



การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการนำหัวเชื่อมลวดทองคำมาใช้ซ้ำเพื่อลดต้นทุน
ในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ โดยการออกแบบการทดลอง

ฉัตรพล พิมพา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



FINDING OPTIMAL CONDITIONS FOR REUSE OF THE GOLD WIRE BONDING
CAPILLARY TO REDUCE PRODUCTION COST IN THE GOLD WIRE BONDING
PROCESS BY DESIGN OF EXPERIMENT

CHATPON PHIMPHA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
MAJOR IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2021
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความเกื้อหนุนและความดูแลของหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สิ้นธุเชาวน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งสละเวลา กรุณาให้คำปรึกษา ความรู้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ตลอดจนให้ความรู้ทางด้านวิชาการอันเป็นแนวทางในการทำวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่ามาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์รวมทั้งให้คำแนะนำที่มีประโยชน์โดยประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร ภูนิคม ผู้ซึ่งกรุณาเป็นประธานในการสอบ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธารชุตตา พันธนิกุล ผู้ซึ่งกรุณาเป็นกรรมการในการสอบ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ศิริรักษ์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่กรุณาเป็นผู้ทรงคุณวุฒิในการสอบ ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้สนใจทุกท่าน ในการนำข้อมูลต่าง ๆ ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ทั้งในทางปฏิบัติและงานวิชาการต่อไป

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ คุณบิดา คุณมารดา ครอบครัว และบุตรชายผู้ซึ่งเป็นแรงผลักดันและกำลังใจในการเรียนครั้งนี้ รวมถึงกัลยาณมิตรทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและสนับสนุน ข้าพเจ้าในทุกทาง ตลอดจนเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา และยังมีผู้เกี่ยวข้องทุกท่านซึ่งผู้วิจัยอาจไม่ได้กล่าวนามของท่านในที่นี้ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณท่านทั้งหลายไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ฉัตรพล พิมพา

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการนำหัวเชื่อมลวดทองคำมาใช้ซ้ำ เพื่อลดต้นทุนในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ โดยการออกแบบการทดลอง

ผู้วิจัย : ฉัตรพล พิมพา

ชื่อปริญญา : ปรัชญาคุณภักดิ์

สาขาวิชา : วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สันธูเชาวน์

คำสำคัญ : การเชื่อมลวดทองคำ, การลดต้นทุน, การออกแบบการทดลอง การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอวิธีการและผลการทดลองจากการนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุมาใช้ในการกระบวนการเชื่อมลวดทองคำของการผลิต IC Packaging โดยใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกระบวนการผลิต ซึ่งงานวิจัยจะศึกษาค่ามาตรฐานของการเชื่อมลวดทองคำ 2 ประเภทคือ ค่าแรงดึงและค่าแรงเฉือน โดยศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่ามาตรฐานของการเชื่อมลวดทองคำจำนวน 5 ปัจจัย ประกอบด้วย แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) ค่าพลังงานที่ใช้ในการสั่นสะเทือนแบบอัลตราโซนิก (USG Power) ค่ากระแสที่ปล่อยผ่าน Electronic Flame Off (EFO) เพื่อหลอมลวดทองคำ (EFO current) และค่าระยะห่างระหว่าง EFO กับลวดทองคำให้ช่วงที่หลอมละลายลวด (EFO gap) ผลจากการวิจัยนั้นแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่ามาตรฐานของการเชื่อมลวดทองคำเมื่อนำหัวเชื่อมลวดทองคำมาใช้ซ้ำจำนวน 1 ปัจจัยคือ แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) สำหรับผลของสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยสำหรับค่ามาตรฐานแรงดึงคือ การปรับตั้งค่าแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เท่ากับ 82 กรัม และเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) 2.1 มิลลิวินาที ซึ่งจะทำให้ได้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ 23.62 กรัม และผลการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของค่ามาตรฐานแรงเฉือนคือ การปรับตั้งค่าแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เท่ากับ 90 กรัม และเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) 1 มิลลิวินาที ค่าพลังงานที่ใช้ในการสั่นสะเทือนแบบอัลตราโซนิก (USG current) 50 มิลลิแอมป์ ค่ากระแสที่ปล่อยผ่าน EFO เพื่อหลอมลวดทองคำ (EFO current) 50 มิลลิแอมป์ และค่าระยะห่างระหว่าง EFO กับลวดทองคำให้ช่วงที่หลอมละลายลวด (EFO gap) 35 ไมครอน ซึ่งจะทำให้ได้ค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ 54.13 กรัม โดยผลการใช้สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวนี้จะทำให้หัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุสามารถใช้งานได้มากขึ้นกว่าเดิมร้อยละ 56 โดยที่ไม่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ผลิต

ABSTRACT

TITLE : FINDING OPTIMAL CONDITIONS FOR REUSE OF THE GOLD WIRE
BONDING CAPILLARY TO REDUCE PRODUCTION COST IN THE GOLD
WIRE BONDING PROCESS BY DESIGN OF EXPERIMENT

AUTHOR : CHATPON PHIMPHA

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : INDUSTRIAL ENGINEERING

ADVISOR : ASST. PROF. SOMBAT SINDHUCHARO, Ph.D.

KEYWORDS : GOLD WIRE BONDING, COST REDUCTION, DESIGN OF EXPERIMENT
OPTIMIZATION

The objective of this research is to propose methods and experimental results from using expired gold wire welding heads in the gold wire welding process for IC packaging production using an experimental design to determine optimal conditions for the manufacturing process. The research studied the two types of standard values for gold wire welding: tensile and shear strength. Five factors expected to affect the standard of gold wire welding were studied: welding pressure (bond force), welding time (bond time), energy values used in ultrasonic vibrations (USG Power), current emitted through Electronic Flame Off (EFO) to melt gold wire (EFO current), and the distance between the EFO and the gold wire provides the wire melting range (EFO gap). Results indicated that the one factor that had a statistically significant effect on the standard value of gold wire welding when reusing a gold electrode was the welding pressure (bond force). The optimal conditions for tensile stress are a gold wire welding pressure (bond force) at 82 g., the duration for gold wire welding (bond time) was 2.1 ms. resulting in maximum tensile strength of 23.62 g. and optimal conditions for gold wire welding shear strength is pressure (bond force) at 90 g., gold wire welding duration (bond time) was 1 ms, energy values used in ultrasonic vibrations (USG current) were at 50 mA., the EFO current emitted to melt gold wire (EFO current) was at 50 mA. and the distance between the EFO and the gold wire provides a wire melting range (EFO gap) of 35 μ and results in maximum shear strength of 54.13 g. By employing such optimum conditions, the expired gold wire welding heads can be used 56% more without affecting the quality of the work piece produced.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 นิยามคำศัพท์	3
บทที่ 2 การประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ประเภท IC PACKAGING	
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล	4
2.2 การตรวจสอบคุณภาพการเชื่อมลวดทองคำตามมาตรฐาน	12
2.3 การออกแบบการทดลอง	13
2.4 การทดลองแบบเป็นลำดับขั้น	16
2.5 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน	17
2.6 การออกแบบการทดลองแบบ One-half Fraction of the 2k Design	18
2.7 โครงสร้างซ้ำซ้อนและรายละเอียดของแผนการทดลอง	20
2.8 การทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ	21
2.9 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง	22
2.10 วิธีเคลื่อนที่ (ขึ้นหรือลง) ไปสู่พื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุด	23
2.11 การตรวจสอบส่วนตกค้าง Model Adequacy Checking	25
2.12 แผนภูมิควบคุมข้อมูลเชิงปริมาณ	28
2.13 การสร้างแผนภูมิควบคุมแบบ X-MR Chart	30
2.14 การลดต้นทุนกระบวนการและการเพิ่มผลผลิต	31
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	
3.1 การศึกษากระบวนการเชื่อมลวดทองคำ	37
3.2 การคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น	39
3.3 การออกแบบการทดลองและทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน	39
3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การวิเคราะห์ส่วนตักค้างของการทดลอง	40
3.6 การวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง	41
3.7 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ	43
3.8 การทดลองยืนยันผลของสภาวะที่เหมาะสมที่สุด	44
3.9 การวิเคราะห์การทดลองยืนยันผล	44
3.10 การควบคุมกระบวนการเพื่อให้ชิ้นงานที่ได้อยู่ภายใต้มาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด	44
3.11 คำนวณต้นทุนและเปรียบเทียบต้นทุน	45
3.12 การสรุปผลงานวิจัย	45
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 ผลการศึกษากระบวนการเชื่อมลวดทองคำ	47
4.2 ผลการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น	55
4.3 การออกแบบการทดลองและการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน	56
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	62
4.5 การวิเคราะห์ส่วนตักค้างของการทดลอง	65
4.6 การวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง	67
4.7 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ	76
4.8 การทดลองและวิเคราะห์การทดลองยืนยันผล	78
4.9 ผลวิเคราะห์การทดลองยืนยันผล	82
4.10 การควบคุมกระบวนการเพื่อให้ชิ้นงานที่ได้อยู่ภายใต้มาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด	83
4.11 การคำนวณต้นทุนและเปรียบเทียบต้นทุน	92
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
5.1 สรุปผลการวิจัย	96
5.2 ข้อเสนอแนะ	99
เอกสารอ้างอิง	100
ภาคผนวก	
ก ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง	109
ข ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงเฉือน	123
ค ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึง	137
ง ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง	141
จ ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน	152
ฉ ชิ้นงานที่ผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง	163
ช ชิ้นงานที่ผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน	169
ประวัติผู้วิจัย	175

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ขั้นตอนแรกในการออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1}
2.2	ขั้นตอนที่สองในการออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1}
2.3	โครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias Structure)
3.1	กระบวนการเชื่อมลวดทองคำของผู้ผลิต IC Packaging ในกรณีศึกษา
3.2	ค่ามาตรฐานคุณภาพของชิ้นงานและวิธีการทดสอบค่ามาตรฐาน
3.3	งานวิจัยและข้อมูลจากกระบวนการผลิตจริงที่ถูกนำมาใช้คัดกรองปัจจัยเบื้องต้น
4.1	ข้อมูลรายละเอียดของเครื่องจักรและอุปกรณ์ในงานวิจัย
4.2	เวลาเฉลี่ยในการทำงานของกระบวนการตรวจสอบคุณภาพของหัวเชื่อมลวดทองคำ
4.3	ค่ามาตรฐานของแรงดึงและแรงเฉือน
4.4	ผลการคัดกรองปัจจัยที่นำมาใช้ในงานวิจัย
4.5	ผลตอบของงานวิจัย
4.6	ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในงานวิจัย
4.7	การออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึงและแรงเฉือน
4.8	ผลการทดลองแบบ 2^{5-1} เพื่อคัดกรองปัจจัยสำหรับผลตอบแรงดึง
4.9	ผลการทดลองแบบ 2^{5-1} เพื่อคัดกรองปัจจัยสำหรับผลตอบแรงเฉือน
4.10	การคำนวณผลกระทบจากการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึง
4.11	การคำนวณผลกระทบจากการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงเฉือน
4.12	ความแปรปรวนจากการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึง
4.13	ความแปรปรวนจากการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงเฉือน
4.14	ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ส่งต่อผลตอบแรงดึง
4.15	เงื่อนไขการทดลองและผลการทดลอง Steepest Ascent ของผลตอบแรงดึง
4.16	ปัจจัยและระดับของการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนของผลตอบแรงดึง
4.17	ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนของผลตอบแรงดึง
4.18	การคำนวณผลกระทบจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนของผลตอบแรงดึง
4.19	ความแปรปรวนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนของผลตอบแรงดึง
4.20	การกำหนดค่าในการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุด
4.21	สถานะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปใช้ในการทดลองยืนยันผล
4.22	ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง
4.23	ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน
4.24	การวิเคราะห์ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง
4.25	การวิเคราะห์ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน
4.26	การสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ X-MR Chart สำหรับค่าผลตอบแรงดึง
4.27	การสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ X-MR Chart สำหรับค่าผลตอบแรงเฉือน

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.28	จำนวนครั้งที่ผลิตชิ้นงานด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง	89
4.29	จำนวนครั้งที่ผลิตชิ้นงานด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน	90
4.30	การเปรียบเทียบต้นทุนด้านเวลาการซ่อมบำรุงสำหรับส่วนงานวิศวกร	93
4.31	การเปรียบเทียบต้นทุนด้านเวลาการซ่อมบำรุงสำหรับส่วนงานควบคุมคุณภาพ	94
4.32	การเปรียบเทียบต้นทุนด้านพลังงานของเครื่องเชื่อมลวดทองคำ	94
4.33	การเปรียบเทียบต้นทุนด้านพลังงานของเครื่องทดสอบคุณภาพ	95
4.34	การเปรียบเทียบต้นทุนด้านวัตถุดิบที่ต้องใช้ในกระบวนการ	95
5.1	ผลที่ได้รับเมื่อนำหัวเชื่อมลวดทองคำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ	99

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการเจียรไนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ (Silicon wafer Grinding)	4
2.2	กระบวนการตัดแยกแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ (Silicon wafer Saw)	5
2.3	ลักษณะของได (DIE) ที่เป็นวงจรมิติขนาดเล็กที่ผ่านการตัดแยกออกเป็นชิ้นจากเวเฟอร์	6
2.4	ลักษณะของลีดเฟรม (Lead Frame)	6
2.5	ลักษณะการติดไดลงบนลีดเฟรมในกระบวนการไดแอตแทค (DIE Attach)	6
2.6	ลักษณะของเครื่องเชื่อมลวดทองคำ (Gold wire Bonding Machine)	7
2.7	ลักษณะของหัวเชื่อมลวด (Capillary)	8
2.8	กระบวนการเชื่อมลวดทองคำแบบ Thermosonic Ball Bonding	9
2.9	การแสดงจุดที่ทำการเชื่อมลวดทองคำ	9
2.10	กระบวนการโมล (Mold) ของ IC Packaging	10
2.11	ลักษณะเตาอบ Post Mold Cure	11
2.12	ลักษณะการทดสอบแรงดึง Wire pull	12
2.13	ลักษณะการทดสอบแรงเฉือน Bond Shear	12
2.14	เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ	22
2.15	การทดลองที่เพิ่มที่จุดแกน Axial Points	23
2.16	ลักษณะการเคลื่อนที่ไปสู่พื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุด	24
2.17	อีโคโนมิกรีสแตลไลน์ที่แตกหักแบบปกติ	26
2.18	การกระจายส่วนตกค้างที่แตกหักแบบปกติ	26
2.19	ส่วนตกค้างของลำดับเวลา	27
2.20	ส่วนตกค้างเปรียบเทียบกับค่าทำนาย	28
2.21	การควบคุมข้อมูลเชิงปริมาณ	28
2.22	ตัวอย่างของแผนภูมิควบคุม X-MR Chart	29
2.23	ส่วนประกอบของราคาขายผลิตภัณฑ์	31
3.1	กระบวนการเชื่อมลวดทองคำ	37
3.2	สรุปแนวทางการดำเนินงานวิจัย	46
4.1	กระบวนการผลิตและรายละเอียดของกระบวนการในส่วนของ FOL	47
4.2	กระบวนการผลิตและรายละเอียดของกระบวนการในส่วนของ EOL	48
4.3	เครื่องเชื่อมลวดทองคำ (Machine model) รุ่น Kns ICoXX PLUS	49
4.4	หัวเชื่อมลวดทองคำ (Capillary type) รุ่น Kns P/N#488XX-46XX	49
4.5	ลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมลวดทองคำจากกรณีศึกษา	50
4.6	ลักษณะของ First bond	50
4.7	ลักษณะของ Second bond	51
4.8	เครื่องทดสอบค่าแรงดึงและแรงเฉือนในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ	52

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.9	ขึ้นงานก่อนและหลังการทดสอบแรงดึง 53
4.10	ขึ้นงานก่อนและหลังการทดสอบแรงเฉือน 54
4.11	ด้านข้างของหัวเชื่อมลวดทองคำที่ใช้ในผลตอบแรงดึง (ผ่านการใช้ 300,000 ครั้ง) 58
4.12	ด้านหน้าของหัวเชื่อมลวดทองคำที่ใช้ในผลตอบแรงดึง (ผ่านการใช้ 300,000 ครั้ง) 59
4.13	ด้านข้างของหัวเชื่อมลวดทองคำที่ใช้ในผลตอบแรงเฉือน (ผ่านการใช้ 300,000 ครั้ง) 60
4.14	ด้านหน้าของหัวเชื่อมลวดทองคำที่ใช้ในผลตอบแรงเฉือน (ผ่านการใช้ 300,000 ครั้ง) 61
4.15	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดึงในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ 63
4.16	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงเฉือนในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ 64
4.17	ผลการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับ ผลตอบแรงดึง 66
4.18	ผลการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับ ผลตอบแรงเฉือน 67
4.19	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดึงในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ 74
4.20	ผลการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับ ผลตอบแรงดึง 75
4.21	ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยสำหรับผลตอบแรงดึง 78
4.22	ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยสำหรับผลตอบแรงเฉือน 78
4.23	เส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุมแบบ X-MR Chart สำหรับผลตอบแรงดึง 86
4.24	เส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุมแบบ X-MR Chart สำหรับผลตอบแรงเฉือน 88
4.25	ค่าแรงดึงเมื่อนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุกลับมาใช้โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด 91
4.26	ค่าแรงเฉือนเมื่อนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุกลับมาใช้โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด 91
5.1	สรุปวิธีการนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลับมาใช้ซ้ำ 97

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

จากภาพรวมของธุรกิจและแนวโน้มของธุรกิจในประเทศไทย พบว่าภาพรวมของธุรกิจดีขึ้นอย่างต่อเนื่องในเกือบทุกอุตสาหกรรมและทุกภูมิภาค โดยเฉพาะภาพรวมของกลุ่มอุตสาหกรรมเทคโนโลยี (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2561) ซึ่งกลุ่มอุตสาหกรรมเทคโนโลยีในประเทศไทยนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มอุตสาหกรรมประเภทชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และกลุ่มอุตสาหกรรมเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (วรารักษ์ วิบูลคณารักษ์, 2561) โดยในปี 2562 พบว่าแนวโน้มการผลิตสินค้าประเภทชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์นั้น มีการส่งออกเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.5 เมื่อเทียบกับปี 2561 เนื่องจากความต้องการสินค้าอิเล็กทรอนิกส์โลกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2562) จากการเติบโตของอุตสาหกรรมดังกล่าวนี้ การปรับปรุงหรือพัฒนากระบวนการผลิตจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ (นวพล บุญประเสริฐ, 2554) เพื่อที่จะตอบรับการเติบโตของธุรกิจ ซึ่งการพิจารณานำชิ้นส่วนเครื่องจักรที่หมดอายุแล้วนำกลับมาใช้ซ้ำ (Cao, 2015) ประกอบซ่อมแซม หรือนำกลับมาใช้ใหม่ ก็เป็นหนึ่งในกลยุทธ์ในการเพิ่มประสิทธิภาพของผู้ผลิต (Klausner, Grimm and Hendrickson, 1998)

ผลิตภัณฑ์ประเภท IC Packaging จัดเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมประเภทชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการผลิตในประเทศไทย การผลิต IC packaging สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 40 ประเภทผลิตภัณฑ์ จำแนกตามรูปร่างและลักษณะการใช้งาน (New Venture Research Corp, 2015) โดยกระบวนการในการผลิต IC Packaging ทุกประเภทนั้น มีกระบวนการหลัก 2 ส่วนคือ การผลิตที่เรียกว่า Front of Line (FOL) ประกอบด้วย 5 กระบวนการย่อย และ End of Line (EOL) ประกอบด้วย 4 กระบวนการย่อย (Hung, 2007) ซึ่งกระบวนการที่มีความสำคัญต่อการผลิต IC Packaging คือกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ (Gold wire bonding) ที่อยู่ในส่วน FOL เพราะเป็นการเชื่อมต่อวงจรของ IC Packaging โดยใช้ลวดทองคำที่มีขนาดเล็ก (Wang and Sun, 2009) และในกระบวนการต้องใช้เครื่องจักรที่มีความแม่นยำสูงรวมถึงใช้ปัจจัยในการปรับตั้งจำนวนมาก (Kim, and et al., 2017) สำหรับวิธีการเชื่อมลวดทองคำที่ใช้ในกระบวนการนั้นมี 3 วิธีคือ Thermo Compression Bonding (Malik et al., 2014) Ultrasonic Bonding (Mayer and Schwizer, 2002) และ Thermosonic Ball Bonding (Xu et al., 2010) ซึ่งผู้ผลิตแต่ละบริษัทจะเลือกใช้แต่ละวิธีตามเครื่องจักรที่แต่ละบริษัทใช้งาน ถึงแม้ว่าวิธีการเชื่อมลวดทองคำจะมีหลายวิธี แต่ทุกวิธีจะต้องใช้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่เรียกว่าหัวเชื่อมลวดทองคำ (Gold wire bonding Capillary) ซึ่งหัวเชื่อมลวดทองคำนั้นมีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็ก ใช้สำหรับร้อยลวดทองคำเพื่อเชื่อมลงบนวงจร (Gomes, Mayer and Lin, 2015) โดยในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำนั้นจะมีการกำหนดค่ามาตรฐานที่ใช้ทดสอบคุณภาพของการเชื่อม คือค่าแรงดึง (Wire pull) (Chan et al., 2006) และค่าแรงเฉือน (Bond Shear) (Manoharana et al., 2018) ซึ่งจำเป็นจะต้องควบคุมค่าให้ได้ตามค่ามาตรฐาน

สำหรับหัวเชื่อมลวดทองคำเป็นชิ้นส่วนที่มีการกำหนดอายุการใช้งานเป็นจำนวนครั้งที่ทำงาน โดยที่หัวเชื่อมลวดทองคำแต่ละชิ้นอาจจะสามารถใช้งานได้ 1 ล้านครั้งหรือน้อยลงตามสภาวะการใช้งานของงานแต่ละงาน (Chauhan, Zhong and Pecht, 2013) และเมื่อใช้หัวเชื่อมลวดทองคำครบตามจำนวนครั้งแล้วจะต้องทำการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำใหม่แทนของเดิม ซึ่งการกำหนดอายุการใช้งานของผู้ผลิต IC Packaging ในกรณีศึกษานั้น ผู้ผลิตอ้างอิงจากมาตรฐานของผู้ผลิตหัวเชื่อมและจากการกำหนดโดยวิศวกรที่ใช้การวิเคราะห์จากประสบการณ์การทำงานจริง ถ้าการวิเคราะห์เพื่อกำหนดอายุการใช้งานของหัวเชื่อมลวดทองคำ ไม่ครอบคลุมถึงปัจจัยในกระบวนการและสภาวะการทำงานจริง จะทำให้ไม่สามารถใช้งานหัวเชื่อมได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะเสนอวิธีการนำชิ้นส่วนเครื่องจักรที่คาดว่าจะหมดอายุในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ (Gold wire bonding) ของการผลิต IC Packaging กลับมาใช้ใหม่ โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้การออกแบบการทดลอง Design of Experiment (DOE) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยจากสภาวะการทำงานจริงของหัวเชื่อมลวดทองคำ (Lu and Wong, 2017; Prakash et al., 2018) และสร้างสมการแบบจำลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ตามผลตอบของการทำงานและการตรวจสอบควบคุมสภาวะการทำงานให้เป็นไปตามมาตรฐานเพื่อให้มั่นใจว่าการนำชิ้นส่วนมาใช้ใหม่ จะไม่ส่งผลกระทบต่อมาตรฐานที่ใช้ทดสอบสำหรับการเชื่อมคือค่าแรงดึง และค่าแรงเฉือน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบของหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุ
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบของหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุ
- 1.2.3 เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยในการนำหัวเชื่อมลวดทองคำ (Capillary) ที่หมดอายุมาใช้ใหม่
- 1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ ผลตอบของการเชื่อมลวดทองคำ โดยหัวเชื่อมลวดทองคำที่นำกลับมาใช้ใหม่กับหัวเชื่อมลวดที่ยังไม่หมดอายุ
- 1.2.5 เพื่อกำหนดแนวทางการนำหัวเชื่อมลวดทองคำ (Capillary) ที่หมดอายุมาใช้ใหม่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ดำเนินการศึกษาระบวนการเชื่อมลวดทองคำ (Gold wire bonding) โดยใช้เครื่องเชื่อมลวดทองคำรุ่นเดียวกัน
- 1.3.2 ขนาดเส้นลวดทองคำที่ใช้ในการศึกษาจะใช้เส้นลวดทองคำทดลองขนาดเดียวกัน
- 1.3.3 หัวเชื่อมลวดทองคำที่ใช้ในการทดลองจะใช้รุ่นเดียวกัน
- 1.3.4 สลิตเฟรมที่ใช้ในการเชื่อมลวดทองคำจะทดลองรุ่นเดียวกัน
- 1.3.5 ทดสอบค่ามาตรฐานการเชื่อม คือ ค่าแรงดึง (Wire pull) และค่าแรงเฉือน (Bond Shear)
- 1.3.6 หัวเชื่อมลวดทองคำที่นำกลับมาใช้ใหม่จะถูกทดลองใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างน้อยร้อยละ 50 จากอายุการใช้งานเดิมของหัวเชื่อมลวดทองคำ
- 1.3.7 การศึกษาใช้วิธีการออกแบบการทดลอง Design of Experiment (DOE) หาระดับของปัจจัยในการนำหัวเชื่อมลวดทองคำ (Capillary) ที่หมดอายุมาใช้ใหม่

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบแทนของหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุ
- 1.4.2 ได้ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบแทนของหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุ
- 1.4.3 ได้ผลการปรับระดับของปัจจัยที่จะใช้เพื่อนำหัวเชื่อมลวดทองคำ (Capillary) ที่หมดอายุมาใช้ใหม่
- 1.4.4 ได้รับแนวทางการนำหัวเชื่อม (Capillary) ที่หมดอายุมาใช้ใหม่
- 1.4.5 สามารถลดต้นทุนของกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ (Wire bonding) ในการผลิต IC Packaging

1.5 นิยามคำศัพท์

1.5.1 หัวเชื่อมลวดทองคำ (Capillary) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมลวดทองคำมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกและมีรูตรงกลางเพื่อใช้ลวดทองคำร้อยในรูดังกล่าวเพื่อเชื่อมลวดทองคำ

1.5.2 ซิลิคอนเวเฟอร์ (Silicon wafer) คือวงจรของชิ้นงานที่ส่งมาจากผู้ผลิตวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมซึ่งยังไม่ได้แบ่งออกเป็นชิ้นเล็ก เมื่อบริษัทผู้ผลิต IC packaging ได้รับมาแล้วจะต้องขัดเพื่อลดความหนาของซิลิคอนเวเฟอร์จากนั้นจึงตัดออกแบ่งซิลิคอนเวเฟอร์ออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ จะได้เป็นไดหรือวงจรของ IC packaging

1.5.3 ได (DIE) วงจรของ IC Packaging ที่ถูกแบ่งออกมาจากซิลิคอนเวเฟอร์ซึ่งจะมีขนาดเล็กมาก การเชื่อมต่อวงจรบนไดโดยการเชื่อมลวดทองคำจะเป็นการเชื่อมต่อจุดเชื่อมที่หนึ่ง (First bond)

1.5.4 ลีดเฟรม (Lead frame) คือโลหะแผ่นที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยการปั๊มขึ้นรูป (Stamping process) ใช้ในการยึดติดไดซึ่งเป็นวงจรของ IC Packaging โดยในหนึ่งแผ่นจะประกอบด้วยชิ้นงานจำนวนมาก

1.5.5 แพด (PAD) คือตำแหน่งบนลีดเฟรมที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อวงจรโดยจุดเชื่อมที่สอง (Second bond) ซึ่งเป็นจุดที่ใช้เชื่อมต่อลงบนแผงวงจรรวมของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

1.5.6 จุดเชื่อมที่หนึ่ง (First bond) คือจุดที่ใช้ในการเชื่อมต่อวงจรในตำแหน่งแรก ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดที่ลวดทองคำเชื่อมต่อกับตำแหน่งบนได (วงจร) ของ IC Packaging มีลักษณะของการเชื่อมลวดทองคำเป็นทรงกลม ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดที่ใช้ในการทดสอบค่ามาตรฐานต่าง ๆ ของชิ้นงาน

1.5.7 จุดเชื่อมที่สอง (Second bond) คือจุดที่ใช้ในการเชื่อมต่อวงจรในตำแหน่งที่สอง ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดที่ลวดทองคำเชื่อมต่อกับแพดของ IC Packaging โดยในจุดเชื่อมต่อนี้จะมีลักษณะในการเชื่อมต่อเป็นลักษณะแบนไม่เหมือนกับจุดเชื่อมต่อวงจรในจุดเชื่อมที่หนึ่งที่มีลักษณะเป็นทรงกลม

1.5.8 การทดสอบแรงดึง (Wire pull test) คือการทดสอบมาตรฐานของชิ้นงาน IC Packaging โดยใช้หัวทดสอบที่มีลักษณะเป็นตะขอ ซึ่งใช้ในการเกี่ยวบริเวณจุดเชื่อมที่หนึ่งและดึงขึ้นในแนวตรง จนกว่าลวดจะขาด จากนั้นจึงบันทึกแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น

1.5.9 การทดสอบแรงเฉือน (Bond shear test) คือการทดสอบมาตรฐานของชิ้นงาน IC Packaging โดยใช้หัวทดสอบที่มีลักษณะเป็นเหล็กลม ดันบริเวณจุดเชื่อมที่หนึ่งโดยใช้แรงขนานกับแนวเชื่อม ซึ่งจะดันจนกระทั่งรอยเชื่อมหลุด จากนั้นจึงบันทึกแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้น

บทที่ 2

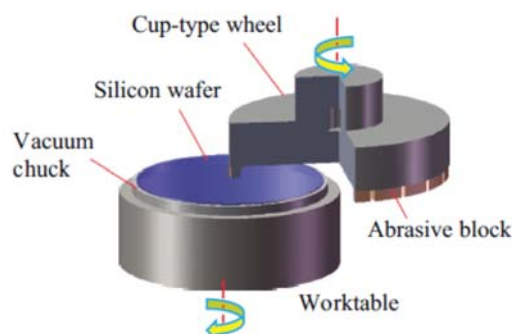
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ประเภท IC PACKAGING

ในการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ประเภท IC PACKAGING สามารถแบ่งกระบวนการผลิตออกเป็น 2 ส่วน คือ Front of Line (FOL) และ End of Line (EOL) ซึ่งใน 2 กระบวนการผลิตหลักดังกล่าว ยังสามารถแบ่งเป็นกระบวนการย่อยได้จำนวน 9 กระบวนการ ดังนี้

2.1.1 กระบวนการเจียรไนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ (Silicon wafer Grinding)

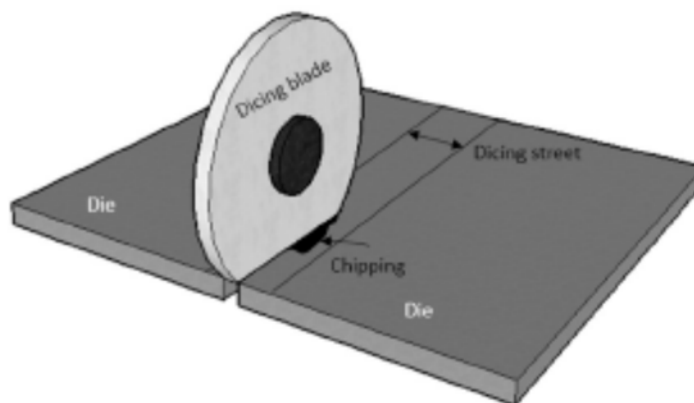
กระบวนการนี้เป็นกระบวนการลดความหนาของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ (Silicon Wafer) เพื่อให้ได้ความหนาตามที่ผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต้องการ สาเหตุที่จำเป็นต้องมีกระบวนการเจียรไนนั้น มาจากปัญหาการขนส่งเนื่องจากแผ่นเวเฟอร์สร้างจากซิลิคอนมีลักษณะคล้ายแผ่นกระจก ซึ่งแตกหักเสียหายง่าย ดังนั้นในการผลิตแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ผู้ผลิตแผ่นเวเฟอร์จะผลิตให้แผ่นเวเฟอร์มีความหนามากกว่าที่บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต้องการ เพื่อให้ง่ายต่อการขนย้ายและลดโอกาสที่จะเกิดการแตกหักเสียหายระหว่างส่งมอบ เช่น บริษัทผู้ผลิตแผ่นเวเฟอร์จะผลิตแผ่นเวเฟอร์ขนาดความหนา 24 ไมโครเมตร ในขณะที่บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์มีความต้องการแผ่นเวเฟอร์ขนาดความหนา 10 ไมโครเมตร สำหรับกระบวนการเจียรไนแผ่นเวเฟอร์จะเริ่มจากการใช้แผ่นพลาสติกที่มีกาวมาติดบริเวณด้านหน้าของแผ่นเวเฟอร์ (ด้านที่เป็นวงจร) เพื่อป้องกันเศษซิลิคอนจากการเจียรไน (Grinding) หลุดเข้าไปในส่วนที่เป็นวงจรและใช้เครื่องเจียรไนละเอียด ลดขนาดความหนาของแผ่นเวเฟอร์ลง ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งในขณะที่ทำการเจียรไนอยู่นั้น จะต้องมีการหล่อด้วยน้ำ Demineral Water (DI) หรือน้ำที่มีการนำเอาเศษตะกอนและสารแขวนลอยต่าง ๆ ออกหมดแล้ว ซึ่งน้ำดังกล่าวนี้มีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้า เมื่อทำการเจียรไนจนได้ขนาดตามที่ผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต้องการแล้ว จะใช้แผ่นกาวที่มีความเหนียวมากกว่าแผ่นพลาสติกที่ติดอยู่บนผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ติดลงบนแผ่นพลาสติก และลอกแผ่นพลาสติกออกเพื่อนำเข้ากระบวนการสุ่มตรวจสอบความเสียหายของชิ้นงาน กรณีที่ไม่พบความเสียหายจะนำแผ่นเวเฟอร์เข้ากระบวนการตัดเพื่อแยกออกเป็นชิ้นต่อไป



ภาพที่ 2.1 กระบวนการเจียรไนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ (Silicon wafer Grinding)
ที่มา: Yin et al. (2018: 173)

2.1.2 กระบวนการตัดแยกแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ (Silicon wafer Saw)

กระบวนการนี้เริ่มต้นโดยการนำแผ่นเวเฟอร์ที่ผ่านกระบวนการเจียรไน ดัดลงบนแผ่นพลาสติกที่มีกาวเพื่อยึดแผ่นเวเฟอร์จากนั้นจึงนำแผ่นเวเฟอร์ที่ติดแผ่นพลาสติกเรียบร้อยแล้ว ไปติดกับแผ่นที่ทำจากโลหะเรียกว่าริงเฟรม (Ring Frame) แล้วจึงนำเข้าเครื่องตัดเพื่อแยกวงจรที่อยู่บนเวเฟอร์ออกเป็นชิ้น ๆ ซึ่งเราจะเรียกว่าการแยกได (DIE) ซึ่งในหนึ่งเวเฟอร์จะมีวงจรหรือไดอยู่จำนวนมาก สำหรับอุปกรณ์ในการตัดแผ่นเวเฟอร์นั้น จะใช้ใบเลื่อยลักษณะเป็นวงกลมทำจากกากเพชรหมุนตัดเพื่อแยกไดออกเป็นชิ้น ๆ โดยจะหมุนตามแนวแกน X และแนวแกน Y ดังภาพที่ 2.2 ในขณะตัดจะใช้น้ำ DI ฉีดลงบนผิวเพื่อล้างเศษของซิลิคอนจากการตัด ในกระบวนการตัดไดจะไม่ตัดให้ขาดจนถึงแผ่นพลาสติกที่ติดอยู่ด้านล่างควบคุมไม่ให้เกิดความเสียหายและเกิดการหลุดร่วนของได



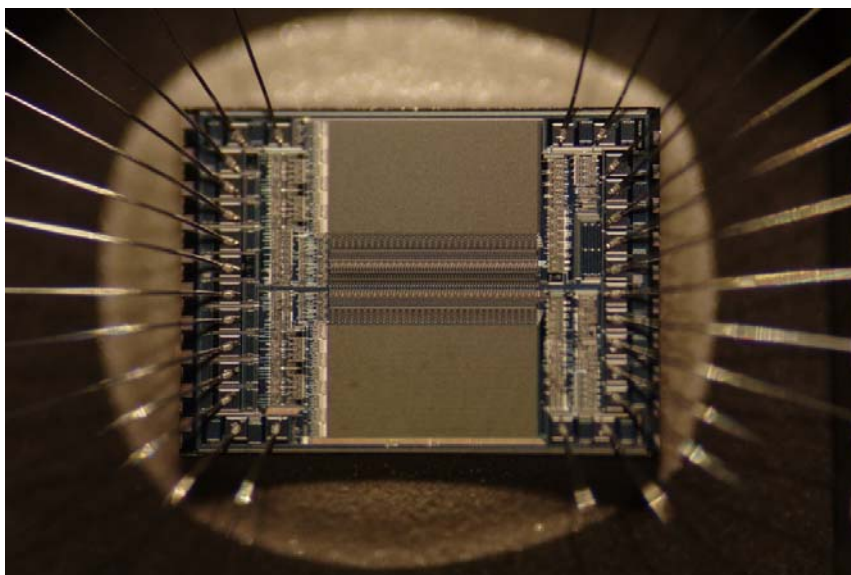
ภาพที่ 2.2 กระบวนการตัดแยกแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ (Silicon wafer Saw)

ที่มา: Su et al. (2018: 258)

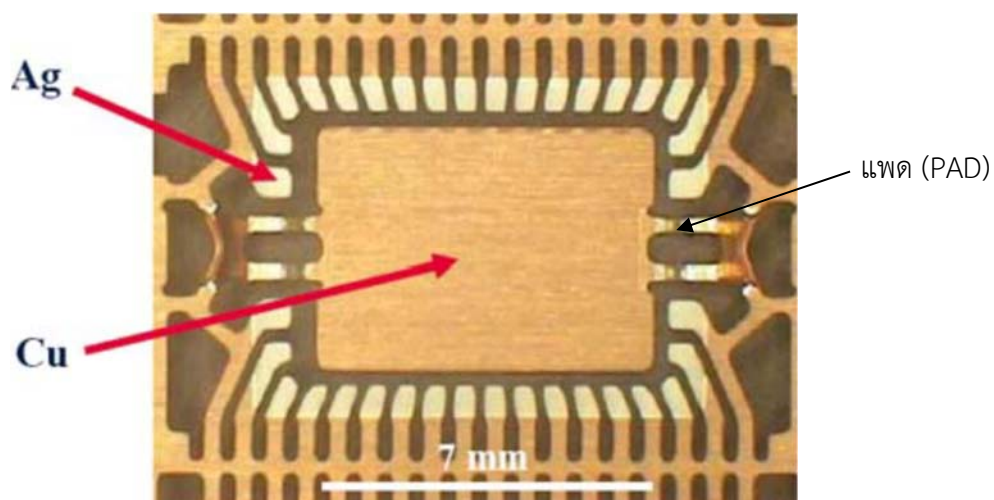
2.1.3 กระบวนการไดแอตแทค (DIE Attach)

กระบวนการไดแอตแทค (DIE Attach) เป็นกระบวนการที่นำไดที่มีลักษณะเป็นวงจรมีขนาดเล็กที่มีจุดต่อเชื่อมวงจรจำนวนมากซึ่งได้ จากกระบวนการตัดแยกแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ดังภาพที่ 2.3 มาติดยึดลงบนโลหะที่มีลักษณะเป็นขาที่แยกออกจากกัน เรียกว่าลีดเฟรม (Lead Frame) โดยในขั้นต้นนั้นลีดเฟรมจะมีหลายชิ้นติดอยู่ด้วยกันลักษณะเป็นแผงเพื่อสะดวกแก่การทำงานของเครื่องจักร ส่วนประกอบอื่นที่สำคัญของลีดเฟรมอีกส่วนหนึ่งคือส่วนที่เป็นขาของลีดเฟรมเรียกว่าแพด (PAD) ซึ่งแพดเป็นจุดที่ใช้เชื่อมต่อวงจรโดยใช้ลวดทองคำเชื่อมต่อวงจรระหว่างวงจรของไดที่วางบนลีดเฟรมและแพด โดยที่ลีดเฟรมแต่ละประเภทจะมีลักษณะรูปร่าง จำนวนแพดและวัสดุที่แตกต่างกันไป เป็นไปตามมาตรฐานที่ลูกค้าเป็นผู้กำหนด ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งในกระบวนการไดแอตแทคนั้นจะใช้เครื่องจักรอัตโนมัติในการหยิบไดวางลงบนลีดเฟรมในแต่ละจุด สำหรับพื้นที่ในการยึดติดไดกับลีดเฟรมนั้น จะใช้พื้นที่บริเวณกึ่งกลางของลีดเฟรม ดังภาพที่ 2.5 สำหรับการประกอบไดกับลีดเฟรมมีตัวประสานที่นิยมใช้ 2 ประเภท แบ่งตามวัตถุประสงค์ที่ถูกกำหนดโดยลูกค้า ประเภทแรกจะใช้สารประเภทอีพ็อกซี่ (Epoxy) โดยการยึดติดประเภทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อยึดติดไดเข้ากับลีดเฟรม

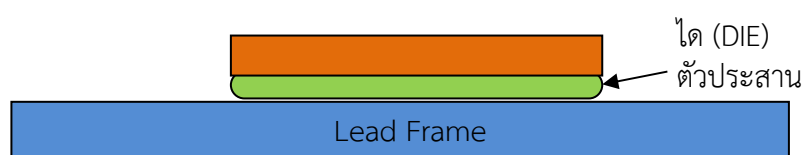
เพียงอย่างเดียว ประเภทที่สองเป็นการยึดติดได้กับลีดเฟรมด้วย ทองคำ ซิลิคอนหรือสารอื่น ๆ ซึ่งการยึดติดรูปแบบนี้จะมีผลทางไฟฟ้าต่อชิ้นงาน



ภาพที่ 2.3 ลักษณะของได (DIE) ที่เป็นวงจรขนาดเล็กที่ผ่านการตัดแยกออกเป็นชิ้นจากเวเฟอร์
ที่มา: Eprom Microchip (2019: Website)



ภาพที่ 2.4 ลักษณะของลีดเฟรม (Lead Frame)
ที่มา: Li (2010: 295)



ภาพที่ 2.5 ลักษณะการติดไดลงบนลีดเฟรมในกระบวนการไดแอตแทค (DIE Attach)

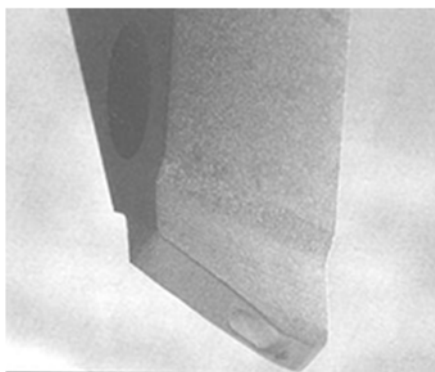
2.1.4 กระบวนการเชื่อมลวดทองคำ (Gold wire bonding)

กระบวนการเชื่อมลวดทองคำ (Gold wire bonding) เป็นกระบวนการที่ใช้วัสดุนำสัญญาณซึ่งมีหลายประเภท เช่น ทองคำ เงิน หรือวัสดุที่นำสัญญาณอื่น ๆ ทั้งนี้การเลือกใช้ลวดเชื่อมจะเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า เนื่องจากการเลือกใช้ลวดเชื่อมแต่ละชนิดส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตชิ้นงาน สำหรับเครื่องจักรที่ใช้กระบวนการเชื่อมลวดทองคำ จะใช้เครื่องจักรที่มีความแม่นยำสูง ดังภาพที่ 2.6 เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดเล็กและต้องการความแม่นยำในการเชื่อมลวดทองคำลงบนวงจรของไอซี สำหรับชิ้นส่วนสำคัญของเครื่องจักรที่ใช้ในการเชื่อมเรียกว่าหัวเชื่อมลวด (Capillary) มีลักษณะเป็นแท่งโลหะที่มีรูเพื่อร้อยลวดเชื่อม ดังภาพที่ 2.7 ซึ่งจะใช้กดลงบนวงจรของไอซีเพื่อให้ลวดติดกับวงจร โดยวิธีการสันสะท้อนหรือการใช้ความร้อนร่วมด้วย สำหรับรูปแบบของการเชื่อมลวดบนชิ้นงานแต่ละรุ่นนั้นจะมีวิธีและลักษณะ ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของลิตเฟรมหรือข้อกำหนดของลูกค้า โดยที่ในกรณีศึกษาของงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้เลือกศึกษาลวดทองคำเพราะเป็นวัสดุที่ใช้อยู่ในบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนในกรณีศึกษา



ภาพที่ 2.6 ลักษณะของเครื่องเชื่อมลวดทองคำ (Gold wire Bonding Machine)

ที่มา: Moh (2008: 1)



ภาพที่ 2.7 ลักษณะของหัวเชื่อมลวด (Capillary)

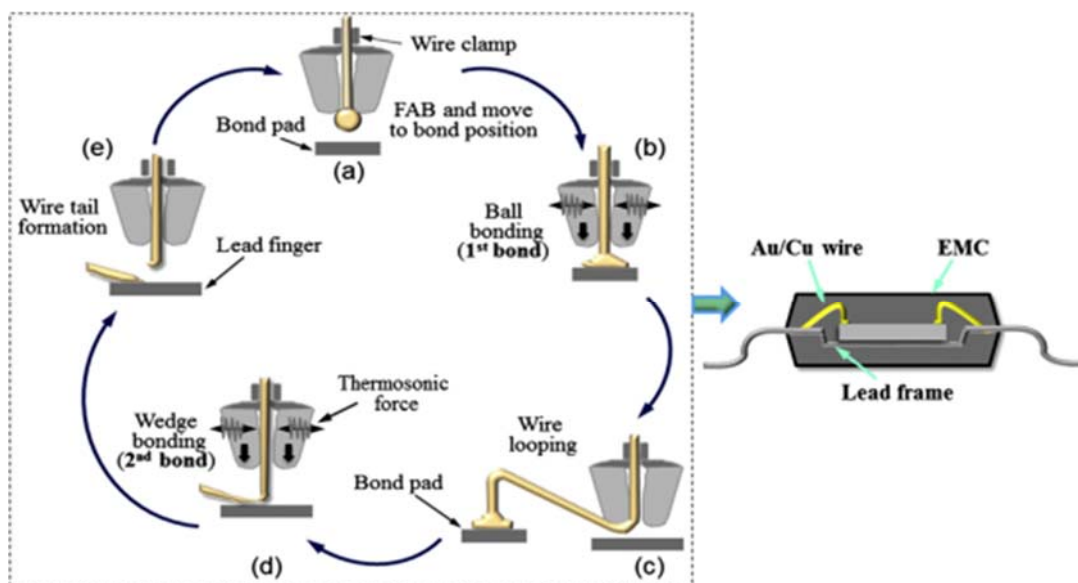
ที่มา: พิมพ์ลอย เดชภิรัตน์มงคล (2555: 9)

กระบวนการเชื่อมลวดทองคำสำหรับผลิตภัณฑ์ IC Packaging มี 3 วิธีคือ

2.1.4.1 Thermo compression bonding เป็นวิธีการที่ใช้ความร้อนร่วมกับแรงกดเพื่อเชื่อมต่อวงจร (Malik et al., 2014) โดยกระบวนการทำงานจะเริ่มจากการสอดลวดทองคำเข้าไปในหัวเชื่อมลวดทองคำที่ผ่านการให้ความร้อน จากนั้นจะนำหัวเชื่อมลวดทองคำไปกดลงบนวงจรของไดโอดจนลวดทองคำติดกับวงจรบนไดโอดและยกหัวเชื่อมลวดทองคำมากดลงบนแพดจนลวดทองคำขาดเพื่อเชื่อมต่อวงจร และจึงเริ่มกระบวนการในจุดอื่นต่อไป

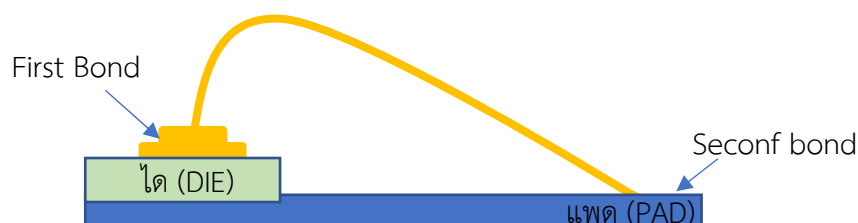
2.1.4.2 Ultrasonic Bonding เป็นวิธีการที่ใช้แรงกดร่วมกับการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมด้วยความถี่สูงจนเกิดแรงเสียดทานและทำให้เกิดความร้อน (Mayer and Schwizer, 2002) จนเกิดการยึดติดระหว่างลวดเชื่อมทองคำและแพด โดยวิธีการทำงานจะสอดลวดเข้าไปในหัวเชื่อมลวดทองคำ จากนั้นจึงใช้ความถี่สูงในการทำให้เกิดความร้อนจนเกิดการเชื่อมประสานแล้วจึงยกหัวเชื่อมลวดทองคำไปที่แพด และใช้ความร้อนกับความถี่สูงเพื่อยึดติดลวดลงบนแพด สำหรับในตำแหน่งอื่น ๆ จะใช้วิธีการเดียวกันจนครบทุกจุด

2.1.4.3 Thermosonic Ball Bonding เป็นวิธีการที่ใช้ความร้อนและความถี่สูงในการเชื่อมลวดทองคำ (Xu et al., 2010) บนวงจรของไดโอดและแพด ซึ่งในกระบวนการทำงานนั้นจะสอดลวดเชื่อมเข้าไปในหัวเชื่อมลวดทองคำและให้ความร้อน เพื่อให้ลวดละลายจนมีลักษณะเป็นลูกบอลกลมขนาดตามพื้นที่ของวงจรบนไดโอด จากนั้นจึงกดลูกบอลที่หลอมละลายลงบนวงจรของไดโอดและใช้ความถี่สูงเพื่อให้เกิดการยึดติด และยกหัวเชื่อมและนำไปวางลงบนแพด จากนั้นจึงใช้ความร้อนและความถี่สูงเชื่อมต่อระหว่างลวดและแพดจนลวดขาด สำหรับตำแหน่งอื่น ๆ จะใช้กระบวนการเดียวกันกับที่กล่าวมาข้างต้น ดังภาพที่ 2.8 สำหรับกระบวนการ Thermosonic Ball Bonding จะแตกต่างกับวิธี Ultrasonic bonding คือจะมีการให้ความร้อนจนลวดมีลักษณะเป็นลูกบอลทรงกลมในขณะที่วิธี Ultrasonic bonding จะใช้ความถี่สูงเพื่อเชื่อมประสานและไม่ได้ทำให้ลวดเกิดการละลายจนเป็นลูกบอลทรงกลม



ภาพที่ 2.8 กระบวนการเชื่อมลวดทองคำแบบ Thermosonic Ball Bonding
ที่มา: Yeh and Tsai (2014: 288)

สำหรับกระบวนการเชื่อมลวดทองคำทั้ง 3 วิธีที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะมีกระบวนการเชื่อมลวดในลักษณะเดียวกัน คือการเชื่อมลวดทองคำลงบนไดจุดแรกจะเรียกว่า First bond และจุดที่สองจะเป็นการเชื่อมต่อวงจรลงบนส่วนที่เป็นแพดหรือส่วนที่เป็นลิตเฟรมเรียกว่า Wadge หรือ Second bond ดังที่แสดงในภาพที่ 2.9

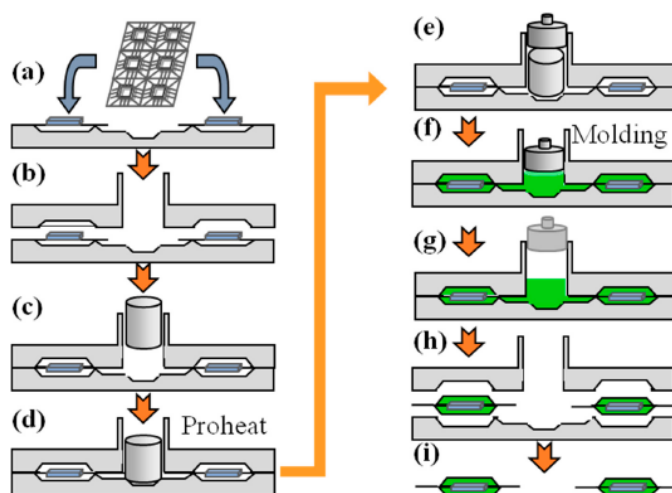


ภาพที่ 2.9 การแสดงจุดที่ทำการเชื่อมลวดทองคำ

2.1.5 กระบวนการโม่ล (Molding)

กระบวนการโม่ล (Molding) เป็นกระบวนการที่นำเอาชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมลวดที่ทำจากวัสดุต่าง ๆ ดังเช่นในงานวิจัยนั้นใช้ทองคำเป็นวัสดุในการเชื่อมต่อวงจร นำเข้าสู่กระบวนการฉีดพลาสติก เซรามิก หรือสารผสมประเภทอื่น ๆ เพื่อคลุมผิวหน้าของชิ้นงานบริเวณด้านหน้าของไดที่มีการเชื่อมต่อด้วยลวดทองคำแล้ว เพราะบริเวณดังกล่าวเกิดการเสียหายได้ง่าย การโม่ล (Mold) ยังช่วยป้องกันการกระแทกกระเทือนอื่น ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นกับวงจรภายในของชิ้นงานได้ด้วย โดยในขั้นตอนดังกล่าวนี้จะมีรูปแบบในการโม่ลที่ต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่บริษัทเป็นผู้กำหนด แต่โดยทั่วไปจะแบ่งตามลักษณะของลิตเฟรมที่ทำการโม่ล ซึ่งในกระบวนการทำงานนั้นจะมีปัจจัยในการปรับตั้งหลายปัจจัยเช่น ความร้อน แรงยึด แรงอัด แรงดัน และปัจจัยเวลา

(Ivankovic et al., 2012) หนึ่งในสารประกอบที่มักนำมาใช้ในกระบวนการคือ อีพ็อกซี (Epoxy) ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทฟอสฟอรัสหรือสารประกอบอื่น ๆ เพื่อให้เกิดลักษณะของการเป็นฉนวนไฟฟ้า โดยกระบวนการในการทำงานนั้นจะเริ่มจากการนำลิตเฟรมที่เชื่อมต่อวงจรแล้วใส่เข้าไปในโมลและนำสารประกอบที่ต้องการใส่เข้าไปในเครื่องจักร จากนั้นจึงทำการให้ความร้อนและใช้แรงดันอัดเพื่อดันสารประกอบเข้าไปในโมล เพื่อให้เกิดการเคลือบบริเวณวงจร ดังที่แสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 กระบวนการโมล (Mold) ของ IC Packaging
ที่มา: Hung (2016: 2)

2.1.6 การตรวจสอบความสมบูรณ์ของไอซี (Post Mold Cure)

เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการโมล (Mold) หรือการฉีดสารประกอบลงบนชิ้นงานเพื่อคลุมบริเวณผิวหน้าของชิ้นงานเพื่อป้องกันการกระแทกกระเทือนของชิ้นงานแล้ว ในขั้นตอนถัดไปจะนำชิ้นงานเข้าอบเพื่อให้สารประกอบแข็งตัว (กิจติศักดิ์ บัวคง, 2557) ในการทำงานจะนำชิ้นงานเข้าอบในเตาอบดังภาพที่ 2.11 ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีการละลายสารประกอบที่เคลือบอยู่บนชิ้นงานบางชิ้นเพื่อสุ่มตรวจสอบตำแหน่งของลวดทองคำว่าการเคลื่อนตัวหรือไม่และทำการตรวจสอบปัญหาอื่น ๆ จากการโมล เช่น การเกิดฟองอากาศซึ่งในการตรวจสอบจำเป็นต้องใช้การ X-Ray



ภาพที่ 2.11 ลักษณะเตาอบ Post Mold Cure
ที่มา: Maynards (2019: Website)

2.1.7 กระบวนการเคลือบผิวด้วยตะกั่ว (Solder paste)

กระบวนการเคลือบผิวด้วยตะกั่ว (Solder paste) เป็นกระบวนการที่ทำการชุบเคลือบสารเคมีเช่น ตะกั่ว ลงบนขาสีดเฟรมบริเวณด้านข้างของชิ้นงาน สำหรับวัสดุที่ใช้ทำแผ่นลีดเฟรมส่วนใหญ่ใช้แผ่นโลหะทองแดงที่มีโลหะอื่นผสม เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรง เช่น เหล็ก และโครเมียม เป็นต้น (วิญญู จิตสัมพันธ์เวช, ภัณฑิรา เกตุแก้ว และอารยา อุไรกุล, 2557) โดยที่จุดที่ชุบเคลือบสารเคมีนั้นเป็นส่วนที่จะต้องนำไปประกอบลงบนแผงวงจรรวม (Printed Circuit Board: PCB) โดยวัตถุประสงค์ในการชุบสารเคลือบบริเวณขาของลีดเฟรมเพราะจุดดังกล่าวเป็นจุดที่ทำการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ตัวชิ้นงานเพื่อให้วงจรนั้นครบสมบูรณ์ ซึ่งในกระบวนการทำงานจะต้องพิจารณาถึงผิวชุบที่ขาของลีดเฟรมจะต้องมีความสม่ำเสมอ

2.1.8 การตัดพัชชาและแยกขาไอซี Deflash Trim Form Singulation (DTFS)

ในกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่รวมการทำงานหลายกระบวนการย่อยเข้าด้วยกัน โดยที่ชิ้นงานก่อนจะเข้ากระบวนการ DTFS นั้น ชิ้นงานจะยังมีลักษณะติดกันเป็นแผงตามลักษณะของแผ่นลีดเฟรม สำหรับกระบวนการ DTFS นั้นสามารถแบ่งแยกขั้นตอนการผลิตได้ดังนี้ กระบวนการ Deflash (D) ทำหน้าที่ตัดสารประกอบส่วนที่เกินออกจากตัวไอซี กระบวนการ Trim (T) เป็นกระบวนการที่ตัดปลายขาหรือบริเวณลีดเฟรมที่ยื่นออกมาเกินบริเวณที่ทำการโมลเพื่อให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน กระบวนการ Form (F) เป็นกระบวนการที่ทำหน้าที่พัชชาตามรูปทรงของชิ้นงานซึ่งอาจแบ่งออกได้หลายประเภท กระบวนการ Singulation (S) ทำหน้าที่ตัดแยกให้ชิ้นงานให้ขาดออกจากกันเป็นชิ้น ๆ เพื่อนำเข้ากระบวนการต่อไป

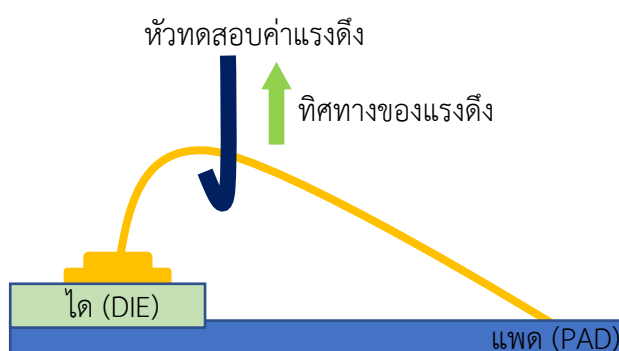
2.1.9 การทดสอบ (Test)

เป็นกระบวนการที่นำชิ้นงานที่ผ่านการผลิตแล้วมาทำการทดสอบ ทั้งการทดสอบค่าสัญญาณและรวมถึงอาจมีการนำกรดมากัดชิ้นงานเพื่อละลายอีพอกซีที่ตัวชิ้นงานเพื่อสุ่มทดสอบทางกายภาพ ดังเช่นการทดสอบค่า Wire Pull (การทดสอบแรงดึงของลวดทองคำ) Bond Shear (การทดสอบค่าแรงเฉือนของลวดทองคำ) เป็นต้น

2.2 การตรวจสอบคุณภาพการเชื่อมลวดทองคำตามมาตรฐาน

2.2.1 การทดสอบค่า Wire Pull (การทดสอบแรงดึงของลวดทองคำ)

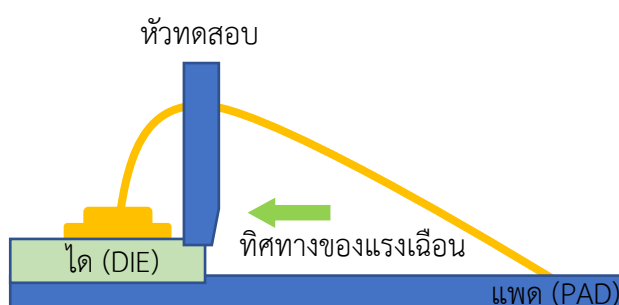
กระบวนการทดสอบค่าแรงดึงนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบแรงยึดติดของเส้นลวดที่ยึดอยู่บนวงจรบนไดและแพดของลิตเฟรมตามมาตรฐานของลูกค้า ซึ่งเป็นการทดสอบแบบทำลาย มีวิธีการทำงานดังนี้ การทำงานเริ่มต้นจากการใช้ตะขขนาดเล็กดึงเส้นลวดทองคำที่เชื่อมติดกับวงจร โดยดึงเป็นแนวเส้นตรงจนกว่าเส้นลวดจะขาด หรือดึงจนกว่าส่วนวงจรส่วนที่ยึดติดกับเส้นลวดหลุดออกเสียหาย (Chan et al., 2006) และขณะที่ทำการทดสอบแรงดึงนั้น ค่าแรงดึงสูงสุดจะถูกบันทึกเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของลูกค้า ดังที่แสดงลักษณะการทดสอบค่า Wire pull ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ลักษณะการทดสอบแรงดึง Wire pull

2.2.2 การทดสอบค่า Bond Shear (การทดสอบแรงเฉือนของลวดทองคำ)

การทดสอบค่า Bond Shear (การทดสอบแรงเฉือนของลวดทองคำ) เป็นการทดสอบแบบทำลายโดยการใช้หัวทดสอบที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ดันเส้นลวดทองคำบริเวณ First bond ที่ยึดอยู่บนวงจรจนกระทั่งเส้นลวดนั้นหลุดหรือแตกหักออกจากวงจร (Manoharana et al., 2018) โดยในการทดสอบนั้นจะให้แรงในการทดสอบเป็นแนวเส้นตรงขนานกับการยึดติด ซึ่งจะดันจนกว่าบริเวณที่ยึดติดจะหลุดออกจากวงจรและจะบันทึกค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ได้ (Mazzei et al., 2014) จากนั้นจึงนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของลูกค้าเพื่อควบคุมแรงเฉือนของเส้นลวดที่ยึดอยู่บนวงจรบนไดและแพดของลิตเฟรม ดังที่แสดงลักษณะการทดสอบค่า Bond Shear ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ลักษณะการทดสอบแรงเฉือน Bond Shear

2.3 การออกแบบการทดลอง

2.3.1 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

การใช้วิธีทางสถิติในการออกแบบการทดลอง มีความจำเป็นที่ผู้วิจัยจะต้องมีความเข้าใจสิ่งที่กำลังศึกษา และขั้นตอนการเก็บข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งแนวทางของการออกแบบการทดลอง (สรรรฐติชัย ชิวสุทธิศิลป์, 2555) นั้นมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.3.1.1 กำหนดปัญหาเป้าหมายและวัตถุประสงค์ในการทดลอง การกำหนดปัญหาและขอบเขตของปัญหาควรศึกษาจากปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการหรือจากข้อร้องเรียนของลูกค้า ซึ่งการกำหนดปัญหาจะต้องกำหนดให้ชัดเจนว่าจะศึกษากับผลิตภัณฑ์ใด โดยก่อนการทดลองจะต้องทำความเข้าใจรวมถึงศึกษาปัญหอย่างละเอียด หรือศึกษาจากงานวิจัย ผังกระบวนการ (Flow Process Chart) จากข้อกำหนดที่สำคัญของลูกค้า ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้นได้มากขึ้น โดยที่การกำหนดปัญหานั้นไม่ควรกำหนดปัญหาที่ซับซ้อนหรือขนาดของปัญหาใหญ่เกินไปเพราะอาจเกิดความผิดพลาดได้ง่าย ในกรณีที่ขนาดของการทดลองที่มีขนาดใหญ่ควรทำการทดลองแบบเป็นลำดับขั้น ซึ่งการทดลองแบบเป็นลำดับขั้นนั้น สามารถแบ่งชุดการทดลองขนาดใหญ่ออกเป็นชุดการทดลองย่อยหลายชุด (Sequential Approach) และยังทำให้การนำข้อมูลไปวิเคราะห์เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น

2.3.1.2 การเลือกตัวแปรผลตอบในการเลือกตัวแปรผลตอบที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย จะต้องแน่ใจว่าตัวแปรผลตอบนั้นมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการ ซึ่งการเลือกตัวแปรผลตอบนั้นสามารถใช้ข้อมูลจากการศึกษากระบวนการหรือจากข้อกำหนดของลูกค้ามาวิเคราะห์ร่วมด้วย โดยในการกำหนดตัวแปรผลตอบจะต้องตรงกับเป้าหมาย วัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษาและจำเป็นจะต้องกำหนดวิธีการวัดผลของตัวแปรและผลตอบให้แน่ชัดก่อนที่จะดำเนินการวิจัย

2.3.1.3 การศึกษาความสามารถของระบบการวัดผลตอบ ผลการทดลองเป็นข้อมูลสำคัญในงานวิจัย ซึ่งได้จากขั้นตอนการวัดผลจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาและประเมินความสามารถของเครื่องมือวัดและผู้วัด โดยเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัยจะต้องมีการบำรุงรักษา มีการสอบเทียบ และการฝึกอบรมพนักงานในการใช้เครื่องมืออย่างสม่ำเสมอ รวมถึงควรมีการกำหนดขั้นตอนการใช้เครื่องมือวัดและการวัดอย่างเป็นมาตรฐาน ซึ่งถ้าเครื่องมือวัดไม่มีความสามารถตามมาตรฐานจะส่งผลให้ข้อมูลผลตอบที่ได้นั้นมีความผิดพลาด ส่งผลให้ความสามารถในการวิเคราะห์และแยกแยะผลกระทบของปัจจัยหรือไม่สามารถตรวจสอบผลกระทบของปัจจัยที่มีค่าน้อยได้ ในกรณีนี้อาจจะสามารถป้องกันด้วยการทดลองซ้ำหลายครั้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองเพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัด

2.3.1.4 การเลือกปัจจัย ระดับและขอบเขต การเลือกปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลองนั้นควรเลือกเฉพาะปัจจัยที่คาดว่าจะมีความสำคัญ สามารถควบคุมได้ หรือปัจจัยที่สนใจศึกษาในจำนวนที่เหมาะสมเท่านั้น ส่วนปัจจัยที่เหลือนั้นต้องควบคุมให้คงที่ตลอดการทดลอง สำหรับปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้นั้นควรใช้หลักการสุ่ม โดยการรวบรวมปัจจัยนั้นควรเลือกมาจากข้อมูลหลากหลายแหล่ง ซึ่งอาจเริ่มต้นจากการระดมความคิดเห็นจากผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการที่สนใจศึกษา ในกระบวนการนี้ควรทำการศึกษาและค้นคว้าอย่างละเอียด เพราะจะช่วยประหยัดเวลาและทรัพยากรในการทดลองอย่างมาก สิ่งที่มีความจำเป็นจะต้องเตรียมศึกษาในขั้นตอนนี้คือ

1) ปัจจัยที่ควบคุมระดับของปัจจัยได้ (Controllable Factors) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ประเภทที่หนึ่งกล่าวได้ว่าเป็นปัจจัยที่ควรถูกเลือกนำมาศึกษา (Potential Design Factors) คือปัจจัยคาดว่าน่าจะมีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ และผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาซึ่งเมื่อปรับเปลี่ยนระดับของปัจจัยแล้วส่งผลต่อผลตอบในการทดลอง ประเภทที่สองปัจจัยควบคุม (Held-Constant Factors) คือปัจจัยที่อาจมีผลต่อผลตอบในการทดลองแต่ผู้วิจัยไม่มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของปัจจัยเหล่านี้ ดังนั้นจึงต้องควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ตัวอย่างเช่น เครื่องจักรที่ทดลองหรือคนที่ทำการทดลอง เป็นต้น

2) ปัจจัยรบกวนที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factors) คือปัจจัยที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามธรรมชาติ และไม่สามารถควบคุมได้ในกระบวนการหรือควบคุมได้ยาก ในการทดลอง ดังนั้นจึงไม่ควรเลือกปัจจัยเหล่านี้มาใช้ในการศึกษาเพราะไม่สามารถที่จะปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยเหล่านั้นได้ ปัจจัยเหล่านี้แม้ว่าจะไม่สามารถควบคุมได้แต่ก็อาจจะมีผลต่อการทดลอง ดังนั้นเพื่อลดผลของปัจจัยรบกวน ผู้วิจัยจึงควรเลือกประยุกต์ใช้หลักการสุ่ม

3) การคัดกรองปัจจัยเบื้องต้นจะให้ผลดีต่อการทดลองในกรณีที่จำนวนปัจจัยในการทดลองมีจำนวนมากเกินกว่าที่จะทำการทดลองได้ จะส่งผลให้การใช้ทรัพยากรในการทดลองมีจำนวนมากขึ้น หรือส่งผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการทดลองมีเวลาที่จำกัด การคัดกรองปัจจัยเบื้องต้นอาจใช้วิธีการประเมินโดยให้คะแนนโดยผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ในการผลิตและมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการที่ศึกษา เพื่อคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะเกี่ยวข้องในเบื้องต้น

4) การกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยที่จะใช้สำหรับการศึกษาทดลองจะทำหลังจากคัดกรองปัจจัยเบื้องต้นแล้ว โดยมีกระบวนการในการทำงานจากการกำหนดระดับของแต่ละปัจจัย โดยการพิจารณากระดับของแต่ละปัจจัยของการทดลอง ในช่วงการเริ่มศึกษากระบวนการหรือในขั้นตอนคัดกรองปัจจัยควรเลือกระดับของแต่ละปัจจัยในการศึกษาหรือขอบเขตให้กว้างที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อเรียนรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ จากนั้นในขั้นตอนต่อไปคือการศึกษาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลให้ผลตอบของกระบวนการมีค่าที่ดีที่สุด

2.3.1.5 การเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม ในขั้นตอนนี้ผู้ทดลองควรจะต้องกำหนดวัตถุประสงค์ในการทดลองให้ชัดเจน เพื่อให้ผู้ทดลองสามารถเลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองและวิธีการทดลองให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องและแม่นยำ โดยที่ในงานวิจัยฉบับนี้จะเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการและใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิต

2.3.1.6 ทำการทดลอง หลักการสำคัญพื้นฐานที่จะใช้ในการทดลองประกอบด้วย 3 ประการ คือการทดลองซ้ำ การสุ่ม และการควบคุม ทั้งนี้หลักการพื้นฐานเหล่านี้ จะช่วยให้ผลการทดลองเกิดความถูกต้องและแม่นยำในการทดลองมากยิ่งขึ้น

1) การทดลองซ้ำ (Replication) คือการทดลองภายใต้เงื่อนไขของ การทดลองแบบเดียวกันมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการทดลองเพิ่มมากขึ้น เมื่อจำนวนการทดลองเพิ่มมากขึ้นจะช่วยให้สามารถประมาณความคลาดเคลื่อนในการทดลองและยังช่วยให้การทดลองแม่นยำขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละการทดลองลดลง รวมถึงจะส่งผลให้

การวิเคราะห์และผลการสรุปจากการทดลองมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสรุปประโยชน์จากการทดลองซ้ำได้ดังนี้ การทำซ้ำช่วยให้ผู้ทดลองสามารถประมาณค่าความผิดพลาดในการทดลองได้ซึ่งใช้สำหรับเปรียบเทียบกับผลของปัจจัยที่สนใจศึกษาได้

2) การสุ่ม (Randomization) คือหลักการสำคัญพื้นฐานอย่างหนึ่งซึ่งเป็นการจัดลำดับในการทดลองให้เป็นแบบสุ่มเป็นการช่วยลดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ผลการทดลองซึ่งเกิดปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ โดยการสุ่มนั้นจะช่วยกระจายความผิดพลาดในการทดลองที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ไปสู่ทุก ๆ การทดลองด้วยโอกาสและขนาดเท่า ๆ กันเพื่อให้ความผิดพลาดในการวิเคราะห์ผลเกิดขึ้นน้อยที่สุด

3) การควบคุม (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงในการทดลอง (Precision) ในการทดลองป้องกันการรบกวนจากปัจจัยภายนอก (Noise, Nuisance และ Factors) โดยจะใช้ควบคุมปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ซึ่งจะลดความผิดพลาดในการทดลอง ในกรณีที่การทดลองมีบล็อกเดียวกันหมายถึงการควบคุมสภาวะในการทดลองให้มีสภาพเหมือนกันมากที่สุด เช่นวัสดุที่ใช้ทดลองจะต้องเป็นวัสดุชุดเดียวกัน ใช้เครื่องจักรเครื่องเดียวกันผู้ทดลองคนเดียวกันวิธีการทดลองเป็นแบบเดียวกันรวมทั้งช่วงเวลาทดลองใกล้เคียงกันโดยเปลี่ยนแปลงเฉพาะเงื่อนไขของปัจจัยที่สนใจศึกษาเท่านั้น

2.3.1.7 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติช่วยให้ผลการสรุปที่ได้มีเหตุผล มีการใช้หลักการทางทฤษฎีมาใช้มากกว่าเชิงพรรณนา โดยพิจารณาจากผลการทดลอง ดังนั้นถ้าการทดลองถูกออกแบบอย่างถูกต้องเหมาะสมและผู้ทดลองทำตามวิธีการที่ออกแบบไว้ได้แก่ วิธีการทางกราฟ (Graphical Method) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ทำให้ผู้วิเคราะห์เห็นภาพ เข้าใจง่ายขึ้น เช่นกราฟปกติของผลกระทบและส่วนค้ำนอกจากนี้ผู้ทดลองอาจแนะนำเสนอในรูปของ “แบบจำลอง” (Empirical Models) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบที่มีนัยสำคัญ (Important Effects) และผลตอบ (Response) โดยสร้างแบบจำลองที่เหมาะสม ในการทำนายผลการทดลองและเลือกเฉพาะปัจจัยหรือเทอมที่มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญเท่านั้น ซึ่งในขั้นตอนนี้ควรตรวจสอบความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์โดยวิธีการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) และตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง (Adequacy Checking) โดยพิจารณาจากการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

2.3.1.8 การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Model Adequacy checking) ก่อนนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ควรทำการทดลองยืนยันผลก่อนเพื่อตรวจสอบว่าผล การนำไปปฏิบัติงานในสถานที่และสภาวะการณ์จริงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำนายจากแบบจำลองหรือไม่ ซึ่งค่าทั้งสองค่าจะมีค่าเท่ากันหรือไม่ก็ได้ กรณีที่มีความต่างกันจะเรียกว่า “ค่าส่วนตกค้าง” (Residual) โดยส่วนตกค้างคือ ผลต่างระหว่างค่าจากการทดลอง และค่าทำนายจากแบบจำลอง โดยค่าทำนายจะขึ้นอยู่กับสมรรถนะของแบบจำลองความสัมพันธ์ (Fitted Model) ว่ามีประสิทธิภาพในการจำลองสภาวะการณ์ของกระบวนการที่ศึกษาได้ใกล้เคียงมากน้อยเพียงใด แบบจำลองดังกล่าวจะรวมเฉพาะเทอมที่มีนัยสำคัญเท่านั้นและแบบจำลองดังกล่าวจะสร้างมาจากข้อมูลของผลการทดลอง ดังนั้นขั้นตอนการวางแผนการออกแบบการทดลอง และการทดลองจึงมีส่วนสำคัญที่จะช่วยให้ได้ข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ โดยค่าส่วนตกค้าง (Residual) ใช้แสดงความผันแปรของสมการ

(Variation) ที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทำนายผล (Fitted Model) การตรวจสอบความเหมาะสมและความพอเพียงของแบบจำลองทำได้โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ตรวจสอบจากกราฟส่วนโค้งกับตัวแปรอิสระอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าทำนายได้แก่ ค่าทำนายลำดับการทดลองหรือเวลา และตัวแปรอิสระอื่น ๆ โดยกราฟส่วนโค้งไม่ควรมีรูปแบบใด ๆ (Patterns) และมีการกระจายตัวแบบสุ่ม (Random Pattern)

2.3.1.9 การทำการทดลองยืนยันผล หลังจากวิเคราะห์ผลการทดลองสร้างแบบจำลองที่เหมาะสม และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากแบบจำลองที่สร้างแล้ว จากนั้นจึงนำเงื่อนไขดังกล่าวไปทดลองปฏิบัติจริง ซึ่งการทดลองยืนยันผลจะทำการตรวจสอบความถูกต้องก่อนนำไปใช้จริงในกระบวนการผลิต โดยตรวจสอบว่าผลการปฏิบัติจริงมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากแบบจำลองหรือไม่ โดยในการทดลองยืนยันผลควรทำการทดลองซ้ำประมาณ 3 ครั้ง นำค่าเฉลี่ยจากการทดลองยืนยันผลใช้สำหรับเปรียบเทียบช่วงความเชื่อมั่นของค่าทำนาย ถ้าค่าดังกล่าวตกอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นก็ถือว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นใช้ทำนายพฤติกรรมของกระบวนการได้ใกล้เคียงสภาวะการณ์จริง

2.3.1.9 หาข้อสรุปและจัดทำข้อเสนอแนะหลังจากที่วิเคราะห์ผลการทดลองแล้วผู้วิจัยควรหาข้อสรุปจากผลการวิเคราะห์และให้ข้อเสนอแนะที่เหมาะสมสำหรับการปฏิบัติต่อไป โดยใช้วิธีแสดงผลแบบ (Graphical Method) ซึ่งมีประโยชน์มากโดยเฉพาะการนำเสนอผลการทดลองหลังจากได้ข้อสรุปและข้อเสนอแนะแล้วควรทำการทดลองยืนยันผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลสรุปจากการทดลอง นอกจากนี้เพื่อให้ผลการปรับปรุงยั่งยืนและต่อเนื่องควรกำหนดเป็นขั้นตอนมาตรฐานการปฏิบัติงานจากนั้นจึงจัดทำระบบควบคุมกระบวนการ การทำการทดลองเป็นกระบวนการเรียนรู้ ดังนั้นในระหว่างที่ทำขั้นตอนแรกจนถึงขั้นตอนสุดท้ายควรสังเกตประเมินผลเพื่อนำมาปรับปรุงในการทดลองเฟสต่อไป และปรับปรุงสมมติฐานของปัญหาหรืองานวิจัย

2.4 การทดลองแบบเป็นลำดับขั้น

การทำการทดลองควรแบ่งการทดลองเป็นลำดับขั้น (Sequential Experiment) ซึ่งจะทำให้ในการทดลองในแต่ละลำดับของการทดลอง ผู้ทดลองจะสามารถปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพในการทดลองได้ (Montgomery and Ruger, 2003) และ (DeVor, Chang and Sutherl, 2007) โดยปัญหาที่พบกรณีไม่ใช้การทดลองแบบเป็นลำดับขั้นคือ ผู้วิจัยส่วนใหญ่มักจะเลือกออกแบบการทดลองที่มีปัจจัยจำนวนมาก เพราะต้องศึกษาปัญหาทุกด้านในคราวเดียวกัน ซึ่งการเลือกปัจจัยที่มากเกินไปอาจมีข้อเสียในหลายด้านดังนี้

ความผิดพลาดจากการตัดสินใจเลือกการออกแบบการทดลอง หรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง ความผิดพลาดเหล่านี้จะก่อให้เกิดความสูญเสียจำนวนมากทั้งเสียเวลาและเสียทรัพยากรในการทดลอง เนื่องจากข้อมูลจากการทดลองอาจใช้ประโยชน์ได้ไม่มากนัก ซึ่งผู้ทดลองอาจเลือกตัวแปรในการศึกษาจำนวนมากเพราะคาดการณ์ว่าตัวแปรเหล่านั้นน่าจะมีผลกระทบต่อกระบวนการ ในบางกรณีผู้ทดลองอาจมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการมากทำให้สามารถระบุปัจจัยที่นำมาใช้ในการทดลองได้จำนวนมาก ส่งผลให้การทดลองมีขนาดใหญ่เกินไปและอาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดได้เช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นการวางแผนการทดลองที่เหมาะสมควรแบ่งการทดลองออกเป็นชุดเล็ก ๆ หลายชุด ซึ่งผู้ทดลองสามารถเพิ่มตัวแปรได้ในภายหลังถ้าเรียนรู้ในระหว่างการทดลองว่ามี

ปัจจัยบางตัวที่สำคัญแต่ไม่ได้รวมไว้ในการศึกษา (Montgomery, 2009a) จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถสรุปได้ว่า การทำการทดลองแบบเป็นลำดับขั้นโดยการแบ่งการทดลองเป็นชุดย่อยหลายชุดที่มีความเกี่ยวเนื่องและมีความสัมพันธ์กัน สามารถนำผลการวิเคราะห์การทดลองชุดก่อนมาใช้สำหรับวางแผนและปรับปรุงการทดลองในชุดต่อไปได้ เช่น การปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงสมมุติฐานในการทดลองให้เหมาะสม ปรับรูปแบบการทดลองในชุดต่อไปโดยอาจเพิ่มหรือลดจำนวนปัจจัยในการทดลอง ปรับเปลี่ยนผลตอบในการทดลอง เปลี่ยนแปลงขอบเขตของปัจจัยในการทดลองหรือปรับเลือกตารางการออกแบบการทดลองให้เหมาะสมกับข้อมูลที่ต้องการวิจัย ซึ่งหลังจากทำการทดลองครบทุกชุด ผู้วิจัยสามารถนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ร่วมกันทำให้สามารถใช้ทรัพยากรในการทดลองมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและเป็นการเสริมสร้างการเรียนรู้ การปรับปรุงวิธีการออกแบบการทดลองอย่างต่อเนื่อง

2.5 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน

ในการนำวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนมาคัดกรองปัจจัย กรณีที่มีปัจจัยที่ในการทดลองจำนวนมากจะส่งผลให้จำนวนการทดลองเพิ่มมากขึ้น ตามไปด้วย (Dean and Lewis, 2002) ซึ่งเมื่อจำนวนการทดลองเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลต่อทรัพยากรในการทดลองที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย อาทิเช่น เวลาในการทดลอง รวมถึงค่าใช้จ่ายในการทดลอง เป็นต้น (Dante et al., 2003) การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนจึงเป็นวิธีที่ถูกพิจารณานำมาใช้เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบของงานวิจัย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนการทดลองลง แต่ยังสามารถที่จะคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบของงานวิจัยที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Montgomery, 2009b) ตัวอย่างกรณีที่จำนวนปัจจัยที่จะทำการทดลองจำนวน 4 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยประกอบด้วยระดับจำนวน 2 ระดับ การทดลองแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวนจะต้องทดลองทั้งสิ้นจำนวน 16 การทดลอง และเมื่อมีการเพิ่มปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมากขึ้นจำนวนการทดลองก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จนอาจทำให้ผู้ทดลองเกิดปัญหาที่ไม่สามารถที่จะทดลองได้ตามจำนวนของการทดลองแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน ซึ่งผู้วิจัยสามารถลดจำนวนการทดลองลงได้โดยการใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน ประกอบด้วย การทดลองแบบครึ่งจำนวน หรือแบบหนึ่งในสี่ส่วน และแบบอื่น ๆ ซึ่งการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถลดจำนวนการทดลองลง แต่อย่างไรก็ดีเมื่อลดจำนวนการทดลองลงมากเกินไปจะทำให้การแปรผลนั้นยากขึ้นด้วย จากข้อมูลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงพิจารณาใช้การออกแบบการทดลองแบบ One-half Fraction of the 2k Design เพื่อลดจำนวนการทดลองลงครึ่งหนึ่งจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน โดยในการทดลองนั้นจะวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยจำนวน 2 ประเภทคือ ประเภทที่หนึ่ง ผลกระทบหลักของแต่ละปัจจัยเรียกว่า Main Effect หมายถึงผลตอบจะเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนระดับของปัจจัย และประเภทที่สอง ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction) หมายถึงการเปลี่ยนระดับของปัจจัยหนึ่งซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออีกปัจจัยหนึ่ง โดยมีหลักคิดสำคัญของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนคือ

2.5.1 The sparsity of effects principle

The sparsity of effects principle คือกรณีที่ปัจจัยในการทดลองเป็นจำนวนมากหรือมีมากกว่า 3 ปัจจัยขึ้นไปนั้น เช่น กรณีที่การทดลองมีปัจจัยในการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนจำนวน 5 ปัจจัย จะมีผลกระทบร่วม (Interaction) จำนวน 4 ประเภทคือ 2 way interaction, 3 way interaction, 4 way interaction และ 5 way interaction ซึ่งผลกระทบร่วมตั้งแต่ 3 Way interaction ขึ้นไปมักจะส่งผลต่อผลตอบของการทดลอง

2.5.2 The projection property

The projection property คือในการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนนั้นจะรวมรูปแบบของการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนอยู่ด้วย

2.5.3 Sequential experimentation

Sequential experimentation คือเมื่อมีการทดลองเพิ่มขึ้นสามารถนำเอาผลจากการทดลองมาคำนวณผลเพิ่มเติมในการทดลองได้

2.6 การออกแบบการทดลองแบบ One-half Fraction of the 2^k Design

การออกแบบการทดลองแบบ One-half Fraction of the 2^k Design เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้การลดจำนวนการทดลองลงครึ่งหนึ่งจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน ตัวอย่างในกรณีที่มีการศึกษาปัจจัยจำนวน 5 ปัจจัย ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน 2^5 จะต้องทำการทดลองทั้งหมดจำนวน 32 การทดลอง แต่การออกแบบการทดลองแบบ One-half Fraction of the 2^k Design (2^{5-1}) จะสามารถลดจำนวนการทดลองลงได้ครึ่งหนึ่งหรือสามารถทดลองเพียง 16 การทดลอง โดยที่ยังสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ ในส่วนของขั้นตอนของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนนั้นสามารถเขียนสรุปขั้นตอนการดำเนินงานได้เป็นขั้น ๆ ดังนี้ ขั้นแรกของการออกแบบการทดลองให้เขียนโครงสร้าง Treatment combination ของการทดลองให้มีปัจจัยน้อยกว่าปัจจัยที่จะใช้ทดลองจริงหนึ่งปัจจัย เช่นการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับการทดลองจำนวน 5 ปัจจัยคือ A, B, C, D และ E แต่ให้เขียน Treatment combination สำหรับ 4 ปัจจัยคือ A, B, C, D ดังในตารางที่ 2.1 ในส่วนของระดับของปัจจัยให้กำหนดแบบ Coded หรือการกำหนดระดับของการทดลองเป็นเครื่องหมาย (-) สำหรับระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองระดับต่ำและการกำหนดเครื่องหมาย (+) สำหรับระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองระดับสูง

ตารางที่ 2.1 ขั้นตอนแรกในการออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1}

ลำดับมาตรฐาน	ปัจจัย			
	A	B	C	D
(1)	-	-	-	-
a	+	-	-	-
b	-	+	-	-
ab	+	+	-	-

ตารางที่ 2.1 ขั้นตอนแรกในการออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} (ต่อ)

ลำดับมาตรฐาน	ปัจจัย			
	A	B	C	D
c	-	-	+	-
ac	+	-	+	-
bc	-	+	+	-
abc	+	+	+	-
d	-	-	-	+
ad	+	-	-	+
bd	-	+	-	+
abd	+	+	-	+
cd	-	-	+	+
acd	+	-	+	+
bcd	-	+	+	+
abcd	+	+	+	+

ขั้นที่สองให้กำหนดปัจจัยตัวสุดท้ายเป็น Generator ซึ่งจะมีค่าคือ $E = ABCD$ และกำหนดระดับของปัจจัยแบบของตัว Generator ตามระดับของปัจจัยที่เกิดขึ้นจากตารางที่ 2.1 ในขั้นตอนสุดท้ายกำหนด Treatment combination ใหม่ตามระดับของปัจจัยจริงที่ได้ทำการออกแบบการทดลองซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขั้นตอนที่สองในการออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1}

ลำดับมาตรฐาน	ปัจจัย				
	A	B	C	D	$E=ACBCD$
e	-	-	-	-	+
a	+	-	-	-	-
b	-	+	-	-	-
abe	+	+	-	-	+
c	-	-	+	-	-
ace	+	-	+	-	+
bce	-	+	+	-	+
abc	+	+	+	-	-
d	-	-	-	+	-
ade	+	-	-	+	+

ตารางที่ 2.2 ขั้นตอนที่สองในการออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} (ต่อ)

ลำดับ มาตรฐาน	ปัจจัย				
	A	B	C	D	E=ACBCD
bde	-	+	-	+	+
abd	+	+	-	+	-
cde	-	-	+	+	+
acd	+	-	+	+	-
bcd	-	+	+	+	-
abcde	+	+	+	+	+

2.7 โครงสร้างซ้ำซ้อนและรายละเอียดของแผนการทดลอง

การทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสามารถที่จะลดจำนวนการทดลองลงได้ แต่อย่างไรก็ตามจำนวนการทดลองที่ลดลงจะปะปนอยู่ในการทดลองนั่นเอง ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาและต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการทดลอง เนื่องจากจะมีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมซ้ำซ้อนกัน เรียกทั่วไปว่าโครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias Structure) โดยการศึกษาโครงสร้างของความซ้ำซ้อนนั้นจะพิจารณาจากค่ารายละเอียดของแผนการทดลอง (Design Resolution) ซึ่งจะเป็นตัวบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมในการทดลอง โดยที่รายละเอียดของแผนการทดลองที่มีระดับสูงจะสามารถแยกผลกระทบหลักของปัจจัยและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยได้ง่ายกว่า ตัวอย่างของรายละเอียดแผนการทดลองนั้นสามารถแปลเป็นความหมายได้ดังนี้

ตัวอย่างกรณีรายละเอียดของแผนการทดลอง อยู่ที่ระดับ 5 (Resolution V Design) คือผลกระทบหลักจะไม่ซ้ำซ้อนกับผลกระทบหลัก ไม่ซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย และ 3 ปัจจัย แต่จะซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วมระหว่าง 4 ปัจจัย สำหรับผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยจะซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย จากแนวคิดสำคัญของการออกแบบการทดลอง The sparsity of effects principle นั้น ถือว่าผลกระทบร่วมตั้งแต่ 3 ปัจจัยจะไม่ส่งผลต่อผลตอบของการทดลองจึงทำให้การออกแบบการทดลองนี้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบได้ทั้งผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (2 Way Interaction)

ดังการเขียนสมการโครงสร้างการทดลองสำหรับการศึกษา ปัญหาในกรณีที่มีการศึกษาปัญหามีจำนวน 5 ปัจจัยหรือ $K = 5$ โดยมีปัจจัย A B C D และ E หากใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนแบบ 2^{5-1} จะสามารถนำไปเขียนเป็นสมการโครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias Structure) ได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias Structure)

Main Effect	Interaction
I + ABCDE	AB + CDE
A + BCDE	AC + BDE
B + ACDE	AD + BCE
C + ABDE	AE + BCD
D + ABCE	BC + ADE
E + ABCD	BD + ACE
	BE + ACD
	CD + ABE
	CE + ABD
	DE + ABC

จากตารางที่ 2.3 จะพบว่าการทดลองที่มี Resolution V นั้นผลกระทบหลัก (Main Effect) ผลจะซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วมระหว่าง 4 ปัจจัย (4 Way Interaction) และผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (2 Way Interaction) ซ้ำซ้อนกับผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย (3 Way Interaction) โดยที่ผลกระทบร่วมที่มากกว่า 3 ปัจจัยขึ้นไปนั้น จะส่งผลต่อผลตอบของการทดลองน้อยมาก ดังนั้นจึงทำให้ผู้วิจัยสามารถทราบผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (2 Way Interaction) ได้

2.8 การทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology: RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ (Mayers and Montgomery, 2011) โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ดังสมการที่ 2.1

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.1)$$

ถ้ากำหนด $E(y) = f(x, y) = \eta$ ดังนั้น สามารถสร้างสมการพื้นผิวได้ดังเขียนสมการที่ 2.2

$$\eta = f(x, y) \quad (2.2)$$

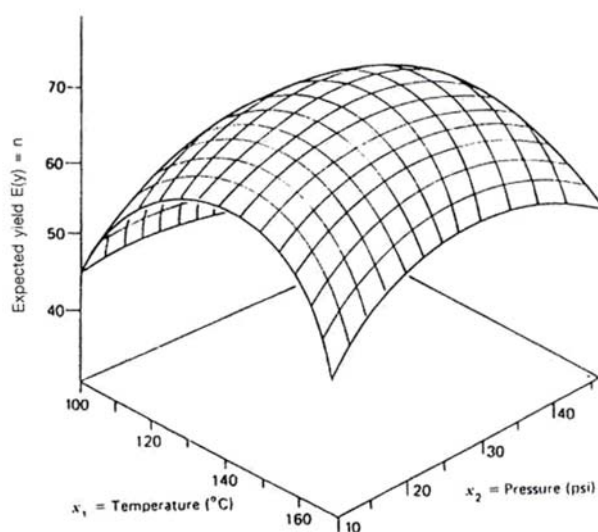
การทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface) โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟิก โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผล

ตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบดังภาพที่ 2.14 ซึ่งในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบของ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ (Ananthakumar et al., 2018) โดยในขั้นตอนแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และกลุ่มของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำ ๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์คือแบบจำลองกำลังหนึ่งดังสมการที่ 2.3

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.3)$$

ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องในระบบจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น มีครอตราดิกหรือความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง ดังสมการที่ 2.4

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.4)$$



ภาพที่ 2.14 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ
ที่มา: Montgomery (2009b: 418)

2.9 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้สำหรับการทดลองที่มีครอตราดิกหรือมีความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง (Acikalin, Karaca and Bolat, 2005) เป็นวิธีที่นักวิจัยนำมาใช้ในงานวิจัยเพื่อใช้หาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบการทดลองนี้ถูกคิดค้นและนำเสนอตั้งแต่ ค.ศ. 1950 แต่ในช่วงเวลา

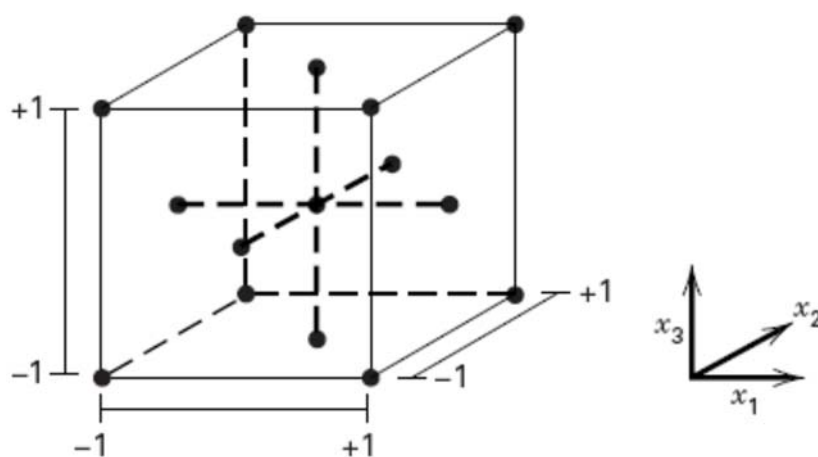
ดังกล่าวนี้ไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากไม่เป็นที่รู้จักและวิธีการในการคำนวณมีความซับซ้อนมากเกินไปจนถึงไม่มีคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ แต่ในปัจจุบันนี้ก็มีวิจัยได้นำมาใช้ในงานวิจัยมากขึ้นเนื่องจากมีความสะดวกในการคำนวณและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ เช่นการนำวิธีดังกล่าวไปใช้ศึกษาปัญหาเกี่ยวกับกระบวนการขัดแผ่นซิลิกาที่มีปัจจัยที่ต้องปรับตั้งจำนวนมาก (Singh, Garg and Lall, 2017) รวมถึงถูกสามารถนำไปใช้เพื่อสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตที่ผลตอบเกี่ยวกับงานที่ต้องการความละเอียดสูงเช่นคุณภาพของผิวชิ้นงาน (Singh and Misra, 2019) ซึ่งในการทดลองสามารถสรุปได้เป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.9.1 การทดลองชุดที่ 1

การทดลองชุดที่ 1 เริ่มกระบวนการโดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน (Full Factorial) หรือการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน (Fractional Factorial) เพื่อสร้างแบบจำลองระดับที่ 1 ซึ่งในการทดลองจำเป็นต้องมีการทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลางเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมและความพอเพียงของแบบจำลองลำดับที่ 1 ว่าควรเพิ่มการทดลองเพื่อทดสอบความเป็นครอตราติค (Aslan, 2008) หรือความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง

2.9.2 การทดลองชุดที่ 2

การทดลองชุดที่ 2 เป็นการทดลองเพิ่มเติมสำหรับการสร้างแบบจำลองที่เป็นครอตราติคหรือความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง หลังจากที่ได้ทดลองชุดที่ 1 แล้ว พบว่าผลการทดลองชุดที่ 1 มีผลของแบบจำลองเป็นส่วนโค้ง จำเป็นต้องทดลองที่เพิ่มที่จุดแกน Axial Points ดังภาพที่ 2.15



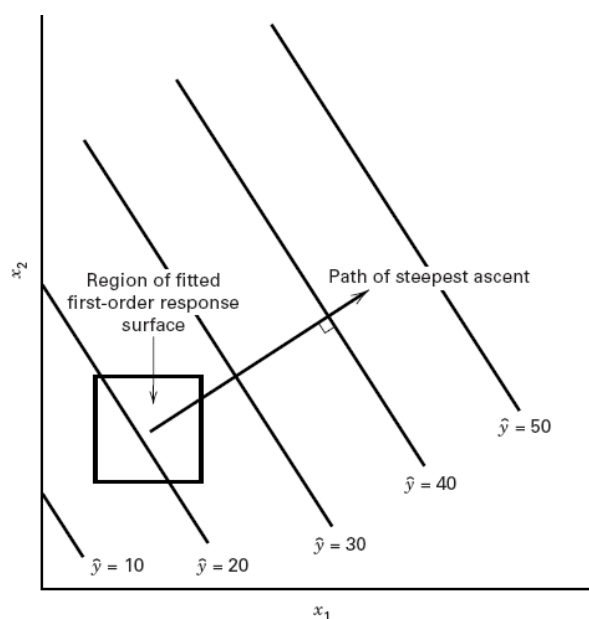
ภาพที่ 2.15 การทดลองที่เพิ่มที่จุดแกน Axial Points

ที่มา: Montgomery (2009b: 300)

2.10 วิธีเคลื่อนที่ (ขึ้นหรือลง) ไปสู่พื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุด

วิธีการนี้เป็นวิธีที่ถูกนำเสนอโดย Box และ Wilson ค.ศ.1951 เพื่อวัตถุประสงค์ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้วิธีในการปรับระดับของปัจจัยเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ชันที่สุด (พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์ และนพดล ฉิ่งทอง, 2550) โดยสามารถแบ่งลักษณะการหาผลตอบออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีการทดลองที่ต้องการผลตอบมากที่สุด (Maximize Response) จะใช้วิธีการเคลื่อนที่ขึ้นไปสู่ผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent or Steepest Descent) ในทางกลับกัน

กรณีที่ต้องการผลตอบที่น้อยที่สุด (Minimize response) จะใช้วิธีการเคลื่อนที่ลงไปสู่ผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent or Steepest Descent) (สรรรฐติชัย ชิวสุทธิศิลป์, 2562) ซึ่งสามารถแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ไปสู่พื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุด ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 ลักษณะการเคลื่อนที่ไปสู่พื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุด
ที่มา: Montgomery (2009b: 420)

รายละเอียดในการทดลองโดยใช้ วิธีการเคลื่อนที่ (ขึ้นหรือลง) ไปสู่พื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุด สามารถสรุปวิธีการดำเนินการออกเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

2.10.1 การเลือกปัจจัยที่จะนำมาทดลอง

การเลือกปัจจัยที่จะนำมาทดลองนั้น จะใช้สมการแบบจำลองจากการทดลองเดิมที่มีการทดลองเพิ่มที่จุดศูนย์กลาง ซึ่งจะเรียกว่าสมการแบบจำลองจากการทดลองในลำดับที่ 1 จากนั้นจึงพิจารณาสมการแบบจำลองเพื่อเลือกปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบในงานวิจัยจำนวน 1 ปัจจัย กรณีที่งานวิจัยมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบของงานวิจัยมากกว่าหนึ่งปัจจัย ผู้วิจัยจะต้องเลือกปัจจัยโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยเฉพาะผลกระทบหลักจากสมการแบบจำลอง และเลือกปัจจัยที่มีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุด

2.10.2 การกำหนดการก้าว (Step size)

การกำหนดการก้าว เป็นขั้นตอนที่ทำหลังจากทำการเลือกปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลองแล้ว โดยที่การกำหนดการก้าวนั้นจะกำหนดอัตราการก้าวของปัจจัยที่เลือกเท่ากับ 1 (การเคลื่อนที่หนึ่งครั้งเท่ากับการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยในการทดลองหนึ่งระดับ) สำหรับปัจจัยอื่น ๆ นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยไม่เท่ากับปัจจัยที่เลือกไว้ ซึ่งในการกำหนดขนาดของการก้าวนั้นมีความสำคัญในการหาจุดที่เหมาะสมที่สุด กรณีที่ทำการกำหนดการก้าวที่มีขนาดกว้าง

เกินไปอาจส่งผลทำให้การทดลองนั้นข้ามจุดที่เหมาะสมที่สุดได้ ในทางกลับกันหากกำหนดขนาดการก้าวที่น้อยจนเกินไปอาจส่งผลให้จำนวนครั้งในการทดลองมีมากจนเกินไปเนื่องจากการก้าวแต่ละครั้งหมายถึงการทดลองที่เพิ่มมากขึ้น โดยในการกำหนดการก้าวเริ่มต้นจากการกำหนดปัจจัยที่จะนำมาทำการทดลอง x_j เป็นปัจจัยตั้งต้นจากนั้นจึงแทนขนาดของการก้าวด้วย x_j และขนาดการก้าวของปัจจัยอื่นด้วย x_i และคำนวณค่าจากสมการที่ 2.5

$$\frac{\Delta x_i}{\beta_i} = \frac{\Delta x_j}{\beta_j} \quad i = 1, 2, \dots, k \text{ and } i \neq j \quad (2.5)$$

โดยที่ β_i คือ สัมประสิทธิ์ในแบบจำลองของปัจจัย x_i

β_j คือ สัมประสิทธิ์ในแบบจำลองของปัจจัย x_j

Δx_i คือ ขนาดก้าวของปัจจัย x_i

Δx_j คือ ขนาดก้าวของปัจจัย x_j

จากสมการ 2.5 หากกำหนด $\Delta x_j = 1$ หน่วยของค่าแปลง ดังนั้นขนาดก้าวของปัจจัย x_i จะสามารถคำนวณได้จากสมการ ที่ 2.6

$$\Delta x_i = \frac{\beta_i}{\beta_j} \quad i = 1, 2, \dots, k \text{ and } i \neq j \quad (2.6)$$

2.10.3 ทำการทดลองในแต่ละก้าวตามเงื่อนไขการทดลอง

จากการทดลองจะพบว่าในละเอียดของการทดลองจะให้ผลตอบของการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเป้าหมายที่ตั้งเอาไว้ (Maximize Response or Minimize Response) เมื่อทดลองในจำนวนก้าวที่เหมาะสมจะพบว่าจะมีจุดที่ให้ค่าผลตอบของงานวิจัยสูงสุดและหากทดลองต่อไปจะทำให้ผลตอบของงานวิจัยแย่งลง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าจุดที่ให้ค่าผลตอบของงานวิจัยสูงสุดนั้นมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งของพื้นผิวผลตอบที่เหมาะสมที่สุด

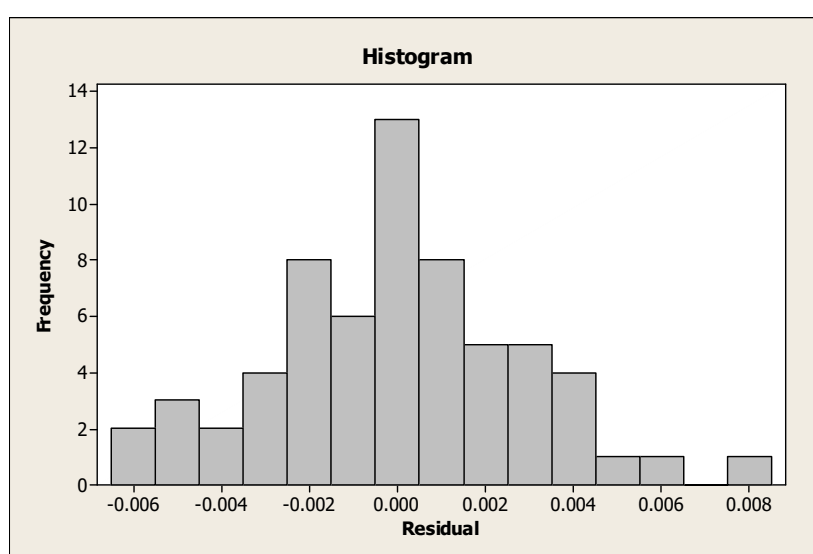
2.11 การตรวจสอบส่วนตกค้าง Model Adequacy Checking

การกระจายตัวของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในการทดลอง เป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการทดลอง ซึ่งสามารถนำไปเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.7 สำหรับความแปรปรวนนั้นสามารถเกิดขึ้นในกระบวนการทดลองได้แต่จำเป็นที่จะต้องมิตสมมุติฐานที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นจากการทดลอง ดังเช่น จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ, เป็นอิสระต่อกัน รวมถึงค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ เป็นต้น

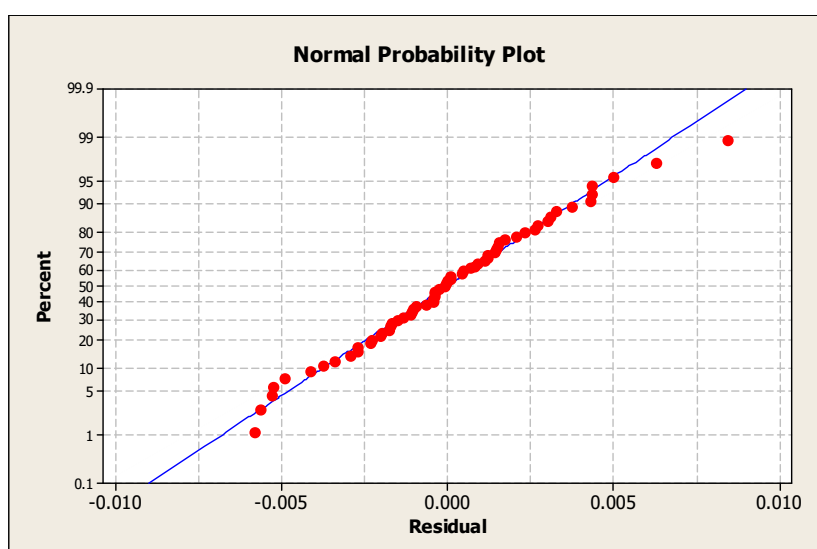
$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.7)$$

2.11.1 การตรวจสอบสมมติฐานการแจกแจงที่เป็นปกติ (The Normal Assumption)

การตรวจสอบนี้สามารถตรวจสอบได้โดยการบันทึกส่วนตกค้างเพื่อทำเป็นฮิสโตแกรม และแผนภาพการกระจายของส่วนตกค้าง โดยในการวิเคราะห์นั้นหากจะพิจารณาจากฮิสโตแกรม จะต้องใช้ข้อสมมุติฐานเช่นเดียวกับลักษณะของการแจกแจงแบบปกติคือ ฮิสโตแกรมของส่วนตกค้างจะต้องมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำที่มีจุดกึ่งกลางอยู่ที่ศูนย์ดังภาพที่ 2.17 แต่ในกรณีที่กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนั้นมีขนาดเล็กเกินไปอาจพบว่าลักษณะของฮิสโตแกรมไม่เป็นปกติ นั้นจะบ่งบอกว่าอาจจำเป็นต้องมีการทดลองหรือวิเคราะห์เพิ่มเติม ในกรณีของแผนภาพการกระจายของส่วนตกค้างนั้นจะมองจากลักษณะข้อมูลในแต่ละจุดจะต้องอยู่ในแนวเส้นตรงดังภาพที่ 2.18



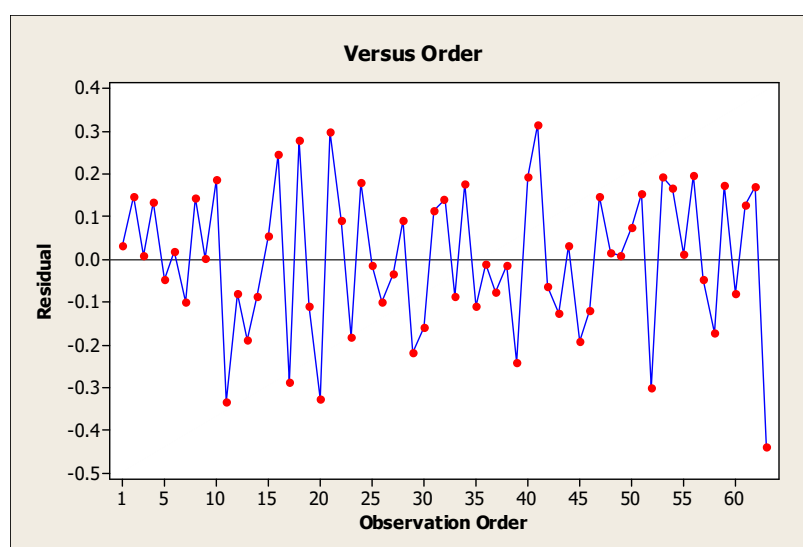
ภาพที่ 2.17 ฮิสโตแกรมส่วนตกค้างที่แจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 2.18 การกระจายส่วนตกค้างที่แจกแจงแบบปกติ

2.11.2 การตรวจสอบส่วนตกค้างของลำดับเวลา (Plot of Residual in Time Sequence)

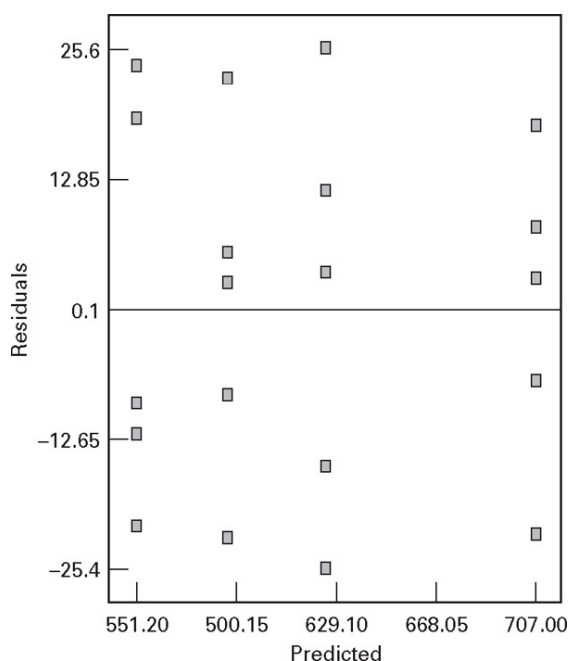
การบันทึกส่วนตกค้างของลำดับเวลาของการทดลองจะช่วยให้การตรวจสอบความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างส่วนตกค้าง ที่แสดงแนวโน้มค่าความสัมพันธ์เชิงบวกหรือเชิงลบ หากส่วนตกค้างส่วนใหญ่อยู่ในทิศทางบวกหรือทิศทางลบแสดงว่า ส่วนตกค้างไม่เป็นอิสระต่อกันซึ่งถือว่าเป็นข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดนั้น อาจเกิดจากการที่ผู้ทำการทดลองเกิดความชำนาญขึ้นระหว่างการทดลองเป็นสาเหตุให้ส่วนตกค้างเกิดความไม่ปกติขึ้นได้ สำหรับแนวทางในการป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นจะการใช้การสุ่มลำดับในการทดลองเข้ามาช่วยในการทดลองเพื่อช่วยป้องกันปัญหาดังกล่าว หากพิจารณาส่วนตกค้างของลำดับเวลาการแผนภาพส่วนตกค้างทั้งส่วนบนและส่วนล่างควรมีปริมาณใกล้เคียงกันและไม่ควรมีรูปแบบใด ๆ เกิดขึ้น รวมถึงควรจะมีลักษณะสุ่มจึงจะถือว่าส่วนตกค้างของลำดับเวลาเป็นปกติ ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ส่วนตกค้างของลำดับเวลา

2.11.3 การตรวจสอบส่วนตกค้างกับค่าทำนาย (Plot of Residual Versus Fitted Values)

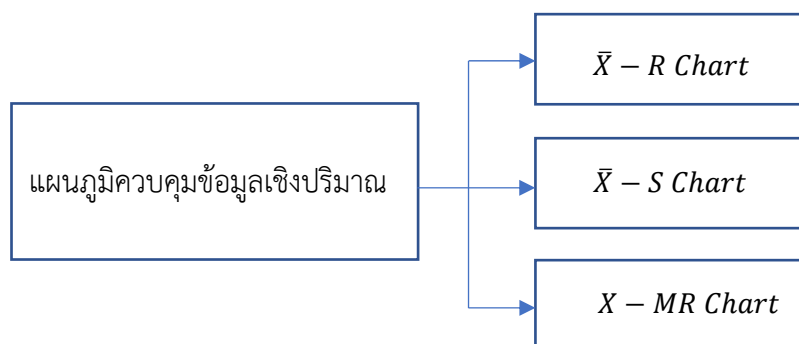
การตรวจสอบส่วนตกค้างกับค่าทำนาย (Plot of Residual Versus Fitted Values) เป็นการบันทึกเพื่อตรวจสอบความแปรปรวนระหว่างค่าประมาณการทดลองที่ระดับ i กับค่าส่วนตกค้าง ซึ่งในการตรวจสอบค่าส่วนตกค้างเปรียบเทียบกับค่าทำนายนั้น ไม่ควรเกิดแนวโน้มใด ๆ ควรจะต้องมีการกระจายแบบสุ่ม ดังภาพที่ 2.20 หากผลการทดลองนั้นพบว่าส่วนตกค้างกับค่าทำนายมีลักษณะที่มีแนวโน้มของรูปร่างเช่น จุดที่แสดงอยู่ฝั่งใดฝั่งหนึ่งจำนวนมาก หรือจุดที่แสดงอยู่ในแผนภาพมีลักษณะด้านซ้ายมีขนาดเล็กด้านขวามีขนาดใหญ่ (คล้ายสัญลักษณ์ลำโพง) นั้นแสดงว่าค่าความแปรปรวนไม่คงที่



ภาพที่ 2.20 ส่วนตกค้างเปรียบเทียบกับค่าทำนาย
ที่มา: Montgomery (2009b: 132)

2.12 แผนภูมิควบคุมข้อมูลเชิงปริมาณ

คุณลักษณะทางคุณภาพที่ผู้วิจัยสามารถวัดออกมาได้เป็นตัวเลข ดังเช่น ความกว้าง ยาว สูง รวมถึงค่าต่าง ๆ ที่สามารถระบุเป็นตัวเลขได้เรียกว่า “ข้อมูลเชิงปริมาณ” โดยที่ข้อมูลเชิงปริมาณที่ทำการเก็บข้อมูลได้นั้น สามารถนำไปใช้เพื่อสังเกตและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการได้หากมีการนำข้อมูลที่ได้ไปใช้อย่างเหมาะสม ซึ่งแนวคิดและเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้ในการนำข้อมูลเชิงปริมาณเพื่อสังเกตและวิเคราะห์ข้อมูลคือ การใช้แผนภูมิควบคุม ซึ่งแผนภูมิควบคุมสำหรับข้อมูลเชิงปริมาณนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังที่แสดงในภาพที่ 2.21 โดยที่แผนภูมิแต่ละประเภทนั้นล้วนมีวัตถุประสงค์เดียวกันคือควบคุมและสังเกตกระบวนการ เพียงแต่กระบวนการในการเก็บข้อมูลนั้นแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดของแผนภูมิควบคุมสำหรับข้อมูลเชิงปริมาณแบบต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 2.4

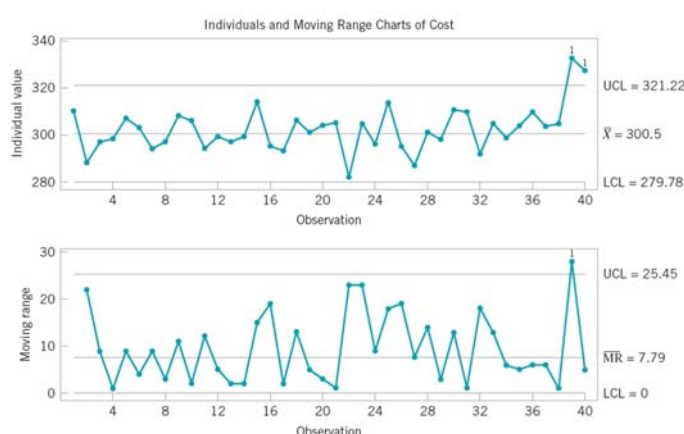


ภาพที่ 2.21 การควบคุมข้อมูลเชิงปริมาณ

ตารางที่ 2.4 รายละเอียดของแผนภูมิควบคุมสำหรับข้อมูลเชิงปริมาณแบบต่าง ๆ

ลักษณะจำเพาะของลักษณะทางคุณภาพที่ควบคุม	แผนภูมิควบคุม	รายละเอียด
ข้อมูลแบบต่อเนื่องหรือข้อมูลชนิดหน่วยวัด (Variable Data)	$\bar{X} - R$ Chart	$\bar{X}$ Chart ควบคุมค่าเฉลี่ย
		R Chart ควบคุมพิสัย
	$\bar{X} - S$ Chart	$\bar{X}$ Chart ควบคุมค่าเฉลี่ย
		S Chart ควบคุมความแปรปรวน
	$X - MR$ Chart	X Chart ควบคุมค่าหน่วยวัดกลุ่มละ 1 ตัวอย่าง
		MR Chart ควบคุมพิสัย

สำหรับในงานวิจัยนั้นจะเลือกนำแผนภูมิควบคุมแบบ $X - MR$ Chart มาใช้เนื่องจากเป็นแผนภูมิควบคุมที่ใช้ขนาดของกลุ่มตัวอย่างจำนวนน้อย ซึ่งเหมาะกับการทดสอบแบบทำลายหรือแบบที่กลุ่มตัวอย่างทดลองมีต้นทุนการผลิตต่อชิ้นสูง โดยจะนำมาใช้ศึกษาและวิเคราะห์ว่ากระบวนการผลิตปัจจุบันอยู่ภายใต้การควบคุม (Statistical Control/ Stable) หรือไม่ โดยที่แผนภูมิควบคุมดังกล่าวนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่หนึ่งแผนภูมิ X Chart ใช้ในการสังเกตค่าแรงดึงและค่าแรงเหวี่ยงของการทดลอง ส่วนที่สองแผนภูมิ MR Chart ใช้ในการสังเกตค่าความความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากการทำงานของค่าแรงดึงและค่าแรงเหวี่ยง ดังที่แสดงในภาพที่ 2.22 ตอนในการทำงานนั้นจะเริ่มจากการเก็บข้อมูลค่าแรงดึงและค่าแรงเหวี่ยงในการทำงานปัจจุบัน เพื่อสร้างขอบเขตควบคุม และจากนั้นจะทำการเก็บข้อมูลค่าแรงดึงและค่าแรงเหวี่ยงจากการทำงานเมื่อมีการนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่นำมาใช้ซ้ำในกระบวนการเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับขอบเขตควบคุม เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดึงและค่าแรงเหวี่ยง ซึ่งในการใช้แผนภูมิควบคุมนั้นจะพิจารณาค่าเฉลี่ย และค่าความแปรปรวนของกระบวนการ รวมถึงตรวจสอบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดึงและค่าแรงเหวี่ยงเพื่อป้องกันความเสียหายอันเกิดจากการผิดปกติในกระบวนการผลิตได้อย่างทันท่วงที



ภาพที่ 2.22 ตัวอย่างของแผนภูมิควบคุม $X-MR$ Chart
ที่มา: Montgomery (2009b: 257)

2.13 การสร้างแผนภูมิควบคุมแบบ X-MR Chart

แผนภูมิควบคุมชนิดถูกเลือกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการ เนื่องจากเป็นแผนภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตที่มีการทดสอบแบบทำลายหรือชิ้นงานที่ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นมีราคาสูง เพราะเป็นแผนภูมิควบคุมที่ใช้ขนาดของกลุ่มย่อยเพียงข้อมูลเดียว ($n = 1$) และนำข้อมูลแต่ละตัวมาพล็อตลงในแผนภูมิ โดยใช้พิสัยเคลื่อนที่ Moving Range (MR) เปรียบเทียบกันระหว่างกลุ่มที่อยู่ติดต่อกันในการคำนวณหาค่าขอบเขตควบคุม เพื่อควบคุมค่าความผันแปรของกระบวนการและสามารถใช้เพื่อช่วยตรวจจับความผิดปกติ (Assignable Cause) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตอย่างได้ถูกต้องและรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลให้สามารถหาวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมก่อนที่จะก่อให้เกิดความเสียหายในกระบวนการ โดยที่ในการทำแผนภูมิควบคุมในขั้นแรกจะต้องเก็บข้อมูลเพื่อสร้างเส้นควบคุมจากข้อมูลของค่าแรงดึงและค่าแรงเฉือนในการทำงานปัจจุบัน โดยที่เส้นควบคุมประกอบด้วย 3 เส้นคือ เส้นขีดจำกัดควบคุมบน (Upper Control Limit: UCL) เส้นขีดจำกัดควบคุมล่าง (Lower Control Limit: LCL) และเส้นกึ่งกลาง (Center Line: CL) โดยที่สมการที่ใช้คำนวณเส้นควบคุมของแผนภูมิ X Chart แสดงไว้ดังสมการที่ 2.8, 2.9 และ 2.10 สำหรับเส้นควบคุมสำหรับแผนภูมิ MR-Chart แสดงไว้ดังสมการที่ 2.11, 2.12 และ 2.13

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ X Chart

$$UCL_{x \text{ Chart}} = \bar{X} + \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (2.8)$$

$$CL_{x \text{ Chart}} = \bar{X} \quad (2.9)$$

$$LCL_{x \text{ Chart}} = \bar{X} - \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (2.10)$$

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ MR Chart

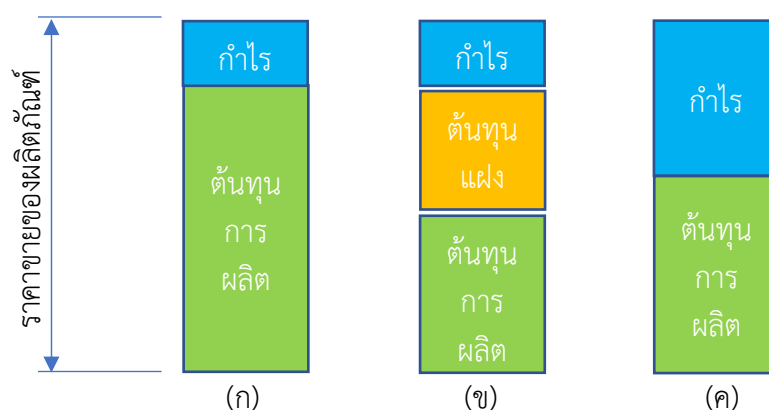
$$UCL_{MR \text{ Chart}} = D_4 \times \overline{MR} \quad (2.11)$$

$$CL_{x \text{ Chart}} = \overline{MR} \quad (2.12)$$

$$LCL_{MR \text{ Chart}} = D_3 \times \overline{MR} \quad (2.13)$$

2.14 การลดต้นทุนกระบวนการและการเพิ่มผลผลิต

ในกระบวนการผลิตประกอบด้วยต้นทุนหลายส่วน ซึ่งต้นทุนการผลิตนั้นจะถูกนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดราคาขายของผลิตภัณฑ์ หรืออาจกล่าวได้ว่าการตั้งราคาขายของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ประกอบด้วยต้นทุนจากกระบวนการผลิตและกำไรที่ผู้ผลิตตั้งเป้าหมายไว้ ซึ่งการลดต้นทุนในกระบวนการนั้นถือเป็นการสร้างความได้เปรียบในการแข่งขันด้านธุรกิจ เพราะจะสามารถได้ผลกำไรเพิ่มขึ้นจากส่วนต่างของการลดต้นทุนในกระบวนการ โดยที่แนวคิดของการลดต้นทุน คือการที่ผู้ผลิตสามารถเพิ่มกำไรโดยการขจัดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นหรือต้นทุนต่าง ๆ ที่แฝงอยู่ในกระบวนการผลิตหรือการบริการ ดังภาพที่ 2.23 ที่แสดงราคาขายของผลิตภัณฑ์ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนการผลิตและกำไร (ก) และเมื่อมีการนำแนวคิดในการลดต้นทุนของกระบวนการไปใช้ในการผลิตจะสามารถแยกส่วนที่เป็นต้นทุนแฝงที่เกิดจากความสูญเปล่า (ข) จากนั้นถ้าสามารถขจัดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นได้ก็จะสามารถลดต้นทุนในกระบวนการทำให้เกิดผลกำไรที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ราคาขายเท่าเดิม (ค)



ภาพที่ 2.23 ส่วนประกอบของราคาขายผลิตภัณฑ์

สำหรับความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเมื่อมีการลดต้นทุนคือ เมื่อเกิดการลดต้นทุนในกระบวนการลง จะส่งผลให้ผลิตภาพของกระบวนการเพิ่มขึ้น กล่าวคือการลดต้นทุนแฝงซึ่งเกิดจากการใช้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรในการผลิตที่อาจใช้ไม่เต็มประสิทธิภาพจะทำให้การผลิตมีกำไรมากขึ้นเนื่องจากสามารถนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรไปใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และยังส่งผลให้ต้นทุนแฝงที่อยู่ในกระบวนการลดลง

การเพิ่มผลผลิต (Productivity) ถือเป็นมาตรวัดสมรรถนะของการผลิตและการบริการ ซึ่งสามารถแบ่งความหมายของการเพิ่มผลผลิตตามแนวคิดขององค์การแรงงานระหว่างประเทศ (International Labor Organization: ILO) ออกเป็นสองส่วนคือ แนวคิดการเพิ่มผลผลิตทางด้านวิทยาศาสตร์ที่มีนำเสนอความหมายในเชิงตัวเลข ซึ่งแสดงอัตราส่วนของผลผลิตส่วนด้วยปัจจัยการผลิตที่นำเข้ากระบวนการ โดยสามารถคำนวณการเพิ่มผลผลิตได้หลายวิธีเช่น การเพิ่มผลผลิตโดยการเพิ่มผลิตผล ในขณะที่ยังใช้ปัจจัยการผลิตที่นำเข้ากระบวนการเท่าเดิม เป็นต้น และทางด้านสังคมศาสตร์จะกล่าวถึงการปรับปรุงกระบวนการเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้นซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

ของสังคมและสภาพเศรษฐกิจที่ดีขึ้นด้วย (นุชสรา เกรียงกรกกฎ, 2556) โดยที่การปรับปรุงกระบวนการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสามารถกำหนดเป็นแนวทางได้จำนวน 3 แนวทางดังนี้ (ณิภณ พินศิริกุล, 2561)

2.14.1 การเพิ่มผลผลิตโดยการลงทุนเพิ่ม

กระบวนการการเพิ่มผลผลิตวิธีนี้เป็นการเพิ่มผลผลิตที่จำเป็นจะต้องมีการลงทุนในกระบวนการผลิตเพิ่ม เพื่อกระตุ้นให้เกิดการเพิ่มผลผลิต ดังเช่นการลงทุนซื้อหรือปรับปรุงเครื่องจักรให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงลงทุนในเทคโนโลยีอื่น ๆ ที่มีความทันสมัย เพื่อให้เกิดผลผลิตที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

2.14.2 การเพิ่มผลผลิตโดยการปรับปรุงกระบวนการทำงานและการบริหารจัดการ

การเพิ่มผลผลิตโดยการปรับปรุงกระบวนการทำงานและการบริหารจัดการ เป็นกระบวนการเพิ่มผลผลิตที่ใช้การลงทุนน้อยกว่าวิธีแรกแต่ก็เป็นวิธีที่มีความยุ่งยากในการดำเนินงาน ซึ่งในการเพิ่มผลผลิตด้วยวิธีนี้จะพิจารณาจากการปรับปรุงกระบวนการโดยใช้หลักการประหยัดการเคลื่อนไหว รวมถึงการพิจารณาเกี่ยวกับการลดการทำงานที่ทำให้เกิดความสูญเสีย (Waste) ซึ่งความสูญเสียในกระบวนการประกอบด้วย ความสูญเสีย 7 ประการ คือ ความสูญเสียจากวัสดุคงคลัง (Inventory) ความสูญเสียจากการผลิตมากเกินไป (Overproduction) ความสูญเสียจากการเคลื่อนไหว (Motion) ความสูญเสียจากการรอ (Delay) ความสูญเสียจากการผลิตของเสีย (Defect) ความสูญเสียจากการขนส่ง (Transportation) และความสูญเสียจากกระบวนการ (Processing)

2.14.3 การเพิ่มผลผลิตโดยการมุ่งใช้เครื่องจักรอุปกรณ์ให้คุ้มค่าที่สุด

กระบวนการเพิ่มผลผลิตในวิธีสุดท้ายนี้เป็นวิธีที่มุ่งพิจารณาการใช้เครื่องมือ เครื่องจักร รวมถึงอุปกรณ์ที่มีอยู่ในกระบวนการอย่างเต็มประสิทธิภาพ เพื่อลดต้นทุนแฝงในกระบวนการซึ่งอาจเกิดจากการใช้ชิ้นส่วนของเครื่องจักร หรือเครื่องจักรที่ไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังเช่นงานวิจัยที่กล่าวถึงแนวทางในการนำชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์กลับมาใช้ใหม่เพื่อเพิ่มผลผลิตและยังช่วยลดปัญหาของเสียประเภทอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้น (Debnath, Roychowdhury and Kundu, 2016) รวมถึงงานวิจัยที่แยกและนำวัสดุในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์กลับมาใช้ซ้ำอีกเป็นต้น (Zhou et al., 2016) ในกรณีที่มีการนำเครื่องจักรและอุปกรณ์อย่างคุ้มค่านี้ย่อมส่งผลต่อการลดลงของต้นทุนที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการแข่งขันทางธุรกิจของผู้ประกอบการได้เป็นอย่างดีอีกด้วย อย่างไรก็ตามการใช้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรเพื่อให้เกิดประโยชน์คุ้มค่าที่สุดนั้นรวมถึงการนำเอาชิ้นส่วนมาใช้ซ้ำเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อกระบวนการสูงสุด ซึ่งการนำเอาชิ้นส่วนมาใช้ซ้ำไม่ควรที่จะมองการใช้งานอย่างคุ้มค่าที่สุดเพียงอย่างเดียว ควรจะต้องมีการพิจารณาถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นควบคู่ไปด้วย (Paton, 1994) โดยกระบวนการที่ทำงานนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบติดตามในขณะที่มีการนำชิ้นส่วนของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรมาใช้ซ้ำ (Kerr and Ryan, 2001) เพื่อให้มั่นใจว่าการเพิ่มผลผลิตโดยการใช้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์อย่างคุ้มค่าที่สุดจะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Baxter et al., 2007)

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ส่วนแรกจะเป็นงานวิจัยที่กล่าวถึงเรื่องกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ (Gold wire bonding) ในการผลิต IC Packaging และส่วนที่สองจะกล่าวถึงเหตุผลและขั้นตอนที่เหมาะสมในกระบวนการวิจัย ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมแนวคิดทฤษฎีและผลงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก โดยทั้งนี้ขั้นตอนการวิจัยนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบของกระบวนการผลิตในแต่ละบริษัทหรือสถานประกอบการแต่ละแห่งซึ่งมีความแตกต่างกันออกไป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ (Gold wire bonding) ในการผลิต IC Packaging นั้นสามารถกล่าวสรุปได้ดังนี้ กระบวนการในการผลิต IC Packaging ทุกประเภทนั้นจะมีกระบวนการหลัก 2 ส่วนคือ การผลิตที่เรียกว่า Front of Line (FOL) และ End of Line (EOL) (Hung et al., 2007) ซึ่งกระบวนการที่มีความสำคัญต่อการผลิต IC Packaging คือกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ (Gold Wire bonding) ที่อยู่ในส่วน FOL เพราะเป็นการเชื่อมต่อวงจรโดยใช้ลวดทองคำที่มีขนาดเล็ก (Wang and Sun, 2009) และในกระบวนการต้องใช้เครื่องจักรที่มีความแม่นยำสูงรวมถึงใช้ปัจจัยในการปรับตั้งจำนวนมาก (Kim et al., 2017) สำหรับกระบวนการเชื่อมลวดทองคำนั้นมี 3 วิธีคือ วิธี Thermo Compression Bonding เป็นการใช้อุณหภูมิกับแรงกดเพื่อเชื่อมเส้นลวด (Malik et al., 2014) วิธี Ultrasonic Bonding เป็นวิธีการที่ใช้แรงกดร่วมกับการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมด้วยความถี่สูงจนเกิดแรงเสียดทานทำให้เกิดความร้อน (Mayer and Schwizer, 2002) และวิธี Thermosonic Ball Bonding เป็นวิธีการที่ใช้ความร้อนและความถี่สูงในการเชื่อมลวดทองคำ (Xu et al., 2010) ซึ่งในการเชื่อมลวดทุกแบบนั้นจะต้องใช้หัวเชื่อมลวด (Capillary) (Gomes et al., 2015) เพื่อเชื่อมต่อลวดทองคำกับวงจรและจะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของการเชื่อมคือ ค่าแรงดึง (Wire pull) และแรงเนียน (Bond Share) ในงานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมลวดทองคำนั้น ได้มีความพยายามค้นคว้าและวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการซึ่งในงานวิจัยแต่ละงานวิจัยนั้น ล้วนใช้วิธีทางสถิติรวมถึงมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่มีความแตกต่างกัน

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ สำหรับงานวิจัยกลุ่มนี้มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงและศึกษากระบวนการเชื่อมลวดทองคำ ในการผลิต IC Packaging เริ่มตั้งแต่ช่วง ค.ศ.1999 มีการใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน 2 ระดับเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของแรงดึงของลวดเชื่อม (Antony, 1999) โดยที่งานวิจัยดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของแรงดึงให้สูงขึ้นถึงร้อยละ 20 แต่จากงานวิจัยจะพบว่าในการทดลองนั้นใช้ผลตอบของงานวิจัยเพียงแค่ผลตอบเดียวคือแรงดึงของการเชื่อมลวดทองคำ ซึ่งในปัจจุบันมีการทดสอบแรงเนียนของการเชื่อมลวดทองคำร่วมด้วย หลังจากนั้นพบว่ามิงานวิจัยที่พิจารณาการทดสอบทั้งแรงดึงและแรงเนียนร่วมกันในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำเพิ่มมากขึ้นรวมถึงมีการศึกษาองค์ประกอบย่อยของเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการ เช่นงานวิจัยที่วิเคราะห์อายุการใช้งาน Electronic Flame Off (EFO) ที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงและแรงเนียนของการเชื่อมลวดทองคำ (EFO คืออุปกรณ์ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้ลวดทองคำหลอมละลาย) โดยการใช้การทดสอบปัจจัยที่ละหนึ่งปัจจัย ซึ่งการวิเคราะห์วิธีนี้จะปรับตั้งค่าของปัจจัยที่สนใจเพียงปัจจัยเดียวและคงที่ปัจจัยอื่นไว้ (พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์ และนพดล ฉิ่งทอง, 2550) จากผลของงานวิจัยพบว่าหากมีการสึกหรอของ EFO มากขึ้น ค่าแรงดึงและแรงเนียนของกระบวนการเชื่อมลวดทองคำนั้นจะลดลงด้วย (Chung, Bernstein and Yang, 2003) ต่อมาในปี

2006 มีการนำโปรแกรม Finite Element มาใช้ศึกษาค่าแรงดึงและแรงเฉือนของกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ (Hsu et al., 2006) รวมถึงในปีเดียวกันได้มีการวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มอุณหภูมิเชื่อมที่ส่งผลต่อค่าแรงเฉือนของการเชื่อมลวดทองคำ โดยการทดสอบปัจจัยที่ละหนึ่งปัจจัยซึ่งผลจากการวิจัยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการเชื่อมมากกว่า 200 องศาเซลเซียสนั้น จะทำให้ค่าแรงเฉือนในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำลดลง (Wu et al., 2006) รวมถึงยังมีการนำ Artificial intelligence มาใช้ศึกษาค่าแรงดึง (Hung et al., 2007) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากงานวิจัยในช่วงดังกล่าวนี้ จะพบว่าการนำวิธีการวิจัยที่มีความหลากหลายมากขึ้นเข้ามาใช้ในการศึกษากระบวนการเชื่อมลวดทองคำแต่อย่างไรก็ตามยังพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ยังคงพิจารณาผลตอบเพียงตัวใดตัวหนึ่งระหว่างค่าแรงดึงและค่าแรงเฉือน หลังจากช่วงเวลาดังกล่าวมีการศึกษาการใช้ลวดเชื่อมที่ทำจากทองแดง (Cu Wire) ซึ่งเป็นลวดเชื่อมที่บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์นำมาใช้เพื่อเป็นการลดต้นทุน โดยมีงานวิจัยที่ใช้การทดสอบปัจจัยที่ละหนึ่งปัจจัย เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงเฉือนของการเชื่อมลวดทองแดง (Zhong et al., 2007) และยังมีการนำเอาวิธีแบบทากูชิ มาใช้ร่วมกับ Neural network เพื่อศึกษากระบวนการเชื่อมลวดทองแดง โดยงานวิจัยนำเสนอเกี่ยวกับการทำงานใช้วิธี Neural network (Hou, Su and Chang, 2008) ต่อมาจึงได้มีการศึกษากลไกในการยึดติดโดยการเชื่อมลวดทองคำแบบเทอร์โมโซนิก โดยศึกษาการวิเคราะห์การแพร่กระจายของทองคำที่เชื่อมติดกับแพด (Xu et al., 2010) และในปีเดียวกันได้มีการเปรียบเทียบความเสียหายของแพด กรณีที่เปลี่ยนมาใช้ลวดทองแดงในกระบวนการเชื่อมเพราะในขณะนั้นลวดเชื่อมทองแดงเป็นลวดเชื่อมที่มีแนวโน้มที่จะนำไปใช้แทนการใช้ลวดทองคำ ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่าการใช้ลวดทองแดงเชื่อมต่อวงจรลงบนแพดที่ออกแบบสำหรับการเชื่อมด้วยลวดทองคำจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อแพด (Qin et al., 2009) ในอดีตไปยังมีงานวิจัยที่กล่าวถึงการเชื่อมลวดทองแดงด้วยลวดเชื่อมขนาด 0.1 ไมโครเมตร ซึ่งในงานวิจัยได้พิจารณาถึงปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมที่ส่งผลต่อการยึดติดของการเชื่อมลวดทองแดงกับแพด ผลจากงานวิจัยพบว่าแพดที่เหมาะสมกับการใช้ลวดทองแดงควรเป็นโลหะผสม เพื่อป้องกันความเสียหายจากกระบวนการเชื่อมโดยใช้ลวดทองแดง (England et al., 2011) และจากการค้นคว้ายังพบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้การออกแบบทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัญหาคุณภาพของโรงงานประกอบ IC packaging และปรับตั้งพารามิเตอร์ในกระบวนการที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อมลวดทองคำ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Analysis of Variance (ANOVA) สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยต้องการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดการจุดเชื่อมต่อ (Bond size) ความสูงของจุดเชื่อมต่อ (Bond Height) และความแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อ (Bond Strength) ซึ่งผลจากงานวิจัยพบว่าการตั้งค่าพารามิเตอร์ควรปรับ ค่าแรงกดการเชื่อม (Bond force) ที่ 40 - 60 กรัม ค่าเวลาในการเชื่อม (Bond time) ที่ 10 - 30 ms และกำลังไฟในการเชื่อม (US Power) 80 - 120 วัตต์ จะให้ค่าความแข็งแรงของการเชื่อมลวดที่จะมีค่าที่เหมาะสม (Satianrangsarith and Tirakanogsathit, 2012) ในช่วงเวลาต่อมาได้พบว่าการนำเอาวิธีทางสถิติจำนวนสองวิธีมาใช้ร่วมกันคือการนำเอาวิธีทากูชิมาใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบของงานวิจัย เมื่อได้ผลจากการทดลองแบบทากูชิ แล้วจึงใช้วิธีแฟกทอเรียลเต็มจำนวนและวิธีพื้นผิวตอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้วิเคราะห์ปัจจัยเกี่ยวกับ EFO และปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของการเชื่อมลวดทองคำ โดยผลของงานวิจัยนั้นสรุปได้ว่าการปรับตั้ง EFO current ที่ 50 mA, อุณหภูมิที่

158 องศาเซลเซียส เวลาในการเชื่อมที่ 20 ms และแรงกดที่ 185 mN จะให้ผลการความแข็งแรงของการเชื่อมลวดทองคำดีที่สุด (Gomes, Mayer and Lin, 2015) และในปีต่อมาได้มีการกล่าวถึงการกระบวนการเชื่อมลวดที่ทำจากโลหะผสมคือลวดที่ผลิตขึ้นจากอลูมิเนียมชุบด้วยเงินเพราะในช่วงเวลาดังกล่าวโลหะประเภทนี้ถือว่ามีแนวโน้มในการนำไปใช้มากขึ้นเนื่องจากต้นทุนต่ำกว่าการใช้ทองคำ โดยทำการทดสอบความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้ภายใต้อุณหภูมิที่สูงและความชื้นสัมพัทธ์พบว่าลวดที่ทำจากอลูมิเนียมชุบเงินนั้นสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดีภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ (Schneider-Ramelow and Ehrhardt, 2016) ซึ่งในงานวิจัยสำหรับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมลวดทองคำ ที่ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบเพื่อนำไปใช้ในการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการ พบงานนำวิธีการออกแบบการทดลองไปใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงกับ IC Packaging คืองานวิจัยปรับปรุงกระบวนการเชื่อมลวดทองคำของวงจร LED โดยงานมีการวิเคราะห์ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อการเชื่อมลวดทองคำทั้งสิ้น 5 ปัจจัยคือ กระแส เวลาในการเชื่อม แรงในการเชื่อม ขนาดของ First bond และกระแสของหัว EFO ซึ่งผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการคือการปรับตั้ง กระแสที่ 163 mA, เวลาในการเชื่อม 11 ms ขนาดของ First bond ที่ 2.5 mil และกระแสของหัว EFO ที่ 27 mA จะทำให้ค่าได้ตามมาตรฐาน (Kim et al., 2017) ในปีต่อมาได้มีการพยายามปรับปรุงลักษณะของเส้นลวดจากที่มีลักษณะเป็นทรงกลมเป็นทรงรีเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำโดยในการศึกษาใช้การทดสอบปัจจัยที่ละหนึ่งปัจจัยเพื่อศึกษาการโค้งตัวซึ่งผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าลวดทองคำทรงรีที่มีขนาดใหญ่จะให้ผลอัตราการโค้งตัวน้อยที่สุดแต่อย่างไรก็ตามการที่จะนำลวดทองคำชนิดที่เป็นวงรีไปใช้ในกระบวนการจริงยังจำเป็นที่จะต้องได้รับการพัฒนาต่อไป (Kung and Hsieh, 2017) ในช่วงเวลาปัจจุบันพบว่ามีการวิจัยที่ให้ความสนใจถึงความแข็งแรงของเส้นลวดทองแดงในกระบวนการเชื่อมลวด เพราะที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของ ลวดทองแดงนั้นจะลดลงเมื่อระดับความบริสุทธิ์ของทองแดงเพิ่มขึ้น และถ้าต้องการให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจำเป็นต้องใช้ลวดทองแดงความบริสุทธิ์ ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้จึงศึกษาการประยุกต์ใช้ความร้อนด้วยเลเซอร์เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการเชื่อมลวดทองแดงเพื่อปรับปรุงโครงสร้างของลวดทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ต่ำ โดยผลการทดลองพบว่าการใช้ความร้อนด้วยเลเซอร์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการเชื่อมลวดทองแดงได้ (Singh and Haseeb, 2019) ในปีเดียวกันยังพบงานวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมลวดทองคำ โดยใช้แพดทำจากแก้วเนื่องจากแก้วเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี โดยวิธีพื้นผิวผลตอบ โดยมีกระบวนการวิจัยคือ ทำความสะอาดแพดแก้วและใช้แผ่นเงินติดลงบนแพดจากนั้นจึงเชื่อมลวดทองคำและให้ความร้อนที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 วันเพื่อบันทึกค่าแรงเฉือน ผลการวิจัยพบว่าเวลาที่จะทำให้ค่าแรงเฉือนที่ดีที่สุดนั้นจะต้องให้ความร้อนไม่เกิน 8 วัน (Kam et al., 2019)

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การนำวิธีทางสถิติมาใช้ในการหาสถานะที่เหมาะสมที่จะปรับตั้งพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำนั้นเป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยจำนวนมาก โดยงานวิจัยแต่ละงานแสดงให้เห็นถึงการนำวิธีการทางสถิติมาประยุกต์ใช้ ซึ่งรวมถึงรายละเอียดของปัจจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น รวมถึงผลตอบของงานวิจัยล้วนมีความแตกต่างกัน จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ ผู้วิจัยได้นำผลการศึกษางานวิจัยนั้นมาวิเคราะห์ร่วมกับบริษัทผู้ผลิต IC Packaging ที่เป็นกรณีศึกษา จนทำให้พบปัญหาและการนำเสนอที่แตกต่างจากการวิจัยที่มีอยู่ใน

ปัจจุบัน คือการพิจารณาเลือกชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ คือ หัวเชื่อมลวดทองคำ เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่มีราคาสูงและจำเป็นต้องเปลี่ยนออกทันทีเมื่อหมดอายุการใช้งานตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด จากนั้นผู้วิจัยจึงได้สืบค้นข้อมูลงานวิจัยพบว่าหัวเชื่อมลวดแต่ละชิ้นสามารถใช้งานได้ 1 ล้านครั้ง หรือน้อยลงตามสภาวะการใช้งานของงานแต่ละงาน (Chauhan, Zhong and Pecht, 2013) แต่เมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของหัวเชื่อมลวดทองคำ ของบริษัทผู้ผลิต IC Packaging ในกรณีศึกษา พบว่าจำนวนครั้งในการใช้งานกำหนดไว้น้อยกว่าข้อมูลที่สืบค้นมา ซึ่งปัญหาเกิดจากการกำหนดอายุการใช้งานไม่ครอบคลุมถึงปัจจัยในกระบวนการและสภาวะการทำงานจริง ทำให้ไม่สามารถใช้งานหัวเชื่อมได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เหตุนี้จึงส่งผลให้ต้นทุนของการผลิตสูงขึ้น จากปัญหานี้เองทำให้ผู้วิจัยและบริษัทผู้ผลิตต้องการปรับปรุงปัญหาดังกล่าว หนึ่งในกลยุทธ์ของการปรับลดต้นทุนการผลิตคือการนำหัวเชื่อมลวดทองคำกลับมาใช้ซ้ำ (Cao, 2015) โดยกระบวนการนำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลับไปใช้ซ้ำ จำเป็นต้องมีนำชิ้นส่วนมาทำการทดสอบ (Klauner, Grimm and Hendrickson, 1998) รวมถึงการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดการทำงานเมื่อจะต้องนำชิ้นส่วนไปใช้ซ้ำ เพื่อให้มั่นใจว่าชิ้นส่วนนั้นจะสามารถผลิตชิ้นงานได้ตามมาตรฐาน ซึ่งวิธีการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดนั้นมีหลายวิธีที่นำมาใช้ในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ เช่น การทดสอบปัจจัยที่ละหนึ่งปัจจัย วิธีทากูชิ (Yeh and Tsai, 2014) วิธีเหล่านี้ล้วนเป็นวิธีที่ถูกนำไปใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Xu et al., 2010) (Stobbe et al., 2002) แต่จากงานวิจัยกล่าวไว้ว่าวิธีที่เหมาะสมกับการหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะใช้ในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำคือ วิธีแฟกทอเรียล (Lu and Wong, 2017) และวิธีพื้นผิวผลตอบ (Prakash et al., 2018) เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์กระบวนการที่มีปัจจัยจำนวนมาก (Dente et al., 2003; Van Berkuma et al., 2005) และการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบนั้นก็สามารถใช้ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลร่วมกับผลจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Mayers and Montgomery, 2011) เพื่อหาค่าระดับของปัจจัยที่ดีที่สุดในการปรับปรุงกระบวนการผลิตได้ (Obeng, Morrell and Napier-Munn, 2005; Acikalin et al., 2005) และเมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดแล้ว เมื่อจะต้องนำสภาวะดังกล่าวไปใช้งานจะต้องควบคุมในกระบวนการทำงาน โดยในการควบคุมกระบวนการนั้นจะต้องใช้หลักการทางสถิติ ซึ่งมีงานวิจัยที่กล่าวถึงการนำเอาแผนภูมิควบคุมไปประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมกระบวนการผลิต Semiconductor (Khaw et al., 2018) ซึ่งเป็นงานที่มีลักษณะงานใกล้เคียงกับงานที่เป็น IC Packaging โดยผลจากการวิจัยพบว่าการควบคุมกระบวนการได้ผลเป็นอย่างดีทั้งนี้ในงานวิจัยยังมีการพัฒนาแผนภูมิควบคุมแบบเมตริกซ์เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการเฉพาะอีกด้วย (Kim et al., 2019) รวมถึงยังมีงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงการเลือกนำแผนภูมิควบคุมมาใช้ในกระบวนการเพราะมีความยืดหยุ่นในการจัดการและควบคุมการผลิต (Kosztyn and Katona, 2018) ดังเช่นการควบคุมคุณภาพของการเชื่อมลวดในงานวิจัย คือ การทดสอบค่าแรงดึงและแรงเฉือนของลวด ซึ่งเป็นการทดสอบแบบทำลาย จึงควรใช้การควบคุมกระบวนการโดยใช้หลักทางสถิติด้วยแผนภูมิควบคุมประเภท X-MR Chart เพื่อควบคุมกระบวนการ (Montgomery, 2009b) เพื่อทำให้มั่นใจได้ว่าหัวเชื่อมที่นำกลับมาใช้นั้นจะไม่ส่งผลต่อคุณภาพการเชื่อมของชิ้นงาน (Stobbe et al., 2002)

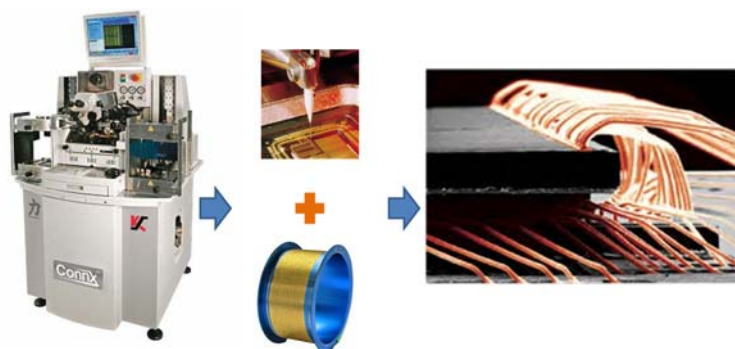
บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะเสนอวิธีการนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่คาดว่าจะหมดอายุในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ (Gold Wire bonding) ของการผลิต IC Packaging กลับมาใช้ใหม่จากกรณีศึกษาของบริษัทผู้ผลิต IC Packaging ที่ตั้งอยู่ในจังหวัดสระบุรี โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดและสร้างสมการแบบจำลองเพื่อให้ผลิตงานได้ตามมาตรฐานคุณภาพของการเชื่อม

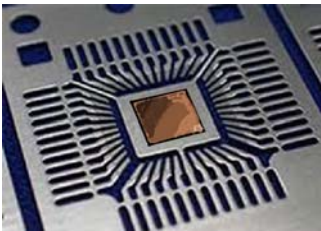
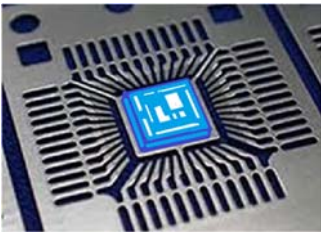
3.1 การศึกษากระบวนการเชื่อมลวดทองคำ

การศึกษากกระบวนการเชื่อมลวดทองคำนั้น ผู้วิจัยจะดำเนินการศึกษากกระบวนการเชื่อมลวดทองคำจากงานวิจัย คู่มือการทำงานของบริษัทรวมถึงจากประสบการณ์ของวิศวกรการผลิต เพื่อรวบรวมข้อมูลปัจจัยทั้งหมดในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำที่คาดว่าจะส่งผลต่อคุณภาพของการเชื่อม โดยผลการศึกษาเบื้องต้น สามารถแสดงกระบวนการเชื่อมลวดทองคำได้ดังภาพที่ 3.1 กล่าวคือ กระบวนการประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ เครื่องเชื่อมลวดทองคำ ลวดทองคำ และหัวเชื่อมลวดทองคำที่จะใช้ในการเชื่อมต่อวงจรของชิ้นงาน และสามารถแสดงรายละเอียดของกระบวนการได้ดังตารางที่ 3.1 จากการศึกษากระบวนการเชื่อมลวดทองคำจากงานวิจัยและในกรณีศึกษาพบว่า มีชิ้นส่วนสำคัญที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำคือหัวเชื่อมลวดทองคำ (Gomes, Mayer and Lin, 2015) ซึ่งข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต IC Packaging ในกรณีศึกษามีการกำหนดอายุการใช้งานของหัวเชื่อมลวดทองคำไว้ที่ 300,000 ครั้ง โดยการกำหนดอายุการใช้งานอ้างอิงจากวิศวกร สภาพของหัวเชื่อมและข้อมูลจากผู้ผลิตหัวเชื่อม เมื่อมีการใช้หัวเชื่อมลวดทองคำจนครบจำนวนครั้งที่กำหนด ผู้ผลิตจะทำการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำใหม่ทันที ขณะที่มีการใช้งานหัวเชื่อมลวดทองคำเพื่อผลิตชิ้นงานจะมีการตรวจสอบคุณภาพของการเชื่อม 2 ประเภท ประกอบด้วย การตรวจสอบค่าแรงดึงและค่าแรงเฉือน สำหรับค่ามาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบ แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 โดยที่งานวิจัยนี้ที่จะพิจารณากระบวนการเพื่อนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุมาใช้ซ้ำ ซึ่งการวิจัยจะอ้างอิงกระบวนการและการตรวจสอบตามมาตรฐานเช่นเดียวกับการทำงานด้วยหัวเชื่อมลวดทองคำแบบปกติ

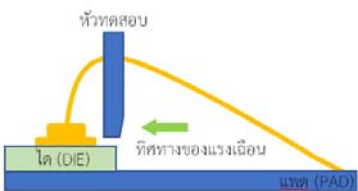


ภาพที่ 3.1 กระบวนการเชื่อมลวดทองคำ

ตารางที่ 3.1 กระบวนการเชื่อมลวดทองคำของผู้ผลิต IC Packaging ในกรณีศึกษา

ลำดับ	ภาพแสดงการทำงาน	รายละเอียด
1		กระบวนการหยอดสารเพื่อยึดติดระหว่างลีดเฟรม (โครงโลหะ) กับได (วงจรรองชิ้นงานที่ได้จากการตัดแผ่นเวเฟอร์ออกเป็นชิ้น)
2		เครื่องจักรอัตโนมัติจะนำโคมมาติดบริเวณกึ่งกลางของลีดเฟรม
3		เครื่องจักรจะใช้ลวดทองคำเชื่อมต่อวงจรของชิ้นงานระหว่างไดและแพด (จุดที่เชื่อมต่อลวดทองคำบนลีดเฟรม)

ตารางที่ 3.2 ค่ามาตรฐานคุณภาพของชิ้นงานและวิธีการทดสอบค่ามาตรฐาน

รายการตรวจสอบ	ค่ามาตรฐาน	หน่วย
การทดสอบค่าแรงเฉือน 	≥ 27	กรัม
การทดสอบค่าแรงดึง 	≥ 6	กรัม

3.2 การคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น

กระบวนการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น ผู้วิจัยจะวิเคราะห์กระบวนการร่วมกับวิศวกรที่ทำงานในสายการผลิตและนำข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาใช้ในการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้นที่คาดว่าจะส่งผลต่อคุณภาพของการเชื่อมลวดทองคำ เพื่อให้ได้จำนวนปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการออกแบบการทดลองในจำนวนที่เหมาะสม เมื่อการคัดเลือกปัจจัยเบื้องต้นเรียบร้อยแล้วจะทำการกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงกำหนดปัจจัยที่สามารถควบคุมได้และปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ โดยมีแนวทางการคัดกรองปัจจัยดังแสดงในตารางที่ 3.3

ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ได้จากการศึกษากระบวนการการเชื่อมลวดทองคำนั้น ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลจากกระบวนการผลิตจริงและจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ร่วมกัน จากนั้นจึงกำหนดเป็นปัจจัยที่ใช้ในการทดลองจำนวน 5 ปัจจัย ซึ่งเป็นปัจจัยดังกล่าวนี้เป็นปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อผลตอบของงานวิจัยคือ ผลตอบแรงดึงและผลตอบแรงเฉือนของการเชื่อมลวดทองคำ รวมถึงเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมระดับของปัจจัยได้ ในส่วนของระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองพิจารณาจากข้อจำกัดของเครื่องจักรซึ่งจะปรับตั้งให้มีขอบเขตของระดับปัจจัยให้มีช่วงการทดลองที่กว้างที่สุดเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยจะพิจารณาข้อจำกัดของเครื่องจักรและคู่มือการทำงานของเครื่องจักรควบคู่ไปด้วยเพื่อไม่ให้เกิดการปรับตั้งระดับของปัจจัยที่มีค่าสูงหรือต่ำเกินไป ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงาน เช่นการเกิดการแตกร้าวของแพดใต้ลวดทองคำซึ่งไม่อาจตรวจสอบได้

ตารางที่ 3.3 งานวิจัยและข้อมูลจากกระบวนการผลิตจริงที่ถูกนำมาใช้คัดกรองปัจจัยเบื้องต้น

ปัจจัยที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ข้อมูลจากกระบวนการผลิตจริง	กระบวนการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น
1. Bond force 2. Bond time 3. US Power 4. EFO current 5. Temperature	1. จากค่ามาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด 2. จากข้อมูลของวิศวกร 3. พิจารณาจากข้อจำกัดของเครื่องจักร 4. ข้อกำหนดของการออกแบบการทดลอง	นำข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและข้อมูลปัจจัยที่พิจารณาจากกระบวนการทำงานจริงวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อคัดกรองปัจจัย

3.3 การออกแบบการทดลองและทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน

จากการศึกษากระบวนการเชื่อมลวดทองคำและการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้นพบว่าในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำมีปัจจัยที่เกี่ยวกับผลตอบของงานวิจัยจำนวนมาก โดยในงานวิจัยนี้เลือกมาใช้ในการวิจัยจำนวน 5 ปัจจัยและการกระบวนการคัดกรองปัจจัยที่งานวิจัยเลือกใช้คือการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน โดยใช้ระดับนัยสำคัญทางสถิติในการทดลองที่ $\alpha = 0.05$ ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนนั้น เป็นการออกแบบการทดลองที่สามารถคัดกรองผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบของงานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงเป็นการทดลองที่สามารถวิเคราะห์ผลกระทบหลักของปัจจัยและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยได้ สำหรับการทดลองนั้นจะใช้หลักการพื้นฐานในการออกแบบการทดลองเข้ามาใช้เพื่อควบคุมความ

แปรปรวนจากปัจจัยอื่นที่ไม่สามารถควบคุมได้ประกอบด้วย หลักการแรกคือการทดลองซ้ำซึ่งผู้วิจัยจะทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้ง ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกันเพื่อให้สามารถประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดลองได้ หลักการที่สองคือการสุ่มการทดลอง ในการวิจัยครั้งนี้จะการใช้การสุ่มลำดับของการทดลองเพื่อกระจายความผิดพลาดในการทดลองที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ไปสู่การทดลองทุกการทดลอง ซึ่งในการสุ่มลำดับการทดลองนี้จะทำการสุ่มโดยใช้โปรแกรม Minitab ในการสุ่มลำดับของการทดลอง สำหรับหลักการสุดท้ายคือหลักการควบคุมกระบวนการ ผู้วิจัยจะทำการควบคุมปัจจัยรบกวนอื่นที่อาจเกิดขึ้นในการทดลองที่ไม่ใช่ปัจจัยที่ผู้วิจัยต้องการศึกษาโดยที่จะควบคุมสถานะที่ใช้ในการทดลองให้มีสถานะที่เหมือนกัน โดยในการทดลองจะควบคุมผู้ทำการทดลอง ผู้ตรวจวัดค่า เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง เครื่องจักรที่ใช้ในการวัดค่า รวมถึงควบคุมวันและเวลาที่ใช้ในการทดลองให้อยู่ในช่วงเวลาเดียวกันเพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงในการทดลองและยังช่วยป้องกันปัจจัยรบกวนที่อื่นที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดลอง โดยในการทดลองนั้นจะมีการทดลองเพิ่มที่จุดศูนย์กลางจำนวน 6 การทดลอง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลองเชิงเส้น ในกรณีที่แบบจำลองมีลักษณะเป็นทอมก่าลังสอง (แบบจำลองมีความเป็นส่วนโค้ง) ซึ่งกรณีที่พบว่าผลของการทดลองมีลักษณะของแบบจำลองที่มีความเป็นส่วนโค้ง ผู้วิจัยจะทำการทดลองเพิ่มด้วยการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ โดยใช้การทดลองการเคลื่อนที่ (ขึ้นหรือลง) ไปสู่พื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุด เพื่อปรับระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองให้เข้าใกล้จุดที่มีสถานะที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นจึงทำการทดลองแบบแพกทอเรียลเพื่อตรวจสอบความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลองต่อไป

3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองตามแผนการทดลองที่ได้กำหนดมาข้างต้นแล้ว ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้วิเคราะห์ทางสถิติ (Minitab) ซึ่งในการวิเคราะห์ผลการทดลองจะคัดกรองผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบของงานวิจัยจำนวน 2 ผลตอบคือ ผลตอบแรงดึงและผลตอบแรงเฉือน โดยในกระบวนการวิเคราะห์จะใช้การพิจารณาค่าทางสถิติ P Value ของปัจจัยแต่ละปัจจัยที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้คือ $\alpha = 0.05$ ซึ่งมีรายละเอียดของการพิจารณาดังต่อไปนี้ กรณีที่ (P-value ของปัจจัยแต่ละปัจจัย $> \alpha = 0.05$) แสดงว่าผลกระทบของปัจจัยที่พิจารณานั้นไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทางกลับกันกรณีที่ (P-value ของปัจจัยแต่ละปัจจัย $< \alpha = 0.05$) แสดงว่าผลกระทบของปัจจัยที่พิจารณานั้นส่งผลกระทบต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ผลกระทบหลักของปัจจัยและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย

3.5 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการทดลอง

การตรวจสอบผลการวิเคราะห์นั้นจะใช้การพิจารณาส่วนตกค้าง (Model Adequacy Checking) จะดำเนินการตรวจสอบทุกครั้งหลังจากที่วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลจากการทดลองมีความน่าเชื่อถือและมีผลของข้อมูลเป็นไปตามสมมุติฐานในการออกแบบการทดลอง สำหรับกระบวนการในการวิเคราะห์นั้น ผู้วิจัยจะวิเคราะห์ผลตอบแรงดึงและแรงเฉือนของการเชื่อมลวด

ทองคำ โดยการตรวจสอบผลการวิเคราะห์นั้นประกอบด้วยการตรวจสอบข้อมูลหลักจำนวน 3 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งการตรวจสอบสมมุติฐานการแจกแจงที่เป็นปกติซึ่งจะพิจารณาจากลักษณะการแจกแจงของ ส่วนตกค้างของการทดลองที่จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสามารถตรวจสอบจากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่แสดงในแผนภาพการกระจายตัว (Normal Probability plot) ที่ข้อมูลจะต้อง อยู่ตามแนวของเส้นค่าเฉลี่ยโดยไม่มีข้อมูลจุดใดจุดหนึ่งแยกออกมาจนเด่นชัด และฮิสโตแกรม (Histogram) จะต้องแสดงข้อมูลที่มีลักษณะการแจกแจงปกติ ส่วนที่สองคือการตรวจสอบส่วนตกค้าง ของลำดับเวลา (Plot of Residual in Time Sequence) เป็นการตรวจสอบที่จะช่วยในการตรวจสอบ ความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างส่วนตกค้าง ที่แสดงแนวโน้มค่าความสัมพันธ์เชิงบวกหรือเชิงลบ การพิจารณาส่วนตกค้างของลำดับเวลาจะใช้แผนภาพส่วนตกค้าง (Versus Order) ซึ่งจะพิจารณาทั้ง ส่วนบนและส่วนล่างควรจะต้องมีปริมาณใกล้เคียงกันและไม่ควรมีรูปแบบหรือแนวโน้ม รวมถึงควรจะมี ลักษณะสุ่มจึงจะถือว่าส่วนตกค้างของลำดับเวลาเป็นปกติ ส่วนที่สามคือการพิจารณาส่วนตกค้าง กับค่าทำนาย (Plot of Residual Versus Fitted Values) เป็นการตรวจสอบค่าความแปรปรวน ระหว่างค่าประมาณการทดลองกับค่าส่วนตกค้าง ซึ่งในการตรวจสอบค่าส่วนตกค้างเปรียบเทียบกับค่า ทำนายนั้น โดยผลการวิเคราะห์จะต้องไม่เกิดแนวโน้มและควรจะต้องมีการกระจายตัวของข้อมูลแบบสุ่ม

3.6 การวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองในขั้นต้นคือการ ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลซึ่งมีการทดลองเพิ่มที่จุดศูนย์กลางเพื่อวิเคราะห์ความเป็นส่วน โค้งของแบบจำลอง ในการวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลองนั้น จะพิจารณาค่า P Value ของความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง (Curvature) ที่ได้จากการทดลอง นำมาเปรียบเทียบกับระดับ นัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้คือ $\alpha = 0.05$ กรณีที่ (P-value ของ Curvature $> \alpha = 0.05$) สามารถ วิเคราะห์ผลได้ว่าแบบจำลองไม่มีความเป็นส่วนโค้งซึ่งไม่จำเป็นต้องทำการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ เพิ่มเติมผู้วิจัยสามารถนำผลไปวิเคราะห์ส่วนตกค้างและสามารถใช้ผลการทดลองหาสถานะที่เหมาะสม ได้ดังหัวข้อ 3.7 ในทางตรงข้ามกรณีที่ (P-value ของ Curvature $< \alpha = 0.05$) สามารถวิเคราะห์ผลได้ ว่าลักษณะของแบบจำลองเชิงเส้นมีความเป็นส่วนโค้งซึ่งจำเป็นจะต้องทำการทดลองเพิ่มเติมด้วยวิธี พื้นผิวผลตอบเพิ่มเติมตามขั้นตอนที่ 3.6.1 – 3.6.5

3.6.1 การทดลองการเคลื่อนที่ (ขึ้นหรือลง) ไปสู่พื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุด

เมื่อผลการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าแบบจำลองมีลักษณะเป็นส่วนโค้ง จำเป็นต้องทำ การวิจัยเพิ่มเติมโดยใช้วิธีเคลื่อนที่ (ขึ้นหรือลง) ไปสู่พื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent or Steepest Descent) ซึ่งเป็นกระบวนการการนำปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน มาทำการปรับค่า ระดับของปัจจัยเพื่อเคลื่อนที่ไปสู่พื้นที่บริเวณที่เป็นผลตอบที่ดีที่สุด โดยเลือกปัจจัยจากแบบจำลองที่ ส่งผลกระทบต่อผลตอบมากที่สุดจำนวน 1 ปัจจัย จากนั้นจึงกำหนดระยะการก้าว (Step size) หรือ ขนาดในการปรับระดับของปัจจัยให้มีความเหมาะสมเพื่อทดลองและเก็บผลตอบของการทดลองที่ เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้การทดลองจนกระทั่งผลตอบที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงหรือต่ำที่สุด

3.6.2 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน

ในขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการวิจัยเมื่อได้ผลจากการใช้วิธีการทดลองการเคลื่อนที่ (ขึ้นหรือลง) ไปสู่พื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ซึ่งผู้วิจัยจะการออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบของงานวิจัยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอีกครั้งและเพื่อตรวจสอบความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง โดยปัจจัยที่ใช้ในการทดลองจะลดน้อยลงเนื่องจากถูกคัดกรองให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบของงานวิจัยอย่างมีนัยสำคัญจากการทดลองในหัวข้อ 3.3 จึงทำให้การออกแบบการทดลองที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทดลองคือการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนมากกว่า การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน เนื่องจากการใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนนั้นจะต้องลดจำนวนการทดลองลงซึ่งอาจส่งผลให้เกิดโครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias Structure) ที่ปะปนกันระหว่างปัจจัยเมื่อทำการทดลองซึ่งอาจส่งผลการทดลองผิดพลาดได้ โดยในการทดลองนั้นผู้วิจัยจะกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลองจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลตอบ และระดับของปัจจัยจะกำหนดจากขนาดการก้าว (Step size) ที่ใช้ในการทดลองในหัวข้อ 3.6.1 และมีการทดลองเพิ่มที่จุดศูนย์กลางจำนวน 3 การทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง

3.6.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนนั้น ผู้วิจัยจะนำมาวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้วิเคราะห์ผลทางสถิติ (Minitab) ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อคัดกรองผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบของงานวิจัยที่มีลักษณะของแบบจำลองเป็นส่วนโค้ง ซึ่งจะใช้การพิจารณาค่าทางสถิติ P Value ของปัจจัยแต่ละปัจจัยที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้คือ $<\alpha = 0.05$ ซึ่งมีรายละเอียดของการพิจารณาดังต่อไปนี้ กรณีที่ (P-value ของปัจจัยแต่ละปัจจัย $<\alpha = 0.05$) แสดงว่าผลกระทบของปัจจัยที่พิจารณานั้นไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทางกลับกันกรณีที่ (P-value ของปัจจัยแต่ละปัจจัย $<\alpha = 0.05$) แสดงว่าผลกระทบของปัจจัยที่พิจารณานั้นส่งผลกระทบต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งในการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ ผลกระทบหลักของปัจจัย ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย

3.6.4 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการทดลอง

การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการทดลองในขั้นนี้เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่ได้มาจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน ซึ่งจะใช้การวิเคราะห์ในแนวทางเดียวกันกับการวิเคราะห์ส่วนตกค้างในกระบวนการที่ผ่านมา โดยการตรวจสอบผลการวิเคราะห์นั้นจะใช้การพิจารณาส่วนตกค้าง (Model Adequacy Checking) จำนวน 3 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งการพิจารณาสมมติฐานการแจกแจงที่เป็นปกติซึ่งจะพิจารณาจากลักษณะการแจกแจงของส่วนตกค้างของการทดลองที่จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ โดยสามารถตรวจสอบจากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่แสดงในแผนภาพการกระจายตัว (Normal Probability plot) ที่ข้อมูลจะต้องอยู่ตามแนวของเส้นค่าเฉลี่ยโดยไม่มีข้อมูลจุดใดจุดหนึ่งแยกออกมาจนเด่นชัด และฮิสโตแกรม (Histogram) ที่จะต้องแสดงข้อมูลที่มีลักษณะการแจกแจงปกติ ส่วนที่สองคือการตรวจสอบส่วนตกค้างของลำดับ

เวลา (Plot of Residual in Time Sequence) เป็นการตรวจสอบที่จะช่วยในการตรวจสอบความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างส่วนตกค้าง ที่แสดงแนวโน้มค่าความสัมพันธ์เชิงบวกหรือเชิงลบ ในการพิจารณาส่วนตกค้างของลำดับเวลาจะใช้แผนภาพส่วนตกค้าง (Versus Order) ซึ่งจะพิจารณาทั้งส่วนบนและส่วนล่างควรจะต้องมีปริมาณใกล้เคียงกันและไม่ควรมีรูปแบบใด ๆ เกิดขึ้น รวมถึงควรมีลักษณะสุ่มจึงจะถือว่าส่วนตกค้างของลำดับเวลาเป็นปกติ ส่วนที่สามคือการพิจารณาส่วนตกค้างกับค่าทำนาย (Plot of Residual Versus Fitted Values) เป็นการตรวจสอบค่าความแปรปรวนระหว่างค่าประมาณการทดลองกับค่าส่วนตกค้าง ซึ่งในการตรวจสอบค่าส่วนตกค้างเปรียบเทียบกับค่าทำนายนั้น โดยผลการวิเคราะห์จะต้องไม่เกิดแนวโน้มและควรจะต้องมีการกระจายตัวของข้อมูลแบบสุ่ม

3.6.5 การวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนที่มีการทดลองเพิ่มที่จุดศูนย์กลางซึ่งจะเป็นข้อมูลที่ใช้ร่วมกันกับกระบวนการการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง ซึ่งในการวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลองของแบบจำลองนั้น จะพิจารณาค่า P Value ของความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง (Curvature) ที่ได้จากการทดลอง นำมาเปรียบเทียบกับระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้คือ $\alpha = 0.05$ กรณีที่ (P-value ของ Curvature $> \alpha = 0.05$) สามารถวิเคราะห์ผลได้ว่าแบบจำลองไม่มีความเป็นส่วนโค้งซึ่งไม่จำเป็นต้องทำการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบเพิ่มเติมผู้วิจัยสามารถนำผลไปวิเคราะห์ส่วนตกค้างและสามารถใช้ผลการทดลองหาสถานะที่เหมาะสมได้ดังข้อ 3.7 ในทางตรงข้ามกรณีที่ (P-value ของ Curvature $< \alpha = 0.05$) สามารถวิเคราะห์ผลได้ว่าลักษณะของแบบจำลองเชิงเส้นมีความเป็นส่วนโค้งซึ่งจะต้องกลับไปทดลองทำการทดลองเพิ่มเติมด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบดังหัวข้อ 3.6.1 – 3.6.5 อีกครั้ง

3.7 การหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ

การหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำนั้น จะใช้ผลจากการออกแบบการทดลองและค่าคุณภาพของการเชื่อมลวดทองคำเป็นผลตอบในงานวิจัยคือ ค่าแรงดึงและแรงเฉือน โดยมีค่าเป้าหมายในการทดลองคือค่าที่มากที่สุด (Maximize) ของแต่ละผลตอบของงานวิจัย สำหรับขั้นตอนในกระบวนการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการทำงานนั้น จะใช้ฟังก์ชัน Response optimizer ของโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab มีขั้นตอนในการทำงานวิจัยดังต่อไปนี้ การกำหนดฟังก์ชันในการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดจะกำหนดเป็นแบบ (Maximize) ซึ่งจะต้องมีการกำหนดค่าในการทำงานจำนวน 2 ค่าคือ ค่าเป้าหมายของผลตอบ (Target) ที่ต้องการและค่าต่ำที่สุด (Lower) ที่จะได้รับเมื่อใช้สถานะที่เหมาะสม โดยการกำหนดค่าเป้าหมายนั้นผู้วิจัยจะกำหนดให้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด 2 เท่า และกำหนดค่าต่ำที่สุดให้มีค่าสูงกว่าที่ลูกค้ากำหนด 1.5 เท่า เพื่อให้มั่นใจว่าการที่นำเอาหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วมาใช้ในการผลิตนั้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน จากนั้นจึงเลือกปัจจัยส่งผลกระทบต่อผลตอบในงานวิจัยเพื่อสร้างสถานะที่เหมาะสมที่สุดซึ่งจะแสดงสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยและผลตอบที่ดีที่สุดเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิต

3.8 การทดลองยืนยันผลของสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

เป็นขั้นตอนที่ใช้ทดลองใช้หัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุผลิตงานโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากข้อที่ 3.7 จะสามารถผลิตชิ้นงานได้ตามมาตรฐานคุณภาพที่กำหนด ซึ่งค่าผลตอบแรงดึงและแรงเฉือนที่ได้จากการผลิตโดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจะต้องมีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันกับค่าที่ได้จากการคำนวณอย่างมีนัยสำคัญ ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยจะนำผลจากการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดไปปรับตั้งเครื่องจักรเพื่อใช้ผลิตงานจริงเพื่อเป็นการยืนยันผล โดยที่ผู้วิจัยจะทำการเก็บข้อมูลจากการทำงานจริงจำนวน 30 ข้อมูล และใช้การทดสอบทางสถิติแบบ One Sample T-Test ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ เพื่อทดสอบสมมติฐานและวิเคราะห์ว่าผลค่าเฉลี่ยของแรงดึงและแรงเฉือนของกระบวนการเชื่อมลวดทองคำโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดนั้นว่ามีความแตกต่างกับค่าที่ได้จากการคำนวณหรือไม่ โดยกำหนดสมมุติฐานในการทดลองไว้ดังต่อไปนี้

สมมุติฐานในการทดลองยืนยันผล

H_0 : ผลค่าเฉลี่ยของแรงดึงและแรงเฉือน เท่ากับ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง

H_1 : ผลค่าเฉลี่ยของแรงดึงและแรงเฉือน ไม่เท่ากับ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง

3.9 การวิเคราะห์การทดลองยืนยันผล

การวิเคราะห์การทดลองยืนยันผลเป็นการนำข้อมูลจากการใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดไปผลิตชิ้นงานจริงจำนวน 30 ชิ้นและนำมาทดสอบสมมุติฐานแบบ One Sample T-Test โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab ตามสมมุติฐานที่ได้กล่าวไว้ในข้อที่ 3.8 เพื่อวิเคราะห์ว่าค่าเฉลี่ยจากการทดลองยืนยันผลมีความแตกต่างจากค่าจากแบบจำลองหรือไม่ สำหรับการพิจารณาจะใช้การพิจารณาค่าทางสถิติ P Value ที่ได้จากการทดลองนำมาเปรียบเทียบกับระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้คือ $\alpha = 0.05$ โดยมีรายละเอียดของการพิจารณาดังต่อไปนี้ กรณีที่ (P-value ของการทดลอง $> \alpha = 0.05$) แสดงว่าค่าเฉลี่ยของแรงดึงและแรงเฉือนมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทางกลับกันกรณีที่ (P-value ของการทดลอง $< \alpha = 0.05$) แสดงว่าค่าเฉลี่ยของแรงดึงและแรงเฉือนมีค่าไม่เท่ากับค่าที่ได้จากแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และหากผลค่าเฉลี่ยของแรงดึงและแรงเฉือน จากการดำเนินงานจริงมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญจะต้องดำเนินการทดลองใหม่

3.10 การควบคุมกระบวนการเพื่อให้ชิ้นงานที่ได้อยู่ภายใต้มาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด

เมื่อทำการทดลองยืนยันผลเป็นที่เรียบร้อยแล้วและพบว่าสภาวะที่เหมาะสมจากการวิจัยสามารถนำไปใช้ได้และไม่ส่งผลกระทบต่อชิ้นงานที่ผลิตจากหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วเกิดความเสียหาย ในลำดับขั้นตอนนี้คือกระบวนการนำชิ้นงานไปทำการผลิตจริงและมีความจำเป็นที่จะต้องทำการควบคุมกระบวนการให้อยู่ภายใต้การควบคุม ซึ่งเครื่องมือที่จะถูกนำมาใช้ในขั้นตอนนี้คือแผนภูมิควบคุมเชิงปริมาณแบบ X-MR Chart ซึ่งเป็นแผนภูมิที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมกระบวนการที่เป็นการทดสอบแบบทำลายและใช้จำนวนชิ้นงานน้อย สำหรับขั้นตอนในการทำงานของกระบวนการควบคุมกระบวนการประกอบด้วย การสร้างเส้นขีดจำกัดของแผนภูมิควบคุมโดยการผลิตชิ้นงานจำนวน

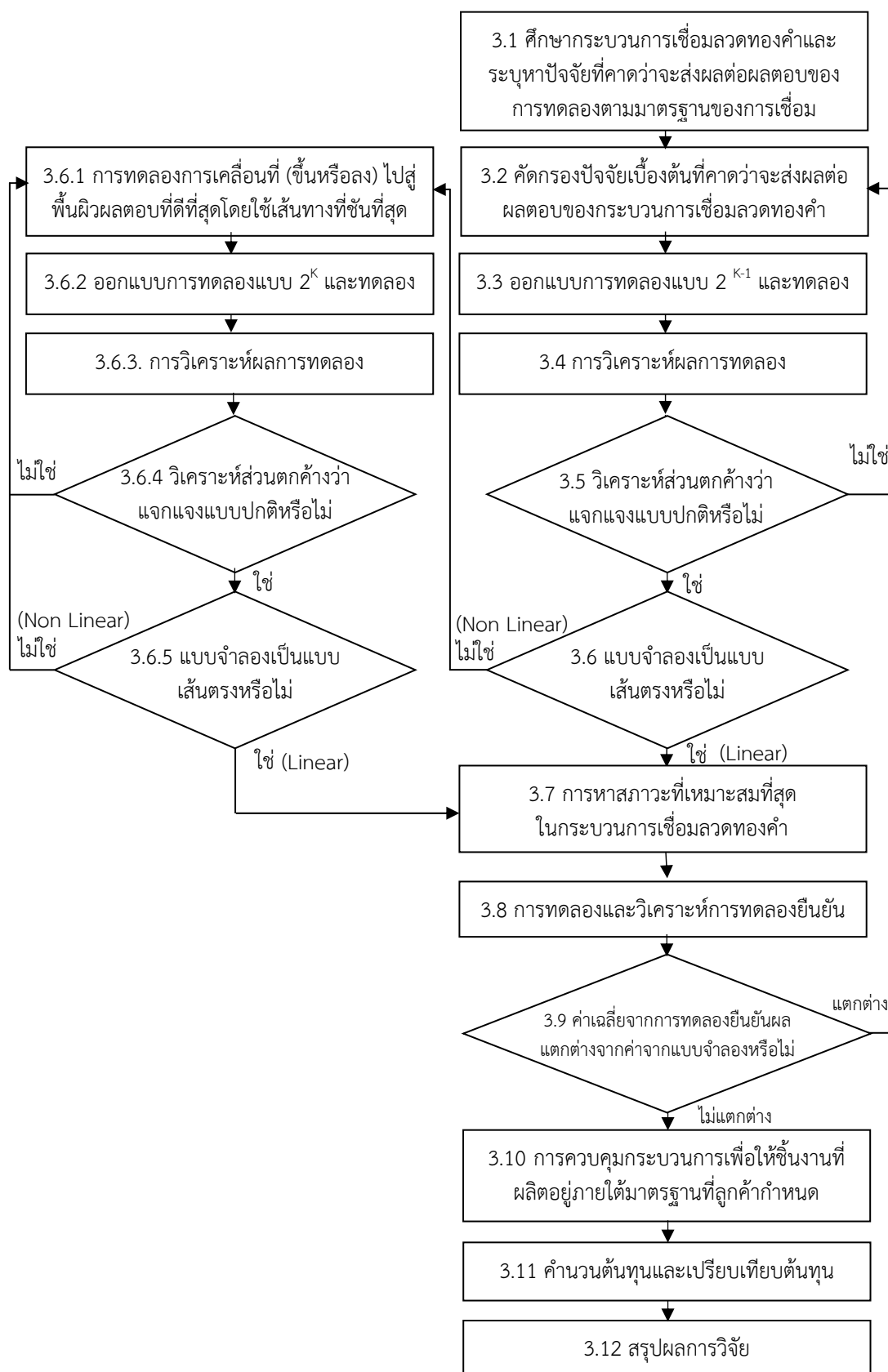
30 ชิ้นงาน เพื่อใช้ในการสร้างเส้นขีดจำกัดบน, ขีดจำกัดล่างและเส้นควบคุมของแผนภูมิสำหรับผลตอบของงานวิจัย จากนั้นเมื่อทำการสร้างเส้นขีดจำกัดจะเริ่มทำการผลิตงานด้วยหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุการใช้งานแล้ว (ใช้เชื่อมไปแล้ว 300,000 ครั้ง คิดเป็น 75,000 ชิ้นงาน) โดยในการผลิตชิ้นงานและสุ่มตรวจสอบชิ้นงานที่ทำการผลิตเมื่อมีการเชื่อมครบ 11,200 ครั้ง (2,800 ชิ้นงาน) โดยจะตั้งเป้าหมายในการเพิ่มจำนวนครั้งที่สามารถเชื่อมลวดทองคำเพิ่มขึ้น 168,000 ครั้ง (42,000 ชิ้นงาน) สำหรับทั้งผลตอบแรงดึงและผลตอบแรงเฉือน โดยใช้แผนภูมิควบคุมในการวิเคราะห์และดูแนวโน้มของชิ้นงาน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดข้อบกพร่องขณะที่ทำการผลิตโดยใช้หัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุ

3.11 คำนวณต้นทุนและเปรียบเทียบต้นทุน

ขั้นตอนการคำนวณต้นทุนและเปรียบเทียบต้นทุนและผลที่ได้จากการนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วกลับมาใช้ซ้ำในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำนั้น จะพิจารณาถึงต้นทุนการผลิตในกระบวนการที่ลดลง โดยผู้วิจัยจะพิจารณาถึงต้นทุนหลายด้านเพื่อให้ครอบคลุมถึงสิ่งที่ได้มาจากการวิจัยทั้งด้านต้นทุนด้าน เงิน เวลา ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในกระบวนการและทำการเปรียบเทียบเมื่อมีการนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรมาใช้ซ้ำหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการยืดอายุการใช้งานชิ้นส่วนของเครื่องจักร ประกอบด้วยการพิจารณาต้นทุน 3 ส่วน ดังต่อไปนี้ การพิจารณาต้นทุนด้านเวลาในการซ่อมบำรุง (Maintenance cost) เป็นการคำนวณต้นทุนด้านเวลาของผู้ผลิตที่จะต้องสูญเสียเมื่อจำเป็นต้องมีการหยุดเครื่องจักรเพื่อเปลี่ยนชิ้นส่วนของเครื่องจักร การพิจารณาต้นทุนด้านพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการ (Electricity cost) เป็นการคำนวณต้นทุนด้านพลังงานซึ่งสูญเสียไป โดยจะพิจารณาจากต้นทุนของพลังงานที่สามารถลดลงในกระบวนการผลิตได้ เมื่อนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่หมดอายุมาใช้ซ้ำซึ่งจะส่งผลให้จำนวนหัวเชื่อมลวดทองคำที่ใช้ในการผลิตในแต่ละเดือนลดลงทำให้เวลาในการใช้พลังงานสำหรับเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำลดลง การพิจารณาต้นทุนด้านวัตถุดิบที่ต้องใช้ในกระบวนการ (Purchasing material cost) เป็นการคำนวณต้นทุนด้านวัตถุดิบ โดยผู้วิจัยจะพิจารณาจากต้นทุนของจำนวนหัวเชื่อมลวดทองคำที่สามารถลดลงได้หากมีการนำหัวเชื่อมลวดทองคำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการ โดยในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบต้นทุนนั้นจะคำนวณจากยอดการผลิตที่ผู้ผลิตจะต้องผลิตในแต่ละเดือนโดยเฉลี่ย

3.12 การสรุปผลงานวิจัย

ในขั้นตอนสรุปผลการวิจัยจะดำเนินการสรุปผลการวิจัยในการนำหัวเชื่อมลวดทองคำมาใช้ซ้ำในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อสรุปและจัดทำรูปเล่มงานวิจัยโดยมีรายละเอียดประกอบด้วย ปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมลวดทองคำ, สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับตั้งปัจจัยที่ใช้ในการนำหัวเชื่อมลวดทองคำมาใช้ซ้ำและผลการคำนวณเปรียบเทียบต้นทุนที่สามารถลดได้จากงานวิจัย



ภาพ 3.2 สรุปแนวทางการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำเสนอวิธีการนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่คาดว่าจะหมดอายุในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ (Gold Wire bonding) ของการผลิต IC Packaging กลับมาใช้ใหม่จากกรณีศึกษาของบริษัทผู้ผลิต IC Packaging ที่ตั้งอยู่ในจังหวัดสระบุรี โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดและสร้างสมการแบบจำลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมตามคุณภาพของการเชื่อมมาตรฐาน

4.1 ผลการศึกษาระบวนการเชื่อมลวดทองคำ

ผลจากการศึกษาระบวนการในการผลิต IC Packaging พบว่ากระบวนการผลิตขึ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ประเภท IC Packaging แบ่งกระบวนการผลิตออกเป็น 2 ส่วนคือ กระบวนการ Front of Line (FOL) ประกอบด้วยกระบวนการย่อยจำนวน 5 กระบวนการคือ Silicon wafer grinding, Silicon wafer Saw, DIE Attach, Gold wire bonding และ Molding โดยกระบวนการในส่วนของ FOL นั้นจะต้องทำในห้องที่ควบคุมฝุ่นผง (Clean room) และกระบวนการ End of Line (EOL) ประกอบด้วยกระบวนการย่อยจำนวน 4 กระบวนการคือ Post Mold cure, Solder paste, DTFS และ Testing สำหรับกระบวนการในส่วน EOL สามารถผลิตได้ในห้องที่ปกติไม่ต้องควบคุมปริมาณฝุ่นผง โดยในภาพที่ 4.1 แสดงกระบวนการผลิตและรายละเอียดของกระบวนการในส่วนของ FOL และภาพที่ 4.2 แสดงกระบวนการผลิตและรายละเอียดของกระบวนการในส่วนของ EOL

Front of Line (FOL)	รายละเอียดกระบวนการ
- Silicon wafer grinding - Silicon wafer Saw - DIE Attach - Gold wire bonding - Molding	- การเจียรระไนความหนาแผ่น Silicon wafer - การตัดแยกได (DIE) หรือวงจรออกเป็นชิ้น ๆ - การนำไปติดลงบนลีดเฟรม - การเชื่อมต่อวงจรระหว่างไดกับลีดเฟรม - การฉีดยึดพลาสติกเพื่อป้องกันความเสียหาย

ภาพที่ 4.1 กระบวนการผลิตและรายละเอียดของกระบวนการในส่วนของ FOL

End of Line (EOL)	รายละเอียดกระบวนการ
• Post Mold cure • Solder paste • DTFS • Testing	• การตรวจสอบคุณลักษณะการโมล • การเคลือบตะกั่วบริเวณขาชิ้นงาน • การตัดและพับขาชิ้นงานออกเป็นชิ้น ๆ • การทดสอบชิ้นงาน

ภาพที่ 4.2 กระบวนการผลิตและรายละเอียดของกระบวนการในส่วนของ EOL

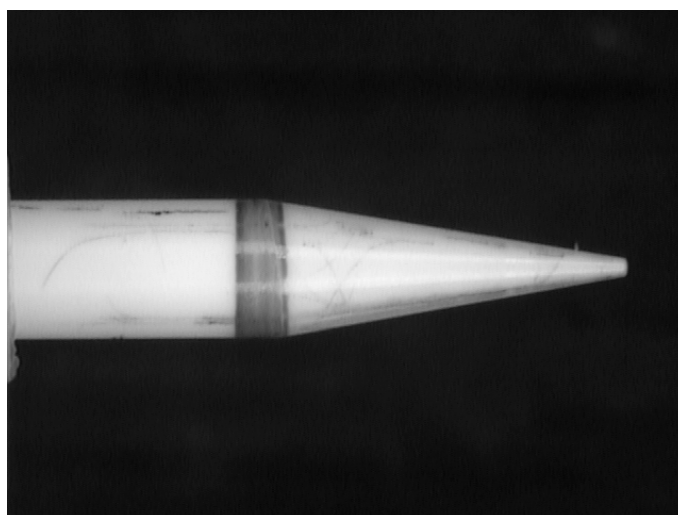
กระบวนการผลิตที่มีความสำคัญในการผลิต IC Packaging คือกระบวนการ Gold wire bonding เพราะเป็นการใช้ลวดทองคำที่มีขนาดเล็กเชื่อมต่อวงจรของชิ้นงาน (Wang and Sun 2009) และในกระบวนการต้องใช้เครื่องจักรที่มีความแม่นยำสูง รวมถึงใช้ปัจจัยในการปรับตั้งจำนวนมาก (Kim and et al., 2017) ซึ่งในการศึกษากระบวนการผลิตจะศึกษากระบวนการเชื่อมลวดทองคำ โดยอ้างอิงข้อมูลจากกระบวนการจริงและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในส่วนของเครื่องมือและเครื่องจักรใช้และอ้างอิงตามมาตรฐานของผู้ประกอบการ ซึ่งผลจากเก็บข้อมูลเครื่องมือและเครื่องจักรที่จะใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย เครื่องเชื่อมลวดทองคำ (Machine model) รุ่น Kns ICoXX PLUS แสดงในภาพที่ 4.3 หัวเชื่อมลวดทองคำ (Capillary type) รุ่น Kns P/N#488XX-46XX แสดงในภาพที่ 4.4 สำหรับลวดทองคำที่ใช้ในกระบวนการ (Wire type) จะใช้ลวดทองคำขนาด 1.3 mils (Au 99.99%) ซึ่งในกระบวนการจะเชื่อมลวดทองคำลงบนลิตเฟรมที่มีจำนวนชิ้นงาน 56 ชิ้นงานต่อลิตเฟรม (pcs/lead frame) และจำนวนครั้งการเชื่อมลวดทองคำต่อชิ้นงาน (Bonding time/pcs) คือ 4 ครั้งต่อชิ้นงาน (จำนวนลวดทองคำจำนวน 2 เส้น โดยเชื่อมเส้นละสองจุดคือ First bond และ second bond ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ซึ่งจากข้อมูลโดยสรุปสามารถเขียนแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ที่แสดงข้อมูลรายละเอียดของเครื่องจักรและอุปกรณ์ในงานวิจัย

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลรายละเอียดของเครื่องจักรและอุปกรณ์ในงานวิจัย

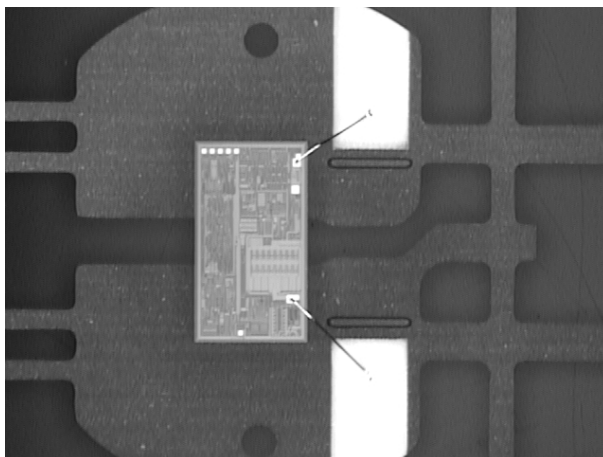
Item	Specification
Machine model	Kns ICoXX PLUS
Capillary type	Kns P/N#488XX-46XX
Testing machine	4000 series Multipurpose Bondtester
Wire type	Gold 1.3 mils (Au 99.99%)
pcs/lead frame	56 pcs/lead frame
Bonding time/pcs	4 times/pcs



ภาพที่ 4.3 เครื่องเชื่อมลวดทองคำ (Machine model) รุ่น Kns ICoXX PLUS

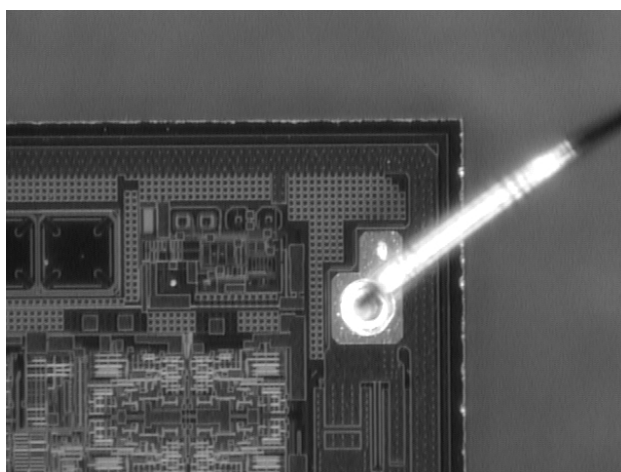


ภาพที่ 4.4 หัวเชื่อมลวดทองคำ (Capillary type) รุ่น Kns P/N#488XX-46XX



ภาพที่ 4.5 ลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมลวดทองคำจากกรณีศึกษา

ผลจากการศึกษาขั้นตอนในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ สามารถสรุปขั้นตอนเพื่ออธิบายรายละเอียดของกระบวนการได้ดังต่อไปนี้คือ การเชื่อมลวดทองคำจะเริ่มจากการให้กระแสไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า EFO Wand ซึ่งมีหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้เส้นลวดเกิดความร้อนจนหลอมเป็นลักษณะทรงกลม จากนั้นจึงกดลวดทองคำที่หลอมแล้วลงบนวงจร (แพด) ซึ่งจุดเชื่อมต่อแรกนี้จะมีลักษณะการเชื่อมต่อที่มีรูปทรงเป็นทรงกลม กระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นจะเรียกจุดเชื่อมต่อวงจรจุดแรกว่า First bond ดังที่แสดงในภาพที่ 4.6 จากนั้นเครื่องจักรจะยกลวดทองคำสูงขึ้นและลากเส้นลวดทองคำมาเชื่อมต่อในจุดที่สองที่บริเวณลีดเฟรม ซึ่งจะเป็นจุดที่ใช้เชื่อมต่อวงจรของ IC Packaging กับวงจรรวมของอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยในการเชื่อมต่อจุดที่สองจะไม่มีหลอมละลายลวดทองคำแต่จะเป็นการแตะลวดทองคำลงบนลีดเฟรมและกดเพื่อให้ลวดทองคำขาด ซึ่งจะมีลักษณะแบนต่างจาก First bond ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม การเชื่อมต่อจุดนี้เรียกว่า Second bond ดังที่แสดงในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.6 ลักษณะของ First bond



ภาพที่ 4.7 ลักษณะของ Second bond

ผลการศึกษาเกี่ยวกับการกำหนดอายุการใช้งานของหัวเชื่อมลวดทองคำในปัจจุบันนั้นพบว่า อายุการใช้งานของหัวเชื่อมลวดทองคำถูกกำหนดจากวิศวกรในกระบวนการ ซึ่งหัวเชื่อมลวดทองคำในกรณีศึกษาได้ถูกกำหนดอายุการใช้งานไว้ 300,000 ครั้ง เมื่อทำงานครบตามจำนวนที่กำหนดไว้ ผู้ประกอบการจะทำการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำชิ้นใหม่ทันที จากนั้นเมื่อหัวเชื่อมลวดทองคำชิ้นใหม่ถูกเปลี่ยนแล้วจะต้องทำการทดสอบค่ามาตรฐานของชิ้นงานที่ใช้หัวเชื่อมลวดทองคำชิ้นใหม่โดยส่วนงานประกันคุณภาพ เพื่อตรวจสอบว่าหัวเชื่อมลวดทองคำชิ้นใหม่ที่เปลี่ยนนั้นสามารถผลิตงานได้ตามมาตรฐานที่กำหนด โดยการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานนั้นจะตรวจสอบค่าแรงดึง (Wire pull) และค่าแรงเฉือน (Bond shear)

กระบวนการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำกรณีที่หัวเชื่อมลวดทองคำหมดอายุการใช้งานนั้นจะถูกเปลี่ยนโดยส่วนงานวิศวกร (Engineering section) โดยที่วิศวกรจะทำการถอดหัวเชื่อมลวดทองคำจากเครื่องและติดตั้งหัวเชื่อมลวดทองคำชิ้นใหม่ จากนั้นวิศวกรจะทดลองผลิตชิ้นงานจำนวน 56 ชิ้น (หนึ่งลิตเฟรม) รวมเวลาเฉลี่ยมาตรฐานในการทำงานของวิศวกรคือ 20 นาที แล้วจึงส่งชิ้นงานให้ส่วนงานควบคุมคุณภาพ (Quality control section) เพื่อสุ่มตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานที่ผลิตโดยหัวเชื่อมลวดทองคำชิ้นใหม่ว่าค่าแรงดึงและแรงเฉือนในการเชื่อมลวดทองคำเป็นไปตามค่ามาตรฐานของลูกค้าหรือไม่ หากพบว่าค่าแรงดึงและแรงเฉือนผ่านตามาตรฐานที่กำหนดจึงจะอนุญาตให้สามารถผลิตชิ้นงานโดยใช้หัวเชื่อมลวดทองคำชิ้นใหม่ โดยที่เวลาเฉลี่ยในการทำงานของกระบวนการตรวจสอบคุณภาพคือ 15 นาที จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยจึงสรุปเวลาในการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำไว้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เวลาเฉลี่ยในการทำงานของกระบวนการตรวจสอบคุณภาพของหัวเชื่อมลวดทองคำ

รายการ	เวลามาตรฐาน
เวลามาตรฐานของกระบวนการในการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำต่อครั้ง	20 นาที
เวลามาตรฐานของกระบวนการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานที่ผลิตด้วยหัวเชื่อมลวดทองคำชิ้นใหม่	15 นาที

การตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานของส่วนงานควบคุมคุณภาพ จะตรวจสอบสอค่าแรงดึง (Wire pull) และแรงเฉือน (Bond Shear) ของการเชื่อมลวดทองคำ โดยมีค่ามาตรฐานในการตรวจสอบซึ่งถูกกำหนดโดยลูกค้าของผู้ผลิตในกรณีศึกษา ซึ่งในการเชื่อมลวดทองคำนั้นจะต้องทำการเชื่อมให้ค่าแรงดึงและแรงเฉือนของกระบวนการมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด ดังข้อมูลแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 สำหรับกระบวนการตรวจสอบแรงดึงและแรงเฉือนนั้นจะใช้เครื่องทดสอบรุ่น 4000 Series Multipurpose Bondtester ในการบันทึกค่าแรงดึงและแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 4.8

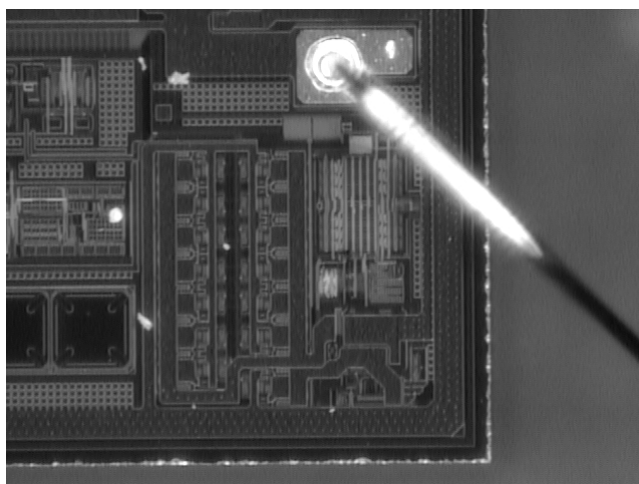
ตารางที่ 4.3 ค่ามาตรฐานของแรงดึงและแรงเฉือน

รายการ	ค่ามาตรฐาน
ค่าแรงดึงมาตรฐาน (Wire pull)	≥ 6 กรัม
ค่าแรงเฉือนมาตรฐาน (Bond shear)	≥ 27 กรัม

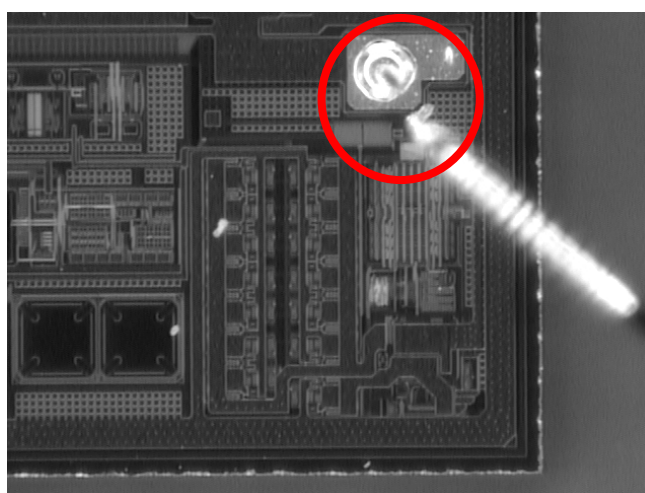


ภาพที่ 4.8 เครื่องทดสอบค่าแรงดึงและแรงเฉือนในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ

ขั้นตอนโดยละเอียดของกระบวนการทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงดึงเป็นกระบวนการทดสอบแบบทำลาย ซึ่งจะใช้เครื่องมือที่มีลักษณะเป็นตะขอ ใช้เกี่ยวบริเวณจุด First bond และดึงขึ้นด้วยแรงคงที่ในแนวตรงซึ่งในกระบวนการนี้จะดึงขึ้นจนกว่าจะเกิดความเสียหายต่อลวดทองคำที่เชื่อมต่อไว้และบันทึกค่าแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ ดังภาพที่ 4.9 (ก) แสดงภาพชิ้นงานก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง และภาพที่ 4.9 (ข) แสดงภาพของชิ้นงานที่ทดสอบแรงดึงแล้วซึ่งจะสังเกตได้ว่าในวงกลมสีแดงลวดทองคำที่เชื่อมต่อไว้ขาดออกจากกันจากการทดสอบแรงดึง สำหรับการทดสอบค่าแรงดึงนี้จะมีโอกาสเกิดความเสียหายต่อเส้นลวดทองคำได้สองกรณีคือกรณีที่แรกที่เกิดขึ้นเป็นปกติคือเส้นลวดจะขาดก่อนที่จะจุด First bond จะเกิดความเสียหายและกรณีที่สองคือจุด First bond หลุดก่อนที่จะลวดทองคำจะขาดซึ่งกรณีที่สองนี้จะไม่สามารถพบเห็นได้ยกเว้นการเชื่อมมีการปรับตั้งค่าผิดปกติจึงจะส่งผลให้เกิดกรณีดังกล่าว



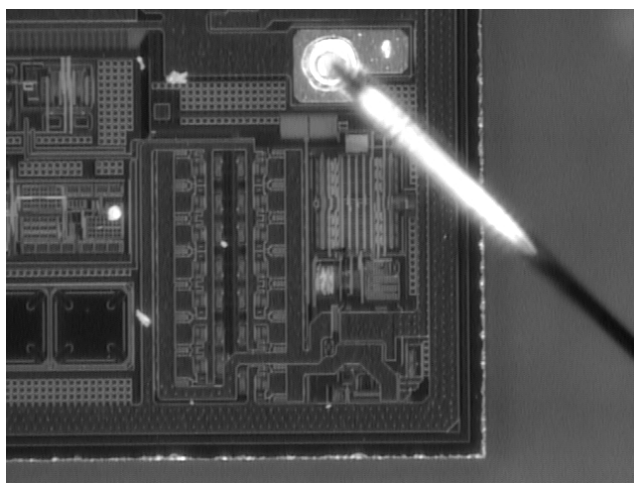
(ก) ภาพชิ้นงานก่อนทดสอบแรงดึง



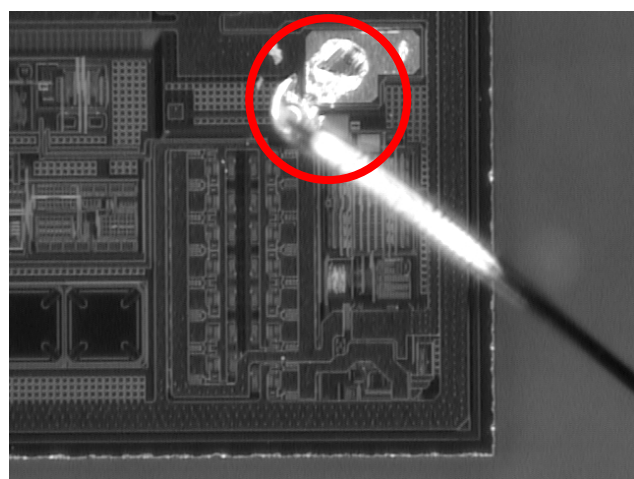
(ข) ภาพชิ้นงานหลังทดสอบแรงดึง

ภาพที่ 4.9 ชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบแรงดึง

ขั้นตอนโดยละเอียดของกระบวนการทดสอบแรงเฉือน โดยการทดสอบแรงเฉือนเป็นกระบวนการทดสอบแบบทำลายเช่นเดียวกับการทดสอบแรงดึง ซึ่งจะใช้เครื่องมือที่มีลักษณะเป็นแท่งใช้ดันบริเวณจุด First bond ด้วยแรงคงที่ในแนวขนาดกัปพื้น ซึ่งในกระบวนการนี้จะดันจุดเชื่อมจนกว่าจะเกิดความเสียหายต่อลวดทองคำที่เชื่อมต่อไว้และบันทึกค่าแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ ดังภาพที่ 4.10 (ก) แสดงภาพชิ้นงานก่อนที่จะทำการทดสอบแรงเฉือน และภาพที่ 4.10 (ข) แสดงภาพของชิ้นงานที่ทดสอบแรงเฉือนแล้ว จะสังเกตได้ว่าในวงกลมสีแดงลวดทองคำที่เชื่อมไว้ดันออกจนหลุดออกจากแพด



(ก) ภาพชิ้นงานก่อนทดสอบแรงเฉือน



(ข) ภาพชิ้นงานหลังทดสอบแรงเฉือน

ภาพที่ 4.10 ชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบแรงเฉือน

4.2 ผลการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น

จากข้อมูลการศึกษากระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า กระบวนการเชื่อมลวดทองคำนั้น มีปัจจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำงานและคาดว่าจะส่งผลกระทบต่อค่าแรงดึงและแรงเฉือน ดังนั้นการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องดำเนินการเพื่อลดจำนวนปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลอง ซึ่งจำนวนปัจจัยที่เพิ่มขึ้นย่อมส่งผลต่อจำนวนการทดลอง เวลาในการทดลอง รวมถึงต้นทุนในการทดลองที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยผลจากการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้นซึ่งคาดว่าจะส่งผลกระทบต่อค่าแรงดึงและแรงเฉือนนั้น ผู้วิจัยพิจารณาข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลจากวิศวกรและข้อจำกัดของเครื่องจักรเพื่อนำมาใช้ในการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้นในการทดลอง ซึ่งสามารถสรุปได้สองส่วนคือ

4.2.1 ปัจจัยที่ได้จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time), ค่าพลังงานที่ใช้ในการสันสะเทือนแบบอัลตราโซนิก (USG Power) ค่ากระแสที่ปล่อยผ่าน EFO เพื่อหลอมลวดทองคำ (EFO current) และค่าอุณหภูมิในการเชื่อม (Temperature) (Satianrangsarith and Tirakanogsathit, 2012; Gomes, Mayer and Lin, 2015)

4.2.3 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาจากกระบวนการทำงานจริง ซึ่งได้จากข้อมูลของวิศวกรและข้อจำกัดของเครื่องจักรประกอบด้วย แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force), เวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time), ค่าพลังงานที่ใช้ในการสันสะเทือนแบบอัลตราโซนิก (USG Power), ค่ากระแสที่ปล่อยผ่าน EFO เพื่อหลอมลวดทองคำ (EFO current) และค่าระยะห่างระหว่าง EFO กับลวดทองคำให้ช่วงที่หลอมละลายลวด (EFO gap)

จากการนำข้อมูลปัจจัยที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและข้อมูลกระบวนการผลิตจริง มาพิจารณาเปรียบเทียบกันพบว่า ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงและแรงเฉือนนั้นตรงกันจำนวน 4 ปัจจัย (ข้อที่ 1 – 4) สำหรับข้อที่ 5 หรือค่าอุณหภูมิในการเชื่อม (Temperature) นั้นจะมีความแตกต่างกันระหว่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและข้อมูลจากกระบวนการจริง ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลไปพิจารณาโดยอ้างอิงจากความสามารถและข้อกำหนดของเครื่องจักรที่ใช้ในงานวิจัยพบว่า เครื่องจักรของผู้ผลิตในกรณีศึกษาไม่สามารถที่จะตรวจสอบค่าอุณหภูมิในการเชื่อม (Temperature) ได้ จึงเลือกใช้ปัจจัยจากการพิจารณากระบวนการทำงานจริงคือ ค่าระยะห่างระหว่าง EFO กับลวดทองคำให้ช่วงที่หลอมละลายลวด (EFO gap) มาใช้ในงานวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการคัดกรองปัจจัยที่นำมาใช้ในงานวิจัย

ปัจจัยที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ข้อมูลจากกระบวนการผลิตจริง	ผลการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น
1. Bond force	1. Bond force	1. Bond force
2. Bond time	2. Bond time	2. Bond time
3. USG Power	3. USG Power	3. USG Power
4. EFO current	4. EFO current	4. EFO current
5. Temperature	5. EFO gap	5. EFO gap

4.3 การออกแบบการทดลองและการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน

ผลจากข้อมูลการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้นเพื่อคัดกรองปัจจัยพบปัจจัยจำนวน 5 ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการเชื่อม เมื่อนำหัวเชื่อมลวดทองคำมาใช้ซ้ำจากกระบวนการ ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลที่ได้มากำหนดผลตอบงานวิจัยโดยการกำหนดผลตอบงานวิจัยนั้น ผู้วิจัยกำหนดจากข้อกำหนดการตรวจสอบคุณภาพของการเชื่อมลวดทองคำ ซึ่งมีการตรวจสอบจำนวน 2 ประเภทคือ ค่าแรงดึง (Wire pull) และค่าแรงเฉือน (Bond Shear) ดังแสดงไว้ในตาราง 4.5 ซึ่งแสดงผลตอบของงานวิจัย ในส่วนของการกำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อผลตอบของงานวิจัยนั้น ผู้วิจัยใช้ข้อมูลซึ่งถูกกล่าวถึงไว้ในผลการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น โดยจะใช้ผลจากการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้นเพื่อกำหนดเป็นปัจจัยที่ใช้ในงานวิจัย สำหรับระดับของงานวิจัยอ้างอิงจากกระบวนการทำงานจริงและจากคู่มือของเครื่องจักรเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลองอย่างเหมาะสม เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพอื่น ๆ ของชิ้นงาน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ตารางแสดงปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 4.5 ผลตอบของงานวิจัย

สัญลักษณ์	ผลตอบงานวิจัย	ค่ามาตรฐาน
Y_1	ค่าแรงดึงมาตรฐาน (Wire pull)	≥ 6 กรัม
Y_2	ค่าแรงเฉือนมาตรฐาน (Bond shear)	≥ 27 กรัม

ตารางที่ 4.6 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในงานวิจัย

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			
	(-1)	0	(+1)	Unit
(A) Bond Force	70	80	90	grams
(B) Bond Time	1	2	3	Mill sec
(C) USG Current	20	35	50	mA
(D) EFO Current	40	45	50	mA
(E) EFO Gap	25	30	35	mils

4.3.1 การออกแบบการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อผลตอบของงาน ผู้วิจัยพิจารณากำหนดการออกแบบการทดลองโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งพบว่าการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการคัดกรองปัจจัยคือ การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน ซึ่งสามารถคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบของงานวิจัยได้ เนื่องจากการออกแบบการทดลองที่สามารถลดจำนวนการทดลองได้มากกว่าการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนและยังสามารถคัดกรองปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} และจะทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้ง ร่วมกับการทดลองที่จุดศูนย์กลางจำนวน 6 ครั้งเพื่อตรวจสอบความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึงและแรงเฉือน

สำหรับส่วนของการทดลองนั้น ผู้วิจัยจะนำหลักการพื้นฐานในการทดลองมาใช้ เพื่อควบคุมปัจจัยอื่นที่อาจส่งผลกระทบต่อผลตอบของงานวิจัยคือ

4.3.1.1 การทดลองซ้ำ (Replication) จะทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้ง เพื่อให้สามารถคำนวณค่าความผิดพลาดของการทดลองได้

4.3.1.2 การสุ่มการทดลอง (Randomization) เพื่อไม่ให้ปัจจัยที่ผู้วิจัยไม่ได้เลือกมาวิเคราะห์ส่งผลต่อผลตอบของการทดลอง ผู้วิจัยจึงทำการสุ่มลำดับการทดลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ในการสุ่มลำดับของการทดลอง เพื่อป้องกันข้อผิดพลาดดังกล่าวที่อาจจะเกิดขึ้น

4.3.1.3 การควบคุมการทดลอง (Blocking) ผู้วิจัยจะทำการควบคุมปัจจัยอื่นที่ควบคุมได้ทั้งหมดเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อผลตอบของการทดลอง โดยมีปัจจัยที่ถูกควบคุมดังนี้ การควบคุมผู้ทำการทดลอง, การควบคุมผู้ที่ทดสอบค่าแรงดึงและแรงเหวี่ยงเป็นคนเดียวกันทุกการทดลอง เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องจักรตัวเดียวกันทุกเครื่องและวัสดุในการเชื่อมลวดทองคำเป็นวัสดุล็อตเดียวกันตลอดการทดลอง

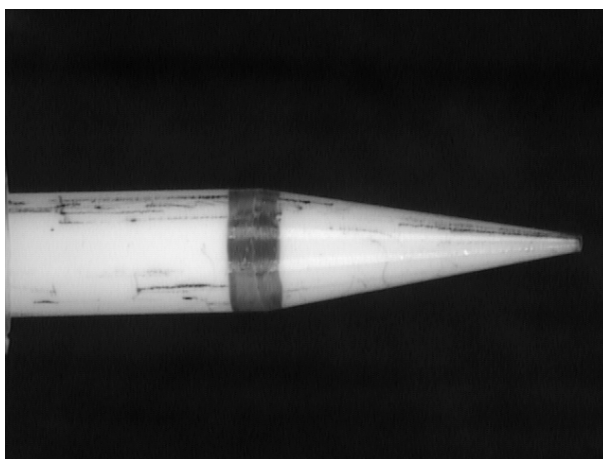
ตารางที่ 4.7 การออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึงและแรงเหวี่ยง

Experiment parameter									Response
Std Order	Run Order	CenterPt	Blocks	Bond Force	Bond Time	USG Current	EFO Current	EFO Gap	
18	1	1	1	90	1	20	40	25	
5	2	1	1	70	1	50	40	25	
9	3	1	1	70	1	20	50	25	
7	4	1	1	70	3	50	40	35	
19	5	1	1	70	3	20	40	25	
10	6	1	1	90	1	20	50	35	
13	7	1	1	70	1	50	50	35	
8	8	1	1	90	3	50	40	25	
31	9	1	1	70	3	50	50	25	
30	10	1	1	90	1	50	50	25	
15	11	1	1	70	3	50	50	25	
37	12	0	1	80	2	35	45	30	
38	13	0	1	80	2	35	45	30	
6	14	1	1	90	1	50	40	35	
35	15	0	1	80	2	35	45	30	
33	16	0	1	80	2	35	45	30	
23	17	1	1	70	3	50	40	35	
2	18	1	1	90	1	20	40	25	
21	19	1	1	70	1	50	40	25	
22	20	1	1	90	1	50	40	35	
29	21	1	1	70	1	50	50	35	
12	22	1	1	90	3	20	50	25	
32	23	1	1	90	3	50	50	35	
16	24	1	1	90	3	50	50	35	

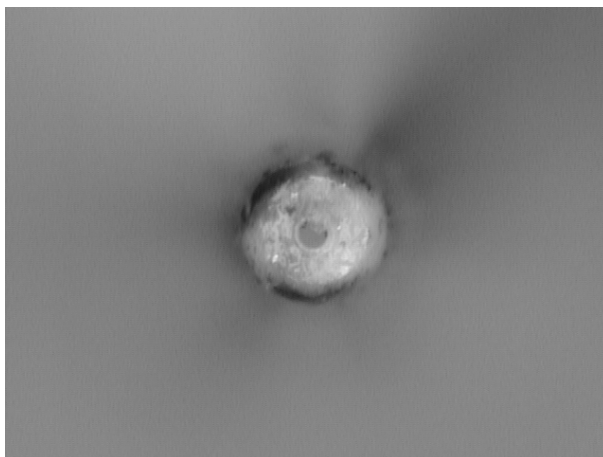
ตารางที่ 4.7 การออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึงและแรงเหวี่ยง (ต่อ)

Experiment parameter									Response
Std Order	Run Order	CenterPt	Blocks	Bond Force	Bond Time	USG Current	EFO Current	EFO Gap	
20	25	1	1	90	3	20	40	35	
1	26	1	1	70	1	20	40	35	
14	27	1	1	90	1	50	50	25	
3	28	1	1	70	3	20	40	25	
17	29	1	1	70	1	20	40	35	
28	30	1	1	90	3	20	50	25	
4	31	1	1	90	3	20	40	35	
34	32	0	1	80	2	35	45	30	
27	33	1	1	70	3	20	50	35	
36	34	0	1	80	2	35	45	30	
11	35	1	1	70	3	20	50	35	
26	36	1	1	90	1	20	50	35	
24	37	1	1	90	3	50	40	25	
25	38	1	1	70	1	20	50	25	

4.3.2 การทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อผลตอบค่าแรงดึง หลังจากที่ได้ทำการออกแบบการทดลองแล้ว ผู้วิจัยได้นำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุ (ผ่านการใช้งานมาแล้วจำนวน 300,000 ครั้ง) ดังภาพที่ 4.11 และ 4.12 มาติดตั้งที่เครื่องเชื่อมลวดทองคำและจึงปรับตั้งค่าตามตารางการออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึง เมื่อทำการเชื่อมลวดทองคำเสร็จตามการออกแบบการทดลองที่กำหนด ผู้วิจัยจะนำชิ้นงานไปทำการตรวจสอบค่าแรงดึงของลวดทองคำ และตรวจสอบลักษณะของการเชื่อมลวดทองคำว่าเป็นไปตามข้อกำหนดโดยพนักงานฝ่ายประกันคุณภาพ โดยผลการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงแสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ในส่วนของรูปผลการทดสอบแรงดึงทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ก



ภาพที่ 4.11 ด้านข้างของหัวเชื่อมลวดทองคำที่ใช้ในผลตอบแรงดึง (ผ่านการใช้ 300,000 ครั้ง)



ภาพที่ 4.12 ด้านหน้าของหัวเชื่อมลวดทองคำที่ใช้ในผลตอบแรงดึง (ผ่านการใช้ 300,000 ครั้ง)

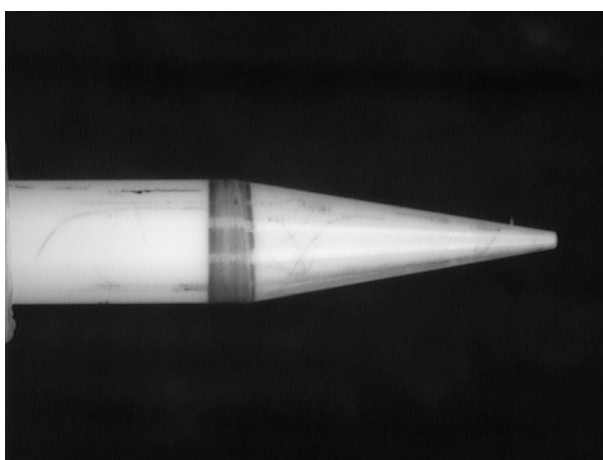
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองแบบ 2^{5-1} เพื่อคัดกรองปัจจัยสำหรับผลตอบแรงดึง

Experiment parameter									Response Wire pull
Std Order	Run Order	CenterPt	Blocks	Bond Force	Bond Time	USG Current	EFO Current	EFO Gap	
18	1	1	1	90	1	20	40	25	21.38
5	2	1	1	70	1	50	40	25	16.69
9	3	1	1	70	1	20	50	25	19.65
7	4	1	1	70	3	50	40	35	16.60
19	5	1	1	70	3	20	40	25	22.18
10	6	1	1	90	1	20	50	35	20.32
13	7	1	1	70	1	50	50	35	18.04
8	8	1	1	90	3	50	40	25	24.15
31	9	1	1	70	3	50	50	25	19.07
30	10	1	1	90	1	50	50	25	20.03
15	11	1	1	70	3	50	50	25	21.14
37	12	0	1	80	2	35	45	30	25.57
38	13	0	1	80	2	35	45	30	21.14
6	14	1	1	90	1	50	40	35	19.39
35	15	0	1	80	2	35	45	30	23.87
33	16	0	1	80	2	35	45	30	26.24
23	17	1	1	70	3	50	40	35	19.25
2	18	1	1	90	1	20	40	25	21.53
21	19	1	1	70	1	50	40	25	17.19
22	20	1	1	90	1	50	40	35	22.77
29	21	1	1	70	1	50	50	35	19.98
12	22	1	1	90	3	20	50	25	20.65
32	23	1	1	90	3	50	50	35	21.55
16	24	1	1	90	3	50	50	35	20.54
20	25	1	1	90	3	20	40	35	20.77

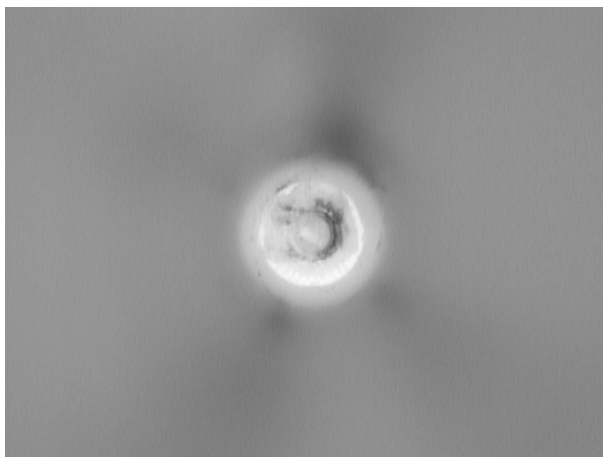
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองแบบ 2^{5-1} เพื่อคัดกรองปัจจัยสำหรับผลตอบแรงดึง (ต่อ)

Experiment parameter									Response Wire pull
Std Order	Run Order	CenterPt	Blocks	Bond Force	Bond Time	USG Current	EFO Current	EFO Gap	
1	26	1	1	70	1	20	40	35	18.79
14	27	1	1	90	1	50	50	25	20.24
3	28	1	1	70	3	20	40	25	19.18
17	29	1	1	70	1	20	40	35	19.03
28	30	1	1	90	3	20	50	25	23.91
4	31	1	1	90	3	20	40	35	22.32
34	32	0	1	80	2	35	45	30	23.55
27	33	1	1	70	3	20	50	35	21.10
36	34	0	1	80	2	35	45	30	23.07
11	35	1	1	70	3	20	50	35	16.34
26	36	1	1	90	1	20	50	35	19.03
24	37	1	1	90	3	50	40	25	21.90
25	38	1	1	70	1	20	50	25	16.11

4.3.3 การทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อผลตอบค่าแรงเฉือน ผู้วิจัยได้นำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุ (ผ่านการใช้งานมาแล้วจำนวน 300,000 ครั้ง) ดังภาพที่ 4.13 และ 4.14 มาติดตั้งที่เครื่องเชื่อมลวดทองคำและจึงปรับตั้งค่าตามตารางการออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงเฉือน เมื่อทำการเชื่อมลวดทองคำเสร็จตามการออกแบบการทดลองที่กำหนดผู้วิจัยจะนำชิ้นงานไปทำการตรวจสอบค่าแรงเฉือนของลวดทองทองคำและตรวจสอบลักษณะของการเชื่อมลวดทองคำว่าเป็นไปตามข้อกำหนดโดยพนักงานฝ่ายประกันคุณภาพ โดยผลการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงเฉือนแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 ในส่วนของรูปผลการทดสอบแรงเฉือนทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ข



ภาพที่ 4.13 ด้านข้างของหัวเชื่อมลวดทองคำที่ใช้ในผลตอบแรงเฉือน (ผ่านการใช้ 300,000 ครั้ง)



ภาพที่ 4.14 ด้านหน้าของหัวเชื่อมลวดทองคำที่ใช้ในผลตอบแรงเฉือน (ผ่านการใช้ 300,000 ครั้ง)

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองแบบ 2^{5-1} เพื่อคัดกรองปัจจัยสำหรับผลตอบแรงเฉือน

Experiment parameter									Response Bond shear
Std Order	Run Order	CenterPt	Blocks	Bond Force	Bond Time	USG Current	EFO Current	EFO Gap	
18	1	1	1	90	1	20	40	25	55.23
5	2	1	1	70	1	50	40	25	51.55
9	3	1	1	70	1	20	50	25	52.09
7	4	1	1	70	3	50	40	35	51.51
19	5	1	1	70	3	20	40	25	52.31
10	6	1	1	90	1	20	50	35	54.04
13	7	1	1	70	1	50	50	35	52.27
8	8	1	1	90	3	50	40	25	53.94
31	9	1	1	70	3	50	50	25	51.08
30	10	1	1	90	1	50	50	25	55.35
15	11	1	1	70	3	50	50	25	51.78
37	12	0	1	80	2	35	45	30	54.02
38	13	0	1	80	2	35	45	30	51.64
6	14	1	1	90	1	50	40	35	54.79
35	15	0	1	80	2	35	45	30	52.17
33	16	0	1	80	2	35	45	30	52.95
23	17	1	1	70	3	50	40	35	53.58
2	18	1	1	90	1	20	40	25	55.25
21	19	1	1	70	1	50	40	25	52.80
22	20	1	1	90	1	50	40	35	54.50
29	21	1	1	70	1	50	50	35	51.28
12	22	1	1	90	3	20	50	25	53.69
32	23	1	1	90	3	50	50	35	52.80
16	24	1	1	90	3	50	50	35	54.99
20	25	1	1	90	3	20	40	35	54.69

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองแบบ 2^{5-1} เพื่อคัดกรองปัจจัยสำหรับผลตอบแทนแรงเฉือน (ต่อ)

Experiment parameter									Response Bond shear
Std Order	Run Order	CenterPt	Blocks	Bond Force	Bond Time	USG Current	EFO Current	EFO Gap	
35	15	0	1	80	2	35	45	30	52.17
1	26	1	1	70	1	20	40	35	51.88
14	27	1	1	90	1	50	50	25	53.84
3	28	1	1	70	3	20	40	25	51.80
17	29	1	1	70	1	20	40	35	52.79
28	30	1	1	90	3	20	50	25	54.77
4	31	1	1	90	3	20	40	35	53.49
34	32	0	1	80	2	35	45	30	52.51
27	33	1	1	70	3	20	50	35	51.59
36	34	0	1	80	2	35	45	30	53.39
11	35	1	1	70	3	20	50	35	50.85
26	36	1	1	90	1	20	50	35	53.28
24	37	1	1	90	3	50	40	25	53.02
25	38	1	1	70	1	20	50	25	52.05

4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองโดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน 2^{5-1} ผู้วิจัยได้นำผลการทดลองมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่ส่งผลต่อผลตอบแทนของงานวิจัยคือ ค่าแรงดึงและค่าแรงเฉือน ซึ่งในการวิเคราะห์จะเปรียบเทียบค่า P-Value กับระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ โดยจะวิเคราะห์ทั้งผลกระทบหลัก (Main effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction effect) จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของแบบจำลองประกอบด้วยการพิจารณาจากลักษณะการแจกแจงของส่วนตกค้างจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ การตรวจสอบจากกราฟส่วนโค้งกับตัวแปรอิสระอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองประกอบด้วย ลำดับการทดลอง เวลา และตัวแปรอิสระอื่น ๆ โดยกราฟส่วนตกค้างไม่ควรมีรูปแบบใด ๆ (Patterns) และมีการกระจายตัวแบบสุ่ม (Random Pattern)

4.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน 2^{5-1} สำหรับผลตอบแทนแรงดึง

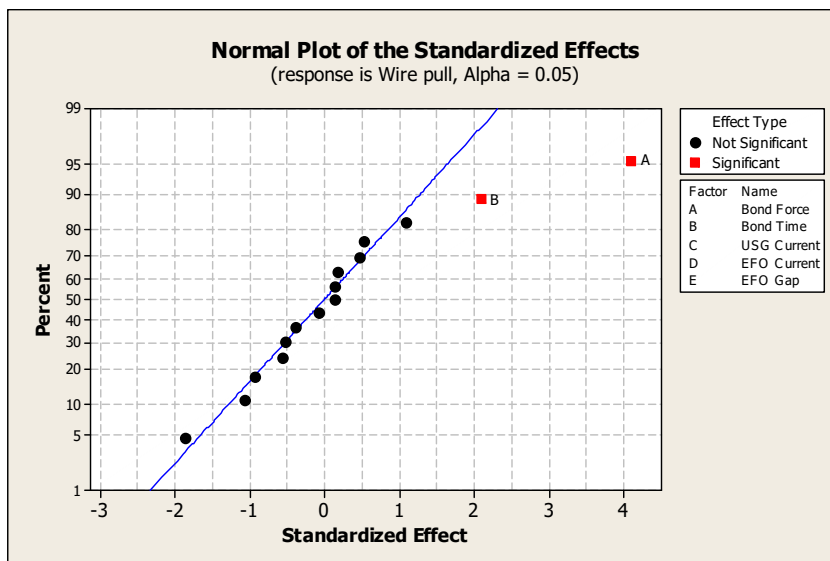
ผลการวิเคราะห์จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนเพื่อคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงของกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ โดยใช้โปรแกรม Minitab พบว่าผลการพิจารณาปัจจัยที่มีนัยสำคัญจากการพิจารณาจากค่า P-Value ที่มีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ นั้นมีปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) และเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นตารางที่แสดงผลการคำนวณผลกระทบจากการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแทนแรงดึง และภาพที่ 4.15 ภาพแสดงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดึงในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าว ผู้วิจัยสามารถนำมาเขียนเป็นสมการแบบจำลองเชิงเส้นลำดับที่ 1 ได้ดังสมการที่ 4.1

$$\hat{y}_1 = 20.03 + 1.25x_1 + 0.64x_2 \quad (4.1)$$

โดยที่ $\hat{y}_1$ คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลองเชิงเส้นของค่าผลตอบแรงดึง

x_1 คือ แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force)

x_2 คือ เวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time)



ภาพที่ 4.15 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดึงในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ

ตารางที่ 4.10 การคำนวณผลกระทบจากการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึง

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	Significant
Constant		20.03	0.31	65.59	0.00	✓
Bond Force	2.51	1.25	0.31	4.11	0.00	✓
Bond Time	1.28	0.64	0.31	2.10	0.04	✓
USG Current	-0.23	-0.12	0.31	-0.38	0.71	
EFO Current	-0.34	-0.17	0.31	-0.56	0.58	
EFO Gap	-0.57	-0.29	0.31	-0.94	0.36	
Bond Force*Bond Time	0.11	0.05	0.31	0.18	0.86	
Bond Force*USG Current	0.32	0.16	0.31	0.52	0.61	
Bond Force*EFO Current	-0.65	-0.33	0.31	-1.07	0.30	
Bond Force*EFO Gap	-0.32	-0.16	0.31	-0.52	0.61	
Bond Time*USG Current	-0.05	-0.02	0.31	-0.08	0.94	
Bond Time*EFO Current	0.08	0.04	0.31	0.14	0.89	

ตารางที่ 4.10 การคำนวณผลกระทบจากการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึง (ต่อ)

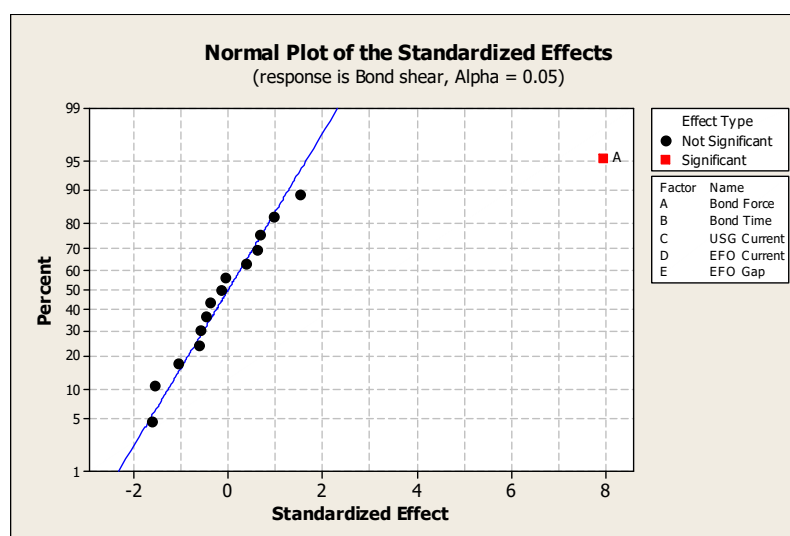
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	Significant
Bond Time*EFO Gap	-1.14	-0.57	0.31	-1.87	0.08	
USG Current*EFO Current	0.67	0.33	0.31	1.10	0.29	
USG Current*EFO Gap	0.29	0.14	0.31	0.47	0.64	
EFO Current*EFO Gap	0.09	0.04	0.31	0.14	0.89	
Ct Pt		3.88	0.77	5.05	0.00	✓

4.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงเฉือน

ผลการวิเคราะห์จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนเพื่อคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงเฉือนของกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ โดยใช้โปรแกรม Minitab พบว่าผลจากการพิจารณาปัจจัยที่มีนัยสำคัญ โดยพิจารณาจากค่า P-Value ที่มีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ มีปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.11 ตารางแสดงผลการคำนวณผลกระทบจากการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงเฉือน และภาพที่ 4.16 ภาพแสดงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงเฉือนในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยสามารถนำมาเขียนเป็นสมการแบบจำลองเชิงเส้นลำดับที่ 1 ได้ดังสมการที่ 4.2

$$\hat{y}_2 = 53.09 + 1.14x_1 \quad (4.2)$$

โดยที่ $\hat{y}_2$ คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลองเชิงเส้นของค่าผลตอบแรงเฉือน
 x_1 คือ แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force)



ภาพที่ 4.16 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงเฉือนในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ

ตารางที่ 4.11 การคำนวณผลกระทบจากการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงเฉือน

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	Significant
Constant		53.09	0.14	370.86	0.00	✓
Bond Force	2.28	1.14	0.14	7.96	0.00	✓
Bond Time	-0.44	-0.22	0.14	-1.55	0.14	
USG Current	-0.04	-0.02	0.14	-0.15	0.88	
EFO Current	-0.46	-0.23	0.14	-1.61	0.12	
EFO Gap	-0.13	-0.07	0.14	-0.48	0.64	
Bond Force*Bond Time	-0.16	-0.08	0.14	-0.59	0.56	
Bond Force*USG Current	-0.10	-0.05	0.14	-0.38	0.71	
Bond Force*EFO Current	0.19	0.10	0.14	0.68	0.51	
Bond Force*EFO Gap	-0.17	-0.09	0.14	-0.61	0.55	
Bond Time*USG Current	-0.01	-0.01	0.14	-0.06	0.96	
Bond Time*EFO Current	0.11	0.06	0.14	0.39	0.70	
Bond Time*EFO Gap	0.27	0.14	0.14	0.97	0.35	
USG Current*EFO Current	0.17	0.09	0.14	0.61	0.55	
USG Current*EFO Gap	0.43	0.22	0.14	1.52	0.14	
EFO Current*EFO Gap	-0.30	-0.15	0.14	-1.06	0.30	
Ct Pt		-0.31	0.36	-0.86	0.40	

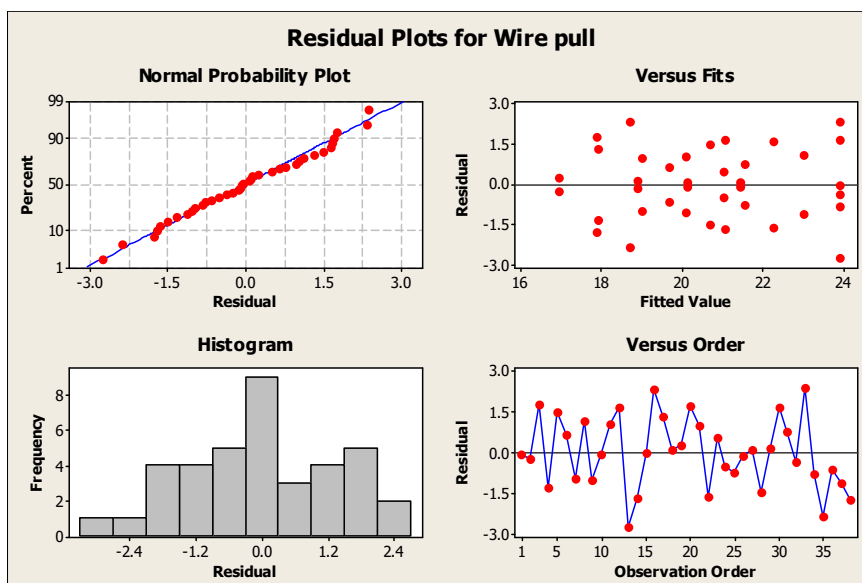
4.5 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการทดลอง

การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ของผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึง เป็นการตรวจสอบเบื้องต้นว่าผลที่ได้จากการทดลองจริงนั้น มีความสอดคล้องกับข้อกำหนดเบื้องต้นของการทดลองหรือไม่ ซึ่งจะพิจารณา 3 ส่วนคือ ส่วนแรกจะพิจารณาข้อกำหนดเรื่อง ส่วนตกค้างจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ โดยในการพิจารณาการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้างนั้นจะพิจารณาจากกราฟ (Normal Probability plot) และ (Histogram) ส่วนที่สองจะพิจารณาส่วนตกค้างของการทดลองเปรียบเทียบกับค่าทำนาย (Versus Fits) ในส่วนสุดท้ายจะพิจารณาส่วนตกค้างจากลำดับการทดลอง (Versus Order)

4.5.1 การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง(Residual Analysis) ของผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึง

ผลการวิเคราะห์กราฟ (Normal Probability plot) และ (Histogram) ของการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึง พบว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติไม่พบแนวโน้มใด สำหรับกราฟส่วนตกค้างกับค่าทำนาย (Versus Fits) มีการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีการกระจายเป็นแนวโน้มหรือรูปแบบเกิดขึ้น และกราฟส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองจากกราฟ (Versus Order) พบว่า

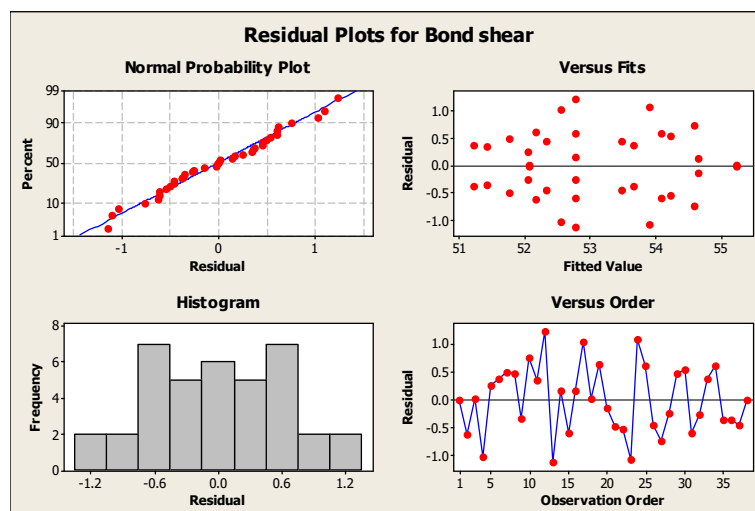
ลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่มแสดงว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับลำดับการทดลองเป็นอิสระต่อกัน ดังภาพที่ 4.17 ซึ่งผลสรุปจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึง ไม่พบความผิดปกติหรือเกิดแนวโน้มของส่วนตกค้าง ผู้วิจัยจึงสรุปได้ว่าผลการทดลองสอดคล้องกับข้อกำหนดเบื้องต้นของการทดลอง จึงสามารถนำผลการทดลองไปใช้ได้



ภาพที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง

4.5.2 การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ของผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงเหวี่ยง

ผลการวิเคราะห์กราฟ (Normal Probability plot) และ (Histogram) ของการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงเหวี่ยง พบว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ โดยที่กราฟส่วนตกค้างกับค่าทำนาย (Versus Fits) มีการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีการกระจายเป็นแนวโน้มหรือรูปแบบเกิดขึ้น และกราฟส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองจากกราฟ (Versus Order) พบว่าลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่มแสดงว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับลำดับการทดลองเป็นอิสระต่อกัน ดังภาพที่ 4.18 ซึ่งจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการทดลองแบบ 2^{5-1} ไม่พบความผิดปกติหรือเกิดแนวโน้มของส่วนตกค้างจึงสรุปได้ว่าสามารถนำผลการทดลองไปใช้ได้



ภาพที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงเฉือน

4.6 การวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง

4.6.1 การวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง จากของผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึง

จากผลการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึง ผู้วิจัยได้นำผลมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงของกระบวนการเชื่อมลวดทองคำโดยใช้โปรแกรม Minitab เพื่อตรวจสอบนัยสำคัญและผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงของกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ ดังแสดงในตาราง 4.12 เพื่อตรวจสอบความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลองพบว่า ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของผลตอบแรงดึง โดยพิจารณาจากค่า P-Value ที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ พบว่าปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญคือ (Main effect) ในส่วนของผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction effect) นั้นไม่ส่งผลต่อค่าแรงดึงในกระบวนการเชื่อม แต่พบว่าผลจากการวิเคราะห์ลักษณะความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง (Curvature) ค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองมีลักษณะเป็นส่วนโค้ง ในกรณีนี้จึงต้องทำการทดลองเพิ่มเติมด้วยวิธีแบบพื้นผิวผลตอบก่อนที่จะหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ดังจะแสดงผลการทดลองในหัวข้อ 4.6.1.1 ถึง 4.6.1.5

ตารางที่ 4.12 ความแปรปรวนจากการทดลองแบบ 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงดึง

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Significant
Main Effects	5	67.513	67.513	13.503	4.530	0.006	✓
Bond Force	1	50.391	50.391	50.391	16.890	0.000	✓
Bond Time	1	13.131	13.131	13.131	4.400	0.048	✓
USG Current	1	0.440	0.440	0.440	0.150	0.705	
EFO Current	1	0.925	0.925	0.925	0.310	0.584	
EFO Gap	1	2.627	2.627	2.627	0.880	0.359	
2-Way Interactions	10	19.910	19.910	1.991	0.670	0.741	
Bond Force*Bond Time	1	0.095	0.095	0.095	0.030	0.860	
Bond Force*USG Current	1	0.816	0.816	0.816	0.270	0.606	
Bond Force*EFO Current	1	3.429	3.429	3.429	1.150	0.296	
Bond Force*EFO Gap	1	0.795	0.795	0.795	0.270	0.611	
Bond Time*USG Current	1	0.018	0.018	0.018	0.010	0.939	
Bond Time*EFO Current	1	0.055	0.055	0.055	0.020	0.893	
Bond Time*EFO Gap	1	10.405	10.405	10.405	3.490	0.076	
USG Current*EFO Current	1	3.577	3.577	3.577	1.200	0.286	
USG Current*EFO Gap	1	0.661	0.661	0.661	0.220	0.643	
EFO Current*EFO Gap	1	0.059	0.059	0.059	0.020	0.890	
Curvature	1	76.066	76.066	76.066	25.500	0.000	✓
Residual Error	21	62.642	62.642	2.983			
Pure Error	21	62.642	62.642	2.983			
Total	37	226.131					

4.6.2 การวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง จากของผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน 2^{5-1} สำหรับผลตอบแรงเฉือน

จากผลการทดลองแบบจากผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงเฉือนของกระบวนการเชื่อมลวดทองคำโดยใช้โปรแกรม Minitab เพื่อตรวจสอบนัยสำคัญและผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงเฉือนของกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ แสดงในตาราง 4.13 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของผลตอบแรงเฉือนนั้นพิจารณาจากปัจจัยที่มีนัยสำคัญจากการพิจารณาค่า P-Value ที่มีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ พบว่าปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญคือ (Main effect) เท่านั้น และผลจากการวิเคราะห์ลักษณะความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง (Curvature) พบว่าค่าที่ P-Value มีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองมีลักษณะเป็นเส้นตรงจึงสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

ตารางที่ 4.13 ความแปรปรวนจากการทดลองแบบ 2⁵⁻¹ สำหรับผลตอบแรงเฉือน

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Significant
Main Effects	5	45.03	45.039	9.01	13.74	0.00	✓
Bond Force	1	41.59	41.59	41.59	63.43	0.00	✓
Bond Time	1	1.57	1.57	1.57	2.41	0.13	
USG Current	1	0.01	0.01	0.01	0.02	0.88	
EFO Current	1	1.69	1.69	1.69	2.59	0.12	
EFO Gap	1	0.15	0.15	0.15	0.23	0.63	
2-Way Interactions	10	4.06	4.06	0.40	0.62	0.78	
Bond Force*Bond Time	1	0.22	0.22	0.22	0.35	0.56	
Bond Force*USG Current	1	0.09	0.09	0.09	0.14	0.71	
Bond Force*EFO Current	1	0.29	0.29	0.29	0.46	0.50	
Bond Force*EFO Gap	1	0.2425	0.24	0.24	0.37	0.55	
Bond Time*USG Current	1	0.01	0.01	0.01	0.00	0.95	
Bond Time*EFO Current	1	0.10	0.10	0.10	0.15	0.69	
Bond Time*EFO Gap	1	0.61	0.61	0.61	0.93	0.34	
USG Current*EFO Current	1	0.24	0.24	0.24	0.37	0.55	
USG Current*EFO Gap	1	1.50	1.50	1.50	2.30	0.14	
EFO Current*EFO Gap	1	0.74	0.74	0.74	1.13	0.30	
Curvature	1	0.48	0.48	0.48	0.74	0.40	
Residual Error	21	13.77	13.77	0.65			
Pure Error	21	13.77	13.77	0.65			
Total	37	63.35					

จากการวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลองสรุปได้ว่าผลตอบของการวิจัยในส่วน
ของผลตอบแรงดึงมี ลักษณะของแบบจำลองเป็นส่วนโค้ง ผู้วิจัยจึงดำเนินการทดลองเพิ่มด้วยวิธีพื้นผิว
ตอบตามระเบียบวิธีวิจัยในข้อที่ 3.6.1-3.6.5 ในกรณีของผลตอบแรงเฉือนพบว่าแบบจำลองมีลักษณะ
เป็นแบบเส้นตรงจึงสามารถที่จะทำการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดได้โดยไม่ต้องทดลองแบบพื้นผิวผล
ตอบ ซึ่งขั้นตอนการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบสำหรับผลตอบแรงดึงมีผลการทดลองดังนี้

4.6.1.1 การเคลื่อนที่ (ขึ้นหรือลง) ไปสู่พื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุด
(Steepest Ascent or Steepest Descent) สำหรับผลตอบแรงดึง

วิธีเคลื่อนที่ (ขึ้นหรือลง) ไปสู่พื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางที่ชันที่สุด
(Steepest Ascent or Steepest Descent) การใช้วิธีการเคลื่อนที่ขึ้นลงไปสู่ผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้
เส้นทางชันที่สุดนั้นผู้วิจัยจะต้องวิธีดังกล่าวมาใช้ในกระบวนการทดลองสำหรับผลตอบแรงดึง
เนื่องจากผิวผลตอบในแบบจำลองเชิงเส้นของงานวิจัยมีลักษณะเป็นส่วนโค้ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำ

แบบจำลองเชิงเส้นอันดับที่ 1 (สมการที่ 4.1) มาสร้างเส้นทางในการเคลื่อนที่ไปสู่ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับผลตอบที่ดีที่สุดซึ่งในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยผลตอบแทนที่มีผลตอบแบบมากที่สุด (Maximum Response) จึงเลือกใช้วิธีการ Steepest Ascent โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

การนำแบบจำลองเชิงเส้นอันดับที่ 1 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน 2^{5-1} สำหรับผลตอบแทนดัง โดยเลือกพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่มีผลกระทบหลัก (Main effect) ที่ส่งผลกระทบอย่างนัยสำคัญทางสถิติต่อผลตอบแทนดังคือ แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) และเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) โดยจะไม่พิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ

การกำหนดการก้าวเพื่อเคลื่อนที่สู่พื้นผิวผลตอบแทนที่ดีที่สุด เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ส่งผลกระทบต่อตำแหน่งพื้นผิวที่ดีที่สุด กรณีที่ขนาดการก้าวมีขนาดที่กว้างมากเกินไปจะส่งผลให้อาจส่งผลทำให้ผลการทดลองข้ามจุดที่เหมาะสมที่สุดได้ ในทางกลับกัน หากกำหนดขนาดการก้าวที่น้อยจนเกินไปอาจส่งผลให้จำนวนครั้งในการทดลองมีมากเกินไป ซึ่งการก้าวแต่ละครั้งหมายถึงจำนวนการทดลองจำนวนหนึ่งการทดลอง ในขั้นตอนแรกนี้ผู้วิจัยได้เลือกปัจจัย 1 ปัจจัยซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบแทนมากที่สุดโดยการพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองเชิงเส้นที่มีค่ามากที่สุดคือปัจจัย แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) กำหนดเป็น x_1 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองเชิงเส้นของแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) กำหนดเป็น β_1 จากนั้นจึงกำหนดปัจจัยที่ทำการเลือกมานั้นให้มีขนาดก้าวเท่ากับ 1 โดยแทนขนาดการก้าวด้วยสัญลักษณ์ Δx_1 สำหรับปัจจัยตัวที่สองที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบแทนดังแต่มีค่าสัมประสิทธิ์น้อยกว่าคือค่าเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) ผู้วิจัยกำหนดเป็น x_2 ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองเชิงเส้นของเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) ผู้วิจัยกำหนดเป็น β_2 และแทนขนาดการก้าวด้วยสัญลักษณ์ Δx_2 จากข้อมูลข้างต้นทำให้สามารถกำหนดขนาดการก้าวของ Δx_2 โดยแทนค่าลงในสมการที่ 2.6 จะทำให้ได้ข้อมูลดังสมการที่ 4.3

$$\Delta x_2 = \frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{0.640}{1.254} = 0.510 \quad (4.3)$$

โดยที่ β_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองของปัจจัยเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) x_2
 β_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองของปัจจัยแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) x_1
 Δx_2 คือ ขนาดก้าวของปัจจัย x_2 เวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time)

จากสมการที่ 4.3 สามารถสรุปได้ว่าหากขนาดการก้าว Δx_1 มีค่าเท่ากับ 1 หน่วยจะทำให้ขนาดการก้าว Δx_2 มีค่าเท่ากับ 0.51 หน่วย

การกำหนดเงื่อนไขในการทดลองจากข้อมูลปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบแทนดังอย่างมีนัยสำคัญประกอบด้วยปัจจัยจำนวนสองปัจจัยคือ แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) และเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลของทั้งสองปัจจัยมาระบุไว้ดัง

ตารางที่ 4.14 แสดงปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบแรงดึง โดยจากตารางจะสามารถกำหนดจุดเริ่มต้นในการเคลื่อนที่โดยเริ่มจากจุดศูนย์กลางของการทดลองหรือจุด Center point (0)

ตารางที่ 4.14 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบแรงดึง

สัญลักษณ์	ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			
		(-1)	(0)	(+1)	Unit
x_1	Bond force	70	80	90	grams
x_2	Bond time	1	2	3	mill sec

การคำนวณการเปลี่ยนแปลงของ Δx_1 และ Δx_2 จากค่าแปลง (Code values) เป็นค่าจริง (Natural Values) ทำได้โดยพิจารณาจากระดับของปัจจัย สำหรับปัจจัย x_1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจะเปลี่ยนไปครั้งละ 10 กรัม ในขณะที่ปัจจัย x_2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจะเปลี่ยนไปครั้งละ 1 มิลลิวินาที สำหรับการกำหนดขนาดการเปลี่ยนแปลงของปัจจัย จำเป็นต้องพิจารณาให้การเปลี่ยนแปลงมีขนาดที่เหมาะสม เพราะการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยในการทดลองปัจจุบันมีระดับของปัจจัยที่มีขนาดกว้าง ซึ่งเมื่อทดลองด้วยวิธีการ Steepest Ascent อาจส่งผลให้ผลทำให้การทดลองนั้นข้ามจุดที่เหมาะสมที่สุดได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดขนาดของการเปลี่ยนแปลง โดยลดระดับของปัจจัยลงมาในสัดส่วนที่เท่ากันทั้งระดับของปัจจัย $x_1 = 2$ กรัมและ $x_2 = 0.2$ มิลลิวินาที จากนั้นจึงกำหนดขนาดแปลงของ Δx_1 ให้มีค่าเท่ากับ 1 หน่วยและกำหนดค่าจริงของ $\Delta Bondforce$ ให้มีค่าเท่ากับ 2 กรัมจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ดังสมการที่ 4.3 คือ $\Delta Bondforce$ มีค่าเท่ากับ 2 กรัม สำหรับการกำหนดขนาดแปลงของ Δx_2 ให้มีค่าเท่ากับ 0.51 หน่วยและกำหนดค่าจริงของ $\Delta Bondtime$ ให้มีค่าเท่ากับ 0.2 กรัมจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ดังสมการที่ 4.4 คือ $Bondtime$ มีค่าเท่ากับ 0.2 กรัม

$$\Delta x_1 = \frac{\Delta Bondforce}{2grams} \quad (4.4)$$

$$\Delta Bondforce = \Delta x_1 \times 2grams$$

$$\Delta Bondforce = 1 \times 2grams$$

$$\Delta Bondforce = 2grams$$

จากการแก้สมการที่ 4.4 จะได้ผลว่าในการทดลองด้วยวิธีการ Steepest Ascent จากค่าแปลง (Code values) เป็นค่าจริง (Natural Values) $\Delta Bondforce$ มีค่าเท่ากับ 2 grams

$$\Delta x_2 = \frac{\Delta Bondtime}{0.2millsec} \quad (4.5)$$

$$\Delta Bondtime = \Delta x_2 \times 0.2millsec$$

$$\Delta Bondtime = 0.51 \times 0.2millsec$$

$$\Delta Bondtime = 0.1millsec$$

จากการแก้สมการที่ 4.5 จะได้ผลว่าในการทดลองด้วยวิธีการ Steepest Ascent จากค่าแปลง (Code values) เป็นค่าจริง (Natural Values) $\Delta Bondtime$ มีค่าเท่ากับ 0.1 มิลลิวินาที จากข้อมูลเมื่อผู้วิจัยแปลงค่าจากค่าแปลง (Code values) เป็นค่าจริง (Natural Values) ของปัจจัยทั้งสองข้างต้นแล้วผู้วิจัยจึงนำมาทำการทดลองแบบ Steepest Ascent ดังแสดงผลการทดลองไว้ในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 เงื่อนไขการทดลองและผลการทดลอง Steepest Ascent ของผลตอบแรงดึง

Step		Coded variables		Natural Variable		Response Wire pull
		x_1	x_2	Bond Force	Bond time	
Origin	Origin	0	0	80	2	23.41
range	1Δ	1	0.51	2.0	0.1	
1	Origin + 1Δ	1.00	0.51	82	2.1	23.59
2	Origin + 2Δ	2.00	1.02	84	2.2	22.62
3	Origin + 3Δ	3.00	1.53	86	2.3	22.09
4	Origin + 4Δ	4.00	2.04	88	2.4	21.74
5	Origin + 5Δ	5.00	2.55	90	2.5	21.07

จากตารางที่ 4.15 ผลการทดลองด้วยวิธีการเคลื่อนที่ขึ้นไปสู่ผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางชันที่สุด (Steepest Ascent) ของผลตอบแรงดึงจำนวน 5 การทดลอง นั้นแสดงให้เห็นว่าค่าผลตอบแรงดึงนั้นเพิ่มจากจุดเริ่มต้นเมื่อปรับค่าแรงกดในกระบวนการเชื่อมขึ้น 2 กรัมและจากนั้นมีแนวโน้มที่ค่าแรงดึงจะลดลงอย่างต่อเนื่องแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขการทดลองที่ 1 ที่มีการปรับตั้งค่าแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เท่ากับ 82 กรัมและเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) 2.1 มิลลิวินาทีเป็นจุดที่ใกล้พื้นผิวผลตอบที่ดีที่สุด

4.6.1.2 การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึง

จากผลการทดลองด้วยวิธีการเคลื่อนที่ขึ้นไปสู่ผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางชันที่สุด (Steepest Ascent) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการทดลองสร้างพื้นผิวผลตอบที่

ตำแหน่งดังกล่าวโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนเพราะจำนวนปัจจัยที่ส่งต่อผลตอบแรงดึงมีจำนวนน้อยจึงทำให้สามารถทดลองแบบเต็มจำนวนได้ และทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลางจำนวน 3 ครั้ง โดยที่การทดลองใหม่นั้นจะใช้ข้อมูลจากทดลองข้างต้นเพื่อกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมาจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดึงคือ ค่าแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เท่ากับ 82 กรัมและเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) 2.1 มิลลิวินาที สำหรับระดับของปัจจัยกำหนดจากขนาดระดับของปัจจัยตามการทดลองด้วยวิธีการเคลื่อนที่ขึ้นไปสู่ผลตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เส้นทางขั้นที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ปัจจัยและระดับของการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนของผลตอบแรงดึง

รายการ	ระดับของปัจจัย			
	(-1)	(0)	(+1)	Unit
Bond force	80	82	84	grams
Bond time	2.0	2.1	2.2	mill sec

จากข้อมูลระดับและปัจจัยที่ได้ ผู้วิจัยจึงทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนแบบ 2^2 และทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลางจำนวน 3 ครั้ง ดังแสดงผลการทดลองไว้ในตารางที่ 4.17 สำหรับหลักการพื้นฐานในการทดลองมาใช้ในการควบคุมปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อผลตอบของงานวิจัยคือ

1) การสุ่มการทดลอง (Randomization) เพื่อไม่ให้ปัจจัยอื่นที่ผู้วิจัยไม่ได้เลือกมาวิเคราะห์ส่งผลกระทบต่อผลตอบของการทดลอง ผู้วิจัยจึงทำการสุ่มลำดับการทดลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ในการสุ่มลำดับของการทดลอง เพื่อป้องกันข้อผิดพลาดดังกล่าวที่อาจจะเกิดขึ้น

2) การควบคุมการทดลอง (Blocking) ผู้วิจัยจะทำการควบคุมปัจจัยที่ควบคุมได้ทั้งหมดเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบของปัจจัยที่ไม่ได้ถูกเลือกมาใช้ในงานวิจัยส่งผลกระทบต่อผลตอบของการทดลอง โดยจะควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังนี้ ผู้ทำการทดลองและกระบวนการเป็นคนเดียวกันทุกการทดลอง ผู้ที่ทดสอบค่าแรงดึงและแรงเหวี่ยงเป็นคนเดียวกันทุกการทดลอง เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องจักรตัวเดียวกันทุกเครื่องและวัสดุในการเชื่อมลวดทองคำเป็นวัสดุล็อตเดียวกันตลอดการทดลอง

ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนของผลตอบแรงดึง

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Bond Force	Bond Time	Wire Pull
5	1	0	1	82	2.1	23.622
2	2	1	1	84	2.0	22.168
7	3	0	1	82	2.1	23.374
6	4	0	1	82	2.1	23.884

ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนของผลตอบแรงดึง (ต่อ)

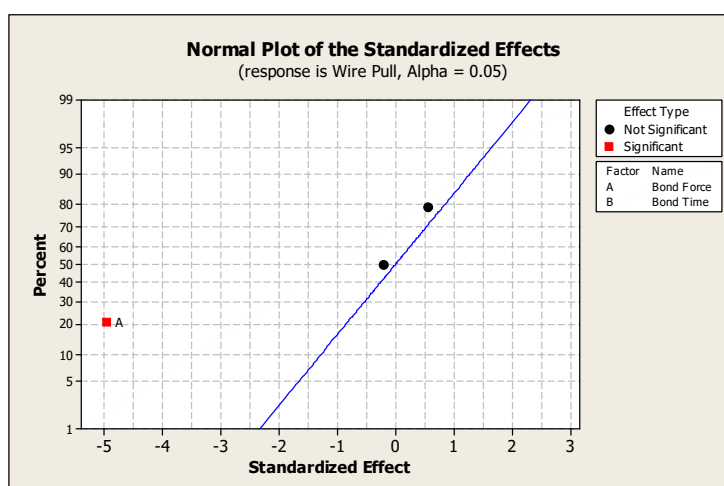
StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Bond Force	Bond Time	Wire Pull
3	5	1	1	80	2.2	23.381
1	6	1	1	80	2.0	23.571
4	7	1	1	84	2.2	22.256

4.6.1.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึง

ผลการวิเคราะห์จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนเพื่อสร้างแบบจำลองเชิงเส้นของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงของกระบวนการเชื่อมลวดทองคำโดยใช้โปรแกรม Minitab โดยการพิจารณาปัจจัยที่มีนัยสำคัญจากการพิจารณาค่า P-Value ที่มีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.18 ตารางแสดงการคำนวณผลกระทบจากการทดลองแบบ 2^2 สำหรับผลตอบแรงดึง และภาพที่ 4.19 ภาพแสดงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดึงในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ ซึ่งผู้วิจัยสามารถนำข้อมูลผลการวิเคราะห์มาเขียนเป็นสมการแบบจำลองเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 4.5

$$\hat{y}_1 = 22.84 - 0.63x_1 \quad (4.5)$$

โดยที่ $\hat{y}_1$ คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลองเชิงเส้นของค่าผลตอบแรงดึง
 x_1 คือ แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force)



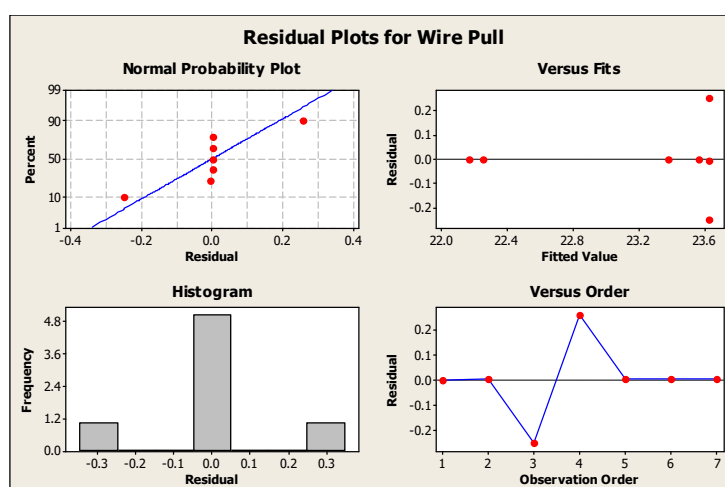
ภาพที่ 4.19 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดึงในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ

ตารางที่ 4.18 การคำนวณผลกระทบจากทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนของผลตอบแรงดึง

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	Significant
Constant		22.84	0.13	179.15	0.00	✓
Bond Force	-1.26	-0.63	0.13	-4.96	0.04	✓
Bond Time	-0.05	-0.03	0.13	-0.20	0.86	
Bond Force*Bond Time	0.14	0.07	0.13	0.55	0.64	
Ct Pt		0.78	0.19	4.02	0.06	

4.6.1.4 การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ของผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน สำหรับผลตอบแรงดึง

การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ของผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึงนั้น เป็นการตรวจสอบเบื้องต้นว่าแบบจำลองเชิงเส้นที่ได้จากการทดลองนั้นมีความสอดคล้องกับข้อกำหนดเบื้องต้นของการทดลองซึ่งจะพิจารณา 3 ส่วนคือ ส่วนตกค้างจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติโดยพิจารณาจากกราฟ (Normal Probability plot) และ (Histogram) การตรวจสอบส่วนตกค้างของการทดลองที่พิจารณาจากค่าทำนาย (Versus Fits) ในส่วนสุดท้ายจะพิจารณาจากลำดับการทดลองจากกราฟ (Versus Order) โดยผลการวิเคราะห์กราฟ (Normal Probability plot) และ (Histogram) ของการทดลองพบว่าการแจกแจงแบบปกติ กราฟส่วนตกค้างกับค่าทำนาย (Versus Fits) มีการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีการกระจายเป็นแนวโน้มหรือรูปแบบเกิดขึ้น และกราฟส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองจากกราฟ (Versus Order) พบว่าลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่มแสดงว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับลำดับการทดลองเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการทดลองแบบ ไม่พบความผิดปกติหรือเกิดแนวโน้มของส่วนตกค้างจึงสรุปได้ว่าสามารถนำผลการทดลองไปใช้ได้ ดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึง

4.6.1.5 การวิเคราะห์ความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลองจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึง

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงของกระบวนการเชื่อมลวดทองคำโดยใช้โปรแกรม Minitab เพื่อตรวจสอบนัยสำคัญและผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงของกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ แสดงในตาราง 4.19 โดยผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าการเปลี่ยนแปลงของผลตอบแรงดึงโดยการพิจารณาปัจจัยที่มีนัยสำคัญจากการพิจารณาค่า P-Value ที่มีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ พบว่าปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญคือ (Main effect) เท่านั้น โดยพบว่าผลจากการวิเคราะห์ลักษณะความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง (Curvature) ค่าที่แสดงมีค่ามากกว่า P-Value จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังแสดงภาพผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึงไว้ใน ภาคผนวก ค

ตารางที่ 4.19 ความแปรปรวนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนของผลตอบแรงดึง

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	Significant
Constant		22.84	0.13	179.15	0.00	✓
Bond Force	-1.26	-0.63	0.13	-4.96	0.04	✓
Bond Time	-0.05	-0.03	0.13	-0.20	0.86	
Bond Force*Bond Time	0.14	0.07	0.13	0.55	0.64	
Ct Pt		0.78	0.19	4.02	0.06	

4.7 การหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ

การหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าแรงดึงและแรงเฉือน ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าผลตอบ ซึ่งได้มาจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล โดยผลตอบแรงดึงนั้นมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจำนวน 1 ปัจจัยคือ แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) และผลตอบแรงเฉือนนั้นมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจำนวน 1 ปัจจัยคือ แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เช่นเดียวกับผลตอบแรงดึง หลังจากทำการวิเคราะห์ผลการทดลองแล้วจึงใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ของโปรแกรม Minitab เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่จะให้ค่าแรงดึงสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดเมื่อใช้หัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุการใช้งานของบริษัทผู้ผลิตในกรณีศึกษา สำหรับการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่จะทำให้ได้ผลตอบแรงดึงและแรงเฉือนสูงสุดนั้น ผู้วิจัยได้อ้างอิงข้อมูลจากค่ามาตรฐานของลูกค้า โดยการปรับตั้งฟังก์ชัน Response Optimization ผู้วิจัยจะกำหนดเป็นแบบมากที่สุด (Maximize) เพื่อให้ได้ค่าแรงดึงและแรงเฉือนสูงสุด ซึ่งการปรับตั้งค่าผลตอบงานวิจัยแบบมากที่สุดนั้น โปรแกรม Minitab จะให้กำหนดค่าเป้าหมาย (Target) และค่าต่ำที่สุด (Lower) ซึ่งค่าเป้าหมายผู้วิจัยเลือกกำหนดให้มีค่าสูงกว่ามาตรฐานของลูกค้า 2 เท่า ซึ่งเป็นค่าที่หัวเชื่อมลวดทองคำที่ยังไม่หมดอายุสามารถให้แรงดึงหรือแรงเฉือนได้เมื่อทำการเชื่อม ในส่วนของค่าต่ำที่สุดกำหนดให้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของลูกค้า 1.5 เท่า ซึ่งเป็นค่ากลางระหว่างค่าเป้าหมายและค่ามาตรฐานของลูกค้า

สำหรับค่าแรงดึงนั้นกำหนดให้ในแต่ละจุดที่มีการเชื่อมจะต้องมีค่าแรงดึงไม่ต่ำกว่า 6 กรัม ดังตารางที่ 4.20 ซึ่งการปรับตั้งค่าในฟังก์ชัน Response Optimization สำหรับเป้าหมาย (Target) ผู้วิจัยกำหนดให้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด 2 เท่าคือ 12 กรัม และค่าต่ำที่สุด (Lower) ผู้วิจัยกำหนดให้มีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด 1.5 เท่าคือ 9 กรัม ในส่วนของค่าแรงเฉือนกำหนดให้ในแต่ละจุดที่มีการเชื่อมจะต้องมีค่าแรงเฉือนไม่ต่ำกว่า 27 กรัม ดังตารางที่ 4.20 ซึ่งการปรับตั้งค่าในฟังก์ชัน Response Optimization สำหรับเป้าหมาย (Target) ผู้วิจัยกำหนดให้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด 2 เท่าคือ 54 กรัม และค่าต่ำที่สุด (Lower) ผู้วิจัยกำหนดให้มีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด 1.5 เท่าคือ 40.5

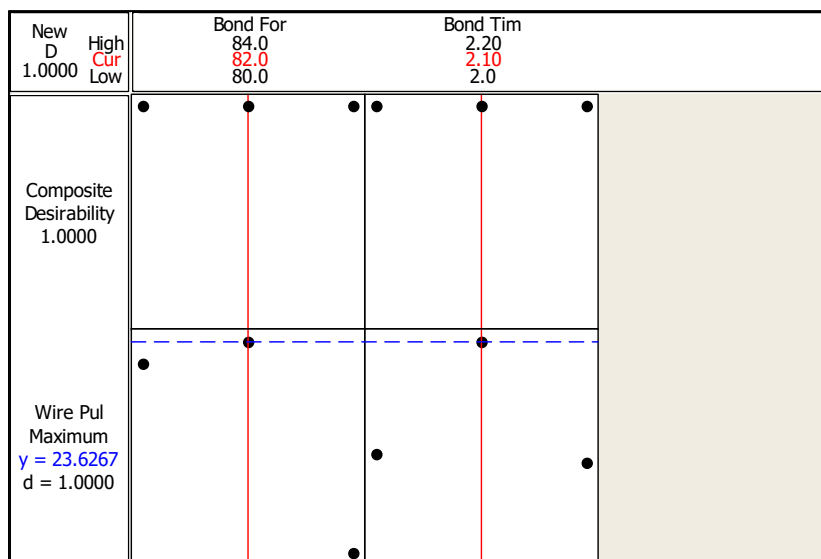
ตารางที่ 4.20 การกำหนดค่าในการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุด

สัญลักษณ์	ผลตอบงานวิจัย	ค่ามาตรฐานกำหนดโดยลูกค้า	ค่าที่ปรับตั้งในการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดแบบมากที่สุด (Maximize)	
			ค่าที่ต้องกำหนด	แรงดึงที่กำหนด
Y_1	ค่าแรงดึงมาตรฐาน (Wire pull)	≥ 6 กรัม	ค่าต่ำสุด (Lower)	9 กรัม
			ค่าเป้าหมาย (Target)	12 กรัม
Y_2	ค่าแรงเฉือนมาตรฐาน (Bond shear)	≥ 27 กรัม	ค่าต่ำสุด (Lower)	40.5 กรัม
			ค่าเป้าหมาย (Target)	54 กรัม

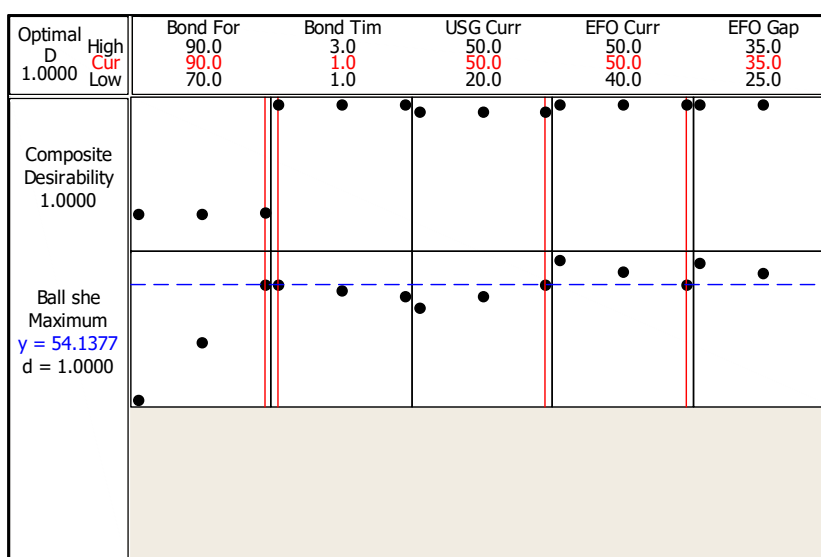
เมื่อกำหนดค่าที่ปรับตั้งในการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดแบบมากที่สุด (Maximize) จากนั้นจึงทำการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่สำหรับผลตอบแทนแรงดึงและแรงเฉือน

ผลการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบแทนแรงดึงคือ การปรับตั้งค่าแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เท่ากับ 82 กรัมและเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) 2.1 มิลลิวินาที ซึ่งจะทำให้ได้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ 23.62 กรัม ดังภาพที่ 4.21 ผลการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยโดยฟังก์ชัน Response optimize

สำหรับผลตอบแทนแรงดึง และผลการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบแทนแรงเฉือนคือ การปรับตั้งค่าแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เท่ากับ 90 กรัมและเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) 1 มิลลิวินาที ค่าพลังงานที่ใช้ในการสั่นสะเทือนแบบอัลตราโซนิก (USG current) 50 ค่ากระแสที่ปล่อยผ่าน EFO เพื่อหลอมลวดทองคำ (EFO current) 50 และค่าระยะห่างระหว่าง EFO กับลวดทองคำให้ช่วงที่หลอมละลายลวด (EFO gap) 35 ค่าซึ่งจะทำให้ได้ค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ 54.13 กรัม ดังภาพที่ 4.22 ผลการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยโดยฟังก์ชัน Response optimize สำหรับผลตอบแทนแรงเฉือน



ภาพที่ 4.21 ผลการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยสำหรับผลตอบแทนดึง



ภาพที่ 4.22 ผลการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยสำหรับผลตอบแทนเนียน

4.8 การทดลองและวิเคราะห์การทดลองยืนยันผล

จากสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่ได้จากฟังก์ชัน Response optimize ผู้วิจัยจะนำระดับของปัจจัยจากการคำนวณไปทำการทดลองเพื่อผลิตชิ้นงาน โดยปรับตั้งระดับของปัจจัยตามผลการคำนวณและตรวจสอบค่าผลตอบค่าเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุด เพื่อยืนยันความถูกต้องของสถานะที่เหมาะสมที่สุด โดยในการทดลองนั้นจะเก็บข้อมูลจำนวน 30 ข้อมูลเพื่อทดสอบสมมุติฐานทางสถิติแบบ T-Test ระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) เพื่อทดสอบสมมุติฐาน สำหรับการกำหนดระดับของปัจจัยสำหรับค่าแรงเนียนจะปรับตั้งค่าแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เท่ากับ 82 กรัมและเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) 2.1 มิลลิวินาที โดยที่ปัจจัยอื่น

ๆ ผู้วิจัยจะปรับตั้งตามค่ามาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต การปรับตั้งค่าแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เท่ากับ 90 กรัมและเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) 1 มิลลิวินาที ค่าพลังงานที่ใช้ในการสั่นสะเทือนแบบอัลตราโซนิก (USG current) 50 ค่ากระแสที่ปล่อยผ่าน EFO เพื่อหลอมลวดทองคำ (EFO current) 50 และค่าระยะห่างระหว่าง EFO กับลวดทองคำให้ช่วงที่หลอมละลายลวด (EFO gap) 35 ดังที่แสดงในตารางที่ 4.21

จากผลการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4.2.1 นั้น จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของแรงดึงและผลสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของแรงเฉือน ซึ่งการนำไปใช้งานจำเป็นจะต้องพิจารณาเลือกใช้ตามความต้องการของผู้ผลิตเป็นสำคัญ

ตารางที่ 4.21 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปใช้ในการทดลองยืนยันผล

ปัจจัย	ผลตอบแรงดึง			ผลตอบแรงเฉือน		
	สภาวะที่เหมาะสมที่สุด	Unit	แรงดึงสูงสุด	สภาวะที่เหมาะสมที่สุด	Unit	แรงเฉือนสูงสุด
(A) Bond Force	82	grams	23.62	90	grams	54.13
(B) Bond Time	2.1	mils sec		1	mils sec	
(C) USG Current	35	mA		50	mA	
(D) EFO Current	45	mA		50	mA	
(E) EFO Gap	30	mils		35	mils	

การทดลองเพื่อยืนยันผลจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยเพื่อให้ได้ค่าแรงดึงและแรงเฉือนสูงสุด นั้นผู้วิจัยได้ควบคุมการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยโดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลโดยใช้เครื่องจักร, คน, วัสดุรวมถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่ต้องควบคุมเพื่อไม่ให้ผลการทดลองเกิดผลกระทบจากปัจจัยอื่นที่ไม่เกี่ยวข้อง โดยในการทดลองนั้นจะทำการทดลองจำนวน 30 ชิ้นสำหรับแต่ละผลตอบ ดังผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.22 แสดงผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึงและแสดงภาพผลการทดลองไว้ในภาคผนวก ง. สำหรับตารางที่ 4.23 แสดงผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือนและแสดงภาพผลการทดลองไว้ในภาคผนวก จ.

ตารางที่ 4.22 ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง

ชิ้นงาน ที่	ผลการทดลองยืนยันผล (แรงดึงหน่วยเป็นกรัม)			ค่ามาตรฐานอื่น ๆ ที่ทดสอบ	
	ค่าแรงดึง จากการทดลอง ยืนยันผล	ค่าแรงดึง มาตรฐาน ลูกค้ำ	ตรวจสอบ ค่าแรงดึงเทียบ กับค่ามาตรฐาน	ลักษณะทาง กายภาพของ การเชื่อม	ค่าสัญญาณ ทางไฟฟ้า
1	23.14	≥ 6	ผ่านมาตรฐาน	ผ่านมาตรฐาน	ผ่านมาตรฐาน
2	23.10	≥ 6			
3	23.91	≥ 6			
4	23.15	≥ 6			
5	24.37	≥ 6			
6	24.92	≥ 6			
7	24.35	≥ 6			
8	23.83	≥ 6			
9	23.92	≥ 6			
10	24.80	≥ 6			
11	23.79	≥ 6			
12	23.20	≥ 6			
13	24.13	≥ 6			
14	22.84	≥ 6			
15	23.03	≥ 6			
16	24.48	≥ 6			
17	23.66	≥ 6			
18	23.81	≥ 6			
19	23.36	≥ 6			
20	24.27	≥ 6			
21	23.15	≥ 6			
22	24.26	≥ 6			
23	23.81	≥ 6			
24	23.33	≥ 6			
25	23.59	≥ 6			
26	23.31	≥ 6			
27	23.78	≥ 6			
28	23.15	≥ 6			
29	24.09	≥ 6			
30	24.32	≥ 6			

ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน

ชิ้นงาน ที่	ผลการทดลองยืนยันผล (แรงเฉือนหน่วยเป็นกรัม)			ค่ามาตรฐานอื่น ๆ	
	ค่าแรงเฉือน จากการทดลอง ยืนยันผล	ค่าแรงเฉือน มาตรฐาน ลูกค้า	ตรวจสอบ ค่าแรงดึงเทียบ กับค่ามาตรฐาน	ลักษณะทาง กายภาพของ การเชื่อม	ค่าสัญญาณ ทางไฟฟ้า
1	53.34	≥ 27	ผ่านมาตรฐาน	ผ่านมาตรฐาน	ผ่านมาตรฐาน
2	54.92	≥ 27			
3	54.64	≥ 27			
4	53.42	≥ 27			
5	54.90	≥ 27			
6	54.35	≥ 27			
7	54.15	≥ 27			
8	53.90	≥ 27			
9	54.07	≥ 27			
10	53.07	≥ 27			
11	52.61	≥ 27			
12	54.12	≥ 27			
13	53.58	≥ 27			
14	52.27	≥ 27			
15	54.54	≥ 27			
16	53.51	≥ 27			
17	53.91	≥ 27			
18	54.22	≥ 27			
19	55.45	≥ 27			
20	53.87	≥ 27			
21	53.97	≥ 27			
22	54.55	≥ 27			
23	55.22	≥ 27			
24	52.91	≥ 27			
25	53.81	≥ 27			
26	52.19	≥ 27			
27	54.45	≥ 27			
28	55.70	≥ 27			
29	54.71	≥ 27			
30	54.58	≥ 27			

จากตารางที่ 4.22 และ 4.23 นั้น แสดงผลของชิ้นงานที่ผลิตโดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งชิ้นงานจะต้องถูกทดสอบมาตรฐานต่าง ๆ ประกอบด้วยค่าแรงดึงและค่าแรงเฉือนและค่ามาตรฐานอื่น ๆ ที่ชิ้นงานนั้นจะต้องตรวจสอบประกอบด้วยลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมซึ่งจะถูกตรวจสอบโดยฝ่ายควบคุมคุณภาพและค่าสัญญาณทางไฟฟ้าของชิ้นงานซึ่งจะถูกทดสอบในกระบวนการการก่อนที่จะส่งชิ้นงานให้ลูกค้า จากผลของชิ้นงานที่ผลิตโดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดพบว่าชิ้นงานทั้งหมดผ่านตามมาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด

4.9 ผลวิเคราะห์การทดลองยืนยันผล

การวิเคราะห์ผลการทดลองยืนยันผลนั้น ผู้วิจัยจะใช้ค่าแรงดึงและค่าแรงเฉือนจากการที่นำสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยไปทดลองผลิตชิ้นงานจริงจำนวน 30 ชิ้นสำหรับแต่ละผลตอบ โดยใช้การทดสอบสมมุติฐานแบบ T-Test ที่ระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงดึงและแรงเฉือนจากการทำงานจริงเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของแรงดึงและแรงเฉือนจากแบบจำลองว่าผลที่ได้จากการทำงานจริงมีค่าไม่แตกต่างกัน เพื่อให้มั่นใจว่าเมื่อนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุการใช้ในการผลิตจริงจะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยในการตรวจสอบผลการทดลองยืนยันผลนั้น จะพิจารณาจากค่า P – Value ของการทดลองเปรียบเทียบค่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

จากข้อมูลการผลิตชิ้นงานโดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจำนวน 30 ชิ้น ดังตารางที่ 4.24 จากนั้นผู้วิจัยนำข้อมูลดังกล่าวมาทดสอบสมมุติฐานแบบ T-Test เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงดึงและแรงเฉือนของชิ้นงานที่ผลิตโดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองเชิงเส้นของแรงดึงคือ 23.62 กรัม และค่าที่ได้จากแบบจำลองเชิงเส้นของแรงเฉือนคือ 54.13 กรัม โดยผู้วิจัยสามารถเขียนสมมุติฐานได้ดังนี้

สมมุติฐานการทดลองยืนยันผลของผลตอบแรงดึง

H_0 : ผลค่าเฉลี่ยของแรงดึง เท่ากับ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง (23.62 กรัม)

H_1 : ผลค่าเฉลี่ยของแรงดึง ไม่เท่ากับ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง (23.62 กรัม)

ตารางที่ 4.24 การวิเคราะห์ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Wire pull confirm result	30	23.76	0.55	0.10	(23.55, 23.96)	1.38	0.17

จากตารางที่ 4.24 ตารางวิเคราะห์ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง แสดงค่า P (P-Value) มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) จึงสามารถสรุปได้ว่าผลจากการทดลองยืนยันผลนั้นยอมรับสมมุติฐานหลักคือ ผลค่าเฉลี่ยของแรงดึง เท่ากับ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง (23.62 กรัม) และค่าแรงดึงของชิ้นงานที่ใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดนั้น ชิ้นงานมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานของลูกค้า ดังนั้นผู้วิจัยจึงจะนำสภาวะที่เหมาะสมที่สุดไปใช้เพื่อผลิตชิ้นงานจริงเพื่อติดตามผลต่อไป

สมมติฐานการทดลองยืนยันผลของผลตอบแรงเฉือน

H_0 : ผลค่าเฉลี่ยของแรงเฉือน เท่ากับ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง (54.13 กรัม)

H_1 : ผลค่าเฉลี่ยของแรงเฉือน ไม่เท่ากับ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง (54.13 กรัม)

ตารางที่ 4.25 การวิเคราะห์ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Bond Shear confirm result	30	54.03	0.86	0.15	(54.70, 54.35)	-0.67	0.50

จากตารางที่ 4.25 ตารางวิเคราะห์ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน แสดงค่า P (P-Vale) มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) จึงสามารถสรุปได้ว่าผลจากการทดลองยืนยันผลนั้น ยอมรับสมมติฐานหลักคือ ผลค่าเฉลี่ยของแรงเฉือน เท่ากับ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง (54.13 กรัม) และ ค่าแรงเฉือนของชิ้นงานที่ใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดนั้น ชิ้นงานมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานของลูกค้ำ ดังนั้นผู้วิจัยจึงจะนำสภาวะที่เหมาะสมที่สุดไปใช้เพื่อผลิตชิ้นงานจริงเพื่อติดตามผลต่อไป

4.10 การควบคุมกระบวนการเพื่อให้ชิ้นงานที่ได้อยู่ภายใต้มาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด

การควบคุมกระบวนการเพื่อให้อยู่ภายใต้มาตรฐานของลูกค้า นั้น ผู้วิจัยจะดำเนินการตรวจสอบ ชิ้นงานที่ผลิตโดยใช้หัวเชื่อมที่หมดอายุและนำกลับมาใช้ซ้ำด้วยแผนภูมิควบคุมแบบ X-MR Chart เพื่อ วิเคราะห์และดูแนวโน้มของชิ้นงาน ป้องกันไม่ให้เกิดชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่องในขณะการผลิตโดยใช้หัว เชื่อมที่นำมาใช้ซ้ำ เนื่องจากแผนภูมิแบบ X-MR Chart ที่เหมาะสำหรับกระบวนการผลิตที่มีการ ทดสอบแบบทำลายหรือชิ้นงานที่ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นมีราคาสูง เพราะเป็นแผนภูมิควบคุมที่ใช้ขนาด ของกลุ่มย่อยเพียงข้อมูลเดียว ($n=1$) และนำข้อมูลแต่ละตัวมาพล็อตลงในแผนภูมิ โดยใช้พิสัยเคลื่อนที่ Moving Range (MR) เปรียบเทียบกันระหว่างกลุ่มที่อยู่ติดต่อกันในการคำนวณค่าขอบเขตควบคุม เพื่อควบคุมค่าความผันแปรของกระบวนการและสามารถใช้เพื่อช่วยตรวจจับความผิดปกติ (Assignable Cause) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วโดยขั้นแรกจะทำการผลิตชิ้นงาน จำนวน 30 ชิ้นเพื่อสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุม จากนั้นจึงผลิตชิ้นงานและตรวจสอบ ตามมาตรฐานของผู้ผลิต ซึ่งจะสุ่มตรวจสอบชิ้นงานเมื่อมีการผลิตทุก ๆ 2,800 ชิ้น

4.10.1 การสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ X-MR Chart

เพื่อสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมผู้วิจัยได้ผลิตชิ้นงานจำนวน 30 ชิ้นเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ ในการคำนวณเพื่อสร้างเส้นขีดจำกัด ดังข้อมูลในการผลิตงานเพื่อสร้างเส้นขีดจำกัดแสดงดังตารางที่ 4.26 ตารางแสดงการผลิตชิ้นงานเพื่อสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ X-MR Chart สำหรับค่า ผลตอบแรงดึง และตารางที่ 4.27 ตารางแสดงการผลิตชิ้นงานเพื่อสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของ แผนภูมิ X-MR Chart สำหรับค่าผลตอบแรงเฉือน เพื่อนำผลที่ได้ไปคำนวณเพื่อสร้างเส้นขีดจำกัด ควบคุมของแผนภูมิ X-MR Chart

ตารางที่ 4.26 การสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ X-MR Chart สำหรับค่าผลตอบแทนดึง

No	Wire pull result	No	Wire pull result	No	Wire pull result
1	22.92	11	23.48	21	22.77
2	23.69	12	23.10	22	23.40
3	25.13	13	24.01	23	24.14
4	24.14	14	23.38	24	23.92
5	22.52	15	23.62	25	22.56
6	24.04	16	23.70	26	23.90
7	23.95	17	23.43	27	22.91
8	24.15	18	23.50	28	23.58
9	24.08	19	24.37	29	24.56
10	24.31	20	23.67	30	23.43

จากตารางที่ 4.26 พบว่าค่า $\bar{x} = 23.68$ และค่า $\overline{MR} = 0.725$ โดยใช้ขนาดของกลุ่มย่อยเพียงข้อมูลเดียว (n=1) จากนั้นจึงแทนค่าลงในสมการเพื่อสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมสำหรับแผนภูมิ X Chart สำหรับผลตอบแทนดึงดังสมการที่ 4.7 ถึง 4.9 และ MR Chart สำหรับผลตอบแทนดึงดังสมการที่ 4.10 ถึง 4.12 เพื่อสร้างเส้นขีดจำกัดจำเป็นต้องใช้ค่าคงที่ซึ่งสามารถกำหนดได้จากตารางปัจจัยของแผนภูมิควบคุมเชิงปริมาณ

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมด้านบนของแผนภูมิ X Chart สำหรับผลตอบแทนดึง

$$UCL_x = \bar{x} + 3 \left(\frac{\overline{MR}}{d_2} \right)$$

$$UCL_x = 23.68 + 3 \left(\frac{0.725}{1.128} \right)$$

$$UCL_x = 25.61$$

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ X Chart สำหรับผลตอบแทนดึง

$$CL_x = \bar{x}$$

$$CL_x = 23.68$$

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมล่างของแผนภูมิ X Chart สำหรับผลตอบแรงดึง

$$LCL_x = \bar{x} - 3 \left(\frac{\overline{MR}}{d_2} \right)$$

$$LCL_x = 23.68 - 3 \left(\frac{0.725}{1.128} \right)$$

$$LCL_x = 21.76$$

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมบนของแผนภูมิ MR Chart สำหรับผลตอบแรงดึง

$$UCL_{MR} = D_4 \times \overline{MR}$$

$$UCL_{MR} = 3.267 \times 0.725$$

$$UCL_{MR} = 2.368$$

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ MR Chart สำหรับผลตอบแรงดึง

$$CL_{MR} = \overline{MR}$$

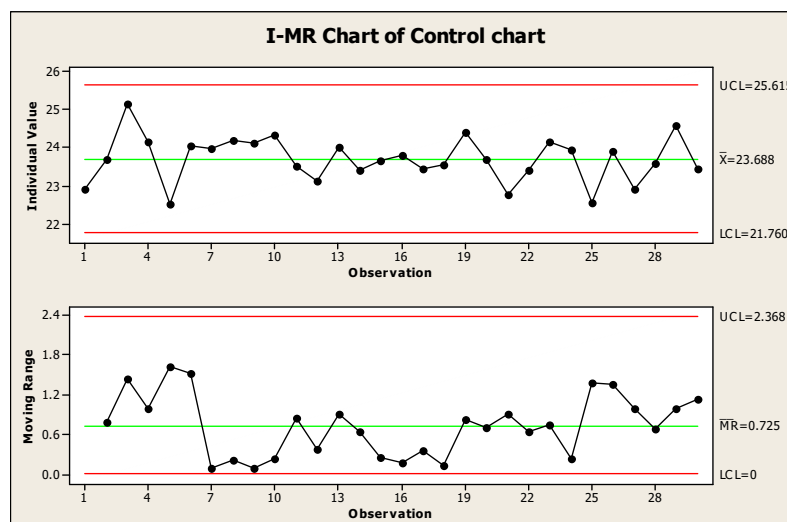
$$CL_{MR} = 0.725$$

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ MR Chart สำหรับผลตอบแรงดึง

$$LCL_{MR} = D_3 \times \overline{MR}$$

$$LCL_{MR} = 0 \times 0.725$$

$$LCL_{MR} = 0$$



ภาพที่ 4.23 เส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุมแบบ X-MR Chart สำหรับผลตอบแรงดึง

จากภาพที่ 4.23 การสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุมแบบ X-MR Chart สำหรับผลตอบแรงดึง พบว่าจำนวนชิ้นงานที่ผลิตด้วยหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วในแผนภูมิ Individual value (X Chart) มีการแจกแจงของข้อมูลปกติไม่มีลักษณะการเกิดแนวโน้มรวมถึงไม่มีจุดของข้อมูลที่อยู่กนออกเหนือเส้นควบคุมที่กำหนดไว้ ผู้วิจัยจึงจะนำผลการสร้างเส้นขีดจำกัดดังกล่าวไปใช้เพื่อควบคุมกระบวนการเพื่อผลิตชิ้นงานต่อไป

ตารางที่ 4.27 การสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ X-MR Chart สำหรับค่าผลตอบแรงเฉือน

No	Bond shear result	No	Bond shear result	No	Bond shear result
1	55.79	11	54.23	21	54.00
2	54.28	12	53.58	22	52.81
3	55.23	13	52.11	23	53.76
4	54.52	14	54.05	24	52.96
5	53.64	15	56.03	25	51.55
6	55.04	16	53.16	26	54.12
7	53.20	17	52.89	27	54.96
8	55.32	18	54.03	28	53.76
9	55.09	19	54.43	29	53.91
10	55.36	20	54.95	30	53.86

จากตารางที่ 4.27 พบว่าค่า $\bar{x} = 54.09$ และค่า $\bar{MR} = 1.186$ โดยใช้ขนาดของกลุ่มย่อยเพียงข้อมูลเดียว (n=1) จากนั้นจึงแทนค่าลงในสมการเพื่อสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมสำหรับแผนภูมิ X Chart สำหรับผลตอบแรงดึงดังสมการที่ 4.13 ถึง 4.15 และ MR Chart สำหรับผลตอบแรงดึงดัง

สมการที่ 4.16 ถึง 4.18 เพื่อสร้างเส้นขีดจำกัดจำเป็นต้องใช้ค่าคงที่ซึ่งสามารถกำหนดได้จากตารางปัจจัยของแผนภูมิควบคุมเชิงปริมาณ

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมด้านบนของแผนภูมิ X Chart สำหรับผลตอบแรงเฉือน

$$UCL_x = \bar{x} + 3 \left(\frac{\overline{MR}}{d_2} \right)$$

$$UCL_x = 54.09 + 3 \left(\frac{1.186}{1.128} \right)$$

$$UCL_x = 57.24$$

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ X Chart สำหรับผลตอบแรงเฉือน

$$CL_x = \bar{x}$$

$$CL_x = 54.09$$

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมด้านล่างของแผนภูมิ X Chart สำหรับผลตอบแรงเฉือน

$$LCL_x = \bar{x} - 3 \left(\frac{\overline{MR}}{d_2} \right)$$

$$LCL_x = 54.09 - 3 \left(\frac{1.186}{1.128} \right)$$

$$LCL_x = 50.937$$

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมด้านบนของแผนภูมิ MR Chart สำหรับผลตอบแรงเฉือน

$$UCL_{MR} = D_4 \times \overline{MR}$$

$$UCL_{MR} = 3.267 \times 1.186$$

$$UCL_{MR} = 3.873$$

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ MR Chart สำหรับผลตอบแรงเฉือน

$$CL_{MR} = \overline{MR}$$

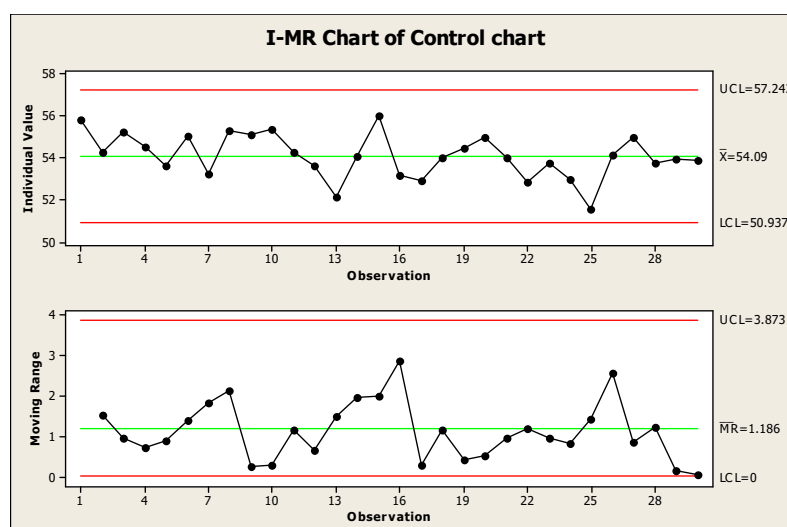
$$CL_{MR} = 1.186$$

สมการสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมด้านล่างของแผนภูมิ MR Chart สำหรับผลตอบแรงเฉือน

$$LCL_{MR} = D_3 \times \overline{MR}$$

$$LCL_{MR} = 0 \times 1.186$$

$$LCL_{MR} = 0$$



ภาพที่ 4.24 เส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุมแบบ X-MR Chart สำหรับผลตอบแรงเฉือน

จากภาพที่ 4.24 การสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิควบคุมแบบ X-MR Chart สำหรับผลตอบแรงเฉือนพบว่าจำนวนชิ้นงานที่ผลิตด้วยหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วดังแสดงในแผนภูมิ Individual value (X Chart) มีการแจกแจงของข้อมูลปกติไม่มีลักษณะการเกิดแนวโน้มรวมถึงไม่มีจุดของข้อมูลที่อยู่นอกเหนือเส้นควบคุมที่กำหนดไว้ ผู้วิจัยจึงจะนำผลการสร้างเส้นขีดจำกัดดังกล่าวไปใช้เพื่อควบคุมกระบวนการเพื่อผลิตชิ้นงานต่อไป

4.10.2 การผลิตชิ้นงานโดยใช้หัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำเพื่อนำหัวเชื่อมลวดทองคำกลับมาใช้ซ้ำนั้น มีการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยเพื่อให้ได้ผลตอบของงานวิจัยที่ดีที่สุด เมื่อนำหัวเชื่อมลวดทองคำมาใช้งาน อย่างไรก็ตามเมื่อจำเป็นจะต้องมีการนำหัวเชื่อมลวดทองคำมาใช้ จำเป็นต้องมีกระบวนการควบคุมผู้วิจัยจึงใช้แผนภูมิควบคุมแบบ X-MR Chart เพื่อเก็บข้อมูลของกระบวนการระหว่างที่ผลิตเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดของเสียระหว่างการผลิต ในการผลิตชิ้นงานนั้นจะใช้หัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุการใช้งานแล้ว (ใช้เชื่อมไปแล้ว 300,000 ครั้ง หรือ 75,000 ชิ้นงาน) โดยในการผลิตชิ้นงานและสุ่มตรวจสอบชิ้นงานที่ทำการผลิตเมื่อมีการเชื่อมครบ 11,200 ครั้ง (2,800 ชิ้นงาน) โดยจะตั้งเป้าหมายในการผลิตไว้ที่จำนวนครั้งในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด 168,000 ครั้ง (42,000 ชิ้นงาน) หรือคิดเป็นอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 54 ตามที่ได้กำหนดไว้ในขอบเขตงานวิจัย สำหรับทั้งผลตอบแรงดึงและผลตอบแรงเฉือน ดังตารางที่ 4.28 ตารางแสดงจำนวนครั้งที่ผลิตชิ้นงานด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง และตารางที่ 4.29 ตารางแสดงจำนวนครั้งที่ผลิตชิ้นงานด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน โดยภาพชิ้นงานที่ผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึงในภาคผนวก ฉ. และภาพชิ้นงานที่ผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือนในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.28 จำนวนครั้งที่ผลิตชิ้นงานด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง

ครั้งที่ตรวจสอบ	จำนวนครั้งที่เชื่อม	ค่าแรงดึง (กรัม)	ค่ามาตรฐานแรงดึงของลูกค้า (กรัม)	ตรวจสอบค่าแรงดึงเทียบกับค่ามาตรฐาน
1	311,660	24.38	≥ 6	ผ่าน
2	322,860	23.79	≥ 6	ผ่าน
3	334,060	23.27	≥ 6	ผ่าน
4	345,260	22.94	≥ 6	ผ่าน
5	356,460	24.22	≥ 6	ผ่าน
6	367,660	23.64	≥ 6	ผ่าน
7	378,860	24.05	≥ 6	ผ่าน
8	390,060	23.26	≥ 6	ผ่าน
9	401,260	24.23	≥ 6	ผ่าน
10	412,460	22.91	≥ 6	ผ่าน
11	423,660	24.46	≥ 6	ผ่าน
12	434,860	23.58	≥ 6	ผ่าน
13	446,060	23.88	≥ 6	ผ่าน
14	457,260	24.28	≥ 6	ผ่าน
15	468,460	23.74	≥ 6	ผ่าน

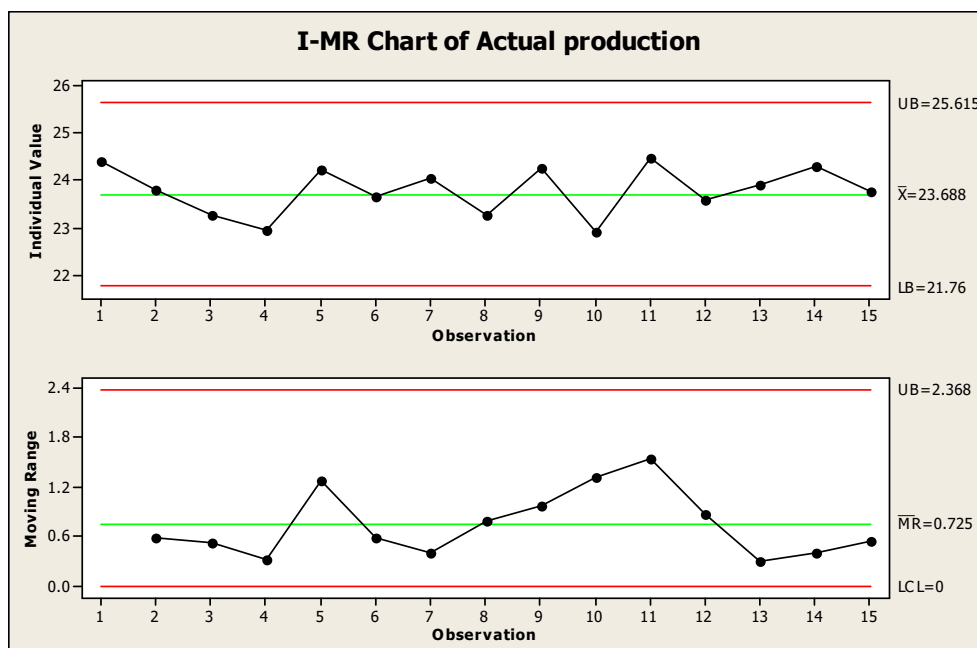
หมายเหตุ: จำนวนครั้งในการเชื่อมขณะที่ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ 460 ครั้ง (115 ชิ้น)

ตารางที่ 4.29 จำนวนครั้งที่ผลิตชิ้นงานด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน

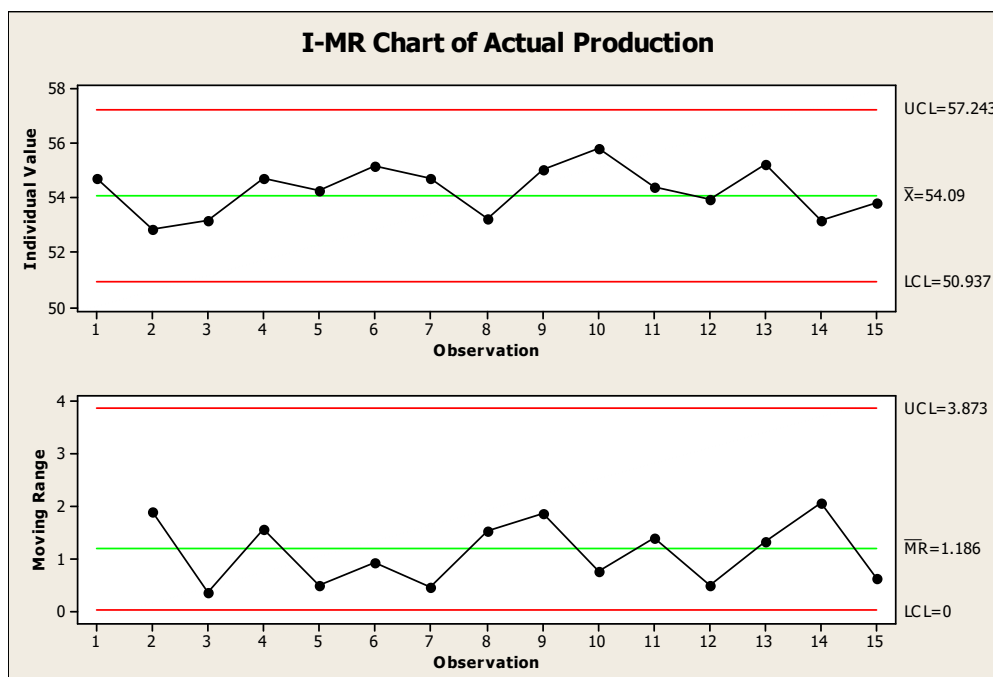
ครั้งที่ ตรวจสอบ	จำนวนครั้งที่ เชื่อม	ค่าแรงเฉือน (กรัม)	ค่ามาตรฐานแรง เฉือนของลูกค้า (กรัม)	ตรวจสอบ ค่าแรงเฉือนเทียบกับ ค่ามาตรฐาน
1	311,592	54.74	≥ 27	ผ่าน
2	322,792	52.84	≥ 27	ผ่าน
3	333,992	53.18	≥ 27	ผ่าน
4	345,192	54.73	≥ 27	ผ่าน
5	356,392	54.26	≥ 27	ผ่าน
6	367,592	55.17	≥ 27	ผ่าน
7	378,792	54.74	≥ 27	ผ่าน
8	389,992	53.22	≥ 27	ผ่าน
9	401,192	55.06	≥ 27	ผ่าน
10	412,392	55.79	≥ 27	ผ่าน
11	423,592	54.41	≥ 27	ผ่าน
12	434,792	53.92	≥ 27	ผ่าน
13	445,992	55.23	≥ 27	ผ่าน
14	457,192	53.19	≥ 27	ผ่าน
15	468,392	53.81	≥ 27	ผ่าน

หมายเหตุ: จำนวนครั้งในการเชื่อมขณะที่ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ 392 ครั้ง (98 ชิ้น)

จากข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.28 และ 4.29 สามารถนำมาบันทึกในแผนภูมิควบคุมที่ได้สร้างเส้นขีดจำกัดไว้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลจากการนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วกลับมาใช้ซ้ำ นั้น มีลักษณะการแจกแจงปกติไม่มีแนวโน้มของผลตอบที่เปลี่ยนไป จึงสามารถสรุปได้ว่า การนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วกลับมาใช้ซ้ำ โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.25 และ 4.26 การเปรียบเทียบผลของแรงดึงและแรงเฉือน ที่ผลิตโดยหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วและนำมาใช้ซ้ำเปรียบเทียบกับหัวเชื่อมลวดทองคำที่ยังไม่หมดอายุการใช้งาน พบว่าค่าจากการผลิตค่าที่ได้นั้นไม่แตกต่างกัน และงานที่ทำการผลิตโดยหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุนั้น ผ่านตามข้อกำหนดอื่น ๆ ในการตรวจสอบการผลิตชิ้นงานคือ ลักษณะทางกายภาพและค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งถูกตรวจสอบก่อนที่จะส่งสินค้าให้ลูกค้า



ภาพที่ 4.25 ค่าแรงดึงเมื่อนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุกลับมาใช้โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 4.26 ค่าแรงฉีกเมื่อนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุกลับมาใช้โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด

4.11 การคำนวณต้นทุนและเปรียบเทียบต้นทุน

ในกระบวนการผลิตประกอบด้วยต้นทุนหลายส่วนซึ่งต้นทุนแต่ละส่วนนั้นถูกใช้เพื่อเป็นส่วนประกอบของราคาของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้พิจารณาถึงการนำขึ้นส่วนของเครื่องจักรที่หมดอายุแล้วกลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตในกระบวนการลดลง โดยในการพิจารณาผู้วิจัยพิจารณาถึงต้นทุนหลายด้านเพื่อให้ครอบคลุมถึงสิ่งที่ได้มาจากการวิจัยทั้งด้านต้นทุนด้าน เงิน เวลา ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในกระบวนการและทำการเปรียบเทียบเมื่อมีการนำขึ้นส่วนของเครื่องจักรมาใช้ซ้ำหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการยืดอายุการใช้งานขึ้นส่วนของเครื่องจักร

4.11.1 การพิจารณาต้นทุนด้านเวลาในการการซ่อมบำรุง (Maintenance cost)

การพิจารณาต้นทุนในการซ่อมบำรุงเครื่องจักรหรือต้นทุนด้านเวลาของผู้ผลิตที่จะต้องสูญเสียเมื่อจำเป็นต้องมีการหยุดเครื่องจักรเพื่อเปลี่ยนชิ้นส่วนของเครื่องจักรเพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานได้ ในงานวิจัยจะกล่าวถึงเวลาที่สามารถลดได้หากมีการนำชิ้นงานส่วนของเครื่องจักรที่หมดอายุกลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งการนำขึ้นส่วนของเครื่องจักรกลับมาใช้ซ้ำนั้นจะส่งผลในจำนวนครั้งในการหยุดเครื่องจักรเพื่อเปลี่ยนแปลงชิ้นส่วน ในการพิจารณาต้นทุนด้านเวลาในกระบวนการซ่อมบำรุงนั้นจะกล่าวถึงส่วนงานสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนที่เป็นเวลาในกระบวนการของวิศวกรที่เปลี่ยนชิ้นส่วนของเครื่องจักร และส่วนที่สองจะกล่าวถึงเวลาที่ส่วนงานควบคุมคุณภาพใช้ในการตรวจสอบชิ้นงานที่ผลิตกลุ่มแรกด้วยหัวเชื่อมลวดทองคำชิ้นใหม่เพื่อให้มั่นใจว่าหัวเชื่อมลวดทองคำชิ้นใหม่ใช้ได้ ตามมาตรฐานของลูกค้า ดังแสดงในตารางที่ 4.30 ตารางแสดงการเปรียบเทียบต้นทุนด้านเวลาการซ่อมบำรุงสำหรับส่วนงานวิศวกร โดยเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนชิ้นส่วนของเครื่องจักรเป็นเวลามาตรฐานคือ 20 นาทีต่อครั้งโดยเวลาดังกล่าวนั้นเป็นเวลาในการถอดและใส่หัวเชื่อมลวดทองคำ และตารางที่ 4.31 ตารางแสดงการเปรียบเทียบต้นทุนด้านเวลาการซ่อมบำรุงสำหรับส่วนงานควบคุมคุณภาพเพื่อตรวจสอบตามมาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด โดยเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของการเชื่อมลวดทองคำคือ 15 นาทีต่อครั้ง

จากตารางที่ 4.30 พบว่าในกรณีที่มีการนำหัวเชื่อมลวดทองคำกลับมาใช้ใหม่นั้นจะส่งผลให้จำนวนการใช้หัวเชื่อมลวดทองคำลดลงหากมีการผลิตตามค่าเฉลี่ยของยอดการผลิตจากเดิมจะต้องใช้หัวเชื่อมลวดทองคำจำนวน 80 ชิ้นลดลงเหลือ 51 ชิ้น ซึ่งจะส่งผลให้เวลาในการติดตั้งหัวเชื่อมลวดทองคำลดลงจากเดิมที่ต้องใช้เวลาในการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำต่อเดือนคือ 26.66 ชั่วโมงต่อเดือน ลดลงเหลือ 17.09 ชั่วโมงต่อเดือน และจากตารางที่ 4.31 แสดงข้อมูลในการตรวจสอบคุณภาพของหัวเชื่อมลวดทองคำซึ่งเป็นขั้นตอนที่จะต้องทำเพื่อตรวจสอบคุณภาพหลังจากมีการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำชิ้นใหม่ โดยการที่สามารถนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วกลับมาใช้ซ้ำนั้นจะทำให้เวลาในการตรวจสอบคุณภาพลดลงจากเดิมที่ต้องใช้เวลาในการตรวจสอบคุณภาพ 20 ชั่วโมงต่อเดือน ลดลงเหลือ 12.8 ชั่วโมงต่อเดือน

การคำนวณต้นทุนด้านเวลาในการการซ่อมบำรุงนั้น ผู้วิจัยจะแปลงข้อมูลเวลาในการซ่อมบำรุงเป็นจำนวนเงิน โดยคำนวณจากค่าแรงของผู้ปฏิบัติงาน 15,000 บาทต่อเดือน หรือคิดเป็นค่าแรงต่อชั่วโมงเท่ากับ 85.22 บาทต่อชั่วโมง (เมื่อผู้ปฏิบัติงานทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน และทำงาน 22 วันต่อเดือน) จากนั้นจึงนำเวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงทั้งส่วนที่เป็นส่วนงานวิศวกรและส่วนงานควบคุมคุณภาพมาทำการคำนวณ

ตารางที่ 4.30 การเปรียบเทียบต้นทุนด้านเวลาการซ่อมบำรุงสำหรับส่วนงานวิศวกร

รายการ	วิธีปัจจุบัน	วิธีที่นำเสนอ
ยอดการผลิตเฉลี่ยต่อเดือน	6,000,000 ชิ้นต่อเดือน	6,000,000 ชิ้นต่อเดือน
จำนวนการครั้งในการเชื่อมต่อขึ้น	4 ครั้งต่อขึ้น	4 ครั้งต่อขึ้น
จำนวนการครั้งในการเชื่อมต่อทั้งหมด	24,000,000 ครั้งต่อเดือน	24,000,000 ครั้งต่อเดือน
อายุการงานหัวเชื่อมลวดทองคำ	300,000 ครั้งต่อขึ้น	468,000 ครั้งต่อขึ้น
จำนวนหัวเชื่อมลวดทองคำต่อเดือน	80 ชิ้น	51 ชิ้น
เวลาในการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำ	20 นาทีต่อครั้ง	20 นาทีต่อครั้ง
เวลาในการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำ	1,600 นาทีต่อเดือน	1,026 นาทีต่อเดือน
เวลาในการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำ	26.66 ชั่วโมงต่อเดือน	17.09 ชั่วโมงต่อเดือน
คิดเป็นต้นทุน	2,272.16 บาทต่อเดือน	1,456.53 บาทต่อเดือน

ตารางที่ 4.31 การเปรียบเทียบต้นทุนด้านเวลาการซ่อมบำรุงสำหรับส่วนงานควบคุมคุณภาพ

รายการ	วิธีปัจจุบัน	วิธีที่นำเสนอ
ยอดการผลิตเฉลี่ยต่อเดือน	6,000,000 ชิ้นต่อเดือน	6,000,000 ชิ้นต่อเดือน
จำนวนการครั้งในการเชื่อมต่อขึ้น	4 ครั้งต่อขึ้น	4 ครั้งต่อขึ้น
จำนวนการครั้งในการเชื่อมต่อทั้งหมด	24,000,000 ครั้งต่อเดือน	24,000,000 ครั้งต่อเดือน
อายุการงานหัวเชื่อมลวดทองคำ	300,000 ครั้งต่อขึ้น	468,000 ครั้งต่อขึ้น
จำนวนหัวเชื่อมลวดทองคำต่อเดือน	80 ชิ้น	51 ชิ้น
เวลาในการตรวจสอบคุณภาพหลังเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำต่อครั้ง	15 นาทีต่อครั้ง	15 นาทีต่อครั้ง
เวลาในการตรวจสอบคุณภาพหลังเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำ	1,200 นาทีต่อเดือน	769 นาทีต่อเดือน
เวลาในการตรวจสอบคุณภาพหลังเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำ	20.0 ชั่วโมงต่อเดือน	12.8 ชั่วโมงต่อเดือน
คิดเป็นต้นทุนที่ลดลงได้	1,704.5 บาทต่อเดือน	1,090.9 บาทต่อเดือน

4.11.2 การพิจารณาต้นทุนด้านพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการ (Electricity cost)

การพิจารณาต้นทุนในส่วนนี้จะกล่าวถึงต้นทุนด้านพลังงานซึ่งสูญเสียไป โดยจะพิจารณาจากต้นทุนของพลังงานที่สามารถลดลงในกระบวนการผลิตได้เมื่อนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่หมดอายุมาใช้ซึ่งจะส่งผลให้จำนวนหัวเชื่อมลวดทองคำที่ใช้ในการผลิตในแต่ละเดือนลดลงทำให้เวลาในการใช้พลังงานในช่วงที่จำเป็นจะต้องเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำและพลังงานที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ

ของชิ้นงานลดลงด้วย โดยจะกล่าวถึงพลังงานที่สามารถลดลงได้หากใช้ชิ้นส่วนที่หมดอายุการใช้งาน ส่วนแรกจะเป็นพลังงานที่ใช้ของเครื่องเชื่อมลวดทองคำในขณะที่ไม่ได้ทำงานซึ่งจะใช้พลังงานอยู่ที่ 1.5KVA หรือ 1.20KW ดังตารางที่ 4.32 ตารางแสดงการเปรียบเทียบต้นทุนด้านพลังงานของเครื่องเชื่อมลวดทองคำ ส่วนที่สองเป็นพลังงานที่ใช้เพื่อตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานจากส่วนงานควบคุมคุณภาพจำนวน 1.19KW ซึ่งจะใช้งานเครื่องมือเครื่องจักรเมื่อมีการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำ โดยรวมจากพลังงานของเครื่องทดสอบ 0.69KW และพลังงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ 0.5KW ดังตารางที่ 4.33 ตารางแสดงการเปรียบเทียบต้นทุนด้านพลังงานของเครื่องทดสอบคุณภาพของชิ้นงาน

การคำนวณต้นทุนด้านพลังงานนั้น ผู้วิจัยจะแปลงข้อมูลพลังงานของเครื่องจักรเป็นจำนวนเงิน โดยคำนวณจากข้อมูลอัตราค่าไฟฟ้า ประเภทที่ 3 สำหรับกิจการขนาดกลาง โดยใช้อัตราปกติซึ่งจะมีค่าใช้จ่าย 175.70 บาทต่อกิโลวัตต์ จากนั้นจึงนำพลังงานทั้งส่วนที่เป็นของเครื่องเชื่อมลวดทองคำและพลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องทดสอบคุณภาพมาทำการคำนวณ

ตารางที่ 4.32 การเปรียบเทียบต้นทุนด้านพลังงานของเครื่องเชื่อมลวดทองคำ

รายการ	วิธีปัจจุบัน	วิธีที่นำเสนอ
ยอดการผลิตเฉลี่ยต่อเดือน	6,000,000 ชิ้นต่อเดือน	6,000,000 ชิ้นต่อเดือน
จำนวนการครั้งในการเชื่อมต่อชิ้น	4 ครั้งต่อชิ้น	4 ครั้งต่อชิ้น
จำนวนการครั้งในการเชื่อมทั้งหมด	24,000,000 ครั้งต่อเดือน	24,000,000 ครั้งต่อเดือน
อายุการงานหัวเชื่อมลวดทองคำ	300,000 ครั้งต่อชิ้น	468,000 ครั้งต่อชิ้น
จำนวนหัวเชื่อมลวดทองคำต่อเดือน	80 ชิ้น	51 ชิ้น
เวลาในการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำ	26.7 ชั่วโมงต่อเดือน	17.1 ชั่วโมงต่อเดือน
พลังงานที่ใช้ของเครื่องเชื่อมลวดทองคำขณะเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำ	1.20 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง	1.20 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง
พลังงานที่ใช้ของเครื่องเชื่อมลวดทองคำขณะเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำ	32 กิโลวัตต์ต่อเดือน	21 กิโลวัตต์ต่อเดือน
ต้นทุนด้านพลังงาน	5,622.4 บาทต่อเดือน	3,689.7 บาทต่อเดือน

ตารางที่ 4.33 การเปรียบเทียบต้นทุนด้านพลังงานของเครื่องทดสอบคุณภาพ

รายการ	วิธีปัจจุบัน	วิธีที่นำเสนอ
ยอดการผลิตเฉลี่ยต่อเดือน	6,000,000 ขึ้นต่อเดือน	6,000,000 ขึ้นต่อเดือน
จำนวนการครั้งในการเชื่อมต่อน	4 ครั้งต่อขึ้น	4 ครั้งต่อขึ้น
จำนวนการครั้งในการเชื่อมทั้งหมด	24,000,000 ครั้งต่อเดือน	24,000,000 ครั้งต่อเดือน
อายุการงานหัวเชื่อมลวดทองคำ	300,000 ครั้งต่อขึ้น	468,000 ครั้งต่อขึ้น
จำนวนหัวเชื่อมลวดทองคำต่อเดือน	80 ขึ้น	51 ขึ้น
เวลาในการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำ	26.7 ชั่วโมงต่อเดือน	17.1 ชั่วโมงต่อเดือน
พลังงานที่ใช้ของเครื่องทดสอบคุณภาพ	1.19 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง	1.19 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง
พลังงานที่ใช้ของเครื่องทดสอบคุณภาพ	24 กิโลวัตต์ต่อเดือน	15 กิโลวัตต์ต่อเดือน
ต้นทุนด้านพลังงาน	4,216.8 บาทต่อเดือน	2,635.5 บาทต่อเดือน

4.11.3 การพิจารณาต้นทุนด้านวัตถุดิบที่ต้องใช้ในกระบวนการ (Purchasing material cost)

การพิจารณาต้นทุนด้านวัตถุดิบจะพิจารณาจากต้นทุนของจำนวนหัวเชื่อมลวดทองคำที่สามารถลดลงได้หากมีการนำหัวเชื่อมลวดทองคำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการ โดยคำนวณจากยอดการผลิตเพื่อหาจำนวนของหัวเชื่อมลวดทองคำที่จำเป็นต้องใช้ และเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างการทำงานในปัจจุบันกับวิธีการที่นำเสนอ พบว่าการนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุกลับมาใช้นั้นจะทำให้ผู้ผลิตสามารถลดจำนวนหัวเชื่อมลวดทองคำได้จากเดิมต้องใช้ 80 ขึ้นต่อเดือน ในขณะที่การนำหัวเชื่อมลวดทองคำกลับมาใช้ใหม่ใช้เพียง 51 ขึ้นต่อเดือน และต้นทุนหัวเชื่อมลวดทองคำลดลงจากเดิมใช้ค่าใช้จ่าย 25,360 บาทต่อเดือน ลงเหลือ 16,256 บาทต่อเดือนดังแสดงในตารางที่ 4.34

ตารางที่ 4.34 การเปรียบเทียบต้นทุนด้านวัตถุดิบที่ต้องใช้ในกระบวนการ

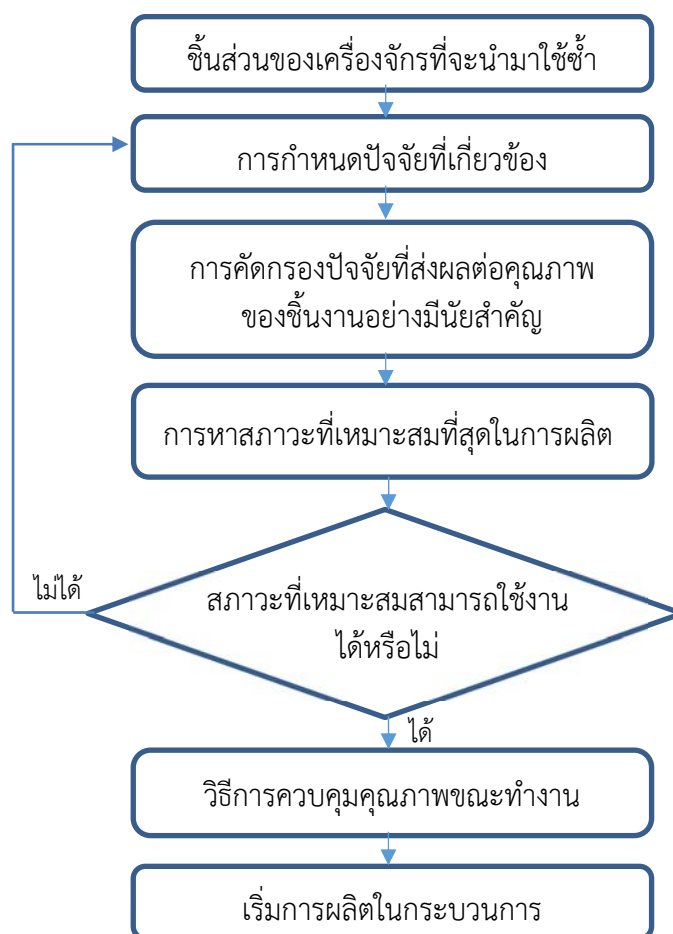
รายการ	วิธีปัจจุบัน	วิธีที่นำเสนอ
ยอดการผลิตเฉลี่ยต่อเดือน	6,000,000 ขึ้นต่อเดือน	6,000,000 ขึ้นต่อเดือน
จำนวนการครั้งในการเชื่อมต่อน	4 ครั้งต่อขึ้น	4 ครั้งต่อขึ้น
จำนวนการครั้งในการเชื่อมทั้งหมด	24,000,000 ครั้งต่อเดือน	24,000,000 ครั้งต่อเดือน
อายุการงานหัวเชื่อมลวดทองคำ	300,000 ครั้งต่อขึ้น	468,000 ครั้งต่อขึ้น
จำนวนหัวเชื่อมลวดทองคำต่อเดือน	80 ขึ้น	51 ขึ้น
ราคาหัวเชื่อมลวดทองคำ	317 บาทต่อขึ้น	317 บาทต่อขึ้น
ต้นทุนหัวเชื่อมลวดทองคำต่อเดือน	25,360 บาทต่อเดือน	16,256 บาทต่อเดือน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

การผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ประเภท IC Packaging ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ใช้สำหรับผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่มีแนวโน้มการผลิตที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการเพื่อให้สามารถแข่งขันกับผู้ประกอบการรายอื่น โดยการปรับปรุงกระบวนการอาจทำได้หลายวิธี โดยวิธีหนึ่งที่บริษัทผู้ผลิตสามารถดำเนินการได้โดยไม่ต้องลงทุนเพิ่มคือ การพิจารณานำชิ้นส่วนเครื่องจักรที่หมดอายุแล้วนำกลับมาใช้ซ้ำหรือการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งการนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่หมดอายุแล้วกลับมาใช้ใหม่นั้น จำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงคุณภาพของชิ้นงานที่ผลิตเป็นสำคัญ เนื่องจากการนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่หมดอายุมาใช้อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานได้โดยตรง ดังนั้นการดำเนินงานดังกล่าวควรมีการกำหนดขั้นตอนอย่างรอบคอบก่อนที่จะดำเนินการ เพื่อให้มั่นใจว่าการผลิตด้วยชิ้นส่วนที่หมดอายุจะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน สำหรับกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ประเภท IC Packaging ในกรณีศึกษานี้ประกอบด้วยกระบวนการผลิตหลายกระบวนการ โดยที่มีกระบวนการผลิตที่สำคัญคือ กระบวนการเชื่อมลวดทองคำซึ่งเป็นกระบวนการที่เชื่อมต่อวงจรของชิ้นส่วน สำหรับกระบวนการเชื่อมลวดทองคำจะต้องใช้เครื่องจักรที่มีความละเอียดและแม่นยำสูงรวมถึงมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก โดยงานวิจัยนี้จะพิจารณาศึกษาชิ้นส่วนที่สำคัญในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ คือ หัวเชื่อมลวดทองคำ จากข้อมูลของบริษัทในกรณีศึกษานั้น บริษัทผู้ผลิตจะใช้หัวเชื่อมลวดทองคำแต่ละหัวจำนวน 300,000 ครั้ง เมื่อใช้หัวเชื่อมลวดทองคำครบตามจำนวนครั้งแล้วจะต้องทำการเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำใหม่แทนของเดิม การกำหนดอายุการใช้งานหัวเชื่อมลวดทองคำของผู้ผลิต IC Packaging ในกรณีศึกษานั้น ผู้ผลิตอ้างอิงข้อมูลจากมาตรฐานของผู้ผลิตหัวเชื่อมลวดทองคำและจากการกำหนดโดยวิศวกรที่ใช้การวิเคราะห์จากประสบการณ์การทำงานจริง ซึ่งในการอ้างอิงอายุการใช้งานจากข้อมูลสองส่วนที่กล่าวมานั้น หากการกำหนดอายุการใช้งานของหัวเชื่อมลวดทองคำไม่ครอบคลุมถึงปัจจัยในกระบวนการและสภาวะการทำงานจริงจะส่งผลให้ผู้ผลิตไม่สามารถใช้งานหัวเชื่อมได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ที่จะเสนอวิธีการนำชิ้นส่วนเครื่องจักรที่คาดว่าจะหมดอายุ ในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำของการผลิต IC Packaging กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งผลของการวิจัยพบว่าขั้นตอนในการนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่หมดอายุแล้วกลับมาใช้ซ้ำจำเป็นต้องมีกระบวนการหลักสองส่วนคือ ส่วนแรกคือกระบวนการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการนำชิ้นส่วนดังกล่าวกลับมาใช้ซ้ำเพื่อให้สามารถผลิตชิ้นส่วนได้ตามมาตรฐานที่ถูกค่ากำหนด ส่วนที่สองคือกระบวนการในการควบคุมคุณภาพระหว่างที่ใช้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่หมดอายุโดยกระบวนการส่วนที่สองนี้ทำให้มั่นใจได้ว่าชิ้นงานที่ผลิตนั้นยังมีคุณภาพตามมาตรฐานและไม่มีแนวโน้มที่จะพบของเสียซึ่งผู้วิจัยสรุปแนวทางการนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่หมดอายุกลับมาใช้ใหม่ไว้ดังภาพที่ 5.1 สรุปวิธีการนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลับมาใช้ซ้ำ



ภาพที่ 5.1 สรุปวิธีการนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลับมาใช้ซ้ำ

จากภาพที่ 5.1 นั้นแสดงภาพการสรุปวิธีการนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรมาใช้ซ้ำ โดยขั้นตอนในการนำชิ้นส่วนของเครื่องจักรมาใช้ซ้ำ เริ่มจากการกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ต้องรวบรวมปัจจัยที่เกี่ยวข้องและข้อจำกัดต่าง ๆ ของการทดลอง เพื่อกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลองไม่ให้มีจำนวนมากเกินไปเพราะจะส่งผลต่อจำนวนครั้งในการทดลอง โดยผลจากการวิจัยซึ่งพิจารณาข้อมูลสองส่วนประกอบด้วย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและข้อมูลจากกระบวนการทำงานในกระบวนการ พบว่าปัจจัยที่อาจเกี่ยวข้องกับคุณภาพของชิ้นงานคือ แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) ค่าพลังงานที่ใช้ในการสันสะเทือนแบบอัลตราโซนิก (USG Power) ค่ากระแสที่ปล่อยผ่าน EFO เพื่อหลอมลวดทองคำ (EFO current) และค่าระยะห่างระหว่าง EFO กับลวดทองคำให้ช่วงที่หลอมละลายลวด (EFO gap)

เมื่อได้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่คาดว่าจะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานหรือผลตอบของงานวิจัย จึงได้นำปัจจัยดังกล่าวมาทำการทดลองด้วยการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบของงานวิจัยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและใช้วิธีแบบพื้นผิวผลตอบ (Response surface methodology) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งผลจากการทดลองทำให้พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบของงานวิจัยในส่วนของค่าแรงดึงคือ แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ

(Bond force) สำหรับผลตอบของงานวิจัยในส่วนของค่าแรงเหวี่ยงคือ แรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เช่นเดียวกัน

จากนั้นผู้วิจัยจึงนำผลการคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบของงานวิจัยมาสร้างสมการแบบจำลองเชิงเส้นและหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยเมื่อใช้หัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุ โดยกำหนดผลตอบเป็นแบบมากที่สุด (Maximize) สำหรับผลของสถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยของผลตอบแรงดึงคือ การปรับตั้งค่าแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เท่ากับ 82 กรัม และเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) 2.1 มิลลิวินาที ซึ่งจะทำให้ได้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ 23.62 กรัม และผลการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบแรงเหวี่ยงคือ การปรับตั้งค่าแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond force) เท่ากับ 90 กรัมและเวลาในการเชื่อมลวดทองคำ (Bond time) 1 มิลลิวินาที ค่าพลังงานที่ใช้ในการสั่นสะเทือนแบบอัลตราโซนิก (USG current) 50 ค่ากระแสที่ปล่อยผ่าน EFO เพื่อหลอมลวดทองคำ (EFO current) 50 และค่าระยะห่างระหว่าง EFO กับลวดทองคำให้ช่วงที่หลอมละลายลวด (EFO gap) 35 ค่าซึ่งจะทำให้ได้ค่าแรงเหวี่ยงสูงสุดที่ 54.13 กรัม และทำการทดลองผลิตชิ้นงานตามสถานะที่เหมาะสมของแต่ละผลตอบจำนวน 30 ชิ้นและทดลองยืนยันผลด้วย T-Test พบว่าค่าผลตอบจากการผลิตงานจริงด้วยสถานะที่เหมาะสมที่สุดมีค่าไม่แตกต่างจากค่าทำนายจึงใช้สถานะที่เหมาะสมที่สุดดังกล่าวไปใช้เพื่อผลิตชิ้นงาน

การควบคุมคุณภาพขณะทำงานเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นในกระบวนการเนื่องจากการควบคุมกระบวนการนั้นสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์และดูแนวโน้มของชิ้นงาน ป้องกันไม่ให้เกิดชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่องในขณะการผลิตโดยใช้หัวเชื่อมที่นำมาใช้ซ้ำ โดยผู้วิจัยเลือกแผนภูมิควบคุมแบบ X-MR Chart ที่เหมาะสำหรับกระบวนการผลิตที่มีการทดสอบแบบทำลายหรือชิ้นงานที่ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นมีราคาสูง เพราะเป็นแผนภูมิควบคุมที่ใช้ขนาดของกลุ่มย่อยเพียงข้อมูลเดียว ($n = 1$) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องสร้างเส้นขีดจำกัดควบคุมโดยเริ่มจากการผลิตชิ้นงานจำนวน 30 ชิ้นเพื่อคำนวณเส้นขีดจำกัด จากนั้นจึงผลิตงานและทำการสุ่มตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของการผลิตด้วยหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วว่ามีแนวโน้มและค่าผลตอบที่ได้นั้นยังอยู่ภายใต้การควบคุมหรือไม่ ผลจากการวิจัยผู้วิจัยได้ทำการเชื่อมชิ้นงานเพิ่มอีกจำนวน 168,000 ครั้ง (42,000 ชิ้น) ตามที่กำหนดในขอบเขตการวิจัยและสุ่มตรวจสอบเมื่อเชื่อมผ่านไป 11,200 ครั้ง (2,800 ชิ้น) พบว่าการนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วกลับมาใช้ซ้ำนั้น มีลักษณะการแจกปกติไม่มีแนวโน้มของผลตอบที่เปลี่ยนไป จึงสามารถสรุปได้ว่า การนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วกลับมาใช้ซ้ำ โดยการหาสถานะที่เหมาะสมนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน

การลดต้นทุนกระบวนการผลิตจากการนำหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วกลับมาใช้งานนั้น ผู้วิจัยได้นำเสนอต้นทุนที่สามารถพิจารณาได้ออกเป็น 3 ส่วนประกอบด้วย ส่วนแรกการพิจารณาต้นทุนด้านเวลาในการซ่อมบำรุง (Maintenance cost) โดยในการพิจารณาต้นทุนนี้จะคำนวณเวลาที่สูญเสียไประหว่างการที่จะต้องเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำประกอบด้วยเวลาในส่วนของการที่ต้องหยุดการทำงานเพื่อเปลี่ยนชิ้นส่วนและเวลาในส่วนของการฝายควบคุมคุณภาพเพื่อตรวจสอบคุณภาพของงานที่ผลิตด้วยหัวเชื่อมลวดทองคำชิ้นใหม่ ส่วนที่สองการพิจารณาต้นทุนด้านพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการ (Electricity cost) การพิจารณาต้นทุนนี้จะคำนวณพลังงานที่สูญเสียไประหว่างการที่จะต้องเปลี่ยนหัวเชื่อมลวดทองคำประกอบด้วยเวลาในส่วนของการที่ต้องเปลี่ยนชิ้นส่วนและ

พลังงานส่วนของฝ่ายควบคุมคุณภาพเพื่อตรวจสอบคุณภาพของงานที่ผลิตด้วยหัวเชื่อมลวดทองคำขึ้นใหม่ ส่วนที่สามการพิจารณาต้นทุนด้านวัตถุดิบที่ต้องใช้ในกระบวนการ (Purchasing material cost) ซึ่งผลจากการนำขึ้นส่วนของหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุกลับมาใช้งานนั้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1 สำหรับการคำนวณโดยละเอียดแสดงไว้ในหัวข้อ 4.11 การคำนวณต้นทุนและเปรียบเทียบต้นทุน

ตารางที่ 5.1 ผลที่ได้รับเมื่อนำหัวเชื่อมลวดทองคำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการเชื่อมลวดทองคำ

รายการ	ปัจจุบัน	นำเสนอ	ผลที่เกิดขึ้น	หน่วย
1. จำนวนครั้งที่สามารถเชื่อมได้	300,000	468,000	168,000	ครั้ง
2. ต้นทุนด้านเวลาในการการซ่อมบำรุง				
2.1 เวลาในส่วนของงานวิศวกรรม	2,272	1,456	816	บาทต่อเดือน
2.2 เวลาในส่วนของงานควบคุมคุณภาพ	1,704	1,090	614	บาทต่อเดือน
3. ต้นทุนด้านพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการ				
3.1 พลังงานในส่วนของงานวิศวกรรม	5,622	3,689	1,933	บาทต่อเดือน
3.2 พลังงานในส่วนของงานควบคุมคุณภาพ	4,216	2,635	1,581	บาทต่อเดือน
4. ต้นทุนด้านวัตถุดิบที่ต้องใช้ในกระบวนการ	25,360	16,256	9,104	บาทต่อเดือน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากการวิจัยสำหรับผลตอบแรงเฉือนพบว่าค่าแรงกดในการเชื่อมลวดทองคำให้สูงขึ้นส่งผลให้ค่าผลตอบแรงเฉือนสูงขึ้น ซึ่งอาจทำให้สามารถใช้หัวเชื่อมลวดทองคำได้นานมากขึ้นกว่างานวิจัยแต่อย่างไรก็ดี การปรับตั้งค่าดังกล่าวอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและเสียหายของจุดที่เชื่อมต่อซึ่งในการตรวจสอบสามารถใช้การตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อตรวจสอบได้จึงอาจทำให้ปรับปรุงผลตอบแรงเฉือนได้มากกว่างานวิจัยที่นำเสนอ

5.2.2 ผู้วิจัยที่สนใจศึกษาสามารถศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการนำเอาหัวเชื่อมลวดทองคำที่หมดอายุแล้วมาใช้และคุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลความสัมพันธ์เพิ่มเติมในส่วนดังกล่าวได้

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- กิจศักดิ์ บัวคง. การลดต้นทุนวัตถุดิบในกระบวนการเชื่อมลวดโดยใช้ลวดทองแดง: กรณีศึกษาโรงงานตัวอย่างเคมีคอนดักเตอร์. การค้นคว้าอิสระปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2557.
- ณิภณ พินศิริกุล. เทคนิคการลดต้นทุน (Cost Reduction). กรุงเทพฯ: สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ, 2561.
- ธนาคารแห่งประเทศไทย. รายงานแนวโน้มธุรกิจไตรมาสที่ 2/2561. กรุงเทพฯ: ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2561.
- นวล นุญประเสริฐ. การปรับปรุงกระบวนการตรวจสอบ ในอุตสาหกรรมผลิตเลนส์แว่นตาโดยการประยุกต์ใช้หลักการของ ECRS. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2554.
- นุชสรุา เกรียงกรกกฎ. การศึกษางานอุตสาหกรรม. อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2562.
- พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ และนพดล ฉิงทอง. “การกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการปรับปรุงขนาดของรูรีมเมอร์โดยวิธีการออกแบบการทดลอง”, ใน การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ ประจำปี 2550 ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์. น. 232-242. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2550.
- พิมพ์พลอย เดชภีรัตนมงคล. การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อมลวดอลูมิเนียม. การค้นคว้าอิสระปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2555.
- วรารณณ์ วิบูลคนารักษ์. Inventor classroom การวิเคราะห์หุ่นเทคโนโลยี (TECH). กรุงเทพฯ: ตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย (SET), 2561.
- วิญญู จิตสัมพันธ์เวช, ภรณ์ทิรา เกตุแก้ว และอารยา อุไรกุล. “การประเมินอายุการใช้งานของน้ำยาชุบที่ใช้เคลือบผิวบนผลิตภัณฑ์ไอซีด้วยดีบุก”, ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52: สาขาวิทยาศาสตร์ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. น. 211-218. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2557.
- สรรรถดิษฐ์ ชีวสุทธิศิลป์. การออกแบบการทดลอง. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2555.
- _____. กลยุทธ์การออกแบบการทดลองสำหรับวิศวกรรม. เชียงใหม่: นันทพันธ์ พรินต์ติ้ง, 2562.
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. รายงานภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรม ปี 2561 และแนวโน้มปี 2562. กรุงเทพฯ: สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2561.
- Açıklın, K., Karaca, F. and Bolat, E. “Central composite rotatable design for liquefaction of pine barks”, *Fuel Processing Technology*. 87(1): 17–24; December, 2005.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Ananthakumar, K. and et al. “Measurement and optimization of multi-response characteristics in plasma arc cutting of Monel 400TM using RSM and TOPSIS”, **Measurement**. 135: 725-737; December, 2018.
- Antony, J. “Improving the wire bonding process quality using statistically designed experiments”, **Microelectronics Journal**. 30(2): 161–168; February, 1999.
- Aslan, N. “Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling and optimization of a multi-gravity separator for chromite concentration”, **Powder Technology**. 185(1): 80–86; June, 2008.
- Baxter, D. and et al. “An engineering design knowledge reuse methodology using process modelling”, **Research in engineering design**. 18(1): 37-48; January, 2007.
- Cao, X. “The Remanufacturing Research on the Key Parts of Engineering Machinery”, In **the 5th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials**. p. 1794-1797. Hohhot: Inner Mongolia., 2015.
- Chan, Y. H. and et al. “Comparative performance of gold wire bonding on rigid and flexible substrates”, **Journal of Materials Science Materials in Electronics**. 17(8): 597-606; August, 2006
- Chauhan, P., Zhong, Z. W. and Pecht, M. “Copper Wire Bonding Concerns and Best Practices”, **Journal of Electronic Materials**. 42(8): 2415-2434; August, 2013.
- Chung, K. J., Bernstein, J. B. and Yang, L. “Experimental Study of EFO Ward Electrode Wear, Surface Pollution, and Discharge Gaps in Wire Bonding Process”, **Tamkang Journal of Science and Engineering**. 6(1): 43-48; March, 2003.
- Dante, R. C. and et al. “Fractional factorial design of experiments for PEM fuel cell performances improvement”, **International Journal of Hydrogen Energy**. 28(3): 343-348; March, 2003.
- Dean, A. M. and Lewis, S. M. “Comparison of group screening strategies for factorial experiments”, **Computational Statistics & Data Analysis**. 39(3): 287–297; February, 2002
- Debnath, B., Roychowdhury, P. and Kundu, R. “Electronic Components (EC) reuse and recycling—a new approach towards WEEE management”, **Procedia Environmental Sciences**. 35(2016): 656-668; August, 2016.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- DeVor, R. E, Chang, T.H. and Sutherl, J. W. **Statistical Quality Design and Control: Contemporary Concepts and Methods**. New Jersey: Prentice Hall, 2006.
- England, L. and et al. “Cu wire bond parameter optimization on various bond pad metallization and barrier layer material schemes”, **Microelectronics Reliability**. 51(1): 81-87; March, 2011.
- Eprom Microchip. “DIE of Integrated circuit”, **Wikipedia**.
https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_circuit. October 27, 2019.
- Gomes, J., Mayer, M. and Lin, B. “Development of a fast method for optimization of Au ball bond process”, **Microelectronics Reliability**. 55(3-4): 602-607; January, 2015.
- Hou, T. H. T., Su, C. H. and Chang, H. Z. “Using neural networks and immune algorithms to find the optimal parameters for an IC wire bonding process”, **Expert Systems with Applications**. 34(1): 427-436; January, 2008.
- Hsu, H. C. and et al. “Parametric Study and Optimal Design in Wire Bonding Process for Mini Stack-Die Package”, In **The 7th International Conference on Electronics Packaging Technology**. p.1-6. Shanghai, China: IEEE., 2006.
- Hung. W. C. and et al. “Recycling and Refurbishing of Epoxy Packaging Mold Ports and Plungers”, **Inventions**. 1(2): 1-9; June, 2016.
- Hung, Y. H. “Optimal process parameters design for a wire bonding of ultra-thin CSP package based on hybrid methods of artificial intelligence”, **Microelectronics International**. 24(3): 3-10; July, 2007.
- Ivankovic, A. and et al. “Comparison of experimental methods for the extraction of the elastic modulus of molding compounds used in IC packaging”, **Microelectronics Reliability**. 52(11): 2677-2684; July, 2012.
- Kam, N. and et al. “Wire bonding on glass substrates via vapour deposition of Ag-Ti film”, **Microelectronics Journal**. 90(1): 199-203; August, 2019.
- Kerr, W. and Ryan, C. “Eco-efficiency gains from remanufacturing: A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia”, **Journal of cleaner production**. 9(1): 75-81; January, 2001.
- Khaw, K. W. and et al. “New adaptive control charts for monitoring the multivariate coefficient of variation”, **Computers & Industrial Engineering**. 126(1): 595-610; December, 2018.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Kim, B. C. and et al. “Process Capability Optimization of Ball Bonding Using Response Surface Analysis in Light Emitting Diode (LED) Wire Bonding”, **Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society**. 18(4): 175-182; April, 2017.
- Kim, J. and et. “Control charts for variability monitoring in high-dimensional processes”, **Computers & Industrial Engineering**. 130(1): 309-316; February, 2019.
- Klausner, M., Grimm, W. M. and Hendrickson, C. “Reuse of Electric Motors in Consumer Products”, **Journal of Industrial Ecology**. 2(2): 89-102; April, 1998.
- Kosztván, Z. T. and Katona, A. I. “Risk-Based X-bar chart with variable sample size and sampling interval”, **Computers & Industrial Engineering**. 120(2018): 308-319; June, 2018.
- Kung, H. K. and Hsieh, C. L. “A theoretical study to improve wire sag of ultra-long wire bond loops for 3D/MCM packaging”, **Microelectronics Reliability**. 78(1): 272-279; November, 2017.
- Li, W. “A Study of Plasma-Cleaned Ag-Plated Cu Lead frame Surfaces”, **Journal of electronic materials**. 39(3): 295–302; July, 2010.
- Lu, D. and Wong, C. P. **Materials for Advanced Packaging**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018.
- Malik, N. and et al. “AlAl thermo compression bonding for wafer-level MEMS sealing”, **Sensors and Actuators A Physical**. 211(1): 115-120; May, 2014.
- Manoharana, S. and et al. “Mechanism of wire bond shear testing”, **Microelectronics Reliability**. 88-90(2018): 738-744; September, 2018.
- Mayer, R. M. and Montgomery, D. C. **Response surface methodology: Process and product Optimization using design experiment**. New York: John Wiley & Sons Inc, 2011.
- Mayer, R. M., and Schwizer, J. “Ultrasonic Bonding: Understanding How Process Parameters Determine the Strength of Au-Al Bonds”, In **the Proceeding-spie the international society for optical engineering**. p. 626-631. Denver: Researchgate Publishers., 2002.
- Maynards. “ASM MC139 POST MOLD CURE OVEN”, **Maynards Industrial Auctions**. <https://auctions.maynards.com/auction-0/itemDetails/1893/196543>. October 27, 2019.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Mazzei, S. and et al. “Analysis of Cu-wire pull and shear test failure modes under ageing cycles and finite element modelling of Si-crack propagation”, **Microelectronics Reliability**. 54(11): 2501-2512; April, 2014.
- Moh, A. **IConn/Connx Basic Process parameter**. Serangoon, Singapore: Kulick & Soffa Industries, Inc., 2008.
- Montgomery, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 6th ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2009a.
- _____. **Design and analysis of experiment**. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2009b.
- Montgomery, D. C. and Runger, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. New York: Wiley Ltd, 2003.
- New Venture Research Corp. **The World wide IC Packaging Market 2015 Edition**. New York: New Venture Research, 2015.
- Obeng, D. P., Morrell, S. and Napier-Munn, T. J. “Application of central composite rotatable design to modeling the effect of some operating variables on the performance of the three-product cyclone”, **International Journal of Mineral Processing**. 76(3): 181-192; June, 2005.
- Paton, B. “Market considerations in the reuse of electronic products”, In **The IEEE International Symposium on Electronics and The Environment**. p. 115-117. San Francisco, California: IEEE., 1994.
- Prakash, J. U. and et al. “Optimization of Wire EDM Process Parameters for Machining Hybrid Composites (356/B4C/Fly Ash) using Taguchi Technique”, **Materials Today**. 5(2): 7275–7283; April, 2018.
- Qin, I. and et al. “Effect of Process Parameters on Pad Damage during Au and Cu Ball Bonding Processes”, In **The 11th Electronics Packaging Technology Conference**. p. 573-578. Singapore: IEEE., 2009.
- Satianrangarith, W. and Tirakanogsathit, M. “Design of Experiments Approach for Improving Wire Bonding Quality”, **International Journal of Innovation, Management and Technology**. 3(4): 327-331; August, 2012.
- Schneider-Ramelow, M. and Ehrhardt, C. “The reliability of wire bonding using Ag and Al”, **Microelectronics Reliability**. 63: 336-341; August, 2016.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Singh, A., Garg, H. and Lall, A. K. “Optical polishing process: Analysis and optimization using responsesurface methodology (RSM) for large diameter fused silica flatsubstrates”, **Journal of Manufacturing Processes**. 30(1): 439-451; October, 2017.
- Singh, B. and Misra, J. P. “Surface finish analysis of wire electric discharge machined specimens by RSM and ANN modeling”, **Measurement**. 137(1): 225-237; January, 2019.
- Singh, G. and Haseeb, A. S. M. A. “Influence of laser power on bonding strength for low purity copper wire bonding technology”, **Microelectronic Engineering**. 211(1): 1–4; March, 2019.
- Stobbe, H. and et al. “Developmental stages and Fine Structure of Surface callus”, **Annals of botany**. 89(6): 773-782; July, 2002.
- Su, T. J. and et al. “An artificial neural network approach for wafer dicing saw quality Prediction”, **Microelectronics Reliability**. 91(2): 257-261; October, 2018.
- Van Berkum, E. E. M. and et al. “Fractional factorial designs for two-step production processes”, **Journal of Statistical Planning and Inference**. 132(12): 53–62; August, 2005.
- Wang, C. and Sun, R. “The Quality Test of Wire Bonding”, **Modern Applied Science**. 3(12): 50-56; November, 2009.
- Wu, Y. X. and et al. “Temperature effect in thermosonic wire bonding”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 16(3): 618-622; June, 2006.
- Xu, H. and et al. “A micro mechanism study of thermosonic gold wire bonding on aluminum pad”, **Journal of Applied Physical**. 108(11): 113517; December, 2010.
- Yeh, J. H. and Tsai, T. N. “Optimizing the fine-pitch copper wire bonding process with multiple quality characteristics using a grey-fuzzy Taguchi method”, **Microelectronics Reliability**. 54(1): 287-296; September, 2014.
- Yin, J. and et al. “Formation of subsurface cracks in silicon wafers by grinding”, **Nanotechnology and Precision Engineering**. 1(3): 172–179; October, 2018.
- Zhong, Z. W. and et al. “Study of factors affecting the hardness of ball bonds in copper wire bonding”, **Microelectronic Engineering**. 84(2): 368–374; January, 2007.

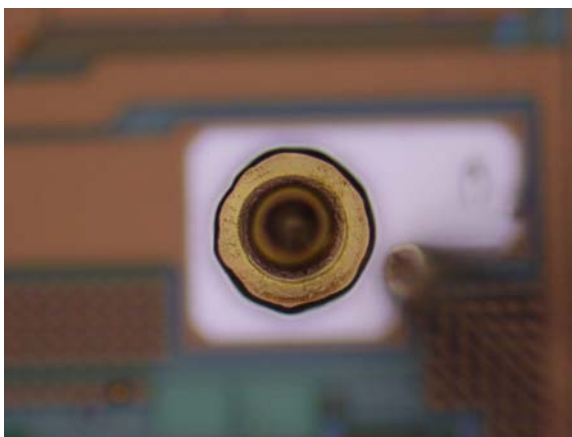
เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Zhou, Y. and et al. “Research on reusing technology for disassembling waste printed circuit boards”, **Procedia Environmental Sciences**. 31: 941–946; 2016.

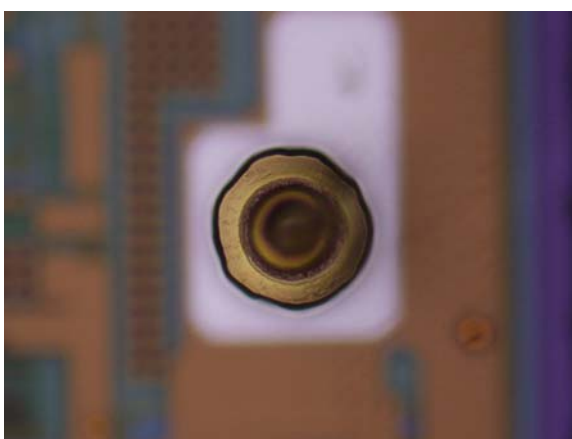
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

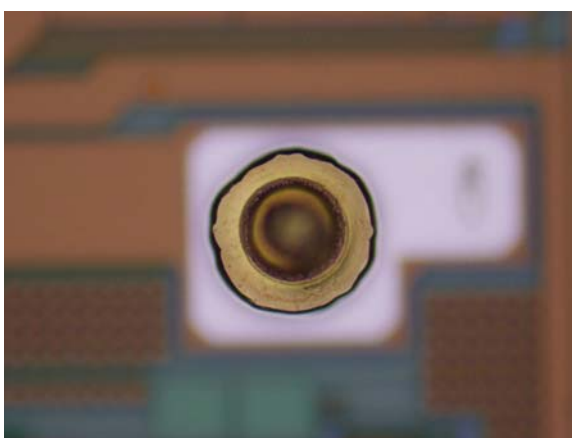
ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



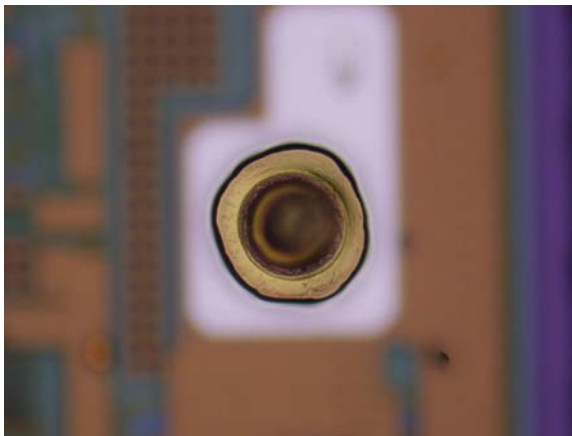
ภาพที่ ก.1 งานขั้นที่ 1 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนดึง



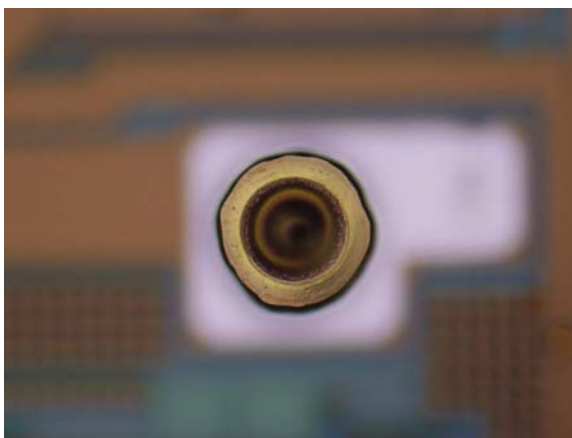
ภาพที่ ก.2 งานขั้นที่ 2 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนดึง



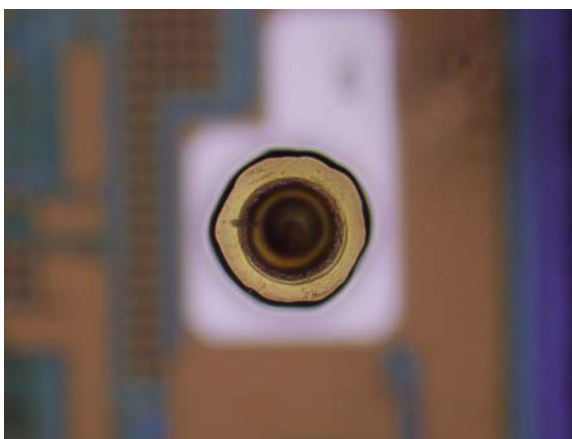
ภาพที่ ก.3 งานขั้นที่ 3 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนดึง



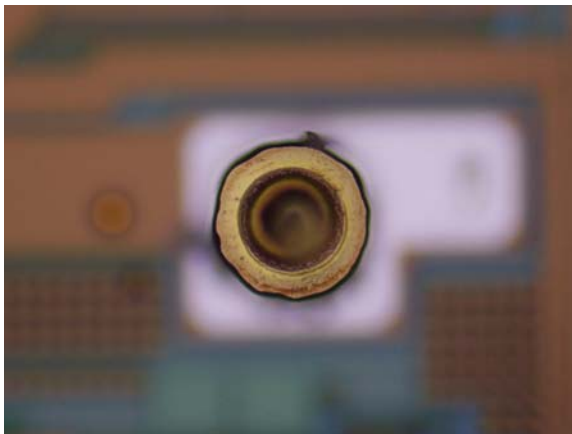
ภาพที่ ก.4 งานชิ้นที่ 4 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



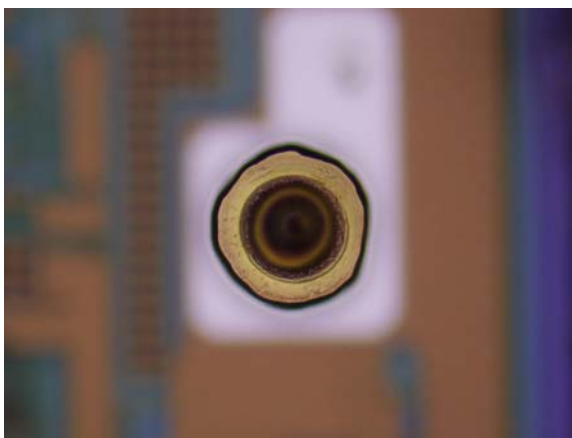
ภาพที่ ก.5 งานชิ้นที่ 5 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



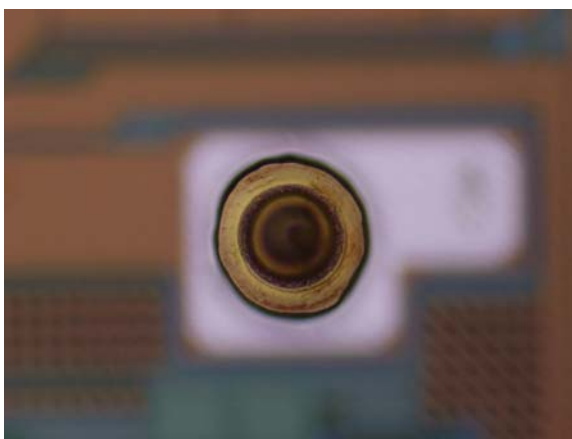
ภาพที่ ก.6 งานชิ้นที่ 6 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



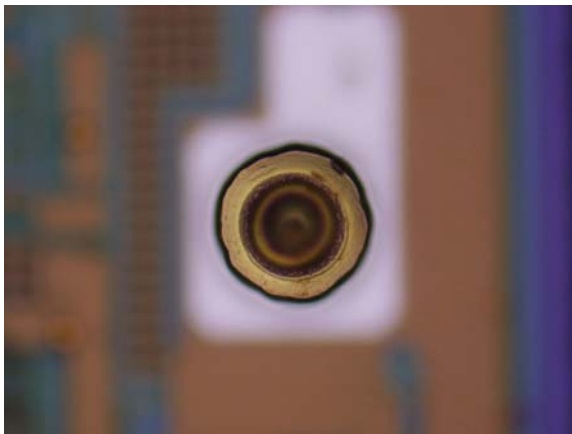
ภาพที่ ก.7 งานชิ้นที่ 7 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



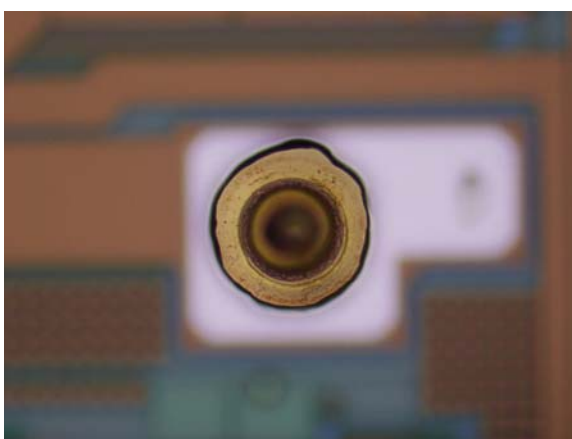
ภาพที่ ก.8 งานชิ้นที่ 8 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



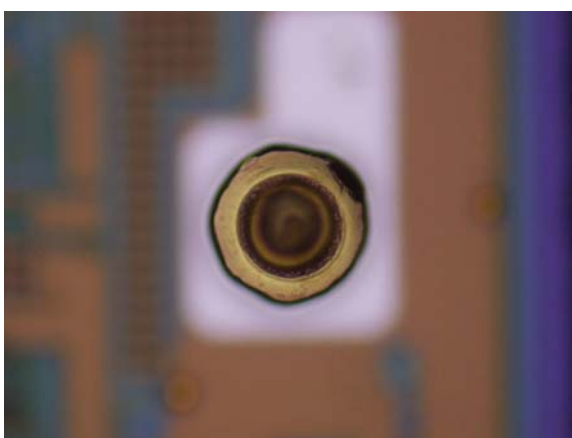
ภาพที่ ก.9 งานชิ้นที่ 9 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



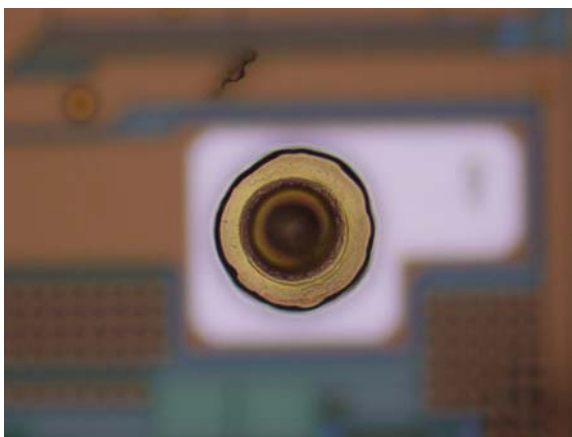
ภาพที่ ก.10 งานชิ้นที่ 10 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



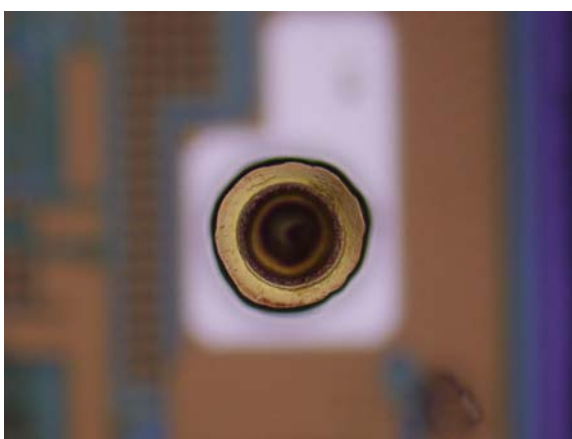
ภาพที่ ก.11 งานชิ้นที่ 11 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



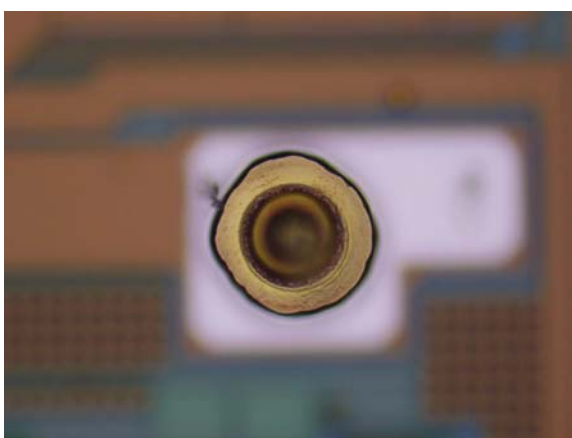
ภาพที่ ก.12 งานชิ้นที่ 12 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



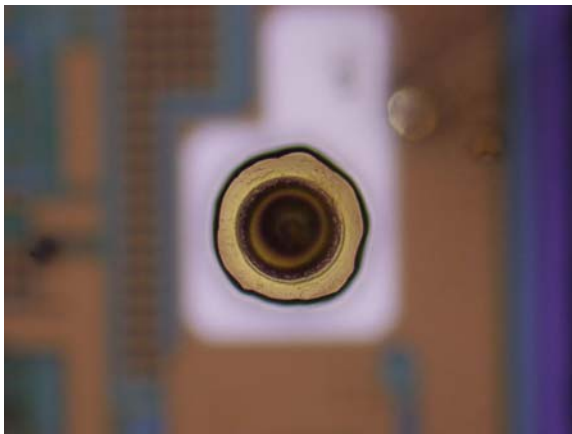
ภาพที่ ก.13 งานชิ้นที่ 13 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



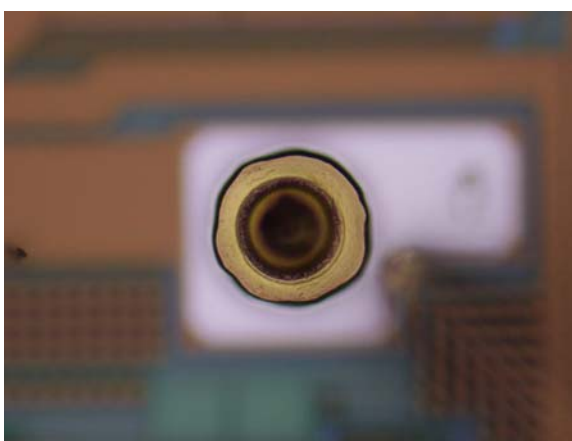
ภาพที่ ก.14 งานชิ้นที่ 14 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



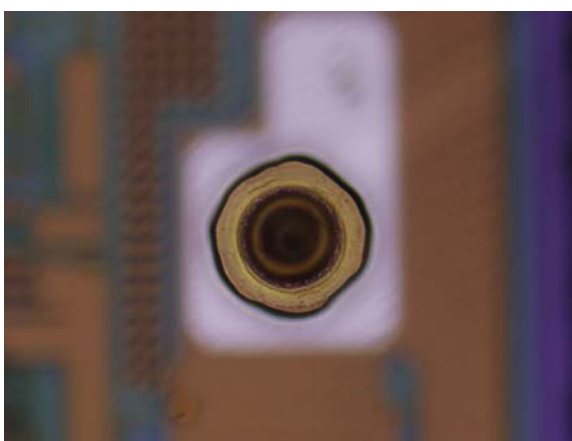
ภาพที่ ก.15 งานชิ้นที่ 15 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



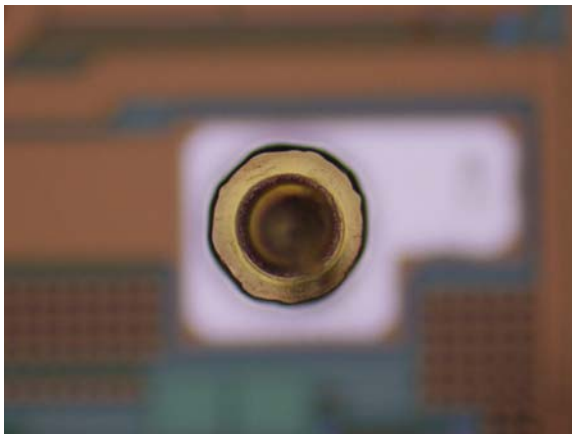
ภาพที่ ก.16 งานชิ้นที่ 16 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



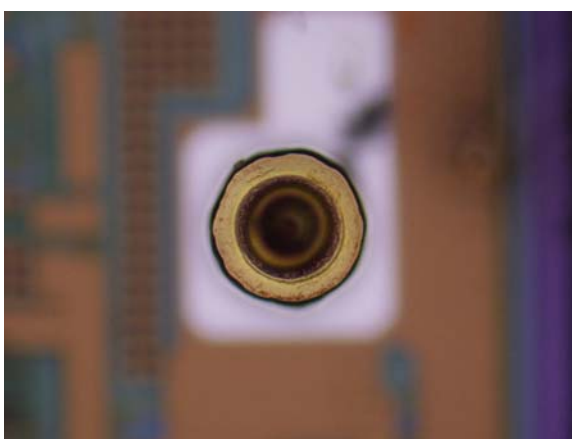
ภาพที่ ก.17 งานชิ้นที่ 17 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



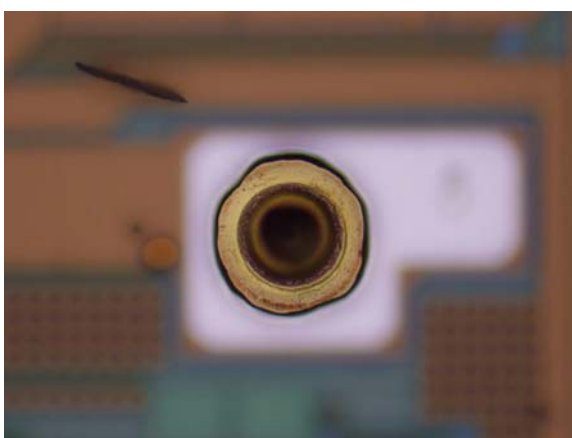
ภาพที่ ก.18 งานชิ้นที่ 18 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



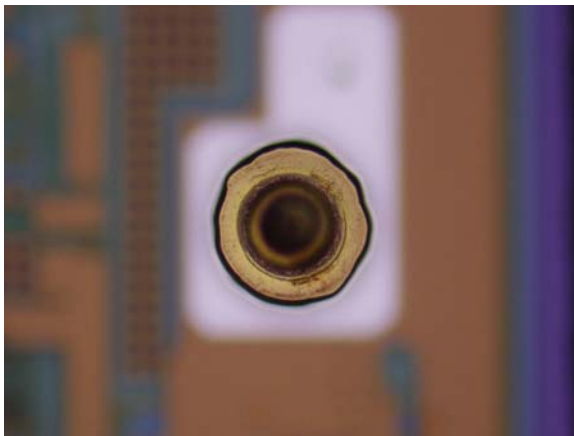
ภาพที่ ก.19 งานชิ้นที่ 19 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



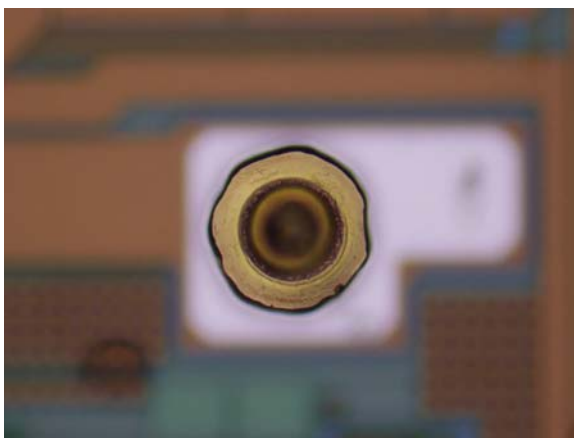
ภาพที่ ก.20 งานชิ้นที่ 20 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



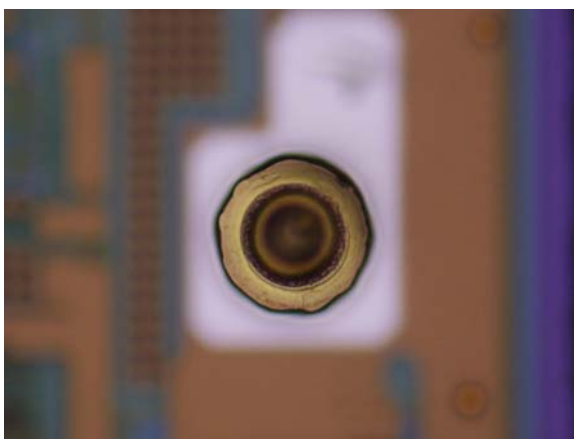
ภาพที่ ก.21 งานชิ้นที่ 21 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



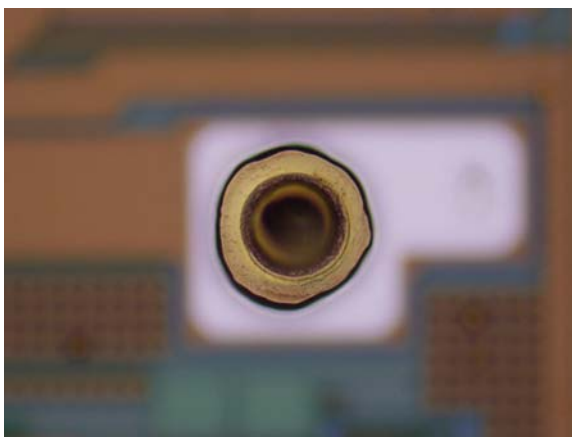
ภาพที่ ก.22 งานชิ้นที่ 22 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



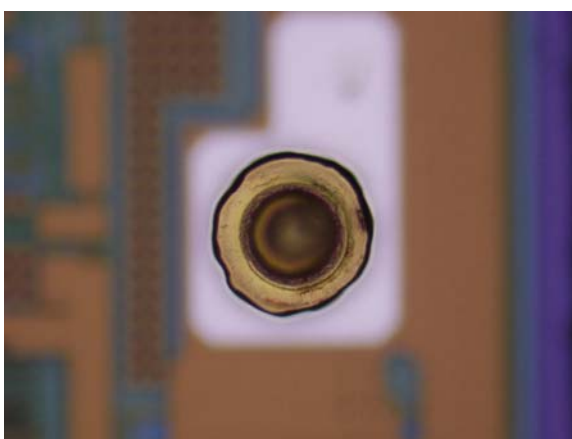
ภาพที่ ก.23 งานชิ้นที่ 23 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



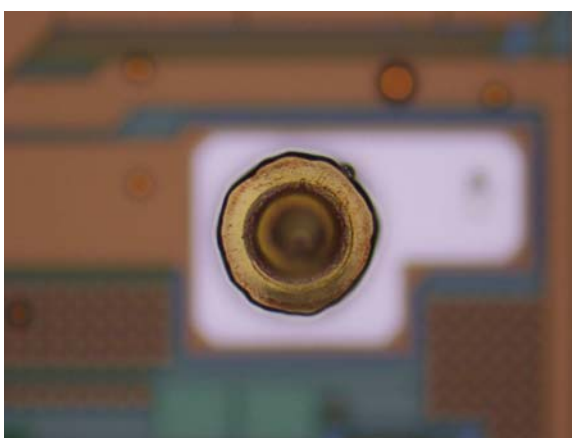
ภาพที่ ก.24 งานชิ้นที่ 24 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



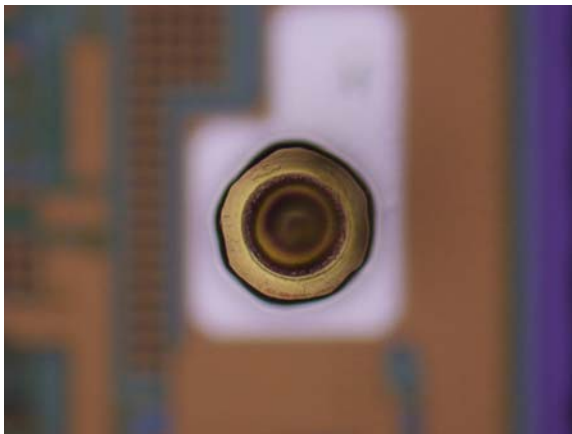
ภาพที่ ก.25 งานชิ้นที่ 25 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



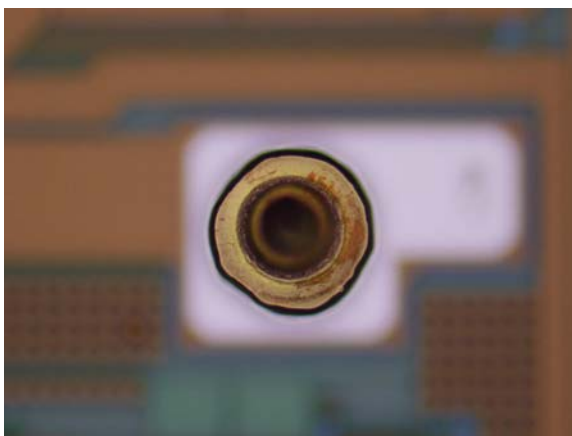
ภาพที่ ก.26 งานชิ้นที่ 26 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



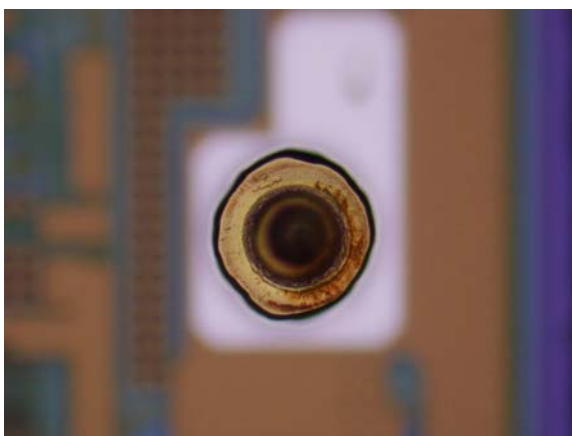
ภาพที่ ก.27 งานชิ้นที่ 27 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



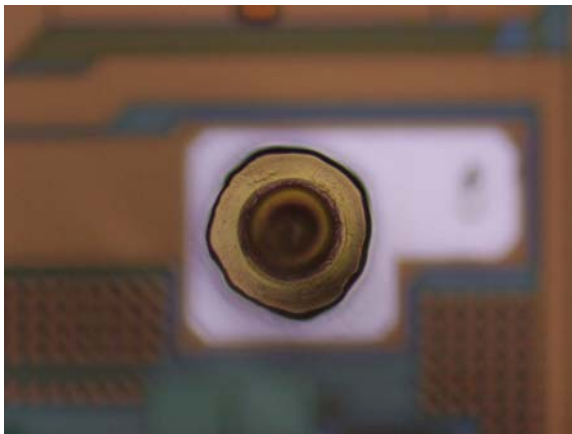
ภาพที่ ก.28 งานชิ้นที่ 28 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



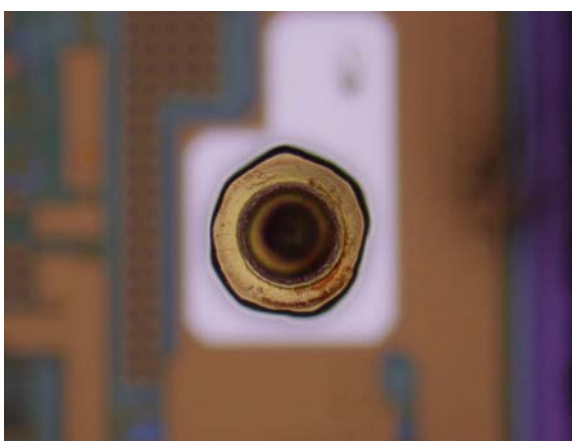
ภาพที่ ก.29 งานชิ้นที่ 29 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



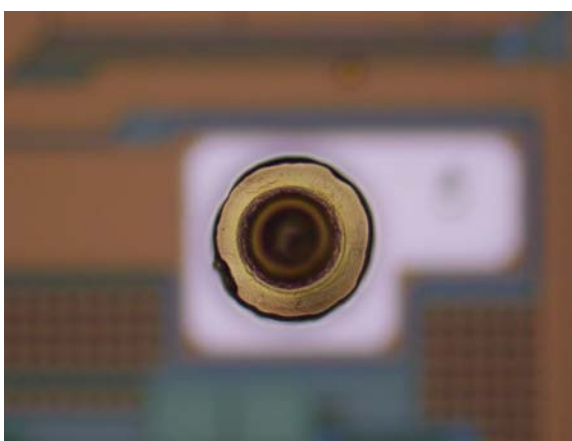
ภาพที่ ก.30 งานชิ้นที่ 30 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



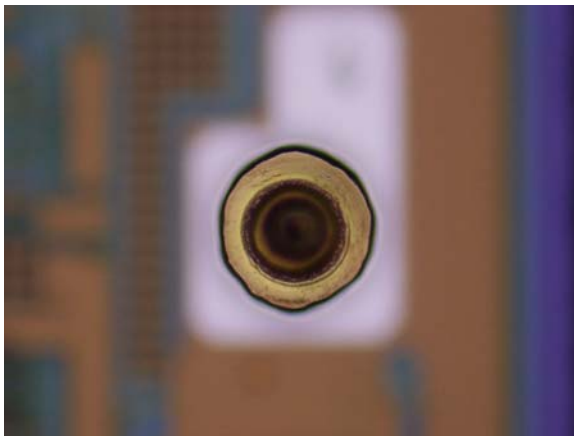
ภาพที่ ก.31 งานชิ้นที่ 31 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



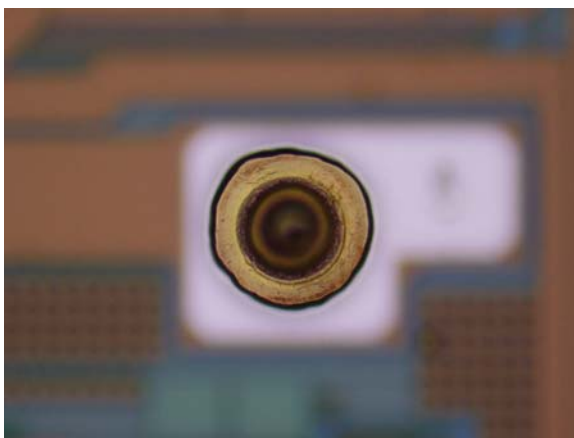
ภาพที่ ก.32 งานชิ้นที่ 32 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



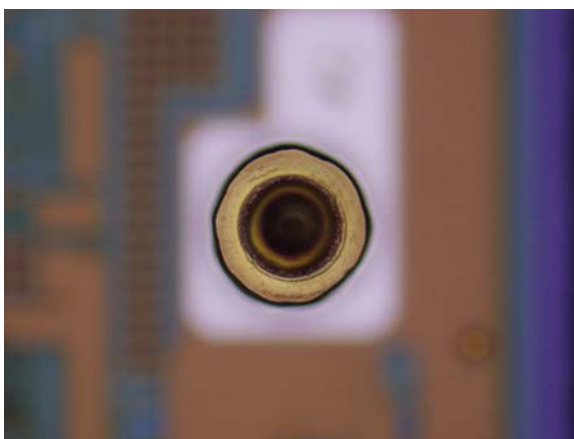
ภาพที่ ก.33 งานชิ้นที่ 33 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



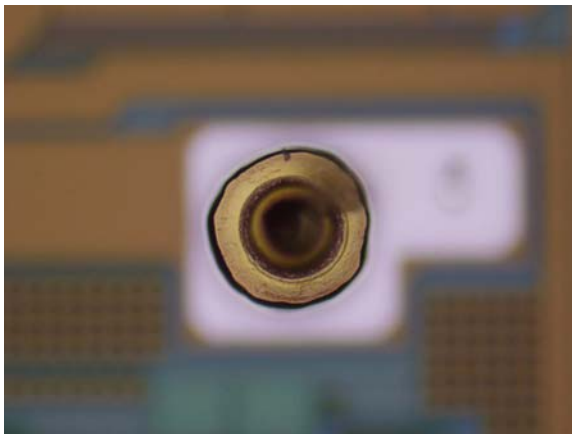
ภาพที่ ก.34 งานชิ้นที่ 34 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



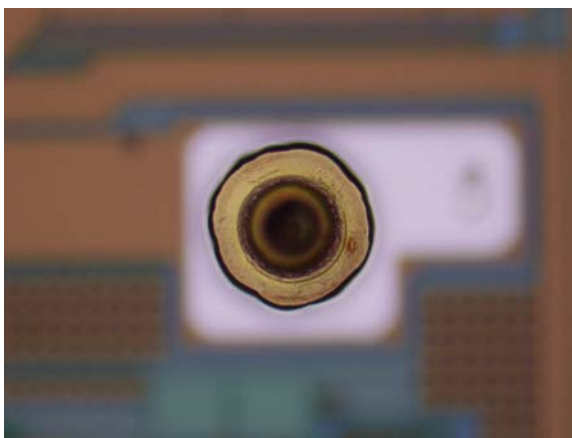
ภาพที่ ก.35 งานชิ้นที่ 35 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง



ภาพที่ ก.36 งานชิ้นที่ 36 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง

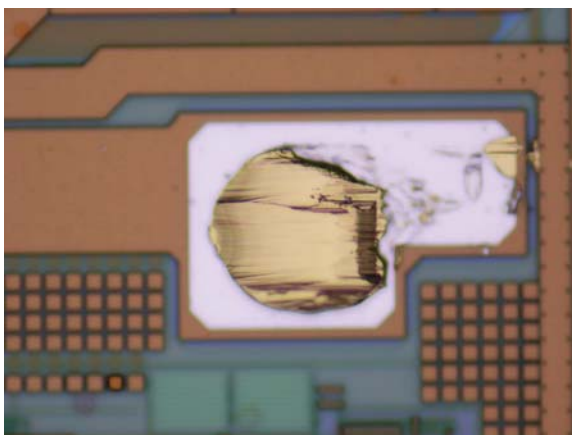


ภาพที่ ก.37 งานชิ้นที่ 37 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง

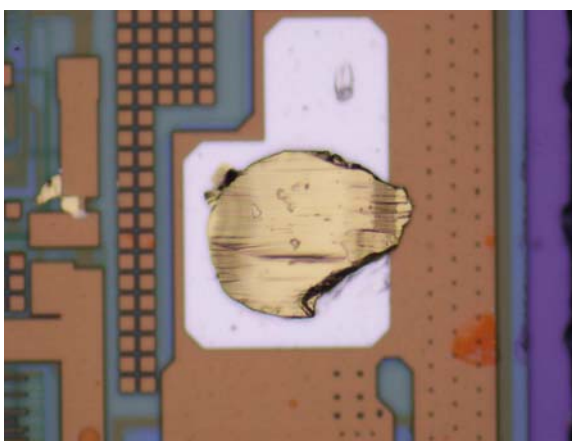


ภาพที่ ก.38 งานชิ้นที่ 38 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงดึง

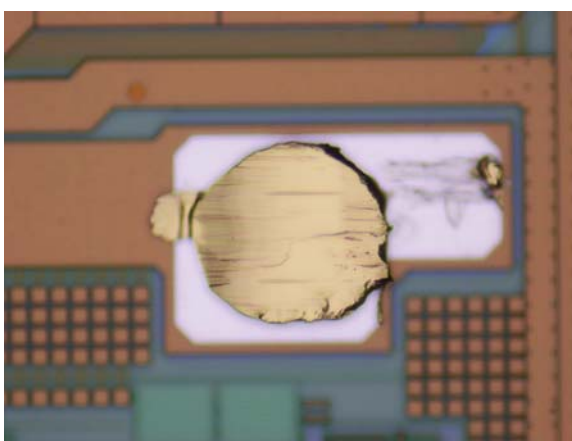
ภาคผนวก ข
ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงเฉือน



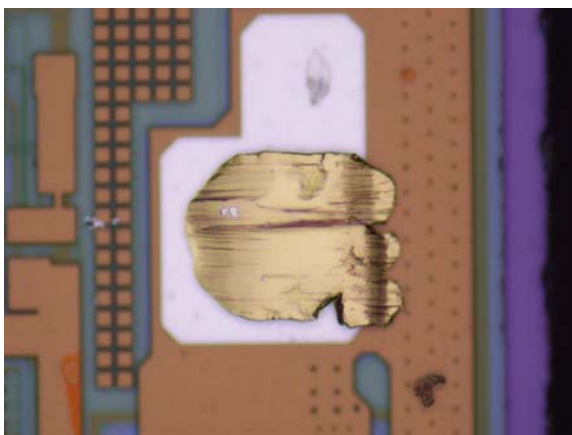
ภาพที่ ข.1 งานชิ้นที่ 1 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



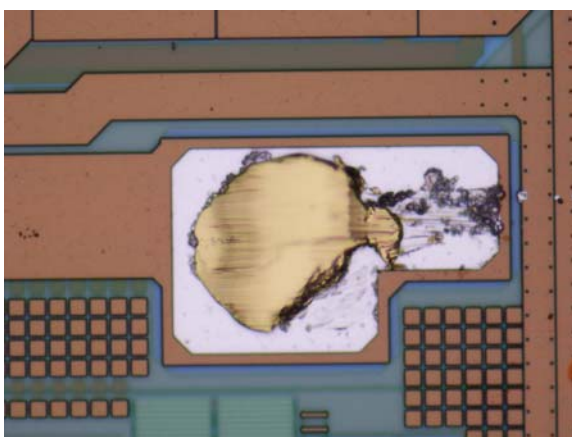
ภาพที่ ข.2 งานชิ้นที่ 2 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



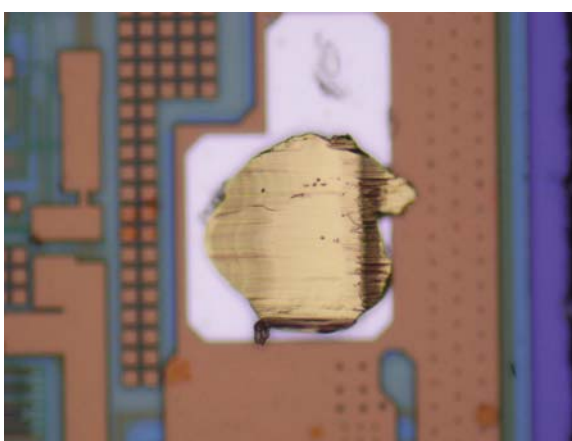
ภาพที่ ข.3 งานชิ้นที่ 3 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



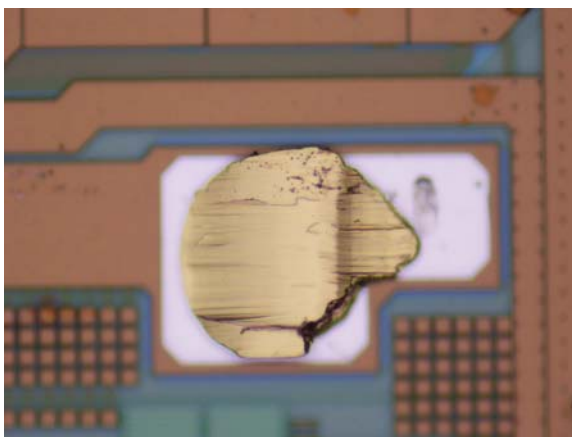
ภาพที่ ข.4 งานชิ้นที่ 4 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



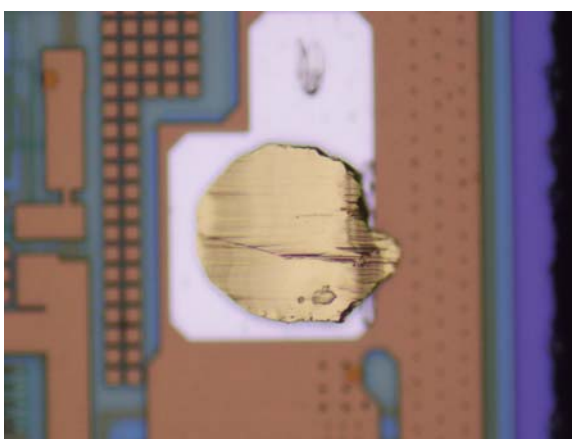
ภาพที่ ข.5 งานชิ้นที่ 5 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



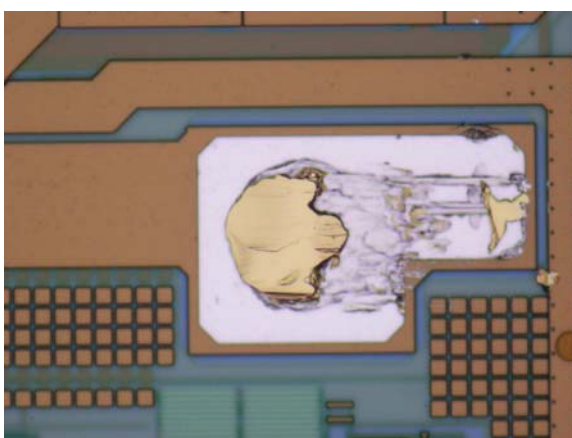
ภาพที่ ข.6 งานชิ้นที่ 6 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



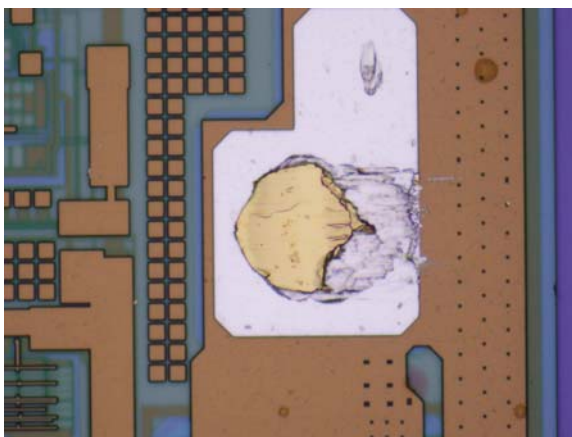
ภาพที่ ข.7 งานชิ้นที่ 7 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงเฉือน



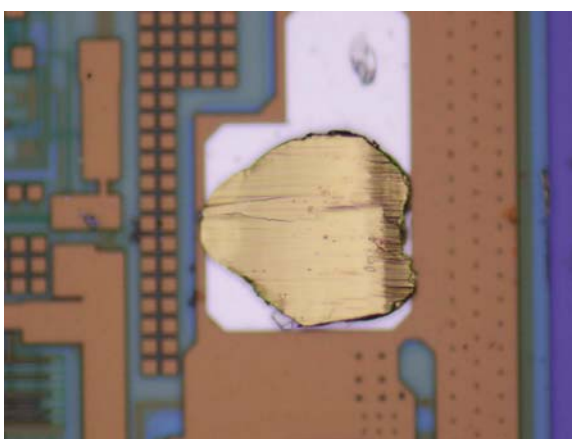
ภาพที่ ข.8 งานชิ้นที่ 8 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงเฉือน



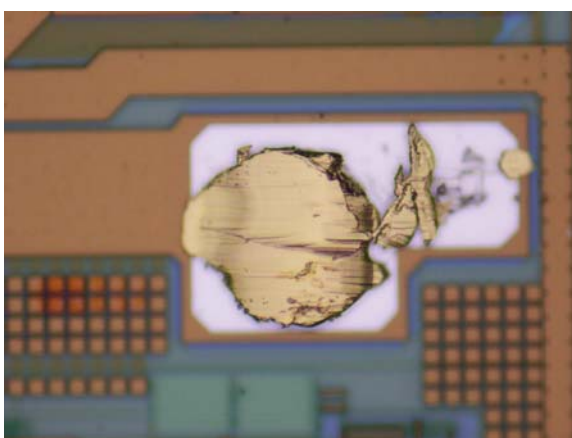
ภาพที่ ข.9 งานชิ้นที่ 9 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงเฉือน



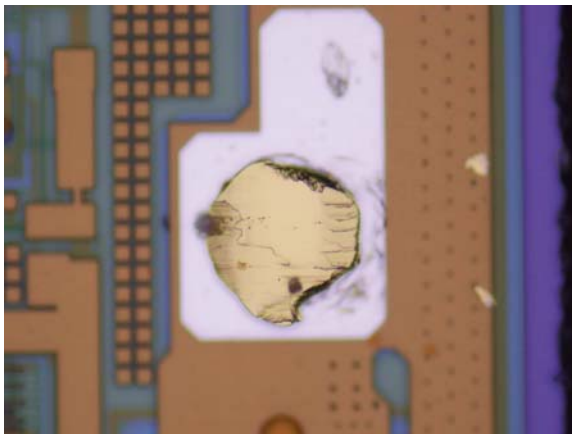
ภาพที่ ข.10 งานชิ้นที่ 10 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



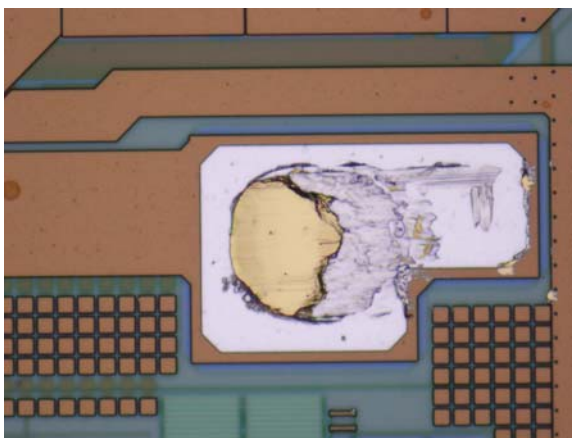
ภาพที่ ข.11 งานชิ้นที่ 11 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



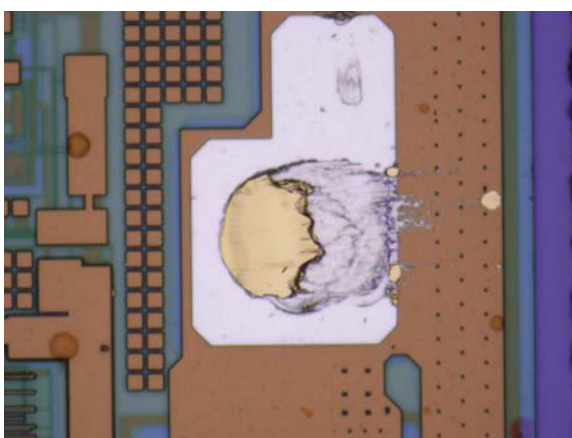
ภาพที่ ข.12 งานชิ้นที่ 12 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



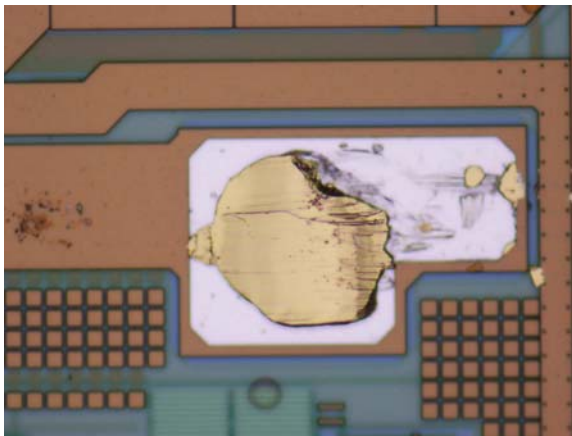
ภาพที่ ข.13 งานชิ้นที่ 13 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



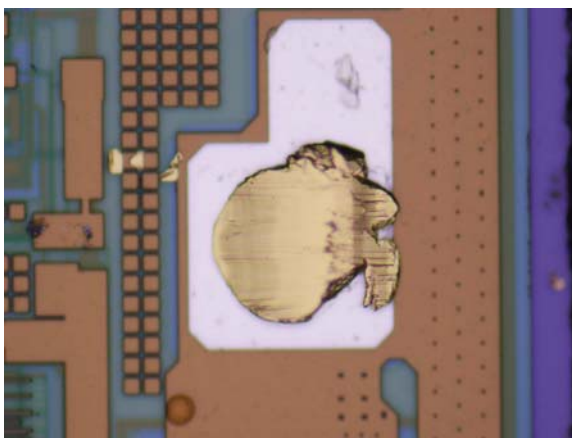
ภาพที่ ข.14 งานชิ้นที่ 14 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



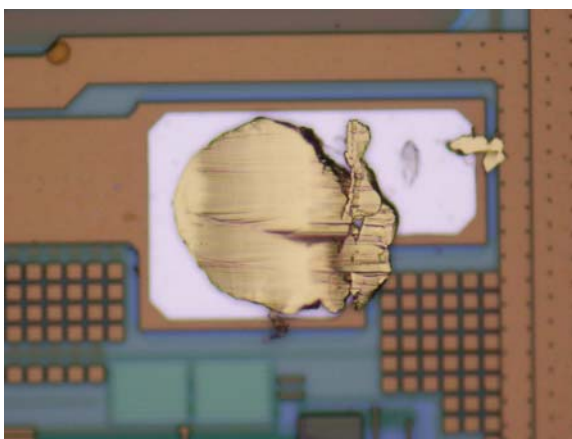
ภาพที่ ข.15 งานชิ้นที่ 15 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



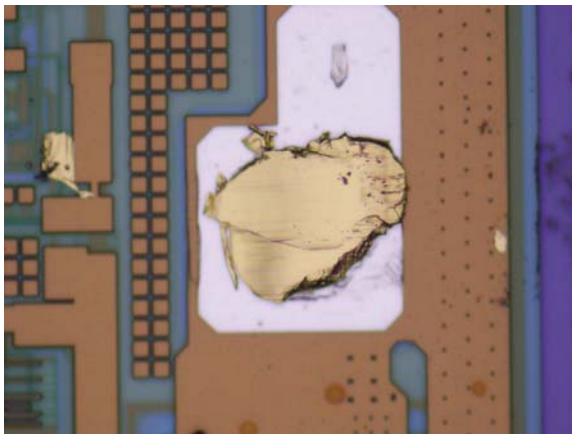
ภาพที่ ข.16 งานชิ้นที่ 16 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



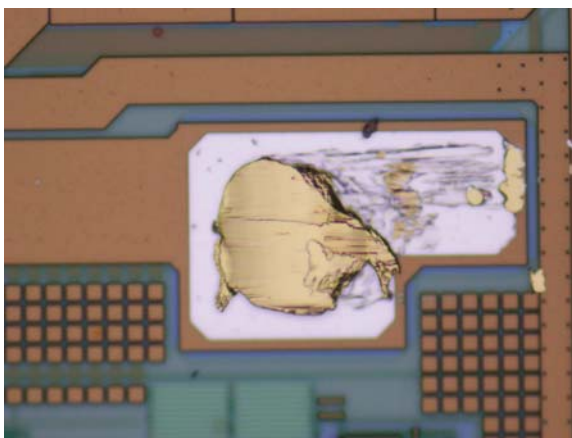
ภาพที่ ข.17 งานชิ้นที่ 17 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



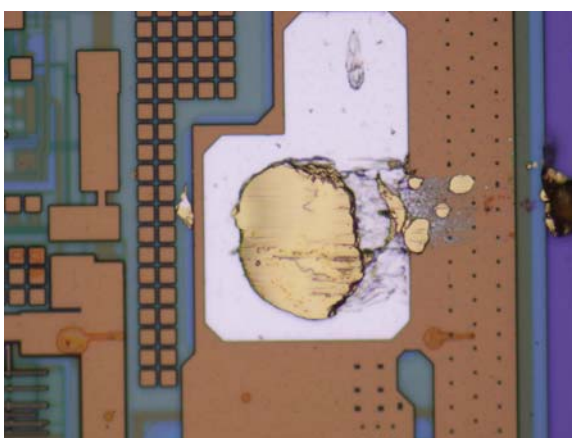
ภาพที่ ข.18 งานชิ้นที่ 18 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



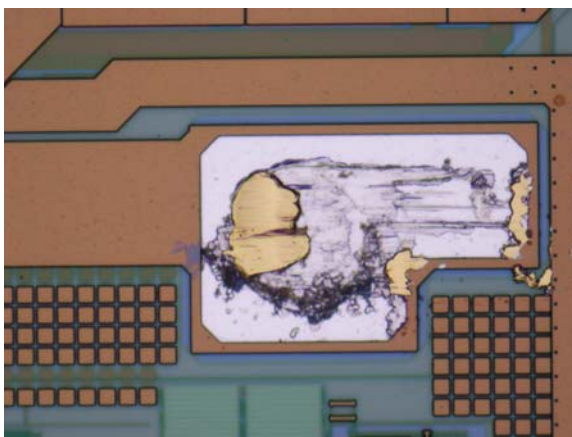
ภาพที่ ข.19 งานชิ้นที่ 19 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



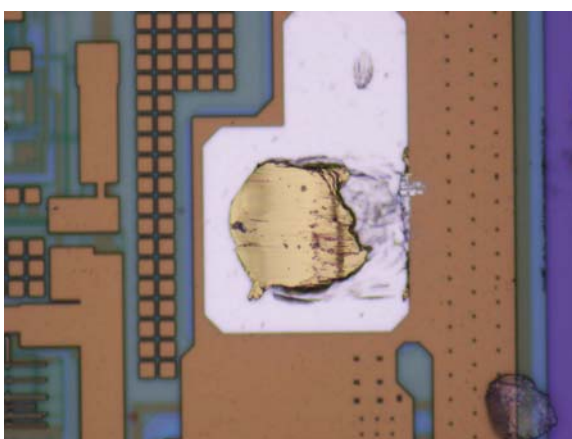
ภาพที่ ข.20 งานชิ้นที่ 20 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



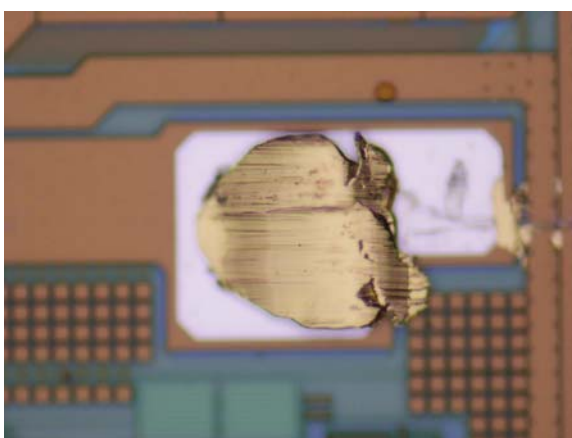
ภาพที่ ข.21 งานชิ้นที่ 21 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



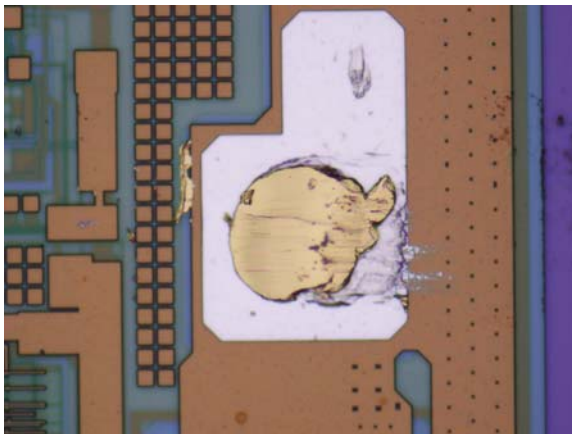
ภาพที่ ข.22 งานชิ้นที่ 22 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



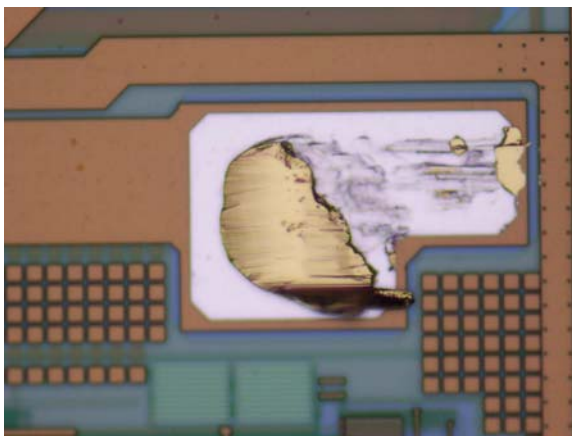
ภาพที่ ข.23 งานชิ้นที่ 23 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



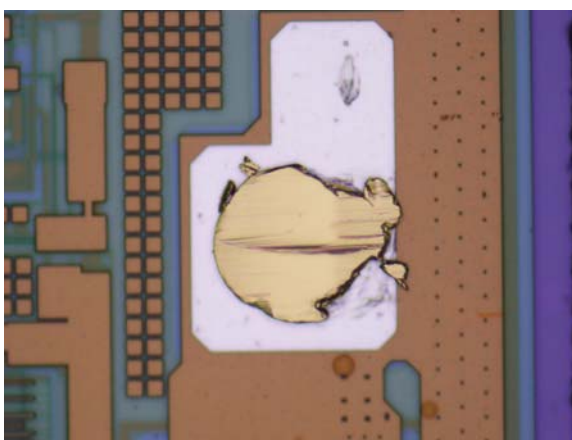
ภาพที่ ข.24 งานชิ้นที่ 24 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



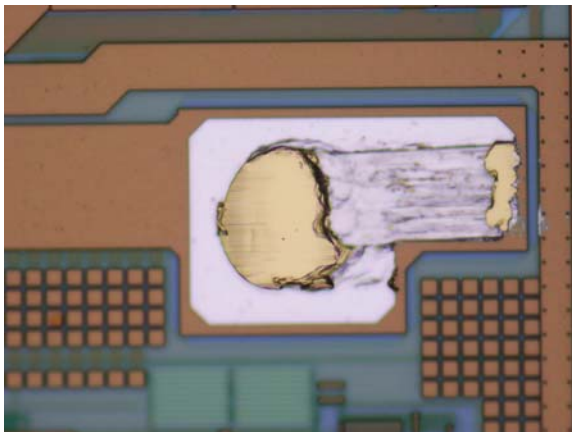
ภาพที่ ข.25 งานชิ้นที่ 25 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



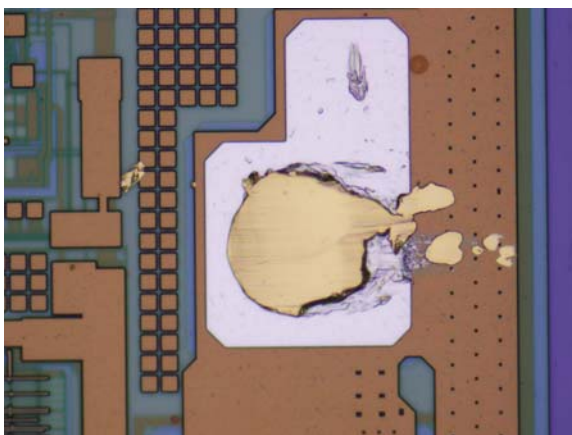
ภาพที่ ข.26 งานชิ้นที่ 26 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



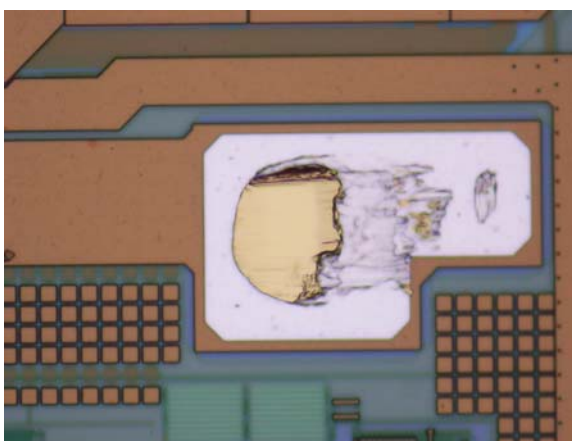
ภาพที่ ข.27 งานชิ้นที่ 27 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



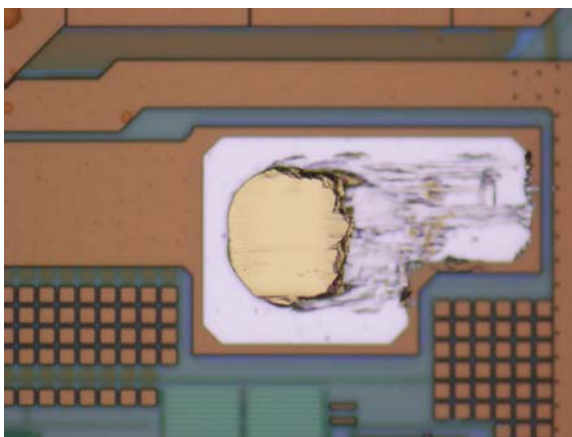
ภาพที่ ข.28 งานชิ้นที่ 28 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



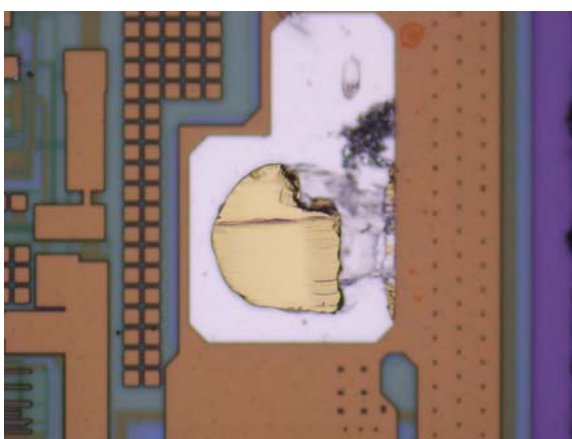
ภาพที่ ข.29 งานชิ้นที่ 29 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



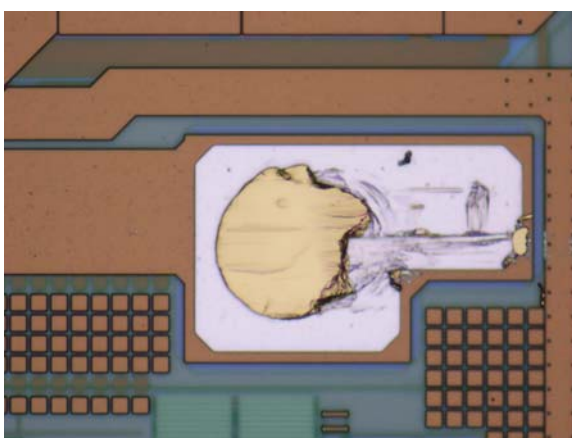
ภาพที่ ข.30 งานชิ้นที่ 30 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



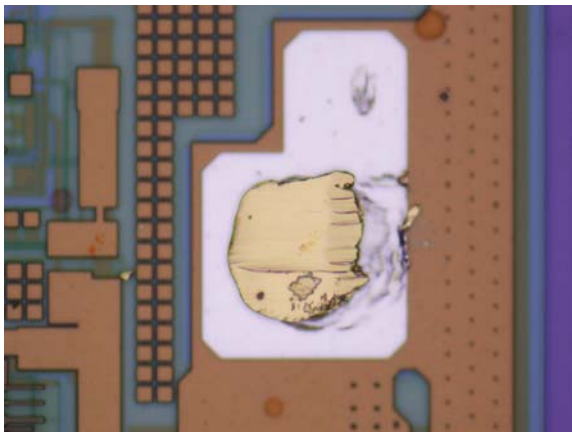
ภาพที่ ข.31 งานชิ้นที่ 31 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



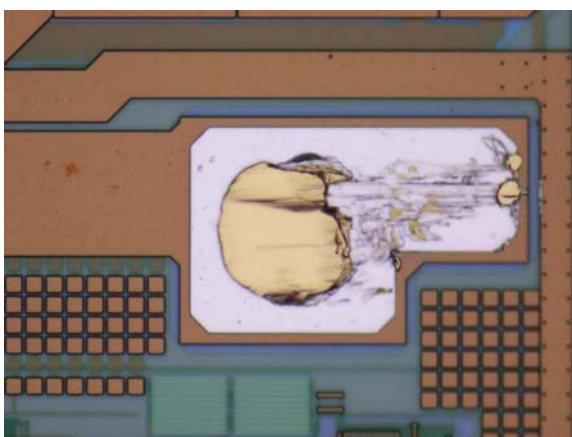
ภาพที่ ข.32 งานชิ้นที่ 32 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



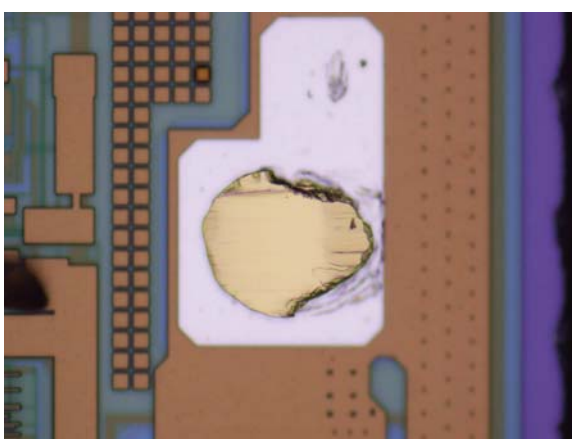
ภาพที่ ข.33 งานชิ้นที่ 33 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



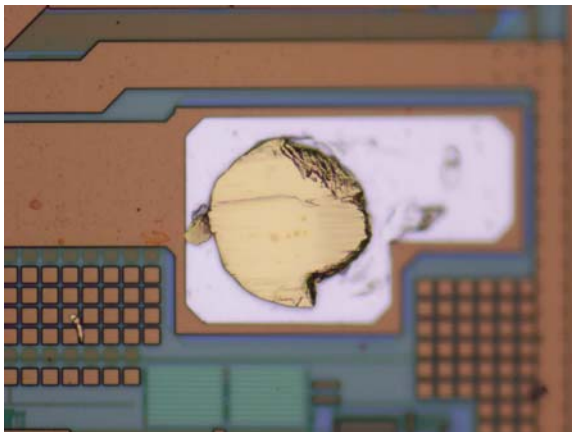
ภาพที่ ข.34 งานชิ้นที่ 34 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงเฉือน



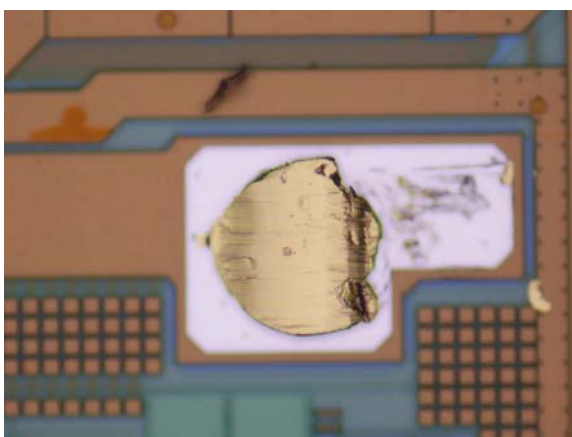
ภาพที่ ข.35 งานชิ้นที่ 35 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงเฉือน



ภาพที่ ข.36 งานชิ้นที่ 36 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแรงเฉือน



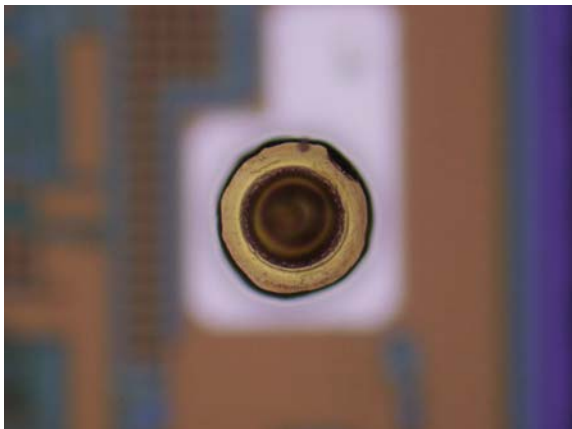
ภาพที่ ข.37 งานชิ้นที่ 37 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน



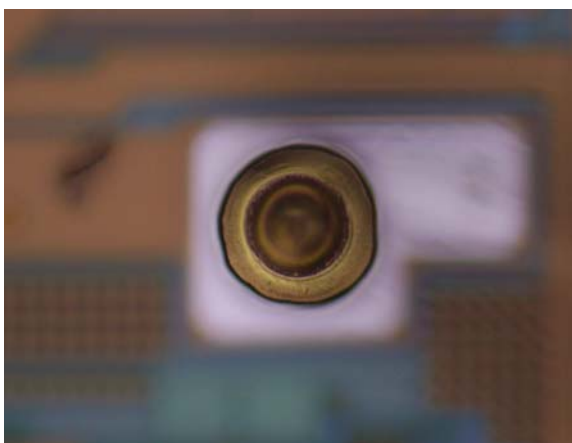
ภาพที่ ข.38 งานชิ้นที่ 38 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนสำหรับผลตอบแทนเฉือน

ภาคผนวก ค

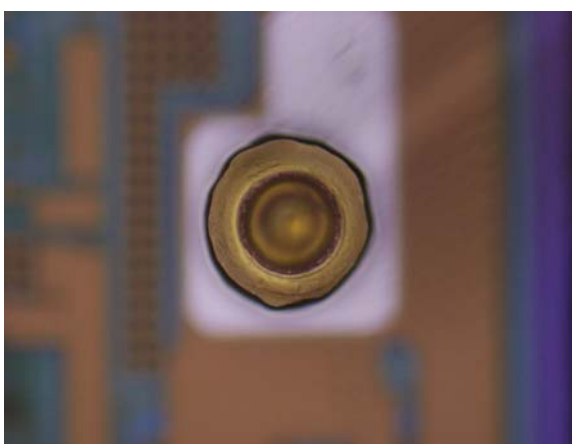
ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึง



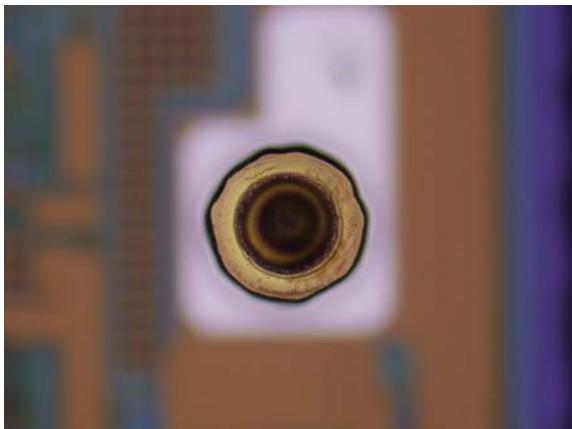
ภาพที่ ค.1 งานชิ้นที่ 1 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึง



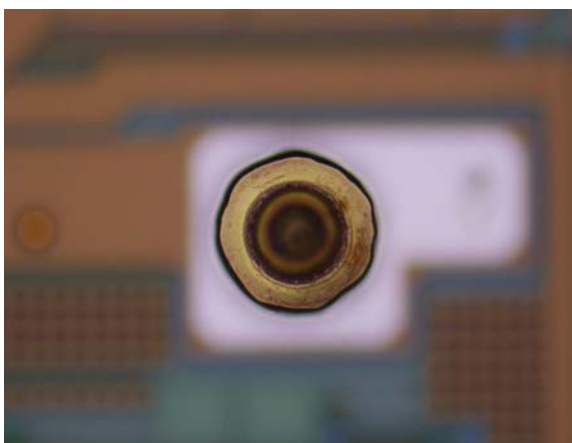
ภาพที่ ค.2 งานชิ้นที่ 2 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึง



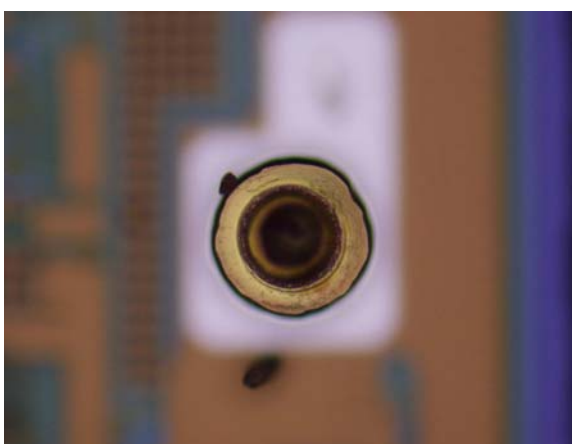
ภาพที่ ค.3 งานชิ้นที่ 3 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึง



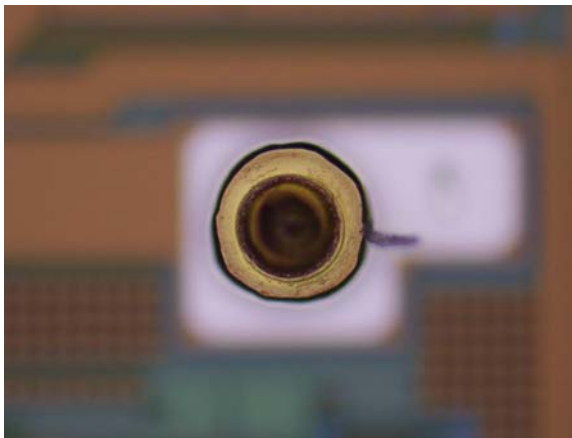
ภาพที่ ค.4 งานชิ้นที่ 4 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึง



ภาพที่ ค.5 งานชิ้นที่ 5 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึง

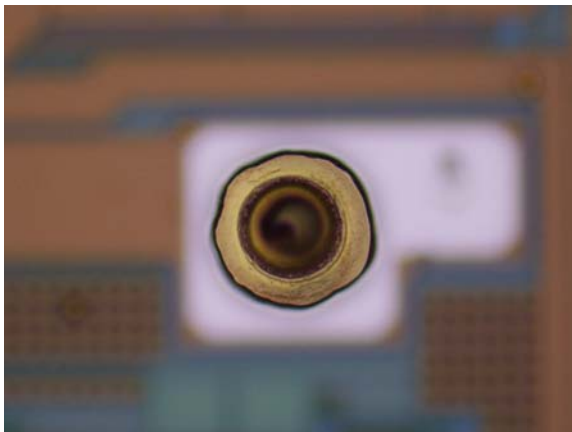


ภาพที่ ค.6 งานชิ้นที่ 6 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึง

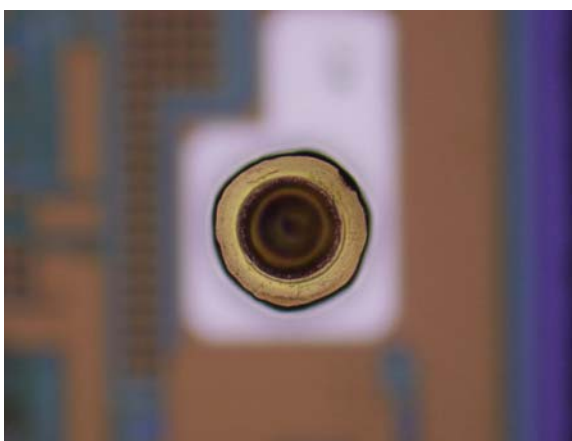


ภาพที่ ค.7 งานชิ้นที่ 7 จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนสำหรับผลตอบแรงดึง

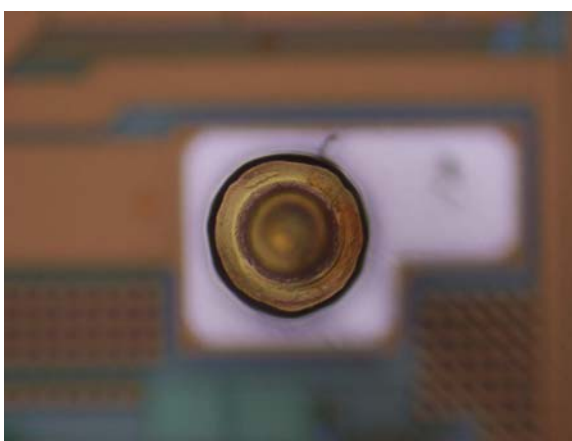
ภาคผนวก ง
ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



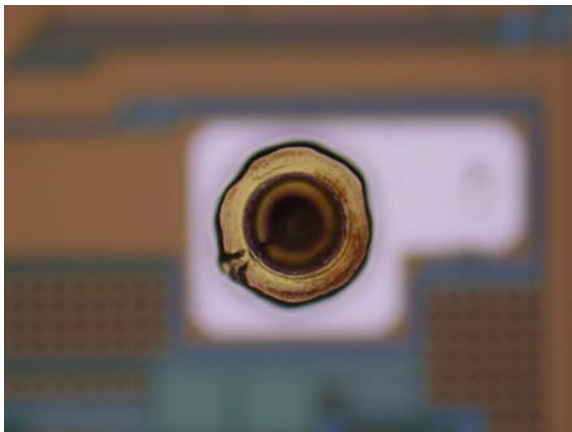
ภาพที่ ง.1 งานชิ้นที่ 1 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



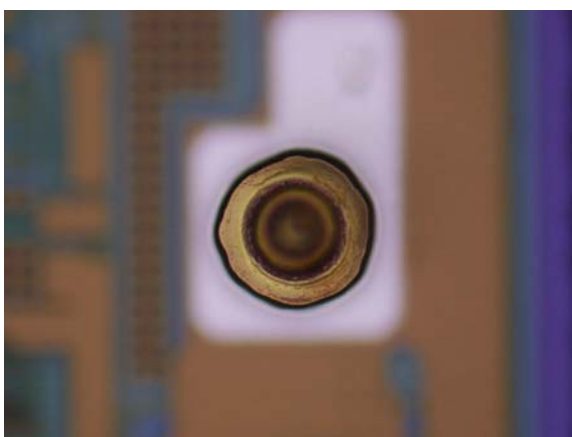
ภาพที่ ง.2 งานชิ้นที่ 2 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



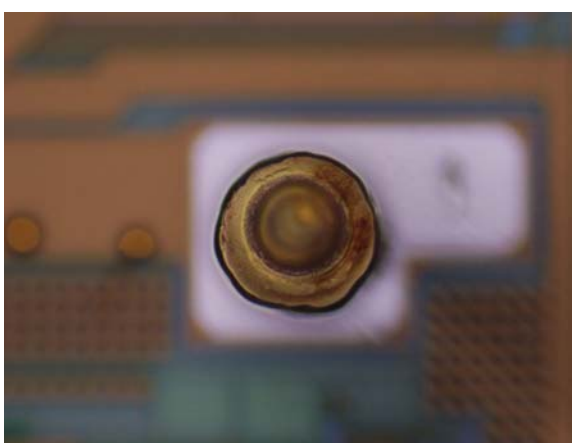
ภาพที่ ง.3 งานชิ้นที่ 3 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



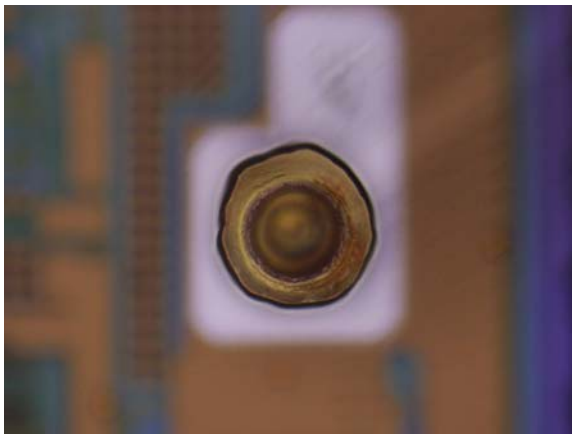
ภาพที่ ง.4 งานชิ้นที่ 4 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



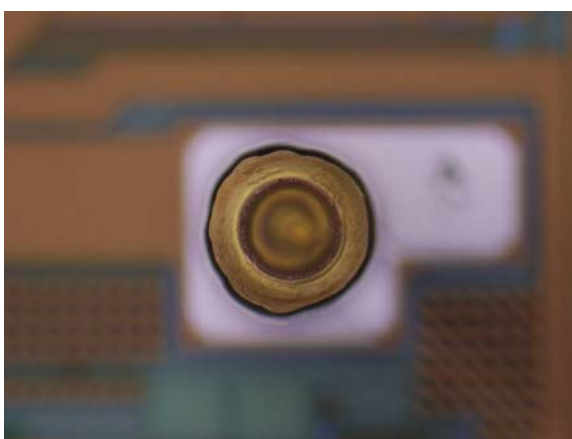
ภาพที่ ง.5 งานชิ้นที่ 5 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



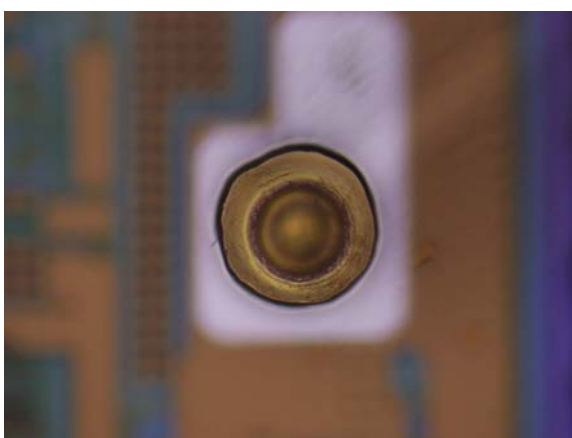
ภาพที่ ง.6 งานชิ้นที่ 6 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



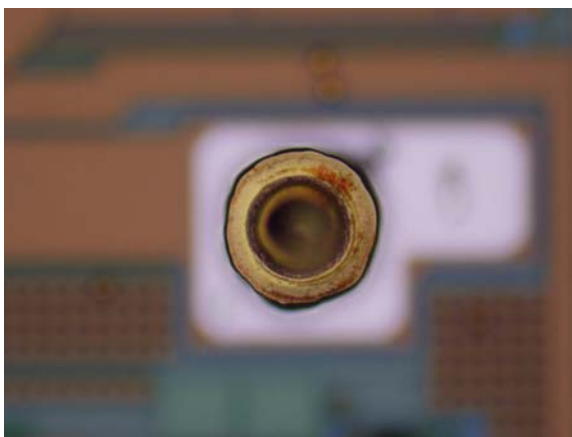
ภาพที่ ง.7 งานชิ้นที่ 7 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



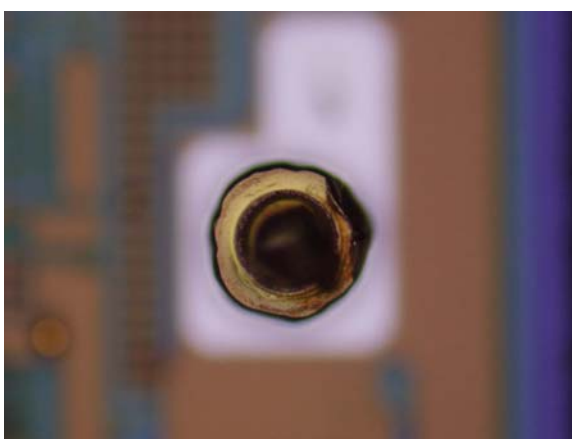
ภาพที่ ง.8 งานชิ้นที่ 8 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



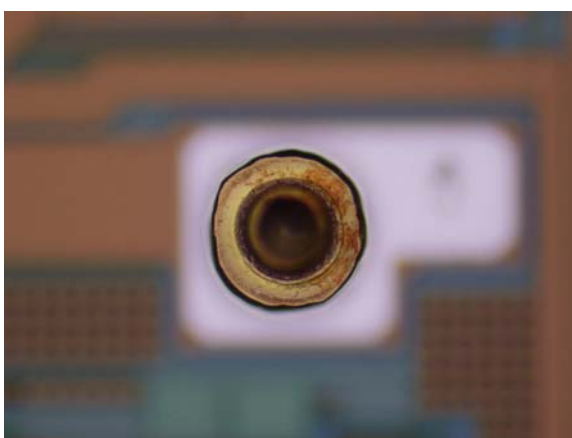
ภาพที่ ง.9 งานชิ้นที่ 9 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



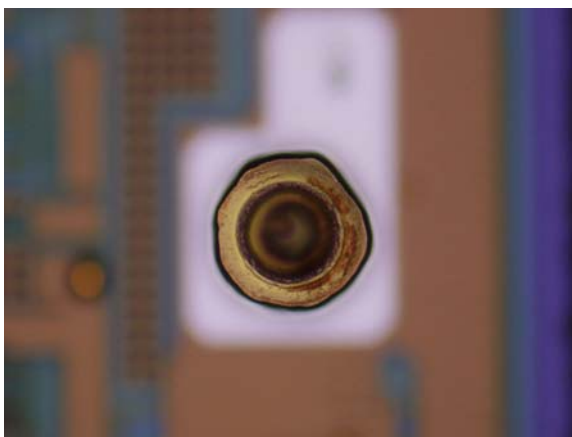
ภาพที่ ง.10 งานชั้นที่ 10 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



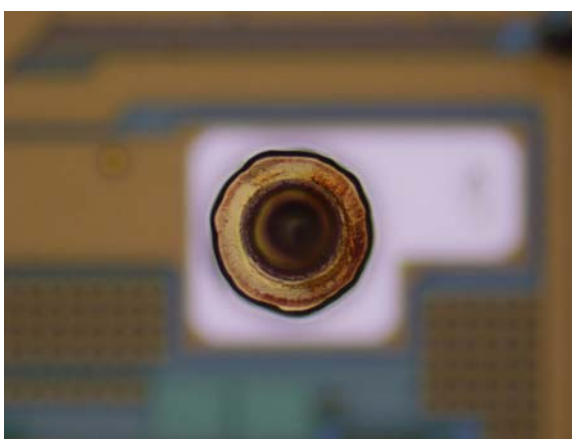
ภาพที่ ง.11 งานชั้นที่ 11 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



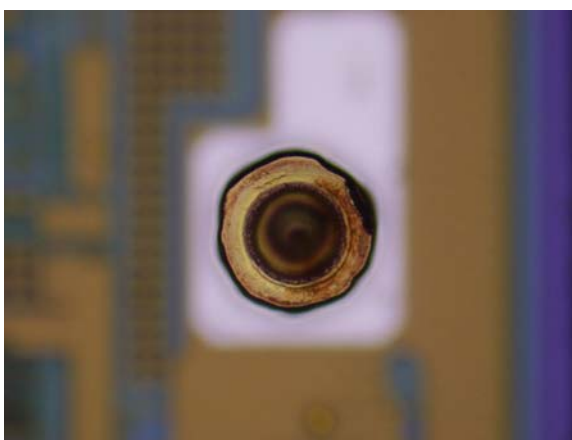
ภาพที่ ง.12 งานชั้นที่ 12 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



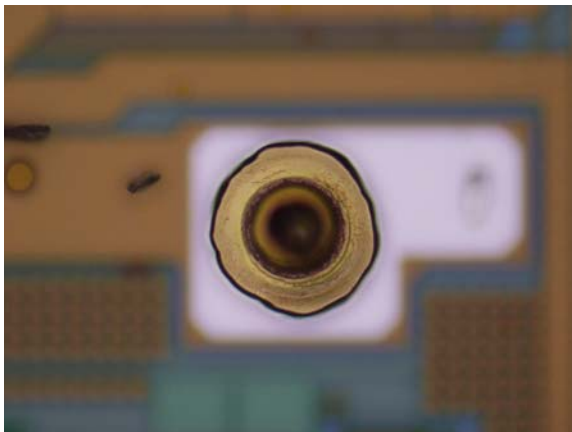
ภาพที่ ง.13 งานชิ้นที่ 13 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



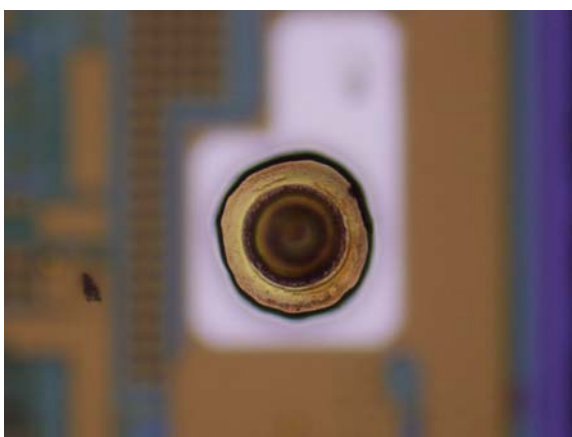
ภาพที่ ง.14 งานชิ้นที่ 14 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



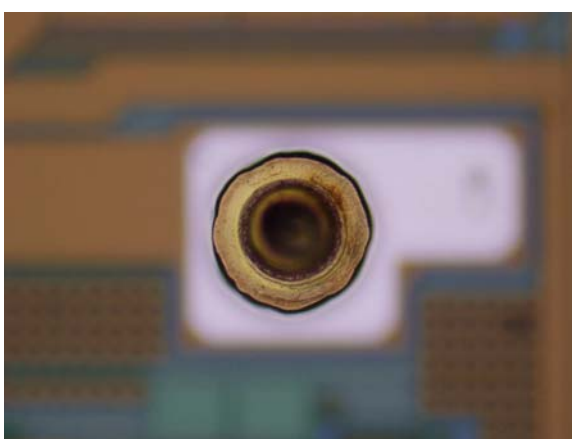
ภาพที่ ง.15 งานชิ้นที่ 15 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



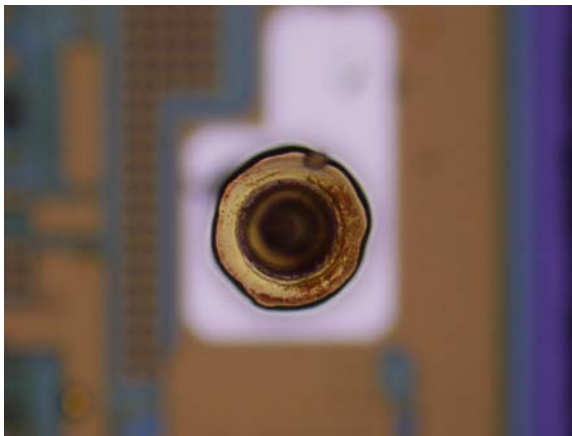
ภาพที่ ง.16 งานชิ้นที่ 16 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



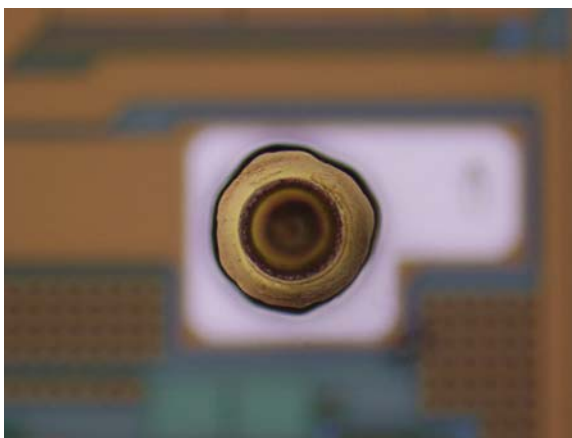
ภาพที่ ง.17 งานชิ้นที่ 17 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



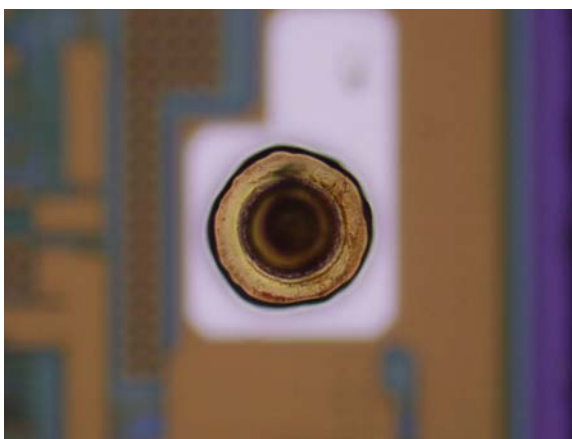
ภาพที่ ง.18 งานชิ้นที่ 18 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



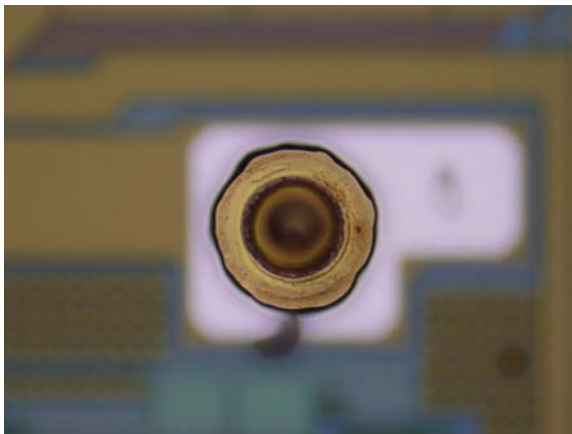
ภาพที่ ง.19 งานชิ้นที่ 19 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



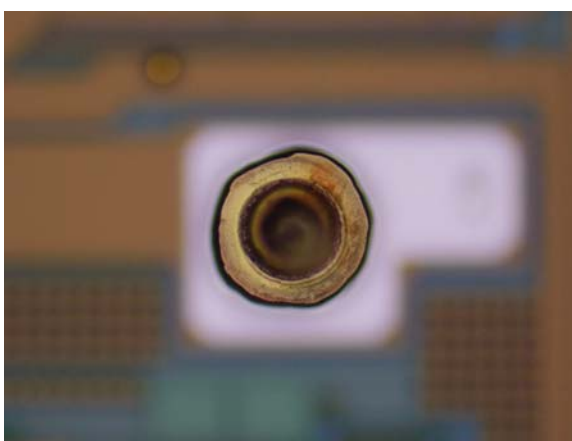
ภาพที่ ง.20 งานชิ้นที่ 20 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



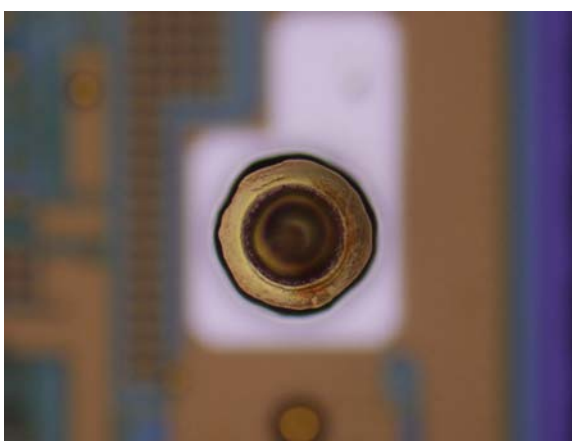
ภาพที่ ง.21 งานชิ้นที่ 21 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



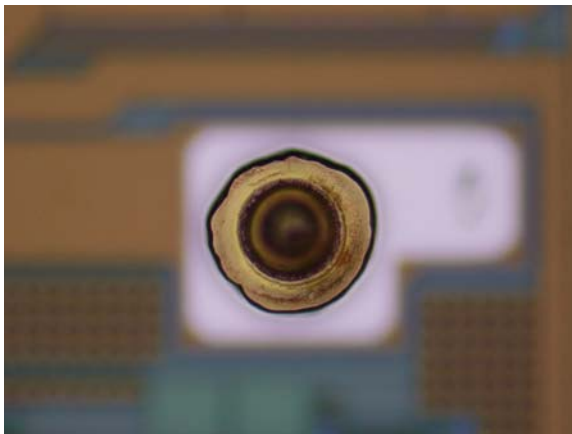
ภาพที่ ง.22 งานชิ้นที่ 22 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



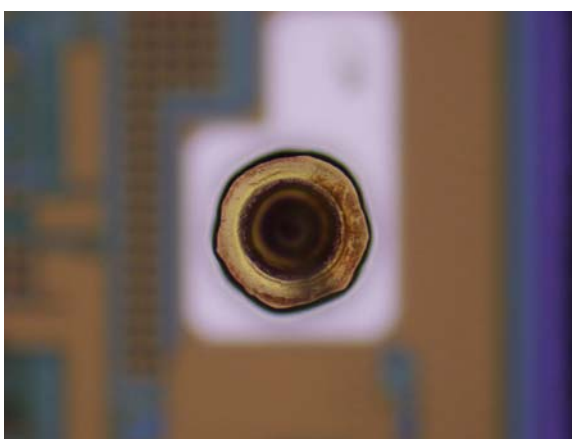
ภาพที่ ง.23 งานชิ้นที่ 23 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



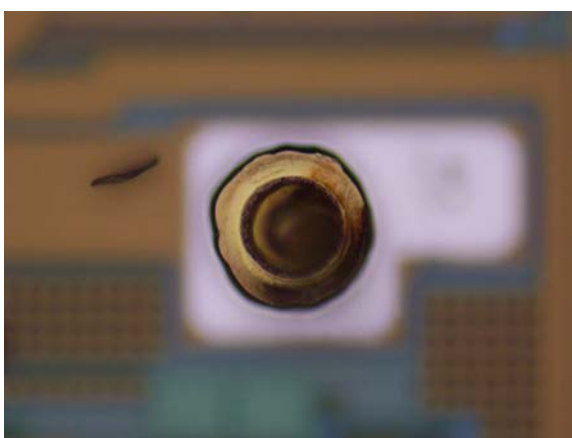
ภาพที่ ง.24 งานชิ้นที่ 24 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



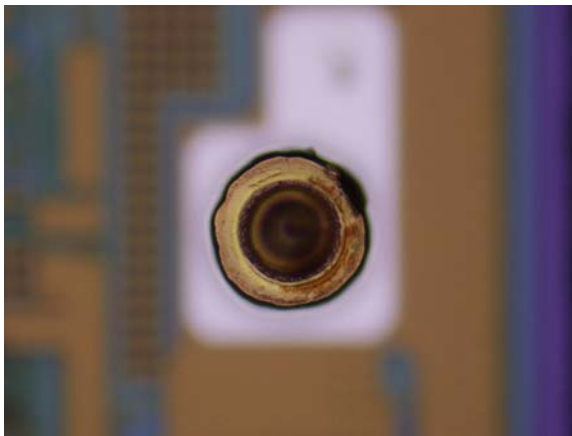
ภาพที่ ง.25 งานชิ้นที่ 25 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



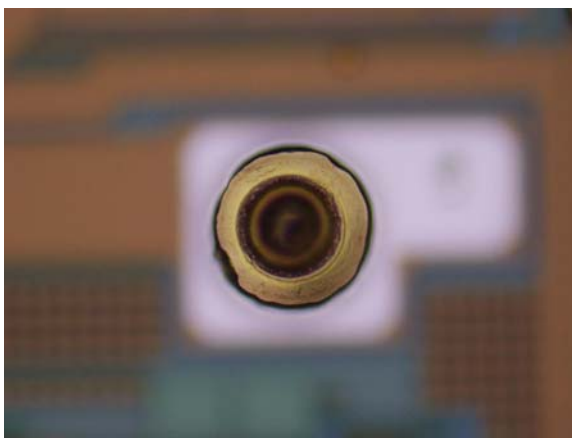
ภาพที่ ง.26 งานชิ้นที่ 26 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



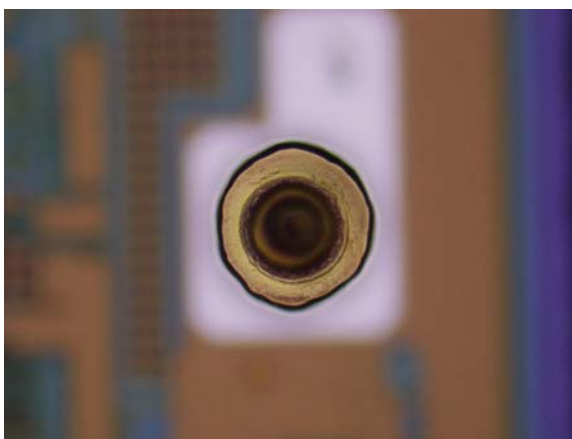
ภาพที่ ง.27 งานชิ้นที่ 27 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง



ภาพที่ ง.28 งานชิ้นที่ 28 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง

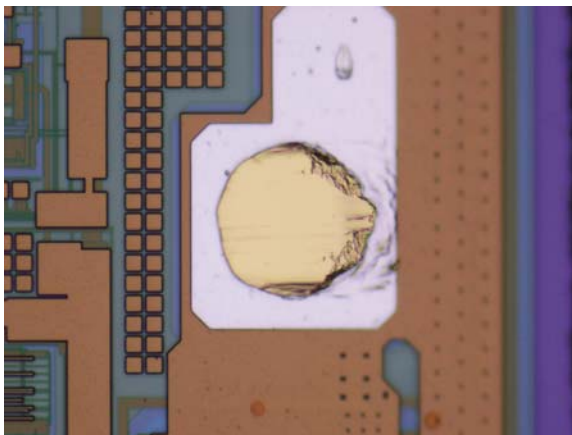


ภาพที่ ง.29 งานชิ้นที่ 29 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง

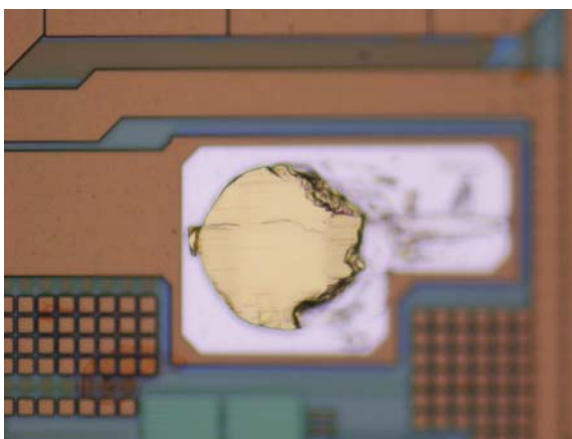


ภาพที่ ง.30 งานชิ้นที่ 30 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงดึง

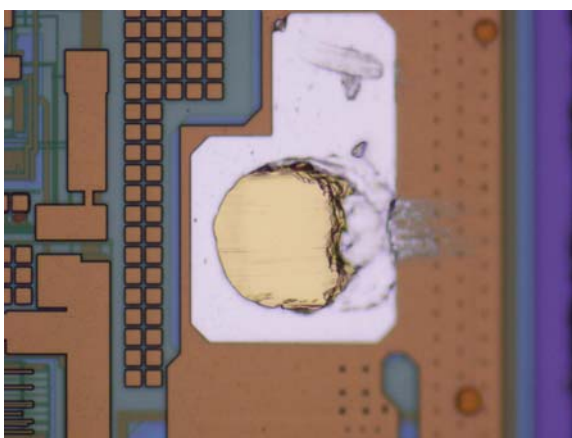
ภาคผนวก จ
ผลการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



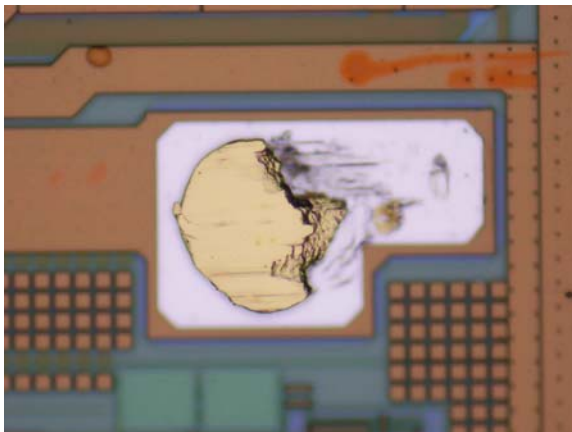
ภาพที่ จ.1 งานชิ้นที่ 1 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



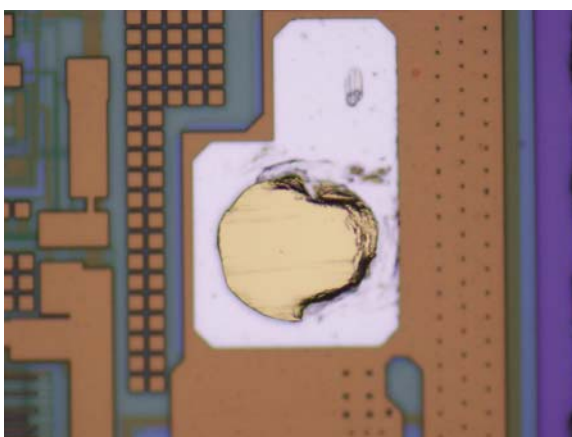
ภาพที่ จ.2 งานชิ้นที่ 2 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



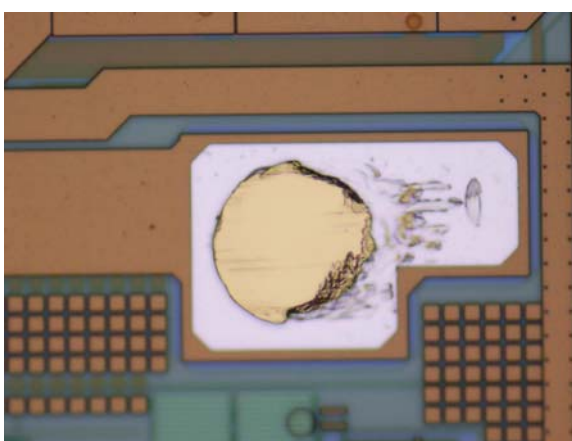
ภาพที่ จ.3 งานชิ้นที่ 3 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



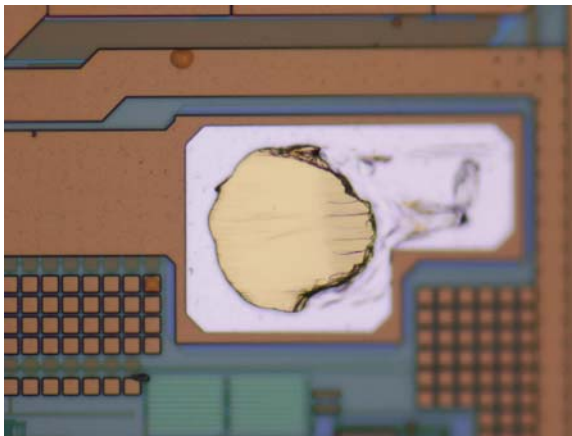
ภาพที่ จ.4 งานชิ้นที่ 4 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



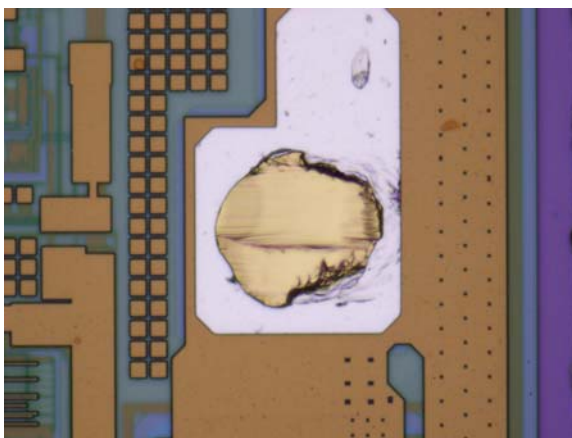
ภาพที่ จ.5 งานชิ้นที่ 5 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



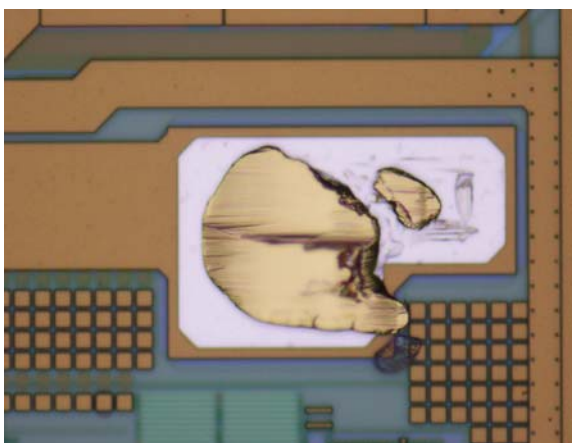
ภาพที่ จ.6 งานชิ้นที่ 6 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



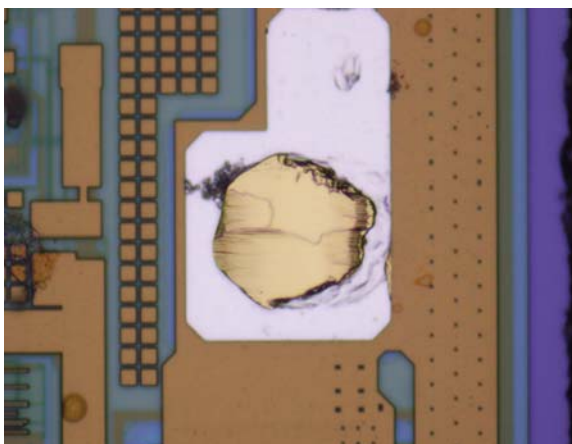
ภาพที่ จ.7 งานชิ้นที่ 7 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



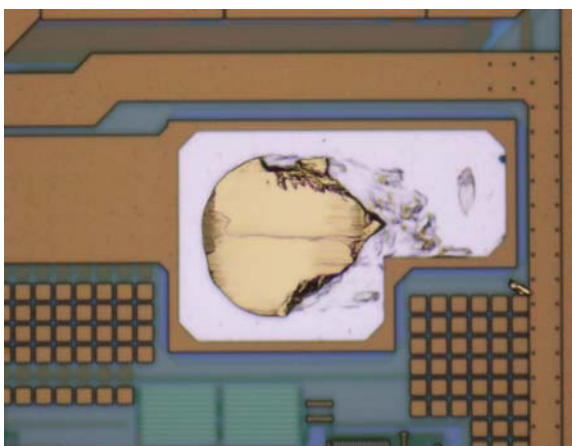
ภาพที่ จ.8 งานชิ้นที่ 8 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



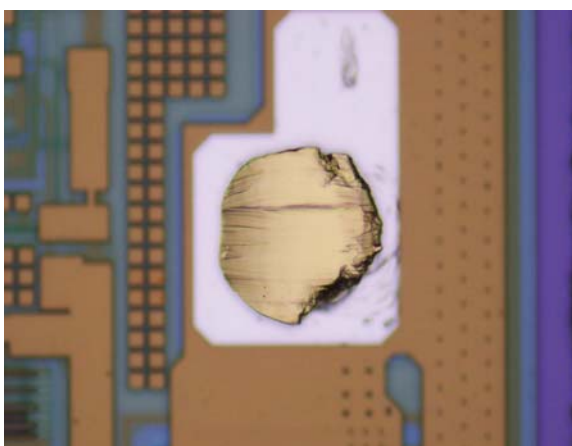
ภาพที่ จ.9 งานชิ้นที่ 9 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



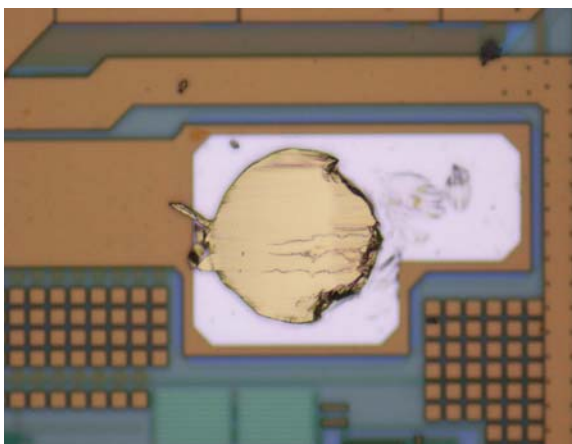
ภาพที่ จ.10 งานชิ้นที่ 10 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



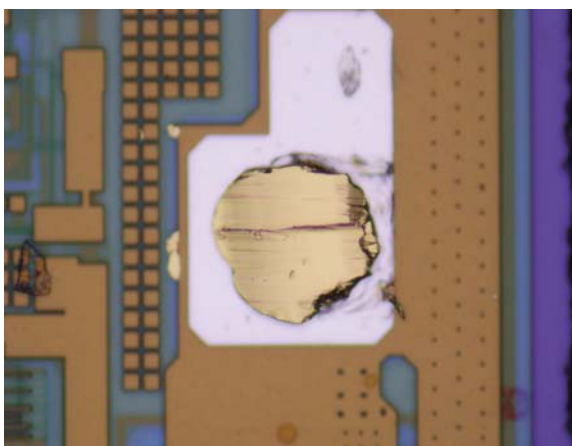
ภาพที่ จ.11 งานชิ้นที่ 11 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



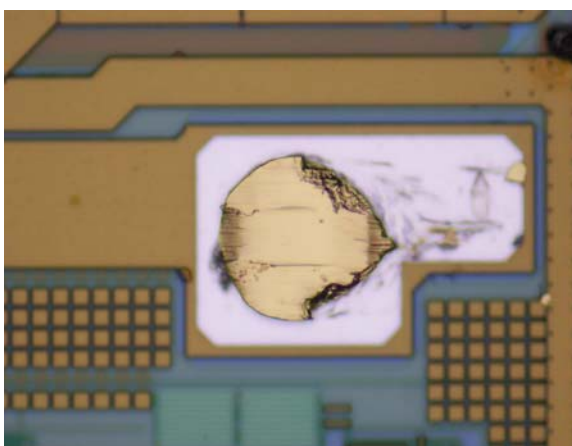
ภาพที่ จ.12 งานชิ้นที่ 12 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



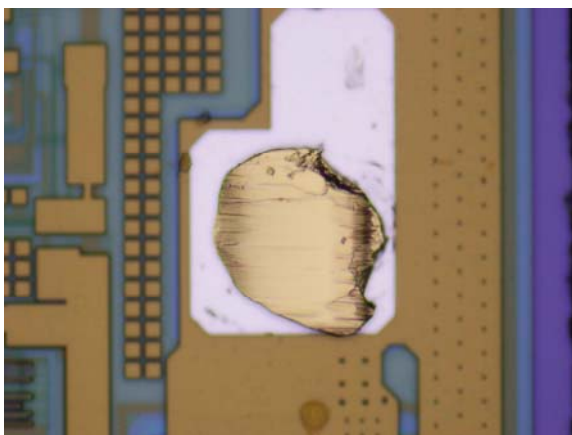
ภาพที่ จ.13 งานชิ้นที่ 13 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



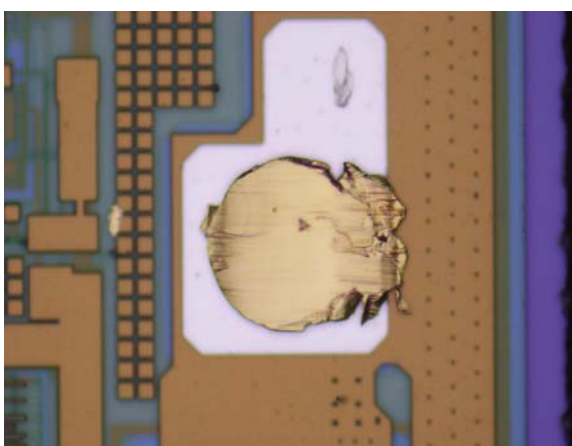
ภาพที่ จ.14 งานชิ้นที่ 14 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



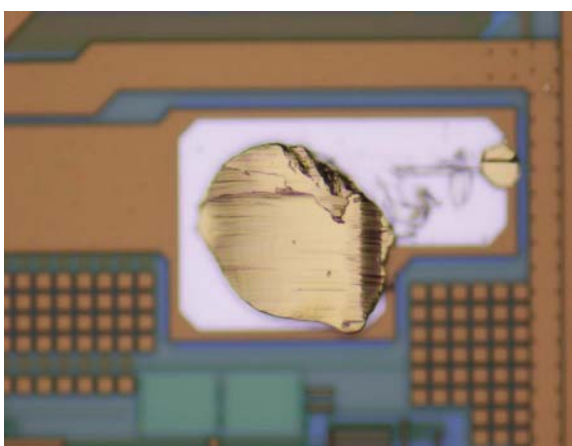
ภาพที่ จ.15 งานชิ้นที่ 15 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



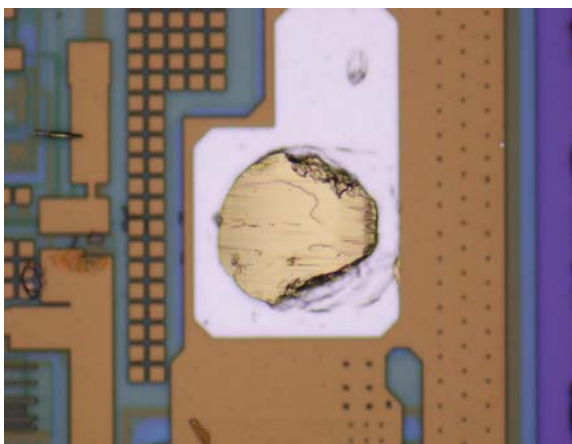
ภาพที่ จ.16 งานชิ้นที่ 16 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



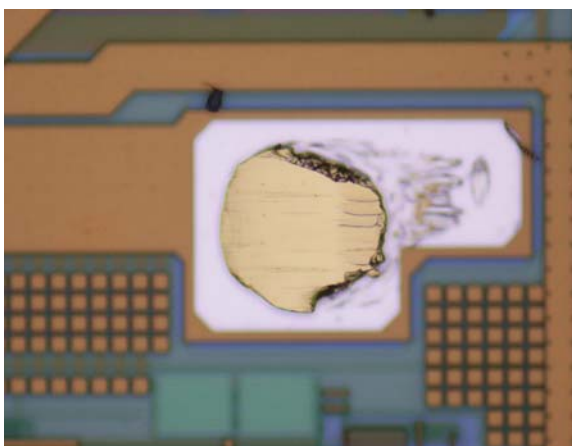
ภาพที่ จ.17 งานชิ้นที่ 17 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



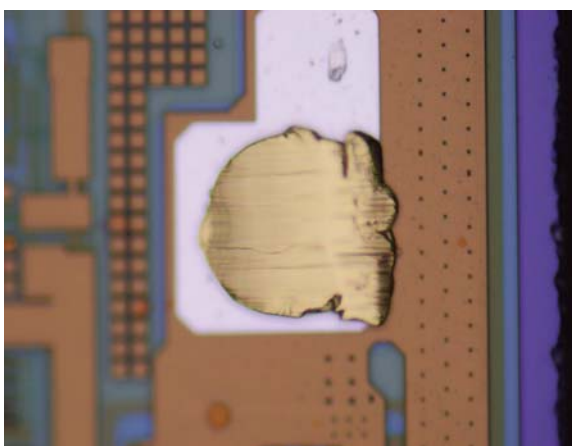
ภาพที่ จ.18 งานชิ้นที่ 18 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



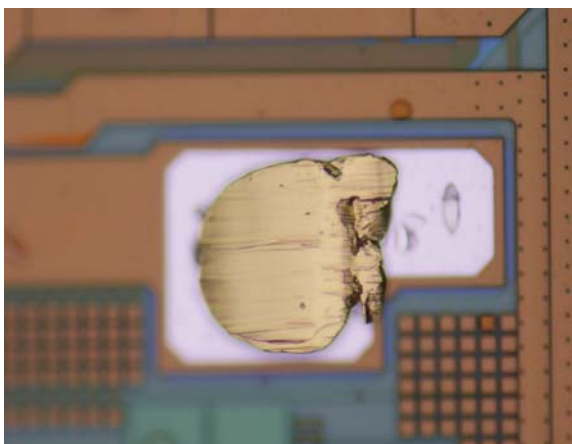
ภาพที่ จ.19 งานชิ้นที่ 19 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



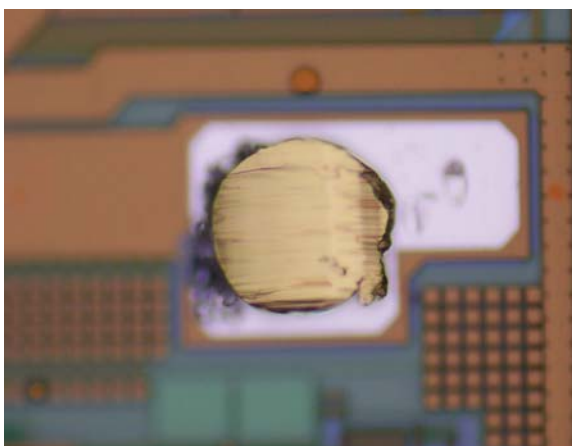
ภาพที่ จ.20 งานชิ้นที่ 20 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



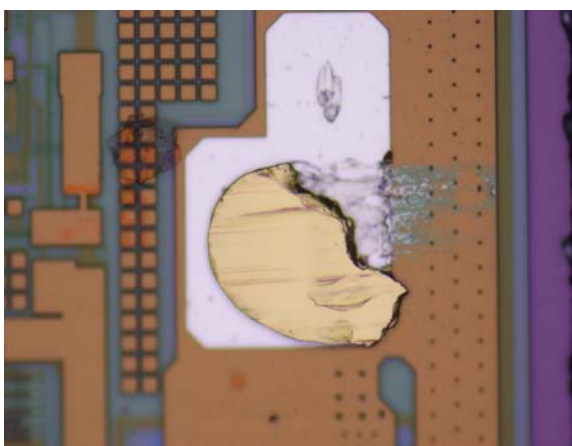
ภาพที่ จ.21 งานชิ้นที่ 21 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



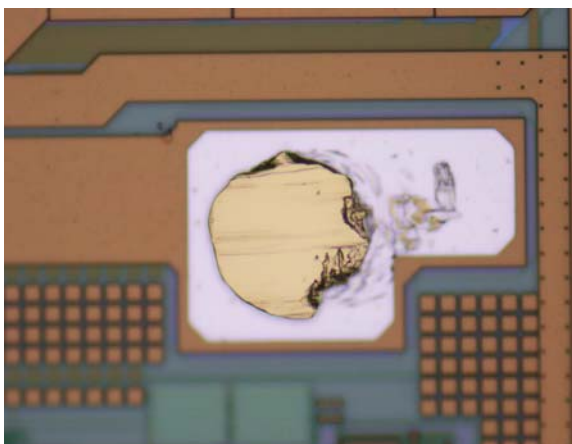
ภาพที่ จ.22 งานชิ้นที่ 22 จากการทดลองยีนย่นผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



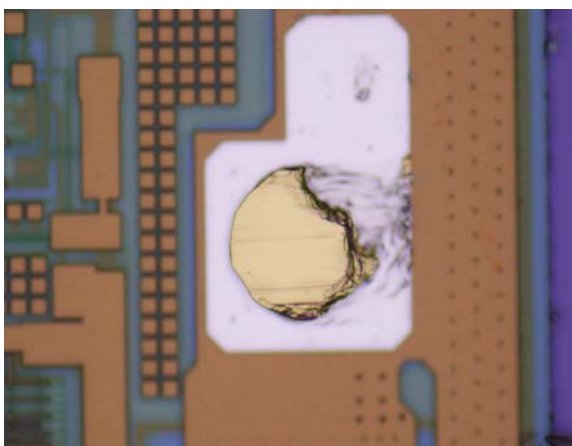
ภาพที่ จ.23 งานชิ้นที่ 23 จากการทดลองยีนย่นผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



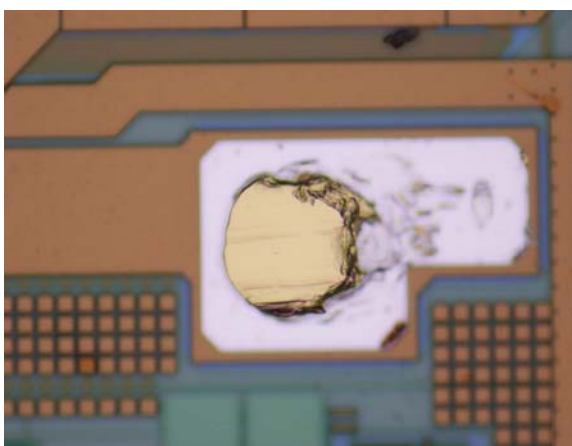
ภาพที่ จ.24 งานชิ้นที่ 24 จากการทดลองยีนย่นผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



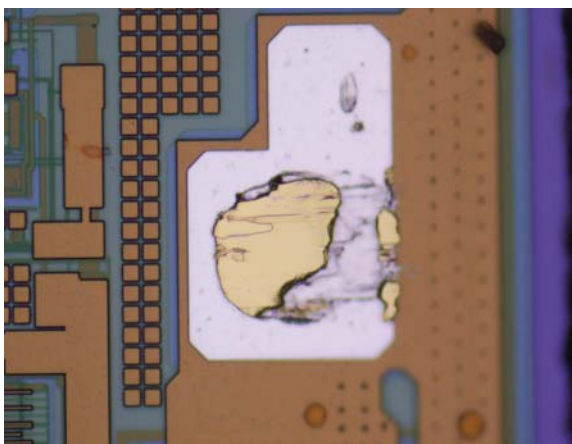
ภาพที่ จ.25 งานชิ้นที่ 25 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



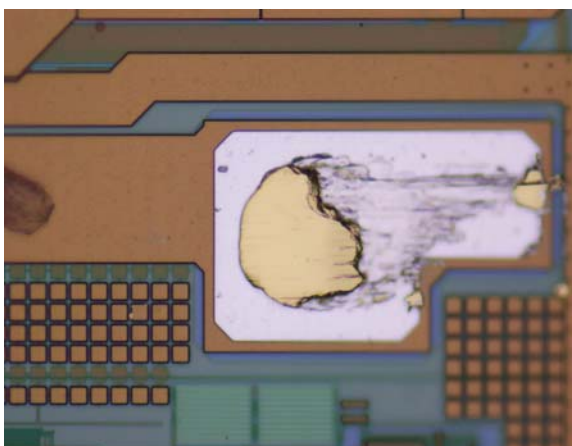
ภาพที่ จ.26 งานชิ้นที่ 26 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



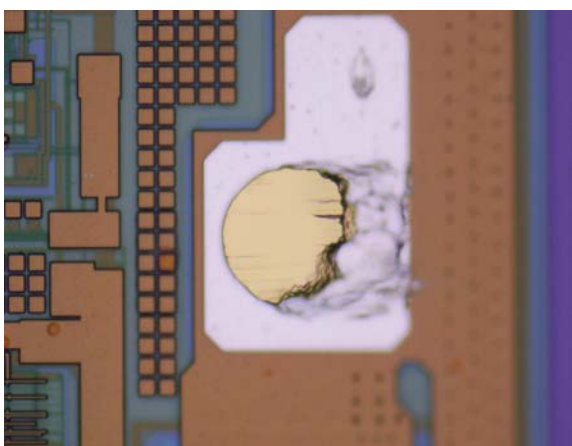
ภาพที่ จ.27 งานชิ้นที่ 27 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



ภาพที่ จ.28 งานชิ้นที่ 28 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



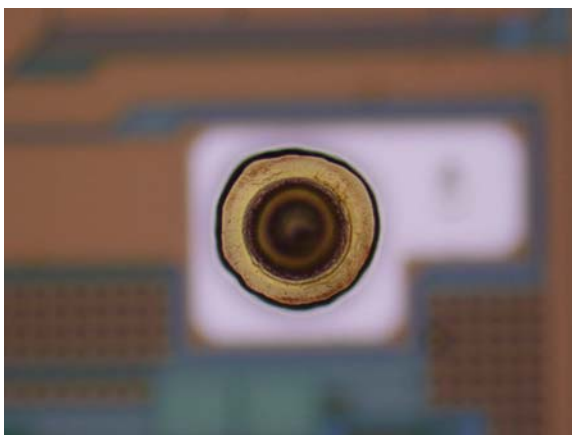
ภาพที่ จ.29 งานชิ้นที่ 29 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน



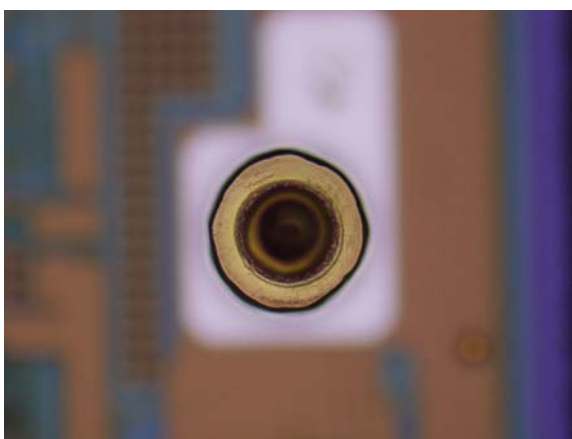
ภาพที่ จ.30 งานชิ้นที่ 30 จากการทดลองยืนยันผลสำหรับผลตอบแรงเฉือน

ภาคผนวก จ

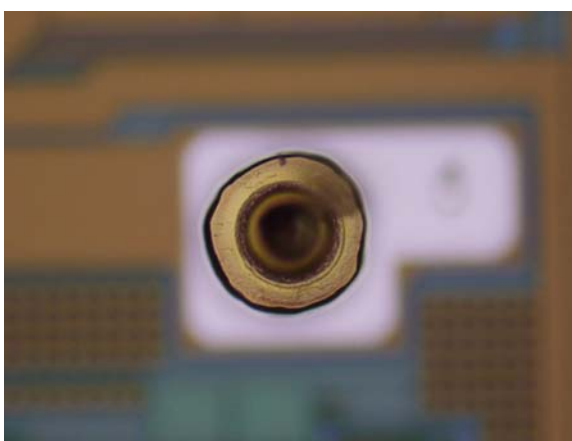
ชิ้นงานที่ผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



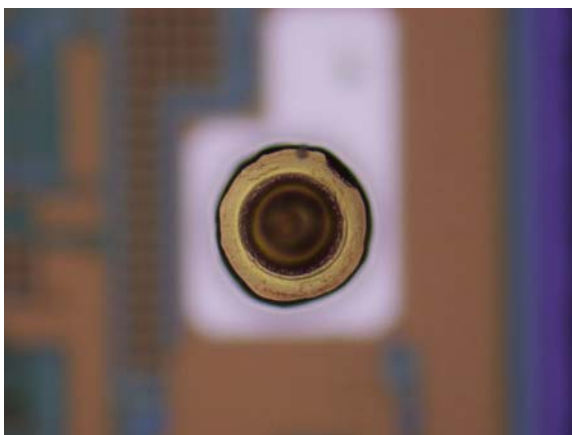
ภาพที่ ฉ.1 งานชิ้นที่ 1 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



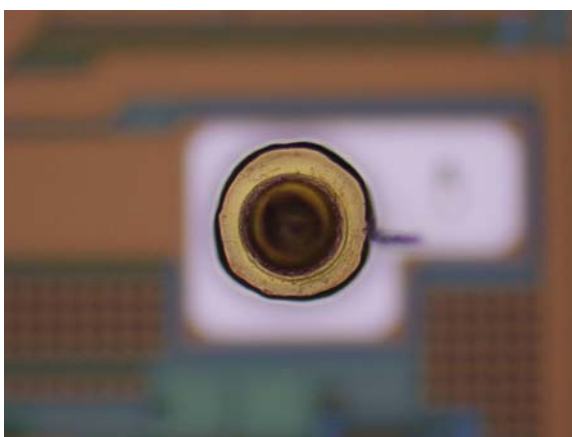
ภาพที่ ฉ.2 งานชิ้นที่ 2 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



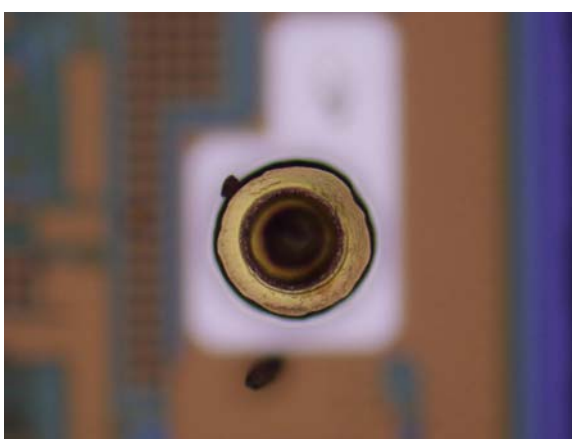
ภาพที่ ฉ.3 งานชิ้นที่ 3 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



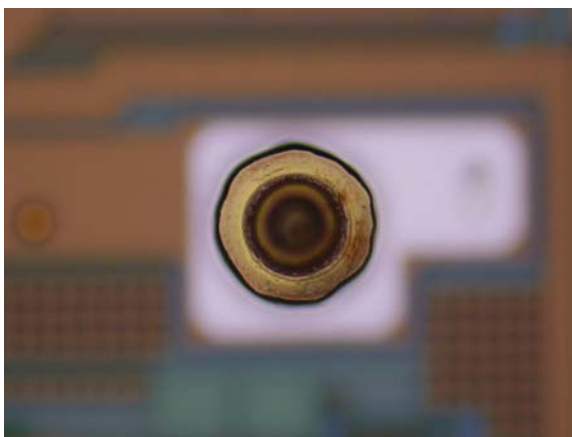
ภาพที่ ฉ.4 งานชิ้นที่ 4 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



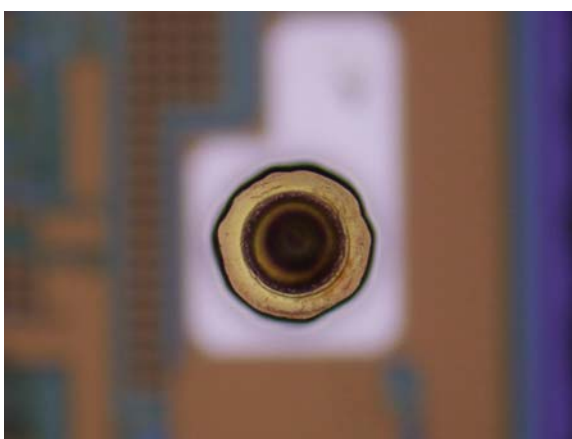
ภาพที่ ฉ.5 งานชิ้นที่ 5 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



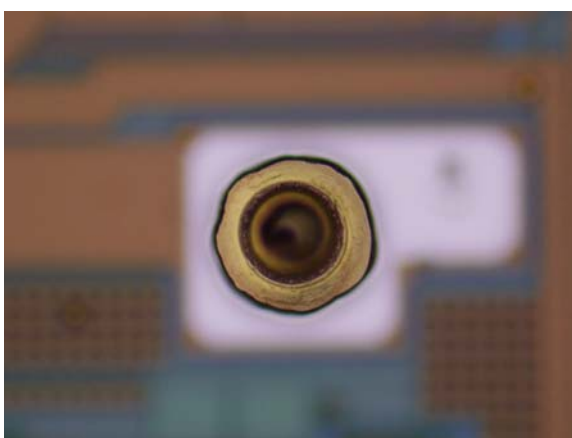
ภาพที่ ฉ.6 งานชิ้นที่ 6 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



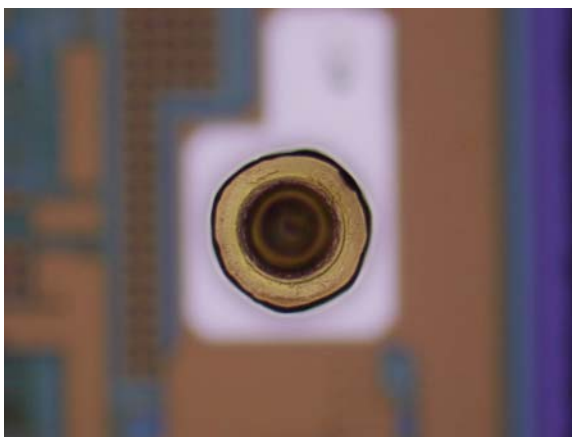
ภาพที่ ฉ.7 งานชิ้นที่ 7 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



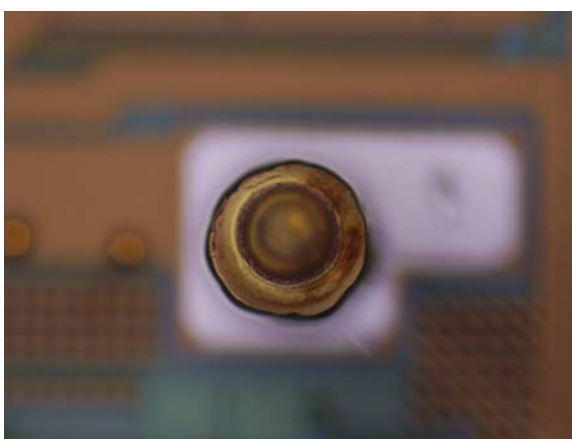
ภาพที่ ฉ.8 งานชิ้นที่ 8 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



ภาพที่ ฉ.9 งานชิ้นที่ 9 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



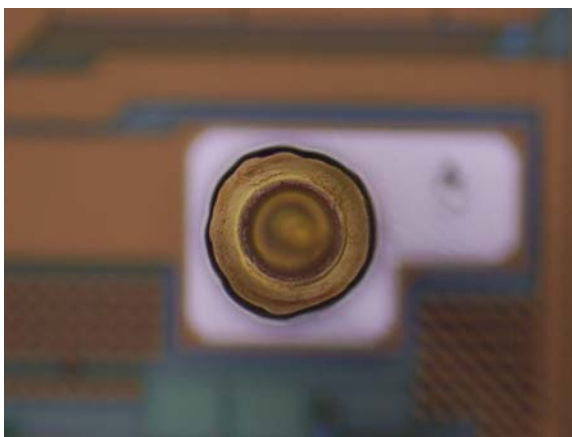
ภาพที่ ฉ.10 งานชิ้นที่ 10 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



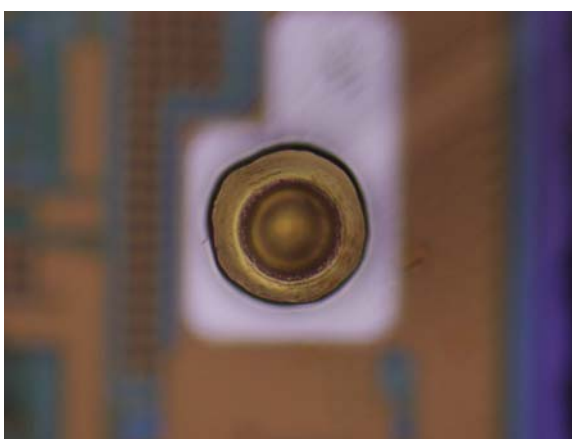
ภาพที่ ฉ.11 งานชิ้นที่ 11 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



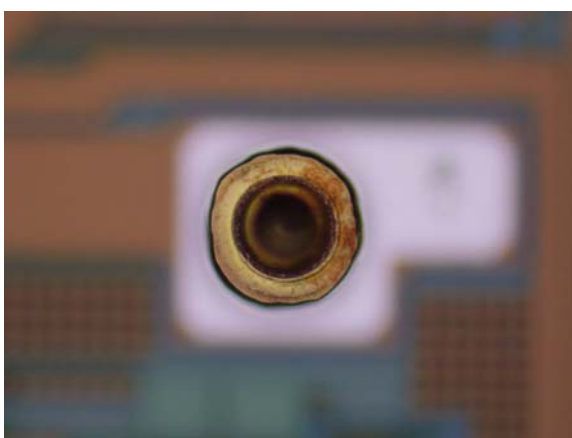
ภาพที่ ฉ.12 งานชิ้นที่ 12 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



ภาพที่ ฉ.13 งานชิ้นที่ 13 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



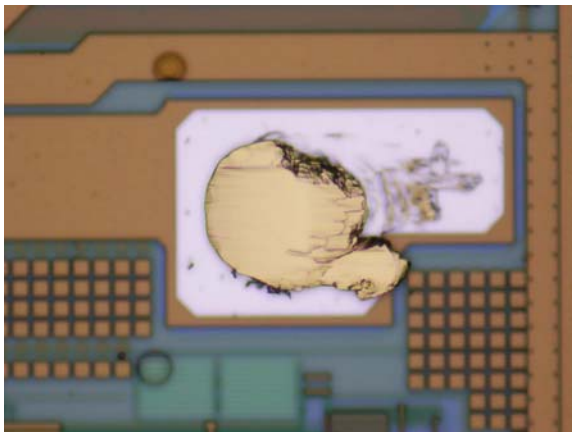
ภาพที่ ฉ.14 งานชิ้นที่ 14 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง



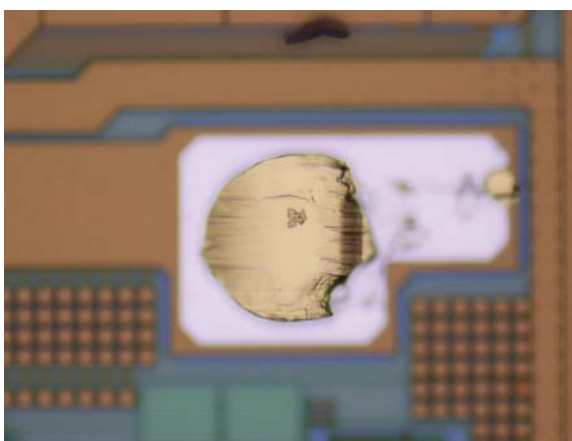
ภาพที่ ฉ.15 งานชิ้นที่ 15 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงดึง

ภาคผนวก ข

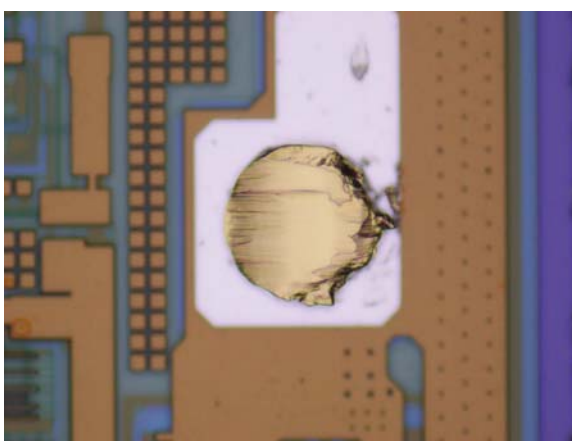
ชิ้นงานที่ผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน



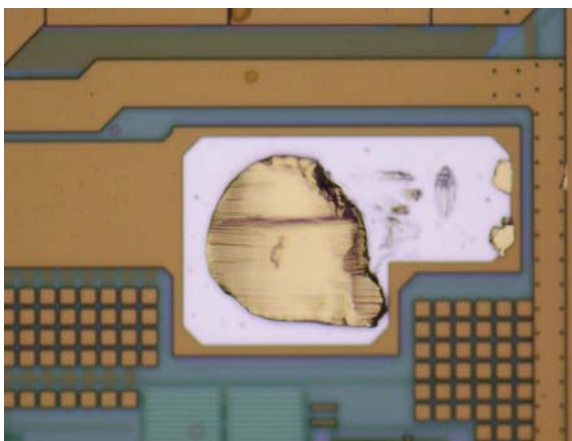
ภาพที่ ข.1 งานชิ้นที่ 1 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน



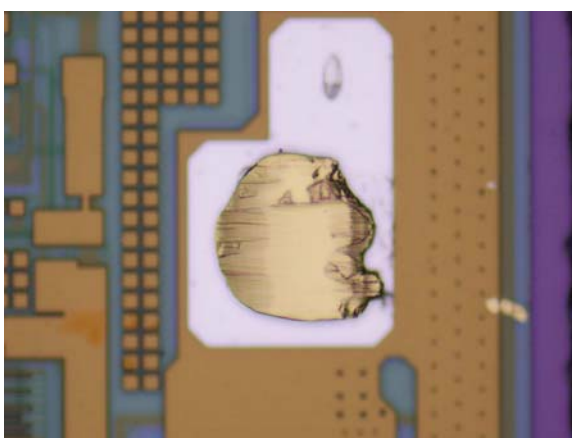
ภาพที่ ข.2 งานชิ้นที่ 2 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน



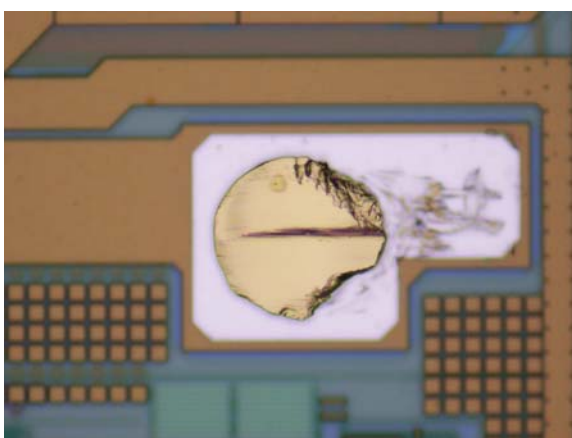
ภาพที่ ข.3 งานชิ้นที่ 3 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน



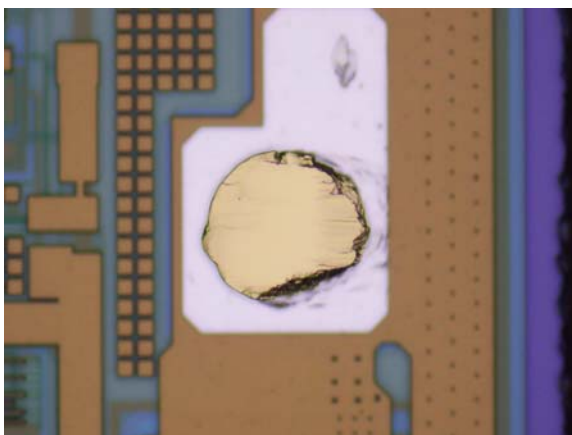
ภาพที่ ข.4 งานชิ้นที่ 4 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน



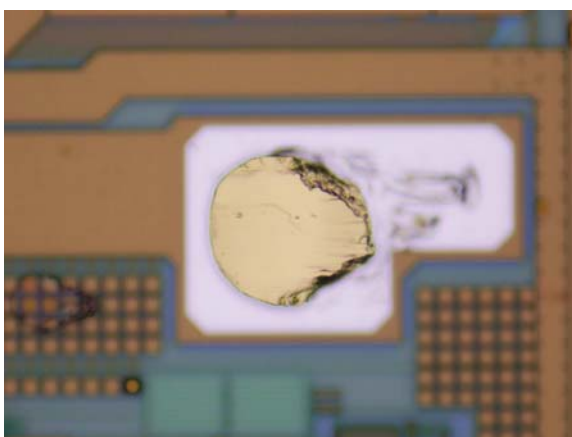
ภาพที่ ข.5 งานชิ้นที่ 5 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน



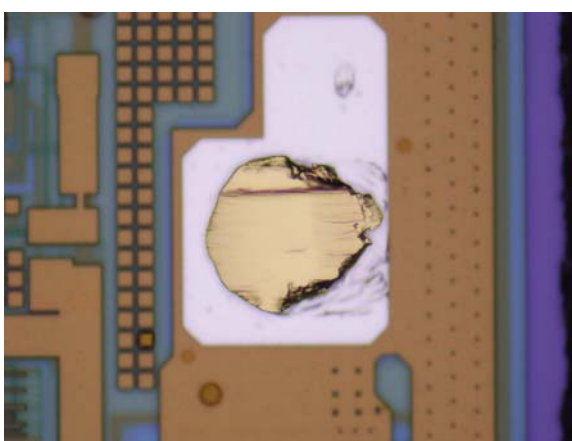
ภาพที่ ข.6 งานชิ้นที่ 6 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน



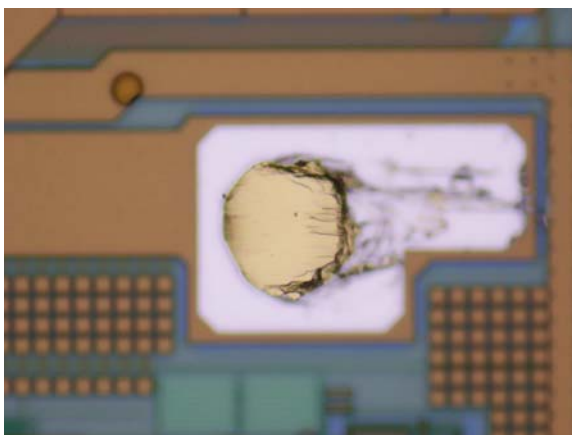
ภาพที่ ข.7 งานชิ้นที่ 7 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแทนเฉือน



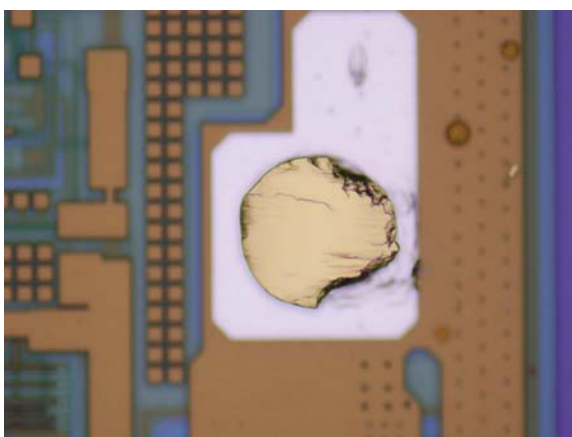
ภาพที่ ข.8 งานชิ้นที่ 8 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแทนเฉือน



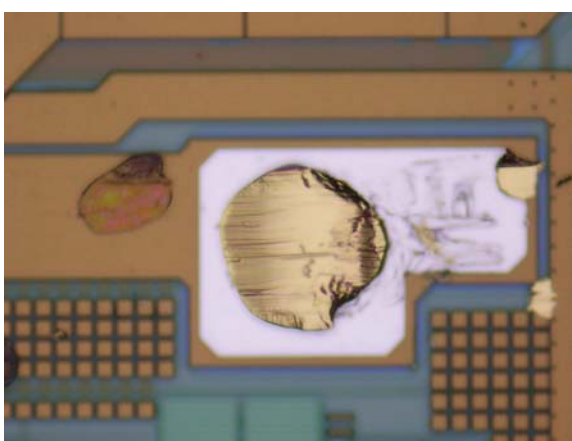
ภาพที่ ข.9 งานชิ้นที่ 9 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแทนเฉือน



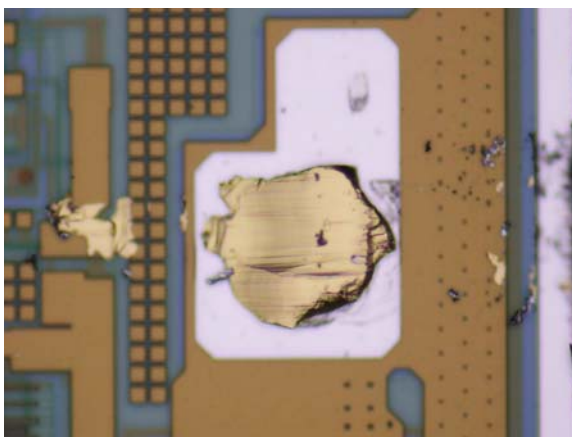
ภาพที่ ข.10 งานชิ้นที่ 10 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน



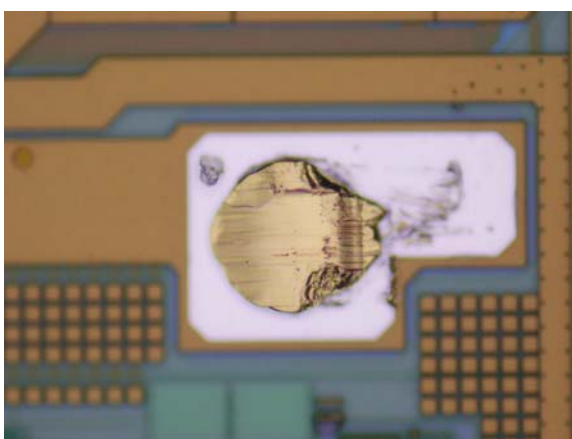
ภาพที่ ข.11 งานชิ้นที่ 11 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน



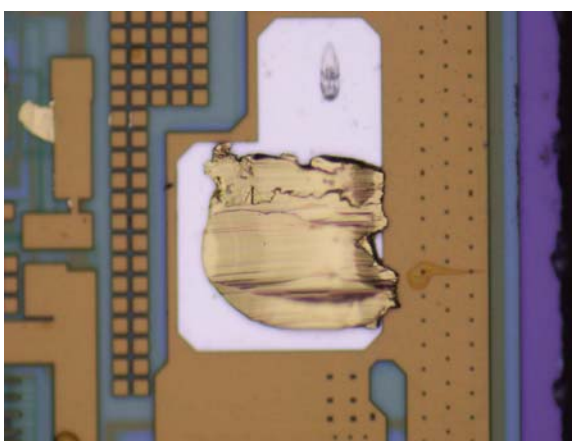
ภาพที่ ข.12 งานชิ้นที่ 12 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน



ภาพที่ ข.13 งานชิ้นที่ 13 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน



ภาพที่ ข.14 งานชิ้นที่ 14 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน



ภาพที่ ข.15 งานชิ้นที่ 15 จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแรงเฉือน

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ สกุล	นายฉัตรพล พิมพา
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2543 - 2546 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ พ.ศ. 2554 - 2556 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2556 – ปัจจุบัน ตำแหน่ง อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ตำแหน่งงาน	พนักงานมหาวิทยาลัย (วิชาการ)
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี