7	0	25	35,000	50.0	60	8.21	9.12	7.36	6.43	8.16	8.23	9.20	8.03	9.81	6.57	10.22	9.42	7.82	9.17	6.00	7.71	
5	8	1	20	20,000	50.0	70	7.12	6.06	6.17	8.64	7.49	7.79	6.88	6.70	7.67	5.29	7.12	9.20	5.65	6.65	5.04	8.11	
6	9	1	30	20,000	50.0	50	12.47	12.45	12.11	15.29	11.77	12.84	12.86	12.95	12.73	14.92	11.63	12.62	12.61	11.36	11.49	10.90	
8	10	1	30	50,000	50.0	70	7.48	9.08	7.14	8.24	6.88	9.14	8.01	6.02	6.94	9.07	9.12	5.89	8.61	7.58	7.76	7.02	
2	11	1	30	20,000	25.0	70	10.44	8.53	8.61	9.61	8.18	10.17	10.01	9.41	10.15	11.70	10.71	10.01	11.33	11.41	12.23	10.66	
StdOrder		RunOrder	CenterPt	Factors				Ybar	Replicate 16-30														
				A	B	C	D		Y16	Y17	Y18	Y19	Y20	Y21	Y22	Y23	Y24	Y25	Y26	Y27	Y28	Y29	Y30
				4	1	1	30	50,000	25.0	50	5.39	5.49	3.64	5.92	4.32	5.89	5.40	4.81	5.88	5.75	6.39	5.28	4.79
10	2	0	25	35,000	37.5	60	8.41	9.04	8.11	8.37	8.18	6.64	10.30	8.96	9.15	8.35	9.01	8.49	9.62	11.71	7.48	8.55	
7	3	1	20	50,000	50.0	50	5.02	5.35	4.82	3.39	4.58	3.88	6.12	5.21	4.46	4.99	5.81	5.16	4.43	5.79	4.92	5.58	
1	4	1	20	20,000	25.0	50	7.10	5.09	7.92	6.30	8.16	8.19	6.53	9.70	6.73	8.55	6.50	5.34	7.20	8.19	5.15	9.67	
9	5	0	25	35,000	37.5	60	8.10	9.56	6.31	7.68	9.83	8.76	7.63	8.93	7.20	8.59	6.29	6.58	8.09	8.70	7.31	9.61	
3	6	1	20	50,000	25.0	70	3.25	3.89	3.11	2.39	3.08	4.43	2.97	3.60	1.82	3.74	4.76	3.84	2.91	2.36	1.85	2.67	
11	7	0	25	35,000	50.0	60	8.21	7.08	9.34	10.15	6.33	6.95	9.41	8.38	6.67	8.29	8.21	9.31	10.34	8.48	6.80	7.44	
5	8	1	20	20,000	50.0	70	7.12	7.76	9.26	9.35	5.64	6.27	5.59	8.52	6.68	7.50	7.60	5.28	7.24	7.83	7.51	7.26	
6	9	1	30	20,000	50.0	50	12.47	10.78	13.48	12.70	13.75	13.35	11.27	12.49	11.28	14.12	11.57	11.42	13.50	10.92	11.68	13.37	
8	10	1	30	50,000	50.0	70	7.48	7.14	6.66	7.13	6.35	5.21	7.27	8.19	8.03	7.09	6.46	6.83	7.15	7.20	8.18	9.07	
2	11	1	30	20,000	25.0	70	10.44	12.21	9.81	9.89	9.19	10.88	10.92	9.23	8.90	12.70	10.97	9.99	11.31	13.63	11.65	9.27	

5.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ก่อนที่จะนำผลการวัดของความกว้างของรอยบิ่นบนแผ่นเวเฟอร์ไปวิเคราะห์ผลการทดลอง จำเป็นต้องตรวจสอบความเพียงพอ (Adequacy) ของแบบจำลองทางสถิติที่จะนำไปใช้ก่อน โดยมีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคือการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ซึ่งประกอบไปด้วย สมมติฐานทั้งหมด 3 ข้อ ดังต่อไปนี้

5.4.1 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นการกระจายแบบปกติ (Normality)

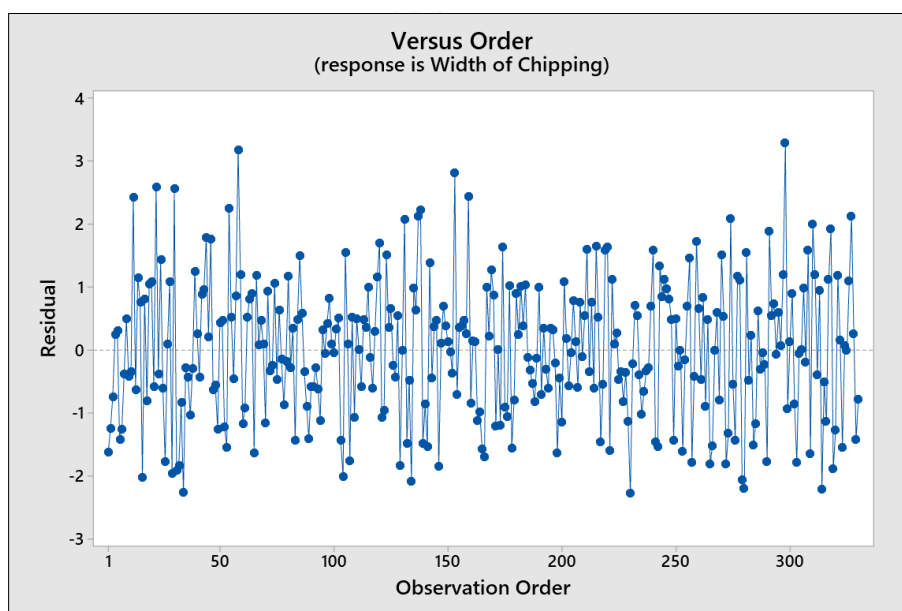
การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติสามารถตรวจสอบได้โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) เช่นเดียวกับที่ได้แสดงวิธีทำและวิธีคำนวณดังในหัวข้อที่ 4.2.1 ซึ่งได้พิสูจน์ว่ามีผลตรงกันกับการใช้ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูล จึงได้ใช้โปรแกรม Minitab วิเคราะห์ข้อมูลในหัวข้อนี้ด้วยเช่นกัน จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงโดยมีค่า P-Value มากกว่าระดับนัยสำคัญ (Alpha level) ที่ 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หมายความว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ ดังที่แสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบสมมติฐานของความเป็นการกระจายแบบปกติสำหรับการวิเคราะห์ผล DOE

5.4.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

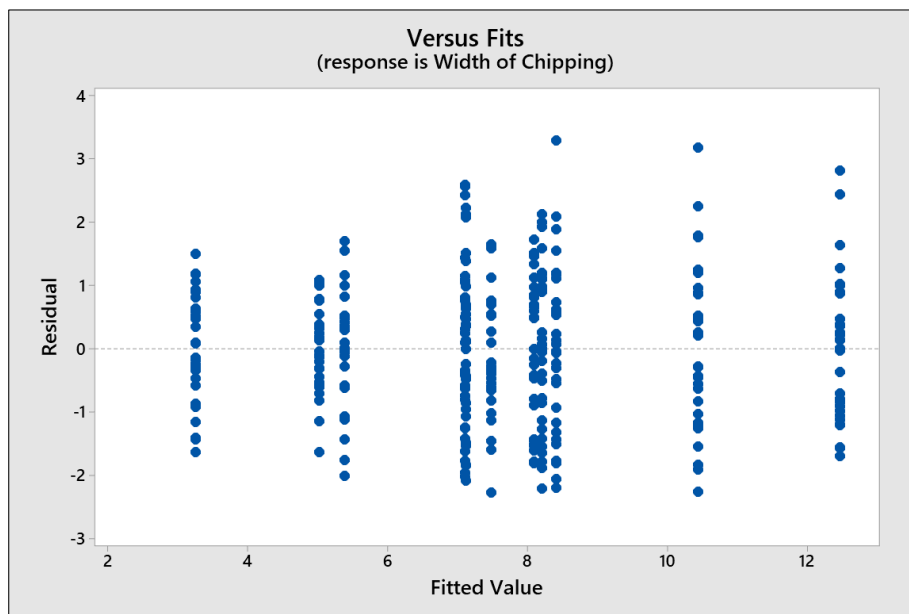
การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง สามารถพิจารณาจากแผนภาพการกระจายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับการเก็บข้อมูล (Observation order) และผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างของความกว้างรอยป็นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลกลุ่มนี้มีความเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของความเป็นอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระสำหรับการวิเคราะห์ผล DOE

5.4.3 ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance stability)

ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน สามารถทำการตรวจสอบได้โดยแผนภาพกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (Residual) กับขนาดของความกว้างของรอยป็น (Width of Chipping) ที่ได้มาจากสมการถดถอย (Fitted value) พบว่าลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวแบบคงที่ โดยที่ไม่มีลักษณะการกระจายตัวในรูปแบบกรวยปากเปิดและกรวยปากปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลกลุ่มนี้มีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน วึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ดังแสดงในรูป 5.10



รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

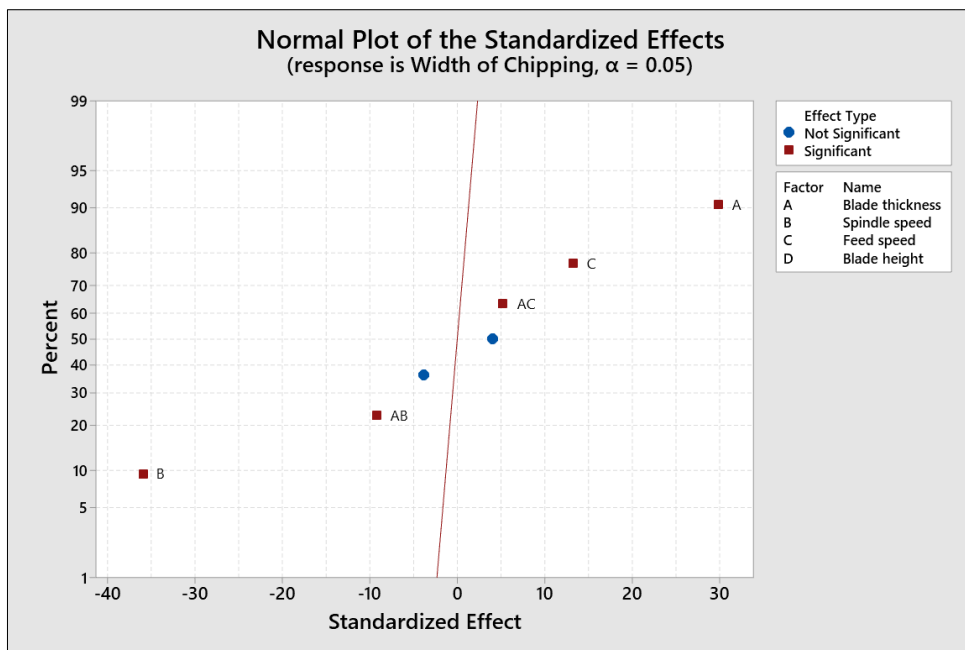
5.5 วิเคราะห์ผลการทดลองของการออกแบบการทดลองในขั้นต้น

การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความกว้างของรอยบินอย่างมีนัยสำคัญ สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังที่ได้แสดงวิธีทำและวิธีการคำนวณในหัวข้อที่ 4.1.4.1 ซึ่งได้พิสูจน์ว่ามีผลตรงกันกับการใช้ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูล จึงใช้โปรแกรม Minitab วิเคราะห์ข้อมูลในหัวข้อนี้ด้วยเช่นกัน

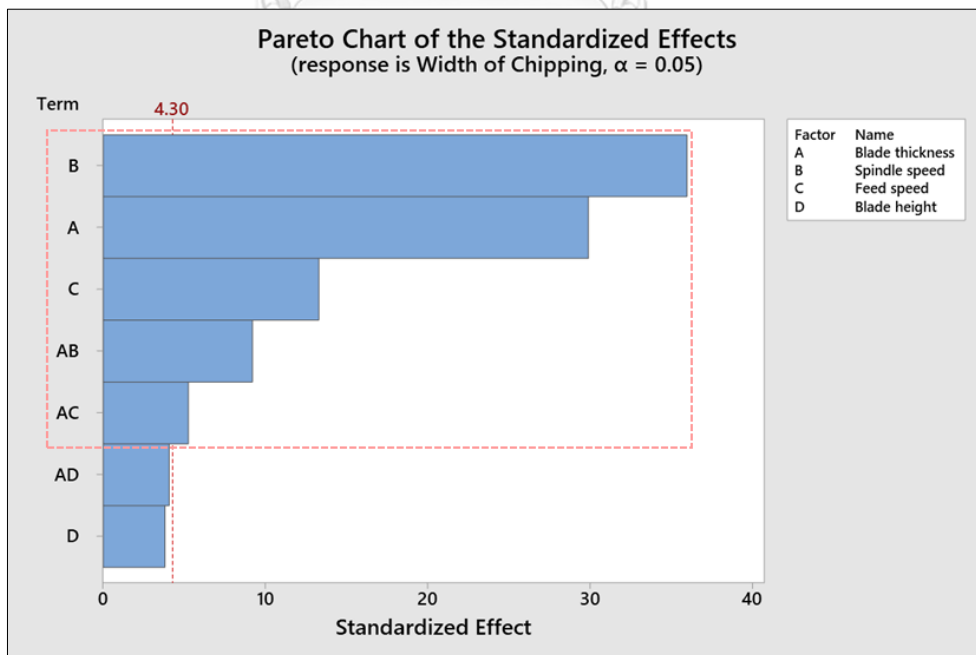
สำหรับผลการวิเคราะห์การทดลองเบื้องต้นด้วยโปรแกรม Minitab ที่ได้แสดงให้เห็นถึงปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีนัยสำคัญ ซึ่งจะถูกแสดงโดยแผนภาพการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าอิทธิพลมาตรฐาน (Normal Probability Plot of the Standardized Effects) ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลัก A, B, และ C มีผลต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกับอันตรกิริยาสองปัจจัย AB และ AC ซึ่งมีผลต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในรูปที่ 5.11

แผนภาพพาเรโตของของอิทธิพลมาตรฐาน (Pareto Chart of the Standardized Effects) ในรูปที่ 5.12 ที่แสดงผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกันกับแผนภาพการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าอิทธิพลมาตรฐาน (Normal Probability Plot of the Standardized Effects) ได้แสดงให้เห็นว่าสามปัจจัยหลัก A, B, และ C มีผลต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์อย่างมี

นัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นเดียวกับกับอันตรกิริยาสองปัจจัย AB และ AC ซึ่งมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.11 แผนภาพการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าอิทธิพลมาตรฐาน



รูปที่ 5.12 แผนภาพพาเรโตของของค่าอิทธิพลมาตรฐาน

การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้นในการหาปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ด้วยโปรแกรม Minitab พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (Alpha = 0.05) มีปัจจัยหลัก (Main factors) ที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ (Width of Topside Chipping) อยู่ทั้งหมด 3 ปัจจัย จาก 4 ปัจจัย โดยที่ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญจะมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งได้แก่ A (ความหนาใบมีดผงเพชร), B (ความเร็วรอบตัด), และ C (ความเร็วป้อนตัด) ในขณะที่ปัจจัยหลัก D (ความสูงใบมีดขณะตัด) ส่งผลต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ดังที่แสดงในรูป 5.14

ในการวิเคราะห์อันตรกิริยา เทอมนามแฝง (Alias) จะถูกลบออกจากแบบจำลองทางสถิติโดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม Minitab เนื่องจากเทอมที่เป็นคู่แฝดต่อกันจะไม่สามารถพิจารณาได้ว่าอันตรกิริยาของเทอมใดที่ส่งผลต่อความกว้างของรอยบิน โครงสร้างคู่แฝดแฝง (Alias structure) ของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลที่มีการเพิ่มจุดกึ่งกลางและมี 4 ปัจจัย จะแสดงในรูปที่ 5.13

Alias Structure	
Factor Name	
A	A
B	B
C	C
D	D
Aliases	
I + ABCD	→ ABCD confounded with the Center point term
A + BCD	→ Main effect A is aliased with interaction BCD
B + ACD	→ Main effect B is aliased with interaction ACD
C + ABD	→ Main effect C is aliased with interaction ABD
D + ABC	→ Main effect D is aliased with interaction ABC
AB + CD	→ Interaction AB is aliased with interaction CD
AC + BD	→ Interaction AC is aliased with interaction BD
AD + BC	→ Interaction AD is aliased with interaction BC

รูปที่ 5.13 โครงสร้างคู่แฝดแฝงของการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล

อันตรกิริยาสองปัจจัย (2 factors interaction) ที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ จะแสดงผลค่า P-Value ที่น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งได้แก่ อันตรกิริยาสองปัจจัย AB และ AC ในขณะที่อันตรกิริยาสองปัจจัย AD ส่งผลอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งจะแสดงผลค่า P-Value ที่มากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 5.14

นอกจากนี้ยังพบว่ามียูทิลิตี้เนื่องจากความโค้งของผลตอบสนอง (Curvature) เกิดขึ้นกับการทดลองนี้ เพราะค่า P-Value ของความโค้งของผลตอบสนองมีค่าเท่ากับ 0.012 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงหมายความว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างปัจจัยนำเข้าแต่ละตัว และตัวแปรตอบสนองที่สนใจนั้น มีความเป็นเส้นโค้ง ในการออกแบบการทดลองจึงจำเป็นต้องใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design) ทดแทนการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล เนื่องจากผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการวิเคราะห์และการตีความมีความผิดพลาดได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.14

Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		7.2837	0.0556	131.08	0.000	
Blade thickness	3.3225	1.6613	0.0556	29.90	0.001	1.00
Spindle speed	-3.9975	-1.9988	0.0556	-35.97	0.001	1.00
Feed speed	1.4775	0.7388	0.0556	13.30	0.006	1.00
Blade height	-0.4225	-0.2112	0.0556	-3.80	0.063	1.00
Blade thickness*Spindle speed	-1.0225	-0.5113	0.0556	-9.20	0.012	1.00
Blade thickness*Feed speed	0.5825	0.2913	0.0556	5.24	0.035	1.00
Blade thickness*Blade height	0.4525	0.2262	0.0556	4.07	0.055	1.00
Ct Pt		0.956	0.106	8.99	0.012	1.00

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.157162	99.92%	99.61%	*

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	8	63.9353	7.9919	323.56	0.003	
Linear	4	58.7611	14.6903	594.75	0.002	
Blade thickness	1	22.0780	22.0780	893.85	0.001	
Spindle speed	1	31.9600	31.9600	1293.93	0.001	
Feed speed	1	4.3660	4.3660	176.76	0.006	
Blade height	1	0.3570	0.3570	14.45	0.063	
2-Way Interactions	3	3.1791	1.0597	42.90	0.023	
Blade thickness*Spindle speed	1	2.0910	2.0910	84.66	0.012	
Blade thickness*Feed speed	1	0.6786	0.6786	27.47	0.035	
Blade thickness*Blade height	1	0.4095	0.4095	16.58	0.055	
Curvature	1	1.9951	1.9951	80.77	0.012	
Error	2	0.0494	0.0247			
Total	10	63.9847				

รูปที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับค่าความกว้างของรอยบิน

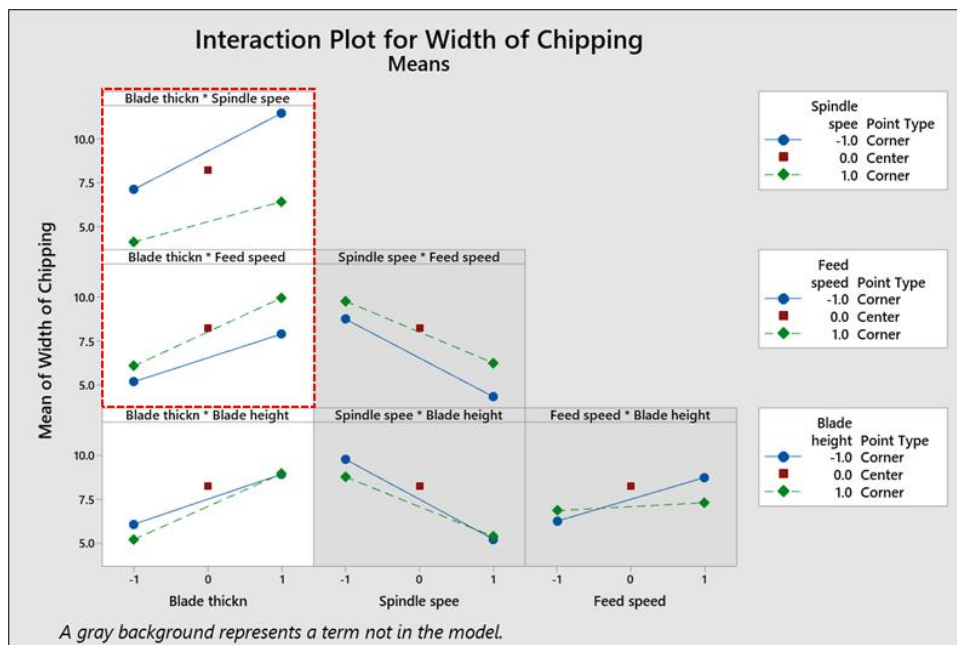
และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ พบว่าเส้นกราฟของปัจจัยหลัก A, B, และ C มีรูปแบบลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน หมายความว่าเมื่อมีการเปลี่ยนระดับของปัจจัย จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง (ความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์) นั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยที่การเปลี่ยนระดับจากระดับต่ำไประดับสูงของปัจจัย A (ความหนาของใบมีดผงเพชร) และ C (ความเร็วป้อนตัด) จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยบินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับการเปลี่ยนระดับของปัจจัย B (ความเร็วรอบตัด) ซึ่งมีแนวโน้มของความกว้างของรอยบินลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนระดับจากระดับต่ำไปยังระดับสูง ดังแสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 แผนภาพแสดงอิทธิพลหลัก (Main Effects) ที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยบิน

ผลของอันตรกิริยา (Interaction) ที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นว่า อันตรกิริยาสองปัจจัย A*B (ความหนาของใบมีดผงเพชร * ความเร็วรอบตัด) และ A*C (ความหนาของใบมีดผงเพชร * ความเร็วป้อนตัด) มีผลต่อค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยบิน เมื่อปัจจัย A (ความหนาของใบมีดผงเพชร) และ B (ความเร็วรอบตัด) เกิดการเปลี่ยนระดับจากระดับต่ำไประดับสูง จะทำให้ค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยบินมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับปัจจัย A (ความหนาของใบมีดผงเพชร) และ C (ความเร็วป้อนตัด) โดยเมื่อเกิดการ

เปลี่ยนแปลงระดับจากระดับต่ำไประดับสูง จะมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยบิ่นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 แผนภาพแสดงอิทธิพลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยบิ่น

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยนำเข้าที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์จะเหลืออยู่เพียง 3 ปัจจัย จาก 4 ปัจจัย นั่นคือ ความหนาของใบมีดผงเพชร, ความเร็วรอบตัด, และความเร็วป้อนตัด ในขณะที่ความสูงใบมีดระหว่างตัดจะเป็นปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ ปัจจัยนำเข้าที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ทั้ง 3 ปัจจัย จะถูกนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติต่อไป

บทที่ 6

ระยะการปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improve phase)

จากการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลที่มีการเพิ่มจุดกึ่งกลาง (Fractional Factorial Design with Center point) จากระยะที่แล้ว ทำให้ทราบว่าปัจจัยนำเข้าที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์จะมีอยู่ 3 ปัจจัย คือ ความหนาของไบมิตดงเพชร, ความเร็วรอบตัด, และความเร็วป้อนตัด นอกจากนี้ยังได้พบว่ามีอิทธิพลเนื่องจากความโค้งของผลตอบสนอง (Curvature) เกิดขึ้นกับการทดลองนี้ ซึ่งความหมายว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างปัจจัยนำเข้าแต่ละตัวและตัวแปรตอบสนองที่สนใจนั้นมีความเป็นเส้นโค้งอยู่ จึงได้นำปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัยมาทำการทดลองทางสถิติต่อ โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองพื้นผิวดตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยนำเข้าที่จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์มีขนาดเล็กที่สุด

6.1 ปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญที่จะทำการศึกษา

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 4 ปัจจัย ในระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา พบว่ามีปัจจัยนำเข้าที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์อยู่ทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ ความหนาของไบมิตดงเพชร, ความเร็วรอบตัด, และความเร็วป้อนตัด ซึ่งระดับที่จะนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองนั้นจะมีทั้งหมด 3 ระดับ ที่อยู่ในช่วงของการทำงานในแต่ละปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงกระบวนการ

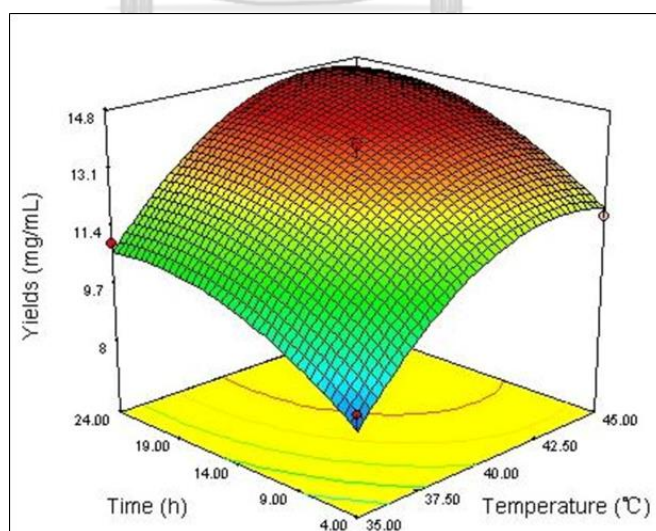
ปัจจัยนำเข้า	สัญลักษณ์	ระดับ			หน่วย
		ต่ำ	กึ่งกลาง	สูง	
ความหนาไบมิตดงเพชร	A	20	25	30	ไมโครเมตร
ความเร็วรอบตัด	B	20,000	35,000	50,000	รอบ/นาที
ความเร็วป้อนตัด	C	25	37.5	50	มิลลิเมตร/วินาที

6.2 ตัวแปรตอบสนอง

ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนของการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยนำเข้า ที่จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของรอยบินบนแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษมีขนาดเล็กมากที่สุด ซึ่งตัวแปรตอบสนองที่ใช้สำหรับรอยบินบนแผ่นเวเฟอร์จากกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชร คือความกว้างของรอยบิน โดยได้ค่าความกว้างมาจากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์

6.3 การเลือกการออกแบบการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม

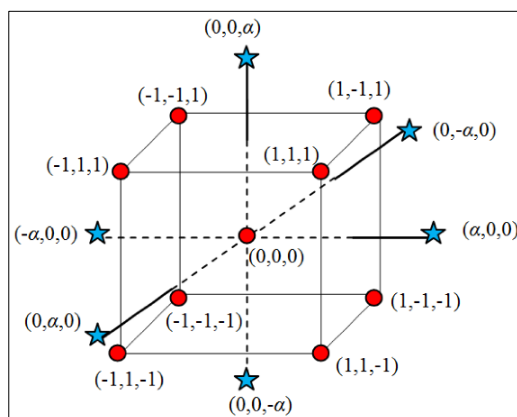
เนื่องจากพบว่ามีอิทธิพลอันเนื่องมาจากความโค้งงอของผลตอบสนอง (Curvature) เกิดขึ้นกับการทดลองนี้ ซึ่งมีความหมายได้ว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างปัจจัยนำเข้าแต่ละตัวและตัวแปรตอบสนองที่สนใจนั้นมีความเป็นเส้นโค้ง จึงได้นำปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย มาทำการทดลองต่อ โดยจะอาศัยหลักการออกแบบการทดลองพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 6.1 ทั้งนี้ก็เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ที่จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์มีขนาดเล็กที่สุด โดยที่การออกแบบการทดลองพื้นผิวตอบสนองนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 แนวทางใหญ่ๆ นั่นคือ การออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design, CCD) และการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ซึ่งสามารถนำมาทำการเปรียบเทียบกันได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.1 ตัวอย่างเส้นโค้งร่างของพื้นผิวผลตอบ

6.3.1 การออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design)

มีลักษณะของแบบจำลองจะเป็นการออกแบบที่ระดับของแต่ละปัจจัย ซึ่งจะห่างจากจุดศูนย์กลางของแบบจำลองเท่ากัน และมีการทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง โดยแต่ละปัจจัยจะมีระดับของการทดลองทั้งหมด 5 ระดับ ได้แก่ $-\text{Alpha}$, -1 , 0 , $+1$, $+\text{Alpha}$ ดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แบบจำลองลูกบาศก์ของการออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design)

โดยที่ค่าของระดับปัจจัยที่นำมาใช้จะไม่ใช้ขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของตัวแปรแต่ละตัว จะมีการเสียบแกน Axial (สัญลักษณ์ดาวสีฟ้าดังแสดงในรูปที่ 6.2) เข้าไปในลูกบาศก์ของแบบจำลอง และทะลุออกไปข้างนอกลูกบาศก์เป็นระยะทางเท่ากับ Alpha ซึ่งมีค่าเท่ากับ $(n_f)^{1/4}$ โดยที่ค่า n_f คือ จำนวนของจุดที่ถูกใช้ในส่วนแฟกทอเรียลของการออกแบบ (Chutima, 2002)

ซึ่งในการทดลองครั้งนี้มี 3 ปัจจัย จึงมีจำนวนจุดที่ถูกใช้ในส่วนแฟกทอเรียลของการออกแบบเท่ากับ 23 จุด ดังนั้นค่า Alpha จะเท่ากับ $(23)^{1/4}$ หรือ 1.682 จากนั้นจะได้ระดับที่จะนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6.2 และจะสามารถสร้างตารางการออกแบบการทดลองของการออกแบบส่วนผสมกลางได้ดังตารางที่ 6.3 ซึ่งจะพบว่ามีการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง

ตารางที่ 6.2 ระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมกลาง

ปัจจัยนำเข้า	สัญลักษณ์	ระดับ					หน่วย
		-1.68	-1	0	1	1.68	
ความหนาใบมีดผงเพชร	A	-0.46	20	25	30	50.5	ไมโครเมตร
ความเร็วรอบตัด	B	-14.1k	20k	35k	50k	84.1k	รอบ/นาที
ความเร็วป้อนตัด	C	-9.1	25	37.5	50	84.1	มิลลิเมตร/วินาที

ตารางที่ 6.3 ตารางการออกแบบการทดลองของการออกแบบส่วนผสมกลาง

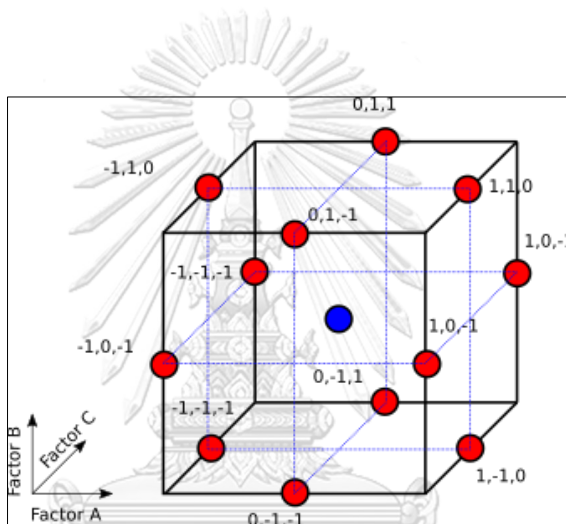
จำนวนการ ทดลอง	ปัจจัยนำเข้า		
	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	-1.682	0	0
10	1.682	0	0
11	0	-1.682	0
12	0	1.682	0
13	0	0	-1.682
14	0	0	1.682
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

เมื่อได้ทราบถึงระดับปัจจัยทั้งหมดดังที่แสดงในตารางที่ 6.2 ทำให้ทราบว่า การปรับระดับของปัจจัยหรือการตั้งค่าเครื่องจักรที่ใช้ตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษไม่สามารถทำได้จริง เครื่องจักรสามารถปรับความเร็วรอบตัดได้สูงสุดที่ 50k รอบ/นาที หรือ 50,000 รอบ/นาที ซึ่งไม่สามารถปรับไปยังระดับ +1.682 ที่มีความเร็วรอบ 84.1k รอบ/นาที หรือ 84,100 รอบ/นาที ได้ ในขณะที่ความหนาของใบมีดตัดที่ระดับ +1.682 ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 50.46 ไมโครเมตร มีขนาดใหญ่ที่ใกล้เคียงกับความกว้างของพื้นที่ทางตัด (Saw Streets Width) อย่างมาก และไม่มีใช้ในโรงงานการศึกษา ด้วย

เหตุผลดังกล่าวมา จึงส่งผลให้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบส่วนผสมกลางไม่สามารถทำได้จริงในขั้นตอนนี้

6.3.2 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

เป็นการออกแบบที่คล้ายกันกับการออกแบบส่วนผสมกลาง แต่ต่างกันที่จุดบนแกนจะอยู่ในระนาบเดียวกับจุดที่เป็นแบบแฟกทอเรียลและทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง โดยที่แต่ละปัจจัยจะมีทั้งหมด 3 ระดับ คือ -1, 0, +1 ดังแสดงในรูปที่ 6.3 และจะสามารถสร้างตารางการออกแบบการทดลองของการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนได้ดังตารางที่ 6.4 ซึ่งจะพบว่ามีจำนวนการทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง



รูปที่ 6.3 แบบจำลองลูกบาศก์ของการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ค่าของระดับของปัจจัยที่จะนำมาใช้ จะสร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของตัวแปรแต่ละตัวเป็นตัวกำหนด โดยที่ระดับที่จะนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองจะเป็นช่วงการปรับที่เครื่องจักรสามารถทำการปรับค่าได้ในทุกระดับ ดังแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ปัจจัยนำเข้า	สัญลักษณ์	ระดับ			หน่วย
		-1	0	1	
ความหนาใบมีดผงเพชร	A	20	25	30	ไมโครเมตร
ความเร็วรอบตัด	B	20k	35k	50k	รอบ/นาที
ความเร็วป้อนตัด	C	25	37.5	50	มิลลิเมตร/วินาที

ตารางที่ 6.4 ตารางการออกแบบการทดลองของการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

จำนวนการทดลอง	ปัจจัยนำเข้า		
	A	B	C
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

6.3.3 สรุปวิธีการออกแบบการทดลองที่เลือกใช้

เมื่อได้ทำการเปรียบเทียบการออกแบบการทดลองของทั้งสองแนวทางเรียบร้อยแล้ว พบว่างานวิจัยฉบับนี้ควรประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เนื่องจาก การออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design) ไม่สามารถทำการปรับการตั้งค่าของ เครื่องจักรได้จริงที่ระดับ $\pm\alpha$

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจำนวนตัวอย่างที่ต้องใช้ในการทดลอง จะพบว่าจำนวนการทดลอง ของการออกแบบส่วนผสมกลางมีทั้งหมด 20 การทดลอง ในขณะที่การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนมี ทั้งหมด 15 การทดลอง เพราะฉะนั้นการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จะใช้จำนวนตัวอย่างน้อยกว่าการ ออกแบบส่วนผสมกลาง ซึ่งถือเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลอง

6.3 การออกแบบการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม

เมื่อได้วิธีการออกแบบการทดลองแล้ว จึงได้เริ่มทำการออกแบบการทดลองตามแนวทางการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับปัจจัย 3 ปัจจัย ซึ่งสามารถสร้างตารางการทดลองได้อย่างง่ายดายด้วยโปรแกรม Minitab ดังในตารางที่ 6.5 โดยที่มีการกำหนดจุดกึ่งกลาง (Center point) เอาไว้เท่ากับ 3 การทดลอง และจำนวนการทำซ้ำ (Replicate) ทั้งหมด 27 ครั้ง โดยการทดลองจะทำแบบสุ่ม เพื่อเป็นการกระจายสัญญาณรบกวน (Noises) จากภายนอกสู่ทุกการทดลองอย่างเป็นธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ดังนั้นจำนวนการทดลองทั่วไปจะเท่ากับ 405 การทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 6.4

Design Summary		
Factors:	3	Replicates: 27
Base runs:	15	Total runs: 405
Base blocks:	1	Total blocks: 1
Center points: 81		

รูปที่ 6.4 ผลลัพธ์จากการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ด้วยโปรแกรม Minitab

ตารางที่ 6.5 ตารางการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ 3 ปัจจัย

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	ความหนา ของใบมีด ผงเพชร	ความเร็ว รอบตัด	ความเร็ว ป้อนตัด
2	1	2	1	30	20000	37.5
12	2	2	1	25	50000	50
3	3	2	1	20	50000	37.5
11	4	2	1	25	20000	50
10	5	2	1	25	50000	25
5	6	2	1	20	35000	25
15	7	0	1	25	35000	37.5
13	8	0	1	25	35000	37.5
14	9	0	1	25	35000	37.5
7	10	2	1	20	35000	50
6	11	2	1	30	35000	25

1	12	2	1	20	20000	37.5
8	13	2	1	30	35000	50
9	14	2	1	25	20000	25
4	15	2	1	30	50000	37.5

6.4 ผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม

จากการเก็บผลการทดลองในขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการผลิตดังตารางที่ 6.5 ที่มีลำดับการสุ่มการทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง และทำซ้ำทั้งหมด 27 ครั้ง โดยผลลัพธ์ของการทดลองคือความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ จะได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

6.4.1 ผลการวัดค่าความกว้างของรอยบินในระยะปรับปรุงกระบวนการ

ผลการวัดค่าความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ในระยะปรับปรุงกระบวนการสำหรับทุกการทดลองของการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 ผลการวัดค่าความกว้างของรอยบินในระยะปรับปรุงกระบวนการ

Y	RunOrder														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	11.50	4.07	1.95	7.14	5.61	7.14	6.38	9.34	8.32	5.10	10.0	5.30	10.00	8.42	4.86
2	8.37	5.23	4.30	12.60	5.15	6.26	7.70	6.61	8.88	7.33	7.30	7.64	12.60	7.73	6.11
3	13.30	5.36	5.68	11.00	7.01	4.31	10.4	8.24	8.24	8.68	8.37	6.76	9.09	8.68	3.74
4	9.10	6.45	3.79	10.60	3.59	7.92	6.97	7.03	8.68	6.04	10.7	6.70	13.30	11.3	5.40
5	14.00	6.88	3.91	10.20	4.84	4.70	7.11	8.87	6.53	7.70	10.9	6.10	8.94	10.0	5.81
6	12.90	4.50	2.09	14.00	3.88	7.71	7.35	9.79	7.79	7.98	8.24	7.90	9.80	10.0	3.24
7	11.80	5.73	3.09	11.50	6.49	9.54	8.51	8.03	7.79	7.20	8.90	6.37	11.40	10.7	5.39
8	10.00	4.42	1.50	12.00	4.56	6.28	7.31	7.71	7.00	5.93	10.7	6.12	11.50	9.55	6.24
9	12.20	5.07	2.58	9.93	7.58	6.96	7.59	8.62	7.41	6.23	6.51	6.14	11.20	11.0	5.08
10	12.70	6.27	2.78	11.00	2.10	5.20	6.49	8.28	8.60	6.19	8.50	9.10	9.97	8.39	6.00
11	12.00	4.00	2.26	9.57	2.83	6.66	7.80	9.74	9.36	8.03	8.64	8.86	10.00	12.0	5.78
12	15.30	5.21	2.54	13.00	5.81	6.29	9.57	6.60	9.92	7.03	8.76	7.87	12.00	10.0	3.78
13	10.70	4.96	2.82	11.60	5.05	5.56	8.17	8.78	8.14	7.00	11.0	6.30	9.70	10.9	6.77
14	11.60	5.78	6.64	8.79	4.69	6.89	8.00	8.87	8.76	6.84	9.62	8.42	12.20	9.76	5.61
15	11.30	6.86	1.42	10.90	3.33	3.86	8.72	7.02	10.9	6.46	9.46	6.40	10.20	9.93	5.06
16	8.96	6.13	3.32	12.00	5.94	6.10	8.24	7.29	9.89	3.90	10.8	7.22	12.90	8.78	6.48
17	12.20	6.40	4.67	10.00	4.89	5.46	6.78	8.40	8.32	5.90	8.13	7.10	10.40	7.60	6.05
18	11.70	7.15	4.04	11.90	3.61	7.00	10.2	7.73	8.83	5.90	9.03	7.79	10.00	9.03	4.89
19	14.30	4.77	3.64	11.00	4.93	5.01	8.66	8.17	8.76	4.84	8.50	6.39	11.30	10.3	4.33
20	13.10	3.70	1.98	11.60	3.86	7.63	6.77	8.36	6.60	7.61	10.7	6.26	13.00	9.05	8.06

21	11.00	6.80	5.26	11.00	4.25	5.71	11.0	6.09	8.60	7.00	8.94	7.17	12.60	11.3	7.93
22	14.00	4.42	2.47	11.00	5.43	6.97	8.26	7.40	6.43	6.84	12.4	7.45	8.83	9.22	6.98
23	8.90	5.70	4.29	11.00	4.99	5.25	8.90	7.10	9.03	5.66	11.9	7.03	10.20	9.90	3.01
24	11.40	5.97	3.63	10.40	4.46	7.70	8.54	9.08	7.27	8.17	9.63	9.31	11.70	8.86	5.97
25	14.40	5.24	2.56	12.60	4.33	8.83	8.28	8.07	7.57	5.29	9.12	6.43	10.00	7.87	5.88
26	12.10	3.42	2.40	9.75	5.14	8.52	7.00	6.22	8.02	5.79	9.89	8.60	11.00	10.6	5.37
27	11.10	6.09	4.44	11.40	4.66	7.46	8.69	7.60	7.48	6.10	8.37	6.09	8.80	7.53	6.50
\bar{Y}	11.85	5.43	3.34	11.02	4.78	6.55	8.13	7.96	8.26	6.55	9.44	7.14	10.84	9.57	5.57
S	1.79	1.04	1.30	1.37	1.21	1.39	1.19	1.01	1.07	1.12	1.37	1.05	1.36	1.23	1.24

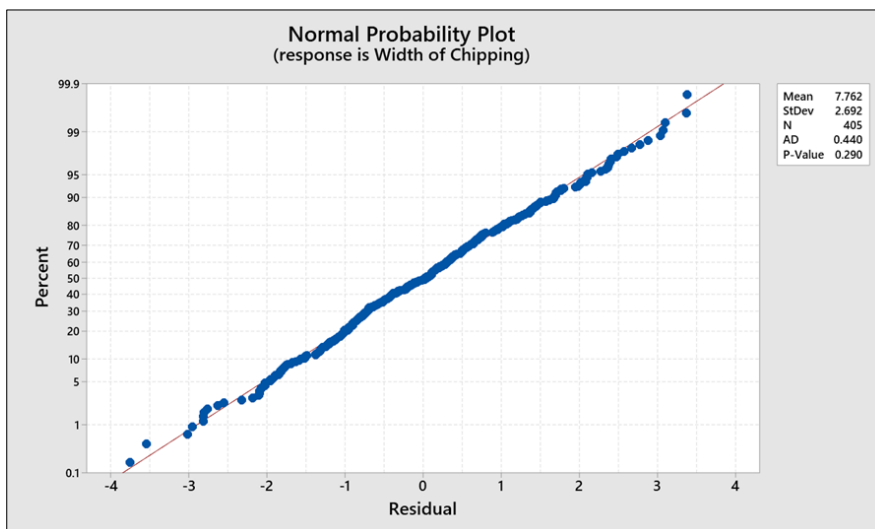
จากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 6.6 จะเห็นได้ว่าการทดลอง (RunOrder) ที่ 3 มีค่าเฉลี่ยของขนาดความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์น้อยที่สุด ในขณะที่ผลการตัดแผ่นเวเฟอร์ของการทดลองที่ 1 จะได้ค่าเฉลี่ยของความกว้างของขนาดรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์มากที่สุด

6.4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางสถิติ

ก่อนที่จะนำผลการวัดความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ไปวิเคราะห์ผลการทดลอง จำเป็นต้องตรวจสอบความเพียงพอ (Adequacy) ของแบบจำลองทางสถิติที่ได้มาก่อนจะนำไปใช้ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลองคือการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ซึ่งประกอบไปด้วยสมมติฐานทั้งหมด 3 ข้อ ดังนี้

- การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality)

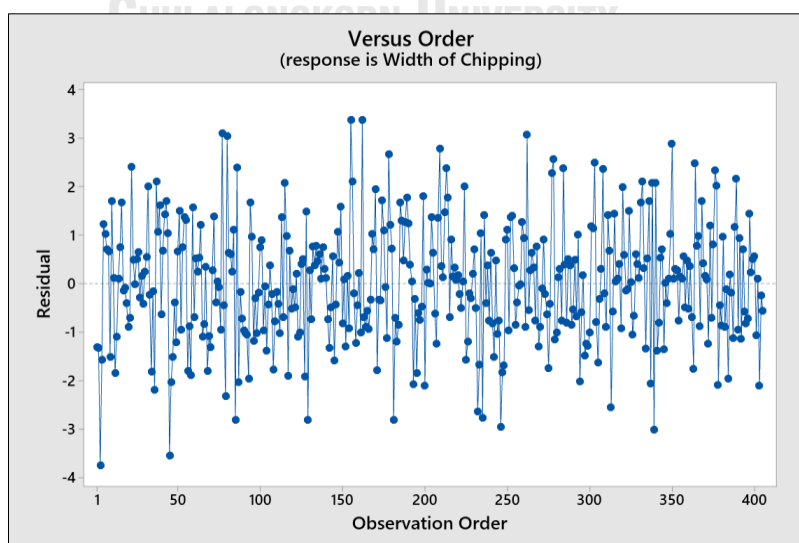
การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติสามารถตรวจสอบได้โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ได้พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงโดยมีค่า P-Value มากกว่าระดับนัยสำคัญ (Alpha level) ที่ 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หมายความว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ ดังที่แสดงในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติในระยะปรับปรุงกระบวนการ

- การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

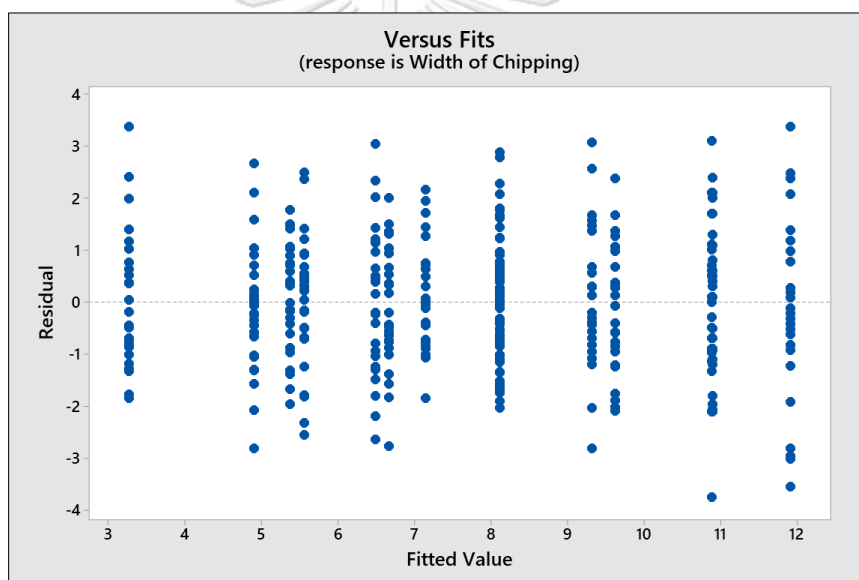
การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง สามารถพิจารณาได้จากแผนภาพการกระจายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับการเก็บข้อมูล (Observation order) และผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab ได้แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างของความกว้างรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลกลุ่มนี้มีความเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของความเป็นอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับในการเก็บข้อมูล

- **ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance stability)**

ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน สามารถทำการตรวจสอบได้โดยแผนภาพกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (Residue) กับตัวแปรตอบสนองหรือความกว้างของรอยบิ่น (Width of Chipping) ที่ได้มาจากสมการถดถอย (Fitted value) สามารถใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ที่ได้และพล็อตกราฟได้ และผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab พบว่าลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวแบบคงที่ โดยที่ไม่มีลักษณะการกระจายตัวในรูปแบบกรวยปากเปิดและกรวยปากปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลกลุ่มนี้มีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ซึ่งได้เป็นไปตามสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ดังแสดงในรูป 6.7



รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและ Fitted Value

จากการตรวจสอบความเพียงพอและความถูกต้องของแบบจำลอง พบว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐาน ทั้ง 3 ข้อตามที่ได้ที่กำหนดไว้ ประกอบด้วย สมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality), สมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence), และ สมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance stability) ดังที่ได้พิสูจน์โดยการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) หมายความว่าแบบจำลองทางสถิติที่ได้มานี้ สามารถให้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นตอนถัดไปได้ถูกต้อง

6.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการประยุกต์รวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์เพื่อจะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ (Chutima, 2002)

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบจากโปรแกรม Minitab ที่มีการพิจารณาความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์คือตัวแปรตอบสนอง และมีปัจจัย 3 ปัจจัยคือ ความหนาของใบมีดผงเพชร, ความเร็วรอบตัด, และความเร็วป้อนตัด ดังที่แสดงในรูปที่ 6.8 พบว่า ปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย, ปัจจัยหลักกำลังสอง, และปัจจัยที่มีอันตรกิริยาต่อกันทุกปัจจัย มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ ดังที่แสดงได้จากค่า P-Value ที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แต่ยกเว้นอันตรกิริยาของความเร็วยรอบตัดและความเร็วป้อนตัด ที่แสดงค่า P-Value ที่มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 หมายความว่าอันตรกิริยาของความเร็วยรอบตัดและความเร็วป้อนตัดมีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติต่อความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์

และจากการพิจารณาสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ไม่เป็นลักษณะเชิงเส้นระหว่างผลตอบตอบสนองกับพจน์ของปัจจัยหลัก ความหนาของใบมีดผงเพชร, ความเร็วยรอบตัด, ความเร็วป้อนตัด และพิจารณาพจน์ของปัจจัยในรูปแบบยกกำลังสอง (Quadratic) คือ (ความหนาของใบมีดผงเพชร)², (ความเร็วยรอบตัด)², (ความเร็วป้อนตัด)² และพิจารณาพจน์ของปัจจัยที่มีอันตรกิริยา ความหนาของใบมีดผงเพชร*ความเร็วยรอบตัด, ความหนาของใบมีดผงเพชร*ความเร็วป้อนตัด นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ R² เท่ากับ 78.63% และ Adjusted R² เท่ากับ 78.14% ซึ่งหมายความว่าค่าความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองที่กระจายอยู่รอบค่าเฉลี่ยซึ่งสามารถอธิบายได้มีอยู่ในตัวแบบเชิงเส้นนี้มากถึง 78.63 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 6.8

เมื่อพิจารณาความสมรูปของสมการ (Lack of Fit) ซึ่งมีค่า P-Value เท่ากับ 0.71 ซึ่งมีค่าที่มากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 หมายความว่าผลการทดลองมีความเพียงพอที่จะนำไปใช้ในพยากรณ์ความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ดังแสดงในรูปที่ 6.8

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	8.118	0.140	58.05	0.000	
Blade thickness	1.7656	0.0856	20.62	0.000	1.00
Spindle speed	-2.5587	0.0856	-29.88	0.000	1.00
Feed speed	0.4356	0.0856	5.09	0.000	1.00
Blade thickness*Blade thickness	-0.249	0.126	-1.98	0.049	1.01
Spindle speed*Spindle speed	-0.896	0.126	-7.10	0.000	1.01
Feed speed*Feed speed	0.476	0.126	3.78	0.000	1.01
Blade thickness*Spindle speed	-0.619	0.121	-5.11	0.000	1.00
Blade thickness*Feed speed	0.350	0.121	2.89	0.004	1.00
Spindle speed*Feed speed	-0.199	0.121	-1.64	0.101	1.00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.25855	78.63%	78.14%	77.50%

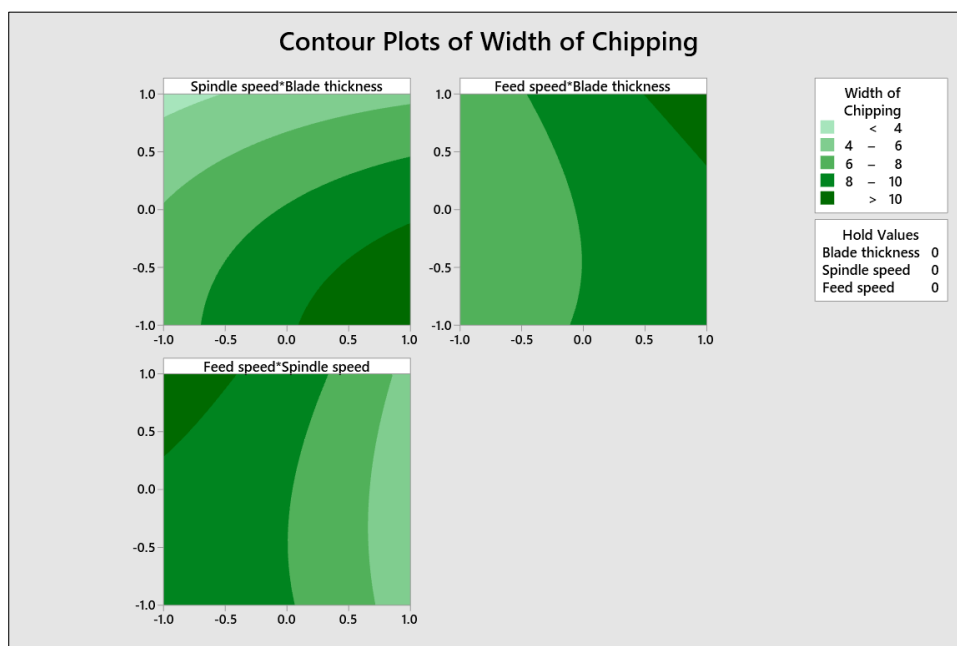


Analysis of Variance

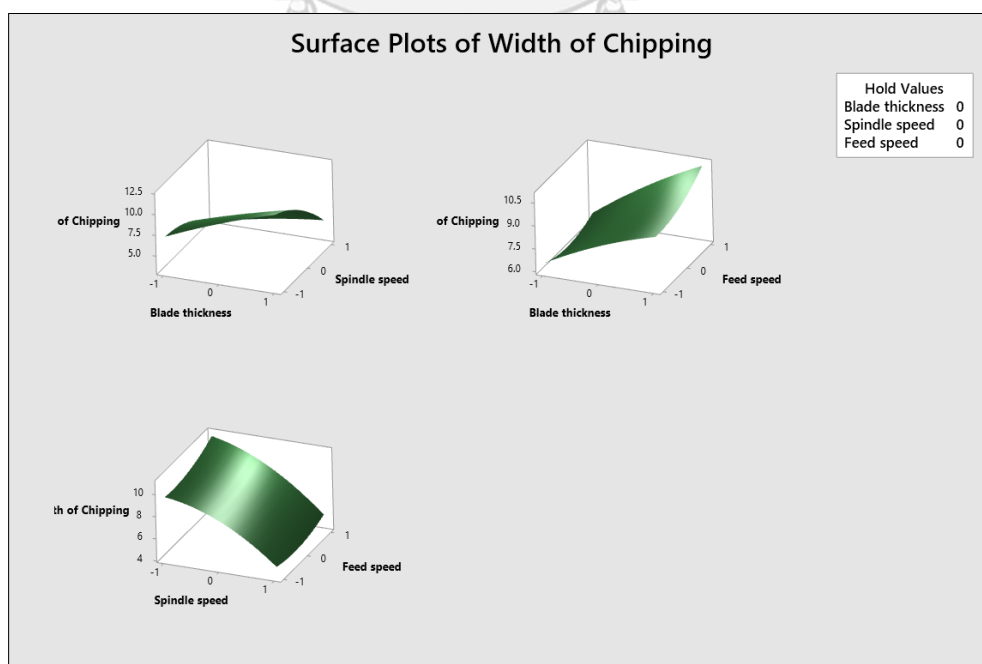
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	2301.89	255.77	161.47	0.000
Linear	3	2128.39	709.46	447.91	0.000
Blade thickness	1	673.31	673.31	425.08	0.000
Spindle speed	1	1414.09	1414.09	892.76	0.000
Feed speed	1	40.99	40.99	25.88	0.000
Square	3	114.62	38.21	24.12	0.000
Blade thickness*Blade thickness	1	6.18	6.18	3.90	0.049
Spindle speed*Spindle speed	1	79.96	79.96	50.48	0.000
Feed speed*Feed speed	1	22.63	22.63	14.29	0.000
2-Way Interaction	3	58.88	19.63	12.39	0.000
Blade thickness*Spindle speed	1	41.37	41.37	26.12	0.000
Blade thickness*Feed speed	1	13.23	13.23	8.35	0.004
Spindle speed*Feed speed	1	4.28	4.28	2.70	0.101
Error	395	625.66	1.58		
Lack-of-Fit	3	2.20	0.73	0.46	0.710
Pure Error	392	623.46	1.59		
Total	404	2927.56			

รูปที่ 6.8 ผลการวิเคราะห์การทดลองพื้นผิวตอบสนองสำหรับความกว้างของรอยบิ่น

เมื่อพิจารณาผลของกราฟเส้นโครงร่าง (Contour Plot) และผลของกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Surface Plot) ของความกว้างของรอยบิ่น (Width of Chipping) ดังที่แสดงในรูปที่ 6.9 และ 6.10 จะสามารถอธิบายผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.9 กราฟเส้นโครงร่างของความกว้างของรอยบิ่น



รูปที่ 6.10 กราฟพื้นผิวผลตอบสนองของความกว้างของรอยบิ่น

1. กราฟเส้นโครงร่างและกราฟพื้นผิวผลตอบของความกว้างของรอยป็น ระหว่างปัจจัย ความเร็วรอบตัดและความหนาของใบมีดผงเพชร (Spindle speed*Blade thickness) พบว่าเมื่อเกิดการเปลี่ยนระดับของปัจจัยความเร็วรอบตัดจากระดับต่ำไประดับสูงและเกิดการเปลี่ยนระดับของปัจจัยความหนาของใบมีดผงเพชรจากระดับสูงไประดับต่ำ ได้ส่งผลให้ค่าความกว้างของรอยป็นมีขนาดที่เล็ก
2. กราฟเส้นโครงร่างและกราฟพื้นผิวผลตอบของความกว้างของรอยป็น ระหว่างปัจจัย ความเร็วป้อนตัดและความหนาของใบมีดผงเพชร (Feed speed*Blade thickness) พบว่าเมื่อเกิดการเปลี่ยนระดับของปัจจัยความเร็วป้อนตัดที่ระดับสูงไปยังระดับต่ำและเกิดการเปลี่ยนระดับของปัจจัยความหนาของใบมีดผงเพชรจากระดับสูงไปยังระดับต่ำ ได้ส่งผลให้ค่าความกว้างของรอยป็นมีขนาดที่เล็ก
3. กราฟเส้นโครงร่างและกราฟพื้นผิวผลตอบของความกว้างของรอยป็น ระหว่างปัจจัย ความเร็วป้อนตัดและปัจจัยความเร็วรอบตัด (Feed speed*Spindle speed) พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนระดับของปัจจัยความเร็วป้อนตัดจากระดับสูงไปยังระดับที่ต่ำและเกิดการเปลี่ยนระดับของปัจจัยความเร็วรอบตัดจากระดับที่ต่ำไประดับที่สูง ได้ส่งผลทำให้ค่าความกว้างของรอยป็นมีขนาดที่เล็กลง

จากตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.8 ซึ่งเป็นผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง จะสามารถเขียนเป็นสมการถดถอยสำหรับการทำนายค่าความกว้างของรอยป็นที่เกิดจากการตัดแผ่นเวเฟอร์ได้ดังสมการที่ 6.1

$$Y = 8.118 + 1.7656A - 2.5587B + 0.4356C - 0.249A^2 - 0.896B^2 + 0.476C^2 - 0.619AB + 0.35AC \quad (6.1)$$

โดยที่ Y คือ ค่าความกว้างของรอยป็นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์

A คือ ความหนาของใบมีดผงเพชร (ไมโครเมตร)

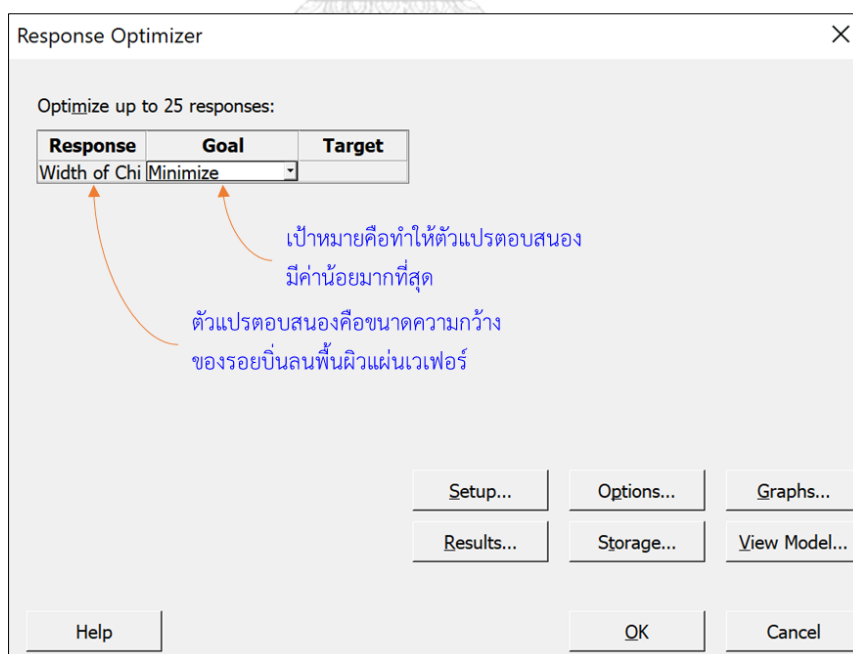
B คือ ความเร็วรอบตัด (รอบ/นาที)

C คือ ความเร็วป้อนตัด (มิลลิเมตร/วินาที)

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัย จะพบว่าความเร็วรอบตัดมีผลต่อขนาดความกว้างของรอยบิ่นมากเป็นอันดับที่หนึ่ง และความหนาของใบมีดผลเพชรมีผลต่อขนาดความกว้างของรอยบิ่นมากเป็นอันดับที่สอง ในขณะที่ความเร็วป้อนตัดมีผลต่อขนาดความกว้างของรอยบิ่นเป็นอันดับสุดท้าย เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนแล้ว ความเร็วรอบตัดและความหนาของใบมีดมีผลต่อความกว้างของรอยบิ่นมาก ในขณะที่ความเร็วป้อนตัดส่งผลต่อค่าความกว้างขนาดของรอยบิ่นน้อย

6.6 ค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองของแต่ละปัจจัย

การพยากรณ์ค่าที่เหมาะสมที่จะทำให้ขนาดความกว้างของรอยบิ่นที่เกิดจากกระบวนการตัดด้วยปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย (ความหนาของใบมีดผงเพชร, ความเร็วรอบตัด, และความเร็วป้อนตัด) มีขนาดเล็กมากที่สุด (Minimizing Width of Chipping) โดยสามารถหาได้จากเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization techniques) ภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ เทคนิควิธีนี้สามารถใช้โปรแกรมทางสถิติเข้ามาช่วยวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัยได้ โดยที่ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ Minitab เข้ามาช่วยวิเคราะห์หาค่าเงื่อนไขที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 ฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรม Minitab

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของโปรแกรมทางสถิติ Minitab ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ได้ผลการหาค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของทั้ง 3 ปัจจัยนำเข้า ที่จะทำให้ขนาดความกว้างของรอยบิ่นมีขนาดเล็กที่สุด ได้ดังแสดงในรูปที่ 6.11 และ 6.12

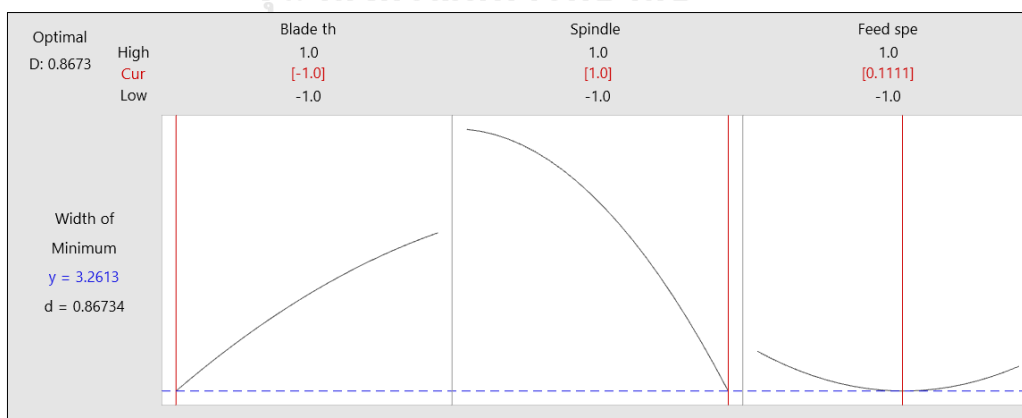
Parameters						
Response	Goal	Lower Target	Upper	Weight	Importance	
Width of Chipping	Minimum	1.42	15.3	1	1	

Solution						
Solution	Blade thickness	Spindle speed	Feed speed	Width of Chipping	Composite Fit	Desirability
1	-1	1	0.111111	3.26127	0.867343	

Multiple Response Prediction						
Variable	Setting					
Blade thickness	-1					
Spindle speed	1					
Feed speed	0.111111					
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI		
Width of Chipping	3.261	0.210	(2.848, 3.675)	(0.753, 5.770)		

รูปที่ 6.11 ค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมของทั้ง 3 ปัจจัย ที่จะทำให้ความกว้างของรอยบิ่นมีขนาดเล็กที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.12 แผนภาพแสดงผลการวิเคราะห์หาระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 6.11 และ 6.12 สามารถสรุปค่าที่เหมาะสมที่สุดของทั้ง 3 ปัจจัยที่จะส่งผลให้ขนาดความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์มีขนาดเล็กที่สุด คือ 3.261 ไมโครเมตร ด้วยค่าความพึงพอใจของผลตอบ (Composite Desirability, D) เท่ากับ 86.73 เปอร์เซนต์ ที่ความเชื่อมั่น 95% ได้ดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 ค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่จะทำให้ขนาดความกว้างของรอยบินเล็กที่สุด

ปัจจัย	ค่า Coded	ค่าพยากรณ์ที่เหมาะสม	ค่าที่ปรับได้จริง	หน่วย
ความหนาของใบมีด	-1	20	20	ไมโครเมตร
ความเร็วรอบตัด	1	50,000	50,000	รอบ/นาที
ความเร็วป้อนตัด	0.111111	38.889	39	มม./วินาที

บทที่ 7

ระยะการติดตามควบคุมผล (Control phase)

จากขั้นตอนในการปรับปรุงกระบวนการ ทำให้ทราบถึงค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่จะทำให้ความกว้างของรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์มีขนาดเล็กที่สุด ในระยะนี้จะเป็นการยืนยันผลบนแผ่นเวเฟอร์จริงที่ได้มาจากลูกค้า เพื่อเป็นการยืนยันอย่างสมบูรณ์ว่าค่าเงื่อนไขที่ได้มาสามารถนำไปใช้งานได้อย่างแท้จริง หลังจากนั้นจะเป็นการติดตามผลโดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับการควบคุม

7.1 การทดสอบยืนยันผล

ทำการยืนยันผลการทดลองด้วยการหาความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง โดยการตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ 50 ไมโครเมตร และมีพื้นที่ทางตัดแคบ 60 ไมโครเมตร ด้วยค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัย 3 ปัจจัย ซึ่งได้มาจากระยะการปรับปรุงกระบวนการในบทที่ผ่านมา สำหรับแผ่นเวเฟอร์ที่จะนำมาใช้เพื่อยืนยันผลการทดลองนั้น คือแผ่นเวเฟอร์ของลูกค้าของบริษัท ګรณศึกษาที่จะนำไปใช้งานจริง โดยค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมของทั้ง 3 ปัจจัย ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 7.1

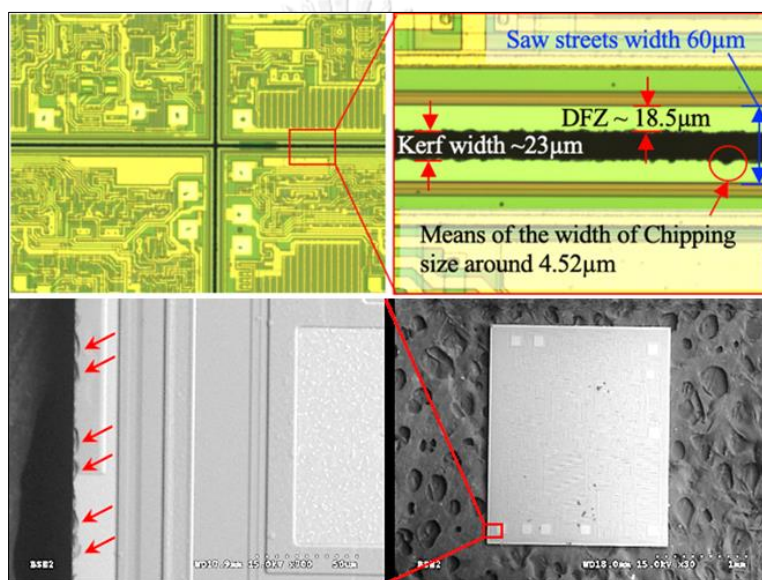
ตารางที่ 7.1 ค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมของทั้ง 3 ปัจจัย ที่จะใช้กับแผ่นเวเฟอร์ของลูกค้า

ปัจจัย	ค่าที่เหมาะสม	หน่วย
ความหนาของใบมีด	20	ไมโครเมตร
ความเร็วรอบตัด	50,000	รอบ/นาที
ความเร็วป้อนตัด	39	มม./วินาที

โดยที่ขนาดของจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจะสามารถอ้างอิงได้จากสมการที่ 4.69 ในระยะของการหาความสามารถของกระบวนการเบื้องต้น (ก่อนการปรับปรุงกระบวนการ) ซึ่งในระยะการหาความสามารถของกระบวนการเบื้องต้น ได้ใช้จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 162 ตัวอย่าง โดยที่ในระยะการทดสอบการยืนยันผลนี้ จะใช้จำนวนตัวอย่างมากกว่าในระยะการหาความสามารถของกระบวนการเบื้องต้น 2 เท่า เนื่องจากว่าเป็นแผ่นเวเฟอร์ของลูกค้าที่มีราคาสูง ลูกค้าจึงต้องการทราบผลการทดลองอย่างละเอียดมากยิ่งขึ้นเพื่อเพิ่มความมั่นใจในผลการทดลอง ดังนั้นจำนวนตัวอย่างที่จะใช้เพื่อยืนยันค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมคือ 324 ตัวอย่าง

7.2 การหาความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง

ทำการตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ 50 ไมโครเมตร และมีพื้นที่ทางตัดแคบ 60 ไมโครเมตร ด้วยค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัย 3 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 7.1 ที่เครื่องตัดแผ่นเวเฟอร์เครื่องเดิม จากนั้นวัดความกว้างของรอยบิ่นที่เกิดจากกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยพนักงานคนเดิมและอุปกรณ์การวัดอันเดิม โดยใช้จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 324 ตัวอย่าง (เพื่อเพิ่มความมั่นใจในการข้อมูลลูกค้าของบริษัทในกรณีศึกษาได้อนุญาตให้ใช้จำนวนตัวอย่างที่มากกว่าระยะก่อนการปรับปรุง 2 เท่า จาก 162 ตัวอย่าง เป็น 324 ตัวอย่าง) และได้ผลการวัดดังแสดงในตารางที่ 7.2 และรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 รอยบิ่นที่เกิดจากการตัดด้วยค่าเงื่อนไขในตารางที่ 7.1

7.2.1 ผลการวัดค่าความกว้างของรอยบิ่นหลังจากปรับปรุงกระบวนการ

ผลการวัดค่าความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์หลังจากระยะปรับปรุงกระบวนการ ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 ขนาดรอยบิ่นที่เกิดจากการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยค่าเงื่อนไขที่เหมาะสม

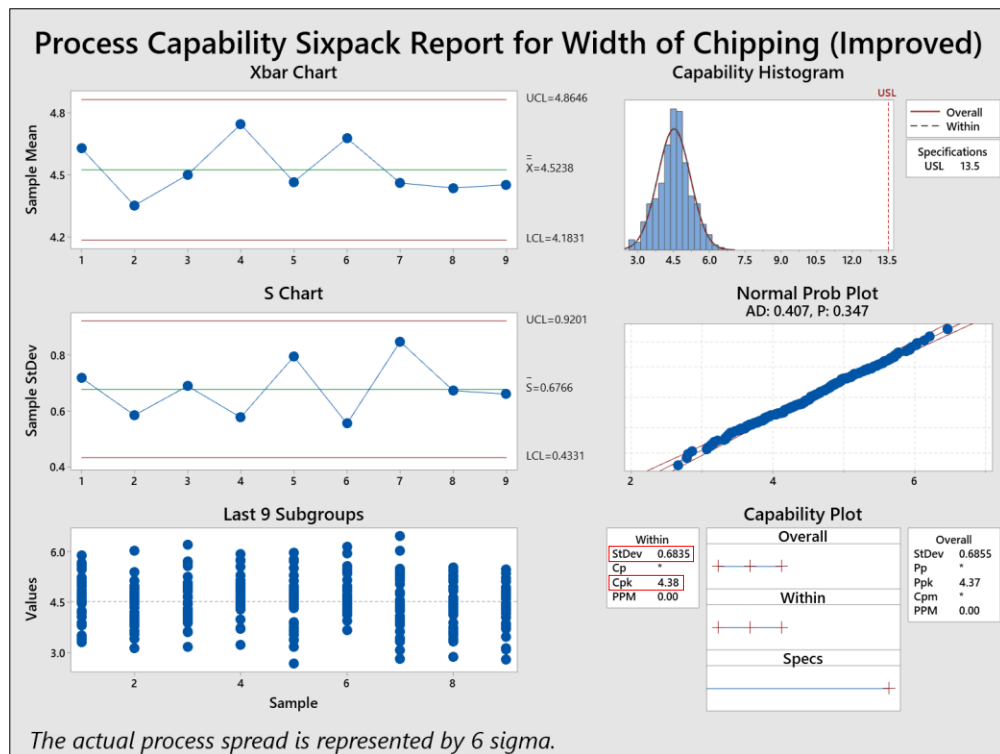
Chipping width measurement result									
No.	Chipping	No.	Chipping	No.	Chipping	No.	Chipping	No.	Chipping
1	3.8	73	3.95	145	4.31	217	3.33	289	4.78
2	4.63	74	4.93	146	3.16	218	4.8	290	4.73
3	4.65	75	5.67	147	4.39	219	4.24	291	4.46

4	4.74	76	4.67	148	5.13	220	3.43	292	5.47
5	5.46	77	5.08	149	5.71	221	5.15	293	3.86
6	3.44	78	4.97	150	4.66	222	4.45	294	5.11
7	3.36	79	4.3	151	3.62	223	3.88	295	4.86
8	4.76	80	4.05	152	5.75	224	5.39	296	2.78
9	5.64	81	6.21	153	4.67	225	5.4	297	5.35
10	4.46	82	4.5	154	3.75	226	5.04	298	4.87
11	5.05	83	4.82	155	3.53	227	6.02	299	5.34
12	5.66	84	4.24	156	4.44	228	3.35	300	4.15
13	4.22	85	4.14	157	4.42	229	3.63	301	4.82
14	4.97	86	4.05	158	4.53	230	4.53	302	3.82
15	4.75	87	5.25	159	4.73	231	2.8	303	4.68
16	4.71	88	4.15	160	4.98	232	4.76	304	4.94
17	4.23	89	3.89	161	3.65	233	4.55	305	4.3
18	4.17	90	5.04	162	3.38	234	4.73	306	4.38
19	5.57	91	4.81	163	4.6	235	3.36	307	4.38
20	3.5	92	3.6	164	3.87	236	6.47	308	4.8
21	3.87	93	4.97	165	3.91	237	3.97	309	5.21
22	4.85	94	5.08	166	4.81	238	4.32	310	4.59
23	5.22	95	5.71	167	4.54	239	5.28	311	4.92
24	5.21	96	4.87	168	5.96	240	4.44	312	4.93
25	3.31	97	4.17	169	4.85	241	4.8	313	4.84
26	5.88	98	4.44	170	4.51	242	4.07	314	3.78
27	4.54	99	4.64	171	3.53	243	4.41	315	4.77
28	3.89	100	4.13	172	4.74	244	3.07	316	4.15
29	4.05	101	3.89	173	5.28	245	5.49	317	4.04
30	5.62	102	3.97	174	4.48	246	5.23	318	3.12
31	5.11	103	3.95	175	5.77	247	3.41	319	3.71
32	4.54	104	3.89	176	2.66	248	4.78	320	3.46
33	4.61	105	3.17	177	4.66	249	3.83	321	4.7
34	5.67	106	3.62	178	5.5	250	4.53	322	3.09
35	3.83	107	3.62	179	4.9	251	4.33	323	4.26
36	4.65	108	5.56	180	3.37	252	5.3	324	4.81
37	4.6	109	5.55	181	4.42	253	4.22	-	-
38	3.13	110	4.63	182	4.98	254	4.52	-	-
39	4.52	111	4.83	183	4.67	255	4.56	-	-
40	4.56	112	4.67	184	3.93	256	4.96	-	-
41	5.14	113	5.72	185	4.6	257	3.62	-	-
42	4.15	114	3.22	186	4.54	258	4.15	-	-
43	3.95	115	5.03	187	5.56	259	4.59	-	-

44	3.9	116	5.1	188	5.41	260	5.52	-	-
45	6.03	117	5.29	189	4.57	261	4.42	-	-
46	3.8	118	4.87	190	4.72	262	4.43	-	-
47	4.46	119	5.75	191	4.51	263	5.25	-	-
48	4.5	120	5.11	192	3.67	264	4.11	-	-
49	4.15	121	4.68	193	5.35	265	5.11	-	-
50	4.8	122	4.28	194	4.21	266	4.25	-	-
51	4.89	123	3.73	195	4.53	267	3.89	-	-
52	3.65	124	5.93	196	4.26	268	5.29	-	-
53	4.7	125	4.48	197	4.28	269	3.4	-	-
54	3.96	126	4.53	198	4.97	270	5.18	-	-
55	3.89	127	4.54	199	4.11	271	4.46	-	-
56	4.59	128	4.51	200	6.14	272	3.6	-	-
57	3.92	129	4.96	201	4.17	273	4.33	-	-
58	4.2	130	4.36	202	4.93	274	4.64	-	-
59	4.96	131	4.54	203	4.43	275	5.16	-	-
60	4.97	132	5	204	4.96	276	5.41	-	-
61	4.18	133	4.7	205	4.2	277	4.84	-	-
62	4.19	134	4.87	206	5.15	278	5.12	-	-
63	3.4	135	4.8	207	4.35	279	3.72	-	-
64	4.91	136	5.15	208	4.88	280	4.41	-	-
65	4.19	137	3.71	209	4.3	281	2.86	-	-
66	3.55	138	4.56	210	4.17	282	5.42	-	-
67	4.45	139	5.55	211	5.47	283	3.53	-	-
68	3.79	140	4.68	212	4.44	284	3.33	-	-
69	4.76	141	4.41	213	4.15	285	3.74	-	-
70	4.34	142	4.29	214	5.94	286	4.88	-	-
71	5.39	143	4.8	215	4.84	287	4.25	-	-
72	4.06	144	3.98	216	4.57	288	4.53	-	-

7.2.2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง

นำข้อมูลการวัดที่ได้มาทั้งหมดจากตารางที่ 7.1 มาหาความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab มาช่วยวิเคราะห์ผลทางสถิติ ผลปรากฏว่าความสามารถของกระบวนการมีค่าเท่ากับ 4.38 ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์การยอมรับด้านเดียวที่ 1.25 หมายความว่า ปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัยที่ได้มีการหาค่าที่เหมาะสมมาดังในตารางที่ 7.1 นั้น สามารถทำให้รอยบิ่นมีขนาดเล็กลงอย่างมาก จึงเหลือพื้นที่ของบริเวณเขตปลอดข้อบกพร่องจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 7.2



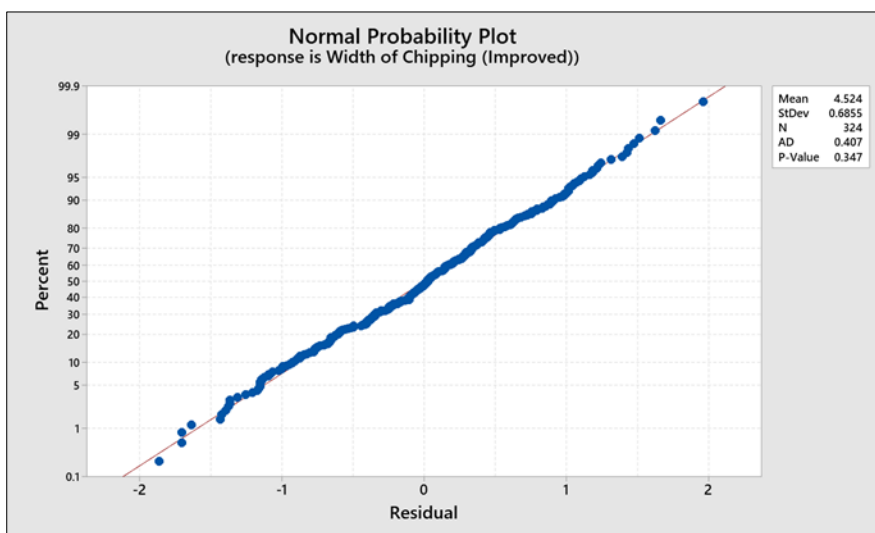
รูปที่ 7.2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุงด้วยโปรแกรม Minitab

7.2.3 ตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลองทางสถิติ

เพื่อให้มั่นใจมากขึ้นว่าผลการวิเคราะห์ทางสถิติมีความน่าเชื่อถือ จำเป็นต้องตรวจสอบความเพียงพอ (Adequacy) ของแบบจำลองทางสถิติที่ได้มา โดยเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลองคือการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ซึ่งประกอบด้วยสมมติฐาน 3 ข้อ ดังต่อไปนี้

- การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality)

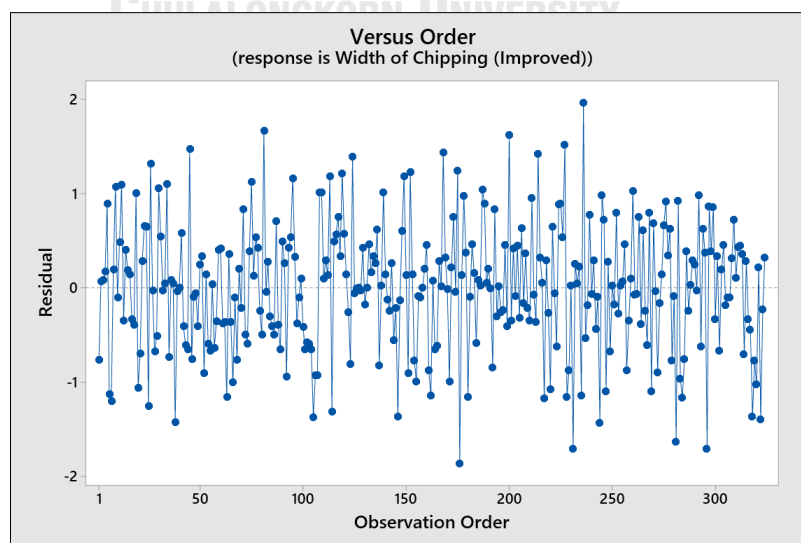
การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติสามารถตรวจสอบได้โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ได้พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงโดยมีค่า P-Value มากกว่าระดับนัยสำคัญ (Alpha level) ที่ 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หมายความว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ ดังที่แสดงในรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติในระยะปรับปรุงกระบวนการ

- การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

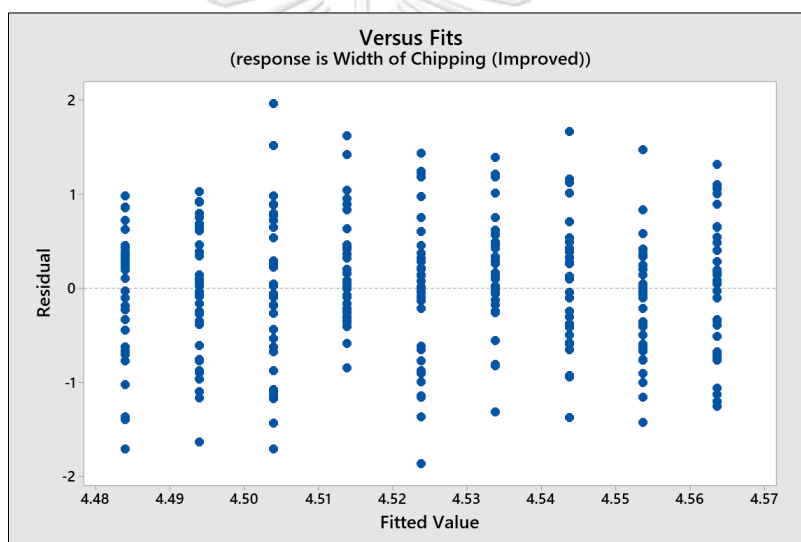
การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของส่วนตักค้าง สามารถพิจารณาได้จากแผนภาพการกระจายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตักค้าง (Residual) กับลำดับการเก็บข้อมูล (Observation order) และผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab ได้แสดงให้เห็นว่าส่วนตักค้างของความกว้างรอยบินบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลกลุ่มนี้มีความเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของความเป็นอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตักค้างและลำดับในการเก็บข้อมูล

- **ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance stability)**

ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน สามารถทำการตรวจสอบได้โดยแผนภาพกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (Residue) กับตัวแปรตอบสนองหรือความกว้างของรอยบิ่น (Width of Chipping) ที่ได้มาจากสมการถดถอย (Fitted value) สามารถใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ที่ได้และพล็อตกราฟได้ และผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab พบว่าลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวแบบคงที่ โดยที่ไม่มีลักษณะการกระจายตัวในรูปแบบกรวยปากเปิดและกรวยปากปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลกลุ่มนี้มีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ซึ่งได้เป็นไปตามสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน ดังแสดงในรูป 7.5



รูปที่ 7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและ Fitted Value

จากการตรวจสอบความเพียงพอและความถูกต้องของแบบจำลอง พบว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐาน ทั้ง 3 ข้อตามที่ได้ที่กำหนดไว้ คือ สมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality), สมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence), และ สมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance stability) ดังที่ได้พิสูจน์โดยการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) หมายความว่าแบบจำลองทางสถิติที่ได้มานี้ สามารถให้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

7.3 การติดตามผลโดยการประยุกต์ใช้แผนภูมิควบคุม

การติดตามผลสามารถประยุกต์ใช้แผนภูมิควบคุมได้ ดังที่ได้แสดงวิธีการคำนวณและขั้นตอนการสร้างแผนภูมิควบคุมในหัวข้อที่ 4.1.2 ของบทที่ 4 มาเรียบร้อยแล้ว ซึ่งในหัวข้อนี้ก็จะประยุกต์ใช้วิธีการเดียวกัน แต่จะใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลแทนการคำนวณด้วยมือดังเช่นบทที่ 4 เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

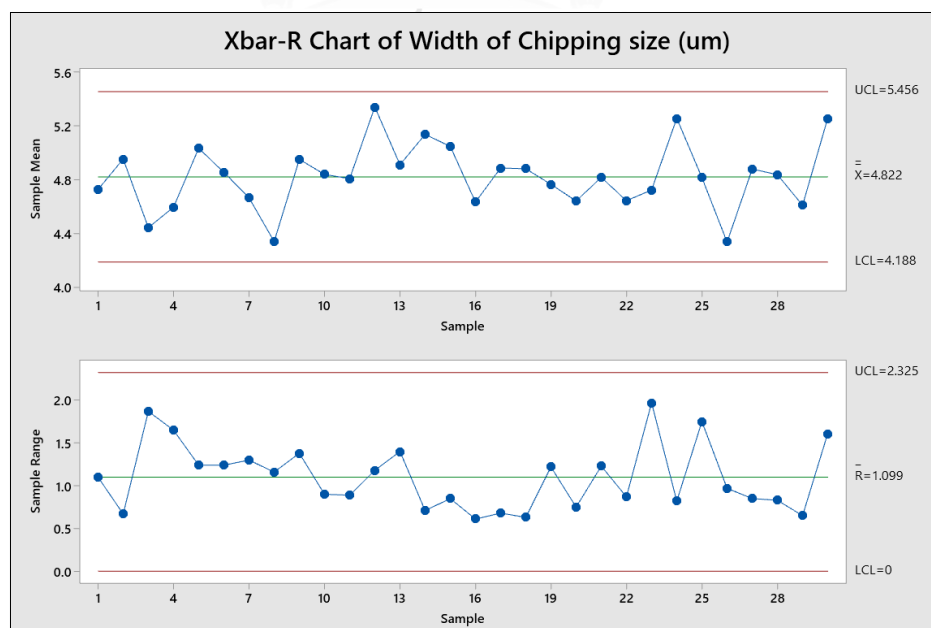
สำหรับการนำเทคนิคทางสถิติเข้ามาประยุกต์ใช้ในการควบคุมขนาดของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ที่เกิดจากการตัดด้วยปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมที่หามาได้ จะใช้แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย (Xbar-R Chart) ซึ่งกำหนดรายละเอียดของการเก็บข้อมูลดังต่อไปนี้ และได้ผลดังรูปที่ 7.6

- จัดให้มีเอกสารเพื่อควบคุมขนาดของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ สำหรับเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ 50 ไมโครเมตร และพื้นที่ทางตัดแคบ 60 ไมโครเมตร
- ขนาดตัวอย่างที่ใช้คือ 5 ตัวอย่าง ซึ่งอยู่ในค่าแนะนำสำหรับจำนวนตัวอย่างคือ 2-10 ตัวอย่าง (Douglas Montgomery, 2009) และสำหรับความถี่ในการเก็บข้อมูลคือแผ่นเวเฟอร์ทุกแผ่นที่ผ่านการตัดด้วยค่าพารามิเตอร์ชุดใหม่ ได้ค่าดังตารางที่ 7.3
- กำหนดให้มีพนักงานเพื่อทำการวัดขนาดความกว้างของรอยบิ่น โดยพนักงานที่ต้องทำการวัดรอยบิ่นต้องผ่านการฝึกอบรมวิธีการก่อน เครื่องมือที่ใช้วัดจะเป็นกล้องไมโครสโคปแบบเดียวกับที่ใช้กับการทดลอง

ตารางที่ 7.3 ขนาดรอยบิ่นที่สุ่มวัดมาจากแผ่นเวเฟอร์ทั้งหมด

Wafer No.	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Xbar	R
1	3.97	5.07	4.73	5.01	4.86	4.73	1.10
2	4.69	4.92	5.04	4.76	5.36	4.95	0.67
3	5.38	4.18	3.51	4.75	4.4	4.44	1.87
4	3.84	3.85	5.49	5.07	4.73	4.60	1.65
5	5.55	4.75	5.4	5.16	4.31	5.03	1.24
6	5.04	5.09	4.61	4.15	5.39	4.86	1.24
7	4.08	4.5	4.08	5.38	5.29	4.67	1.30
8	4.17	3.6	4.5	4.76	4.67	4.34	1.16
9	5.65	4.4	5.64	4.8	4.27	4.95	1.38
10	4.45	5.35	4.5	5.21	4.69	4.84	0.90
11	4.7	4.81	4.33	5.22	4.98	4.81	0.89

12	5.88	5.1	4.7	5.16	5.87	5.34	1.18
13	4.58	4.19	4.95	5.59	5.25	4.91	1.40
14	4.71	5.2	5.35	5.42	5.01	5.14	0.71
15	4.95	5.4	5.37	4.97	4.55	5.05	0.85
16	4.85	4.83	4.29	4.9	4.3	4.63	0.61
17	5.01	4.5	4.9	4.85	5.18	4.89	0.68
18	4.65	4.97	5.02	4.57	5.2	4.88	0.63
19	5.41	4.19	5.25	4.75	4.23	4.77	1.22
20	4.9	4.86	4.9	4.15	4.4	4.64	0.75
21	4.44	4.39	5.62	5.04	4.6	4.82	1.23
22	4.61	4.52	5.13	4.26	4.7	4.64	0.87
23	5.97	4.56	4.3	4	4.79	4.72	1.97
24	5.44	5.62	4.93	4.8	5.5	5.26	0.82
25	5.52	3.84	3.95	5.59	5.18	4.82	1.75
26	4.42	4.82	4.52	3.85	4.07	4.34	0.97
27	4.6	4.54	5.11	4.76	5.39	4.88	0.85
28	4.41	5.15	4.49	4.9	5.24	4.84	0.83
29	4.59	4.97	4.32	4.53	4.64	4.61	0.65
30	4.71	4.39	5.2	6	5.99	5.26	1.61



รูปที่ 7.6 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย ของขนาดความกว้างของรอยบิ่น

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคทางซิกซ์-ซิกม่า เพื่อปรับปรุงกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ สำหรับแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ 50 ไมโครเมตร และพื้นที่ทางตัดแคบ 60 ไมโครเมตร เนื่องจากต้องการลดขนาดรอยบิ่นให้มีขนาดไม่เกินขนาดของพื้นที่ปลอดข้อบกพร่องที่ 13.5 ไมโครเมตร และเพิ่มความสามารถของกระบวนการให้มีค่ามากกว่า 1.25 ซึ่งเป็นเกณฑ์การยอมรับด้านเดียว โดยที่วิธีของซิกซ์-ซิกม่า ได้เริ่มจากการนิยามปัญหาที่ต้องการปรับปรุง, การตรวจสอบระบบการวัดว่าสามารถให้ข้อมูลได้ถูกต้องและการหาสภาพปัจจุบันของปัญหา, การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา, การปรับปรุงแก้ไขสาเหตุของปัญหา, และการติดตามควบคุมผล โดยที่สามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังนี้

8.1 สรุปประเด็นนิยามปัญหา

ปัญหาของโรงงานในกรณีที่ได้ศึกษาคือ ลูกคามีความต้องการที่จะลดขนาดของพื้นที่ทางตัด (Saw streets) ของแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ (Ultrathin wafer) ให้มีขนาดแคบลง จากเดิมที่ 80 ไมโครเมตร เหลือเพียง 60 ไมโครเมตร โดยที่ขอบเขตของข้อกำหนดด้านบน (Upper Specification Limit) ซึ่งถูกกำหนดจากขนาดของพื้นที่ปลอดข้อบกพร่อง (Defect Free Zone) จะลดลงไปด้วย จาก 23.5 ไมโครเมตร เหลือเพียง 13.5 ไมโครเมตร จึงไม่สามารถใช้พารามิเตอร์ปัจจุบันเพื่อตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษที่มีพื้นที่ทางตัดแคบได้ เนื่องจากขนาดของค่าเฉลี่ยความกว้างของขนาดรอยบิ่นมีขนาด 14 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดของพื้นที่ปลอดข้อบกพร่อง จึงจำเป็นต้องลดขนาดของรอยบิ่นที่ผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ให้มีขนาดน้อยกว่าพื้นที่ปลอดข้อบกพร่อง และเป็นการปรับปรุงตัวดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ (Cpk) จากปัจจุบันที่มีค่า -1.30 ให้มีค่ามากกว่า 1.25 ซึ่งเป็นเกณฑ์ยอมรับด้านเดียว (One sided specification) ตามคำแนะนำ

8.2 สรุปประเด็นการวัดและการเก็บข้อมูลเพื่อหาสภาพของปัญหา

จากการวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis, MSA) จะเห็นว่าระบบการวัดมีความแม่นยำ (Accuracy) ซึ่งถูกพิสูจน์โดยการตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ความเอนเอียง (%Bias), ความมีเสถียรภาพของข้อมูล (Stability), และเปอร์เซ็นต์ความเป็นเส้นตรง (%Linearity) ที่แสดงค่าน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่ 5% และแสดงให้เห็นว่าระบบการวัดนี้มีความเที่ยงตรง (Precision) ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการตรวจสอบความแปรปรวนจากระบบการวัดเทียบกับความแปรปรวนจาก

การผลิต (%SV) ซึ่งมีค่า 1.38% และมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ยอมรับที่ 10% จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบการวัดนี้มีความเที่ยงตรงและความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับความแปรปรวนจากกระบวนการวัดได้

จากผลการศึกษาความสามารถของกระบวนการ (Process Capability) ในเบื้องต้น (ก่อนทำการปรับปรุง) โดยทำการบันทึกผลจากพนักงานวัดคนเดียวกัน ที่เครื่องวัดเครื่องเดียวกัน ด้วยจำนวนตัวอย่าง 162 ตัวอย่าง และใช้ข้อกำหนดแบบใหม่ที่ลูกค้าต้องการ นั่นคือขีดจำกัดของข้อกำหนดเฉพาะด้านบน (Upper Specification Limit, USL) ที่ 13.5 ไมโครเมตร ผลปรากฏว่าค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (Cpk) มีค่าเท่ากับ -1.30 เท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ยอมรับด้านเดียวที่ 1.25 จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุง

และจากการระดมความคิดจากทีมผู้เชี่ยวชาญ โดยใช้วิธีการผังแสดงเหตุและผล เพื่อรวบรวมปัจจัยนำเข้าที่มีแนวโน้มส่งผลต่อค่าความกว้างของรอยบิ่น พบว่าปัจจัยนำเข้าที่มีแนวโน้มส่งผลต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์มากที่สุดมีทั้งหมด 5 ปัจจัย คือ ความหนาใบมีดผงเพชร, ความเร็วรอบตัด, ความเร็วป้อนตัด, ความสูงใบมีดขณะตัด, และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ซึ่งอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเป็นปัจจัยนำเข้าที่ทำการปรับเปลี่ยนได้ยาก เนื่องจากเป็นปัจจัยนำเข้าที่ใช้กับทุกผลิตภัณฑ์ของโรงงาน เมื่อปรับเปลี่ยนไปแล้วทุกผลิตภัณฑ์ของโรงงานจะได้รับผลกระทบ จึงจำกัดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเป็นปัจจัยควบคุม ดังนั้นจึงเหลือปัจจัยนำเข้าที่ต้องนำไปวิเคราะห์ต่อในระบะถัดไปทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ความหนาใบมีดผงเพชร, ความเร็วรอบตัด, ความเร็วป้อนตัด, และความสูงใบมีดขณะตัด

8.3 สรุประยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้นในการหาปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ด้วยโปรแกรม Minitab พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) มีปัจจัยหลัก (Main factors) ที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ (Width of Topside Chipping) อยู่ทั้งหมด 3 ปัจจัย จาก 4 ปัจจัย โดยที่ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญจะมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งได้แก่ A (ความหนาใบมีดผงเพชร), B (ความเร็วรอบตัด), และ C (ความเร็วป้อนตัด) ในขณะที่ปัจจัยหลัก D (ความสูงใบมีดขณะตัด) ส่งผลต่อความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

นอกจากนี้ยังพบว่ามียุทธิพลเนื่องจากความโค้งของผลตอบสนอง (Curvature) เกิดขึ้นกับการทดลองนี้ เพราะค่า P-Value ของความโค้งของผลตอบสนองมีค่าเท่ากับ 0.012 ซึ่งน้อยกว่าระดับ

นัยสำคัญที่ 0.05 จึงหมายความว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างปัจจัยนำเข้าแต่ละตัว และตัวแปรตอบสนองที่สนใจนั้น มีความเป็นเส้นโค้ง ในการออกแบบการทดลองจึงจำเป็นต้องใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) ทดแทนการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล

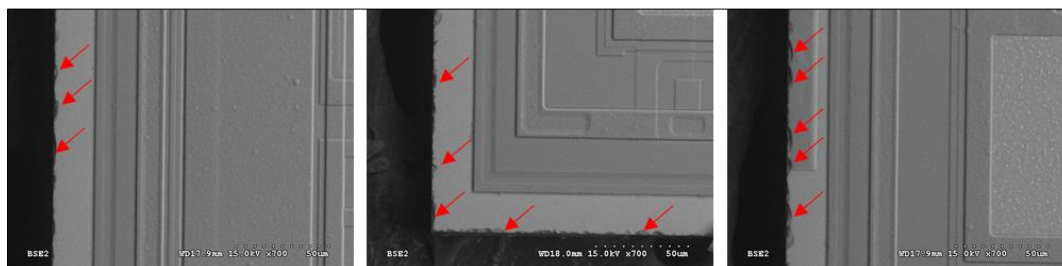
8.4 สรุประยะการปรับปรุงแก้ไขปัญหา

ความเร็วรอบตัดมีผลต่อขนาดความกว้างของรอยบิ่นมากที่สุดเป็นอันดับที่หนึ่ง และความหนาของใบมีดผลเพชรมีผลต่อขนาดความกว้างของรอยบิ่นมากเป็นอันดับที่สอง ในขณะที่ความเร็วป้อนตัดมีผลต่อขนาดความกว้างของรอยบิ่นเป็นอันดับสุดท้าย เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนแล้ว ความเร็วรอบตัดและความหนาของใบมีดมีผลต่อความกว้างของรอยบิ่นมาก ในขณะที่ความเร็วป้อนตัดส่งผลต่อค่าความกว้างขนาดของรอยบิ่นน้อย โดยมีค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่จะทำให้รอยบิ่นมีขนาดเล็กที่สุดคือ ความหนาของใบมีดผงเพชร 20 ไมโครเมตร, ความเร็วรอบตัด 50,000 รอบ/นาที, และความเร็วป้อนตัด 39 มิลลิเมตร/วินาที

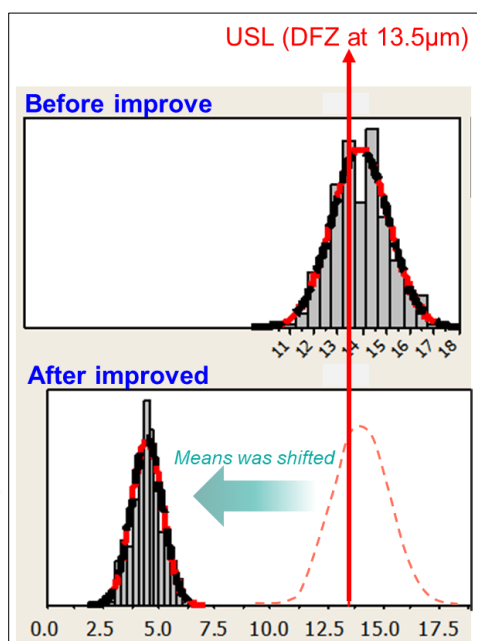
โดยที่การพยากรณ์จากค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมได้ผลว่าขนาดความกว้างของรอยบิ่นบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์มีขนาดเล็กที่สุด คือ 3.261 ไมโครเมตร ด้วยค่าความพึงพอใจของผลตอบ (Composite Desirability, D) เท่ากับ 86.73 เปอร์เซนต์ ที่ความเชื่อมั่น 95%

8.5 สรุประยะการติดตามควบคุมผล

ทำการยืนยันผลการทดลองด้วยการหาความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง โดยการตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษ 50 ไมโครเมตร และมีพื้นที่ทางตัดแคบ 60 ไมโครเมตร ด้วยค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัย 3 ปัจจัย ซึ่งได้มาจากระยะการปรับปรุงกระบวนการในบทที่ผ่านมา ผลปรากฏว่าความสามารถของกระบวนการได้ถูกปรับปรุงจนมีค่าสูงเท่ากับ 4.38 ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์การยอมรับด้านเดียวที่ 1.25 และมากกว่าค่าความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงที่ -0.13 ดังแสดงในรูปที่ 8.1 และ 8.2



รูปที่ 8.1 รอยบิ่นที่เกิดจากการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่หามาได้



รูปที่ 8.2 ภาพเปรียบเทียบความสามารถของกระบวนการก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

จากการสุ่มวัดตัวอย่าง 5 ตัวอย่างบนแผ่นเวเฟอร์จำนวน 30 แผ่นในแต่ละวัน เพื่อใช้สำหรับการสร้างแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและค่าพิสัย พบว่ากระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมทางสถิติ และมีค่าเฉลี่ยของขนาดความกว้างของรอยบิ่นอยู่ที่ 4.822 ไมโครเมตร ซึ่งถือว่าเป็นไปตามข้อกำหนดที่ได้ตั้งไว้ นั่นคือรอยบิ่นต้องมีขนาดที่น้อยกว่าพื้นที่ปลอดข้อบกพร่องที่ 13.5 ไมโครเมตร

8.6 ผลประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยฉบับนี้

เนื่องจากเทคโนโลยีในการตัดแผ่นเวเฟอร์ชนิดบางพิเศษที่มีพื้นที่ทางตัดแคบสำหรับโรงงานใหญ่ๆ ในหลายประเทศจะนิยมใช้เทคโนโลยีเลเซอร์ เนื่องจากการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยเทคโนโลยีเลเซอร์จะทำให้รอยบิ่นที่เกิดจากการตัดนั้นมีขนาดเล็กมากจนสามารถอนุมานได้ว่าไม่มีรอยบิ่นเกิดขึ้น ซึ่งหลายโรงงานในประเทศไทยรวมทั้งโรงงานในกรณีศึกษาไม่พร้อมที่จะลงทุนในเทคโนโลยีเลเซอร์อันเนื่องมาจากค่าใช้จ่ายที่สูงมากถึง 1.02 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ทางโรงงานในกรณีศึกษาจึงต้องการใช้เทคโนโลยีเดิมที่มีอยู่ในการตัดแผ่นเวเฟอร์แบบพิเศษชนิดนี้เพื่อเป็นโอกาสใหม่ทางธุรกิจโดยไม่ต้องลงทุนซื้อเครื่องจักรใหม่ และงานวิจัยฉบับนี้ได้พิสูจน์ว่ายังสามารถใช้เทคโนโลยีเดิมหรือการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยใบมีดผงเพชรได้ ทำให้โรงงานได้รับงานชนิดใหม่เข้ามาผลิตมากขึ้นโดยไม่ต้องลงทุนเพิ่ม



รูปที่ 8.3 เครื่องตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยเลเซอร์ที่มีราคาสูงมากถึง 1.02 ล้านดอลลาร์สหรัฐ

8.7 ข้อเสนอแนะ

1. คุณภาพของการตัดแผ่นเวเฟอร์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับรอยบิ่นที่พื้นผิวแผ่นเวเฟอร์อย่างเดียวเท่านั้น รอยบิ่นที่ด้านหลังและด้านข้างของตัวได้ยังคงต้องนำมาพิจารณา ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกศึกษาเฉพาะรอยบิ่นที่ด้านหน้าใดเท่านั้น จึงต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป
2. ชนิดของแผ่นเวเฟอร์และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแผ่นเวเฟอร์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน งานวิจัยฉบับนี้ได้ทดลองกับแผ่นเวเฟอร์ที่ทำมาจากซิลิกอนเท่านั้น โดยสามารถใช้วิธีแนวทางเดียวกันในการปรับปรุงคุณภาพในการตัดแผ่นเวเฟอร์ได้
3. สำหรับแผ่นเวเฟอร์ที่มีการลดขนาดพื้นที่ทางตัดให้เหลือแคบน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร และบางครั้งไม่เหลือพื้นที่ทางตัดที่กว้างพอสำหรับการตัดด้วยใบมีดผงเพชร เทคโนโลยีในการตัดแผ่นเวเฟอร์ด้วยเลเซอร์จะเหมาะสมมากขึ้น เนื่องจากเทคโนโลยีนี้จะสร้างรอยบิ่นขนาดเล็กมาก ผู้ประกอบการควรศึกษาถึงจุดคุ้มทุนในการลงทุน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีราคาแพง





ตาราง ก-1

No.	Appraisers			Parts				Repeatability				Total			Residual	Fitted Value
	xi	xi-xbar	(xi-xbar) ²	xi	xi-xbar	(xi-xbar) ²	xi	xbar	xi-xbar	(xi-xbar) ²	xi	xi-xbar	(xi-xbar) ²			
1	17.09	0.00	0.00	18.41	1.32	1.75	18.40	18.41	-0.01	0.00	18.40	1.31	1.73	0.93	17.47	
2	17.09	0.00	0.00	16.76	-0.33	0.11	18.40	18.41	-0.01	0.00	18.40	1.31	1.73	0.93	17.47	
3	---	---	---	17.48	0.39	0.15	18.43	18.41	0.02	0.00	18.43	1.34	1.80	0.96	17.47	
4	---	---	---	18.50	1.42	2.00	16.78	16.76	0.02	0.00	18.42	1.33	1.78	0.95	17.47	
5	---	---	---	15.73	-1.35	1.83	16.75	16.76	-0.01	0.00	18.40	1.31	1.73	0.93	17.47	
6	---	---	---	16.87	-0.22	0.05	16.75	16.76	-0.01	0.00	18.40	1.31	1.73	0.93	17.47	
7	---	---	---	18.31	1.22	1.48	17.50	17.47	0.03	0.00	16.78	-0.31	0.09	-0.65	17.43	
8	---	---	---	15.86	-1.22	1.50	17.47	17.47	0.00	0.00	16.75	-0.34	0.11	-0.68	17.43	
9	---	---	---	16.84	-0.25	0.06	17.45	17.47	-0.02	0.00	16.75	-0.34	0.11	-0.68	17.43	
10	---	---	---	17.53	0.45	0.20	18.52	18.50	0.02	0.00	16.77	-0.32	0.10	-0.66	17.43	
11	---	---	---	17.64	0.55	0.30	18.49	18.50	-0.01	0.00	16.75	-0.34	0.11	-0.68	17.43	
12	---	---	---	15.69	-1.39	1.95	18.50	18.50	0.00	0.00	16.75	-0.34	0.11	-0.68	17.43	
13	---	---	---	17.69	0.60	0.36	15.73	15.74	-0.01	0.00	17.50	0.41	0.17	0.11	17.39	
14	---	---	---	16.64	-0.45	0.20	15.75	15.74	0.01	0.00	17.47	0.38	0.15	0.08	17.39	
15	---	---	---	18.32	1.23	1.52	15.75	15.74	0.01	0.00	17.45	0.36	0.13	0.06	17.39	
16	---	---	---	15.40	-1.69	2.86	16.88	16.88	0.00	0.00	17.50	0.41	0.17	0.11	17.39	
17	---	---	---	18.21	1.12	1.25	16.90	16.88	0.02	0.00	17.45	0.36	0.13	0.06	17.39	
18	---	---	---	17.64	0.56	0.31	16.85	16.88	-0.03	0.00	17.48	0.39	0.15	0.09	17.39	
19	---	---	---	16.76	-0.33	0.11	18.32	18.30	0.02	0.00	18.52	1.43	2.05	1.17	17.35	
20	---	---	---	15.48	-1.61	2.60	18.29	18.30	-0.01	0.00	18.49	1.40	1.97	1.14	17.35	
21	---	---	---	---	---	---	18.30	18.30	0.00	0.00	18.50	1.41	2.00	1.15	17.35	
22	---	---	---	---	---	---	15.86	15.86	0.00	0.00	18.50	1.41	2.00	1.15	17.35	

50	----	----	----	----	----	----	18.20	18.20	0.00	16.83	-0.26	0.07	-0.32	17.15
51	----	----	----	----	----	----	18.20	18.20	0.00	16.83	-0.26	0.07	-0.32	17.15
52	----	----	----	----	----	----	17.65	17.64	0.01	16.83	-0.26	0.07	-0.32	17.15
53	----	----	----	----	----	----	17.65	17.64	0.01	16.85	-0.24	0.06	-0.30	17.15
54	----	----	----	----	----	----	17.63	17.64	-0.01	16.83	-0.26	0.07	-0.32	17.15
55	----	----	----	----	----	----	16.75	16.76	-0.01	17.52	0.43	0.19	0.41	17.11
56	----	----	----	----	----	----	16.77	16.76	0.01	17.55	0.46	0.21	0.44	17.11
57	----	----	----	----	----	----	16.75	16.76	-0.01	17.52	0.43	0.19	0.41	17.11
58	----	----	----	----	----	----	15.45	15.47	-0.02	17.53	0.44	0.20	0.42	17.11
59	----	----	----	----	----	----	15.45	15.47	-0.02	17.52	0.43	0.19	0.41	17.11
60	----	----	----	----	----	----	15.50	15.47	0.03	17.55	0.46	0.21	0.44	17.11
61	----	----	----	----	----	----	18.42	18.41	0.01	17.65	0.56	0.32	0.58	17.07
62	----	----	----	----	----	----	18.40	18.41	-0.01	17.63	0.54	0.30	0.56	17.07
63	----	----	----	----	----	----	18.40	18.41	-0.01	17.64	0.55	0.31	0.57	17.07
64	----	----	----	----	----	----	16.77	16.76	0.01	17.63	0.54	0.30	0.56	17.07
65	----	----	----	----	----	----	16.75	16.76	-0.01	17.63	0.54	0.30	0.56	17.07
66	----	----	----	----	----	----	16.75	16.76	-0.01	17.64	0.55	0.31	0.57	17.07
67	----	----	----	----	----	----	17.50	17.48	0.02	15.68	-1.41	1.98	-1.35	17.03
68	----	----	----	----	----	----	17.45	17.48	-0.03	15.70	-1.39	1.92	-1.33	17.03
69	----	----	----	----	----	----	17.48	17.48	0.00	15.68	-1.41	1.98	-1.35	17.03
70	----	----	----	----	----	----	18.50	18.50	0.00	15.70	-1.39	1.92	-1.33	17.03
71	----	----	----	----	----	----	18.51	18.50	0.01	15.69	-1.40	1.95	-1.34	17.03
72	----	----	----	----	----	----	18.49	18.50	-0.01	15.70	-1.39	1.92	-1.33	17.03
73	----	----	----	----	----	----	15.75	15.72	0.03	17.68	0.59	0.35	0.69	16.99
74	----	----	----	----	----	----	15.72	15.72	0.00	17.70	0.61	0.38	0.71	16.99
75	----	----	----	----	----	----	15.70	15.72	-0.02	17.68	0.59	0.35	0.69	16.99
76	----	----	----	----	----	----	16.87	16.86	0.01	17.70	0.61	0.38	0.71	16.99

77	----	----	----	----	----	----	----	----	16.87	16.86	0.01	0.00	17.70	0.61	0.38	0.71	16.99
78	----	----	----	----	----	----	----	----	16.85	16.86	-0.01	0.00	17.67	0.58	0.34	0.68	16.99
79	----	----	----	----	----	----	----	----	18.30	18.31	-0.01	0.00	16.64	-0.45	0.20	-0.31	16.95
80	----	----	----	----	----	----	----	----	18.30	18.31	-0.01	0.00	16.65	-0.44	0.19	-0.30	16.95
81	----	----	----	----	----	----	----	----	18.32	18.31	0.01	0.00	16.64	-0.45	0.20	-0.31	16.95
82	----	----	----	----	----	----	----	----	15.85	15.86	-0.01	0.00	16.63	-0.46	0.21	-0.32	16.95
83	----	----	----	----	----	----	----	----	15.86	15.86	0.00	0.00	16.62	-0.47	0.22	-0.33	16.95
84	----	----	----	----	----	----	----	----	15.87	15.86	0.01	0.00	16.65	-0.44	0.19	-0.30	16.95
85	----	----	----	----	----	----	----	----	16.83	16.84	-0.01	0.00	18.32	1.23	1.52	1.41	16.91
86	----	----	----	----	----	----	----	----	16.85	16.84	0.01	0.00	18.30	1.21	1.47	1.39	16.91
87	----	----	----	----	----	----	----	----	16.83	16.84	-0.01	0.00	18.32	1.23	1.52	1.41	16.91
88	----	----	----	----	----	----	----	----	17.53	17.53	0.00	0.00	18.33	1.24	1.55	1.42	16.91
89	----	----	----	----	----	----	----	----	17.52	17.53	-0.01	0.00	18.33	1.24	1.55	1.42	16.91
90	----	----	----	----	----	----	----	----	17.55	17.53	0.02	0.00	18.32	1.23	1.52	1.41	16.91
91	----	----	----	----	----	----	----	----	17.63	17.63	0.00	0.00	15.40	-1.69	2.84	-1.46	16.86
92	----	----	----	----	----	----	----	----	17.63	17.63	0.00	0.00	15.38	-1.71	2.91	-1.48	16.86
93	----	----	----	----	----	----	----	----	17.64	17.63	0.01	0.00	15.41	-1.68	2.81	-1.45	16.86
94	----	----	----	----	----	----	----	----	15.70	15.70	0.00	0.00	15.41	-1.68	2.81	-1.45	16.86
95	----	----	----	----	----	----	----	----	15.69	15.70	-0.01	0.00	15.39	-1.70	2.88	-1.47	16.86
96	----	----	----	----	----	----	----	----	15.70	15.70	0.00	0.00	15.39	-1.70	2.88	-1.47	16.86
97	----	----	----	----	----	----	----	----	17.70	17.69	0.01	0.00	18.21	1.12	1.26	1.39	16.82
98	----	----	----	----	----	----	----	----	17.70	17.69	0.01	0.00	18.20	1.11	1.24	1.38	16.82
99	----	----	----	----	----	----	----	----	17.67	17.69	-0.02	0.00	18.20	1.11	1.24	1.38	16.82
100	----	----	----	----	----	----	----	----	16.63	16.63	0.00	0.00	18.20	1.11	1.24	1.38	16.82
101	----	----	----	----	----	----	----	----	16.62	16.63	-0.01	0.00	18.21	1.12	1.26	1.39	16.82
102	----	----	----	----	----	----	----	----	16.65	16.63	0.02	0.00	18.21	1.12	1.26	1.39	16.82
103	----	----	----	----	----	----	----	----	18.33	18.33	0.00	0.00	17.65	0.56	0.32	0.87	16.78

104	***	***	***	***	***	***	***	***	***	18.33	18.33	0.00	0.00	17.65	0.56	0.32	0.87	16.78
105	***	***	***	***	***	***	***	***	***	18.32	18.33	-0.01	0.00	17.63	0.54	0.30	0.85	16.78
106	***	***	***	***	***	***	***	***	***	15.41	15.40	0.01	0.00	17.65	0.56	0.32	0.87	16.78
107	***	***	***	***	***	***	***	***	***	15.39	15.40	-0.01	0.00	17.63	0.54	0.30	0.85	16.78
108	***	***	***	***	***	***	***	***	***	15.39	15.40	-0.01	0.00	17.65	0.56	0.32	0.87	16.78
109	***	***	***	***	***	***	***	***	***	18.20	18.21	-0.01	0.00	16.75	-0.34	0.11	0.01	16.74
110	***	***	***	***	***	***	***	***	***	18.21	18.21	0.00	0.00	16.77	-0.32	0.10	0.03	16.74
111	***	***	***	***	***	***	***	***	***	18.21	18.21	0.00	0.00	16.75	-0.34	0.11	0.01	16.74
112	***	***	***	***	***	***	***	***	***	17.65	17.64	0.01	0.00	16.75	-0.34	0.11	0.01	16.74
113	***	***	***	***	***	***	***	***	***	17.63	17.64	-0.01	0.00	16.75	-0.34	0.11	0.01	16.74
114	***	***	***	***	***	***	***	***	***	17.65	17.64	0.01	0.00	16.76	-0.33	0.11	0.02	16.74
115	***	***	***	***	***	***	***	***	***	16.75	16.75	0.00	0.00	15.45	-1.64	2.68	-1.25	16.70
116	***	***	***	***	***	***	***	***	***	16.75	16.75	0.00	0.00	15.45	-1.64	2.68	-1.25	16.70
117	***	***	***	***	***	***	***	***	***	16.76	16.75	0.01	0.00	15.50	-1.59	2.52	-1.20	16.70
118	***	***	***	***	***	***	***	***	***	15.50	15.48	0.02	0.00	15.50	-1.59	2.52	-1.20	16.70
119	***	***	***	***	***	***	***	***	***	15.45	15.48	-0.03	0.00	15.45	-1.64	2.68	-1.25	16.70
120	***	***	***	***	***	***	***	***	***	15.50	15.48	0.02	0.00	15.50	-1.59	2.52	-1.20	16.70
Avg.	17.09	0.00	0.00	17.09	0.00	1.03	17.09	0.00	1.03	2050.39	17.09	0.00	0.00	17.09	0.00	1.03	0.00	17.09
Sum	34.17	0.00	0.00	341.73	0.00	20.59	2050.39	0.00	20.59	2050.39	2050.39	0.00	0.02	2050.39	0.00	123.55	0.00	2050.39

ตาราง ก-2 ผลการคำนวณในสมการแอนเตอร์สัน - ดาร์ลิ่ง

Width of Chipping	i	Sorted	$F(X_i)$	$1-F(X_i)$	$1-F(X_{n+1})$	S	p	z
19.15	1	15.88	0.012004	0.987996	0.0135976	-8.72034	0.00431	-2.62674
20.38	2	16.27	0.023486	0.976514	0.02234239	-22.6578	0.010468	-2.30914
21.78	3	16.44	0.030835	0.969165	0.02385893	-36.0736	0.016626	-2.12904
21.39	4	16.48	0.032816	0.967184	0.0313023	-48.1663	0.022783	-1.99939
17.12	5	16.64	0.041817	0.958183	0.03330829	-59.1876	0.028941	-1.89659
20.44	6	16.89	0.05978	0.94022	0.03878953	-66.7336	0.035099	-1.81064
20.45	7	16.9	0.060608	0.939392	0.04117843	-77.9112	0.041256	-1.73629
17.6	8	16.97	0.066659	0.933341	0.04368524	-87.5838	0.047414	-1.67046
19.3	9	16.97	0.066659	0.933341	0.04433081	-99.0122	0.053571	-1.61117
20.73	10	17.1	0.079122	0.920878	0.04564502	-106.849	0.059729	-1.55705
21.99	11	17.12	0.081187	0.918813	0.04564502	-117.555	0.065887	-1.50715
20.63	12	17.12	0.081187	0.918813	0.04699037	-128.083	0.072044	-1.46073
20.74	13	17.15	0.08436	0.91564	0.04977637	-136.822	0.078202	-1.41727
18.9	14	17.16	0.085438	0.914562	0.05574277	-144.368	0.08436	-1.37633
20	15	17.17	0.086526	0.913474	0.05731925	-153.886	0.090517	-1.33758
20.53	16	17.21	0.090983	0.909017	0.05893061	-162.083	0.096675	-1.30073
18.14	17	17.23	0.093275	0.906725	0.07217258	-165.03	0.102833	-1.26558
18.6	18	17.26	0.096791	0.903209	0.07313058	-173.275	0.10899	-1.23192
16.27	19	17.26	0.096791	0.903209	0.07313058	-183.176	0.115148	-1.1996
22.32	20	17.27	0.097985	0.902015	0.08648549	-186.058	0.121305	-1.16849
17.46	21	17.29	0.100404	0.899596	0.08981155	-193.052	0.127463	-1.13847
19.82	22	17.4	0.114493	0.885507	0.08981155	-196.823	0.133621	-1.10944
17.12	23	17.45	0.121342	0.878658	0.1328361	-185.75	0.139778	-1.08132
18.33	24	17.46	0.122746	0.877254	0.13433079	-192.939	0.145936	-1.05402
18.74	25	17.48	0.125588	0.874412	0.13433079	-200.028	0.152094	-1.0275
18.39	26	17.6	0.143599	0.856401	0.14042478	-199.094	0.158251	-1.00167
21.68	27	17.67	0.154875	0.845125	0.14354112	-201.732	0.164409	-0.9765
18.02	28	17.69	0.158201	0.841799	0.14991291	-205.787	0.170567	-0.95193
21.59	29	17.7	0.159882	0.840118	0.15316849	-211.444	0.176724	-0.92792
17.67	30	17.7	0.159882	0.840118	0.16665608	-213.884	0.182882	-0.90444
16.48	31	17.75	0.168459	0.831541	0.16839436	-217.313	0.189039	-0.88144
19.58	32	17.76	0.170209	0.829791	0.18088712	-219.278	0.195197	-0.8589
20.28	33	17.85	0.186483	0.813517	0.18271807	-219.65	0.201355	-0.83679
20.26	34	17.88	0.192116	0.807884	0.18641454	-223.073	0.207512	-0.81508
19.92	35	17.9	0.195927	0.804073	0.19015697	-227.004	0.21367	-0.79375
19.41	36	18	0.215666	0.784334	0.19015697	-226.769	0.219828	-0.77278

17.15	37	18	0.215666	0.784334	0.19394522	-231.717	0.225985	-0.75213
19.88	38	18	0.215666	0.784334	0.19585647	-237.33	0.232143	-0.73181
18.55	39	18.01	0.217701	0.782299	0.21356677	-236.27	0.2383	-0.71178
17.1	40	18.02	0.219747	0.780253	0.21762548	-240.18	0.244458	-0.69203
17.4	41	18.05	0.225952	0.774048	0.23006528	-239.503	0.250616	-0.67255
17.29	42	18.08	0.232255	0.767745	0.25387202	-234.96	0.256773	-0.65332
19.36	43	18.1	0.236511	0.763489	0.27196525	-233.227	0.262931	-0.63434
19.1	44	18.11	0.238654	0.761346	0.27427118	-237.195	0.269089	-0.61557
21.24	45	18.11	0.238654	0.761346	0.27427118	-242.648	0.275246	-0.59702
19.87	46	18.13	0.242974	0.757026	0.28594362	-242.675	0.281404	-0.57868
18.79	47	18.14	0.245149	0.754851	0.29305858	-244.894	0.287562	-0.56052
17.26	48	18.19	0.256181	0.743819	0.29544835	-245.207	0.293719	-0.54255
19.8	49	18.2	0.258418	0.741582	0.29784705	-248.742	0.299877	-0.52475
21.82	50	18.21	0.260666	0.739334	0.29784705	-253.014	0.306034	-0.50712
19	51	18.24	0.267467	0.732533	0.30267088	-253.901	0.312192	-0.48965
21.57	52	18.26	0.27205	0.72795	0.30509586	-256.356	0.31835	-0.47232
18.93	53	18.27	0.274357	0.725643	0.31242194	-257.956	0.324507	-0.45513
17.76	54	18.33	0.288394	0.711606	0.31734776	-255.857	0.330665	-0.43808
17.16	55	18.39	0.302761	0.697239	0.31982293	-254.493	0.336823	-0.42115
18.26	56	18.4	0.305186	0.694814	0.32230615	-257.419	0.34298	-0.40434
15.88	57	18.41	0.30762	0.69238	0.35527641	-250.154	0.349138	-0.38765
19.13	58	18.48	0.32489	0.67511	0.36826872	-244.169	0.355296	-0.37106
17.26	59	18.54	0.34	0.66	0.37877298	-239.806	0.361453	-0.35458
21.23	60	18.55	0.342545	0.657455	0.38405944	-241.369	0.367611	-0.33819
20.69	61	18.58	0.35022	0.64978	0.38405944	-242.744	0.373768	-0.32189
18.2	62	18.6	0.355372	0.644628	0.40810295	-237.492	0.379926	-0.30567
20.2	63	18.63	0.363149	0.636851	0.40810295	-238.647	0.386084	-0.28954
21.23	64	18.74	0.392128	0.607872	0.41619991	-230.22	0.392241	-0.27348
18.96	65	18.74	0.392128	0.607872	0.41619991	-233.846	0.398399	-0.25749
18.05	66	18.79	0.405512	0.594488	0.41890701	-232.225	0.404557	-0.24157
19.56	67	18.8	0.408203	0.591797	0.42433261	-233.179	0.410714	-0.22571
19.22	68	18.82	0.413597	0.586403	0.42705086	-234.052	0.416872	-0.2099
19.11	69	18.84	0.419007	0.580993	0.42705086	-235.739	0.42303	-0.19415
20.42	70	18.9	0.435327	0.564673	0.43795729	-230.364	0.429187	-0.17844
18.93	71	18.9	0.435327	0.564673	0.45440311	-228.48	0.435345	-0.16278
20	72	18.91	0.438059	0.561941	0.47644817	-224.052	0.441502	-0.14716
20.67	73	18.91	0.438059	0.561941	0.48473736	-224.685	0.44766	-0.13158
20.4	74	18.93	0.44353	0.55647	0.48750207	-225.123	0.453818	-0.11602
17.7	75	18.93	0.44353	0.55647	0.49303316	-226.505	0.459975	-0.1005
21.43	76	18.93	0.44353	0.55647	0.49303316	-229.545	0.466133	-0.08499

18.48	77	18.93	0.44353	0.55647	0.49579927	-231.73	0.472291	-0.06951
19.91	78	18.96	0.451758	0.548242	0.50133196	-230.19	0.478448	-0.05405
20.09	79	19	0.462759	0.537241	0.5068644	-227.659	0.484606	-0.0386
17.23	80	19.02	0.468271	0.531729	0.5068644	-228.677	0.490764	-0.02315
20.4	81	19.1	0.49037	0.50963	0.50963019	-223.253	0.496921	-0.00772
17.7	82	19.1	0.49037	0.50963	0.50963019	-226.026	0.503079	0.007718
21.6	83	19.11	0.493136	0.506864	0.5317287	-220.868	0.509236	0.023154
18.93	84	19.11	0.493136	0.506864	0.53724075	-221.823	0.515394	0.038597
19.56	85	19.13	0.498668	0.501332	0.54824237	-219.168	0.521552	0.054048
20.37	86	19.15	0.504201	0.495799	0.55646981	-217.328	0.527709	0.069513
17.17	87	19.16	0.506967	0.493033	0.55646981	-218.923	0.533867	0.084994
18	88	19.16	0.506967	0.493033	0.55646981	-221.454	0.540025	0.100496
18.41	89	19.18	0.512498	0.487502	0.55646981	-222.064	0.546182	0.116022
18.21	90	19.19	0.515263	0.484737	0.56194149	-221.859	0.55234	0.131575
19.9	91	19.22	0.523552	0.476448	0.56194149	-221.449	0.558498	0.147161
19.1	92	19.3	0.545597	0.454403	0.56467297	-215.461	0.564655	0.162783
16.89	93	19.36	0.562043	0.437957	0.56467297	-212.322	0.570813	0.178444
18.24	94	19.4	0.572949	0.427051	0.58099265	-205.695	0.57697	0.194149
18.08	95	19.4	0.572949	0.427051	0.58640317	-206.143	0.583128	0.209902
21.1	96	19.41	0.575667	0.424333	0.59179732	-205.672	0.589286	0.225708
16.44	97	19.43	0.581093	0.418907	0.59448796	-205.14	0.595443	0.24157
18	98	19.44	0.5838	0.4162	0.60787186	-202.018	0.601601	0.257493
17.48	99	19.44	0.5838	0.4162	0.60787186	-204.09	0.607759	0.273482
18.1	100	19.47	0.591897	0.408103	0.63685091	-194.153	0.613916	0.289541
18.93	101	19.47	0.591897	0.408103	0.64462794	-193.664	0.620074	0.305675
16.9	102	19.56	0.615941	0.384059	0.6497796	-185.893	0.626232	0.321889
19.84	103	19.56	0.615941	0.384059	0.65745543	-185.317	0.632389	0.338188
19.47	104	19.58	0.621227	0.378773	0.65999985	-184.556	0.638547	0.354577
19.02	105	19.62	0.631731	0.368269	0.67511026	-178.104	0.644704	0.371062
21.57	106	19.67	0.644724	0.355276	0.69238029	-170.183	0.650862	0.387649
21.55	107	19.8	0.677694	0.322306	0.69481417	-160.425	0.65702	0.404343
19.43	108	19.81	0.680177	0.319823	0.69723946	-160.396	0.663177	0.42115
20.61	109	19.82	0.682652	0.317348	0.71160619	-156.674	0.669335	0.438078
21.51	110	19.84	0.687578	0.312422	0.72564323	-152.266	0.675493	0.455131
18.54	111	19.87	0.694904	0.305096	0.72794952	-150.613	0.68165	0.472318
17.75	112	19.88	0.697329	0.302671	0.732533	-149.799	0.687808	0.489646
19.44	113	19.9	0.702153	0.297847	0.73933441	-147.512	0.693966	0.507122
17.9	114	19.9	0.702153	0.297847	0.74158161	-148.134	0.700123	0.524755
18.11	115	19.91	0.704552	0.295448	0.74381872	-147.969	0.706281	0.542552
17.69	116	19.92	0.706941	0.293059	0.754851	-145.078	0.712438	0.560522

18.84	117	19.95	0.714056	0.285944	0.75702639	-143.33	0.718596	0.578676
19.4	118	20	0.725729	0.274271	0.76134566	-139.413	0.724754	0.597022
19.16	119	20	0.725729	0.274271	0.76134566	-140.599	0.730911	0.615572
18.74	120	20.01	0.728035	0.271965	0.76348943	-140.356	0.737069	0.634335
17.27	121	20.09	0.746128	0.253872	0.76774501	-134.275	0.743227	0.653325
19.4	122	20.2	0.769935	0.230065	0.77404773	-125.77	0.749384	0.672553
20.01	123	20.26	0.782375	0.217625	0.78025259	-120.922	0.755542	0.692034
18.13	124	20.28	0.786433	0.213567	0.78229894	-119.984	0.7617	0.711178
18.91	125	20.37	0.804144	0.195856	0.78433424	-114.763	0.767857	0.731808
21.07	126	20.38	0.806055	0.193945	0.78433424	-115.089	0.774015	0.752134
19.67	127	20.4	0.809843	0.190157	0.78433424	-114.82	0.780172	0.772776
19.9	128	20.4	0.809843	0.190157	0.80407252	-109.39	0.78633	0.793752
22.03	129	20.42	0.813585	0.186415	0.80788446	-107.848	0.792488	0.815083
19.62	130	20.44	0.817282	0.182718	0.81351657	-105.713	0.798645	0.836792
19.18	131	20.45	0.819113	0.180887	0.82979071	-100.776	0.804803	0.858903
20.73	132	20.52	0.831606	0.168394	0.83154104	-97.0132	0.810961	0.881442
21.41	133	20.53	0.833344	0.166656	0.84011833	-94.4782	0.817118	0.904437
19.81	134	20.61	0.846832	0.153168	0.84011833	-90.9044	0.823276	0.927922
21.64	135	20.63	0.850087	0.149913	0.8417989	-90.0156	0.829433	0.951929
18.01	136	20.67	0.856459	0.143541	0.84512512	-87.5925	0.835591	0.976498
16.64	137	20.69	0.859575	0.140425	0.85640074	-83.6291	0.841749	1.001671
18.9	138	20.73	0.865669	0.134331	0.87441229	-76.5753	0.847906	1.027496
16.97	139	20.73	0.865669	0.134331	0.87725379	-76.2335	0.854064	1.054024
21.07	140	20.74	0.867164	0.132836	0.87865751	-75.8566	0.860222	1.081316
16.97	141	21.07	0.910188	0.089812	0.88550671	-60.6114	0.866379	1.109438
18.11	142	21.07	0.910188	0.089812	0.89959563	-56.5755	0.872537	1.138466
19.19	143	21.1	0.913515	0.086485	0.90201513	-55.1703	0.878695	1.168486
17.85	144	21.23	0.926869	0.073131	0.90320873	-51.0126	0.884852	1.199598
18.27	145	21.23	0.926869	0.073131	0.90320873	-51.3681	0.89101	1.231916
19.16	146	21.24	0.927827	0.072173	0.90672542	-50.2921	0.897167	1.265576
19.47	147	21.39	0.941069	0.058931	0.90901686	-45.7461	0.903325	1.300733
18.91	148	21.41	0.942681	0.057319	0.91347401	-44.1107	0.909483	1.337577
17.21	149	21.43	0.944257	0.055743	0.91456236	-43.5599	0.91564	1.376331
17.88	150	21.51	0.950224	0.049776	0.91564043	-41.6176	0.921798	1.41727
18.63	151	21.55	0.95301	0.04699	0.91881336	-39.9736	0.927956	1.460733
17.45	152	21.57	0.954355	0.045645	0.91881336	-39.8117	0.934113	1.507145
20.52	153	21.57	0.954355	0.045645	0.92087808	-39.3899	0.940271	1.557052
18.82	154	21.59	0.955669	0.044331	0.93334143	-35.0986	0.946429	1.611169
18.58	155	21.6	0.956315	0.043685	0.93334143	-35.1186	0.952586	1.670464
19.44	156	21.64	0.958822	0.041178	0.93939188	-32.5221	0.958744	1.736291

19.11	157	21.68	0.96121	0.03879	0.94021999	-31.6766	0.964901	1.810637
18.4	158	21.78	0.966692	0.033308	0.95818313	-24.1265	0.971059	1.896592
18.19	159	21.82	0.968698	0.031302	0.96718406	-20.6586	0.977217	1.999387
19.95	160	21.99	0.976141	0.023859	0.9691654	-17.6943	0.983374	2.129037
18.8	161	22.03	0.977658	0.022342	0.97651385	-14.8822	0.989532	2.309137
18	162	22.32	0.986402	0.013598	0.98799558	-8.32305	0.99569	2.626741
$\bar{x} = 19.3$	n=162							



บรรณานุกรม

- Bothe, D. R. (1997). *Measuring Process Capability: Techniques and Calculations for Quality and Manufacturing Engineers* (1st ed.): McGraw-Hill.
- Chutima, P. (2002). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม (1st ed.): Chulalongkorn University Printery.
- Craggs, D. (2019). *MSA 3 – Gage Bias*: Accendo Reliability.
- Craig Gygi, B. W. (2012). *Six Sigma For Dummies* (2nd ed.): Wiley.
- Donald J. Wheeler, R. W. L. (1990). *Evaluating the Measurement Process* (2nd ed.): SPC Press, Inc.
- Gambino, J. P. (2013). *Thin silicon wafer processing and strength characterization*. Paper presented at the 20th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), Suzhou, China
- Hongxiu Zhou, S. Q., Yanxia Huo, Nianmin Zhang. (2012). High-speed dicing of silicon wafers conducted using ultrathin blades. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 947–953. doi:10.1007
- Kalaphakdee, P. (2014). *Effect of Silicon Wafer Cutting factors on Crack*. (Master), Chulalongkorn,
- Kennedy, D. (2019). 7 Elements of the Six Sigma Project Charter. Retrieved from <https://blog.masterofproject.com/six-sigma-project-charter/>
- Kulpiya, S. (2013). *Application of Six Sigma in Defect Reduction of Chipped Integrated Circuit Products*. (Master), Chulalongkorn University,
- Marks, M. R. (2014). Characterization Methods for Ultrathin Wafer and Die Quality. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 4(12), 2042 - 2057. doi:10.1109/TCPMT.2014.2363570
- McNeese, B. (2018). Acceptance Criteria for Measurement Systems Analysis (MSA). Retrieved from <https://www.spcforexcel.com/knowledge/measurement-systems-analysis/acceptance-criteria-for-MSA>
- Mikel J. Harry, P. S. M., Ofelia C. De Hodgins, Richard L. Hulbert, Christopher J. Lacke. (2007). *Practitioner's Guide to Statistics and Lean Six Sigma for Process*

Improvements: John Wiley & Sons, Inc.

Montgomery, D. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control* (6 ed.): John Wiley & Sons, Inc.

MSA. (2010). *MEASUREMENT SYSTEMS ANALYSIS (Reference Manual)* (4 ed.): Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation.

Nunak, N. (2012). *Measurement and Instrumentation*: Faculty of Engineering – KMITL.

Ploypanichcharoen, K. (2006). การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA): ประมวลผลด้วย Minitab (5th ed.): TPA Publishing.

T. W. Anderson, D. A. D. (1952). Asymptotic Theory of Certain Goodness of Fit Criteria Based on Stochastic Processes. *The Annals of Mathematical Statistics*, 23, 193-212.

Y.H. Chiew, J. Y. L., F.F. Tan (2018). *Mechanical Dicing Challenges and Development on 50um Saw Street with Wafer Backside Coating (WBC)*. Paper presented at the IEEE 38th International Electronics Manufacturing Technology Conference (IEMT), Melaka, Malaysia



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วรวิช สนามทอง
วัน เดือน ปี เกิด	4 มกราคม พ.ศ. 2535
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลบาราศนราครุร เลขที่ 38 หมู่ 4 ตำบลตลาดขวัญ ถนนติวานนท์ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สาขาฟิสิกส์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	50/1 หมู่ 1 ตำบลบ้านซุง อำเภอนครหลวง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13260
ผลงานตีพิมพ์	Chipping size reduction on Ultra-Thin Wafers and Narrow Saw- Streets for Wafer Sawing Process, Materials Science Forum (ISSN: 1662-9752)
รางวัลที่ได้รับ	Excelent Oral Presentation of 3rd International Conference on Sensors, Materials and Manufacturing 2019 (ICSMM 2019)