

การออกแบบการทดลองและการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องคัดแยกฝาขวด

Experimental Design and Optimization for Improving Performance of the Bottle Cap Screening Machine

กนกพร พิษผล

จิราภรณ์ ประดับวงษ์¹

คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

E-mail: jiraporn@eng.src.ku.ac.th¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยกฝาขวด โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของเครื่องคัดแยกฝาขวดของบริษัทกรณีศึกษาคือ มีฝาขวดที่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน ถูกคัดแยกออกจากกระบวนการคัดแยกปะปนกับฝาขวดที่ไม่ได้มาตรฐาน คิดเป็นร้อยละ 28 จากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาพบว่าความผิดพลาดเกิดจาก 3 ปัจจัยหลัก คือ ความเร็วของสายพาน ระยะห่างระหว่างตัวคัดแยกกับฝา และการตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบพีแอลซี จากนั้นจึงการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จำนวนการทดลองทั้งหมดคือ 54 ครั้ง พบว่าผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างของตัวคัดแยกกับฝาและความเร็วของสายพาน มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการคัดแยกฝาขวดอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้จำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกคัดแยกออกจากกระบวนการน้อยที่สุดคือ ระยะห่างระหว่างตัวคัดแยกกับฝาเท่ากับ 19 มิลลิเมตร และความเร็วสายพานเท่ากับ 150 รอบต่อนาที หลังจากการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้จริงพบว่าสัดส่วนของฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกคัดแยกออกมาลดลงเหลือร้อยละ 1.7

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูป การออกแบบการทดลอง การปรับปรุงประสิทธิภาพ

ABSTRACT

This study aimed to investigate the factors that affected the efficiency of the bottle cap screening machine, which was responsible for screening out non-standard caps before transferring them to the packing process. However, the acceptable caps were being screened out from the process together with the ones that were non-standard, with the percentage of 28. To identify the causes of this problem, a fish-bone diagram was utilized, and the three main factors were established that potentially caused this problem, which were: the conveyor

speed, the distance between the separator and the caps and the PLC delay settings. Then, a full factorial design was performed with a total number of 54 experiments. The results revealed that the two factor interactions of the distance between the separator and the caps, and the conveyor speed had a significant impact on the efficiency of the bottle cap screening machine. To meet the minimum number of acceptable caps being screened out from the process, the results showed that the parameters should be set as follows: the distance between the separator and the caps at 19 mm. and the conveyor speed at 150 RPM. When these parameters were applied in the screening process, it was found that the proportion of acceptable caps, screened out from the process, was reduced to 1.7 percent.

KEYWORDS: Full Factorial Design, Experimental Design, Performance Improvement

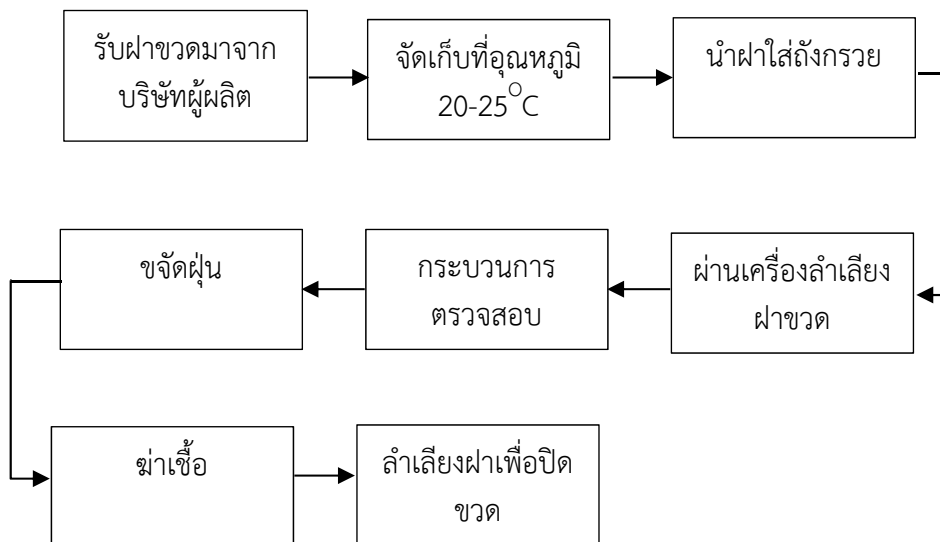
บทนำ

อุตสาหกรรมน้ำมะพร้าวแปรรูปได้รับความนิยมน้อย่างมากทำให้ต้องมีการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องจักรและสินค้าให้มีประสิทธิภาพเพื่อสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคทั้งภายในและนอกประเทศ บริษัทกรณีศึกษาเป็นบริษัทขนาดใหญ่ (พระราชบัญญัติโรงงาน, 2535) ประกอบด้วยเครื่องจักรเกิน 50 แรงม้า และคนงานเกิน 50 คน มีทำเลที่ตั้งอยู่ใกล้แหล่งวัตถุดิบหลักในการผลิตคือมะพร้าว ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายและลดเวลาในการขนส่งวัตถุดิบ บริษัทกรณีศึกษาถือเป็นผู้ผลิตแปรรูป และส่งออกผลผลิตจากมะพร้าวรายใหญ่ของประเทศไทย โดยมีผลิตภัณฑ์หลักคือ น้ำมะพร้าวและน้ำกะทิ มีการส่งออกน้ำมะพร้าวแปรรูปไปยัง 77 ประเทศทั่วโลก ใน 5 ทวีป เช่น ประเทศฮ่องกง ประเทศสิงคโปร์ ประเทศญี่ปุ่น ประเทศเกาหลี ประเทศจีน ประเทศมาเลเซีย ประเทศออสเตรเลีย เป็นต้น ซึ่งถือได้ว่าบริษัทกรณีศึกษาประสบความสำเร็จเป็นอย่างมากโดยวัดจากยอดการส่งออกเฉลี่ยประมาณ 1,500 ล้านบาทต่อปี (ข้อมูลอัตราการส่งออกย้อนหลังปี 2558 ของบริษัทกรณีศึกษา)

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ของบริษัทกรณีศึกษาแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการหลักคือ (1) แปรรูปมะพร้าว (2) ผลิตขวดเพื่อใช้สำหรับบรรจุน้ำมะพร้าว และ (3) บรรจุน้ำมะพร้าวลงขวด ในแผนกผลิตขวดและบรรจุน้ำมะพร้าวลงขวด มีการผลิตบรรจุภัณฑ์คือ ขวดโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly Ethylene Terephthalate: PET) โดยใช้กระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบการฉีดเป่าขึ้นรูป (Injection Blow Molding) เป็นวิธีแปรรูปพลาสติกที่ใช้เทคนิคการฉีดและการเป่าร่วมกัน (Chen, Wang, & Wang, 2015) เครื่องฉีดเป่าประกอบด้วยชุดฉีดและหลอมพลาสติก ชุดขึ้นรูปและชุดหลอมพลาสติก สามารถสรุปขั้นตอนการฉีดเป่าได้ 3 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้ (1) การเตรียมชิ้นงานก่อนขึ้นรูป (2) กระบวนการฉีดและเป่าขึ้นรูป และ (3) การเคลื่อนย้ายชิ้นงานไปยังชุดถอดชิ้นงานเพื่อถอดชิ้นงานออกจากตัวรองรับ ในส่วนของฝาขวด บริษัทกรณีศึกษาได้ทำการสั่งซื้อฝาขวดจากบริษัทผู้ผลิต (Supplier) เพื่อใช้ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ โดยก่อนเข้าสู่กระบวนการบรรจุภัณฑ์จำเป็นต้องทำการตรวจสอบคุณภาพของฝาขวด โดยทำการลำเลียงฝาขวดผ่านสายพานเพื่อเข้าเครื่องตรวจสอบ

ความผิดปกติของฝ้ายโดยใช้เครื่องเพรสโก้ (Presco) ซึ่งเป็นเครื่องตรวจสอบและคัดแยกฝ้ายที่ไม่ได้มาตรฐานตามที่กำหนดไว้ออกจากกระบวนการ โดยสามารถสรุปกระบวนการลำเลียงฝ้ายและตรวจสอบคุณภาพได้ดังนี้ (1) รับฝ้ายมาจากบริษัทผู้ผลิต (2) จัดเก็บที่อุณหภูมิ 20 - 25 องศาเซลเซียส (3) นำ

ฝ้ายใส่ถังกรวย (Hopper) เพื่อลำเลียงเข้าสู่กระบวนการตรวจคัดแยกฝ้าย (4) กระบวนการตรวจเช็คคุณภาพของฝ้ายด้วยเครื่องคัดแยกฝ้ายเพรสโก้ (6) กระบวนการขจัดฝุ่น (Ionizer Dedusting) และ (7) กระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อ (Sterilization) สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการคัดแยกฝ้าย

ที่มา: กระบวนการคัดแยกฝ้ายของบริษัทกรณีศึกษา

จากการศึกษากระบวนการคัดแยกฝ้ายเพื่อส่งเข้ากระบวนการบรรจุภัณฑ์ของบริษัทกรณีศึกษาพบความผิดปกติในขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพของฝ้าย เมื่อฝ้ายน้ำหนักแพรวแปรรูปถูกลำเลียงโดยสายพานผ่านเครื่องตรวจสอบ เครื่องตรวจสอบนี้ทำหน้าที่คัดกรองคุณภาพของฝ้ายที่ไม่ได้มาตรฐาน เช่น ฝ้ายมีลักษณะเปียก เกลียวขรุขระ จะถูกคัดแยกหรือดีดออกจากสายพานลำเลียง โดยฝ้ายที่ไม่ได้มาตรฐานจะถูกคัดแยกออกจากสายพานลำเลียงครั้งละ 1 ฝ้ายเท่านั้น ทั้งนี้พบความผิดปกติจากกระบวนการคัดแยกฝ้ายคือ มีฝ้ายที่ได้มาตรฐานถูกคัดแยกปนออกมาพร้อมกับฝ้ายที่ไม่ได้

มาตรฐาน ซึ่งฝ้ายที่ได้มาตรฐานที่ถูกดีดออกจากสายพานปะปนออกมาพร้อมกับฝ้ายที่ไม่ได้มาตรฐานในกระบวนการนี้จะถูกนับเป็นของเสียทันที และไม่สามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการบรรจุภัณฑ์ได้ จากการเก็บข้อมูลเป็นจำนวน 6 เดือน (มีนาคม - สิงหาคม 2559) แสดงดังตารางที่ 1 พบว่ามีจำนวนฝ้ายที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออกมาปะปนกับฝ้ายที่ไม่ได้มาตรฐานรวมทั้งสิ้น 121,101 ซีน คิดเป็นมูลค่ารวมของการสูญเสียทั้งสิ้น 60,554 บาท ในระยะเวลา 6 เดือน หรือคิดเป็นร้อยละ 28.75 โดยเฉลี่ยของจำนวนฝ้ายที่ถูกคัดแยกออกทั้งหมด

ตารางที่ 1 ปริมาณจำนวนฝ้ายที่ถูกคัดแยกต่อเดือนตั้งแต่เดือนมีนาคม – สิงหาคม 2559

เดือน	จำนวนฝ้ายที่ถูกคัดแยกออกทั้งหมด (ซัน)	จำนวนฝ้ายที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออก (ซัน)	ร้อยละของฝ้ายที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออก	มูลค่าของฝ้ายที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออก (บาท)
มี.ค.	82,245	26,296	31.97	13,148
เม.ย.	52,449	16,277	31.03	8,139
พ.ค.	27,342	7,812	28.57	3,906
มิ.ย.	96,963	27,771	28.64	13,889
ก.ค.	75,695	21,487	28.39	10,743
ส.ค.	89,857	21,458	23.88	10,729
รวม	424,551	121,101	28.75	60,554
จำนวนฝ้ายที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออกรวม (ซัน)			121,101	
มูลค่ารวมของฝ้ายที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออก (บาท)			60,554	
ร้อยละของฝ้ายที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออกโดยเฉลี่ย			28.75	

ที่มา: ข้อมูลย้อนหลังในกระบวนการคัดแยกฝ้ายของบริษัทกรณีศึกษา

ทั้งนี้ในสถานะเศรษฐกิจชะลอตัวบริษัทกรณีศึกษาจำเป็นต้องหาวิธีการแก้ปัญหาฝ้ายที่ได้คุณภาพตามมาตรฐานที่ถูกคัดแยกติดอกมากับฝ้ายที่ไม่ได้มาตรฐาน เพื่อลดความสูญเสียที่เกิดขึ้น โดยการปรับปรุงกระบวนการคัดแยกฝ้ายให้มีประสิทธิภาพ เพื่อลดต้นทุนและทำให้เกิดผลกำไรมากที่สุด

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์คือ

- 1) เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยกฝ้าย โดยทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องคัดแยกฝ้าย
- 2) ทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการคัดแยกฝ้ายและทำให้จำนวนฝ้ายที่ได้มาตรฐานถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการลดลงอย่างน้อยร้อยละ 5

ประโยชน์ที่ได้รับ

ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ

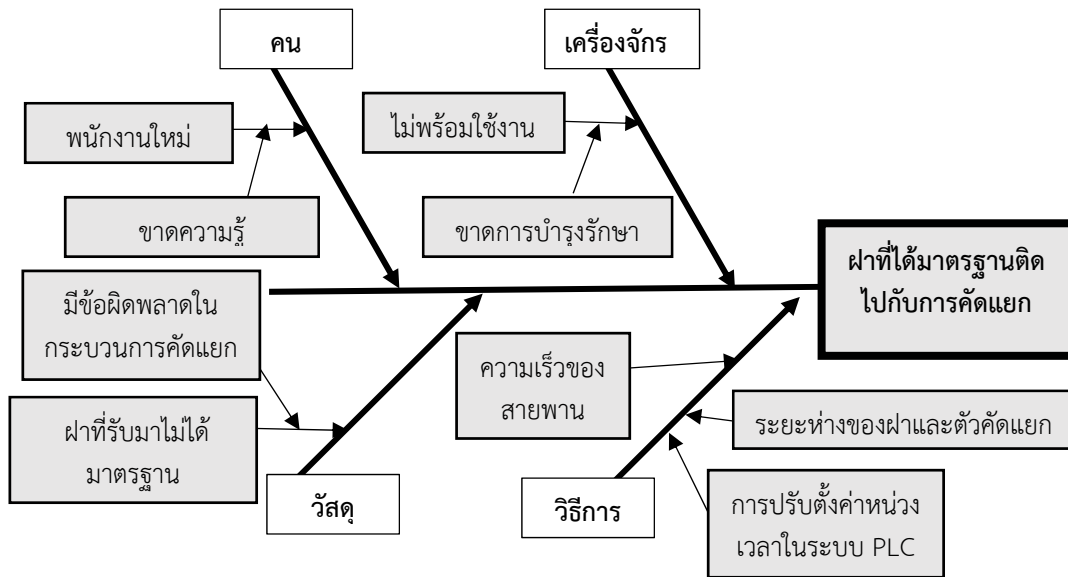
- 1) เข้าใจการวิเคราะห์สาเหตุของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกระบวนการคัดแยกฝ้าย
- 2) ทราบค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการคัดแยกฝ้าย
- 3) ทราบแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการคัดแยกฝ้ายเพื่อเป็นมาตรฐานในการปรับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับเครื่องคัดแยกฝ้าย
- 4) เพื่อลดต้นทุนที่เกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการคัดแยกฝ้าย

วิธีดำเนินการวิจัย

จากปัญหาฝ้ายที่ได้ คุณภาพตามมาตรฐานที่ถูกคัดแยกติดอกมากับฝ้ายที่ไม่ได้มาตรฐานในกระบวนการคัดแยกฝ้ายนั้น จึงทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา โดยเริ่มจากการระดมความคิดจากทีมงานวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ร่วมกับ

ฝ่ายเทคนิคและบริการ รวมทั้งผู้เกี่ยวข้องในสายการผลิตสามารถนำข้อมูลที่ได้ร่วมกันคิดวิเคราะห์นำมา

สร้างแผนภูมิแก๊งปลา (Fish-Bone Diagram) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภูมิแก๊งปลาแสดงสาเหตุของปัญหาปลาขวดที่ได้คุณภาพตามมาตรฐานที่ถูกตัดแยกติดออกมากับปลาขวดที่ไม่ได้มาตรฐานในกระบวนการตัดแยกปลาขวด

ที่มา: กระบวนการระดมสมองโดยทีมงานวิศวกรและผู้เกี่ยวข้องของบริษัทกรณีศึกษา

จากภาพที่ 2 สามารถจำแนกสาเหตุของปัญหาได้ดังนี้

1) คน (Man) พนักงานขาดความรู้ในการทำงาน เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษามีการเปลี่ยนพนักงานบ่อย จึงทำให้พนักงานใหม่เกิดความไม่เข้าใจในการปรับตั้งค่าเครื่องจักรก่อนใช้งาน ส่วนพนักงานที่มีประสบการณ์อยู่แล้วยังขาดความเอาใจใส่ในการตรวจสอบเครื่องก่อนการทำงาน เนื่องจากความเร่งรีบในการผลิตเพื่อให้ทันต่อการส่งมอบให้กับลูกค้า

2) เครื่องจักร (Machine) เครื่องจักรและอุปกรณ์ไม่พร้อมใช้งาน เนื่องจากมีการใช้งานของเครื่องตลอดเวลาจึงทำให้ขาดการบำรุงรักษาซึ่งอาจส่งผลให้มีเศษพลาสติกจากปลาขวดเข้าไปติดในเครื่องเพรชโก้ เป็นสาเหตุทำให้เครื่องจักรทำงานติดขัด

3) วิธีการทำงาน (Method) ไม่มีค่าที่เป็นมาตรฐานในการปรับตั้งค่าเครื่องจักรและไม่มีมาตรฐานในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้ คือ

(ก) ระยะห่างของปลาขวดแต่ละปลาวางติดกันเกินไป อาจส่งผลให้เครื่องเพรชโก้ทำการตัดแยกปลาไม่ทัน

(ข) ความเร็วของสายพาน (Speed) เร็วเกินไปทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนของการตัดแยกปลาขวด

(ค) ระยะห่างระหว่างตัวตัดแยกกับปลา (Nozzle) ห่างเกินไปทำให้ขาดความแม่นยำในการตรวจสอบชิ้นงาน

(ง) การตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC (Delay)

4) วัตถุดิบ (Material) ปลาที่รับมาไม่ได้มาตรฐานซึ่งอาจเกิดการชำรุดในขณะขนย้าย และ

เกิดข้อผิดพลาดในการตรวจสอบจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาสาเหตุหลักที่ทำให้กระบวนการคัดแยกฝาชวดที่ได้มาตรฐานถูกทำลายออกจากกระบวนการ ได้ข้อสรุปดังนี้คือ

(1) ความเร็วของสายพาน เนื่องจากในปัจจุบันได้ตั้งค่าความเร็วของสายพานที่ใช้ในการลำเลียงฝาชวดเพื่อเข้าสู่กระบวนการคัดแยกไว้ที่ 450 รอบต่อนาที (Revolution per minute: RPM) ซึ่งอาจมีอัตราที่เร็วเกินไปและเป็นสาเหตุให้ฝาชวดที่ได้มาตรฐานหลุดออกไปจากสายพานพร้อมกับฝาดที่ไม่ได้มาตรฐานในกระบวนการคัดแยก ดังนั้นจึงทำการศึกษาโดยตั้งค่าความเร็วของสายพานให้ต่ำกว่าค่าที่ใช้ ณ ปัจจุบัน และทำการศึกษาที่ 3 ระดับ คือ (ก) ความเร็วของสายพาน 150 RPM (ระดับต่ำ) เพราะถ้ากำหนดต่ำกว่า 150 RPM ลงไปจะทำให้ฝาชวดเข้าสู่กระบวนการปิดขวดไม่ทัน (ข) ความเร็วของสายพาน 250 RPM (ระดับกลาง) และ (ค) ความเร็วของสายพาน 350 RPM (ระดับสูง) เนื่องจากถ้าความเร็วของสายพานเร็วเกินไปอาจทำให้ฝาดที่อยู่ข้างๆ ติดไปกับกระบวนการคัดแยก

(2) ระยะห่างระหว่างตัวคัดแยกกับฝาด จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า การปรับตั้งค่าระยะห่างระหว่างตัวคัดแยกกับฝาชวดที่ลำเลียงโดยสายพาน อาจส่งผลกระทบต่อการคัดแยกของฝาด โดยถ้าห่างมากเกินไปอาจส่งผลต่อความแม่นยำในการคัดแยก ปัจจุบันตั้งค่าระยะห่างระหว่างตัวคัดแยกกับฝาดอยู่ที่ 26 มิลลิเมตร ซึ่งห่างเกินไป ดังนั้นจึงทำการตั้งค่าระยะห่างระหว่างตัวคัดแยกกับฝาดให้ต่ำกว่าค่าที่ใช้ ณ ปัจจุบัน และทำการศึกษาที่ 3 ระดับ คือ (ก) ระยะห่างระหว่างตัวคัดแยกกับฝาดเท่ากับ 16 มิลลิเมตร (ระดับต่ำ) เนื่องจากหากตั้งค่าให้น้อยกว่านี้อาจส่งผลให้ลมที่ใช้ในการคัดแยกแรงเกินไป (ข) ระยะห่างระหว่างตัวคัดแยกกับฝาดเท่ากับ 19 มิลลิเมตร (ระดับกลาง) และ (ค) ระยะห่างระหว่างตัวคัดแยกกับฝาดเท่ากับ 24 มิลลิเมตร เนื่องจากถ้าตั้งค่าเกินกว่านี้จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการคัดแยก

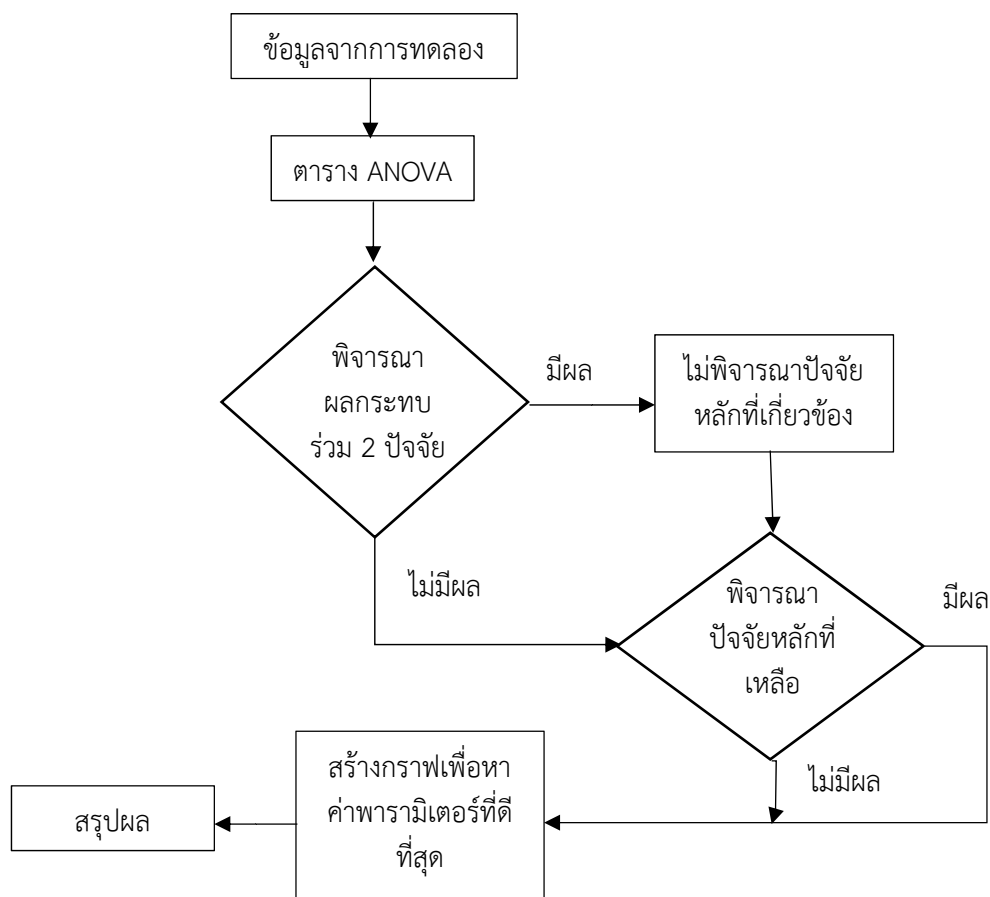
(3) การตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าเมื่อเครื่องตรวจจับ (Sensor) ตรวจพบฝาดที่ไม่ได้มาตรฐาน ระบบจะทำการสั่งให้ลมทำการคัดแยกฝาดดังกล่าวออกจากสายพาน จากการทำงานของระบบเดิมที่ทำให้ฝาดที่ได้มาตรฐานและฝาดที่ไม่ได้มาตรฐานถูกคัดแยกไปด้วยกัน เนื่องจากระบบการหน่วงเวลาในระบบ PLC ที่เรียกว่าไทม์เมอร์ (Timer) จะสั่งการไปยังเครื่องคัดแยกฝาดมีช่วงเวลาทำงานที่มากเกินไป ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงการหน่วงเวลาในโปรแกรมให้เหมาะสมกับการคัดแยกชิ้นงาน โดยปัจจุบันมีการตั้งค่าอยู่ที่ 1,200 มิลลิวินาที (Microsecond: ms) ซึ่งนานเกินไป ดังนั้นจึงทำการตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC ให้ต่ำกว่าค่าที่ใช้ ณ ปัจจุบัน และทำการศึกษาที่ 3 ระดับ คือ (ก) ตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC เท่ากับ 1,175 ms (ระดับต่ำ) เพราะถ้าตั้งค่าน้อยกว่านี้จะส่งผลให้ระยะเวลาในการคัดแยกสั้นเกินไป และอาจทำให้ฝาชวดไม่ถูกคัดแยกออกจากกระบวนการ (ข) ตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC เท่ากับ 1,185 ms (ระดับกลาง) และ (ค) ตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC เท่ากับ 1,195 ms (ระดับสูง) เนื่องจากหากตั้งค่านานกว่านี้ จะทำให้ลมติดโดนฝารอบข้าง

จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา เนื่องจากปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยดังกล่าวข้างต้นถือเป็นปัจจัยวิกฤติที่ส่งผลต่อความผิดพลาดในกระบวนการคัดแยกฝาชวด ดังนั้น เพื่อทำการศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย และเพื่อให้จำนวนการทดลองไม่มากเกินไป ซึ่งจะส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการทำการทดลองในบริษัท วิศวกรรมศึกษา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (3^k Full Factorial Design) โดยการทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ สามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกันโดยมี วัตถุประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย ซึ่งจำนวนระดับของปัจจัยนั้นขึ้นอยู่กับความสำคัญของปัจจัย ถ้าเป็นปัจจัยที่ต้องการศึกษาอย่างละเอียดหรือ

ปัจจัยวิกฤตก็จะใช้จำนวนระดับมากขึ้นตามลำดับ (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551; โสภิตา ท่วมมี, 2550; Montgomery, 2009) ทั้งนี้มีงานวิจัยจำนวนหลายงานที่ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ เพื่อหาปัจจัยและระดับที่เหมาะสม (เช่น ฐานันดร เชียวสังข์ และ ศุภรัชชัย วรรัตน์, 2555; โสภิตา ท่วมมี, 2550; กิรติศักดิ์ กิรติอัศมเดช, 2555; พิพัฒพงศ์ ศรีชนะ และ พรประเสริฐ ขวลาธาร, 2555; นันทนา จันทร์ตะวงค์, 2551; จักรกริช คำทีระ และ อิศรา

ธีระวัฒน์สกุล, 2558; เจตรวี ตะเงิน, จิราภรณ์ ประดับวงษ์, และ ภัฏฐวิภา จันทร์ศรี, 2560; Lin & Chananda, 2003; Oktay, Eevli, & Coruh, 2009; Kukreja, Chopra, Aggarwal, & Khanna, 2011) กระบวนการวิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 3 ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองนี้จะใช้ระดับของการทดสอบความมีนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลด้วยการออกแบบการทดลอง
 ที่มา: ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ (2551)

ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะสามารถทำได้เมื่อมีการทดสอบข้อสมมติเกี่ยวกับค่าผิดพลาดก่อน ดังนั้นจึงมีการตรวจสอบความถูกต้องของข้อสมมติทั้ง 4 นี้ดังนี้

(1) ค่าความผิดพลาด (ε) มีการแจกแจงปกติ

(2) $E(\varepsilon_j) = 0$ (ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาด

เท่ากับ 0)

(3) $V(\varepsilon_j) = \sigma^2$ (ค่าความแปรปรวนของค่าผิดพลาดมีค่าคงที่)

(4) ค่าความผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน

การวิเคราะห์ด้วยตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถทำได้โดยทำการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับปัจจัยที่ต้องการทดสอบ ซึ่งแบ่งได้ 2 กรณี คือ

(1) การทดสอบปัจจัยร่วม (Test of Interaction Factor) ภายใต้ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) โดยที่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก เมื่อค่า p-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (α) แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ มีความสัมพันธ์ต่อค่าตอบสนอง Y (จำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงออกมาจากกระบวนการ) อย่างมีนัยสำคัญ โดยตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบผลกระทบร่วมของปัจจัยดังนี้

พิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างตัวคัดแยกกับฝาและการตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC

H_0 : ผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างตัวคัดแยกกับฝาและการตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC ไม่มีผลต่อจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงออกมาจากกระบวนการ

H_1 : ผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างตัวคัดแยกกับฝาและการตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC มีผลต่อจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงออกมาจากกระบวนการ

พิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างตัวคัดแยกกับฝาและความเร็วของสายพาน

H_0 : ผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างตัวคัดแยกกับฝาและความเร็วของสายพานไม่มีผลต่อ

จำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงออกมาจากกระบวนการ

H_1 : ผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างตัวคัดแยกกับฝาและความเร็วของสายพานมีผลต่อจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงออกมาจากกระบวนการ

พิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างการตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC และความเร็วของสายพาน

H_0 : ผลกระทบร่วมระหว่างการตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC และความเร็วของสายพานไม่มีผลต่อจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงออกมาจากกระบวนการ

H_1 : ผลกระทบร่วมระหว่างการตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC และความเร็วของสายพานมีผลต่อจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงออกมาจากกระบวนการ

(2) การทดสอบปัจจัยหลัก (Test of Main Factor) ภายใต้ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) โดยที่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก เมื่อค่า p-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (α) แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ มีความสัมพันธ์ต่อจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐาน ที่ถูกคัดแยกอย่างมีนัยสำคัญ โดยตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบผลกระทบหลักของปัจจัยดังนี้

H_0 : ปัจจัยระยะห่างตัวคัดแยกกับฝาไม่มีผลต่อจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงออกมาจากกระบวนการ

H_1 : ปัจจัยระยะห่างตัวคัดแยกกับฝามีผลต่อจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงออกมาจากกระบวนการ

H_0 : ปัจจัยการตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC ไม่มีผลต่อจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงออกมาจากกระบวนการ

H_1 : ปัจจัยการตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC มีผลต่อจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงออกมาจากกระบวนการ

H_0 : ปัจจัยความเร็วของสายพานไม่มีผลต่อจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงออกมาจากกระบวนการ

H_1 : ปัจจัยความเร็วของสายพานมีผลต่อจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกลำเลียงออกมาจากกระบวนการ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองโดยทำการศึกษาที่ 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยทำการศึกษาที่ 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลา ทรัพยากร และงบประมาณที่ใช้ ดังนั้นจะได้จำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ $3^3 \times 2 = 54$ ครั้ง แล้วจึงทำการทดลอง

ตามค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ที่ละการทดลอง และทำการบันทึกข้อมูลจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานที่ถูกคัดแยกออกมาปะปนกับฝาขวดที่ไม่ได้มาตรฐาน (ค่าตอบสนอง: Y) โดยทำการเลือกการทดลองแบบสุ่ม (Random) เพื่อลดอคติที่อาจเกิดขึ้นจากการทำการทดลอง (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551) ในการเก็บข้อมูลใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 10 สัปดาห์ (สิงหาคม - ตุลาคม 2560) เนื่องจากข้อจำกัดด้านการใช้งานของเครื่องจักร โดยที่เครื่องจักรต้องทำงานตลอดเวลา และสามารถทำการทดลองได้เฉพาะวันที่เครื่องจักรไม่ได้ใช้งานเท่านั้น

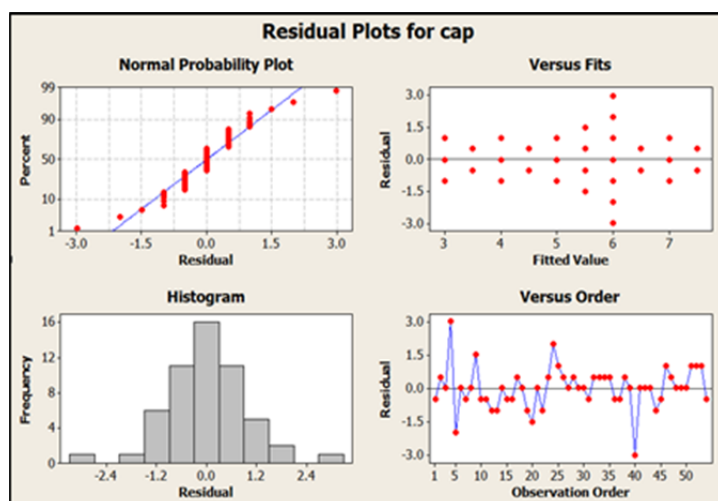
ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับปัจจัย

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		
	1	2	3
ความเร็วของสายพาน (หน่วย: RPM)	150	250	350
ระยะห่างระหว่างตัวคัดแยกกับฝา (หน่วย: มิลลิเมตร)	16	19	24
การตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC (หน่วย: ms)	1,175	1,185	1,195

การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลและนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab16 โดยเริ่มจากการตรวจสอบข้อสมมุติของค่าความผิดพลาด (Residuals) เพื่อตรวจสอบ

ความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง จากผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4 พบว่ารูปแบบของค่าความผิดพลาดเป็นไปตามเงื่อนไข $\epsilon \sim NID(0, \sigma^2)$ ดังนั้นจึงสามารถดำเนินการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้



ภาพที่ 4 การทดสอบค่าความผิดพลาดในการประมาณค่า

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน กำหนดการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงดังตารางที่ 3 ในการวิเคราะห์ผลการทดลองจะต้องทำการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยก่อนเสมอ โดยที่ถ้าผลกระทบร่วมของปัจจัยใดๆ มีผลต่อค่าตอบสนองในทางทฤษฎีจะไม่ทำการวิเคราะห์ผลกระทบหลักที่เกี่ยวข้อง (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551)

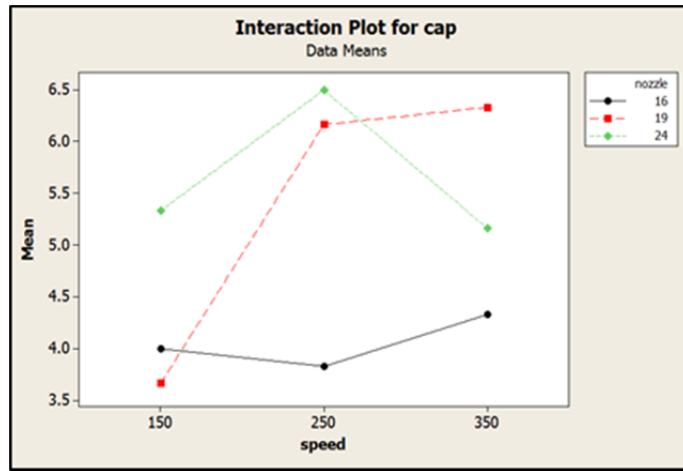
หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลกระทบหลักของปัจจัยอื่นๆ ที่เหลือ ทั้งนี้ผลกระทบร่วมระหว่างสามปัจจัยจะไม่ทำการพิจารณาเนื่องจากในทางทฤษฎีถือว่าผลกระทบร่วมระหว่างสามปัจจัยถือว่ามีค่าน้อยมาก (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	Df	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	p-value
Nozzle	2	26.704	26.704	13.352	7.84	0.002
Delay	2	1.815	1.815	0.907	0.53	0.593
Speed	2	13.815	13.815	6.097	4.05	0.029
Nozzle*Delay	4	2.074	2.074	0.519	0.3	0.872
Nozzle*Speed	4	20.074	20.074	5.019	2.95	0.038
Delay*Speed	4	2.296	2.296	0.574	0.34	0.851
Nozzle*Delay*Speed	8	21.148	21.148	2.644	1.55	0.186
Error	27	46	46	1.704		
Total	53	133.926				

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยคือ ระยะห่างระหว่างตัวตัดแยกกับผ่าขวด* ความเร็วของสายพานมีผลต่อค่าตอบสนอง (p-value = 0.038) ส่วนผลกระทบร่วมของระยะห่างระหว่างตัวตัดแยกกับผ่าขวด*การตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC และการตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC* ความเร็วของสายพานไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง เนื่องจากค่า p-value > 0.05 ดังนั้นจึงทำการพิจารณาผลกระทบหลักที่เหลือคือ การตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC ซึ่งค่า p-value = 0.593 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าผลกระทบหลักของการตั้งค่าการหน่วงเวลาในระบบ PLC ไม่มีผลต่อค่าตอบสนองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างระหว่างตัวตัดแยกกับผ่า* ความเร็วของสายพานโดยพิจารณาจากกราฟผลกระทบร่วมดังแสดงในภาพที่ 5 โดยที่ค่าเฉลี่ย (Mean) คือ ค่าเฉลี่ยของจำนวนผ่าขวดที่ได้มาตรฐาน หรือค่าเฉลี่ยของค่าตอบสนองที่หลุดออกมาพร้อมกับผ่าที่ไม่ได้มาตรฐานในกระบวนการตัดแยกผ่าขวด จากภาพที่ 5 สามารถสรุปได้ว่าเพื่อให้ผ่าขวดที่ได้มาตรฐานหลุดออกมาปะปนกับผ่าขวดที่ไม่ได้มาตรฐานในกระบวนการตัดแยกผ่าขวดให้น้อยที่สุดควรปรับตั้งค่าระยะห่างระหว่างตัวตัดแยกกับผ่าให้อยู่ในระดับกลาง คือ 19 มิลลิเมตร และปรับความเร็วของสายพานให้อยู่ในระดับต่ำ คือ 150 RPM



ภาพที่ 5 กราฟผลกระทบร่วมของปัจจัยระยะห่างระหว่างตัวตัดแยกกับฝา* ความเร็วของสายพาน

จากนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลเพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยทำการตั้งค่าระยะห่างระหว่างตัวตัดแยกกับฝาให้อยู่ในระดับกลาง คือ 19 มิลลิเมตร และปรับความเร็วของสายพานให้อยู่ในระดับต่ำ คือ 150 RPM โดยได้ทำการทดลองทั้งหมด 30 ครั้ง และใช้จำนวนฝาที่ใช้ทดสอบแต่ละการทดลองเท่ากับ 100 ฝา และทำการเก็บข้อมูลจำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานที่หลุดปะปนออกมากับฝาขวดที่ไม่ได้

มาตรฐาน เพื่อทำการวิเคราะห์ว่าเมื่อตั้งค่าระดับปัจจัยตามผลการทดลองแล้วจะส่งผลให้จำนวนฝาขวดที่ได้มาตรฐานถูกคัดแยกออกมากับฝาขวดที่ไม่ได้มาตรฐานลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากการเก็บข้อมูลพบว่าสัดส่วนฝาขวดที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออกมาเท่ากับ 51 ฝา จากจำนวนฝาขวดทั้งหมด 3,000 ฝา ดังนั้นสามารถสร้างความเชื่อมั่นได้ดังแสดงด้านล่างนี้

$$\hat{p} = \frac{x}{n} = \frac{51}{3,000} = 0.017$$

ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของสัดส่วนฝาที่ได้มาตรฐานที่หลุดออกมาจะมีค่าเท่ากับ

$$\hat{p} - Z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\hat{p}\hat{q}}{n}} < p < \hat{p} + Z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\hat{p}\hat{q}}{n}} \quad \dots(1)$$

แทนค่า $0.017 - (1.956) \sqrt{\frac{(0.017)(0.983)}{3000}} < p < 0.017 + (1.956) \sqrt{\frac{(0.017)(0.983)}{3000}}$

จะได้ $0.012 < p < 0.022$

ดังนั้นจะได้ว่าช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของสัดส่วนผาขวดที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออกมา จะอยู่ระหว่าง $0.012 < p < 0.022$ จากค่าสัดส่วนของเสียที่ได้เท่ากับ 0.017 ซึ่งอยู่ภายใต้ช่วงความเชื่อมั่นดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่าสามารถยอมรับสัดส่วนของผาขวดที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออกมา ได้ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปปรับใช้จริงเป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่า ผาขวดที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออกมาปะปนกับผาที่ไม่ได้มาตรฐานคิดเป็นร้อยละ 1.7 หรือคิดเป็นมูลค่า 3,608 บาท เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการปรับปรุงซึ่งผาขวดที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออกมาปะปนกับผาที่ไม่ได้มาตรฐานมีค่าเท่ากับร้อยละ 28.75 หรือคิดเป็นมูลค่า 60,554 บาท (ดังแสดงในตารางที่ 1) ดังนั้นจะได้ว่าปริมาณผาขวดที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออกมาปะปนกับผาที่ไม่ได้มาตรฐานลดลงถึงร้อยละ 27.05 ($28.75 - 1.7 = 27.05$) หรือคิดเป็นจำนวนต้นทุนที่ลดลงเท่ากับ 56,946 บาท ($60,554 - 3,608 = 56,946$) ต่อระยะเวลา 6 เดือน หรือ 113,892 บาท/ปี

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องคัดแยกผาขวด จากการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 3 ปัจจัย 3 ระดับ และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง โดยจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 54 ครั้ง แล้วจึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab 16 พบว่า ผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างของตัวคัดแยกกับผา*ความเร็วของสายพาน มีผลต่อจำนวนผาที่ได้มาตรฐานที่หลุดออกมาจากกระบวนการคัดแยกผาขวด (ค่าตอบสนอง: Y) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และควรตั้งค่าระยะห่างระหว่างตัวคัดแยกกับผาให้อยู่ในระดับกลาง คือ 19 มิลลิเมตร และปรับความเร็วของสายพานให้อยู่ในระดับต่ำ คือ 150 RPM

จากการยืนยันผลการทดลองและติดตามผลการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ พบว่าสัดส่วนของผาขวดที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออกมา (0.017) อยู่ภายใต้ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($0.012 < p < 0.022$) และจากการนำค่าพารามิเตอร์ไปปรับใช้ ในระยะเวลา 6 เดือน พบว่าสามารถลดปริมาณผาขวดที่ได้มาตรฐานและถูกคัดแยกออกมาปะปนกับผาที่ไม่ได้มาตรฐานลงถึงร้อยละ 27.05 (ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้คือ ทำให้จำนวนผาขวดที่ได้มาตรฐานถูกคัดแยกออกมาจากกระบวนการลดลงอย่างน้อยร้อยละ 5 หรือคิดเป็นจำนวนต้นทุนที่ลดลงเท่ากับ 56,946 บาทต่อระยะเวลา 6 เดือน หรือ 113,892 บาท/ปี

ข้อเสนอแนะ

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้เหมาะสำหรับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องเพรสโกในกระบวนการคัดแยกผาขวด เพื่อเข้าสู่กระบวนการบรรจุภัณฑ์ของโรงงานผลิตน้ำมะพร้าวแปรรูปของบริษัทกรณีศึกษาเท่านั้น ทั้งนี้ในสายการผลิตอื่นๆ ที่มีความคล้ายคลึง อาจนำผลการวิเคราะห์การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากงานวิจัยนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัจจัยและการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ ทั้งนี้ อาจต้องพิจารณาเงื่อนไขของเครื่องจักร หรือสภาวะอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย

เอกสารอ้างอิง

- กิริตศักดิ์ กิริตอัสมเดช. 2555. การลดสัดส่วนของเสีย ในกระบวนการผลิตผากระป๋อง โดยใช้ การควบคุมกระบวนการด้วยหลักการทางสถิติ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.
- จักรกริช คำที่ระ, และ อิศรา ชีระวัฒน์สกุล. 2558. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ปรับตั้งเครื่องปักผ้าโดยเทคนิคการออกแบบการทดลอง. วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร, 9(1): 102-111.

- เจตรวี ต๊ะเงิน, จิราภรณ์ ประดับวงษ์, และ นัฏฐวิภา จันทร์ศรี. 2560. การออกแบบการทดลอง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทนทานต่อ แสงยูวีของอะคริลิกฟิล์มในงานเคลือบ หลังคา. ใน การประชุมวิชาการช่างงาน วิศวกรรมอุตสาหกรรม (น. 1253-1256). เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ฐานันดร เขียวสังข์, และ ศุภรัชชัย วรรัตน์. 2555. การลดของเสียในกระบวนการผลิตการ ขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติก. ใน การประชุม วิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม (น. 725-729). เพชรบุรี: โรงแม่ธาตวลัยชะอำ.
- นันทนา จันทร์ตะวงค์. 2551. การศึกษาปัจจัยที่มีผล กระทบต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ในกระบวนการ ฉีดขึ้นรูปพลาสติก. ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูล. 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การ ทดลอง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป.
- พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535. ราชกิจจานุเบกษา 109 ตอนที่ 37. สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2559, จาก <http://www2.diw.go.th>
- พิพัฒพงศ์ ศรีชนะ, และ พรประเสริฐ ขวาลาธาร. 2555. การลดของเสียในกระบวนการผลิตอิฐบล็อก กรณีศึกษา: บริษัทมหาอาณาจักร จำกัด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- โสภิตา ท่วมมี. 2550. การลดปริมาณของเสียใน กระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นโดยการ ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษา บริษัทในอุตสาหกรรมผลิต พลาสติก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- Chen, Y. C., Wang, S. L., & Wang, Y. H. 2015. Ram injection molding mold flow analysis and process parameter optimization. *International Journal of Organizational Innovation*, 7(4): 165-183.
- Kukreja, A., Chopra, P., Aggarwal, A., & Khanna, P. 2011. Application of full factorial design for optimization of feed rate of stationary hook hopper. *International Journal of Modeling and Optimization*, 1(3): 205-209.
- Lin, T., & Chananda, B. 2003. Quality improvement of an injection-molded product using design of experiments: A case study. *Quality Engineering*, 16(1): 99-104.
- Montgomery, D. C. 2009. *Design and analysis of experiments* (7th ed.). The United States of America: John Wiley & Sons.
- Oktaý, B. M., Elevation, E., & Coruh, S. 2009. Malachite green dye removal using montmorillonite clay: Full factorial design analysis. *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*, 4(3): 13-17.