NUEJ
Naresuan University
Engineering Journal

การพัฒนาประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตยางแท่ง STR 20 โดยใช้การออกแบบการทดลอง

The Efficiency Improvement of STR 20 Block Rubber Production Process by Using Design of Experiments

นิภาส ลีนะธรรม[1*], วีระยุทธ สุดสมบูรณ์[1], สิทธิชัย แก้วเกื้อกูล[2], ฉัตรชัย แก้วดี[1] , วีรพล ปานสีนวล[1]
Nipas Leenatham[1*], Weerayute Sudsomboon[1], Sittichai Kaewkuekool[2], Chatchai Kaewdee[1],
Weeraphol Pansrinual[1]

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
[2]ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[1]Graduate Program in Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology,
Nakhon Si Thammarat Rajabhat University
[2]Department of Production Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology,
King Mongkut's University of Technology Thonburi

*Corresponding author e-mail: 6177707002@nstru.ac.th

(Received: 17 August 2020, Revised: 20 January 2021, Accepted: 27 January 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตยางแท่ง STR 20 ภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ จากการศึกษาสภาพของปัญหาในปัจจุบันพบว่า มีสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์สูงกว่าข้อกำหนดขีดจำกัดด้านบนที่โรงงานกำหนด โดยจากการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพสาเหตุและผล และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในกระบวนการผลิตพบว่าปัญหาการเกิดจุดขาวมีสาเหตุหลักมาจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางแท่งไม่เหมาะสม ในการจัดการกับปัญหาดังกล่าวอย่างเป็นระบบ ได้ประยุกต์ใช้แนวคิดระบบการผลิตแบบลีนซิกซ์ซิกม่าเพื่อปรับปรุงงาน ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^K เพื่อกรองปัจจัยของระบบในเบื้องต้น และการออกแบบการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต จากผลการวิจัยพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตยางแท่ง คือ อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น 110 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง 120 องศาเซลเซียส เวลาในการอบยางแท่ง 210 นาที ขนาดความหนาของยางผสม 3 มิลลิเมตร และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงพบว่า สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ลดลงจากเดิมคิดเป็น 17.16 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสมรรถภาพกระบวนการหลังการปรับปรุง C_{pk} เท่ากับ 1.45 แสดงว่ากระบวนการอยู่ในเกณฑ์ดี โดยช่วงความเชื่อมั่นของกระบวนการเท่ากับ $1.04 < C_{pk} < 1.87$ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และสามารถคาดการณ์ได้ว่าต้นทุนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ซึ่งต้องนำมาผลิตซ้ำจะลดลงได้ 924,630 บาทต่อปี

คำสำคัญ : การออกแบบการทดลอง, การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ, มาตรฐานยางแท่งไทย 20, จุดขาวในยางแท่ง

NUEJ
Naresuan University
Engineering Journal

Abstract

The objective of this research is to investigate optimum parameters for STR 20 block rubber production process while all possible constrains are carefully taken into consideration. According to the current problem study, it was found that the proportion of the achieved rubber with white-spot problems, caused by inappropriate drying process, went higher than the factory acceptable range. The analysis was done by applying the Cause-and-Effect diagram and Failure Mode and Effect Analyze method (FMEA). It revealed that the white-spot problems were mainly caused by improper working parameters operated in the production process. In order to systematically solve the problems, the Lean Six Sigma approach was integrated. The 2^K Factorial experiment design was used to screen for system variables and Box-Behnken experiment design was applied to get the optimal production conditions. The experimental designs provided the optimum drying process parameters. For the STR 20 block rubber drying process, the appropriate moisture discharging and drying temperatures were 110 and 120 degree Celsius, respectively. The 3-millimeter-thick mixed rubber should be dried in 210 minutes. The achieved parameters were then used in the onsite production line. The results showed that the new parameter process decreased the fraction the problematic white-spot rubber by 17.16 percent. The capability analysis (C_{pk}) was 1.45 with 0.05 significance level. It indicated the highly efficient process as the confidence interval of the process was $1.04 < C_{pk} < 1.87$. The estimated reduced cost from white-spot block rubber reprocessing was 924,630 Baht per year.

Keyword : Design of Experiments, Process Capability Analysis, Standard Thai Rubber 20, White-spot problem in rubber.

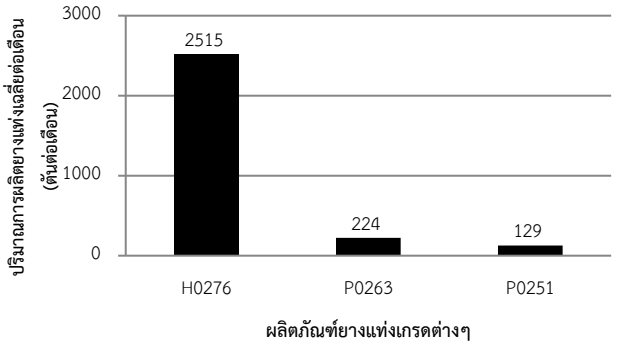
1. บทนำ

อุตสาหกรรมยางพาราเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจโลก จีนเป็นประเทศที่มีการนำเข้ายางพาราและผลิตภัณฑ์ยางพารามากเป็นอันดับหนึ่งของโลก (30 เปอร์เซ็นต์ของมูลค่าการนำเข้าของโลก) ตามด้วยสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และอินเดีย ไทยเป็นประเทศที่มีการส่งออกยางพาราสูง โดยในปี พ.ศ. 2562 ประเทศไทยมีการส่งออกยางพาราประมาณ 4.81 ล้านตัน (Puangthong & Daengkanit, 2020) จากการที่ไทยสามารถผลิตน้ำยางดิบได้เป็นจำนวนมากนี้เอง จึงทำให้ไทยมีอุตสาหกรรมต่อเนื่องเกี่ยวกับยางพาราเกิดขึ้นมากมาย เช่น ยางแท่ง ยางแผ่น ยางเครป ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตยางแท่ง STR 20 (Standard Thai Rubber 20) ก็เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมยางพาราที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจไทย โดยในกระบวนการผลิตยางแท่งมีหลายขั้นตอน ได้แก่ รับซื้อวัตถุดิบ คัดแยกวัตถุดิบ ล้างทำความสะอาด ผสมและตัดฝอย อบยางแท่ง บรรจุสินค้า และคลังสินค้า ทุกส่วนล้วนมีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตยางแท่ง และเนื่องจากในปัจจุบันมีการแข่งขันในอุตสาหกรรมยางแท่งสูงมาก ดังนั้นผู้ผลิตยางแท่งต้องทำการพัฒนาและปรับปรุงทั้งในส่วน บุคลากร เครื่องจักร วัตถุดิบ และวิธีการต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตสินค้าให้สูงขึ้นและตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า โดยเฉพาะกระบวนการควบคุมคุณภาพ เพราะคุณภาพมีความเกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิต หน้าที่การใช้งาน ตลอดจนรูปร่างลักษณะของผลิตภัณฑ์ และถ้าการผลิตขาดกระบวนการควบคุมคุณภาพผลผลิตที่ได้ก็จะขาดคุณภาพ กระบวนการควบคุมคุณภาพจึงถือว่าเป็นความจำเป็นของกระบวนการผลิตเพื่อให้ผลผลิตได้มาตรฐานตามต้องการ (Ramasamy, 2009)

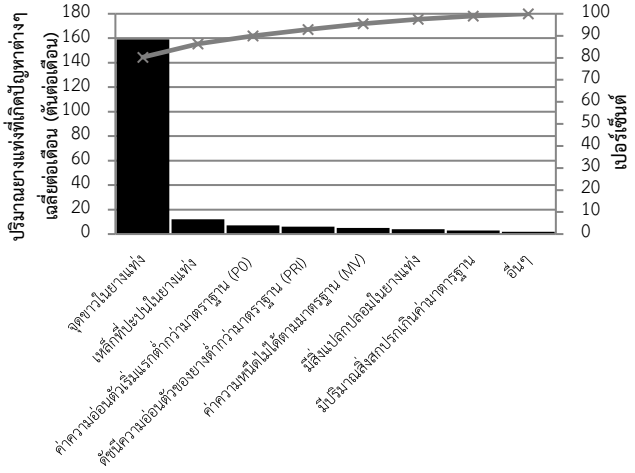
โดยจากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่า บริษัทกรณีศึกษาดำเนินธุรกิจเกี่ยวกับการผลิตยางแท่ง สามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ยางแท่งออกได้เป็น 3 เกรด ตามอัตราส่วนผสมระหว่างเศษยางและยางแผ่น ได้แก่ H0276 (80:20) P0263 (60:40) และ

P0251 (40:60) และมีการจัดระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous Production System) ด้วยการผลิตตามคำสั่งซื้อจากลูกค้า (Make to Order) เป็นหลัก ซึ่งในปัจจุบันปริมาณการผลิตยางแท่ง ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2562 พบว่า ผลิตภัณฑ์ยางแท่งเกรด H0276 มีปริมาณการผลิตเฉลี่ยต่อเดือนสูงสุดเท่ากับ 2,515 ตันต่อเดือน หรือคิดเป็น 87.69 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณการผลิตผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 1 งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาผลิตภัณฑ์ยางแท่งเกรด H0276 ซึ่งถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์หลักของบริษัทกรณีศึกษา และเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงยางแท่งเกรดอื่นๆ ทั้งนี้ หากพิจารณาปัญหาของยางแท่งในแต่ละประเภท พบปัญหาต่างๆ ได้แก่ จุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ เหล็กที่ปะปนในยางแท่งจากกระบวนการผลิต ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรกต่ำกว่ามาตรฐาน (P0) ดัชนีความอ่อนตัวของยางต่ำกว่ามาตรฐาน (PRI) ค่าความหนืดไม่ได้ตามมาตรฐาน (MV) มีสิ่งแปลกปลอมในยางแท่ง และมีปริมาณสิ่งสกปรกเกินค่ามาตรฐาน และจากหลักการพาเรโตกฎ 80:20 โดยเป็นกฎที่อธิบายหลักการว่าผลลัพธ์ส่วนใหญ่กว่า 80 เปอร์เซ็นต์ มักเกิดจากตัวแปรขนาดเล็กเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นปัญหาปริมาณยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์เฉลี่ย เท่ากับ 159 ตันต่อเดือน หรือคิดเป็น 80.30 เปอร์เซ็นต์ จากปัญหาทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2 งานวิจัยนี้จึงเลือกพัฒนาและปรับปรุงปัญหาจุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์เป็นโจทย์วิจัยหลักต่อไป

จากปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นกับกระบวนการการผลิตยางแท่ง คณะผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) (Sudasna- na- Ayudthya & Luangpaiboon, 2008) และแนวคิดระบบการผลิตแบบลีนซิกซ์ซิกม่า (Lean Six Sigma) (Breyfogle III, 2003) เพื่อที่จะลดปัญหาในกระบวนการผลิต และถือได้ว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพ อีกทั้งวิธีการดังกล่าวถือว่าเป็นการปรับปรุงกระบวนการอย่างต่อเนื่องเพื่อสร้างผลกำไรโดยการกำจัดความแปรปรวน ลดความสูญเสียต่างๆ และเป็นการเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อีกด้วย ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตยางแท่ง STR 20 ภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ โดยการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ นอกจากนั้นยังเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการในอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ใกล้เคียงกัน และเผยแพร่ผลงานวิจัยต่อสถานประกอบการผลิตยางแท่งต่อไป



รูปที่ 1 ปริมาณการผลิตยางแท่งของแต่ละเกรด



รูปที่ 2 ปริมาณยางแท่งที่เกิดปัญหาต่างๆ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับยางแท่ง

ยางแท่งมีชื่อเรียกโดยสากลว่า ยางธรรมชาติที่ระบุค่าทางเทคนิค (Technically Specified Natural Rubber) เป็นผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตขึ้นด้วยกรรมวิธีมาตรฐานสามารถควบคุมสมบัติและคุณภาพได้ ส่งผลให้ปริมาณความต้องการของยางประเภทนี้เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเป็นยางที่ง่ายต่อการควบคุมคุณภาพและเป็นวัตถุดิบที่ง่ายต่อการนำไปผลิตและแปรรูปต่อ จนในปัจจุบันยางแท่งกลายเป็นผลิตภัณฑ์หลักของยางธรรมชาติที่มีการซื้อขาย ประเทศหลักที่มีการผลิตและส่งออกยางแท่งประกอบด้วย ไทย มาเลเซีย อินโดนีเซีย เวียดนาม และอินเดีย ซึ่งในแต่ละประเทศจะมีการกำหนดมาตรฐานยาง ซึ่งจะระบุค่าสมบัติต่างๆ ในแต่ละคุณภาพแตกต่างกัน หน่วยงานแรก

ที่ทำการประกาศมาตรฐานยางแท่งคือ องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (The International Standards Organization) โดยมีการประกาศใช้ครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2507 คือ ISO 2000 และต่อมาในปี พ.ศ. 2508 ประเทศมาเลเซียได้ทำการประกาศใช้มาตรฐานยางแท่งของตนเอง โดยใช้ชื่อว่า มาตรฐานยางมาเลเซีย (Standard Malaysian Rubber) เช่นเดียวกับประเทศผู้ผลิตยางแท่งอื่น ก็มีการประกาศใช้มาตรฐานยางแท่งของประเทศตนเอง เช่น ประเทศอินโดนีเซียใช้มาตรฐาน (Standard Indonesian Rubber) ประเทศเวียดนามใช้มาตรฐาน (Standard Vietnamese Rubber) เป็นต้น (Satsue & Phitthayaphinant, 2019)

กระบวนการผลิตยางแท่ง (Sae-ui & Sirisingha, 2007) ประกอบด้วยการรับซื้อวัตถุดิบโดยรับซื้อยางพาราที่มีลักษณะเป็นเศษยางและยางแผ่นดิบ จากเกษตรกรหรือร้านค้าซึ่งต้องปราศจากการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมต่างๆ จากนั้นนำไปพักไว้ในสถานที่เตรียมวัตถุดิบ โดยการแปรรูปวัตถุดิบเริ่มจากนำเศษยางและยางแผ่นดิบมาผสมรวมกันตามอัตราส่วนที่กำหนด จากนั้นนำวัตถุดิบที่ผสมแล้วมาทำการรีดยาง และตัดย่อยยางให้มีขนาดเล็กลง จนมีลักษณะเป็นเม็ดฝอย และส่งต่อไปยังบ่อพักเพื่อสเปรย์น้ำและล้างสิ่งสกปรกโดยล้างซ้ำไปมาจนสะอาดแล้วนำไปใส่ลงในแม่พิมพ์หรือตะกง เมื่อบรรจุวัตถุดิบลงในตะกงแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการอบยางให้แห้งด้วยเตาอบ โดยการทำงานของเตาอบเริ่มจากการใช้ความร้อนไล่ความชื้นออกจากก้อนยางในช่วงแรก แล้วต่อด้วยการให้ความร้อนสูงเพื่อทำให้ยางแห้งในช่วงที่สอง หลังจากนั้นให้เวลาในการถ่ายเทความร้อนกระจายทั่วเม็ดยางและให้เนื้อยางทุกส่วนได้รับความร้อนทั่วถึงกัน ยางที่ได้จะแห้งโดยสมบูรณ์ในส่วนนี้ และเพื่อที่จะได้ยางที่ออกมาไม่เป็นจุดขาว (White Spots) หากยางที่ออกมายังเป็นจุดขาวถือว่าเป็นข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถแบ่งเกณฑ์การตรวจสอบจุดขาวในยางแท่งได้ 4 เกรด แสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 3

สำหรับยางแท่งที่ได้คุณภาพจะถูกลำเลียงผ่านเครื่องตรวจจับโลหะ และสุ่มตัดตัวอย่างยางแท่งส่งให้กับห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบค่าต่างๆ สำหรับยางแท่งที่ได้คุณภาพตามข้อกำหนดของลูกค้าจะนำไปห่อด้วยพลาสติก และจัดเรียงบนพาเลทเพื่อนำไปจัดเก็บก่อนจัดส่งไปยังลูกค้าต่อไป

ตารางที่ 1 เกณฑ์การตรวจสอบจุดขาวในยางแท่ง

ขนาดของจุดขาว	การตัดสินใจ
ระดับ A : ไม่พบจุดขาว	ยอมรับ
ระดับ B : ขนาดจุดขาว ≤ 3 มิลลิเมตร จำนวนจุดขาว ≤ 10 จุด	ยอมรับ
ระดับ C : ขนาดจุดขาว ≤ 3 มิลลิเมตร จำนวนจุดขาว > 10 จุด	ไม่ยอมรับ
ระดับ D : ขนาดจุดขาว > 3 มิลลิเมตร จำนวนจุดขาว ≥ 1 จุด	ไม่ยอมรับ

ที่มา : ข้อมูลจากฝ่ายผลิตของโรงงานกรณีศึกษา

รูปที่ 3 ตัวอย่างจุดขาวในยางแท่ง

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Experiment)

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย (Multiple Factor Experiment) (Montgomery, 2019) ซึ่งเราต้องการที่จะศึกษาอิทธิพลของปัจจัยมากกว่าหนึ่งปัจจัยพร้อมกัน โดยให้ความสนใจที่อิทธิพลร่วมของปัจจัย ซึ่งเป็นอิทธิพลที่ส่งผลให้กับตัวแปรตอบสนอง ที่เกิดจากปัจจัยเหล่านั้น โดยทั่วไปแล้วอาจกล่าวได้ว่า การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปซึ่งเรียกว่า ทรีทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment Combination) และเนื่องจากมีปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้ด้วย

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^K จะใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับเท่านั้น ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเร็วหรือเวลา

เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับสูงหรือต่ำของปัจจัยเหล่านั้น และจะแทนระดับทั้งสองด้วยเครื่องหมาย (-) และ (+) ตามลำดับ ในข้อมูล 1 ซ้ำ ที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times \ldots \times 2 = 2^K$ ข้อมูล (Leenatham & Khemavuk, 2019)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^K มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ ดังนั้นการออกแบบการทดลองชนิดนี้จะทำให้สามารถกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลงได้ (Sudasna-na-Ayudthya & Luangpaiboon, 2008)

3.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองบ๊อกซ์–เบห์นเคน (Box-Behnken Experiment)

เป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่มีสามระดับ โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการตัวแบบเมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ ซึ่งพัฒนาขึ้นมาโดยนายบ๊อกซ์และนายเบห์นเคน ซึ่งได้พัฒนาประสิทธิภาพการออกแบบการทดลองแบบสามระดับสำหรับฟิตพื้นผิวตอบสนองที่มีสมการอันดับสอง (Second-Order) ลักษณะของการออกแบบการทดลองบ๊อกซ์-เบห์นเคน จะใช้หลักการของ 2^2 แฟคทอเรียลเต็มรูปผนวกกับจุดกึ่งกลาง (Central Point) รวมเข้าไป โดยได้จัดทำตารางสำหรับแผนการทดลองเพื่อใช้กับปัจจัยได้สูงสุดไม่เกิน 16 ปัจจัย (ไม่รวมกรณี 8 ปัจจัย) แผนการทดลองนี้ไม่มีการพิจารณาจุดมุม (Myers et al., 2016)

แผนการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน มีลักษณะเกือบจะเป็น Orthogonal จำนวนการทดลองแต่ละคอมบิเนชัน ทำในจำนวนครั้งที่ไม่เท่ากัน โดยเฉพาะการทดลองที่ทำ ณ จุดศูนย์กลาง (Center points) ข้อดี คือ มีค่ารายละเอียดของแผนการทดลองเท่ากับ IV ซึ่งทำให้สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสองและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย และในกรณีปัจจัยที่ศึกษามีจำนวน 3 หรือ 4 ปัจจัย จำนวนการทดลองน้อยกว่าแบบพื้นผิวตอบแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดลองได้ ข้อเสีย คือ แผนการทดลองนี้จะมีประสิทธิภาพด้อยกว่าการทดลองแบบพื้นผิวตอบแบบส่วนประสมกลาง เมื่อจำนวนปัจจัยที่ศึกษามีจำนวนมากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป (Khuri, 2006)

4.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ (Process Capability Analysis)

การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ (Process Capability Analysis : C_{pk}) (Montgomery, 2019) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้เพื่อกำหนดความสามารถของกระบวนการผลิตว่าสามารถผลิตสินค้าได้ตรงตามข้อกำหนด (Specification Limit) หรือไม่ ซึ่งความสามารถของกระบวนการคือ ความสม่ำเสมอ (Uniform) ของกระบวนการ โดยจะมีการวัดความสม่ำเสมอจากความแปรเปลี่ยนภายในกระบวนการ ด้วยค่าลักษณะคุณภาพของผลผลิตจากกระบวนการนั้น โดยความหมายของค่า C_{pk} มีดังนี้

2.4.1 $C_{pk} < 1$ กระบวนการผลิตแย่ มีการผลิตสินค้าไม่ตรงตามข้อกำหนดที่ต้องการและมีของเสียเกิดขึ้นจากการผลิต ควรจะต้องมีการปรับปรุงกระบวนการในด้านการลดความแปรปรวนของกระบวนการผลิตลง ซึ่งสามารถทำได้โดยเปลี่ยนหรือปรับตั้งเครื่องจักรใหม่เลือกวัตถุดิบที่เหมาะสม ฝึกอบรมพนักงานให้มีความชำนาญมากขึ้น เป็นต้น

2.4.2 $C_{pk} = 1$ กระบวนการเกือบจะใช้ไม่ได้ แทบจะหลุดออกนอกข้อกำหนดเนื่องจากความกว้างของข้อกำหนดมีขนาดเท่ากับความกว้างของ 6 ซิกม่า พอดี

2.4.3 $1 < C_{pk} < 1.33$ กระบวนการพอใช้ได้

2.4.4 $C_{pk} > 1.33$ กระบวนการดีมาก

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kaewploy and Boonseng (2014) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบไม้ยางพาราโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ เวลา และการเปิด-ปิดปล่องระบายในกระบวนการอบ เพื่อให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นตามมาตรฐานที่กำหนดโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน และเมื่อทำการวิเคราะห์พบว่า สามารถกำหนดสภาวะในการอบไม้ยางพาราด้วยสมการถดถอยคือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น $= 343.640 - 0.788A - 42.464B + 1.339B^2 +$

0.053AB ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความเชื่อถือได้

Homkhiew et al. (2017) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์การขึ้นรูปอัดร้อนที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพารา โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน ปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบไปด้วย อุณหภูมิการอัดร้อน ระยะเวลาการอัด และความหนาแน่น ผลจากการทดลองพบว่า ทั้งสามปัจจัยมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงดัด มอดุลัสการดัด ความแข็งแรงดึง มอดุลัสการดึง และการดูดซับน้ำ และพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสม มีสมบัติแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายไม่เกิน 3.78 เปอร์เซ็นต์

Srerungruang et al. (2017) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการหาสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดล้างด้านหลังตะแกรงของเครื่องเหวี่ยงแยกเพื่อลดการสูญเสียแป้งมันสำปะหลัง การทดลองถูกออกแบบโดยใช้วิธีการแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน และหาค่าสภาวะที่ทำให้ค่าร้อยละการสูญเสียแป้งต่ำที่สุดโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง จากผลการทดลองสามารถทำนายสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของการฉีดล้างด้านหลังตะแกรง คือ ระยะเวลาในการฉีดล้าง 63 วินาที เวลาหยุดฉีด 5 วินาที และใช้หัวฉีดสเปรย์ที่ทำมุมกับก้านฉีดที่ 33 องศา พบว่า ปริมาณแป้งที่สูญเสียไปในกากหลังการปรับปรุง ลดลง 11.8 เปอร์เซ็นต์ ชี้ให้เห็นว่าสามารถรบกวนการเกิดการอุดตันได้จริง

Ketsarapong and Sriyanalugsana (2019) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตตู้แช่อาหารโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคซิกซ์ ซิกม่า เพื่อที่จะแก้ไขปรับปรุงกระบวนการควบคู่กับเครื่องมือคุณภาพ และการวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการ (Failure Mode and Effect Analyze Process: FMEA) สำหรับวิเคราะห์สาเหตุของข้อบกพร่อง โดยบริษัทกรณีศึกษามีการผลิตตู้แช่อาหารเฉลี่ย 161 ตู้ต่อเดือน ซึ่งพบข้อบกพร่องเฉลี่ยเท่ากับ 93,168 PPM หลังจากดำเนินการปรับปรุง ข้อบกพร่องเฉลี่ยลดลงเหลือ 26,666.67 PPM ซึ่งลดลงจากก่อนปรับปรุง 28.62 เปอร์เซ็นต์

Sliva & Ferreira (2017) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาการทำงานและลดต้นทุนในกระบวนการอัดขึ้นรูปยางรถยนต์โดยใช้วิธีการซิกซ์ซิกม่า เพื่อที่จะแก้ไขปรับปรุงกระบวนการ ด้วยขั้นตอนทั้งสิ้น 5 ขั้นตอน คือการกำหนดปัญหา (Define) การประเมินวิธีการวัดผล (Measure) การวิเคราะห์ปัญหา (Analyze) การดำเนินการปรับปรุง (Improve) และการควบคุม (Control) โดยได้พัฒนาเครื่องจักรในการผสมยางเป็นนวัตกรรมแบบใหม่ ผลจากการทดลองพบว่า และสามารถลดเวลาในการทำงานได้ 0.89 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดต้นทุนได้ 165,000 ยูโรต่อปี ส่งผลให้ประสิทธิภาพกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้น

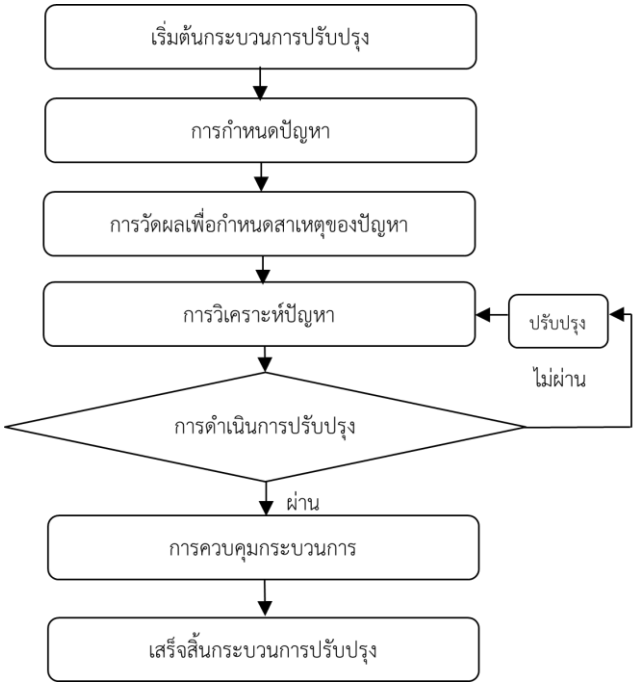
Hassan (2013) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความสูญเสียในกระบวนการผลิตลวดเชื่อมโดยใช้วิธีการซิกซ์ซิกม่าและอาศัยแนวคิดระบบการผลิตแบบลีน และทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ซึ่งได้สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาและมีผลกระทบต่อการเกิดของเสียมากที่สุดมีอยู่ 7 สาเหตุ โดยส่วนมากจะเกิดจากวิธีการทำงาน และพบว่าจำนวนของเสียลดลงจากเดิม 34.78 เปอร์เซ็นต์ ถือเป็นหนึ่งในแนวทางที่ประสบความสำเร็จในด้านการปรับปรุงคุณภาพและลดต้นทุน

Coelhoa et al. (2019) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการสกัดโปรตีนจากเนื้อแพะโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่ให้เหลือน้อยลง และวิธีการแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ (25–50 องศาเซลเซียส) เวลาในการสกัด (8-20 นาที) ปริมาณตัวแยกขนาด (3–10 มิลลิลิตร) และความเข้มข้นของเครื่องสกัด (0.05–0.1 โมลาริตี) เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่า โปรตีนจากเนื้อแพะที่สกัดด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้ มีปริมาณโปรตีนเพิ่มสูงขึ้นคิดเป็น 30.5 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้แนวคิดระบบการผลิตแบบลีนซิกซ์ซิกม่า (Lean six sigma) เพื่อเป็นวิธีการในการปรับปรุงงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ประกอบกับใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^K เพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่ให้เหลือน้อยลงและวิธีการออกแบบการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต ส่งผลให้ปริมาณยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ในกระบวนการผลิตลดลง ภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาค้นคว้าตามขั้นตอนของกระบวนการวิจัยจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จึงได้กำหนดขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยการประยุกต์ใช้แนวทางการแก้ปัญหาตามแนวคิดระบบการผลิตแบบลีนซิกซ์ซิกม่า ประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน คือ การกำหนดปัญหา (D: define) การวัดผลเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา (M: measure) การวิเคราะห์ปัญหา (A: analyze) การดำเนินการปรับปรุง (I: improve) การควบคุมกระบวนการ (C: control) ซึ่งรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4 (Pyzdek & Keller, 2019)

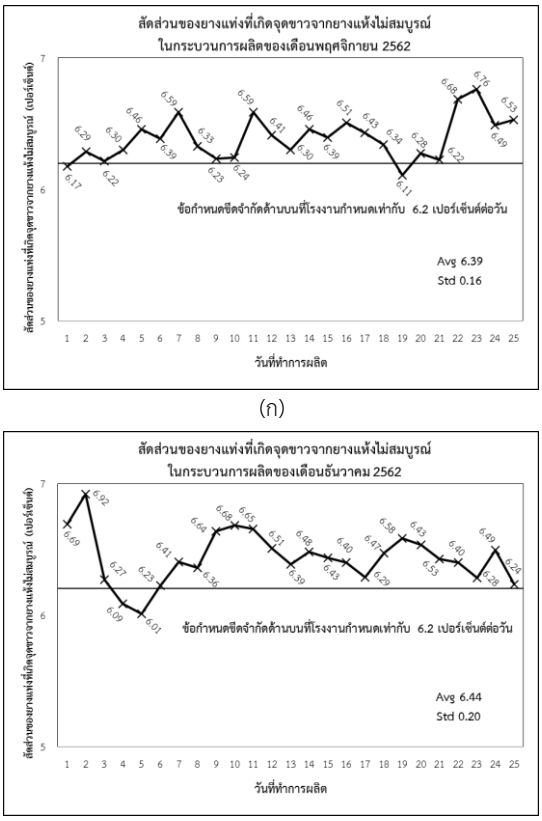


รูปที่ 4 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

4. ผลการวิจัย

4.1 การกำหนดปัญหา

คณะผู้วิจัยได้ทำการเข้าไปศึกษาสภาพปัญหาจริงของกระบวนการผลิตยางแท่งเกี่ยวกับปัญหาหลักดังกล่าวข้างต้น โดยทำการเก็บข้อมูลสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ เพื่อให้แน่ใจว่ากระบวนการมีปัญหาจริงและต้องการแก้ไขปรับปรุง ซึ่งในกระบวนการผลิตยางแท่งของโรงงานกรณีศึกษา มีการผลิตในแต่ละวันด้วยจำนวนชั่วโมงการทำงานที่เท่ากัน โดยในหนึ่งวันทำงานมี 3 กะ กะละ 7 ชั่วโมง รวมทำงานทั้งสิ้น 21 ชั่วโมงต่อวัน โดยเก็บข้อมูลระหว่างเดือนพฤศจิกายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562 รวมทั้งหมด 2 เดือน เดือนละ 25 วัน วันละ 3 กะ ใช้ข้อมูลทั้งสิ้น 75 ครั้ง โดยนำข้อมูลมาคำนวณค่าสถิติต่างๆ และวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการแสดงดังรูปที่ 5 และตารางที่ 2



(ก)

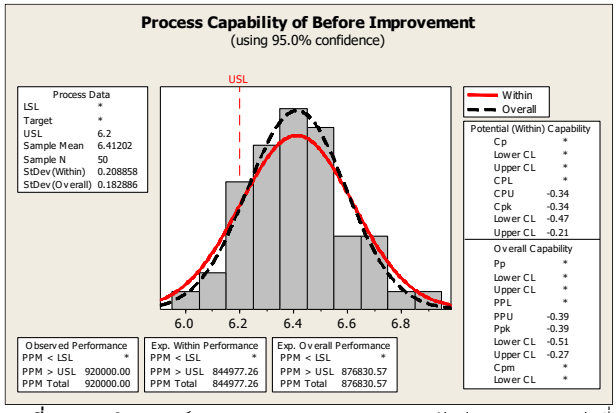
(ข)

รูปที่ 5 สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ในเดือนพฤศจิกายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562

จากรูปที่ 5 พบว่าสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2562 (ก) คิดเฉลี่ยเป็น 6.39 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.16 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน และในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 (ข) คิดเฉลี่ยเป็น 6.44 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.20 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ส่งผลให้มีสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ สูงกว่าข้อกำหนดขีดจำกัดด้านบนที่โรงงานกำหนด คือ 6.2 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน จึงต้องทำการปรับปรุงโดยทำการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุในกระบวนการถัดไป

ตารางที่ 2 ค่าสถิติต่างๆ จากผลการทดลองก่อนการปรับปรุงสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ ในช่วงระหว่างเดือนพฤศจิกายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562

ค่าทางสถิติ (เปอร์เซ็นต์ต่อวัน)	ก่อนการปรับปรุง
สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย	6.41
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.18
ขอบเขตบนสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ยที่ช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	6.46



รูปที่ 6 การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการของสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวก่อนการปรับปรุง

จากรูปที่ 6 แสดงว่าสมรรถภาพกระบวนการของสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวก่อนการปรับปรุงขาดประสิทธิภาพ เนื่องจากมีค่า C_{pk} = - 0.34 ซึ่งค่า $C_{pk} < 1$ แสดงว่ากระบวนการผลิตมีขีดความสามารถที่ไม่ดี ควรได้รับการปรับปรุงแก้ไขให้มีประสิทธิภาพต่อไป

4.2 การวัดผลเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

หลังจากดำเนินการศึกษากระบวนการโดยละเอียดแล้วนั้น ในขั้นตอนนี้จะใช้แผนภาพสาเหตุและผล (Montgomery, 2019) ที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลลัพธ์สำหรับปัญหาที่ทำการศึกษา ซึ่งแผนภาพนี้มีส่วนช่วยให้การวิเคราะห์ปัญหามีความง่ายและเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยการระดมสมองของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องร่วมกันแสดงความคิดเห็นเพื่อค้นหาสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมด ความคิดเห็นนี้จะไม่จำกัดปริมาณและคุณภาพของความคิด เพื่อป้องกันการตกหล่นของสาเหตุที่อาจมีผลกระทบต่อปัญหา โดยใช้หลัก 4M ดังแสดงในรูปที่ 7 สาเหตุของสัดส่วนยางแท่งที่เกิดจุดขาวแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน คือ สาเหตุที่เกิดจากพนักงาน เครื่องจักร วิธีการ และวัตถุดิบ ซึ่งสามารถพิจารณาสาเหตุเบื้องต้น ได้ดังนี้

4.2.1 สาเหตุจากพนักงาน จากจำนวนพนักงานทั้งหมดส่วนใหญ่จะเป็นเพศชายประมาณร้อยละ 70 ส่วนที่เหลือเป็นพนักงานเพศหญิง ซึ่งอายุของพนักงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 20-50 ปี ซึ่งอยู่ในวัยทำงานจึงมีสุขภาพร่างกายแข็งแรง และมีการจัดฝึกอบรมให้แก่พนักงานอย่างต่อเนื่อง

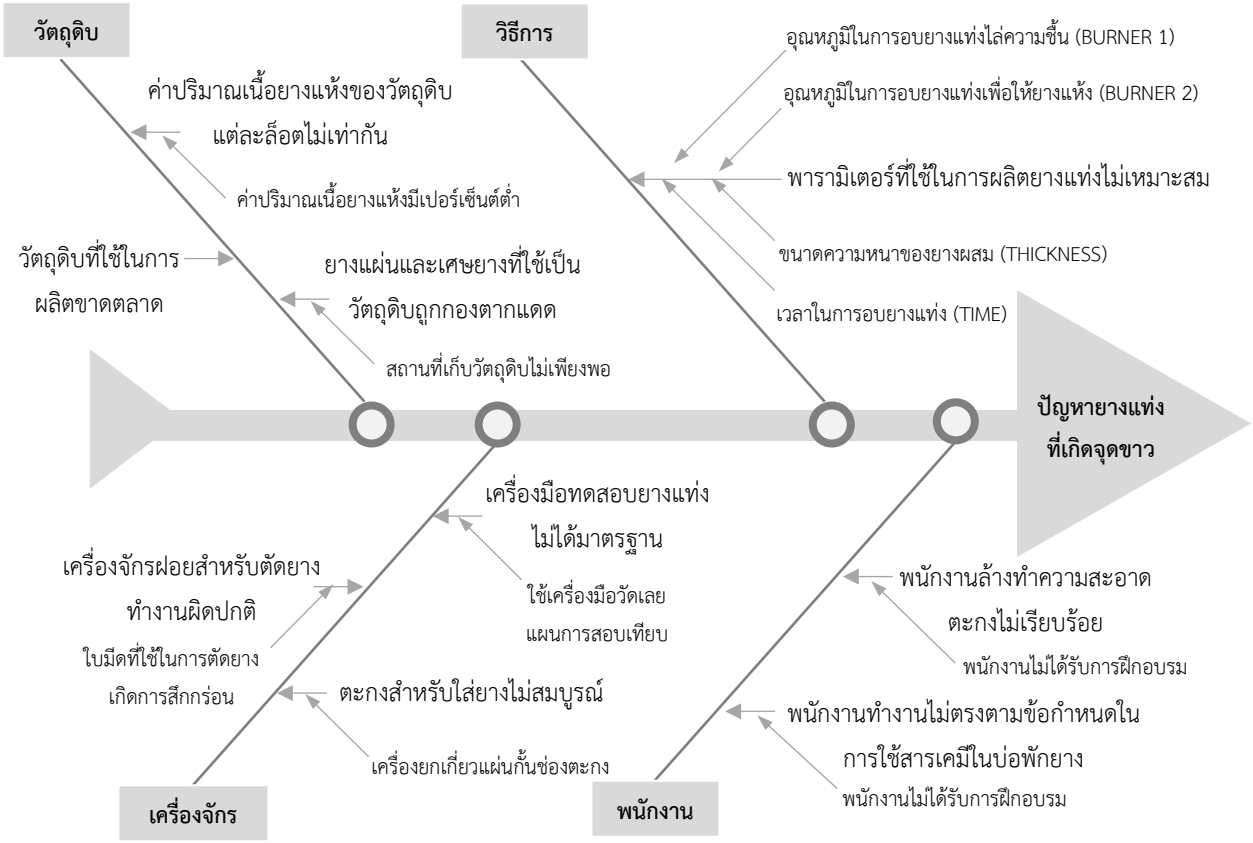
4.2.2 สาเหตุจากเครื่องจักร มีการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและตรวจติดตามการใช้งานของเครื่องจักรตามแผนซ่อมบำรุงของแผนกซ่อมบำรุงอย่างสม่ำเสมอ

4.2.3 สาเหตุจากวัตถุดิบ มีแผนการสต็อกวัตถุดิบล่วงหน้าเพื่อให้เพียงพอต่อการผลิตยางแท่งและจัดเตรียมสถานที่สำหรับเก็บวัตถุดิบอย่างเพียงพอ และมีมาตรฐานในการใช้วัตถุดิบตามที่กำหนด

4.2.4 สาเหตุจากวิธีการ มีการควบคุมค่าของพารามิเตอร์จากข้อกำหนด แต่ไม่สามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ โดยจะปรับลดค่าพารามิเตอร์ตามปัญหาที่เกิดขึ้นส่งผลให้มีปริมาณยางแท่งที่เกิดจุดขาวสูงในกระบวนการผลิต

4.3 การวิเคราะห์ปัญหา

จากการวัดผลเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหาข้างต้นนำไปสู่การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analyze Process: FMEA) (Ramasamy, 2009) เป็นเทคนิคหรือกระบวนการอย่างเป็นระบบที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์กิจกรรมในกระบวนการผลิต โดยการชี้บ่งปัญหาหรือข้อบกพร่องใดๆ ที่มีโอกาสเกิดขึ้นในกิจกรรมนั้น โดยการพิจารณาจากดัชนีความเสี่ยงชี้นำ (Risk Priority Number: RPN) ซึ่งได้จากการประเมินค่าความรุนแรง (Severity) โอกาสที่จะเกิด (Occurrence) และความสามารถในการตรวจพบข้อบกพร่องนั้นๆ (Detection) และค่าต่างๆถูกประเมินโดยคณะทำงานผู้ชำนาญทั้งหมด 10 ท่าน ซึ่งประกอบไปด้วยวิศวกรฝ่ายผลิต วิศวกรฝ่ายคุณภาพ วิศวกรฝ่ายซ่อมบำรุง และหัวหน้างานแผนกต่างๆ จากนั้นนำสาเหตุของปัญหายางแท่งที่เกิดจุดขาว มาวิเคราะห์ผลกระทบเพื่อหาค่าดัชนีความเสี่ยงชี้นำคำนวณจากผลคูณของ S x O x D = RPN ดังตารางที่ 3 และวิเคราะห์สาเหตุที่มีผลกระทบต่อปัญหาโดยใช้แผนภาพพาเรโตเพื่อทำการเลือกผลกระทบที่มีความรุนแรงมาก โดยมีค่า RPN มากกว่าหรือเท่ากับ 100 ไปปรับปรุงแก้ไขต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 8



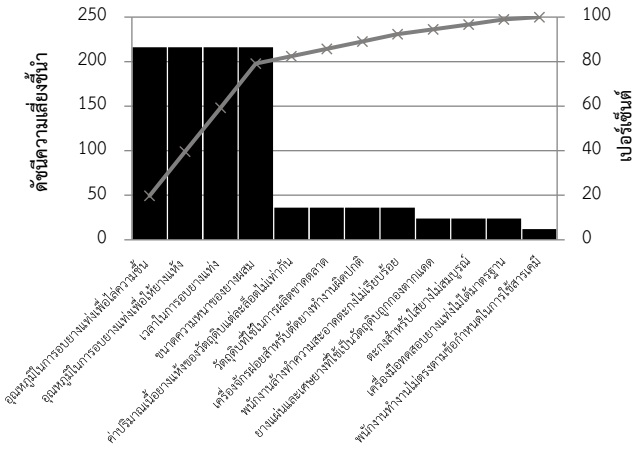
รูปที่ 7 แผนภาพสาเหตุและผล

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ

สาเหตุจาก	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบข้อบกพร่อง	S	สาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง	O	การควบคุมกระบวนการปัจจุบัน	D	RPN
เครื่องจักร	ตะกงสำหรับใส่ยางไม่สมบูรณ์	เกิดจุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์	6	เครื่องยกเกี่ยวแผ่นกั้นช่องตะกง ทำให้เกิดการบิดเบี้ยว	2	มีแผนซ่อมบำรุงเชิงป้องกันตะกงก่อนการผลิตและมีการตรวจติดตามในทุกรอบการผลิตยางแท่ง	2	24
	เครื่องจักรฝอยสำหรับตัดยางทำงานผิดปกติ	เกิดจุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์	6	ใบมีดที่ใช้สำหรับการตัดยางเกิดการสึกกร่อนจากการใช้งาน	3	มีแผนการตรวจสอบการใช้ใบมีดตามมาตรฐานที่กำหนดในทุกรอบการผลิต	2	36
	เครื่องมือทดสอบยางแท่งไม่ได้มาตรฐาน	เกิดจุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์	6	มีการใช้เครื่องมือวัดเลยแผนการสอบเทียบเนื่องจากปริมาณการผลิตยางแท่งสูง	2	มีการตรวจสอบ และติดตามแผนการสอบเทียบเครื่องมือวัดตามแผนที่กำหนดไม่ให้เลยแผนในทุกรอบการผลิตยางแท่ง	2	24

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สาเหตุจาก	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบข้อบกพร่อง	S	สาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง	O	การควบคุมกระบวนการปัจจุบัน	D	RPN
วิธีการ	พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางแท่งไม่เหมาะสม	เกิดจุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์	6	อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (BURNER 1)	4	มีการควบคุมค่าของพารามิเตอร์จากข้อกำหนด แต่ไม่สามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้น	9	216
			6	อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (BURNER 2)	4		9	216
			6	เวลาในการอบยางแท่ง (TIME)	4		9	216
			6	ขนาดความหนาของยางผสม (THICKNESS)	4		9	216
วัตถุดิบ	ค่าปริมาณเนื้อยางแห้งของวัตถุดิบแต่ละล็อตไม่เท่ากัน	เกิดจุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์	6	ค่าปริมาณยางแห้งของเศษยางและยางแผ่นที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีเปอร์เซ็นต์ต่ำ	2	มีการตรวจสอบ และติดตามการใช้วัตถุดิบตามมาตรฐานที่กำหนด โดยมีค่าปริมาณยางแห้งของเศษยางอยู่ระหว่าง 70-75% และยางแผ่น 90-95%	3	36
	ยางแผ่นและเศษยางที่ใช้เป็นวัตถุดิบถูกกองตากแดด	เกิดจุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์	6	สถานที่ใช้ในการเก็บสต็อกวัตถุดิบไม่เพียงพอ	2	สร้างโรงเก็บวัตถุดิบเพิ่มเติม และมีการสเปรย์น้ำในบ่อพักยางเพื่อให้ยางนิ่ม และให้สิ่งสกปรกหลุดออก	2	24
	วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตขาดตลาด	เกิดจุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์	6	ทำให้ต้องใช้วัตถุดิบที่ระยะเวลาในการบ่มไม่ครบ 15 วัน ตามมาตรฐานที่กำหนด	3	มีแผนการสั่งซื้อวัตถุดิบล่วงหน้าเพื่อให้เพียงพอต่อการผลิตยางแท่ง	2	36
พนักงาน	พนักงานล้างทำความสะอาดตะกงไม่เรียบร้อย	เกิดจุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์	6	เศษยางแห้งฉีกขาดติดที่ตะกงตอนทำการผลิตยางแท่ง	2	จัดอบรมพนักงานและมีแผนในการตรวจติดตามการทำความสะอาดตะกงหลังการใช้งาน	3	36
	พนักงานทำงานไม่ตรงตามข้อกำหนดในการใช้สารเคมีในบ่อพักยาง	เกิดจุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์	6	พนักงานไม่เข้าใจวิธีการทำงานเรื่องการตรวจสอบค่า PH ในบ่อพักยาง	1	จัดอบรมพนักงานและตรวจติดตามในการควบคุมค่า PH ระหว่าง 6-10 ในบ่อพักยาง	2	12



รูปที่ 8 แผนภาพพาเรโตดัชนีความเสี่ยงชี้นำ (RPN)

จากรูปที่ 8 พบว่าสาเหตุที่มีความรุนแรงมากคือค่าความเสี่ยงชี้นำ (RPN) สูง โดยส่งผลกระทบต่อปัญหายางแท่งที่เกิดจุดขาว มีจำนวน 4 สาเหตุหลัก ได้แก่ อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (BURNER 1) อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (BURNER 2) เวลาในการอบยางแท่ง (TIME) และขนาดความหนาของยางผสม (THICKNESS) ตามลำดับ จึงได้นำสาเหตุหลักดังกล่าวมาปรับปรุงแก้ไขต่อไป

4.4 การดำเนินการปรับปรุง

จากการวิเคราะห์สาเหตุที่แท้จริงของปัญหา ด้วยการวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการมาก่อนหน้านี้ หลังจากนั้นเพื่อหาวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าว คณะผู้วิจัยได้ใช้การออกแบบการทดลอง 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อที่จะกรองปัจจัยที่ไม่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^K และขั้นตอนที่สองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน แล้วจึงทำการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป ดังนี้

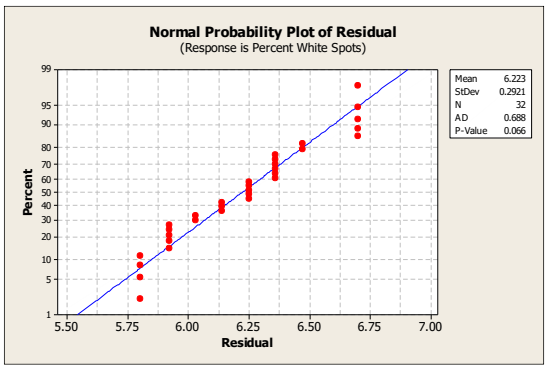
4.4.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^K

เมื่อได้ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อปัญหายางแท่งที่เกิดจุดขาว จึงได้นำปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย มาทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4 ซึ่งมี 16 การทดลอง แต่ละการทดลองสามารถผลิตยางแท่ง 64 ตะกง ตะกงละ 14 ตัวอย่าง รวมใช้จำนวนตัวอย่าง 64 x 14 = 896 ตัวอย่างต่อการทดลอง ประกอบไปด้วยปัจจัยควบคุม 4 ปัจจัย ซึ่งทำการศึกษาปัจจัยละ 2 ระดับ คือที่ระดับต่ำและสูง แต่ละระดับมีการทำซ้ำ 2 ซ้ำ รวมใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 16 x 896 x 2 = 28,672 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 4 และวิธีการตรวจสอบจุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์จะดูด้วยสายตา (Visual Control) โดยต้องพลิกยางแท่งเพื่อทำการตรวจเช็คจุดขาวรอบก้อนยางทุกก้อนตามเกณฑ์การตรวจสอบ และวัดค่าสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ (Y) โดยการคิดสัดส่วนระหว่างจำนวนยางแท่งที่เกิดจุดขาวต่อจำนวนยางแท่งที่ผลิตทั้งหมดในแต่ละการทดลอง

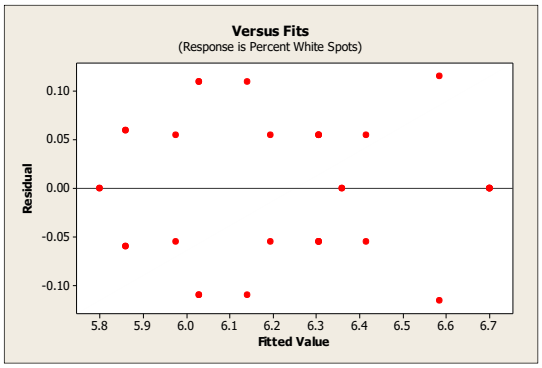
ตารางที่ 4 ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4

ปัจจัยที่ทำการศึกษา	สัญลักษณ์	ระดับ	
		ต่ำ	สูง
อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น BURNER 1 (องศาเซลเซียส)	ปัจจัย A	95	105
อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง BURNER 2 (องศาเซลเซียส)	ปัจจัย B	105	115
เวลาในการอบยางแท่ง TIME (นาที)	ปัจจัย C	180	200
ขนาดความหนาของยางผสม THICKNESS (มิลลิเมตร)	ปัจจัย D	4	6

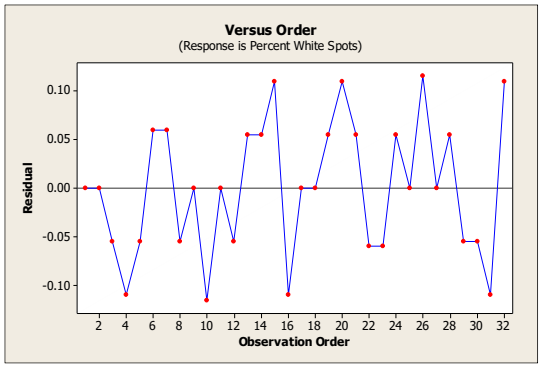
1) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อทดสอบว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และมีความเป็นอิสระต่อกันตรงตามข้อสมมติฐานเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง โดยแบ่งการทดสอบเป็นดังนี้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 9 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1.1) การตรวจสอบการกระจายแบบปกติ จากรูปที่ 9(ก) พบว่าค่า P-Value เท่ากับ 0.066 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

1.2) การตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ จากรูปที่ 9(ข) พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนและมีค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนคงที่

1.3) การตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล จากรูปที่ 9(ค) พบว่าการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระ มีการกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

2) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

1.2) กำหนดรูปแบบจำลอง ดังนี้

$$Y_{ijklm} = \mu + A_i + B_j + C_k + D_l + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (AD)_{il} + (BC)_{jk} + (BD)_{jl} + (CD)_{kl} + (ABC)_{ijk} + (ABD)_{ijl} + (ACD)_{ikl} + (BCD)_{jkl} + (ABCD)_{ijkl} + \varepsilon_{ijklm} \quad (1)$$

โดยที่ i = 1, 2; j = 1, 2; k = 1, 2; l = 1, 2; m = 1, 2

2.2) ตั้งสมมติฐานการทดสอบ

H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์

ทดสอบสมมติฐานที่ความเชื่อมั่น 95% หรือที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.2) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4

แหล่งความผันแปร	องศาเสรี	ผลบวกกำลังสอง	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง	ค่าสถิติ F	ค่า P-value
A	1	0.50250	0.502503	53.69	0.000*
B	1	0.30225	0.302253	32.29	0.000*
C	1	0.50250	0.502503	53.69	0.000*
D	1	0.44888	0.448878	47.96	0.000*
AB	1	0.22950	0.229503	24.52	0.000*
AC	1	0.05865	0.058653	6.27	0.024*
AD	1	0.12625	0.126253	13.49	0.002*
BC	1	0.00003	0.000028	0.00	0.957
BD	1	0.03990	0.039903	4.26	0.056
CD	1	0.01403	0.014028	1.50	0.239
ABC	1	0.00003	0.000028	0.00	0.957
ABD	1	0.01287	0.128778	13.76	0.002*
ACD	1	0.12625	0.126253	13.49	0.002*
BCD	1	0.01488	0.014878	1.59	0.225
ABCD	1	0.00165	0.001653	0.18	0.680
ความคลาดเคลื่อน	16	0.14975	0.009359		
ทั้งหมด	31	2.64585			

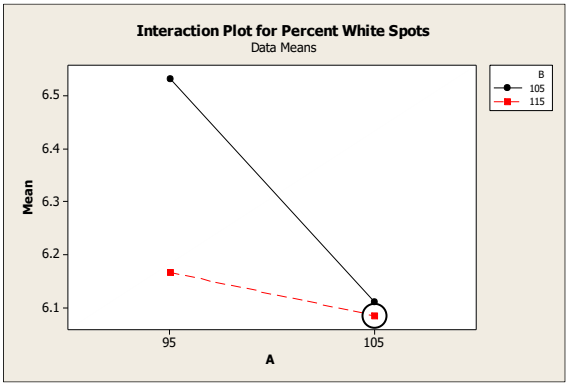
S = 0.0967439, R-Sq = 94.34%, R-Sq(adj) = 89.03%

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4 ข้างต้นดังตารางที่ 5 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แบ่งออกเป็นอิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัยและอิทธิพลหลัก โดย

อิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้นและอุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (AB) อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้นและเวลาในการอบยางแท่ง (AC) อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้นและขนาดความหนาของยางผสม (AD) ซึ่งทำให้อิทธิพลหลัก คือ อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (B) เวลาในการอบยางแท่ง (C) ขนาดความหนาของยางผสม (D) มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ โดยที่จะไม่พิจารณาอิทธิพลอันตรกิริยาตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป มีสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) เท่ากับ 94.34 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 100 แสดงให้เห็นว่า ตัวแบบจำลองการถดถอยที่ได้มานั้นสามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนอง ที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้เป็นอย่างดี (Chutima, 2002)

3) สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4 โดยพิจารณาจาก Factorial Plots (Chutima, 2002)

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4 ข้างต้น ดังตารางที่ 5 เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละระดับของปัจจัยและสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว ได้ผลดังนี้

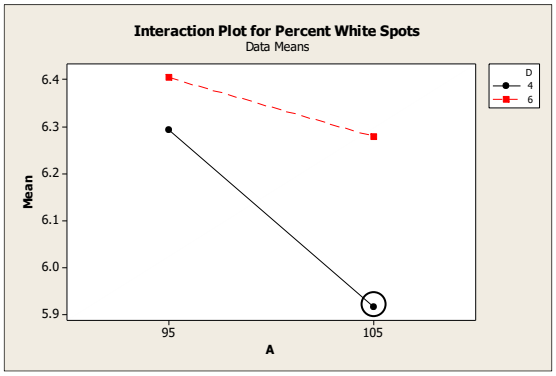


รูปที่ 10 กราฟอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) และอุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (B)

จากรูปที่ 10 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อกำหนดอุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) 105 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (B) ที่ 115 องศาเซลเซียส สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว เท่ากับ 6.10 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิทั้งสองในการอบยางแท่งให้สูงขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวลดลงตามลำดับ

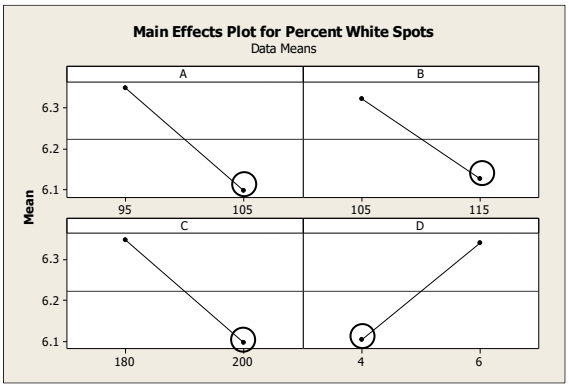
รูปที่ 11 กราฟอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) และเวลาในการอบยางแท่ง (C)

จากรูปที่ 11 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อกำหนดอุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) 105 องศาเซลเซียส และเวลาในการอบยางแท่ง (C) ที่ 200 นาที สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว เท่ากับ 6.01 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการอบยางให้สูงขึ้นและเวลาการอบยางแท่งให้นานขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวลดลง ตามลำดับ



รูปที่ 12 กราฟอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) และขนาดความหนาของยางผสม (D)

จากรูปที่ 12 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อกำหนดอุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) 105 องศาเซลเซียส และขนาดความหนาของยางผสม (D) 4 มิลลิเมตร สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว เท่ากับ 5.91 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการอบยางให้สูงขึ้นและความหนาของยางผสมที่ขนาดเล็กลงส่งผลให้สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวลดลง ตามลำดับ



รูปที่ 13 กราฟอิทธิพลหลักของปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว

จากรูปที่ 10 ถึง 13 สามารถอธิบายได้ว่ากราฟอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาควรตั้งค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว คือ อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) ที่ระดับสูง 105 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (B) ที่ระดับสูง 115 องศาเซลเซียส เวลาในการอบยางแท่ง (C) ที่ระดับสูง 200 นาที ขนาดความหนาของยางผสม (D) ที่ระดับต่ำ 4 มิลลิเมตร จะส่งผลให้สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวลดลง

4.4.2 การออกแบบการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน

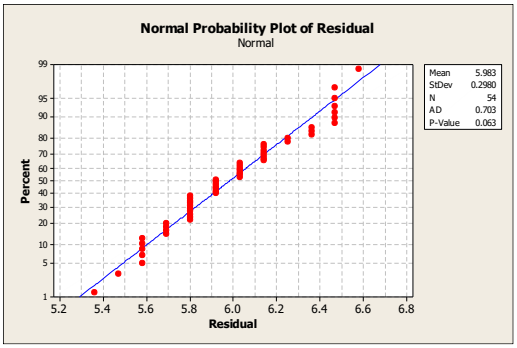
ตารางที่ 6 ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองแบบบ๊อกซ์ - เบห์นเคน

ปัจจัยที่ทำการศึกษา	สัญลักษณ์	ระดับ		
		ต่ำ	กลาง	สูง
อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น BURNER 1 (องศาเซลเซียส)	ปัจจัย A	100	105	110
อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง BURNER 2 (องศาเซลเซียส)	ปัจจัย B	110	115	120
เวลาในการอบยางแท่ง TIME (นาที)	ปัจจัย C	190	200	210
ขนาดความหนาของยางผสม THICKNESS (มิลลิเมตร)	ปัจจัย D	3	4	5

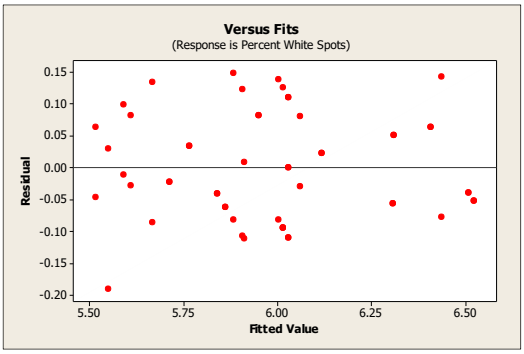
หลังจากที่ได้ทำการทดลองเบื้องต้นทำให้ได้ปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ ในขั้นตอนต่อไปทำการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมโดยใช้แผนการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งแผนการทดลองนี้ได้มีการกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 3 ระดับ และในการกำหนดระดับได้มีการปรับค่าระดับของปัจจัยต่างๆ ให้ออกนอกช่วงที่เคยทำการทดลองและผลิตจริงเล็กน้อย เพราะถ้าปรับค่าพารามิเตอร์มากเกินไป อาจทำให้สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวลดลงแต่เกิดปัญหาอื่นๆ ตามมาได้ ดังตารางที่ 6

1) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

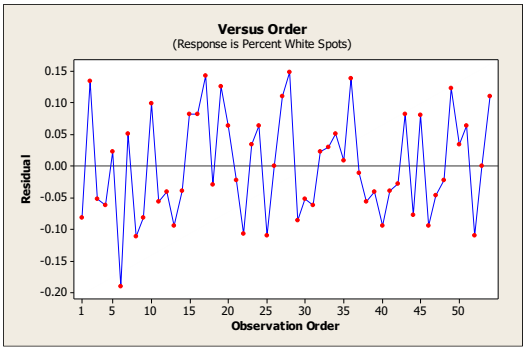
เพื่อทดสอบว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และมีความเป็นอิสระต่อกัน ตรงตามข้อสมมติฐานเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง โดยแบ่งการทดสอบเป็นดังนี้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 14 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1.1) การตรวจสอบการกระจายแบบปกติ จากรูปที่ 14(ก) พบว่าค่า P-Value เท่ากับ 0.063 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

2.1) การตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ จากรูปที่ 14(ข) พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนและมีค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนคงที่

3.1) การตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล จากรูปที่ 14(ค) พบว่าการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระ มีการกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

2) ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวผลตอบสนอง (Myers et al., 2016)

ตารางที่ 7 วิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นผิวผลตอบสนองสำหรับการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณ β_i	ค่าสถิติ T	ค่า P-Value
Constant	6.0300	153.751	0.000
A	-0.21917	-11.176	0.000*
B	0.20875	10.645	0.000*
C	-0.24125	-12.303	0.000*
D	0.13833	7.054	0.000*
AA	-0.03000	-1.020	0.314
BB	-0.01687	-0.574	0.569
CC	0.00687	0.234	0.816
DD	-0.06500	-2.210	0.033*
AB	-0.11125	-3.275	0.002*
AC	-0.03000	-0.883	0.383
AD	-0.01375	-0.405	0.688
BC	-0.03875	-1.141	0.261
BD	0.11125	3.275	0.002*
CD	0.04250	1.251	0.218

จากตารางที่ 7 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (B) เวลาในการอบยางแท่ง (C) ขนาดความหนาของยางผสม (D) พจน์กำลังสองของขนาดความหนาของยางผสม (DD) อิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัยระหว่างอุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้นและอุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (AB) และอิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัยระหว่างอุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้งและขนาดความหนาของยางผสม (BD)

จากนั้นนำปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคน มาทำการวิเคราะห์การถดถอยต่อเพื่อสร้างสมการถดถอยและพยากรณ์สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว ได้ผลดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 วิเคราะห์การถดถอยสำหรับตัวแปรอิสระ A B C D DD AB และ BD

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณ β_i	ค่าสถิติ T	ค่า P-Value
Constant	6.00867	348.728	0.000
A	-0.21917	-11.377	0.000
B	0.20875	10.836	0.000
C	-0.24125	-12.523	0.000
D	0.13833	7.181	0.000
DD	-0.05700	-2.205	0.032
AB	-0.11125	-3.334	0.002
BD	0.11125	3.334	0.002

S = 0.0943740, R-Sq = 91.29%, R-Sq(adj) = 89.97%

จากตารางที่ 8 ได้สมการถดถอยดังนี้

$$Y = 6.00867 - 0.21917A + 0.20875B - 0.24125C + 0.13833D - 0.05700DD - 0.11125AB + 0.11125BD \quad (2)$$

โดยกำหนดให้

อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) มีค่าอยู่ระหว่าง 100 - 110 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (B) มีค่าอยู่ระหว่าง 110 - 120 องศาเซลเซียส

เวลาในการอบยางแท่ง (C)

มีค่าอยู่ระหว่าง 190 – 210 นาที

ขนาดความหนาของยางผสม (D)

มีค่าอยู่ระหว่าง 3 - 5 มิลลิเมตร

ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) เท่ากับ 91.29 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่าในความผันแปรของสัดส่วนยางแท่งที่เกิดจุดขาวทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ สมการถดถอยสามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 91.29 เปอร์เซ็นต์

3) การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบ (Lack of Fit Test) มีสมมติฐาน ดังนี้ (Khuri, 2006)

H_0 : สมการเหมาะสมแล้ว

H_1 : สมการขาดความเหมาะสม

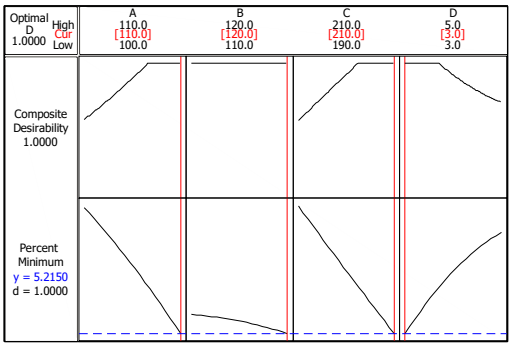
ทดสอบสมมติฐานที่ความเชื่อมั่น 95% หรือที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบความถดถอย

แหล่งความผันแปร	องศาเสรี	ผลบวกกำลังสอง	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง	ค่าสถิติ F	ค่า P-value
Regression	7	4.29610	61373.0	68.91	0.000
Residual Error	46	0.40970	0.00891		
Lack of Fit	17	0.15600	0.00918	1.05	0.441
Pure Error	29	0.25370	0.00875		
Total	53	4.70580			

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าค่า P-Value ของ Lack of Fit = 0.441 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 แสดงว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เหมาะสมแล้ว

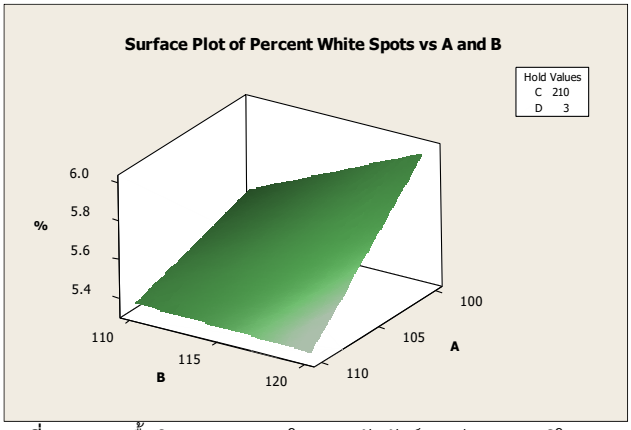
4) สรุปผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน โดยพิจารณาจากกราฟพื้นผิวผลตอบสนองและ Response Optimizer



รูปที่ 15 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจาก Response Optimizer

ตารางที่ 10 ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตยางแท่ง

ปัจจัย	ระดับ
อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A)	110 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (B)	120 องศาเซลเซียส
เวลาในการอบยางแท่ง (C)	210 นาที
ขนาดความหนาของยางผสม (D)	3 มิลลิเมตร

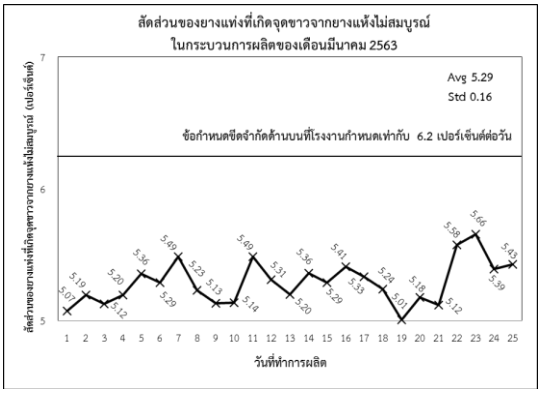


รูปที่ 16 กราฟพื้นผิวผลตอบสนองในความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (B) (เมื่อกำหนดเวลาในการอบยางแท่ง (C) ที่ 210 นาที และขนาดความหนาของยางผสม (D) 3 มิลลิเมตร)

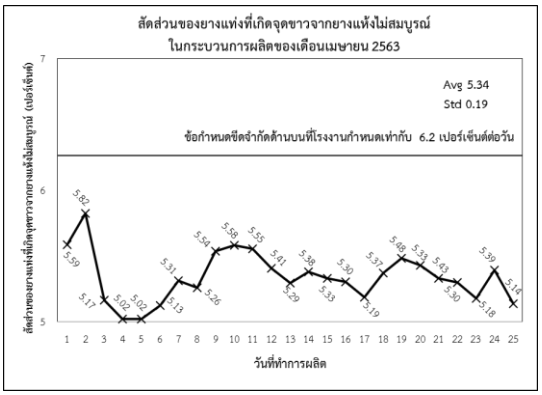
ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากกราฟพื้นผิวผลตอบสนองและ Response Optimizer แสดงดังรูปที่ 15-16 และตารางที่ 10 โดยได้ค่าที่ดีที่สุด (Y) คือ มีสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ เท่ากับ 5.215 เปอร์เซ็นต์ และวัดค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (Composite Desirability: D) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ถ้า D มี

ค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ (Khuri, 2006)

หลังจากได้ดำเนินการปรับปรุงแก้ไขตามวิธีการข้างต้นแล้ว คณะผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์หลังการปรับปรุงเพื่อใช้เปรียบเทียบกระบวนการ โดยเก็บข้อมูลระหว่างเดือนมีนาคม - เมษายน พ.ศ. 2563 รวมทั้งหมด 2 เดือน เดือนละ 25 วัน วันละ 3 กะ ใช้ข้อมูลทั้งสิ้น 75 ครั้ง โดยนำข้อมูลมาคำนวณค่าสถิติต่างๆ และวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ แสดงดังรูปที่ 17 และตารางที่ 11



(ก)



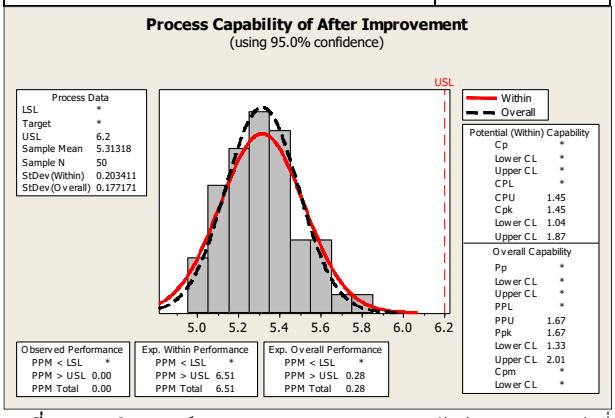
(ข)

รูปที่ 17 สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ในเดือนมีนาคม - เมษายน พ.ศ. 2563

จากรูปที่ 17 พบว่าสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2563 (ก) คิดเฉลี่ยเป็น 5.29 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.16 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ได้ลดลงกว่าเดิมคิดเป็น 17.47 เปอร์เซ็นต์ และในเดือนเมษายน พ.ศ. 2563 (ข) คิดเฉลี่ยเป็น 5.34 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.19 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ได้ลดลงกว่าเดิมคิดเป็น 16.69 เปอร์เซ็นต์ จากเดือนพฤศจิกายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562 หลังจากการปรับปรุงกระบวนการผลิตยางแท่ง สามารถสรุปได้ว่าการปรับปรุงในกระบวนการนี้สามารถลดปัญหาได้จริง และตรงตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

ตารางที่ 11 ค่าสถิติต่างๆ จากผลการทดลองหลังการปรับปรุงสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ ในช่วงระหว่างเดือนมีนาคม – เมษายน พ.ศ. 2563

ค่าทางสถิติ (เปอร์เซ็นต์ต่อวัน)	หลังการปรับปรุง
สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย	5.31
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.18
ขอบเขตบนสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ยที่ช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	5.36



รูปที่ 18 การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการของสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวหลังการปรับปรุง

จากรูปที่ 18 พบว่าผลการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการที่ได้จากข้อมูลกระบวนการผลิตหลังการปรับปรุง มีข้อกำหนดขีดจำกัดด้านบน (USL) เพียงด้านเดียว คือ สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว โดยค่าที่โรงงานกำหนดคือ 6.2 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน มีค่า C_{pk} เท่ากับ 1.45 แสดงว่ากระบวนการอยู่ในเกณฑ์ดี โดยช่วงความเชื่อมั่นของกระบวนการเท่ากับ $1.04 < C_{pk} < 1.87$

ตารางที่ 12 ต้นทุนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวซึ่งต้องนำมาผลิตซ้ำ

รายการ	บาท/กิโลกรัม
ต้นทุนคงที่	
- ค่าที่ดิน อาคารโรงงาน อุปกรณ์ เครื่องชั่ง รถยก ยาง	18.0
- ค่าใช้จ่ายในการบริหาร	09.0
- ค่าดอกเบี้ยเงินทุนหมุนเวียน	58.0

ตารางที่ 12 (ต่อ)

รายการ	บาท/ กิโลกรัม
ต้นทุนผันแปร	
- ค่าแรงงาน	72.0
- ค่าซ่อมบำรุงเครื่องจักร	07.0
- ค่าไฟฟ้า	50.0
- ก๊าซแอลพีจี	17.0
- น้ำบาดาล	03.0
- ค่าวัสดุสิ้นเปลือง	04.0
รวม	38.2

ที่มา : ข้อมูลจากฝ่ายบัญชีของโรงงานกรณีศึกษา

จากตารางที่ 12 การศึกษาต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ของยางแท่งที่เกิดจุดขาวซึ่งต้องนำมาผลิตซ้ำ เท่ากับ 2.38 บาท/กิโลกรัม (Sriwarin et al., 2014) โดยหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย 5.31 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ได้ลดลงจากเดิมคิดเป็น 17.16 เปอร์เซ็นต์ หรือลดลงเท่ากับ 388,500 กิโลกรัมต่อปี ดังนั้น สามารถคาดการณ์ได้ว่าต้นทุนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวซึ่งต้องนำมาผลิตซ้ำจะลดลงได้ 924,630 บาทต่อปี

4.5 การควบคุมกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการควบคุมกระบวนการเพื่อรักษาสภาพหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยมีการปรับปรุงคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Instructions) ที่ได้จากผลการทดลองที่เหมาะสมจากการปรับปรุงมาแล้วนั้น เพื่อเก็บไว้เป็นมาตรฐานในการทำงานและใช้อบรม (Training) ให้คนรุ่นหลังต่อไป (Leenatham et al., 2019) จากนั้นคณะผู้วิจัยทำการยืนยันผลการปรับปรุงกระบวนการผลิตยางแท่ง เพื่อเป็นผลสรุปว่ากระบวนการผลิตที่ได้รับการปรับปรุงแล้วนั้นสามารถใช้ได้ในระยะยาว โดยได้ทำการทดลองเก็บข้อมูลสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว ทั้งหมด 2 เดือน เดือนละ 25 วัน ในระหว่างเดือนพฤษภาคม – มิถุนายน พ.ศ. 2563 โดยแบ่งเป็นครั้งที่ 1 (25 วันในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2563) และครั้งที่ 2 (25 วันในมิถุนายน พ.ศ. 2563) ใช้ข้อมูลทั้งสิ้น 50 ครั้ง

4.5.1 การคำนวณค่าสถิติต่างๆ

จากผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลได้ค่าสถิติต่างๆ ได้แก่ สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และขอบเขตบนสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ยที่ช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าสถิติต่างๆ จากผลการทดลองยืนยันผลข้อมูลสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ในช่วงระหว่างเดือนพฤษภาคม – มิถุนายน พ.ศ. 2563

ค่าทางสถิติ (เปอร์เซ็นต์ต่อวัน)	ยืนยันผล
สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย	5.30
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.17
ขอบเขตบนสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ยที่ช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	5.34

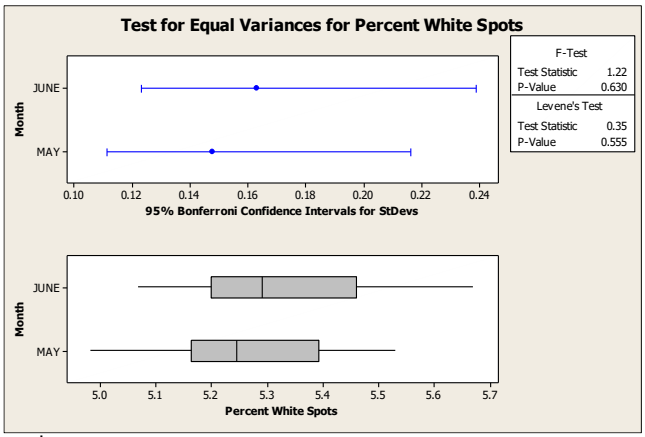
4.5.2 การทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างสองชุดที่เป็นอิสระต่อกัน

1) การทดสอบความแปรปรวน ในการทดลองเพื่อตรวจสอบสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ จากการเก็บข้อมูล 2 ครั้ง ว่าค่าความแปรปรวนของทั้งสองครั้งนี้มีค่าเท่ากันหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งมีสมมติฐาน ดังนี้

โดยทดสอบว่า $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$

$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$

จะได้ผลการทดสอบความแปรปรวน ดังนี้



รูปที่ 19 กราฟแสดงผลการทดสอบความแปรปรวนของการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากรูปที่ 19 สามารถสรุปได้ว่าค่า P-Value เท่ากับ 0.630 มากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก แสดงว่าไม่มีหลักฐานแน่ชัดที่จะบ่งชี้ว่าค่าความแปรปรวนของสัดส่วนยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ ทั้งสองครั้งนี้ไม่เท่ากัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2) การทดสอบค่าเฉลี่ย ในการทดลองเพื่อตรวจสอบสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ จากการเก็บข้อมูล 2 ครั้ง ว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองครั้งนี้มีค่าเท่ากันหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งมีสมมติฐาน ดังนี้

โดยทดสอบว่า

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$
$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

จะได้ผลการทดสอบค่าเฉลี่ย ดังนี้

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

แหล่งที่มา	ค่า T-Value	องศาเสรี (d.f.)	ค่า P-Value
สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์	1.25	48	218.0

จากตารางที่ 14 สามารถสรุปได้ว่าค่า P-Value เท่ากับ 0.218 มากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ ทั้งสองครั้งนี้ไม่ต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

5. สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตยางแท่ง STR 20 ภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ ผลการวิจัยพบว่า ก่อนปรับปรุงกระบวนการผลิต สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย 6.41 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ซึ่งสูงกว่าข้อกำหนดขีดจำกัดด้านบนที่โรงงานกำหนด คือ 6.2 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน โดยจากการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพสาเหตุและผล และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในกระบวนการผลิต พบว่า มีสาเหตุหลักมาจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางแท่งไม่เหมาะสม ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้แนวคิดระบบการผลิตแบบลีนซิกซ์ซิกม่าเพื่อปรับปรุงงาน และใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^K เพื่อกรองปัจจัยในเบื้องต้นและการออกแบบการทดลองแบบบ๊อกซ์-เบห์นเคนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต จากผลการทดลองพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตยางแท่ง คือ อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น 110 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง 120 องศาเซลเซียส เวลาในการอบยางแท่ง 210 นาที ขนาดความหนาของยางผสม 3 มิลลิเมตร หลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย 5.31 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ได้ลดลงจากเดิมคิดเป็น 17.16 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสมรรถภาพกระบวนการหลังการปรับปรุง C_{pk} เท่ากับ 1.45 แสดงว่ากระบวนการอยู่ในเกณฑ์ดี โดยช่วงความเชื่อมั่นของกระบวนการเท่ากับ $1.04 < C_{pk} < 1.87$ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และสามารถคาดการณ์ได้ว่าต้นทุนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวซึ่งต้องนำมาผลิตซ้ำจะลดลงได้ 924,630 บาทต่อปี

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมเพื่อค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตยางแท่ง พบว่า ทุกปัจจัยที่ทำการทดลองมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ และสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองต่อได้ว่าสภาวะเหมาะสมในกระบวนการผลิตที่ส่งผลให้สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวลดลง มีระดับของปัจจัยอุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (B) และเวลาในการอบยางแท่ง (C) ที่ระดับสูง ซึ่งแปรผกผันกับระดับของปัจจัยขนาดความหนาของยางผสม (D) ที่ระดับต่ำ โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.2.1 อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) พบว่าเมื่อปรับอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียสจะส่งผลให้เกิดสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวสูงกว่าที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เนื่องจากยางก่อนอบจะมีความชื้นค่อนข้างสูงโดยเฉลี่ย 20 เปอร์เซ็นต์ (Sae-ui & Sirisingha, 2007) ดังนั้นในการผลิตยางแท่งควรที่จะไล่ความชื้นออกจากเม็ดยางให้ได้มากที่สุดซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิช่วงแรกของการอบยางที่พอเหมาะ และใน

การปรับค่าอุณหภูมิช่วงแรกไม่ควรที่จะสูงจนเกินไปเพราะอาจส่งผลกระทบอื่นๆได้

5.2.2 อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (B) พบว่าเมื่อปรับอุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียสจะส่งผลให้เกิดสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวสูงกว่าที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิการอบยางในช่วงที่สองจะสูงที่สุด เพื่อให้ยางได้รับความร้อนและแห้งอย่างทั่วถึงทั้งบนผิวและภายในเม็ดยาง และในการปรับค่าอุณหภูมิช่วงที่สองไม่ควรที่จะสูงจนเกินไป เพราะอาจส่งผลกระทบอื่นๆได้

5.2.3 เวลาในการอบยางแท่ง (C) พบว่าเมื่อปรับเวลาในการอบยางที่ 180 นาทีจะส่งผลให้เกิดสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวสูงกว่าที่เวลาในการอบยาง 210 นาที เนื่องจากการให้เวลาที่นานกว่าในการอบยางทำให้การถ่ายเทความร้อนกระจายได้ทั่วเม็ดยาง ส่งผลให้เนื้อยางทุกส่วนได้รับความร้อนทั่วถึงกัน โดยยางจะแห้งโดยสมบูรณ์ และในการปรับเวลาในการอบยางไม่ควรที่จะนานจนเกินไปเพราะอาจส่งผลกระทบอื่นๆได้

5.2.4 ขนาดความหนาของยางผสม (D) พบว่าเมื่อขนาดความหนาของยางผสมที่ 6 มิลลิเมตรจะส่งผลให้เกิดสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวสูงกว่าที่ขนาดความหนาของยางผสม 3 มิลลิเมตร เนื่องจากเม็ดยางที่มีขนาดใหญ่เกินไปยางจะอบไม่สุกทำให้เกิดจุดขาวในยางได้ และถ้ามีขนาดเม็ดเล็กจนเกินไป หากอบยางที่อุณหภูมิสูงจะทำให้สมบัติทางกายภาพของยางแท่งลดลงได้ ดังนั้นขนาดเม็ดยางที่มีขนาดพอเหมาะกับความร้อนในเตาอบจะสามารถผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดยางได้สะดวกกว่าส่งผลให้การอบยางแห้งโดยสมบูรณ์

6. ข้อเสนอแนะการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตยางแท่ง STR 20 ด้วยการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการต่อการลดสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว อย่างไรก็ตามเพื่อให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นควรต้องต่อยอดการปรับปรุง ในเรื่องการตรวจสอบจุดขาวในยางแท่งโดยทั่วไปจะใช้พนักงานฝ่ายควบคุมคุณภาพตัดสินใจแยกเกรดยางต่างๆ ว่ายอมรับหรือไม่ยอมรับด้วยสายตา (Visual Control) ซึ่งคณะผู้วิจัยเสนอแนะว่าควรสร้างเครื่องตรวจจับข้อบกพร่องอัตโนมัติด้วยการแยกคุณสมบัติของสียาง จะช่วยให้ได้ข้อมูลเกรดยางที่มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น อีกทั้งลดความผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์ได้อีกด้วย แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาในด้านความคุ้มทุนด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ โรงงานกรณีศึกษา ที่ได้ให้โอกาสคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตยางแท่ง ช่วยเหลืออนุเคราะห์ข้อมูลในการทำวิจัยฉบับนี้ และเอื้อเฟื้อสถานที่เพื่อการวิจัยด้วยดีเสมอมา

8. เอกสารอ้างอิง

Breyfogle III, F.W. (2003). *Implementing six sigma: smarter solutions using statistical methods* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Chutima, P. (2002). *Engineering experimental design.* Chulalongkorn University Press.

Coelhoa, T., Braga, F., Silva, N., Dantas, C., Lopes, C., Sousa, S. & Vieira, E. (2019). Optimization of the protein extraction method of goat meat using factorial design and response surface methodology. *Journal of Food Chemistry, 281*, 63-70. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.055

Hassan, M. (2013). Applying lean six sigma for waste reduction in a manufacturing environment. *American Journal of Industrial Engineering, 1*(2), 28-35. https://doi.org/10.12691/ajie-1-2-4

Homkhiew, C., Boomchouytan, W., & Rawangwong, S. (2017). Optimal manufacturing parameters of rubberwood flour/ high density polyethylene composites using box-behnken design. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 27*(2), 315-328. https://doi.org/10.14416/j.kmutnb.2017.03.009

Kaewploy, S. & Boonseng, K. (2014). Design of experiment for evaluating the optimal condition in drying process of rubberwood. *Khon Kaen University Research Journal, 19*(2), 284-292.

Ketsarapong, P. & Sriyanalugsana, S. (2019). Reducing defective in food refrigerator production process with six sigma technique. *Kasem Bundit Engineering Journal, 9*(2), 25-37.

Khuri, A. (2006). *Response surface methodology and related topics.* World Scientific Publishing.

Leenatham A. & Khemavuk P. (2019). Process improvement of PTCA guide wire by using design of experiment. *SWU Engineering Journal, 14*(2), 12-24.

Leenatham N., Sudsomboon W., Kaewdee C. & Krainara A. (2019). Reducing of the wasting time in the dirt testing process of rubber by lean six sigma approach: a case study in a rubber factory. *Wichcha Journal, 38*(2), 104-119.

Montgomery, D.C. (2019). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). John Wiley & Sons.

Montgomery, D.C. (2019). *Introduction to statistical quality control.* (8th ed.). John Wiley & Sons.

Myers, R. H., Montgomery, D. C. & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments* (4th ed.). John Wiley & Sons.

Puangthong, J. & Daengkanit, A. (2020). Rubber situation in year 2019 and trends year 2020. *Para Rubber Journal, 41*(2), 36-39.

Pyzdek, T., & Kller, P. (2019). *The six sigma handbook* (5th ed.). Mcgraw Hill.

Ramasamy, S. 2009). *Total quality management.* Tata Mcgraw Hill.

Sae-ui, P., & Sirisingha, C. (2007). *Rubber production: process and testing.* SE-ED Publishing.

Satsue, P., & Phitthayaphinant, P. (2019). Para-rubber industry under ASEAN economic community: manifestation of para-rubber plantation area in the large city of two sea. *King Mongkut's Agricultural Journal, 37*(4), 675-685.

Sliva, T., & Ferreira, P. (2017). Improve the extrusion process in tire production using six sigma methodology. *Procedia manufacturing, 13*, 1104-1111. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.171

Srerungruang, N., Neramittagapong, A., Sriprom, P., Kumsaen, T., Sangnak, S., & Neramittagapong, S. (2017). Optimization of back-washing condition for centrifugal extractor to minimize cassava starch loss. *Khon Kaen University Research Journal, 17*(2), 61-70.

Sriwarin, P., Petchernnoen, T., Ananta, M., & Kunilaasiri, A. (2014). The cost of processing primary rubber at the factory level. *Para Rubber Journal, 18*(3), 20-29.

Sudasna-na-Ayudthya, P., & Luangpaiboon, P. (2008). *Design and analysis of experiment.* TOP Publishing.