

การวิเคราะห์จำแนกประเภทสำหรับการลดของเสียกระบวนการพิมพ์พลาสติก ของฝาเครื่องดื่ม

Discriminant Analysis for Defect Reduction in Plastic Printing Process of Beverage Closures

กชวรรณ อยู่ไทย¹ กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข^{1*} และ กนกกรรณ ลีโรจนประภา²

Kotchawan Yoothai¹ Kittiwat Sirikasemsuk¹ and Kanogkan Leerojanaprapa²

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

¹Department of Industrial Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang

²Department of Statistics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

วันที่ส่งบทความ : 15 กรกฎาคม 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 8 กันยายน 2566 วันที่ตอบรับบทความ : 12 ตุลาคม 2566

Received: 15 July 2023, Revised: 8 September 2023, Accepted: 12 October 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกประเภทสำหรับการจำแนกกลุ่มชิ้นงานว่าเป็นของดีหรือของเสียเพื่อลดของเสียสำหรับกระบวนการพิมพ์พลาสติก โดยใช้การวิเคราะห์จำแนกประเภท (Discriminant analysis) จากบริษัทกรณีศึกษาพบว่า มีปัญหาเรื่องฝาเครื่องดื่มมีของเสียจากการหลุดลอกของหมึกพิมพ์ของเครื่องหมายทางการค้า ซึ่งมีความสำคัญต่อภาพลักษณ์ของผลิตภัณฑ์และการดึงดูดความสนใจสำหรับผู้บริโภคกับความต้องการซื้อผลิตภัณฑ์ ข้อมูลตัวอย่างจำนวน 180 ชุดได้ถูกเก็บรวบรวมกำหนดตัวแปรทำนาย 3 ตัว ได้แก่ ความดันแก๊ส (x_1) ความดันอากาศอัด (x_2) และความเร็วสายพาน (x_3) ตัวแปรตามถูกกำหนดเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มของดีและกลุ่มของเสีย ในงานวิจัยนี้สมการวิเคราะห์จำแนกประเภทสามารถระบุได้ดังนี้ $\hat{Y} = -15.175 + 0.089x_1 + 0.171x_2 + 0.004x_3$ ซึ่งมีประสิทธิภาพความถูกต้องเท่ากับ 94.4% นอกจากนี้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของความดันแก๊สมีค่าเท่ากับ 82 มิลลิบาร์ (mbar) ความดันอากาศอัดมีค่าเท่ากับ 7 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) และความเร็วสายพานมีค่าเท่ากับ 1,000 รอบต่อนาที (rpm) ค่าดังกล่าวถูกทำการทดลองซ้ำซึ่งยืนยันว่าได้ชิ้นงานเป็นกลุ่มของดีทั้งหมด

คำสำคัญ : การวิเคราะห์จำแนกประเภท ของเสีย กระบวนการพิมพ์พลาสติก การลดของเสีย

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: kittiwat.sirikasemsuk@gmail.com

Abstract

This research aimed to create the discriminant analysis equation for a classification group of good and bad products, in order to reduce the defects of the plastic printing process by means of the discriminant analysis. According to the company's case study, there was a problem with the beverage closures getting damaged because of the trademark ink peeling off. It was crucial for the brand of the goods and for attracting consumers to buy the product. A total of 180 sample data sets were collected. There were the following three predicted variables: gas pressure (x_1), compressed air pressure (x_2), and conveyor speed (x_3). The dependent variables were separated into two categories: good components and defects. In this research, the discriminant analysis equation could be determined as $\hat{Y} = -15.175 + 0.089x_1 + 0.171x_2 + 0.004x_3$, under a 94.4% accuracy rate. The suitable gas pressure, compressed air pressure, and conveyor speed were 82 mbar, 7 psi, and 1000 rpm, respectively. These results were replicated experimentally, which proved that every beverage closure was good.

Keyword: Discriminant analysis, Defect, Plastic printing process, Defect reduction

1. บทนำ

ในโลกปัจจุบันอุตสาหกรรมพลาสติกถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งซึ่งมีความสำคัญกับเศรษฐกิจและสร้างรายได้สำหรับประเทศไทยจำนวนมาก โดยเป็นอุตสาหกรรมที่ทำหน้าที่เปลี่ยนเม็ดพลาสติกไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกรูปแบบต่างๆ ได้แก่ ชิ้นส่วนประกอบอุตสาหกรรมรถยนต์ อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า และบรรจุภัณฑ์พลาสติก โดยอุตสาหกรรมหลายสาขามีแนวโน้มใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกเพิ่มขึ้น คือ อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม ส่งผลกับความต้องการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับการบรรจุและห่อหุ้มสินค้าเพื่อป้องกันความสะอาด ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ตลาดมีความต้องการในปริมาณสูง [1]-[2] ดังนั้นอุตสาหกรรมจึงต้องปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์ของตนเองอยู่เสมอ เช่น การปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด การลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ การลดปริมาณของเสียของกระบวนการผลิต ถือเป็นการเพิ่มโอกาสและประสิทธิภาพในการแข่งขันด้านธุรกิจของตนเองให้อยู่รอดในการดำเนินธุรกิจ [3]

สำหรับงานวิจัยนี้ บริษัทกรณีศึกษาเป็นผู้ผลิตและจำหน่ายบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่ม คือ ฝาเครื่องดื่ม สำหรับใช้ในการปิดขวดน้ำดื่มหรือน้ำอัดลม หากพิจารณาอุตสาหกรรมผลิตพลาสติกประเภทบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มพบว่าตลาดปัจจุบันมีบทบาทสำคัญและเติบโตอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงสำหรับการบริโภคในชีวิตประจำวัน ดังนั้น บริษัทกรณีศึกษาจึงมีความจำเป็นต้องถูกพัฒนาอย่างสมบูรณ์แบบ เพื่อตอบสนองความต้องการซื้อสำหรับผู้บริโภค

กระบวนการผลิตฝาเครื่องดื่มของบริษัทกรณีศึกษา ประกอบด้วย 4 กระบวนการหลัก โดยเริ่มจากกระบวนการฉีด กระบวนการพิมพ์ กระบวนการบรรจุ และกระบวนการจัดเก็บ มียอดการผลิตจำนวน

ทั้งหมด 473-480 ล้านชิ้นต่อปี จากการสำรวจข้อมูลของเสียจากการผลิตฝาเครื่องดื่มเฉลี่ยในอดีต 5 ปี ย้อนหลัง พบว่ามีของเสียเกิดขึ้นทั้งหมดประมาณ 6.2 ล้านชิ้นต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 1.32 สามารถแบ่งของเสียได้เป็น 2 ประเภท คือ 1) ของเสียที่เกิดจากกระบวนการฉีด คิดเป็นร้อยละ 0.54 และ 2) ของเสียที่เกิดจากกระบวนการพิมพ์ คิดเป็นร้อยละ 0.78 มีจำนวนสูงสุดเป็นอันดับ 1 โดยจะมีลักษณะการหลุดลอกของหมึกพิมพ์บริเวณด้านบนของฝา ส่งผลให้เครื่องหมายทางการค้าของลูกค้าไม่สมบูรณ์ตามแบบพิมพ์ ถือเป็นการเพิ่มต้นทุนที่ไม่ผ่านคุณภาพเป็นของเสีย สิ่งนี้ยังส่งผลให้พนักงานต้องสูญเสียเวลาสำหรับการปรับตั้งพารามิเตอร์ของเครื่องจักรใหม่ ซึ่งใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error) ถือเป็นการสูญเสียเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต [4] ด้วยปัญหานี้บริษัทกรณีศึกษาจึงมีความต้องการที่จะลดของเสียจากกระบวนการพิมพ์ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับผลิตภัณฑ์ อีกทั้งเป็นการเพิ่มโอกาสทางการแข่งขันด้านการตลาด เนื่องจากกระบวนการพิมพ์สีฝาเครื่องดื่มเป็นกระบวนการสำหรับสร้างภาพลักษณ์ที่สวยงามให้กับเครื่องหมายทางการค้าของลูกค้า ซึ่งถือเป็นกระบวนการสำคัญที่ต้องได้รับการพัฒนาให้มีคุณภาพสูงที่สุด [5]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการพยากรณ์ซึ่งมีความถูกต้อง (Accuracy) สำหรับการจำแนกกลุ่มว่าชิ้นงานว่าเป็นของดีหรือของเสีย โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภท (Discriminant analysis) มาประยุกต์ใช้ และหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์สำหรับการปรับตั้งเครื่องจักรเพื่อลดจำนวนของเสียในกระบวนการพิมพ์ฝาเครื่องดื่ม

1.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์จำแนกประเภท

การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม เป็นวิธีการสถิติที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มของตัวแปรเกณฑ์ (Y) โดยการวิเคราะห์ซึ่งพิจารณาระหว่างตัวแปรเกณฑ์ 1 ตัวและตัวแปรทำนายตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไป การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถจำแนกความแตกต่างระหว่างกลุ่ม และสามารถบอกธรรมชาติแต่ละรูปแบบของการจำแนกกลุ่มได้ เช่น สามารถแสดงว่าตัวแปรใดจำแนกได้ดีที่สุด หมายถึง สามารถแสดงประสิทธิภาพหรือค่าน้ำหนักของการจำแนกสำหรับตัวแปรเหล่านั้น [6]

การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม เริ่มต้นจากการเก็บข้อมูลที่ทราบจำนวนกลุ่ม และทราบว่าแต่ละเหตุการณ์หรือกรณีอยู่กลุ่มใด แล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้สำหรับการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรที่พยากรณ์ว่าจะทำให้เหตุการณ์หรือกรณีที่อยู่คนละกลุ่มมีความแตกต่างกัน และนำสมการที่สร้างได้มาทำการจัดกลุ่ม พยากรณ์เหตุการณ์หรือกรณีที่ยังไม่ทราบกลุ่ม [7]

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์จำแนกประเภท แสดงทั้งหมด 3 ประการ ดังต่อไปนี้ [8]

1. ใช้สำหรับหาสาเหตุหรือตัวแปรที่ควรใช้สำหรับแบ่งกลุ่ม
 2. เพื่อสร้างสมการจำแนกกลุ่มที่เหมาะสมที่สุดของข้อมูล
 3. เพื่อประยุกต์ใช้สมการจำแนกกลุ่มสำหรับพยากรณ์กลุ่มใหม่ว่าต้องพิจารณาจัดให้อยู่เป็นกลุ่มใด
- ลักษณะข้อมูลที่ประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์จำแนกประเภท แบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้
1. ตัวแปรเกณฑ์ จัดเป็นข้อมูลเชิงกลุ่ม (Categorical) เป็นตัวแปรที่แบ่งเป็นกลุ่มๆ ตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป มีระดับการวัดในมาตรานามบัญญัติ (Nominal scale) หรือมาตราเรียงอันดับ (Ordinal scale) และเมื่อพบข้อมูลเป็นรูปแบบอื่นต้องแปลงข้อมูลเป็นตัวแปรเชิงกลุ่มก่อนที่จะนำไปทำการวิเคราะห์

2. ตัวแปรอิสระ เป็นตัวแปรสำหรับจำแนกหรือเป็นตัวแปรสำหรับการพยากรณ์ เป็นตัวแปรต่อเนื่อง ซึ่งมีระดับการวัดอยู่ในมาตราอันตรภาค (Interval scale) หรือมาตราอัตราส่วน (Ratio scale) และเมื่อพบว่าข้อมูลเป็นระดับอื่นต้องแปลงเป็นตัวแปรหุ่น (Dummy coding) ก่อนการนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์ การตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานของการวิเคราะห์จำแนกประเภท แสดงเงื่อนไขดังต่อไปนี้ [9]-[11]

1. การตรวจสอบตัวแปรทำนายมีการแจกแจงแบบปกติหลายตัวแปร (Normality of Independent Variables) โดยวิธี Anderson-Darling

2. การตรวจสอบเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมสำหรับตัวแปรทำนายแต่ละกลุ่มต้องเท่ากัน ตรวจสอบโดยใช้สถิติ Box's M

3. การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของตัวแปรทำนายและตัวแปรตาม ตรวจสอบโดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พอยท์ไบซีเรียล (Point Biserial Correlation Coefficient) โดยที่ตัวแปรหนึ่งเป็นตัวแปรต่อเนื่องซึ่งมีการแจกแจงแบบปกติ และอีกตัวแปรหนึ่งเป็นแบบ Dichotomous ที่จำแนกได้เป็นสองกลุ่ม คือ ขึ้นงานดี แทนเป็น 1 และขึ้นงานเสีย แทนเป็น 0 [12] แสดงดังสมการที่ (1)

$$r_{pbi} = \frac{\bar{x}_p - \bar{x}_q}{S_x} \sqrt{pq} \quad (1)$$

โดย	r_{pbi}	แทนสหสัมพันธ์พอยท์ไบซีเรียล
	S_x	แทนส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรทำนาย
	p	แทนสัดส่วนของจำนวนข้อมูลในกลุ่มหนึ่งต่อจำนวนข้อมูลทั้งหมด
	q	แทนสัดส่วนของจำนวนข้อมูลในอีกกลุ่มหนึ่งต่อจำนวนข้อมูลทั้งหมด
	$\bar{x}_p$	แทนค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายเฉพาะในกลุ่มที่กำหนดเป็น 1
	$\bar{x}_q$	แทนค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายเฉพาะในกลุ่มที่กำหนดเป็น 0
	$\bar{x}$	แทนค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายทั้งหมด

4. การตรวจสอบตัวแปรทำนายต้องไม่มีความสัมพันธ์ร่วมเชิงพหุเชิงเส้น (Multicollinearity) ตรวจสอบโดยพิจารณาค่าทางสถิติ Collinearity ซึ่งพิจารณาค่า Tolerance และ Variance Inflation Factor (VIF)

การประเมินประสิทธิภาพของสมการวิเคราะห์จำแนกประเภท เป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพของสมการวิเคราะห์จำแนกประเภท ซึ่งนำค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมาพิจารณาเป็นมาตรวัดประสิทธิภาพสำหรับการทำนาย ซึ่งคำนวณจากอัตราของการจำแนกกลุ่มที่ถูกต้องกับจำนวนข้อมูลทั้งหมด [13] แสดงดังตารางที่ 1 และสมการที่ (2)

ตารางที่ 1. ความถูกต้องของการพยากรณ์

		ค่าพยากรณ์		รวม
		เกิดเหตุการณ์	ไม่เกิดเหตุการณ์	
ค่าอ้างอิง (เป็นจริง)	เกิดเหตุการณ์	True Positive (TP)	False Positive (FP)	TP + FP
	ไม่เกิดเหตุการณ์	False Negative (FN)	True Negative (TN)	FN + TN
รวม		TP + FN	FP + TN	TP+FP+FN+TN

โดยที่

True Positive (TP) แทนจำนวนข้อมูลซึ่งพยากรณ์เกิดเหตุการณ์ว่าเกิดเหตุการณ์

False Positive (FP) แทนจำนวนข้อมูลซึ่งพยากรณ์เกิดเหตุการณ์ว่าไม่เกิดเหตุการณ์

False Negative (FN) แทนจำนวนข้อมูลซึ่งพยากรณ์ไม่เกิดเหตุการณ์ว่าเกิดเหตุการณ์

True Negative (TN) แทนจำนวนข้อมูลซึ่งพยากรณ์ไม่เกิดเหตุการณ์ว่าไม่เกิดเหตุการณ์

$$\text{Accuracy (\%)} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{FN} + \text{TN}} * 100 \quad (2)$$

1.2 ทฤษฎีการปรับสภาพผิวของพลาสติก

พลาสติกโดยทั่วไปมีลักษณะดังนี้ เมื่อต่อสารเคมี ผิวไม่มีรูพรุน และแรงดึงผิวต่ำ จึงทำให้พลาสติกไม่สามารถเกาะติดได้ดีกับพลาสติกเหลวที่ใช้เคลือบ กาวและหมึกพิมพ์ต่างๆ ได้ ซึ่งโพลีเอทิลีน (Polyethylene: PE) และโพลีโพรพิลีน (Polypropylene: PP) เป็นพลาสติกที่มีแรงดึงผิวต่ำที่สุด ส่วนใหญ่แล้ว PE และ PP จะถูกนำมาปรับสภาพพื้นผิวเพื่อให้มีการเกาะติดที่ดีขึ้น ทั้งนี้การปรับสภาพผิวฟิล์มไม่ได้มีข้อจำกัด ว่าต้องทำกับพลาสติก 2 ชนิดนี้เท่านั้น ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้สำหรับปรับปรุงการเกาะติดกับพลาสติกทุกประเภท อาทิ ฟิล์ม เป็นต้น และวัสดุที่ไม่ใช่พลาสติก อาทิ พอยล์และกระดาษ เป็นต้น ซึ่งการปรับสภาพผิว สามารถทำได้ทั้งหมด 4 วิธี ได้แก่ [14]

1. การปรับสภาพผิวโดยใช้โคโรนา (Corona treatment)
2. การปรับสภาพผิวโดยใช้เปลวไฟ (Flame treatment)
3. การปรับสภาพผิวโดยใช้พลาสมา (Plasma treatment)
4. การปรับสภาพผิวโดยใช้ Primer

ในงานวิจัยนี้บริษัทกรณีศึกษาซึ่งผลิตฝาเครื่องดื่มประเภทน้ำอัดลม ได้ใช้วัตถุดิบเป็นพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนเกรด High Density Polyethylene (HDPE) ซึ่งมีค่าพลังงานพื้นผิว (Surface energy) โดยทั่วไปเท่ากับ 40 ไดน์ต่อเซนติเมตร ซึ่งถือว่ามีความต่ำไม่สามารถเกาะติดกับหมึกพิมพ์ได้ในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับสภาพผิวของฝาโดยใช้เปลวไฟก่อนเข้าสู่การพิมพ์สี (Printing process)

การปรับสภาพพื้นผิวด้วยเปลวไฟ เป็นวิธีการปรับสภาพผิวสำหรับพลาสติกที่ทำโดยการป้อนขึ้นงานผ่านเปลวไฟ ทำให้เกิดอนุมูลใหม่ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) บนพื้นผิวของพลาสติก ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอกซิล และหมู่คาร์บอนิล ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีสภาพเป็นขั้ว ให้พลาสติกมีพลังงานพื้นผิวและความสามารถในการเปียกผิว (Wettability) สูงขึ้น การเปียกผิวดีส่งผลให้การติดดูระหว่างของเหลวกับพื้นผิวสัมผัสที่เป็นของแข็งดี ซึ่งปัจจัยทั้งสองข้อนี้ นับเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งส่งผลต่อการยึดเกาะของหมึกพิมพ์บนพื้นผิวพลาสติก การปรับสภาพพื้นผิวด้วยเปลวไฟ มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการยึดเกาะของของเหลวลงบนวัสดุที่มีพื้นผิวเป็นของแข็ง ปัจจัยที่มีผลสำหรับประสิทธิภาพของการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟ ได้แก่ ระยะห่างระหว่างไฟกับวัตถุ ความเร็วของสายพาน ปริมาณแก๊ส (Gas) และปริมาณอากาศ (Air) [15] เป็นต้น

1.3 ทฤษฎีการพิมพ์และการอบแห้งของพลาสติก

กระบวนการพิมพ์พลาสติกในอุตสาหกรรมมีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และประเภทของการใช้งาน ได้แก่

1. รูปแบบพิมพ์ออฟเซต (Offset printing)
2. รูปแบบพิมพ์เลตเตอร์เพรส (Letterpress printing)
3. รูปแบบพิมพ์ซิลค์สกรีน (Silkscreen printing)
4. รูปแบบพิมพ์ดิจิตอล (Digital printing)
5. รูปแบบพิมพ์เฟล็กโซกราฟี (Flexography)
6. รูปแบบพิมพ์กราวัร์ (Gravure)

โดยในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการพิมพ์พลาสติกรูปแบบ Offset Printing เนื่องจากเป็นรูปแบบที่บริษัทธนศึกษานำมาประยุกต์ใช้ กระบวนการพิมพ์รูปแบบ Offset Printing เป็นเทคนิคที่แพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นการพิมพ์ที่สามารถผลิตงานพิมพ์ได้เร็วกว่าการพิมพ์ด้วยบล็อกสกรีน เพราะการพิมพ์ด้วยวิธีนี้นั้น ขึ้นงานและลูกกลิ้งจะทำงานอยู่ตลอดเวลา ขั้นตอนของกระบวนการพิมพ์ คือ แม่พิมพ์รูปแบบนี้มีลักษณะแบบลูกกลิ้งกลมกลวง โดยสีจะถูกฉีดออกจากข้างในลูกกลิ้ง และมีตัวปาดสีจะทำหน้าที่อยู่ภายในลูกกลิ้ง ขณะเครื่องทำงานพิมพ์ลูกกลิ้งจะหมุนรอบตัวและสีก็จะออกมาตามลวดลายของลูกกลิ้ง และลวดลายก็จะถูกพิมพ์ไปบนชิ้นงานที่วิ่งไปตามสายพาน [16]

การอบแห้งของพลาสติก ใช้รูปแบบของการทำให้สารเคลือบผิวของวัสดุอยู่ตัวหรือแข็งตัว ด้วยการเรียงตัวระหว่างโมเลกุล โดยการนำสารพิเศษที่มีคุณสมบัติตอบสนองต่อความร้อนหรือรังสีผสมลงในหมึกสี แลคเกอร์หรือกาวที่ใช้ทาเคลือบผิววัสดุ จากนั้นให้ความร้อนหรือฉายรังสีลงไปส่งผลให้โมเลกุลของสารพิเศษเกิดการต่อตัวกันยาวขึ้น ทำให้หมึกสี แลคเกอร์ หรือกาวนั้นแห้งและแข็งตัวในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งอุตสาหกรรมมีความต้องการกระบวนการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนต่ำ [17] โดยกระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. การอบแห้งโดยใช้ความร้อน (Thermal curing)
2. การอบแห้งโดยใช้รังสี (Radiation curing)

สำหรับบริษัทกรณีศึกษาใช้วิธีการอบแห้งโดยใช้รังสีชนิดรังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งมีข้อดีคือเป็นเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการเพิ่มยอดการผลิตและการใช้พลังงานของกระบวนการพิมพ์ที่ลดลง ขั้นตอนการทำงานจะใช้การฉายรังสีอัลตราไวโอเลตลงไปที่วัสดุซึ่งผ่านการพิมพ์ เคลือบด้วยหมึกหรือสีซึ่งมีสารพิเศษที่มีคุณสมบัติตอบสนองต่อรังสีอัลตราไวโอเลต ทำให้โมเลกุลของสารพิเศษนี้เกิดปฏิกิริยาเรียงตัวกันทำให้แห้งพร้อมกับแข็งตัวเคลือบลงบนพื้นผิวสัมผัสอย่างรวดเร็ว [18]

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟ ก่อนเข้าสู่กระบวนการพิมพ์ แสดงดังต่อไปนี้

Sutherland และคณะ [19] ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟ ของพลาสติก โดยพิจารณาที่ค่าพลังงานพื้นผิว ซึ่งปัจจัยที่นำมาพิจารณาและส่งผลต่อการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟ ได้แก่ ความดันแก๊ส ความดันอากาศอัด เวลาที่ขึ้นงานสัมผัสเปลวไฟซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของการป้อนชิ้นงาน และระยะระหว่างจุดกำเนิดเปลวไฟกับพื้นผิวของชิ้นงาน Medeiros และคณะ [20] กล่าวว่าพลาสติกโดยส่วนใหญ่มีพลังงานพื้นผิวที่ต่ำ และการยึดเกาะของหมึกพิมพ์บนชิ้นงานพลาสติกถือเป็นปัญหาคุณภาพที่สำคัญของอุตสาหกรรม ซึ่งคุณสมบัติการยึดเกาะของหมึกพิมพ์ของชิ้นงานพลาสติกขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการเปียกผิว และพลังงานพื้นผิว การปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟ เป็นกระบวนการที่ใช้ต้นทุนต่ำ ให้ประสิทธิภาพดี ใช้ระยะเวลาสั้น และยังช่วยเพิ่มพลังงานพื้นผิวของชิ้นงานพลาสติกคิดเป็น 20% โดยประมาณ ในขณะที่ Mazzola และคณะ [21] ได้ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟ โดยพิจารณาค่าพลังงาน ความเป็นขี้ และความเปียกผิว โดยนำปัจจัยซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟมาพิจารณาเป็น 5 ปัจจัย ได้แก่ ระยะของเปลวไฟระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวของชิ้นงาน เวลาที่ขึ้นงานสัมผัสเปลวไฟ ความเร็วของการป้อนชิ้นงาน ความดันของแก๊ส และความดันของอากาศอัด

การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคทางด้านสถิติ แสดงดังต่อไปนี้

Antonogeorgos และคณะ [22] ได้เปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์จำแนกประเภท และวิธีการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกส์ สำหรับการพิจารณาปัจจัยที่มีผลกับโรคหอบหืดของเด็กอายุ 10-12 ปี และสรุปผลว่าทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ในการจำแนกประเภทเหมือนกัน ซึ่งการตัดสินใจเลือกวิธีสำหรับการวิเคราะห์ว่าวิธีการใดเหมาะสมที่สุด ก็จะต้องพิจารณาสมมุติฐานของเหตุการณ์ในการประยุกต์ใช้ร่วมด้วย Andrew และ Mark [23] ได้กล่าวว่าหากชุดข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ รวมถึงเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมสำหรับแต่ละกลุ่มเท่ากันจะเลือกประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภทจะมีความเหมาะสมของแบบจำลอง หากข้อมูลไม่เข้าเงื่อนไขจึงจะพิจารณาใช้การวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกส์ และการวิเคราะห์ต้นไม้ตัดสินใจ เป็นลำดับถัดไป ซึ่งทั้งสามวิธีเป็นเทคนิคที่เป็นแบบจำลองใช้สำหรับพยากรณ์กลุ่มเหตุการณ์ ในขณะที่ Press และ Wilson [24] ได้เสนอให้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภทจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกส์ เมื่อชุดข้อมูลสำหรับกลุ่มประชากรเป็นการแจกแจงแบบปกติ แต่ถ้าหากชุดข้อมูลของกลุ่มประชากรเป็นการแจกแจงไม่ปกติ ไม่เป็นไปตาม

เงื่อนไข เสนอให้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกส์ ซึ่งพิจารณาค่าความเป็นไปได้สูงสุด (Maximum likelihood)

Krzanowski [25] กล่าวว่า การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์จำแนกประเภท สำหรับตัวแปรอิสระควรเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ หรือหากมีตัวแปรเชิงกลุ่มอยู่ด้วยจะต้องปรับตัวแปรเชิงกลุ่มให้เป็นตัวแปรเทียม และตัวแปรตามเป็นตัวแปรเชิงกลุ่ม ที่แบ่งเป็น 2 กลุ่ม หรือมากกว่า 2 กลุ่ม หากจำนวนการจำแนกกลุ่มของตัวแปรตามถูกจำแนกเป็นหลายกลุ่ม ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเก็บรวบรวมข้อมูล ก็จะต้องเก็บข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองจำนวนมากขึ้นตามการจำแนกกลุ่มของตัวแปรตาม และ Dattalo [26] ได้ศึกษาเปรียบเทียบการวิเคราะห์จำแนกประเภทและการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกส์ ทั้งสองวิธีสามารถใช้กับการจำแนกประเภท ควรเลือกใช้วิธีการรูปแบบใดต้องพิจารณามุมมองสำหรับการวิเคราะห์ร่วมด้วย ได้แก่ วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ เงื่อนไขของชุดข้อมูล และความคงทนของสมมติฐาน โดยงานวิจัยของ Dattalo สรุปผลว่าการวิเคราะห์จำแนกประเภทแบบจำลองให้ความถูกต้อง 84.30% ซึ่งสูงกว่าการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกส์สมการให้ความถูกต้อง 83.28% ในขณะที่ Efron [27] พิจารณาประสิทธิภาพของทั้งสองวิธีการ เปรียบเทียบกันในมุมมองของเงื่อนไขของชุดข้อมูลและกล่าวว่าการวิเคราะห์จำแนกประเภทมีเงื่อนไขของตัวแปรอิสระที่มากกว่าการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกส์ แต่จะให้ประสิทธิภาพดีกว่า หากตัวแปรอิสระเป็นไปตามเงื่อนไขการตรวจสอบพื้นฐานของตัวแปรอิสระ

หลังจากทบทวนวรรณกรรม ผู้วิจัยพบว่างานวิจัยในอดีต [19]-[21] ได้พิจารณาในหัวข้อปัญหาคุณสมบัติการยึดเกาะของหมึกพิมพ์บนชิ้นงานพลาสติก ซึ่งถือเป็นปัญหาคุณภาพ สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม โดยมุ่งเน้นพิจารณาเฉพาะผลลัพธ์การปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟด้วยคุณสมบัติเชิงเคมีของพลาสติกในมุมของพลังงานพื้นผิว และกำหนดปัจจัยซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟ ได้แก่ ความดันแก๊ส ความดันอากาศอัด เวลาที่ชิ้นงานสัมผัสเปลวไฟซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของการป้อนชิ้นงาน และระยะระหว่างจุดกำเนิดเปลวไฟกับพื้นผิวของชิ้นงาน [19]-[21]

เนื่องจากบริษัทนักศึกษาไม่มีอุปกรณ์และเครื่องมือวัด และใช้กำลังการผลิตที่สูง จึงไม่สามารถวัดผลลัพธ์เป็นค่าพลังงานพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟได้อย่างละเอียด ประกอบกับไม่ค่อยมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นไปศึกษากระบวนการพิมพ์พลาสติกของฝาวาจะเป็นกลุ่มของดีหรือของเสีย หลังจากการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟ จึงเป็นโอกาสที่ดีที่งานวิจัยนี้จะศึกษาการกำหนดค่าการปรับตั้งเครื่องจักร นับเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟอ้างอิงตามงานวิจัยของ Mazzola และคณะ [21] และพิจารณาที่ผลลัพธ์สุดท้ายของกระบวนการพิมพ์ของพลาสติกว่าผลลัพธ์สุดท้ายจะได้เป็นกลุ่มของดีหรือกลุ่มของเสีย เพื่อมุ่งเน้นการลดของเสียสำหรับขั้นตอนการพิมพ์ ที่แตกต่างจากงานวิจัยในอดีตที่มุ่งเน้นพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติด้านพลังงานพื้นผิว

จากการที่งานวิจัยนี้กำหนดปัจจัยที่มีผลกับการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟ (x) ได้แก่ ความดันแก๊ส ความดันอากาศอัด และความเร็วของสายพานตามงานวิจัยของ Mazzola และคณะ [21] และกำหนดค่าตัวแปรตาม (Y) เป็นกลุ่มของดีหรือกลุ่มของเสีย ซึ่งจัดว่าเป็นข้อมูลเชิงกลุ่ม และผู้วิจัยพิจารณาลักษณะของข้อมูลเบื้องต้นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขการตรวจสอบพื้นฐานสำหรับเทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภท และพิจารณาค่าตัวแปรตาม (Y) เป็นข้อมูลเชิงกลุ่ม ด้วยเหตุผลนี้เองผู้วิจัยจึงนำเลือกน้าเทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภทมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ ประกอบกับงานวิจัยของ Efron [27] ที่กล่าวว่าหากชุดข้อมูล

เป็นไปตามเงื่อนไขพื้นฐาน การประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภทจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกส์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภท สำหรับการสร้างสมการพยากรณ์ที่มีความถูกต้อง ในการจำแนกกลุ่มว่าชิ้นงานเป็นของดีหรือของเสีย และหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์สำหรับการปรับตั้งเครื่องจักรเพื่อลดจำนวนของเสียของกระบวนการพิมพ์ฝาเครื่องต้ม

งานวิจัยนี้จะพิจารณาผลลัพธ์ของการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟ โดยพิจารณามุมมองคุณภาพผลลัพธ์สุดท้ายของกระบวนการผลิตชิ้นงานเป็นหลักว่าเป็นของดีหรือของเสีย ซึ่งถือได้ว่าเป็นความต้องการสุดท้ายของบริษัทที่ผลิตสินค้าที่ต้องการได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของดี และพบว่าแตกต่างกับมุมมองการวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยส่วนใหญ่ในอดีต จะเน้นพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติเชิงเคมีหรือพฤติกรรมด้านคุณสมบัติพื้นผิวของพลาสติกเพื่อพิจารณาผลลัพธ์ของประสิทธิภาพกระบวนการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟ ซึ่งถือได้ว่าไม่ใช่เป็นผลลัพธ์สุดท้ายสำหรับกระบวนการผลิต ที่ไม่อาจยืนยันได้ว่าเมื่อผ่านกระบวนการผลิตขั้นตอนถัดไปจนถึงกระบวนการสุดท้ายแล้วจะได้เป็นชิ้นงานดีหรือไม่

2. วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการพิมพ์พลาสติกของฝาเครื่องต้ม เป็นขั้นตอนการสร้างเครื่องหมายทางการค้าตามความต้องการของลูกค้าลงบนฝาเครื่องต้ม ซึ่งเป็นขั้นตอนสำหรับสร้างมูลค่ารวมถึงภาพลักษณ์ที่สวยงามให้กับผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนการพิมพ์จึงเป็นขั้นตอนซึ่งมีความสำคัญเนื่องจากเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะบรรจุฝาเครื่องต้มลงกล่องและส่งออกเป็นผลิตภัณฑ์ไปสู่ลูกค้า ประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานทั้งหมด 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การปรับสภาพพื้นผิวโดยใช้เปลวไฟ 2) การพิมพ์ของฝา 3) การอบแห้ง และ 4) การทดสอบการหลุดลอกของหมึกพิมพ์ โดยใช้การทดสอบด้วยเทป (Ink Adhesion Tape Test) อ้างอิงตาม ASTM F2252-03 Tape Test เพื่อทดสอบว่าผลิตภัณฑ์ฝาเป็นของดีคือไม่มีการหลุดลอกของหมึกพิมพ์ หรือเป็นของเสียที่มีการหลุดลอกของหมึกพิมพ์ แสดงดังรูปที่ 1



ก) ของดี



ข) ของเสีย

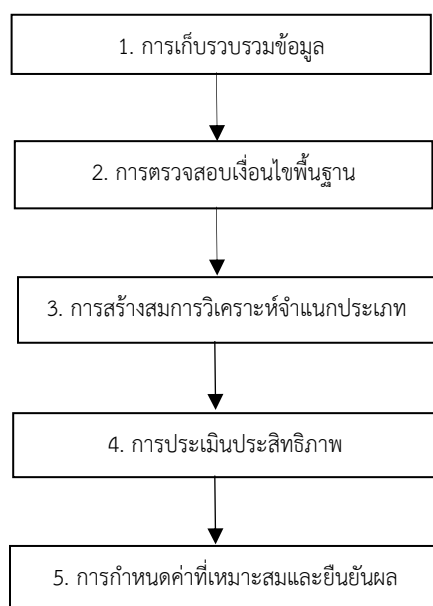
รูปที่ 1. ของดี และของเสีย

หากมีการปรับสภาพผิวโดยใช้เปลวไฟอย่างมีประสิทธิภาพ ถือเป็นการเพิ่มความสามารถสำหรับการยึดเกาะและป้องกันการหลุดลอกของหมึกพิมพ์ เพื่อให้เป็นของดี ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการปรับสภาพผิวโดยใช้เปลวไฟ ได้แก่ ความดันแก๊ส ความดันอากาศอัด และความเร็วสายพาน [28] ดังนั้นสำหรับ

งานวิจัยนี้จะนำปัจจัยดังกล่าวทั้ง 3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องและมีผลกับการหลุดลอกของหมึกพิมพ์ของฝา มา กำหนดเป็นตัวแปรทำนาย (x) ได้แก่ ความดันแก๊ส (x_1) ความดันอากาศอัด (x_2) และความเร็วสายพาน (x_3) สำหรับการสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกประเภท และกำหนดตัวแปรตาม Y เป็นประเภทของชิ้นงาน ซึ่งจะ แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่เป็นของดีไม่พบการหลุดลอกของหมึกพิมพ์กำหนดค่าเป็น 1 และกลุ่มที่เป็นของ เสียพบการหลุดลอกของหมึกพิมพ์กำหนดค่าเป็น 0 โดยตัวแปรทำนาย (x) ในแต่ละปัจจัย จะอยู่ในช่วงของ ชุดข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ความดันแก๊ส (x_1) มีหน่วยเป็น mbar เครื่องจักรสามารถปรับตั้งค่าได้ตั้งแต่ 80-150 mbar
2. ความดันอากาศอัด (x_2) มีหน่วยเป็น psi เครื่องจักรสามารถปรับตั้งค่าได้ตั้งแต่ 3-30 psi
3. ความเร็วสายพาน (x_3) มีหน่วยเป็น rpm เครื่องจักรสามารถปรับตั้งค่าได้ตั้งแต่ 600-1,000 rpm

เมื่อศึกษาสภาพปัจจุบันสำหรับบริษัทกรณีศึกษา กำหนดหัวข้อปัญหา ศึกษาและกำหนดปัจจัยที่มี ผลกับการหลุดลอกของหมึกพิมพ์ของฝา กำหนดตัวแปรทำนาย (x) และตัวแปรตาม (Y) ต่อไปนี้จะ ดำเนินการตามขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยบนพื้นฐานของการวิเคราะห์จำแนกประเภท แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

สำหรับวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลจะใช้จำนวนตัวอย่างเป็น 10 เท่าของจำนวนตัวแปรทำนาย ซึ่ง สอดคล้องกับการกำหนดจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์จำแนกประเภทซึ่งงานวิจัยของ Polit [29] ได้กล่าวไว้ แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้จำนวนตัวอย่าง $n = 180$ โดยชุดข้อมูลนี้จะถูกกำหนดและแยก ออกเป็นสองชุดข้อมูล คือชุดข้อมูลแรกจำนวน 70% ของจำนวนข้อมูลทั้งหมด เป็น Training Sample ใช้ สำหรับการสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกประเภท คิดเป็น 126 ข้อมูล เป็นกลุ่มของดีจำนวน 76 ข้อมูล และ กลุ่มของเสียจำนวน 50 ข้อมูล และชุดข้อมูลที่สองจำนวน 30% ของข้อมูลทั้งหมด เป็น Holdout Sample

ใช้สำหรับประเมินประสิทธิภาพสมการวิเคราะห์จำแนกประเภท คิดเป็น 54 ข้อมูล เป็นกลุ่มของดีจำนวน 30 ข้อมูล และกลุ่มของเสียจำนวน 24 ข้อมูล แสดงตัวอย่างตารางการเก็บข้อมูลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. ตัวอย่างตารางการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวแปรทำนาย (x) และตัวแปรตาม (Y)

	ลำดับ ข้อมูล (N)	ความดันแก๊ส x_1 (mbar)	ความดันอากาศอัด x_2 (psi)	ความเร็วสายพาน x_3 (rpm)	Y (ของดี = 1, ของเสีย = 0)
ข้อมูลสร้างสมการ (70% ของข้อมูล ทั้งหมด)	1	80	3	820	1
	2	80	3	825	1
	3	81	4	825	1
	...	...	...	...	...
	126	139	23	955	0
ข้อมูลทดสอบ (30% ของข้อมูล ทั้งหมด)	1	82	3	820	1
	2	110	5	845	1
	3	111	10	835	1
	...	...	...	...	...
	54	125	30	910	0

โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมทั้งหมด 2 โปรแกรม ได้แก่ โปรแกรม SPSS และโปรแกรม Minitab 17 โดยรายละเอียดการนำแต่ละโปรแกรมไปประยุกต์ใช้แสดงดังต่อไปนี้

1. โปรแกรม SPSS ใช้สำหรับการตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานของชุดข้อมูลในหัวข้อการตรวจสอบเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมสำหรับตัวแปรทำนายแต่ละกลุ่มต้องเท่ากัน โดยการพิจารณาสถิติ Box's M การตรวจสอบตัวแปรทำนายต้องไม่มีความสัมพันธ์ร่วมเชิงพหุเชิงเส้น และการสร้างสมการจำแนกกลุ่ม
2. โปรแกรม Minitab 17 ใช้สำหรับการตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานของชุดข้อมูลในหัวข้อการตรวจสอบตัวแปรทำนายมีการแจกแจงแบบปกติหลายตัวแปร และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์สำหรับนำไปปรับตั้งเครื่องจักร

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานของการวิเคราะห์จำแนกประเภท

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลค่าการปรับตั้งเครื่องจักรสำหรับกระบวนการพิมพ์พลาสติกประจำวันจำนวนทั้งหมด 180 ข้อมูล จะนำข้อมูลชุดแรก กลุ่ม Training Sample จำนวน 126 ข้อมูล เป็นกลุ่มของดีจำนวน 76 ข้อมูล และกลุ่มของเสียจำนวน 50 ข้อมูล ตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐาน ซึ่งแสดงผลดังต่อไปนี้

1. ผลการตรวจสอบตัวแปรทำนาย โดยการนำข้อมูลตัวแปรทำนาย ทั้ง 3 ตัวแปร ได้แก่ ความดันแก๊ส ความดันอากาศอัด และความเร็วสายพาน ของทั้ง 2 กลุ่มข้อมูล คือกลุ่มที่เป็นของดีกับของเสีย มาทำการตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ โดยวิธี Anderson-Darling ด้วยโปรแกรม Minitab ดังตารางที่ 3

และ 4 แสดงให้เห็นว่าค่า P-value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของตัวแปรทำนายทั้ง 3 ตัวแปร ทั้ง 2 กลุ่ม มีค่ามากกว่า 0.05 สรุปได้ว่า ความดันแก๊ส ความดันอากาศอัด และความเร็วสายพาน มีการแจกแจงแบบปกติ

ตารางที่ 3. ผลการตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของตัวแปรทำนาย ของชุดข้อมูลที่เป็นของดี จำนวน 76 ข้อมูล (ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05)

ชื่อตัวแปร	Mean	Standard Deviation	Average Deviation	P-value
ความดันแก๊ส	92.89	8.064	0.732	0.054
ความดันอากาศอัด	8.276	3.232	0.709	0.062
ความเร็วสายพาน	742.0	78.05	0.696	0.066

ตารางที่ 4. ผลการตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของตัวแปรทำนาย ของชุดข้อมูลที่เป็นของเสีย จำนวน 50 ข้อมูล (ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05)

ชื่อตัวแปร	Mean	Standard Deviation	Average Deviation	P-value
ความดันแก๊ส	131.4	6.178	0.539	0.159
ความดันอากาศอัด	22.58	4.016	0.579	0.125
ความเร็วสายพาน	953.7	25.51	0.598	0.114

2. ผลการตรวจสอบการเท่ากันของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมสำหรับตัวแปรทำนายแต่ละกลุ่มคือ กลุ่มของดีและของเสีย ตรวจสอบโดยใช้สถิติ Box's M แสดงดังตารางที่ 5 โดยกำหนดสมมติฐานสำหรับการทดสอบแสดงดังนี้

$$\begin{aligned}
 H_0: \Sigma_1 &= \Sigma_2; \text{ ความแปรปรวนร่วมของ 2 กลุ่มเท่ากัน} \\
 H_1: \Sigma_1 &\neq \Sigma_2; \text{ ความแปรปรวนร่วมของ 2 กลุ่มไม่เท่ากัน} \\
 \text{โดย } \Sigma_1 &\text{ แทนความแปรปรวนร่วมของกลุ่มที่ 1 คือกลุ่มของดี} \\
 \Sigma_2 &\text{ แทนความแปรปรวนร่วมของกลุ่มที่ 2 คือกลุ่มของเสีย}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 5. ผลการตรวจสอบการเท่ากันของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของตัวแปรทำนาย

Test Results		
Box's M		1.606
F	Approx.	1.593
	df1	1
	df2	40952.070
	Sig.	0.207

จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าค่า Sig. ของการทดสอบ = 0.207 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐาน H_0 แสดงว่าข้อมูลของตัวแปรทำนายทั้งสองกลุ่มมีค่าความแปรปรวนเท่ากัน ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของการวิเคราะห์จำแนกประเภท

ตารางที่ 6. ผลการตรวจสอบการเท่ากันของค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนาย

Test of Function(s)	Wilks' Lambda	Sig.
1	0.084	<0.001

จากตารางที่ 6 เป็นการทดสอบการเท่ากันของค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายว่ามีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มหรือไม่ด้วยสถิติทดสอบ Wilks' Lambda ซึ่งค่า Wilks' Lambda มีค่าเท่ากับ 0.084 จะใช้ทดสอบสมมติฐานสำหรับค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายทุกตัวในกลุ่มของดีและของเสีย ซึ่งได้ค่า Sig <0.001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงทำให้มั่นใจว่าควรใช้ตัวแปรทำนายทั้ง 3 ตัวในการแบ่งกลุ่ม

3. การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปรทำนายและตัวแปรตาม ตรวจสอบโดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พอยท์ไบซีเรียล (r_{pbi}) แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7. ผลของสหสัมพันธ์พอยท์ไบซีเรียล (r_{pbi})

ชื่อตัวแปร	r_{pbi}
ความดันแก๊ส (r_{pb1y})	-0.93
ความดันอากาศอัด (r_{pb2y})	-0.89
ความเร็วสายพาน (r_{pb3y})	-0.85

จากตารางที่ 7 แสดงให้เห็นว่า ค่า r_{pb1y} , r_{pb2y} และ r_{pb3y} มีค่าติดลบ ทำให้สรุปได้ว่า ตัวแปรทำนายทั้ง 3 ตัวแปรได้แก่ ความดันแก๊ส ความดันอากาศอัด และความเร็วสายพาน มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามซึ่งเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน

4. ผลการตรวจสอบตัวแปรทำนายต้องไม่มีความสัมพันธ์ร่วมเชิงพหุเชิงเส้น โดยวิเคราะห์จากค่า Tolerance และ Variance Inflation Factor (VIF) แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8. ผลการตรวจสอบความสัมพันธ์ร่วมเชิงพหุเชิงเส้น

Model	Collinearity Statistics	
	Tolerance	VIF
Gas Pressure	0.145	6.903
Air Pressure	0.302	3.312
Speed Conveyor	0.212	4.709

จากตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ค่า Tolerance มีค่าเข้าใกล้ 1 และ Variance Inflation Factor (VIF) มีค่าไม่เข้าใกล้ 10 ทำให้สรุปได้ว่าตัวแปรทำนายไม่ได้มีความสัมพันธ์ร่วมเชิงพหุเชิงเส้น

3.2 ผลการสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกประเภท

เมื่อนำชุดข้อมูลทั้งหมด 126 ชุดข้อมูลที่เป็น Training Sample ที่ผ่านการตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานมาสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกประเภท โดยพิจารณาตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์การจำแนกกลุ่มคาโนนิคัล (Canonical Discriminant Function Coefficient)

ตารางที่ 9. ค่าสัมประสิทธิ์การจำแนกกลุ่มคาโนนิคัล

Canonical Discriminant Function Coefficients	
Gas Pressure	.089
Air Pressure	.171
Speed Conveyor	.004
(Constant)	-15.175

จะได้สมการวิเคราะห์จำแนกประเภทจำนวน 1 สมการ ดังสมการที่ (3) เนื่องจากจำนวนสมการวิเคราะห์จำแนกประเภท มีค่าเท่ากับจำนวนกลุ่ม -1

สมการจำแนกกลุ่มของดีและของเสีย คือ

$$\hat{Y} = -15.175 + 0.089x_1 + 0.171x_2 + 0.004x_3 \quad (3)$$

โดย $\hat{Y}$ แทนคะแนนจำแนก
 x_1 แทนความดันแก๊ส
 x_2 แทนความดันอากาศอัด
 x_3 แทนความเร็วของสายพาน

จากตารางที่ 9 สัมประสิทธิ์อยู่ในรูป Unstandardized ซึ่งค่านี้ไม่สามารถระบุได้ว่าตัวแปรทำนายใดส่งผลต่อคะแนนจำแนกมาก หรือมีอิทธิพลต่อการจำแนกกลุ่มมาก เนื่องจากตัวแปรทำนายมีหน่วยที่แตกต่างกัน ถ้าพิจารณาเฉพาะค่า โดยไม่พิจารณาเครื่องหมายจากตารางที่ 9 จะพบว่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรความดันอากาศอัด (x_2) มากที่สุด

ตารางที่ 10. ค่าสัมประสิทธิ์รูปคะแนนมาตรฐาน

Model	Function 1
Gas Pressure	0.655
Air Pressure	0.608
Speed Conveyor	0.243

หากพิจารณาจากตารางที่ 10 ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในรูปคะแนนมาตรฐาน (Standardized) ทำให้ไม่มีหน่วย จะพบว่าตัวแปรความดันแก๊ส (x_1) ส่งผลต่อการแบ่งกลุ่มมากที่สุด สำหรับความดันอากาศ

อัด (x_2) และความเร็วสายพาน (x_3) ส่งผลรองลงมาตามลำดับ ดังนั้นการพิจารณาความสำคัญของตัวแปรทำนายที่มีผลต่อการแบ่งกลุ่ม ควรพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในรูปมาตรฐาน [9]

จากสมการจำแนกกลุ่มของดีและของเสีย ดังสมการที่ (3) ค่า $\hat{Y}$ หรือค่าคะแนนจำแนกจะมีค่าอยู่ระหว่าง -5.14 ถึง 7.31 คำนวณเพื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับตัดสินใจว่าจะได้ค่า Y ที่แบ่งเป็น 2 กลุ่มคือของดี ($Y=1$) หรือของเสีย ($Y=0$) โดยพิจารณาจากค่ากลางของแต่ละกลุ่ม ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11. ค่ากลางของกลุ่มของดีและของเสีย

Functions at Group Centroids	
OK NG	Function 1
NG Peeling	4.027
OK Not Peeling	-2.650

เมื่อวิเคราะห์ตารางที่ 11 ซึ่งเป็นตารางที่แสดงค่ากลางของแต่ละกลุ่มสำหรับกลุ่มของเสียและของดี โดยที่ค่ากลางของกลุ่มของเสีย มีค่าเท่ากับ 4.027 และค่ากลางของกลุ่มของดี มีค่าเท่ากับ -2.650 ซึ่งค่ากลางของทั้งสองกลุ่มแตกต่างกันมาก แสดงว่าชิ้นงานที่อยู่ใน 2 กลุ่มค่อนข้างแตกต่างกันและสมการวิเคราะห์จำแนกประเภทสามารถจำแนกได้ดี ในกรณีที่ข้อมูลชุดใหม่มาใช้สมการในการพยากรณ์ ก็สามารถคำนวณค่า $\hat{Y}$ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่ากลางของแต่ละกลุ่ม หากค่า $\hat{Y}$ มีแนวโน้มเข้าใกล้ค่ากลางของกลุ่มชิ้นงานใดก็มีโอกาสที่จะจัดให้อยู่ในกลุ่มนั้น ถ้าค่า $\hat{Y}$ จากสมการจำแนกกลุ่มของดีและของเสีย มีค่ามากจะถูกจัดกลุ่มให้อยู่ในกลุ่มของเสีย ถ้าค่า $\hat{Y}$ มีค่าน้อยจะถูกจัดกลุ่มให้อยู่ในกลุ่มของดี

จากตารางที่ 11 แสดงค่ากลางของกลุ่มของเสียและของดี เพื่อให้สามารถใช้ค่าดังกล่าวในการจำแนกกลุ่มได้ จะทำการตรวจสอบค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายทั้ง 2 กลุ่ม คือค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลที่เป็นของดี และค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลที่เป็นของเสียว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยใช้สถิติการทดสอบไคเทิลล์ที่สแควร์ (Hotelling T^2) โดยกำหนดสมมติฐานสำหรับการทดสอบแสดงดังนี้

$$H_0: [\mu_1] = [\mu_2]$$

$$H_1: [\mu_1] \neq [\mu_2]$$

โดย $[\mu_1]$ คือค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายกลุ่มที่เป็นของดี
 $[\mu_2]$ คือค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายกลุ่มที่เป็นของเสีย

จากการใช้โปรแกรม SPSS ผลการทดสอบโดยใช้สถิติไคเทิลล์ที่สแควร์มีค่าเท่ากับ 33.795 ได้ค่า $\text{sig} < 0.001$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก หมายความว่าค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายทั้ง 2 กลุ่มแตกต่างกัน ทำให้สามารถแบ่งกลุ่มทั้งสองกลุ่มออกจากกันอย่างมีนัยสำคัญ

3.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพของสมการวิเคราะห์จำแนกประเภท

ผลการนำชุดข้อมูลทั้งสองชุดข้อมูลจากกลุ่ม Training Sample จำนวน 126 ข้อมูล และกลุ่ม Holdout Sample จำนวน 54 ข้อมูล มาใช้สมการวิเคราะห์จำแนกประเภทในการพยากรณ์ เพื่อประเมิน

ประสิทธิภาพของสมการวิเคราะห์จำแนกประเภท ดังตารางที่ 12 แสดงให้เห็นว่าสมการมีความถูกต้องสำหรับการพยากรณ์ สำหรับข้อมูลกลุ่ม Training Sample ได้ถูกต้อง 100% ดังตารางที่ 13 และสมการที่ (4) สำหรับข้อมูลกลุ่ม Holdout Sample พยากรณ์ได้ถูกต้อง 94.44% ดังตารางที่ 14 และสมการที่ (5)

ตารางที่ 12. ตัวอย่างข้อมูลของตัวแปรตามที่เป็นค่าอ้างอิงและค่าพยากรณ์

ลำดับ ข้อมูล (N)	ความดันแก๊ส x_1 (mbar)	ความดันอากาศอัด x_2 (psi)	ความเร็วสายพาน x_3 (rpm)	Y ค่าอ้างอิง (ของดี = 1, ของเสีย = 0)	Y พยากรณ์ (ของดี = 1, ของเสีย = 0)
1	80	3	820	1	1
2	80	3	825	1	1
3	81	4	825	1	1
...	...	...	...	...	...
126	139	23	955	0	0
1*	82	3	820	1	1
2*	110	5	845	1	1
3*	111	10	835	1	1
...	...	...	...	...	...
54*	125	30	910	0	0

หมายเหตุ : * คือชุดข้อมูลของการทดสอบสมการ

ตารางที่ 13. ความถูกต้องของการพยากรณ์ ข้อมูลกลุ่ม Training Sample

		ค่าพยากรณ์		รวม
		ของดี	ของเสีย	
ค่าอ้างอิง (เป็นจริง)	ของดี	76	0	76
	ของเสีย	0	50	50
	รวม	76	50	

$$\text{Accuracy (\%)} = \frac{76+50}{76+50} * 100 = 100 \quad (4)$$

ตารางที่ 14. ความถูกต้องของการพยากรณ์ ข้อมูลกลุ่ม Holdout Sample

		ค่าพยากรณ์		รวม
		ของดี	ของเสีย	
ค่าอ้างอิง (เป็นจริง)	ของดี	29	1	30
	ของเสีย	2	22	24
	รวม	31	23	

$$\text{Accuracy (\%)} = \frac{29+22}{29+1+2+22} * 100 = 94.44 \quad (5)$$

3.4 การกำหนดค่าที่เหมาะสมและยืนยันผล

การกำหนดค่าของตัวแปรทำนาย ได้แก่ ความดันแก๊ส (x_1) ความดันอากาศอัด (x_2) และความเร็วสายพาน (x_3) ที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ $\hat{Y}$ มีค่าเท่ากับค่ากลางของกลุ่มของดี คือ -2.65 เพื่อให้สมการจำแนกกลุ่มพยากรณ์ให้เป็นของดี โดยใช้โปรแกรม Minitab ซึ่งได้ชุดตัวแปรทำนายแสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15. ค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรทำนาย

ลำดับ คำตอบ	ความดันแก๊ส (mbar)	ความดันอากาศ อัด (psi)	ความเร็วสายพาน (rpm)	คะแนนจำแนก $\hat{Y}$	กลุ่มชิ้นงาน (Y)
1	82	7	1000	-2.65	1
2	105	3	650	-2.65	1

เมื่อนำค่าตัวแปรทำนายสำหรับ 2 กรณีของตารางที่ 15 ไปยืนยันผลโดยการปรับใช้กับเครื่องจักรกรณีละ 10 ครั้ง พบว่าทั้ง 2 กรณี ได้ผลลัพธ์เป็นกลุ่มของดีทั้งหมด 10 ครั้ง แต่หากวิเคราะห์ในมุมมองสำหรับกำลังการผลิตสำหรับประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตจริง จะเห็นว่าค่าความเร็วของสายพาน (x_3) ของกรณีที่ 1 คือ 1,000 rpm ซึ่งมีค่าสูงกว่ากรณีที่ 2 คือ 650 rpm ซึ่งความเร็วของสายพานส่งผลโดยตรงกับกำลังการผลิต คือความเร็วสายพานที่สูงจะส่งผลให้จำนวนยอดการผลิตต่อวันเพิ่มสูงขึ้น รวมถึงค่าความดันแก๊ส (x_1) มีราคาต้นทุนของทรัพยากรที่สูงกว่าค่าความดันอากาศอัด (x_2) หากใช้ความดันแก๊สได้จำนวนน้อยกว่าความดันอากาศอัดก็ถือเป็นโอกาสที่ดีในการประหยัดค่าใช้จ่ายของบริษัทกรณีศึกษา ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกที่จะใช้ค่าตัวแปรทำนาย ได้แก่ ความดันแก๊ส (x_1) เป็น 82 mbar ความดันอากาศอัด (x_2) เป็น 7 psi และความเร็วสายพาน (x_3) เป็น 1,000 rpm เป็นตัวแปรทำนายอันดับแรกสำหรับลดข้อเสียของกระบวนการพิมพ์ และสำหรับค่าตัวแปรทำนายกรณีอื่นๆ จะนำมาเป็นแนวทางเลือกในอนาคตต่อไป

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการสำรวจสภาพปัจจุบัน ศึกษาปัจจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการพิมพ์สี ซึ่งจากงานวิจัยของ Sutherland และคณะ [19] กล่าวว่า ขั้นตอนการปรับสภาพผิวโดยใช้เปลวไฟ ส่งผลโดยตรงกับขั้นตอนการพิมพ์ หากการปรับสภาพผิวมีประสิทธิภาพจะทำให้กระบวนการพิมพ์มีประสิทธิภาพ เกิดเป็นของดี ไม่พบการหลุดลอก ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการปรับสภาพผิวโดยใช้เปลวไฟ มีทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ 1) ความดันแก๊ส 2) ความดันอากาศอัด และ 3) ความเร็วสายพาน โดยจะนำปัจจัยทั้งหมดมาใช้ในการออกแบบการทดลอง กำหนดตัวแปรตาม (Y) เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มของดี ($Y = 1$) และกลุ่มของเสีย ($Y = 0$)

จากการนำชุดข้อมูลมาตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานของเทคนิควิเคราะห์จำแนกประเภท สร้างสมการวิเคราะห์จำแนกประเภท และประเมินประสิทธิภาพของสมการ โดยใช้ทั้งสองชุดข้อมูล ได้แก่ กลุ่ม

Training Sample และกลุ่ม Holdout Sample ให้ผลประสิทธิภาพสำหรับการพยากรณ์ ของชุดข้อมูล Training Sample เท่ากับ 100% และสำหรับชุดข้อมูล Holdout Sample เท่ากับ 94.4% จากนั้นหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรทำนาย ได้แก่ ความดันแก๊ส ปรับใช้ค่าเท่ากับ 82 mbar ความดันอากาศอัด ปรับใช้ค่าเท่ากับ 7 psi และความเร็วสายพาน ปรับใช้ค่าเท่ากับ 1,000 rpm ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้ จะนำไปใช้สำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรในกระบวนการพิมพ์ต่อไป เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ชุดนี้ ถูกทำการยืนยันผลแล้วว่าหากปรับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรตามค่าดังกล่าวจะทำให้ได้ชิ้นงานเป็นกลุ่มของดีทั้งหมด รวมถึงได้ผลของกำลังการผลิตที่สูง

จากการพิจารณาผลค่าที่เหมาะสมที่สุดของความดันแก๊ส ค่าเท่ากับ 82 mbar ความดันอากาศอัด ค่าเท่ากับ 7 psi และความเร็วสายพาน ค่าเท่ากับ 1,000 rpm เมื่อนำไปเป็นค่าพารามิเตอร์มาตรฐานของเครื่องจักรในกระบวนการพิมพ์ หากพิจารณาในมุมมองผลลัพธ์ของการพยากรณ์ในเชิงสถิติจะมีความถูกต้องของการพยากรณ์ 94.4% แต่เมื่อพิจารณาอีกมุมมองหนึ่งในมุมมองของกระบวนการพิมพ์ของบริษัท กรณีศึกษา จะพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของทั้ง 3 ตัวแปร เช่น ค่าความดันแก๊ส สามารถปรับตั้งได้ตั้งแต่ 80-150 mbar แต่ค่าที่เหมาะสมที่สุดจากสมการจำแนกกลุ่ม คือ 82 mbar ถือว่าอยู่ในช่วงค่าที่น้อยที่สุดของการใช้แก๊ส รวมถึงค่าความดันอากาศอัด สามารถปรับตั้งได้ตั้งแต่ 3-30 psi แต่ค่าที่เหมาะสมที่สุดจากสมการจำแนกกลุ่ม คือ 7 psi ถือว่าอยู่ในช่วงค่าที่น้อยที่สุดของการใช้อากาศอัดเช่นเดียวกัน นับว่าเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายให้กับบริษัทกรณีศึกษาและยังได้รับผลลัพธ์ที่เป็นของดี และจากตัวแปรทำนายทั้ง 3 ตัวแปร ส่งผลต่อการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟซึ่งเหมือนกับงานวิจัยในอดีต [19]-[21] แต่ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าตัวแปรตามเป็นของดีหรือของเสียของกระบวนการพิมพ์พลาสติกซึ่งเป็นผลลัพธ์สุดท้ายที่บริษัทกรณีศึกษามุ่งเน้น ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยในอดีตที่จะพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติพลังงานพื้นผิวหลังการปรับสภาพผิวด้วยเปลวไฟเท่านั้น

เทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภท พบข้อจำกัดเรื่องการตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานสำหรับชุดข้อมูล ก่อนการนำเทคนิคมาประยุกต์ใช้ แต่ก็มีข้อดีคือในเรื่องร้อยละความถูกต้องของการพยากรณ์ สำหรับชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบสมการ (Holdout Sample)

สำหรับข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคต ขอเสนอการนำเทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอย โลจิสติกส์มาประยุกต์ใช้สำหรับการลดของเสียของกระบวนการพิมพ์ เพื่อลดข้อจำกัดของการตรวจสอบเงื่อนไขพื้นฐานสำหรับชุดข้อมูล นอกจากนี้ การเพิ่มจำนวนชุดข้อมูลสำหรับนำมาวิเคราะห์ อาจส่งผลให้ร้อยละความถูกต้องสำหรับการพยากรณ์ถูกสูงขึ้น การเพิ่มการเก็บข้อมูลการยืนยันผลให้มากขึ้น รวมถึงการเพิ่มชุดข้อมูลของค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรทำนาย เพื่อเป็นแนวทางซึ่งมีหลากหลายมากยิ่งขึ้นในการปรับตั้งเครื่องจักร จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลเพื่อเลือกวิธีทางสถิติที่ให้ค่าความถูกต้องของการพยากรณ์ที่ดีที่สุด เช่น การเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภทกับการวิเคราะห์ความถดถอย โลจิสติกส์และวิธีความใกล้เคียงมากที่สุด (K-nearest Neighbour) เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Seethamraju, R. and Marjanovic, O. 2009. Role of process knowledge in business process improvement methodology: a case study. *Business Process Management Journal*, 15(6), 920-936.
- [2] Ajayi, S.O., Oyedele, L.O., Bilal, M., Akinade, O.O., Alaka, H.A., Owolabi, H.A. and Kadiri, K.O. 2015. Waste effectiveness of the construction industry: Understanding the impediments and requisites for improvements. *Resources Conservation and Recycling*, 102, 101-112.
- [3] Leksic, I., Stefanic, N. and Veza, I. 2020. The impact of using different lean manufacturing tools on waste reduction. *Advances in Production Engineering and Management*, 15(1), 50-55.
- [4] Starch, D. 1910. A demonstration of the trial and error method of learning. *Psychological Bulletin*, 7(1), 20.
- [5] Lim, S., Buswell, R., Le, T., Wackrow, R., Austin, S.A., Gibb, A. and Thorpe, T. 2011. *Development of a viable concrete printing process*. 665-670.
- [6] McKay, R.J. and Campbell, N.A. 1982. Variable selection techniques in discriminant analysis: II. Allocation. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 35(1), 30-41.
- [7] Habbema, J.D.F. and Hermans, J. 1977. Selection of variables in discriminant analysis by F-statistic and error rate. *Technometrics*, 19(4), 487-493.
- [8] Sharma, A. and Paliwal, K.K. 2015. Linear discriminant analysis for the small sample size problem: an overview. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 6, 443-454.
- [9] กลยา วานิษฐ์บัญชา. 2564. การวิเคราะห์สถิติขั้นสูงด้วย SPSS for Windows. พิมพ์ครั้งที่ 15, ห้างหุ้นส่วนจำกัดสามลดา, กรุงเทพฯ. [Kunlaya Wanidbuncha. 2021. Data analysis SPSS for Windows. 15th ed, Samladda. Bangkok. (in Thai)]
- [10] Izenman, A.J. 2013. Linear discriminant analysis. In *Modern multivariate statistical techniques: regression, classification, and manifold learning*, 237-280.
- [11] Knoke, J.D. 1982. Discriminant analysis with discrete and continuous variables. *Biometrics*, 191-200.
- [12] Brown, J.D. 2001. Point-biserial correlation coefficients. *Statistics*, 5(3), 12-16.
- [13] Visa, S., Ramsay, B., Ralescu, A. L. and Van Der Knaap, E. 2011. Confusion matrix-based feature selection. *Maics*, 710(1), 120-127.

- [14] Strobel, M., Jones, V., Lyons, C.S., Ulsh, M., Kushner, M.J., Dorai, R. and Branch, M.C. 2003. A comparison of corona-treated and flame-treated polypropylene films. *Plasmas and Polymers*, 8, 61-95.
- [15] Farris, S., Pozzoli, S., Biagioni, P., Duó, L., Mancinelli, S. and Piergiovanni, L. 2010. The fundamentals of flame treatment for the surface activation of polyolefin polymers– A review. *Polymer*, 51(16), 3591-3605.
- [16] Lee, T.M., Han, H.S., Kim, B., Kwak, S.W., Noh, J.H. and Kim, I. 2013. Roll offset printing process based on interface separation for fine and smoot patterning. *Thin solid films*, 548, 566-571.
- [17] Abliz, D., Duan, Y., Steuernagel, L., Xie, L., Li, D. and Ziegmann, G. 2013. Curing methods for advanced polymer composites-a review. *Polymers and Polymer Composites*, 21(6), 341-348.
- [18] Shukla, V., Bajpai, M., Singh, D.K., Singh, M. and Shukla, R. 2004. Review of basic chemistry of UV-curing technology. *Pigment & Resin Technology*, 33(5), 272-279.
- [19] Sutherland, I., Brewis, D.M., Health, R.J. and Sheng, E. 1991. Modification of polypropylene surfaces by flame treatment. *Surface and interface analysis*, 17(7), 507-510.
- [20] Medeiros, E., Brandes, R., Al-Qureshi, H.A. and Recouvreux, D.D. 2017. Effect of Flame Treatment in the Coating Adhesion on Polypropylene Substrate. 24th International Congress of Mechanical Engineering, 200-206.
- [21] Mazzola, L., Bemporad, E. and Carassiti, F. 2011. Flame treatment on plastic: A new surface free energy statistical prediction model and characterization of treated surfaces. *Applied Surface Science*, 257(6), 2148-2158.
- [22] Antonogeorgos, G., Panagiotakos, D.B., Priftis, K.N. and Tzonou, A. 2009. Logistic regression and linear discriminant analyses in evaluating factors associated with asthma prevalence among 10-to 12-years-old children: divergence and similarity of the two statistical methods. *International journal of pediatrics*, 18(8), 500-506.
- [23] Worth, A.P. and Cronin, M.T. 2003. The use of discriminant analysis, logistic regression and classification tree analysis in the development of classification models for human health effects. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 622(2), 97-111.
- [24] Press, S.J. and Wilson, S. 1978. Choosing between logistic regression and discriminant analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 73(364), 699-705.
- [25] Krzanowski, W.J. 1980. Mixtures of continuous and categorical variables in discriminant analysis. *Biometrics*, 493-499.

- [26] Dattalo, P. 1994. A comparison of discriminant analysis and logistic regression. *Journal of Social Service Research*, 19(3-4), 121-144.
- [27] Efron, B. 1975. The efficiency of logistic regression compared to normal discriminant analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 70(352), 892-898.
- [28] Abliz, D., Duan, Y., Steuernagel, L., Xie, L., Li, D. and Ziegmann, G. 2013. Curing methods for advanced polymer composites-a review. *Polymers and Polymer Composites*, 21(6), 341-348.
- [29] Polit, D.F. 2017. Clinical significance in nursing research: A discussion and descriptive analysis. *International Journal of Nursing Studies*, 73, 17-23.