

การประยุกต์การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเพื่อการตัดสินใจเชิงข้อมูลในการลดของเสียจากการ ดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด : กรณีศึกษาบริษัทอิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง

จิรนนท์ ใจเอื้อ¹ กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข^{2*} กนกกรรณ ลีโรจนประภา³ ไยแก้ว ศีลรักษ์⁴

^{1,2*} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,
กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

³ ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

⁴ คณะศิลปศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*อีเมลผู้ประพันธ์บทความ: kittiwat.sirikasemsuk@gmail.com

รับต้นฉบับ: 1 สิงหาคม 2568; รับบทความฉบับแก้ไข: 10 กันยายน 2568; ตอบรับบทความ: 23 กันยายน 2568

เผยแพร่ออนไลน์: 27 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

บริษัทอิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง พบว่า อัตราความล้มเหลวในการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดอยู่ในระดับสูงคิดเป็นร้อยละ 43.5 ส่งผลให้เกิดของเสียจำนวนมากและเพิ่มต้นทุนในกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม (discriminant analysis) เพื่อจำแนกชิ้นงานเป็นกลุ่มของดีและกลุ่มของเสีย พร้อมทั้งหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรหลักที่มีผลต่อการลดของเสียในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ โดยใช้ข้อมูลจริงจำนวน 180 ชุดเพื่อสร้างและทดสอบสมการ ตัวแปรทำนาย (X) ได้แก่ ระยะเข็ม (X_1) แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) และแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า ปัจจัยหลักสองประการ ได้แก่ ระยะเข็ม (X_1) และแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสำเร็จของกระบวนการ แบบจำลองหรือสมการเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวต้นได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีความแม่นยำร้อยละ 95.14 ในการสร้างโมเดล และร้อยละ 97.22 ในการทดสอบ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าที่เหมาะสม คือ ระยะเข็ม (X_1) เท่ากับ 502 ไมโครเมตร และแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) เท่ากับ -0.55 มิลลิบาร์ ขณะเดียวกันมีการเสนอให้ตั้งค่าแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) เท่ากับ -0.15 มิลลิบาร์ ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนจำนวนแผ่นที่ดึงวงจรรวมไม่ขึ้นลดลงร้อยละ 13.25 และค่าเฉลี่ยจำนวนวงจรรวมที่ดึงไม่ขึ้นลดลงร้อยละ 43.36 อันทำให้ลดต้นทุนการกำจัดของเสียได้ถึงร้อยละ 48.25

คำสำคัญ: การลดของเสีย เทปรองรับการตัด การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม วงจรรวม การดึงวงจรรวม

Applying Discriminant Analysis for Data-Driven Decision Making to Reduce Defects in Integrated Circuit Pick-Up from Dicing Tape: A Case Study of an Electronics Company

Jiranan Jaior¹ Kittiwat Sirikasemsuk^{2*} Kanogkan Leerojanaprapa³ Yaikaew Silrak⁴

^{1, 2*}*Department of Industrial Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang, Bangkok, Thailand*

³*Department of Statistics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand*

⁴*School of Liberal Arts, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand*

*Corresponding author e-mail: kittiwat.sirikasemsuk@gmail.com

Received: 1 August 2025; Revised: 10 September 2025; Accepted: 23 September 2025

Published online: 27 April 2026

Abstract

An electronics manufacturer experienced a high failure rate in picking up integrated circuits (ICs) from dicing tape at 43.5 percent, leading to increased waste and production costs. This research aimed to investigate the factors affecting the IC pick-up process by applying discriminant analysis to classify the workpieces into two groups: good and defective. The study also sought to identify the optimal values of key variables contributing to defect reduction in the inspection and packaging processes. A total of 180 actual production data sets were used to build and validate the model. Predictor variables included needle distance (X_1), vacuum suction force of the pick-up head (X_2), and vacuum suction force of the dicing tape needle (X_3). The analysis revealed that the two key factors—needle distance and vacuum suction force of the pick-up head—significantly influenced the success of the process. The model achieved 95.14 percent accuracy in training and 97.22 percent in testing. The optimal settings were 502 micrometers for X_1 and -0.55 millibar for X_2 . Additionally, the suction force of the dicing tape needle (X_3) was recommended to be set at -0.15 millibar. This resulted in an average proportion of IC pick-up failures decreased by 13.25 percent and the average number of IC that failed to pull up decreased by 43.36 percent that leads to a disposal cost reduction by 48.25 percent.

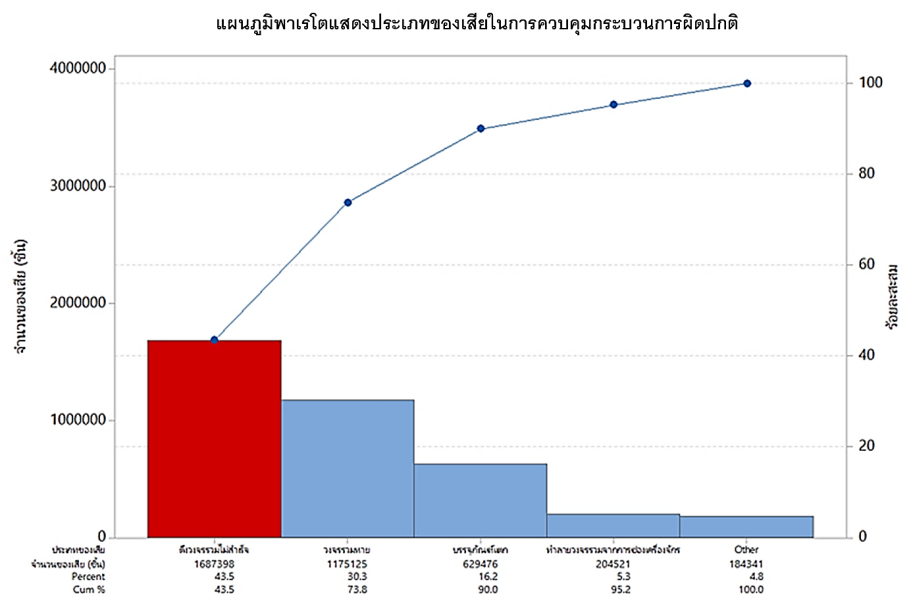
Keywords: Defect reduction, Dicing tape, Discriminant analysis, Integrated circuit, Pick-up integrated circuit

บทนำ

การผลิตเซมิคอนดักเตอร์เป็นการผลิตสารกึ่งตัวนำ หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติกึ่งนำไฟฟ้าโดยนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนสำคัญในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องมือสื่อสาร รถยนต์ และสินค้าเทคโนโลยีอื่น ๆ ซึ่งถูกพัฒนาให้ทันสมัย [1] อุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์จึงเป็นหัวใจสำคัญของเศรษฐกิจการค้ายุคใหม่ และเป็นตัวขับเคลื่อนทางเทคโนโลยีที่มีความท้าทายซึ่งถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีขนาดเล็กและประมวผลได้อย่างรวดเร็ว [2] ส่งผลให้ยอดขายเซมิคอนดักเตอร์มีแนวโน้มขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 7.1 ต่อปีระหว่างปี พ.ศ. 2564–2569 [3] เมื่อพิจารณาการเติบโตของอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ทำให้ผู้ผลิตต้องเผชิญกับภาวะการแข่งขันสูงไม่ว่าจะเป็น การส่งมอบสินค้าที่รวดเร็ว การเพิ่มกำลังการผลิต การลดของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มโอกาสในการแข่งขันด้านธุรกิจมากยิ่งขึ้น

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ โรงงานกรณีศึกษาเป็นผู้ผลิตและจำหน่ายเซมิคอนดักเตอร์ คือ วงจรรวม (integrated circuit) สำหรับรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า ระบบรักษาความปลอดภัย เครื่องมือสื่อสาร และอื่น ๆ ซึ่งถือเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของผู้บริโภค ดังนั้นโรงงานกรณีศึกษาจึงให้ความสำคัญกับการพัฒนากระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็น การใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า และนำเทคโนโลยีมาช่วยในการตรวจสอบเพื่อความแม่นยำเพื่อให้วงจรรวมมีความน่าเชื่อถือ [4] กระบวนการผลิตวงจรรวมของโรงงานกรณีศึกษาแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการ ได้แก่ 1) กระบวนการเตรียมประกอบ (pre-assembly) 2) กระบวนการประกอบ (assembly) 3) กระบวนการทดสอบค่าทางไฟฟ้า (electrical test) และ 4) กระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ (inspection and packaging) [5]

จากการรวบรวมข้อมูลพบว่าโรงงานกรณีศึกษามียอดการผลิตวงจรรวม 4,586 ล้านชิ้นต่อปี โดยวงจรรวมไม่มีขาขึ้น (Quad Flat No-Lead) หรือ QFN มีของเสียมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 55.3 เมื่อจำแนกประเภทของเสียแบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่ 1) ความเสียหายที่ขางจรรวม คิดเป็นร้อยละ 25 2) ความเสียหายของวงจรรวมด้านเครื่องหมาย คิดเป็นร้อยละ 23.3 และ 3) ของเสียจากการควบคุมกระบวนการผลิต คิดเป็นร้อยละ 51.7 ซึ่งพบมากที่สุดเป็นอันดับ 1 และมีสาเหตุมาจากการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด (dicing tape) ไม่สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 43.5 ของจำนวนของเสียจากการควบคุมกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 1 โดยมีสัดส่วนของจำนวนแผ่นที่ดึงวงจรรวมไม่ขึ้นต่อล้อต่อการผลิต คิดเป็นร้อยละ 3.02 และมีค่าเฉลี่ยของจำนวนวงจรรวมที่ดึงไม่ขึ้นต่อล้อต่อการผลิตอยู่ที่ 113 ตัว จากปัญหาดังกล่าวทำให้โรงงานกรณีศึกษาจำเป็นต้องกำจัด (scrap) วงจรรวมที่นำออกจากเทปรองรับการตัดไม่สำเร็จ และเพิ่มผลผลิตเพื่อทดแทนวงจรรวมที่ถูกลำจัด ส่งผลให้ต้นทุนในการทำลายวงจรรวมเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 1: แผนภูมิพารेटโต้ (pareto chart) แสดงความสำคัญของปัญหาที่เกิดจากการควบคุมกระบวนการผลิต

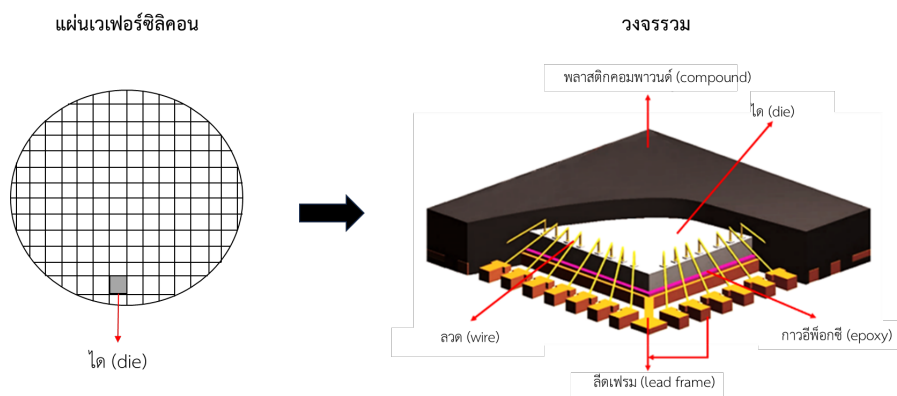
ดังนั้นโรงงานกรณีศึกษาจึงมีความต้องการที่จะลดจำนวนของเสียจากการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิตวงจรรวม และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเพื่อให้กระบวนการมีคุณภาพมากที่สุด

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้ คือ ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดโดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม (discriminant analysis) เพื่อสร้างสมการพยากรณ์สำหรับการจำแนกกลุ่ม และหาค่าที่เหมาะสมเพื่อลดของเสียจากการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ โดยกำหนดให้ตัวชี้วัดหลัก ได้แก่ อัตรา หรือสัดส่วนของจำนวนแผ่นที่ดึงวงจรรวมไม่ขึ้นต่อล็อตการผลิต (จำนวนแผ่นต่อจำนวนแผ่นทั้งหมดที่สนใจ) และตัวชี้วัดรอง ได้แก่ จำนวนหรือสัดส่วนของจำนวนวงจรรวมที่ดึงไม่ขึ้นต่อล็อตการผลิต และต้นทุนใช้ในการทำลายวงจรรวมที่ดึงไม่ขึ้นต่อล็อตการผลิต

1. การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

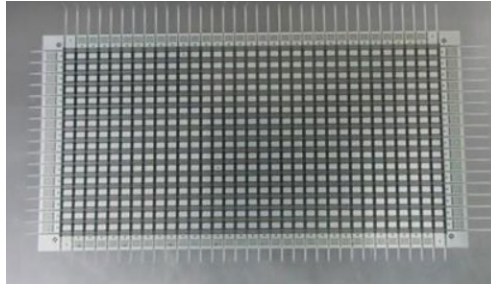
การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยการผลิตวงจรรวม การดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดและการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 *ทฤษฎีการผลิตวงจรรวม:* วงจรรวม คือ วงจรที่นำไดโอด ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และองค์ประกอบวงจรต่าง ๆ มาประกอบรวมกันบนผลึกเดี่ยว หรือแผ่นเวเฟอร์ซิลิคอนโดยอาศัยการถ่ายภาพอย่างละเอียดและการผสมระหว่างขบวนการทางเคมีเพื่อสร้างลายวงจรที่มีความละเอียดสูง แผ่นเวเฟอร์ซิลิคอนดังกล่าวจะถูกนำมาตัดเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กแต่มีโครงสร้างของวงจรรวมอยู่ในชิ้นส่วนขนาดเล็กเพื่อให้สามารถนำไปใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้ ทางอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จึงเรียกชิ้นส่วนนี้ว่า ได (die) เมื่อได้ผ่านการห่อหุ้มวงจรเรียบร้อยแล้วจึงเรียกว่า วงจรรวม หรือ ชิป (chip) ข้อดีของการผลิตวงจรรวมคือ มีน้ำหนักเบา และใช้พลังงานน้อยเนื่องจากวงจรรวมมีขนาดเล็กจึงใช้พื้นที่น้อย ผลิตเป็นจำนวนมาก และราคาวัตถุดิบต่ำ แต่มีความน่าเชื่อถือสูงเนื่องจากไม่มีการเชื่อมต่อตะกั่วภายในวงจรรวม [4] วงจรรวมจะถูกผลิตในพื้นที่ควบคุมปริมาณฝุ่น อุณหภูมิและความชื้นเนื่องจากอุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงด้านสภาพอากาศและสิ่งแวดล้อม [6] ลักษณะวงจรรวมดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยลีดเฟรม (lead frame) หรือขางานทำหน้าที่รองรับได จากนั้นนำไดติดลีดเฟรมด้วยกาวอีพ็อกซี (epoxy) และเชื่อมลวด (wire) โดยใช้ลวดทองหรือลวดทองแดงเป็นเส้นทางนำกระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นจะห่อหุ้มวงจรรวมเพื่อป้องกันความเสียหายโดยใช้พลาสติกคอมพาวนด์ (compound) และวงจรรวมจะถูกส่งไปทดสอบค่าทางไฟฟ้าที่กระบวนการทดสอบค่าทางไฟฟ้าก่อนนำลงบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ [4], [7]



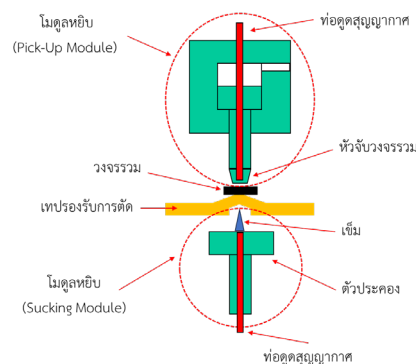
รูปที่ 2: โครงสร้างของวงจรรวม [6]

1.2 *หลักการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด:* โรงงานกรณีศึกษาได้ผลิตวงจรรวมมาบนเทปรองรับการตัดเพื่อเพิ่มผลผลิตและช่วยลดของเสียที่เกิดจากการเคลื่อนย้าย วงจรรวมจะถูกนำออกจากเทปที่เครื่องจักรในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ (inspection and packaging machine) ซึ่งเทปรองรับการตัดอาจต่างชนิดกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน [8] ลักษณะการผลิตวงจรรวมบนเทปรองรับการตัด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3: การผลิตวงจรรวมบนเทปรองรับการตัด

สำหรับการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด มีดังนี้ 1) โมดูลดูด (sucking module) จะเคลื่อนที่เข้าหาวงจรรวมโดยตัวประกอบ (supporter) สัมผัสกับเทปรองรับการตัดและปล่อยแรงดูดออกจากท่อสุญญากาศเพื่อประกอบเทปรองรับการตัดให้ตึง 2) โมดูลหยิบ (pick-up module) เคลื่อนลงมาจนกระทั่งใกล้กับวงจรรวม 3) เข็ม (needle) โมดูลดูดยกขึ้นเพื่อดันเทปรองรับการตัด 4) หัวจับวงจรรวม (pick-up head) ในโมดูลหยิบจะปล่อยแรงดูดสุญญากาศจากท่อสุญญากาศเพื่อดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด [8] แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4: โครงสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดที่เครื่องตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ [8]

1.3 ทฤษฎีการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม: การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเป็นเครื่องมือทางสถิติที่ใช้การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป [9] จากการหาความสัมพันธ์ที่ทำให้หน่วยตัวอย่างมีความแตกต่างกัน โดยสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรทำนาย และนำสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มที่ได้ไปพยากรณ์หน่วยตัวอย่างใหม่ [10] โดยกำหนดให้ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรทำนาย (independent variable) เป็นตัวแปรต่อเนื่อง (continuous variable) 1 ตัวขึ้นไป สำหรับตัวแปรตาม (dependent variable) กำหนดเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ (quantitative variable) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม และตัวแปรทำนายจะอยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้น (linear) สมการจำแนกกลุ่ม (model of sample) ดังสมการที่ (1) [10]

$$\hat{Y} = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p \quad (1)$$

โดย $\hat{Y}$ แทนค่าคะแนนของหน่วยตัวอย่างที่ได้จากสมการจำแนกกลุ่ม

a แทนค่าคงตัว (constant) ในรูปแบบคะแนนดิบ (unstandardized)

b_j แทนค่าถ่วงน้ำหนักของตัวแปรทำนายซึ่ง $j = 1, 2, \dots, p$

X_j แทนตัวแปรทำนายซึ่ง $j = 1, 2, \dots, p$

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม มีดังนี้ [10]

1) เพื่อศึกษาตัวแปรทำนายที่ทำให้กลุ่มมีความแตกต่างกันจากการสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม

2) เพื่อพยากรณ์จัดกลุ่มหน่วยตัวอย่างใหม่จากสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม

ลักษณะของข้อมูลและการเตรียมข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ประกอบด้วย 5 ประการ ดังต่อไปนี้ [10], [11]

1) ตัวแปรตาม (Y) ประกอบด้วยกลุ่มประชากร หรือกลุ่มตัวอย่างอย่างน้อย 2 กลุ่ม

2) กำหนดตัวแปรตาม (X) หรือตัวแปรอิสระที่คาดว่าจะสามารถแบ่งกลุ่มตัวแปรตามได้แตกต่างกัน

3) ตัวแปรตาม (Y) เป็นตัวแปรที่มีระดับการวัดในมาตราอันดับ (ordinal scale) และถ้าหากมีข้อมูลอยู่ในระดับอื่นให้แปลงข้อมูลเป็นตัวแปรเชิงกลุ่มก่อนนำไปวิเคราะห์

4) ตัวแปรทำนาย (X) เป็นตัวแปรต่อเนื่องที่มีระดับการวัดในมาตราอัตราภาค (interval scale) หรือมาตราอัตราส่วน (ratio scale) หากมีข้อมูลอยู่ในระดับอื่นให้แปลงข้อมูลเป็นตัวแปรหุ่น (dummy coding) ก่อนนำไปวิเคราะห์

5) ชุดข้อมูลประกอบด้วย 2 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูลฝึกฝน (training data set) เพื่อสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม และชุดข้อมูลทดสอบ (testing data set) เพื่อทดสอบสมการ

การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มจำเป็นต้องมีกลุ่มข้อมูลที่นำมาทดสอบอย่างน้อย 10 เท่าของจำนวนตัวแปรทำนายเพื่อลดความผิดพลาดในการสร้างสมการจำแนกกลุ่ม และการกำหนดค่ากลางเพื่อจำแนกกลุ่มของชุดข้อมูล [12] สำหรับการตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานของการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม แสดงเงื่อนไขดังต่อไปนี้ [10], [12], [13], [14]

1) ตัวแปรอิสระมีการแจกแจงปกติหลายตัวแปร (normality of independent variables) ในแต่ละกลุ่มของตัวแปรตาม (Y)

2) การตรวจสอบชุดข้อมูลฝึกฝน ในแต่ละกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) ต้องไม่พบค่านอกเกณฑ์ (outlier)

3) เมทริกซ์ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วม (variance-covariance matrix) ของตัวแปรทำนาย (X) แต่ละกลุ่มต้องเท่ากัน

4) การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้น (linearity of relationship) ของตัวแปรทำนาย (X)

5) ตัวแปรทำนาย (X) ต้องไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุสูงเกินไป (multicollinearity)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม คือ การสร้างสมการเพื่อนำมาวิเคราะห์และจำแนกกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) โดยอ้างอิงจากตัวแปรทำนาย (X) ซึ่งสามารถประเมินความแม่นยำของสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มได้จากร้อยละของการทำนายที่ถูกต้อง ดังสมการที่ (2)

$$\text{ความถูกต้อง} = \frac{\text{จำนวนข้อมูลที่ทำนายถูกต้อง}}{\text{จำนวนข้อมูลที่ถูกทำนายทั้งหมด}} \times 100 \quad (2)$$

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเคมีคอนกรีต: จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่ามีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาเกี่ยวกับการติดตั้งหรือวางรวมออกจากเทปรองรับการตัด โดยเน้นไปที่ปัจจัยทางกายภาพ เช่น การกระจายเข็ม ความหนาและขนาดของโดยรวมถึงแรงดูดสุญญากาศ ซึ่งล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ ตัวอย่างเช่น

Liu et al. [15] ได้ศึกษาการกระจายเข็มในโมดูลดูด เพื่อปรับปรุงความสำเร็จในการนำโดออกจากเทปรองรับการตัด พบว่า การกระจายเข็มไม่สามารถเพิ่มความสำเร็จในการนำโดออกจากเทปรองรับการตัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเข็มเพียง 1 ตัว แต่สามารถช่วยลดอัตราการแตกร้าวของโดได้ ขณะที่ Ogasawara et al. [16] ได้ศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ 1) ความแตกต่างของเทปรองรับการตัด 2) ความหนาของโดที่แตกต่างกัน และ 3) ระยะห่างระหว่างเข็มกับเทปรองรับการตัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำโดออกจากเทปรองรับการตัด พบว่าความแตกต่างของเทปรองรับการตัดและระยะห่างระหว่างเข็มกับเทปรองรับการตัดให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันเมื่อความหนาโดต่างกัน

Zhoulong [17] ได้ศึกษาการนำวางรวมออกจากเทปรองรับการตัดโดยใช้แรงดูดสุญญากาศ ซึ่งพิจารณาจากปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการ ได้แก่ 1) ความยาวที่ถูกติดบนเทปรองรับการตัด 2) ความแรงของแรงดูดสุญญากาศ และ 3) การเคลื่อนที่ของหัวจับงาน อีกทั้งได้นำถึงความเสี่ยงของโดที่จะเกิดขึ้น สรุปได้ว่าความยาวของบริเวณที่ติดกาวควรควบคุมให้น้อยกว่าร้อยละ 40 ของความ

ยาววงจรรวมเพื่อลดผลกระทบจากความหนาของวงจรรวมต่อประสิทธิภาพในการนำวงจรรวมออกจากเตปรงรับการตัด และเมื่อเพิ่มแรงดูดสุญญากาศมากขึ้นจะสามารถเร่งการหลุดของวงจรรวมได้มากขึ้น ขณะที่ Cheng et al. [18] ได้ศึกษาความหนาของวงจรรวมที่แตกต่างกัน แต่ความยาวของวงจรรวมเท่ากัน (5 มิลลิเมตร) พบว่าความหนาของวงจรรวมมีผลต่อการดึงวงจรรวมออกจากเตปรงรับการตัด แม้ว่าวงจรรวมที่มีความหนาเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร ได้รับแรงในการดึงวงจรรวมมากกว่าแต่ไม่สามารถแยกออกจากเตปรงรับการตัดได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่วงจรรวมที่มีความหนา 0.34 มิลลิเมตร ได้รับแรงน้อยกว่าแต่สามารถแยกออกจากเตปรงรับการตัดได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่แตกหัก

สุดท้าย Peng et al. [19] ได้วิเคราะห์เชิงกลไกของการดึงวงจรรวมออกจากเตปรงรับการตัดที่ได้จากการใช้เข็มดันเตปรงรับการตัดในมุมมองของกลศาสตร์การแตกหัก ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดึงวงจรรวมออกจากเตปรงรับการตัด คือ อัตราส่วนความยาวต่อความหนาของวงจรรวม ดังนั้นหากวงจรรวมบาง หรือใหญ่จะทำให้ประสิทธิภาพในการดึงวงจรรวมลดลง

โดยสรุป งานวิจัยก่อนหน้านี้มุ่งเน้นปัจจัยทางกายภาพของวัสดุและอุปกรณ์ จากการสังเคราะห์งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระยะเข็มแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม และความหนาของวงจรรวมเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการดึงวงจรรวมออกจากเตปรงรับการตัด แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านทฤษฎีการวิเคราะห์แบบสถิติเพื่อสร้างแบบจำลองเชิงพยากรณ์ งานวิจัยนี้จึงเสนอการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเพื่อระบุปัจจัยสำคัญและกำหนดค่าที่เหมาะสมอย่างเป็นระบบ ช่วยลดข้อเสียและต้นทุนในกระบวนการผลิต

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม: การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม เป็นเทคนิคทางสถิติที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการสร้างแบบจำลองเพื่อจำแนกกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) ที่อยู่ในรูปของข้อมูลจำแนกประเภท (categorical data) ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้นำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายสาขา ตัวอย่างเช่น

Deeprom [20] ได้ศึกษาแบบจำลองในการพยากรณ์ความล้มเหลวทางการเงินระยะเริ่มต้นดำเนินการของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมในประเทศไทย และสร้างจำลองสำหรับพยากรณ์ความล้มเหลวทางการเงินล่วงหน้าโดยใช้วิธีการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม พบว่ามี 4 ตัวแปรทำนายที่ส่งผลต่อการจำแนกกลุ่มมีความถูกต้องของการทดสอบสมการคิดเป็นร้อยละ 92.86 ในลักษณะเดียวกัน ธนากร ดันติกาญจน์ [21] ได้นำเทคนิคนี้มาใช้ในการพยากรณ์ความล้มเหลวทางการเงิน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเชิงขั้นตอน (stepwise discriminant analysis) เพื่อคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างสมการพยากรณ์ และสามารถจำแนกกลุ่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความถูกต้องของการทดสอบเท่ากับร้อยละ 73.8 และความถูกต้องของชุดข้อมูลทดสอบอยู่ที่ร้อยละ 78.9

ในภาคเกษตรกรรม Thonglor et al. [22] ได้นำข้อมูลจำนวน 120 ข้อมูล และตรวจสอบความเหมาะสมของสมการที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 80 เพื่อทำนายปริมาณน้ำนมของฟาร์มโคนมว่าจัดอยู่ในกลุ่มฟาร์มให้น้ำนมสูงหรือต่ำ โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการใช้วิธีการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มกับการวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติกแบบทวิ (binary logistic regression analysis) พบว่าค่าความถูกต้องที่ใกล้เคียงกัน โดยการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมีความถูกต้องร้อยละ 65.0 ในขณะที่การวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติกแบบทวิมีความถูกต้องร้อยละ 64.2

ในด้านการผลิต Yoothai et al. [12] ได้นำการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมาประยุกต์ใช้ในการจำแนกกลุ่มชิ้นงานว่าเป็นของดีหรือของเสียเพื่อลดจำนวนของเสียในกระบวนการพิมพ์พลาสติก โดยใช้ข้อมูลตัวอย่างทั้งหมด 180 มีตัวแปรอิสระทั้งหมด 3 ตัวแปร และตัวแปรตาม 2 ตัวแปร และได้กำหนดค่าจำแนกกลุ่มเป็นเกณฑ์ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยเพื่อนำไปปรับตั้งเครื่องจักร

นอกจากนี้ Preme et al. [23] ได้ศึกษาการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มและการวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติก (logistic regression) โดยอธิบายว่าการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มจะสร้างสมมติฐานโดยใช้ข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ ส่วนการวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติกเป็นวิธีที่ยืดหยุ่นกว่าถ้าใช้จำนวนข้อมูลน้อย และข้อมูลไม่จำเป็นต้องมีการแจกแจงแบบปกติ และ Liong and Foo [24] ได้อธิบายว่าการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มจะต้องทดสอบชุดข้อมูลก่อนว่าเป็นสมมติฐานของตัวแปรที่มีการแจกแจงปกติ และเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมระหว่างกลุ่มต้องเท่ากัน หากไม่เป็นไปตามข้อกำหนดดังกล่าวการวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติกจะมีความยืดหยุ่นมากกว่า แต่ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น และการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมีความถูกต้องสูงขึ้นเมื่อข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐาน ในทำนองเดียวกัน Mustafa [25] ได้เปรียบเทียบการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มและการวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติกกับข้อมูลจริงของการคลอดโดยการผ่าตัดคลอดและการคลอดตามธรรมชาติ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็น

เห็นว่าการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมีความถูกต้องในการจำแนกมากกว่าการวิเคราะห์การถดถอยแบบลอจิสติกเล็กน้อย คิดเป็นร้อยละ 87 และร้อยละ 86.1 ตามลำดับ

จากการสังเคราะห์งานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเป็นเครื่องมือทางสถิติที่ได้รับความนิยมในการพยากรณ์และจำแนกกลุ่มตัวแปรตาม (Y) ที่เป็นข้อมูลเชิงกลุ่ม โดยมีการประยุกต์ใช้ในหลากหลายบริบท เช่น การพยากรณ์ความล้มเหลวทางการเงินของวิสาหกิจ [20], [21] การจำแนกปริมาณน้ำมันในฟาร์มโคนม [22] และการคัดแยกของเสียในกระบวนการผลิต [12] โดยมีข้อสังเกตว่าวิธีการนี้ให้ผลการจำแนกที่แม่นยำ โดยเฉพาะเมื่อชุดข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ [24], [25]

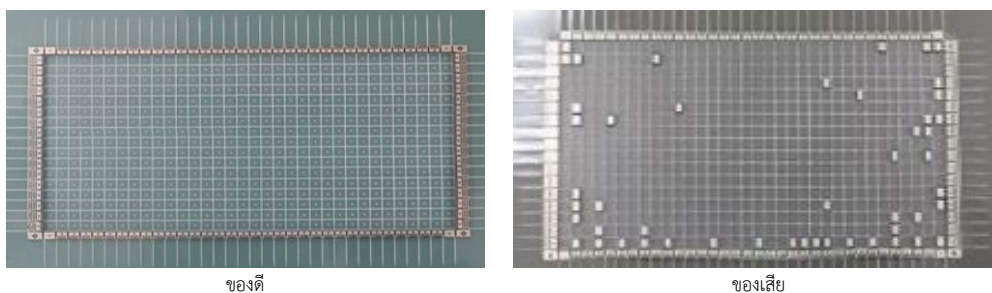
ภายใต้บริบทของการผลิตวงจรรวม งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการนำวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ โดยกำหนดให้วงจรรวมมีความหนา 0.85 มิลลิเมตร และใช้ตัวแปรทำนาย (X) ได้แก่ ระยะเข็ม (ตามแนวทางของ Ogasawara et al. [16]) แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม [17] และแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด ซึ่งเพิ่มเติมขึ้นในงานวิจัยฉบับนี้ ส่วนตัวแปรตาม (Y) คือ การจำแนกเป็นกลุ่มของดีหรือกลุ่มของเสีย ตามแนวทางของ Yoothai et al. [12] ทั้งนี้ ยังให้ความสำคัญกับคุณภาพของวงจรรวมที่ต้องไม่เกิดความเสียหาย [19] และพิจารณาลักษณะข้อมูลเบื้องต้นที่เข้าเงื่อนไขของการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม [21], [24]

ดังนั้น เพื่อให้สามารถจำแนกและพยากรณ์ผลของกระบวนการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มในการสร้างสมการพยากรณ์ พร้อมทั้งหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต้น เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น และลดจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์

ระเบียบวิธีวิจัย

1. วิธีการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นขั้นตอนการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดเนื่องจากไม่สามารถนำวงจรรวมดีออกจากเทปรองรับการตัดได้สำเร็จ ส่งผลให้จำนวนวงจรรวมถูกส่งไปยังกระบวนการถัดไปมีปริมาณน้อยลง โดยกำหนดให้ของดี คือ วงจรรวมถูกดึงขึ้นทั้งหมดต่อแผ่น (ไม่มีวงจรรวมเหลือบนเทปรองรับการตัด) และหากพบวงจรรวมหลงเหลือบนเทปรองรับการตัดจะถือว่าเป็นของเสีย ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5: ของดีและของเสีย

การปรับปรุงการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดให้มีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปัจจัย ดังต่อไปนี้ ระยะเข็ม (X_1) แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) และแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) หากสามารถควบคุมปัจจัยดังกล่าวได้จะทำให้ประสิทธิภาพของการดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดเพิ่มมากขึ้น จำนวนของเสียลดลง สำหรับช่วงชุดข้อมูลของตัวแปรทำนาย (X) แต่ละปัจจัยถูกกำหนดจากความสามารถของเครื่องจักรที่สามารถดำเนินการผลิตได้จริง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1: ช่วงของชุดข้อมูลตัวแปรทำนาย

ตัวแปรทำนาย (X)	ช่วงชุดข้อมูล
X_1	400 ถึง 600 ไมโครเมตร
X_2	-0.35 ถึง -0.55 มิลลิบาร์
X_3	-0.10 ถึง -0.30 มิลลิบาร์

จากการกำหนดจำนวนชุดข้อมูลเพื่อวิเคราะห์สมการจำแนกกลุ่มได้ทำการรวบรวมข้อมูลอย่างน้อย 10 เท่าของจำนวนตัวแปรทำนายเพื่อความแม่นยำในการสร้างสมการ [12] ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูล 180 ข้อมูล โดยแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูลที่ 1 ใช้สำหรับสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม คิดเป็นร้อยละ 80 หรือ 144 ข้อมูล และชุดข้อมูลที่ 2 ใช้ทดสอบการพยากรณ์จากสมการที่ได้จากชุดข้อมูลที่ 1 คิดเป็นร้อยละ 20 หรือ 36 ข้อมูล และกำหนดตัวแปรตาม (Y) เป็นประเภทของชิ้นงาน ซึ่งจะแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของดีกำหนดค่าเป็น 1 และกลุ่มของเสียกำหนดค่าเป็น 0 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2: ชุดข้อมูลตัวแปรทำนาย

ประเภทชุดข้อมูล	ลำดับข้อมูล (N)	X_1	X_2	X_3	Y
ชุดข้อมูลสร้างสมการ	1	510	-0.47	-0.14	1
	2	555	-0.47	-0.18	0
	3	545	-0.51	-0.25	1
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	144	450	-0.46	-0.21	0
ชุดข้อมูลทดสอบสมการ	1	550	-0.45	-0.21	1
	2	410	-0.36	-0.22	0
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	36	445	-0.40	-0.15	0

2. วิธีการวิจัย

การตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานและการสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม ดังต่อไปนี้

1) ตรวจสอบการแจกแจงของตัวแปรทำนาย (X) โดยใช้ Anderson-Darling ตรวจสอบค่าผิดปกติของชุดข้อมูลของตัวแปรทำนาย (X) โดยใช้ Grubbs' test ตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของตัวแปรทำนาย (X) และตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุของตัวแปรทำนาย (X) และใช้ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรทำนาย (X) ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม (Y) โดยใช้โปรแกรม Minitab 18

2) ประยุกต์ใช้โปรแกรม SPSS ในการตรวจสอบเมทริกซ์ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วมโดยใช้ Box's M test ตรวจสอบโดยการพิจารณาเมทริกซ์สหสัมพันธ์ หาค่ากลางจำแนกกลุ่ม และสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ผลการตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานของการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม

นำข้อมูลชุดที่ 1 มาทดสอบเงื่อนไขพื้นฐานเพื่อใช้สำหรับสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมีข้อมูลทั้งหมด 144 ข้อมูลประกอบด้วยกลุ่มของดี ($Y = 1$) 68 ข้อมูล และกลุ่มของเสีย ($Y = 0$) 76 ข้อมูล ผลการทดสอบเงื่อนไขพื้นฐาน แสดงดังต่อไปนี้

1.1 การตรวจสอบการแจกแจงตัวแปรทำนาย (X) หลายตัวแปรที่ระดับนัยสำคัญ 0.05: โดยทดสอบตัวแปรทำนาย (X) ของแต่ละกลุ่มตัวแปรตาม (Y) โดยกำหนดข้อสมมติฐานไว้ดังนี้ [10]

H_0 = ตัวแปรทำนาย (X) มีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 = ตัวแปรทำนาย (X) ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

เมื่อพิจารณาค่า p -value มากกว่า 0.05 ทุกตัว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวแปรทำนาย (X) ทุกตัวมีการแจกแจงแบบปกติหลายตัวแปร ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3: ผลการวิเคราะห์การแจกแจงของตัวแปรทำนาย (X) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

	ตัวแปรทำนาย (X)	Mean	Standard Deviation (SD)	p -value
ของดี (Y = 1)	X ₁	549.3	33.47	0.077
	X ₂	-0.495	0.032	0.230
	X ₃	-0.208	0.055	0.132
ของเสีย (Y = 0)	X ₁	458.8	35.59	0.083
	X ₂	-0.408	0.035	0.186
	X ₃	-0.205	0.057	0.213

1.2 การตรวจสอบค่าผิดปกติของชุดข้อมูลตัวแปรทำนาย (X) ของแต่ละกลุ่มตัวแปรตาม (Y) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05: โดยมีข้อสมมติฐานไว้ดังนี้

H_0 = ไม่มีค่าผิดปกติในชุดข้อมูลของตัวแปรทำนาย

H_1 = มีค่าผิดปกติในชุดข้อมูลของตัวแปรทำนาย

เมื่อพิจารณาค่า p -value ของทุกตัวแปรทำนาย (X) ในแต่ละกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) ในตารางที่ 4 มีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไม่มีค่าผิดปกติในชุดข้อมูลของตัวแปรทำนาย

ตารางที่ 4: ผลการตรวจสอบค่าผิดปกติของชุดข้อมูลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

	ตัวแปรทำนาย (X)	Mean	Standard Deviation (SD)	G-Value	p -value
ของดี (Y = 1)	X ₁	549.26	33.47	2.97	0.150
	X ₂	-0.495	0.032	3.22	0.055
	X ₃	-0.208	0.055	1.94	1.00
ของเสีย (Y = 0)	X ₁	458.82	35.59	3.26	0.055
	X ₂	-0.408	0.035	2.67	0.479
	X ₃	-0.205	0.057	1.83	1.00

1.3 การตรวจสอบเมทริกซ์ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วม: สำหรับตัวแปรทำนาย (X) ในแต่ละกลุ่มตามตัวแปรตาม (Y) ซึ่งกำหนดสมมติฐานไว้ คือ $H_0: \Sigma_0 = \Sigma_1$ และ $H_1: \Sigma_0 \neq \Sigma_1$

จากสมมติฐานข้างต้น Σ_0 แทนเมทริกซ์ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วม (variance-covariance matrix) ของตัวแปรตามที่เป็นของเสีย (Y = 0) และ Σ_1 แทนเมทริกซ์ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วมของตัวแปรตามที่เป็นของดี (Y = 1) ผลลัพธ์จาก Box's M test พบว่าค่านัยสำคัญ (Sig) เท่ากับ 0.190 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้นเมทริกซ์ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วมระหว่างกลุ่มของเสียและกลุ่มของดีไม่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5: ผลการตรวจสอบเมทริกซ์ความแปรปรวนที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05

Box's M test result		4.833
F	Approx.	1.586
	df ₁	3
	df ₂	6048377.689
	Sig.	0.190

1.4 การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของตัวแปรทำนาย (X): โดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation coefficient) พบว่าตัวแปรทำนายทุกตัวมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับตัวแปรตาม (Y) เนื่องจากค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 และ X_1 กับ Y มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน X_2 กับ Y และ X_3 กับ Y มีความสัมพันธ์เชิงเส้นในทิศทางตรงกันข้าม ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6: ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของตัวแปรทำนาย

	X_1 และ Y	X_2 และ Y	X_3 และ Y
Pearson correlation coefficient	0.796	-0.793	-0.023

1.5 การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุของตัวแปรทำนาย (X): โดยการพิจารณา Variance Inflation Factor (VIF) หากมีค่าน้อยกว่า 10 จะสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรทำนาย (X) ทุกตัวไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุ ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7: ผลการตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุ

	X_1	X_2	X_3
VIF	2.20	2.18	1.03

2. การสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม

การสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเป็นการนำข้อมูลชุดที่ 1 ที่ผ่านการตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานมาสร้างสมการเพื่อระบุค่ากลางเพื่อใช้จำแนกกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) ดังต่อไปนี้

2.1 การคัดเลือกตัวแปรทำนาย (X): จากค่า Wilks' Lambda พบว่าตัวแปรทำนาย (X) ที่ส่งผลต่อการสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มมากที่สุด คือ ระยะเข็ม (X_1) และแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) โดยมีค่านัยสำคัญ (Sig) <0.001 และมีค่า Wilk's Lambda เท่ากับ 0.367 และ 0.270 ตามลำดับ ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8: การคัดเลือกตัวแปรทำนาย (X) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

Step	Variables	Lambda	df ₁	df ₂	df ₃	Exact F			
						Statistic	df ₁	df ₂	Sig
1	X_1	0.367	1	1	142	245.167	1	142	<0.001
2	X_2	0.270	2	1	142	190.522	2	141	<0.001

2.2 ทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยพิจารณาค่าเฉพาะ (Eigenvalue): แสดงความแตกต่างระหว่างกลุ่ม จากข้อมูลที่น่ามาทดสอบมีตัวแปรตาม (Y) 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มของดี (Y = 1) และกลุ่มของเสีย (Y = 0) จึงมีค่าเฉพาะเพียง 1 ค่า เท่ากับ 2.702 เมื่อค่าเฉพาะมีค่าไม่เข้าใกล้ 0 แสดงว่าความแตกต่างระหว่างกลุ่มมาก ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9: ค่าเฉพาะ

Function	Eigenvalue	% of Variance	Cumulative %	Canonical Correlation
1	2.702	100.0	100.0	0.854

2.3 ทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนาย (X): โดยทำการทดสอบตัวแปรทำนายทุกตัวในกลุ่มของเสีย (Y = 0) และกลุ่มของดี (Y = 1) ซึ่งกำหนดสมมติฐานไว้เป็น $H_0: \mu_0 = \mu_1$ และ $H_1: \mu_0 \neq \mu_1$

ค่า Wilks' Lambda ดังตารางที่ 10 เท่ากับ 0.270 และค่านัยสำคัญ (Sig) < 0.001 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนาย (X) ในกลุ่มของดี (Y = 1) และกลุ่มของเสีย (Y = 0) แตกต่างกัน ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยนี้สามารถสร้างสมการที่วิเคราะห์จำแนกกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 10: ผลลัพธ์การตรวจสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนาย (X) ทุกตัวในกลุ่มตัวแปรตาม (Y)

Wilks' Lambda	Test of Function(s)	Wilks' Lambda	Chi-square	df	Sig.
	1	0.270	184.5668	2	<0.001

2.4 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (ค่าถ่วงน้ำหนัก) ของตัวแปรทำนาย (X) ที่นำมาสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มในรูปแบบมาตรฐาน (Standardized): เพื่อหาตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการจำแนกกลุ่ม พบว่าระยะเข็ม (X_1) มีความสำคัญต่อการจำแนกกลุ่มของตัวแปรตาม (Y) มากที่สุด เนื่องจากมีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0.634 ซึ่งมากกว่าแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) ที่มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ -0.623 ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11: Standardized canonical discriminant function coefficients

ตัวแปรทำนาย	Function
	1
X_1	0.634
X_2	-0.623

2.5 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (ค่าถ่วงน้ำหนัก) ของตัวแปรทำนาย (X): เพื่อนำมาสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มในรูปแบบคะแนนดิบ (unstandardized) ซึ่งประกอบด้วยค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละตัวแปรทำนาย (X) และค่าคงตัว ซึ่งระยะเข็ม (X_1) ค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0.018 และแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ -18.577 ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12: Unstandardized canonical discriminant function coefficients

ตัวแปรทำนาย	Function
	1
X_1	0.018
X_2	-18.577
(Constant)	-17.527

เนื่องจากตัวแปรตามมี 2 กลุ่มคือ ของดี ($Y = 1$) และของเสีย ($Y = 0$) ดังนั้นสมการจำแนกกลุ่ม $\hat{Y}$ จึงมี 1 สมการเพื่อใช้คำนวณคะแนนจำแนกกลุ่มตัวแปรตาม (Y) ดังสมการที่ (3)

$$\hat{Y} = -17.527 + 0.018X_1 - 18.577X_2 \quad (3)$$

2.6 การกำหนดค่ากลางจำแนกกลุ่ม (Group Centroids): เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ชี้วัดว่าคะแนนที่ได้จากสมการที่ (3) ควรจัดอยู่ในกลุ่มใด โดยกลุ่มของดี ($Y = 1$) และกลุ่มของเสีย ($Y = 0$) มีค่ากลางเท่ากับ 1.726 และ -1.544 ตามลำดับ ดังตารางที่ 13 สำหรับความน่าจะเป็นที่หน่วยใหม่จะอยู่ในกลุ่มใดคิดเป็น 0.5 เนื่องจากมีตัวแปรตาม (Y) เพียง 2 กลุ่ม

ตารางที่ 13: Functions at group centroids

Y	Function
	1
1	1.726
0	-1.544

2.7 การตรวจสอบความแม่นยำของสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม: แสดงการพยากรณ์สำหรับชุดข้อมูลที่ 1 พบว่าการพยากรณ์กลุ่มของเสีย ($Y = 0$) ตรงกับค่าอ้างอิงมีความแม่นยำร้อยละ 96.05 การพยากรณ์กลุ่มของเสีย ($Y = 0$) ไม่ตรงกับค่าอ้างอิงเท่ากับร้อยละ 5.88 การพยากรณ์กลุ่มของดี ($Y = 1$) ตรงกับค่าอ้างอิงมีความแม่นยำเท่ากับร้อยละ 94.12 และการพยากรณ์กลุ่มของดี ($Y = 1$) ไม่ตรงกับค่าอ้างอิงเท่ากับร้อยละ 3.95 ดังตารางที่ 14 และความแม่นยำของสมการเท่ากับร้อยละ 95.14 (คำนวณจากสมการที่ (1))

ตารางที่ 14: ความถูกต้องของการพยากรณ์แบ่งตามกลุ่มของดีและกลุ่มของเสียของชุดข้อมูลสร้างสมการ

	Y ตามค่าอ้างอิง	Y ตามการพยากรณ์		รวม
		0	1	
จำนวนในแต่ละกลุ่ม	0	73	3	76
	1	4	64	68
ร้อยละความแม่นยำ และร้อยละความผิดพลาด	0	96.05	3.95	100
	1	5.88	94.12	100

3. ทดสอบสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบสมการ

การทดสอบสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเริ่มต้นจากการนำชุดข้อมูลทดสอบสมการ มีทั้งหมด 36 ข้อมูล ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มของดี ($Y = 1$) 18 ข้อมูล และกลุ่มของเสีย ($Y = 0$) 18 ข้อมูล หาคะแนนของหน่วยตัวอย่างใหม่โดยใช้สมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม ดังสมการที่ (3) และนำคะแนนที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ากลางของแต่ละกลุ่มตัวแปรตาม (Y) ดังตารางที่ 13 หากคะแนนจำแนกกลุ่มเข้าใกล้ค่าใดมากที่สุด แสดงว่าหน่วยตัวอย่างใหม่เป็นสมาชิกของกลุ่มนั้น จากคะแนนจำแนกกลุ่ม $\hat{Y}$ ของข้อมูลทดสอบทั้งหมด 36 ข้อมูล อธิบายได้ว่าช่วงคะแนนการจำแนกกลุ่ม คือ -3.735 ถึง 3.304 ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15: การพยากรณ์กลุ่มตัวแปรตาม (Y) ของชุดข้อมูลทดสอบสมการ

ลำดับข้อมูล (N)	X_1	X_2	X_3	Y ค่าอ้างอิง	คะแนน $\hat{Y}$	Y พยากรณ์
1	600	-0.45	-0.21	1	1.633	1
2	410	-0.36	-0.22	0	-3.459	0
3	570	-0.47	-0.29	1	1.464	1
...	...	...	...	...	...	...
36	455	-0.40	-0.15	0	-1.906	0

หมายเหตุ: *คะแนน $\hat{Y}$ ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (3)

นอกจากนี้ได้ทดสอบความแม่นยำของสมการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มโดยเปรียบเทียบตัวกลุ่มที่พยากรณ์กับค่าอ้างอิง พบว่าการพยากรณ์กลุ่มของเสีย ($Y = 0$) ตรงกับค่าอ้างอิงมีความแม่นยำร้อยละ 94.44 การพยากรณ์กลุ่มของเสีย ($Y = 0$) ไม่ตรงกับค่าอ้างอิงเท่ากับร้อยละ 5.56 การพยากรณ์กลุ่มของเสีย ($Y = 1$) ตรงกับค่าอ้างอิงมีความแม่นยำร้อยละ 100 และไม่พบการพยากรณ์กลุ่มของดี ($Y = 1$) ไม่ตรงกับค่าอ้างอิง ดังตารางที่ 16 ดังนั้นความแม่นยำของสมการเท่ากับร้อยละ 97.22 (คำนวณจากสมการที่ (1))

ตารางที่ 16: ความถูกต้องของการพยากรณ์แบ่งตามกลุ่มของดีและกลุ่มของเสียของชุดข้อมูลทดสอบสมการ

	Y ตามค่าอ้างอิง	Y ตามการพยากรณ์		รวม
		0	1	
จำนวนในแต่ละกลุ่ม	0	17	1	18
	1	0	18	18
ร้อยละความแม่นยำ และร้อยละความผิดพลาด	0	94.44	5.56	100
	1	0	100	100

4. การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการลดของเสียจากการดิงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด

สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรทำนาย (X) ประกอบด้วยระยะเข็ม (X_1) ตั้งแต่ 400 ถึง 600 ไมโครเมตร แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) ตั้งแต่ -0.35 ถึง -0.55 มิลลิบาร์ และแรงดันสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) ตั้งแต่ -0.10 ถึง -0.30 มิลลิบาร์ และกำหนดให้ตัวแปรตาม (Y) คือ ค่ากลางจำแนกกลุ่มของดีเท่ากับ 1.726 แสดงค่าที่เหมาะสมดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17: ค่าที่เหมาะสมของตัวแปรทำนาย (X)

Solution	X_1	X_2	คะแนน Fit
1	502	-0.55	1.726

ค่าที่เหมาะสมที่เข้าใกล้ค่ากลางจำแนกกลุ่มของดีเท่ากับ 1.726 คือ ระยะเข็ม (X_1) เท่ากับ 502 ไมโครเมตร แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) เท่ากับ -0.55 มิลลิบาร์ (ซึ่งเป็นตัวแปรทำนาย (X) ที่ส่งผลต่อการดิงวงจรรวมดังงานวิจัยของ Ogasawara & Zhoulong) และได้กำหนดการตั้งค่าแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) เท่ากับ -0.15 มิลลิบาร์ เพื่อป้องกันปัญหาคุณภาพอื่น ๆ เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมจึงนำไปปรับตั้งที่เครื่องจักรเพื่อติดตามผล 43 ล็อตการผลิต โดยใช้เวลาในการติดตามผลจำนวน 1 สัปดาห์ แสดงผลดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18: ผลหลังจากปรับตั้งค่าตัวแปรทำนาย (X) ที่เหมาะสม

วันที่	ล็อตการผลิต	จำนวนต่อล็อตการผลิต		ของดี (Y = 1)				ของเสีย (Y = 0)				ปัญหาคุณภาพอื่น ๆ
		จำนวนแผ่น	จำนวนวงจรรวม	จำนวนแผ่น	สัดส่วนจำนวนแผ่น (%)	จำนวนวงจรรวม	สัดส่วนวงจรรวม	จำนวนแผ่น	สัดส่วนจำนวนแผ่น (%)	จำนวนวงจรรวม	สัดส่วนวงจรรวม (%)	
1	1	81	42,294	75	92.59	42,074	99.48	6	7.41	220	0.52	ไม่พบ
1	2	54	28,437	52	96.30	28,396	99.86	2	3.70	41	0.14	ไม่พบ
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7	43	81	42,726	77	95.06	42,646	99.81	4	4.94	80	0.19	ไม่พบ
ค่าเฉลี่ย		-	-	81	97.38	43,771	99.85	2	2.62	64	0.15	-

จากการติดตามผลจำนวน 43 ล็อตการผลิต ดังตารางที่ 18 พบว่ากลุ่มของเสีย (Y = 0) มีอัตรา หรือสัดส่วนจำนวนแผ่นที่ดิงวงจรรวมไม่ขึ้นต่อจำนวนแผ่นทั้งหมดที่สนใจคิดเป็นร้อยละ 2.62 มีจำนวนวงจรรวมที่ดิงไม่ขึ้นเฉลี่ยต่อล็อตการผลิตคิดเป็น 64 ตัว และได้มีการติดตามผลดังงานวิจัยของ Peng et al. [19] สรุปผลได้ว่าไม่พบปัญหาด้านคุณภาพอื่น ๆ เพิ่มเติมหลังจากมีการปรับตั้งค่าปัจจัยดังกล่าว และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนการปรับปรุงพบว่า หลังปรับปรุงทำให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนจำนวนแผ่นที่ดิงวงจรรวมไม่ขึ้นต่อล็อตการผลิตลดลงจากร้อยละ 3.02 เป็นร้อยละ 2.62 (ลดลงไปร้อยละ 13.25) และค่าเฉลี่ยของจำนวนวงจรรวมที่ดิงไม่ขึ้นลดลงไปร้อยละ 43.36 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของต้นทุนการกำจัดวงจรรวมก่อนปรับปรุงเท่ากับ 10.44 ดอลลาร์ต่อล็อตการผลิต และหลังปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยต้นทุนการกำจัดวงจรรวมเท่ากับ 5.40 ดอลลาร์ต่อล็อตการผลิต ส่งผลให้ต้นทุนการกำจัดวงจรรวมลดลงถึงร้อยละ 48.28

สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดิงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัด โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเพื่อตัดสินใจเชิงข้อมูล (data-driven decision making) ในการลดของเสียในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ของบริษัท

อิเล็กทรอนิกส์แห่งหนึ่ง โดยกำหนดตัวแปรต้นที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ระยะเข็ม (X_1) แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) และแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) ขณะที่ตัวแปรตาม (Y) ถูกกำหนดเป็นผลลัพธ์ของการดึงวงจรรวม คือ ของดี ($Y = 1$) และของเสีย ($Y = 0$) จากการรวบรวมข้อมูลทั้งหมด 180 ข้อมูลได้ทำการตรวจสอบเงื่อนไขขั้นพื้นฐานของการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม การสร้างสมการหาคะแนนของการจำแนกกลุ่มตัวแปรตาม พบว่าระยะเข็ม (X_1) และแรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) ส่งผลต่อการจำแนกกลุ่มตัวแปรตาม และได้ตรวจสอบความแม่นยำสมการของข้อมูลสร้างสมการและข้อมูลทดสอบสมการมีค่าร้อยละ 95.14 และร้อยละ 97.22 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงศักยภาพของการใช้ข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจปรับตั้งค่าเครื่องจักรให้เหมาะสม โดยได้ค่าที่เหมาะสมของตัวแปร คือ ระยะเข็ม (X_1) มีค่า 502 ไมโครเมตร แรงดูดสุญญากาศของหัวจับวงจรรวม (X_2) มีค่า -0.55 มิลลิบาร์ สำหรับแรงดูดสุญญากาศของเข็มแทงเทปรองรับการตัด (X_3) ที่ไม่ส่งผลต่อการดึงวงจรรวมได้กำหนดค่าเป็น -0.15 มิลลิบาร์ ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดที่เครื่องจักรสามารถดึงวงจรรวมออกจากเทปรองรับการตัดได้โดยไม่พบปัญหาคุณภาพอื่น ๆ และยังช่วยประหยัดพลังงาน ยืดอายุการใช้งานอุปกรณ์ อีกทั้งยังสามารถกำหนดเป็นมาตรฐานของการปรับตั้งค่าเครื่องจักรได้อีกด้วย

การวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางการใช้ข้อมูลภายในกระบวนการผลิตเพื่อการจัดการที่มีประสิทธิภาพ (data-driven management) โดยไม่ต้องเปลี่ยนวัตถุดิบหรือเครื่องจักร และยังสามารถกำหนดเป็นมาตรฐานในการตั้งค่าเครื่องจักรในอนาคตได้ นอกจากนี้ ยังมี ความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเปลี่ยนจากการศึกษาทางกลไกเชิงวิศวกรรมมาเป็นการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เพื่อการจัดการเชิงกลยุทธ์

นอกจากนี้ความท้าทายของงานวิจัยฉบับนี้ คือ การกำหนดให้กลุ่มของดีโดยวงจรรวมจะต้องถูกดึงออกจากเทปรองรับการตัดทั้งหมด หากมีวงจรรวมหลงเหลือเพียง 1 ตัวจะถือว่าเป็นของเสียทันทีเนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาไม่สามารถนำแผ่นนั้นกลับมาทำซ้ำได้อีก ซึ่งถือเป็นผลลัพธ์ที่โรงงานกรณีศึกษามุ่งเน้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดด้านวัตถุดิบ เช่น เทปรองรับและพลาสติกห่อหุ้ม ที่ไม่สามารถเปลี่ยนได้เพราะข้อกำหนดของลูกค้า รวมถึงข้อจำกัดด้านข้อมูลบางรายการ เช่น ลีตของวัตถุดิบ รวมถึงข้อจำกัดของเทคนิควิเคราะห์จำแนกกลุ่มที่ต้องตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานหลายขั้นตอน

ข้อเสนอแนะในอนาคตสำหรับสถานประกอบการ (managerial implementation) ได้แก่ การขยายขอบเขตไปยังขั้นตอนก่อนหน้า เช่น ขั้นตอนการอบวงจรรวม การควบคุมระยะเวลาในกระบวนการผลิตวงจรรวม รวมถึงการเลือกชนิดเทปรองรับการตัด และ ข้อเสนอแนะทางการวิจัยในอนาคต (future research) ได้แก่ การใช้เทคนิคอื่น ๆ ที่ยืดหยุ่นกว่า เช่น logistic regression, QDA, SVM, ANN หรือ k-NN รวมถึงการปรับกระบวนการให้รองรับการตัดสินใจโดยอิงจากข้อมูลมากยิ่งขึ้น เพื่อยกระดับคุณภาพและลดของเสียได้อย่างยั่งยืน

REFERENCES

- [1] R. Zorich, *Handbook of Quality Integrated Circuit Manufacturing*. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1991.
- [2] Office of Trade Policy and Strategy, Macroeconomic Trade Research Division, "Global Semiconductor Industry Situation and Trends and Implications for Thailand," (in Thai), in *Thailand: Office of Trade Policy and Strategy*, pp. 1–18, 2022.
- [3] ttb analytics, "Semiconductor shortage issue in 2023," (in Thai), 2022, [Online]. Available: https://media.ttbbank.com/5004/analytics_business_and_industry/26-highlight-desktop-th.pdf
- [4] G. S. May and C. J. Spanos, *Fundamentals of Semiconductor Manufacturing and Process Control*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [5] S. Kumar and A. Gupta, *Integrated Circuit Fabrication*. Boca Raton, FL, USA: Manakin Press, 2021.
- [6] L. H. Lau, *Fan-Out Wafer-Level Packaging*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2018.
- [7] A. Chen and R. H. Lo, *Semiconductor Packaging: Materials Interaction and Reliability*. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Group, 2012.
- [8] T. H. Cheng, C. C. Du, and C. H. Tseng, "Study in IC chip failure during pick-up process by using experimental and finite element methods," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 172, no. 3, pp. 407–416, 2006.
- [9] W. R. Klecka, *Discriminant Analysis*. Newbury Park, CA, USA: SAGE Publications, 1980.



- [10] S. Sinsomboonthong, *Multivariate Analysis Using SPSS and MINITAB*. Bangkok, Thailand: Chamchuri Products (in Thai), 2016.
- [11] J. H. Carl and O. Stephen, *Applied MANOVA and Discriminant Analysis*. New Jersey, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [12] K. Yoothai, K. Sirikasemsuk, and K. Leerojanaprapa, "Discriminant analysis for defect reduction in plastic printing process of beverage closures," (in Thai), *J. Sci. Ladkrabang*, vol. 32, no. 2, pp. 17–37, 2023.
- [13] K. Vanichbancha, *Advanced Statistical Analysis Using SPSS for Windows*, 6th ed. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Printing House (in Thai), 2008.
- [14] C. Teerawiriya, *Statistical Data Analysis Using Minitab*. Bangkok, Thailand: Simplify Publishing (in Thai), 2020.
- [15] Z. Liu, Y. A. Huang, H. Liu, J. Chen, and Z. Yin "Reliable peeling of ultrathin die with multi needle ejector," *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, vol. 4, no. 9, pp. 1545–1554, 2014.
- [16] T. Ogasawara, N. Saiki, and S. Takyu, "Quantitative investigation of pick-up performance for UV-curable dicing tape," in *Proc. IEEE CPMT Symp. Jpn. (ICSJ)*, Kyoto, Japan, 2018, pp. 163–166.
- [17] X. Zhoulong, Z. Liu, Y. Huang, and J. Chen, "Vacuum-based picking-up of thin chip from adhesive tape," *J. Adhesion Sci. Technol.*, vol. 29, no. 13, pp. 1315–1329, 2015.
- [18] T. H. Cheng, C.-H. Tseng, and C.-H. Hung, "Application of a genetic algorithm associated with adhesive joint analysis to the IC chip pick-up process," *J. Adhesion Sci. Technol.*, vol. 22, no. 10, pp. 1057–1072, 2008.
- [19] B. Peng, Y. Huang, Z. Yin, and Y. Xiong, "Analysis of interfacial peeling in IC chip pick-up process," *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 7, 2011, Art. no. 073508. doi: 10.1063/1.3642975.
- [20] A. Deeprom, "Financial failure prediction in the early stage of small and medium enterprises (SMEs) in Thailand using discriminant analysis," (in Thai), M.S. thesis, Dept. Accounting, Thammasat Univ., Bangkok, Thailand, 2011.
- [21] T. Tantikan, "Making the financial model with discriminant analysis for small and medium enterprises in construction sector," (in Thai), M.S. thesis, Dept. Accounting, Thammasat Univ., Bangkok, Thailand, 2011.
- [22] O. Thonglor, S. Manatrainon, and A. Chaokhruea, "Discriminant analysis and binary logistic regression for prediction of milk production of dairy cattle farms," (in Thai), *KKU Sci. J.*, vol. 40, no. 4, pp. 1195–1204, 2012.
- [23] M. P. Perme, M. Blas, and S. Turk, "Comparison of logistic regression and linear discriminant analysis: a simulation study," *Adv. Methodology Statist.*, vol. 1, no. 1, pp. 143–161, 2004.
- [24] C. Y. Liong and S. F. Foo, "Comparison of linear discriminant analysis and logistic regression for data classification," presented at the 20th Nat. Symp. Math. Sci.: Res. Math. Sci.: Catalyst Creativity Innov., Putrajaya, Malaysia, 2013.
- [25] Q. Mustafa, "Comparison of discriminant analysis and logistic regression analysis: An application on caesarean births and natural births data," *J. Inst. Natural Appl. Sci.*, vol. 20, no. 1-2, pp. 34–46, 2015.