



การลดของเสียในกระบวนการประกอบสายส่งสัญญาณทางแสง

Defective Reduction in Active Optical Cable Assembly Process

อาภาณวล แก้วกาหลง* และ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์

Arpanual Keawkalong* and Jeerapat Ngaoprasertwong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok, Thailand 10330

*E-mail: arpanual@hotmail.com, Tel.: +668-745-19691

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการประกอบสายส่งสัญญาณทางแสง (Active Optical Cable) ที่ระดับความเร็ว 100Gb/s ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการส่งสัญญาณสำหรับดาต้าเซ็นเตอร์ที่เติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยประยุกต์ใช้เครื่องมือปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา หรือ DMAIC ประกอบด้วย (1) ระบุนิยามปัญหา (Define) พิจารณาอัตราผลิตผลดีในกระบวนการประกอบระดับบอร์ดคอลเลนจิ้น แล้วเลือกกระบวนการที่มีอัตราผลิตผลดีต่ำที่สุดเพื่อดำเนินการแก้ปัญหา (2) ระบุการวัด (Measure) เพื่อวิเคราะห์ความฟุ้งกันของระบบวัดสำหรับข้อมูลแบบนับ (Attribute gage R&R) (3) ระบุวิเคราะห์ (Analyze) หาสาเหตุของปัญหาจากการระดมสมองในทีมผู้เชี่ยวชาญ และการใช้เครื่องมือเช่น แผนภูมิ ก้างปลา วิธีผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Analysis) ตลอดจนการทดสอบทางสถิติเพื่อวิเคราะห์นัยสำคัญของแต่ละปัจจัยต่อสัดส่วนของเสีย (4) การดำเนินการปรับปรุง (Improve) และ (5) การติดตามผล (Control) ซึ่งหลังการปรับปรุงพบว่าสัดส่วนของเสียลดลงจาก 8.4% เหลือ 1.49% หรือลดลง 82%

คำสำคัญ: การปรับแนวแกนแสงแบบแพสซีฟ; การลดของเสีย; ซิกซ์ ซิกมา

ABSTRACT

Active Optical Cable or AOC is commonly used for high-speed data transmission (100Gb/s) in many applications including Datacenter with continuous growth of demand. In order to make product price stay competitive in the market, manufacturing process need to have high efficiency and low cost. This research aims to improve AOC assembly process particularly in optical engine level with Six sigma methodology DMAIC which consist of 5 phases as follow, (1) Define phase to consider the most critical process and estimate improvement target. (2) Measure phase, to analyze accuracy and precision of measurement system.

(3) Analyze phase, to brainstorm possible causes and proceed statistical test to verify which input factor give significantly different to defective rate. (4) Improve phase to determine an effective solution for each factor, and the last (5) Control phase to follow up target achievement. As a result, the average defective rate is decreased from 8.4% to 1.49% or equal to 82% reduction. This research can achieve breakthrough improvement by conducting Six sigma approach.

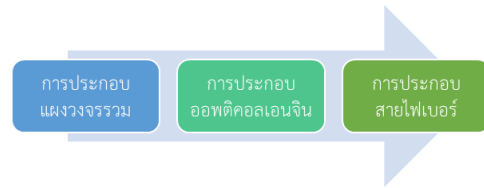
Keywords: Passive alignment technique; Defective reduction; Six sigma

1. บทนำ

บริษัทกรณีสึกษาดำเนินธุรกิจรับจ้างผลิตและประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (EMS : Electronics Manufacturing Services) ประเภทแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board), แผงวงจรรวมหรือไอซี (IC), และผลิตภัณฑ์กลุ่มออปติก (Optics) ซึ่งนับเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีการเติบโตอย่างมากในช่วงปี 2561 มียอดขายโดยเฉลี่ยในปี 2562 ประมาณ 1.89 ล้านดอลลาร์/เดือน และยังคงมีแนวโน้มที่จะเติบโตอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กลุ่มออปติก ได้แก่ สายแอกทีฟออปติคัลเคเบิล (Active Optical Cable: AOC) เป็นสายสำหรับรับส่งสัญญาณทางแสงความเร็วสูง 100Gb/s ซึ่งใช้ในดาต้าเซ็นเตอร์

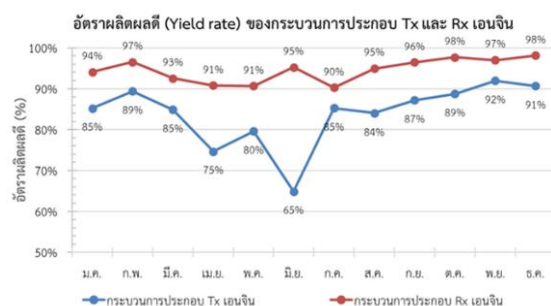
สาย AOC มี 2 ประเภท คือสายส่งสัญญาณ (Transmitter) หรือ Tx และสายรับสัญญาณ (Receiver) หรือ Rx มีระดับการประกอบหลัก 3 ระดับ ได้แก่

- 1) การประกอบแผงวงจรรวม ด้วยเทคโนโลยี SMT (Surface Mount Technology)
- 2) การวางตำแหน่งอุปกรณ์แอกทีฟ เช่น เลเซอร์ไดโอด ตัวขับเลเซอร์ รวมทั้งไมโครเลนส์ อาเรย์ลงบนแผงวงจรรวมด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง (High Precision Alignment) เรียกว่าการประกอบออปติคัลเอนจิน (Optical Engine)
- 3) การประกอบเส้นใยนำแสง เพื่อเป็นเส้นทางเดินของแสงเข้ากับออปติคัลเอนจินที่ผลิตได้จากข้อ 2 ในกระบวนการรับและส่งสัญญาณด้วยแสง



รูปที่ 1 กระบวนการประกอบสาย AOC แบ่งตามระดับการประกอบ

งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นเฉพาะการปรับปรุงกระบวนการประกอบระดับออปติคัลเอนจินสำหรับตัวส่งสัญญาณ หรือ Tx เอนจินเท่านั้น เนื่องจากมีความยากและซับซ้อนมากกว่าในเชิงเทคนิค สามารถพิจารณาได้จากกราฟแสดงอัตราการผลิต (%Yield) เปรียบเทียบกระบวนการประกอบตัวส่งสัญญาณหรือ Tx เอนจิน และตัวรับสัญญาณหรือ Rx เอนจิน ดังรูปที่ 2 ซึ่งจะพบว่าการประกอบ Tx เอนจินมีอัตราการผลิตต่ำกว่า Rx เอนจินเสมอ



รูปที่ 2 เปรียบเทียบอัตราการผลิตระหว่างออปติคัลเอนจินแบบตัวส่งและตัวรับสัญญาณ

วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัยเพื่อลดของเสียในกระบวนการประกอบสายส่งสัญญาณทาง มุ่งเน้นการลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการประกอบผลิตภัณฑ์ Tx

ในระดับออปติคอลเอนจิน ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับส่งข้อมูล ระยะใกล้ในดาต้าเซ็นเตอร์แบบ 12 ช่องสัญญาณ ที่ระดับ อัตราเร็วในการส่งข้อมูล 10 Gb/s ต่อช่องสัญญาณ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

ประยุกต์ใช้การปรับปรุงกระบวนการที่เป็นอยู่ใน ปัจจุบันให้ดีขึ้นตามแนวทาง DMAIC สามารถแตกออกได้ เป็น 5 เฟส ดังนี้ [1]

- 1) การกำหนดปัญหา (Define Phase) ศึกษา กระบวนการประกอบ Tx เอนจิน และข้อบกพร่อง ที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการเพื่อกำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ตลอดจนขอบเขตของงานวิจัย
- 2) การวัดเก็บข้อมูล (Measure Phase) ทำการ วิเคราะห์ความถูกต้องและความพ้องกันของ ระบบการวัด (Gage R&R Analysis) เพื่อให้การ วิเคราะห์ผลทางสถิติที่จะเกิดขึ้นในลำดับถัดไป ถูกต้องแม่นยำ เชื่อถือได้ และการวิเคราะห์ ความสามารถของกระบวนการ ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ การพิจารณาความสามารถของ กระบวนการแบบข้อมูลนับ (Attribute Process Capability Analysis) ซึ่งเหมาะกับข้อมูลประเภท Pass/Fail
- 3) การวิเคราะห์สาเหตุปัญหา (Analysis Phase) ระดมสมองตามแนวทาง 4M: Man, Machine, Material, Method โดยเลือกใช้แผนภูมิแกงปลา เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้า และฝั่งเหตุและผล (Cause and Effect Analysis) เพื่อคัดเลือกให้ เหลือปัจจัยที่มีแนวโน้มจะส่งผลต่อตัวชี้วัด และการทดสอบสมมติฐานความมีนัยสำคัญทางสถิติ ของปัจจัยนำเข้าต่อตัวชี้วัด [2]
- 4) การปรับปรุงกระบวนการ (Improve Phase) หา แนวทางแก้ไขปัญหา เช่น วิธีการควบคุมวัตถุดิบ ตลอดจนการปรับตั้งค่าเครื่องจักรให้เหมาะสม

- 5) การติดตามและควบคุม (Control Phase) ทดสอบเพื่อยืนยันผลหลังการปรับปรุง โดยใช้การ วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการแบบ ข้อมูลนับอีกครั้งเพื่อติดตามผล รวมทั้งการกำหนด แผนการควบคุมและวิธีการปฏิบัติงานให้เป็น มาตรฐาน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย [3] อธิบายขั้นตอนการประกอบตัวส่งและ รับสัญญาณแสงที่มีแพ็คเกจแบบ TOSA/ROSA ว่ามี 4 ขั้นตอนได้แก่ 1) การผลิตแผ่นวงจรรวม หรือ PCBA 2) การวางตำแหน่งเลเซอร์ VCSEL และ PD ด้วยเทคโนโลยี วางตำแหน่งระดับความแม่นยำสูง (High Precision Alignment) 3) การเชื่อมต่อวงจรด้วยลวดทองคำ 4) การ ครอบเลนส์เหนือตำแหน่งเลเซอร์ VCSEL โดยให้ตำแหน่ง กึ่งกลางของเลนส์ตำแหน่งแรกตรงกับกึ่งกลางของ VCSEL เลเซอร์ และกึ่งกลางของเลนส์ตำแหน่งสุดท้ายตรงกับ กึ่งกลางของตัวตรวจรับแสง (PD) ใช้การอว็อกซ์ที่เพื่อยึด เลนส์ให้ติดกับแผ่นแสง (Optical Bench)

กระบวนการติดแบบความแม่นยำสูง สำหรับสาย แอคทีฟออปติคอลเคเบิลนั้น มี 6 ตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความแม่นยำในแกน Z เป็นตัวกำหนดบอนด์ไลน์ (Bond Line) ความผิดพลาดในแนวแกน X, Y และมุมใน แกน Z ตามผลการทดลองจากงานวิจัย [4]

การศึกษาของ [5] ทำให้พบว่าความถูกต้องแม่นยำ ของการวางแนวแบบแพสซีฟจะถูกกำหนดด้วย ความสามารถในการตรวจจับชีพและการอ่านลักษณะเฉพาะ ของขอบ และการคำนวณระยะทางสัมพันธ์ในลักษณะของ พิกเซลของภาพ ซึ่งสามารถแปลงกลับมาให้อยู่ในรูปแบบ ของระยะทางที่แท้จริง ความละเอียดในการวัดระยะจะถูก จำกัดด้วยกำลังขยายของกล้อง ความผันแปรของแสงสว่าง และสัญญาณรบกวนทางอิเล็กทรอนิกส์

งานวิจัยของ [6] อธิบายวิธีการประกอบแพ็คเกจทาง แสง เพื่อวางตำแหน่งไฟเบอร์เข้ากับแอคทีฟคอมโพเนนท์ มี 2 รูปแบบ ได้แก่ การวางตำแหน่งแบบแอคทีฟ (Active Optical Alignment) ซึ่งเป็นวิธีการดั้งเดิมและมีราคาแพง โดยที่ตัวงานจะต้องถูกจ่ายกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในสภาวะที่

กำลังทำงาน (Operate) และใช้ข้อมูลเชิงสมรรถนะ เช่น จุดพิคของสัญญาณแสง เป็นข้อมูลป้อนกลับจุดที่เหมาะสม ในการวางตำแหน่ง และ การวางตำแหน่งแบบแพสซีฟ (Passive Optical Alignment) จะใช้ การมองภาพ เอกลักษณะ เป็นจุดอ้างอิงสำหรับการวางตำแหน่งไฟเบอร์ ดังนั้นคุณภาพของการวางตำแหน่งแบบแพสซีฟขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยคือ จุดเอกลักษณะต้องมีลักษณะเด่นเพียงพอ และ เครื่องมือวางตำแหน่งมีความสามารถในการอ่านเอกลักษณะ ได้อย่างถูกต้อง ข้อดีของการวางตำแหน่งแบบแพสซีฟ คือ ความเร็ว จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต แต่ในทางปฏิบัติพบว่า การวางตำแหน่งแบบแพสซีฟจะให้ ประสิทธิภาพของแสงคู่ควบเฉลี่ย (Average Coupling Efficiency) ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบการวางตำแหน่งแบบ แอคทีฟ

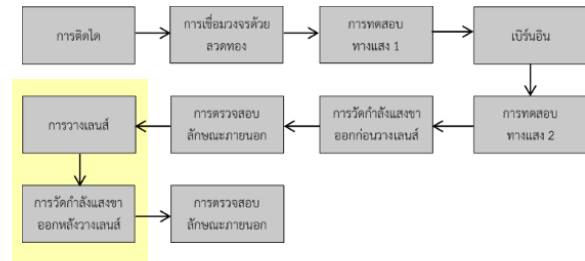
ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการวาง ตำแหน่งเลนส์แบบแพสซีฟเหนือเลเซอร์ VCSEL ของโมดูล สำหรับการส่งข้อมูลแบบความเร็วสูง 120Gb/s ของ [7] โดยทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง VCSEL ในแนวระนาบซึ่งก็คือแกน X-Y และในแนวดิ่ง คือแกน Z ต่อการสูญเสียของการคู่ควบแสง (Coupling Loss) พบว่า ความผิดพลาดในการวางแนวในแกน X-Y ที่ระยะ $\pm 10 \mu\text{m}$ จะทำให้เกิดค่า สูญเสียการคู่ควบ (Coupling loss) 1dB ในขณะที่แกน Z สามารถผิดพลาดได้ถึง $\pm 60 \mu\text{m}$ จึงจะทำให้เกิดความ สูญเสียที่ 1dB ผลการทดลองนี้แสดงว่า การวางตำแหน่งใน แนว X-Y มีความสำคัญมากกว่าในแนวแกน Z

3. วิธีการวิจัยและผลการวิจัย

3.1 ระยะเวลาการนิยามปัญหา

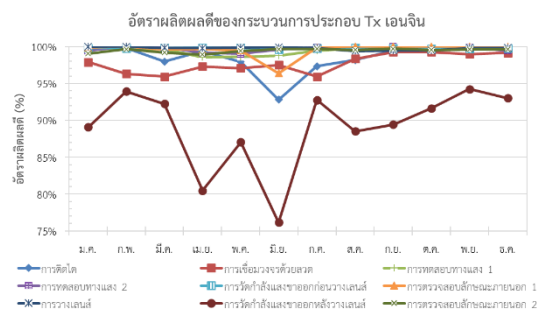
พิจารณากระบวนการประกอบระดับออปติคอลเอนจิน มีขั้นตอนการทำงานย่อย 10 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การตัดโด 2) การเชื่อมวงจรไฟฟ้าด้วยเส้นลวดทอง 3) การทดสอบทาง แสงครั้งที่ 1 4) กระบวนการเบิร์นอิน 5) การทดสอบทาง แสงครั้งที่ 2 6) การวัดกำลังแสงขาออกก่อนวางเลนส์ 7) การตรวจสอบลักษณะภายนอกก่อนวางเลนส์ 8) กระบวนการวางเลนส์ด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งแบบ

แพสซีฟ (Passive Alignment) ซึ่งใช้การวัดค่าเป็นตัววัด ให้เลนส์เกาะติดกับแท่นแสงบนแผ่นวงจรรวม 9) การวัด กำลังแสงขาออกหลังวางเลนส์ และลำดับสุดท้าย คือ 10) การตรวจสอบลักษณะภายนอก



รูปที่ 3 ลำดับการประกอบ Tx ออปติคอลเอนจิน

เมื่อพิจารณาอัตราผลิตผลดี (Yield Rate) ของแต่ละ ขั้นตอนการประกอบในช่วงเดือนมกราคมถึงธันวาคม 2562 พบว่า กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกหลังวางเลนส์มีอัตรา ผลิตผลดีต่ำและแปรปรวนที่สุด แสดงด้วยกราฟจุดวงกลม ซึ่งกระบวนการวัดกำลังแสงขาออกหลังวางเลนส์เป็นตัวชี้วัด คุณภาพของกระบวนการวางเลนส์ เพื่อที่จะปรับปรุง กระบวนการวัดกำลังแสงขาออก จึงจำเป็นอย่างยั้งที่จะต้อง วิเคราะห์ให้ครอบคลุมไปถึงกระบวนการวางเลนส์ด้วย



รูปที่ 4 อัตราผลิตผลดีของแต่ละกระบวนการประกอบ ออปติคอลเอนจิน

เพื่อให้การประเมิน Baseline เป็นไปอย่างเป็นกลาง ผู้วิจัยเลือกใช้ข้อมูลในช่วง กรกฎาคม-ธันวาคม 2563 พบว่า มีอัตราผลิตผลดีเฉลี่ยอยู่ที่ 91.60% เท่ากับมีสัดส่วนของเสีย สูงถึง 8.4%

3.2 ระยะเวลาการวัด

3.2.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องและความพ้องกันของระบบการวัด ดังนี้

1) กำหนดเครื่องทดสอบชิ้นงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริง ในขั้นตอนวัดกำลังแสงขาออก (Optical Power) ซึ่งประกอบด้วย 3 เครื่อง

2) กำหนดจำนวนชิ้นตัวอย่างงาน และจำนวนครั้งในการทดสอบซ้ำ โดยอ้างอิงจาก Fasser and Brettner แนะนำไว้ดังตารางที่ 1 ใช้ Tx เอนจินจำนวน 20 ตัวอย่าง โดยให้มี Tx เอนจินที่มีค่ากำลังแสงขาออกแบบผ่านสเปค ไม่ผ่านสเปค และแบบก้ำกึ่งหรือมาร์จินัล (marginal) อย่างละเท่า ๆ กัน

3) ขั้นตอนการทดลองคือ เช็ต Tx เอนจินลงบนเครื่องทดสอบชิ้นงาน เครื่องทดสอบจะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่ตัวงาน แล้ววัดกำลังแสงขาออกในแต่ละช่องสัญญาณ จากนั้นจะประเมินผลการทดสอบสุดท้าย คือ ผ่าน (Pass spec) หรือไม่ผ่าน (Fail spec) ดำเนินการวัดชิ้นงานซ้ำ 3 ครั้ง แบบถอดชิ้นงานและเช็ตใหม่ทุกครั้ง โดยให้มีลำดับอย่างสุ่ม

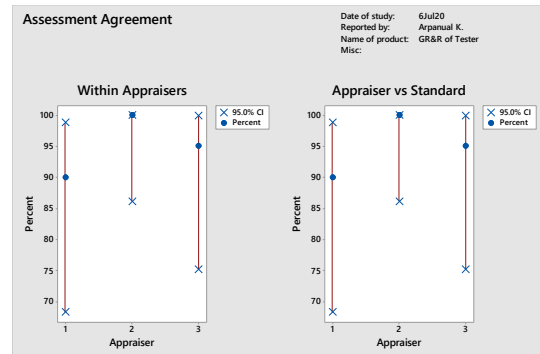
4) บันทึกค่าการทดลอง และวิเคราะห์ระบบการวัดของเครื่องทดสอบกำลังแสงขาออก

ตารางที่ 1 จำนวนชิ้นตัวอย่างงานในการประเมินผลระบบการตรวจสอบข้อมูลนับ

จำนวนเครื่องทดสอบ	จำนวนตัวอย่างที่ต่ำที่สุด	จำนวนทดลองซ้ำที่ต่ำที่สุด
1	24	5
2	18	4
≥3	12	3

ตารางที่ 2 ผลการประเมินระบบการวัด

หมายเลขเครื่องวัด	Kappa	Within Appraisers	Appraiser Vs Standard
1	0.92	90%	90%
2	1.00	100%	100%
3	0.96	95%	95%



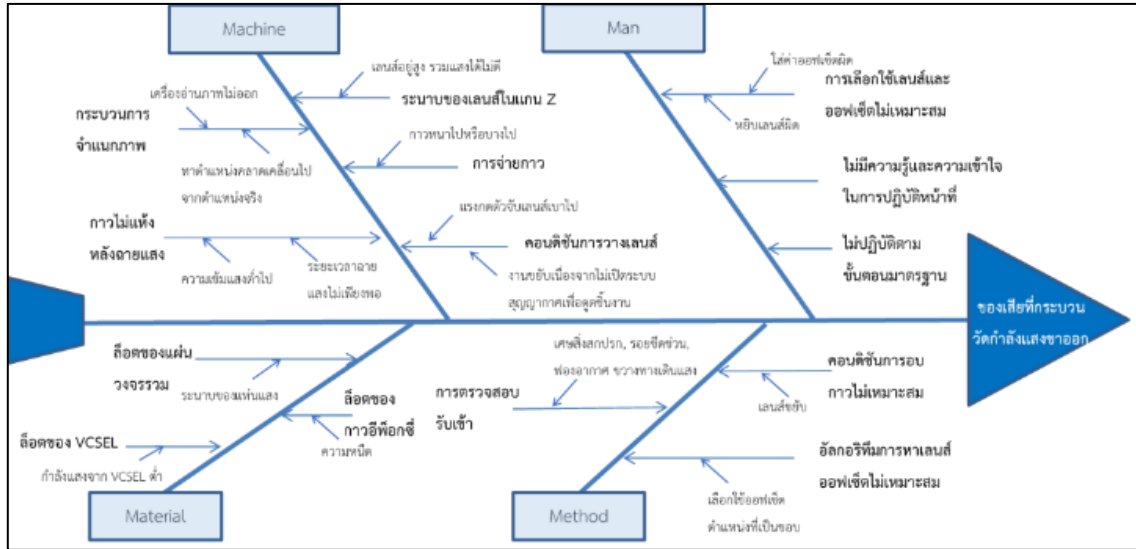
รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดสำหรับข้อมูลแบบนับ

จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 5 พบว่า เครื่องทดสอบชิ้นงานทั้ง 3 เครื่องให้ผลการวัดซ้ำ (Within Appraisers) 90% ขึ้นไป แสดงว่า สามารถให้ผลการตัดสินใจแต่ละครั้งของการวัดซ้ำเหมือนกัน และการตัดสินใจถูกต้องตามค่าอ้างอิง (Appraiser vs Standard) เกิน 90% เช่นกัน แสดงว่า เครื่องทดสอบทั้ง 3 เครื่องสามารถดักจับชิ้นงาน ของดี ของเสียได้ตรงตามชิ้นงานอ้างอิง (Reference unit) นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ค้ำปาที้มากกว่า 0.9 ในทุกเครื่องทดสอบ ยังสามารถบอกได้ว่าระบบวัดมีความพ้องกันมาก [8]

3.3 ระยะเวลาการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

3.3.1 ระยะเวลาการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

เลือกใช้แผนภูมิแก๊งปลา (Fish bond) วิเคราะห์ตามหลักการ 4M ได้แก่ Man, Machine, Material และ Method ดังแสดงในรูปที่ 6



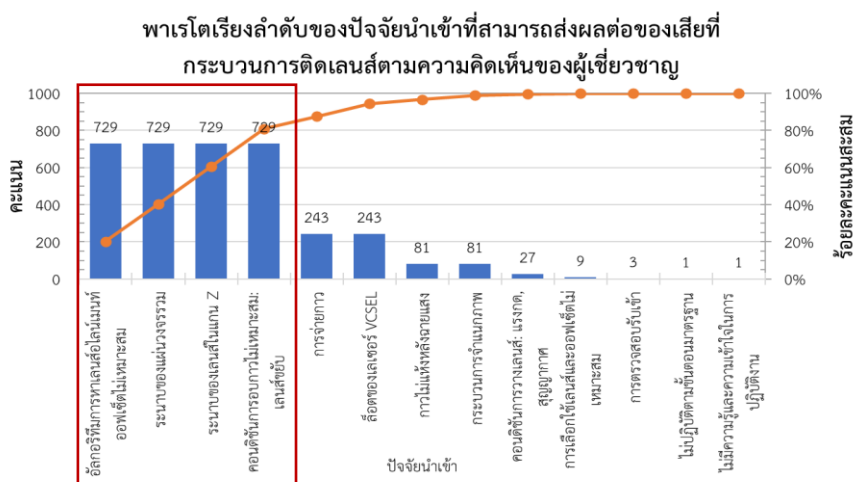
รูปที่ 6 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยแผนผัง

จัดลำดับความสำคัญของสาเหตุของปัญหาโดยเมทริกซ์สาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) เพื่อประเมินปัจจัยนำเข้าที่มีแนวโน้มจะส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกโดยการให้คะแนนจากคณะผู้เชี่ยวชาญ [9] ที่มีประสบการณ์ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์กลุ่มออปติคทั้งหมด 3 ท่าน เกณฑ์การให้คะแนนแสดงในตารางที่ 3 โดยคะแนนรวมคิดจากผลคูณของคะแนนจากทั้งสามผู้เชี่ยวชาญ เนื่องจากให้น้ำหนักความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเท่ากันทั้ง 3 ท่าน

ตารางที่ 3 เกณฑ์การให้คะแนนปัจจัยนำเข้า

เกณฑ์คะแนน	คำอธิบาย
0	ไม่ส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดของเสีย
1	ส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดของเสียเล็กน้อย
3	ส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดของเสียปานกลาง
9	ส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดของเสียอย่างมาก

ใช้กราฟพาราโดตดังรูปที่ 7 พิจารณาคะแนน และเปอร์เซ็นต์คะแนนสะสมของปัจจัยนำเข้า เพื่อคัดกรองสาเหตุของปัญหาที่จะถูกนำไปศึกษาในลำดับถัดไป



รูปที่ 6 พาราโดตผลคะแนนของปัจจัยนำเข้าที่มีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดของเสีย

พบว่า มี 4 ปัจจัย ที่มีเปอร์เซ็นต์คะแนนสะสมมากกว่า 80% ของระดับคะแนนทั้งหมด ได้แก่

1. อัลกอริทึมการหาเลนส์ออนไลน์เม้นท์ออฟเซต ไม่เหมาะสม
2. แผ่นวงจรรวมที่ผลิตจากลูกค้าและที่ผลิตได้เอง ในบริษัทกรณีศึกษา มีระนาบของแท่นแสงแตกต่างกัน เมื่อใช้อินไลน์เม้นท์ออฟเซตเดียวกัน อาจให้ระดับกำลังแสงขาออกไม่เท่ากัน
3. ระนาบของเลนส์ในแกน Z ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างเลเซอร์ VCSEL กับจุดรวมแสงของเลนส์นูนห่างกันมากขึ้น ลำแสงจากเลเซอร์ VCSEL ถูกรวมผ่านเลนส์ได้น้อยลง ส่งผลให้ระดับกำลังแสงขาออกลดลง
4. คอนดิชันการอบกาวไม่เหมาะสม การยึดเกาะระหว่างกาวอีพ็อกซี เลนส์ และแท่นแสงไม่สมบูรณ์ มีโอกาสให้เลนส์ขยับ ส่งผลต่อกำลังแสงขาออก

ปัจจัยเหล่านี้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าสำคัญทางสถิติในหัวข้อ 3.3.3 ถึง 3.3.6 โดยเลือกใช้วิธีการทดสอบสมมติฐานสำหรับค่าสัดส่วนประชากร (Hypothesis test for two proportions)

3.3.2 การกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับทดสอบสมมติฐาน

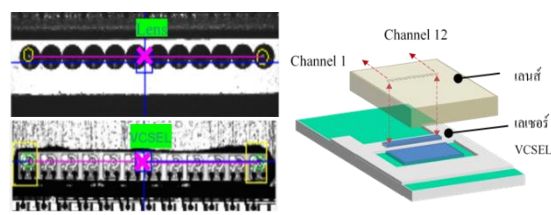
เนื่องจากสิ่งที่สนใจในการวิจัยนี้คือ สัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกของการประกอบ Tx เอนจิน ดังนั้น จึงเลือกใช้การทดสอบสมมติฐานสำหรับสัดส่วนประชากร 2 กลุ่มซึ่งสามารถคำนวณจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมได้จากสมการ

$$n = \frac{(z_{\alpha}\sqrt{p_1(1-p_1)} + z_{\beta}\sqrt{p_2(1-p_2)})^2}{(p_1 - p_2)^2} \quad (1)$$

ค่าเฉลี่ยสัดส่วนของเสียในปัจจุบัน p_1 เท่ากับ 0.084 และ สัดส่วนของเสียเป้าหมาย p_2 เท่ากับ 0.025 คือของเสียลดลง 70% ตามแนวทางของซิกซ์ ซิกมา ที่ระดับอำนาจการทดสอบ (Power) 0.90 เลือกเป็นการทดสอบแบบทางเดียวพบว่า ต้องใช้ขนาดตัวอย่าง 254 ตัวขึ้นไป

3.3.3 การวิเคราะห์ความแตกต่างของอัลกอริทึมในการหาเลนส์เม้นท์ออฟเซต

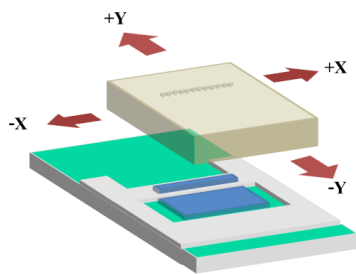
กระบวนการวางเลนส์คือ การปรับแนวแกนแสง (Optical Alignment) ระหว่างเลเซอร์ VCSEL และเลนส์ที่ส่งผลโดยตรงต่อระดับกำลังแสงขาออก กล่าวคือ ถ้าตำแหน่งกึ่งกลางของบริเวณแอคทีฟของเลเซอร์ VCSEL กับเลนส์ตรงกัน Tx เอนจินก็จะมีกำลังแสงขาออกที่สูงในทางตรงกันข้าม หากตำแหน่งของ VCSEL และเลนส์คลาดเคลื่อนกัน ก็จะทำให้กำลังแสงขาออกต่ำลงหรือไม่มีกำลังแสงขาออกเลย เนื่องจากเลนส์ไม่สามารถรวมแสงที่เปลี่ยนจากบริเวณแอคทีฟเลเซอร์ VCSEL ได้ ความท้าทายของกระบวนการวางเลนส์คือ จะต้องทำให้เลเซอร์ VCSEL และเลนส์ทั้ง 12 ช่องสัญญาณตรงกัน เพื่อให้ Tx เอนจินมีความสามารถในการส่งข้อมูลที่ระดับความเร็วรวม 100Gb/s ด้วยข้อดีของเทคนิคการทำเลนส์ออนไลน์แบบแพสซีฟ คือความเร็วและราคาถูกเมื่อเทียบกับเทคนิคการทำเลนส์ออนไลน์แบบแอ็กทีฟ ทำให้เทคนิคนี้ถูกเลือกมาใช้ในการกระบวนการผลิตในโรงงานกรณีศึกษา อย่างไรก็ตาม วิธีการวางตำแหน่งเลนส์แบบแพสซีฟนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ คือ เครื่องจักรที่ใช้จะต้องมีความละเอียดและความแม่นยำสูงหลักการคือ เครื่องจักรจะอ่านภาพเลเซอร์ VCSEL ที่ช่องสัญญาณที่ 1 และ 12 ด้วยกล้องตัวบน (High power camera) จากนั้นคำนวณจุดกึ่งกลางระหว่างช่องสัญญาณที่ 1 และ 12 ของเลเซอร์ VCSEL ส่วนกล้องอีกตัวจะทำหน้าที่อ่านภาพไมโครเลนส์อาเรียจจากมุมมองด้านล่าง (Bottom camera) ที่ช่องสัญญาณที่ 1 และ 12 โดยเทียบกับภาพอ้างอิงเช่นเดียวกัน แล้วคำนวณหาจุดกึ่งกลางของเลนส์ระหว่างช่องสัญญาณที่ 1 และ 12 แสดงด้วยกากบาทสีชมพูในรูปที่ 8



รูปที่ 7 หลักการวางตำแหน่งเลนส์ด้วยเทคนิคแพสซีฟ

ลำดับถัดไป โปรแกรมจะวางตำแหน่งโดยให้กากบาท สีชมพูบนเลนส์และเลเซอร์ VCSEL ตรงกัน ถ้าซ้อนทับกันพอดีถือเป็นตำแหน่ง (0, 0) แต่หากมีการตั้งค่า (X, Y) ตำแหน่งอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ (0, 0) เครื่องจักรก็จะคำนวณแล้วเลื่อนเลนส์ไปในตำแหน่ง (X, Y) ให้ตรงตามที่ป้อนค่าไว้ในเครื่องจักร เรียกว่า (X, Y) เหล่านี้ว่า อไลน์เมนต์ออฟเซต (Alignment offset) มีหน่วยเป็น μm

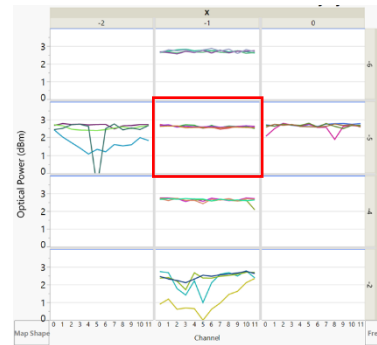
ในอุดมคติการเล็งตำแหน่งกึ่งกลางของเลเซอร์ VCSEL เข้ากับกึ่งกลางของเลนส์ควรจะเป็นจุดที่ดีที่สุดแสงจาก VCSEL เดินทางเข้าสู่เลนส์ และแสดงผลเป็นค่ากำลังแสงขาออกที่ผ่านข้อกำหนดของลูกค้าได้ แต่ในทางปฏิบัติ การผลิตเลนส์ที่มีความโค้งผิวแบบแอสเฟอริคัล (Aspherical lens) มีความซับซ้อนและคลาดเคลื่อนได้มาก จึงทำให้ไม่สามารถใช้ออฟเซต (0, 0) μm แล้วได้กำลังแสงขาออกที่สูงพอจะผ่านข้อกำหนดเฉพาะของลูกค้าได้ เลนส์ล็อตใด ๆ จะมีค่าอไลน์เมนต์ออฟเซตเฉพาะซึ่งได้จากการทดลอง เรียกว่า การทดลองเพื่อหาอไลน์เมนต์ออฟเซตที่เหมาะสม ซึ่งโดยปกติการทดลองชนิดนี้จะเกิดขึ้นทุก ๆ ครั้งเมื่อเปลี่ยนเลนส์ล็อตใหม่ หลักการคือทดลองวางตำแหน่งเลนส์ที่ค่าออฟเซต (X, Y) ที่แตกต่างกัน แล้วติดตามกำลังแสงขาออกของงานเหล่านั้น ตำแหน่ง (X, Y) ที่ให้กำลังแสงขาออกที่ดีที่สุด ซึ่งจะต้องประกอบด้วย 2 เงื่อนไขคือ กำลังแสงขาออกแต่ละช่องสัญญาณต้องสูงพอ และอยู่ในระดับสม่ำเสมอในทุก ๆ ช่องสัญญาณ (Linearity) จะถูกเลือกเป็นอไลน์เมนต์ออฟเซตของเลนส์ล็อตนั้น ๆ



รูปที่ 8 หลักการของการหาอไลน์เมนต์ออฟเซต

ในอดีตเทคนิคการเลือกออฟเซตยังไม่มีหลักการที่แน่นอน เพียงแต่ทดลองวางเลนส์ด้วยออฟเซตที่ต่างกัน 5-10 ออฟเซต เมื่อเจอจุดที่กำลังแสงขาออกสูงพอและเป็น

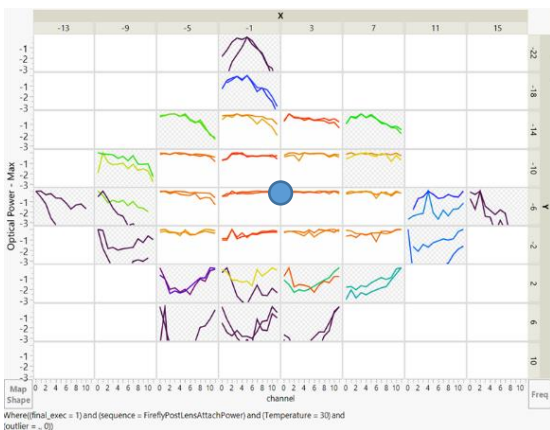
เส้นตรง ก็จะเลือกใช้ค่าออฟเซตที่จุดนั้นเลย ยกตัวอย่าง การหาออฟเซตด้วยวิธีเดิม วิศวกรทดลองทั้งหมด 6 ออฟเซต ดังรูปที่ 10 ได้แก่ (-2,-5), (-1,-6), (-1,-5), (0,-5), (-1,-4), และ (-1,-2) แสดงผลกำลังแสงขาออกทั้ง 12 ช่องสัญญาณ ด้วยกราฟเส้น ซึ่งจะเห็นว่า การทดลองทำที่ระยะความกว้างในแกน X เพียง 2 μm และ 3 μm ในแกน Y โดยใช้ 4 ตัวอย่างในแต่ละจุด จากผลระดับกำลังแสงขาออกที่ได้จากการทดลอง พบว่า จุด (-1, -5) μm มีเสถียรภาพของกำลังแสงขาออกดีที่สุดในทุก ๆ ช่องสัญญาณ จึงเป็นจุดที่วิศวกรเลือกให้เป็นค่าอไลน์เมนต์ออฟเซตของเลนส์ล็อตนี้ แต่ก็พบว่ายังมีของเสียเกิดขึ้นในขั้นตอนวัดกำลังแสงขาออกจำนวนมาก แม้ว่าจะวางเลนส์ด้วยค่า (X,Y) ที่คิดว่าเหมาะสมแล้วก็ตาม หรืออีกนัยหนึ่งคือ วิธีการนี้ยังไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ



รูปที่ 9 ผลการหาออฟเซตด้วยวิธีการแบบเก่า

ทีมวิศวกรจึงพยายามปรับปรุงอัลกอริทึมการหาอไลน์เมนต์ออฟเซตให้ดีขึ้นโดยมีแนวคิดที่ว่า เพื่อให้การเลือกใช้ออฟเซตเป็นไปอย่างเหมาะสมถูกต้องแม่นยำอย่างแท้จริง เราควรต้องทราบระยะใช้งาน (Processing window) ของเลนส์ ความหมายคือ การทดลองวางตำแหน่งจะต้องเกิดในแกน X และ Y ที่กว้างพอจนเริ่มเห็นการถดถอยของกำลังแสงขาออก เพื่อให้มั่นใจว่าจุดออฟเซตที่เลือกอยู่ในบริเวณกึ่งกลางระยะใช้งาน ที่เมื่อรวมกับความคลาดเคลื่อนของเครื่องจักรแล้วยังสามารถให้กำลังแสงขาออกที่สูงและสม่ำเสมอได้ ตัวอย่างการใช้อัลกอริทึมใหม่สำหรับหาอไลน์เมนต์ออฟเซตสำหรับเลนส์ล็อต A เช่นเดียวกัน แต่วิธีการใหม่จะทดลอง โดยขยับตำแหน่งการ

ปรับตั้งค่าออฟเซตที่แกน X และ Y ทีละ 4 μm และทดลองช่วงออฟเซตที่กว้างขึ้น ในกรณีนี้คือ 28 μm ในแกน X และ Y บริเวณที่เป็นเส้นตรง คือจุดออฟเซตที่ให้กำลังแสงขาออกสม่ำเสมอทั้ง 12 ช่องสัญญาณสังเกตว่าจะอยู่ในลักษณะเส้นตรง กรณีนี้คือที่ -5 μm ถึง 7 μm ในแกน X และที่ -10 μm ถึง 2 μm ในแกน Y แต่บริเวณที่กำลังแสงขาออกเริ่มถดถอย และเริ่มไม่เป็นเส้นตรง เป็นเส้นโค้ง หรือมีความขุ่นยกตัวอย่าง



รูปที่ 10 ผลการทดลองหาออฟเซตด้วยวิธีการใหม่

- 1) ตำแหน่ง (-1, -22) μm กราฟมีลักษณะโค้งคว่ำ คือช่องสัญญาณหัวและท้ายมีกำลังแสงขาออกต่ำ
- 2) ตำแหน่ง (-1, 6) μm กราฟมีลักษณะโค้งหงาย คือช่องสัญญาณที่ 4-8 มีกำลังแสงขาออกต่ำ
- 3) ตำแหน่ง (-9, -6) μm กราฟมีลักษณะยกสูงที่ช่องสัญญาณแรก ๆ และลดต่ำในช่องสัญญาณท้าย ๆ
- 4) ตำแหน่ง (11, -6) μm กราฟมีลักษณะลดต่ำที่ช่องสัญญาณแรก ๆ และยกสูงในช่องสัญญาณท้าย ๆ

จากผลการทดลองหาไลน์แมนท์ออฟเซตด้วยวิธีการใหม่ วิศวกรเลือกออฟเซต (0,-8) μm เป็นจุดที่เหมาะสม เพราะเป็นจุดที่เห็นแนวโน้มข้อมูลแล้วว่าอยู่ที่กึ่งกลางย่านใช้งาน

จากนั้นทดลองวางตำแหน่งเลนส์ลีดเดียวกันนี้ ด้วยออฟเซตที่ได้จากวิธีการเก่า คือ (-1,-5) μm และที่ได้จาก

วิธีการใหม่คือ (0,-8) μm แล้วติดตามสัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออก

$$H_0 : p_1 = p_2$$

$$H_1 : p_1 > p_2$$

โดยที่

p_1 แทนสัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกเมื่อติดเลนส์ด้วยออฟเซตที่เลือกจากวิธีการเดิม

p_2 แทนสัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกเมื่อติดเลนส์ด้วยออฟเซตที่เลือกจากวิธีการใหม่

สัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกถูกคำนวณดังสมการที่ 2

$$p = \frac{x}{n} \tag{2}$$

โดยที่

p คือ สัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออก

x คือ จำนวนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออก

n คือ จำนวนงานทั้งหมดที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4 การทดสอบสัดส่วนของเสียเมื่อใช้วิธีการหาออฟเซตวิธีการเดิมและวิธีการใหม่

ออฟเซต	สถิติทดสอบ	x	n	p	p-value
วิธีการเก่า(-1,-5)	p_1	205	3873	0.053	0.000
วิธีการใหม่(0,-8)	p_2	5	2077	0.002	

หมายเหตุ

x (ของเสีย : ขึ้น)

n (จำนวนตัวอย่าง : ขึ้น)

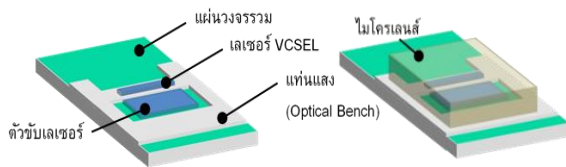
$p(x/n)$

ผลการทดสอบทางสถิติพบว่า $p\text{-value} = 0.000$ น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักหรือ H_0 ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ค่าออฟเซตที่ได้จากวิธีการหาออฟเซตแบบเก่าให้สัดส่วนของเสียมากกว่า การติดเลนส์ด้วยออฟไลน์แมนท์ออฟเซตที่ได้จากอัลกอริทึมแบบใหม่ ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 10 ก็ จะเห็นว่าแม้ที่จุด (-1, -5) μm จะเป็นจุดที่มีกำลังแสงขาออกสูงและค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่จุดออฟเซตข้างเคียงซึ่งห่างกันเพียงแค่ 1 μm ในแนวแกน X ให้กำลังแสงขาออกที่ไม่คงที่

มีความแปรปรวน และหากพิจารณาพร้อมกับความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นได้จากเครื่องจักร ($\pm 3 \mu\text{m}$) ก็พบว่ามีโอกาสที่ตำแหน่งจะคลาดเคลื่อนไปเป็น $(-2, -5) \mu\text{m}$ ได้ตามสเปกความสามารถของเครื่องจักร จึงทำให้สัดส่วนของเสียจากการใช้ออปเซ็ท $(-1, -5) \mu\text{m}$ สูงกว่าการใช้ออปเซ็ท $(0, -8) \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของย่านใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 11 หรืออาจกล่าวได้ว่าข้อมูลจากการหาโอไลน์เมนต์ออปเซ็ทด้วยวิธีการแบบเก่าไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการตัดสินใจอย่างถูกต้อง

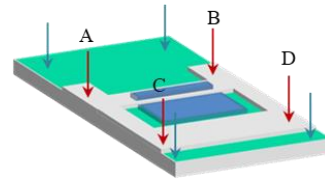
3.3.4 ความแตกต่างของแผ่นวงจรรวม

กระบวนการประกอบ Tx เอนจินที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น หลักสำคัญคือการวางองค์ประกอบแอ็กทีฟ (Active components) ได้แก่ เลเซอร์ VCSEL, ตัวขับสัญญาณ (Driver) ลงบน แท่นแสง (Optical bench) ซึ่งวางอยู่บนแผงวงจรรวม และเมื่อครบเลนส์ลงบนแท่นแสงจะได้ลักษณะดังรูปที่ 12 แท่นแสงทำหน้าที่เป็นส่วนฐานสำหรับการวางเลนส์ ที่ส่งผลกระทบต่อระนาบของการวางเลนส์ และในท้ายที่สุดอาจส่งผลกระทบต่อระดับกำลังแสงขาออก



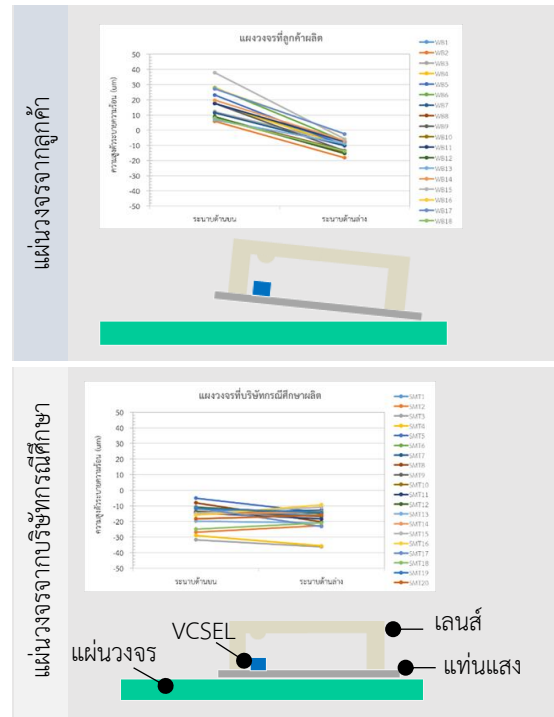
รูปที่ 11 อธิบายองค์ประกอบของ Tx เอนจิน

การทดลองนี้ทำการวัดระดับความสูงและระนาบของแท่นแสงของแผ่นวงจรรวมที่ผลิตมาจาก 2 แหล่งที่แตกต่างกัน ด้วยเครื่องมือวัดความละเอียดสูง Nikon NEXIV VMZ-R6555 ด้วยฟังก์ชัน AF เลเซอร์ เพื่อวัดระดับความสูงของแท่นแสงเทียบกับระดับของแผ่นวงจรรวม ซึ่งแสดงด้วยลูกศรสีแดงและสีน้ำเงิน ตามลำดับ ในตำแหน่งทั้ง 4 ได้แก่ A, B, C, และ D ดังรูปที่ 13



รูปที่ 12 แสดงตำแหน่งการวัดความสูงของแท่นแสงเทียบกับแผ่นวงจรรวม

หาค่าเฉลี่ยจุด A และ B เพื่อเป็นตัวแทนความสูงแท่นแสงด้านบน และค่าเฉลี่ยจุด C และ D เป็นตัวแทนความสูงของแท่นแสงด้านล่าง แล้วพล็อตกราฟค่าเฉลี่ยความสูงของแท่นแสงระหว่างแผ่นวงจรรวมที่ผลิตจากลูกค้าและบริษัทกรณีสึกษา



รูปที่ 13 ผลการวัดระนาบแท่นแสงและการจำลองการวางตัวของแท่นแสงเลเซอร์ VCSEL และเลนส์

ทดลองติดตั้งเลนส์ด้วยเลนส์ล็อตเดียวกัน เครื่องจักรและโอไลน์เมนต์ออปเซ็ทเดียวกัน แล้วติดตามระดับกำลังแสงขาออกของกลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่ม ทดสอบว่าการที่แท่นแสงมีการวางตัวไม่ขนานซึ่งเป็นลักษณะที่ปรากฏในแผ่นวงจรที่ผลิตจากลูกค้า มีนัยสำคัญทางสถิติต่อสัดส่วนของเสียมากกว่าเมื่อแท่นแสงวางตัวขนานหรือไม่

$$H_0 : p_1 = p_2$$

$$H_1 : p_1 > p_2$$

โดยที่

p_1 แทนสัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกเมื่อใช้แผ่นวงจรรวมที่ผลิตโดยลูกค้า

p_2 แทนสัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกใช้แผ่นวงจรรวมที่ผลิตจากบริษัทกรณีศึกษา

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบทางสถิติสัดส่วนของเสียที่เกิดจากการใช้แผ่นวงจรที่ผลิตจากแหล่งที่แตกต่างกัน

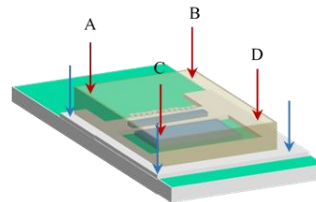
แหล่งผลิตแผ่นวงจร	สถิติทดสอบ	x	n	p	p-value
จากบริษัทลูกค้า	p_1	490	1960	0.250	0.000
จากบริษัทกรณีศึกษา	p_2	101	3740	0.027	

ผลการทดสอบทางสถิติ พบว่า $p\text{-value} = 0.000$ น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักหรือ H_0 ได้ สรุปได้ว่า สัดส่วนของเสียเมื่อติดเลนส์บนแผ่นวงจรรวมจากลูกค้ามากกว่าเมื่อติดเลนส์บนแผ่นวงจรรวมที่ผลิตจากบริษัทกรณีศึกษา แม้งานทั้งสองกลุ่มจะใช้เลนส์ออนไลน์เมนทอเฟสเดียวกัน วิศวกรจึงทำการปรับค่าออนไลน์เมนทอเฟสเฉพาะให้สำหรับแผ่นวงจรจากลูกค้า พบว่า ของเสียลดลงจาก 25% เหลือ 3% แสดงให้เห็นว่าการใช้แผ่นวงจรรวมที่มีระนาบของแท่นแสงแตกต่างกันก็สามารถควบคุมให้สัดส่วนของเสียน้อยลงได้ หากเลือกใช้ออนไลน์เมนทอเฟสที่เหมาะสม

3.3.5 ระนาบของเลนส์ในแนวแกน Z

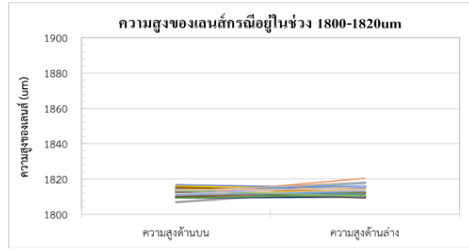
ระนาบในแนวแกน Z หรือในเชิงเทคนิคการผลิตเรียก บอนด์ไลน์ (Bond line) เป็นตัวแปรสำคัญ ซึ่งถูกกล่าวถึงในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวางตำแหน่งแบบความแม่นยำสูง (High Precision Alignment) แต่ในข้อกำหนดจากลูกค้า ไม่มีการกำหนดในหัวข้อนี้ และไม่เคยมีการควบคุมมาก่อน อย่างไรก็ตามนักวิจัยมีความสนใจต่อค่าคลาดเคลื่อนในแกน Z ที่ยังสามารถยอมรับได้ และไม่ส่งผลให้เกิดของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออก ดำเนินการหาเบสไลน์ของความสูงเลนส์ที่ยังให้กำลังแสงขาออกอยู่ในเกณฑ์ที่ผ่านข้อกำหนดเฉพาะ โดยสุ่มงาน 100 ตัวที่ถูก

ทดสอบว่ามีกำลังแสงขาออกผ่านข้อกำหนดเฉพาะ แล้ววัดยืนยันความสูงของเลนส์เทียบกับแท่นแสงโดยใช้เครื่องมือวัดความละเอียดสูง Nikon NEXIV VMZ-R6555 วัดความสูงของของเลนส์ ที่ 4 ตำแหน่ง ได้แก่ A, B, C, และ D แสดงด้วยลูกศรสีแดง เทียบกับระดับของแท่นแสง (Optical bench) ทั้ง 4 มุมแสดงด้วยลูกศรสีน้ำเงิน หาค่าเฉลี่ยจุด A และ B เพื่อเป็นตัวแทนความสูงของเลนส์ด้านบน และค่าเฉลี่ยจุด C และ D เป็นตัวแทนความสูงของเลนส์ด้านล่าง พบว่างานที่ผ่านข้อกำหนดเฉพาะทางกำลังแสงขาออกมีระดับความสูงของเลนส์เทียบกับแท่นแสงอยู่ที่ประมาณ 1810-1820 μm และความสูงแท้จริงของเลนส์มีค่าเท่ากับ 1800 μm

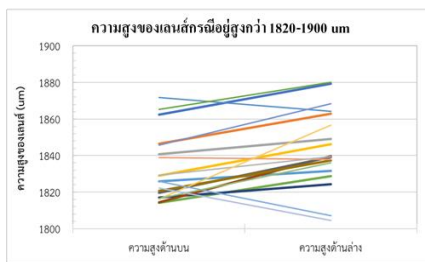


รูปที่ 14 การวัดความสูงของเลนส์เทียบกับแท่นแสง

งานวิจัย [7] ที่อธิบายความผิดพลาดในแกน Z ว่ายอมรับได้ที่ $\pm 60 \mu\text{m}$ แต่ค่าความคลาดเคลื่อนอาจมีความแตกต่างกันได้ ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่ใช้ ความหนาของไดโอด ตลอดจนระยะโฟกัสของเลนส์ จึงทดลองปรับตั้งค่าเครื่องติดเลนส์ให้บอนด์ไลน์มีค่ามากกว่า 1820 μm เพื่อพิสูจน์ว่าความคลาดเคลื่อนที่เกินกว่า 1820 μm ทำให้เกิดสัดส่วนของเสียที่มากขึ้นหรือไม่ ในกลุ่มตัวอย่างที่ปกติพบว่าความสูงของเลนส์เมื่อเทียบกับแท่นแสงจะอยู่ในช่วง 1810-1820 μm และในกลุ่มตัวอย่างที่ความสูงของเลนส์ $> 1820 \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 16 และ 17 ตามลำดับ



รูปที่ 15 กลุ่มตัวอย่างที่สูงของเลนส์ในแนวแกน Z อยู่ในช่วง 1810-1820 μm



รูปที่ 16 กลุ่มตัวอย่างที่ความสูงของเลนส์ >1820 μm

ติดตามระดับกำลังแสงขาออกของกลุ่มตัวอย่างทั้งสอง เมื่อความสูงของเลนส์ในแกน Z เทียบกับตำแหน่งแตกต่างกันสมมติฐานการทดสอบคือ

$$H_0 : p_1 = p_2$$

$$H_1 : p_1 > p_2$$

โดยที่

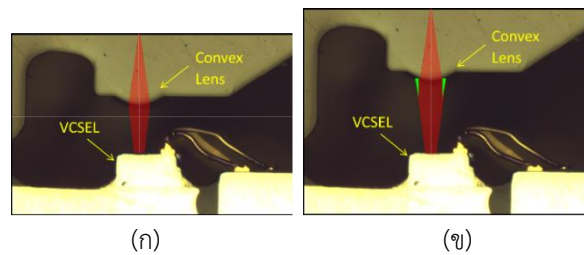
p_1 แทนสัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออก เมื่อความสูงของเลนส์ >1820 μm

p_2 แทนสัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออก เมื่อความสูงของเลนส์ อยู่ในช่วง 1810-1820 μm

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบทางสถิติสัดส่วนของเสียเมื่อความสูงในแนวแกน Z ของเลนส์แตกต่างกัน

ความสูงของเลนส์ ในแนวแกน Z	สถิติ ทดสอบ	x	n	p	p-value
>1820 μm	p_1	13	38	0.342	0.000
1810-1820 μm	p_2	5	1349	0.004	

ผลการทดสอบทางสถิติพบว่า $p\text{-value} = 0.000$ น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักหรือ H_0 ได้ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ความสูงของเลนส์เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่อยู่ในช่วง >1820 μm จะมีสัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกสูงกว่าเมื่อความสูงของเลนส์อยู่ในระดับ 1810-1820 μm จากพื้นของตำแหน่ง เมื่อพิจารณาพร้อมกับความสูงของตัวเลนส์เองที่มีขนาด 1800 μm แสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนในแกน Z ที่ยอมรับได้คือ $\leq 20 \mu\text{m}$



รูปที่ 17 ภาพตัดขวางของ Tx เอนจิน แสดงให้เห็นการวางตัวของเลนส์และเลเซอร์ VCSEL

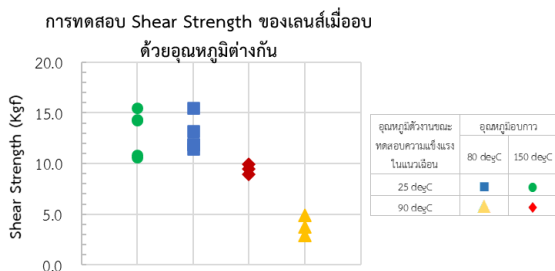
สามารถอธิบายเหตุการณ์นี้ได้จากภาพตัดด้านข้าง (Cross-sectional) เมื่อระยะความสูงของเลนส์จากพื้นตำแหน่งแสงมากขึ้น ทำให้ระยะห่างระหว่างจุดโฟกัสของเลนส์นูนกับ VCSEL เลเซอร์มากขึ้นตามไปด้วย ด้วยคุณสมบัติของลำแสงเลเซอร์ที่สามารถบานออกตามธรรมชาติ (Diverge) ทำให้จะต้องมีลำแสงบางส่วนสูญเสียไปแสดงด้วยแถบสีเขียวในรูปที่ 18 (ข) เพราะเลนส์นูนไม่สามารถรวมแสงที่เปล่งจากเลเซอร์ทั้งหมดเข้าสู่เส้นไฟเบอร์ได้ ส่งผลให้ระดับกำลังแสงขาออกต่ำลง เลเซอร์ทั้งหมดเข้าสู่เส้นไฟเบอร์ได้ ส่งผลให้ระดับกำลังแสงขาออกต่ำลง

3.3.6 คอนดิชันการอบกาวให้แห้ง

ในกระบวนการติดเลนส์ Tx เอนจิน จะต้องผ่านการเข้าอบเพื่อทำให้กาวอีพ็อกซีที่ทำหน้าที่ยึดเลนส์ไว้กับตำแหน่งแห้งสนิท ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรง และป้องกันการขยับของเลนส์ ก่อนส่งไปกระบวนการถัดไป แต่เนื่องจากข้อมูลทางเทคนิคของกาวอีพ็อกซีชนิดนี้ระบุเงื่อนไขการอบกาวไว้ 2 เงื่อนไข ได้แก่

- 1) อุณหภูมิ 80°C เวลา 60 นาที ซึ่งเป็นคอนดิชันที่ใช้ในปัจจุบัน
- 2) อุณหภูมิ 150°C เวลา 30 นาที

ทีมวิศวกรจึงมีความสนใจว่า คอนดิชันการอบที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อความแข็งแรง และโอกาสที่ทำให้เลนส์ขยับได้หรือไม่ จึงทดสอบอบกาวที่ 80°C และ 150°C แล้วทดสอบความแข็งแรงในแนวเฉือน (Shear strength) ที่ 2 เงื่อนไขคือ ในขณะที่ตัวงานอุณหภูมิ 25°C และทำให้ตัวงานร้อนขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 90°C ขณะทดสอบเพื่อจำลองให้ตัวงานอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นระดับอุณหภูมิที่ตัวงานต้องผ่านในกระบวนการประกอบถัด ๆ ไป จึงจำเป็นต้องทดสอบความแข็งแรงแนวเฉือนที่สภาวะนี้ด้วย

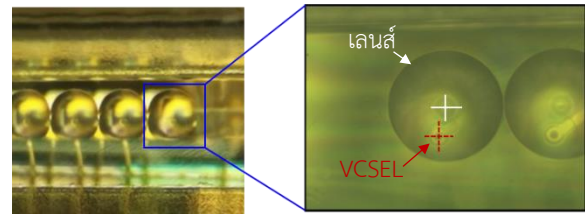


รูปที่ 18 ผลการทดสอบความแข็งแรงในแนวเฉือน

พบว่าที่อุณหภูมิ 25°C ค่าความแข็งแรงไม่ต่างกันไม่ว่างานจะเข้าอบจากอุณหภูมิ 80°C หรือ 150°C แสดงด้วยจุดสี่เหลี่ยมและวงกลม ตามลำดับ แต่เมื่อให้ความร้อนไปที่ตัวงานประมาณ 90°C ขณะทดสอบแรงเฉือน พบว่าค่าความแข็งแรงลดลง แต่การเข้าอบที่อุณหภูมิ 150°C ซึ่งแสดงด้วยจุดข้าวหลามตัดจะให้ความแข็งแรงที่ดีกว่าการอบที่ 80°C แสดงด้วยจุดสามเหลี่ยมหนึ่งเท่าตัว ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การอบที่อุณหภูมิ 150°C นาน 30 นาทีทำให้ความสามารถของกาวอีพ็อกซีในการยึดเกาะเลนส์ให้อยู่กับแท่นแสงดีกว่า แม้ตัวงานจะอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูง

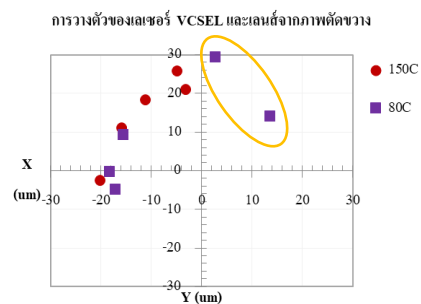
ดำเนินการศึกษาต่อด้วยการวิเคราะห์ภาพตัดขวาง (Cross sectional) ของตัวงานที่ถูกอบด้วย 80°C และ 150°C อย่างละ 5 ตัว โดยใช้กล้อง Nikon NEXIV VMZ-R6555 วัดว่าจุดกึ่งกลางเลนส์กับกึ่งกลางเลเซอร์ VCSEL วางตัวอยู่ในลักษณะอย่างไร ตัวอย่างรูปที่ 20 กากบาท

เส้นทึบแทนตำแหน่งกึ่งกลางเลนส์ และกากบาทเส้นประแทนตำแหน่งกึ่งกลางเลเซอร์ VCSEL รูปตัวอย่างนี้แสดงว่าเลเซอร์ VCSEL อยู่ห่างจากกึ่งกลางเลนส์ไปทางตำแหน่งล่างซ้าย หรือ (-X, -Y)



รูปที่ 19 ภาพตัดขวางของเลเซอร์ VCSEL และเลนส์

พล็อตกราฟจุดตัดแกน X-Y (Scatter plot) เพื่อพิจารณาแนวการวางตัวของเลนส์และเลเซอร์ VCSEL



รูปที่ 20 ผลการวัดตำแหน่งของเลนส์และเลเซอร์ VCSEL จากภาพตัดขวาง

ผลการทดลองพบว่า การเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 150°C ซึ่งแสดงด้วยจุดวงกลม การวางตัวของเลนส์และ VCSEL จะเกาะกลุ่มกว่าเมื่อเทียบกับการอบที่อุณหภูมิ 80°C แสดงด้วยจุดสี่เหลี่ยมที่มี 2 ใน 5 ข้อมูลที่หลุดออกจากกลุ่มชี้ให้เห็นว่า การอบที่ให้เสถียรภาพในการยึดเกาะระหว่างเลนส์และแท่นแสงมากกว่า คือที่ 150°C/30 นาที

ทดลองติดเลนส์โดยใช้เลนส์ลีดและออฟเซตเดียวกันแต่นำเข้าอบที่คอนดิชัน 80°C/60 นาที และ 150°C/30 นาที แล้วติดตามสัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกของกลุ่มตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่ม มีสมมติฐานการทดสอบคือ

$$H_0 : p_1 = p_2$$

$$H_1 : p_1 > p_2$$

โดยที่

p_1 แทนสัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกเมื่ออบกาวให้แห้งด้วย 80°C/60 นาที

p_2 แทนสัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกเมื่ออบกาวให้แห้งด้วย 150°C/30 นาที

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบทางสถิติสัดส่วนของเสียเมื่อเข้าอบกาวที่คอนดิชันต่างกัน

คอนดิชันการอบกาวให้แห้ง	สถิติทดสอบ	x	n	p	p-value
80 C/ 60 นาที	p_1	124	4941	0.025	0.000
150 C/ 30 นาที	p_2	29	2529	0.011	

ผลการทดสอบทางสถิติ พบว่า $p\text{-value} = 0.000$ น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$ สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักหรือ H_0 ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การอบกาวให้แห้งด้วย 80°C/60 นาที ให้สัดส่วนของเสียมากกว่าเมื่อใช้ 150°C/30 นาที

สรุประยะวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยการทดสอบทางสถิติ พบว่าทั้ง 4 ปัจจัย ได้แก่ 1) อัลกอริทึมของการหาไลน์เมนท้อฟเซต 2) ระบายของแท่นแสงบนแผ่นวงจรรวม 3) ระบายของเลนส์ในแนวแกน Z 4) คอนดิชันการอบกาวให้แห้ง ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออก

4. ระยะการปรับปรุงแก้ไขปัญหา

ดำเนินการปรับปรุงปัจจัยนำเข้าไปที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการวางเลนส์ ซึ่งผ่านการทดสอบทางสถิติแล้วว่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออก ดังนี้

4.1 การปรับเปลี่ยนอัลกอริทึมการหาไลน์เมนท้อฟเซต

กำหนดวิธีการหาไลน์เมนท้อฟเซตด้วยวิธีการมาตรฐาน คือ ทดลองวางตำแหน่งเลนส์ที่ออฟเซตต่าง ๆ โดยให้มีค่าระยะจากด้าน -x ถึง +x และจาก -y ถึง +y กว้างอย่างน้อย 20 μm ติดตามผลการวัดกำลังแสงขาออกแล้วสร้างเป็นไลน์เมนท้อฟเซตกริด (Grid) ดังแสดงแล้วในรูปที่ 11 เพื่อให้สามารถเห็นระยะใช้งาน (Processing

window) ได้ชัดเจน อันเป็นเครื่องมือช่วยให้ตัดสินใจเลือกจุดต่อไลน์เมนท้อฟเซตได้อย่างถูกต้อง

4.2 การควบคุมแผ่นวงจรรวมที่มาจากแหล่งผลิตที่ต่างกัน

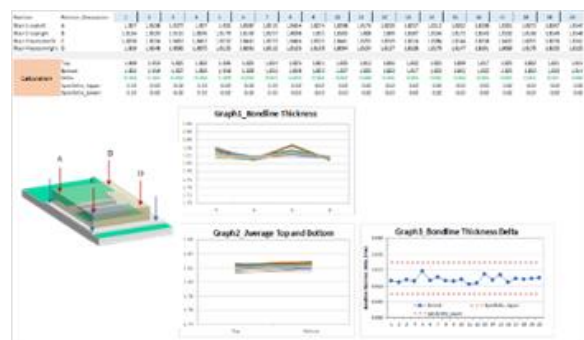
กำหนดให้ที่กระบวนการรับเข้า (Incoming process) ต้องแยกแผ่นวงจรที่ผลิตโดยลูกค้า และที่ผลิตเองภายในก่อนนำเข้ากระบวนการผลิต และกำหนดให้มีการปรับตั้งค่าออฟเซตอย่างเฉพาะเจาะจงสำหรับรองรับการผลิต Tx เอนจินที่ใช้แผ่นวงจรรวมที่ผลิตจากลูกค้าและแผ่นวงจรรวมที่ผลิตได้ในบริษัทกรณีศึกษา

4.3 การเปลี่ยนคอนดิชันอบกาว

เปลี่ยนคอนดิชันการอบกาวให้แห้งจาก 80°C/60 นาที เป็น 150°C/30 นาที ซึ่งเป็นคอนดิชันที่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทำให้กาวอีพ็อกซีมีความสามารถในการยึดเกาะเลนส์ให้อยู่กับแท่นแสงได้ดีกว่า

4.4 การควบคุมระนาบในแกน Z ของเลนส์

กำหนดให้สุ่มตรวจเช็คระนาบของเลนส์ในแกน Z หรือบอนด์ไลน์ (Bond line) ก่อนเริ่มปฏิบัติงานในทุก ๆ กะ จำนวน 20 ตัว เพื่อเป็นมาตรการป้องกัน (Preventive action) โดยวัดระยะความสูงของเลนส์เทียบกับแท่นแสงของแผ่นวงจรรวมด้วยเครื่อง Nikon NEXIV VMZ-R6555 บันทึกผลการวัดลงในแบบฟอร์มที่วิศวกรจัดทำไว้ ความสูงของเลนส์จากแท่นแสงต้องอยู่ในช่วง 1810-1820 μm และเลนส์จะต้องวางตัวในลักษณะขนาน คือค่าเฉลี่ยความสูงของเลนส์ด้านบนและด้านล่างจะต้องต่างกันไม่เกิน $\pm 15 \mu\text{m}$



รูปที่ 21 แบบฟอร์มการตรวจเช็คความสูงของเลนส์ก่อนเริ่มปฏิบัติงานแต่ละกะ

อ้างอิงสรุปแนวทางการปรับปรุงแก้ไขปัจจัยนำเข้าแต่ ละปัจจัยจากตารางที่ 8

5. ระยะเวลาควบคุม

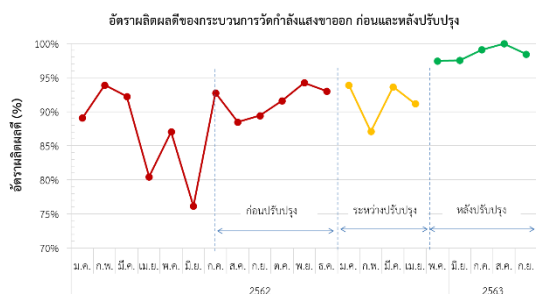
ติดตามสัดส่วนของเสียและอัตราผลิตผลดีของ กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกในกระบวนการประกอบ

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบกระบวนการวางแผนสีก่อนและหลังการปรับปรุงในแต่ละปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของ เสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออก

ลำดับ	ปัจจัย	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
1	อัลกอริทึมการหาไลน์เมทออฟ เซ็ต	หาจุดที่กำลังแสงขาออกสูงสุด <ul style="list-style-type: none"> ความกว้างแกน X = 2 um ความกว้างแกน Y = 4 um 	หาจนเจอจุดที่กำลังแสงขาออกเริ่มลดลง (Edge) <ul style="list-style-type: none"> ความกว้างแกน X = 20 um ความกว้างแกน Y = 20 um
2	การควบคุมแผ่นวงจรรวมที่มาจาก แหล่งผลิตที่แตกต่างกัน	<ul style="list-style-type: none"> ไม่มีการแยกแผ่นวงจรรวมของลูกค้าและที่ ผลิตได้จากโรงงานกรีนศึกษาก่อนไหลเข้า กระบวนการประกอบ ใช้ไลน์เมทออฟเซตร่วมกัน 	<ul style="list-style-type: none"> แยกแผ่นวงจรรวมของลูกค้าและที่ผลิตได้ จาก โรงงานกรีนศึกษา ก่อนไหลเข้า กระบวนการประกอบ พิจารณาการหาไลน์เมทออฟเซตแยกกัน
3	ระนาบของเลนส์ในแกน Z (Bond line)	ไม่มีการควบคุม	<ul style="list-style-type: none"> ควบคุมบอนด์ไลน์ในช่วง 1800-1820 um กำหนดคให้สูมวัดบอนด์ไลน์ทุกคืนกะ (Shiftily)
4	คอนดิชันการอบกาว	<ul style="list-style-type: none"> 80 degC 60 นาที 	<ul style="list-style-type: none"> 150 degC 30 นาที

ตารางที่ 9 สัดส่วนของเสียหลังการปรับปรุงกระบวนการ

เดือน	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
จำนวนงานขาเข้า	10525	6569	3160	1760	4370
จำนวนของเสีย	267	161	28	0	68
สัดส่วนของเสีย (%)	2.54	2.45	0.89	0.00	1.56



รูปที่ 22 เปรียบเทียบอัตราผลิตผลดี ก่อนและหลังการปรับปรุง

Tx เอนจินหลังการปรับปรุง ตั้งแต่เดือน พฤษภาคม- กันยายน 2563 พบว่า ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของเสียอยู่ที่ 1.49% อ้างอิงจากตารางที่ 9 ลดลงจากค่าเฉลี่ยก่อน ปรับปรุงซึ่งสูงถึง 8.4% คิดเป็น 82%

รูปที่ 23 แสดงอัตราผลิตผลดีในช่วงก่อน ระหว่าง และหลังปรับปรุง พบว่ากระบวนการวัดกำลังแสงขาออกมี อัตราผลิตผลดีเฉลี่ยสูงขึ้น อยู่ที่ประมาณ 98.51% หลังการ ปรับปรุง

6. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ประยุกต์ใช้แนวทางซิกซ์-ซิกมา เพื่อ ปรับปรุงกระบวนการประกอบสายส่งสัญญาณทางแสง (Active Optical Cable) ระดับออปติคอลเอนจิน (Optical Engine Assembly) สำหรับตัวส่งสัญญาณ (Tx) แบบ 12 ช่องสัญญาณที่ความเร็ว 10Gb/s ต่อช่องสัญญาณ หรือ ระดับความเร็วรวม 100Gb/s โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลด สัดส่วนของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกหลังวาง เลนส์ ดำเนินงานวิจัยตามระยะการปรับปรุงที่แบ่งออกเป็น 5 ระยะ ได้แก่ ระยะการนิยามปัญหา (Define phase),

ระยะการวัด (Measure phase), ระยะการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analyze phase), ระยะการปรับปรุง (Improve phase), และระยะการควบคุม (Control phase) ได้ผลการแก้ไข้ปัญหาของเสียที่กระบวนการวัดกำลังแสงขาออกลดลงจาก 8.4% เหลือ 1.49% จึงสามารถสรุปได้ว่า งานวิจัยบรรจุวัดอุปกรณ์ สามารถลดของเสียในกระบวนการประกอบสายส่งสัญญาณทางแสงด้วยแนวทางชิคซ์ ชิคมมา

จุดพิจารณาประการหนึ่ง คืออัลกอริทึมใหม่จะใช้เวลาในการทดลองมากกว่า ตารางที่ 10 แสดงเวลาที่เกี่ยวข้องกับการทำออนไลน์เม้นท์ออฟเซตซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือเวลาที่ใช้ติดตั้งและเวลาที่ใช้ในการวัดระดับกำลังแสงขาออก

ตารางที่ 10 คำนวณเวลารวมที่ใช้สำหรับการทำออนไลน์เม้นท์ออฟเซตแบบวิธีการเก่าและใหม่

เวลาที่ใช้ติดตั้ง (วินาที/ตัว)	เวลาที่ใช้วัดระดับ กำลังแสงขาออก (วินาที/ตัว)	เวลารวม (วินาที/ตัว)
70	180	250

รูปแบบการหาออนไลน์เม้นท์ออฟเซต	จำนวนออฟเซต	จำนวนตัวอย่าง/จุด	จำนวนตัวอย่างทั้งหมด	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)
วิธีการเก่า	6	4	24	1.7
อัลกอริทึมใหม่	32	2	64	4.4

พบว่า อัลกอริทึมใหม่ต้องใช้จำนวนตัวอย่างมากกว่าแบบเก่าถึง 40 ตัว และต้องใช้เวลาในการทดลองมากกว่าวิธีการเก่าถึง 2.8 ชั่วโมง แต่หากเปรียบเทียบกับความสามารถในการลดของเสียจาก 5.2% เหลือ 0.2% ดังแสดงในการคำนวณข้อ 3.3.3 แล้ว ถือว่าอัลกอริทึมการหาออนไลน์เม้นท์ออฟเซตวิธีการใหม่คุ้มค่าที่จะดำเนินการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Montgomery, D.C. Introduction to Statistical Quality Control. 6th edition, Massachusetts, John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [2] Billingsley, P., et al., Statistical inference for management and economics. 3rd edition. 1986, Boston: Boston : Allyn and Bacon. 1986.
- [3] Evans, D.D. Active Optical Cable Transceiver Packaging Trends and Die Bonding Case Studies. 2015 China Semiconductor Technology International Conference. March 15-16, Shanghai, China, 2015.
- [4] Evans, D.D. and Bok, Z. Micron Level Placement Accuracy Case Studies for Optoelectronic Products. 59th Electronic Components and Technology Conference, May 26-29, San Diego, California, UAS, 2009.
- [5] Tichem, M., van Gurp, J.F.C., Peters, T-J and Henneken, V.J. Micro-fabrication as Enabler for Sub-Um Photonic Alignment. 4th Electronic System-Integration Technology Conference, September 17-20, Amsterdam, Netherlands, 2012.
- [6] Boudreau, R., Passive optical alignment methods. 3rd International Symposium on Advanced Packaging Materials Processes, Properties and Interfaces. March 9-12, Braselton, GA, USA, 1997.
- [7] Hwang, S.H., Lim, J.W. and Rho, B.S. 120 Gb/s-level VCSEL Array Optical Subassembly Using Passive Alignment Technique. 58th Electronic Components and Technology Conference. May 27-30, Lake Buena Vista, FL, USA, 2008.

- [8] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) (ประมวลผลด้วย MINITAB). 5 edition, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2546.
- [9] พลัญญ์กร ใจผ่องอัครกุล และนภัสสงศ์ โอสสถิลป์. การลดปัญหาการแห้งสัมผัสของสีน้ำมัน. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2019; 26(3): 197-213.