วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

ปีที่ 35 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม 2568)
VOL.35 NO.2 JULY - DECEMBER 2025

SCIENCE JOURNAL CRU

ISSN: 1685 - 0491
ISSN: 2697 - 4584
(ONLINE)

กองบรรณาธิการ

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม (Science Journal Chandrakasem Faculty of Science Chandrakasem Rajabhat University) ซึ่งฉบับนี้เป็นปีที่ 35 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2568 โดยวารสารฉบับนี้ประกอบด้วยบทความวิจัยทั้งสิ้น 8 เรื่อง และทุกบทความได้รับการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 3 ท่าน

โดยวารสารวิชาการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษมออนไลน์ใช้ระบบ ThaiJO 2.0 มีหมายเลข ISSN (Online) คือ 2697-4584 และวารสารเป็นเล่ม มี ISSN (Print) คือ 1685-0491 ซึ่งวารสารมีกำหนดออกปีละ 2 ฉบับ (ฉบับที่ 1: มกราคม – มิถุนายน และฉบับที่ 2: กรกฎาคม – ธันวาคม) วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม เผยแพร่ผลงานทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์ ของอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา และบุคคลทั่วไปที่สนใจ จากสถาบันอุดมศึกษาและหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งบทความวิจัยและบทความวิชาการ ซึ่งกองบรรณาธิการวารสารวิชาการวิทยาศาสตร์มุ่งมั่นที่จะปรับระดับคุณภาพของวารสารให้พร้อมที่จะเข้าสู่การประเมินคุณภาพวารสารในฐาน TCI ที่สูงขึ้นต่อไป

กองบรรณาธิการวารสารขอขอบคุณผู้นิพนธ์บทความทุกท่านที่ให้ความไว้วางใจในการส่งบทความ จำนวน 8 บทความ (บทความภายใน 1 บทความ และบทความภายนอก 7 บทความ) เพื่อตีพิมพ์ในวารสารฯ ปีที่ 35 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2568 กองบรรณาธิการฯ ขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่กรุณาสละเวลาในการตรวจสอบคุณภาพของบทความและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ยิ่ง สุดท้าย ขอขอบคุณ ทีมงานที่เกี่ยวข้องทุกคนที่ทำให้รูปเล่มของวารสารให้มีความสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร. อำนาจ สวัสดิ์นะที

บรรณาธิการวารสารวิชาการวิทยาศาสตร์

สารบัญ / Index

บทความวิจัย / Research Article

วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

ผลของการฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบาที่มีต่อความคล่องแคล่วว่องไวในนักกีฬาฟุตซอลหญิง กรณีศึกษา: มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตสุโขทัย

The Effect of Ladder Interval Training on Agility in Woman Futsal Case Study: Thailand National Sports University Sukhothai Campus

ตรีเทพ ประจันตเสน[1*] และ ภูฟ้า เสวกพันธ์[2]

Treetap Prajantasan[1*] and Pufa Savagpun[2]

[1] มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติวิทยาเขตสุโขทัย

[1] Thailand National Sports University Sukhothai Campus

[2] คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

[2] Faculty of Education, Naresuan University

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบา ที่มีต่อความคล่องแคล่วว่องไวในนักกีฬาฟุตซอลหญิง มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตสุโขทัย กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยคือ นักกีฬาฟุตซอลหญิง มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตสุโขทัย จำนวน 20 คน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มควบคุมทำการฝึกฟุตซอลโปรแกรมปกติ และกลุ่มทดลองทำการฝึกฟุตซอลโปรแกรมปกติ ร่วมกับฝึกวิ่งเคลื่อนที่ด้วยบันไดลิงแบบหนักสลับเบาที่ความหนัก 90-95 เปอร์เซ็นต์ของชีพจรสูงสุด โดยมีท่าทั้งหมดจำนวน 10 ท่า ท่าละ 15 วินาที ระยะเวลาในการพัก 15 วินาที ท่าละ 2 เที่ยว รวมทั้งหมด 20 เที่ยว ต่อ 1 วัน และทำการฝึก 2 วันต่อสัปดาห์ ในวันจันทร์และพฤหัสบดี เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ทำการทดสอบ ความคล่องแคล่วว่องไวด้วยแบบทดสอบ SEMO test และ FAF's Slalom test วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน Dependent sample t-test และ Independent sample t-test ผลการวิจัย พบว่าภายหลังการฝึก 8 สัปดาห์ กลุ่มทดลองมีความคล่องแคล่วว่องไวดีขึ้นจากก่อนการฝึกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนกลุ่มควบคุมไม่พบความแตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มทดลองกับกลุ่มควบคุมภายหลังการฝึกในสัปดาห์ที่ 8 พบว่า กลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุมมีความคล่องแคล่วว่องไวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 จึงสรุปได้ว่า การฝึกการเคลื่อนที่ด้วยบันไดลิง สามารถช่วยพัฒนาความคล่องแคล่วว่องไว และความสัมพันธ์ของระบบประสาทและกล้ามเนื้อในนักกีฬาฟุตซอลได้

สำคัญ: การฝึกบันไดลิง หนักสลับเบา ความคล่องแคล่วว่องไว นักกีฬาฟุตซอลหญิง

** Corresponding author: rattaveeo@nu.ac.th*

***Received**: 15 สิงหาคม 2567* ***Revised:** 21 มีนาคม 2568* ***Accepted**: 2 เมษายน 2568*

Abstract

This research aimed to study the effect of ladder interval training on agility in female futsal players at the National Sports University, Sukhothai Campus. The sample group used in the research was 20 female futsal players at the National Sports University, Sukhothai Campus, divided into 2 groups: a control group trained in the normal futsal program and an experimental group trained in the normal futsal program combined with ladder interval training at 90-95 percent of maximum heart rate. There were 10 poses, 15 seconds per pose, 15 seconds rest period, 2 rounds per pose, totaling 20 rounds per day. The training was conducted 2 days per week, Monday and Thursday, for 8 weeks. The agility test was performed using the SEMO test and FAF's Slalom test. The data were analyzed using statistics, mean, standard deviation, Dependent sample t-test, and Independent sample t-test. The results of the research found that after 8 weeks of training, the experimental group had significantly better agility than before training. The control group did not have any differences. When comparing the experimental group with the control group after 8 weeks of training, the experimental group and the control group had significantly different agility at the 0.05 level. Therefore, it can be concluded that training in ladder movement to the rhythm of music can help develop agility and the relationship of the nervous system and muscles in futsal athletes.

Keywords: Ladder, Interval, Agility, Woman futsal

1. บทนำ

กีฬาฟุตซอลเป็นกีฬาที่ต้องอาศัยความแข็งแกร่ง ทรหดอดทน ความเร็ว พลังกล้ามเนื้อ ความคล่องแคล่วว่องไว ความอ่อนตัว ความอดทนของระบบหัวใจและไหลเวียนเลือด ปฏิกิริยาการตอบสนอง และความสัมพันธ์ระหว่างระบบประสาทและกล้ามเนื้อ ทศพล ชวนบุญ (2558) พลังงานที่ใช้ในการต่อสู้แข่งขันในการออกอาวุธ คือ พลังงาน ATP แบบ Alactic หรือ Phosphagen system หรือ ATP - PC system การเคลื่อนไหวที่เกิดจากการฝึกจนเกิดกลไกการเคลื่อนไหวเป็นธรรมชาติ เป็นจุดเด่นที่ทำให้นักกีฬาผู้นั้นที่ได้รับการฝึกมาเป็นอย่างดี เกิดความได้เปรียบ โดดเด่นกว่าทีมฝ่ายตรงข้าม มีโอกาสที่จะเกิดข้อผิดพลาด ทั้งทักษะและการเคลื่อนไหวได้น้อยกว่าทีมผู้เล่นที่ไม่ได้รับการฝึกมาเป็นอย่างดี ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นน้อยที่สุดย่อมเป็นหนทางมีโอกาสได้รับชัยชนะมากที่สุด การใช้ทักษะหน้าเท้าในการจับบอล เป็นจุดเด่นและมีมนต์เสน่ห์ ในการควบคุมเรื่องทิศทางในการบังคับลูกฟุตซอล ไม่ว่าจะเป็นการจับเพื่อการส่ง หรือเป็นการจับเพื่อปรับเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนไหวของลูก การจับบอลด้วยหน้าเท้ามีผลเป็นอย่างมาก ตลอดจนทำให้ลูกฟุตซอลอยู่ติดเท้า และสามารถส่งแรงดันไปข้างหน้า หรือดึงกลับ หรือปรับแต่งทิศทางไปทางด้านข้าง การใช้หน้าเท้าจับและดันไปข้างหน้า สามารถส่งผลต่อจังหวะในการก้าวเท้านำเท้าตาม โดยใช้เท้าหลักก้าวตามไปข้างหน้า เพื่อใช้ขาข้างที่ถนัด มีช่วงส่งแรงออกแรงเตะส่งลูกฟุตซอลไปในทิศทางที่ต้องการ โดยที่พบว่า การแตะบอล และดันบอลไปข้างหน้า จะส่งผลต่อระยะทางในการเหวี่ยงขาออกเตะ ทำให้เกิดความแม่นยำมากกว่าการจับบอลติดตัว และยังเป็นการบังคับให้ร่างกายเกิดการเคลื่อนไหวไปข้างหน้า ซึ่งดีกว่าการจับบอลด้วยข้างเท้าด้านในแบบนักกีฬาฟุตบอล นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้เกิดการเตะด้วยลูกหลังเท้าได้ดีกว่าการจับบอลด้วยข้างเท้าด้านใน และส่งบอลด้วยลูกหลังเท้า

จากการศึกษาผลการทดสอบสมรรถภาพทางกาย ประจำปี 2562 ของนักกีฬาฟุตซอล โรงเรียนมัธยมสาธิตมหาวิทยาลัยนเรศวร พบว่า มีผลการทดสอบสมรรถภาพทางกาย ด้านความคล่องแคล่วว่องไวที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของนักกีฬาฟุตซอล โดยนักกีฬาฟุตซอลโรงเรียนมัธยมสาธิตมหาวิทยาลัยนเรศวร มีนักกีฬาฟุตซอลที่มีความคล่องแคล่วว่องไวอยู่ในระดับดี คิดเป็นร้อยละ 25 และความคล่องแคล่วว่องไวอยู่ในระดับต่ำ คิดเป็นร้อยละ 75 ซึ่งความคล่องแคล่วว่องไวมีความสำคัญต่อกีฬาฟุตซอลอย่างมาก เพราะกีฬาฟุตซอลจะมีพื้นฐานของการเคลื่อนไหว โดยร่างกายมีการเปลี่ยนตำแหน่ง และทิศทางในการเคลื่อนไหวตลอดเวลา รวมทั้ง

ต้องหลบหลีกคู่ต่อสู้และสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ถ้าร่างกายมีความคล่องแคล่วว่องไวที่ดี ก็จะช่วยให้นักกีฬาฟุตซอลเล่นกีฬาฟุตซอลประสบความสำเร็จในการแข่งขันได้ การเล่นฟุตซอลมีทักษะบางอย่าง ที่ต้องมีการเคลื่อนที่ที่ดีและรวดเร็ว เพื่อหาจังหวะเข้าทำประตูในพื้นที่สนามที่แคบ และผู้เล่นจำนวนจำกัดถึงแม้ว่าจะสามารถเปลี่ยนตัวผู้เล่นเข้าออกได้ตลอดเวลา แต่คู่แข่งขันก็ได้รับโอกาสนั้นเช่นเดียวกันตามกฎกติกาเหมือนกัน ทำให้นักกีฬาต้องสู้ด้วยทักษะการเล่นฟุตซอล เทคนิค แท็กติก ทีมเวิรค์ และสมรรถภาพทางกาย ดังนั้นรูปแบบในการฝึกการเคลื่อนไหวต้องมีทั้งรูปแบบการฝึกการเคลื่อนที่ของนักกีฬา แบบไม่มีลูกฟุตซอล และแบบที่เคลื่อนที่ไปกับลูกฟุตซอล แต่การพัฒนาการเคลื่อนที่ไปกับลูกฟุตซอลจะทำได้ยากกว่า การเคลื่อนที่โดยไม่มีลูกฟุตซอล เมื่อทำการฝึกการเคลื่อนที่ไม่มีลูกฟุตซอลจนเกิดความชำนาญจะส่งผลต่อการพัฒนาการเคลื่อนไหว ที่ต้องควบคุม ลูกฟุตซอลได้ง่ายยิ่งขึ้นไปด้วย

การฝึกความคล่องแคล่วว่องไวที่ส่งผลต่อการฝึกทักษะกีฬา ทำให้ระบบประสาทเกิดการทำงาน เรียนรู้ และพัฒนา จนเกิดการตอบสนองเพิ่มมากขึ้น ด้วยเครื่องมือ วิธีการ รูปแบบการฝึกที่แตกต่างและหลากหลายด้วยกัน ส่งผลต่อการพัฒนาทักษะ และสมรรถภาพทางกายควบคู่กัน มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี การฝึกการเคลื่อนไหวเพื่อเพิ่มทักษะของขาและเท้า ตลอดจนการเคลื่อนไหวที่หลากหลายรูปแบบ ความเร็วในการเคลื่อนที่ ความเร็วในการเคลื่อนที่ไปกับลูกบอล พลังกล้ามเนื้อในการเคลื่อนไหว ในช่วงของการปรับเปลี่ยนกิจกรรมการเคลื่อนไหว การเพิ่มความเร็ว การลดความเร็ว และการใช้ทักษะกับลูกฟุตบอลในรูปแบบทักษะต่าง ๆ เป็นสาเหตุทำให้ผู้ฝึกสอนกีฬา นักวิทยาศาสตร์การกีฬา ได้สร้างนวัตกรรมการฝึกรูปแบบใหม่ ๆ ทั้งเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีต่าง ๆ นำมาใช้ในการพัฒนาการฝึกสมรรถภาพทางกาย และ 1 ในรูปแบบฝึกที่นิยมใช้ในการฝึกการเคลื่อนไหว คือการฝึกทักษะท่าทางจากการประยุกต์ท่าทางการเคลื่อนไหวของลีลาศ นำมาใช้ในการประกอบกับการฝึกในตาราง หรือใช้กับตารางบันไดลิง (Ladder) โดยใช้ทักษะท่าทางการเคลื่อน การก้าวเท้าที่แตกต่างกันไปในแต่ละท่า เป็นขั้นตอน วิธีการระบบ และระเบียบแบบแผนในแต่ละท่า จนเกิดการเรียนรู้และจดจำ ทักษะท่าทางต่าง ๆ ส่งผลต่อการพัฒนาการเคลื่อนไหว ทั้งทางด้านทักษะและสมรรถภาพทางกาย โดยใช้รูปแบบการเคลื่อนไหวความหนักที่แตกต่างกัน อย่างมีระบบในแต่ละช่วง รูปแบบนี้คือการฝึกแบบหนักสลับเบา ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจพัฒนารูปแบบการฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบา ที่มีต่อความคล่องแคล่วว่องไวในนักกีฬาฟุตซอลหญิง

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบทักษะความคล่องแคล่วว่องไวระหว่างก่อนและหลังการฝึกบันไดลิง แบบหนักสลับเบาในนักกีฬาฟุตซอลหญิง

2. เพื่อเปรียบเทียบทักษะความคล่องแคล่วว่องไวระหว่างกลุ่มทดลองที่ฝึกบันไดลิง แบบหนักสลับเบาและกลุ่มควบคุมในนักกีฬาฟุตซอลหญิง

3. วิธีดำเนินการวิจัย

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย คือ นักกีฬาฟุตซอลหญิง มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตสุโขทัย จำนวน 20 คน ระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาวิจัย คือ 8 สัปดาห์ ๆ ละ 2 วัน ทำการฝึกทุกวันจันทร์ และพฤหัสบดี

ตัวแปรที่ศึกษา ตัวแปรต้น คือ โปรแกรมการฝึกบันไดลิง แบบหนักหนักสลับเบา ตัวแปรตาม คือ ความคล่องแคล่วว่องไวในนักกีฬาฟุตซอลหญิง มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตสุโขทัย

ข้อตกลงเบื้องต้น กลุ่มตัวอย่างจะปฏิบัติภารกิจประจำวันตามปกติ ช่วงเวลาในการฝึกซ้อมจะเป็นเวลาเดียวกัน คือ 16.00 - 19.00 น.

สิ่งที่ต้องเตรียม

1. สนามฟุตซอล มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตสุโขทัย
2. นาฬิกาวัดชีพจร ยี่ห้อ Polar team รุ่น FS1 และสายวัดชีพจร รุ่น T31 จำนวน 10 เครื่อง ผลิตในประเทศจีน
3. นาฬิกาจับเวลา CASIO รุ่น HS-30W จำนวน 3 เครื่อง ผลิตในประเทศญี่ปุ่น

4. ใบบันทึกผลการทดสอบความความคล่องแคล่วว่องไวด้วยแบบทดสอบ SEMO test และ FAF’s Slalom test และใบบันทึกผลการฝึกซึ่งสร้างโดยผู้วิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. โปรแกรมการฝึกทักษะกีฬาฟุตซอล ที่ผ่านการตรวจสอบความเที่ยงตรง การตรวจหาคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ

2. โปรแกรมการฝึกทักษะกีฬาฟุตซอล ควบคู่กับการฝึกวิ่งเคลื่อนที่บันไดลิง ฝึกที่ความหนัก 90-95 เปอร์เซ็นต์ของชีพจรสูงสุด ระยะเวลาในการฝึก 15 วินาที ระยะเวลาในการพัก 15 วินาที 10 ท่า ท่าละ 2 เที่ยว รวมทั้งหมด 20 เที่ยว ต่อ 1 วัน และทำการฝึก 2 วันต่อสัปดาห์ ในวันจันทร์ และพฤหัสบดี เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ที่ผ่านการตรวจสอบความเที่ยงตรงและการคำนวณหาค่า (IOC: Index of item objective congruence) ของกิจกรรมการฝึก และให้ข้อคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะต่าง ๆ ค่า IOC ของงานวิจัยครั้งนี้ได้ค่าเท่ากับ 0.86

3. เครื่องมือทดสอบสมรรถภาพทางกาย 3 สถานี ประกอบไปด้วย

3.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก วัดส่วนสูง

3.2 เครื่องวัดแรงดันชีพจรและวัดชีพจรขณะพัก

3.3 แบบทดสอบ ความคล่องแคล่วว่องไวด้วยแบบทดสอบ SEMO test และ FAF’s Slalom test

การเก็บรวบรวมข้อมูล

การทำวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการ เครื่องมือ อุปกรณ์ และวิธีการทดสอบ

2. ศึกษาวิธีการฝึกท่าฝึกบันไดลิงกำหนดโดยใช้แบบหนักสลับเบา โดยอาศัยทฤษฎีและหลักการจากเอกสาร ตำรา งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้อง

3. นำหนังสือขอความอนุเคราะห์จากคณะศึกษาศาสตร์ ภาควิชาพลศึกษาและวิทยาศาสตร์การออกกำลังกาย มหาวิทยาลัยนเรศวร ไปติดต่อหน่วยงานและบุคคลที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

4. ชี้แจงขั้นตอนของการวิจัยให้กลุ่มตัวอย่างโดยละเอียด เพื่อให้เกิดความเข้าใจอย่างถูกต้อง

ก่อนการทดลอง 2 วัน

เวลา 07.00 น. ก่อนรับประทานอาหาร ผู้เข้ารวมการทดสอบเข้ารับการชี้แจงวิธีการฝึกสมรรถภาพ และวิธีการทดสอบสมรรถภาพ ที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ เข้าเยี่ยมชมอุปกรณ์การทดสอบ และอุปกรณ์การฝึก

เวลา 07.30 น. ทำการวัดชีพจร โดยเครื่องวัดแรงดันชีพจร วัดความดันโลหิตขณะพัก ชั่งน้ำหนัก และวัดส่วนสูง

เวลา 16.00 น. 1. ทำการทดสอบโปรแกรมการทดสอบสมรรถภาพความคล่องแคล่วว่องไวด้วยแบบทดสอบ SEMO test และ FAF’s Slalom test สนามกรีฑา 400 เมตร

2. เริ่มต้นดำเนินการฝึกทุกวันจันทร์ และพฤหัสบดี เวลา 16.00-17.00 น. เป็นเวลา 8 สัปดาห์

2.1 กลุ่มควบคุม ฝึกฟุตซอลโปรแกรมปกติ ได้แก่ การอบอุ่นร่างกาย (Warm up) 10 นาที การยืดเหยียดกล้ามเนื้อ (Stretching) 10 นาที ทักษะพื้นฐานการเล่นฟุตซอล (Basic Skill) 20 นาที ทำการฝึก 2 วันต่อสัปดาห์ เป็นเวลา 8 สัปดาห์

2.2 กลุ่มทดลอง ฝึกฟุตซอลโปรแกรมปกติ ร่วมกับฝึกวิ่งเคลื่อนที่บันไดลิง ฝึกที่ความหนัก 90-95 เปอร์เซ็นต์ของชีพจรสูงสุด ระยะเวลาในการฝึก 15 วินาที ระยะเวลาในการพัก 15 วินาที 10 ท่า ท่าละ 2 เที่ยว รวมทั้งหมด 20 เที่ยว ต่อ 1 วัน และทำการฝึก 2 วันต่อสัปดาห์ ในวันจันทร์ และพฤหัสบดี เป็นเวลา 8 สัปดาห์

3. ทำการทดสอบสมรรถภาพทางกายหลังจากทำการฝึกสมรรถภาพทางกาย โดยมีโปรแกรมการทดสอบดังต่อไปนี้

หลังการทดลอง 1 วัน

เวลา 07.30 น. ก่อนรับประทานอาหารเช้า ทำการวัดชีพจร ความดันโลหิตขณะพัก ชั่งน้ำหนัก และวัดส่วนสูง

เวลา 16.00 น. ทำการทดสอบโปรแกรมการทดสอบความคล่องแคล่วว่องไว ที่สนามฟุตซอล

วิธีวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อแบ่งกลุ่มในครั้งนี้ ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

1. คำนวณค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของน้ำหนัก อายุ และส่วนสูงของกลุ่มตัวอย่าง

2. ทดสอบค่าความแตกต่างของค่าความคล่องแคล่วว่องไวจาก SEMO test และ FAF's Slalom test ภายในกลุ่มระหว่างก่อนและหลังการฝึก 8 สัปดาห์ โดยใช้การวิเคราะห์ T- test dependent

3. ทดสอบหาค่าความแตกต่างของค่าความคล่องแคล่วว่องไว SEMO test และ FAF's Slalom test ระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง ภายหลังจากทำการฝึก 8 สัปดาห์ โดยใช้การวิเคราะห์ T- test independent

4. ผลการวิจัย

ผลการศึกษาพบว่าความคล่องแคล่วว่องไวด้วยการฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบาในนักกีฬาฟุตซอลหญิงหลังการทดลองดีกว่าก่อนการทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ดังรายละเอียดตารางด้านล่าง

ตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน อายุ น้ำหนัก และส่วนสูงของกลุ่มตัวอย่าง ก่อนการฝึกทั้ง 2 กลุ่ม

กลุ่มตัวอย่าง	Age	Weight (k.g.)	High (c.m.)
	$\bar{X}$±S.D.	$\bar{X}$±S.D.	$\bar{X}$±S.D.
กลุ่มควบคุม	20.64±0.55	52.44±5.27	160.37±2.95
กลุ่มทดลอง	20.23±0.76	53.19±6.32	162.81±3.60

จากตาราง 1 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ อายุ น้ำหนัก และส่วนสูงของกลุ่มตัวอย่าง ก่อนการฝึก พบว่ากลุ่มควบคุมมีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงมาตรฐานของอายุ น้ำหนัก และส่วนสูง เท่ากับ 20.64 ±0.55 ปี 52.44±5.27กิ โลกรัม และ 160.37±2.95 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนกลุ่มทดลองมีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอายุ น้ำหนัก และส่วนสูง เท่ากับ 20.23±0.76 ปี 53.19±6.32 กิโลกรัม และ 162.81±3.60 เซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบความคล่องแคล่วว่องไว โดยการทดสอบ SEMO TEST และ FAF's Slalom test ระหว่างก่อนการฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบากับหลังการฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบา 8 สัปดาห์ ของกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง

การทดสอบ	กลุ่มตัวอย่าง	ก่อนฝึก	หลังฝึก	t	*P*
SEMO TEST (วินาที)	กลุ่มควบคุม	13.37±.19	29.13±16	28.2	.059
	กลุ่มทดลอง	26.13±16	51.12±17	8.66	.*000
FAF's Slalom test (วินาที)	กลุ่มควบคุม	7.72±19	34.7±22	4.00	.*003
	กลุ่มทดลอง	64.7±26	10.7±15	8.40	.*001

*$P<0.05$

จากตาราง 2 ผลการเปรียบเทียบความคล่องแคล่วว่องไว ระหว่างก่อนการฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบา และหลังการฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบา 8 สัปดาห์ของกลุ่มควบคุม พบว่าความคล่องแคล่วว่องไวจากการทดสอบ SEMO test ไม่มีความแตกต่างกัน ส่วนความคล่องแคล่วว่องไวจากการทดสอบ FAF's Slalom test แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ส่วนกลุ่มทดลอง

พบว่าความคล่องแคล่วว่องไวจากการทดสอบ SEMO test และ FAF's Slalom test ระหว่างก่อนการฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบา และหลังการฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบา 8 สัปดาห์ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบความคล่องแคล่วว่องไว โดยการทดสอบ SEMO TEST และ FAF's Slalom test ระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง ของก่อนการฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบากับหลังการฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบา 8 สัปดาห์

ตัวแปร	กลุ่มตัวอย่าง	กลุ่มควบคุม	กลุ่มทดลอง	t	*P*
SEMO test (วินาที)	ก่อนฝึก	13.37±.19	26.13±16	0.84	.421
	หลังฝึก	29.13±16	51.12±17	76.25	.*001
FAF's Slalom test (วินาที)	ก่อนฝึก	7.72±19	64.7±26	0.97	.36
	หลังฝึก	34.7±22	10.7±15	8.40	.001*

*$P<0.05$

จากตาราง 3 ผลการเปรียบเทียบความคล่องแคล่วว่องไว ระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง พบว่าก่อนฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบา ความคล่องแคล่วว่องไวจากการทดสอบ SEMO testและ FAF's Slalom test ไม่มีความแตกต่างกัน แต่ภายหลังจากการฝึกบันไดลิงแบบหนักสลับเบา สัปดาห์ที่ 8 ความคล่องแคล่วว่องไวจากการทดสอบ SEMO testและ FAF's Slalom test ระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาพบว่าโปรแกรมการฝึกวิ่งเคลื่อนที่บันไดลิง ฝึกที่ความหนัก 90 - 95 เปอร์เซ็นต์ของชีพจรสูงสุด ระยะเวลาในการฝึก 15 วินาที ระยะเวลาในการพัก 15 วินาที 10 ท่า ท่าละ 2 เที่ยว รวมทั้งหมด 20 เที่ยว ต่อ 1 วัน และทำการฝึก 2 วันต่อสัปดาห์ มีผลต่อความคล่องแคล่วว่องไวได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ผลของการฝึกระหว่างกลุ่ม หลังการฝึกด้วยวิ่งเคลื่อนที่บันไดลิงแตกต่างจากการไม่ได้รับการฝึกด้วยบันไดลิง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า โปรแกรมการฝึกวิ่งเคลื่อนที่บันไดลิง ฝึกที่ความหนัก 90-95 เปอร์เซ็นต์ของชีพจรสูงสุดเป็นเวลา 8 สัปดาห์ สามารถพัฒนาความคล่องแคล่วว่องไวได้เป็นอย่างดี สอดคล้องกับการศึกษาของถาวร กมุทศรี. (2560) ที่ศึกษาและเปรียบเทียบโปรแกรมฝึกตาราง 9 ช่อง และโปรแกรมฝึกบันไดลิงที่มีผลต่อปฏิกิริยาการตอบสนองของขาในนักเรียนหญิง 12 ปี กลุ่มตัวอย่างได้จากการสุ่มแบบเจาะจง จำนวน 24 คน เป็นนักเรียนหญิง โรงเรียนเทศบาล 4 วัดโพธิวราราม และแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม ๆ ละ 12 คน คือกลุ่มที่ 1 ฝึกตาราง 9 ช่อง และกลุ่มที่ 2 ฝึกบันไดลิงจำนวน 12 คน โดยทำการฝึกเป็นเวลาเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ผลของการฝึกตาราง 9 ช่อง และบันไดลิง ก่อนการฝึกและภายหลังการฝึก ภายในกลุ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 และผลของการฝึกตาราง 9 ช่อง และบันไดลิง ก่อนการฝึกและภายหลังการฝึก ระหว่างกลุ่มภายหลังจากการฝึกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ทั้งนี้ฟุตซอลจำเป็นที่ต้องมีการฝึกเพื่อส่งเสริมความคล่องแคล่วว่องไว เพราะยุทธวิธีในการเล่นฟุตซอล ถึงแบ่งออกเป็น เกมรุกและเกมรับ อยู่ที่สถานการณ์ของแต่ละฝ่าย ว่าต้องเล่นในบทบาทไหน การรุกที่ต้องชิงไหวชิงพริบ เพื่อหลบคู่ต่อสู้เข้าไปในพื้นที่ที่สามารถยิงประตูหรือรับบอล เพื่อส่งให้เพื่อนในทีมยิงประตู และกลยุทธ์การเคลื่อนไหวที่สำคัญ การเปลี่ยนแปลงระบบการเล่นที่ไม่ตายตัว การสลับผู้เล่น เน้นรุก หรือเน้นรับ หรือการสลับผู้เล่นเพื่อผ่อนเกม การสลับผู้เล่นเพื่อให้ผู้เล่นตัวหลักได้เข้ามาพัก คือการใช้ทรัพยากรตัวผู้เล่นที่มีอยู่ในทีมได้อย่างคุ่มค่า แต่ผู้ฝึกสอนควรฝึกให้ผู้เล่นทุกคน เข้าใจวิธีการเล่นและบทบาทของแต่ละคน เพื่อที่จะเปลี่ยนเกมการเล่นได้อย่างถูกต้องตามสถานการณ์ที่ผู้ฝึกสอนส่งลงไปเล่น จำเป็นต้องมีการฝึกความคล่องแคล่วด้วยแบบฝึกบันไดลิง เพราะการฝึกความคล่องแคล่วว่องไว เป็นการฝึกการเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศทางด้วยความเร็วสูงสุดอย่างรวดเร็วในระยะเวลาที่สั้นที่สุด เป็นการเคลื่อนไหวที่ใช้ในสนามแข่งขันประเภทลาน (ลูกบอล แร็คเก็ต) ประเภททีมเกือบทุกชนิดและประเภทกีฬาต่อสู้ โดยต้องอาศัยความแข็งแรงสูงสุด และพลังกล้ามเนื้อที่ใช้ในการขับเคลื่อนองค์ประกอบสมรรถภาพทางกายเพื่อความคล่องแคล่วว่องไว การฝึกควรเริ่มจากการฝึกทักษะการเคลื่อนไหว ทักษะการเรียนรู้ และการวิเคราะห์การเคลื่อนไหว

ที่ถูกต้องจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ เพื่อเพิ่มความเร็วในการเปลี่ยนทิศทางที่ดีขึ้น การเคลื่อนที่เพื่อเปลี่ยนตำแหน่งการเล่น การวิ่งเข้าหาเป้าหมายที่มีการเปลี่ยนจุด การหลบหลีกคู่ต้อสู่ หรือการเข้าไปรับหรือการเล่นฟุตซอล

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองอธิการบดีมหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติวิทยาเขตสุโขทัยเป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและพื้นที่ในการทำวิจัย ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี ในการเข้าไปทำวิจัยและเก็บข้อมูลสำหรับการทำการวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

ถาวร กมุทศรี. (2560). *การเสริมสร้างสมรรถภาพทางกาย*. วิทยาลัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการกีฬา มหาวิทยาลัยมหิดล.

ทศพล ชวนบุญ. (2558). *ผลของการฝึกวิ่งแบบหนักสลับเบาที่ความหนักระดับสูงที่มีต่อสมรรถภาพแอโรบิกและแอนแอโรบิกในนักกีฬาฟุตบอล* [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทิสยา ทิศเสถียร. (15 ตุลาคม 2564). *บันไดลิงอัจฉริยะ Smart Ladder for Agility*. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=61359

ธนากาญจน์ เสถียรพูนสุข. (2564). การพัฒนาแบบทดสอบความคล่องแคล่วว่องไวบนพื้นทรายสำหรับนักกีฬาแฮนด์บอลชายหาด. *วารสารสุขศึกษา พลศึกษา และสันทนาการ, 47*(2), 340-352.

มัชฌิมา ยาวิไชย. (2558). ผลของการฝึกความคล่องแคล่วและพลังของกล้ามเนื้อต่อความเร็วของการวิ่งในนักกรีฑา: การศึกษานำร่อง [การค้นคว้าอิสระปริญญามหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุรชัย แซ่ด่าน. (2560). ผลการฝึกโดยใช้ตารางเก้าช่องและบันไดลิงที่มีต่อความคล่องตัวในกีฬากาบัดดี้ [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยทักษิณ.

อำนาจ ธูปบูชา และ สมเกียรติ เนตรประเสริฐ. (2558). ผลการฝึกเสริมด้วยโปรแกรมการฝึกความคล่องแคล่วว่องไวที่มีต่อความสามารถในการเลี้ยงลูกฟุตบอลของนักกีฬาฟุตบอลชาย อายุ 16-18 ปี. *วารสารวิชาการเครือข่ายบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏภาคเหนือ, 5*(8). 131-142.

Makaje, N., Ruangthai, R., Arkarapanthu, A., & Yoopat, P. (2012). Physiological demands and activity profiles during futsal match play according to competitive level. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 52*(4), 366-374.

วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

การศึกษาการก่อกลายพันธุ์ของสารสกัดมะแขว่นด้วยวิธีทดสอบเอมส์

Mutagenicity Study of *Zanthoxylum myriacanthum* Wall. ex Hook.f. Extract Using the Ames Test

วิจิตรา สุดห่วง[1*], สุจริต อุ่นกาศ[1], ปัถยา ศิรินันท์ธนานนท์[1], พราว ศุภจริยาวัตร[1], พรชัย สินเจริญโภไคย[1], ศรายุธ ระดาพงษ์[1] และ ศักดิ์วิชัย อ่อนทอง[1]

Wijittra Sudhong[1*], Sutjarit Aunkat[1], Padtaya Sirinantananon[1], Praw Suppajariyawat[1], Pornchai Sincharoenpokai[1], Sarayut Radapong[1] and Sakwichai Onthong[1]

[1] สถาบันวิจัยสมุนไพร กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์

[1] Medicinal Plat Research Institute, Department of Medical Sciences

บทคัดย่อ

มะแขว่น (*Zanthoxylum myriacanthum* Wall. ex Hook.f.) เป็นพืชสมุนไพรที่มีการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในภาคเหนือของประเทศไทยทั้งในด้านอาหารและการแพทย์แผนไทย โดยมีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาหลากหลาย เช่น ต้านอนุมูลอิสระ ต้านการอักเสบ ต้านเชื้อแบคทีเรีย และเชื้อรา รวมถึงการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แต่ข้อมูลด้านความปลอดภัยของสารสกัดมะแขว่น ยังมีจำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาการก่อกลายพันธุ์ของสารสกัดมะแขว่นด้วยวิธีทดสอบเอมส์ ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *Salmonella typhimurium* 4 สายพันธุ์ ได้แก่ TA98, TA100, TA1535, TA1537 และ *Escherichia coli* สายพันธุ์ WP2 *uvr*A ผลการทดลองพบว่า สารสกัดมะแขว่นไม่เกิดการก่อกลายพันธุ์ ชี้ให้เห็นว่าสารสกัดมะแขว่นมีความปลอดภัยในระดับหนึ่ง หากมีการนำสารสกัดมะแขว่นไปพัฒนาเป็นยาหรือผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องศึกษาในเชิงลึกต่อไปเพื่อให้มีความปลอดภัยและน่าเชื่อถือมากขึ้น

สำคัญ: การก่อกลายพันธุ์ สารสกัดมะแขว่น วิธีทดสอบเอมส์

** Corresponding author: wijittra.s@dmsc.mail.go.th*

***Received**: 28 เมษายน 2568* ***Revised:** 18 มิถุนายน 2568* ***Accepted**: 24 กรกฎาคม 2568*

Abstract

Makwan (*Zanthoxylum myriacanthum* Wall. ex Hook.f.) is a medicinal plant widely utilized in northern Thailand for both culinary and traditional medicine purposes. It exhibits various pharmacological properties, including antioxidant, anti-inflammatory, antibacterial, and antifungal activities, and has been developed into various products. However, safety information regarding Makwan extract remains limited. Therefore, this study investigated the mutagenicity of Makwan extract using the Ames test under conditions with and without S9 metabolic activation, employing four strains of *Salmonella typhimurium* (TA98, TA100, TA1535, TA1537) and one strain of *Escherichia* coli (WP2 *uvr*A). The results indicated that Makwan extract did not induce mutagenicity indicating a certain level of safety. Nevertheless, if Makwan extract is to be developed into pharmaceutical products, further in-depth safety studies are necessary to ensure greater safety and reliability.

Keywords: Mutagenicity, *Zanthoxylum myriacanthum* Wall. ex Hook.f., Ames test

1. บทนำ

มะแขว่น มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Zanthoxylum myriacanthum* Wall. ex Hook.f. เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดทางภาคเหนือ เช่น น่าน พะเยา แม่ฮ่องสอน ลำปาง และลำพูน มะแขว่นเป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ สูงประมาณ 10-20 เมตร ลำต้นมีหนามยาว 3 เซนติเมตร กิ่งกลวง มีหนามแหลมตรงจำนวนมาก ใบประกอบแบบขนนกปลายคี่ โคนใบมน กึ่งหัวใจ หรือเบี้ยวเล็กน้อย ขอบใบหยัก 6-8 หยัก ผลมีลักษณะแห้งกลม ผิวขรุขระสีน้ำตาล เมื่อแก่ผลจะแตกจนเห็นเมล็ดสีดำกลมผิวเรียบเป็นมัน มีรสเผ็ดเล็กน้อย คนท้องถิ่นภาคเหนือนิยมนำใบอ่อน เมล็ด และผลแห้ง มาใช้ในการประกอบอาหาร เพื่อลดกลิ่นคาว เพิ่มกลิ่นหอม และทำให้รสอาหารเผ็ดร้อนคล้ายพริกไทย เช่น ลาบ หลู้ ยำ และแกงต่าง ๆ (ณัฐกานต์ วงศ์สีสม, 2557) ในทางการแพทย์ตามภูมิปัญญาไทยได้นำทุกส่วนของมะแขว่นมาใช้เป็นยาสมุนไพรรักษาโรค เช่น เปลือกมะแขว่น ใช้ในการลดไข้ ขับเหงื่อ ขับปัสสาวะ ส่วนผลมะแขว่น มีฤทธิ์ในการไล่ยุงและรักษาฟันผุ นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบในยาบำรุงหัวใจ แก้โลหิตเป็นพิษ บำรุงโลหิต บำรุงธาตุ ขับลมในทางเดินอาหาร แก้วิงเวียนศีรษะ (ชุลี ยมภักดี และวรินทร ชวศิริ, 2554) ซึ่งในผลมะแขว่นมีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ น้ำมันระเหยยาก (Fixed oil) น้ำมันหอมระเหย (Volatile oil) เช่น Limonene Alpha-phellandrene และ Trans-beta-ocimene รวมทั้ง แอลคาลอยด์ ลิกแนน คูมาริน เทอร์พีน แทนนิน ฟลาโวนอยด์ ฟีโนลิก และไกลโคไซด์ ซึ่งสารเหล่านี้มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ (Anti-oxidation) ต้านการอักเสบ (Anti-inflammatory) ต้านเชื้อแบคทีเรีย (Anti-bacterial) ต้านเชื้อรา (Anti-fungal) และต้านมะเร็ง (Anti-cancer) (Tangjitjaroenkun et al., 2012) นอกจากนี้สารแอลคาลอยด์ที่พบในมะแขว่นบางชนิด แสดงฤทธิ์ความเป็นพิษต่อเซลล์ เช่น 8-methoxy-N-methylflindersine ซึ่งเป็นองค์ประกอบในเปลือกลำต้น แสดงฤทธิ์ความเป็นพิษต่อเซลล์อย่างอ่อนจากการทดสอบด้วย Brine shrimp lethality bioassay มีค่า LC_{50} 53.96 μg/mL (Ahsan et al., 2000) สาร 6-Acetonyldihydrochelerythrin และ arnottianamide ที่แยกได้จากหนามลำต้น แสดงฤทธิ์ความเป็นพิษอย่างอ่อนต่อเซลล์มะเร็งของมนุษย์ ได้แก่ เซลล์มะเร็งปากมดลูกชนิด HeLa มะเร็งตับชนิด Hep G2 มะเร็งเต้านมชนิด SK-BR-3 และ MDA-MB-231 มะเร็งลำไส้ชนิด HCT 116 และ SW480 และมะเร็งผิวหนังชนิด A375 ที่ค่า IC_{50} ในช่วง 29.74-500.00 μM (Sreelekha et al., 2014) ส่วนการทดสอบทางพิษวิทยาในการทดสอบสารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์จากมะแขว่น พบว่าสารสกัดเมล็ดมะแขว่นไม่เกิดการก่อกลายพันธุ์ต่อเชื้อแบคทีเรีย *Salmonella typhimurium* สายพันธุ์ TA98 และ TA100 ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีเอนไซม์กระตุ้น (ชุลี ยมภักดี และวรินทร ชวศิริ, 2554) และการศึกษาในสัตว์ทดลอง (*in vivo*) พบว่าเจลที่มีส่วนประกอบของน้ำมันหอมระเหยจากผลแห้งของมะแขว่น สามารถยับยั้งพฤติกรรมแบบ licking ของหนูที่เกิดแผลที่เยื่อบุปากทำให้ช่วยลดจำนวนของเซลล์อักเสบได้ (Netweera et al., 2016) ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยพบว่าข้อมูลด้านพิษวิทยาของสารสกัดมะแขว่นยังมีรายงานอยู่น้อย ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นข้อมูลฤทธิ์ทางชีวภาพทั้ง

ในระดับเซลล์ (*in vitro*) และในสัตว์ทดลอง (*in vitro*) ทำให้ปัจจุบันได้มีการนำสารสกัดจากมะแขว่นมาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น เอสเซ้นส์บำรุงผิวหน้ามะแขว่นที่มีสารประกอบฟีนอลิคสูงมีฤทธิ์ในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2565) ผลิตภัณฑ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรียในช่องปากจากสารสกัดมะแขว่นที่มีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียสแตฟิโลค็อกคัสมิวแทน (พัชรวรรณ ตันอมาตยรัตน์, 2558) ผลิตภัณฑ์น้ำมันหอมระเหยจากผลมะแขว่นที่มีฤทธิ์ในการบรรเทาอาการปวด (จุรีภรณ์ อิ้มพัฒน์ และนันทกานต์ วุฒิศิลป์, 2564) จากความต้องการนำสารสกัดมะแขว่นมาพัฒนาเป็นยารักษาโรคหรือผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้พืชสมุนไพร ถูกมองว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ยาบริสุทธิ์ อาจเนื่องมาจากสารสกัดประกอบด้วยสารที่มีโครงสร้างแตกต่างกันอย่างหลากหลายและร่วมกันแสดงฤทธิ์อย่างมีประสิทธิภาพสูงด้วยกลไกที่ซับซ้อน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญของการใช้สมุนไพรอย่างปลอดภัย จึงได้มีการศึกษาในหลอดทดลองโดยการประยุกต์ใช้การทดสอบในสารสกัดสมุนไพรโดยใช้เชื้อแบคทีเรีย เรียกว่าการทดสอบการก่อกลายพันธุ์โดยวิธีทดสอบเอมส์ (Ames test) หรือที่เรียกว่าการทดสอบการก่อกลายพันธุ์แบบย้อนกลับของแบคทีเรีย อ้างอิงจาก OECD Guideline No.471 ซึ่งการทดสอบนี้ใช้เชื้อแบคทีเรีย *Salmonella typhimurium* และ *Escherichia coli* ที่มีการกลายพันธุ์ในยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ฮิสทิดีนและทริปโตเฟน เพื่อตรวจสอบว่าสารเคมีและสารสมุนไพรสามารถ ทำให้เกิดความผิดปกติในระดับ DNA หรือไม่ หากสารเคมีหรือสารสมุนไพรดังกล่าว เป็นการก่อกลายพันธุ์ (Mutagen) จะแสดงให้เห็นว่าสารนั้นอาจจะไม่ปลอดภัยที่จะบริโภค เนื่องจากอาจจะก่อโรคที่ผิดปกติทางพันธุกรรมหรือโรคมะเร็งได้ โดยมีการทดสอบทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น ซึ่งการทดสอบในสภาวะที่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น เป็นเอนไซม์จากตับหนูที่ทำการเลียนแบบการเผาผลาญของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและเพิ่มการตรวจจับกิจกรรมการกลายพันธุ์ (Vijay et al., 2018) ซึ่งการทดสอบเอมส์เป็นหนึ่งในการทดสอบที่เป็นความต้องการของผู้ประกอบการ เนื่องจากเป็นวิธีการทดสอบความปลอดภัยตามกฎข้อบังคับ การประเมินความปลอดภัยทางเคมี การเลือกและจัดลำดับสารเคมีที่อยู่ระหว่างการพัฒนาสารเคมีและผลิตภัณฑ์ใหม่ รวมทั้งการขึ้นทะเบียนผลิตภัณฑ์สุขภาพกับคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) ที่เป็นหน่วยขึ้นทะเบียนที่ต้องใช้ข้อมูลด้านความปลอดภัยในการประเมินผลิตภัณฑ์สุขภาพต่าง ๆ ทำให้ (อย.) มีการร้องขอผลการทดสอบการก่อกลายพันธุ์ภายใต้ระบบ OECD GLP ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ยา อาหาร เครื่องสำอาง และสารเคมี เนื่องจากระบบมาตรฐาน OECD GLP เป็นระบบมาตรฐานสากลที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง โดยเน้นความน่าเชื่อถือและความสมบูรณ์ของข้อมูลการทดสอบ ส่งผลในการสร้างความมั่นใจให้กับผู้บริโภค และยังมีประโยชน์ทางเศรษฐกิจที่สำคัญโดยการลดต้นทุน ลดความซ้ำซ้อน เพิ่มประสิทธิภาพในการกำกับดูแลและส่งเสริมการเข้าสู่ตลาดโลก

ดังนั้น จึงได้มีการศึกษาการก่อกลายพันธุ์ของสารสกัดมะแขว่น โดยอาศัยวิธี Bacterial reverse mutation (Ames test) ในสภาวะที่มีและไม่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *Salmonella typhimurium* 4 สายพันธุ์ ได้แก่ TA98, TA100, TA1535, TA1537 และ *Escherichia coli* สายพันธุ์ WP2 *uvr*A ซึ่งหากสารทดสอบมีฤทธิ์การก่อกลายพันธุ์ จะพบว่าจำนวนโคโลนีกลายพันธุ์ที่เกิดขึ้น (Revertant colony) ของเชื้อแบคทีเรียจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของตัวอย่างทดสอบ ดังนั้น ในการศึกษาการก่อกลายพันธุ์จึงใช้เป็นข้อมูลยืนยันทางด้านความปลอดภัย ซึ่งหากมีการนำสารสกัดมะแขว่นไปต่อยอดในการผลิตเป็นยาหรือผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จำเป็นต้องมีการทดสอบในสัตว์ทดลองหรือเชิงลึกต่อไป เพื่อให้ผู้บริโภคเกิดความมั่นใจในการบริโภคสมุนไพรมากขึ้น

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาการก่อกลายพันธุ์ของสารสกัดมะแขว่นในเชื้อแบคทีเรีย 5 สายพันธุ์ (ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น) ด้วยวิธีทดสอบเอมส์ อ้างอิงจาก OECD Guideline No.471 (OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, 2020)

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ ได้แก่

3.1.1 เครื่องชั่งไฟฟ้าความละเอียดไม่เกิน 0.00001 กรัม ยี่ห้อ Sartorius รุ่น AX224

3.1.2 เครื่องชั่งไฟฟ้าความละเอียดไม่เกิน 0.001 กรัม ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น XS2002S

3.1.3 เครื่องผสมสำหรับหลอดทดลอง ยี่ห้อ Scientific Industries รุ่น G-560E

3.1.4 ตู้ชีวนิรภัย ยี่ห้อ EUROCLONE รุ่น Safemate EZ1.8

3.1.5 ขวดรูปชมพู่ ยี่ห้อ KIMA

3.1.6 หลอดทดลอง ยี่ห้อ SPLLIFESCIENCE

3.1.7 หลอดเซนติฟิวก์พลาสติก ยี่ห้อ VWR

3.1.8 ตะแกรงใส่หลอดทดลอง

3.1.9 ปิเปตอัตโนมัติแบบอิเล็คทรอนิกส์ ปริมาตร 10, 5 มิลลิลิตร และ 1000, 300, 100, 10 ไมโครลิตร ยี่ห้อ RAININ

3.1.10 จานเพาะเชื้อ ยี่ห้อ CLINAG

3.1.11 ขวดแก้วใส่สารเคมี ยี่ห้อ KIMA

3.1.12 อ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า ยี่ห้อ Julabo รุ่น SW23

3.1.13 ตู้อบเพาะเชื้อ ยี่ห้อ SalvisLAB รุ่น IC400

3.1.14 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง ยี่ห้อ Metertech รุ่น SB8001

3.1.15 กล้องจุลทรรศน์แบบหัวกลับ ยี่ห้อ EVOS รุ่น M7000

3.1.16 เครื่องบันทึกภาพแบบนับโคโลนีอัตโนมัติ ยี่ห้อ Interscience รุ่น Scan4000

3.1.17 ตู้แช่แข็งแบบพิเศษ (-80องศาเซลเซียส) ยี่ห้อ ilshin รุ่น DF8524

3.1.18 ตู้แช่แข็ง (-30องศาเซลเซียส) ยี่ห้อ Haier รุ่น DW-40L262

3.1.19 ตู้เย็น 4 องศาเซลเซียส ยี่ห้อ Haier รุ่น HYC-390

3.1.20 เตาไมโครเวฟ ยี่ห้อ Electrolux

3.1.21 เครื่องให้ความร้อนแบบหลุม ยี่ห้อ Ohaus รุ่น HB6DG

3.2 สารเคมี ได้แก่

3.2.1 Nutrient broth No.2 ยี่ห้อ OXOID

3.2.2 Agar ยี่ห้อ Merck

3.2.3 Magnesium sulfate ยี่ห้อ Sigma- ALDRICH

3.2.4 Citric acid monohydrate ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.2.5 Potassium phosphate, dibasic (anhydrous) ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.2.6 Sodium ammonium phosphate ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.2.7 Sodium chloride (NaCl) ยี่ห้อ Merck

3.2.8 L-Histidine HCl ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.2.9 Biotin ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.2.10 Glucose ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.2.11 Potassium chloride ยี่ห้อ Merck

3.2.12 L-Typtoplan ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.3 เชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบ

เชื้อทั้ง 5 สายพันธุ์เป็นเชื้อที่ได้กลายพันธุ์ไปจากสายพันธุ์ปกติ เพื่อให้มีความไวต่อการทดสอบการกลายพันธุ์ต่อสารเคมีต่าง ๆ และเป็นเชื้อที่ได้อ้างอิงจาก OECD test guideline No.471 เชื้อมาจาก Japan Collection of Microorganism

3.3.1 *S. typhimurium* สายพันธุ์ TA98

3.3.2 *S. typhimurium* สายพันธุ์ TA100

3.3.3 *S. typhimurium* สายพันธุ์ TA1535

3.3.4 *S. typhimurium* สายพันธุ์ TA1537

3.3.5 *Escherichia coli* สายพันธุ์ WP2 *uvr*A

3.4 สารเคมีก่อกลายพันธุ์

3.4.1 2-Aminoanthracene (2-AA) ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.4.2 4-Nitro-o-phenylenediamine (NPD) ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.4.3 Sodium azide (SA) ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.4.4 2-Nitrofluorene (2-NF) ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.4.5 4-Nitroquinoline-N-oxide (4NQNO) ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.4.6 Acridine Mutagen ICR191 (ICR-191) ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.5 S9 mix

3.5.1 S9 Moltox จากประเทศสหรัฐอเมริกา

3.5.2 Cofactor-I จากประเทศญี่ปุ่น

3.6 ตัวทำละลาย

3.6.1 Dimethyl sulfoxide (DMSO) ยี่ห้อ Sigma-ALDRICH

3.7 ตัวอย่างทดสอบ

3.7.1 วัตถุดิบ: ตัวอย่างมะแขว่นแก่จัด อายุประมาณ 4 เดือน เก็บในเดือนพฤศจิกายน 2567 ในพื้นที่ อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน ตัวอย่างได้รับการยืนยันข้อมูลทางด้านพฤกษศาสตร์และตรวจสอบชื่อวิทยาศาสตร์ของพืช โดยนายศักดิ์วิชัย อ่อนทอง นักพฤกษศาสตร์ของสถาบันวิจัยสมุนไพร กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ และเก็บตัวอย่าง voucher specimen เลขที่ DMSC 5370 อ้างอิงที่พิพิธภัณฑ์พืช กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์

3.7.2 ขั้นตอนการสกัดตัวอย่าง เก็บตัวอย่างมะแขว่น มาคัดและตัดก้านช่อผล ล้างทำความสะอาดและนำไปผึ่งลม จากนั้นนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส เมื่ออบแห้งแล้วให้นำมาคัดเฉพาะผลมะแขว่นที่ประกอบด้วยส่วนของเนื้อผลและส่วนของเมล็ด นำไปบดเป็นผงหยาบ สกัดด้วยวิธีการหมักโดยใช้ตัวทำละลาย 95% เอทานอล เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำสารไปกรองและนำกากที่แยกได้ไปสกัดต่ออีก 1 รอบ หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการสกัดไประเหยแห้งด้วยวิธี Rotary evaporator

3.8 การเตรียมสารสกัดมะแขว่น ชั่งสารสกัดมะแขว่นละลายด้วย Dimethyl sulfoxide (DMSO) โดยสารจะต้องละลายสมบูรณ์และไม่ตกตะกอน ใช้ความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถเตรียมได้ การทดสอบนี้ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น 5,000 µg/plate ทำการเจือจางแบบ half log (ประมาณ 3.16 เท่า) อีก 5 ระดับความเข้มข้น ได้แก่ 1,500 500 150 50 15 µg/plate

3.9 การเตรียมเชื้อแบคทีเรีย

เชื้อที่ใช้ในการทดสอบถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส โดยเชื้อที่นำมาใช้ต้องผ่านคุณสมบัติของเชื้อแบคทีเรียและมีปริมาณเชื้อที่เหมาะสมต่อการทดสอบ คือ ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 10^9 CFU/ml ปิเปตเชื้อที่พร้อมทดสอบ *S. typhimurium* สายพันธุ์ TA98 TA100 TA1535 TA1537 ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงใน Nutrient broth No.2 ส่วน *E. coli*

สายพันธุ์ WP2 *uvr*A ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ปิเปตลงใน Luria Broth เขย่าเชื้อที่ความเร็วรอบ 120 rpm ในอ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิและเขย่าที่อุณหภูมิ 37±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8-12 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาวัดค่าความขุ่นของเชื้อที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

3.10 การทดสอบการก่อกลายพันธุ์แบบย้อนกลับด้วยวิธีทดสอบเอมส์

1) เตรียม top agar ที่ผสม Histidine และ Biotin สำหรับใช้ Overlay หน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ Minimal Glucose Agar (MGA) ของเชื้อ *S. typhimurium* และเตรียม top agar ที่ผสม tryptophan สำหรับเชื้อ *E. coli* สายพันธุ์ WP2 *uvr*A

2) การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่ สภาวะที่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น และสภาวะที่ไม่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น ทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ โดยมีลำดับการนำสารใส่หลอดทดลอง ดังนี้

<u>สภาวะที่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น</u>
1. Top agar ปริมาตร 2000 ไมโครลิตร (เตรียมตามข้อ 1)
2. Negative/Positive/test item ปริมาตร 10 ไมโครลิตร
3. เชื้อแต่ละสายพันธุ์ ปริมาตร 10 ไมโครลิตร (เตรียมตามข้อ 3.9)
4. เอนไซม์ S9mix ปริมาตร 500 ไมโครลิตร

<u>สภาวะที่ไม่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น</u>
1. Top agar ปริมาตร 2000 ไมโครลิตร (เตรียมตามข้อ 1)
2. Buffer pH7.4 ปริมาตร 500 ไมโครลิตร
3. Negative/Positive/test item ปริมาตร 10 ไมโครลิตร
4. เชื้อแต่ละสายพันธุ์ ปริมาตร 10 ไมโครลิตร (เตรียมตามข้อ 3.9)

3) ผสมสารที่เติมให้เข้ากัน จากนั้น overlay ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อหน้าเพลทแห้งแล้วนำไปบ่มในตู้อบเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 37±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50±2 ชั่วโมง

3.11 วิเคราะห์ผลการทดสอบการก่อกลายพันธุ์แบบย้อนกลับด้วยวิธีทดสอบเอมส์

1) ส่องดูการเกิด Killing effect บน background lawn ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบอินเวอร์ท

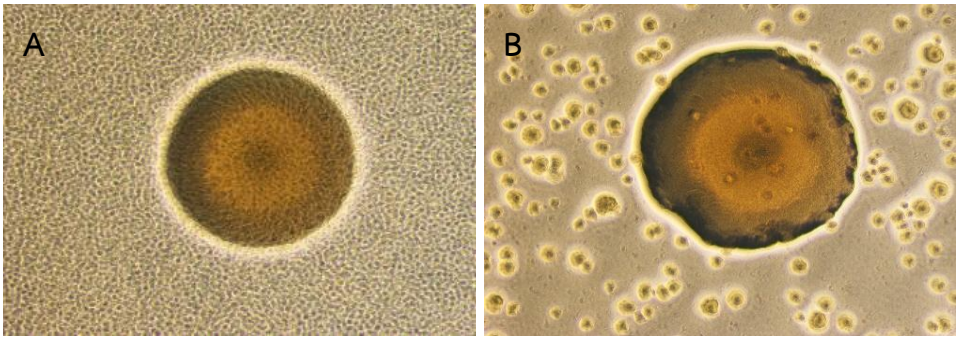
2) นับจำนวนโคโลนีกลายพันธุ์ที่ขึ้นบนอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยใช้เครื่องบันทึกภาพและนับจำนวนโคโลนีอัตโนมัติ

ภาพที่ 1 A. แสดงภาพกล้องจุลทรรศน์แบบอินเวอร์ท B. แสดงภาพเครื่องบันทึกภาพและโคโลนีแบบอัตโนมัติ

3.12 การแปลผลการทดสอบการก่อกลายพันธุ์แบบย้อนกลับด้วยวิธีทดสอบเอมส์

1) ต้องไม่พบตะกอนหรือเกิดการขุ่นบนหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ

2) ความเข้มข้นที่ไม่เหมาะสมต่อการทดสอบ ดูได้จากการเกิดความผิดปกติของ background lawn ซึ่งจะพบว่า background lawn บนอาหารเลี้ยงเชื้อเกิดการตายของเชื้อ (Killing effect) ภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงผลการส่องดู Background lawn โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบหัวกลับ กำลังขยาย 10 เท่า A. แสดงถึง background lawn ที่ปกติ ไม่เกิดการตายของเชื้อ ส่วนภาพ B. เกิด Killing effect ซึ่งจะเห็นว่า background lawn ไม่เต็ม มีช่องว่างที่พื้นหลัง แสดงถึงการตายของเชื้อเนื่องจากความเข้มข้นไม่เหมาะสมต่อการทดสอบ

3) ตัวอย่างทดสอบที่เกิดการก่อกลายพันธุ์ จะพบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวอย่างทดสอบกับจำนวนโคโลนีกลายพันธุ์ (Revertant colony) โดยจะพบว่าเชื้อสายพันธุ์ TA98, TA100 และ *E. coli* สายพันธุ์ WP2 *uvr*A จำนวนโคโลนีกลายพันธุ์ มีจำนวนสูงเกิน 2 เท่า เมื่อเทียบกับจำนวนโคโลนีที่กลายพันธุ์ตามธรรมชาติ (Negative Control) ส่วนเชื้อสายพันธุ์ TA1535 และTA1537 จำนวนโคโลนีกลายพันธุ์สูงเกิน 3 เท่า เมื่อเทียบกับจำนวนโคโลนีที่กลายพันธุ์ตามธรรมชาติ (Negative Control)

4. ผลการวิจัย

การศึกษาการก่อกลายพันธุ์ของสารสกัดมะแขว่น ในเชื้อแบคทีเรีย *S. typhimurium* สายพันธุ์ TA98, TA100, TA1535, TA1537 และ *E. coli* สายพันธุ์ WP2 *uvr*A แบ่งความเข้มข้นออกเป็น 6 ความเข้มข้น ได้แก่ 5,000 1,500 500 150 50 และ 15 µg/plate ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น ผลการทดลองพบว่าสารสกัดมะแขว่นทุกระดับความเข้มข้นไม่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ (ดังตารางที่ 1 และ 2) แต่เมื่อทำการส่องเพลทภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบการเกิด Killing effect ที่ระดับความเข้มข้น 5,000 µg/plate ของเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ TA1535 และ TA1537 ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น (ดังภาพที่ 3)

ตารางที่ 1 แสดงค่าจำนวนโคโลนีกลายพันธุ์ (Revertant colony) ของสารสกัดมะแขว่นในเชื้อแบคทีเรีย 5 สายพันธุ์ (ในสภาวะที่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น) ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

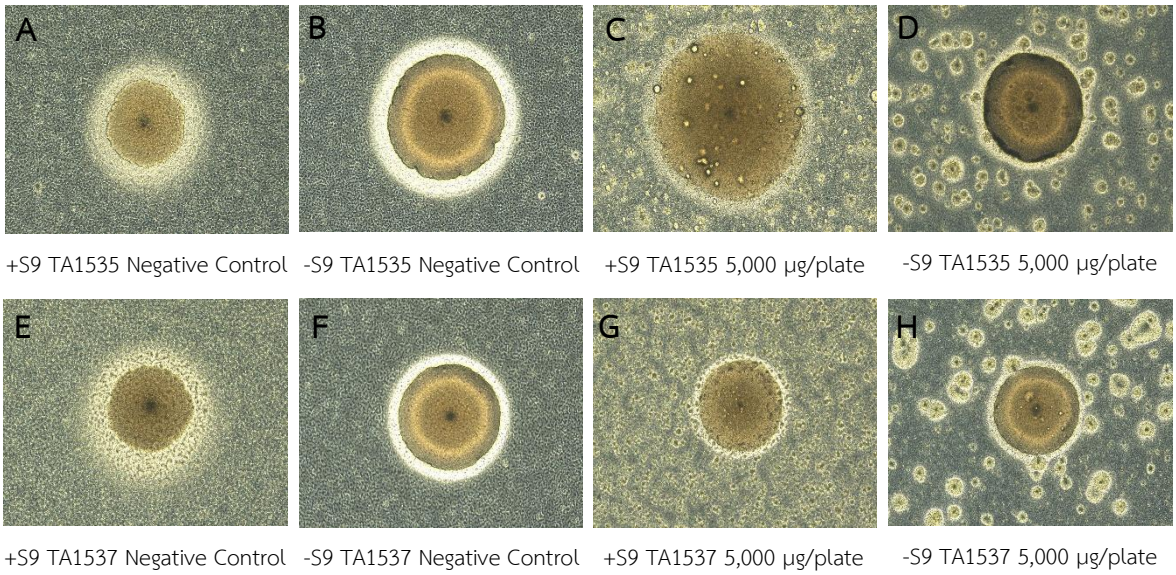
Concentration	Revertant colony (Mean±S.D.) With S9									
(µg/plate)	TA98	BL	TA100	BL	TA1535	BL	TA1537	BL	WP2 *uvr*A	BL
Negative Control	27.33±5.51	N	164.00±12.12	N	12.33±2.89	N	14.67±0.58	N	54.67±5.86	N
Positive Control	634.33±51.73	N	333.33±19.43	N	147.00±8.54	N	205.33±21.73	N	433.67±18.45	N
5,000	35.00±6.00	N	124.00±10.39	N	7.00±2.65	K	3.00±0.00	K	62.67±1.53	N
1,500	27.00±6.00	N	144.33±6.03	N	12.33±3.51	N	9.00±2.65	N	54.33±2.31	N
500	20.33±4.04	N	157.67±9.29	N	11.50±0.71	N	13.50±2.12	N	54.67±4.93	N

Concentration (µg/plate)	Revertant colony (Mean±S.D.) With S9									
	TA98	BL	TA100	BL	TA1535	BL	TA1537	BL	WP2 *uvr*A	BL
150	25.33±6.11	N	175.00±11.31	N	15.33±3.21	N	11.67±0.58	N	50.00±2.83	N
50	24.00±2.00	N	157.33±7.64	N	10.00±0.00	N	11.00±1.41	N	51.00±1.41	N
15	21.67±1.53	N	155.00±8.54	N	15.00±2.65	N	15.50±3.54	N	57.00±0.00	N

ตารางที่ 2 แสดงค่าจำนวนโคโลนีกลายพันธุ์ (Revertant colony) ของสารสกัดมะแขว่น ในเชื้อแบคทีเรีย 5 สายพันธุ์ (ในสภาวะที่ไม่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น) ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

Concentration (µg/plate)	Revertant colony (Mean±S.D.) With S9									
	TA98	BL	TA100	BL	TA1535	BL	TA1537	BL	WP2 *uvr*A	BL
Negative Control	11.67±3.06	N	147.00±13.89	N	13.67±5.03	N	4.67±3.21	N	56.33±5.77	N
Positive Control	76.00±5.66	N	394.00±8.19	N	311.67±40.38	N	540.67±78.82	N	330.00±1.00	N
5,000	24.50±3.54	N	156.50±4.95	N	10.67±3.51	K	1.00±0.00	K	64.33±7.09	N
1,500	9.50±3.54	N	142.50±0.71	N	16.33±1.53	N	4.00±1.73	N	53.00±8.54	N
500	17.00±1.41	N	160.33±2.89	N	12.67±1.15	N	5.33±1.53	N	65.00±5.66	N
150	6.50±2.12	N	127.50±9.19	N	21.00±0.00	N	6.67±1.53	N	35.00±0.00	N
50	9.00±0.00	N	140.50±7.78	N	23.00±2.83	N	5.00±2.00	N	51.50±7.78	N
15	5.33±2.08	N	138.50±2.12	N	11.00±1.41	N	6.33±1.53	N	58.00±2.65	N

หมายเหตุ : BL= Background lawn N = Normal background lawn K = Killing effect background lawn



+S9 TA1535 Negative Control -S9 TA1535 Negative Control +S9 TA1535 5,000 µg/plate -S9 TA1535 5,000 µg/plate

+S9 TA1537 Negative Control -S9 TA1537 Negative Control +S9 TA1537 5,000 µg/plate -S9 TA1537 5,000 µg/plate

ภาพที่ 3 A. Background lawn ของ TA1535 ในสภาวะที่มีเอนไซม์กระตุ้น B. Background lawn ของ TA1535 ในสภาวะที่ไม่มีเอนไซม์กระตุ้น C. เกิด Killing effect Background lawn ที่ความเข้มข้น 5,000 µg/plate ของ TA1535 ในสภาวะ ที่มีเอนไซม์กระตุ้น D. เกิด Killing effect Background lawn ที่ความเข้มข้น 5,000 µg/plate ของ TA1535 ในสภาวะที่ไม่มีเอนไซม์กระตุ้น E. Background lawn ของ TA1537 ในสภาวะที่มีเอนไซม์กระตุ้น F. Background lawn ของ TA1537 ในสภาวะที่ไม่มีเอนไซม์กระตุ้น G. เกิด Killing effect Background lawn ที่ความเข้มข้น 5,000 µg/plate ของ TA1537 ในสภาวะที่มีเอนไซม์กระตุ้น H. เกิด Killing effect Background lawn ที่ความเข้มข้น 5,000 µg/plate ของ TA1537 ในสภาวะที่ไม่มีเอนไซม์กระตุ้น

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การทดสอบการก่อกลายพันธุ์โดยวิธีทดสอบเอมส์ (Ames test) ในสภาวะที่มีและไม่มีเอนไซม์กระตุ้น เป็นการทดสอบเพื่อใช้คัดกรองหาฤทธิ์ก่อกลายพันธุ์ของสารสกัดสมุนไพร ที่จะนำไปสู่การเกิดมะเร็งได้ เรียกว่า การทดสอบการกลายพันธุ์แบบย้อนกลับ อ้างอิงจาก OECD test guideline 471 เป็นการทดสอบพิษวิทยาและการประเมินความปลอดภัย เนื่องจากแบคทีเรียที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ ถูกทำให้กลายพันธุ์ไปจนไม่สามารถสังเคราะห์กรดอะมิโน Histidine หรือ Tryptophan ได้ ทำให้ไม่สามารถเจริญเติบโตในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ขาดกรดอะมิโนชนิดนี้ แต่ถ้าสารทดสอบมีฤทธิ์ก่อกลายพันธุ์จะทำให้แบคทีเรียชนิดนี้ เกิดการกลายพันธุ์แบบย้อนกลับ ทำให้สามารถสร้าง Histidine หรือ Tryptophan ได้เองอีกครั้ง จึงสามารถกลับมาเจริญเติบโตในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ขาด Histidine หรือ Tryptophan ได้อีก ในกระบวนการทดสอบด้วยวิธีทดสอบเอมส์ มีทั้งในสภาวะที่ไม่มีการเติมเอนไซม์และมีการเติมเอนไซม์จากตับหนูเพื่อกระตุ้นเมแทบอลิซึมของสารที่ทดสอบด้วยวิธีทดสอบเอมส์ จึงเป็นการทดสอบการก่อกลายพันธุ์ในสถานการณ์จำลองการย่อยสลายสารเคมี/สารสมุนไพรในร่างกาย (บรรจง วิทยวีรศักดิ์และคณะ, 2553) หากสารเคมี/สารสมุนไพรที่ส่งผลให้เกิดการกลายพันธุ์ต่อเซลล์ร่างกาย เมื่อมีการบริโภคเข้าไปนั้นอาจทำให้เซลล์ถูกพัฒนาไปเป็นเซลล์มะเร็งหรือเกิดโรคความผิดปกติทางพันธุกรรมได้ ดังนั้นผลการทดสอบการก่อกลายพันธุ์ของสารสกัดมะแขว่นในเชื้อแบคทีเรีย *S. typhimurium* สายพันธุ์ TA98, TA100, TA1535, TA1537 และ *E. coli* สายพันธุ์ WP2 uvrA ด้วยวิธีทดสอบเอมส์ ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวอย่างทดสอบกับจำนวนโคโลนีกลายพันธุ์ (Revertant colony) พบว่าสารสกัดมะแขว่นไม่เกิดการก่อกลายพันธุ์ เนื่องจากจำนวนโคโลนีกลายพันธุ์ สูงไม่เกิน 2-3 เท่าเมื่อเทียบกับจำนวนโคโลนีที่กลายพันธุ์ตามธรรมชาติ (Negative Control) จากการศึกษาพบว่ามะแขว่นมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์สูง ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยอนุมูลอิสระเป็นโมเลกุลที่ไม่เสถียรที่สามารถทำลายเซลล์และ DNA ทำให้เกิดการกลายพันธุ์และนำไปสู่การเกิดมะเร็งได้ ดังนั้นเมื่อสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ไปจับและกำจัดอนุมูลอิสระ จึงช่วยลดความเสียหายต่อ DNA และลดความเสี่ยงของการกลายพันธุ์ได้ (Alam et al., 2019) แต่เมื่อพิจารณาความเข้มข้นที่ไม่เหมาะสมโดยดูจากความผิดปกติของ background lawn พบความผิดปกติของ background lawn ที่ระดับความเข้มข้น 5,000 µg/plate ของเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ TA1535 และ TA1537 ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีเอนไซม์ S9 กระตุ้น โดยความผิดปกติของ background lawn ที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า Killing effect background lawn ซึ่งลักษณะของ background lawn จะมีช่องว่างที่พื้นหลังแสดงถึงการตายของเชื้อ ส่วนระดับความเข้มข้นที่ลดลงถัดมา คือ 1,500 µg/plate ไม่เกิดความผิดปกติของ background lawn ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสารสกัดมะแขว่นมีความปลอดภัยในระดับหนึ่ง โดยระดับความเข้มข้นที่นำไปใช้ในการศึกษาต่อต้องไม่เกิน 1,500 µg/plate ซึ่งเป็นเกณฑ์การตัดสินใจอย่างหนึ่งที่บ่งบอกถึงความเหมาะสมของระดับความเข้มข้นของสารทดสอบที่ปลอดภัย จากผลการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของปฐมาวัลย์ วิภูษณพันธุ์ (2561) รายงานว่าสารสกัดเมล็ดมะแขว่นไม่มีฤทธิ์การก่อกลายพันธุ์ในเชื้อ *S. typhimurium* สายพันธุ์ TA98 TA100 ในสภาวะที่มีและไม่มีไนไตร์กระตุ้น โดยไม่มีผลทำให้เซลล์สิ่งมีชีวิตเกิดการกลายพันธุ์ ซึ่งการทดสอบการก่อกลายพันธุ์มีประโยชน์อย่างมาก นอกจากจะใช้เป็นวิธีทดสอบศักยภาพของสารสมุนไพรในการที่จะก่อให้เกิดมะเร็งหรือทำนายว่าสารสมุนไพรชนิดนั้น ๆ มีฤทธิ์ก่อมะเร็งหรือไม่แล้ว ยังสามารถนำไปใช้หรือประยุกต์ใช้ในการจัดอับดับความสำคัญของสารสมุนไพรเพื่อทำการทดสอบฤทธิ์ก่อมะเร็งในสัตว์ทดลองต่อไป แต่อย่างไรก็ตามผลการศึกษาทดลองในครั้งนี้เป็นเพียงตัวชี้วัดทางด้านความปลอดภัยในระดับหนึ่ง แต่ก็ต้องมีการศึกษาในเชิงลึกเพิ่มเติมและจะต้องมีการศึกษาหาข้อมูลด้านความปลอดภัยที่ถูกต้องก่อนนำมาบริโภค

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ผู้ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการพิษวิทยา สถาบันวิจัยสมุนไพร กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ที่ให้ความช่วยเหลืองานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

จุรีภรณ์ อิ้มพัฒน์ และนันทกานต์ วุฒิศิลป์. (2564). การพัฒนาน้ำมันที่มีส่วนประกอบของน้ำมันหอมระเหยจากผลมะแขว่นและฤทธิ์บรรเทาปวดที่มีต่อกล้ามเนื้อน่องในผู้เข้าร่วมวิจัยสุขภาพดี. *วารสารการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก, 19*(1), 147-160.

ชุลี ยมภักดี และวรินทร ชวศิริ. (2554). *สารออกฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์จากมะแขว่น Zanthoxylum limonella Alston. Anti-microbial Activity from Zanthoxylum limonella Alston* [รายงานผลการวิจัย]. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณัฐกานต์ วงศ์สีสม, จามจุรี จินะตา, บุษบา มะโนแสน, จิรรัชต์ กันทะขู้, สุรีพร วันควร, และสุภาวดี ศรีแย้ม. (2557). การศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรียก่อโรคในอาหารของน้ำมันหอมระเหยจากมะแขว่น. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ, 37*(1), 3-14.

บรรจง วิทยวีรศักด์, จันทิภา ปุรินทราภิบาล, กัญญารัตน์ หลงเศษ, และซูไฮณีย์ อิงดิง. (2553). *การตรวจหาสารก่อกลายพันธุ์ในน้ำทิ้งและในบรรยากาศการทำงานภายในโรงงานผลิตถุงมือยางในจังหวัดสงขลา: รายงานฉบับสมบูรณ์*. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.

ปฐมาวัลย์ วิภูษณพันธุ์. (2561). *ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันและฤทธิ์ต้านการก่อกลายพันธุ์ของสารสกัดจากผนังผลและเมล็ดมะแขว่น* [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต]. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พัชรวรรณ ตันอมาตยรัตน์. (2558). *การพัฒนาผลิตภัณฑ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรียในช่องปากจากสารสกัดผลมะแขว่น* [รายงานผลการวิจัย]. มหาวิทยาลัยพะเยา.

มหาวิทยาลัยแม่โจ้. (2565). *เอสเซ้นส์บำรุงผิวหน้ามะแขว่น (Ma-khaen Essence)*. องค์ความรู้มหาวิทยาลัยแม่โจ้. https://kb.mju.ac.th/product.aspx?id=3748

Ahsan, M., Zaman, A. T., Hasan, M. C., Ito, C., & Islam, K. S. (2000). Constituents and cytotoxicity of *Zanthoxylum rhetsa* stem bark. *Fitoterapia, 71*(6), 697-700. https://doi.org/10.1016/S0367-326X(00)00214-8

Alam, F., Saqib, Q. N., & Ashraf, M. (2019). Phenolic contents, elemental analysis, antioxidant and lipoxygenase inhibitory activities of *Zanthoxylum armatum* DC fruit, leaves and bark extracts. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences, 32*(4), 1703-1708.

Netweera, V., Priprem, A., & Limsittichaikoon, S. (2016). In vitro and in vivo studies of a bioadhesive gel containing volatile oil extracted from fruits of *Zanthoxylum limonella* Alston. *International Journal of Scientific and Research Publications, 6*(1), 175-178.

OECD. (2020). *Test No. 471: Bacterial reverse mutation test*. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 4. https://doi.org/10.1787/9789264071247-en

Sreelekha, M., Anto, N. P., Anto, R. J., & Shafi, P. M. (2014). Cytotoxicity of 6-acetonyldihydrochelerythrin, arnottianamide and 6-(2-hydroxypropyl)-dihydrocherythrine towards human cancer cell lines. *Indian Journal of Chemistry, 53B*, 647-651.

Tangjitjaroenkun, J., Supabphol, R., & Chavasiri, W. (2012). Antioxidant effect of *Zanthoxylum limonella* Alston. *Journal of Medicinal Plants Research, 6*(8), 1407-1414. https://doi.org/10.5897/JMPR10.846

Vijay, U., Gupta, S., Mathur, P., & Bhatnagar, P. (2018). Microbial Mutagenicity Assay: Ames Test. *Bio-protocol, 8*(6), Article e2763. https://doi.org/10.21769/BioProtoc.2763

วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

การเปลี่ยนรูปทรงวัสดุพลาสติกโพลีเอทิลีนเพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ประณีตศิลป์ แก่วิสาหกิจชุมชนสตรีจ้าวภูผา

Transforming Polyethylene Plastic Materials into the Design and Development of Fine Arts Products for the Chao Phu Pha Women's Community Enterprise

สุภารีย์ เถาว์วงศ์ษา[1*]
Suparee Taowongsa[1 *]

[1] สาขาการออกแบบเครื่องประดับ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี
[1] Faculty Of Gems, Burapha University Chanthaburi Campus

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เกิดขึ้นจากความต้องการแก้ไขปัญหา การนำของเหลือใช้ในกลุ่มวิสาหกิจชุมชนสตรีจ้าวภูผากลับมาใช้ประโยชน์ คือ ชิ้นส่วนของตาข่ายพลาสติกโพลีเอทิลีน เป็นวิจัยที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาช่วงความร้อนที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุโพลีเอทิลีนในการขึ้นโครงสร้างผลิตภัณฑ์รูปทรงนูนต่ำ รูปทรงนูนสูง และลอยตัว เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุโพลีเอทิลีน ทำการทดลองโดยนำวัสดุพลาสติกโพลีเอทิลีนเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100-150 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 1-10 นาทีตามลำดับ พร้อมกับทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานในรูปทรงนูนต่ำ รูปทรงนูนสูง และลอยตัว ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปชิ้นงานคือ 110-120 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 3-5 นาที โดยวัสดุพลาสติกโพลีเอทิลีนสามารถขึ้นรูป ในรูปทรงนูนต่ำตามแม่พิมพ์กระเบื้องได้เป็นอย่างดี จึงนำไปสู่การออกแบบต้นแบบผลิตภัณฑ์ประณีตศิลป์เพื่อเพิ่มมูลค่าของเหลือใช้ พร้อมนำเสนอตัวอย่างการสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ประณีตศิลป์จากวัสดุโพลีเอทิลีนรูปทรงนูนต่ำไว้ในข้อเสนอแนะ

สำคัญ: วิสาหกิจชุมชน โพลีเอทิลิน การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ ประณีตศิลป์

Abstract

This research was initiated to address the need for reusing waste materials, specifically polyethylene plastic netting, from the Chao Phu Pha Women's Community Enterprise. Polyethylene plastic materials were placed in an oven at 100-150°C for 1-10 minutes each. Following this, their ability to be formed into bas-relief, high-relief, and round relief shapes was tested. The experimental results indicated that the appropriate temperature for forming the workpiece is 110-120°C, with a processing time of 3-5 minutes. Bas-relief shapes can be effectively formed from polyethylene plastic materials using tile molds. This led to the design of a fine art product prototype to enhance the value of waste, and the suggestions include an example of creating such a product from bas-relief polyethylene material.

Keywords: Enterprises, Polyethylene, Product Design & Development, Fine Art

** Corresponding author: suparee@go.buu.ac.th*

***Received**: 19 กุมภาพันธ์ 2568* ***Revised:** 15 เมษายน 2568* ***Accepted**: 14 พฤษภาคม 2568*

1. บทนำ

วิสาหกิจชุมชนเกิดหลังจากที่รัฐบาลให้ความสำคัญกับหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงควบคู่กับเศรษฐกิจกระแสหลัก เนื่องจากเศรษฐกิจกระแสหลักก่อให้เกิดความเหลื่อมล้ำของประชาชนในด้านรายได้และเกิดปัญหาในสังคม รัฐบาลจึงนำหลัก “ปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง” มาเป็นพื้นฐานของเศรษฐกิจชุมชน โดยส่งเสริมการรวมกลุ่มของประชาชนเพื่อประกอบกิจการที่ช่วยแก้ปัญหาในการดำรงชีวิตของคนในชุมชนและนำทรัพยากรที่มีอยู่ในชุมชนมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดเพื่อสร้างอาชีพและรายได้ให้กับชุมชน เรียกว่า “วิสาหกิจชุมชน” ทำให้ภาครัฐมีนโยบายในการสนับสนุนและส่งเสริมการจัดตั้งวิสาหกิจชุมชน ซึ่งประชาชนก็ให้ความสำคัญในการจัดตั้งวิสาหกิจชุมชนเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากข้อมูลจำนวนวิสาหกิจชุมชนของประเทศไทยที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามมีเพียงวิสาหกิจชุมชนบางกลุ่มเท่านั้นที่ประสบความสำเร็จในการดำเนินงาน (มนูญ สอนเกิด, 2599; มูลนิธิชัยพัฒนา, 2566) กลุ่มวิสาหกิจสตรีจ้าวภูผา ตำบลจันทเขลม อำเภอเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี เป็นกลุ่มวิสาหกิจชุมชนขนาดเล็ก ที่ก่อตั้งในปี 2559 โดยการรวบรวมกลุ่มสมาชิกสตรีชุมชนตำบลจันทเขลมที่ว่างเว้นจากการทำงานสวน ในระยะแรกมีจำนวนสมาชิก 30 คน มีเป้าหมายเพื่อผลิตสินค้าเครื่องจักรสานจากต้นคลุ้ม ซึ่งเป็นพืชพื้นถิ่นเป็นอาชีพเสริม อีกทั้งยังเป็นเป็นการรักษาวัฒนธรรมและลวดลายเฉพาะของชนชาวชอง ซึ่งเป็นชนกลุ่มน้อยเชื้อสายมอญที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ตำบลจันทเขลม จังหวัดจันทบุรี ให้ดำรงอยู่ โดยมีการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ในงานแสดงสินค้าต่าง ๆ และจำหน่ายทางออนไลน์

ประธานกลุ่มวิสาหกิจชุมชนจ้าวภูผา ลิลี่ แซ่ตั้ง (การสัมภาษณ์, 9 สิงหาคม 2566) ได้กล่าวถึงสถานการณ์ปัญหาของกลุ่มหลังจากที่ผู้วิจัยเข้าไปลงพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลและประชุมหารือความต้องการของวิสาหกิจชุมชน พบว่ามีของเหลือใช้จากการทำงานสวนและเลี้ยงสัตว์ของสมาชิกในกลุ่ม คือ ชิ้นส่วนของตาข่ายพลาสติก จึงมีความต้องการให้ผู้วิจัยช่วยคิดค้นและออกแบบต้นแบบผลิตภัณฑ์ใหม่จากของเหลือใช้ดังกล่าว เพราะกลุ่มยังขาดทักษะการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า วัสดุพลาสติกโพลีเอทิลีน (Polyethylene: PE) เป็นวัสดุที่มีต้นทุนต่ำ มีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกง่ายต่อการแปรรูป ความทนทานต่อน้ำสูง, ทนทานสภาวะอากาศได้ดี, ความยืดหยุ่นสูงรับแรงได้ดีแต่ไม่แข็ง, ทนความร้อนได้ 70-100 องศาเซลเซียส และความยืดหยุ่นจะมากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับความหนาแน่น จากปัญหาสิ่งแวดล้อมจึงมีการทดลองเพื่อนำวัสดุพลาสติกที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่อย่างหลากหลายในปัจจุบัน ทั้งในลักษณะการนำขยะพลาสติกที่คัดแยกมาเป็นส่วนผสมเพิ่มค่าความเสถียรภาพให้กับถนนแอสฟัลติกคอนกรีต โดยนำถุงพลาสติกที่คัดแยกได้มาตัดเปนชิ้นเล็ก ๆ ผสมกับวัสดุมวลรวมคละ และยางแอสฟลตซีเมนตโดยใช้ความร้อนหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดตามเกณฑมาตรฐานของกรมทางหลวงเพื่อนำไปใชในการกอสร้างถนน ในการทดลองการผสานวัสดุยังมีการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของเศษขยะขวดน้ำพลาสติก ทำการสร้างพื้นผิวโดยผสมผสานกับเศษวัสดุแห เชือก อวน และทุ่นโฟมด้วยการหลอมโดยใช้ความร้อนจากเตาอบ เพราะสามารถควบคุมอุณหภูมิให้ผลการหลอมได้ทั่วถึงกับวัสดุ ผลที่ได้ของการนำพลาสติกคนละชนิดที่มีจุดหลอมเหลวต่างกัน คือ พลาสติก HDPE ที่มีจุดหลอมเหลว 230 องศาเซลเซียส มาหลอมพร้อมกับพลาสติกชนิด PET ที่มีจุดหลอมเหลว 293 องศาเซลเซียส ทำให้พลาสติกที่มีจุดหลอมเหลวต่ำว่ามีการเผาไหม้เป็นเป็นสีน้ำตาลเข้ม สีดำ และแข็งตัวคงรูป และวัสดุบางชนิดทำให้เกิดพื้นผิวไม่เรียบ มีความขรุขระ เช่น แห อวน และเศษวัสดุเชือก ส่วนเศษวัสดุทุ่นโฟมไม่สามารถยึดติดกับพลาสติก ลักษณะพื้นผิวที่ได้จึงเป็นเพียงแค่ร่องรอยของทุ่นโฟมบนพลาสติก ในระดับผลิตภัณฑ์มีการนำพลาสติกชนิดโพลิเอทธิลีน เช่น ฝาขวดน้ำ และกล่องพลาสติกใส่อาหารสีดำ มาตัดเป็นขนาดเล็ก ๆ ใส่ในพิมพ์กดให้หลอมด้วยความร้อน ก็จะได้ชิ้นพลาสติกรูปทรงตามพิมพ์ จึงนำมาร้อยเป็นกระเป๋า จะเห็นได้ว่าพลาสติกมีวิธีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงด้วยความร้อน โดยผู้วิจัยพบว่ามี การนำพลาสติกชนิดฝาขวดน้ำมาใช้งานมากที่สุด แต่ยังไม่พบการนำตาข่ายพลาสติกมาใช้งาน (เวชสวรรค์ หล่ากาศ และคณะ, 2560, น. 41; ศุภรา อรุณศรีมรกต และคณะ, 2562, น. 91; มินัณยาร์ เพ็ชรสุด และชลธิดา เกษเพชร, 2567, น. 42)

ผู้วิจัยจึงพิจารณาคุณสมบัติเด่นของวัสดุชนิดนี้ ทำการทดลองหาความร้อนที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุโพลีเอทิลีนชนิดสำเร็จ เพื่อใช้ขึ้นโครงสร้างผลิตภัณฑ์รูปทรงนูนต่ำ รูปทรงนูนสูง และลอยตัว โดยการทดลองนำวัสดุต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบร่วมกับโครงตาข่ายโพลีเอทิลีนเหลือใช้ ทำให้เกิดการสร้างมูลค่าเพิ่มแก่วัสดุโพลีเอทิลีนสู่การเป็นผลิตภัณฑ์ประณีตศิลป์ เพื่อพัฒนารูปแบบผลิตภัณฑ์ให้หลากหลายเป็นที่น่าสนใจแก่ผู้บริโภค เป็นการพัฒนาศักยภาพและองค์ความรู้

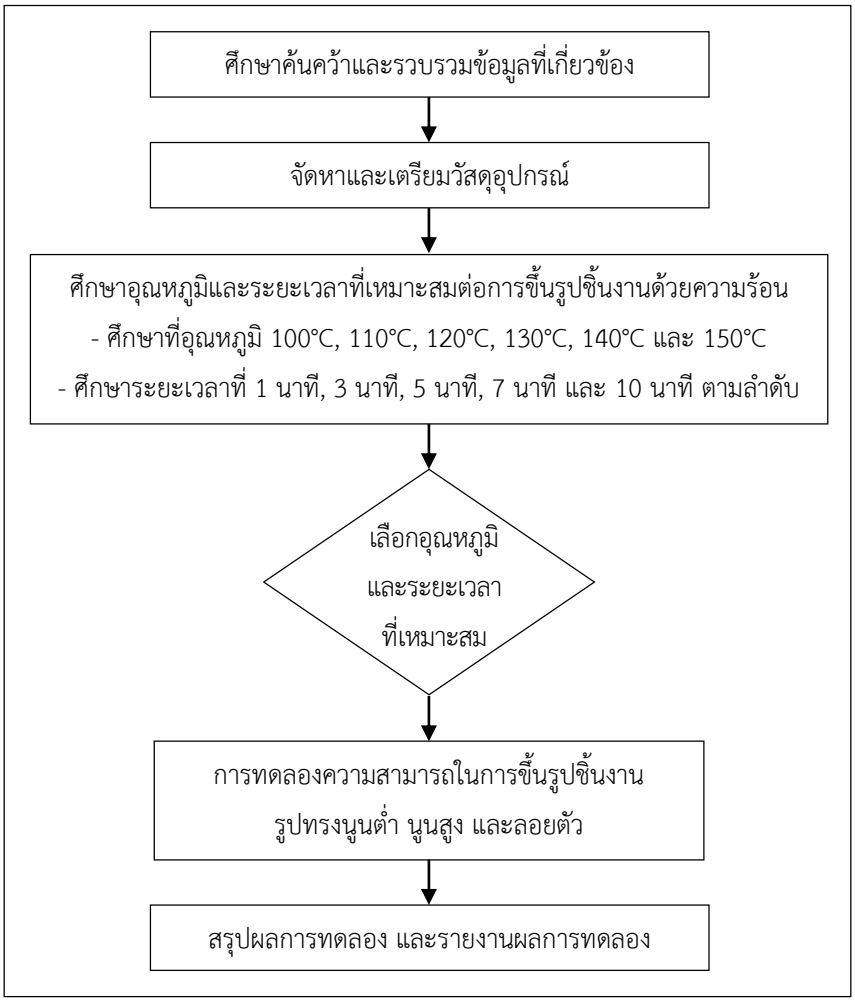
ให้กับผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชนให้สามารถแข่งขันในสภาพเศรษฐกิจในปัจจุบัน สร้างอัตลักษณ์ให้กับผลิตภัณฑ์ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน นำไปสู่การต่อยอดสร้างรายได้ในอนาคตต่อไป

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาช่วงความร้อนที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุโพลีเอทิลีน เพื่อใช้ขึ้นโครงสร้างผลิตภัณฑ์รูปทรงนูนต่ำ รูปทรงนูนสูงและลอยตัว และนำเสนอตัวอย่างการสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ประณีตศิลป์จากวัสดุโพลีเอทิลีนรูปทรงนูนต่ำ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

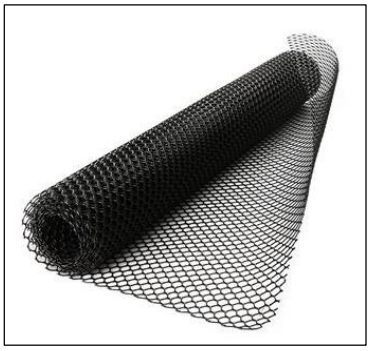
3.1 กรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัย: งานวิจัยนี้ศึกษาช่วงความร้อนที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุโพลีเอทิลีน เพื่อใช้ขึ้นโครงสร้างผลิตภัณฑ์รูปทรงนูนต่ำ รูปทรงนูนสูงและลอยตัว โดยได้ดำเนินการตามลำดับขั้น เริ่มโดยการศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง จากนั้นจึงจัดหาและเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และทำการทดลองศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความร้อน ศึกษาที่อุณหภูมิ 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C และ 150°C ในระยะเวลาที่ 1 นาที, 3 นาที, 5 นาที, 7 นาที และ 10 นาที ตามลำดับ จากนั้นเลือกอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมจากผลการทดลอง จึงนำไปการทดลองความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงนูนต่ำ นูนสูง ลอยตัว และสรุปผลการทดลอง รายงานผลการทดลอง โดยสามารถอธิบายเป็นแผนภาพอธิบายขั้นตอนการดำเนินงานดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ตาข่ายพลาสติกโพลีเอทิลีน (Polyethylene - PE) ขนาดของตา (รูตาข่าย) 5 มม. ความหนา 1.5 มม. สีดำ การเลือกซื้อวัสดุชนิดนี้จะแบ่งประเภทตามขนาดของตา (รูตาข่าย) ซึ่งมีตั้งแต่ 1-15 มม. (ไม่สามารถกำหนดความหนาได้ สามารถหาซื้อได้จากร้านขายวัสดุก่อสร้างทั่วไป)



ภาพที่ 2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
ที่มา (Homepro, 2566)

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

(1) กรรไกร
(2) ไม้บรรทัด
(3) ปากคีบชิ้นงาน
(4) ที่วัดอุณหภูมิ
(5) พิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน

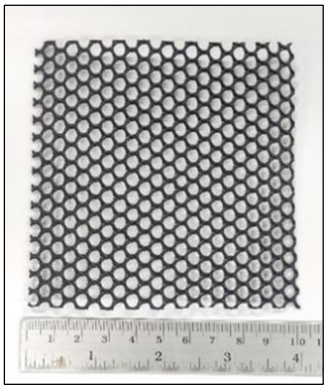
3.2.3 เครื่องมือ: เตาอบ (เตาอบไฟฟ้า ยี่ห้อ HOUSE WORTH ขนาด 25 ลิตร รุ่น HW-EO01)

ภาพที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
ที่มา (ไทยวัสดุ, 2566)

3.3 การศึกษาและทดลองการเปลี่ยนรูปทรงวัสดุพลาสติกโพลีเอทิลีน

3.3.1 ศึกษาและทดลองอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความร้อน: โดยการเตรียมตาข่ายพลาสติก PE ขนาดของตา (รูตาข่าย) 5 มม. สีดำ ตัดเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 x 10 เซนติเมตร ดังภาพที่ 4 ทำการทดลองโดยการนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิและระยะเวลายืนที่แตกต่างกัน โดยใช้ชิ้นงาน 1 ชิ้นต่อแต่ละอุณหภูมิรวมทั้งสิ้น 30 ชิ้นงาน

ทำการทดลองศึกษาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส, 110 องศาเซลเซียส, 120 องศาเซลเซียส, 130 องศาเซลเซียส, 140 องศาเซลเซียส และ 150 องศาเซลเซียส โดยทดลองศึกษาระยะเวลายืนที่ 1 นาที, 3 นาที, 5 นาที, 7 นาที และ 10 นาที



ภาพที่ 4 การเตรียมตาข่ายพลาสติก PE ตัดเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 x 10 เซนติเมตร

3.3.2 ศึกษาและทดลองความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงาน: โดยการเตรียมตาข่ายพลาสติก PE ที่ใช้ในการทดลองตัดเป็นรูปทรงตามขนาดของพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานในแต่ละรูปทรง ทดลองโดยการนำตาข่ายพลาสติก PE เข้าเตาอบโดยวางไว้บนพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานในรูปทรงที่แตกต่างกัน ดังนี้

(1) รูปทรงนูนต่ำ พิมพ์กระเบื้องที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานมีขนาด 7 x 2 เซนติเมตร ขนาดของตาข่ายพลาสติก PE ก่อนขึ้นรูปเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร

(2) รูปทรงนูนสูง พิมพ์กระเบื้องที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานมีขนาด 5 x 3 เซนติเมตร ขนาดของตาข่ายพลาสติก PE ก่อนขึ้นรูปเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร

(3) รูปทรงลอยตัว พิมพ์กระเบื้องที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานมีขนาด 7 x 10 เซนติเมตร ขนาดของตาข่ายพลาสติก PE ก่อนขึ้น รูปเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาและทดลองอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความร้อน

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส: พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที ตาข่ายพลาสติก PE ไม่มีการเปลี่ยนแปลง, เมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที ตาข่ายพลาสติก PE เริ่มหดตัวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน, เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ตาข่ายพลาสติก PE หดตัวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานแต่ยังมีบางส่วนที่ไม่แนบสนิทกับพิมพ์, เมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที ตาข่ายพลาสติก PE หดตัวแนบสนิทตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน และเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ตาข่ายพลาสติก PE หดตัวแนบสนิทตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน โดยผลการทดลองที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในระยะเวลายืนที่ 1 นาที, 3 นาที, 5 นาที, 7 นาที และ 10 นาที เป็นอุณหภูมิและระยะเวลา ที่ยังไม่เหมาะสมจะทำให้วัสดุสามารถขึ้นรูปได้สมบูรณ์พอที่จะนำไปใช้งานได้

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส: พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที ตาข่ายพลาสติก PE เริ่มอ่อนตัวลงแต่ยังไม่หดตัวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน, เมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที ตาข่ายพลาสติก PE หดตัวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานแต่ยังมีบางส่วนที่ไม่แนบสนิทพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน, **** เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ตาข่ายพลาสติก PE หดตัวแนบสนิทตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน*, เมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที ตาข่ายพลาสติก PE เริ่มมีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานเล็กน้อย และเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ตาข่ายพลาสติก PE เริ่มมีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน โดยผลการทดลองที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ในระยะเวลายืนที่ 1 นาที และ 3 นาที เป็นอุณหภูมิและระยะเวลา ที่ยังไม่เหมาะสมจะทำให้วัสดุสามารถขึ้นรูปได้

สมบูรณ์พอที่จะนำไปใช้งานได้ *ในขณะที่ในระยะเวลา *** 5 นาที เป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้แนบสนิทตามพิมพ์ โดยวัสดุไม่เสียคุณสมบัติ* ส่วนในระยะเวลาที่ 7 นาทีขึ้นไป เป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่ทำให้วัสดุเริ่มเสียคุณสมบัติ คือ วัสดุเสียความยืดหยุ่น เมื่อเย็นตัวลงส่วนที่เสียความยืดหยุ่นเสี่ยงมีลักษณะแข็งขึ้น เสี่ยงต่อการแตกหัก

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส: พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที ตาข่ายพลาสติก PE หดตัวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานแต่ยังมีบางส่วนที่ไม่แนบสนิท **** เมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที ตาข่ายพลาสติก PE หดตัวแนบสนิทตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน*, เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ตาข่ายพลาสติก PE เริ่มมีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน, เมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที ตาข่ายพลาสติก PE มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน และเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ตาข่ายพลาสติก PE มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานมากขึ้น โดยผลการทดลองที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ในระยะเวลายืนที่ 1 นาที เป็นอุณหภูมิและระยะเวลา ที่ยังไม่เหมาะสมจะทำให้วัสดุสามารถขึ้นรูปได้สมบูรณ์พอที่จะนำไปใช้งานได้ *ในขณะที่ระยะเวลายืนที่ *** 3 นาที เป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้แนบสนิทตามพิมพ์ โดยวัสดุไม่เสียคุณสมบัติ* ส่วนในระยะเวลาที่ 5 นาทีขึ้นไป เป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่ทำให้วัสดุเริ่มเสียคุณสมบัติ คือ วัสดุเสียความยืดหยุ่น เมื่อเย็นตัวลงส่วนที่เสียความยืดหยุ่นเสี่ยงมีลักษณะแข็งขึ้น เสี่ยงต่อการแตกหัก

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส: พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที ตาข่ายพลาสติก PE หดตัวแนบสนิทตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน และคุณภาพวัสดุเปลี่ยนแปลง, เมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที ตาข่ายพลาสติก PE มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน, เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ตาข่ายพลาสติก PE มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานมากขึ้น, เมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที ตาข่ายพลาสติก PE มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานมากขึ้น และเมื่อนำตาข่ายพลาสติก PE ออกจากพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานสามารถทำได้ยากและอาจเกิดการขาดของข่ายพลาสติก PE ได้, เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ตาข่ายพลาสติก PE มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานมากขึ้น และเมื่อนำตาข่ายพลาสติก PE ออกจากพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานสามารถทำได้ยากและอาจเกิดการฉีกขาดของข่ายพลาสติก PE ได้ โดยผลการทดลองที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ในระยะเวลายืนที่ 1 นาที เป็นอุณหภูมิและระยะเวลา ที่ยังไม่เหมาะสมจะทำให้วัสดุสามารถขึ้นรูปได้สมบูรณ์พอที่จะนำไปใช้งานได้ ในขณะที่ในระยะเวลาที่ 3 และ 5 นาที เป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่ทำให้วัสดุเริ่มเสียคุณสมบัติ คือ วัสดุเสียความยืดหยุ่น เมื่อเย็นตัวลงส่วนที่เสียความยืดหยุ่นเสี่ยงมีลักษณะแข็งขึ้น เสี่ยงต่อการแตกหัก และในระยะเวลาที่ 7 นาทีขึ้นไป เป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่ทำให้วัสดุเสียคุณสมบัติ คือ วัสดุเกิดการหดตัว, เกิดการหลอมละลาย และเมื่อเย็นตัวลงส่วนที่มีการหลอมละลายจะมีความแข็งกรอบ

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส: พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที ตาข่ายพลาสติก PE หดตัวแนบสนิทตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานและมีการหลอม, เมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที ตาข่ายพลาสติก PE มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานมากขึ้น และเมื่อนำตาข่ายพลาสติก PE ออกจากพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานสามารถทำได้ยากและอาจเกิดการฉีกขาดของข่ายพลาสติก PE ได้, เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ตาข่ายพลาสติก PE มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานมากขึ้น และเมื่อนำตาข่ายพลาสติก PE ออกจากพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานสามารถทำได้ยากและอาจเกิดการฉีกขาดของข่ายพลาสติก PE ได้, เมื่อเวลาผ่านไปตั้งแต่ 7 นาที ตาข่ายพลาสติก PE มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานมากขึ้น และเกิดการฉีกขาดของตาข่ายพลาสติก PE เมื่อนำตาข่ายพลาสติก PE ออกจากพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน โดยผลการทดลองที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ในระยะเวลายืนที่ 1 และ 3 นาที เป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่ทำให้วัสดุเริ่มเสียคุณสมบัติ คือ วัสดุเสียความยืดหยุ่น เมื่อเย็นตัวลง ส่วนที่เสียความยืดหยุ่นจะมีลักษณะแข็งขึ้นเสี่ยงต่อการแตกหัก และในระยะเวลาที่ 5 นาทีขึ้นไป เป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่ทำให้วัสดุเสียคุณสมบัติ คือ วัสดุเกิดการหดตัว, เกิดการหลอมละลาย และเมื่อเย็นตัวลงส่วนที่มีการหลอมละลายจะมีความแข็งกรอบ

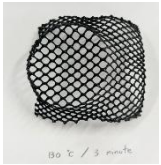
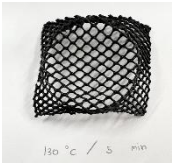
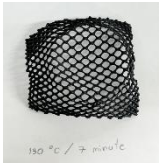
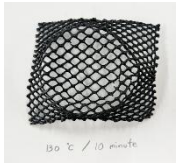
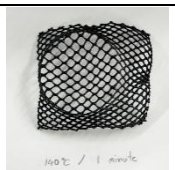
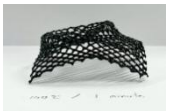
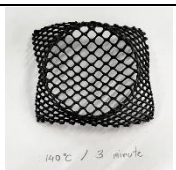
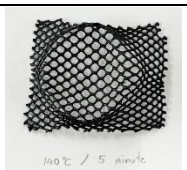
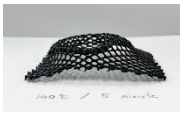
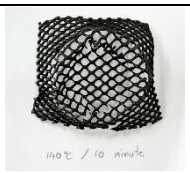
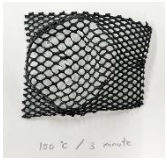
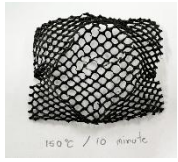
ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส: พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที ตาข่ายพลาสติก PE มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานมากขึ้นและเมื่อนำตาข่ายพลาสติก PE ออกจากพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานสามารถทำได้ยากและอาจเกิดการฉีกขาดของข่ายพลาสติก PE ได้, เมื่อเวลาผ่านไปตั้งแต่ 3 นาที เป็นต้นไป ตาข่ายพลาสติก PE มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานมากขึ้น และเกิดการฉีกขาดของข่ายพลาสติก PE เมื่อนำตาข่ายพลาสติก PE ออกจากพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูป

ชิ้นงาน โดยผลการทดลองที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในระยะเวลายืนที่ 1 นาที เป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่ทำให้วัสดุเริ่มเสียคุณสมบัติ คือ วัสดุเสียความยืดหยุ่น เมื่อเย็นตัวลง ส่วนที่เสียความยืดหยุ่นจะมีลักษณะแข็งขึ้นเสี่ยงต่อการแตกหัก และในระยะเวลาตั้งแต่ 3 นาทีขึ้นไป เป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่ทำให้วัสดุละลายหลอมติดพิมพ์ วัสดุเสียคุณสมบัติ คือ วัสดุเกิดการหดตัว, เกิดการหลอมละลาย ฉีกขาด และเมื่อเย็นตัวลงส่วนที่มีการหลอมละลายจะมีความแข็งกรอบ นำออกจากพิมพ์ได้ยากและเสี่ยงฉีกขาดสูง

จากผลการศึกษาพบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุโพลีเอทิลีน คืออุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาอบที่ 5 นาที และอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาอบที่ 3 นาที เป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม สามารถขึ้นรูปชิ้นงานตาข่ายพลาสติก PE ได้แนบสนิทตามพิมพ์ โดยวัสดุไม่เสียคุณสมบัติ

ตารางที่ 1 ผลการศึกษาและทดลองอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความร้อน

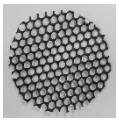
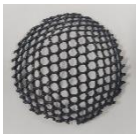
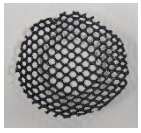
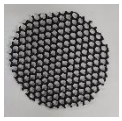
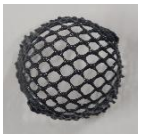
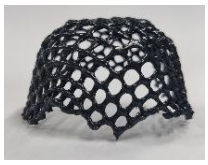
อุณหภูมิ (°C)	**ระยะเวลา**				
	1 นาที	**3 นาที**	**5 นาที**	**7 นาที**	**10 นาที**
100					
	ไม่มีการเปลี่ยนแปลง	เริ่มหดตัวตามพิมพ์กระเบื้อง	หดตัวตามพิมพ์กระเบื้องแต่บางส่วนไม่แนบสนิท	หดตัวแนบสนิทตามพิมพ์กระเบื้อง ขึ้นรูปไม่สมบูรณ์	หดตัวแนบสนิทตามพิมพ์กระเบื้อง ขึ้นรูปไม่สมบูรณ์
110					
	เริ่มอ่อนตัวลงแต่ยังไม่หดตัวตามพิมพ์กระเบื้อง	หดตัวตามพิมพ์กระเบื้องแต่บางส่วนไม่แนบสนิท	<u>** หดตัวแนบสนิทตามพิมพ์กระเบื้อง ขึ้นรูปได้สมบูรณ์</u>	เริ่มมีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องเล็กน้อย	เริ่มมีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้อง
120					
	หดตัวตามพิมพ์กระเบื้องแต่บางส่วนไม่แนบสนิท	<u>** หดตัวแนบสนิทตามพิมพ์กระเบื้อง ขึ้นรูปได้สมบูรณ์</u>	เริ่มมีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้อง	มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้อง	มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องมากขึ้น

อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา				
	1 นาที	3 นาที	5 นาที	7 นาที	10 นาที
130	 	 	 	 	 
	หดตัวแนบสนิทตามพิมพ์กระเบื้อง คุณภาพวัสดุเปลี่ยนแปลง	มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้อง	มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องมากขึ้น	มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องมากขึ้น นำออกจากพิมพ์ได้ยากและเสี่ยงฉีกขาด	มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องมากขึ้น นำออกจากพิมพ์ได้ยากและเสี่ยงฉีกขาด
140	 	 	 	 	 
	มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้อง	มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องมากขึ้น นำออกจากพิมพ์ได้ยากและเสี่ยงฉีกขาด	มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องมากขึ้น นำออกจากพิมพ์ได้ยากและเสี่ยงฉีกขาด	เมื่อเวลาผ่านไปตั้งแต่ 7 นาที ตาข่ายมีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องมากขึ้น และเกิดการฉีกขาดเมื่อนำออกจากพิมพ์กระเบื้อง	
150	 	 	 	 	 
	มีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องมากขึ้น	เมื่อเวลาผ่านไปตั้งแต่ 3 นาที ตาข่ายมีการหลอมที่ผิวตามพิมพ์กระเบื้องมากขึ้น และเกิดการฉีกขาดเมื่อนำออกจากพิมพ์กระเบื้อง			

4.2 ผลการศึกษาและทดลองความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงาน

ผลการทดลองการขึ้นรูปชิ้นงานในรูปทรงต่าง ๆ ด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาอบที่ 5 นาที แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า เมื่อทำการขึ้นรูปกับพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานทรงนูนต่ำ ตาข่ายพลาสติก PE สามารถขึ้นรูปได้ตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์ แต่เมื่อทำเช่นเดิมกับพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานทรงนูนสูง ตาข่ายพลาสติก PE ไม่สามารถขึ้นรูปตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์โดยจะมีส่วนที่ไม่แนบสนิทกับพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานเล็กน้อย และเมื่อทำเช่นเดิมกับพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานทรงลอยตัว ตาข่ายพลาสติก PE ไม่สามารถขึ้นรูปตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาและทดลองความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงาน

รูปทรง	พิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน	ตาข่ายพลาสติก PE (ก่อนขึ้นรูป)	ตาข่ายพลาสติก PE (หลังขึ้นรูป)		
			ด้านบน (Top-View)	ด้านล่าง (Bottom View)	ด้านข้าง (Side View)
นูนต่ำ	 ขนาด 7 x 2 ซ.ม.	 เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 ซ.ม.			 ขึ้นรูปได้อย่างสมบูรณ์
นูนสูง	 ขนาด 5 x 3 ซ.ม.	 เส้นผ่านศูนย์กลาง 9 ซ.ม.		 พบรอยย่นเล็กน้อย จากการหดตัวของตาข่าย PE	 ขึ้นรูปได้เกือบสมบูรณ์
ลอยตัว	 ขนาด 7 x 10 ซ.ม.	 เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซ.ม.		 พบรอยย่นอย่างมาก จากการหดตัวของตาข่าย PE	 ขึ้นรูปได้ไม่สมบูรณ์

4.3 ตัวอย่างการสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ประณีตศิลป์จากวัสดุโพลีเอทิลีนรูปทรงนูนต่ำ

การออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าจากวัสดุโพลีเอทิลีน ทำได้โดยการออกแบบรูปทรงกระเป๋าก่อน โดยให้คำนึงจากรูปแบบที่ต้องการสร้างสรรค์และแม่พิมพ์ที่มี โดยควรใช้พิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่ซับซ้อน เช่น ทรงเรขาคณิต และเป็นพิมพ์ที่สามารถทนความร้อนได้มากกว่า 200 องศาเซลเซียส การเลือกใช้ตาข่ายพลาสติก PE สามารถเลือกได้จากขนาดของพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน หากเลือกพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานใหญ่ควรเลือกตาข่ายพลาสติก PE ที่มีรูตาข่ายใหญ่ตามกันไปเพื่อให้โครงสร้างหลังการขึ้นรูปมีความแข็งแรง และควรเตรียมตาข่ายพลาสติก PE ควรเตรียมให้เป็นรูปทรงเดียวกับพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน เช่น ทรงกลม สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม เป็นต้น ในการเตรียมตาข่ายพลาสติก PE ตามรูปทรงต้นแบบ ควรเตรียมให้ใหญ่กว่าขนาดต้นแบบประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ เพราะพลาสติก PE จะเกิดการหดตัวหลังจากได้รับความร้อน โดยในตัวอย่างนี้ผู้วิจัยใช้แม่พิมพ์กระเบื้องรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 12 X 8 ซ.ม. และต้องการนำเส้นไหมเข้าไปสานในตัวตาข่ายด้วย จึงเลือกตาข่ายที่มีขนาดของตา (รูตาข่าย) ที่ 10 มม. ความหนา 2 มม. สีดำ มาตัดเป็นขนาดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่กว่าแม่พิมพ์ 10-15 เปอร์เซ็นต์ ทำการเปิดเตาอบให้มีอุณหภูมิภายในเตาอยู่ที่ 110-120 องศาเซลเซียส จึงนำชิ้นงานไปวางอยู่ในตำแหน่งตรงกลางเตาอบ เพื่อให้ชิ้นงานได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน เป็นระยะเวลา 5 นาที ตาข่ายพลาสติก PE จึงหดตัวแนบสนิทตามพิมพ์กระเบื้องขึ้นรูปชิ้นงาน หากไม่มีเตาอบสามารถใช้เครื่องมือให้ความร้อนชนิดอื่นได้นอกจากเตาอบ เช่น เครื่องเป่าลมร้อน (การใช้งานต้องให้ความร้อนตลอดชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ โดยสามารถสังเกตได้จากการหดตัวของตาข่าย) และในการใช้งานเครื่องเป่าลมร้อน ควรใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าเตาอบ โดยใช้ประมาณ 300-400 องศาเซลเซียส เนื่องจากความร้อนจะสูญเสียไปกับบรรยากาศ และควรเป่าห่างจากชิ้นงาน 1-3 เซนติเมตร โดยหลังจากอบชิ้นงานได้รูปทรงตามต้องการแล้ว ผู้วิจัยจึงนำเส้นไหมสีดำเข้าไปสานในตัวตาข่ายจนเต็มชิ้นงาน จากนั้นจึงพันเก็บขอบของชิ้นงาน

โดยรอบก็จะได้ชิ้นส่วนด้านหน้า เมื่อนำชิ้นส่วนด้านหน้ามาประกอบกับชิ้นส่วนด้านหลังที่เหมือนกัน โดยการใช้เข็มพลาสติกเบอร์ใหญ่ร้อยไหมชนิดเดิมที่ใช้สานตาข่าย เย็บชิ้นส่วนด้านหน้าให้ติดกับชิ้นส่วนด้านหลัง ก็จะได้ออกมาเป็นตัวกระเป๋า หลังจากนั้นจึงใช้ถุงผ้าสำเร็จสีแดงใส่เข้าไปด้านในตัวกระเป๋าและสอยให้ติดกับตัวกระเป๋า พร้อมติดสายหนังสีดำสะพายไหล่แบบสำเร็จ ก็จะได้กระเป๋าสำเร็จดังในภาพด้านล่าง ดังนั้นการสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ประณีตศิลป์จากวัสดุโพลีเอทิลีนรูปทรงนูนต่ำนี้ นักออกแบบสามารถออกแบบและประยุกต์ได้ตามความสร้างสรรค์และความสวยงามส่วนบุคคล

ภาพที่ 5 ตัวอย่างขั้นตอนการทำผลิตภัณฑ์กระเป๋าวัสดุพลาสติกโพลีเอทิลีน

ภาพที่ 6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กระเป๋าวัสดุพลาสติกโพลีเอทิลีน

ภาพที่ **7** ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กระเป๋าวัสดุพลาสติกโพลีเอทิลีน (ต่อ)

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาช่วงความร้อนที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุโพลีเอทิลีน เพื่อใช้ขึ้นโครงสร้างผลิตภัณฑ์รูปทรงนูนต่ำ รูปทรงนูนสูง และลอยตัว และนำเสนอตัวอย่างการสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ประณีตศิลป์จากวัสดุโพลีเอทิลีนรูปทรงนูนต่ำ พบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุโพลีเอทิลีน คืออุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาอบที่ 5 นาที และอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาอบที่ 3 นาที เป็นอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม สามารถขึ้นรูปชิ้นงานตาข่ายพลาสติก PE ได้แนบสนิทตามพิมพ์ โดยวัสดุไม่เสียคุณสมบัติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการแปลงรูปวัสดุขยะขวดน้ำดื่มพลาสติกเพื่อใช้ในงานออกแบบที่กรองแสงลานจอดรถ ที่ระบุว่าวัสดุพลาสติก PE ทนความร้อนอุณหภูมิระหว่าง 70-100 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างจึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นคือ 110-120 องศาเซลเซียส (กัลยา ตันติยาสวัสดิกุล, 2561, น. 163)

พลาสติกตาข่ายโพลีเอทิลีนนี้มีข้อดีในการนำมาออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋า และผลิตภัณฑ์ประณีตศิลป์ต่าง ๆ เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ราคาถูก มีความคงทน และสามารถนำชิ้นส่วนเหลือใช้ของตาข่ายมาขึ้นรูปได้ง่าย ใช้ระยะเวลาไม่นาน และมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุให้มีมิติ ทั้งลักษณะรูปทรงนูนต่ำ รูปทรงนูนสูง และลอยตัว จากลักษณะที่เป็นตาข่าย จึงทำให้มีน้ำหนักเบา และทำให้นักออกแบบสามารถนำเส้นไหม เส้นใยต่าง ๆ มาทำการสานเพิ่มสีและลวดลายให้แก่วัสดุ เพื่อเพิ่มมูลค่าสู่งานประณีตศิลป์ ซึ่งนักออกแบบสามารถในไปใช้ได้ทั้งลักษณะรูปทรงนูนต่ำ รูปทรงนูนสูง และลอยตัว ขึ้นอยู่กับการออกแบบได้ตามความคิดสร้างสรรค์และความต้องการ ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋า จำนวน 3 แบบ ทำการส่งมอบต้นแบบและจัดอบรมปฏิบัติการให้แก่วิสาหกิจชุมชนสตรีจ้าวภูผา หลังจากการอบรมกลุ่มวิสาหกิจชุมชนได้มีการทดลองวางจำหน่ายตัวกระเป๋าวัสดุพลาสติก PE (Polyethylene) ในวันที่ 6-15 พฤศจิกายน พ.ศ. 2566 ณ ห้างสรรพสินค้าโรบินสันจันทบุรี โดยมีตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่วางจำหน่าย ดังภาพที่ 5-9 จากผลความพึงพอใจของผู้ซื้อ จึงมีจำนวนการสั่งผลิตเพิ่มขึ้นในช่วงเทศกาลปีใหม่ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนสตรีจ้าวภูผา ยังได้คำนวณต้นทุนของอุปกรณ์ ประยุกต์เพื่อผลิตเป็นกระเป๋าสำหรับใส่สินค้าของชุมชน และตะกร้าใส่ผลไม้ เช่น ทุเรียน มังคุด และผลไม้ชนิดอื่น ๆ ที่เป็นผลิตผลทางการเกษตรของจังหวัดจันทบุรี เพื่อที่จะพร้อมวางขายในช่วงเทศกาลผลไม้ต่อไป

ภาพที่ 8 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กระเป๋าวัสดุพลาสติกโพลีเอทิลีน รูปแบบอื่น ๆ

ภาพที่ 9 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กระเป๋าวัสดุพลาสติกโพลีเอทิลีน รูปแบบอื่น ๆ (ต่อ)

6. เอกสารอ้างอิง

กัลยา ตันติยาสวัสดิกุล. (2553). การแปลงรูปวัสดุขยะขวดน้ำดื่มพลาสติกเพื่อใช้ในงานออกแบบที่กรองแสงลานจอดรถ. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies (JARS), 7*(2), 163–178. https://doi.org/10.56261/jars.v7i2.168902

ไทยวัสดุ. (18 มกราคม 2566). *เตาอบไฟฟ้า ยี่ห้อ HOUSE WORTH ขนาด 25 ลิตร รุ่น HWEO01*. ไทยวัสดุ. https://www.thaiwatsadu.com/th/brand/HOUSE%20WORTH

มนูญ สอนเกิด. (2 พฤษภาคม 2559). *เศรษฐกิจพอเพียงกับวิสาหกิจชุมชน*. Sufficient Economy Web. https://sufficienteconomyweb.wordpress.com

มินัณยาร์ เพ็ชรสุด, และชลธิดา เกษเพชร. (2567). การออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าจากขยะพลาสติกรีไซเคิล. *วารสารดีไซน์เอคโค, 5*(1), 42-48.

มูลนิธิชัยพัฒนา. (15 มีนาคม 2566). *เศรษฐกิจพอเพียง*. มูลนิธิชัยพัฒนา. https://www.chaipat.or.th/publication/publish-document/sufficiency-economy.html

เวชสวรรค์ หล้ากาศ, วรจิตต์ เศรษฐพรรค์, และไกรสร ลักษณ์ศิริ. (2017). กระบวนการสร้างถนนแอสฟัลติกคอนกรีตเพื่อลดปัญหาขยะพลาสติกในชุมชน. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์, 12*(1), 41-54.

ศุภรา อรุณศรีมรกต, ปิติวรรธน์ สมไทย, และภรดี พันธุภากร. (2019). การศึกษากระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของเศษขยะขวดน้ำพลาสติกและกระบวนการสร้างพื้นผิวโดยผสมผสานกับเศษวัสดุแหอวนและทุ่นโฟม. *วารสารศิลปกรรมบูรพา, 22*(2), 91-104.

Homepro. (4 มกราคม 2566). *ตาข่ายถัก*. Homepro. https://www.homepro.co.th/c/CON050203

Pakkeeree, P., & Pradchaya, P. (2021). *Guidelines for developing sustainable community enterprises with local wisdom* [Master's thesis, Ramkhamhaeng University]. Ramkhamhaeng University Intellectual Repository.

TU pack. (2024, April 29). *Impact of plastic on the environment*. Tupack. https://www.tupack.co.th/knowledge/315

Wikipedia. (2023, January 23). *พอลิเอทิลีน*. Wikipedia. https://th.wikipedia.org/wiki/Wiki_Polyethylene

วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

ผลลัพธ์โปรแกรมการออกกำลังกายผู้ป่วยผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียมในโรงพยาบาลพระนารายณ์มหาราช

Outcome of a Rehabilitation Exercise Program for Patients Undergoing Total Knee Arthroplasty at King Narai Hospital

วิทวัส รัตนายน[1*]

Wittawat Rattanayon[1 *]

[1] นักกายภาพบำบัดชำนาญการ โรงพยาบาลพระนารายณ์มหาราช

[1] Physical Therapist, King Narai Hospital

บทคัดย่อ

ปัจจุบันผู้ป่วยข้อเข่าเสื่อม มักได้รับการรักษาโดยการเปลี่ยนข้อเข่าเทียม และถูกจำหน่ายออกจากโรงพยาบาลภายใน 1-2 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลาฟื้นฟูที่สั้น อาจส่งผลให้เกิดปัญหาต่อเนื่อง เช่น อาการปวดและการเคลื่อนไหวที่จำกัด งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อติดตามผลโปรแกรมการฟื้นฟูของผู้ป่วยภายหลังผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียมในเรื่ององศาการเคลื่อนไหว อาการปวดและความสามารถในการใช้งานข้อเข่า โดยวิธีการเป็นวิจัยกึ่งทดลองแบบกลุ่มเดียววัดซ้ำ 4 ครั้ง ในผู้ป่วยที่ได้รับการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม ณ หอผู้ป่วยศัลยกรรมกระดูก โรงพยาบาลพระนารายณ์มหาราช จำนวน 54 ราย ระหว่างเดือนเมษายนถึงกันยายน 2567 เก็บข้อมูลด้วยแบบประเมินระดับความรุนแรงของโรคข้อเข่าเสื่อม (Oxford Knee Score) แบบวัดระดับความเจ็บปวด (Visual Analog Scale) และการวัดองศาการเคลื่อนไหวของข้อเข่า (Universal Goniometer) วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนาและการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวชนิดวัดซ้ำ ผลการศึกษา ดังนี้ กลุ่มตัวอย่างมีอายุเฉลี่ย 64.42±7.45 ปี ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง (ร้อยละ 88.89) องศาการงอข้อเข่าลดลงจาก 96.79±13.24 องศาเหลือ 62.59±9.10 องศาในช่วงหลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาล และเพิ่มขึ้นเป็น 97.96±10.07 องศาเมื่อครบ 3 เดือน องศาการเหยียดข้อเข่าเพิ่มขึ้นชั่วคราวจาก 14.72±8.76 องศาเป็น 27.12±6.84 องศาในช่วงหลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาลและดีขึ้นเป็น 11.31±6.10 องศาที่ 3 เดือน ระดับความเจ็บปวดเพิ่มขึ้นจาก 5.42±1.63 เป็น 5.77±1.51 ในช่วงหลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาล และลดลงต่อเนื่องเหลือ 1.87±1.08 ที่ 3 เดือน คะแนน Oxford Knee Score แสดงการฟื้นตัวที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกช่วงเวลา ($p<.005$) โดยที่ 3 เดือนหลังผ่าตัดมีระดับความรุนแรงลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับก่อนผ่าตัด

สำคัญ: การผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม การฟื้นฟู องศาการเคลื่อนไหวข้อเข่า อาการปวด

** Corresponding author: nice8145@gmail.com*

***Received**: 1 เมษายน 2568* ***Revised:** 15 กรกฎาคม 2568* ***Accepted**: 22 กรกฎาคม 2568*

Abstract

Knee osteoarthritis patients often undergo total knee arthroplasty (TKA) and are typically discharged within 1-2 days after surgery—a short recovery period that may lead to complications such as pain and limited range of motion. This study aimed to evaluate the rehabilitation outcomes following TKA in terms of range of motion, pain levels, and knee function. A single-group, repeated-measures quasi-experimental design was employed, involving 54 TKA patients at King Narai Hospital between April and September 2024. Data were collected using the Oxford Knee Score, Visual Analog Scale (VAS), and Universal Goniometer. Descriptive statistics and repeated-measures ANOVA were utilized for analysis. The average age of participants was 64.42 ± 7.45 years, with 88.89% being female. After surgery, knee flexion decreased from 96.79 ± 13.24° to 62.59 ± 9.10° during hospitalization but increased to 97.96 ± 10.07° at three months. Knee extension temporarily increased from 14.72 ± 8.76° to 27.12 ± 6.84° during hospitalization and then improved to 11.31 ± 6.1° at three months. Pain levels rose from 5.42 ± 1.63 to 5.77 ± 1.51 during hospitalization but significantly decreased to 1.87 ± 1.08 at three months. The Oxford Knee Score demonstrated significant improvement at all time points ($p<.005$), with the greatest improvement observed at three months post-surgery compared to baseline.

Keywords: Total knee arthroplasty, Rehabilitation, Range of motion, Pain management

1. บทนำ

โรคข้อเข่าเสื่อม (Knee Osteoarthritis) เป็นปัญหาสุขภาพที่มีความสำคัญอย่างมากในกลุ่มผู้สูงวัย ซึ่งมีผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตและความสามารถในการดำเนินกิจวัตรประจำวันของผู้ที่เป็นโรคนี้ หากไม่ได้รับการดูแลรักษาอย่างถูกต้อง อาจนำไปสู่ภาวะทุพพลภาพในระยะยาวได้ ตามข้อมูลขององค์การอนามัยโลก ประมาณ 73% ของผู้ป่วยโรคข้อเข่าเสื่อมมีอายุเกิน 55 ปี และ 60% เป็นเพศหญิง โดยมีความชุกทั่วโลกถึง 365 ล้านคน ข้อเข่าเป็นข้อที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด ตามมาด้วยข้อสะโพกและมือ (World Health Organization, 2023) สาเหตุหลักของโรคนี้เกิดจากการเสื่อมของกระดูกอ่อนผิวข้อ ซึ่งเป็นผลมาจากอายุที่มากขึ้น การใช้งานข้อเข่าอย่างหนัก และปัจจัยเสี่ยงอื่น ๆ เช่น น้ำหนักตัวที่มากเกินไป โดยเฉพาะในผู้ที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไป พบว่ามีอัตราการเกิดโรคข้อเข่าเสื่อมถึงร้อยละ 40 และมีแนวโน้มที่จะพบในผู้หญิงมากกว่าผู้ชายถึง 2-3 เท่า เนื่องจากการขาดฮอร์โมนเอสโตรเจนที่ช่วยป้องกันความเสื่อมของกระดูกอ่อนผิวข้อเข่า นอกจากนี้ ผู้ที่มีน้ำหนักมากหรือเป็นโรคอ้วนจะมีโอกาสเกิดโรคข้อเข่าเสื่อมเร็วขึ้น เนื่องจากน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดแรงกดต่อข้อเข่ามากขึ้น เช่น น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น 0.5 กิโลกรัม จะเพิ่มแรงที่กระทำต่อข้อเข่า 1-5 กิโลกรัม อีกทั้ง การใช้งานข้อเข่าอย่างหนัก เช่น การยืนเป็นเวลานาน การยกของหนัก หรือการทำกิจกรรมที่มีแรงกดต่อข้อเข่าสูง ก็เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดโรคนี้ได้ อาการของโรคข้อเข่าเสื่อมมักจะค่อย ๆ เกิดขึ้น ทำให้ผู้ป่วยส่วนใหญ่ไม่ใส่ใจ อาการที่พบบ่อยที่สุด คือ ความเจ็บปวดในข้อเข่าที่รุนแรงขึ้นเมื่อมีการใช้งาน เช่น การเดินขึ้นลงบันได นั่งพับเพียบหรือทำกิจกรรมอื่น ๆ ที่ต้องใช้ข้อเข่า อาการจะบรรเทาลงหลังจากการพัก แต่เมื่อข้อเข่าเริ่มสึกหรอ จะมีการเสียดสีของเยื่อบุภายในข้อ ทำให้เกิดเสียงดังกรอบแกรบในข้อเข่า พร้อมกับความรู้สึกติดขัดหรือฝืดตึง

สถานการณ์โรคข้อเข่าเสื่อมในจังหวัดลพบุรี จากข้อมูลระบบฐานข้อมูลสถิติการคัดกรองข้อเข่าเสื่อมในผู้สูงอายุ จังหวัดลพบุรี เขต 4 (สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดลพบุรี, 2567) พบว่ามีผู้ป่วยข้อเข่าผิดปกติจำนวน 8,050 คน และผู้ป่วยข้อเข่าเสื่อมที่เข้ารับการรักษาด้วยการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียมในโรงพยาบาลพระนารายณ์มหาราชปีงบประมาณ 2566 และส่งปรึกษานักกายภาพบำบัดเรื่องการฝึกเดินเป็นจำนวน 403 คน ซึ่งผู้ป่วยส่วนใหญ่ที่ได้รับการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม หลังผ่าตัดจะได้ถูกจำหน่ายออกจากโรงพยาบาลภายใน 1-2 วัน ซึ่งถือเป็นระยะเวลาฟื้นฟูที่สั้นมาก อาจส่งผลให้เกิดปัญหาต่อเนื่อง เช่น อาการปวดและการเคลื่อนไหว

ที่จำกัด ซึ่งจากการศึกษาของธีรพงศ์ โศภิษฐิกุล (2565, น. 88-98) พบว่าระยะเวลานอนโรงพยาบาลส่วนใหญ่ 3 วันมากที่สุด 21 วัน จึงมีผู้ป่วยบางรายได้รับการส่งกลับมาปรึกษานักกายภาพบำบัด ด้วยปัญหามีอาการปวด ข้อเข่าติด งอเหยียดเข่าไม่สุด ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการดูแลฟื้นฟูระยะหลังการผ่าตัด และการติดตามผลการรักษามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง จากการศึกษาของธัญชนก ดำริห์ (2563, น. 605-617) พบว่าโปรแกรมการดูแลผู้ป่วยตั้งแต่ก่อนผ่าตัด หลังผ่าตัด จนถึงระยะติดตามการรักษา สามารถใช้ได้ผลดีในการฟื้นฟูผู้ป่วยผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการประเมินความสามารถในการทำกิจวัตรประจำวัน หลังผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม และการวางแผนโปรแกรมการรักษาทางกายภาพบำบัดที่จะให้แก่ผู้ป่วยกลับไปปฏิบัติตัวที่บ้าน ควรเป็นโปรแกรมที่ครอบคลุมทั้งการเพิ่มความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ การเพิ่มช่วงการเคลื่อนไหวเพื่อป้องกันข้อยึดติด ซึ่งยังไม่มีการศึกษารูปแบบโปรแกรมการฟื้นฟูเฉพาะในโรงพยาบาลทั่วไป และโรงพยาบาลชุมชนในพื้นที่จังหวัดลพบุรี ซึ่งผู้วิจัยสนใจศึกษาติดตามผลการฟื้นฟูของผู้ป่วยที่ได้รับการรักษาโดยการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียมหลังจากออกจากโรงพยาบาล เพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการรักษาให้แก่นักกายภาพบำบัดในการฟื้นฟูผู้ป่วยเปลี่ยนข้อเข่าเทียมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อติดตามผลโปรแกรมการฟื้นฟูของผู้ป่วยภายหลังผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียมในเรื่ององศาการเคลื่อนไหว อาการปวดและความสามารถในการใช้งานข้อเข่า

สมมติฐาน $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ (การวัดทั้ง 4 ครั้ง องศาการเคลื่อนไหว ระดับความเจ็บปวด ค่าคะแนน Oxford Knee Score มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน)

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$ (การวัดทั้ง 4 ครั้ง องศาการเคลื่อนไหว ระดับความเจ็บปวด ค่าคะแนน Oxford Knee Score มีอย่างน้อย 1 ครั้งที่มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกัน)

คำนิยามศัพท์เฉพาะ

ฟื้นตัว หมายถึง กระบวนการที่ผู้ป่วยมีการเปลี่ยนแปลงทางร่างกาย จิตใจ หรือการทำหน้าที่ของร่างกายที่ดีขึ้นภายหลังการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม (TKA) โดยพิจารณาจากตัวชี้วัด ได้แก่ ระดับความปวดที่ลดลง, ช่วงการเคลื่อนไหวของข้อเข่าที่ดีขึ้น (Range of Motion), และคะแนนการทำงานของข้อเข่าที่เพิ่มขึ้นจากแบบประเมิน Oxford Knee Score (OKS)

ระดับความรุนแรงของโรคข้อเข่าเสื่อม หมายถึง ระดับของอาการและผลกระทบต่อการทำหน้าที่ของข้อเข่าที่เกิดจากภาวะข้อเข่าเสื่อม โดยประเมินจากคะแนนแบบสอบถาม Oxford Knee Score (OKS) ซึ่งประกอบด้วย 12 ข้อคำถามเกี่ยวกับความเจ็บปวดและการทำกิจวัตรประจำวัน คะแนนรวมมีช่วงตั้งแต่ 0-48 คะแนน โดยคะแนนที่ต่ำกว่าบ่งชี้ถึงความรุนแรงของโรคที่มากกว่า

3. วิธีดำเนินการวิจัย

รูปแบบการวิจัย เป็นรูปแบบการวิจัยแบบกึ่งทดลอง (Quasi-Experimental Research) แบบกลุ่มเดียว วัดก่อนและหลังการทดลอง (One-group pretest–posttest design)

ขอบเขตการศึกษา

ประชากร คือ ผู้ป่วยข้อเข่าเสื่อมเพศชายและหญิง อายุ 50 ปีบริบูรณ์ขึ้นไป ที่ได้รับการรักษาโดยการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม ณ โรงพยาบาลพระนารายณ์มหาราช ระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2567 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2567

กลุ่มตัวอย่าง คือ ผู้ป่วยข้อเข่าเสื่อมเพศชายและหญิง อายุ 50 ปีบริบูรณ์ขึ้นไป ที่ได้รับการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม และพักรักษาตัวในหอผู้ป่วยศัลยกรรมกระดูก โรงพยาบาลพระนารายณ์มหาราช ระหว่างเดือนเมษายน พ.ศ. 2567 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2567 การศึกษาครั้งนี้คำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่าง โดยเป็นการวิจัยกึ่งทดลองแบบกลุ่มเดียววัดซ้ำ 4 ครั้ง

การคำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างใช้โปรแกรม G*Power 3.1.9.7 สำหรับการวิเคราะห์ Repeated measures ANOVA (within factors) โดยกำหนดค่า Effect size = 0.31 Faul et al. (2007, pp. 175-191) α = 0.05, Power = 0.80, จำนวนการวัด = 4 ครั้ง, ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างการวัด = 0.5 และ Nonsphericity correction ε = 1 ได้ขนาดกลุ่มตัวอย่างขั้นต่ำ 30 คน และเพื่อป้องกันการสูญหายของข้อมูล 15% จึงปรับขนาดตัวอย่างด้วยสูตร n_adj = n/(1-0.15) ได้ขนาดกลุ่มตัวอย่างทั้งสิ้นอย่างน้อย 36 คน อย่างไรก็ตาม เพื่อเพิ่มความมั่นใจในความแม่นยำของการประมาณค่าทางสถิติ รวมถึงเพื่อรองรับกรณีที่อาจมีการถอนตัวระหว่างการวิจัยหรือข้อมูลไม่สมบูรณ์บางส่วน ผู้วิจัยจึงเลือกเพิ่มจำนวนกลุ่มตัวอย่างเป็น 54 คน หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% จากขนาดขั้นต่ำ โดยพิจารณาจากหลักความปลอดภัยทางสถิติ (statistical safety margin) เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความมั่นคงและน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

เกณฑ์การคัดเข้า

1. ยินยอมเข้าร่วมโครงการโดยสมัครใจ
2. เป็นผู้ป่วยปวดเข่าที่สามารถเดินได้ก่อนรับการผ่าตัด
3. ได้รับการประเมินทางกายภาพบำบัดก่อนผ่าตัด หลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาล 1 เดือน และ 3 เดือนหลังผ่าตัดเมื่อผู้ป่วยมาตรวจตามแพทย์นัด
4. ไม่เคยได้รับการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียมมาก่อน
5. ไม่มีโรคทางกระดูก และกล้ามเนื้อที่ส่งผลต่อการเคลื่อนไหวของข้อเข่า เช่น เก๊าท์ รูมาตอยด์ SLE

เกณฑ์การคัดออก

1. ผู้ป่วยที่ไม่สามารถติดตามประเมินได้ครบ 4 ครั้ง
2. ผู้ป่วยเกิดภาวะติดเชื้อในข้อเข่าหลังการผ่าตัด
3. ผู้ป่วยที่เกิดการบาดเจ็บของขาหลังการผ่าตัด เช่น ล้ม อุบัติเหตุอื่นที่มีผลต่อข้อเข่า

ขั้นตอนการวิจัย

1. ทบทวนวรรณกรรม เอกสารวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น โรคข้อเข่าเสื่อม การผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม วิธีการออกกำลังบริหารข้อเข่า
2. ออกแบบโปรแกรมการบริหารข้อเข่าในผู้ป่วยผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่า
3. ขออนุมัติโครงการวิจัยผ่านคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์โรงพยาบาลพระนารายณ์มหาราช
4. อธิบายผู้ป่วยที่เข้าร่วมโครงการวิจัยให้ทราบเกี่ยวกับการวิจัยและขอความยินยอมโดยใช้แบบยินยอมเข้าร่วมวิจัย ให้ผู้เข้าร่วมโครงการวิจัยลงชื่อเข้าร่วมโครงการโดยสมัครใจ
5. ผู้ป่วยเข้าร่วมโครงการวิจัยตอบแบบเก็บข้อมูลส่วนบุคคล และแบบประเมินระดับความรุนแรงของโรคข้อเข่าเสื่อม (Oxford Knee Score) Charoencholvanich & Pongcharoen (2005, pp. 1194-1202) โดยผู้วิจัยคนเดียวเป็นผู้ประเมินและอธิบายความรู้และการปฏิบัติตัวหลังได้รับการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่า วัดองศาเคลื่อนไหวข้อเข่า วัดระดับความเจ็บปวด สอนเดินด้วยเครื่องช่วยเดิน (Walker) และสอนวิธีการออกกำลังบริหารข้อเข่า 6 ท่า แบบ Active exercise ตามแผ่นพับ

การพิทักษ์สิทธิกลุ่มตัวอย่าง การวิจัยครั้งนี้ได้ผ่านการรับรองจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์โรงพยาบาลพระนารายณ์มหาราช รหัสงานวิจัย KNH 03/2567 ให้ไว้ ณ วันที่ 9 เมษายน พ.ศ.2567

เครื่องมือที่ใช้เก็บข้อมูลในการวิจัย

1. แบบสอบถามข้อมูลส่วนตัว ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 อายุ เพศ น้ำหนัก ส่วนสูง ระดับการศึกษา โรคประจำตัว หมายเลขโทรศัพท์ ส่วนที่ 2 องศาการเคลื่อนไหวของข้อเข่าและระดับอาการปวด
2. แบบประเมินความรุนแรงของโรคข้อเข่าเสื่อม (Oxford Knee Score) ฉบับภาษาไทย เป็นแบบประเมินอาการของผู้ป่วยโรคข้อเข่าเสื่อมที่ประกอบด้วยลักษณะอาการปวดเข่า ปัญหาในการทำกิจวัตรประจำวันต่าง ๆ เช่น การเดิน การนั่ง ฯลฯ

3. แถบวัดอาการปวดขณะพัก (Visual Analog Scale) ที่มีค่าตั้งแต่ 0-10 (0 คือ ไม่มีความเจ็บปวด และ 10 คือ ปวดมากที่สุดจนทนไม่ไหว ให้ผู้ป่วยทำเครื่องหมายจุดลงบนแถบวัดระดับที่มีความยาว 10 เซนติเมตร ค่าดังกล่าวจะแทนค่าความเจ็บปวดของผู้ป่วย

4. Universal Goniometer อุปกรณ์สำหรับวัดองศาการเคลื่อนไหวของข้อเข่า โดยใช้วัดองศาการงอเหยียดของข้อเข่า (Knee flexion-extension) โดยวิธีการวัดให้ผู้ป่วยนอนคว่ำ จุดหมุนอยู่ที่ lateral epicondyle ของกระดูก femur แขนข้างหนึ่งของ Goniometer อยู่ที่ตำแหน่งระหว่าง greater trochanter กับตรงกลางของกระดูก femur ส่วนอีกแขนหนึ่งจะอยู่ที่ตำแหน่งระหว่าง lateral malleolus กับตรงกลางของกระดูก fibular ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะทำการวัดองศาการเคลื่อนไหวแบบ Passive Range of motion

ภาพการวัดองศาการงอข้อเข่า ภาพการวัดองศาการเหยียดข้อเข่า

ภาพที่ 1 แสดงตัวอย่างการวัดองศาการงอเหยียดข้อเข่า

5. แผ่นพับความรู้เกี่ยวกับการปฏิบัติตัวหลังผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม ท่าบริหารเพื่อเพิ่มกำลังกล้ามเนื้อขา และเพิ่มองศาการเคลื่อนไหวของข้อเข่า 6 ท่า

ท่าออกกำลังกาย 6 ท่า เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของขา และเพิ่มช่วงการเคลื่อนไหวของข้อเข่า ให้ทำทุกท่า ท่าละ 10 ครั้งต่อรอบ ทำทุกชั่วโมง จนครบ 10 รอบ แต่ถ้ามีอาการปวดระบมให้ลดจำนวนรอบเหลือ 5 รอบ ทำทุก 2 ชั่วโมง ควรออกกำลังกายต่อเนื่องทุกวัน จนสามารถเคลื่อนไหวขาได้เป็นปกติไม่มีอาการตึงหรือปวดจึงหยุดทำ

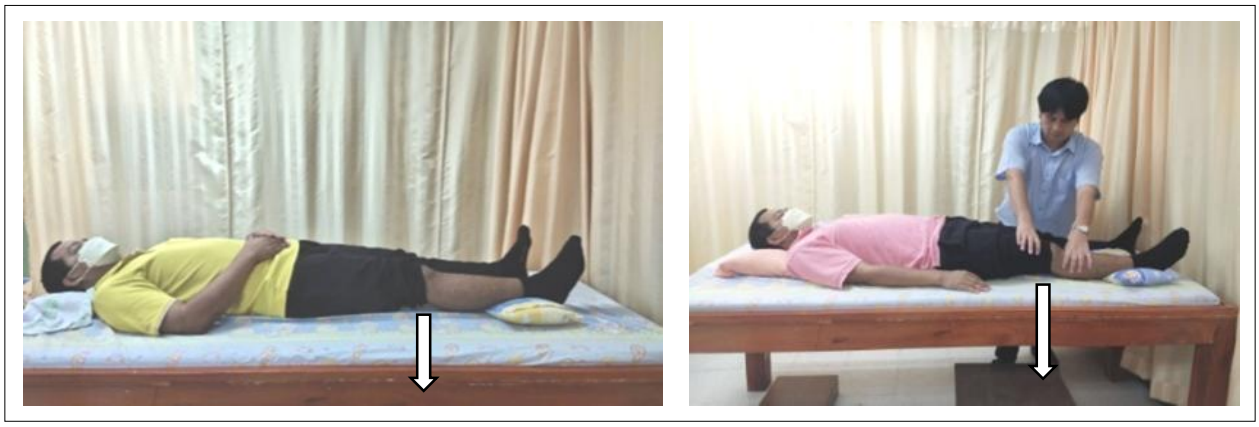
ท่าที่ 1 ท่าเพิ่มกำลังกล้ามเนื้อกางสะโพก ให้ผู้ป่วยยกขาขึ้นพ้นจากพื้นเล็กน้อย ออกแรงกางขาออกด้านข้าง

ท่าที่ 2 ท่าเพิ่มกำลังกล้ามเนื้องอสะโพกเข่าเหยียด ให้ผู้ป่วยยกขาขึ้นจากพื้น 45 องศา เกร็งค้างไว้ 10 วินาที

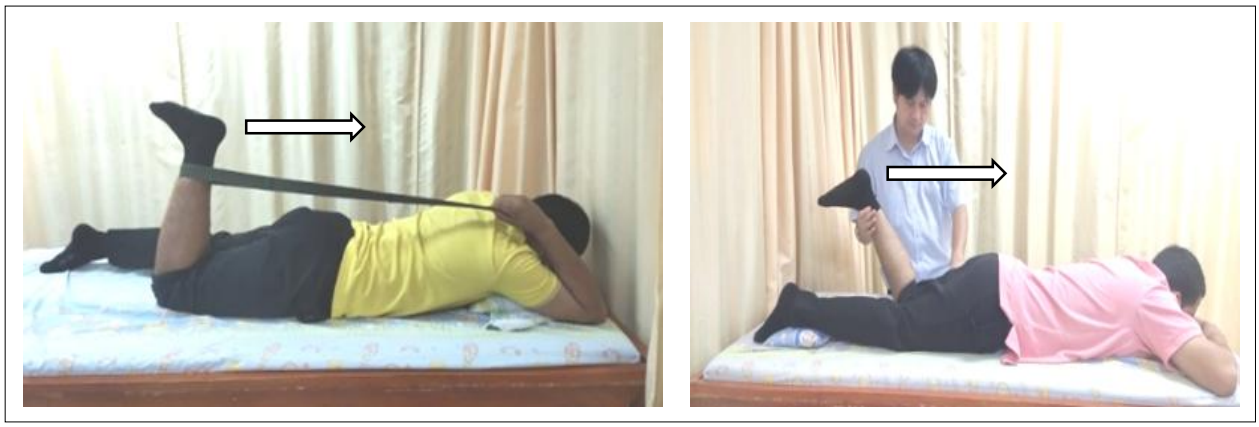
ท่าที่ 3 ท่าเพิ่มกำลังกล้ามเนื้องอสะโพกเข่างอ ให้ผู้ป่วยยกขางอสะโพก งอเข่ามากที่สุดเท่าที่ทำได้

ท่าที่ 4 ท่าเพิ่มกำลังกล้ามเนื้อเหยียดข้อเข่า ให้ผู้ป่วยนั่งบนเตียงหรือเก้าอี้ ออกแรงเหยียดข้อเข่า เกร็งค้างไว้ 10 วินาที

ท่าที่ 5 ท่าเพิ่มช่วงการเคลื่อนไหวเหยียดข้อเข่า ให้ผู้ป่วยนอนหงาย ใช้หมอนใบเล็ก ๆ หรือผ้าขนหนูม้วน วางใต้ข้อเท้า ออกแรงกดเหยียดข้อเข่าให้ติดพื้นเตียง ถ้ามีผู้ช่วยอาจให้ออกแรงกดเบา ๆ บริเวณเหนือต่อและใต้ต่อข้อเข่า พร้อมกับให้ผู้ป่วยเกร็งค้างไว้ 10 วินาที



ท่าที่ 6 ท่าเพิ่มช่วงการเคลื่อนไหวงอข้อเข่า ให้ผู้ป่วยนอนคว่ำ ออกแรงงอข้อเข่าให้มากที่สุดเท่าที่ทำได้ ถ้าผู้ป่วยไม่สามารถทำได้เอง ให้ใช้ผ้า/เข็มขัดคล้องบริเวณข้อเท้า แล้วใช้มือช่วยออกแรงดึง ถ้ามีผู้ช่วยให้จับประคองบริเวณข้อเท้า ให้ผู้ป่วยออกแรงงอเข่าเท่าที่ทำได้ ผู้ช่วยเอามือดันตามและหยุดในตำแหน่งที่ผู้ป่วยพอทนได้ค้างไว้ จนรู้สึกแรงต้านจากผู้ป่วยลดลง ให้ผู้ป่วยออกแรงงอเพิ่มอีกรอบ ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนผู้ป่วยไม่สามารถงอเพิ่มได้อีก นับเป็น 1 ครั้ง



โดยทำการสอนและประเมินก่อนการผ่าตัด หลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาล 1 เดือน และ 3 เดือน เมื่อผู้ป่วยมาตรวจตามแพทย์นัด

การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือ การหาความความตรงตามเนื้อหา (Content Validity Index) ได้ให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน ดังนี้ แพทย์เวชศาสตร์ฟื้นฟู 2 ท่าน พยาบาลวิชาชีพหัวหน้าหอผู้ป่วยศัลยกรรมกระดูก 2 ท่าน และนักกายภาพบำบัด 1 ท่าน ตรวจสอบความเที่ยงตรง ความครอบคลุม ตลอดจนความเหมาะสมของเนื้อหา พบว่า ค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) จากผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน มีค่ารายข้ออยู่ระหว่าง 0.60-1.00 และค่าเฉลี่ยทั้งฉบับเท่ากับ 0.93 การตรวจสอบความเชื่อมั่น (Reliability) โดยนำแบบประเมินไปทดลองใช้กับผู้ป่วยที่มีคุณสมบัติคล้ายกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน วิเคราะห์ความสอดคล้องภายในด้วยวิธีสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's alpha coefficient) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.83

การวิเคราะห์ข้อมูล นำข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้มาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ หาค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวชนิดวัดซ้ำ (One-way analysis of variance with repeated measure) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างก่อนการผ่าตัด หลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาล 1 เดือนและ 3 เดือน เมื่อผู้ป่วยมาตรวจตามแพทย์นัด การเก็บข้อมูลประกอบด้วยการวัดระดับความปวดด้วยแบบประเมิน Pain Score การวัดองศาการงอ-เหยียดของข้อเข่าด้วยโกนิโอมิเตอร์ (Goniometer) และการประเมินการทำงานของข้อเข่าด้วยแบบสอบถาม Oxford Knee Score ในแต่ละช่วงเวลา ข้อมูลถูกวัดซ้ำในกลุ่มตัวอย่างเดียวกัน (Within-subjects) เพื่อเปรียบเทียบระดับความปวด เปรียบเทียบองศาการงอ-เหยียดของข้อเข่า เปรียบเทียบค่าคะแนน Oxford Knee Score ใช้ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

4. ผลการวิจัย

กลุ่มตัวอย่างเป็นผู้สูงอายุที่ได้รับการรักษาด้วยการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียมจำนวน 54 ราย ซึ่งมีอายุตั้งแต่ 51-84 ปี อายุเฉลี่ย 64.42 ±7.45 ปี เป็นเพศหญิง 48 คน ส่วนใหญ่ศึกษาระดับประถมศึกษา 42 คน มีโรคประจำตัวมากกว่า 1 โรคเป็นส่วนใหญ่ ร้อยละ 44.44 ค่าดัชนีมวลกายส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 25.0-29.9 โดยทำผ่าตัดเปลี่ยนเข่าขวาจำนวน 26 คน และเข่าซ้าย จำนวน 28 คน (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ตารางแสดงลักษณะส่วนบุคคลของผู้ป่วยเข้ารับการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม

ลักษณะส่วนบุคคล	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
เพศ		
ชาย	6	11.11
หญิง	48	88.89
อายุ (ปี)		
50-59	16	29.63
60-69	21	38.89
70-79	16	29.63
≥80 ปีขึ้นไป	1	1.85
$\bar{x}$ = 64.42 , SD = 7.45		
ระดับการศึกษา		
ประถมศึกษา	42	77.78
มัธยมศึกษา	7	12.96
ปริญญาตรี	5	9.26
ค่าดัชนีมวลกาย		
18.5 – 22.9	8	14.81
23.0 – 24.9	13	24.07
25.0 – 29.9	22	40.74
≥30.0	11	20.37
ขาข้างผ่าตัด		
ขวา	26	48.15
ซ้าย	28	51.85

ลักษณะส่วนบุคคล	จำนวน (ราย)	ร้อยละ
โรคประจำตัว		
ไม่มีโรค	11	20.37
ความดันโลหิตสูง	13	24.07
ไขมันในเลือดสูง	5	9.26
หัวใจ	1	1.85
มากกว่า 1 โรค (HT DM อื่นๆ)	24	44.44

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยขององศาการงอ-เหยียดของข้อเข่าในระยะก่อนผ่าตัด หลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาล 1 เดือน และ 3 เดือน เมื่อผู้ป่วยมาตรวจตามแพทย์นัด

ช่วงเวลา	องศาการงอข้อเข่า	องศาการเหยียดข้อเข่า
ก่อนผ่าตัด	96.79±13.24	14.72±8.76
หลังผ่าตัดขณะนอนรพ.	62.59±9.10	27.12±6.84
หลังผ่าตัด 1 เดือน	86.55±7.81	13.79±6.21
หลังผ่าตัด 3 เดือน	97.96±10.07	11.31±6.10

การศึกษาองศาการเคลื่อนไหวข้อเข่าพบว่าองศาการงอข้อเข่าลดลงจาก 96.79±13.24 องศาเหลือ 62.59±9.10 องศาในช่วงหลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาลและเพิ่มขึ้นจนสามารถงอเข่าได้มากกว่า 90 องศา คือ 97.96±10.07 องศาเมื่อครบ 3 เดือน ส่วนองศาการเหยียดข้อเข่าจาก 14.72±8.76 องศาเป็น 27.12±6.84 องศาในช่วงหลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาล และเหยียดได้เพิ่มมากขึ้นเป็น 11.31±6.10 องศาที่ 3 เดือนหลังผ่าตัด

ตารางที่ 3 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของระดับความเจ็บปวดในระยะก่อนผ่าตัด หลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาล 1 เดือนและ 3 เดือน เมื่อผู้ป่วยมาตรวจตามแพทย์นัด

ช่วงเวลา	ระดับความปวด VAS
ก่อนผ่าตัด	5.42±1.63
หลังผ่าตัดขณะนอนรพ.	5.77±1.51
หลังผ่าตัด 1 เดือน	3.11±1.32
หลังผ่าตัด 3 เดือน	1.87±1.08

การศึกษาระดับความเจ็บปวด (VAS) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยเพิ่มขึ้นจาก 5.42±1.63 เป็น 5.77±1.51 ในช่วงหลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาล จากนั้นลดลงเป็น 3.11±1.32 ที่ 1 เดือน และลดลงต่อเนื่องเหลือ 1.87±1.08 ที่ 3 เดือนหลังผ่าตัด

ใช้สถิติ Shapiro-Wilk ในการทดสอบองศาการงอ-เหยียดข้อเข่า ระดับความเจ็บปวด พบว่ามีการกระจายตัวแบบปกติ จึงใช้การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย repeated measure analysis of variance ได้ผลแสดงตามตารางที่ 4 5 6 และ 7

ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยขององศาการเคลื่อนไหวการงอข้อเข่า

ช่วงเวลา	ช่วงเวลา	Mean Difference (I-J)	Std.Error	Sig.	95% Confidence Interval for Difference	
					Lower Bound	Upper Bound
ก่อนผ่าตัด	หลังผ่าตัดขณะนอนรพ.	34.204*	1.620	.000	30.954	37.453
	หลังผ่าตัด 1 เดือน	10.241*	1.445	.000	7.341	13.140
	หลังผ่าตัด 3 เดือน	-1.167	1.590	.466	-4.355	2.022
หลังผ่าตัดขณะนอนรพ.	หลังผ่าตัด 1 เดือน	-23.963*	1.306	.000	-26.582	-21.344
	หลังผ่าตัด 3 เดือน	-35.370*	1.441	.000	-38.261	-32.480
หลังผ่าตัด 1 เดือน	หลังผ่าตัด 3 เดือน	-11.407*	1.278	.000	-13.970	-8.845

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ผลการทดสอบ Mauchly's test of sphericity พบว่าข้อมูลไม่ละเมิดข้อตกลงเบื้องต้นของ sphericity (Mauchly's $W = .90$, $\chi^2(5) = 5.0$, $p = .41$)

การศึกษาเปรียบเทียบองศาการเคลื่อนไหวการงอข้อเข่าในช่วงเวลาต่าง ๆ พบการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p<.005) ระหว่างช่วงเวลาส่วนใหญ่ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนผ่าตัด พบว่า องศาการเคลื่อนไหวลดลงอย่างมากในช่วงหลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาล (Mean difference = -34.204°, 95%CI: -37.453 ถึง -30.954) และยังคงต่ำกว่าค่าก่อนผ่าตัดอย่างมีนัยสำคัญที่ 1 เดือน (Mean difference = -10.241°, 95%CI: -13.140 ถึง -7.341) อย่างไรก็ตาม เมื่อครบ 3 เดือนหลังผ่าตัด องศาการเคลื่อนไหวได้ฟื้นตัวกลับสู่ระดับใกล้เคียงกับก่อนผ่าตัด โดยไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Mean difference = -1.167*, 95%CI: -2.022 ถึง 4.355, p=.466) การวิเคราะห์การฟื้นตัวระหว่างช่วงเวลาหลังผ่าตัด พบการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญในทุกช่วง โดยมีการฟื้นตัวเพิ่มขึ้นจากขณะนอนโรงพยาบาลถึง 1 เดือน (Mean difference = 23.963*, p<.001) และมีการฟื้นตัวต่อเนื่องจาก 1 เดือนถึง 3 เดือน (Mean difference = 11.407*, p<.001) แสดงให้เห็นถึงพัฒนาการการฟื้นตัวที่ดีขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 3 เดือนหลังการผ่าตัด

ตารางที่ 5 ตารางแสดงผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยขององศาการเคลื่อนไหวการเหยียดข้อเข่า

ช่วงเวลา	ช่วงเวลา	Mean Difference (I-J)	Std.Error	Sig.	95% Confidence Interval for Difference	
					Lower Bound	Upper Bound
ก่อนผ่าตัด	หลังผ่าตัดขณะนอนรพ.	-12.407*	1.359	.000	-16.133	-8.682
	หลังผ่าตัด 1 เดือน	.926	1.226	1.000	-2.435	4.287
	หลังผ่าตัด 3 เดือน	3.407	1.365	.094	-.335	7.150
หลังผ่าตัด	หลังผ่าตัด 1 เดือน	13.333*	.989	.000	10.622	16.044
ขณะนอนรพ.	หลังผ่าตัด 3 เดือน	15.815*	1.135	.000	12.704	18.925
หลังผ่าตัด 1 เดือน	หลังผ่าตัด 3 เดือน	-2.481	1.005	.101	-5.236	.273

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ผลการทดสอบ Mauchly's test of sphericity พบว่าข้อมูลไม่ละเมิดข้อตกลงเบื้องต้นของ sphericity (Mauchly's $W = .82$, $\chi^2(5) = 9.98$, $p = .07$)

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงองศาการเหยียดข้อเข่าในช่วงเวลาต่าง ๆ พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระยะแรกหลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาล (Mean difference = -12.407°, 95%CI: -16.133 ถึง -8.682, p<.005) ซึ่งการฟื้นตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเดือนแรก โดยพบการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากหลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาลถึงหลังผ่าตัด 1 เดือน (Mean difference = 13.333*, p<.005) แต่องศาการเหยียดข้อเข่าที่ 1 เดือน และ 3 เดือนหลังผ่าตัดไม่แตกต่างจากก่อนผ่าตัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p = 1.000 และ p = .094 ตามลำดับ) นอกจากนี้ ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญ ระหว่าง 1 เดือน ถึง 3 เดือนหลังผ่าตัด (p = .101) แสดงให้เห็นว่าการฟื้นฟูองศาการเหยียดข้อเข่าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงเดือนแรกหลังการผ่าตัด

ตารางที่ 6 ตารางแสดงผลรวมสรุปผลต่างของค่าเฉลี่ยระดับความรุนแรงของโรคข้อเข่าเสื่อม

ช่วงเวลา	ช่วงเวลา	Mean Difference (I-J)	Std.Error	Sig.	95% Confidence Interval for Difference	
					Lower Bound	Upper Bound
ก่อนผ่าตัด	หลังผ่าตัดขณะนอนรพ.	7.648*	.982	.000	4.955	10.341
	หลังผ่าตัด 1 เดือน	-9.870*	.834	.000	-12.156	-7.585
	หลังผ่าตัด 3 เดือน	-18.574*	.958	.000	-21.201	-15.947
หลังผ่าตัด	หลังผ่าตัด 1 เดือน	-17.519*	.865	.000	-19.888	-15.149
ขณะนอนรพ.	หลังผ่าตัด 3 เดือน	-26.222*	.783	.000	-28.369	-24.076
หลังผ่าตัด 1 เดือน	หลังผ่าตัด 3 เดือน	-8.704*	.986	.000	-11.406	-6.002

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ผลการทดสอบ Mauchly's test of sphericity พบว่าข้อมูลไม่ละเมิดข้อตกลงเบื้องต้นของ sphericity (Mauchly's $W = .84$, $\chi^2(5) = 8.84$, $p = .11$)

การศึกษาพบการเปลี่ยนแปลงของระดับความรุนแรงของโรคข้อเข่าเสื่อม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกช่วงเวลา (p<.005) โดยมีการเพิ่มขึ้นชั่วคราวในช่วงหลังผ่าตัดขณะนอนโรงพยาบาล (Mean difference = 7.648, 95%CI: 4.955 ถึง 10.341) แต่หลังจากนั้นมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยที่ 3 เดือนหลังผ่าตัดมีระดับความรุนแรงลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับก่อนผ่าตัด (Mean difference = -18.574, 95%CI: -21.201 ถึง -15.947)

ตารางที่ 7 ตารางแสดงผลของค่าเฉลี่ยของแบบประเมินระดับความรุนแรงของโรคข้อเข่าเสื่อมตามรายข้อคำถาม

ข้อคำถาม	ก่อนผ่าตัด	หลังผ่าตัด ขณะนอนรพ.	หลังผ่าตัด 1 เดือน	หลังผ่าตัด 3 เดือน	Mauchly's W	p
ลักษณะอาการเจ็บปวด	1.92±0.88	1.79±0.83	2.92±0.57	3.55±0.50	0.73	0.007
ปัญหาในการทำกิจวัตรประจำวัน	1.94±0.73	1.57±0.60	2.70±0.60	3.42±0.53	0.88	0.30*
การขึ้นลงรถประจำทาง	1.79±0.68	1.51±0.60	2.68±0.74	3.42±0.53	0.98	0.97*
ระยะเวลาเดินก่อนที่จะมีอาการปวด	1.68±0.57	1.55±0.57	2.57±0.56	3.42±0.49	0.85	0.14*
อาการปวดขณะลุกจากเก้าอี้หลังทานอาหาร	1.83±0.50	1.29±0.63	2.64±0.58	3.35±0.51	0.89	0.30*
การเดินโยกตัว	1.75±0.61	1.33±0.61	2.62±0.65	3.31±0.50	0.93	0.59*
การนั่งคุกเข่าและลุก	1.90±0.59	1.22±0.71	2.59±0.68	3.29±0.46	0.94	0.68*
อาการปวดขณะนอนกลางคืน	1.85±0.73	1.03±0.72	2.59±0.63	3.25±0.44	0.82	0.73*

ข้อคำถาม	ก่อนผ่าตัด	หลังผ่าตัด ขณะนอนรพ.	หลังผ่าตัด 1 เดือน	หลังผ่าตัด 3 เดือน	Mauchly's W	p
อาการปวดขณะทำงาน	1.64±0.78	0.68±0.74	2.57±0.76	3.24±0.43	0.83	0.10*
อาการเข่าทรุด,หมดแรง	1.70±1.15	0.74±1.18	2.55±0.60	3.18±0.39	0.52	0.00
การไปซื้อของใช้ด้วยตนเอง	1.40±1.18	0.00±00	1.85±0.97	2.92±0.42	0.24	0.00
การเดินลงบันได	1.14±097	0.40±0.71	2.42±0.79	3.05±0.40	0.61	0.00

หมายเหตุ *p<.05

ผลการวิเคราะห์แบบประเมินระดับความรุนแรงของโรคข้อเข่าเสื่อมตามรายข้อ พบการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ดีขึ้นในทุกด้าน โดย 8 ข้อคำถามมีการกระจายแบบ sphericity (p>.05) และ 4 ข้อคำถามไม่เป็นไปตามข้อตกลง sphericity (p<.05) ได้แก่ ลักษณะอาการเจ็บปวด อาการเข่าทรุด การไปซื้อของ และการเดินลงบันได ในช่วงก่อนผ่าตัดปัญหาที่รุนแรงที่สุด คือ การทำกิจวัตรประจำวัน (1.94±0.73) หลังผ่าตัดช่วง 1 เดือนและ 3 เดือน มีการฟื้นตัวดีขึ้นในทุกด้าน โดยเฉพาะด้านอาการเจ็บปวด (3.55±0.50 ที่ 3 เดือน) แต่การเดินลงบันไดเป็นกิจกรรมที่ผู้ป่วยทำให้ยาก (3.05±0.40) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของโปรแกรมการออกกำลังกายผู้ป่วยผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม สามารถปรับปรุงคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยอย่างต่อเนื่อง

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยสนับสนุนสมมติฐานของการวิจัยที่ตั้งไว้ แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมการออกกำลังกายผู้ป่วยผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียมสามารถฟื้นฟูผู้ป่วยหลังผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียมได้ โดยสรุปได้ดังนี้ กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นผู้สูงอายุเพศหญิงที่มีการศึกษาระดับประถมศึกษา สะท้อนลักษณะทั่วไปของผู้ป่วยโรคข้อเข่าเสื่อมในประเทศไทย สอดคล้องกับการศึกษาของสุวรรณี สร้อยสงค์และคณะ (2562, น. 197-210) ที่พบว่าผู้ป่วยข้อเข่าเสื่อมในไทยส่วนใหญ่เป็นผู้หญิงซึ่งเกิดโรคข้อเสื่อม มากกว่าผู้ชาย 2-3 เท่า และการที่ผู้ป่วยส่วนใหญ่มีโรคประจำตัวมากกว่า 1 โรค (ธีรพงศ์ โศภิษฐิกุล, 2565, น. 89-98) พบว่าโรคร่วมไม่มีความสัมพันธ์ต่อความสำเร็จการผ่าตัดของการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม ซึ่งไม่สอดคล้องกับจิตรรดา พงศธราธิก, และแก้วใจ ทัดจันทร์ (2564, น. 54-68) ที่พบว่าภาวะโรคร่วม (comorbidity) ส่งผลต่อฟื้นฟูสภาพภายหลังได้รับการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียมได้ร้อยละ 6.2 ผู้ป่วยที่มีคะแนนโรคร่วมจะทำให้ผู้ป่วยมีอาการปวดข้อเข่าได้มากขึ้น

ด้านการฟื้นตัวขององศาการเคลื่อนไหว ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงการฟื้นตัวที่ดีขึ้นขององศาการเคลื่อนไหวของข้อเข่าภายหลังการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม โดยเฉพาะในช่วง 3 เดือนหลังการผ่าตัด องศาการงอข้อเข่ามีแนวโน้มที่จะกลับคืนสู่ระดับใกล้เคียงกับก่อนการผ่าตัด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโปรแกรมการฟื้นฟูที่ดำเนินการอย่างต่อเนื่องและมีระบบ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ระหว่างช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ยังบ่งชี้ถึงความก้าวหน้าในการฟื้นฟูที่ชัดเจน ซึ่งเป็นสัญญาณที่ดีสำหรับผู้ป่วยในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับอัคคลักษณ์ ญาณโรจน์ (2567, น. 355-363) ที่พบว่ากลุ่มผู้ป่วยทุกกลุ่มมีการเพิ่มขึ้นของมุมงอเข่า มุมเหยียดเข่า ภายหลังจากการรักษาทางกายภาพบำบัด โดยองศาการเคลื่อนไหวเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งของการทำกายภาพบำบัด

ผลการศึกษานี้สนับสนุนให้เห็นว่าโปรแกรมการออกกำลังกายหลังผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียมจากแผ่นพับการปฏิบัติตัวหลังการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม มีบทบาทสำคัญในการฟื้นฟูองศาการเคลื่อนไหว ลดระดับความเจ็บปวด และเพิ่มความสามารถในการใช้งานข้อเข่า ซึ่งส่งผลดีต่อคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาโปรแกรมฟื้นฟูที่เหมาะสม และเข้าถึงได้สำหรับผู้ป่วยจึงเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญในอนาคต

ข้อจำกัด

แม้ว่าผลการศึกษาจะชี้ให้เห็นถึงผลบวกจากโปรแกรมการออกกำลังกาย แต่ก็ยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น ขนาดตัวอย่างที่อาจไม่เพียงพอในการสรุปผลในประชากรที่กว้างขึ้น และความหลากหลายของโรคประจำตัวที่อาจส่งผลต่อผลลัพธ์ นอกจากนี้ ควรมีการติดตามผลในระยะยาวเพื่อดูว่าผู้ป่วยสามารถรักษาระดับความสามารถในการใช้งานข้อเข่าได้หรือไม่

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการติดตามและให้กำลังใจผู้ป่วยอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงเดือนแรกที่มีการฟื้นตัวมาก เนื่องจากผู้ป่วยบางรายอาจมีความเจ็บปวดหรือการอักเสบทำให้หยุดทำโปรแกรมการออกกำลังกาย

นักกายภาพบำบัดในโรงพยาบาลชุมชน สามารถนำโปรแกรมการออกกำลังกายนี้ไปประยุกต์ใช้ในการดูแลผู้ป่วยหลังผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม เพื่อส่งเสริมการฟื้นตัว ลดความปวด และเพิ่มการเคลื่อนไหวของข้อเข่าอย่างต่อเนื่อง ในระยะหลังผ่าตัดเมื่อผู้ป่วยถูกจำหน่ายจากโรงพยาบาล

การวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการศึกษาติดตามผลระยะยาว (6-12 เดือน) เพื่อประเมินความยั่งยืนของผลลัพธ์
2. ควรศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการฟื้นตัว เช่น อายุ โรคร่วมและความร่วมมือในการทำกายภาพบำบัด
3. ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิผลของโปรแกรมฟื้นฟูรูปแบบต่าง ๆ
4. ควรมีการศึกษาคุณภาพชีวิตและความพึงพอใจของผู้ป่วยในระยะยาว
5. ควรศึกษาในกลุ่มตัวอย่างที่มีสัดส่วนเพศที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น อาจทำการศึกษาเฉพาะในกลุ่มผู้ป่วยเพศชายเพิ่มเติม

6. เอกสารอ้างอิง

จิตรรดา พงศธราธิก และแก้วใจ ทัดจันทร์. (2564). ปัจจัยทำนายการฟื้นฟูสภาพและประสบการณ์การฟื้นฟูสภาพของผู้ป่วยที่ได้รับการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม. *วารสารมหาวิทยาลัยคริสเตียน, 27*(1), 54-68.

ธัญชนก ดำริห์. (2563). ผลของการใช้โปรแกรมฟื้นฟูผู้ป่วยภายหลังผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม. *วารสารการแพทย์โรงพยาบาลศรีสะเกษ สุรินทร์ บุรีรัมย์, 35*(3), 605-617.

ธีรพงศ์ โศภิษฐิกุล. (2565). ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อผลสำเร็จของการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียมในผู้ป่วยโรคข้อเข่าเสื่อมโรงพยาบาลเทพรัตน์นครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา. *ชัยภูมิเวชสาร, 42*(1), 88-98.

นิลุบล ไชยโกมล. (2563). ผลของโปรแกรมบริหารกล้ามเนื้อและข้อเข่าในผู้ป่วยโรคข้อเข่าเสื่อมหลังผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่า. *วารสารการแพทย์โรงพยาบาลอุดรธานี, 28*(3), 384-396.

ศุภานัน ก้อนจันทร์ และรัชนี นามจันทรา. (2562). ประสิทธิผลของโปรแกรมการจัดการความปวดและการฟื้นฟูสภาพในผู้ป่วยที่เข้ารับการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม. *วารสารมหาวิทยาลัยคริสเตียน, 25*(3), 64-77.

สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดลพบุรี. (2567). *สถิติการคัดกรองข้อเข่าเสื่อมในผู้สูงอายุ จังหวัดลพบุรี เขต 4*. https://lbo.hdc.moph.go.th/hdc/main/index.php

สุวรรณี สร้อยสงค์, อังคณา เรือนก้อน, ภัณฑิรชา เฟื่องทอง, และผุสดี สระทอง. (2562). การพยาบาลผู้สูงอายุโรคข้อเข่าเสื่อม. *วารสารวิชาการแพทย์เขต 11, 33*(2), 197-210.

อัคคลักษณ์ ญาณโรจน์. (2567). การศึกษาย้อนหลังผลของจำนวนครั้งของโปรแกรมการออกกำลังกายต่อมุมในการเคลื่อนไหวของข้อเข่าและความสามารถในการเดินของผู้ป่วยภายหลังการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม ณ โรงพยาบาลลำพูน. *วารสารอนามัยสิ่งแวดล้อมและสุขภาพชุมชน, 9*(2), 355-363.

Charoencholvanich, K., & Pongcharoen, B. (2005). Oxford Knee Score and SF-36: Translation & reliability for use with total knee arthroscopy patients in Thailand. *Journal of the Medical Association of Thailand, 88*(9), 1194-1202.

Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods, 39*(2), 175-191. https://doi.org/10.3758/BF03193146

World Health Organization. (2023). *Osteoarthritis*. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/osteoarthritis

Yap, Y. Y. W., Edwards, K. L., Soutakbar, H., Fernandes, G. S., & Scammell, B. E. (2021). Oxford Knee Score 1 year after TKR for osteoarthritis with reference to a normative population: What can patients expect? *Osteoarthritis and Cartilage Open, 3*(2), Article 100143. https://doi.org/10.1016/j.ocarto.2021.100143

วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

ประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพยูเรีย มูลวัว และ มูลแพะที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักคะน้าฮ่องกง

Efficiency of Bioextract from Urea Cow Manure and Goat Manure on the Growth and Quality of *Brassica alboglabra* L.H

กฤตนัย ทองโอฬาร[1], อุดมศักดิ์ ผ่องศรี[1*] และ โกเมนทร์ บุญเจือ[1]

Kittanai Tong-o-larn[1], Udomsak Phongsri[1*] and Komain Booncher[1]

[1] สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะเกษตรและชีวภาพ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

[1] Program in Agriculture, Faculty of Agriculture and Life Sciences, Chandrakasem Rajabhat University, Bangkok

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อการเจริญเติบโตของผักคะน้าฮ่องกง (Brassica alboglabra) ที่ปลูกในกระถาง โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) จำนวน 4 กรรมวิธี ได้แก่ กรรมวิธีที่ 1 น้ำเปล่าเป็นชุดควบคุม กรรมวิธีที่ 2 น้ำหมักชีวภาพจากยูเรีย กรรมวิธีที่ 3 น้ำหมักชีวภาพจากมูลวัว และกรรมวิธีที่ 4 น้ำหมักชีวภาพจากมูลแพะ โดยแต่ละกรรมวิธีใช้อัตราน้ำหมักชีวภาพ 20 มิลลิลิตรต่อน้ำ 20 ลิตร ผลการทดลองพบว่า กรรมวิธีที่ 3 ซึ่งใช้น้ำหมักชีวภาพจากมูลวัว ให้ผลผลิตน้ำหนักสดรวมรากสูงสุดเฉลี่ย 21.25 กรัม และน้ำหนักสดของต้นเฉลี่ย 14.25 กรัม ในขณะที่กรรมวิธีที่ 2 ให้จำนวนใบเฉลี่ยมากที่สุด คือ 9.96 ใบต่อหนึ่งต้น สำหรับกรรมวิธีที่ 4 พบว่ามีขนาดความกว้างของทรงพุ่ม และความสูงของต้นดีที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ย 12.36 เซนติเมตร และ 14.36 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนน้ำเปล่าชุดควบคุม ให้ผลการเจริญเติบโตต่ำสุดในทุกตัวชี้วัด ได้แก่ จำนวนใบเฉลี่ย 8.19 ใบ ความกว้างของทรงพุ่ม 11.32 เซนติเมตร ความสูงต้น 12.32 เซนติเมตร น้ำหนักสดรวมราก 15.90 กรัม และน้ำหนักสดของต้น 10.18 กรัม การวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าความกว้างของทรงพุ่ม และความสูงของต้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) แสดงให้เห็นว่าชนิดของน้ำหมักชีวภาพมีผลต่อคุณลักษณะการเจริญเติบโตบางประการของผักคะน้าฮ่องกงอย่างชัดเจน

สำคัญ: น้ำหมักชีวภาพยูเรีย น้ำหมักมูลวัว น้ำหมักมูลแพะ ผักคะน้าฮ่องกง ปุ๋ยคอก

** Corresponding author: ababyhook@hotmail.com*

***Received**: 28 เมษายน 2568* ***Revised:** 28 กรกฎาคม 2568* ***Accepted**: 4 สิงหาคม 2568*

Abstract

This study aimed to evaluate the effectiveness of different bio-fermented liquid fertilizers on the growth of Hong Kong kale (Brassica alboglabra) cultivated in pots. A Completely Randomized Design (CRD) was employed with four treatments: Treatment 1 (control, plain water), Treatment 2 (urea-based bio-fermented liquid fertilizer), Treatment 3 (cow manure-based bio-fermented liquid fertilizer), and Treatment 4 (goat manure-based bio-fermented liquid fertilizer). Each treatment was applied at 20 ml per 20 liters of water. The results indicated that Treatment 3, using cow manure-based fertilizer, produced the highest fresh weight with roots (21.25 grams) and shoot fresh weight (14.25 grams). Meanwhile, Treatment 2 resulted in the greatest number of leaves, averaging 9.96 leaves per plant. Treatment 4 exhibited the best canopy width and plant height, measuring 12.36 cm and 14.36 cm, respectively. In contrast, the control group (plain water) showed the lowest performance in all parameters, with an average of 8.19 leaves, a canopy width of 11.32 cm, a plant height of 12.32 cm, a fresh weight with roots of 15.90 grams, and a shoot fresh weight of 10.18 grams. Statistical analysis revealed that canopy width and plant height differed significantly among treatments ($P<0.05$), suggesting that the type of bio-fermented liquid fertilizer significantly influences certain growth traits of Hong Kong kale.

Keywords: Urea Bio-Extract, Cow Manure Bio-Extract, Goat Manure Bio-Extract, *Brassica Alboglabra* L.H, Farmyard Manure

1. บทนำ

ปัญหาในการใช้ปุ๋ยเคมีติดต่อกันนาน ๆ Das et al. (2023) การใส่ปุ๋ยเคมีติดต่อกันนานๆ ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมมากมาย ไม่ว่าจะเป็น ดินเค็มขึ้น มีสารโลหะหนักสะสม แหล่งน้ำเน่าเสียจากการเจริญเติบโตของพืชน้ำมากเกินไป (ยูโทรฟิเคชัน) หรือแม้แต่การสะสมของสารไนเตรทที่เป็นอันตราย ยิ่งใช้ปุ๋ยเคมีมากเกินไป ปัญหาก็ยิ่งตามมา ทั้งดินเสื่อม น้ำเน่า และอากาศเป็นพิษ ดังนั้น เพื่อให้เราสามารถทำการเกษตรได้นาน ๆ ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากปุ๋ยเคมี จึงจำเป็นต้องมีมาตรการเพื่อแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม และเศรษฐกิจที่เกี่ยวข้องกับปุ๋ยเคมีอย่างเร่งด่วน โดยการจัดการธาตุอาหารแบบแม่นยำและมีประสิทธิภาพ เช่น การใส่ปุ๋ยเฉพาะที่ การใส่ปุ๋ยพร้อมน้ำ Fertigation การใส่ปุ๋ยแบบแบ่ง Split Application (Shaviv, 2005) การใช้ปุ๋ยที่มีคุณสมบัติเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ปุ๋ยปล่อยช้า Slow-release Fertilizers (Chen et al., 2018)

คะน้า มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Brassica alboglabra* L.H. Bailey อยู่ในวงศ์ Brassicaceae (Bailey, 1922) คะน้ามีวิตามินซีสูง ช่วยทำให้ผิวสวย ป้องกันโรคหวัด ช่วยให้เนื้อเยื่อทำงานได้ดี คะน้ามีแคลเซียมสูง และร่างกายสามารถดูดซึมได้ดี ในคะน้ามีแคโรทีนอยด์ วิตามินเอ เบต้าแคโรทีน (มหาวิทยาลัยมหิดล และมูลนิธิโตโยต้าประเทศไทย, 2541) คุณค่าอาหารของคะน้าต่อ 100 กรัม มีพลังงาน 24 กิโลแคลอรี่ โปรตีน 2.7 กรัม ไขมัน 0.5 กรัม คาร์โบไฮเดรต 2.2 กรัม แคลเซียม 245 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัส 80 มิลลิกรัม เหล็ก 1.2 มิลิกรัม วิตามินบี1 0.05 มิลลิกรัม วิตามินบี2 0.08 มิลลิกรัม ไนอาซิน 1 มิลลิกรัม วิตามินซี 147 มิลลิกรัม (กระทรวงสาธารณสุข, ม.ป.ป.) เป็นผักที่มีความสำคัญด้านโภชนาการ และเศรษฐกิจการเกษตร

ในการปลูกคะน้าเพื่อให้ได้ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่มากขึ้น ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการเกษตร ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาพันธุ์ การใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืช การใช้ปุ๋ยเคมี ซึ่งการใช้ปุ๋ยเคมีถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเพิ่มผลผลิต เกษตรกร หันมาใช้ปุ๋ยเคมีกันมาก เนื่องจากใช้สะดวกมีสูตรต่าง ๆ ให้เลือกมากมายและเห็นผลเร็ว แต่การใช้ปุ๋ยเคมี มีข้อจำกัดและสร้างผลกระทบได้เช่นกัน ดังที่กล่าวมาข้างต้น การใช้ปุ๋ยอินทรีย์ เยาวพล ชุมพล (2564, น.34-40) ประสิทธิภาพของปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากเมล็ดถั่วเหลืองและสับปะรดในการเพิ่มผลผลิตคะน้า พบว่า การใช้ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากเมล็ดถั่วเหลืองและสับปะรดต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1:100 ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดของต้นคะน้าที่อายุ 56 วัน สูงสุด (46.6กรัมต่อต้น) ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับคะน้าที่แนวโน้ม

ทำให้ผักที่ใช้ปุ๋ยยูเรีย (46.3 กรัมต่อต้น) ดังนั้น การใช้ปุ๋ยหมักชีวภาพจากถั่วเหลืองและสับปะรด ในอัตราส่วนผสมของน้ำหมักชีวภาพต่อน้ำ 1:100 มีผลต่อการเพิ่มการเจริญเติบโตของต้นคะน้าพันธุ์เพชรน้ำเอก และสามารถทดแทนการใช้ปุ๋ยยูเรียได้ อีกทั้งยังลดการใช้ปุ๋ยเคมีที่ส่งผลต่อสุขภาพของผู้ใช้ ผู้บริโภค และสิ่งแวดล้อมได้อย่างดี จึงเรียกปุ๋ยชนิดนี้ว่า “ปุ๋ยชีวภาพยูเรีย” อีกทั้ง ชินกร จิรขจรจริตกุล (2566, น. 107-119) ประสิทธิภาพของปุ๋ยน้ำหมักจากมูลวัวและมูลแพะต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดกวางตุ้งฮ่องเต้ พบว่า การใช้ปุ๋ยน้ำหมักจากมูลวัว ให้ผลดีกว่าการใช้ปุ๋ยน้ำหมักจากมูลแพะ แต่ยังคงมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการใช้ปุ๋ยยูเรียที่อายุ 56 วัน โดยการใช้ปุ๋ยน้ำหมักจากมูลวัว ให้ผลดีกว่าการใช้ปุ๋ยน้ำหมักจากมูลแพะ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P<0.05$) โดยการให้ปุ๋ยน้ำหมักจากมูลวัว มีผลให้ผักกาดกวางตุ้งฮ่องเต้ มีความสูง 18.17 เซนติเมตร ความกว้างทรงพุ่ม 19.30 เซนติเมตร มีจำนวนใบ 11.00 ใบต่อต้น น้ำหนักต้นสด 20.74 กรัมต่อต้น น้ำหนักต้นแห้ง 1.74 กรัมต่อต้น น้ำหนักรากสด น้ำหนักรากแห้ง 5.00 และ 0.76 กรัมต่อต้นตามลำดับ และปริมาณคลอโรฟิลล์ 40.55 SPAD-Reading ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังนั้น การใช้ปุ๋ยน้ำหมักมูลวัวสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตผักประเภทกินใบได้ และสุกิจ แก้วสุขศรี (2552) ศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยน้ำหมักจากมูลแพะและมูลวัวที่มีผลต่อการเจริญเติบโตผลผลิตผักคะน้าที่ปลูกในกระถาง ผลศึกษาพบว่าดินที่ใช้ปลูกผสมปุ๋ยน้ำหมักจากมูลวัวให้ผลการเจริญเติบโต และผลผลิตดีที่สุด ธรณัส (2536) ได้ศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยอินทรีย์ต่อการเจริญเติบโตของผักคะน้า พบว่าการใช้ Humicin,Terra-Sorb และปุ๋ยคอกให้การเจริญเติบโตที่ไม่แตกต่างกันในขณะที่การให้ปุ๋ยคอกร่วมกับปุ๋ยรองพื้นและปุ๋ยยูเรียให้การเจริญเติบโตดีที่สุด สุพัตรา เจริญภักดี (2014, น.256-261) การใช้ปุ๋ยมูลสัตว์ในการปลูกผักกาดหอม (Lactuca sativa L.) ในระบบปลูกพืชไร้ดินแบบทำเอง มีการคำนวณและเปรียบเทียบต้นทุนของการบำบัดแต่ละชนิด พบว่ามูลค้างคาวมีต้นทุนต่ำที่สุด (0.4 บาท/ลิตร) ตามมาด้วยมูลโค (0.5 บาท/ลิตร) และมูลสุกร (0.6 บาท/ลิตร) ส่วนปุ๋ยเคมีเชิงพาณิชย์มีราคาสูงที่สุด (3 บาท/ลิตร) มูลสัตว์ทุกชนิดมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าปุ๋ยเคมี โดยเฉพาะมูลสัตว์ท้องถิ่น ซึ่งมีราคาถูกกว่า

สำหรับปุ๋ยคอกเป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่ง ที่ได้จากการเลี้ยงสัตว์ ซึ่งปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากมูลสัตว์อุดมไปด้วยธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งมูลวัวมีปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ย 1.55%, ฟอสฟอรัส 0.41% และโพแทสเซียม 1.8% อินทรีย์คาร์บอน 25.99 C/N 16.714 ในขณะที่มูลแพะมีไนโตรเจน 3.003%, ฟอสฟอรัส 0.721% และโพแทสเซียม 2.15% อินทรีย์คาร์บอน 32.985 C/N 10.984 และค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของธาตุอาหารในมูลสัตว์ในแต่ละภาค (ภาคกลาง ภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) มีเปอร์เซ็นต์ของธาตุอาหารไม่เท่ากัน การปลดปล่อยธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของปุ๋ยอินทรีย์ขึ้นอยู่กับพืชนำไปใช้ได้ทันที 10-30% ของปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบ และขึ้นอยู่กับสัดส่วน C/N ความชื้น อุณหภมิ และการระบายอากาศของดิน (สุภาพร ชุมพงษ์, 2548, น.1)

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพยูเรีย น้ำหมักชีวภาพมูลวัว และน้ำหมักชีวภาพมูลแพะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของผักคะน้าฮ่องกงในกระถาง

3. วิธีดำเนินการวิจัย

วางแผนการทดลอง

ทำการศึกษาประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพยูเรียมูลวัวและมูลแพะ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักคะน้าฮ่องกง โดยวางแผนการการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) โดยทำการทดลองทั้งหมด 4 กรรมวิธี วิธีละ 4 ซ้ำ ซ้ำละ 5 ต้น ทั้งหมด 80 ต้น ได้แก่ กรรมวิธีที่ 1 น้ำเปล่าชุดควบคุม กรรมวิธีที่ 2 น้ำหมักชีวภาพยูเรีย 20 มิลลิลิตร ต่อน้ำ 20 ลิตร กรรมวิธีที่ 3 น้ำหมักชีวภาพมูลวัว 20 มิลลิลิตร ต่อน้ำ 20 ลิตร กรรมวิธีที่ 4 น้ำหมักชีวภาพมูลแพะ 20 มิลลิลิตร ต่อน้ำ 20 ลิตร

การเตรียมปุ๋ยน้ำชีวภาพยูเรีย และปุ๋ยน้ำหมักมูลสัตว์

การทำน้ำหมักชีวภาพยูเรีย โดยนำถั่วเหลือง 10 กิโลกรัม สับปะรด 10 กิโลกรัม กากน้ำตาล 5 ลิตร และข้าวสาร 5 กิโลกรัม มาผสมกับน้ำจำนวน 60 ลิตร มาหมักลงในภาชนะแล้วปิดฝา ทุก 3 วัน เปิดคลุกเคล้าน้ำหมักเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการหมัก แล้วเก็บที่ร่มประมาณ 30 วัน จากนั้นกรองเอาเฉพาะส่วนที่เป็นของเหลวได้เป็นน้ำหมักชีวภาพยูเรีย

การทำน้ำหมักชีวภาพมูลวัว และมูลแพะ โดยนำมูลวัวและมูลแพะ จำนวน 30 กิโลกรัม มาผสมกับน้ำ จำนวน 60 ลิตร มาหมักลงในภาชนะอย่างละถังแล้วปิดฝา ทุก 3 วัน เปิดคลุกเคล้าน้ำหมักเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการหมัก แล้วเก็บที่ร่มประมาณ 30 วัน จากนั้นกรองเอาเฉพาะส่วนที่เป็นของเหลวได้เป็นน้ำหมักชีวภาพมูลวัว และน้ำหมักชีวภาพมูลแพะ

อัตราการนำไปใช้ เจือจางน้ำหมักชีวภาพยูเรีย น้ำหมักชีวภาพมูลวัวและมูลแพะ ในอัตราส่วนปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพแต่ละชนิด ในอัตราส่วน 20 มิลลิลิตร ต่อ น้ำ 20 ลิตร (1:1,000) เยาวพล ชุมพล (2564, น.34-40) จากนั้นก็นำสารละลายที่ได้ไปรดต้นผักคะน้าฮ่องกง กระถางละ 500 มิลลิลิตร ทุก 7 วัน

ตารางที่ 1 แสดงราคาปุ๋ย

รายการ	จำนวน	ราคา/หน่วย	รวม (บาท)
1 มูลวัว	30	10	300
2 มูลแพะ	30	10	300
3 น้ำหมักชีวภาพยูเรีย	-	-	572
3.1 ถั่วเหลือง	10	14.4	72
3.2 ข้าวสาร	5	50	250
3.3 สับปะรด	10	10	100
3.4 กากน้ำตาล	5	30	150
4 ปุ๋ยเคมี ยูเรีย 46-0-0	1	600	600

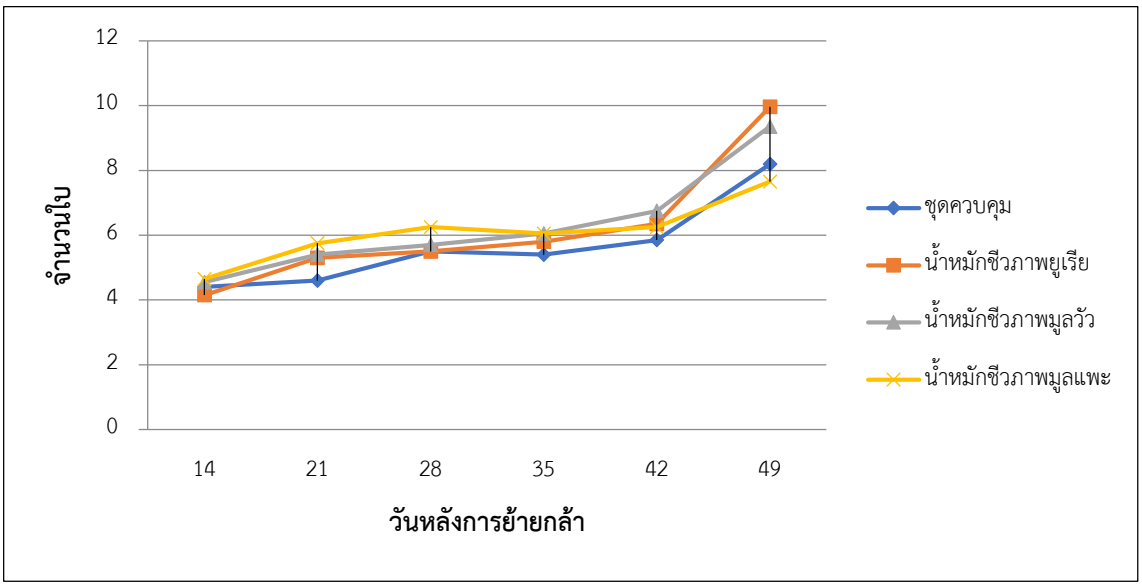
การบันทึกข้อมูล

ความสูงต้น วัดความสูงจากโคนต้นถึงปลายยอด ความกว้างทรงพุ่ม (เซนติเมตร) นับจำนวนใบ ทุก 7 วัน น้ำหนักสดต้นพร้อมรากและน้ำหนักสดต้น (กรัม) เมื่อผักมีอายุ 49 วัน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของแต่ละลักษณะที่ทำการศึกษา และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Oneway Analysis of Variance ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4. ผลการวิจัย

จำนวนใบ

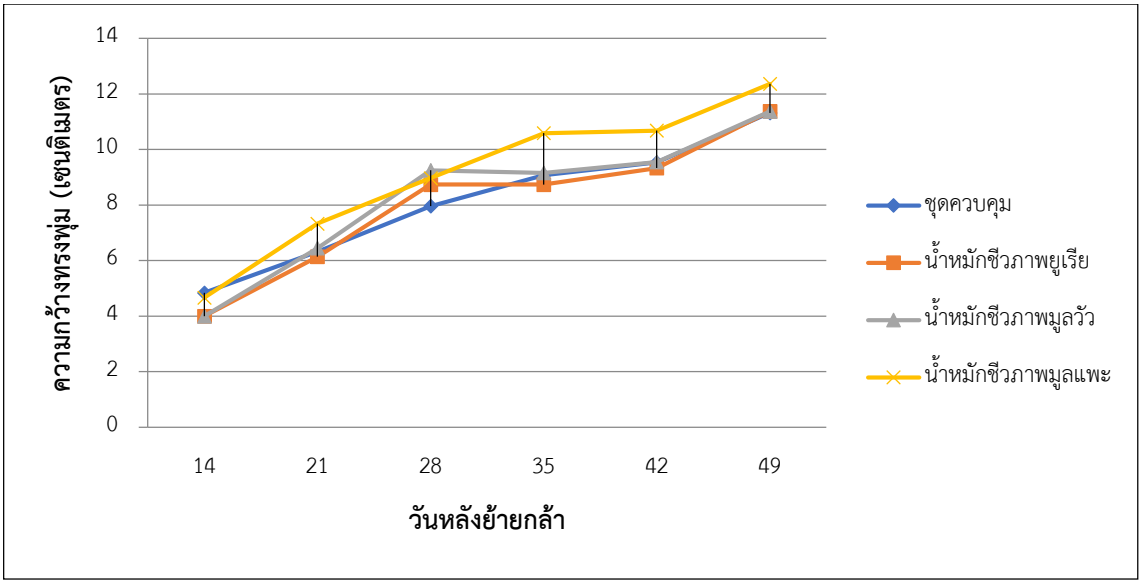
จากผลการทดลองประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพยูเรียมูลวัวและมูลแพะ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักคะน้าฮ่องกง พบว่า จำนวนใบเฉลี่ยตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 7 กรรมวิธีที่ 3 น้ำหมักชีวภาพมูลวัว มีผลให้จำนวนใบเฉลี่ยสูงสุด 6.30 ใบ รองลงมาคือ กรรมวิธีที่ 2 น้ำหมักชีวภาพยูเรีย และกรรมวิธีที่ 4 น้ำหมักชีวภาพมูลแพะ 6.10 5.66 ใบตามลำดับ โดยที่กรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม มีจำนวนใบน้อยที่สุด 5.66 ใบ โดยจำนวนใบเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมัน 95%



ภาพที่ 1 แสดงจำนวนใบ

ความกว้างทรงพุ่ม

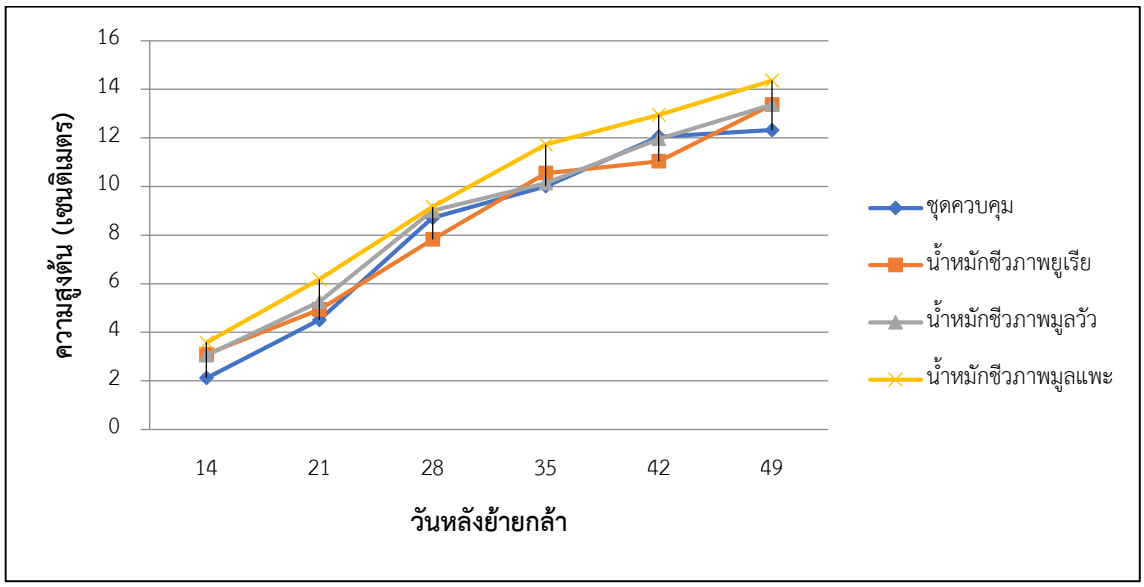
จากผลการทดลองประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพยูเรียมูลวัวและมูลแพะ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตด้านความกว้างทรงพุ่มของผักคะน้าฮ่องกง พบว่า ความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ย ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 7 กรรมวิธีที่ 4 น้ำหมักมูลแพะ มีผลให้ความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ยสูงสุด 9.10 เซนติเมตร รองลงมาคือ กรรมวิธีที่ 3 น้ำหมักมูลวัว และกรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม 8.30 8.17 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยที่กรรมวิธีที่ 2 น้ำหมักชีวภาพยูเรีย มีความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ยน้อยที่สุด 8.05 เซนติเมตร โดยจำนวนใบเฉลี่ยมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมัน 95%



ภาพที่ 2 แสดงความกว้างทรงพุ่ม

ความสูงต้น

จากผลการทดลองประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพยูเรียมูลวัวและมูลแพะ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของผักคะน้าฮ่องกง พบว่า ความสูงต้นเฉลี่ย ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 7 กรรมวิธีที่ 4 น้ำหมักชีวภาพมูลแพะ มีผลให้ความสูงต้นเฉลี่ยสูงสุด 9.66 เซนติเมตร รองลงมาคือ กรรมวิธีที่ 3 น้ำหมักชีวภาพมูลวัว และกรรมวิธีที่ 2 น้ำหมักชีวภาพยูเรีย 8.80 8.47 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยที่กรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม มีความสูงต้นเฉลี่ยน้อยที่สุด 8.29 เซนติเมตร โดยความสูงต้นเฉลี่ยมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมัน 95%



ภาพที่ 3 แสดงความสูงต้น

น้ำหนักสดต้นพร้อมราก

จากผลการทดลองประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพยูเรียมูลวัวและมูลแพะ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักคะน้าฮ่องกง พบว่า เมื่อครบ 49 วัน ผักคะน้าฮ่องกงที่ปลูกในกรรมวิธีที่ 3 น้ำหมักชีวภาพมูลวัว มีน้ำหนักสดต้นและรากเฉลี่ยสูงสุดคือ 21.25 กรัม รองลงมาคือ กรรมวิธีที่ 4 น้ำหมักชีวภาพมูลแพะและกรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม มีน้ำหนักสดต้นและรากเฉลี่ยคือ 18.05 และ 15.9 กรัม ตามลำดับ ส่วนผักคะน้าที่ปลูกในกรรมวิธีที่ 2 น้ำหมักชีวภาพยูเรีย มีน้ำหนักสดต้นพร้อมรากเฉลี่ยต่ำสุด คือ 15.05 กรัม เมื่อนำค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดต้นพร้อมรากที่ได้นำไปวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมัน 95%

น้ำหนักสดราก

จากผลการทดลองประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพยูเรียมูลวัวและมูลแพะ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักคะน้าฮ่องกง พบว่า เมื่อครบ 49 วัน ผักคะน้าฮ่องกงที่ปลูกในกรรมวิธีที่ 3 น้ำหมักชีวภาพมูลวัว มีน้ำหนักสดรากเฉลี่ยสูงสุดคือ 7.00 กรัมรองลงมาคือ กรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม และกรรมวิธีที่ 4 น้ำหมักมูลแพะมีน้ำหนักสดรากเฉลี่ยคือ 5.72 และ 5.41 กรัม ตามลำดับ ส่วนผักคะน้าที่ปลูกในกรรมวิธีที่ 2 น้ำหมักชีวภาพยูเรีย มีน้ำหนักสดรากเฉลี่ยต่ำสุด คือ 4.46 กรัม เมื่อนำค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดรากที่ได้นำไปวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมัน 95%

น้ำหนักสดต้น

จากผลการทดลองประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพยูเรียมูลวัวและมูลแพะ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักคะน้าฮ่องกง พบว่าเมื่ออายุ 49 วันหลังเพาะเมล็ด พบว่าผักคะน้าฮ่องกงที่ปลูกในกรรมวิธีที่ 3 น้ำหมักชีวภาพมูลวัว มีน้ำหนักสดต้นเฉลี่ยสูงสุด

คือ 14.25 กรัม รองลงมาคือ ผักคะน้าฮ่องกงที่ปลูกในกรรมวิธีที่ 4 น้ำหมักชีวภาพมูลแพะ และกรรมวิธีที่ 2 น้ำหมักชีวภาพยูเรีย มีน้ำหนักสดต้นและรากเฉลี่ยคือ 12.64 และ10.59 กรัมตามลำดับ ส่วนผักคะน้าที่ปลูกในกรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม มีน้ำหนักสดต้นพร้อมรากเฉลี่ยต่ำสุด คือ 10.18 กรัม เมื่อนำค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดต้นที่ได้นำไปวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมัน 95%

ภาพที่ 4 แสดงผลของประสิทธิภาพน้ำหมักชีวภาพมูลวัว

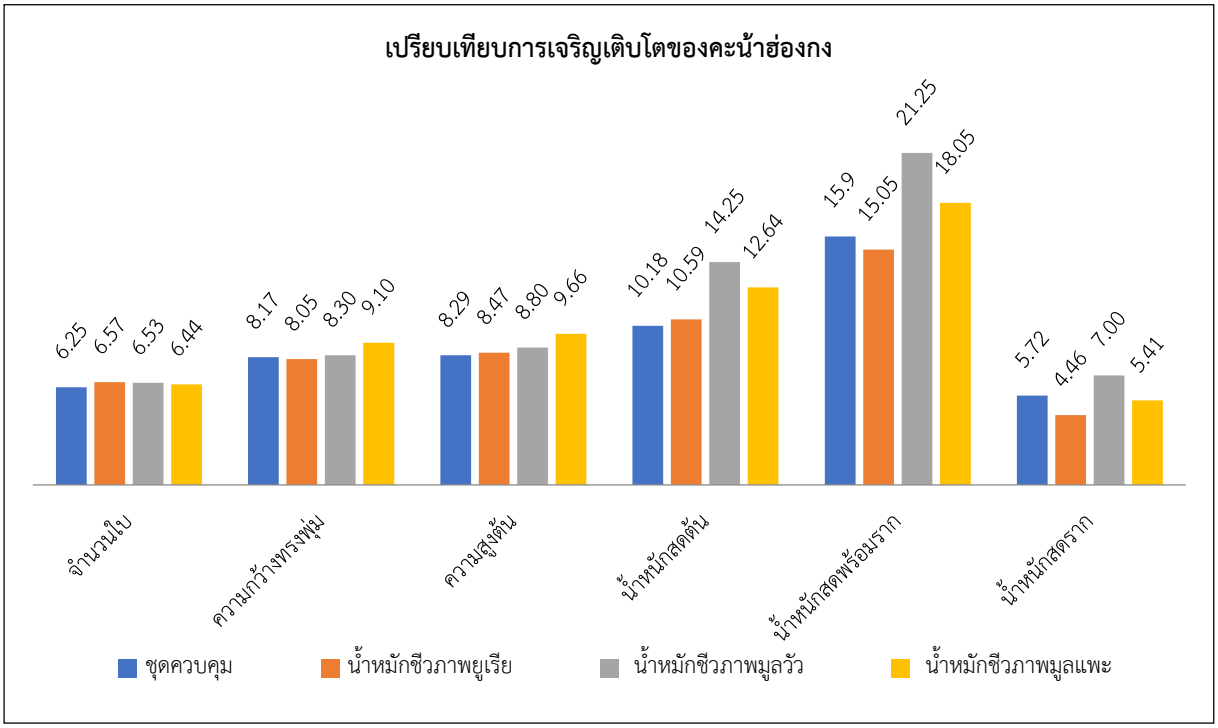
จากการศึกษาประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพมูลวัวมูลแพะและยูเรีย ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตผลผลิตผักคะน้าฮ่องกงที่ปลูกในกระถาง พบว่ากรรมวิธีที่ 3 ใช้น้ำหมักชีวภาพมูลวัวให้ผลผลิตดีที่สุดโดยมีน้ำหนักสดต้นพร้อมรากเฉลี่ย 21.25 กรัม น้ำหนักสดต้นเฉลี่ย 14.25 กรัม จำนวนใบเฉลี่ย 9.35 ใบ ความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ย 11.37 เซนติเมตร ความสูงเฉลี่ย 13.37 เซนติเมตร ปริมาณผลผลิตรองลงมาได้แก่ กรรมวิธีที่ 4 ใช้น้ำหมักชีวภาพมูลแพะ มีน้ำหนักสดต้นพร้อมรากเฉลี่ย 18.05 กรัม น้ำหนักสดต้นเฉลี่ย 12.64 กรัม จำนวนใบ 7.65 ใบ ความสูงต้น 14.36 เซนติเมตร เป็นความสูงต้นที่ดีที่สุด รองลงมา กรรมวิธีที่2ใช้น้ำหมักชีวภาพยูเรียให้จำนวนใบมากที่สุด 9.96 ใบ ผลผลิตน้ำหนักสดต้นพร้อมรากเฉลี่ย 15.05 กรัม น้ำหนักสดต้นเฉลี่ย 14.25 กรัม ชุดควบคุมกรรมวิธีที่ 1 ให้ผลการเจริญเติบโตน้อยที่สุด จำนวนใบเฉลี่ย 8.19 ใบ ความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ย 11.32 เซนติเมตร ความสูงเฉลี่ย 12.32 เซนติเมตร

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักคะน้าฮ่องกง

การเจริญเติบโต	อายุ (วัน)	Treatment				ค่า F
		กรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม	**กรรมวิธีที่ 2** น้ำหมักชีวภาพยูเรีย	**กรรมวิธีที่ 3** น้ำหมักชีวภาพมูลวัว	**กรรมวิธีที่ 4** น้ำหมักชีวภาพมูลแพะ	
จำนวนใบ (ใบ)	14	4.4	15.4	55.4	65.4	ns
	21	6.4	3.5	4.5	75.5	ns
	28	5.5	5.5	5.7	6.25	ns
	35	5.4	5.8	6.05	6.05	ns
	42	5.85	6.35	6.75	6.25	ns
	49	19.8	96.9	35.9	65.7	ns
ค่าเฉลี่ย	-	5.66	6.18	6.30	6.10	-
ความกว้างทรงพุ่ม (เซนติเมตร)	14	84.4	4	4	67.4	ns
	21	6.32	6.14	6.45	7.33	ns
	28	7.96	8.74	9.25	8.97	ns
	35	9.07	8.74	9.16	10.59	ns
	42	9.53	9.33	9.55	10.68	ns
	49	11.32^{b}	11.37^{ab}	11.37^{ab}	12.36^{a}	*
ค่าเฉลี่ย	-	8.17	8.05	8.30	9.10	-
ความสูงต้น (เซนติเมตร)	14	2.12^{b}	3.1^{a}	3.05^{a}	3.58^{a}	*
	21	4.51^{b}	4.94^{b}	5.26^{ab}	6.18^{a}	*
	28	8.71	7.82	9	9.16	ns
	35	10.01	10.55	10.14	11.73	ns
	42	12.05	11.04	11.96	12.95	ns
	49	12.32^{b}	13.37^{ab}	13.37^{ab}	14.36^{a}	*
ค่าเฉลี่ย	-	8.29	8.47	8.80	9.66	-
น้ำหนักสดต้นพร้อมราก	49	15.9	15.05	21.25	18.05	ns
น้ำหนักสดต้น	49	10.18	.1059	14.25	12.64	ns
น้ำหนักสดราก	49	5.72	4.46	7.00	5.41	ns

หมายเหตุ: ns = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

* = มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ความเชื่อมั่นที่ 95 %



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของคะน้าฮ่องกง

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การทดลองในครั้งนี้มีข้อสังเกตได้ว่า กรรมวิธีที่ใช้น้ำหมักชีวภาพมูลวัวและกรรมวิธีน้ำหมักชีวภาพมูลแพะ ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของผักคะน้าฮ่องกง ด้านผลผลิตได้ดี ดังรายงานปริมาณอาหารในน้ำหมักชีวภาพของคณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2548) นอกจากนี้รายงานของหฤษภฎ์ (2552) ได้ทำการทดลองประสิทธิภาพของปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพจากมูลแพะ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผัก จำนวน 4 ชนิด พบว่าน้ำหมักชีวภาพจากมูลแพะให้ผลการทดลองดีที่สุด แต่ถ้าพิจารณาเปรียบเทียบน้ำหมักมูลวัวกับมูลแพะพบว่า น้ำหมักมูลวัวทำให้คะน้าฮ่องกงมีการเจริญเติบโตที่ดีกว่าน้ำหมักมูลแพะ เช่นเดียวกับการทดลองของชินกร (2566) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยน้ำหมักจากมูลวัวและมูลแพะ ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดกวางตุ้งฮ่องแต้ พบว่าปุ๋ยจากน้ำหมักมูลวัวให้ผลดีกว่าการใช้ปุ๋ยน้ำหมักมูลแพะ

จากผลการทดลองในการใช้น้ำหมักชีวภาพ ยูเรีย น้ำหมักชีวภาพจากมูลสัตว์ ช่วยในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของคะน้าฮ่องกง เกษตรกรสามารถลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีที่มีราคาแพง ร่วมกับการใช้ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพ เพื่อลดต้นทุนการผลิตของเกษตรกร เช่นเดียวกับการทดทองของเยาวพล ชุมพล (2564) พบว่าการใช้น้ำหมักชีวภาพจากถั่วเหลืองและสัปปะสด ในการเพิ่มผลผลิตคะน้าสามารถทดแทนปุ๋ยยูเรีย 46.3 กรัมต่อต้นได้ โดยความสูง ลำต้น จำนวนใบ ความกว้างใบ ความยาวก้านไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพมูลวัวและน้ำหมักชีวภาพมูลแพะ ที่มีต่อการเจริญเติบโตผลผลิตผักคะน้าฮ่องกงที่ปลูกในกระถาง พบว่า กรรมวิธีที่ใช้น้ำหมักชีวภาพมูลวัวให้ผลการเจริญเติบโตและผลผลิต ดีที่สุด โดยมีจำนวนใบ 9.35 ใบ ความกว้างทรงพุ่ม 11.37 เซนติเมตร ความสูง 13.37 เซนติเมตร น้ำหนักสดต้นพร้อมรากเฉลี่ย 21.25 กรัม น้ำหนักสดต้นเฉลี่ย 14.25 กรัม น้ำหนักสดราก 7.00 กรัม รองลงมาได้แก่น้ำหมักชีวภาพมูลแพะ และกรรมวิธีที่ใช้น้ำหมักชีวภาพยูเรีย ในขณะที่กรรมวิธีที่ใช้ (น้ำเปล่า) ชุดควบคุม ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ข้อเสนอแนะ

นำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาต่อยอดเพื่อให้ได้ผักคะน้าฮ่องกงที่มีคุณภาพและต้นทุนการผลิตต่ำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ และผู้ให้การสนับสนุนในการวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทร์เกษม ที่ได้ให้สถานที่ในการทำการทดลองครั้งนี้ ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

กองโภชนาการ กรมอนามัย. (ม.ป.ป.). *ผักคะน้าราชินีผักใบเขียว*. กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. https://nutrition2.anamai.moph.go.th/th/infographic/4536

ชินกร จิรขจรจริตกุล. (2566). ประสิทธิภาพของปุ๋ยน้ำหมักจากมูลวัวและมูลแพะต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดกวางตุ้งฮ่องเต้. *วารสารวิจัยและพัฒนาวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, *18*(2), 107-119.

ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2548). *ปฐพีวิทยาเบื้องต้น* (พิมพ์ครั้งที่ 10). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มหาวิทยาลัยมหิดล และมูลนิธิโตโยต้าประเทศไทย. (2542). *มหัศจรรย์ผัก 108* (พิมพ์ครั้งที่ 5). สำนักพิมพ์คบไฟ.

เยาวพล ชุมพล. (2564). ประสิทธิภาพของปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากเมล็ดถั่วเหลืองและสัปปะรดในการเพิ่มผลผลิตคะน้า. *วารสารเกษตรพระวรุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม*, *18*(1), 34-40. https://doi.org/10.14456/paj.2021.4

สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร. (2548). *วัสดุอินทรีย์และปุ๋ยคอกในพื้นที่ทำการเกษตร* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรมวิชาการเกษตร.

หฤษฎ์ นิ่มรักษา. (2552). *ประสิทธิภาพของปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพจากมูลแพะที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักจำนวน 4 ชนิด* [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม.

Bailey, L. H. (1922). Various binomials. *Gentes Herbarum; Occasional Papers on the Kinds of Plants, 1*(1), 53-108.

Charoenpakdee, S. (2020). Using animal manure to grow lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a Homemade Hydroponics System. *Agriculture and Natural Resources, 54*(4), 543–550.

Chen, J., Liu, X., Liu, C., Mao, B., Liu, W., & Zhang, H. (2018). Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment. *Science of The Total Environment, 613-614*, 829-839. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.186

Das, H., Devi, N. S., Venu, N., & Borah, A. (2023). Chemical fertilizer and its effects on the soil environment. In *Research and review in agriculture sciences* (Vol. 7, pp. 31-51). Bright Sky Publications.

FitAudit. (n.d.). *Chinese broccoli —Nutrition Facts*. https://fitaudit.com/food/122431

Shaviv, A. (2005). Advances in controlled-release fertilizers. *Advances in Agronomy, 87*, 1-74. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87001-4

วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

ผลของอัตราส่วนผสมระหว่างไม้และพลาสติกต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุผสมไม้และพลาสติก

Effects of the Mixing Ratio of Wood and Plastic on Physical and Mechanical Properties of Wood-Plastic Composite Materials

ฐิติพงษ์ อุ่นใจ[1], อดุลย์ จรรยาเลิศอดุลย์[2] และ สุนิดา ทองโท[3*]

Thitipong Unchai[1], Adun Janyalertadun[2] and Sunida Thongtho[3*]

[1] สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

[1] Program of Physics, Faculty of Science, Ubon Ratchathani Rajabhat University

[2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

[2] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

[3] สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

[3] Program of Environmental science, Faculty of Science, Ubon Ratchathani Rajabhat University

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุผสมระหว่างพลาสติก HDPE และเศษไม้ย่อยหรือขี้เลื่อย เพื่อพัฒนาวัสดุผสมจากวัสดุเหลือใช้ โดยใช้วัตถุดิบที่มีขนาดตั้งแต่ 0.2 ถึง 7.0 มิลลิเมตร ที่อัตราส่วน 20-50 wt% มาผสมและอบหลอมที่อุณหภูมิ 185°C เป็นระยะเวลา 20 นาที ปล่อยให้เย็นตัวเป็นระยะเวลา 40 นาที ตามชนิดและอัตราส่วนผสม จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล ผลการทดสอบทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของไม้ต่อพลาสติกที่เพิ่มขึ้น และวัสดุผสมที่ใช้เศษไม้ย่อยมีความหนาแน่นสูงกว่าวัสดุผสมที่ใช้ขี้เลื่อยในทุกอัตราส่วนของไม้ต่อพล าสติก ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำพบว่าการดูดซึมน้ำของวัสดุผสมมีค่าตั้งแต่ 4.34-34.25% เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของไม้ต่อพลาสติกที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วน 20 wt% ขี้เลื่อยมีความต้านทานแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 16.70 MPa การทดสอบความต้านทานแรงอัดของวัสดุผสมไม่แสดงแนวโน้มที่ชัดเจนตามอัตราส่วนของไม้ต่อพลาสติกที่เปลี่ยนแปลง 13.83-16.67 MPa และผลทดสอบความต้านทานแรงดัด แสดงให้เห็นได้ว่าความต้านทานแรงดัดของวัสดุผสมลดลงตามอัตราส่วนของไม้ต่อพลาสติกที่เพิ่มขึ้น และเมื่อนำพลาสติกผสมมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบ 3 ประเภท ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ชนิดรับแรง ผลิตภัณฑ์สำหรับใช้ภายในอาคาร และผลิตภัณฑ์สำหรับใช้ภายนอกอาคาร พบว่า พลาสติกผสมเหมาะสำหรับนำมาใช้ในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับใช้ภายในและภายนอกอาคาร แต่สำหรับการนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุรับแรงยังไม่มีความเหมาะสมมากนัก อาจต้องมีการปรับอัตราส่วนผสมหรือกระบวนการผลิตให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

สำคัญ: วัสดุผสมไม้และพลาสติก ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงอัด ความต้านทานแรงดัด

** Corresponding author: sunida.t@ubru.ac.th*

***Received**: 17 มิถุนายน 2568* ***Revised:** 8 สิงหาคม 2568* ***Accepted**: 18 สิงหาคม 2568*

Abstract

This research aims to develop a composite material made from HDPE plastic combined with either ground wood or sawdust to develop composite materials from waste materials. The raw materials used have particle sizes ranging from 0.2 to 0.7 millimetres and are mixed at ratios of 20 to 50 wt%. The mixture is then heated at 185°C for 20 minutes, followed by cooling for 40 minutes, depending on the type and ratio of the mixture. The physical and mechanical properties of the composites are then tested. The results of the relative density tests show that the density of the composite increases with a higher ratio of wood to plastic. Additionally, composites made with ground wood have a higher density than those made from sawdust at all wood-to-plastic ratios. The water absorption tests indicate that the water absorption of the composite ranges from 4.34 to 34.25%, increasing with the wood-to-plastic ratio. The tensile strength tests reveal that at a 20 wt% ratio, the composite containing sawdust achieves the highest average tensile strength of 16.70 MPa. The compressive strength tests of the composite do not show a clear trend with changing wood-to-plastic ratios, ranging from 13.83 to 16.67 MPa. The flexural strength tests indicate that the flexural strength of the composite decreases with an increasing wood-to-plastic ratio. When the composite plastic is molded into three types of prototype products: load-bearing products, indoor-use products, and outdoor-use products, it is found that the composite plastic is suitable for use in indoor and outdoor products. However, it is not yet highly suitable for use as a load-bearing material, and the mixing ratios or production processes may need to be adjusted for better suitability.

Keywords: Wood-plastic composites (WPCs), Tensile strength, Compressive strength, Flexural strength

1. บทนำ

วัสดุผสมไม้และพลาสติก (Wood-Plastic Composites: WPCs) ถือเป็นวัสดุทางเลือกที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นที่รวมข้อดีของทั้งไม้และพลาสติกเข้าด้วยกัน คือ มีความแข็งแรง ทนต่อความชื้น การกัดกร่อนจากแมลง และสภาพแวดล้อมภายนอก อีกทั้งยังสามารถใช้วัสดุเหลือใช้ เช่น ขี้เลื่อยหรือไม้บดร่วมกับพลาสติกรีไซเคิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดปริมาณขยะและส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า เทคโนโลยีการผลิต WPCs ทั่วไปประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ การผสม การขึ้นรูป และการหล่อเย็น (Toghyani, A., และคณะ 2020) โดยมักใช้กระบวนการหลอมพลาสติกและผสมกับเส้นใยไม้ผ่านเทคนิคการอัดรีด (Extrusion) หรือการอัดร้อน (Compression molding) ซึ่งให้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นและรูปร่างสม่ำเสมอ (Miki และคณะ, 2014) พลาสติกที่นิยมใช้ในงานวิจัย ได้แก่ HDPE, PP และ PVC โดย HDPE เป็นพลาสติกที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทนต่อสารเคมี และมีความเหนียวดี จึงเหมาะกับการใช้งานภายนอกอาคาร (Turku และคณะ, 2018) งานวิจัยในระดับนานาชาติหลายฉบับ ยังได้แสดงให้เห็นว่าลักษณะของเส้นใยไม้ เช่น ขนาด ความยาว และปริมาณที่ใช้ในการผสม มีผลต่อคุณสมบัติของ WPCs อย่างมีนัยสำคัญ (Faruk และคณะ, 2014)

แม้จะมีการศึกษาหลากหลายเกี่ยวกับการใช้วัสดุธรรมชาติในการผลิต WPCs แต่ยังพบช่องว่างด้านองค์ความรู้ โดยเฉพาะการเปรียบเทียบสมรรถนะของวัสดุผสมที่ได้จากขี้เลื่อยและไม้บดย่อยร่วมกับพลาสติกชนิด HDPE ที่ใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรม งานวิจัยที่มีอยู่ส่วนมากมุ่งเน้นไปที่การเลือกชนิดพลาสติกหรือเส้นใยไม้เพียงประเภทเดียว (Khamtree, S. และคณะ, 2024) โดยขาดการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างแหล่งเส้นใยที่มีลักษณะทางกายภาพต่างกัน เช่น ขี้เลื่อยซึ่งมีความละเอียดมากกว่า กับไม้บดย่อยที่มีขนาดใหญ่และหยาบกว่า ซึ่งอาจมีผลต่อการกระจายตัวในเนื้อพลาสติกและส่งผลต่อสมบัติของวัสดุผสมโดยรวม (Delviawan และคณะ, 2019; Kim และคณะ, 2009) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายหลักในการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมและกำหนดเงื่อนไข

กระบวนการผลิตด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยใช้ขี้เลื่อยและไม้บดย่อยเป็นวัสดุเส้นใย ร่วมกับพลาสติก HDPE ที่ผ่านการเตรียมให้มีขนาดไม่เกิน 7 มิลลิเมตร เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ได้ และหาแนวทางในการพัฒนาเป็นวัสดุผสมที่เหมาะสมต่อการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

หลังจากได้ผลิตวัสดุผสม WPCs แล้ว วัสดุทั้งหมดจะถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางฟิสิกส์ตามมาตรฐาน ASTM เพื่อประเมินคุณภาพและความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมก่อสร้างและตกแต่งอาคาร การทดสอบทางฟิสิกส์จะรวมถึงการวัดค่าความหนาแน่น (Density Testing) การดูดซึมน้ำ (Water Absorption Testing) ในขณะที่การทดสอบทางกลจะครอบคลุมความต้านทานแรงดึง (Tensile Testing) ความต้านทานแรงอัด (Compression Testing) และความต้านทานแรงดัด (Bending Testing) ตามเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM ที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล (Beg, M. D. H., และ Pickering, K. L., 2008, Zhang และคณะ, 2019) การดำเนินการทดสอบภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานจะช่วยให้สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุผสมกับข้อกำหนดของสถาบันพลาสติก (Raj, S. S., และคณะ, 2021) และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตวัสดุผสมในอนาคต โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ WPCs ที่ได้มาตรฐานและสามารถใช้งานได้จริงในบริบทของการพัฒนาอย่างยั่งยืน

แม้ว่าวัสดุผสม WPCs จะได้รับการพัฒนาอย่างกว้างขวางและมีการประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรมแล้วก็ตาม แต่งานวิจัยนี้จะสร้างองค์ความรู้ใหม่ในเชิงลึกเกี่ยวกับการเปรียบเทียบลักษณะเชิงกลและสมบัติทางฟิสิกส์ของ WPCs ที่ผลิตจากเส้นใยไม้สองชนิด คือ ขี้เลื่อยและไม้บดย่อย ซึ่งมีขนาด องค์ประกอบ และลักษณะโครงสร้างแตกต่างกัน เมื่อนำมาผสมกับพลาสติก HDPE ภายใต้กระบวนการผลิตแบบอัดร้อน โดยมุ่งวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนผสมและเงื่อนไขการผลิตต่อคุณสมบัติของวัสดุที่ได้ งานวิจัยนี้จึงมีส่วนในการเติมเต็มช่องว่างขององค์ความรู้ที่ยังไม่สมบูรณ์ เกี่ยวกับการศึกษาเปรียบเทียบวัสดุเส้นใยที่หลากหลายภายใต้กระบวนการผลิตเดียวกัน อีกทั้งยังช่วยกำหนดแนวทางการผลิต WPCs ให้ได้วัสดุที่มีคุณภาพตรงตามมาตรฐาน ASTM และเหมาะสมต่อการใช้งานจริง ต่อยอดสู่การใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างและออกแบบผลิตภัณฑ์ไม้เทียมในอนาคต

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาวัสดุผสมไม้และพลาสติกรีไซเคิลด้วยกระบวนการหลอมขึ้นรูปด้วยความร้อน และ 2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุผสมไม้และพลาสติกรีไซเคิล ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) สำหรับพลาสติกชนิด HDPE โดยผลิตวัสดุ WPCs ด้วยเส้นใยไม้ 2 ประเภท ได้แก่ ขี้เลื่อยหรือไม้บดย่อยร่วมกับพลาสติกรีไซเคิลชนิด HDPE และทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ รวมถึงสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงอัด และความต้านทานแรงดัด

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การพัฒนาวัสดุผสมไม้และพลาสติก

กระบวนการพัฒนาวัสดุผสม WPCs ใช้พลาสติก HDPE จากขวดน้ำดื่ม 20 ลิตรที่หมดอายุการใช้งาน ทำความสะอาด และบดย่อย เรียบร้อยแล้วเป็นวัตถุดิบหลัก ผสมเข้ากับเศษไม้ย่อยจากไม้ปาติเกิล (Particle Board) หรือขี้เลื่อยไม้สัก ในอัตราส่วนผสมที่กำหนด เพื่อเพิ่มความแข็งแรง มีลักษณะทางกายภาพและผิวสัมผัสคล้ายกับวัสดุธรรมชาติแก่วัสดุผสม และขึ้นรูปด้วยการหลอมละลายภายในแม่พิมพ์สแตนเลส

วัสดุผสม WPCs จากการวิจัยนี้ขึ้นรูปโดยการผสมพลาสติก HDPE ที่ผ่านการบดละเอียดให้มีขนาดเล็กกว่า 1.0 มิลลิเมตร ร่วมกับเศษไม้ย่อยที่มีขนาดเล็กกว่า 7.0 มิลลิเมตร หรือขี้เลื่อยที่มีขนาดเล็กกว่า 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนตามมาตรฐาน ASTM (ASTM Test Sieves) ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที เพื่อไล่ความชื้นที่อาจส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างวัสดุ เมื่อแห้งสนิทแล้วจึงนำมาผสมในอัตราส่วนร้อยละโดยมวลระหว่าง 20-50 wt% เพื่อเตรียมสำหรับกระบวนการหลอมขึ้นรูปเป็นวัสดุผสม WPCs ดังภาพที่ 1

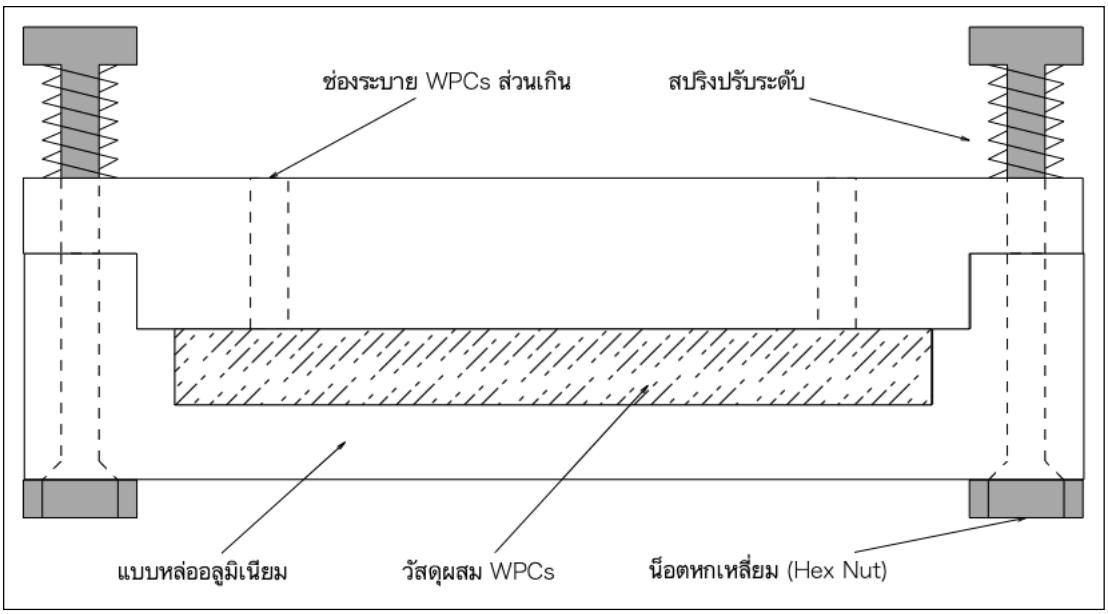
(ก) พลาสติก HDPE (ข) ไม้บดย่อย (ค) ขี้เลื่อย

ภาพที่ 1 วัตถุดิบสำหรับพัฒนาวัสดุผสมไม้และพลาสติก

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างวัสดุผสมเริ่มจากการชั่งวัตถุดิบตามอัตราส่วนผสมร้อยละโดยมวล ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1 โดยให้น้ำหนักรวมของวัสดุผสมทั้งหมดเท่ากับ 100 กรัมในแต่ละชุดทดลอง เพื่อควบคุมปริมาณและความสม่ำเสมอของตัวอย่างในการเปรียบเทียบผล หลังจากผสมวัสดุทั้งสองชนิดให้เข้ากันอย่างทั่วถึงแล้ว จึงนำไปบรรจุลงในแบบหล่ออลูมิเนียม (ภาพที่ 2) ตัวอย่างที่บรรจุในแบบหล่อจะถูกนำเข้าเตาอบ (Oven) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที เพื่อให้พลาสติกหลอมละลายและแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างของเส้นใยไม้ ทำให้เกิดการยึดติดกันของวัสดุผสมอย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากนั้นจะปล่อยให้วัสดุเย็นตัวลงในอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 40 นาที โดยยังคงอยู่ในแบบ เพื่อให้เกิดการแข็งตัวและคงรูปก่อนนำวัสดุออกไปทดสอบสมบัติต่อไป

ตารางที่ 1 รหัสตัวอย่างและอัตราส่วนผสมสำหรับทดสอบวัสดุ WPCs

รหัสตัวอย่าง	HDPE (wt%)	ไม้บดย่อย (wt%)	ขี้เลื่อย (wt%)
WS-20	80	20	0
WS-30	70	30	0
WS-40	60	40	0
WS-50	50	50	0
SD-20	80	0	20
SD-30	70	0	30
SD-40	60	0	40
SD-50	50	0	50



ภาพที่ 2 แบบหล่ออลูมิเนียมสำหรับพัฒนาวัสดุผสม WPCs

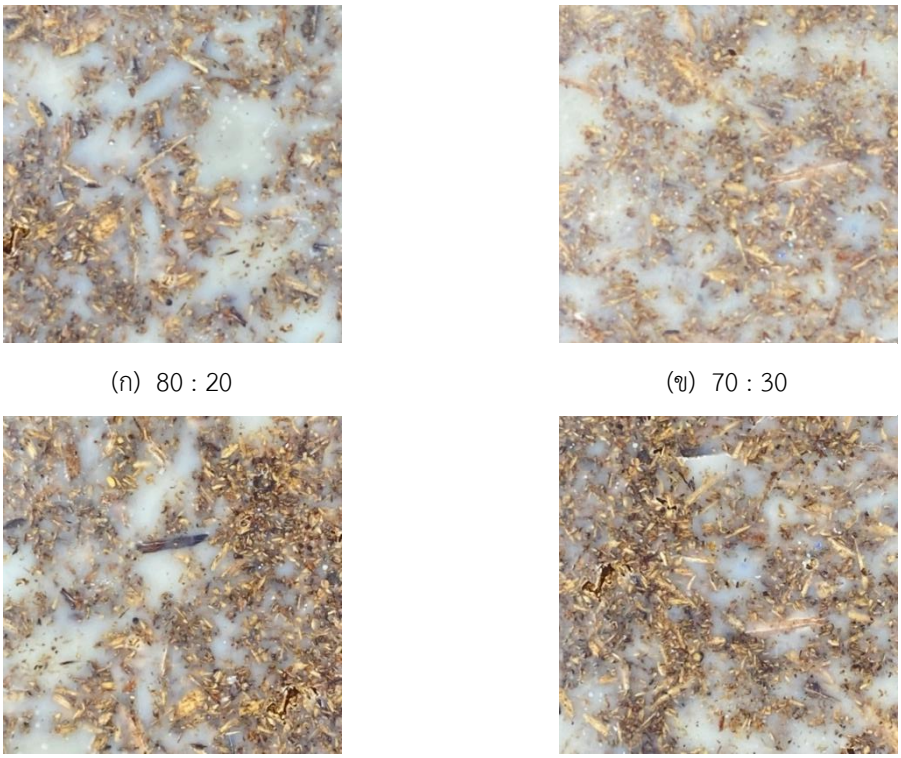
3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุ WPCs โดยขึ้นรูปตัวอย่างตามมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติของวัสดุผสมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Beg, M. D. H., และ Pickering, K. L., 2008; Raj, S. S., และคณะ, 2021) การทดสอบสมบัติทางกายภาพประกอบด้วย การทดสอบความหนาแน่นของวัสดุโดยใช้มาตรฐาน ASTM D792 ดำเนินการด้วยเครื่องวัดความหนาแน่น (Bulk Density Tester) เพื่อประเมินความแน่นของเนื้อวัสดุ และการทดสอบการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM D570 โดยใช้เครื่องทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption Tester) เพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานความชื้นของวัสดุผสม นอกจากนี้ยังได้ดำเนินการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ WPCs ได้แก่ การทดสอบความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 การทดสอบความต้านทานแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM D695 และการทดสอบความต้านทานแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยใช้เครื่องทดสอบวัสดุทางกล (Universal Testing Machine) ในแต่ละรายการทดสอบจะใช้ตัวอย่างจำนวน 5 ชิ้นต่อชนิดวัสดุ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ได้แก่ การหาค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) สำหรับเปรียบเทียบและประเมินสมรรถนะของวัสดุผสมในแต่ละอัตราส่วนผสมอย่างเป็นระบบและมีความน่าเชื่อถือ

4. ผลการวิจัย

4.1 วัสดุผสมไม้และพลาสติก

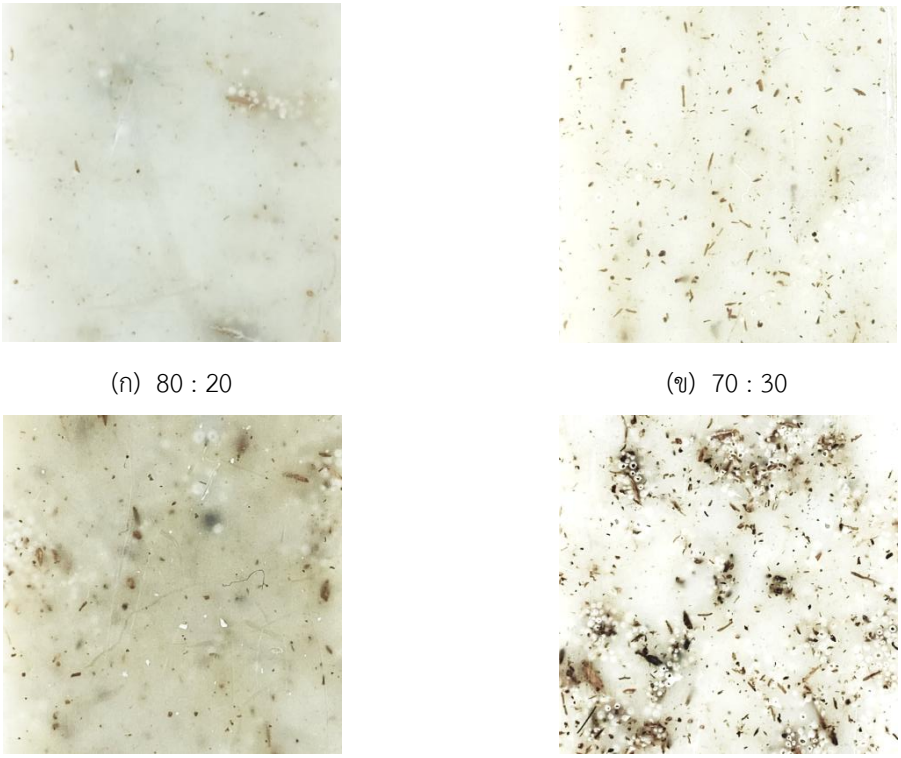
ผสมพลาสติก HDPE กับเศษไม้ย่อยหรือขี้เลื่อยในอัตราส่วน 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก บรรจุในแม่พิมพ์สแตนเลสเพื่อหลอมรวมที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส (Arnandha, Y., และคณะ, 2017) ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression Molding) ซึ่งเป็นอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก HDPE เป็นระยะเวลา 20 นาที ให้พลาสติกละลายจนหมด แล้วปล่อยให้เย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นระยะเวลา 40 นาที หลังจากปิดเตา เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุผสมสัมผัสอากาศ อันจะก่อให้เกิดฟองอากาศภายในและลดอุณหภูมิลงไม่เร็วจนเกินไป กระทั่งเนื้อวัสดุผสมเกิดรอยร้าวภายใน นำวัสดุผสม WPCs เมื่อออกจากแม่พิมพ์จะได้วัสดุผสมจากพลาสติก HDPE กับเศษไม้ย่อย ดังภาพที่ 3 และวัสดุผสมจากพลาสติก HDPE กับขี้เลื่อย ดังภาพที่ 4



(ก) 80 : 20 (ข) 70 : 30

(ค) 60 : 40 (ง) 50 : 50

ภาพที่ 3 วัสดุประกอบพลาสติกและไม้บดย่อยในอัตราส่วนต่าง ๆ (พลาสติก : ไม้บดย่อย)



(ก) 80 : 20 (ข) 70 : 30

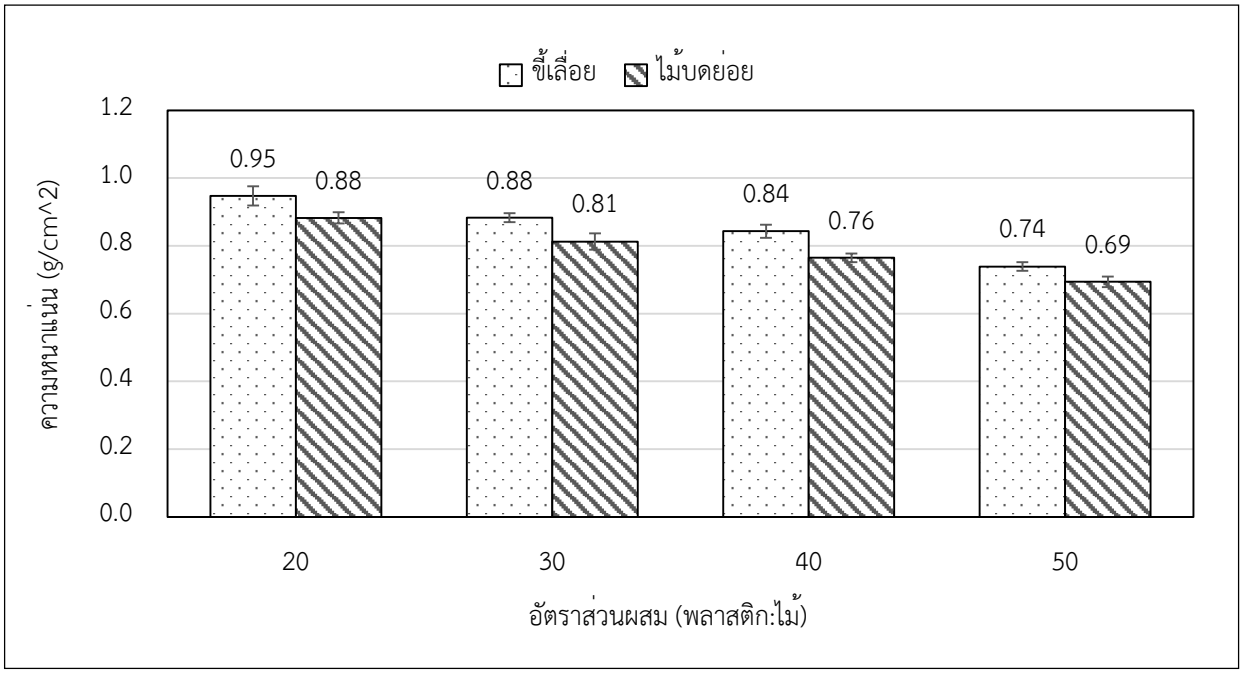
(ค) 60 : 40 (ง) 50 : 50

ภาพที่ 4 วัสดุประกอบพลาสติกและขี้เลื่อยในอัตราส่วนต่าง ๆ (พลาสติก : ขี้เลื่อย)

วัสดุผสมไม้และพลาสติกผสม WPCs ที่ได้จากเศษไม้ย่อยหรือขี้เลื่อยผสมกับพลาสติก HDPE มีความแตกต่างที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ วัสดุผสม WPCs ที่มีส่วนผสมจากเศษไม้ย่อย จะสังเกตเห็นเนื้อไม้บดได้อย่างเด่นชัดตลอดทั่วทั้งตัวอย่าง รวมถึงปรากฏช่องว่างบริเวณผิวที่เกิดจากเศษไม้ย่อยและพลาสติกหลอมรวมกันได้ยังไม่สมบูรณ์ในวัสดุผสม WPCs จากพลาสติก HDPE กับเศษไม้ย่อย อันอาจเป็นผลจากปัจจัยผสมระหว่าง คุณสมบัติวัสดุ และเทคนิคการขึ้นรูป โดยหากต้องการลดหรือป้องกันปัญหานี้ควรปรับปรุงการเตรียมวัตถุดิบ หรือการเติมสารช่วยยึดเกาะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหลอมรวม

4.2 สมบัติทางกายภาพ

ทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์ของวัสดุผสม WPCs ตามมาตรฐาน ASTM D792 (ความหนาแน่นสัมพัทธ์และความหนาแน่นของพลาสติกแข็ง) คือการวัดอัตราส่วนของมวลต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุ เปรียบเทียบกับความหนาแน่นของน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ได้ผลดังภาพที่ 5

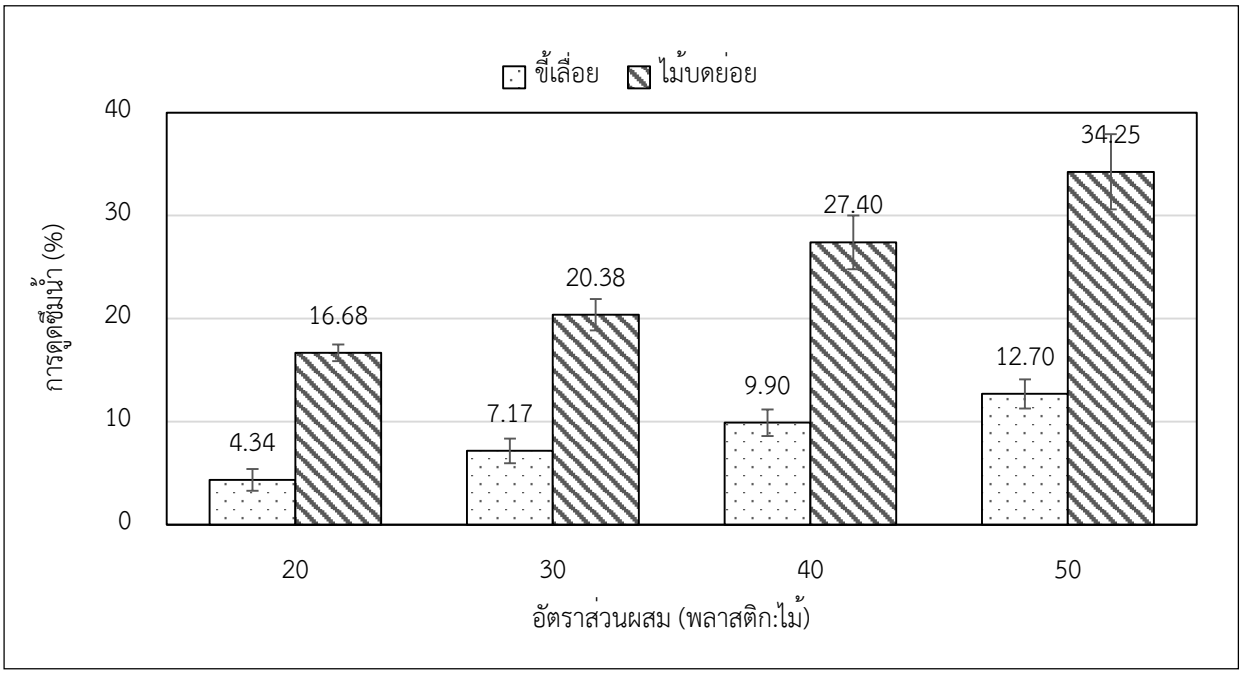


ภาพที่ 5 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของวัสดุผสม WPCs ตามมาตรฐาน ASTM D792

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างไม้และพลาสติกกับความหนาแน่นของวัสดุผสมที่ใช้เศษไม้ย่อยหรือขี้เลื่อยเป็นส่วนผสมแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนผสมเศษไม้ย่อย 20, 30, 40 และ 50 wt% วัสดุผสมมีความหนาแน่น 0.88, 0.81, 0.76 และ 0.69 g/cm^2 ตามลำดับ ส่วนวัสดุผสมขี้เลื่อยมีความหนาแน่น 0.95, 0.88, 0.84 และ 0.74 g/cm^2 ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Arnandha, Y., และคณะ (2017) ที่มีความหนาแน่น 0.86 g/cm^2

ความหนาแน่นเฉลี่ยของวัสดุผสมจากเศษไม้ย่อยกับพลาสติกมีความหนาแน่นรวมจะมีค่าลดลงผกผันกับปริมาณมวลไม้ที่เพิ่มขึ้น โดยวัสดุผสมจากขี้เลื่อยจะมีค่าความหนาแน่นมากกว่าวัสดุผสมจากเศษไม้ย่อย แสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคไม้เป็นปัจจัยหลักที่กำหนดความหนาแน่นของตัวอย่าง WPCs ที่ขนาดอนุภาคไม้มีขนาดเล็กกว่าจะทำให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคภายในวัสดุผสมน้อยกว่า นอกจากนี้ จากปัจจัยความหนาแน่นดั้งเดิมของไม้ที่มีค่าน้อยกว่าพลาสติก ส่งผลให้วัสดุผสมที่มีปริมาณไม้เพิ่มมากขึ้นจึงมีค่าความหนาแน่นรวมลดลง (Li, L., และคณะ, 2025)

ทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุผสม WPCs ตามมาตรฐาน ASTM D570 (การดูดซึมน้ำของพลาสติกแข็ง) เพื่อกำหนดอัตราสัมพัทธ์ของการดูดซึมน้ำโดยพลาสติกเมื่อแช่ในน้ำ ภายหลังจากการแช่น้ำอุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ได้ผลดังภาพที่ 6



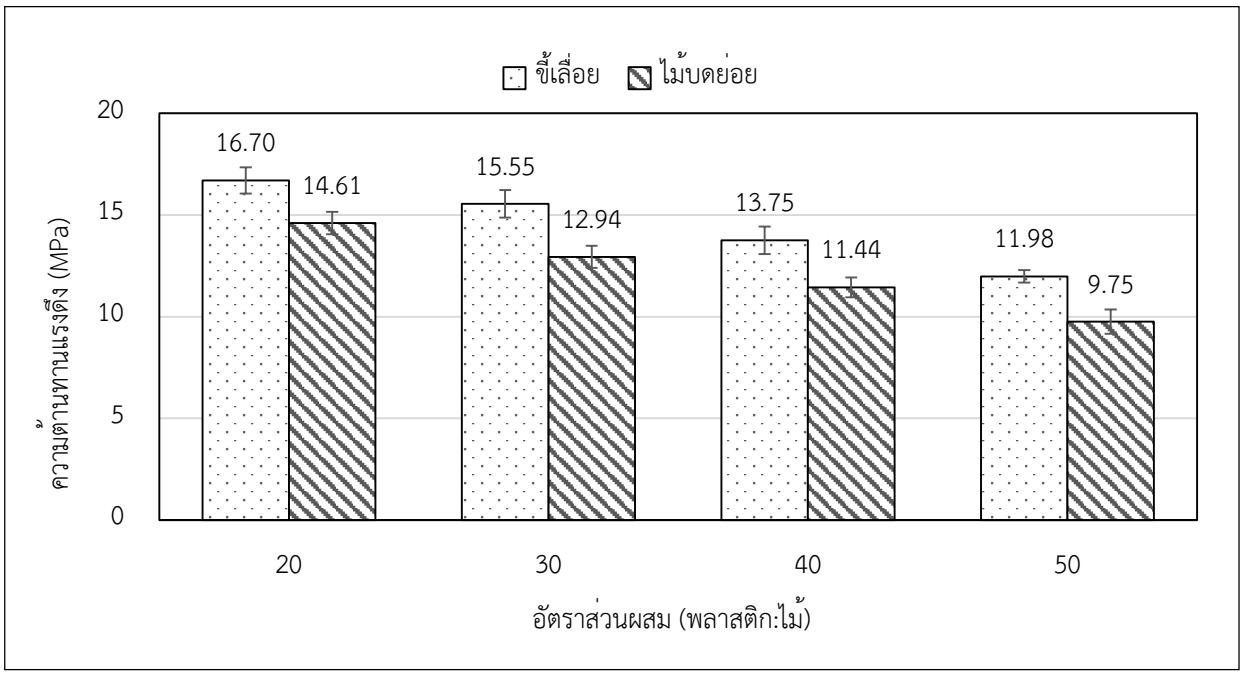
ภาพที่ 6 การดูดซึมน้ำของวัสดุผสม WPCs ตามมาตรฐาน ASTM D570

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างไม้และพลาสติกกับความหนาแน่นของวัสดุผสมที่ใช้เศษไม้ย่อยหรือขี้เลื่อยเป็นส่วนผสมแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนผสมเศษไม้ย่อย 20, 30, 40 และ 50 wt% วัสดุผสมมีการดูดซึมน้ำ 16.68, 20.38, 27.40 และ 34.25% ตามลำดับ ส่วนวัสดุผสมขี้เลื่อยมีการดูดซึมน้ำ 4.34, 7.17, 9.90 และ 12.70% ตามลำดับ ต่ำกว่าผลการวิจัยของ Arnandha, Y., และคณะ (2017) ที่มีค่าการดูดซึมน้ำ 19.2-26.36%

ความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุผสมเมื่อแช่น้ำเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งได้ผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ วัสดุผสมจากเศษไม้ย่อยกับแผ่นพลาสติกจะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าวัสดุผสมจากขี้เลื่อยกับพลาสติก เนื่องจากขนาดอนุภาคของเศษไม้ย่อยมีขนาดใหญ่มากกว่าขี้เลื่อย ส่งผลให้เศษไม้ย่อยโผล่พ้นขึ้นมาบนพื้นผิวของวัสดุผสม อันเป็นผลทำให้น้ำสามารถซึมเข้าสู่เนื้อวัสดุผสม WPCs (Zhou, H., 2022) ที่ทำขึ้นจากเศษไม้ย่อยกับพลาสติกได้ แสดงลักษณะพื้นผิวของวัสดุผสมจากเศษไม้ย่อย

4.3 สมบัติเชิงกล

ทดสอบความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสม WPCs ตามมาตรฐาน ASTM D638 (ความต้านทานแรงดึงจำเพาะของพลาสติกแข็ง) เป็นการวัดแรงที่จำเป็นในการทำให้ชิ้นทดสอบพลาสติกแตก และชิ้นงานทดสอบยืดหรือยืดออกเป็นระยะจนถึงจุดแตกหักเพื่อหาความเค้นและความเครียดที่จุดแตกหักของชิ้นงานทดสอบ ได้ผลดังภาพที่ 7

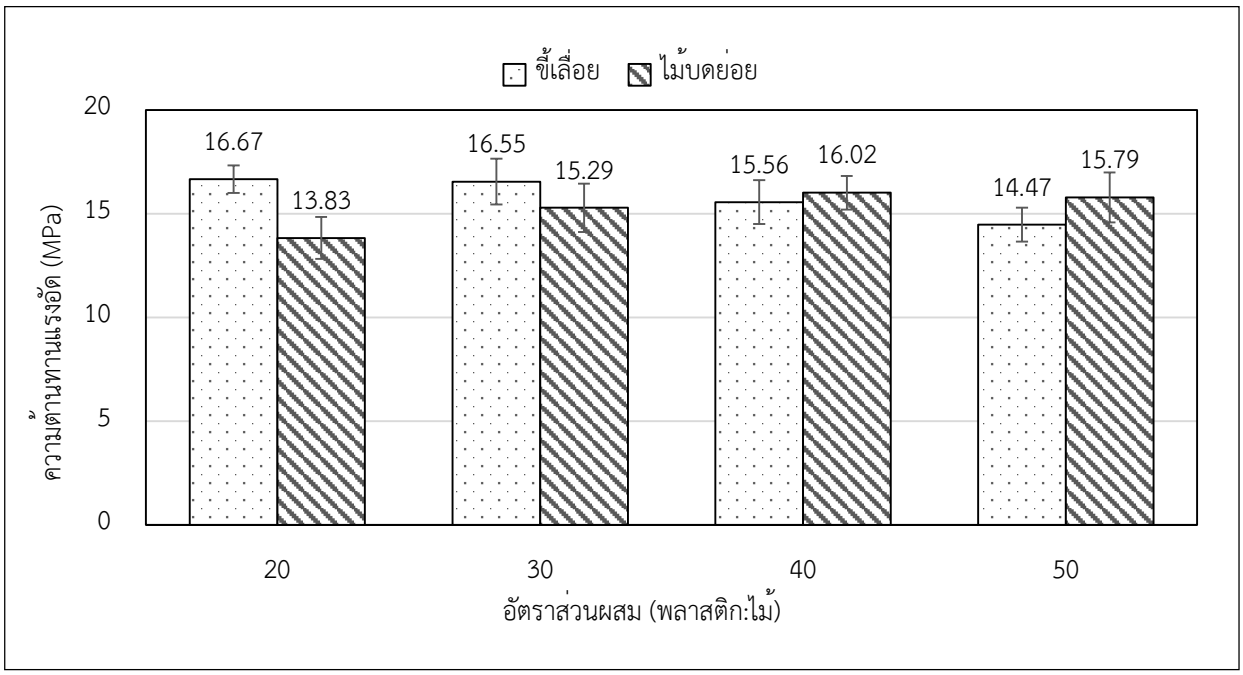


ภาพที่ 7 ความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสม WPCs ตามมาตรฐาน ASTM D638

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างไม้และพลาสติกกับความแข็งแรงต่อความต้านทานแรงดึงจำเพาะของวัสดุผสมที่ใช้เศษไม้ย่อยหรือขี้เลื่อยเป็นส่วนผสมแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนผสมเศษไม้ย่อย 20, 30, 40 และ 50 wt% วัสดุผสมมีความแข็งแรงต่อความต้านทานแรงดึงจำเพาะ 14.61, 12.94, 11.44 และ 9.75 MPa ตามลำดับ ส่วนวัสดุผสมขี้เลื่อยมีความแข็งแรงต่อความต้านทานแรงดึงจำเพาะ 16.70, 15.55, 13.75 และ 11.98 MPa ตามลำดับ สูงกว่าผลการวิจัยของ Arnandha, Y., และคณะ (2017) ที่มีผลการทดสอบระหว่าง 5.98-10.33 MPa

ความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM สำหรับพลาสติกชนิด HDPE ที่ต้องไม่น้อยกว่า 8 MPa โดยวัสดุผสมทั้งสองมีค่าความต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกันแตกต่างกันเฉลี่ยเพียง 12% ถึง 18% และมีค่าความต้านทานแรงดึงแตกต่างกันสำหรับปริมาณสัดส่วนผสมมากที่สุดและน้อยที่สุดสำหรับขี้เลื่อยและเศษไม้ย่อยเพียง 28% และ 33% ตามลำดับ ทั้งนี้ ความต้านทานแรงดึงที่แตกต่างกันเกิดจากขนาดของอนุภาคไม้ ที่มีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าพลาสติก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Friedrich, D. (2022) ว่าเศษไม้ย่อยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ตั้งแต่ 0.5 ถึง 7.0 มิลลิเมตร จึงมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 0.2 มิลลิเมตร

ทดสอบความต้านทานแรงอัดของวัสดุผสม WPCs ตามมาตรฐาน ASTM D695 (ความต้านทานแรงอัดของพลาสติกแข็ง) เป็นวิธีการทดสอบที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติการอัดของวัสดุแข็งโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกในความสามารถในการทนความเค้นจากแรงอัด ได้ผลดังภาพที่ 8

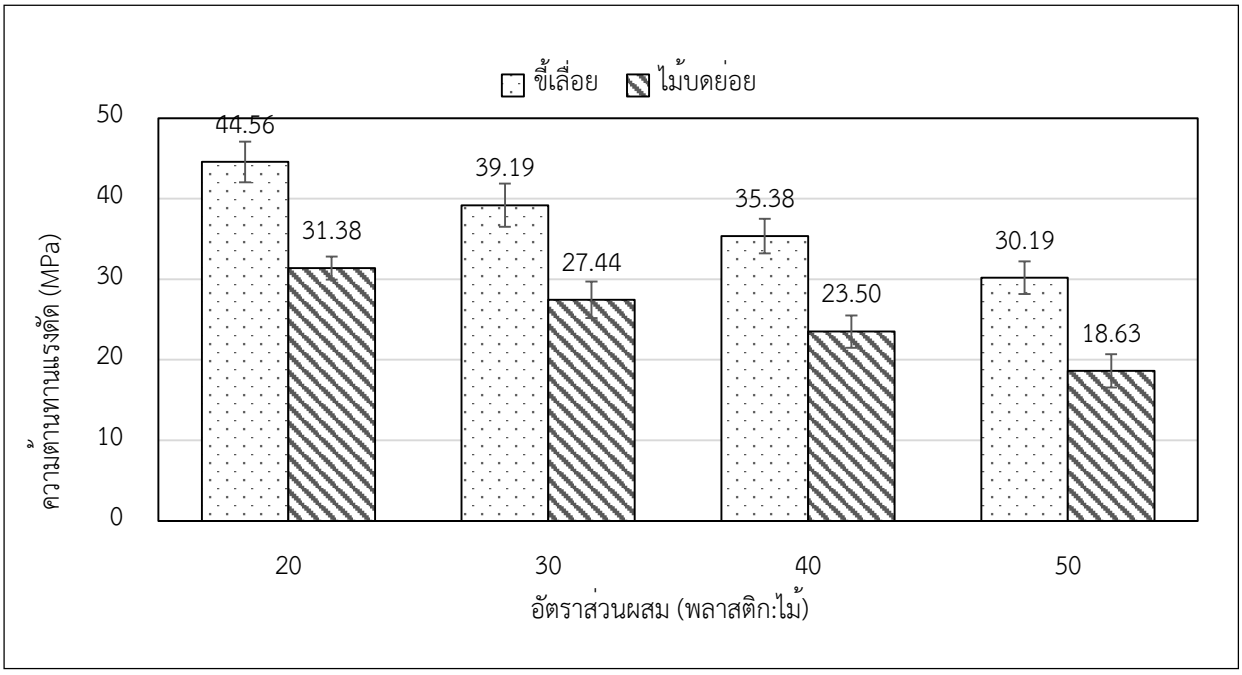


ภาพที่ 8 ความต้านทานแรงอัดของวัสดุผสม WPCs ตามมาตรฐาน ASTM D695

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างไม้และพลาสติกกับความแข็งแรงต่อความต้านทานแรงอัดของวัสดุผสมที่ใช้เศษไม้ย่อยหรือขี้เลื่อยเป็นส่วนผสมแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนผสมเศษไม้ย่อย 20, 30, 40 และ 50 wt% วัสดุผสมมีความแข็งแรงต่อความต้านทานแรงอัด 13.83, 15.29, 16.02 และ 15.79 MPa ตามลำดับ ส่วนวัสดุผสมขี้เลื่อยมีความแข็งแรงต่อความต้านทานแรงอัด 16.67, 16.55, 15.56 และ 14.47 MPa ตามลำดับ

จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเศษไม้ย่อยในวัสดุผสม WPCs ตั้งแต่ 20% ถึง 40% โดยน้ำหนัก ความสามารถในการต้านทานแรงอัดของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอธิบายได้ว่า เศษไม้ย่อยที่มีขนาดใหญ่กว่าขี้เลื่อยสามารถทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรับแรง (Reinforcement) ได้ดีขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยยังไม่รบกวนความสามารถในการยึดเกาะของพลาสติก HDPE มากนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อสัดส่วนถึง 50% แรงอัดเริ่มลดลงเล็กน้อย สะท้อนว่าอาจเริ่มเกิดการแทรกตัวของพลาสติกได้ไม่ทั่วถึง จนทำให้ยึดเศษไม้ได้ไม่แน่นหนา (Ratanawilai, T., และคณะ, 2023) ในทางกลับกัน วัสดุผสมที่ใช้ขี้เลื่อยซึ่งมีขนาดเล็กและพื้นที่ผิวสูง เมื่อผสมในปริมาณมากขึ้นจะเกิดการกระจายตัวทั่วเนื้อพลาสติกมากเกินไป ส่งผลให้พลาสติกไม่สามารถหลอมครอบคลุมผิวของขี้เลื่อยได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงภายในวัสดุ และลดการยึดเหนี่ยวระหว่างขี้เลื่อยกับพลาสติก จึงเป็นเหตุให้ความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุผสมลดลงตามปริมาณขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้น

ทดสอบความต้านทานแรงดัดของวัสดุผสม WPCs ตามมาตรฐาน ASTM D790 (ความต้านทานแรงดัดของพลาสติกแข็ง) ครอบคลุมถึงการกำหนดคุณสมบัติความต้านทานแรงดัดของพลาสติกที่ไม่เสริมแรงและพลาสติกเสริมแรง ซึ่งรวมถึงคอมโพสิตโมดูลัสในรูปแบบของแท่งสี่เหลี่ยมที่ตัดโดยตรงจากแผ่นขึ้นรูปหรือรูปทรงที่ขึ้นรูป ได้ผลดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความต้านทานแรงดัดของวัสดุผสม WPCs ตามมาตรฐาน ASTM D790

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างไม้และพลาสติกกับความต้านทานแรงดัดของวัสดุผสมที่ใช้เศษไม้ย่อยหรือขี้เลื่อยเป็นส่วนผสมแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนผสมเศษไม้ย่อย 20, 30, 40 และ 50 wt% วัสดุผสมมีความต้านทานแรงดัด 31.38, 27.44, 23.50 และ 18.63 MPa ตามลำดับ ส่วนวัสดุผสมขี้เลื่อย มีความต้านทานแรงดัด 44.56, 39.19, 35.38 และ 30.19 MPa ตามลำดับ สูงกว่าผลการวิจัยของ Arnandha, Y., และคณะ (2017) ที่ได้ผลการทดสอบระหว่าง 14.4-24.9 MPa

ความต้านทานแรงดัดของวัสดุผสมลดลงตามอัตราส่วนของไม้ต่อพลาสติกที่เพิ่มขึ้น และวัสดุผสมที่ใช้ขี้เลื่อยมีความต้านทานแรงดัดสูงกว่าวัสดุผสมที่ใช้เศษไม้ย่อยในทุกอัตราส่วนของไม้ต่อพลาสติก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เส้นใยพืชที่แทรกอยู่ในเนื้อวัสดุผสมมีความยืดหยุ่นต่ำและมีแนวโน้มที่จะแตกหักได้ง่ายเมื่อรับแรงดัด ส่งผลให้การถ่ายโอนแรงระหว่างอนุภาคไม้กับพลาสติกมีประสิทธิภาพลดลง โดยเฉพาะเมื่อมีปริมาณเส้นใยมากขึ้น จึงส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงดัดของวัสดุผสมอย่างมีนัยสำคัญ (Bouafif, H., และคณะ, 2009)

ทั้งนี้ วัสดุผสม WPCs ที่ผสมเศษไม้บดที่มีขนาดใหญ่มีแนวโน้มให้สมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่าเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างไม้กับพลาสติกมีน้อย ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสองวัสดุต่ำ พลาสติกหลอมจึงไม่สามารถแทรกซึมและยึดเกาะกับผิวไม้ได้ทั่วถึง ทำให้เกิดโพรงอากาศหรือช่องว่างในเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นจุดอ่อนทางโครงสร้าง อีกทั้งเศษไม้ขนาดใหญ่ยังมีแนวโน้มกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในเนื้อวัสดุผสม ส่งผลให้เกิดความไม่ต่อเนื่องภายในเนื้อวัสดุ และทำให้ค่าความต้านทานแรงดึง แรงอัด และแรงดัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับวัสดุที่ผสมด้วยขี้เลื่อยที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยพบว่าวัสดุผสม WPCs ที่ผลิตจากพลาสติก HDPE กับเศษไม้ย่อยหรือขี้เลื่อย โดยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดร้อนให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน ตามลักษณะและอัตราส่วนของอนุภาคไม้ที่ใช้ โดยเฉพาะวัสดุที่มีส่วนผสมของเศษไม้ย่อย ซึ่งมีแนวโน้มเกิดช่องว่างภายในเนื้อวัสดุเนื่องจากการหลอมรวมกับพลาสติกยังไม่สมบูรณ์ ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน ขณะที่วัสดุผสมที่ใช้ขี้เลื่อย ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กและกระจายตัวดี ให้สมบัติที่มีความสม่ำเสมอและเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์มากกว่า

จากข้อค้นพบดังกล่าว ผู้วิจัยเห็นว่าการปรับปรุงสมบัติของ WPCs ควรเน้นการเลือกใช้วัสดุไม้ที่มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอมากขึ้น เพื่อเพิ่มการยึดเกาะกับพลาสติกและลดการเกิดช่องว่างภายในวัสดุ นอกจากนี้ควรพิจารณาเติมสารช่วยประสานและปรับอัตราส่วนผสมให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานเป้าหมาย ซึ่งจะช่วยให้วัสดุ WPCs มีคุณภาพดีขึ้น สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในเชิงอุตสาหกรรมหรือการประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์ในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับจัดสรรงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ปีงบประมาณ 2567 เพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund, FF) ตามแผนงานการสร้างมหาวิทยาลัยสีเขียวและคาร์บอนต่ำของมหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา สำหรับการอำนวยความสะดวกในระหว่างการดำเนินการวิจัย สาขาวิชาฟิสิกส์ และสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ในการอนุเคราะห์สถานที่สำหรับจัดทำห้องปฏิบัติการวิจัย ระหว่างการดำเนินงานกระทั่งงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

7. เอกสารอ้างอิง

Arnandha, Y., Satyarno, I., Awaludin, A., Irawati, I. S., Prasetya, Y., Prayitno, D. A., Winata, D. C., Satrio, M. H., & Amalia, A. (2017). Physical and mechanical properties of WPC board from sengon sawdust and recycled HDPE plastic. *Procedia Engineering, 171*, 695-704. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.412

Beg, M. D. H., & Pickering, K. L. (2008). Mechanical performance of Kraft fibre reinforced polypropylene composites: Influence of fibre length, fibre beating and hygrothermal ageing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 39*(11), 1748-1755. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.08.003

Bouafif, H., Koubaa, A., Perré, P., & Cloutier, A. (2009). Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40*(12), 1975-1981. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.06.003

Delviawan, A., Kojima, Y., Kobori, H., Suzuki, S., Aoki, K., & Ogoe, S. (2019). The effect of wood particle size distribution on the mechanical properties of wood–plastic composite. *Journal of Wood Science, 65*. Article 67. https://doi.org/10.1186/s10086-019-1846-9

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., & Sain, M. (2014). Progress report on natural fiber reinforced composites. *Macromolecular Materials and Engineering, 299*(1), 9-26. https://doi.org/10.1002/mame.201300008

Friedrich, D. (2022). Success factors of wood-plastic composites (WPC) as sustainable packaging material: A cross-sector expert study. *Sustainable Production and Consumption, 30*, 506-517. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.030

Khamtree, S., Srivabut, C., Khamtree, S., & Kaewmai, R. (2024). Effects of natural fiber waste, content, and coupling agent on the physical and mechanical properties of wood species–plastic composites as green materials. *Fibers and Polymers, 25*(4), 1391-1402. https://doi.org/10.1007/s12221-024-00493-9

Kim, J.-W., Harper, D. P., & Taylor, A. M. (2009). Effect of wood species on the mechanical and thermal properties of wood-plastic composites. *Journal of Applied Polymer Science, 112*(3), 1378-1385. https://doi.org/10.1002/app.29522

Li, L., Zuo, J., Chang, R., & Du, L. (2025). Converting plastic waste into wood-plastic composite products – A practical environmental impacts assessment using primary data. *Resources, Conservation and Recycling, 218*, Article 108267. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108267

Miki, T., Seki, M., Tanaka, S., Sobue, N., Shigematsu, I., & Kanayama, K. (2014). Preparation of wood plastic composite sheets by lateral extrusion of solid woods using their fluidity. *Procedia Engineering, 81*, 580-585. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.043

Raj, S. S., Michailovich, K. A., Subramanian, K., Sathiamoorthyi, S., & Kandasamy, K. T. (2021). Philosophy of selecting ASTM standards for mechanical characterization of polymers and polymer composites. *Materiale Plastice, 58*(3), 247-256. https://doi.org/10.37358/mp.21.3.5523

Ratanawilai, T., Leelasilapasart, V., Srivabut, C., & Ratanawilai, S. (2023). Lifetime prediction under dead-load long-term creep test and models analysis of wood-plastic composites for building materials. *Plastics, Rubber and Composites: Macromolecular Engineering, 52*(9-10), 506-515. https://doi.org/10.1080/14658011.2023.2232666

Toghyani, A., Matthews, S., & Varis, J. (2020). Forming challenges of extruded wood plastic composite products in a post-production process. *Procedia CIRP, 93*, 502-507. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.156

Turku, I., Kärki, T., & Puurtinen, A. (2018). Durability of wood plastic composites manufactured from recycled plastic. *Heliyon, 4*(3), Article e00559. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00559

Zhang, X., Zhang, J., & Wang, R. (2019). Thermal and mechanical behavior of wood plastic composites by addition of graphene nanoplatelets. *Polymers, 11*(8), Article 1365. https://doi.org/10.3390/polym11081365

Zhou, H., Li, W., Hao, X., Zong, G., Yi, X., Xu, J., Ou, R., & Wang, Q. (2022). Recycling end-of-life WPC products into ultra-high-filled, high-performance wood fiber/polyethylene composites: A sustainable strategy for clean and cyclic processing in the WPC industry. *Journal of Materials Research and Technology, 18*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.091

วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

GradFace: Attendance Registration System Using Face Recognition for The Graduate School, Kasetsart University

Sarach Tuomchomtam[1,2*], Suttipong Meuntaboot[2], Passapong Jittavanit[3] and Sornchai Laksanapeeti[2]

[1] Human-Centered AI Laboratory (KU-HCAI)
[2] Department of Computer Science, Faculty of Science, Kasetsart University
[3] The Graduate School, Kasetsart University

Abstract

Traditional attendance methods at The Graduate School, Kasetsart University can be time-consuming and susceptible to errors, while barcode systems have hardware needs and are susceptible to impersonation. To address these issues, we propose GradFace, an automated attendance system utilizing computer vision. GradFace uses a Gradio interface, employs the YOLOv11n-face model for real-time face detection, and leverages AWS Rekognition for accurate face identification. The system supports indexing faces from images linked to existing data and facilitates live registration via webcam. Experimental deployment during university events demonstrated stable performance and accurate face recognition across varied conditions (e.g., glasses, hairstyles, image quality), and positive feedback regarding convenience from 273 attendees. While network dependency and hardware requirements were noted as areas for improvement, GradFace successfully streamlined the registration process, generating attendance records and timestamped images with a latency of 1-2 seconds. Future work aims to enhance scalability, improve data management, explore local recognition.

Keywords: Face Recognition, Attendance Registration, Computer Vision, AWS Rekognition, YOLO

** Corresponding author: sarach.t@ku.th*

***Received**: 17 June 2025* ***Revised:** 26 August 2025* ***Accepted**: 11 September 2025*

1. Introduction

The Graduate School, Kasetsart University serves as a central hub for postgraduate education, regularly hosting a multitude of academic events, seminars, workshops, and orientations. These events often attract a large number of attendees, necessitating an efficient and reliable method for attendance registration. Traditionally, the Graduate School has relied on manual registration processes, typically involving attendees signing paper-based lists. However, this method is inherently inefficient, requiring significant workforce allocation for preparation, supervision, and data entry, consuming valuable time during event check-in, and being susceptible to human error or illegible entries. The increasing scale of educational institutions has made these methods increasingly inefficient.

In an attempt to improve efficiency and address the limitations of manual methods, the Graduate School explored various automated attendance systems. Quantitative data from prior manual registration processes reveals that an average event with 100 attendees often resulted in queues and data entry taking minutes, with errors from illegible handwriting or missed entries. Barcode and QR code systems, while faster, still required scanner deployment and were susceptible to proxy attendance, highlighting the need for a more robust and efficient

Existing research showcases various approaches to building such systems. System frameworks like Gradio and Streamlit facilitate the development of cross-platform applications with centralized server logic and accessible client interfaces (Abid et al., 2019). For the core task of face detection, techniques have evolved from traditional image processing methods like Haar cascades (Viola & Jones, 2001) to more robust deep learning models such as the You Only Look Once (YOLO) family (Redmon et al., 2016), which offer improved accuracy and speed. Other face detection algorithms include Multi-Task Cascaded Convolutional Neural Network (MTCNN) (Zhang et al., 2016), known for high accuracy.

Similarly, face recognition has progressed from methods like Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) (Lowe, 2004) to sophisticated deep learning models that generate unique face embeddings for comparison, as well as powerful cloud-based services like AWS Rekognition (Indla, 2021). Deep learning models, particularly Convolutional Neural Networks (CNNs), have revolutionized face recognition by learning highly discriminative face embeddings, with models like InsightFace (Ren et al., 2023) achieving state-of-the-art performance and robustness. Online face recognition services, such as AWS Rekognition, provide pre-trained functionalities accessible via APIs, offering ease of use, scalability, and cost-effectiveness, though requiring careful consideration of privacy. Leveraging these technological advancements, we identified an opportunity to develop a more efficient, reliable, and user-friendly attendance system tailored to the needs of the Graduate School.

2. Objectives

This paper introduces GradFace, an automated attendance registration system designed and implemented specifically for the Graduate School at Kasetsart University. The primary goal is to streamline the event registration process by replacing manual and semi-automated methods with a robust face recognition solution. Explicit consent for data usage, including facial images and associated metadata, was obtained from all participating individuals prior to system deployment and data collection. Our contributions are as follows:

1. We developed an attendance registration system integrating a user-friendly web interface (Gradio), a real-time face detection module (YOLOv11n-face), and a cloud-based face recognition service (AWS Rekognition).

2. The system is designed to work with minimally modified existing operational data formats (Excel spreadsheets for metadata) and standard image files (PNG, JPG, WEBP) for facial data, ensuring ease of adoption.

3. We deployed GradFace in actual event scenarios at the Graduate School, Kasetsart University, evaluated its performance under operational conditions, and gathered feedback from both staff and attendees.

We classify GradFace as a face recognition system, as its primary function is to identify known individuals from a pre-indexed database, rather than simply verifying a one-to-one match. The choice of YOLOv11n-face for detection was based on its balance of speed and accuracy suitable for real-time webcam processing on the target hardware, while AWS Rekognition was selected for its proven accuracy, scalability, and ease of integration, minimizing local computational overhead for the recognition task.

3. Methods

3.1 System Architecture

GradFace is designed as a server-client application built primarily in Python, comprising several core components working together (see Figure 1).

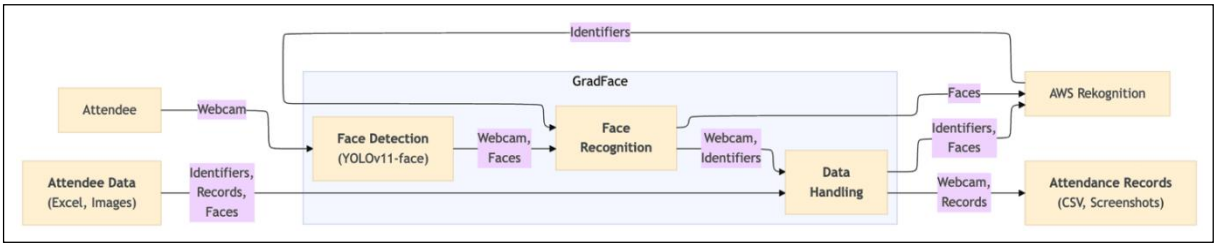


Figure 1 Overview of the GradFace system architecture, illustrating the flow of data and interactions between the attendee, server components, attendee data, and AWS Rekognition.

A key element is the system framework provided by Gradio, which delivers the web-based user interface, enabling cross-platform access via a browser and handling user interactions, data uploads, and real-time video streaming. Another crucial part involves data preparation and indexing, where the system processes attendee metadata from an Excel file and corresponding facial images, subsequently indexing the faces using AWS Rekognition to associate each unique identifier with specific facial features. For real-time operation, the system employs a face detection module based on YOLOv11n-face to analyze the live webcam feed and locate faces. Following detection, a face recognition component utilizes AWS Rekognition to compare the detected faces against the indexed collection and identify registered individuals. Lastly, the registration and output component handle the recording of attendance, displays relevant attendee information on the interface, and generates essential output files, including a Comma-Separated Values (CSV) log and timestamped screenshots for verification. The system also incorporates configurable parameters, such as detection sensitivity thresholds and recognition frequency, allowing for operational adjustments to optimize performance based on specific event requirements.

3.2 Interface Design

The user interface, built with Gradio (Abid et al., 2019), is structured for clarity and ease of use, organized into two main functional tabs, as shown in Figure 2 and Figure 3.

Register Tab: This tab (Figure 2) serves as the primary interface for conducting live attendance registration during events. This tab features a live webcam feed display, which is limited to an 800x600 resolution to maintain stable performance using WebRTC technology (Sredojev et al., 2015). Adjacent to the feed are controls allowing staff to adjust the sensitivity range for face detection. Users can also toggle the face recognition process on or off using a dedicated switch. A specific area within this tab is designated for displaying the photo and pertinent information, such as name and faculty, of successfully recognized attendees. For finalizing attendance, a manual "Register" button allows for staff confirmation, while an optional toggle switch enables automatic registration immediately upon positive identification. The system ensures that output files, namely the CSV log and webcam screenshots, are updated in real-time whenever a registration occurs.

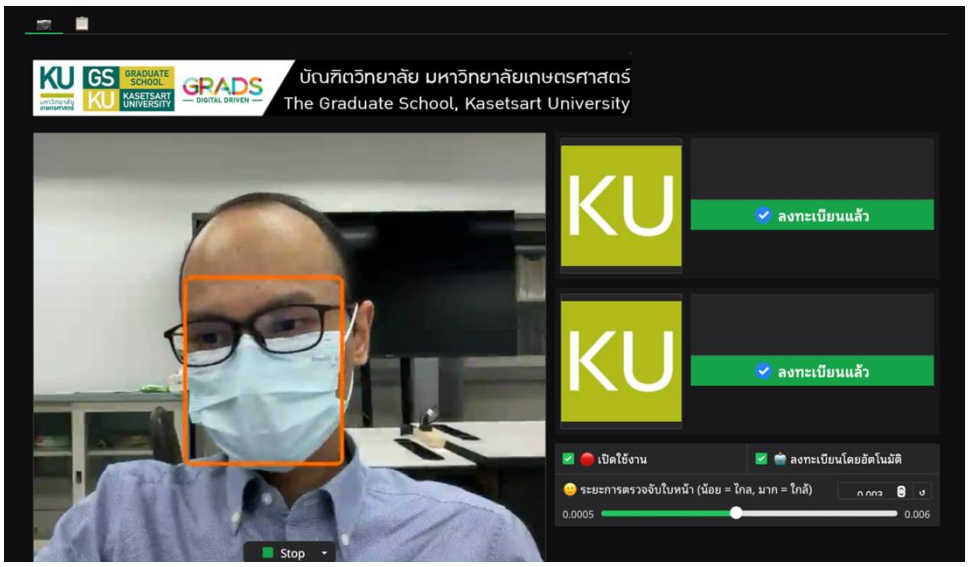


Figure 2 The Register Tab displays the live webcam feed, detection controls, and information for recognized attendees.

Upload Tab: This tab (Figure 3) is dedicated to data management tasks. Within this tab, users find controls for initiating the loading of metadata and face images, guided by paths specified in a configuration file. It also provides functionality for resetting the AWS Rekognition collection, effectively clearing all indexed faces, and for re-indexing faces from the currently loaded images into the AWS collection. These data handling processes are designed to be automated based on the predefined configuration settings.

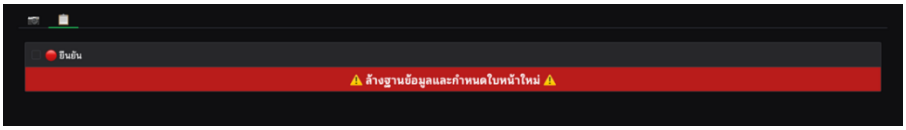


Figure 3 The Upload Tab provides controls for loading metadata and images and managing AWS Rekognition indexing.

3.3 Data Handling

To ensure seamless integration with existing operational procedures, GradFace is designed to utilize data formats already familiar to the Graduate School staff, necessitating only minimal adjustments. Attendee metadata is sourced from an Excel file, which contains essential information including a unique identifier (specifically constructed using the format FIRSTNAME_LASTNAME_NUM, where NUM is the image number), the individual's name prefix, faculty affiliation, and potentially other relevant details as required (Table 1).

Table 1 Key columns used for attendee metadata in the Excel file.

Column Name (Thai)	Description
คำนำหน้า	Prename/title (English and Thai)
ชื่อ	First name (English and Thai)
สกุล	Surname/last name (English and Thai)
คณะ	Faculty name (English and Thai)
สาขาวิชา	Major or field of study (Thai)
รหัสนิสิต	Student ID (or equivalent identifier)
ประเภท	Type (e.g., staff type, student type)

Complementing the metadata, face images are provided as individual files, with support for common formats like PNG, JPG, and WEBP. A critical requirement is that each image filename must precisely match the unique identifier found in the metadata file to establish the correct link. The system supports the use of multiple images per person, which enhances the robustness of the face recognition process. The indexing procedure is initiated from the Upload Tab during the data loading process. The system programmatically iterates through the metadata records and their associated images. For each person, their face image(s) are uploaded to the AWS Rekognition service and indexed using the corresponding unique identifier. This operation effectively builds a searchable collection of known faces within the AWS cloud service, ready for comparison during the live registration phase.

Recognizing the sensitive nature of biometric data, GradFace incorporates several technical privacy and security measures. All facial images are encrypted at rest using AWS S3 encryption standards (server-side encryption with S3-managed keys), and access to the AWS Rekognition collection is secured via AWS Identity and Access Management (IAM) roles with the principle of least privilege. Explicit consent for data usage, including facial images and associated metadata, was obtained from all participating individuals prior to system deployment and data collection via their student admission forms. This approach ensures that sensitive data is retained responsibly within the system during the events.

3.4 Face Detection

Real-time face detection is a critical component of GradFace, performed continuously on the incoming webcam stream. This is achieved using the YOLOv11 n-face model, which was developed by GitHub user "akanametov" (akanametov, 2023) by fine-tuning an Ultralytics YOLOv11 nano model (Jocher et al., 2022) on the WIDER FACE dataset (Yang et al., 2016). To strike a balance between computational performance and detection

accuracy on the designated hardware, the input resolution fed to the detection model is intentionally halved. Furthermore, the detection process is carefully managed with a target frame rate limit set at 10 frames per second (FPS). This limitation ensures stable, consistent operation and prevents excessive computational load on the system. As faces are detected in the video stream, they are visually highlighted by bounding boxes drawn directly onto the live webcam feed displayed within the Gradio interface, providing immediate visual feedback to the operator. The efficient transmission and display of the video stream are handled using WebRTC technology (Sredojev et al., 2015).

3.5 Face Recognition

When one or more faces are successfully detected by the YOLO model, the face recognition process is triggered, provided it has been enabled in the user interface. The high-level flow of this process is outlined in Algorithm 1.

Algorithm 1 The high-level flow for the face recognition and attendance registration process.

Input: Webcam Frame Stream, Known Faces Database F, Metadata M, Configuration (AutoRegister flag).
Output: UI Updates, Attendance Records (CSV, Screenshots).

Loop: Continuously process incoming frames.
  Capture Frame: Get current frame *I*.
  Detect Faces: Identify face regions *D* in *I* using YOLOv11n-face.
  For each detected face *f* in *D*:
    Recognize Face: Compare *f* against database *F* (using AWS Rekognition).
    If recognized match *id* found:
      Retrieve Info: Get attendee details Info(*id*) from *M*.
      Update UI: Display Info(*id*) and photo.
      Register (if applicable): If AutoRegister is True or manual trigger received, record attendance for *id*.
    Else (no match): Clear corresponding UI display area.
End Loop

In practice, the regions within the detected bounding boxes are first cropped from the current video frame. These cropped face images are then sent to the AWS Rekognition SearchFacesByImage API. To manage API costs and potential throttling, requests are batched, sending up to a default limit of 3 detected faces per second. AWS Rekognition compares the submitted faces against the pre-indexed collection (F) and returns the unique identifier (id) of the most likely matches. If a match is found, the system uses the returned identifier to look up the corresponding attendee's full information (name, faculty, image path, etc.) from the loaded metadata (M). This information, along with the attendee's indexed photo, is displayed in the Register Tab interface (Figure 1). If the auto-registration feature is enabled, or if the staff clicks the manual "Register" button, the attendance is logged in a CSV file with the current timestamp, and a screenshot of the webcam feed at that moment is saved for verification.

3.6 Evaluation Setup

The GradFace system underwent deployment and evaluation under authentic operational conditions during scheduled events organized by the Graduate School at Kasetsart University. The entire setup process and

subsequent operation during the events were managed directly by the Graduate School staff, with the research authors providing necessary technical support and guidance.

Hardware: The configuration consisted of an MSI gaming laptop, which served as the host server running the GradFace application. This laptop was equipped with an NVIDIA GeForce RTX 2060 GPU to accelerate the deep learning computations. Video input was captured using a 4K resolution, wide-range external webcam connected to the laptop.

Software: The system operated within a Python 3.11 environment. GPU acceleration for the YOLO model was enabled through CUDA 12.6 and PyTorch 2.6.0. Essential libraries underpinning the system included Gradio, which provided the web interface framework, and Boto3, used for interacting with the AWS Rekognition API.

Dataset: The dataset used for indexing and testing is summarized in Table 2. Crucially, informed consent was obtained from all individuals involved, permitting the use of their images and associated data specifically for this system, prior to any participation.

Events: The events chosen for the primary evaluation included a significant orientation event for newly admitted students enrolling in the first semester of the 2025 academic year. To further assess performance and gather additional data, supplementary testing was also conducted during several smaller, functionally similar events hosted by the Graduate School.

Table 2 Summary of the experimental dataset used for GradFace evaluation.

Data Category	Description	Quantity/Details
Known Individuals	Graduate School Staff	31 people, 62 photos (DSLR, 2 poses/person)
Event Attendees	Actual Participants	242 people, 242 photos (Varied quality/poses)
Metadata	Attendee Information	Excel file (ID, Name, Faculty, etc.)
Consent	Data Usage Permission	Obtained from all participants

4. Results

The deployment and operation of GradFace during the selected events yielded encouraging results, affirming its potential as a viable automated attendance registration system. Key findings regarding system operation, performance, and feedback are summarized in Table 3.

Table 3 Summary of key evaluation results and user feedback from GradFace deployment.

Metric/Aspect	Finding	Notes
System Setup	Straightforward (Python env.)	Integrated with existing Excel workflows
Outputs	CSV Log (Timestamped), Screenshots	Generated consistently
Detection Performance	Stable 10 FPS (YOLOv11n-face); 1-2 false positives observed	Sensitivity adjustable, occasional over-detection
Recognition Accuracy	100% (AWS Rekognition)	Robust to variations (glasses, lighting etc.)

Metric/Aspect	Finding	Notes
Registration Time	~1-2 seconds per attendee	Significant improvement over manual (~15-30s) and QR (~5-10s) methods
Staff Feedback	Need guidance cues, Network/Hardware dependent	Positive overall
Attendee Feedback	Convenient, Faster, Modern	Positive overall

4.1 System Setup and Operation

The initial setup proved to be straightforward, primarily requiring the configuration of a standard Python environment and the installation of necessary library dependencies. The data import mechanism, designed to leverage existing Excel spreadsheet formats with minimal changes, significantly facilitated the integration of GradFace into the established operational workflows of the Graduate School staff. Throughout the events, the system consistently generated the expected outputs, namely a detailed CSV file logging all registered attendees along with their registration timestamps, and a corresponding set of webcam screenshots captured precisely at the moment each registration occurred, serving as visual verification.

4.2 Detection and Recognition Performance

Quantitative performance metrics observed during deployment demonstrate the system's reliability. GradFace achieved a stable 10 FPS processing rate for face detection with YOLOv11n-face on live webcam feeds, though 1-2 false positives (detecting non-faces as faces) were occasionally spotted. The face recognition component, leveraging AWS Rekognition, demonstrated 100% accuracy in identifying all registered attendees from the dataset during the experimental deployments. The average detection and recognition time, from frame capture to identified result display, was approximately 1-2 seconds per attendee. This significantly improved throughput compared to previous manual methods (which could take 15-30 seconds per attendee) or QR code systems (which could be 5-10 seconds per attendee). The system also demonstrated robustness by successfully identifying attendees across a wide range of challenging conditions. These included variations in ambient lighting, the presence of accessories like glasses, diverse hairstyles, significant variability in the quality of indexed photos (including older or lower-resolution images), and the presence of noise or artifacts in the input images.

4.3 User Feedback

Valuable staff feedback was collected during and after the events. Operational staff emphasized the need for clearer on-screen instructions or visual cues within the interface to better guide attendees on optimal positioning (e.g., where to stand or look) for efficient recognition by the camera. They also observed that the system's overall performance and responsiveness could sometimes be affected by fluctuations in network connectivity, particularly the latency involved in communicating with the AWS Rekognition service, and suggested that employing more powerful computing hardware could potentially enhance responsiveness. Attendee feedback was predominantly positive. Participants generally expressed appreciation for the convenience offered by the GradFace system, highlighting the elimination of the need to manually sign paper lists or remember to bring physical ID cards. The

automated face recognition process was widely perceived as being significantly quicker and more modern compared to the traditional registration methods previously employed by the Graduate School.

5. Discussions and conclusions

The successful deployment and evaluation of GradFace clearly demonstrate the significant potential of integrating readily available deep learning models and cloud-based services to create effective, practical solutions for common operational challenges, such as event attendance registration. The strategic use of Gradio provided a simple yet highly functional interface, accessible universally via a standard web browser. Concurrently, the YOLOv11n-face model offered robust and efficient real-time face detection capabilities, while the reliance on AWS Rekognition ensured a high degree of face recognition accuracy, even under challenging real-world conditions. However, the evaluation also brought several areas for potential improvement into sharp focus.

5.1 Limitations and Challenges

The most prominent limitation identified was the architectural reliance on a single server instance, which was responsible for handling the entire workflow: processing the incoming webcam feed, executing the face detection model, managing recognition requests to the cloud service, and updating the user interface. As observed by the operational staff, network latency, particularly in communications with AWS, could introduce delays and impact the perceived speed of the recognition process. In scenarios where network stability might be compromised, this dependency could pose a significant operational challenge. This single-instance architecture also presents a significant scalability challenge, especially when considering larger events that might involve substantially more attendees, potentially numbering in the thousands (e.g., 2000+). For such scenarios, the current setup would likely prove insufficient. Hardware limitations also play a role, as more powerful computing resources could potentially improve responsiveness and allow for higher resolution or frame rate processing.

5.2 Data Management and Usability

While the current system achieves functional integration by utilizing external files like Excel spreadsheets and image folders, this approach relies heavily on manual file manipulation outside the application. Integrating more sophisticated and robust data management features directly within the GradFace application itself would significantly improve usability and streamline workflows. This could include built-in tools for importing data batches, exporting attendance logs in various formats, editing attendee records directly, and managing the associated image files, thereby reducing the dependency on external software and manual processes. Furthermore, usability could be enhanced by acting upon staff feedback regarding the need for clearer, intuitive on-screen visual guidance for attendees to help them position themselves correctly relative to the camera, optimizing the conditions for successful and rapid face detection and recognition.

5.3 Future Work

Addressing the limitations identified points towards several avenues for future work. A logical next step is to explore the implementation of a distributed system architecture, potentially incorporating multiple processing instances coordinated by a load balancer, to effectively handle the increased throughput demands of large-scale deployments and mitigate the single-server bottleneck. Enhancing data management capabilities within the

application remains a priority for improved usability. Therefore, further investigation into optimizing user guidance within the interface and more rigorous performance evaluation with diverse metrics is warranted.

Another crucial aspect for future development involves refining the adaptability of the face detection model. Currently, YOLOv11n-face is hardcoded in Algorithm 1. While this provides stability for the current deployment, a more flexible approach could involve incorporating a mechanism for dynamic model selection or updates, allowing the system to easily integrate newer or better face detection models as they emerge, without requiring non-trivial code changes to the core detection logic.

Finally, a promising direction involves exploring the feasibility of utilizing local, on-device face recognition models. While potentially requiring more powerful local hardware, this approach could mitigate the system's dependency on network connectivity, potentially reduce recurring operational costs associated with cloud API calls, and importantly, enhance privacy by processing sensitive biometric data locally without transmitting it to external services. This presents a trade-off between initial hardware investment, ongoing costs, network reliance, and data privacy considerations.

Conclusion

This paper presented GradFace, a face recognition-based attendance system developed and implemented for the Graduate School at Kasetsart University. By effectively integrating a Gradio-powered web interface, the YOLOv11n-face model for real-time detection, and the AWS Rekognition service for accurate identification, the system successfully automated and streamlined the event registration process, replacing previous manual methods. Experimental deployment demonstrated GradFace's promising performance with its capability for accurate attendee identification across diverse and challenging conditions, receiving positive feedback from users regarding its convenience. While the evaluation highlighted challenges related to network dependency for cloud recognition and hardware requirements for optimal performance, GradFace successfully streamlined registration, generating automated attendance records and corresponding timestamped images. Future development efforts will focus on enhancing user guidance features, improving the system's scalability, and further investigating the potential advantages and trade-offs of employing local, on-device recognition models.

6. Acknowledgment

We would like to express our sincere gratitude to the Graduate School, Kasetsart University, for the opportunities provided and to their staff for their valuable cooperation, feedback, and assistance during the experimental deployment of the GradFace system. We also acknowledge the financial support provided by the Department of Computer Science, Faculty of Science, Kasetsart University.

7. References

Abid, A., Abdalla, A., Abid, A., Khan, D., Alfozan, A., & Zou, J. (2019). *Gradio: Hassle-free sharing and testing of ML models in the wild* (arXiv:1906.02569) [Preprint]. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.02569

akanametov. (2023). *Yolo-face* [Computer software]. GitHub. https://github.com/akanametov/yolo-face

Indla, R. K. (2021). *An overview on Amazon Rekognition technology* [Master's thesis, California State University, San Bernardino]. CSUSB ScholarWorks. https://scholarworks.lib.csusb.edu/etd/1263

Jocher, G., Chaurasia, A., Stoken, A., Borovec, J., NanoCode012, Kwon, Y., Michael, K., TaoXie, Fang, J., imyhxy, Lorna, Zeng, Y., Wong, C., V, A., Montes, D., Wang, Z., Fati, C., Nadar, J., Laughing, ... Jain, M. (2022). *ultralytics/yolov5: v7.0 – YOLOv5 SOTA realtime instance segmentation* (Version v7.0) [Computer software]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.7347926

Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision, 60*(2), 91-110. https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 779-788. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91

Ren, X., Lattas, A., Gecer, B., Deng, J., Ma, C., & Yang, X. (2023). Facial geometric detail recovery via implicit representation. *2023 IEEE 17th International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG)*, 1-8. https://doi.org/10.1109/FG57933.2023.10042505

Sredojev, B., Samardzija, D., & Posarac, D. (2015). WebRTC technology overview and signaling solution design and implementation. *2015 38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 1006-1009. https://doi.org/10.1109/MIPRO.2015.7160422

Viola, P., & Jones, M. (2001). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001),* I-511–I-518. https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990517

Yang, S., Luo, P., Loy, C. C., & Tang, X. (2016). WIDER FACE: A face detection benchmark. Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 5525–5533. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.596

Zhang, K., Zhang, Z., Li, Z., & Qiao, Y. (2016). Joint face detection and alignment using multitask cascaded convolutional networks. *IEEE Signal Processing Letters, 23*(10), 1499-1503. https://doi.org/10.1109/LSP.2016.2603342

วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกู้คืนกุญแจลับแบบหลายเอเจนต์ที่ไม่อาศัยศูนย์กลาง ระหว่าง IHADM-KRS และ SSDM-KRS

A Comparative Study on the Performance of Decentralized Multi-Agent Key Recovery Systems between IHADM-KRS and SSDM-KRS

จำรูญ จันทร์กุญชร[1] และ กนกวรรณ กันยะมี[1*]

Jumroon Chankulchorn[1] and Kanokwan Kanyamee[1*]

[1] หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

[1] Information Technology Program, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University

บทคัดย่อ

การจัดการความเสี่ยงของกุญแจลับจากการถูกโจมตีหรือสูญหาย เป็นประเด็นสำคัญต่อการ รักษาความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูล โดยระบบกู้คืนกุญแจ (Key Recovery System : KRS) ถือเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดความเสี่ยงดังกล่าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ของระบบกู้คืนกุญแจลับแบบหลายเอเจนต์ (Multiple Key Recovery System) 2 รูปแบบ คือ SSDM-KRS และ IHADM-KRS โดยเน้นการประเมินประสิทธิภาพใน 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ (1) การสร้างฟิลด์ในการกู้คืนกุญแจ (Key Recovery Filed : KRF) (2) การกู้คืนกุญแจในกรณีปกติ และ(3) การกู้คืนกุญแจในกรณีที่มีเอเจนต์ในการกู้คืนกุญแจ (Key Recovery Agent : KRA) ล่มหรือไม่สามารถให้บริการได้ การวิจัยได้จำลองการทำงานของ KRA ตั้งแต่ 5 ถึง 50 เอเจนต์ โดยกำหนดเกณฑ์การกู้คืนขั้นต่ำที่ 2 เอเจนต์ ผลการประเมินประสิทธิภาพในการสร้าง KRF พบว่า SSDM-KRS มีข้อได้เปรียบด้านความเร็วมากกว่า IHADM-KRS เนื่องจากโครงสร้างไม่ซับซ้อน ในขณะที่ IHADM-KRS มีความยืดหยุ่นในการบริหารจัดการ KRA และมีความมั่นคงปลอดภัยสูงกว่า SSDM-KRS ส่วนการกู้คืนกุญแจลับในสถานการณ์ปกติที่ไม่มี KRA ล่มนั้น ทั้งสองระบบใช้เวลาในการกู้คืนใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อทดลองกู้คืนกุญแจในกรณีที่มี KRA ล่ม พบว่า IHADM-KRS มีศักยภาพในการกู้คืนที่เสถียร มีความมั่นคงปลอดภัยสูง แต่ใช้เวลามากกว่า SSDM-KRS โดยเฉพาะเมื่อจำนวน KRA เพิ่มขึ้น ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การเลือกใช้ระบบกู้คืนกุญแจที่เหมาะสมควรพิจารณาให้สอดคล้องกับความต้องการด้านประสิทธิภาพ และนโยบายความมั่นคงปลอดภัย ทั้งนี้ระบบทั้งสองรูปแบบได้รับการออกแบบให้สามารถต้านทานการสมรู้ร่วมคิดของ KRA และมีความแข็งแกร่งทนทานต่อความล้มเหลว ซึ่งช่วยเสริมสร้างความมั่นคงปลอดภัยของระบบโดยรวม

สำคัญ: กู้คืนกุญแจลับ หลายเอเจนต์ ความมั่นคง เปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ

** Corresponding author: kanokwan@uru.ac.th*

***Received**: 20 มิถุนายน 2568* ***Revised:** 2 พฤศจิกายน 2568* ***Accepted**: 28 พฤศจิกายน 2568*

Abstract

Managing the risks of secret keys from attacks or loss is a critical aspect of maintaining information security. The Key Recovery System (KRS) is a technology developed to mitigate such risks. This study aims to analyze and compare the performance of two types of Multiple Key Recovery Systems (M-KRS): SSDM-KRS and IHADM-KRS, focusing on three key processes: (1) creation of the Key Recovery Field (KRF), (2) key recovery in normal conditions, and (3) key recovery in scenarios where some Key Recovery Agents (KRAs) fail or are unavailable. The experiment simulated KRA operations ranging from 5 to 50 agents, with a minimum recovery threshold set at two agents. The performance evaluation of KRF creation revealed that SSDM-KRS outperformed IHADM-KRS in terms of processing speed due to its simpler structure, while IHADM-KRS demonstrated greater flexibility in KRA management and offered higher security. In normal recovery scenarios without KRA failures, both systems achieved comparable recovery times. However, in scenarios with KRA failures, IHADM-KRS maintained stable recovery performance and high security but required more time than SSDM-KRS, particularly as the number of KRAs increased. The findings indicate that selecting an appropriate key recovery system should align with performance requirements and security policies. Both systems were designed to resist KRA collusion and are robust against failures, thereby enhancing the overall security of the system.

Keywords: Secret Key Recovery, Multi-Agent, Security, Comparative, Performance

1. บทนำ

ในยุคดิจิทัลที่ข้อมูลมีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินงานในทุกภาคส่วน ไม่ว่าจะเป็นภาครัฐ ภาคเอกชน หรือการทำธุรกิจ และการติดต่อสื่อสารส่วนบุคคล ทำให้ความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูลเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการเข้ารหัสลับข้อมูล (Data Encryption) (Stallings, 2023) ซึ่งเป็นวิธีป้องกันการเข้าถึงโดยไม่ได้รับอนุญาต อย่างไรก็ตามความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูลจะดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพและมีความสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อ สามารถจัดการกับสถานการณ์ฉุกเฉินหรือเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด เช่น เกิดการสูญหายของกุญแจลับ (Secret Key : Ks) (Hughes, 2022) หรือการที่กุญแจลับไม่สามารถใช้สำหรับการถอดรหัสข้อมูลได้ ตลอดจนความเสี่ยงต่อการรั่วไหลของข้อมูลและการละเมิดความเป็นส่วนตัว หากไม่มีมาตรการควบคุมความปลอดภัยที่เพียงพอ (Abelson et al., 1997)

เทคโนโลยีระบบกู้คืนกุญแจลับ (Key Recovery System: KRS) (Al-Salqan, 1997) เป็นแนวทางหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับเหตุการณ์เหล่านี้ ในบริบทของการใช้หลายเอเจนต์ร่วมมือกันกู้คืน (Multiple Key Recovery Agent: M-KRA) โดยไม่อาศัยศูนย์กลาง (Decentralized Multi-Agent Systems) เช่น การกู้คืนกุญแจลับที่มีการจำลองพฤติกรรมโปรโตคอลโดยใช้ ECTPN (Lim et al., 2003) และระบบกู้คืนกุญแจในสภาพแวดล้อมของอุปกรณ์ทางการแพทย์ (IoMT) (Kim et al., 2021) เป็นต้น วิธีการดังกล่าวใช้หลักการแชร์ความลับ (Shamir, 1979) เพื่อช่วยลดความเสี่ยงจากการผูกขาดกุญแจลับ และเพิ่มระดับความปลอดภัยของการกู้คืนกุญแจ ด้วยการประสานการทำงานร่วมกันของกลุ่ม KRA (National Institute of Standards and Technology, 1998)

อย่างไรก็ตามยังพบจุดอ่อนหรือมีข้อจำกัดด้านความเสี่ยงจากการสมรู้ร่วมคิดระหว่าง KRA เพื่อเป็นการแก้ปัญหาประเด็นดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาระบบกู้คืนกุญแจลับที่มีฟังก์ชันสนับสนุนด้านความมั่นคงปลอดภัยครบถ้วน สามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ รองรับการเข้าถึงข้อมูลโดยชอบด้วยกฎหมาย ช่วยลดความเสี่ยงจากการโจมตีแบบจุดเดียว (Single Point of Failure : SPOF) และลดการโจมตีที่เกิดจากการสมรู้ร่วมคิดบางส่วนของ KRA คือ ระบบ IHADM-KRS จากงานวิจัยเรื่อง Improved High Availability Decentralized Multi-agent KRS (กนกวรรณ กันยะมี, 2566) และระบบ SSDM-KRS จากงานวิจัยเรื่อง Simple Secret-key Splitting and Sharing in Decentralized Multi-agent KRS (กนกวรรณ กันยะมี, 2566) โดย IHADM-KRS มีจุดเด่นในด้านความยืดหยุ่นของการกำหนดเงื่อนไขจำนวน KRA ที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจ ซึ่งทำให้ระบบมีความมั่นคงปลอดภัยสูง ในขณะที่ SSDM-KRS เน้นความเรียบง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อน

มีความเร็วในการประมวลผล ทั้งสองระบบสามารถจัดการกระบวนการกู้คืนกุญแจลับได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ เหมาะสมกับลักษณะการนำไปประยุกต์ใช้งานในบริบทที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ดียังขาดการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบในเชิงลึก โดยเฉพาะในแง่มุมของประสิทธิภาพเชิงเวลาในกระบวนการสร้างฟิลด์กู้คืนกุญแจ (Key Recovery Field : KRF) การกู้คืนกุญแจลับในสถานการณ์ปกติ และการกู้คืนกุญแจลับในกรณีที่ KRA บางส่วนล่ม ส่งผลให้ข้อจำกัดนี้ยังไม่มีข้อมูลสรุปที่ชัดเจนอย่างเป็นรูปธรรม ภายใต้เงื่อนไขด้านความมั่นคงปลอดภัย และความเร็วในการประมวลผลที่แตกต่างกัน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ IHADM-KRS และ SSDM-KRS โดยมุ่งเน้นไปที่ 3 ประเด็นหลัก ได้แก่ (1) ประสิทธิภาพเวลาในการประมวลผลขั้นตอนการสร้าง KRF (2) ประสิทธิภาพเวลาของการกู้คืนกุญแจลับในสถานการณ์ปกติ และ (3) ประสิทธิภาพเวลาของการกู้คืนกุญแจลับเมื่อเกิดเหตุการณ์มี KRA ในกลุ่มการกู้คืนล่ม เพื่อนำไปสู่ข้อสรุปในการเลือกใช้รูปแบบการกู้คืนกุญแจที่เหมาะสมสอดคล้องกับบริบทด้านความมั่นคงปลอดภัย โดยสามารถพิจารณาปัจจัยด้านความเร็วในการประมวลผล การบริหารจัดการ KRA และระดับความมั่นคงปลอดภัย

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบการประเมินประสิทธิภาพด้านเวลาในการประมวลผล ของการกู้คืนกุญแจลับ 2 รูปแบบ คือ (1) IHADM-KRS และ (2) SSDM-KRS ใน 3 ประเด็นที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

2.1 ประสิทธิภาพด้านเวลาในการประมวลผล การสร้าง KRF

2.2 ประสิทธิภาพด้านเวลาในการประมวลผล ที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจในกรณีปกติ

2.3 ประสิทธิภาพด้านเวลาในการประมวลผล ที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจในกรณีที่มี KRA ในกลุ่มการกู้คืนล่ม

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกู้คืนกุญแจลับ 2 รูปแบบ คือ (1) IHADM-KRS และ (2) SSDM-KRS โดยมีขั้นตอนดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 ศึกษาทบทวนทฤษฎีของการกู้คืนกุญแจลับหลายเอเจนต์ (M-KRA) แบบไม่อาศัยศูนย์กลางหรือแบบกระจาย และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 การกู้คืนกุญแจลับ M-KRA แบบไม่อาศัยศูนย์กลาง

การกู้คืนกุญแจลับ (Secret Key Recovery) เป็นกระบวนการที่ช่วยให้ผู้ใช้หรือระบบสามารถเข้าถึงข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสได้ แม้ในกรณีที่กุญแจลับสูญหายหรือไม่สามารถเข้าถึงได้ตามปกติ โดยเฉพาะในระบบที่มีการเข้ารหัสแบบสมมาตร ระบบกู้คืนกุญแจลับแบบ M-KRA เป็นแนวทางที่ใช้ตัวแทน KRA จำนวน 2 เอเจนต์ขึ้นไป เข้ามามีบทบาทร่วมกันในการกู้คืนกุญแจลับ โดยอาศัยหลักการกระจายความรับผิดชอบและลดความเสี่ยงจากการพึ่งพาศูนย์กลางเพียงรายเดียว ในระบบแบบไม่อาศัยศูนย์กลางนั้น KRA แต่ละรายจะทำหน้าที่ร่วมกันในการกู้คืนกุญแจลับตามกลไกที่กำหนด โดยไม่มีหน่วยงานควบคุมส่วนกลาง ระบบลักษณะนี้จึงสามารถออกแบบให้มีความยืดหยุ่นในการควบคุมสิทธิ์การเข้าถึงของ KRA และรองรับการกำหนดจำนวน KRA ขั้นต่ำเพื่อให้สามารถทำการกู้คืนกุญแจลับได้ (Kanyamee et al., 2014)

จุดเด่นของระบบกู้คืนกุญแจลับแบบ M-KRA ที่ไม่อาศัยศูนย์กลาง ได้แก่

(1) มีความมั่นคงปลอดภัย ด้วยการแบ่งข้อมูลส่วนประกอบของกุญแจออกเป็นส่วน ๆ เพื่อกระจายให้ KRA ในกลุ่มการกู้คืน

(2) ลดความเสี่ยงจากการสมรู้ร่วมคิดกันระหว่าง KRA

(3) สามารถปรับขนาดและความซับซ้อนของระบบได้ ตามระดับความปลอดภัยที่ต้องการ

(4) การออกแบบระบบรองรับการล่มของ KRA บางส่วน เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่ต้องการความมั่นคงปลอดภัยสูง และสามารถประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการเข้ารหัสข้อมูล การควบคุมการเข้าถึง และระบบการจัดการกุญแจในระดับองค์กร

3.1.2 วิเคราะห์เหตุผลในการเลือกเปรียบเทียบ IHADM-KRS และSSDM-KRS ในงานวิจัย

(1) พัฒนาภายใต้แนวคิดของการทำงานในรูปแบบที่ไม่อาศัยศูนย์กลาง หรือแบบกระจายศูนย์ (Decentralized Multi-Agent KRS) ซึ่งสนับสนุนการจัดการกุญแจลับในยุคที่ต้องการความมั่นคงปลอดภัยสูง และลดความเสี่ยงจากการพึ่งพาศูนย์กลางเพียงจุดเดียว (Single Point of Failure)

(2) มีพื้นฐานจากการใช้แนวคิดเดียวกัน แต่มีกระบวนการกู้คืนกุญแจที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

(3) มีสถาปัตยกรรมพื้นฐานที่ใกล้เคียงกัน ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบได้อย่างเที่ยงตรง ไม่มีความแตกต่างด้านโครงสร้างหรือตัวแปรที่อาจเป็นจุดอ่อนต่อการประเมินและวิเคราะห์ผล

(4) สามารถควบคุมตัวแปรในการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การวิเคราะห์เปรียบเทียบด้านประสิทธิภาพและความมั่นคงปลอดภัยเป็นไปอย่างตรงประเด็นและเชื่อถือได้

3.1.3 งานวิจัย Improved High Availability Decentralized Multi-agent KRS (IHADM-KRS)

ระบบ IHADM-KRS (กนกวรรณ กันยะมี, 2566) เป็นแนวทางการออกแบบระบบกู้คืนกุญแจลับที่เน้นความยืดหยุ่นในการควบคุมระดับความมั่นคงปลอดภัย ระบบมีโครงสร้างแบบลำดับชั้น สามารถกำหนดจำนวน KRA ขั้นต่ำในการร่วมกันกู้คืนกุญแจลับได้ตามความเหมาะสม จุดเด่นของ IHADM-KRS คือการกระจายข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกุญแจลับ (เช่น แอตทริบิวต์ TTi ตามสมการ (1)) ไปยัง KRA แต่ละรายแบบเฉพาะเจาะจง โดยแต่ละ KRA จะมีข้อมูลส่วนประกอบของกุญแจบางส่วนเท่านั้น ทำให้สามารถควบคุมสิทธิ์ในการเข้าถึงข้อมูลกุญแจได้อย่างเหมาะสมปลอดภัย ช่วยลดความเสี่ยงจากการสมรู้ร่วมคิดของ KRA และสามารถกู้คืนกุญแจลับได้แม้ในกรณีที่มี KRA ล่ม โดยมีรูปแบบของ KRF ดังนี้

$$KRF = \{ Ku_{agi}[KRF_i\text{'s}] \,||\, Ku_R(S_R) \,||\, Ku_G(S_R) \}$$

$$KRF_i = Ku_{agi}[S_i \,||\, SGN \,||\, TT_i\text{'s} \,||\, \text{Other information}]$$

และ IHADM-KRS มีรูปแบบการกระจายแอตทริบิวต์ TTi สำหรับบริหารจัดการกู้คืนกุญแจในกรณีที่มี KRA ในกลุ่มการกู้คืนล่ม ดังนี้

$$\mathrm{TT_i} = \{\mathrm{KRA}_{(i,1)\bmod n}, \mathrm{KRA}_{(i,2)\bmod n}, \ldots, \mathrm{KRA}_{(i,t)\bmod n}\} \qquad (1)$$

โดยที่

i = ลำดับของ KRA_i (เริ่มจาก 1)

$t = n - mr$

ใช้ modulo n เพื่อให้วนกลับไปที่ KRA_1 เมื่อถึง KRA_n

จากการศึกษาวิเคราะห์พบว่า IHADM-KRS มีความแข็งแกร่งในด้านความมั่นคงปลอดภัยและมีความสามารถในการควบคุมเชิงนโยบาย แต่มีต้นทุนด้านเวลาและโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่า SSDM-KRS ที่มีจุดเด่นด้านความเรียบง่าย รวดเร็ว

3.1.4 งานวิจัย Simple Secret-key Splitting and Sharing in Decentralized Multi-agent KRS (SSDM-KRS)

ระบบ SSDM-KRS (กนกวรรณ กันยะมี, 2566) เป็นระบบกู้คืนกุญแจลับที่ออกแบบโดยมุ่งเน้นความเรียบง่าย รวดเร็ว แต่ยังสามารถกู้คืนกุญแจได้ในกรณีที่มี KRA ล่ม ระบบนี้จัดเก็บส่วนประกอบของกุญแจทั้งหมดสำหรับการกู้คืนไว้ที่ KRF โดยไม่ใช้วิธีการกระจายส่วนประกอบของกุญแจลับไปยัง KRA ทำให้สามารถเข้าถึงและกู้คืนกุญแจลับได้อย่างรวดเร็ว จุดเด่นของ SSDM-KRS คือ มีการออกแบบให้โครงสร้างของ KRF ไม่ซับซ้อน จัดเก็บส่วนประกอบของกุญแจที่เอื้อให้การกู้คืนทำได้อย่างรวดเร็ว แต่ยังคงมีความมั่นคงปลอดภัย เนื่องจากมีฟังก์ชันการพิสูจน์ตัวจริงของ KRA ในกลุ่มการกู้คืนที่แข็งแกร่ง การกู้คืนกุญแจลับสามารถดำเนินการได้โดยใช้ KRA ขั้นต่ำจำนวน 2 รายในการตรวจสอบสิทธิ์และยืนยันการร้องขอการกู้คืนกุญแจ โดยมีรูปแบบของ KRF ดังนี้

KRF = { Kuagi[KRFi's] || TTi's || KuR(SR) || KuG(SR) || h(SGN) }

KRFi = Kuagi[Si || SGN || Other information]

อย่างไรก็ตาม SSDM-KRS มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถกำหนดจำนวน KRA ขั้นต่ำในการกู้คืนกุญแจตามเงื่อนไขได้ ทั้งนี้ระบบกำหนดให้มี KRA อย่างน้อย 2 ราย (ที่ไม่ล่ม) ก็สามารถให้บริการกู้คืนกุญแจได้ SSDM-KRS มีประสิทธิภาพสูงในด้านเวลาและการประมวลผล โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำนวน KRA เพิ่มขึ้น ระบบยังสามารถรักษาความเร็วในการกู้คืนได้อย่างมีเสถียรภาพ

3.2 ออกแบบการทดลอง กำหนดค่าตัวแปร และจำลองการทำงานของ IHADM-KRS และ SSDM-KRS โดยใช้จำนวนตัวแทน KRA ในการกู้คืนกุญแจ (KRA) ตั้งแต่ 5 ถึง 50 เอเจนต์ และกำหนดให้มี KRA ขั้นต่ำในการกู้คืนกุญแจ เท่ากับ 2 เอเจนต์

3.3 ทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงานของการกู้คืนกุญแจ และเก็บผลการทดลองใน 3 ประเด็น คือ การสร้าง KRF การกู้คืนกุญแจในสถานการณ์ปกติ และการกู้คืนกุญแจเมื่อมี KRA ล่ม

3.4 รวบรวมผลการทดลองเพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพใน 3 ประเด็นข้างต้น

3.5 อภิปราย และสรุปผลการวิจัย

4. ผลการวิจัย

4.1 การเปรียบเทียบรูปแบบการกู้คืนกุญแจแบบ IHADM-KRS และ SSDM-KRS

การเลือกใช้รูปแบบการกู้คืนกุญแจลับที่เหมาะสม ส่งผลต่อประสิทธิภาพและความมั่นคงปลอดภัยของระบบสารสนเทศ การเปรียบเทียบรูปแบบระหว่าง IHADM-KRS และ SSDM-KRS ดังแสดงในตารางที่ 1 ช่วยให้เห็นข้อดี ข้อจำกัด ตลอดถึงโครงสร้างการจัดเก็บส่วนประกอบของกุญแจ และการห่อหุ้ม KRF ของแต่ละระบบ ซึ่งเป็นแนวทางในการเลือกใช้หรือเพื่อสนับสนุนการออกแบบระบบกู้คืนกุญแจที่สอดคล้องกับระดับความมั่นคงปลอดภัยที่ต้องการในการบริหารจัดการสารสนเทศ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบรูปแบบการกู้คืนกุญแจแบบ IHADM-KRS และ SSDM-KRS

หัวข้อเปรียบเทียบ	IHADM-KRS	SSDM-KRS
ชื่อเต็ม	Improved High Availability Decentralized Multi-agent KRS	Simple Secret-key Splitting and Sharing in Decentralized Multi-agent KRS
(1) รูปแบบการกู้คืนกุญแจลับ	กู้คืนกุญแจแบบ M-KRA ที่ไม่อาศัยศูนย์กลาง (แบบปรับปรุงขั้นสูง)	กู้คืนกุญแจแบบ M-KRA ที่ไม่อาศัยศูนย์กลาง (แบบง่าย)
(2) แนวคิดหลัก	ปรับปรุงฟิลด์กู้คืนกุญแจด้วย Power Set และ Secret Sharing	แบ่งและแชร์กุญแจลับแบบง่าย

หัวข้อเปรียบเทียบ	IHADM-KRS	SSDM-KRS
(3) ความสามารถในการต้านทานการสมรู้ร่วมคิด	ป้องกันได้	ป้องกันได้
(4) การยืนยันตัวตน KRA	ใช้ SGN โดยตรง	ใช้ hash ของ SGN (*h(SGN)*)
(5) วิธีเก็บส่วนประกอบของกุญแจใน KRF	ใช้ Power Set ในการกระจายส่วนประกอบของกุญแจ	ใช้การเก็บแอตทริบิวต์ TT_i
(6) โครงสร้าง KRF	ซับซ้อนและยืดหยุ่นสูง	เรียบง่าย
(7) ขนาดของ KRF	เล็กกว่า SSDM-KRS เล็กน้อย อย่างไม่มีนัยสำคัญ	ใหญ่กว่า IHADM-KRS เล็กน้อย อย่างไม่มีนัยสำคัญ
(8) ความพร้อมใช้งาน	มีความพร้อมใช้งานแม้ในกรณีที่มี KRA ล่ม และสามารถกำหนดจำนวน KRA ในการกู้คืนกุญแจได้	มีความพร้อมใช้งานแม้ในกรณีที่มี KRA ล่ม
(9) การรองรับการเข้าถึงข้อมูลโดยชอบด้วยกฎหมาย	รองรับการเข้าถึงข้อมูลโดยชอบด้วยกฎหมายโดยเข้าถึงได้จาก KRF	รองรับการเข้าถึงข้อมูลโดยชอบด้วยกฎหมายโดยเข้าถึงได้จาก KRF
(10) ความเหมาะสมในการใช้งาน	ระบบที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง กู้คืนกุญแจลับได้ในสถานการณ์ที่ซับซ้อน	ระบบที่ต้องการความเร็ว ไม่ซับซ้อน

จากตารางที่ 1 สามารถสรุปได้ว่า IHADM-KRS ถูกออกแบบให้มีความยืดหยุ่นสูง สามารถบริหารจัดการจำนวน KRA ที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจได้ตามความเหมาะสมของระดับความมั่นคงปลอดภัยที่ต้องการ มีฟังก์ชันกำหนดจำนวน KRA ขั้นต่ำที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจ เหมาะกับระบบที่ต้องการความมั่นคงปลอดภัยสูง และสามารถป้องกันการสมรู้ร่วมคิดของ KRA ในกลุ่มการกู้คืน ส่วน SSDM-KRS ออกแบบให้ทำงานง่าย ไม่ซับซ้อน มีประสิทธิภาพ เหมาะกับนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่ต้องการการประมวลผลที่รวดเร็ว มีการป้องกันการสมรู้ร่วมคิด และมีกระบวนการพิสูจน์ตัวจริงของ KRA

4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประมวลผลเวลาที่ใช้ในการสร้าง KRF ของรูปแบบการกู้คืนกุญแจ SSDM-KRS และ IHADM-KRS (หน่วย มิลลิวินาที: ms)

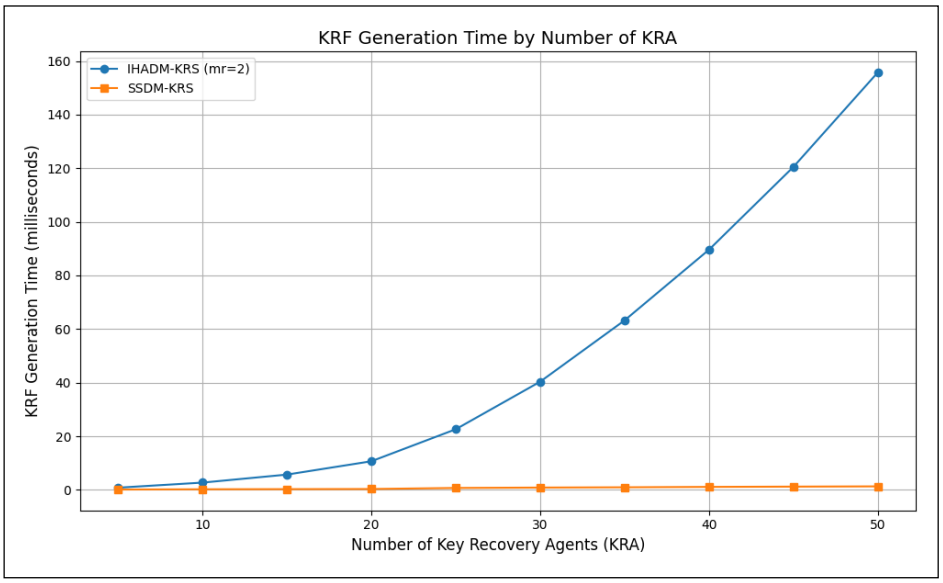
การสร้างฟิลด์ในการกู้คืนกุญแจ (Key Recovery Field: KRF) เป็นขั้นตอนที่มีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบทั้งด้านเวลาและทรัพยากร การทดลองนี้จึงมีจุดประสงค์ในการวัดและเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการสร้าง KRF ระหว่างระบบ SSDM-KRS และ IHADM-KRS โดยจำลองจำนวนตัวแทน KRA ในการกู้คืนกุญแจ (KRA) ตั้งแต่ 5 ถึง 50 เอเจนต์ ทั้งนี้ได้กำหนดให้มี KRA ขั้นต่ำในการกู้คืนกุญแจ เท่ากับ 2 เอเจนต์ เพื่อประเมินแนวโน้มของเวลาในการสร้าง KRF ภายใต้โครงสร้างการจัดเก็บส่วนประกอบของกุญแจที่แตกต่างกันของทั้งสองระบบ ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 1

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประมวลผลเวลาที่ใช้ในการสร้าง KRF

จำนวน KRA	IHADM-KRS, mr=2 (ms)	SSDM-KRS (ms)
5	0.808	0.121
10	2.702	0.216
15	5.692	0.266
20	10.658	0.317

จำนวน KRA	IHADM-KRS, mr=2 (ms)	SSDM-KRS (ms)
25	22.599	0.708
30	38.743	0.437
35	32.546	0.62
40	46.548	0.644
45	54.873	0.633
50	67.585	0.762

จากผลการทดลองในตารางที่ 2 พบว่า ระบบ SSDM-KRS ใช้เวลาในการสร้าง KRF น้อยกว่า IHADM-KRS อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อจำนวน KRA เพิ่มขึ้น เนื่องจาก SSDM-KRS มีโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลแบบรวมไว้ที่ KRF ซึ่งไม่ต้องประมวลผลการกระจายส่วนประกอบของกุญแจแบบเฉพาะเจาะจง ในขณะที่ IHADM-KRS ต้องดำเนินการกระจายส่วนประกอบของกุญแจไปใน KRF ของทุก KRA ตามเงื่อนไขที่กำหนด ทำให้ใช้เวลาเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่งผลให้แนวโน้มของเวลาที่ใช้สำหรับการสร้าง KRF ของ IHADM-KRS มีลักษณะเพิ่มสูงขึ้นมากตามจำนวน KRA ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ SSDM-KRS มีเวลาที่เพิ่มเล็กน้อยเกือบเป็นเส้นตรงและคงที่กว่า ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการสร้าง KRF

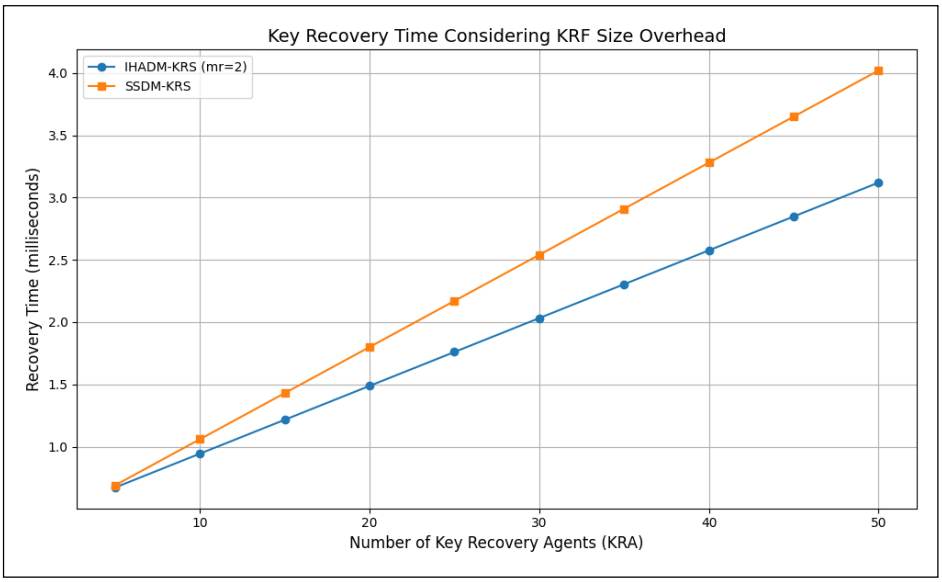
4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประมวลผลเวลาที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจลับแบบปกติ ของรูปแบบการกู้คืนกุญแจ SSDM-KRS และ IHADM-KRS (หน่วย มิลลิวินาที: ms)

การกู้คืนกุญแจลับในสถานการณ์ปกติ หมายถึงการกู้คืนในภาวะที่ไม่มี KRA ในกลุ่มการกู้คืนล่ม เป็นกระบวนการที่สะท้อนถึงประสิทธิภาพของการกู้คืนกุญแจภายใต้เงื่อนไขความพร้อมใช้งาน (Availability) ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินความเร็วในการเข้าถึงข้อมูลส่วนประกอบของกุญแจ ที่ถูกห่อหุ้มไว้ใน KRF และเวลาในการคำนวณกุญแจลับ โดยได้ทดลองจำลอง KRA ตั้งแต่ 5 ถึง 50 เอเจนต์ กำหนดให้มี KRA ขั้นต่ำในการกู้คืนกุญแจ (mr) เท่ากับ 2 เอเจนต์ ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 3 และ ภาพที่ 2

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประมวลผลเวลาที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจลับแบบปกติ

จำนวน KRA	IHADM-KRS, mr=2 (ms)	SSDM-KRS (ms)
5	0.672	0.692
10	0.971	1.023
15	1.277	1.354
20	1.551	1.682
25	1.872	2.014
30	2.171	2.347
35	2.470	2.677
40	2.773	3.112
45	3.072	3.331
50	3.371	3.661

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 พบว่า ระบบ SSDM-KRS และ IHADM-KRS มีเวลาในการกู้คืนกุญแจลับในสถานการณ์ปกติที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากทั้ง 2 ระบบสามารถใช้ข้อมูลส่วนประกอบของกุญแจ ที่ห่อหุ้มไว้ใน KRF ได้โดยตรง อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวน KRA เพิ่มขึ้น ระบบ SSDM-KRS มีแนวโน้มใช้เวลามากกว่าเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งเป็นผลจากขนาดของ KRF ที่เพิ่มขึ้นตามจำนวน KRA ซึ่งส่งผลต่อเวลาในการโหลดหรือเข้าถึงข้อมูล ในขณะที่ IHADM-KRS ยังคงรักษาประสิทธิภาพได้ดีด้วยขนาด KRF ที่คงที่ ทำให้ระบบเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการความเร็วและความเสถียรในการกู้คืนในภาวะปกติ



ภาพที่ 2 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจลับแบบปกติ

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประมวลผลเวลาที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจลับที่มี KRA ในกลุ่มการกู้คืนล่มของรูปแบบการกู้คืนกุญแจ SSDM-KRS และ IHADM-KRS (หน่วย มิลลิวินาที: ms)

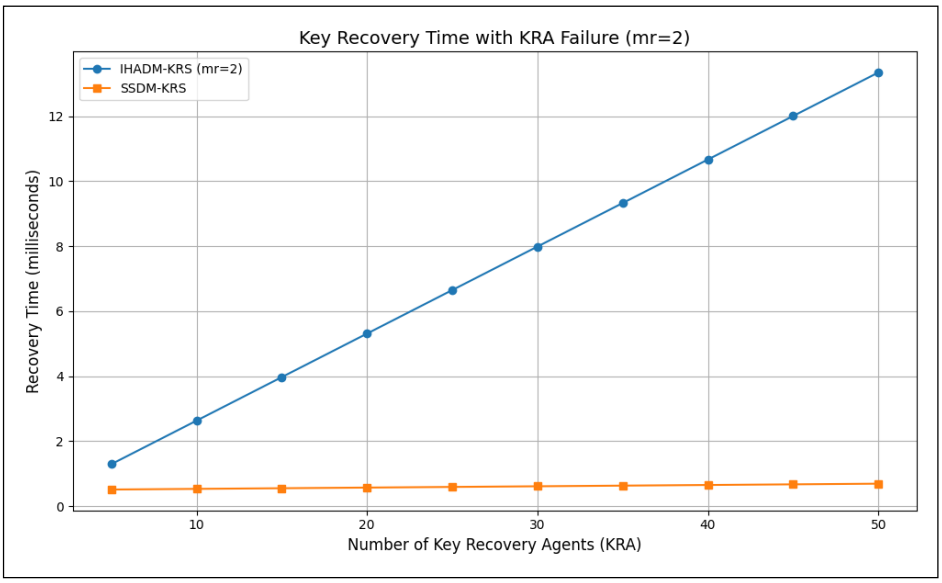
ระบบ SSDM-KRS และ IHADM-KRS มีความสามารถในการกู้คืนกุญแจลับได้ แม้ในกรณีที่มี KRA ล่ม โดยอาศัยวิธีการสำรองส่วนประกอบของกุญแจไว้ใน KRF การทดลองนี้จึงประเมินเวลาในการกู้คืนกุญแจลับ และความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของเวลา

ในการกู้คืน โดยกำหนดเงื่อนไขจำลอง KRA ตั้งแต่ 5 ถึง 50 เอเจตน์ และใช้ KRA ขั้นต่ำ เท่ากับ 2 เอเจนต์ ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 4 และภาพที่ 3

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประมวลผลเวลาที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจลับในกรณีที่มี KRA ในกลุ่มการกู้คืนล่ม

จำนวน KRA	IHADM-KRS, mr=2 (ms)	SSDM-KRS (ms)
5	1.293	0.511
10	3.122	0.542
15	4.954	0.575
20	6.781	0.611
25	8.617	0.635
30	10.445	0.661
35	12.272	0.693
40	14.132	0.720
45	15.931	0.751
50	17.764	0.783

ผลการทดลองในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมี KRA ในกลุ่มการกู้คืนล่ม จะต้องใช้ข้อมูลส่วนประกอบของกุญแจที่สำรองไว้ใน KRF ทำให้ระบบ IHADM-KRS มีแนวโน้มใช้เวลามากกว่าระบบ SSDM-KRS โดยเฉพาะเมื่อจำนวน KRA เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก IHADM-KRS ใช้วิธีการกระจายค่าส่วนประกอบของกุญแจแบบเฉพาะเจาะจง ทำให้ต้องประมวลผลชุดข้อมูลจำนวนมากขึ้น ในขณะที่ SSDM-KRS รวบรวมจัดเก็บส่วนประกอบของกุญแจของทุก KRA ไว้ใน KRF ส่งผลให้การเข้าถึงข้อมูลทำได้อย่างรวดเร็วและมีค่าเวลาคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 3 อย่างไรก็ตาม IHADM-KRS มีความยืดหยุ่นในการการบริหารจัดการ KRA ได้ดี และสามารถมีศักยภาพในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยที่สูงกว่า SSDM-KRS



ภาพที่ 3 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจลับแบบเมื่อมี KRA ล่ม (mr=2)

4.5 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของประสิทธิภาพระบบ IHADM-KRS และ SSDM-KRS

เพื่อแสดงภาพรวมของความแตกต่างระหว่าง IHADM-KRS และ SSDM-KRS อย่างชัดเจน จึงได้สรุปผลการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพในประเด็นด้านประสิทธิภาพการประมวลผลการกู้คืนกุญแจ ทั้ง 2 รูปแบบ ใน 3 กระบวนการหลัก ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพของประสิทธิภาพระบบ IHADM-KRS และ SSDM-KRS ในกระบวนการกู้คืนกุญแจ

รายการประเมิน	IHADM-KRS	SSDM-KRS
1. การสร้าง KRF	ใช้เวลามากกว่า ตามจำนวน KRA เนื่องจากใช้กระบวนการกระจายส่วนประกอบของกุญแจตามเงื่อนไขความมั่นคงปลอดภัย	ใช้เวลาน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากโครงสร้างไม่ซับซ้อน ไม่มีกระบวนการคำนวณสำหรับการกระจายส่วนประกอบของกุญแจ
2. การกู้คืนกุญแจ (กรณีปกติ)	คงประสิทธิภาพดี แม้จำนวน KRA เพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดของ KRF คงที่	เวลาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่มจำนวนของ KRA เพราะขนาด KRF ใหญ่ขึ้น
3. การกู้คืนกุญแจ (กรณีมี KRA ล่ม)	ใช้เวลามากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามจำนวน KRA แต่มีความเสถียรและความปลอดภัยสูง	ใช้เวลาน้อยกว่าคงที่ เพราะเก็บส่วนประกอบไว้รวมใน KRF

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า SSDM-KRS มีข้อได้เปรียบในด้านความเร็ว โดยเฉพาะในกระบวนการ สร้าง KRF และการกู้คืนในกรณีที่ KRA ล่ม ซึ่งระบบใช้โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและจัดเก็บข้อมูลส่วนประกอบของกุญแจไว้ใน KRF ทำให้ไม่ต้องใช้เวลาในการประมวลผลการกระจายส่วนประกอบของกุญแจ ส่งผลให้ประสิทธิภาพด้านเวลาคงที่ และตอบสนองได้รวดเร็ว แม้เมื่อจำนวน KRA เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม IHADM-KRS แม้จะใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่าในบางกระบวนการ แต่มีจุดเด่นในด้านความยืดหยุ่นและความมั่นคงปลอดภัย โดยเฉพาะในกรณีที่มี KRA ล่ม ระบบสามารถกู้คืนกุญแจได้อย่างเสถียร ผ่านกลไกการกระจายข้อมูลที่ออกแบบตามเงื่อนไขของความมั่นคงปลอดภัย อีกทั้งยังรักษาประสิทธิภาพในการกู้คืนกรณีปกติได้ดี แม้มีการเพิ่มจำนวน KRA

ในด้านความเหมาะสมของบริบทการใช้งาน พบว่า ระบบ IHADM-KRS เหมาะสำหรับสภาพแวดล้อมที่มีความต้องการความมั่นคงปลอดภัยในระดับสูงมาก เช่น หน่วยงานภาครัฐ ภาคการเงิน หรือระบบโครงสร้างพื้นฐานที่มีความสำคัญ เนื่องจากระบบนี้สามารถกำหนดจำนวน KRA ขั้นต่ำ (Threshold) ได้อย่างยืดหยุ่น ทำให้สามารถควบคุมความเสี่ยงจากการสมรู้ร่วมคิดของ KRA และเพิ่มความทนทานต่อเหตุการณ์ที่ KRA บางส่วนล่มได้เป็นอย่างดี ในขณะที่ระบบ SSDM-KRS เหมาะสำหรับบริบทที่ให้ความสำคัญกับความเร็วในการประมวลผล มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน โดยเฉพาะองค์กรที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร เช่น ระบบงานธุรกิจทั่วไป ระบบสำรองข้อมูล หรือระบบ IoT ที่ต้องการความรวดเร็วและการติดตั้งใช้งานที่ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามแม้ว่าระดับความมั่นคงปลอดภัยจะน้อยกว่า IHADM-KRS แต่สามารถเสริมด้วยมาตรการรักษาความปลอดภัยอื่นเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการขององค์กรได้ ดังนั้นการเลือกประยุกต์ใช้งาน 2 รูปแบบ ควรพิจารณาตามลักษณะการใช้งานจริงเพื่อให้เกิดประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 อภิปรายผลการวิจัย

การพัฒนาระบบกู้คืนกุญแจลับเริ่มจากแนวคิดที่นำเสนอเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจ เพื่อรองรับกรณีสูญหายของกุญแจเข้ารหัสหรือการเข้าถึงข้อมูลตามข้อกำหนดทางกฎหมาย (Al-Salqan, 1997) ในระยะแรกนิยมใช้หน่วยงานกลางที่เชื่อถือได้ (Trusted Third Party: TTP) ซึ่งมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัดด้านความมั่นคงปลอดภัยจากความเสี่ยง Single Point of Failure (SPOF) และการผูกขาดการควบคุมกุญแจในจุดเดียว เพื่อแก้ปัญหานี้สถาบันมาตรฐานและเทคโนโลยีแห่งชาติ ซึ่งเป็นหน่วยงานของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา (National Institute of Standards and Technology : NIST) (NIST, 1998) จึงเสนอแนวคิดการใช้การกู้คืนกุญแจแบบ M-KRA ในสถาปัตยกรรมแบบกระจายศูนย์ (Decentralized Multi-Agent Systems) ลดการพึ่งพา

ศูนย์กลางและเพิ่มความทนทานของระบบ ต่อมาได้มีงานวิจัยที่จำลองพฤติกรรมโปรโตคอลกู้คืนกุญแจด้วย Extended Cryptographic Timed Petri Net (ECTPN) (Lim et al., 2003) เพื่ออธิบายการทำงานร่วมกันของ M-KRA ซึ่งสะท้อนศักยภาพของโครงสร้างแบบกระจายศูนย์ในการลดความซับซ้อนของขั้นตอนโปรเซส ขณะที่ต่อมามีงานวิจัยที่ได้ประยุกต์ใช้ระบบในสภาพแวดล้อมของอุปกรณ์ทางการแพทย์ (IoMT) (Kim et al., 2021) มีการฝังข้อมูลฟิลด์สำหรับกู้คืนกุญแจไว้ภายในข้อความที่ถูกเข้ารหัส และใช้กระบวนการเข้ารหัสซ้ำผ่านพร็อกซีเพื่อเพิ่มความปลอดภัยของข้อมูล แม้มีความมั่นคงปลอดภัยสูง แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความยืดหยุ่นและความทนทานต่อการล่มของ KRA บางส่วน

จากข้อจำกัดของงานก่อนหน้า จึงมีการพัฒนาระบบ IHADM-KRS และ SSDM-KRS ขึ้น ซึ่งเป็นระบบกู้คืนกุญแจลับแบบ M-KRA ที่ไม่อาศัยศูนย์กลาง โดย IHADM-KRS มุ่งเน้นความยืดหยุ่นในการกำหนดจำนวน KRA ขั้นต่ำ เพื่อเพิ่มความมั่นคงปลอดภัยและรองรับการล่มของ KRA ได้ดีกว่า ขณะที่ SSDM-KRS เน้นความความเร็วในการประมวลผล มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเพื่อลดภาระการจัดการ ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งนำเสนอการทดลองเชิงลึกโดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ 2 ระบบ ในสามประเด็นหลัก ได้แก่ (1) เวลาที่ใช้ในการสร้าง KRF (2) เวลาที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจในสถานการณ์ปกติ และ (3) เวลาที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจเมื่อ KRA บางส่วนล่ม ซึ่งยังไม่มีการนำเสนอในงานวิจัยก่อนหน้า ผลการวิจัยช่วยให้เข้าใจข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของแต่ละระบบได้ชัดเจนในบริบทการนำไปประยุกต์ใช้งาน

โดยผลการทดลองชี้ว่า IHADM-KRS เหมาะสมกับระบบที่ให้ความสำคัญกับความมั่นคงปลอดภัย และความสามารถในการกำหนดจำนวนขั้นต่ำของ KRA ที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจลับ ให้เหมาะสมกับระดับนโยบายความมั่นคงปลอดภัย โดยแม้จะใช้เวลาประมวลผลมากกว่า แต่สามารถรักษาความถูกต้องและความสมบูรณ์ของการกู้คืนได้ดี แม้ในสถานการณ์ KRA ล่ม ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ NIST และสนับสนุนข้อเสนอในงานก่อนหน้าเกี่ยวกับการกระจายความรับผิดชอบเพื่อลดความเสี่ยงจากจุดล้มเหลวเพียงจุดเดียว ส่วน SSDM-KRS มีจุดเด่นอย่างชัดเจนด้านความเร็วในการสร้าง KRF และการกู้คืนกุญแจในสถานการณ์ปกติ อันเป็นผลจากโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและกระบวนการทำงานที่รวดเร็ว ข้อสังเกตนี้สอดคล้องกับแนวคิดของการวิจัยกู้คืนกุญแจ (Lim et al., 2003) ที่ระบุว่าการลดความซับซ้อนของโครงสร้างสามารถช่วยเพิ่มความเร็วของระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะการวิจัย

5.2.1 แนวทางการพัฒนาและต่อยอด

สามารถพัฒนาอัลกอริทึมในรูปแบบไฮบริดหรือผสมผสาน (Hybrid Adaptive Decentralized Key Recovery System) ซึ่งเป็นการสังเคราะห์ข้อดีของทั้งสองระบบเข้าด้วยกัน โดยผสานการทำงานระหว่าง IHADM-KRS และ SSDM-KRS เพื่อให้เกิดความสมดุลด้านความเร็วในการประมวลผลและความมั่นคงปลอดภัย เพิ่มสมรรถนะและประสิทธิภาพของการกู้คืนกุญแจลับให้สูงขึ้น โดยใช้หลักการปรับระดับความมั่นคงปลอดภัยแบบอัตโนมัติ ซึ่งพิจารณาจากค่าดัชนีความปลอดภัยแบบพลวัตเรียกว่า Adaptive Security Threshold (AST) (Canetti et al., 1999) โดยคำนวณจากตัวแปรตามสถานะของระบบ 3 ด้าน คือ (1) ความพร้อมของเอเจนต์ (Availability) (2) ความหน่วงของเวลาเฉลี่ยในระบบ (Latency) และ (3) ความเชื่อมั่นของการยืนยันตัวตน (Authentication Confidence)

อัลกอริทึมแบบไฮบริดนี้ เอื้อต่อการประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมที่ต้องการสมดุลระหว่างความเร็วและความมั่นคงปลอดภัยจากโหมดการทำงาน 2 โหมด คือ

(1) โหมดความเร็วสูง (Fast Recovery Mode) ใช้หลักการของ SSDM-KRS เพื่อให้การกู้คืนทำได้รวดเร็ว ระยะเวลาการรอคอยต่ำ

(2) โหมดความมั่นคงปลอดภัยสูง (Secure Recovery Mode) ใช้หลักการของ IHADM-KRS เพื่อเพิ่มความมั่นคงปลอดภัยในกรณีที่มีแนวโน้มการเกิดความเสี่ยง

ผลลัพธ์ที่คาดหวังคือ จะช่วยให้ระบบกู้คืนกุญแจลับมีสมรรถนะที่ดีกว่าระบบเดิมทั้งสองรูปแบบ โดยสามารถลดเวลาเฉลี่ยในการสร้าง KRF ได้ และเพิ่มความเสถียรของการกู้คืนในสภาวะที่เกิดความเสี่ยงได้อย่างมีนัยสำคัญ เป็นแนวทางใหม่ที่นำไปพัฒนาและใช้งานได้จริงบนระบบความมั่นคงปลอดภัยในยุคดิจิทัล

5.2.2 การทดสอบในสภาพแวดล้อมการโจมตีจริง

งานวิจัยในอนาคตอาจออกแบบการทดสอบโดยจำลองการโจมตีรูปแบบต่าง ๆ เช่น การโจมตีแบบสมรู้ร่วมคิด (Collusion Attack) หรือการโจมตีเพื่อทำให้เอเจนต์ล่ม (Denial of Service) เพื่อประเมินความทนทานของระบบในสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงการใช้งานจริงมากที่สุด

6. เอกสารอ้างอิง

กนกวรรณ กันยะมี. (2566). การกระจายและการแชร์กุญแจลับอย่างง่ายบนระบบการกู้คืนกุญแจแบบหลายเอเจนต์ที่ไม่อาศัยศูนย์กลาง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, 6*(1), 104-115.

กนกวรรณ กันยะมี. (2566). การปรับปรุงฟิลด์การกู้คืนกุญแจ เพื่อแก้ปัญหาการสมรู้ร่วมคิดกันระหว่างเอเจนต์ บนระบบการกู้คืนกุญแจแบบไม่อาศัยศูนย์กลาง. *รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 9*. (น. 651-658). มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย.

Abelson, H., Anderson, R., Bellovin, S. M., Benaloh, J., Blaze, M., Diffie, W., Gilmore, J., Neumann, P. G., Rivest, R. L., Schiller, J. I., & Schneier, B. (1997). The risks of key recovery, key escrow, and trusted third-party encryption. *World Wide Web Journal, 2*(3), 241-257.

Al-Salqan, Y. Y. (1997). Cryptographic key recovery. *Proceedings of the Sixth IEEE Computer Society Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems* (pp. 34-37). IEEE Computer Society. https://doi.org/10.1109/FTDCS.1997.644700

Arbogast, J. K., Sumner, I. B., & Lam, M. O. (2018). Parallelizing Shamir's secret sharing algorithm. *Journal of Computing Sciences in Colleges, 33*(3), 12-18.

Canetti, R., Gennaro, R., Jarecki, S., Krawczyk, H., & Rabin, T. (1999). Adaptive security for threshold cryptosystems. In M. Wiener (Ed.), *Advances in cryptology—CRYPTO '99* (Vol. 1666, pp. 98–116). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-48405-1_7

Hughes, L. E. (2022). Basic cryptography: Symmetric key encryption. In Pro Active Directory Certificate Services (pp. 3-17). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7486-6_1

Kanyamee, K., & Sathitwiriyawong, C. (2014). High-availability decentralized cryptographic multi-agent key recovery. *The International Arab Journal of Information Technology, 11*(1), 52-60.

Kim, T., Kim, W., Seo, D., & Lee, I. (2021). Secure encapsulation schemes using key recovery system in IoMT environments. *Sensors, 21*(10), Article 3474. https://doi.org/10.3390/s21103474

Lim, S., Kang, S., & Sohn, J. (2003). Modeling of multiple agent based cryptographic key recovery protocol. *Proceedings of the 19th Annual Computer Security Applications Conference*, 119–128. IEEE Computer Society. https://doi.org/10.1109/CSAC.2003.1254317

National Institute of Standards and Technology. (1998). *Requirements for key recovery products: Final report*. Federal Information Processing Standard for Federal Key Management Infrastructure.

Shamir, A. (1979). How to share a secret. *Communications of the ACM, 22*(11), 612-613. https://doi.org/10.1145/359168.359176

Stallings, W. (2023). *Cryptography and network security: Principles and practice* (8th ed.). Pearson.