



JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

THONBURI UNIVERSITY

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธนบุรี

Vol 8 No 2 July - December 2024
ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2567



ISSN 2730-3837 (Online)



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี

ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม- ธันวาคม 2567



กำหนดการพิมพ์เผยแพร่

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี กำหนดพิมพ์เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ

1. ฉบับที่ 1 มกราคม- มิถุนายน
2. ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม

พิมพ์ที่ : มหาวิทยาลัยธนบุรี

วัตถุประสงค์ของการจัดพิมพ์วารสาร

1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ ในด้านวิศวกรรมศาสตร์ ได้แก่ วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมการผลิต วิศวกรรมวัสดุ วิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม รวมทั้งสาขาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง และในด้านวิทยาศาสตร์ ได้แก่ สาขาวิชา คณิตศาสตร์ สถิติ ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา วิทยาศาสตร์การอาหาร วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาการสารสนเทศ หรือวิทยาศาสตร์ประยุกต์ และสาขาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ความคิดเห็น วิทยาการและเทคนิคใหม่ๆ อันนำไปสู่การพัฒนาทักษะและศักยภาพในการสร้างผลงานทางวิชาการ การค้นคว้า ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อส่งเสริมความร่วมมือและการนำเสนอบทความทางด้านการวิจัย และการบริการสังคม

เจ้าของ : มหาวิทยาลัยธนบุรี

ผู้ดำเนินการ : ดร.บัญชา เกิดมณี อธิการบดี มหาวิทยาลัยธนบุรี

บรรณาธิการวารสาร : ดร.ฐิติพร กรัยวิเชียร ผู้อำนวยการสำนักวิจัย มหาวิทยาลัยธนบุรี

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร. ปรัชญนันท์ นิลสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมชาติ มานพ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรัญ แสงราช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ศิริลักษณ์ สุวรรณวงศ์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ สุรัชย์ ธรรมทวีกุล	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนิต แต่งศรี	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยอดนภา เกตุเมือง	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

ฝ่ายจัดการ และเลขานุการ

อาจารย์ฐานพิณี จิวศิริรุ่งค์	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ ผศ.จิระศักดิ์ ส่งบุญแก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ ผศ.สมจินต์ อักษรธรรม	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์วสันต์ ลีละธนาฤกษ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์สิทธิศักดิ์ ทองสุข	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์นันทวัน นาคอร่าม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์อรรหาวี เจ๊ะสะแม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์เอนก นามจันทร์	ศูนย์คอมพิวเตอร์และสารสนเทศ
อาจารย์สุดาร์ตน์ คงคาชาติ	สำนักวิชาศึกษาทั่วไป
อาจารย์วราภรณ์ สุ่มมาตย์	สำนักวิชาศึกษาทั่วไป

คณะกรรมการกลั่นกรอง (Peer Review)

รศ.ดร.ไพฑูรย์ ศิริโอฬาร	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
รศ.ดร.มานิตย์ อิมาทา	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผศ.ดร.ศราวุธ สุวรรณอรรถ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผศ.ดร. วงศ์วิศรุต เชื่องสตุ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เรวดี ศักดิ์ดุษฎยธรรม	มหาวิทยาลัยราชพฤกษ์
ผศ.ดร.พรรษา เอกพรประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. ประสพโชค ให้อองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.พิสิทธิ วิสุทธินเมธีกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.เมธา อึ้งทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สถิตย์พงษ์ มั่นหล้า	วิทยาลัยดุสิตธานี
ผศ.ดร.พรหมพักตร์ บุญรักษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.กัม พรประเสริฐ	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
รศ.ดร.ปัญญา สำราญพันธ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
ผศ.ดร.นภดล เชนะโยธิน	มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
ผศ. ดร.น่านน้ำ บัวคล้าย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.กมลพงศ์ แจ่มกมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร. พิษานันท์ วงศ์ศิริธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.จิระศักดิ์ ส่งบุญแก้ว	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผศ.สมจินต์ อักษรธรรม	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผศ. ยอดนภา เกตุเมือง	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
ดร.ตันติกร พิษณุพิบูล	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
ดร. อัครนันท์ พงศธรวิวัฒน์	สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
ดร.งามเฉิด ด้านพัฒนามงคล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร. ยุทธนา คงจีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.โสธมา เครือเมฆ	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ดร. วสพร นิชรรัตน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร. พรหมพักตร์ บุญรักษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ. กิตติพงษ์ พุ่มโกชนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.วรวิทย์ กังหัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร. กัลยารัตน์ เชี่ยวชาญ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ. บัญชา หิริยสิงห์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ดร. จิรวดี อินทกาญจน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ดร.อุทุมพร อยู่สุข	มหาวิทยาลัยศรีปทุม

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ฉบับนี้ จัดพิมพ์ขึ้นเป็นปีที่ 8 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม 2567) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทุกบทความเน้นเนื้อหาที่น่าสนใจ และเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเนื้อหาของบทความทั้งรูปแบบบทความวิชาการและบทความวิจัยที่ผ่านการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา โดยแต่ละบทความผ่านการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน เพื่อพัฒนาคุณภาพวารสารและเป็นประโยชน์สูงสุด

ในนามของกองบรรณาธิการของวารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ขอถือโอกาสเชิญชวนคณาจารย์ นักวิชาการและผู้สนใจเสนอบทความเข้ารับการตีพิมพ์เผยแพร่ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านทุกท่าน และขอขอบคุณที่ท่านผู้อ่านได้ให้ความสนใจวารสารฯ มาโดยตลอด

ดร.ฐิติพร กรัยวิเชียร

บรรณาธิการวารสาร

สารบัญ

ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2567

บทความวิจัย

- 1-11 วิद्यตเชิงเส้นและสังวัตนาการเชิงการจัด
DISCRETE LINEAR AND COMBINATORIAL CONVOLUTIONS
กัจกร มุณีแก้ว ชิธมาวัชร บัญมา
- 12-17 ON THE DIOPHANTINE EQUATION $9^x + 9^y + n^z = w^2$
Apirat Siraworakun Suton Tadee
- 18-28 การลดเวลาในกระบวนการเปลี่ยนรุ่นการผลิตชิ้นงานโมเดล A กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์
REDUCING SETUP TIME IN THE PRODUCTION CHANGEOVER PROCESS FOR MODEL A: A CASE STUDY IN AN AUTOMOTIVE PARTS MANUFACTURING PLANT
จุฑาทิพย์ ลีลาธนาพิพัฒน์ ศิลา วงศ์สุนทรพจน์ อภิชาติ ชัยชลิต
- 29-38 การใช้พลังงานไฟฟ้าแบบผสมของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 สำหรับการแข่งขัน BWSC-2023 รุ่น CRUISER CLASS
HYBRID ELECTRIC POWER USAGE OF THE STC-4 SOLAR ELECTRIC VEHICLE FOR THE BWSC-2023 CRUISER CLASS COMPETITION
กัจจาด ใจตรง ปิยะนัฐ ใจตรง
- 39-46 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการสึกหรอของผิวเคลือบด้วยวิธีการพ่นเคลือบแบบ HVOF บนใบมีดเกี่ยวข้าว
INVESTIGATION OF FACTORS AFFECTING FRICTION COEFFICIENT AND WEAR CHARACTERISTICS OF HVOF-SPRAYED COATINGS ON RICE HARVESTER BLADES รณฤทธิ์ ชิงภูเขียว วรวิทย์ ปัญญาคำ ดุสิต สิงห์พรหมมาศ นุชริน ทองพูล วรณวดี สุขแจ่ม
สุพจน์ สระทองหลาง
- 47-59 เครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี
BACTERIA STERILIZER WITH UV-C
กิตติภณ ฉัตรเงิน ธนบัตร ภักดีแก้ว ธนากร แวงวรรณ รจนา ทองสม บัญชา ศรีวิโรจน์ ปณต ศรีภักดิ์
- 60-71 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการกะเทาะเปลือกกุ้ง
ANALYSIS OF OPTIMAL PARAMETER IN DRY SHRIMP PEELING PROCESS
เอกพล ทับพร อภิชาติ ไชยพร จิรศักดิ์ ส่งบุญแก้ว

Received: Aug 27, 2024

Revised: Dec 24, 2024

Accepted: Jul 25, 2024

วิฤตเชิงเส้นและสังวัตนาการเชิงการจัด

DISCRETE LINEAR AND COMBINATORIAL CONVOLUTIONS

กำจร มุณีแก้ว¹ ซิธิมาวอร์ บุญมา^{2*}

¹สาขาวิชาวัดผลการศึกษาและการสอนคณิตศาสตร์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

²สำนักศึกษาทั่วไป มหาวิทยาลัยธนบุรี

Kumjorn Muneekaew¹ Zithimawor Bunma²

¹Program in Educational Measurement and Teaching Mathematics, Department of Education,
Bansomdejchaopraya Rajabhat University

²General Education Affair, Thonburi University

E-mail: ¹munee.j@hotmail.com, ²zithimawor@thonburi-u.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอวิฤตเชิงเส้นและสังวัตนาการเชิงการจัด โดยมีจุดประสงค์เพื่ออธิบายผลบวกของอนุกรมเลขคณิต-เรขาคณิตที่วางนัยทั่วไป ที่สอดคล้องตามความสัมพันธ์เวียนเกิดเชิงเส้นและสังวัตนาการเชิงการจัด สรุปได้ดังนี้
ผลบวกของอนุกรมเลขคณิต-เรขาคณิตที่วางนัยทั่วไป กำหนดโดยสูตร

$$S_n(z) = \sum_{j=1}^n j^n z^j, \quad z \in \mathbb{C}, \quad |z| < 1, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{และ} \quad S_0(z) = \frac{z}{1-z}$$

ซึ่งสอดคล้องตามความสัมพันธ์เวียนเกิดและสังวัตนาการเชิงการจัด ดังนี้

$$S_{n+1}(z) = S_n(z) + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} S_k(z) S_{n-k}(z), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{และ} \quad k = 0, 1, 2, \dots, n$$

และ

$$S_n(z) = \frac{z}{1-z} \left[1 + \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n}{k} S_k(z) \right], \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{และ} \quad k = 0, 1, 2, \dots, n$$

คำสำคัญ: วิฤตเชิงเส้น, สังวัตนาการเชิงการจัด, ความสัมพันธ์เวียนเกิดเชิงเส้น

Abstract

This article presents the discrete linear and combinatorial convolutions with the purpose of explaining the sum of generalized arithmetic-geometric series that corresponds to the linear recurrence relation and combinatorial convolutions can be summarized as follows

The sum of generalized arithmetic-geometric series is given by the formula:

$$S_n(z) = \sum_{j=1}^n j^n z^j, \quad z \in \mathbb{C}, \quad |z| < 1, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{and} \quad S_0(z) = \frac{z}{1-z}$$

which corresponds to the recurrence relation and combinatorial convolutions as follows

$$S_{n+1}(z) = S_n(z) + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} S_k(z) S_{n-k}(z), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{และ} \quad k = 0, 1, 2, \dots, n$$

and
$$S_n(z) = \frac{z}{1-z} \left[1 + \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n}{k} S_k(z) \right], \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{และ } k = 0, 1, 2, \dots, n$$

Keywords : Discrete linear, Combinatorial convolutions, Linear recurrence relation

บทนำ

ผลคูณโคชีเป็นหนึ่งในคณิตศาสตร์เชิงวิเคราะห์ที่มีความสำคัญกับเรื่อง อนุกรมอนันต์สองอนุกรม โดยตั้งชื่อตาม นักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Augustin-Louis Cauchy ซึ่งได้ถูกนำไปใช้แพร่หลายในด้านแคลคูลัส และรวมทั้งในด้าน วิทยาศาสตร์ (ก่าจร มณีแก้ว, 2563) ฉะนั้นจึงควรต้องทำความรู้จักแนวคิดและทฤษฎีบท ให้เป็นที่เข้าใจกันเสียก่อนดังนี้

ผลคูณโคชี (Cauchy Products)

กำหนดให้ $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ และ $\sum_{n=0}^{\infty} b_n$ เป็นอนุกรมอนันต์ แล้วผลคูณโคชี $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ ของอนุกรมอนันต์ทั้งสองนี้ ถูก

กำหนด

โดยสังวัตนาการวียด ดังนี้

$$\left(\sum_{n=0}^{\infty} a_n \right) \otimes \left(\sum_{n=0}^{\infty} b_n \right) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \quad \text{โดยที่ } c_n = \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} \quad \text{สำหรับทุก } n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$$

ทฤษฎีบทของเมอร์เทนส์ (Mertens' Theorem) (Wikipedia, 2024)

ให้ $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ หรือ $\sum_{n=0}^{\infty} b_n$ เป็นอนุกรมลู่เข้า โดยลู่เข้าสู่ A และ B ตามลำดับ

และ $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ ลู่เข้าสัมบูรณ์ แล้วผลคูณโคชี $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ ลู่เข้าสู่ AB

ผลบวกของอนุกรมเลขคณิต-เรขาคณิต

ผลบวกของอนุกรมเลขคณิต-เรขาคณิตที่วางนัยทั่วไป (Cirnu MI., 2011) ยังมีประเด็นที่ให้ศึกษาดังนี้

$$S_n(z) = \sum_{j=1}^n j^n z^j, \quad z \in C \quad \text{เมื่อ } C \text{ เป็นจำนวนเชิงซ้อน}, \quad |z| < 1, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{และ } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad \dots(1)$$

นอกจากนี้ยังเป็นฟังก์ชันก่อกำเนิดของลำดับเชิงตัวเลข $(j^n, j = 1, 2, 3, \dots)$ สำหรับ $n = 0$

จาก (1) จึงลดรูปไปสู่ผลบวกของการก้าวหน้าเรขาคณิต

$$S_0(z) = \sum_{j=1}^{\infty} z^j = \frac{z}{1-z} \quad \dots(2)$$

1. ความสัมพันธ์เวียนเกิดกับสังวัตนาการเชิงการจัด

ทฤษฎีบท 1 สำหรับ $z \in C$, $|z| < 1$ ผลบวก $S_n(z)$ ที่สอดคล้องตามความสัมพันธ์เวียนเกิดกับสังวัตนาการเชิงการจัด กำหนดโดย

$$S_{n+1}(z) = S_n(z) + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} S_k(z) S_{n-k}(z), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{และ } k = 0, 1, 2, \dots, n \quad \dots(3)$$

พิสูจน์ ดำเนินการเปลี่ยนดัชนี $q = j - i$ และใช้ทฤษฎีบททวินามของนิวตัน (Whitman College, 2024)

$$\begin{aligned}
 S_{n+1}(z) &= \sum_{j=1}^{\infty} j^{n+1} z^j \\
 &= 1^n \cdot z^1 + 2 \cdot 2^n \cdot z^2 + 3 \cdot 3^n \cdot z^3 + 4 \cdot 4^n \cdot z^4 + \dots \\
 &= (1^n z^1 + 2^n z^2 + 3^n z^3 + 4^n z^4 + \dots) + (2^n z^2 + 3^n z^3 + 4^n z^4 + \dots) \\
 &\quad + (3^n z^3 + 4^n z^4 + 5^n z^5 + \dots) + (4^n z^4 + 5^n z^5 + 6^n z^6 + \dots) + \dots \\
 &= \sum_{j=1}^{\infty} j^n z^j + \sum_{i=1}^{\infty} (i+1)^n z^{i+1} + \sum_{i=1}^{\infty} (i+2)^n z^{i+2} + \sum_{i=1}^{\infty} (i+3)^n z^{i+3} + \dots \\
 &= \sum_{j=1}^{\infty} j^n z^j + \sum_{i=1}^{\infty} [(i+1)^n z^{i+1} + (i+2)^n z^{i+2} + (i+3)^n z^{i+3} + \dots] \\
 &= \sum_{j=1}^{\infty} j^n z^j + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=i+1}^{\infty} j^n z^j \\
 &= S_n(z) + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} (i+q)^n z^{i+q} ; q = j - i \\
 &= S_n(z) + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} i^k q^{n-k} z^i z^q \\
 &= S_n(z) + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \sum_{i=1}^{\infty} i^k z^i \sum_{q=1}^{\infty} q^{n-k} z^q
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$S_{n+1}(z) = S_n(z) + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} S_k(z) S_{n-k}(z)$$

ตัวอย่าง โดยการใช้สูตร (2) และ (3) สำหรับ $z \in \mathbb{C}$ โดยที่ $|z| < 1$ ที่ได้มา

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } n=0; \quad S_1(z) &= S_0(z) + \sum_{k=0}^0 \binom{0}{k} S_k(z) S_{0-k}(z) \\
 &= S_0(z) + \binom{0}{0} S_0(z) S_0(z) \\
 &= S_0(z) + S_0^2(z) \\
 &= \frac{z}{1-z} + \left(\frac{z}{1-z} \right)^2 \\
 &= \frac{z(1-z) + z^2}{(1-z)^2}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$S_1(z) = \frac{z}{(1-z)^2}$$

เมื่อ $n=1$; $S_2(z) = S_1(z) + \sum_{k=0}^1 \binom{1}{k} S_k(z) S_{1-k}(z)$

$$\begin{aligned}
 &= S_1(z) + \binom{1}{0} S_0(z) S_1(z) + \binom{1}{1} S_1(z) S_0(z) \\
 &= S_1(z) + S_0(z) S_1(z) + S_1(z) S_0(z) \\
 &= S_1(z) + 2S_0(z) S_1(z) \\
 &= \frac{z}{(1-z)^2} + 2 \left(\frac{z}{1-z} \right) \left[\frac{z}{(1-z)^2} \right] \\
 &= \frac{z(1-z) + 2z^2}{(1-z)^3}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น $S_2(z) = \frac{z^2 + z}{(1-z)^3}$

เมื่อ $n=2$; $S_3(z) = S_2(z) + \sum_{k=0}^2 \binom{2}{k} S_k(z) S_{2-k}(z)$

$$\begin{aligned}
 &= S_2(z) + \binom{2}{0} S_0(z) S_2(z) + \binom{2}{1} S_1(z) S_1(z) + \binom{2}{2} S_2(z) S_0(z) \\
 &= S_2(z) + S_0(z) S_2(z) + 2S_1(z) S_1(z) + S_2(z) S_0(z) \\
 &= S_2(z) + 2S_0(z) S_2(z) + 2S_1^2(z) \\
 &= \frac{z^2 + z}{(1-z)^3} + 2 \left(\frac{z}{1-z} \right) \left[\frac{z^2 + z}{(1-z)^3} \right] + \frac{2z^2}{(1-z)^4} \\
 &= \frac{z(1-z^2) + 2z(z^2 + z) + 2z^2}{(1-z)^4}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น $S_3(z) = \frac{z^3 + 4z^2 + z}{(1-z)^4}$

บทแทรก สำหรับ $z \in C, |z| < 1$

จำนวน $x_n(z) = \frac{1}{n!} S_n(z), n=1, 2, 3, \dots$... (4)

ซึ่งสอดคล้องตามความสัมพันธ์เวียนเกิดด้วยสังวัตนาการเชิงการจัด ดังนี้

$$(n+1)x_{n+1}(z) = x_n(z) + \sum_{k=0}^n x_k(z)x_{n-k}(z), n=0, 1, 2, \dots$$
 ... (5)

และมีเงื่อนไขเริ่มต้นคือ $x_0(z) = \frac{z}{1-z}$... (6)

พิสูจน์ โดยกำหนด (4) แทนที่ใน (3)

$$\begin{aligned} \text{จาก } S_{n+1}(z) &= S_n(z) + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} S_k(z) S_{n-k}(z) \\ &= S_n(z) + n! \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} S_k(z) \cdot \frac{1}{(n-k)!} S_{n-k}(z) \end{aligned}$$

$$S_{n+1}(z) = S_n(z) + n! \sum_{k=0}^n x_k(z) x_{n-k}(z)$$

$$\frac{1}{n!} S_{n+1}(z) = \frac{1}{n!} S_n(z) + \sum_{k=0}^n x_k(z) x_{n-k}(z)$$

$$\text{นั่นคือ } (n+1)x_{n+1}(z) = x_n(z) + \sum_{k=0}^n x_k(z) x_{n-k}(z)$$

$$\text{จาก (1) และ (4) จึงได้ว่า } n!x_n(z) = S_n(z) = \sum_{j=1}^n j^n z^j$$

สำหรับ $n=0$ อนุกรมดังกล่าวจะลดรูปไปสู่ผลบวกของความก้าวหน้าเรขาคณิต

$$x_0(z) = S_0(z) = \frac{z}{1-z}$$

$$\text{ดังนั้น จำนวน } x_n(z) = \frac{1}{n!} S_n(z), \quad n=1, 2, 3, \dots$$

จึงมีความสัมพันธ์เวียนเกิดด้วยสังวัตนาการเชิงการจัด ดังนี้

$$(n+1)x_{n+1}(z) = x_n(z) + \sum_{k=0}^n x_k(z) x_{n-k}(z), \quad n=0, 1, 2, \dots$$

$$\text{และมีเงื่อนไขเริ่มต้นคือ } x_0(z) = \frac{z}{1-z}$$

2. ความสัมพันธ์เวียนเกิดเชิงเส้น

สำหรับ $z \in C, |z| < 1$ เราแสดงให้เห็นว่า

$$G(z, p) = \sum_{n=0}^{\infty} x_n(z) p^n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} S_n(z) p^n, \quad \forall p \in C, |p| < 1 \quad \dots(7)$$

ฟังก์ชันก่อกำเนิดของ $x_n(z)$ เหมือนกันกับฟังก์ชันก่อกำเนิดเลขชี้กำลังของลำดับ $S_n(z)$

ทฤษฎีบท 2 ฟังก์ชันก่อกำเนิดเลขชี้กำลัง $G(z, p)$ ของลำดับ $S_n(z), n=0, 1, 2, \dots$

$$\text{ถูกกำหนดโดยสูตร } G(z, p) = \frac{ze^p}{1-ze^p}, \quad \forall z, p \in C, |z| < 1, |p| < 1 \quad \dots(8)$$

พิสูจน์ จาก (5); $(n+1)x_{n+1}(z) = x_n(z) + \sum_{k=0}^n x_k(z)x_{n-k}(z)$

โดยการคูณความสัมพันธ์ (5) ด้วย p^n และผลรวมสำหรับ $n = 0, 1, 2, \dots$

จึงได้
$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)x_{n+1}(z)p^n = \sum_{n=0}^{\infty} x_n(z)p^n + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n x_k(z)x_{n-k}(z)p^n \quad \dots(9)$$

พิจารณา
$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)x_{n+1}(z)p^n = x_1(z) + 2x_2(z)p + 3x_3(z)p^2 + \dots$$

$$= \frac{d}{dp} (x_0(z) + x_1(z)p + x_2(z)p^2 + x_3(z)p^3 + \dots) = \frac{d}{dp} \sum_{n=0}^{\infty} x_n(z)p^n$$

ดังนั้น
$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)x_{n+1}(z)p^n = \frac{d}{dp} G(z, p) \quad \dots(9.1)$$

และพิจารณา
$$\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n x_k(z)x_{n-k}(z)p^n = \sum_{k=0}^0 x_k(z)x_{0-k}(z)p^0 + \sum_{k=0}^1 x_k(z)x_{1-k}(z)p^1$$

$$+ \sum_{k=0}^2 x_k(z)x_{2-k}(z)p^2 + \sum_{k=0}^3 x_k(z)x_{3-k}(z)p^3 + \sum_{k=0}^4 x_k(z)x_{4-k}(z)p^4 + \dots$$

$$= x_0(z)x_0(z) + (x_0(z)x_1(z) + x_1(z)x_0(z))p$$

$$+ (x_0(z)x_2(z) + x_1(z)x_1(z) + x_2(z)x_0(z))p^2$$

$$+ (x_0(z)x_3(z) + x_1(z)x_2(z) + x_2(z)x_1(z) + x_3(z)x_0(z))p^3$$

$$+ (x_0(z)x_4(z) + x_1(z)x_3(z) + x_2(z)x_2(z) + x_3(z)x_1(z) + x_4(z)x_0(z))p^4 + \dots$$

$$= (x_0(z) + x_1(z)p + x_2(z)p^2 + x_3(z)p^3 + \dots)^2 = \left(\sum_{n=0}^{\infty} x_n(z)p^n \right)^2$$

ดังนั้น
$$\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n x_k(z)x_{n-k}(z)p^n = G^2(z, p) \quad \dots(9.2)$$

จาก (9), (9.1) และ (9.2) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีบทโคชี-เมอร์เทินส์ (Cauchy-Mertens) (Kumaresan S., 2020) ที่เกี่ยวข้องกับการคูณของอนุกรมกำลังในความสัมพันธ์ (9) จึงลดรูปไปสู่สมการเชิงอนุพันธ์ (10)

$$\frac{d}{dp} G(z, p) = G(z, p) + G^2(z, p) \quad \dots(10)$$

$$\frac{d}{dp} G(z, p) - G(z, p) = G^2(z, p)$$

$$G^{-2}(z, p) \frac{d}{dp} G(z, p) - G^{-1}(z, p) = 1 \quad \dots(10.1)$$

ให้
$$v(z, p) = G^{-1}(z, p) \quad \dots(10.2)$$

จะได้

$$\frac{d}{dp}v(z, p) = -G^{-2}(z, p)\frac{d}{dp}G(z, p) \quad \dots(10.3)$$

จาก (10.1) , (10.2) และ (10.3) จึงได้ว่า

$$\begin{aligned} -\frac{d}{dp}v(z, p) - v(z, p) &= 1 \\ \frac{d}{dp}v(z, p) + v(z, p) &= -1 \\ e^p \frac{d}{dp}v(z, p) + e^p v(z, p) &= -e^p \\ \frac{d}{dp}(e^p v(z, p)) &= -e^p \\ e^p v(z, p) &= -e^p + c_1 \\ v(z, p) &= -1 + c_1 e^{-p} \\ \frac{1}{G(z, p)} + 1 &= c_1 e^{-p} \\ \frac{1+G(z, p)}{G(z, p)} &= e^{-p-c} ; \quad c_1 = e^{-c} \\ \frac{G(z, p)}{G(z, p)+1} &= e^{p+c} \\ G(z, p) &= e^{p+c}G(z, p) + e^{p+c} \\ (1-e^{p+c})G(z, p) &= e^{p+c} \\ G(z, p) &= \frac{e^{p+c}}{1-e^{p+c}} \quad \dots(11) \\ G(z, 0) &= \frac{e^c}{1-e^c} ; \quad p = 0 \end{aligned}$$

ซึ่งได้เกิดเป็นตัวคงค่า $z \in \mathbb{C}$ จาก (6) , (7) และ (11) ในความสัมพันธ์สุดท้าย

สำหรับ $p = 0$ จึงได้ผลเป็น

$$G(z, 0) = x_0(z) = \frac{z}{1-z} = \frac{e^c}{1-e^c}$$

นั่นคือ

$$e^c = z \quad \dots(12)$$

จาก (11) และ (12) จะได้

$$G(z, p) = \frac{ze^p}{1-ze^p}$$

ต่อไปเราจะนำฟังก์ชันก่อกำเนิดเลขชี้กำลัง ไปหาความสัมพันธ์เวียนเกิดเชิงเส้น ดังต่อไปนี้

ทฤษฎีบท 3 สำหรับ $z \in \mathbb{C}$, $|z| < 1$ ลำดับ $S_n(z)$ สอดคล้องกับความสัมพันธ์เวียนเกิดเชิงเส้นที่มีสัมประสิทธิ์เป็นตัวแปร

$$S_n(z) = \frac{z}{1-z} \left[1 + \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n}{k} S_k(z) \right], \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \dots(13)$$

พิสูจน์ จาก (8) ;
$$G(z, p) = \frac{ze^p}{1 - ze^p}$$

จะได้
$$G(z, p) \left(\frac{1}{z} - e^p \right) = e^p$$

$$\frac{1}{z} G(z, p) - G(z, p) e^p = e^p$$

และตามด้วยความสัมพันธ์ (7) จึงกลายเป็น

$$\frac{1}{z} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} S_n(z) p^n - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} S_n(z) p^n \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} p^n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} p^n, \quad \forall p \in \mathbb{C}, |p| < 1 \quad \dots(14)$$

พิจารณา
$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} S_n(z) p^n \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} p^n$$

$$= \left(\frac{1}{0!} S_0(z) p^0 + \frac{1}{1!} S_1(z) p^1 + \frac{1}{2!} S_2(z) p^2 + \dots \right) \left(\frac{1}{0!} p^0 + \frac{1}{1!} p^1 + \frac{1}{2!} p^2 + \dots \right)$$

$$= \frac{1}{0!0!} S_0(z) p^0 + \frac{1}{0!1!} S_0(z) p^1 + \frac{1}{0!2!} S_0(z) p^2 + \frac{1}{0!3!} S_0(z) p^3 + \frac{1}{0!4!} S_0(z) p^4 + \dots$$

$$+ \frac{1}{1!0!} S_1(z) p^1 + \frac{1}{1!1!} S_1(z) p^2 + \frac{1}{1!2!} S_1(z) p^3 + \frac{1}{1!3!} S_1(z) p^4 + \frac{1}{1!4!} S_1(z) p^5 + \dots$$

$$+ \frac{1}{2!0!} S_2(z) p^2 + \frac{1}{2!1!} S_2(z) p^3 + \frac{1}{2!2!} S_2(z) p^4 + \frac{1}{2!3!} S_2(z) p^5 + \frac{1}{2!4!} S_2(z) p^6 + \dots$$

$$+ \frac{1}{3!0!} S_3(z) p^3 + \frac{1}{3!1!} S_3(z) p^4 + \frac{1}{3!2!} S_3(z) p^5 + \frac{1}{3!3!} S_3(z) p^6 + \frac{1}{3!4!} S_3(z) p^7 + \dots$$

$$+ \frac{1}{4!0!} S_4(z) p^4 + \frac{1}{4!1!} S_4(z) p^5 + \frac{1}{4!2!} S_4(z) p^6 + \frac{1}{4!3!} S_4(z) p^7 + \frac{1}{4!4!} S_4(z) p^8 + \dots$$

$$+ \dots + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{k!m!} S_k(z) p^{k+m} + \dots$$

$$= \frac{1}{0!0!} S_0(z) p^0 + \left(\frac{1}{0!1!} S_0(z) p^1 + \frac{1}{1!0!} S_1(z) p^1 \right) + \left(\frac{1}{0!2!} S_0(z) p^2 + \frac{1}{1!1!} S_1(z) p^2 + \frac{1}{2!0!} S_2(z) p^2 \right)$$

$$+ \left(\frac{1}{0!3!} S_0(z) p^3 + \frac{1}{1!2!} S_1(z) p^3 + \frac{1}{2!1!} S_2(z) p^3 + \frac{1}{3!0!} S_3(z) p^3 \right)$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\frac{1}{0!4!} S_0(z) p^4 + \frac{1}{1!3!} S_1(z) p^4 + \frac{1}{2!2!} S_2(z) p^4 + \frac{1}{3!1!} S_3(z) p^4 + \frac{1}{4!0!} S_4(z) p^4 \right) + \dots \\
& = \sum_{k=0}^0 \frac{1}{k!(0-k)!} S_k(z) p^0 + \sum_{k=0}^1 \frac{1}{k!(1-k)!} S_k(z) p^1 + \sum_{k=0}^2 \frac{1}{k!(2-k)!} S_k(z) p^2 \\
& + \sum_{k=0}^3 \frac{1}{k!(3-k)!} S_k(z) p^3 + \sum_{k=0}^4 \frac{1}{k!(4-k)!} S_k(z) p^4 + \dots
\end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} S_n(z) p^n \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} p^n = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!(n-k)!} S_k(z) p^n$$

โดยใช้ทฤษฎีบทของ Cauchy-Mertens อีกครั้งเกี่ยวกับการคูณของอนุกรมกำลัง
แล้วจึงเปลี่ยนรูปความสัมพันธ์ (14) ได้เป็น

$$\frac{1}{z} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} S_n(z) p^n - \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!(n-k)!} S_k(z) p^n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} p^n, \forall p \in \mathbb{C}, |p| < 1 \quad \dots(15)$$

จาก (15) ค่าสัมประสิทธิ์ของ p^n จึงได้ผลเป็นดังนี้

$$\frac{1}{z} \cdot \frac{1}{n!} S_n(z) - \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!(n-k)!} S_k(z) = \frac{1}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \dots(16)$$

โดยการคูณ (16) ด้วย $n!$ เราจะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{z} S_n(z) - \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} S_k(z) = 1 \\
& \frac{1}{z} S_n(z) - \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n}{k} S_k(z) - \binom{n}{n} S_n(z) = 1 \\
& \frac{1-z}{z} S_n(z) - \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n}{k} S_k(z) = 1
\end{aligned}$$

ดังนั้น

$$S_n(z) = \frac{z}{1-z} \left[1 + \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n}{k} S_k(z) \right], \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

ตัวอย่าง โดยใช้สูตร (2) และ (13) สำหรับ $z \in C, |z| < 1$ เราจะได้

$$\begin{aligned} n=1; \quad S_1(z) &= \frac{z}{1-z} \left[1 + \sum_{k=0}^0 \binom{1}{k} S_k(z) \right] \\ &= \frac{z}{1-z} \left[1 + \binom{1}{0} S_0(z) \right] = \frac{z}{1-z} \left(1 + \frac{z}{1-z} \right) \end{aligned}$$

ดังนั้น
$$S_1(z) = \frac{z}{(1-z)^2}$$

$$\begin{aligned} n=2; \quad S_2(z) &= \frac{z}{1-z} \left[1 + \sum_{k=0}^1 \binom{2}{k} S_k(z) \right] \\ &= \frac{z}{1-z} \left[1 + \binom{2}{0} S_0(z) + \binom{2}{1} S_1(z) \right] = \frac{z}{1-z} (1 + S_0(z) + 2S_1(z)) \\ &= \frac{z}{1-z} \left[1 + \frac{z}{1-z} + \frac{2z}{(1-z)^2} \right] = \frac{z}{1-z} \left[\frac{(1-z)^2 + z(1-z) + 2z}{(1-z)^2} \right] \end{aligned}$$

ดังนั้น
$$S_2(z) = \frac{z^2 + z}{(1-z)^3}$$

$$\begin{aligned} n=3; \quad S_3(z) &= \frac{z}{1-z} \left[1 + \sum_{k=0}^2 \binom{3}{k} S_k(z) \right] \\ &= \frac{z}{1-z} \left[1 + \binom{3}{0} S_0(z) + \binom{3}{1} S_1(z) + \binom{3}{2} S_2(z) \right] \\ &= \frac{z}{1-z} (1 + S_0(z) + 3S_1(z) + 3S_2(z)) \\ &= \frac{z}{1-z} \left[1 + \frac{z}{1-z} + \frac{3z}{(1-z)^2} + \frac{3z(z+1)}{(1-z)^3} \right] \\ &= \frac{z(z^2 + 4z + 1)}{(1-z)^4} \end{aligned}$$

ดังนั้น
$$S_3(z) = \frac{z^3 + 4z^2 + z}{(1-z)^4}$$

สรุป

การนำเสนอขั้นตอนการเชิงการจัด มาใช้ในการหาผลบวกของอนุกรมเลขคณิต-เรขาคณิตที่วางนัยทั่วไป ในรูปความสัมพันธ์เวียนเกิดเชิงเส้น จึงช่วยลดขั้นตอนในการหาผลลัพธ์ได้สะดวกขึ้นและมีความถูกต้องแม่นยำ อันจะนำไปประยุกต์ใช้กับสูตรตัวกำหนดในแบบต่างๆ สำหรับผลบวกของอนุกรมเลขคณิต-เรขาคณิตที่วางนัยทั่วไปที่ซับซ้อนขึ้นไป

เอกสารอ้างอิง

- กำจร มุณีแก้ว. (2563). ผลบวกของอนุกรมเลขคณิต-เรขาคณิตที่วางนัยทั่วไป. *วารสารก้าวหน้าทางโลกวิทยาศาสตร์: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 19(2), 1-11.
- Cîrnu Ml. (2011). Determinantal formulas for sum of generalized arithmetic-geometric series. *De La Asociacion Matematica Venezolana*, 18(1), 25-38.
- Kumaresan, S. (2020). *Cauchy-Mertens*. Retrieved from <https://www.youtube.com/Cauchy-Mertens/>.
- Whitman College. (2024). *Newton's Binomial Theorem*. Retrieved from <https://www.whitman.edu/Newton's Binomial Theorem/>.
- Wikipedia. (2024). *Mertens' Theorem*. Retrieved from <https://en.wikipedia.org/Mertens' Theorem/>.

Translated Thai References

- Muneekaew, K. (2020). Eulerian Numbers and Generalized Arithmetic – Geometric Series. *Advance Science Journal, Science and Technology*, 19(2), 1-11.

Received: Sep 11, 2024

Revised: Dec 18, 2024

Accepted: Jul 25, 2024

ON THE DIOPHANTINE EQUATION $9^x + 9^y + n^z = w^2$

Apirat Siraworakun and Suton Tadee*

Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology,
Thepsatri Rajabhat University

*E-mail: suton.t@lawasri.tru.ac.th

Abstract

In this work, we give some conditions for the non-existence of solutions of the Diophantine equation $9^x + 9^y + n^z = w^2$, where n is a positive integer and x, y, z, w are non-negative integers. Moreover, we find all solutions of this equation for some positive integer n .

Keywords: Diophantine equation, Integer solution, Congruence

Introduction

The Diophantine equation is a well-known concept in number theory with numerous variations. One notable form is an exponential Diophantine equation $a^x + b^y = w^2$. Many authors study this equation by giving a and b as explicit positive integers, see (Asthana & Singh, 2020), (Sroysang, 2014). Moreover, a or b are given as variables under certain condition in various articles, see (Chotchaisthit, 2012), (Siraworakun & Tadee, 2023), (Tadee, 2023) and (Tangjai & Chubthaisong, 2021).

The Diophantine equation $a^x + b^y + c^z = w^2$, where a, b and c are positive integers, has been formulated and analyzed in subsequent studies. For example, Bacani and Rabago (2014) solved the Diophantine equation $3^x + 5^y + 7^z = w^2$, when x, y, z, w are non-negative integers. Analogously, a, b and c can be considered as variables subjected to certain conditions.

In addition, the non-negative integer solution of the equation $a^x + b^y + c^z = w^2$ is investigated, when all exponents are 1 or 2. For example, Burshtein (2020) showed all solutions of the equation $p^x + (p+1)^y + (p+2)^z = M^2$ for primes $p \geq 2$ when $1 \leq x, y, z \leq 2$. Pandichelvi and Sandhya (2022) investigated integer solutions to the Diophantine equation $p_1^x + p_2^y + p_3^z = M^2$, where p_1, p_2, p_3 are prime numbers and $x, y, z \in \{1, 2\}$.

In this research, we investigate some conditions regarding the non-existence of non-negative integer solutions of the Diophantine equation

$$9^x + 9^y + n^z = w^2, \quad (1)$$

where n is a positive integer and x, y, z, w are non-negative integers. Furthermore, we explore all solutions of this equation for some positive integer n . Without loss of generality, we may assume that $x \leq y$.

Main Results

In the beginning, we provide some conditions for the non-existence of non-negative integer solutions of the Diophantine equation (1).

Theorem 1. The Diophantine equation (1) has no non-negative integer solution if

1. $n \equiv 0, 1 \pmod{4}$ or
2. $n \equiv 2 \pmod{4}$ and $z \neq 1$ or
3. $n \equiv 3 \pmod{4}$ and z is even.

Proof. It is easy to see that $w^2 \equiv 0, 1 \pmod{4}$ and $9^x \equiv 9^y \equiv 1 \pmod{4}$.

1. Assume that $n \equiv 0, 1 \pmod{4}$. Suppose that (1) has a non-negative integer solution. We obtain that $w^2 \equiv 2, 3 \pmod{4}$. It is a contradiction. Thus, (1) has no non-negative integer solution.

2. Assume that $n \equiv 2 \pmod{4}$ and $z \neq 1$. Suppose that (1) has a non-negative integer solution. Since $z \neq 1$, we get $z = 0$ or $z \geq 2$. From (1), we have $w^2 \equiv 3 \pmod{4}$ or $w^2 \equiv 2 \pmod{4}$, respectively. It is a contradiction. Thus, (1) has no non-negative integer solution.

3. Assume that $n \equiv 3 \pmod{4}$ and z is even. Suppose that (1) has a non-negative integer solution. Then, $n^z \equiv 1 \pmod{4}$. From (1), we have $w^2 \equiv 3 \pmod{4}$. It is a contradiction. Thus, (1) has no non-negative integer solution. ■

Next, we give some results about the Diophantine equation (1), when $z = 1$.

Theorem 2. Let $x = y = 0$ and $z = 1$. The Diophantine equation (1) has no non-negative integer solution if $n \equiv 0 \pmod{3}$.

Proof. Assume that $n \equiv 0 \pmod{3}$. Suppose that (1) has a non-negative integer solution. Then $w^2 \equiv 2 \pmod{3}$. It is a contradiction since $w^2 \equiv 0, 1 \pmod{3}$. ■

Theorem 3. Let $x, y \geq 1$ and $z = 1$. The Diophantine equation (1) has no non-negative integer solution if

1. $n \equiv 2 \pmod{3}$ or
2. $n \equiv 3, 6 \pmod{9}$.

Proof. 1. Assume that $n \equiv 2 \pmod{3}$. Suppose that (1) has a non-negative integer solution. It implies that $w^2 \equiv 2 \pmod{3}$. It is a contradiction since $w^2 \equiv 0, 1 \pmod{3}$.

2. Assume that $n \equiv 3, 6 \pmod{9}$. Suppose that (1) has a non-negative integer solution. Since $n \equiv 3, 6 \pmod{9}$, we have $3|n$. From (1), we have $3|w$, $3|(w - 3^x)$ and $3|(w + 3^x)$. Then $9|(w - 3^x)(w + 3^x)$ and $9|(9^y + n)$. Thus $9|n$. It is a contradiction. ■

Theorem 4. Let $x = 0$ and $y \geq 0$ and $z = 1$. Then the equation (1) has a non-negative integer solution if and only if $1 + n = a(2 \cdot 3^m + a)$ for some positive integer a and non-negative integer m . Moreover, if the equation (1) has a non-negative integer solution, then $(n, x, y, z, w) = (a(2 \cdot 3^m + a) - 1, 0, m, 1, a + 3^m)$.

Proof. First, assume that (1) has a non-negative integer solution. Then $1 + n = w^2 - 3^{2y} = (w - 3^y)(w + 3^y)$. Choose $a = w - 3^y$ and $m = y$. Thus, $1 + n = a(2 \cdot 3^m + a)$. Conversely, assume that $1 + n = a(2 \cdot 3^m + a)$ for some positive integer a and non-negative integer m . Then

$$1 + 9^m + n = a(2 \cdot 3^m + a) + 9^m = a^2 + 2 \cdot 3^m a + 3^{2m} = (a + 3^m)^2.$$

Thus, (1) has a non-negative integer solution, which is $(n, x, y, z, w) = (a(2 \cdot 3^m + a) - 1, 0, m, 1, a + 3^m)$. ■

From Theorem 1, it remains to study 2 cases: 1) $n \equiv 2 \pmod{4}$ and $z = 1$, 2) $n \equiv 3 \pmod{4}$ and z is odd. Next, we investigate the non-negative integer solutions of the Diophantine equation (1) for $n \equiv 2 \pmod{4}$ and $z = 1$.

Theorem 5. Let $x, y \geq 1$ and $z = 1$. If $n \equiv 2 \pmod{12}$, then the Diophantine equation (1) has no non-negative integer solution.

Proof. Assume that $n \equiv 2 \pmod{12}$. Then $n \equiv 2 \pmod{3}$. By Theorem 3(1), we can conclude that (1) has no non-negative integer solution. ■

By Theorem 1(2), Theorem 4 and Theorem 5, we found all solutions of the Diophantine equation (1) for some positive integer n .

Example 6. The Diophantine equation $9^x + 9^y + 2^z = w^2$ has only one non-negative integer solution, i.e., $(x, y, z, w) = (0, 0, 1, 2)$.

Example 7. The Diophantine equation $9^x + 9^y + 14^z = w^2$ has only one non-negative integer solution, i.e., $(x, y, z, w) = (0, 0, 1, 4)$.

Example 8. The Diophantine equation $9^x + 9^y + 26^z = w^2$ has only one non-negative integer solution, i.e., $(x, y, z, w) = (0, 1, 1, 6)$.

Theorem 9. Let $x, y \geq 1$ and $z = 1$. If $n = 12k + 6$ for some non-negative integer k with $k \equiv 0, 2 \pmod{3}$, then the Diophantine equation (1) has no non-negative integer solution.

Proof. Assume that $n = 12k + 6$ for some non-negative integer k with $k \equiv 0, 2 \pmod{3}$. Therefore $n \equiv 3, 6 \pmod{9}$. By Theorem 3(2), we can conclude that (1) has no non-negative integer solution. ■

By Theorem 1(2), Theorem 4 and Theorem 9, we found all solutions of the Diophantine equation (1) for some positive integer n with above conditions.

Example 10. The Diophantine equation $9^x + 9^y + 6^z = w^2$ has only one non-negative integer solution, i.e., $(x, y, z, w) = (0, 1, 1, 4)$.

Example 11. The Diophantine equations $9^x + 9^y + 30^z = w^2$, $9^x + 9^y + 42^z = w^2$ and $9^x + 9^y + 66^z = w^2$ have no non-negative integer solution.

We can ensure that the Diophantine equation (1) has no non-negative solution in the following theorem.

Theorem 12. Let $z = 1$. If $n = 4 \cdot 3^k + 2$, where $k \geq 2$, then the Diophantine equation (1) has no non-negative integer solution.

Proof. Assume that $n = 4 \cdot 3^k + 2$, where $k \geq 2$. Suppose that (1) has a non-negative integer solution. Then $n \equiv 2 \pmod{12}$. By Theorem 5, we obtain that $x = 0$ and $y \geq 0$. Assume that $y \geq 1$. From (1), we get $3 \mid w$, $3 \mid (w - 3^y)$ and $3 \mid (w + 3^y)$. This implies that $9 \mid (4 \cdot 3^k + 3)$. It is a contradiction with the fact that $k \geq 2$. Therefore $y = 0$. From (1), we have $3^k = \left(\frac{w}{2} - 1\right)\left(\frac{w}{2} + 1\right)$. There exists a non-negative integer u such that

$\frac{w}{2} - 1 = 3^u$ and $\frac{w}{2} + 1 = 3^{k-u}$. Thus $2 = 3^u(3^{k-2u} - 1)$. Then $u = 0$ and $k = 1$. It is a contradiction. Therefore, (1) has no non-negative integer solution. ■

By Theorem 1(2) and Theorem 12, we have the following example.

Example 13. The Diophantine equations $9^x + 9^y + 38^z = w^2$, $9^x + 9^y + 110^z = w^2$ and $9^x + 9^y + 326^z = w^2$ have no non-negative integer solution.

For another cases of n , we cannot guarantee all solution. However, we show that the Diophantine equation (1) has the unique non-negative integer solution, when $x \leq 1$ and $n = 10$.

Theorem 14. If $x \leq 1$ and $n = 10$, then the Diophantine equation (1) has the unique non-negative integer solution, i.e., $(x, y, z, w) = (1, 2, 1, 10)$.

Proof. Since $n = 10$ and Theorem 1(2), we have $z = 1$. We consider the following cases.

Case 1. $x = 0$ and $y = 0$. From (1), we have $w^2 = 12$. This is impossible.

Case 2. $x = 0$ and $y \geq 1$. From (1), we have $11 = (w - 3^y)(w + 3^y)$. Then $w - 3^y = 1$, $w + 3^y = 11$ and $2 \cdot 3^y = 10$. Thus $3^y = 5$. It is a contradiction since y is an integer.

Case 3. $x = 1$ and $y \geq 1$. From (1), we get $w^2 = 9^y + 19$. It implies that $w^2 \equiv (-1)^y - 1 \pmod{10}$. Since $w^2 \equiv 0, 1, 4, 5, 6, 9 \pmod{10}$, we obtain that y is even. There exists a positive integer k such that $y = 2k$. Therefore $19 = (w - 9^k)(w + 9^k)$ and so $w - 9^k = 1$ and $w + 9^k = 19$. Then $2 \cdot 9^k = 18$. Thus $k = 1$ and $y = 2$. Hence $(x, y, z, w) = (1, 2, 1, 10)$. ■

Finally, we consider $n \equiv 3 \pmod{4}$. Then $n \equiv 3, 7 \pmod{8}$.

Theorem 15. If $n \equiv 3 \pmod{8}$, then the Diophantine equation (1) has no non-negative integer solution.

Proof. Assume that (1) has a non-negative integer solution. Since $n \equiv 3 \pmod{8}$, we get $n \equiv 3 \pmod{4}$. By Theorem 1(3), it implies that z is odd. Then $n^z \equiv 3 \pmod{8}$. From (1), $w^2 \equiv 5 \pmod{8}$. It is a contradiction since $w^2 \equiv 0, 1, 4 \pmod{8}$. ■

For $n \equiv 7 \pmod{8}$ and z is odd, the existence of the solutions cannot be confirmed. However, we show the solutions of the Diophantine equation (1), when $z = 1$.

Theorem 16. Let $x, y \geq 1$ and $z = 1$. If $n \equiv 23 \pmod{24}$, then the Diophantine equation (1) has no non-negative integer solution.

Proof. Assume that $n \equiv 23 \pmod{24}$. Then $n \equiv 2 \pmod{3}$. By Theorem 3(1), we can conclude that (1) has no non-negative integer solution. ■

By Theorem 4 and Theorem 16, we found all solutions of the Diophantine equation (1) for $z = 1$ and some positive integer n .

Example 17. The Diophantine equation $9^x + 9^y + 23 = w^2$ has only one non-negative integer solution, i.e., $(x, y, w) = (0, 0, 5)$.

Example 18. The Diophantine equation $9^x + 9^y + 47 = w^2$ has only one non-negative integer solution, i.e., $(x, y, w) = (0, 0, 7)$.

Example 19. The Diophantine equation $9^x + 9^y + 71 = w^2$ has only one non-negative integer solution, i.e., $(x, y, w) = (0, 1, 9)$.

Example 20. The Diophantine equation $9^x + 9^y + 95 = w^2$ has no non-negative integer solution.

Theorem 21. Let $x, y \geq 1$ and $z = 1$. If $n = 24k + 15$ for some non-negative integer k with $k \equiv 0, 1 \pmod{3}$, then the Diophantine equation (1) has no non-negative integer solution.

Proof. Assume that $n = 24k + 15$ for some non-negative integer k with $k \equiv 0, 1 \pmod{3}$. Therefore, $n \equiv 3, 6 \pmod{9}$. By Theorem 3(2), we can conclude that (1) has no non-negative integer solution. ■

By Theorem 4 and Theorem 21, we found all solutions of the Diophantine equation (1) for $z = 1$ and some positive integer n with above conditions.

Example 22. The Diophantine equation $9^x + 9^y + 15 = w^2$ has only one non-negative integer solution, i.e., $(x, y, w) = (0, 1, 5)$.

Example 23. The Diophantine equation $9^x + 9^y + 39 = w^2$ only two non-negative integer solutions. That are $(x, y, w) \in \{(0, 1, 7), (0, 2, 11)\}$.

Conclusions

This research demonstrates some conditions for the non-existence of non-negative integer solution of the Diophantine equation $9^x + 9^y + n^z = w^2$, where n is a positive integer and x, y, z, w are non-negative integers, and investigates all solutions of this equation for some positive integer n . However, the results of this work cannot cover all cases. For example, when $n = 18$ and $n = 54$. This unsolved problem remains an interesting topic for further investigation.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers for their careful reading of this manuscript and their useful comments. This work was supported by Research and Development Institute and Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University, Thailand.

Declaration of conflicting interests

The authors declared that they have no conflicts of interest in the research, authorship, and this article's publication.

References

- Asthana, S. & Singh, M.M. (2020). On the Diophantine equation $3^x + 117^y = z^2$. *GANITA*, 70(2), 43-47.
- Bacani, J. B. & Rabago, J. F. T. (2014). On the Diophantine equation $3^x + 5^y + 7^z = w^2$. *Konuralp Journal of Mathematics*. 2(2), 64-69.
- Burshtein, N. (2020). Solutions of the Diophantine equations $p^x + (p+1)^y + (p+2)^z = M^2$ for primes $p \geq 2$ when $1 \leq x, y, z \leq 2$. *Annals of Pure and Applied Mathematics*. 22(1), 41-49.
- Chotchaisthit, S. (2012). On the Diophantine equation $4^x + p^y = z^2$ where p is a prime number. *American Journal of Mathematics and Sciences*. 1(1), 191-193.

- Pandichelvi, V. & Sandhya, P. (2022). Investigation of solutions to an exponential Diophantine equation $p_1^x + p_2^y + p_3^z = M^2$ for prime triplets (p_1, p_2, p_3) . *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*. 5(2), 22-31.
- Siraworakun, A. & Tadee, S. (2023). Solutions of the Diophantine equation $p^x + q^y = z^2$, where $p, q \equiv 3 \pmod{4}$. *International Journal of Mathematics and Computer Science*. 18(1): 131-136.
- Sroysang, B. (2014). More on the Diophantine equation $4^x + 10^y = z^2$. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 91(1). 135-138.
- Tadee, S. (2023). On the Diophantine equation $n^x + 10^y = z^2$. *WSEAS Transactions on Mathematics*. 22, 150-153.
- Tangjai, W. & Chubthaisong, C. (2021). On the Diophantine equation $3^x + p^y = z^2$ where $p \equiv 2 \pmod{3}$. *WSEAS Transactions on Mathematics*. 20, 283-287.

Received: Aug 7, 2024

Revised: Dec 21, 2024

Accepted: Dec 25, 2024

การลดเวลาในกระบวนการเปลี่ยนรุ่นการผลิตชิ้นงานโมเดล A กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

REDUCING SETUP TIME IN THE PRODUCTION CHANGEOVER PROCESS FOR MODEL A: A CASE STUDY IN AN AUTOMOTIVE PARTS MANUFACTURING PLANT

จุฑาทิพย์ ลีลาธนาพิพัฒน์¹ ศิลา วงศ์สุนทรพจน์² อภิชาติ ชัยชวลิต³¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์^{2,3}สาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์Jutathip Leelathanapit¹ Silar Wongsuntornpoj² Apichart Chaichawalit³¹Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Panyapiwat Institute of Management^{2,3}Robotics and Automation Engineering Faculty of Engineering and Technology,

Panyapiwat Institute of Management

jutathiplee@pim.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้วัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาในกระบวนการเปลี่ยนรุ่นการผลิตชิ้นงานโมเดล A โดยโมเดล A คือ ตัวพื้นรถยนต์ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของรถยนต์ เป็นชิ้นงานที่มีความหลากหลายมากที่สุด มีด้วยกันถึง 9 รุ่น เป็นกระบวนการผลิตที่มีเวลาในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตที่ใช้เวลานานและไม่มีอุปกรณ์ช่วยในการเปลี่ยนรุ่นการผลิต โดยในแต่ละรุ่นจะมีลักษณะคล้ายกันโดยจะมีเพียงการเจาะรูที่ต่างกัน ซึ่งในกระบวนการผลิตต้องเปลี่ยนรุ่นการผลิต พนักงานจะเข้าไปเปลี่ยนรุ่นการผลิตในแม่พิมพ์ของเครื่องปั๊มชิ้นงานเครื่องที่ 3 และ เครื่องที่ 4 โดยใช้เวลา 230 วินาที คิดเป็น 3.83 นาที มีระยะทางทั้งหมด 73 เมตรผู้วิจัยจึงทำการปรับปรุงโดย โดยนำทฤษฎี ECRS 7waste มาปรับปรุงกระบวนการวิธีที่ 1 โดยการเพิ่มพนักงานและเปลี่ยนเส้นทางการเดินในการเปลี่ยนรุ่นการผลิต และนำโปรแกรม PLC เข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการ วิธีที่ 2 โดยการเปลี่ยนรุ่นการผลิตโดยใช้ระบบอัตโนมัติ

ผลดำเนินการหลังการปรับปรุงวิธีที่ 1 จากการเพิ่มพนักงานและเปลี่ยนเส้นทางการเดินในการเปลี่ยนรุ่นการผลิต ใช้เวลาทั้งหมด 200 วินาที มีระยะทางทั้งหมด 53 เมตร เวลาลดลงจากเดิม 30 วินาที คิดเป็นร้อยละ 13.04 และ ระยะทางลดลง 20 เมตร คิดเป็นร้อยละ 27.4 และ วิธีที่ 2 การเปลี่ยนรุ่นการผลิตโดยใช้ระบบอัตโนมัติ ใช้เวลาทั้งหมด 145 วินาที มีระยะทาง 3 เมตร เวลาลดลงจากเดิม 85 วินาที คิดเป็นร้อยละ 36.96 และ ระยะทางลดลง 70 เมตร คิดเป็นร้อยละ 95.89

คำสำคัญ : ระบบอัตโนมัติ, กระบวนการเปลี่ยนรุ่นการผลิต, โมเดล A

Abstract

The objective of this study is to reduce the time required for the production model changeover process for Model A, a critical automotive component. Model A, which constitutes the vehicle floor, is produced in nine variants, each differing primarily in the placement of drilled holes. The existing process lacks equipment to assist with the changeover, and workers manually perform the changeover in the molds of stamping machines 3 and 4, taking 230 seconds and covering a distance of 73 meters. To improve this process, the researcher applied the ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange and Simplify) theory and the 7 Wastes principles. Method 1 involved increasing the workforce and optimizing the walking route during the changeover, while Method 2 incorporated a PLC-based automation system. Post-improvement results show that Method 1 reduced the time to 200 seconds (a 13.04% reduction) and the distance to 53 meters (a

27.4% reduction). Method 2 resulted in a time reduction to 145 seconds (a 36.96% decrease) and a distance reduction to 3 meters (a 95.89% decrease).

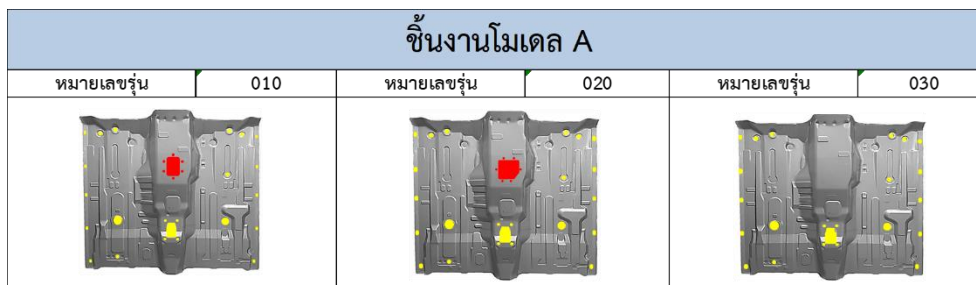
Keywords: Automation, Production model change processes, Model A

บทนำ

อุตสาหกรรมรถยนต์ในประเทศไทยช่วงปี 2566-2568 มีแนวโน้มเติบโตต่อเนื่อง โดยมีแรงหนุนด้านอุปสงค์จากภาวะเศรษฐกิจไทยที่คาดว่าจะขยายตัว 3.3% ในปี 2566 3.7% ในปี 2567 และ 3.5% ในปี 2568 กิจกรรมในภาคธุรกิจให้กระตือรือร้นเป็นลำดับ โดยเฉพาะภาคขนส่งและโลจิสติกส์ ภาวะการท่องเที่ยวที่ฟื้นตัวหลังสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัส COVID-19 บรรเทาและกำลังซื้อของผู้บริโภคที่มีทิศทางดี ทำให้คาดว่าจะปริมาณการผลิตรถยนต์ช่วงปี 2566 ถึงปี 2568 เติบโตเฉลี่ย 3-4 % ต่อปี หรือมีจำนวน 1.93-2.10 ล้านคัน โดยคาดว่าจะปริมาณการผลิตรถยนต์จะกลับมาใกล้เคียงกับช่วงก่อนการระบาดของไวรัส COVID19 ที่ประมาณ 2 ล้านคัน ในปี 2567 (สำนักงานเศรษฐกิจการคลัง, 2566)

โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์โดยผลิตตามความต้องการของลูกค้า โดยผลิตภัณฑ์ที่ดำเนินการผลิตเป็นส่วนประกอบภายนอกรถยนต์ โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในส่วนของการผลิตชิ้นส่วนขนาดใหญ่ ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้แก่ ประตูรถ ฝากระโปรงรถ ตัวพื้นรถ แผงด้านข้างรถ และฝากระโปรงท้าย ในอนาคตจากข้อมูลยอดพยากรณ์การผลิตชิ้นงานจากทางลูกค้าคาดว่าในปี 2567 โมเดล A มีแนวโน้มที่ลูกค้ามีความต้องการสูง จากการพยากรณ์มีอัตราการความต้องการในการผลิตมากขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่มีนาคม พ.ศ. 2566 – มีนาคม พ.ศ.2567 มีอัตราการความต้องการในการผลิตจากทางลูกค้าอยู่ที่ 333 – 18,189 ชิ้น โดยมีความต้องการเพิ่มขึ้นตามลำดับและคาดว่าจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นชิ้นงานตัวใหม่ที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โมเดล A คือ ตัวพื้นรถยนต์ ดังรูปที่ 1 เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของรถยนต์ เป็นชิ้นงานที่มีความหลากหลายมากที่สุด เป็นกระบวนการผลิตที่มีเวลาในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตที่ใช้เวลานานและไม่มียุทธศาสตร์ช่วยในการเปลี่ยนรุ่นการผลิต ซึ่งในกระบวนการผลิตต้องเปลี่ยนรุ่นการผลิตในแม่พิมพ์ของชิ้นงานแต่ละรุ่นตามความต้องการของลูกค้า

จากการเก็บข้อมูลเวลาสูญเสียที่เกิดในกระบวนการผลิตในช่วงเดือนมิถุนายน - กันยายน พ.ศ. 2566 พบว่า ปัญหาที่เกิดเวลาสูญเสียในกระบวนการผลิตชิ้นงานโมเดล A ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นปัญหาที่เกิดขึ้น เกิดจากการเปลี่ยนรุ่นการผลิตเนื่องจากมีเวลาสูญเสียมากที่สุดในกระบวนการผลิต จึงทำการศึกษาระบบการเปลี่ยนรุ่นการผลิต พบว่าการเปลี่ยนรุ่นการผลิต 1 ครั้ง ใช้พนักงาน 1 คน โดยพนักงานต้องเดินเข้าไปเปลี่ยนรุ่นการผลิตในแม่พิมพ์ของเครื่องปั๊มชิ้นงาน ผู้วิจัยจึงทำการปรับปรุงโดยลดเวลาและระยะทางในกระบวนการเปลี่ยนรุ่นการผลิต โดยนำทฤษฎี ECRS 7waste และโปรแกรม PLC เข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อลดเวลาสูญเสียในกระบวนการผลิตที่เกิดจากการเปลี่ยนรุ่นการผลิต ลดการทำงานซ้ำซ้อนในบางขั้นตอนใช้ระยะเวลาในการดำเนินการกิจกรรมนานเกินไปทำให้เกิดความล่าช้า มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ยังสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่หลากหลายได้และสร้างความเชื่อมั่นให้กับลูกค้าได้อีกด้วย



ภาพที่ 1 ตัวอย่างชิ้นงานโมเดล A

วัตถุประสงค์

เพื่อลดเวลาในกระบวนการเปลี่ยนรุ่นการผลิตชิ้นงานโมเดล A

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การกำจัดความสูญเสีย (7 Waste) เป็นกฎแฉอดอกหนึ่งในระบบ Lean Manufacturing เป็นระบบกำจัดความสูญเสียและปรับปรุงคุณภาพอย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกิจกรรมหรืองานที่ดำเนินการ ดังนั้นจึงมีแนวคิดเพื่อพยายามจะลดความสูญเสียเหล่านี้เกิดขึ้นมากมาย (Marry Poppendieck., 2002) ระบบการผลิตแบบโตโยต้า (Toyota production system) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อขจัดความสูญเสีย 7 ประการ

- การผลิตเกินความต้องการ (Overproduction) คือ การผลิตสินค้าเกินกว่าที่ลูกค้าต้องการหรือเกินจากความสามารถในการขาย ทำให้เกิดการเก็บสต็อกเกินความจำเป็น
- การรอ (Waiting) คือ การที่คนหรือเครื่องจักรรอการทำงานในขั้นตอนถัดไป เช่น การรอวัสดุหรือข้อมูล ทำให้เวลาในการผลิตเสียไป
- การขนส่ง (Transport) คือ การเคลื่อนย้ายวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็น ส่งผลให้สูญเสียเวลาและพลังงาน
- การประมวลผลที่เกินความจำเป็น (Extra Processing) คือ การทำงานหรือการประมวลผลที่เกินความจำเป็น เช่น การทดสอบซ้ำๆ หรือใช้เทคโนโลยีที่ซับซ้อนเกินไป
- สต็อกสินค้าที่มากเกินไป (Inventory) คือ การเก็บสต็อกสินค้าหรือวัสดุในปริมาณมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดค่าใช้จ่ายสูงหรือของเสีย
- การเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น (Motion) คือ การเคลื่อนไหวที่ไม่มีประสิทธิภาพ เช่น การเดินหรือการยกของที่ไม่จำเป็น ทำให้เสียเวลาและพลังงาน
- ข้อผิดพลาดหรือของเสีย (Defects) คือ การผลิตสินค้าที่มีข้อผิดพลาดหรือคุณภาพต่ำ ต้องมีการตรวจสอบหรือแก้ไขซึ่งส่งผลให้สูญเสียเวลาและทรัพยากร

ECRS เป็นเครื่องมือในการปรับปรุงกระบวนการที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความสูญเสียและเพิ่มคุณค่าในกระบวนการต่างๆ ตามหลักการบริหารจัดการแบบลีน และการปรับปรุงกระบวนการทำงาน โดยมี 4 ขั้นตอนหลักที่ช่วยลดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตหรือการดำเนินงานโดยรวม แนวคิดของ ECRS (บันทึก อินทรีย์มีศักดิ์ และ พิพัฒน์ เลิศโกวิท, 2567) ประกอบด้วย:

- กำจัด (Eliminate) คือ กำจัดกิจกรรมที่ไม่จำเป็น
- รวม (Combine) คือ รวมกิจกรรมที่สามารถทำได้พร้อมกัน
- จัดเรียงใหม่ (Rearrange) คือ ปรับลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
- ทำให้เรียบง่าย (Simplify) คือ ลดความซับซ้อนของขั้นตอนการทำงาน

จิรกาล กัลยาโพธิ์ (2564) มุ่งลดความสูญเสียเปล่าในกระบวนการผลิตยางรองล้อรถยนต์ โดยใช้หลัก Lean และเครื่องมือ ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) วิเคราะห์กิจกรรมที่เพิ่มคุณค่าและความสูญเสียเปล่าต่างๆ ผลการปรับปรุงได้ลดกิจกรรมที่ไม่เพิ่มมูลค่า (NVA) จาก 19 เหลือ 0 กิจกรรม (-100%) และลดกิจกรรมที่ไม่เพิ่มมูลค่าแต่จำเป็น (NNVA) จาก 92 เหลือ 81 กิจกรรม (-12%) นอกจากนี้ยังลดจำนวนขั้นตอน (-26%) เวลาในการผลิต (-26%) และระยะทางการขนส่ง (-91%) อย่างมีประสิทธิภาพ.

นันทพันธ์ กนกศิริจุฑา (2564) มุ่งลดความสูญเสียเปล่าในสายการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (HDD) โดยประยุกต์ใช้เทคนิค ECRS สำหรับลดความสูญเสียเปล่าในกระบวนการผลิตแขนจับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และลดการไหลงานที่ไม่จำเป็นออกจากกระบวนการ การรวมงานที่คล้ายกันเข้าด้วยกัน และจัดเรียงใหม่เพื่อให้เกิดความสมดุลของ สายการผลิตโดยการ ลดความสูญเสียเปล่าที่เกิดจากคนทำงานมากเกินไป และลดงานที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม (Non-value Added) ผลการปรับปรุงปรากฏว่าสามารถลดคนจาก 5 คน เหลือ 3 คน เวลาการว่างงานลดลงจาก 5,463 วินาที/Lot เหลือ 1,597 วินาที/Lot คิดเป็น 70.6% ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มจาก 42% เป็น 83% คิดเป็น 41%

วิธีดำเนินงานวิจัย

ศึกษากระบวนการเปลี่ยนรุ่นการผลิตชิ้นงานโมเดล A

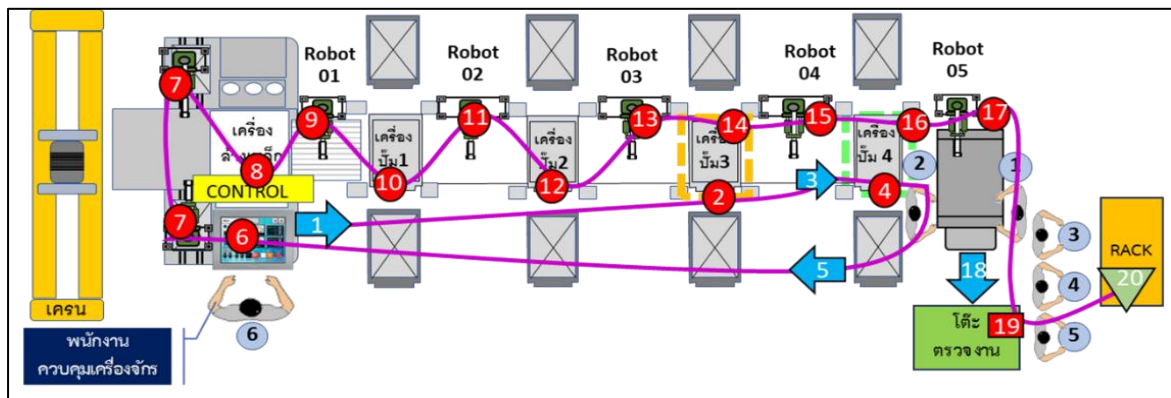
ผู้วิจัยศึกษาขั้นตอนการเปลี่ยนรุ่นการผลิตและรวบรวมข้อมูลถึงสาเหตุที่ก่อให้เกิดเวลาสูญเสียโมเดล A ดังตารางที่ 1 เป็นกระบวนการผลิตที่มีเวลาในการเปลี่ยนรุ่นที่ใช้เวลานาน โดยในแต่ละรุ่นจะมีลักษณะคล้ายกันโดยจะมีเพียงการเจาะรูที่ต่างกัน โดยพนักงานจะเข้าไปเปลี่ยนรุ่นการผลิตในแม่พิมพ์ของเครื่องปั๊มชิ้นงานเครื่องที่ 3 และ เครื่องที่ 4 จากแผนภูมิ

กระบวนการไหล เกิดกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่า/ไม่มีความจำเป็นต้องทำ (Non-Value Added Activities หรือ NVA) ทั้งหมด 5 กิจกรรม เป็นกิจกรรมที่ควรปรับปรุงทันที ส่วนกิจกรรมที่เหลือเป็นกิจกรรมไม่เพิ่มคุณค่าแต่จำเป็นต้องทำ (Non Value Added but Necessary Activities หรือ NVAN) ไม่สามารถกำจัดทิ้งได้ทันทีแต่ต้องลดให้เหลือเท่าที่จำเป็น (นพดล ศรีพุทธา และ บุญสิน นาดอนคู่, 2562)

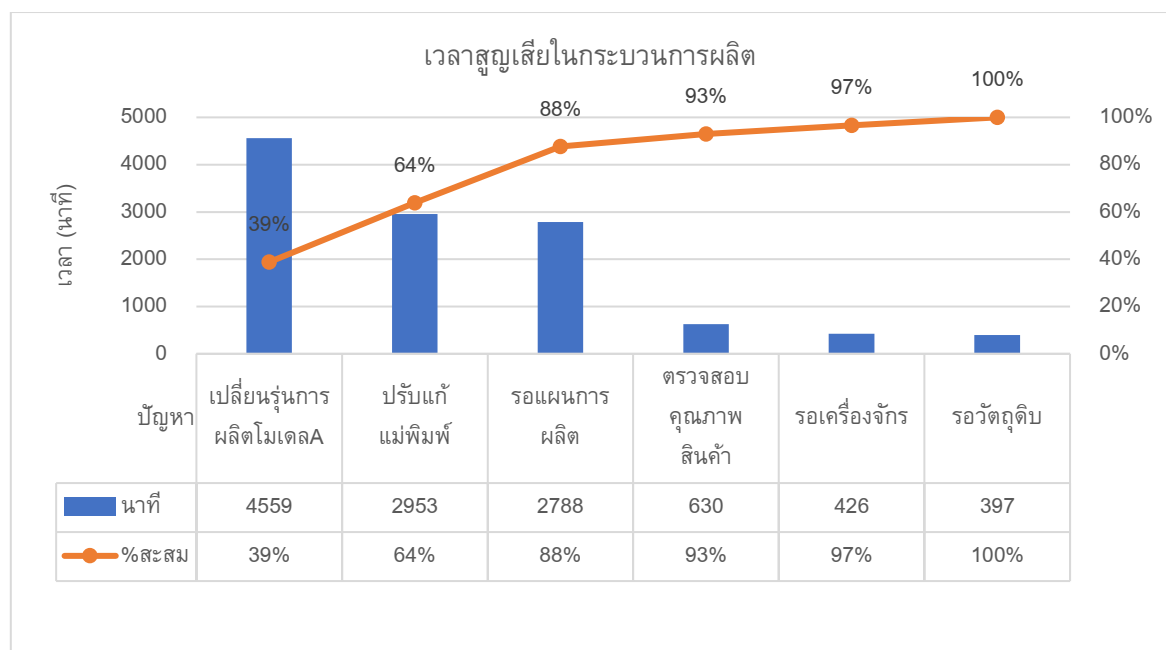
ตารางที่ 1 แผนภูมิกระบวนการไหลขั้นตอนการเปลี่ยนรุ่นการผลิตชิ้นงานโมเดล A

แผนภูมิกระบวนการไหล (FLOW PROCESS CHART)									
แผนภูมิหมายเลข 1 แผ่นที่ 1					สรุปผล				
กิจกรรม : ขั้นตอนการเปลี่ยนรุ่นการผลิตชิ้นงานโมเดล A					กิจกรรม	ปัจจุบัน	ปรับปรุง	ลดลง	
วิธีทำงาน : ปัจจุบัน					ปฏิบัติงาน ○	14	-	-	
สถานที่ : บริษัทผลิตชิ้นส่วนยานยนต์					เคลื่อนย้าย ⇨	4	-	-	
พนักงาน : แผนกผลิตชิ้นส่วนขนาดใหญ่					รอคอย □	-	-	-	
จัดทำโดย : นางสาว วรัญญา ไจหาญ					ตรวจสอบ □	1	-	-	
อนุมัติโดย : นายเอกรินทร์ แก้วสูงเนิน					จัดเก็บ ▽	1	-	-	
ขั้นตอน					สัญลักษณ์				
วิธีการ (ก่อนปรับปรุง)					○	⇨	□	□	▽
					จำนวน (ชิ้น)	ระยะ (เมตร)	เวลา (วินาที)	ประเภท	
1	เดินจากเครื่องควบคุมไปที่เครื่องปั๊มเครื่องที่ 3	1	30	30	○	⇨	□	□	▽
2	ตั้งค่ารุ่นการผลิตในแม่พิมพ์	1		15	●	⇨	□	□	▽
3	เดินจากเครื่องปั๊มชิ้นงานเครื่องที่ 3 ไปที่เครื่องที่ 4	1	5	10	●	⇨	□	□	▽
4	ตั้งค่ารุ่นการผลิตในแม่พิมพ์	1		15	●	⇨	□	□	▽
5	เดินกลับไปยังเครื่องควบคุม	1	35	30	○	⇨	□	□	▽
6	Resetเครื่อง	1		35	●	⇨	□	□	▽
7	Robot หยิบผ่านเหล็กวางบนสายพาน	1		5	●	⇨	□	□	▽
8	ทำความสะอาดแผ่นเหล็ก	1		5	●	⇨	□	□	▽
9	Robot หยิบผ่านเหล็กวางบนเครื่องปั๊มเครื่องที่ 1	1		5	●	⇨	□	□	▽
10	เครื่องปั๊มชิ้นงานเครื่องที่ 1 ปั๊มโครงชิ้นงาน	1		5	●	⇨	□	□	▽
11	Robot หยิบผ่านเหล็กวางบนเครื่องปั๊มเครื่องที่ 2	1		5	●	⇨	□	□	▽
12	เครื่องปั๊มชิ้นงานเครื่องที่ 2 ตัดขอบชิ้นงาน	1		5	●	⇨	□	□	▽
13	Robot หยิบผ่านเหล็กวางบนเครื่องปั๊มเครื่องที่ 3	1		5	●	⇨	□	□	▽
14	เครื่องปั๊มชิ้นงานเครื่องที่ 3 เจาะรูรอบที่ 1	1		5	●	⇨	□	□	▽
15	Robot หยิบผ่านเหล็กวางบนเครื่องปั๊มเครื่องที่ 4	1		5	●	⇨	□	□	▽
16	เครื่องปั๊มชิ้นงานเครื่องที่ 4 เจาะรูรอบที่ 2	1		5	●	⇨	□	□	▽
17	Robot หยิบผ่านเหล็กวางบนสายพาน	1		5	●	⇨	□	□	▽
18	ยกชิ้นงานจากสายพาน ไปที่โต๊ะตรวจสอบชิ้นงาน	1	2	10	○	⇨	□	□	▽
19	พนักงานตรวจสอบชิ้นงาน	1		20	○	⇨	■	□	▽
20	ยกชิ้นงานจัดเก็บใน Rack	1	1	10	○	⇨	□	□	▽
รวม					14	4	-	1	1

สำหรับกระบวนการเปลี่ยนรุ่นการผลิต เป็นกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่า (NVAN) เนื่องจากพนักงานต้องเดินจากเครื่องควบคุมตามเส้นทางสีแดง ไปยังเครื่องปั๊มชิ้นงานเครื่องที่ 3 และ เครื่องปั๊มชิ้นงานเครื่องที่ 4 เพื่อตั้งค่าเครื่องในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตเพียงพนักงานเดียว ดังรูปที่ 2 โดยกระบวนการเปลี่ยนรุ่นการผลิตมีทั้งหมด 20 ขั้นตอน โดยเริ่มจากขั้นตอนการปฏิบัติงานทั้งหมด 14 ขั้นตอน ใช้เวลา 120 วินาที ขั้นตอนการเคลื่อนย้าย 4 ขั้นตอน ใช้เวลาใน 80 วินาที ขั้นตอนตรวจสอบ 1 ขั้นตอน ใช้เวลา 20 วินาที และขั้นตอนการจัดเก็บ 1 ขั้นตอน ใช้เวลา 10 วินาที โดยกระบวนการรวมทั้งหมด 20 ขั้นตอน ใช้เวลา 230 วินาที หรือคิดเป็น 3.83 นาที มีระยะทางทั้งหมด 73 เมตร



ภาพที่ 2 แผนภาพการไหลของการเปลี่ยนรุ่นการผลิต (ก่อนปรับปรุง)



ภาพที่ 3 เลือกหัวข้อปัญหาด้วยหลักการพาเรโต (Pareto Chart)

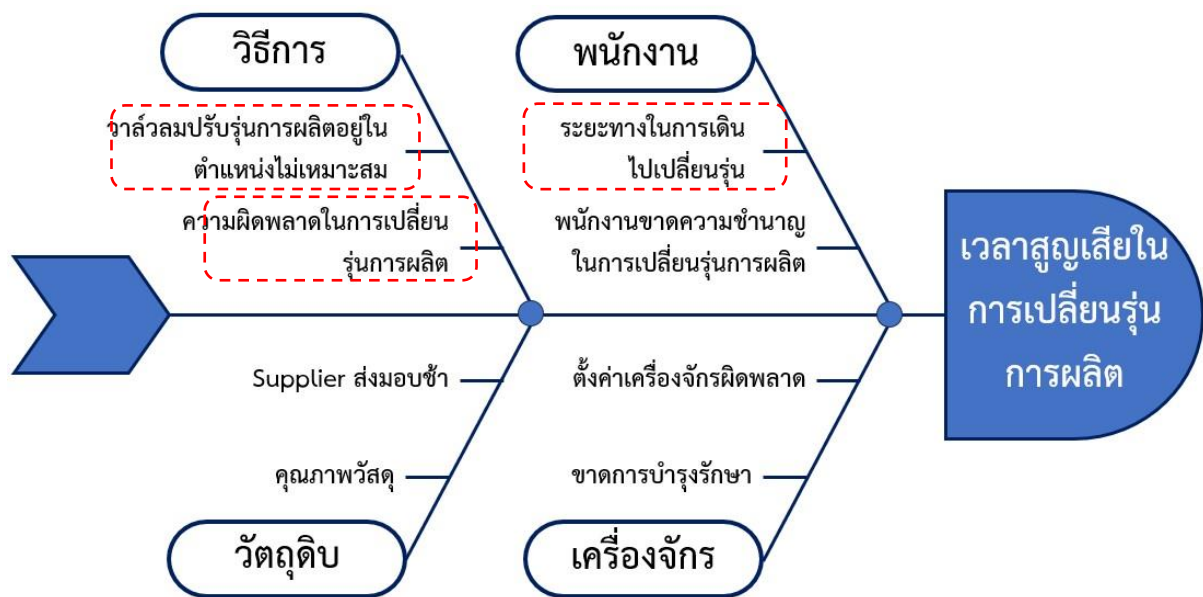
สาเหตุของปัญหาในกระบวนการผลิต

ผู้วิจัยจึงนำหลักการของเครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด (7 QC Tool) โดยนำพาเรโต (Pareto Chart) มาประยุกต์ใช้ตามหลักของกฎ 80:20 หรือ กฎของพาเรโต ที่ว่า สาเหตุหลัก 20% ส่งผลทำให้เกิดผลลัพธ์ 80% (อมรรัตน์ ปิ่นชัยมุล และ

คณะ, 2561), ดังนั้นผู้วิจัยจึงตัดสินใจเลือกปัญหาที่มีเปอร์เซ็นต์มาเป็นอันดับหนึ่ง คือ การเปลี่ยนรุ่นการผลิต มาเป็นตัวอย่างในการวิจัย ดังภาพที่ 3

วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนภูมิแก๊งปลา (Fishbone Diagram)

หลังจากการเก็บรวบรวมข้อมูลในวิจัยนี้ได้ใช้แผนภูมิแก๊งปลา (Fishbone Diagram) เพื่อวิเคราะห์ปัญหาซึ่งเครื่องมือดังกล่าวจะแสดงให้เห็นถึงปัญหาและที่มาได้อย่างชัดเจน (Russell & Taylor, 2013) ปัญหาที่สามารถดำเนินการแก้ไขและควบคุมได้จะอยู่ในส่วนของวิธีการและพนักงานดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนภูมิแก๊งปลาสำหรับวิเคราะห์ปัญหา

จากภาพที่ 4 ปัญหาที่ส่งผลให้กระบวนการผลิตเกิดเวลาสูญเสียสามารถวิเคราะห์ออกเป็น 2 ด้านดังนี้

1. ด้านวิธีการ

วาล์วลมเปลี่ยนรุ่นการผลิตอยู่ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม พนักงานทำงานลำบากและใช้พนักงานหลายพนักงานในการทำงาน ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตได้

2. ด้านพนักงาน

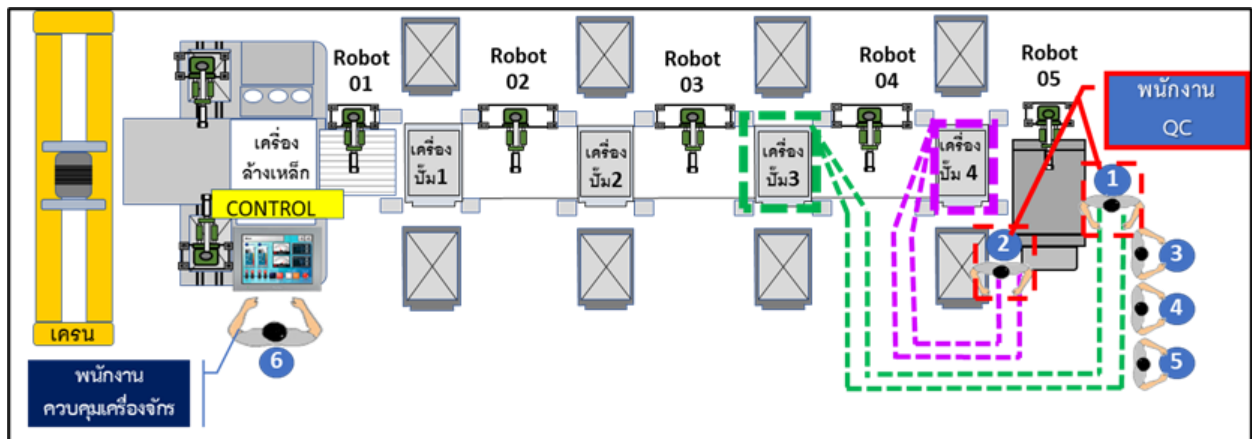
พนักงานขาดความชำนาญในการเปลี่ยนรุ่นการผลิต เนื่องจากการเปลี่ยนพนักงานบ่อยส่งผลให้เกิดความผิดพลาดและระยะทางในการเดินไปเปลี่ยนรุ่นการผลิตอยู่ไกล ส่งผลให้กระบวนการผลิตเกิดเวลาสูญเสียและเกิดการรอคอย

เสนอแนวทางแก้ไขปรับปรุง

วิธีที่ 1 การเพิ่มพนักงานและเปลี่ยนเส้นทางการเดินในการเปลี่ยนรุ่นการผลิต

โดยผู้วิจัยได้ผู้วิจัยได้นำหลัก ECRS ในหัวข้อ การจัดใหม่ (Rearrange) และ ลดความซับซ้อนของขั้นตอนการทำงาน (Simplify) ส่งผลทำให้กำจัดความสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนไหว (Motion) (ชยานุตัน ภูนาเถร ชลลดา ทองคำและสุพรรณิ อึ้งปัญสัตวงศ์, 2558). นำมาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการเพื่อกำจัดความสูญเสียในการทำงานช่วยให้ระบบการทำงานในองค์กรมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยการเปลี่ยนตำแหน่งพนักงานในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตและเส้นทางการเดิน ดังนั้นจึงเสนอการเพิ่มพนักงานในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตเป็น 2 พนักงาน (ใช้พนักงานเดิมในสายการผลิตเพียงเปลี่ยนตำแหน่งหน้าที่การทำงานเนื่องจากในขั้นตอนการเปลี่ยนรุ่นการผลิตจะ) และเปลี่ยนตำแหน่งพนักงานในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตเพื่อให้มีระยะการ

เดินที่สั้นลงและลดเวลาสูญเสียในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตได้ โดยให้พนักงานพนักงานที่ 1 (MAN 1) เดินเข้าไปเปลี่ยนรุ่นการผลิตในแม่พิมพ์ของเครื่องปั๊มเครื่องที่ 3 ตามเส้นทางการเดินสีเขียว และพนักงานพนักงานที่ 2 (MAN 2) เดินเข้าไปเปลี่ยนรุ่นการผลิตในแม่พิมพ์ของเครื่องปั๊มเครื่องที่ 4 ตามเส้นทางการเดินสีม่วง ภาพที่ 5



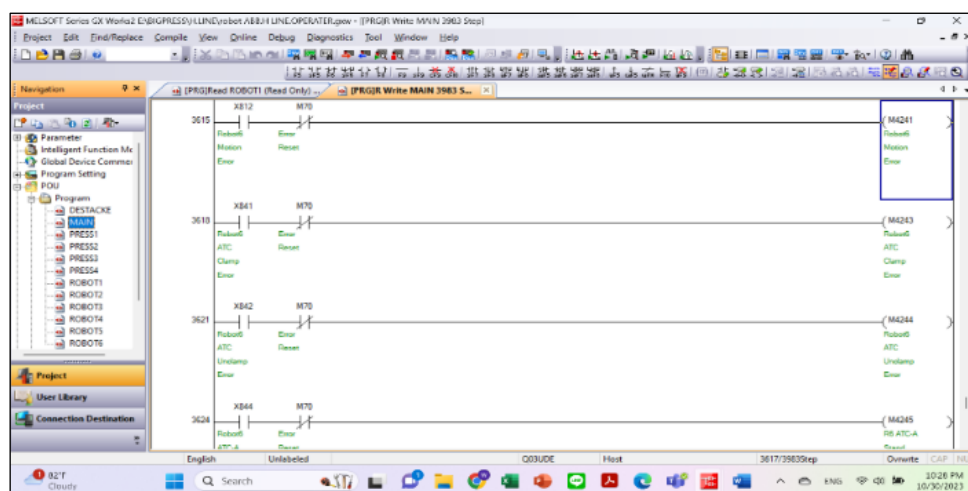
ภาพที่ 5 การแก้ไขวิธีที่ 1 การเพิ่มพนักงานและเปลี่ยนเส้นทางการเดินในการเปลี่ยนรุ่นการผลิต

วิธีที่ 2 การเปลี่ยนรุ่นการผลิตโดยใช้ระบบอัตโนมัติ

เป็นการนำระบบอัตโนมัติ เข้ามาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงวิธีที่ 2 เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษา มีการใช้การสั่งการด้วยโปรแกรม PLC ระหว่างเครื่องจักรและระบบอัตโนมัติ จึงนำมาต่อยอดให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยการ จัดทำระบบสั่งการวาร์ลุ่มด้วยโซลินอยด์ ที่ใช้ควบคุมโดยพนักงานเพียง 1 พนักงานในการเลือกเปลี่ยนรุ่นการผลิตขึ้นงานโมเดล A

ศึกษาระบบอัตโนมัติ และโปรแกรม PLC

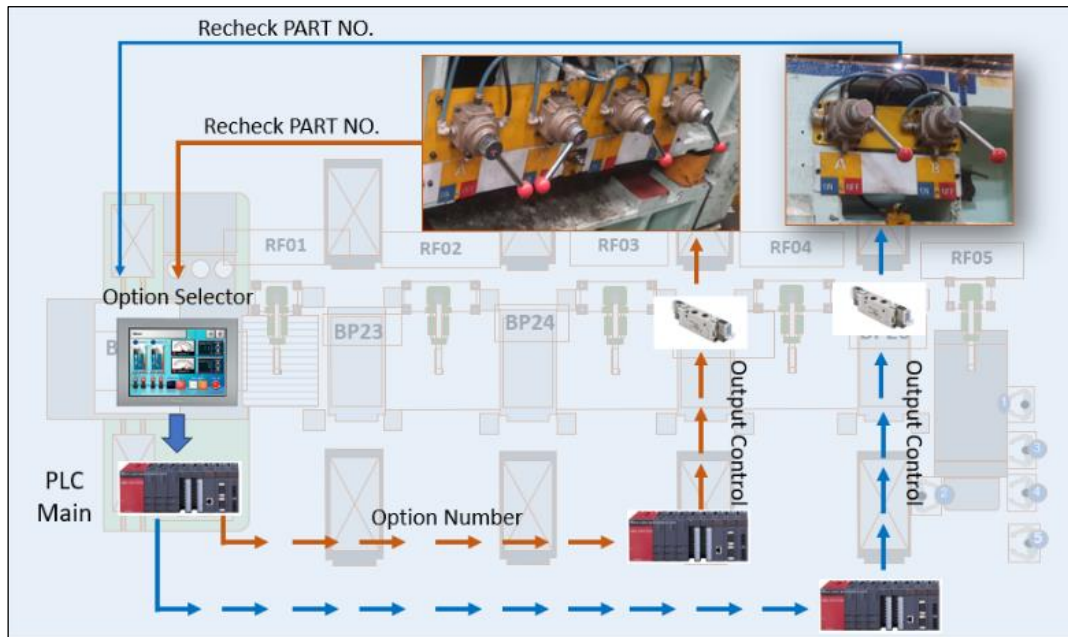
ศึกษาการทำงานของระบบอัตโนมัติ และศึกษาการใช้โปรแกรม PLC เนื่องจากระบบอัตโนมัติ เป็นระบบที่ทำงานผ่านการควบคุมจากคอมพิวเตอร์ หรือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเริ่มทำงานได้ด้วยตัวเองตามคำสั่งที่มนุษย์เป็นผู้ควบคุมเอาไว้ เป็นสิ่งที่มีความแม่นยำสูงกว่ามนุษย์ ปัจจุบันระบบอัตโนมัติเข้ามามีบทบาทมากขึ้น จึงศึกษารายละเอียดในแต่ละส่วน เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขปัญาให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังภาพที่ 6



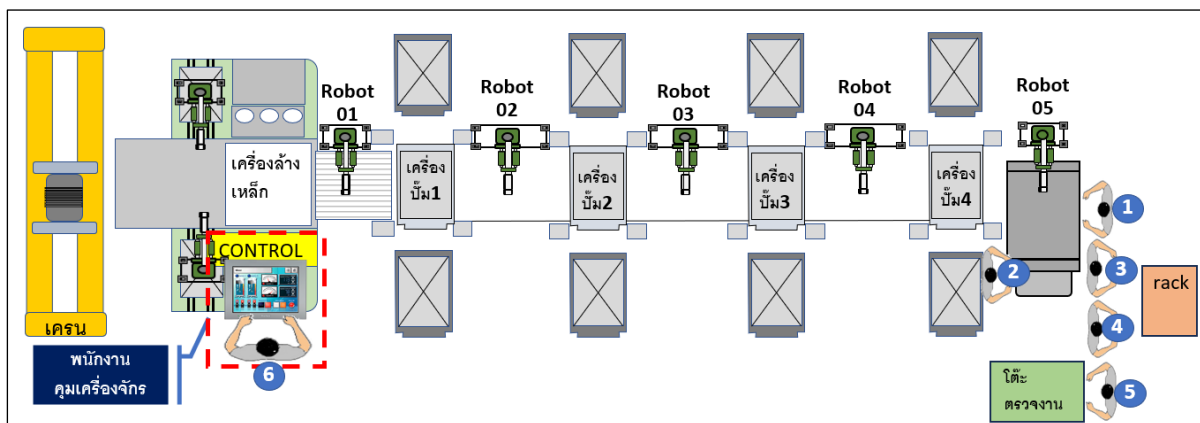
ภาพที่ 6 ศึกษาและเขียนโปรแกรม PLC

ออกแบบและวางแผนการทำงานของระบบอัตโนมัติ

การทำงานของระบบอัตโนมัติ จะทำงานโดยพนักงานควบคุมเครื่องจักร จะทำการเลือกรุ่นการผลิตของโมเดล A ผ่านหน้าจอควบคุม ที่ผู้ควบคุม โดยใช้ ระบบ PLC เข้ามาสื่อสารกับอุปกรณ์เพื่อสั่งการระบบ โซลินอยวาล์วลมของเครื่องปั๊ม ขึ้นงานเครื่องที่ 3 4 ที่ต่อเข้ากับแม่พิมพ์เพื่อเปลี่ยนรุ่นการผลิตตามความต้องการ ทำให้ลดระยะทางการเคลื่อนที่และเวลา การเปลี่ยนรุ่นการผลิตได้ ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ออกแบบการทำงานของระบบอัตโนมัติ

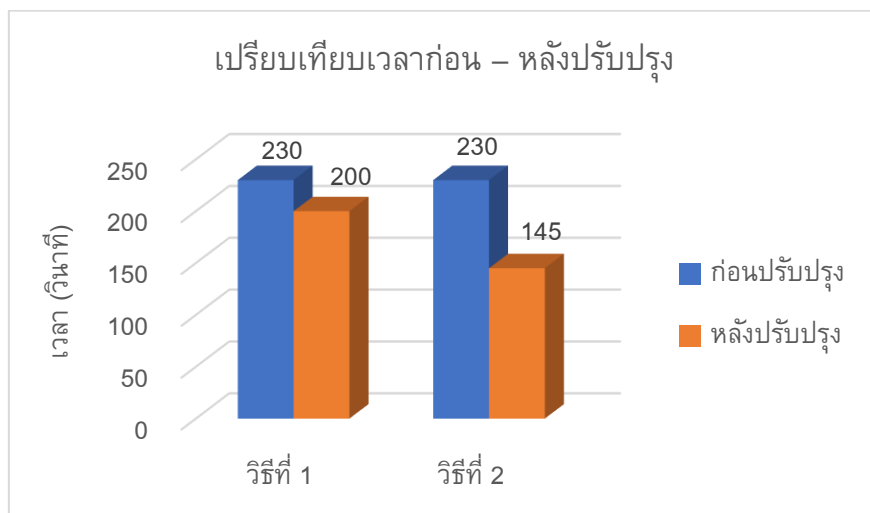


ภาพที่ 8 การแก้ไขวิธีที่ 2 การเปลี่ยนรุ่นการผลิตโดยใช้ระบบอัตโนมัติ

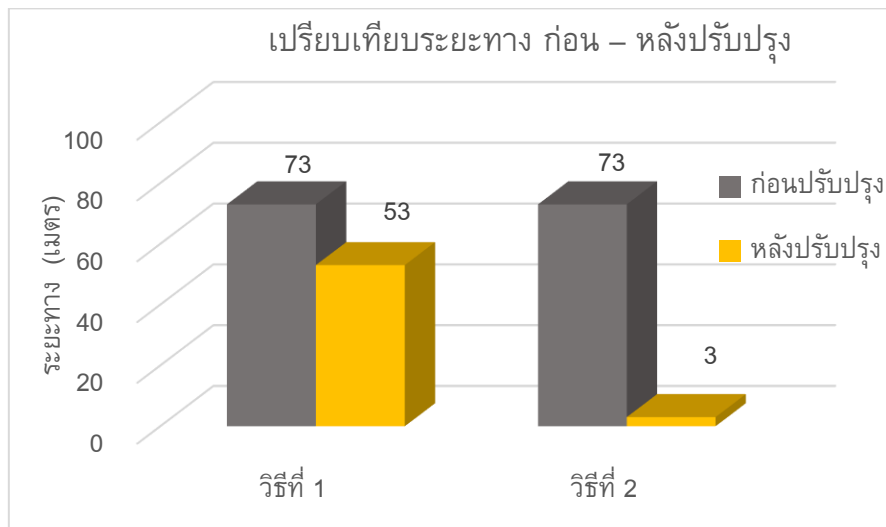
จากภาพที่ 8 การแก้ไขวิธีที่ 2 การเปลี่ยนรุ่นการผลิตโดยใช้ระบบ อัตโนมัติ จะทำงานโดยใช้พนักงานควบคุมเครื่องจักรเพียง 1 พนักงาน ทำการเลือกรุ่นการผลิตของโมเดล A ผ่านหน้าจอควบคุม โดยไม่ต้องเดินเข้าไปเปลี่ยนรุ่นการผลิตในแม่พิมพ์เครื่องปั๊มขึ้นงานทั้งสองเครื่อง

ผลการดำเนินงาน

ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามวิธีการที่กำหนด ทำให้พบปัญหาที่เกิดขึ้นต่อสายการผลิตซึ่งปัญหาเวลาการทำงานสูญเสียเปล่าของพนักงานและเครื่องจักร จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา และแนวทางการปรับปรุงแก้ไขการทำงานให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตมากขึ้น ลดเวลาสูญเสียเปล่าและต้นทุนการผลิตที่ไม่เกิดประสิทธิภาพในการทำงาน ส่วนของวิธีการทำงานจะใช้หลักการ ECRS และ 7 waste และ ระบบอัตโนมัติ มาใช้เป็นหลักการในการปรับปรุงกระบวนการ ผลดำเนินการปรับปรุงด้วยวิธีที่ 1 โดยการเปลี่ยนตำแหน่งพนักงานในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตและเส้นทางการเดิน ใช้เวลาทั้งหมด 200 วินาที และใช้ระยะทางทั้งหมด 53 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับผลดำเนินการก่อนปรับปรุง เมื่อเปรียบเทียบผลดำเนินการจะเห็นได้ว่า ใช้เวลาทั้งหมด 200 วินาที หรือ 3.33 นาที เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตลดลงจากเดิม 30 วินาที คิดเป็นร้อยละ 13.04 นอกจากนี้ยังดำเนินการเปรียบเทียบระยะทางทั้งหมด 53 เมตร ระยะทางที่ใช้ในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตลดลงจากเดิม 20 เมตร คิดเป็นร้อยละ 27.4 ผลดำเนินการปรับปรุงด้วยวิธีที่ 2 การเปลี่ยนรุ่นการผลิตโดยใช้ระบบอัตโนมัติ จะทำงานโดยใช้พนักงานควบคุมเครื่องจักร (MAN 6) เพียง 1 พนักงาน ทำการเลือกรุ่นการผลิตผ่านหน้าควบคุม ใช้เวลา 145 วินาที หรือ 2.42 นาที ใช้ระยะทางทั้งหมด 3 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับผลดำเนินการก่อนปรับปรุง เมื่อเปรียบเทียบผลดำเนินการจะเห็นได้ว่า ใช้เวลา 145 วินาที หรือ 2.42 นาที เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตลดลงจากเดิม 85 วินาที คิดเป็นร้อยละ 36.96 นอกจากนี้เปรียบเทียบระยะทางทั้งหมด 3 เมตร ระยะทางที่ใช้ในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตลดลงจากเดิม 70 เมตร คิดเป็นร้อยละ 95.89 ดังภาพที่ 9 และ 10



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบเวลาก่อน – หลังปรับปรุง ทั้ง 2 วิธี



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบระยะทาง ก่อน – หลังปรับปรุง ทั้ง 2 วิธี

สรุปผลการทดลอง

วิธีที่ 1 การเพิ่มพนักงานและเปลี่ยนเส้นทางการเดินในการเปลี่ยนรุ่นการผลิต

การปรับปรุงโดยนำหลัก ECRS ในหัวข้อ การจัดใหม่ (Rearrange) และ 7 Waste ในหัวข้อ การกำจัดความสูญเสียนื่องจากการเคลื่อนไหว (Motion) นำมาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการเพื่อกำจัดความสูญเปล่าในการทำงานช่วยให้ระบบการทำงานในองค์กรมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยการเปลี่ยนตำแหน่งพนักงานในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตและเส้นทางการเดิน ใช้เวลาทั้งหมด 200 วินาที หรือ 3.33 นาที มีระยะทาง 53 เมตร เวลาลดลงจากเดิม 30 วินาที คิดเป็นร้อยละ 13.04 และระยะทางลดลง 20 เมตร คิดเป็นร้อยละ 27.4

วิธีที่ 2 การเปลี่ยนรุ่นการผลิตโดยใช้ระบบ อัตโนมัติ

การปรับปรุงโดยนำระบบ อัตโนมัติ เข้ามาประยุกต์ใช้ การทำงานของอัตโนมัติ จะทำงานโดยพนักงานควบคุมเครื่องจักร จะทำการเลือกรุ่นการผลิตของโมเดล A ผ่านหน้าจอบควบคุมที่ตู้ควบคุมโดยใช้ ระบบ PLC เข้ามาสื่อสารกับอุปกรณ์เพื่อสั่งการระบบ ใช้เวลาทั้งหมด 145 วินาที หรือ 2.42 นาที มีระยะทาง 3 เมตร เวลาลดลงจากเดิม 85 วินาที คิดเป็นร้อยละ 36.96 และ ระยะทางลดลง 70 เมตร คิดเป็นร้อยละ 95.89

ในปัจจุบันได้นำวิธีการที่ 2 การใช้ระบบอัตโนมัติ ไปใช้ในการเปลี่ยนรุ่นการผลิต เนื่องจากการสรุปผลการดำเนินงานทั้ง 2 วิธี พบว่าวิธีที่ 2 ใช้เวลาในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตและใช้ระยะทางที่น้อยกว่าการปรับปรุงวิธีที่ 1 โดยใช้ระยะเวลาในการเปลี่ยนรุ่นการผลิตน้อยกว่าวิธีที่ 1 เป็นเวลา 55 วินาที และใช้ระยะทางที่สั้นกว่า 50 เมตร

เอกสารอ้างอิง

- จิรกาล กัลยาโพธิ์ และ จิรพัฒน์ เจาประเสริฐวงศ์. (2564). การลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตยางรองล้อรถยนต์. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์*, 28(1), 78-92.
- ชญาอนุตน์ ภูนาธร, ชลดา ทองคำ, และ สุพรรณิ อึ้งปัญสัตวงศ์. (2558). การผลิตแบบสลิมนิโรงงานอุตสาหกรรม.[วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- นพพล ศรีพุทธา และ บุญสิน นาดอนตู. (2562). การลดความสูญเปล่าในกระบวนการกลึงข้อต่อท่อโดยใช้เทคนิค ECRS. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 11, จังหวัดเชียงใหม่.
- นันทพันธ์ กนกศิริจุธิยา. (2564). การลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน HDD โดยเทคนิค ECRS. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี*, 5(1), 77-91.

- บัณฑิต อินทรีย์มีศักดิ์ และ พิพัฒน์ เลิศโกวิทย์. (2567). การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตของชิ้นส่วนยานยนต์ เพื่อทำการลดต้นทุน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี*, 8(1), 44-59.
- สำนักงานเศรษฐกิจการคลัง (2566). รายงานประจำปี 2566. สืบค้นจาก <https://www.fpo.go.th>.
- อมรรัตน์ ปิ่นชัยมูล และคณะ (2561), การปรับปรุงสายการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ด้วยเครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหกรรม. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 14, 93-105.
- Russell, R. & Taylor, B. (2556). การจัดการการดำเนินงาน Operation Management. (ภูษิต วงศหลอสาชช, ผู้แปล). กรุงเทพฯ: ทอป.
- Poppendieck, M. (2002). Lean software development: An agile toolkit. *Addison-Wesley*.

Translated Thai References

- Kanyapho, J. & Ngaoprasertwong, J. (2021). Reducing waste in the production process of car wheel rubber. *Engineering Journal*, 28(1), 78-92.
- Phunather, C., Thongkham, C., & Ungpansattawong, S. (2015). *Lean Production in industrial Plants*. [Master of Science Thesis]. Khon Kaen University.
- Sripuththa, N. & Nadorndu, B. (2019). Reducing waste in the pipe joint turning process using the ECRS technique. *The 11th RMUTT Conference*, Chiang Mai.
- Kanoksirirujitaya, N. (2021). Reducing waste in the production process of HDD components using ECRS technique. *Journal of Science and Technology, Thonburi University*, 5(1), 77-91.
- InseemeeSak, B. & Lertkowitz, P. (2024). Improving the production process efficiency of automotive components to reduce costs. *Journal of Science and Technology, Thonburi University*, 8(1), 44-59.
- Fiscal Policy Office (2023). Annual Report 2023. Retrieved from <https://www.fpo.go.th>.
- Pinchaimong, A. & et al. (2018). Improving the automotive parts production line with industrial engineering tools. *Academic Journal of Industrial Technology*, 14, 93-105.
- Russell, R. & Taylor, B. (2013). Operation Management. (Phusit Wonglorsaichon, Translator). Bangkok: Top Publishing.

Received: Mar 25, 2024

Revised: Dec 24, 2024

Accepted: Jul 25, 2024

การใช้พลังงานไฟฟ้าแบบผสมของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 สำหรับการแข่งขัน BWSC-2023 รุ่น CRUISER CLASS

HYBRID ELECTRIC POWER USAGE OF THE STC-4 SOLAR ELECTRIC VEHICLE FOR THE BWSC-2023 CRUISER CLASS COMPETITION

กัจจาด ใจตรง¹ ปิยะนัฐ ใจตรง²¹สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าและระบบควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรีKumjat Jaitrong¹ Piyanat Jaitrong²¹Electrical Technology and Automatic Control System, Faculty of Engineering and Technology,
Siam Technology College

E-mail: kumjatj@siamtechno.ac.th

²Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University

E-mail: piyanat@thonburi-u.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าแบบผสมของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 ขนาด 4 ที่นั่ง สำหรับการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge 2023 รุ่น Cruiser Class โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าร่วมกับแบตเตอรี่และทดสอบการใช้พลังงานในสภาวะการใช้งานจริง ซึ่งตัวถังทำด้วยไฟเบอร์กลาส น้ำหนักรถ 2,010 kg และน้ำหนักบรรทุกน้ำหนักบรรทุกทุกเท่ากับ 2,330 kg ที่ระยะทางแข่งขันที่สามารถชาร์จประจุแบตเตอรี่ได้ 1,000 km ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านชนิดอัดขนาด 12 kW ที่แรงดันไฟฟ้า 96 V จำนวน 2 ล้อ เพื่อขับเคลื่อนล้อหลัง ส่วนแหล่งจ่ายไฟฟ้าใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวแบบอ่อนตัวได้ที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 756 W ที่แรงดันไฟฟ้า 79.8 V เพื่อประจุไฟฟ้าให้แบตเตอรี่ NMC ขนาด 97 kWh ที่แรงดันไฟฟ้า 96 V ผลการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์โดยเก็บผลการใช้พลังงานในขณะเข้าร่วมการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge 2023 ตั้งแต่จุดเริ่มต้นที่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นระยะทาง 322 km โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ 44,554.20 Wh พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 1,032.44 Wh รวมพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปทั้งหมด 45,586.64 Wh คิดเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 42,299.40 Wh และพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 3,287.30 Wh คงเหลือพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ 54,700.60 Wh แต่ถ้าหากใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 42,299.40 Wh เพื่อระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถขับเคลื่อนได้เป็นระยะทางประมาณ 280 km

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านชนิดอัด, BWSC-2023 รุ่น Cruiser Class

Abstract

The objective of this research is to analyze the combined electrical energy consumption of the 4-seat STC-4 solar electric vehicle for the Bridgestone World Solar Challenge 2023 Cruiser Class competition. It utilizes solar energy as an electrical source together with batteries, and to test energy use under actual operating conditions. The body is made of fiberglass with a weight of 2,010 kg for the car. The total weight of the car, including the cargo, is 2,330 kg. It can cover a racing distance that allows battery charging for up

to 1,000 km. It uses a brushless direct current electric motor with a power of 12 kW at an electrical voltage of 96 V. The vehicle has 2 wheels and is rear-wheel drive. The power supply section utilizes a single, flexible monocrystalline silicon solar panels with a maximum power ranging of 756 W. The electrical voltage of this solar panel is 79.8 V. It charges an NMC battery with a capacity of 97 kWh, operating at an electrical voltage of 96 V. The test results of using electric power for a motor powered by a combination of batteries and solar cells during the Bridgestone World Solar Challenge 2023 from the starting point in Darwin to Katherine, a distance of 322 km. The electric power used to drive the motor was 44,554.20 Wh, the electric power used in the solar electric vehicle was 1,032.44 kWh, and the total electric power used was 45,586.64 Wh, which was calculated as electric power consumption from the battery was 42,299.40 Wh and electric power from the solar cell was 3,287.30 Wh, leaving 54,700.60 Wh of electric power in the battery. However, if the electric power from the 42,299.40 Wh battery is used only for the solar electric vehicle driving system, the solar electric vehicle can drive a distance of about 280 km.

Keywords: Solar Energy, Brushless DC Hub Motor, BWSC-2023 Cruiser Class Model

บทนำ

ปัจจุบันการใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนสำหรับการขนส่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความสะดวกต่อการใช้งาน แต่การใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงมีผลต่อปัญหาการปล่อยแก๊สเรือนกระจกขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ (Rajabi, H.S. et al., 2019) สภาวะโลกร้อนทำให้ทุกภาคส่วนลดการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลลง โดยการใช้พลังงานทดแทน แนวโน้มการใช้ยานพาหนะในการเดินทางเริ่มเปลี่ยนแปลงเป็นพาหนะที่ใช้พลังงานขับเคลื่อนจากพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น (นภัทร วัฒนเทพินทร์ และคณะ, 2559) ส่วนการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า จากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศโลกจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,353 \text{ W/m}^2$ โดยมีค่าการแผ่รังสีเฉลี่ยอยู่ระหว่าง $1,350\text{--}1,440 \text{ W/m}^2$ ซึ่งเป็นค่าอัตราการตกกระทบของพลังงานแสงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่ในทิศทางตั้งฉากกับดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศโลกและจะมีค่าแตกต่างกันออกไปในแต่ละเดือน เมื่อการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องลงมาประกอบด้วยพลังงานแสงและพลังงานความร้อน พลังงานทั้งสองนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับรถไฟพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แผงโซลาร์เซลล์ และเติมประจุไฟฟ้าให้กับยานยนต์ไฟฟ้าได้ (Secinaro, S. et al., 2020) และการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเพราะเป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ไม่ได้ใช้กระบวนการเผาไหม้ (Rizzo, G. et al., 2021) การพัฒนารถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีปัจจัย 3 ส่วน ประกอบด้วยส่วนที่ 1 แบตเตอรี่รถไฟพลังงานแสงอาทิตย์ โดยออกแบบให้สามารถใช้งานได้ตามระยะทางที่กำหนด ส่วนที่ 2 ระบบส่งกำลัง มีการออกแบบและสร้างเพลาส่งกำลังล้อให้เหมาะสมกับชุดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ส่วนที่ 3 ระบบบังคับเลี้ยว มีการออกแบบและปรับให้มุมบังคับเลี้ยวล้อหน้าด้านใดด้านหนึ่งมากที่สุดขณะรถเคลื่อนที่ (Rizzo, G. et al., 2010)

การสร้างรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเข้าร่วมการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge 2023 รุ่น Cruiser Class ที่มีระยะทางการแข่งขัน 3,022 กม ข้ามทวีปออสเตรเลียจากเมือง Darwin ทางตอนเหนือไปยังเมือง Adelaide ที่ทางใต้ของประเทศออสเตรเลีย ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนผังเส้นทางการแข่งขัน

ที่มา <https://www.springnews.co.th/keep-the-world/energy/842519>

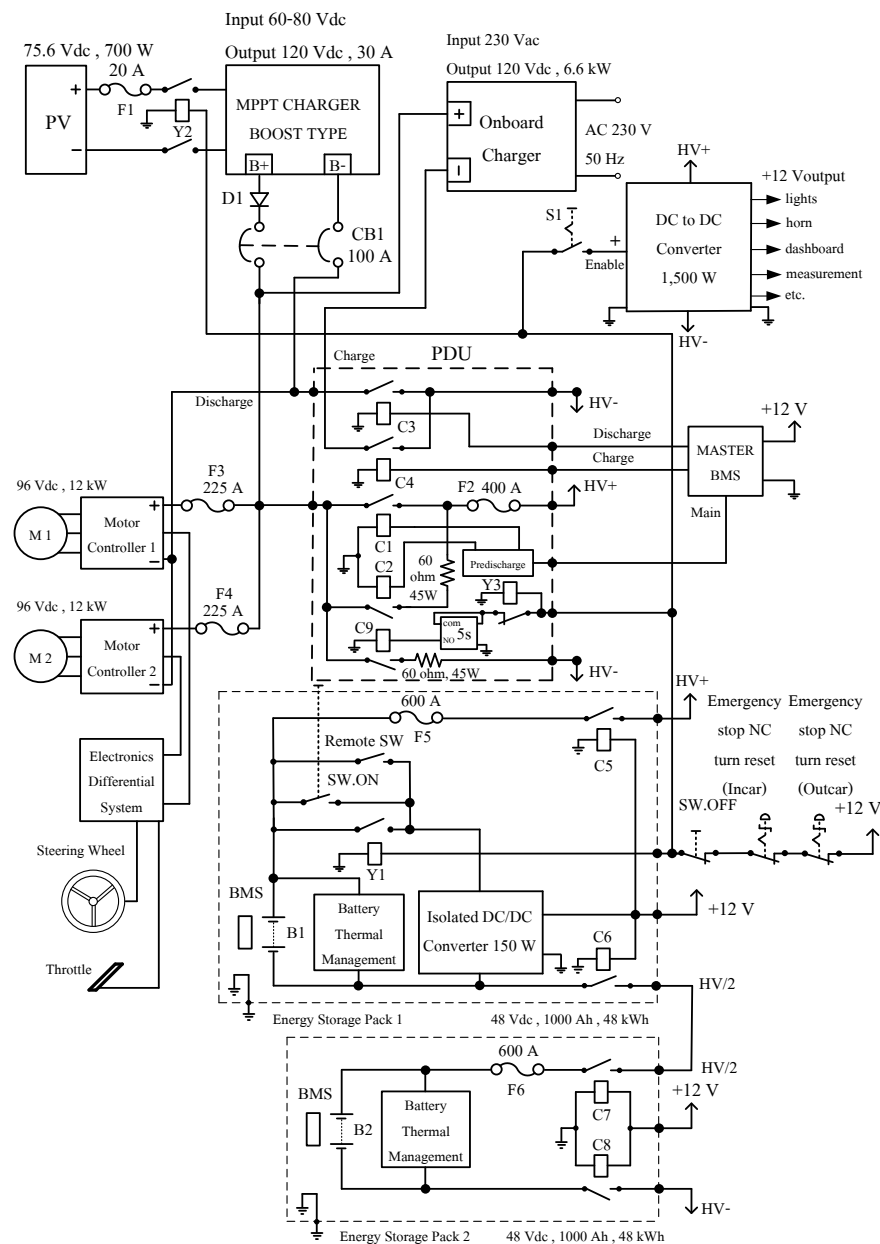
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 ขนาด 4 ที่นั่งสำหรับการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge 2023 รุ่น Cruiser Class ที่ใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่ที่มีการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และเข้าร่วมการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge 2023 รุ่น Cruiser Class โดยเก็บผลการใช้พลังงานทั้งหมดของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากจุดเริ่มต้นที่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นระยะทาง 322 km เนื่องจากภูมิประเทศตั้งแต่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นพื้นที่ที่มีความลาดชันทำให้การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สูง อีกทั้งสภาพความเข้มแสงและอุณหภูมิของอากาศตั้งแต่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นเมืองที่อยู่ในแนวเขตใกล้เส้นศูนย์สูตรทำให้ความเข้มแสงสูงเป็นผลให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่ที่มีการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านชนิดฮับมอเตอร์ ตั้งแต่จุดเริ่มต้นที่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นระยะทาง 322 km

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อวางแผนรูปแบบการพัฒนา ระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมในการใช้งานและหาสมรรถนะของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งการทำงานของมีดังต่อไปนี้ เมื่อกดสวิตช์ SW.ON หรือ กดสวิตช์ Remote SW ทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 48 V จากแบตเตอรี่ชุดที่ 1 จ่ายไฟให้กับ Isolated DC/DC Converter เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 48 V เป็น 12 V แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V ทำให้รีเลย์ Y1 ทำงานและคอนแทคของรีเลย์ต่อวงจรการจ่ายไฟให้กับ Isolated DC/DC Converter และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V ทำให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ C5, C6, C7 และ C8 ทำงานและต่อวงจรแบตเตอรี่ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายออกมาจากแบตเตอรี่มีขนาด 96 V เพื่อจ่ายให้กับกล่อง PDU และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V ยังทำให้รีเลย์ Y2 ทำงานและต่อวงจรไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับ MPPT CHARGER BOOST TYPE เพื่อปรับแรงดันให้สามารถเชื่อมต่อระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับกล่องควบคุมมอเตอร์ เมื่อกดสวิตช์ Discharge ที่ MASTER BMS ระบบไฟฟ้าในกล่อง PDU เข้าโหมด Predischage 5 s แมกเนติกคอนแทคเตอร์ C2 และ C3 ทำงานและต่อวงจร หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็นโหมด Discharge แมกเนติกคอนแทคเตอร์ C2 หยุดทำงาน C1 ทำงานแทนและต่อวงจร ในโหมดนี้ระบบไฟฟ้าในกล่อง PDU จ่ายไฟให้กับกล่องควบคุมมอเตอร์ เมื่อเปิด CB1 ในตำแหน่ง ON พลังงานไฟฟ้าจาก MPPT CHARGER BOOST TYPE เชื่อมต่อระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับกล่องควบคุมมอเตอร์ ในขณะนี้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่และแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้กับกล่องควบคุมมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า 2 ล้อหลัง ส่วนการบังคับเลี้ยวทางอิเล็กทรอนิกส์ใช้ Electronic differential system ที่ติดตั้งตัวต้านทานปรับค่าได้ที่แกนพวงมาลัยเพื่อวัดค่าแรงบิดที่ตำแหน่งแกนพวงมาลัย ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ถูกส่งไปยังกล่องบังคับเลี้ยวทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประมวลผลแรงบิดแกนพวงมาลัย เพื่อใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า 2 ล้อหลัง เมื่อกดสวิตช์ SW.OFF แมกเนติกคอนแทคเตอร์ C1, และ C3 หยุดทำงาน ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์หยุดทำงาน พลังงานที่ค้างในกล่องควบคุมมอเตอร์ถูก Discharge ด้วยแมกเนติกคอนแทคเตอร์ C9 ผ่านตัวต้านทาน 60 Ω เป็นเวลา 5 s เมื่อกดสวิตช์ Charge ที่ MASTER BMS ระบบไฟฟ้าในกล่อง PDU เข้าโหมด Charge แมกเนติกคอนแทคเตอร์ C1 และ C4 ทำงานและต่อวงจรไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับ Onboard charger เพื่อประจุไฟฟ้าลงไปยังแบตเตอรี่ทั้ง 2 ชุด



ภาพที่ 2 วงจรไฟฟ้าของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ STC-4

ระบบขับเคลื่อนและการควบคุม

มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ชนิดฮับมอเตอร์ ยี่ห้อ QS Motor ขนาดกำลังไฟฟ้า 12 kW ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 96 V และมีค่าความเร็วรอบสูงสุด 10,000 rpm โดยมอเตอร์จะติดตั้งที่ศูนย์กลางล้อ และใช้ล้อขนาด 15 นิ้ว ดังแสดงในภาพที่ 3 ส่วนกล่องควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านเป็นแบบ 2 จุดภาค ยี่ห้อ Fardriver เป็นกล่องควบคุมมอเตอร์ที่สามารถคืนพลังงานได้เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยแรงเฉื่อย ดังแสดงในภาพที่ 4 และระบบควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า 2 ล้อหลัง ด้วยระบบบังคับเลี้ยวทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics differential system) โดยติดตั้งตัวต้านทานปรับค่าได้ที่แกนพวงมาลัยเพื่อวัดค่าวงเลี้ยวจุดหมุนที่ตำแหน่งแกนพวงมาลัย ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะถูกส่งไปยังกล่องระบบบังคับเลี้ยวทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประมวลผลวงเลี้ยวแกนพวงมาลัย เพื่อใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า 2 ล้อหลัง ส่วนการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าใช้คันเร่งรถไฟฟ้าแบบแป้นเหยียบ ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านยี่ห้อ QS



ภาพที่ 4 กล่องควบคุมยี่ห้อ Fardriver



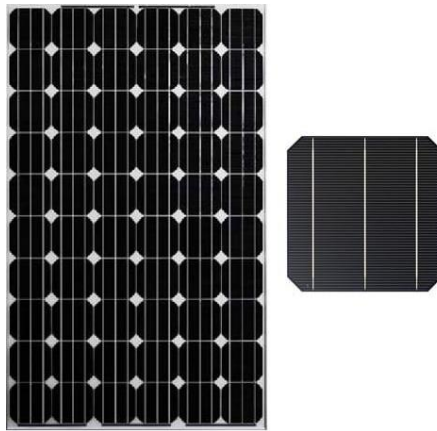
ภาพที่ 5 ระบบควบคุมบังคับเลี้ยวทางอิเล็กทรอนิกส์

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

รถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 2 ส่วน คือ 1) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน NMC Pack (8P14S) ยี่ห้อ CATL 811 ขนาดพิกัดต่อเซลล์ 3.7 V ความจุ 117 Ah โดยแบตเตอรี่มีจำนวน 2 ชุด ต่อแบบอนุกรม ขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 96 V ความจุรวมของแบตเตอรี่ 97 kWh โดยแบตเตอรี่ที่ใช้งานจำนวน 1 ชุด ดังแสดงในภาพที่ 6 2) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคารถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นชนิดซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Pmax) 756 W จำนวน 1 แผง โดยมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Vmp) 79.8 V กระแสไฟฟ้าสูงสุด (Imp) 9.47 A แรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจร (Voc) 92.1 V และกระแสไฟฟ้าสูงสุด (Isc) 10.73 A ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 6 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน NMC Pack (8P14S) พิกัดแรงดันไฟฟ้าขนาด 48 V



ภาพที่ 7 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว

ที่มา <https://www.infinitysolar.co.zw/monocrystalline-solar-cells-vs-polycrystalline-which-is-better/>

ระบบควบคุมการประจุไฟฟ้า

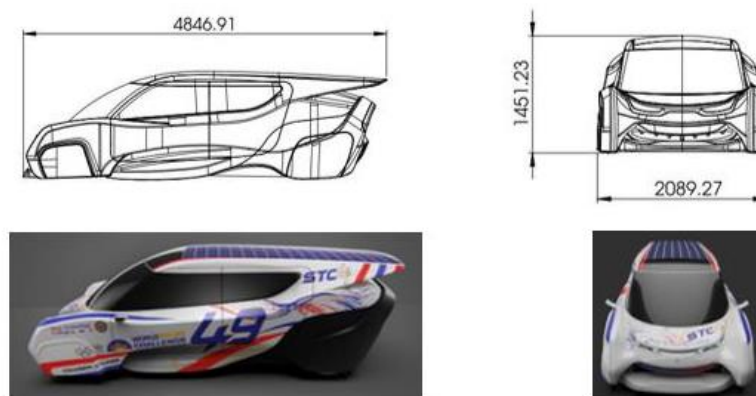
อุปกรณ์ควบคุมการประจุไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเก็บพลังงานเข้าแบตเตอรี่และจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้ Motor Controller เป็นอุปกรณ์ MPPT Charger Boost Type ที่มีฟังก์ชันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต 120 V กระแสไฟฟ้าสูงสุด 12 A ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 MPPT Charger Boost Type

วิธีการทดสอบ

การทดสอบสมรรถนะของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 ในภาพที่ 9 โดยการทดสอบจริงในการเข้าร่วมการแข่งขัน World Solar Challenge 2023 ซึ่งบทความวิจัยนี้วัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในระหว่างการแข่งขันรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากจุดเริ่มต้นที่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นระยะทาง 322 km เพื่อเป็นข้อมูลในการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 ต่อไป



ภาพที่ 9 รถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge 2023 รุ่น Cruiser Class

สรุปผลการวิจัย

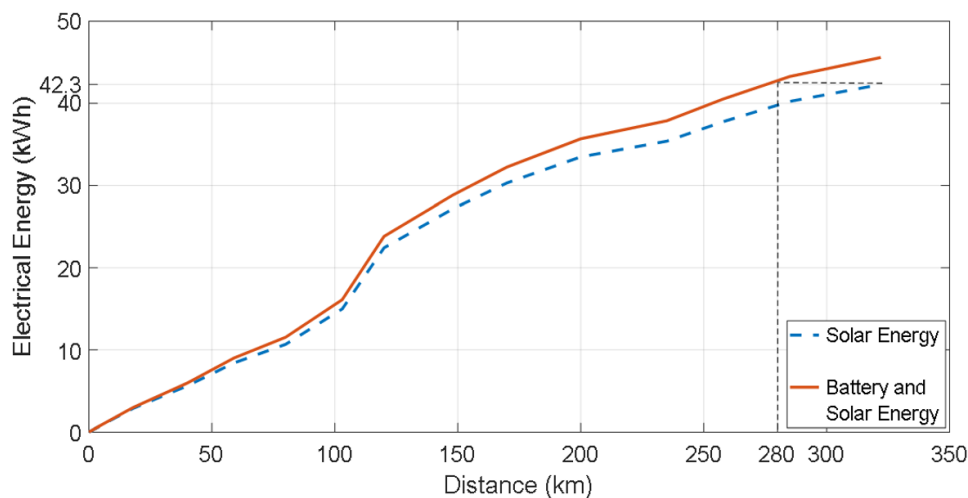
งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าแบบผสมของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อเข้าร่วมการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge 2023 รุ่น Cruiser Class โดยมีจุดเริ่มต้นที่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นระยะทาง 322 km

1. การใช้พลังงานไฟฟ้าแบบผสมของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เมื่อแบตเตอรี่จ่ายพลังงานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะเข้าร่วมการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge 2023 รุ่น Cruiser Class

การใช้พลังงานไฟฟ้าในระหว่างการแข่งขันรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากจุดเริ่มต้นที่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นระยะทาง 322 กิโลเมตร มีการใช้พลังงานไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงเป็นรูปกราฟได้ในภาพที่ 10

ตารางที่ 1 การใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ขับเคลื่อนเมื่อแบตเตอรี่จ่ายพลังงานร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

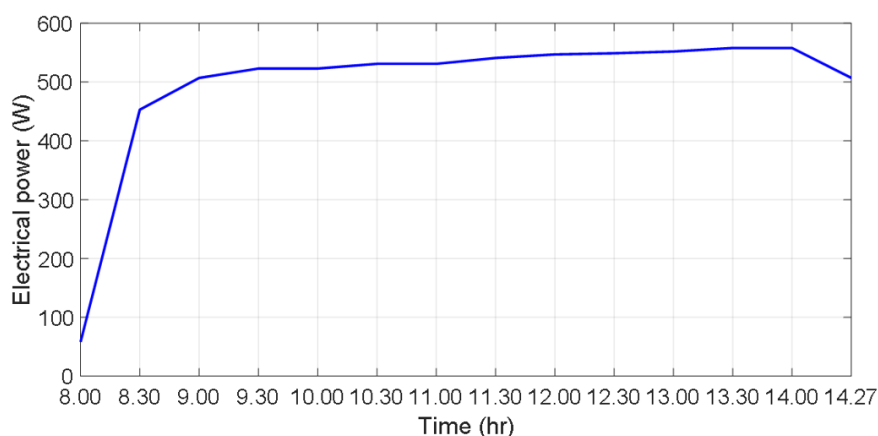
วันที่	เวลา	ระยะทาง	กำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่ายให้ระบบ	พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จ่ายให้ระบบ	กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์	กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์	พลังงานขับเคลื่อนมอเตอร์	พลังงานที่ใช้ในรถ
	(h)	(km)	(W)	(Wh)	(W)	(Wh)	(W)	(Wh)	(Wh)
22/10/23	8.00	0	0	0	358	0.99	0	0	0.44
	8.30	18	5,731.8	2,869.4	453	105.78	6,024.8	2,894.74	80.44
	9.00	40	5,498.5	5,609.0	507	342.09	5,845.5	5,790.6	160.44
	9.30	59	6,679.7	8,402.5	523	602.07	7,042.7	8,764.12	240.44
	10.00	80	8,104.4	10,672.3	523	863.57	8,467.4	11,215.4	320.44
	10.30	103	7,965.5	14,980.5	531	1,128.60	8,336.5	15,708.6	400.44
	11.00	120	16,185.0	22,427.9	531	1,394.10	16,556	23,341.5	480.44
	11.30	148	7,132.4	27,170.2	541	1,662.20	7,513.4	28,271.9	560.44
	12.00	170	5,460.1	30,307.6	547	1,933.40	5,847.1	31,600.5	640.44
	12.30	200	7,196.1	33,476.0	549	2,207.87	7,585.1	34,963.4	720.44
	13.00	235	5,098.1	35,393.1	552	2,483.50	5,490.1	37,076.1	800.44
	13.30	258	4,824.0	37,775.2	558	2,759.70	5,222.0	39,654.5	880.44
	14.00	285	4,954.9	40,236.7	558	3,038.70	5,352.9	42,315.0	960.44
	14.27	322	413.7	42,299.4	507	3,287.30	760.7	44,554.2	1,032.44



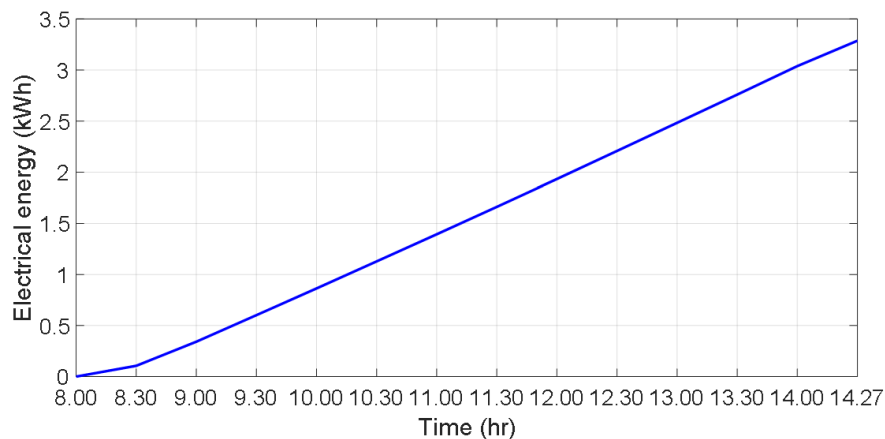
ภาพที่ 10 การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากจุดเริ่มต้นที่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นระยะทาง 322 km

จากภาพที่ 10 การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยจุดเริ่มต้นที่เมือง Darwin เวลา 8.00 น. เมื่อเปิดระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าจ่ายให้ระบบควบคุมรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างเพียงพอ พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไม่ได้จ่ายให้ระบบควบคุม เมื่อเหยียบคันเร่งรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่และเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ในการเดินทางถึงเมือง Katherine เวลา 14.27 น. ระยะทางประมาณ 322 km ใช้ระยะเวลาเดินทาง 6 ชั่วโมง 27 นาที โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ 44,554.20 Wh พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 1,032.44 Wh รวมพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปทั้งหมด 45,586.64 Wh คิดเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 42,299.40 Wh และพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 3,287.30 Wh คงเหลือพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ 54,700.60 Wh แต่ถ้าหากใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 42,299.40 Wh เพื่อระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถขับเคลื่อนได้เป็นระยะทางประมาณ 280 km

จากตารางที่ 1 ค่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระหว่างการแข่งขันรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากจุดเริ่มต้นที่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นระยะทาง 322 km โดยในช่วงเวลาประมาณ 13.30 น. - 14.00 น. เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตค่ากำลังไฟฟ้าได้สูงสุดประมาณ 558 W ดังแสดงในภาพที่ 11 เมื่อถึงเมือง Katherine เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 3,287.30 Wh ที่เวลา 14.27 น. ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 11 กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากจุดเริ่มต้นเมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นระยะทาง 322 km



ภาพที่ 12 การผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จากจุดเริ่มต้นเมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นระยะทาง 322 km

อภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าแบบผสมของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 ขนาด 4 ที่นั่ง สำหรับการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge 2023 รุ่น Cruiser Class โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าร่วมกับแบตเตอรี่และทดสอบการใช้พลังงานในสภาวะการใช้งานจริง ซึ่งตัวถังทำด้วยไฟเบอร์กลาส น้ำหนักรถ 2,010 kg และน้ำหนักบรรทุกน้ำหนักบรรทุกทุกเท่ากับ 2,330 kg ที่ระยะทางแข่งขันที่สามารถชาร์จประจุแบตเตอรี่ได้ 1,000 km ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านชนิดอับขนาด 12 kW ที่แรงดันไฟฟ้า 96 V จำนวน 2 ล้อ เพื่อขับเคลื่อนล้อหลัง ส่วนแหล่งจ่ายไฟฟ้าใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวแบบอ่อนตัวได้ที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 756 W ที่แรงดันไฟฟ้า 79.8 V เพื่อประจุไฟฟ้าให้แบตเตอรี่ NMC ขนาด 97 kWh ที่แรงดันไฟฟ้า 96 V โดยเก็บผลการใช้พลังงานทั้งหมดของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากจุดเริ่มต้นที่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นระยะทาง 322 km เนื่องจากภูมิประเทศตั้งแต่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นพื้นที่ทางลาดชันทำให้การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สูงขึ้นด้วย อีกทั้งสภาพความเข้มแสงและอุณหภูมิของอากาศตั้งแต่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นเมืองที่อยู่ในแนวเขตใกล้เส้นศูนย์มีความเข้มแสงสูงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมาก ผลการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์จะเก็บผลการใช้พลังงานในขณะเข้าร่วมการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge 2023 ตั้งแต่จุดเริ่มต้นที่เมือง Darwin ถึงเมือง Katherine เป็นระยะทาง 322 km โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ 44,554.20 Wh พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 1,032.44 Wh รวมพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปทั้งหมด 45,586.64 Wh คิดเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 42,299.40 Wh และพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 3,287.30 Wh คงเหลือพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ 54,700.60 Wh แต่ถ้าหากใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 42,299.40 Wh เพื่อระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถขับเคลื่อนได้เป็นระยะทางประมาณ 280 km

ข้อแนะนำ

การออกแบบรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 ขนาด 4 ที่นั่ง ใช้สำหรับการเข้าร่วมแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge 2023 รุ่น Cruiser Class โดยรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 เป็นรถไฟฟ้าต้นแบบเพื่อทดสอบใช้ในชีวิตประจำวัน และยังสามารถพัฒนาต่อยอดในส่วนของการจัดการพลังงานของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ STC-4

เอกสารอ้างอิง

นภัทร วัฒนเทพินทร์ สามารถ ทัดเกษ กิตตินันท์ พลอยรัตน์ และปัญญา กล้าเดช. (2559). การพัฒนารถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบสำหรับการแข่งขัน. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร*, 10(2), 54-65.

- Rajabi, H.S., Colantoni, A., Gallucci, F., Salerno, M., Silvestri, C., & Villarini, M. (2019). Comparative energy and environmental analysis of agro-pellet production from orchard woody biomass. *Biomass and Bioenergy*, 129, 105334. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105334>
- Rizzo, G., Tiano, F. A., Mariani, V. & Marino, M. (2021). Optimal Modulation of Regenerative Braking in through-The-Road Hybridized Vehicles. *Energies*, 14(20), 6835. <https://doi.org/10.3390/en14206835>
- Rizzo, G. (2010). Automotive applications of solar energy. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(7), 174-185. <https://doi.org/10.3182/20100712-3-DE-2013.00199>
- Secinaro, S., Brescia, V., Calandra, D., & Biancone, P. (2020). Employing bibliometric analysis to identify suitable business models for electric cars. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121503, 1879-1786. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121503>

Translated Thai References

- Watjanatepin, N., Tadmak, S., Ployrat, K., & Klamdate, P. (2016). The development of solar racing car prototype. *RMUTP Research Journal*, 10(2), 54-65.

Received: Oct 16, 2021

Revised: Dec 21, 2021

Accepted: Dec 25, 2021

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการสึกหรอของผิวเคลือบด้วยวิธีการพ่นเคลือบแบบ HVOF บนใบมีดเกี่ยวข้าว

INVESTIGATION OF FACTORS AFFECTING FRICTION COEFFICIENT AND WEAR CHARACTERISTICS OF HVOF-SPRAYED COATINGS ON RICE HARVESTER BLADES

รณฤทธิ์ ชิงกุเขียว¹ วรวิทย์ ปัญญาคำ^{2*} ดุสิต สิงห์พรหมมาศ³ นุชริน ทองพูล⁴ วรณวดี สุขแจ่ม⁵
และ สุพจน์ สรระทองหลาง⁶

¹สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

^{2,3}สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

^{4,5,6}สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Ronnarit Khuengphukhiao¹ Voravee Punyakum^{2*} Dusit Singpommatt³ Nucharin Thongpool⁴
Vanvadee Sukchaem⁵ and Suphot Srathonglang⁶

¹Department of Integrated Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology

^{2,3}Department of Industrial Engineering, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of
Technology Krungthep

^{4,5,6}Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology
Krungthep

Corresponding Author: e-mail *voravee.p@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของใบมีดเกี่ยวข้าว ปัจจัยที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย น้ำหนักกด และวัสดุเคลือบ โดยทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีการพินออนดิส (ASTM G99) ซึ่งในการทดสอบมีน้ำหนักกด 3 ระดับ ได้แก่ 20, 40 และ 60 นิวตัน ส่วนวัสดุเคลือบที่ใช้ ได้แก่ ใบมีดเกี่ยวข้าวแบบไม่เคลือบผิว และใบมีดเกี่ยวข้าวเคลือบด้วย NiSiCrFeB, WC-Co/NiSiCrFeB, WC-Co และ WC-Cr₃C₂-Ni ซึ่งเคลือบด้วยการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนจากเชื้อเพลิงความเร็วสูง (HVOF) ผลการศึกษาพบว่า ผิวเคลือบมีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอของใบมีดเกี่ยวข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value < 0.05) โดยมีค่า f-value สูงกว่าปัจจัยน้ำหนักกด แสดงให้เห็นว่าผิวเคลือบมีผลมากกว่าน้ำหนักกด อย่างมีนัยสำคัญต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอของใบมีดเกี่ยวข้าว

คำสำคัญ: ใบมีดเกี่ยวข้าว, การสึกหรอ, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

Abstract

The objective of this research was to investigate factors affecting wear and friction coefficient of rice harvester blades. The studied factors included loading weight and coating materials. Wear testing was conducted using the pin-on-disc method (ASTM G99) with three loading weight levels: 20, 40, and 60 N. The coating materials consisted of uncoated rice harvester blades and blades coated with NiSiCrFeB, WC-Co/NiSiCrFeB, WC-Co, and WC-Cr₃C₂-Ni using High-Velocity Oxygen Fuel (HVOF) thermal spray coating process. The results indicated that coating surfaces significantly affected the friction coefficient and wear rate of rice harvester blades (p-value < 0.05), with a higher f-value compared to the loading weight factor. This demonstrates that coating surfaces had a significantly greater impact than loading weight on both friction coefficient and wear rate of rice harvester blades.

Keywords: rice harvester blades, wear, friction coefficient

บทนำ

ในภาคการเกษตรของประเทศไทย การเก็บเกี่ยวข้าวเป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อผลผลิตและต้นทุนของเกษตรกร รถเกี่ยวข้าวได้กลายเป็นเครื่องจักรกลที่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนในกระบวนการนี้ อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญที่เกษตรกรต้องเผชิญคือการสึกหรอของใบมีดเกี่ยวข้าว ซึ่งต้องมีการเปลี่ยนบ่อยครั้ง ส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นและการหยุดชะงักในกระบวนการเก็บเกี่ยว การแก้ปัญหาการสึกหรอของใบมีดเกี่ยวข้าวได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลก โดยมีกลุ่มนักวิจัยของ Kang, Cheema and Singla (2014); Kang, Grewal, Jain, & Kang, (2012); Karoonboonyanan, Salokhe, & Niranatlumpong, (2007) นำวิธีการเคลือบผิวด้วยวิธีต่างๆ เพื่อนำมาปรับปรุงสมบัติทางกลของผิวเคลือบของใบมีดเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตร เช่น การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนจากเชื้อเพลิงความเร็วสูง การพ่นเคลือบแบบอาร์ค การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนแบบพลาสมา การพ่นเคลือบด้วยปืนจู่ระยะเปิด และการชุบโครเมียม โดยทำการเคลือบบนใบมีดโรตารี ซึ่งช่วยการปรับปรุงการต้านทานการสึกหรอให้มีอายุการใช้งานมากขึ้น ส่วนงานวิจัยกลุ่มของ Cooke (2019), Lima, Ferraresi, & Reis, (2014) และ Niranatlumpong, Sukhonket, & Nakgoenthong (2013) ปรับปรุงใบมีดตัดอ้อยโดยใช้วิธีการชุบแข็งด้วยความร้อน การชุบโครเมียม การพ่นเคลือบแบบอาร์ค การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนแบบพลาสมา การเชื่อมแบบฟลักซ์คอร์ และการพ่นพอกด้วยการอาร์คไฟฟ้า ในส่วนของงานวิจัย Karoonboonyanan et al., (2007), Khuengpukheiw, Saikaew, & Wisitsoraat, (2021) และ Niranatlumpong et al., (2013) ได้แนะนำการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนจากเชื้อเพลิงความเร็วสูงมาใช้ในการปรับปรุงใบมีดเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตรเพื่อช่วยเพิ่มการต้านทานการสึกหรอ และสมบัติทางกลได้ดีกว่าการเคลือบแบบอื่นๆ

นักวิจัยกลุ่มหนึ่งได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนจากเชื้อเพลิงความเร็วสูง (Ruiz-Luna et al., 2014) ทำการศึกษาปัจจัยของกระบวนการเคลือบผิวด้วยการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนจากเชื้อเพลิงความเร็วสูง ได้แก่ การไหลของเชื้อเพลิง, การไหลของออกซิเจน และระยะของการพ่นเคลือบ การเคลือบผิวที่ระยะของการพ่นเคลือบที่ 250 ถึง 300 ไมคอน รูพรุน ความเครียด และความเค้น อยู่ในระดับที่ต่ำ ในส่วนของ (Ham, Kreethi, Kim, Yoon, & Lee, 2021) ใช้วัสดุเคลือบ WC-12Co, WC-10Co-4Cr และ $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ ซึ่งพบว่า ผิวเคลือบ WC-12Co ให้ความเครียดต่ำ, ผิวเคลือบของ $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ ให้เปอร์เซ็นต์รูพรุนต่ำ ในส่วนของผิวเคลือบ WC-10Co-4Cr ให้การต้านทานแรงดึงสูง Khuengpukheiw et al., (2021) ได้ศึกษาปัจจัยจากวัสดุเคลือบและความหนาของผิวเคลือบ โดยจากการศึกษา พบว่า วัสดุเคลือบผิวและความหนาของผิวเคลือบมีสมบัติทางกลเปลี่ยนแปลงไปตามตามวัสดุเคลือบและความหนาของผิวเคลือบ Nitesh Vashishtha, S. G., Sapate, J. S. Gahlot, (2018) ปัจจัยน้ำหนักกด และความเร็วในการทดสอบการสึกหรอ พบว่า การสึกหรอของผิวเคลือบและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักกด ที่เพิ่มขึ้นและความเร็วรอบที่ต่ำ เห็นได้ว่า วัสดุเคลือบและน้ำหนักกด มีผลต่อการเคลือบผิวด้วยการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนจากเชื้อเพลิงความเร็วสูงมีผลต่อการสึกหรอและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ดังนั้น การเพิ่มอายุการใช้งานของใบมีดเกี่ยวข้าวมีความสำคัญอย่างยิ่งในภาคเกษตรกรรมช่วยลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยว งานวิจัยนี้จึงมุ่งหาแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติของใบมีดเกี่ยวข้าวโดยใช้วิธีการเคลือบด้วยวิธีการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนจากเชื้อเพลิงความเร็วสูง (HVOF) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ใบมีดเกี่ยวข้าวแบบไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวด้วยวัสดุเคลือบ ได้แก่ NiSiCrFeB, WC-Co/NiSiCrFeB, WC-Co และ WC- $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{Ni}$ แล้วนำมาทำการทดสอบการสึกหรอทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบพินออนดิส (ASTM G99) โดยใช้ น้ำหนักกด 20, 40 และ 60 นิวตัน ความเร็วรอบ 0.24 เมตรต่อวินาที เวลาทดสอบ 60 นาที เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริงของใบมีดเกี่ยวข้าว

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาน้ำหนักกดที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการสึกหรอของบนใบมีดเกี่ยวข้าว
2. เพื่อศึกษาวัสดุเคลือบผิวด้วยการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนจากเชื้อเพลิงความเร็วสูง (HVOF) ที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการสึกหรอของบนใบมีดเกี่ยวข้าว

ขอบเขตของการวิจัย

1. วัสดุฐานรองของชิ้นตัวอย่างทดสอบใช้ใบมีดเกี่ยวข้าวใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1095 ขนาดความกว้าง 76 มิลลิเมตร ความสูง 83 มิลลิเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร และผิวเคลือบของใบมีดเกี่ยวข้าวทำการศึกษาสมบัติทางกลผิวเคลือบชิ้นตัวอย่างทดสอบ ได้แก่ การสูญเสียของผิวเคลือบ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

2. วัสดุพ่นเคลือบผิวชิ้นตัวอย่างทดสอบและใบมีดเกี่ยวข้าว ได้แก่ NiSiCrFeB, WC-Co/NiSiCrFeB, WC-Co และ WC-Cr₃C₂-Ni

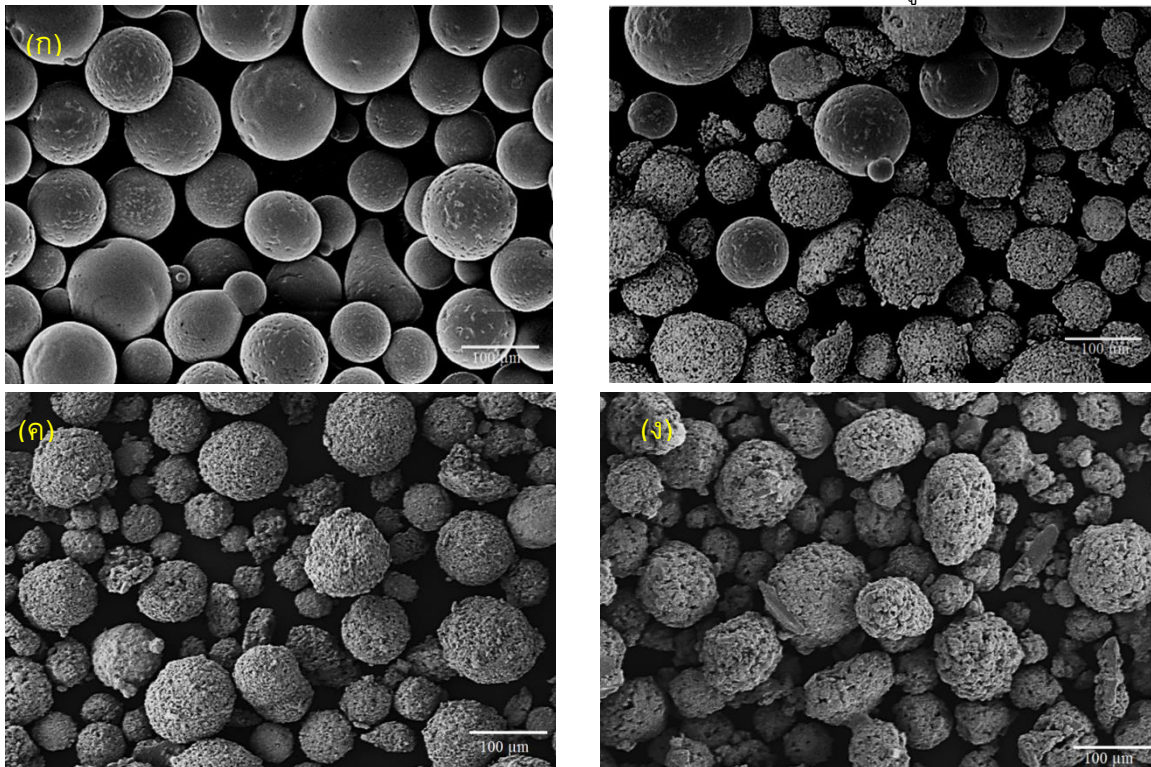
3. ใบมีดเกี่ยวข้าวทำการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่อง Universal Friction and Wear Tester (Jinan Yihua Tribology Testing Co., Ltd., MMW-1A) โดยใช้วิธีการทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิส (pin-on-disc) และใช้พินเป็นเหล็กกล้าเกรด 45C ในการทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G99 ตามแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งใช้น้ำหนักกด 3 ระดับ คือ 20, 40 และ 60 นิวตัน

4. ทำการชั่งน้ำใบมีดเกี่ยวข้าวก่อน-หลังทดสอบด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลทศนิยม 3 ตำแหน่ง แล้วนำมาประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Design-Expert 7.0

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. การจัดเตรียมชิ้นงานและวัสดุเคลือบ

ใบมีดตัดเกี่ยวข้าวก่อนนำไปพ่นเคลือบด้วยความร้อนจากเชื้อเพลิงความเร็วสูงรุ่น TAFA JP-5000 HP โดยทำการพ่นด้วยทรายเพื่อให้ผิวของใบมีดเกี่ยวข้าวเกิดความขรุขระผิว แล้วนำมาทำความสะอาดผิวก่อนเคลือบ ในขณะที่วัสดุเคลือบที่ใช้ในการพ่นเคลือบด้วยความร้อนจากเชื้อเพลิงความเร็วสูงใช้วัสดุเคลือบ 4 ชนิด ได้แก่ NiSiCrFeB, WC-Co/NiSiCrFeB, WC-Co และ WC-Cr₃C₂-Ni ซึ่งแสดงตามภาพที่ 1 (ก-ง) วัสดุเคลือบที่นำมาใช้เคลือบผิวผ่านการอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที แล้วนำมาพ่นเคลือบด้วยความร้อนจากเชื้อเพลิงความเร็วสูง



ภาพที่ 1 วัสดุเคลือบผิว (a) NiSiCrFeB, (b) WC-Co/NiSiCrFeB (c) WC-Co และ (d) WC-Cr₃C₂-Ni

2. การทดสอบสมบัติทางกล

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอในงานวิจัยนี้คือ เครื่อง Universal Friction and Wear Tester (Jinan Yihua Tribology Testing Co., Ltd., MMW-1A) ดังภาพที่ 2 โดยใช้วิธีการทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิส (ASTM G99) ซึ่งชิ้นตัวอย่างเป็นใบมีดเกี่ยวข้าวลักษณะการทดสอบตามภาพที่ 2 และพินเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด 45C เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร เงื่อนไขการทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิส น้ำหนักกด 3 ระดับ คือ 20, 40 และ 60 นิวตัน ความเร็วรอบ 0.24 เมตรต่อวินาที และระยะเวลาทดสอบ 60 นาที การทดสอบการสึกหรอได้ผลของสมบัติทางกล ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และการสูญเสียของผิวเคลือบ ข้อมูลของการสูญเสียของผิวเคลือบได้จากการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอของชิ้นใบมีดเกี่ยวข้าว แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าสูญเสียของผิวเคลือบของชิ้นตัวอย่างทดสอบ ได้ตามสมการที่ 1 แล้วมาวิเคราะห์ผลด้วยวิธี ANOVA

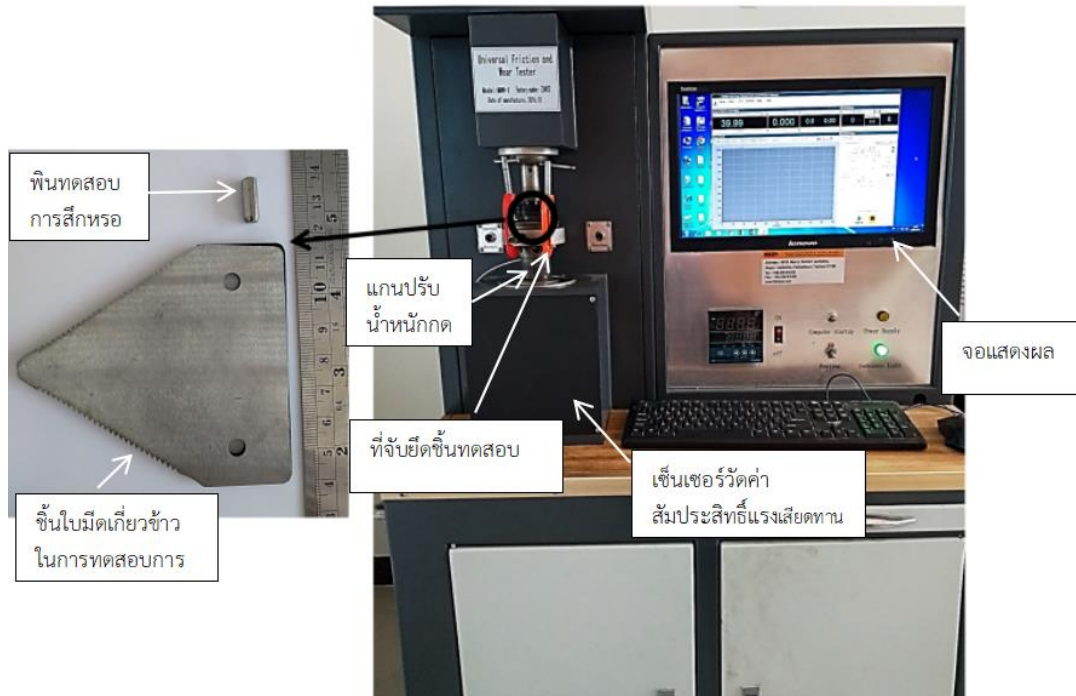
$$vl = \frac{wl}{p} \quad (1)$$

โดยที่ vl คือ การสูญเสียของผิวเคลือบ (mm^3), wl คือ น้ำหนักที่สูญเสีย (g) และ p คือ ความหนาแน่นของผิวเคลือบ ($\text{g}\cdot\text{mm}^3$)

ขั้นตอนในการทำการทดสอบสึกหรอ มีดังนี้

2.1 นำชิ้นใบมีดเกี่ยวข้าวตัวอย่างชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบการสึกหรอแล้วบันทึกผล

2.2 นำชิ้นใบมีดเกี่ยวข้าวมาวางบนช่องทดสอบ ตามภาพที่ 2 แล้วปรับไปที่แกนปรับน้ำหนักกดที่น้ำหนักกด 20, 40 และ 60 นิวตัน ความเร็วรอบ 0.24 เมตรต่อวินาที ระยะเวลาในการทำการทดสอบ 60 นาที ตั้งค่าตามเงื่อนไขการทดสอบบนหน้าจอแสดงผลทำการทดสอบ แล้วนำชิ้นชิ้นใบมีดเกี่ยวข้าวทำการชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบการสึกหรอ แล้วนำมาคำนวณหาค่าการสูญเสียของผิวเคลือบ ตามสมการที่ 1 ในขณะเดียวกันทำการบันทึกผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้หลังจากการทดสอบการสึกหรอ

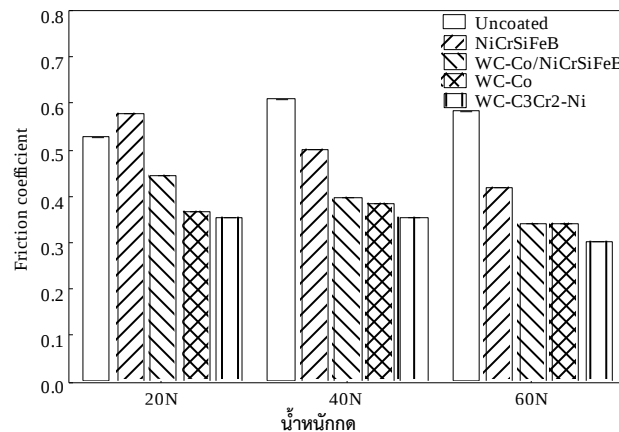


ภาพที่ 2 เครื่อง Universal Friction and Wear Tester (Jinan Yihua Tribology Testing Co., Ltd., MMW-1A)

ผลการดำเนินการ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกหรอและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผิวเคลือบบนใบมีดเกี่ยวข้าวที่เคลือบด้วยวิธีการพ่นเคลือบด้วยความร้อนจากเชื้อเพลิงความเร็วสูง (HVOF) โดยพิจารณาปัจจัยหลักสองประการ ได้แก่ น้ำหนักกด และวัสดุเคลือบ

1. สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของใบมีดเกี่ยวข้าวแบบไม่เคลือบผิว, เคลือบด้วย NiSiCrFeB, WC-Co/NiSiCrFeB, WC-Co และ WC-Cr₃C₂-Ni



ภาพที่ 3 กราฟสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของใบมีดเกี่ยวข้าวแบบไม่เคลือบผิว, เคลือบด้วย NiSiCrFeB, WC-Co/NiSiCrFeB, WC-Co และ WC-Cr₃C₂-Ni

จากภาพที่ 3 เห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของใบมีดเกี่ยวข้าวแบบไม่เคลือบผิวและผิวเคลือบ WC-Co มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดที่น้ำหนักกด 40 นิวตัน ในขณะที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำสุดที่น้ำหนักกด 20 นิวตัน แสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 20 นิวตันไป 40 นิวตัน แล้วลดลงเมื่อเพิ่มน้ำหนักกด เป็น 60 นิวตัน ในส่วนของใบมีดเกี่ยวข้าวเคลือบด้วย NiSiCrFeB และ WC-Co/NiSiCrFeB แสดงแนวโน้มลดลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อน้ำหนักกด เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดที่น้ำหนักกด 20 นิวตัน และลดลงเรื่อยๆ เมื่อน้ำหนักกด เพิ่มขึ้นเป็น 40 และ 60 นิวตัน ในขณะที่ใบมีดเกี่ยวข้าวเคลือบด้วย WC-Cr₃C₂-Ni แสดงแนวโน้มลดลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอย่างชัดเจนเมื่อน้ำหนักกด เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดที่น้ำหนักกด 20 นิวตัน และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อน้ำหนักกด เพิ่มขึ้นเป็น 40 และ 60 นิวตัน เมื่อเทียบกับวัสดุเคลือบอื่นๆ พบว่า มีการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ชัดเจนที่สุด

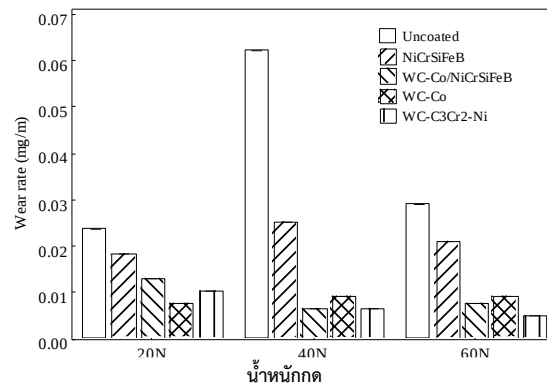
โดยสรุป วัสดุเคลือบที่แตกต่างกันส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของใบมีดเกี่ยวข้าวมีลักษณะแตกต่างกันภายใต้ น้ำหนักกด ที่ต่างกัน โดยเฉพาะวัสดุเคลือบด้วย WC-Cr₃C₂-Ni ที่แสดงแนวโน้มการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอย่างชัดเจนเมื่อน้ำหนักกด เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการลดแรงเสียดทานในการใช้งานที่มีน้ำหนักกด สูง

2. อัตราการสึกหรอของใบมีดเกี่ยวข้าวแบบไม่เคลือบผิว, เคลือบด้วย NiSiCrFeB, WC-Co/ NiSiCrFeB, WC-Co และ WC-Cr₃C₂-Ni

จากภาพที่ 4 เห็นได้ว่าค่าอัตราการสึกหรอของใบมีดเกี่ยวข้าวแบบไม่เคลือบผิวและใบมีดเกี่ยวข้าวเคลือบด้วย NiCrSiFeB พบว่า อัตราการสึกหรอที่สูงอยู่ที่น้ำหนักกด 40 นิวตัน และอัตราสึกหรอต่ำที่สุดอยู่ที่น้ำหนักกด 20 นิวตัน ในส่วนของใบมีดเกี่ยวข้าวที่เคลือบด้วย WC-Co มีอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักกด เพิ่มขึ้น ในขณะที่ผิวเคลือบ WC-Cr₃C₂-Ni มีอัตราการสึกหรอลดลงตามน้ำหนักกด ที่เพิ่มมากขึ้น และใบมีดเกี่ยวข้าวเคลือบด้วย WC-Co/ NiCrSiFeB มีอัตราการสึกหรอสูงสุดที่น้ำหนักกด 20 นิวตัน และอัตราการสึกหรอต่ำสุดที่ 40 นิวตัน

จากภาพที่ 3 และ ภาพที่ 4 เห็นได้ว่าใบมีดเกี่ยวข้าวที่ไม่ได้เคลือบผิวมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอสูงสุดที่น้ำหนักกด 40 นิวตัน และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอต่ำสุดที่น้ำหนักกด 20 นิวตัน ในส่วนของผิวเคลือบ WC-Cr₃C₂-Ni มีอัตราการสึกหรอและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงตามน้ำหนักกด

ที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ผิวเคลือบ NiCrSiFeB และ WC-Co/NiCrSiFeB มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงตามน้ำหนักกด ที่เพิ่มมากขึ้น แต่ในขณะของอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ NiCrSiFeB สูงสุดที่น้ำหนักกด 40 นิวตัน และมีอัตราการสึกหรอต่ำสุดที่น้ำหนักกด 20 นิวตัน ส่วนของผิวเคลือบของ WC-Co/NiCrSiFeB อัตราการสึกหรอมากที่สุดที่น้ำหนักกด 20 นิวตัน พบว่า มีอัตราการสึกหรอต่ำสุดที่น้ำหนักกด 40 นิวตัน



ภาพที่ 4 อัตราการสึกหรอของโบริดเกี่ยวข้าวแบบไม่เคลือบผิว, เคลือบด้วย NiSiCrFeB, WC-Co/ NiSiCrFeB และ WC-Co

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อประเมินผลกระทบของปัจจัยผิวเคลือบและน้ำหนักกดต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอของโบริดเกี่ยวข้าว ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นตามตารางที่ 1 และ 2 พบว่า ผลการวิเคราะห์ ANOVA แสดงให้เห็นว่าปัจจัยวัสดุเคลือบมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} = 0.000697 < 0.05$) ในขณะที่ปัจจัยของน้ำหนักกด ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} = 0.132719 > 0.05$) นอกจากนี้ ค่า F-value ของปัจจัยวัสดุเคลือบ (15.98181) สูงกว่าปัจจัยของน้ำหนักกด (2.627154) อย่างชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ว่าวัสดุเคลือบมีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากกว่าน้ำหนักกด อย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของผลการวิเคราะห์ของอัตราการสึกหรอ ผลการวิเคราะห์แสดงแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยปัจจัยวัสดุเคลือบมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} = 0.019391 < 0.05$) ในขณะที่ปัจจัยน้ำหนักกด ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} = 0.429532 > 0.05$) เช่นเดียวกับกรณีของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ค่า F-value ของปัจจัยวัสดุเคลือบ (5.551274) สูงกว่าปัจจัยน้ำหนักกด (0.940957) อย่างมีนัยสำคัญ

ผลการวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่า วัสดุเคลือบมีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่น้ำหนักกด ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอ และผิวเคลือบ WC-Cr₃C₂-Ni แสดงแนวโน้มการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอเมื่อน้ำหนักกดเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 ตารางวิเคราะห์ ANOVA สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของโบริดเกี่ยวข้าว

Source	SS	df	MS	f-value	p-value
วัสดุเคลือบ	0.118466	4	0.029616	15.98181	0.000697
น้ำหนักกด	0.009737	2	0.004868	2.627154	0.132719
Error	0.014825	8	0.001853		
Total	0.143028	14			

ตารางที่ 2 ตารางวิเคราะห์ ANOVA อัตราการสึกหรอของโบริดเกี่ยวข้าว

Source	SS	df	MS	F-value	P-value
วัสดุเคลือบ	0.002097	4	0.000524259	5.551274	0.019391
น้ำหนักกด	0.000178	2	8.88634E-05	0.940957	0.429532
Error	0.000756	8	9.44394E-05		
Total	0.00303	14			

สรุปผลและการอภิปราย

การศึกษานี้เพื่อศึกษาน้ำหนักกด และวัสดุเคลือบผิวด้วยการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนจากเชื้อเพลิงความเร็วสูง (HVOF) ที่มีผลต่อการสึกหรอและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของใบมีดเกี่ยวข้าวข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. ใบมีดเกี่ยวข้าวที่ไม่ได้เคลือบผิวมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอสูงที่สุดที่น้ำหนักกด 40 นิวตัน และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอต่ำสุดที่น้ำหนักกด 20 นิวตัน ในส่วนของผิวเคลือบ WC-C₃Cr₂-Ni มีอัตราการสึกหรอและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงตามน้ำหนักกด ที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ผิวเคลือบ NiCrSiFeB และ WC-Co/NiCrSiFeB มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงตามน้ำหนักกด ที่เพิ่มมากขึ้น แต่ในขณะของอัตราการสึกหรอของผิวเคลือบ NiCrSiFeB สูงสุดที่น้ำหนักกด 40 นิวตัน และมีอัตราการสึกหรอต่ำสุดที่น้ำหนักกด 20 นิวตัน ส่วนของผิวเคลือบของ WC-Co/NiCrSiFeB อัตราการสึกหรอมากที่สุดที่น้ำหนักกด 20 นิวตัน พบว่า มีอัตราการสึกหรอต่ำสุดที่น้ำหนักกด 40 นิวตัน

2. การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อประเมินผลกระทบของปัจจัยผิวเคลือบและน้ำหนักกด ต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอของใบมีดเกี่ยวข้าว ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นตามตารางที่ 1 และ 2 พบว่า ผลการวิเคราะห์ ANOVA แสดงให้เห็นว่าปัจจัยวัสดุเคลือบมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} = 0.000697 < 0.05$) ในขณะที่ปัจจัยของน้ำหนักกด ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} = 0.132719 > 0.05$) นอกจากนี้ ค่า F-value ของปัจจัยวัสดุเคลือบ (15.98181) สูงกว่าปัจจัยของน้ำหนักกด (2.627154) อย่างชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ว่าวัสดุเคลือบมีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากกว่าน้ำหนักกด อย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของผลการวิเคราะห์ของอัตราการสึกหรอ ผลการวิเคราะห์แสดงแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยปัจจัยวัสดุเคลือบมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} = 0.019391 < 0.05$) ในขณะที่ปัจจัยน้ำหนักกด ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} = 0.429532 > 0.05$) เช่นเดียวกับกรณีของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ค่า F-value ของปัจจัยวัสดุเคลือบ (5.551274) สูงกว่าปัจจัยน้ำหนักกด (0.940957) อย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารอ้างอิง

- Cooke, K. O. (2019). Tribological Performance of Hardfaced / Thermally Sprayed Coatings for Increased Wear Resistance of Cutting Blades Used in Harvesting Sugarcane. *Annals of Agricultural & Crop Sciences*, 4(1), 1–7.
- Ham, G. S., Kreethi, R., Kim, H. jun, Yoon, S. hoon, & Lee, K. A. (2021). Effects of different HVOF thermal sprayed cermet coatings on tensile and fatigue properties of AISI 1045 steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 6647–6658.
- Kang, A. S., Cheema, G. S., & Singla, S. (2014). Wear behavior of hardfacings on rotary tiller blades. *Procedia Engineering*, 97, 1442–1451.
- Kang, A. S., Grewal, J. S., Jain, D., & Kang, S. (2012). Wear behavior of thermal spray coatings on rotavator blades. *Journal of Thermal Spray Technology*, 21(2), 355–359.
- Karoonboonyanan, S., Salokhe, V. M., & Niranatlumpong, P. (2007). Wear resistance of thermally sprayed rotary tiller blades. *Wear*, 263, 604–608.
- Khuengpukheiw, R., Saikaew, C., & Wisitsoraat, A. (2021). Wear resistance of HVOF sprayed NiSiCrFeB, WC-Co/NiSiCrFeB, WC-Co, and WC-Cr₃C₂-Ni rice harvesting blades. *Materials Testing*, 63(1), 62–72.
- Lima, A. C., Ferraresi, V. A., & Reis, R. P. (2014). Performance analysis of weld hardfacings used in the sugar/alcohol industry. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(5), 1823–1833.
- Niranatlumpong, P., Sukhonket, C., & Nakngonthong, J. (2013). Wear resistant surface treatment of pulverizer blades. *Wear*, 302(1–2), 878–881.
- Nitesh Vashishtha, S. G. Sapate, J. S. Gahlot, P. B. (2018). Effect of Tribo-Oxidation on Friction and Wear Behaviour of HVOF. *Tribology Letters*, 66(56), 11–19.

Ruiz-Luna, H., Lozano-Mandujano, D., Alvarado-Orozco, J. M., Valarezo, A., Poblano-Salas, C. A., Trápaga-Martínez, L. G., Muñoz-Saldaña, J. (2014). Effect of HVOF processing parameters on the properties of NiCoCrAlY coatings by design of experiments. *Journal of Thermal Spray Technology*, 23(6), 950–961.

Received: May 16, 2024

Revised: Dec 23, 2024

Accepted: Dec 26, 2024

เครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี BACTERIA STERILIZER WITH UV-C

กิตติภณ ฉัตรเงิน ธนบัตร ภัคดีแก้ว ธนากร แวงวรรณ รจนา ทองสม

บัญชา ศรีวิโรจน์ ปณต ศรีภักดิ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธนบุรี

Kittipon Chatngoen, Thanabat Pakdeekaew, Thanakorn Wangwun, Rochana Thongsom,

Bancha Sriwirote, and Panot Sripakarach

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University

E-mail: mintandmos60@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซีที่เน้นประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียและการใช้งานที่ปลอดภัย โดยใช้แนวคิดการผสานเทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 กับระบบควบคุมที่ออกแบบมาให้เหมาะสมทั้งในรูปแบบการทำงานอัตโนมัติและควบคุมด้วยมือ เครื่องฆ่าเชื้อดังกล่าวใช้หลอดรังสียูวีซีขนาด 6 วัตต์ จำนวน 4 หลอด พร้อมกลไกความปลอดภัยที่จำกัดสวิตช์ช่วยป้องกันการสัมผัสรังสีโดยไม่ตั้งใจ ผลการทดลองยืนยันว่าเครื่องสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียโคลิฟอร์มและเอสเชอริเชียโคไลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดจำนวนเชื้อจนไม่หลงเหลือ (0 CFU/ml) ภายในเวลา 60 นาที โดยความเข้มรังสียูวีซีเฉลี่ยอยู่ที่ 3,466.16 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ การพัฒนานี้มุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อในหลากหลายประเภทของวัสดุ พร้อมทั้งลดความซับซ้อนในการใช้งาน และสร้างมาตรฐานใหม่ในเครื่องฆ่าเชื้อยูวีซีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานทั่วไปและในชุมชน

คำสำคัญ: หลอดรังสียูวีซี แบคทีเรียโคลิฟอร์ม แบคทีเรียเอสเชอริเชียโคไล บอร์ดอาดูโน่ ระบบควบคุมอัตโนมัติ

Abstract

This article presents the design and development of a UV-C germicidal device emphasizing efficiency in bacterial elimination and operational safety. The proposed system integrates Arduino Uno R3 microcontroller technology with dual operating modes: manual and automatic. The device features four 6W UV-C lamps and a safety mechanism utilizing limit switches to prevent unintended exposure to UV radiation. Experimental results demonstrate the device's ability to effectively eliminate coliform bacteria and Escherichia coli, reducing bacterial counts to 0 CFU/ml within 60 minutes. The average UV-C intensity was measured at 3,466.16 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. This innovation focuses on enhancing sterilization performance across various material types, simplifying usability, and establishing new standards for UV-C sterilization devices suitable for general and community use.

Keywords: UV-C lamps, coliform bacteria, escherichia coli, arduino board, automatic control system

บทนำ

การใช้อุปกรณ์เครื่องใช้และภาชนะที่สะอาดและปลอดภัยเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสุขภาพและคุณภาพชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน ความสะอาดของอุปกรณ์เหล่านี้ไม่เพียงแต่ลดความเสี่ยงในการเกิดโรคที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์ แต่ยังส่งเสริมความมั่นใจในการใช้งานในชีวิตประจำวัน อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม เช่น มลพิษทางน้ำและอากาศ อันเนื่องมาจากภาคอุตสาหกรรมและการดำรงชีวิตในสังคมเมือง กลับเพิ่มความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียที่อาจเป็นอันตราย เช่น เชื้อแบคทีเรียโคลิฟอร์ม (Coliform) และเอสเชอริเชียโคไล (Escherichia coli, E. coli)

เชื้อแบคทีเรียโคลิฟอร์มมักถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความไม่สะอาดหรือมลพิษในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในน้ำดื่มและอาหาร การพบเชื้อดังกล่าวอาจสะท้อนถึงการปนเปื้อนที่เกิดจากกระบวนการผลิตหรือการจัดเก็บที่ไม่ได้มาตรฐาน (กรมอนามัย, 2562) ในขณะที่เชื้อเอสเชอริเชียโคไล (E. coli) แม้ว่าสายพันธุ์ส่วนใหญ่จะไม่ก่อให้เกิดโรค แต่บางสายพันธุ์อาจนำไปสู่โรคติดเชื้อร้ายแรง เช่น การติดเชื้อในระบบทางเดินอาหารจากการบริโภคอาหารหรือเครื่องดื่มที่ปนเปื้อน (ไอยฤทธิ์ ไทยพิสุทธิกุล, 2562)

ด้วยความตระหนักถึงปัญหานี้ นักวิจัยได้พัฒนาอุปกรณ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่มีต้นทุนต่ำและใช้งานง่าย ในปี 2563 มีการออกแบบเครื่องฆ่าเชื้อแบบเคลื่อนที่ซึ่งใช้หลอดยูวีซีขนาด 6W จำนวน 2 หลอด โดยมีต้นทุนการผลิตที่เหมาะสมและได้รับความร่วมมือจากชุมชนในทุกขั้นตอนการพัฒนา (วรพล หนูขุน และคณะ, 2563) ต่อมาในปี 2564 ได้มีการพัฒนาต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสด้วยลำแสงยูวีซีขนาดเล็กที่เพิ่มจำนวนหลอดยูวีซีเป็น 4 หลอด เพื่อให้มีประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อสูงขึ้น โดยเครื่องต้นแบบนี้สามารถฉายรังสียูวีซีที่มีความเข้มเฉลี่ย 0.211-0.984 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร และฆ่าเชื้อได้ภายใน 30 นาที (พจนศิรินทร ลิมนันทน์ และคณะ, 2564)

รังสียูวีซี (UV-C) ซึ่งมีความยาวคลื่น 200-280 นาโนเมตร ได้รับการยอมรับในวงการวิทยาศาสตร์ว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการทำลาย DNA ของแบคทีเรียและไวรัส ทำให้เชื้อไม่สามารถเจริญเติบโตและแพร่พันธุ์ได้ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ในการพัฒนาอุปกรณ์ฆ่าเชื้อจึงตอบโจทยทั้งในด้านความสะอาดและความปลอดภัย นอกจากนี้ การผสมผสานเทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น Arduino Uno R3 ช่วยเพิ่มความสามารถในการควบคุมระบบการทำงานของเครื่อง ทั้งในรูปแบบ Manual และ Automatic ทำให้ผู้ใช้สามารถปรับแต่งการใช้งานได้ตามความต้องการ

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซีที่ใช้หลอดยูวีซีขนาด 6W จำนวน 4 หลอด พร้อมระบบควบคุมที่ใช้งานได้ทั้ง Manual และ Automatic ระบบนี้ไม่เพียงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ แต่ยังลดความเสี่ยงในการสัมผัสรังสีด้วยการติดตั้งลิ้มิตสวิตช์เพื่อความปลอดภัย การออกแบบดังกล่าวยังช่วยเพิ่มความสะดวกในการใช้งานสำหรับผู้ทั่วไปและส่งเสริมการนำไปประยุกต์ใช้ในชุมชนได้อย่างเหมาะสม

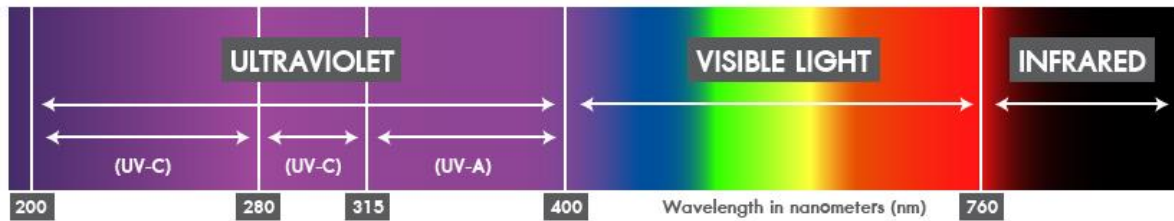
รังสีอัลตราไวโอเลต

รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Radiation: UV) เป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างรังสีที่มองเห็นได้ (visible light) และรังสีเอกซ์ (X-ray) ซึ่งมีพลังงานสูงกว่า รังสี UV ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1801 โดย Johann Wilhelm Ritter จากการศึกษาปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าซึ่งเกิดขึ้นนอกเหนือจากแสงสีม่วงในสเปกตรัมแสงที่มองเห็นได้ รังสี UV มีความสำคัญทั้งในธรรมชาติและการประยุกต์ใช้ทางวิทยาศาสตร์ โดยแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลักตามช่วงความยาวคลื่นและพลังงาน ดังนี้ (จุฑาทิพย์ ศรีวงศ์ษา, 2560)

1) UV-A (Longwave UV): มีความยาวคลื่นประมาณ 320-400 นาโนเมตร เป็นรังสีที่มีความเข้มข้นต่ำสุดเมื่อเทียบกับ UV-B และ UV-C แต่สามารถทะลุผ่านชั้นบรรยากาศโลกได้ถึง 95% รังสี UV-A มีผลโดยตรงต่อการทำลายคอลลาเจนในผิวหนัง อาจทำให้เกิดริ้วรอย จุดด่างดำ และผลเสียสะสมจากแสงแดดในระยะยาว การใช้งาน UV-A มักเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมความงาม เช่น เครื่องอบเล็บบเจลและเตียงอาบแดด (Tanning Beds)

2) UV-B (Mediumwave UV): มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 280-320 นาโนเมตร และมีพลังงานสูงกว่า UV-A แต่ต่ำกว่า UV-C รังสีชนิดนี้เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดอาการผิวหนังไหม้ (sunburn) และช่วยกระตุ้นการสังเคราะห์วิตามินดีในร่างกาย อย่างไรก็ตาม การได้รับรังสี UV-B ในปริมาณมากเกินไปอาจเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งผิวหนังและปัญหาผิวหนังในระยะยาว การใช้งาน UV-B พบได้ในงานบำบัดโรคผิวหนัง เช่น โรคสะเก็ดเงิน (Psoriasis) และในอุตสาหกรรมการผลิตหลอดไฟ UV-B ที่ใช้กระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช

3) UV-C (Shortwave UV): มีความยาวคลื่นประมาณ 100-280 นาโนเมตร และเป็นรังสีที่มีพลังงานสูงที่สุดในกลุ่มรังสี UV UV-C มีความสามารถในการทำลาย DNA และ RNA ของเซลล์ชีวภาพ เช่น เชื้อแบคทีเรียและไวรัส ทำให้ไม่สามารถแบ่งตัวหรือแพร่พันธุ์ได้ การใช้งาน UV-C มีหลากหลาย เช่น การฆ่าเชื้อในโรงงานผลิตอาหาร การทำความสะอาดอุปกรณ์ทางการแพทย์ การฆ่าเชื้อในระบบน้ำและอากาศ เช่น เครื่องฟอกอากาศและเครื่องกรองน้ำ และการใช้ในอุปกรณ์ฆ่าเชื้อโรคพกพาที่เหมาะสมสำหรับครัวเรือน การประยุกต์ใช้ UV-C จึงเป็นส่วนสำคัญในอุตสาหกรรมที่ต้องการความสะอาดและปลอดภัยในระดับสูง



ภาพที่ 1 รังสีอัลตราไวโอเลต (แสงชัยมิตร, 2567)

ขั้นตอนการดำเนินงานออกแบบและคำนวณสร้างเครื่องฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวีซี

1 การดำเนินการในการออกแบบและคำนวณสร้างเครื่องฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวีซีนั้น จำเป็นต้องพิจารณาและเลือกใช้หลอดรังสี UV-C ให้เหมาะสมกับขนาดของตู้ติดตั้งและประเภทของชิ้นงานที่จะนำไปในตู้ฆ่าเชื้อ รวมถึงพิจารณาระยะเวลาการฆ่าเชื้อ เพื่อให้การฆ่าเชื้อมีประสิทธิภาพในการปฏิบัติจริง โดยเฉพาะการกำจัดเชื้อแบคทีเรียโคลิฟอร์ม (Coliform) และเชื้อเอสเชอริเชียโคไล (Escherichia coli, E. coli) ซึ่งมีความยาวคลื่นของรังสี UV-C ที่เหมาะสมอยู่ที่ช่วง 200-313 นาโนเมตร โดยช่วงนี้ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพสูงในการทำลาย DNA ของแบคทีเรีย และสามารถฆ่าเชื้อได้สูงถึง 99.99% (จุฬาทิพย์ ศรีวงศ์ษา, 2560)

การพิจารณาในการออกแบบยังครอบคลุมถึงระยะทางจากหลอด UV-C ถึงจุดเป้าหมาย (DDD) และค่าความถี่ (fff) ของรังสี UV-C ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน โดยความถี่ของรังสี UV-C ถูกคำนวณจากสมการที่ 3

ซึ่งความถี่ที่เหมาะสมมาจากความยาวคลื่นในช่วง 254 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ผลการคำนวณความถี่อยู่ที่ 1.18×10^{15} Hz ทำให้รังสีในช่วงนี้สามารถดูดซับได้ดีที่สุดโดย DNA ของเชื้อแบคทีเรีย ส่งผลให้เชื้อไม่สามารถแบ่งตัวหรือเพิ่มจำนวนได้

ระยะ D ที่ใช้ในการออกแบบระบบนี้ ถูกกำหนดให้เหมาะสมกับขนาดของตู้อุปกรณ์ ซึ่งเป็นระยะที่ทำให้ความเข้มรังสี UV-C (E) สูงพอที่จะฆ่าเชื้อได้สำเร็จ โดยค่า D ได้ถูกออกแบบให้อยู่ในช่วงที่รังสีสามารถกระจายได้ทั่วถึงบนพื้นที่เป้าหมายทุกชั้น โดยพิจารณาจากสมการที่ 1 และถูกออกแบบให้เหมาะสมกับขนาดตู้และวัตถุประสงค์การใช้งาน เพื่อให้มั่นใจว่าความเข้มของรังสี UV-C ที่เป้าหมายมีค่าเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า $3,466.16 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ซึ่งเป็นค่าที่พิสูจน์แล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพเพียงพอในการฆ่าเชื้อภายในระยะเวลา 60 นาที

ดังนั้น การออกแบบและคำนวณสร้างเครื่องฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวีซี สามารถใช้สูตรสมการในคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ และตัวแปรที่สำคัญ ดังนี้

- 1) คำนวณหาขนาดพิกัดของหลอดรังสียูวีซี (P_{UV-C} : (W)) ดังสมการที่ 1 (ฐานิยา คัมภีรานนท์, 2563)

$$P_{UV-C} = \frac{2ELD\pi^2}{2\alpha + \sin 2\alpha} \quad (1)$$

โดยที่ E คือ ขนาดความเข้มของรังสียูวีซี (W/m^2)

L คือ ขนาดความยาวของหลอดรังสียูวีซี (m)

D คือ ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางหลอดถึงจุดเป้าหมายที่ต้องการ (m)

α คือ มุมระหว่างจุดเป้าหมายถึงปลายหลอดรังสียูวีซี (องศา)

- 2) คำนวณหาระยะเวลาในการฉายรังสียูวีซี (t_{exp} : (s)) ที่รับรังสียูวีซีในระยะใช้งานที่ต้องการ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2 (แสงชัยมิตร, 2567)

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{e,UV} X}{E_{e,UV} X} \quad (2)$$

โดยที่ $H_{e,UV} X$ คือ ปริมาณรังสียูวีซีที่ต้องการใช้งาน (J/m^2)
 $E_{e,UV} X$ คือ ความรับรังสียูวีซีที่ระยะใช้งาน (W/m^2)

3) คำนวณหาความถี่ของความยาวคลื่น (f : (Hz)) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3 (แสงชัยมิเตอร์, 2567)

$$f = \frac{C}{\lambda} \quad (3)$$

โดยที่ C คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $299,792,458$ (m/s)
 λ คือ ความยาวคลื่น (m)

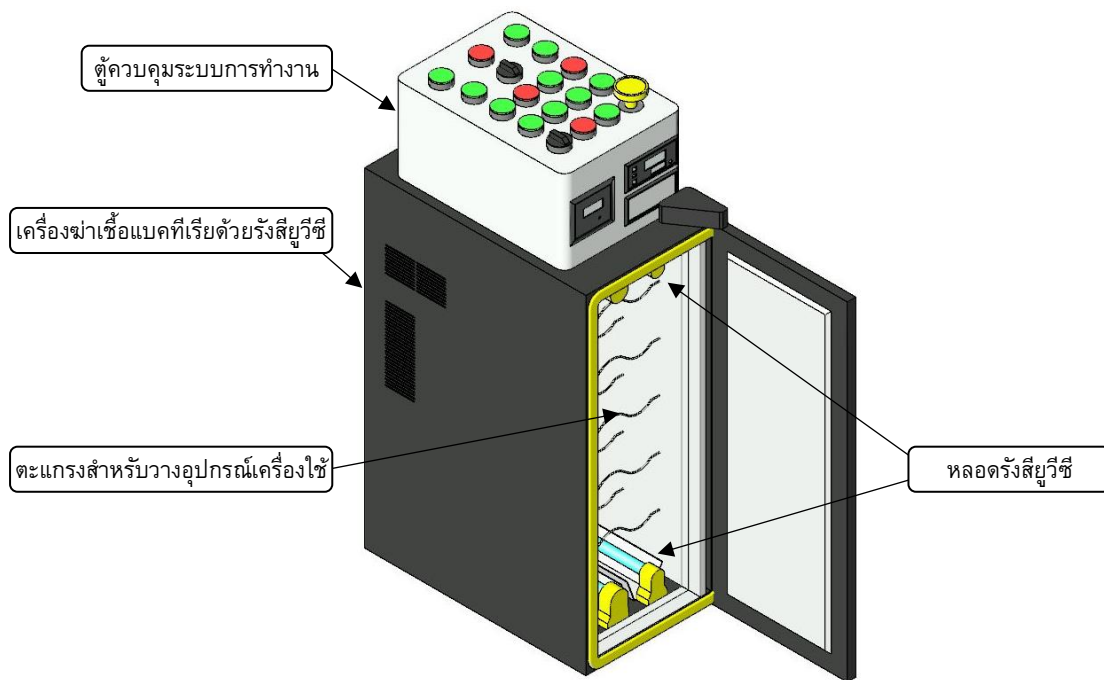
4) คำนวณหาพลังงานของโฟตอน (E : (J)) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4 (แสงชัยมิเตอร์, 2567)

$$E = H \frac{C}{\lambda} \quad (4)$$

โดยที่ H คือ ค่าคงที่พลังค์ (Planck's constant) มีค่าประมาณ 6.626×10^{-34} (J.s)

การออกแบบโครงสร้างเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี

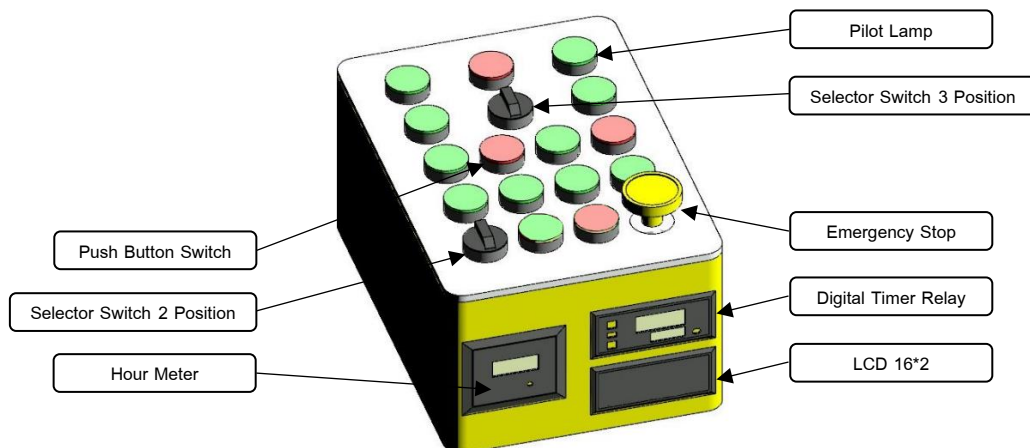
การออกแบบโครงสร้างเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซีเป็นการประยุกต์ใช้งานตู้แช่ไวน์ ขนาดภายในตู้กว้าง 185 มม. สูง 535 มม. ลึก 300 มม. ให้สามารถติดตั้งหลอดรังสียูวีซีขนาด 6 W จำนวน 4 หลอดได้ โดยภายในตู้ด้านบนติดตั้งจำนวน 2 หลอด และด้านล่างของตู้ติดตั้งจำนวน 2 หลอด เพื่อให้สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียบริเวณด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์เครื่องใช้ได้อย่างทั่วถึง มีการปิดแผ่นพอลิภายในตู้เพื่อไม่ให้อรังสียูวีซีออกมากระทบต่อผู้ใช้ รวมถึงมีการใช้งานลิ้มิตสวิตช์เพื่อเป็นตัวตัดการทำงานของระบบในกรณีที่มีการเปิดประตู ทั้งนี้มีการออกแบบการติดตั้งตู้ควบคุมระบบการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซีให้สามารถใช้งานได้ทั้งระบบ Manual และระบบ Automatic ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 2 แบบโครงสร้างเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี

การออกแบบโครงสร้างตู้ควบคุมระบบการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี

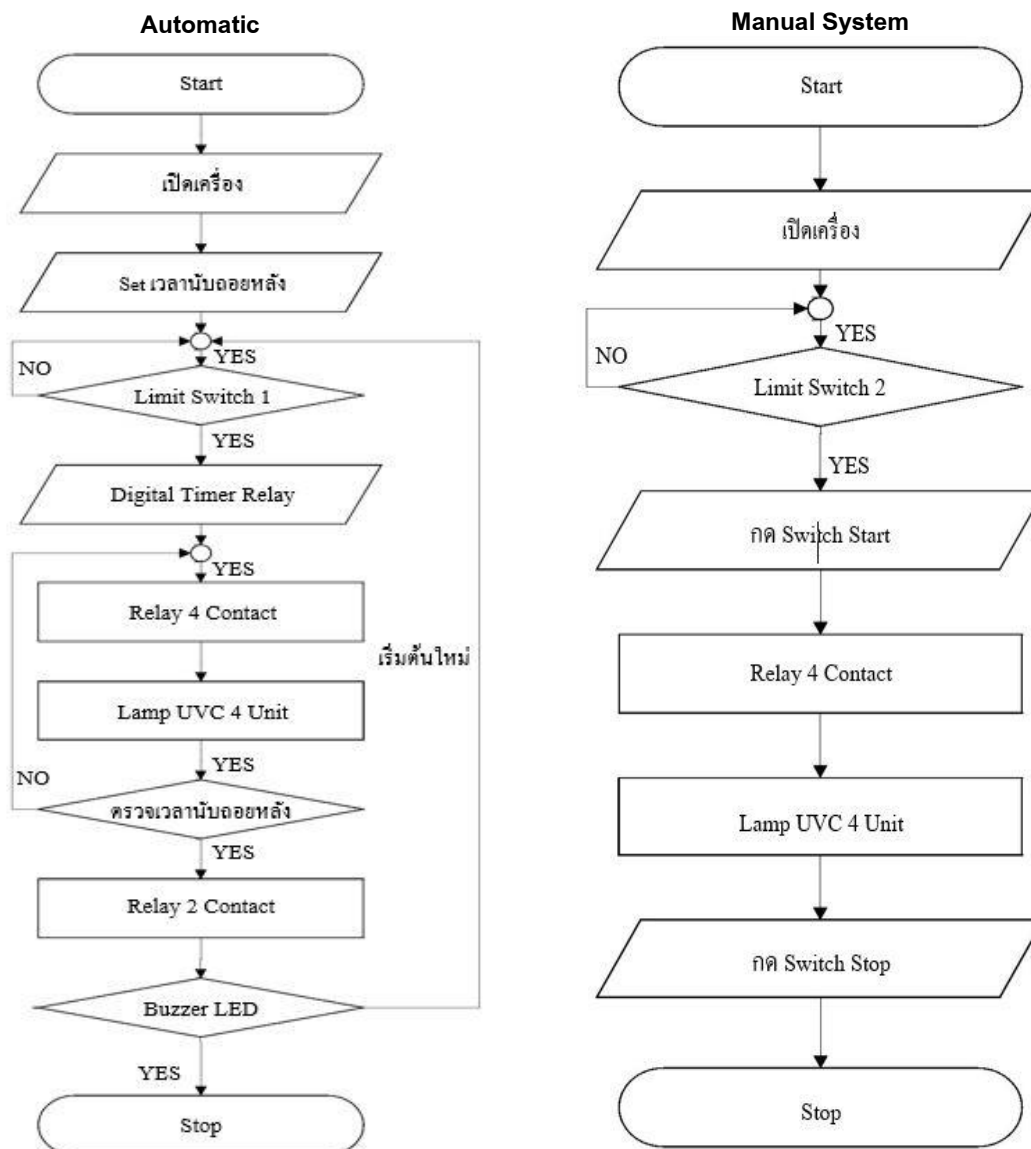
เป็นการออกแบบตำแหน่งการวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมระบบการทำงานให้เหมาะสมกับขนาดของตู้ฉายรังสียูวีซี และตู้ควบคุมระบบ อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงฟังก์ชันการทำงานของเครื่องฯ ทั้งระบบ Manual และ ระบบ Automatic ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 3 แบบโครงสร้างตู้ควบคุมระบบการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี

การออกแบบฟังก์ชันการทำงาน

ในการออกแบบฟังก์ชันการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี จำเป็นต้องให้ความสำคัญกับปัจจัยความปลอดภัยในการใช้งาน และความเข้าใจที่เชี่ยวชาญในหลักการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี โดยจะต้องพิจารณาลำดับขั้นตอนของการทำงานอย่างรอบคอบ ควรคำนึงถึงการตรวจสอบและการป้องกันการเกิดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการทำงาน เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบวงจรระบบควบคุมการทำงาน มีความปลอดภัย และเกิดประสิทธิภาพที่สูงสุด ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ฟังก์ชันการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี

จากภาพที่ 4 เป็นฟังก์ชันการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี ซึ่งสามารถแบ่งระบบการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี ได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ ดังนี้

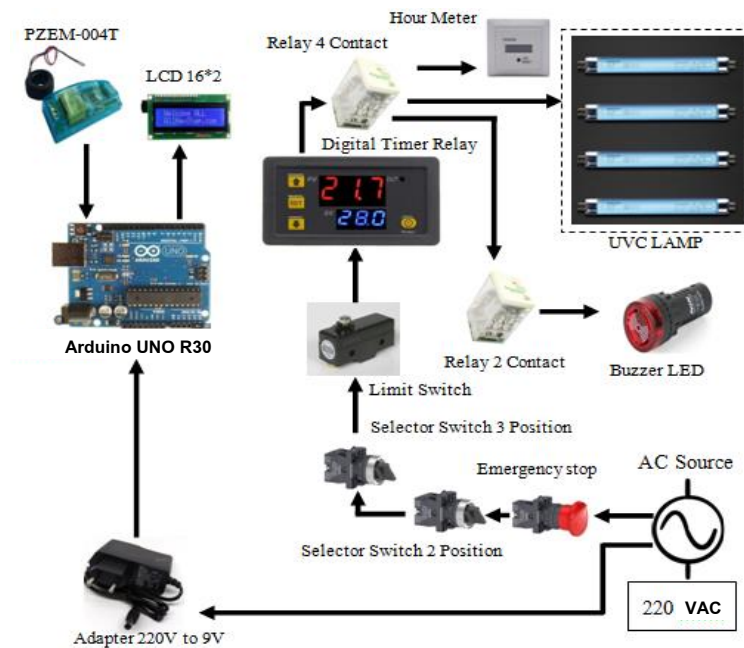
ส่วนที่ 1 ระบบอัตโนมัติ (Auto System) เป็นการตั้งค่าเวลานับถอยหลังผ่านดิจิตอลทามเมอร์รีเลย์ผ่านบนตู้ Control Box โดยมีลิ้มิตสวิตช์เป็นตัวตัด - ต่อของระบบ เพื่อความปลอดภัยในการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี

ส่วนที่ 2 ระบบควบคุม (Manual System) เป็นการกดปุ่มสวิตช์ ON และ สวิตช์ OFF ผ่านบนตู้ Control Box โดยมีลิ้มิตสวิตช์เป็นตัวตัด-ต่อของระบบ เพื่อความปลอดภัยในการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี

ออกแบบโครงสร้างการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี

1) ออกแบบโครงสร้างการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี แบบอัตโนมัติ (Automatic System)

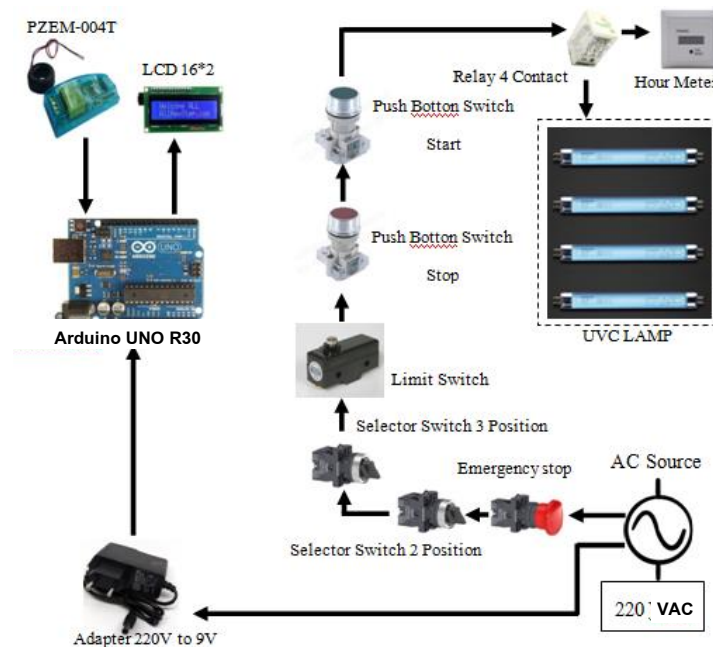
ในส่วนนี้เป็นการออกแบบโครงสร้างการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี ให้สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ โดยการตั้งค่าเวลาการฆ่าเชื้อ แล้วกดปุ่มเริ่มทำงาน ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 โครงสร้างการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี แบบอัตโนมัติ (Automatic System)

2) ออกแบบโครงสร้างการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี แบบควบคุมด้วยมือ (Manual System)

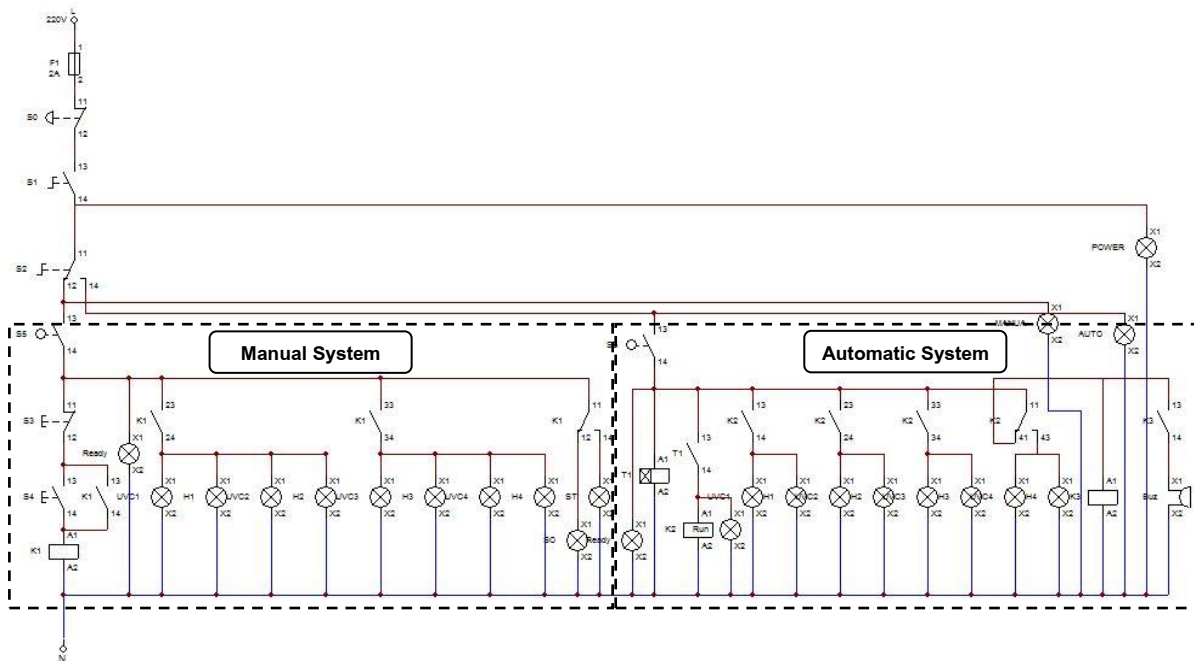
ในส่วนนี้เป็นการออกแบบโครงสร้างการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี ให้สามารถควบคุมการทำงานได้ด้วยผู้ควบคุม โดยการกดปุ่มเริ่มทำงานและหยุดการทำงานด้วยมือหรือผู้ควบคุม ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี แบบควบคุมด้วยมือ (Manual System)

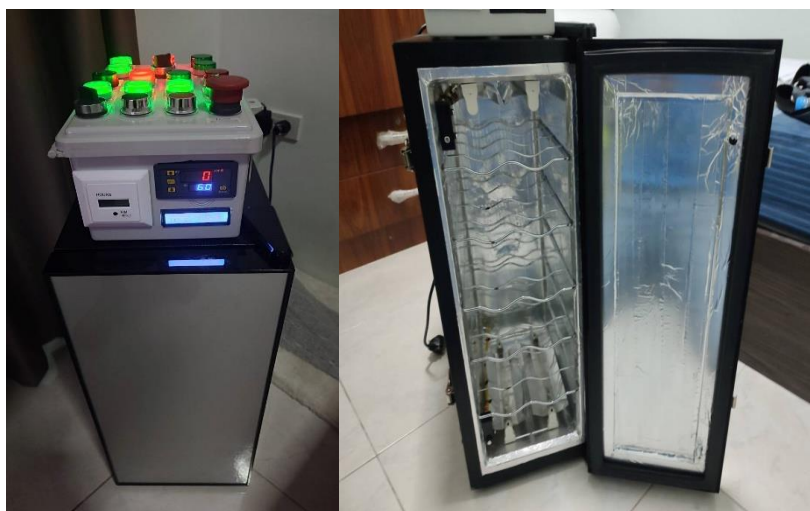
ออกแบบวงจรควบคุมไฟฟ้าของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี

การออกแบบวงจรควบคุมไฟฟ้าของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี เป็นการออกแบบโดยอ้างอิงจากแบบโครงสร้างการทำงานดังภาพที่ 5 และ 6 ซึ่งสามารถออกแบบเป็นวงจรควบคุมไฟฟ้าได้ดังนี้



ภาพที่ 7 วงจรควบคุมไฟฟ้าของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี ทั้ง Automatic และ Manual System

จากภาพที่ 7 เป็นวงจรควบคุมไฟฟ้าของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซีที่มีการออกแบบให้มีระบบทั้งอัตโนมัติและควบคุมด้วยมือ โดยสามารถสลับการทำงานระหว่างทั้งสองระบบได้ผ่าน Selector Switch 3 ตำแหน่ง (S2) ซึ่งระบบ Automatic สามารถกำหนดเวลาในการทำงานและเริ่มต้นการทำงานผ่าน Digital Timer Relay (T1) ในขณะที่ระบบ Manual สามารถเริ่มทำงานด้วยการกดปุ่ม Push Button (S3) และหยุดการทำงานด้วยการกดปุ่ม Push Button (S4) การใช้งานทั้งสองระบบจำเป็นต้องมีประตูปิดอย่างแน่นหนาและปิดสนิทเพื่อให้ Limit Switch (S5 - S6) ทำงานอย่างถูกต้อง เพื่อป้องกันความเสี่ยงจากการสัมผัสรังสียูวีซีไปยังผู้ใช้งาน



ภาพที่ 8 เครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซีเสร็จสมบูรณ์

ทดสอบและเก็บผลการทำงานของเครื่องฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวีซี

ในการทดสอบและเก็บผลการทำงานจริงของเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซีที่ได้ออกแบบและสร้างเสร็จสมบูรณ์ เป็นการนำอุปกรณ์เครื่องใช้และภาชนะตัวอย่างที่มีขนาดและวัสดุต่างกันมาใช้ โดยมีการปนเปื้อนเชื้อแบคทีเรียโคลิฟอร์ม (Coliform) และเอสเชอริเชียโคไล (Escherichia coli, E. coli) เพื่อทำการทดสอบและเก็บผลประสิทธิภาพการใช้งานเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้

- ผลการวัดปริมาณความเข้มของรังสียูวีซีและอุณหภูมิภายในเครื่อง (ขณะเครื่องทำงาน)
- ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย Coliform และ E. coli ด้วยการใช้งานหลอดรังสียูวีซี

ผลการวัดปริมาณความเข้มของรังสียูวีซีและอุณหภูมิภายในเครื่อง (ขณะเครื่องทำงาน)

เป็นการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มของรังสียูวีซีและอุณหภูมิภายในเครื่องขณะทำงาน โดยใช้เครื่องมือวัดความเข้มของรังสียูวีซี (UV512C) และเครื่องมือวัดอุณหภูมิ เก็บผลในแต่ละจุดของชั้นตะแกรงวางชิ้นงานทั้ง 5 ชั้น จากชั้นบนสุดไปจนถึงชั้นล่างสุด จำนวน 5 ครั้ง ดังรูปที่ 9 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความเข้มของรังสีที่ปล่อยออกมาจากหลอดและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในแต่ละชั้นเทียบกับเวลาทดสอบ 60 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (ผกากรองวนไพศาล, 2563)

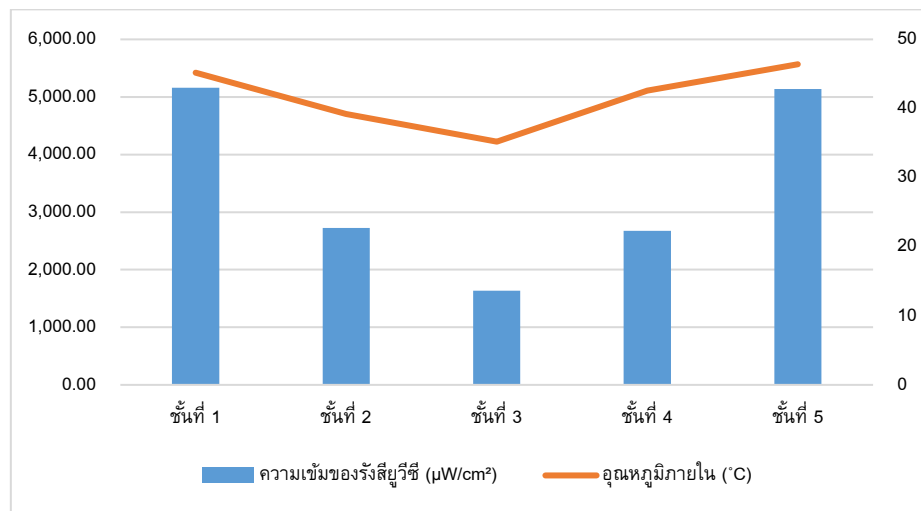


ภาพที่ 9 การวัดปริมาณความเข้มของรังสียูวีซี ในแต่ละชั้นตะแกรง

ตารางที่ 1 ผลการวัดค่าปริมาณความเข้มของรังสียูวีซีและอุณหภูมิภายในเครื่อง (ขณะเครื่องทำงาน)

ชั้นตะแกรง	ความเข้มของรังสียูวีซี ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	อุณหภูมิภายใน ($^{\circ}\text{C}$)
ชั้นที่ 1	5,158.60	45.20
ชั้นที่ 2	2,723.20	39.20
ชั้นที่ 3	1,635.60	35.20
ชั้นที่ 4	2,677.00	42.60
ชั้นที่ 5	5,136.40	46.40
เฉลี่ย	3,466.16	41.72

หมายเหตุ ชั้นที่ 1 คือชั้นตะแกรงที่อยู่ด้านล่างสุด
ชั้นที่ 5 คือชั้นตะแกรงที่อยู่ด้านบนสุด



ภาพที่ 10 ผลการวัดค่าปริมาณความเข้มของรังสียูวีซีและอุณหภูมิภายในเครื่อง (ขณะเครื่องทำงาน)

จากตารางที่ 1 และภาพที่ 10 แสดงผลการวัดค่าความเข้มของรังสียูวีซีและอุณหภูมิภายในเครื่องขณะทำงาน พบว่า บริเวณด้านบนสุดและด้านล่างสุดของเครื่องมีค่าความเข้มของรังสียูวีซีและค่าอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณตรงกลางของเครื่อง เนื่องจากระยะห่างระหว่างหลอดไฟและผิวของวัสดุที่ต้องการฆ่าเชื้อมีผลต่อค่าความเข้มของรังสียูวีซีและอุณหภูมิ โดยมีค่าเฉลี่ยความเข้มของรังสียูวีซีอยู่ที่ 3,466.16 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ และอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 41.72°C

ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย Coliform และ E. coli ด้วยการใช้งานหลอดรังสียูวีซี

เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย Coliform และ E. coli ด้วยชุดทดสอบเชื้อแบคทีเรีย โดยใช้ชิ้นงานที่เป็นอุปกรณ์เครื่องมือและภาชนะ จัดวางในแต่ละจุดของชั้นตะแกรง และทำการทดสอบก่อนและหลังเข้าเครื่องในระยะเวลา 60 นาที (ผลการรณ วนไพศาล, 2563) เพื่อวัดการลดลงของการปนเปื้อนเชื้อแบคทีเรียในแต่ละชั้นตะแกรง และประเมินจุดที่เหมาะสมที่สุดในการวางชิ้นงาน ดังตารางที่ 2 และภาพที่ 11 โดยอ้างอิงจากผลการทดสอบทั้งหมดเป็นจำนวน 5 ครั้ง สำหรับอุปกรณ์เครื่องมือและภาชนะตัวอย่างที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ จะแบ่งประเภทวัสดุดังนี้

- 1) วัสดุประเภทสแตนเลส (Stainless steel) เช่น ช้อน ส้อม
- 2) วัสดุประเภทแก้ว (Glass) เช่น แก้วน้ำ แก้วกาแฟ
- 3) วัสดุประเภทกระเบื้อง (Tile) เช่น ถ้วยเล็ก ถ้วยใหญ่
- 4) วัสดุประเภทเซรามิก (Ceramic) เช่น จาน ชาม
- 5) วัสดุประเภทเมลามีน (Melamine) เช่น กระจับ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย Coliform และ E. coli ด้วยการใช้งานหลอดรังสียูวีซี

ชั้นตะแกรง	ประเภทวัสดุ	ก่อนเข้าเครื่องฆ่าเชื้อ (CFU/ml)		หลังเข้าเครื่องฆ่าเชื้อ (CFU/ml)	
		Coliform	E. coli	Coliform	E. coli
ชั้นที่ 1	Stainless steel	56.00	47.20	0	0
ชั้นที่ 2	Glass	60.40	48.40	0	0
ชั้นที่ 3	Tile	64.40	47.20	0	0
ชั้นที่ 4	Ceramic	64.80	53.20	0	0
ชั้นที่ 5	Melamine	66.00	55.20	0	0
เฉลี่ย		62.32	50.24	0	0

จากผลการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย Coliform และ E. coli ตามที่แสดงในตารางที่ 2 พบว่า เครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซีสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ถึง 100% ภายในระยะเวลา 60 นาที โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ

แบคทีเรียทั้งในทุกระดับชั้นตะแกรงและทุกประเภทของวัสดุที่ทดสอบ จากค่าเฉลี่ยของเชื้อแบคทีเรีย Coliform ที่ 62.32 CFU/ml และค่าเฉลี่ยของเชื้อแบคทีเรีย E. coli ที่ 50.24 CFU/ml ลดลงเหลือ 0 CFU/ml ทั้งหมด สามารถแสดงผลการทดสอบได้ชัดเจนตามภาพที่ 11



(ก) ก่อนเข้าเครื่องฆ่าเชื้อ

(ข) หลังเข้าเครื่องฆ่าเชื้อ

ภาพที่ 11 ถาดเพาะเชื้อ ก่อนและหลังเข้าเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี

สรุปผล

จากผลการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยเครื่องยูวีซี พบว่าเครื่องสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรีย Coliform และ E. coli ได้ 100% ภายใน 60 นาที โดยมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อที่สูงในทุกชั้นตะแกรงและทุกประเภทของวัสดุที่ทดสอบ ทั้งนี้ ความเข้มของรังสียูวีซีและอุณหภูมิภายในเครื่องมีผลต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้ออย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดที่มีความเข้มของรังสีสูงสุด ด้วยความเข้มรังสียูวีซีเฉลี่ยในชั้นบนสุดอยู่ที่ 5,158.6 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ และในชั้นล่างสุดอยู่ที่ 5,136.4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ในขณะที่อุณหภูมิในชั้นบนสุดอยู่ที่ 45.2°C และในชั้นล่างสุดอยู่ที่ 46.4°C จากค่าเฉลี่ยเชื้อแบคทีเรีย Coliform ที่ 62.32 CFU/ml และค่าเฉลี่ยเชื้อแบคทีเรีย E. coli ที่ 50.24 CFU/ml (ก่อนการทดสอบ) ลดลงเหลือ 0 CFU/ml ทั้งหมด (หลังการทดสอบ) สรุปได้ว่าเครื่องฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวีซีมีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมในการใช้สำหรับการฆ่าเชื้อโรคบนอุปกรณ์และภาชนะต่างๆ ภายในระยะเวลา 60 นาที

อภิปรายผล

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า เครื่องฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวีซีมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้ง Coliform และ E. coli การวัดค่าความเข้มของรังสียูวีซีแสดงให้เห็นว่าจุดที่มีความเข้มสูงสุดอยู่ในชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดของตะแกรง เนื่องจากระยะใกล้กับหลอดรังสี ส่งผลให้อุณหภูมิในจุดเหล่านี้สูงกว่าจุดอื่น ความเข้มของรังสียูวีซีที่สูงร่วมกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ นอกจากนี้ การทดสอบพบว่าความเข้มของรังสีและระยะเวลาการฉายรังสีมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อโรค ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ระบุว่ารังสียูวีซีมีประสิทธิภาพสูงในการทำลาย DNA ของเชื้อแบคทีเรียและไวรัส

การใช้หลอดยูวีซีขนาด 6W จำนวน 4 หลอดในเครื่องทำให้สามารถกระจายรังสีได้ทั่วถึงในทุกชั้นตะแกรง โดยเฉพาะในชั้นที่อยู่ใกล้กับหลอดรังสี ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าความเข้มของรังสีและอุณหภูมิในแต่ละชั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบเครื่องฆ่าเชื้อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

โดยสรุป การศึกษานี้ยืนยันว่าเครื่องฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวีซีสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรีย Coliform และ E. coli ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และแนะนำให้ใช้งานเครื่องในสภาวะที่มีการควบคุมความเข้มของรังสีและอุณหภูมิอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ผลการฆ่าเชื้อที่ดีที่สุด ภายในระยะเวลา 60 นาที

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านในการออกแบบและสร้างเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซี ที่ ได้ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนจนงานนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรของมหาวิทยาลัยธนบุรี ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะที่มีคุณค่าในการดำเนินงานนี้ และขอขอบพระคุณโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลหนองบอนแดง อำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี ที่ให้ความร่วมมือและสนับสนุนในการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของเครื่อง รวมถึง การรับมอบเครื่องเพื่อนำไปใช้งานในการดูแลสุขภาพของชุมชน

เอกสารอ้างอิง

- กรมอนามัย. (2562). โคลิฟอร์มแบคทีเรีย ศัตรูตัวร้าย แฝงอันตรายในน้ำใส. ศูนย์อนามัยกลุ่มชาติพันธุ์ ชายขอบและแรงงานข้ามชาติ (ศอช.). สืบค้นจาก <https://multimedia.anamai.moph.go.th/infographics/coliform-bacteria-in-drinking-water/>
- จุฑาทิพย์ ศรีวงศ์ษา. (2560). การศึกษารังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ที่สถานีวัดรังสีอาทิตย์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม. [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม. สืบค้นจาก <http://thesis-ir.su.ac.th/dspace/bitstream/123456789/1581/1/58306203.pdf>
- ฐานิยา คัมภีรานนท์. (2563). คำแนะนำสำหรับการใช้ “หลอดยูวี” ทำลายเชื้อโควิด 19. สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม. สืบค้นจาก <https://www.nimt.or.th/main/?p=31767>
- ผกากรอง วนไพศาล. (2563). การฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวีซี (UVC). ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. สืบค้นจาก <https://pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge>
- พจนศิริธร ลิ้มปิ่นทน, วิรุณ โมนะตระกูล, สาโรช บุญมี, ธเนศ ยืนสุข, ชมภู เหนือศรี, พันธิวา แก้วมาตย และ ชวิศร ปุคะภาค. (2564). การพัฒนาต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสและแบคทีเรียด้วยลำแสง UV-C ขนาดเล็ก. (รายงานผลการวิจัย). มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.
- วรพล หนูขุน, มูฮัมหมัดอัฟฟาน สือแม และ อนุวัติ เดชชนะ (2563). การพัฒนานวัตกรรมเครื่องฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงยูวี แบบเคลื่อนที่ ที่ปลอดภัยและต้นทุนต่ำ โดยความร่วมมือของชุมชน. (รายงานผลการวิจัย). คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์, มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- ศักดิ์ดา จงแก้ววัฒนา. ผลงานและการถ่ายทอดผลงานในระบบเกษตรนิเวศ. สืบค้นจาก http://www.mcc.cmu.ac.th/graduate/Agro723/Reading_Materials/Energy%202.html
- แสงชัยมิเตอร์. รังสีอัลตราไวโอเล็ต และผลกระทบต่อร่างกาย. สืบค้นจาก https://www.sangchaimeter.com/support_detail/Ultraviolet_Radiation_UV
- ไอยฤทธิ ไทยพิสุทธิกุล. (2562). มารู้จักเชื้ออีโคไล. คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล. สืบค้นจาก <https://www.si.mahidol.ac.th/Th/healthdetail.asp?aid=1399>

Translated Thai References

- Department of Health. (2019). Coliform bacteria: Hidden danger in clear water. *Center for Ethnic Health, Marginalized Groups, and Migrant Workers*. Retrieved from <https://multimedia.anamai.moph.go.th/infographics/coliform-bacteria-in-drinking-water/>
- Sriwongsa, J. (2017). *A study of ultraviolet radiation from the sun at the solar radiation measurement station, Silpakorn University, Nakhon Pathom Province*. [Master's thesis]. Silpakorn University, Nakhon Pathom. Retrieved from <http://thesis-ir.su.ac.th/dspace/bitstream/123456789/1581/1/58306203.pdf>
- Kamphiran, T. (2020). Guidelines for using "UV lamps" to destroy COVID-19. *National Institute of Metrology, Ministry of Higher Education, Science, Research, and Innovation*. Retrieved from <https://www.nimt.or.th/main/?p=31767>

- Wanpaisin, P. (2020). Disinfection with UVC. *Department of Microbiology, Faculty of Pharmacy, Mahidol University*. Retrieved from <https://pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge>
- Limpinan, P., Monatakul, W., Boonmee, S., Yuensuk, T., Nuasri, C., Kaewmatya, P. & Pookapark, C. (2021). *Development of a small prototype UV-C light disinfection device for viruses and bacteria* (Research Report). Mahasarakham Rajabhat University.
- Noonnun, W., Sueamae, M.A., Dechana, A. (2020). *Development of a mobile UV disinfection innovation: Safe and low-cost with community participation* (Research Report). Faculty of Humanities and Social Sciences, Thaksin University.
- Sakda Jongkaewwattana. *Energy and energy transfer in agroecological systems*. Retrieved from http://www.mcc.cmu.ac.th/graduate/Agro723/Reading_Materials/Energy%202.html
- Sangchai Meter. *Ultraviolet radiation and its effects on the human body*. Retrieved from https://www.sangchaimeter.com/support_detail/Ultraviolet_Radiation_UV
- Thaipisutthikul, I. (2019). Understanding E. coli bacteria. *Faculty of Medicine, Siriraj Hospital*. Retrieved from <https://www.si.mahidol.ac.th/Th/healthdetail.asp?aid=1399>

Received: Dec 16, 2024

Revised: Dec 24, 2024

Accepted: Dec 26, 2024

การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการกะเทาะเปลือกกุ้งแห้ง

ANALYSIS OF OPTIMAL PARAMETER IN DRY SHRIMP PEELING PROCESS

เอกพล ทับพร¹ อภิชาติ ไชยพร² จิรศักดิ์ ส่งบุญแก้ว^{3*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

²สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันโคเซ็นแห่งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

Ekkapol Tubpond¹ Apichat Chaiyaporn² Jirasak Songbunkaew³

¹Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University

²Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, KOSEN of King Mongkut's Institute of Technology

Ladkrabang

E-mail: ¹ekkapol_ie@thonburi-u.ac.th, ²apichat.cha@kmitl.ac.th, ³jirasak@thonburi-u.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จของเปลือกกุ้งแห้งและเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการคัดแยกเปลือกกุ้งแห้งภายใต้การทดสอบด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกกุ้งแห้ง โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3 ระดับ เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของรากเหง้าปัญหาและคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น จากการระดมสมองได้กำหนดปัจจัยที่ใช้ศึกษา 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ คือ ความเร็วรอบใบกวน เท่ากับ 115-120, 145-150 และ 175-180 RPM ค่าความชื้น <19, 19-21, >21 % และรูปทรงใบกวน 3 แบบ ได้แก่ แบบเพลาทรงกระบอก แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบผสมผสาน จากผลการวิจัยพบว่า ถ้าต้องการค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดหรือค่าอัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้งที่มากที่สุดเท่ากับ $y = 292.33$ PCS ควรกำหนดค่าพารามิเตอร์หรือปัจจัยและระดับของปัจจัยดังนี้ คือ ความเร็วรอบใบกวนอยู่ในช่วงเท่ากับ 145-150 RPM ค่าความชื้นอยู่ในช่วงเท่ากับ 19-21 % และรูปทรงใบกวนควรใช้แบบที่ 3 คือ แบบผสมผสาน โดยมีค่าช่วงของความเชื่อมั่น 95% CI ความน่าจะเป็นของค่าเฉลี่ยจากอัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้งจะตกอยู่ในช่วง 280.83 - 303.84 เท่ากับ 95%

คำสำคัญ: กุ้งแห้ง, การออกแบบการทดลอง, กระบวนการกะเทาะเปลือกกุ้งแห้ง

Abstract

This research aims to analyze the factors influencing the peeling efficiency of dried shrimp shells and determines the optimal parameters for the shell separation process using a dried shrimp peeling machine. A 3-level factorial experimental design was applied to identify root causes and screen factors potentially affecting the outcomes. Based on brainstorming, three factors were selected for investigation, each with three levels: impeller speed at 115–120, 145–150, and 175–180 RPM; moisture content at <19%, 19–21%, and >21%; and three impeller shapes, namely cylindrical, rectangular, and hybrid designs. The research findings show that the highest peeling efficiency of dried shrimp, at $y = 292.33$ PCS, can be achieved with the following optimal parameters: motor speed (S_p) of 145–150 RPM, moisture content (M_o) of 19–21%, and impeller shape (S_h) type 3 (hybrid design). The 95% confidence interval (CI) indicates that the mean peeling efficiency is likely to fall within the range of 280.83 to 303.84, with a 95% probability.

Keywords: dried shrimp, experimental design, dry shrimp peeling process

บทนำ

ปัจจุบันกุ้งแห้งเป็นผลิตภัณฑ์ประมงพื้นเมืองที่สำคัญสำหรับการบริโภคในประเทศและส่งออก โดยในปี 2566 การส่งออกกุ้งแห้งของไทยมีปริมาณรวม 109,663 ตัน คิดเป็นมูลค่า 36,284 ล้านบาท โดยตลาดส่งออกหลัก ได้แก่ ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย ฮองกงและแคนาดา ปริมาณการส่งออกลดลง 9% และมูลค่าลดลง 14% เมื่อเทียบกับปี 2565 สาเหตุหลักมาจากเศรษฐกิจโลกที่ชะลอตัว และการแข่งขันในตลาดโลกที่รุนแรงขึ้น จากข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรมระบุว่า มีโรงงานแปรรูปกุ้งแห้งขึ้นทะเบียนในประเทศไทย 79 แห่ง แต่ละแห่งมีพนักงานเฉลี่ย 40-50 คน โรงงานเหล่านี้ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์กุ้งและสนับสนุนตลาดในประเทศและส่งออก วิธีการผลิตกุ้งแห้งแต่เดิมได้รับการเรียนรู้ และถ่ายทอดจากบรรพบุรุษ ไม่มีมาตรฐานการผลิตที่แน่นอน ทำให้กุ้งแห้งมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ กุ้งที่นำมาผลิตกุ้งแห้งจะเป็นกุ้งที่อยู่ในตระกูลเพนียดี (Penaeidae) และพาลิโมนิดี (Palaemonidae) เป็นกุ้งที่มีขนาดเล็ก กุ้งแห้งที่จำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาดมี 2 แบบคือแบบแยกเปลือกและแบบไม่แยกเปลือก การผลิตกุ้งแห้งในประเทศไทย จะต้มกุ้งในน้ำเดือดประมาณ 10 นาที ซึ่งโดยแท้จริงแล้วเวลาต้มกุ้งจะไม่แน่นอน (Sun และคณะ, 2022) ขึ้นอยู่กับปริมาณกุ้งที่ใช้ต้มแต่ละรอบการผลิต ก่อนอบแห้งหรือนำไปตากแดดโดยจะใช้อุณหภูมิในช่วง 60-100 องศาเซลเซียส (Om และคณะ, 2019) ซึ่งภายหลังจากกระบวนการลดความชื้นให้เนื้อกุ้งแห้ง จะส่งผลต่อค่าความชื้นซึ่งค่าความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการแกะเปลือกกุ้งแห้ง ควรอยู่ที่ประมาณ 18-22% เพื่อให้เปลือกมีความแข็งพอเหมาะ สามารถแยกออกจากเนื้อได้ง่าย โดยไม่ทำให้เปลือกแตกละเอียดเกินไปหรือเนื้อกุ้งเปื่อยจนเสียหาย ถ้าความชื้นมีค่าต่ำกว่า 18% กุ้งจะมีลักษณะแข็งและเปราะเปลือกอาจแตกหักยากต่อการแยกและทำให้เกิดเศษเล็ก ๆ ปะปน ในขณะที่ถ้าความชื้นสูงกว่า 22% เนื้อกุ้งจะนุ่ม เปลือกอาจติดกับเนื้อทำให้แกะยากและเสียหาย โดยค่าความชื้นเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับกุ้งแห้งอยู่ที่ประมาณ 20-25% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น การบริโภคโดยตรง ค่าความชื้นควรต่ำกว่า 25% เพื่อป้องกันการเน่าเสียหรือการเกิดเชื้อราหรือการแปรรูปเพิ่มเติม อาจต้องลดความชื้นลงต่ำกว่า 20% เพื่อให้กุ้งมีความกรอบมากขึ้นและเหมาะสำหรับการแปรรูปในขั้นถัดไป

การคัดแยกหรือการแกะเปลือกกุ้งแห้งในแบบชาวประมงแบบเดิมจะนำเนื้อกุ้งแห้งไปคัดแยกเปลือกโดยวิธีการทุบโดยขึ้นตอนทั้งหมดจะต้องใช้แรงงานจากคนเป็นส่วนใหญ่ จะใช้เวลาในการปฏิบัติงานสูง เพื่อให้เปลือกกุ้งแห้งหลุดออก อีกทั้งยังเกิดการเสียหายกับตัวเนื้อกุ้ง เพราะหากใช้แรงในการทุบมากเกินไป จะทำให้เนื้อกุ้งแตกออกจากกันได้หากนำไปจำหน่ายอาจจะได้ราคาต่ำเพราะกุ้งเนื้อไม่เต็ม จึงนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนามาเป็นเครื่องแกะเปลือกกุ้งแห้งในปัจจุบัน ดังแสดงดังภาพที่ 1 และภาพที่ 2 เป็นเครื่องจักรพิเศษที่ออกแบบมาเพื่อทำให้กระบวนการแกะเปลือกกุ้งเป็นไปโดยอัตโนมัติ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและสุขอนามัยในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเลได้อย่างมาก เทคโนโลยีนี้เกิดขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการกุ้งแปรรูปที่เพิ่มมากขึ้นและความท้าทายที่เกี่ยวข้องกับวิธีการแกะเปลือกแบบดั้งเดิมที่ใช้แรงงานคน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำเครื่องแกะเปลือกกุ้งอัตโนมัติมาใช้งานจะช่วยผลผลิตสูงขึ้นและต้นทุนการดำเนินงานลดลง (Nananและคณะ, 2023) (Alfiya และคณะ, 2022) แต่เนื่องจากเครื่องดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ทักษะ ความรู้ ความเชี่ยวชาญจากผู้ใช้ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ความเร็วรอบใบกวน (Speed of spindle) 3 ระดับ ได้แก่ 115-120, 145-150, 175-180 RPM ซึ่งถ้าการแกะเปลือกกุ้งในแต่ละครั้งถ้าใช้ความเร็วรอบสูงเกินไปจะทำให้ตัวเนื้อกุ้งเกิดความเสียหาย แต่ถ้าความเร็วรอบต่ำเกินไปจะทำให้เปลือกกุ้งไม่หลุดออกค่าความชื้น (Moisture) 3 ระดับ ได้แก่ <19, 19-21, >21 ซึ่งถ้ากำหนดค่าความชื้นของเนื้อกุ้งไม่เหมาะสมกุ้งจะมีลักษณะแข็งและเปราะเปลือกอาจแตกหักยากต่อการแยกและทำให้เกิดเศษเล็ก ๆ หรือ และรูปร่างใบกวน (Shape of the impeller) 3 แบบ ถ้าเลือกไม่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่ออัตราการแกะสำเร็จ (Peeling Efficiency) (Gringer และคณะ, 2018)



ภาพที่ 1 การประกอบเครื่องกะเทาะเปลือกกุ้งแห้ง



ภาพที่ 2 เครื่องกะเทาะเปลือกกุ้งแห้ง

ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้วิจัย จึงต้องการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของกุ้งแห้งและเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการคัดแยกเปลือกกุ้งแห้ง โดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางด้านวิศวกรรมและการประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสามระดับ (3^k Factorial Design) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์และคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้ง (Peeling Efficiency) เพื่อสามารถช่วยให้แยกเนื้อกุ้งออกจากเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้งและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการคัดแยกเปลือกกุ้งแห้ง

ขอบเขตของการวิจัย

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้งและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการคัดแยกเปลือกกุ้งแห้ง มีขอบเขตของการวิจัยประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

1. เครื่องกะเทาะเปลือกกุ้งแห้ง ขนาด $0.8 \times 1.0 \times 1.50$ m ขับเคลื่อนด้วยใบกวนกระแสน้ำขนาด 90 วัตต์ ผ่านเกียร์ทดรอบขนาด 1 : 7.5 กะเทาะเปลือกกุ้งแห้งด้วยระบบการเสียดสีระหว่างชุดใบกวน (Shape of the impeller) เปลือกกุ้งแห้งกับถังกวนและเป่าเศษเปลือกกุ้งแห้งที่กะเทาะแล้วออกจากเครื่องด้วยโบเวอร์ขนาด 20 วัตต์
2. ปัจจัยทดสอบประกอบด้วย 3 ปัจจัย มีรายละเอียดดังนี้ คือ
 A = ความเร็วรอบใบกวน (Speed of spindle ; Sp)
 ระดับของการทดสอบ 3 level ได้แก่ 115-120, 145-150, 175-180 RPM
 B = ค่าความชื้น (Moisture ; Mo) ระดับของการทดสอบ 3 level ได้แก่ <19, 19-21, >21 %
 C = รูปร่างใบกวน (Shape of the impeller ; Sh) ระดับของการทดสอบ 3 level ได้แก่ 1, 2, 3
 Y = อัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้ง (Peeling Efficiency ; y)
 จำนวนการทดสอบซ้ำ (Replicates ; n) = 3 ครั้ง
3. ศึกษาอัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้งภายใต้การทดสอบด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกกุ้งแห้ง โดยควบคุมขนาดของกุ้งแห้งที่นำมาทดสอบในแต่ละรอบการทดสอบจำนวน 300 pcs/kg และยังไม่ได้กะเทาะเปลือกกุ้งแห้งออก
4. ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 19 มาช่วยในการดำเนินการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ระดมความคิดเห็นเพื่อกำหนดปัจจัย

การระดมความคิดเห็นเพื่อกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยจากผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต การออกแบบ การรวบรวมข้อมูลและการศึกษาสภาพปัญหาที่เกิดขึ้น พบว่าอัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้ง (Peeling Efficiency) เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบใบกวน (Speed of spindle) 3 ระดับ ได้แก่ 115-120, 145-150 และ 175-180 RPM ค่าความชื้น (Moisture) 3 ระดับ ได้แก่ <19, 19-21, >21 และรูปร่างใบกวน (Shape of the impeller) 3 แบบ ได้แก่ แบบเพลาทรงกระบอก แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบผสมผสานดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2

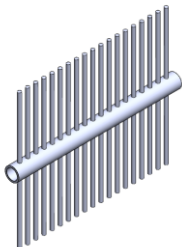
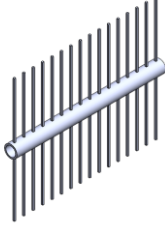
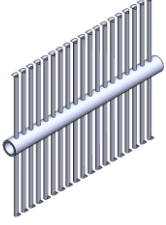
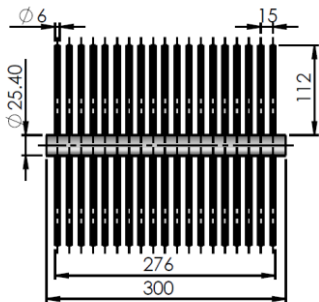
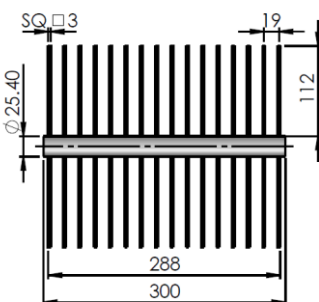
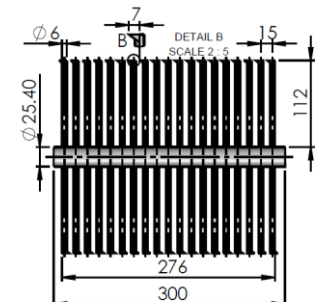
การปรับค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นค่าที่ไม่คงที่ ซึ่งถ้าใช้ความเร็วรอบสูงเกินไปจะทำให้ตัวเนื้อกุ้งเกิดความเสียหาย แต่ถ้าความเร็วรอบต่ำไปจะทำให้เปลือกกุ้งไม่หลุดออก โดยปัจจัยดังกล่าวเป็นตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของกุ้งแห้ง ซึ่งผู้วิจัยมองว่าการกำหนดพารามิเตอร์ในลักษณะนี้มีลักษณะการลองผิดลองถูก (Trial and Error) หรือการใช้การทดลองปรับตั้งค่าของกระบวนการทีละค่า (One Factor At a Time) จากผู้ควบคุมสายการผลิตเพื่อให้ชิ้นงานมีคุณภาพ (Muralidharan และคณะ, 2019) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2

เพราะฉะนั้นผู้วิจัยจึงได้นำปัจจัยดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ (3^k Factorial Design) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์และคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง ในขั้นตอนนี้จะกำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้ง (Peeling Efficiency) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 19 มาช่วยในการดำเนินการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ (3^k Factorial Design) เพื่อคัดแยกปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออกไป

ตารางที่ 1 แสดงปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ศึกษา

Factor	Units	Level		
		Low	Medium	High
ความเร็วรอบใบกวน (Speed of spindle ; Sp)	RPM	A (115-120)	B (145-150)	C (175-180)
ค่าความชื้น (Moisture ; Mo)	%	D (<18)	E (19-21)	F (>22)
รูปทรงใบกวน (Shape of the impeller ; Sh)	Type	1	2	3

ตารางที่ 2 ลักษณะใบกวน (Shape of the impeller ; Sh)

แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
		
		

2. การกำหนดสมมติฐานการทดลอง

การตั้งสมมติฐานนั้นจะตั้งโดยใช้หลักการทางสถิติ ซึ่งจะวิเคราะห์ปัจจัยหลัก (Main Effect) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหรือปัจจัยร่วม (Interaction) ที่มีผลตอบสนองต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง (Peeling Efficiency) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยสามารถพิจารณาแบบจำลองการวิเคราะห์ความแปรปรวน 3 ปัจจัย ได้ดังสมการที่ 1

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} \quad (1)$$

โดยที่ y คือ อัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง μ คือค่าเฉลี่ยรวม (Grand mean) α_i คือ ความเร็วรอบใบกวน β_j คือ ค่าความชื้น γ_k คือ ลักษณะใบกวน และ $(\alpha\beta)_{ij}$, $(\alpha\gamma)_{ik}$, $(\beta\gamma)_{jk}$, $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ คือ ปัจจัยร่วมหรือปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างตัวแปร

- สมมติฐานที่ 1 อิทธิพลของความเร็วรอบใบกวนมีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง
 $H_0: \alpha_i = 0$ ทุกๆค่า i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, a$: ปัจจัย Sp ไม่มีผลต่อ Y
 $H_1: \alpha_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า i : ปัจจัย Sp มีผลต่อ Y
- สมมติฐานที่ 2 อิทธิพลของค่าความชื้นมีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง

- $H_0: \beta_j = 0$ ทุกๆค่า j เมื่อ $j = 1, 2, \dots, b$: ปัจจัย M_0 ไม่มีผลต่อ Y
 $H_1: \beta_j \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า j : ปัจจัย M_0 มีผลต่อ Y
3. สมมติฐานที่ 3 อิทธิพลของลักษณะใบกวนมีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง
- $H_0: \gamma_k = 0$ ทุกๆค่า k เมื่อ $k = 1, 2, \dots, c$: ปัจจัย S_h ไม่มีผลต่อ Y
 $H_1: \gamma_k \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า k : ปัจจัย S_h มีผลต่อ Y
4. สมมติฐานที่ 4 อิทธิพลของร่วมของความเร็รรอบใบกวนและค่าความชื้นมีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง
- $H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0$ ทุกๆค่า i และ j เมื่อ $i = 1, 2, \dots, a$ และ $j = 1, 2, \dots, b$
 $H_1: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า i และ j
5. สมมติฐานที่ 5 อิทธิพลของร่วมของความเร็รรอบใบกวนและลักษณะใบกวนมีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง
- $H_0: (\alpha\gamma)_{ik} = 0$ ทุกๆค่า i และ k เมื่อ $i = 1, 2, \dots, a$ และ $k = 1, 2, \dots, c$
 $H_1: (\alpha\gamma)_{ik} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า i และ k
6. สมมติฐานที่ 6 อิทธิพลของร่วมของค่าความชื้นและลักษณะใบกวนมีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง
- $H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0$ ทุกๆค่า j และ k เมื่อ $j = 1, 2, \dots, b$ และ $k = 1, 2, \dots, c$
 $H_1: (\beta\gamma)_{jk} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า j และ k
7. สมมติฐานที่ 7 อิทธิพลของร่วมของความเร็รรอบใบกวน ค่าความชื้นและลักษณะใบกวนมีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง
- $H_0: (\alpha\beta\gamma)_{ijk} = 0$ ทุกๆค่า i, j และ k
 $H_1: (\alpha\beta\gamma)_{ijk} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า i, j และ k

3. การออกแบบการทดลองและการเก็บข้อมูล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเพื่อค้นหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ (3^k Factorial Design) ที่ประกอบด้วย k ปัจจัย ในระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบ โดยปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ โดยนำปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่มีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง มาทำการทดลองทั้งหมด $3 \times 3 \times 3 \times \dots \times 3 = 3^k$ การทดลองการออกแบบการทดลอง โดยกำหนดให้ปัจจัย (Factors) คือเท่ากับ 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (Replicates) ได้ทั้งหมด (Total runs) เท่ากับ 81 ครั้ง แสดงดังภาพที่ 3 โดยมีผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 19 แสดงเป็นตารางข้อมูลดังภาพที่ 3

Multilevel Factorial Design

Design Summary

Factors: 3	Replicates: 3
Base runs: 27	Total runs: 81
Base blocks: 1	Total blocks: 1
Number of levels: 3, 3, 3	

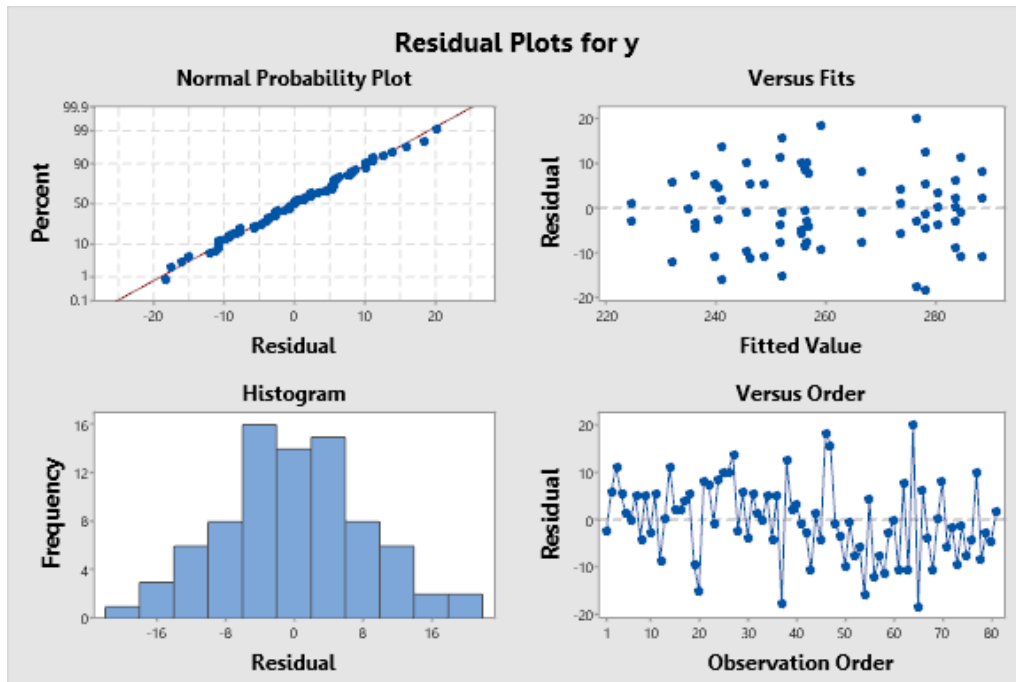
ภาพที่ 3 Multilevel Factorial Design

ตารางที่ 3 แสดงผลข้อมูลจากการออกแบบการทดลอง

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Sp	Mo	Sh	y
1	1	1	1	A	D	1	238
2	2	1	1	A	D	2	238
3	3	1	1	A	D	3	263
4	4	1	1	A	E	1	252
5	5	1	1	A	E	2	226
6	6	1	1	A	E	3	235
7	7	1	1	A	F	1	245
8	8	1	1	A	F	2	253
*	*	*	*	*	*	*	*
*	*	*	*	*	*	*	*
74	74	1	1	C	D	2	251
75	75	1	1	C	D	3	259
76	76	1	1	C	E	1	232
77	77	1	1	C	E	2	256
78	78	1	1	C	E	3	248
79	79	1	1	C	F	1	254
80	80	1	1	C	F	2	251
81	81	1	1	C	F	3	243

ผลการออกแบบการทดลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) วิเคราะห์เงื่อนไขความพอเพียงจากกราฟ การวิเคราะห์ความพอเพียงของข้อมูลจากกราฟ 4 ใน 1 (Four in one) ดังแสดงภาพที่ 4 จากกราฟการกระจาย (Normal Probability Plot) ของค่าส่วนตกค้างโดยพิจารณาจากการกระจายตัวของข้อมูล ซึ่งการกระจายตัวของข้อมูลมีการกระจายตัวรอบเส้นตรงแบบปกติ ซึ่งแสดงได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ จากกราฟ (Versus Fits) แสดงการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) จาก พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีการกระจายตัวที่เป็นแบบอิสระ ไม่เป็นรูปแบบแน่นอนแสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกันทั้งด้านบวกและด้านลบไม่เป็นลักษณะของรูปแบบลำโพงปากเปิดด้านใดด้านหนึ่ง จึงอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้ข้อมูลพิจารณาได้จากกราฟฮิสโตแกรม (Histogram) แสดงลักษณะข้อมูลที่อยู่ทั้งสองฝั่งซึ่งเป็นการกระจายตัวในรูปแบบปกติ โดยจะมีลักษณะเป็นรูปแบบการกระจายแบบระฆังคว่ำแสดงได้ว่าข้อมูลที่ได้มีการกระจายตัวแบบปกติ จากกราฟการกระจายตัวแบบสุ่ม (Versus Order) ใช้ตรวจสอบข้อมูลว่ามีการกระจายตัวแบบสุ่มหรือไม่ จากลักษณะของข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนการกระจายตัวที่ดี เนื่องจากเนื่องจากอยู่ภายใต้การควบคุมที่ดีแสดงว่าข้อมูลมีลักษณะแบบสุ่ม



ภาพที่ 4 กราฟ 4 ใน 1 (Four in one)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

จากการนำข้อมูลการออกแบบการทดลองไปใช้ในการปรับตั้งค่าที่เครื่องกะเทาะเปลือกกุ้งแห้ง เพื่อทดลองหาอัตราการผลิตสำเร็จของกุ้งแห้ง (Peeling Efficiency) ภายใต้เงื่อนไขการทดลองแล้วจึงนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จะอ่านค่า P-value ที่ได้จากตารางสรุป ANOVA โดยถ้าค่า P-value $> \alpha$ (0.05) จะยอมรับสมมติฐาน H_0 และปฏิเสธสมมติฐาน H_1 ตรงกันข้ามถ้าค่า P-value $\leq \alpha$ (0.05) จะปฏิเสธสมมติฐานสมมติฐาน H_0 และจะยอมรับสมมติฐาน H_1

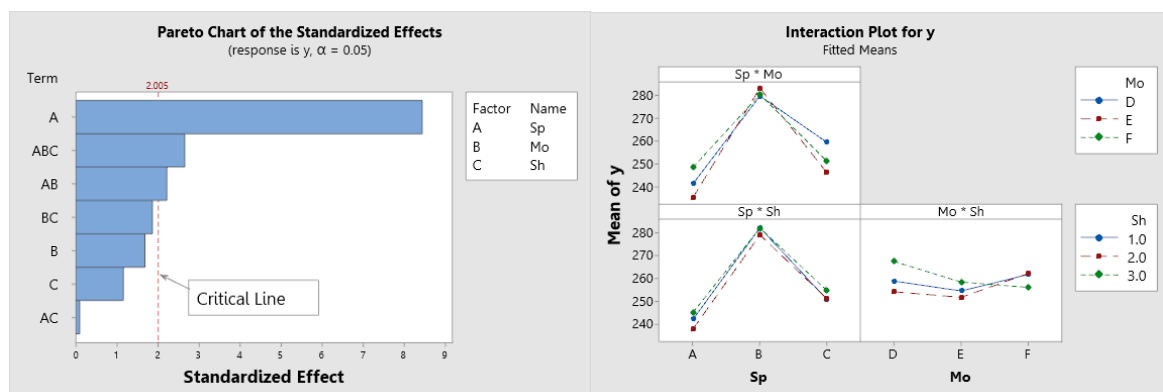
จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะทำให้ทราบผลของอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) และปัจจัยร่วม (Interaction) ที่มีผลต่ออัตราการผลิตสำเร็จของกุ้งแห้ง (Peeling Efficiency) และสามารถวิเคราะห์หาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดได้จากการวิเคราะห์จาก Main Effect และ Interaction Plot เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดได้ตามต้องการ โดยมีผลจากตาราง (ANOVA) ดังนี้

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลจากการออกแบบการทดลอง

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	27491.4	1057.4	10.57	0.000
Linear	6	23037.5	3839.6	38.38	0.000
Sp	2	22268.5	11134.2	111.29	0.000
Mo	2	484.2	242.1	2.42	0.099
Sh	2	284.8	142.4	1.42	0.250
2-Way Interactions	12	2180.9	181.7	1.82	0.069
Sp*Mo	4	1153.5	288.4	2.88	0.031
Sp*Sh	4	91.9	23.0	0.23	0.921

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Mo*Sh	4	935.5	233.9	2.34	0.067
3-Way Interactions	8	2273.0	284.1	2.84	0.010
Sp*Mo*Sh	8	2273.0	284.1	2.84	0.010
Error	54	5402.7	100.0		
Total	80	32894.0			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
10.0025	83.58%	75.67%	63.04%		

จากตาราง ANOVA พบว่า ปัจจัย Sp มีค่า P-value < 0.05 แสดงว่ามีอิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้ง และเมื่อพิจารณาร่วมกันแบบ 2 ปัจจัย พบว่า Sp*Mo (2-way Interaction) มีค่า P-value = 0.031 แสดงว่ามีอิทธิพลของร่วมของความเร็วยรอบใบกวนและค่าความชื้นมีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้ง และเมื่อพิจารณาร่วมกันแบบ 3 ปัจจัย พบว่า Sp*Mo*Sh (3-way Interaction) มีค่า P-value = 0.010 แสดงว่าอิทธิพลของร่วมของความเร็วยรอบใบกวนค่าความชื้นและลักษณะใบกวนมีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้ง และเมื่อพิจารณา Model Summary พบว่า ปัจจัยทั้ง 3 มีอิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้งคิดเป็น 83.58% ค่า R ที่ปรับแล้วคิดเป็น 75.67 % ค่าของการพยากรณ์อิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จได้เท่ากับ 63.04% และจากภาพที่ 5 พบว่าที่บริเวณเส้นวิกฤตแสดงให้เห็นว่า ปัจจัย A, AB, ABC มีผลตอบสนองมากกว่าปัจจัย B, C, BC และ AC



ภาพที่ 5 Pareto Chart and Interaction Plot

จากกราฟ interaction Plot แสดงอิทธิพลร่วมกันระหว่างตัวแปร โดยลักษณะของเส้นกราฟมีทิศทางตัดกันแสดงว่ามีอิทธิพลร่วมกันระหว่างตัวแปร ผู้วิจัยจึงการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ส่งผลอัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้ง (Peeling Efficiency) ด้วยการใช้ Response Optimizer มาทำการวิเคราะห์เพื่อยืนยันผลจากโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านสถิติ Minitab Version 19

ตารางที่ 5 แสดงข้อมูลจากการทดลอง

Response Optimization: y						
Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
y	Maximum	220	297		1	1

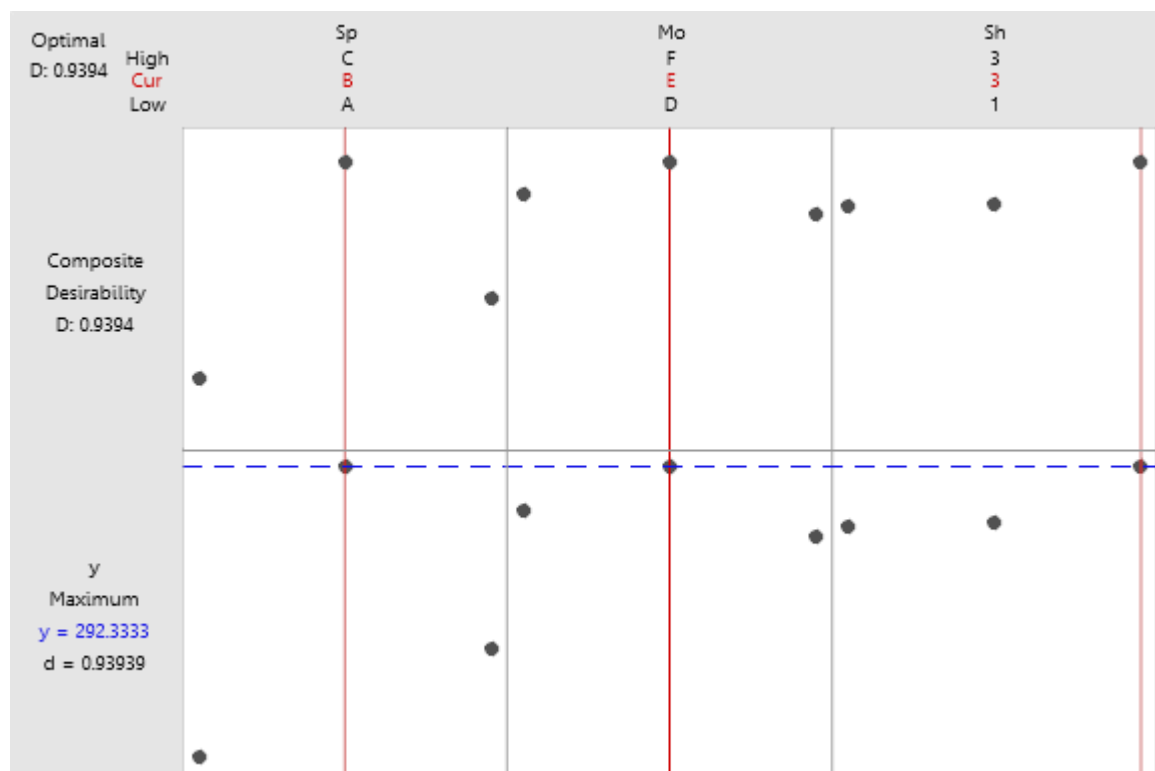
Solution					
Solution	Sp	Mo	Sh	y Fit	Composite Desirability
1	B	E	3	292.333	0.939394

Multiple Response Prediction				
Variable	Setting			
Sp	B			
Mo	E			
Sh	3			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
y	292.33	5.74	(280.83, 303.84)	(269.32, 315.34)

จากตาราง Parameters แสดงค่าการเลือกเป้าหมายที่ต้องการหาผลลัพธ์ของการตอบสนองในที่นี้ คือ อัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้ง (Peeling Efficiency) โดยข้อมูลมีค่าสูงสุด (Maximum) คือ 297 มีค่าต่ำสุด (Lower) คือ 220

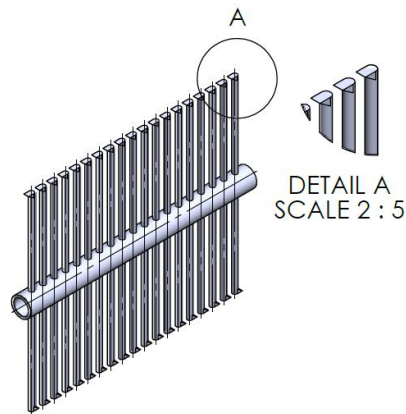
จากตาราง Solution แสดงผลลัพธ์ปัจจัยที่เหมาะสม คือ ความเร็วรอบใบกวน (Speed of spindle ; Sp) เท่ากับ 145-150 RPM ค่าความชื้น (Moisture ; Mo) เท่ากับ 19-21 % และรูปทรงใบกวน (Shape of the impeller ; Sh) ควรใช้แบบที่ 3 โดยมีค่าช่วงของความเชื่อมั่น (Confidence Interval) 95% CI คือมีการทดลองแบบเดิมซ้ำๆกับประชากรกลุ่มเดิม ความน่าจะเป็นที่ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์จะอยู่ในช่วง 280.83 - 303.84 เท่ากับ 95%

ที่ 95% PI เป็นช่วงการทำนาย (Prediction Interval) คือ ถ้าทดลองแบบเดิมซ้ำๆกับประชากรกลุ่มเดิมความน่าจะเป็นที่จะได้ผลลัพธ์จะตกอยู่ในช่วง 269.32 - 315.34 เท่ากับ 95%



ภาพที่ 5 Response Optimizer

จากภาพที่ 5 พบว่าจากผลการวิเคราะห์ด้วย Response Optimizer ถ้าต้องการค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดหรือค่าอัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง (Peeling Efficiency) ที่มากที่สุด เท่ากับ $y = 292.33$ PCS ควรกำหนดค่าพารามิเตอร์หรือปัจจัยและระดับของปัจจัยดังนี้ คือ ความเร็วรอบใบกวน (Speed of spindle ; Sp) อยู่ในช่วงเท่ากับ 145-150 RPM ค่าความชื้น (Moisture ; Mo) อยู่ในช่วงเท่ากับ 19-21 % และรูปทรงใบกวน (Shape of the impeller ; Sh) ควรใช้แบบที่ 3 คือ แบบผสมผสานแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ลักษณะใบกวนแบบผสมผสาน

สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง (Peeling Efficiency) และเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการคัดแยกเปลือกกึ่งแห้งโดยการทดสอบด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกกึ่งแห้ง โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ เพื่อวิเคราะห์และคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น โดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางด้านวิศวกรรมและการประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลมาช่วยวิเคราะห์ ซึ่งจากการระดมความคิดเห็นเพื่อกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัย พบว่าอัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง (Peeling Efficiency) เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบใบกวน (Speed of spindle) 3 ระดับ ได้แก่ 115-120, 145-150 และ 175-180 RPM ค่าความชื้น (Moisture) 3 ระดับ ได้แก่ <19, 19-21, >21 และรูปทรงใบกวน (Shape of the impeller) 3 แบบ ได้แก่ แบบเพลาทรงกระบอก แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ผู้วิจัยจึงได้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 19 กำหนดให้ปัจจัย (Factors) คือ เท่ากับ 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (Replicates) ได้ทั้งหมด (Total runs) เท่ากับ 81 ครั้ง โดยมีผลการออกแบบการทดลอง คือ จากตาราง ANOVA พบว่า ปัจจัย Sp มีค่า P-value < 0.05 แสดงว่ามีอิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง และเมื่อพิจารณาร่วมกันแบบ 2 ปัจจัย พบว่า $Sp*Mo$ (2-way Interaction) มีค่า P-value = 0.031 แสดงว่ามีอิทธิพลของร่วมของความเร็วรอบใบกวนและค่าความชื้นมีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง และเมื่อพิจารณาร่วมกัน แบบ 3 ปัจจัย พบว่า $Sp*Mo*Sh$ (3-way Interaction) มีค่า P-value = 0.010 แสดงว่าอิทธิพลของร่วมของความเร็วรอบใบกวนค่าความชื้นและลักษณะใบกวนมีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง และเมื่อพิจารณา Model Summary พบว่าปัจจัยทั้ง 3 มีอิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้งคิดเป็น 83.58% ค่า R ที่ปรับแล้วคิดเป็น 75.67 % ค่าของการพยากรณ์อิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จได้เท่ากับ 63.04%

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง

จากการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางด้านวิศวกรรมและการประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ (3k Factorial Design) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์และคัดกรองปัจจัย พบว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง คือ ปัจจัยความเร็วรอบใบกวน และปัจจัยร่วมกันแบบ 2 ปัจจัย (2-way Interaction) พบว่า ปัจจัยความเร็วรอบใบกวนและค่าความชื้นมีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง และเมื่อพิจารณาร่วมกัน แบบ 3 ปัจจัย (3-way Interaction) พบว่า ปัจจัยความเร็วรอบใบกวน ค่าความชื้นและรูปทรงใบมีผลต่ออัตราการแกะสำเร็จของกึ่งแห้ง ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

ถ้าต้องการค่าพารามิเตอร์หรือค่าอัตราการแกะสำเร็จของกุ้งแห้ง (Peeling Efficiency) ที่มากที่สุด เท่ากับ $y = 292.33$ PCS. ควรกำหนดค่าพารามิเตอร์หรือปัจจัยและระดับของปัจจัยดังนี้ คือ ความเร็วรอบใบกวน (Speed of spindle ; Sp) อยู่ในช่วงเท่ากับ 145-150 RPM ค่าความชื้น (Moisture ; Mo) อยู่ในช่วงเท่ากับ 19-21 % และรูปทรงใบกวน (Shape of the impeller ; Sh) ควรใช้แบบที่ 3 คือ แบบผสมผสาน

ข้อเสนอแนะ

เครื่องกะเทาะเปลือกกุ้งแห้งสามารถการนำเทคโนโลยีเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เข้ามาประยุกต์ใช้จะช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการปฏิบัติงาน ลดต้นทุนแรงงานรวมถึงการควบคุมพลังงาน เพื่อให้เครื่องทำงานได้อย่างคุ้มค่าและลดการสิ้นเปลืองพลังงานและยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง

- Alfiya, P. v., Rajesh, G. K., Murali, S., Aniesrani Delfiya, D. S., Samuel, M. P., & Prince, M. v. (2022). Quality evaluation of solar and microwave dried shrimps – A comparative study on renewable and dielectric heating methods. *Solar Energy*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.09.048>
- Gringer, N., Dang, T. T., Orlie, V., Olsen, K., Boknaes, N., & Jessen, F. (2018). A quantitative method to measure and evaluate the peelability of shrimps (*Pandalus borealis*). *LWT*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.022>
- Hu, M., Xue, Y., Zhao, L., Liu, Q., & Cao, R. (2022). Comparison of Flavor Substances in Dried Shrimp Products Processed by Litopenaeus Vannamei from Two Aquaculture Patterns. *Journal of Ocean University of China*, 21(6). <https://doi.org/10.1007/s11802-022-5239-0>
- Muralidharan, K., Romero, M., Wüthrich, K., Uthrich, K. W., Andrews, I., Armstrong, T., Bharadwaj, P., Chandrasekhar, A., de Chaise-Martin, C., Dahl, G., Dellavigna, S., Duflo, E., Elliott, G., Goldstein, M., Humphreys, M., Kaido, H.-R., Katz, L., Kolesar, M., Kwon, S., & Vera, D. (2019). *Factorial Designs, Model Selection, and (Incorrect) Inference in Randomized Experiments Factorial designs, model selection, and (incorrect) inference in randomized experiments*. Retrieved from <http://www.nber.org/data-appendix/w26555>
- Nanan, K., Eiamsa-ard, S., Chokphoemphun, S., Kumar, M., Pimsarn, M., & Chuwattanakul, V. (2023). Influence of bed height and drying temperature on shrimp drying characteristics using a fluidized-bed dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103144>
- Om, A., Ak, B., Fo, O., & Ge, Z. (2019). Effects of Drying Methods on Quality Attributes of Shrimps. *J Food Process Technol*, 10(1).
- Sun, W., Ji, H., Zhang, D., Zhang, Z., Liu, S., & Song, W. (2022). Evaluation of Aroma Characteristics of Dried Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Prepared by Five Different Procedures. *Foods*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/foods11213532>



JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

THONBURI UNIVERSITY

Thonburi University

248 Phetkasem 110 Nongkhaengphlu,
Nongkhaem District, Bangkok - 10160