

การประเมิน DEG7-9 อีวริสติกเพื่อการออกแบบโดยใช้แบบสอบถามประสบการณ์การเล่นเกม

กรชูลี สังข์แก้ว*

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี ต.ขุนทะเล อ.เมือง จ.สุราษฎร์ธานี 84100

* Corresponding Author: kornchulee.sun@sru.ac.th

อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีมีเดียและแอนิเมชัน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 27 พฤษภาคม 2562

แก้ไข : 10 มีนาคม 2563

ตอบรับ : 31 มีนาคม 2563

คำสำคัญ :

อีวริสติกเพื่อการออกแบบ /
เกมดิจิทัลเพื่อการศึกษา /
ประสบการณ์การเล่นเกม /
แบบสอบถามประเมินประสบการณ์
การเล่นเกม /
การปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์
กับคอมพิวเตอร์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของชุดอีวริสติกเพื่อการออกแบบ ชื่อ “DEG7-9” ในแง่ของประสบการณ์การเล่นเกม โดยใช้แบบประเมินประสบการณ์การเล่นเกม ชื่อ “THGEQ” ในการประเมินเกมชื่อ “การคัดแยกขยะ” ซึ่งเป็นเกมดิจิทัลเพื่อการศึกษาสำหรับเด็กอายุ 7-9 ปี ที่ใช้ DEG7-9 เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนา ทั้งนี้ สุ่มเด็กนักเรียนอายุ 7-9 ปี จำนวน 72 คน เพื่อเล่นเกมดังกล่าว จากนั้นให้แสดงความรู้สึกต่อเกมโดยใช้ visual analogue scale ให้คะแนนในแต่ละคำถามของ THGEQ คำนวณค่าเฉลี่ยของระดับความรู้สึกต่อคำถาม 7 ข้อ ซึ่งครอบคลุมประเด็นทางประสบการณ์การเล่นเกม 7 ประเด็น พร้อมทั้งใช้การทดสอบแบบ Kolmogorov-Smirnov Test และ Mann-Whitney ในการเปรียบเทียบระดับความรู้สึกของเด็กกลุ่มประชากรศาสตร์ที่แตกต่างกัน 3 กลุ่ม (เพศ ระดับชั้นการศึกษา และอายุ) ผลการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า เด็กมีความรู้สึกด้านบวกต่อเกมอยู่ในระดับปานกลางจนถึงมากที่สุด ในขณะที่มีความรู้สึกเชิงลบอยู่ในระดับน้อย เด็กทั้ง 3 กลุ่มมีประสบการณ์การเล่นเกมใน 6 ประเด็นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นประเด็นของ ความรู้สึกติดต่อกับเกม ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า THGEQ ซึ่งแปลงมาจาก KidsGEQ และได้รับการปรับปรุงให้กระชับขึ้น สามารถนำไปใช้ในการประเมินประสบการณ์การเล่นของเด็กไทยได้อย่างเหมาะสม เกมที่ได้รับการออกแบบตาม DEG7-9 ส่งผลต่อประสบการณ์การเล่นที่ดีของเด็ก ทั้ง DEG7-9 และ THGEQ สามารถใช้เป็นหลักการทาง HCI ในการออกแบบและประเมินประสบการณ์การเล่นเกมดิจิทัลเพื่อการศึกษาสำหรับเด็กกลุ่มอายุ 7-9 ปี โดยเฉพาะได้

Evaluation of DEG7-9 Design Heuristics by Applying Game Experience Questionnaire

Kornchulee Sungkaew*

Suratthani Rajabhat University, Khun Taleay, Muang, Suratthani, 84100

* Corresponding Author: kornchulee.sun@sru.ac.th

Lecturer, Multimedia Technology and Animation Program, Faculty of Science and Technology.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: May 27, 2019

Revised: March 10, 2020

Accepted: March 31, 2020

Keywords:

Design Heuristics /
Digital Educational Game (DEG) /
Game Experience /
Game Experience
Questionnaire (GEQ) /
Human Computer Interaction
(HCI)

This research aimed to validate the effectiveness of the design heuristic called "DEG7-9" in terms of game experience by using the game experience questionnaire called "THGEQ" to evaluate a digital educational game called "Waste Separation," which was designed for children age 7-9 following DEG7-9. Seventy-two students were randomized to play the game. Then, they were asked to indicate their feeling about the DEG by rating 7 statements covering the 7 dimensions of the game experience using the visual analogue scale. After the means for each of the THGEQ statements were computed, the differences in the level of perceptions related to three demographic variables (gender, education level, and age) were compared by the Kolmogorov-Smirnov Test and Mann-Whitney test. It was found that the means for the positive dimensions were moderate to highest, whereas the means for the negative dimensions were low. There were no significant differences in the perceptions of 6 dimensions between the groups of children; only exception was noted in the case of Immersion. THGEQ, which has been translated from KidsGEQ into a set of understandable and concise statements for Thai children, is therefore noted to be appropriate for identifying children's perceptions of game experience. The game designed by following DEG7-9 could present a quality game experience. Both DEG7-9 and THGEQ are valuable tools to provide game design teams with an HCI-focused set of design heuristics and GEQ that can be used for designing DEGs and measuring game experience for children age 7-9 years in particular.

1. บทนำ

เกมดิจิทัลนิยมใช้เป็นเครื่องมือเพื่อส่งเสริมพัฒนาการทางการเรียนรู้ให้แก่เด็กกันมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากกิจกรรมที่ฝังอยู่ในเกมช่วยสร้างความรู้ความเข้าใจให้แก่เด็กได้ง่ายขึ้น [1] เกมดิจิทัลที่ออกแบบทั้งเพื่อความบันเทิงและเพื่อส่งเสริมการเรียนรู้ มีคำเรียกที่หลากหลาย ได้แก่ Edutainment, Serious Games, Game-based Learning และ Persuasive Games [2-3] เป็นต้น คำว่า “*เกมดิจิทัลเพื่อการศึกษา (Digital Educational Game: DEG)*” เป็นอีกคำหนึ่งที่ใช้เรียกเกมดิจิทัลที่ออกแบบให้มีผลทางการให้ความรู้พร้อมความบันเทิง [4]

อย่างไรก็ตาม การออกแบบ DEG มีความซับซ้อนกว่าการออกแบบสื่ออื่นๆ เพราะจะต้องมีความสมดุลระหว่างความสนุกสนานและประสิทธิภาพในการเรียนรู้ นักออกแบบ DEG ควรว่าคุณลักษณะใดมีความสำคัญและควรนำมาใช้ในการออกแบบ เพื่อกระตุ้นให้เด็กบรรลุผลทางการเรียนรู้พร้อมกับความสนุกสนาน ดังนั้น นักออกแบบ DEG ในปัจจุบันจึงให้ความสำคัญกับการใช้หลักการทางด้านการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ (Human Computer Interaction: HCI) เพื่อช่วยในการออกแบบกันมากขึ้น [5]

Nielsen Norman Group ซึ่งประกอบไปด้วยผู้เชี่ยวชาญทางด้าน UX Design โดยการนำของ J. Nielsen ได้นำเสนอหลักการทางด้าน HCI เพื่อช่วยในการออกแบบผลิตภัณฑ์แบบปฏิสัมพันธ์ หรือ Design Guidelines สำหรับเด็กไว้จำนวนมาก [6] Design Guidelines ดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบแอปพลิเคชันประเภทต่างๆ รวมไปถึงการออกแบบเกม และ DEG ทั้งที่เป็น Web-based และ Mobile ได้ Design Guidelines เหล่านี้ได้ถูกประเมินแล้วว่าช่วยให้เด็กเกิดประสบการณ์การใช้งาน (User Experience: UX) ที่ดีต่อผลิตภัณฑ์

อย่างไรก็ตาม การศึกษาของ Nielsen Norman Group ให้ความสนใจกับกลุ่มเป้าหมายเด็กครอบคลุมช่วงอายุที่กว้างคือ 3-12 ปี ประกอบกับการศึกษาวิจัยก่อนหน้านี้ของผู้วิจัย [7] ซึ่งให้ความสนใจในการพัฒนาฮิวริสติกเพื่อการออกแบบ (Design Heuristics) สำหรับใช้เป็นหลักการทาง HCI ในการออกแบบ DEG สำหรับเด็กอายุ 7-11 ปี การศึกษาวิจัยพบคุณลักษณะสำคัญ 8 ประการที่ทำให้เกมมีประสิทธิภาพในการกระตุ้นให้เด็กอายุ 7-11 ปี เล่นและเรียนรู้ไปพร้อมกัน จึงได้นำเสนอเป็น

Design Heuristics ชุดใหม่ชื่อว่า “DEG7-11” อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษายังพบข้อจำกัดว่า เกมที่ออกแบบด้วย DEG7-11 ยังคงไม่เป็นที่พึงพอใจต่อเด็กทั้งกลุ่มอายุ 7-11 ปี เด็กที่อายุน้อยที่สุด (7 ปี) ชอบลักษณะเกมต่างกับเด็กที่อายุมากที่สุด (11 ปี) ผู้วิจัยจึงให้ข้อเสนอแนะไว้ว่า ควรต่อยอดงานวิจัยเพื่อสกัดเอาเฉพาะฮิวริสติกข้อที่เหมาะสมในการใช้ออกแบบ DEG สำหรับเด็กช่วงอายุที่เฉพาะเจาะจงขึ้น เช่น 7-9 ปี หรือ 9-11 ปี เป็นต้น เพื่อจะได้นำฮิวริสติกไปใช้ในการออกแบบเกมดิจิทัลให้เหมาะกับเด็กในช่วงวัยที่แตกต่างกัน

ดังนั้น ในการศึกษาที่ผ่านมา [8-9] ผู้วิจัยจึงได้ใช้วิธีการประเมินแบบฮิวริสติก (Heuristics Evaluation: HE) ของ Nielsen [10] และข้อมูลเกมรีวิว ในการประเมินเกมดิจิทัลเพื่อการศึกษาที่เผยแพร่อยู่บนอินเทอร์เน็ต เพื่อสกัดคุณลักษณะ 8 ประการของ DEG7-11 ให้คงเหลือเฉพาะคุณลักษณะที่มีประสิทธิภาพในการออกแบบเกมที่สามารถกระตุ้นให้เด็กอายุ 7-9 ปี เล่นและเรียนรู้ไปพร้อมกัน จากนั้น นำเสนอเป็น Design Heuristic ชุดใหม่ให้ชื่อว่า “DEG7-9” เพื่อใช้เป็นหลักการทางด้าน HCI สำหรับนักออกแบบและพัฒนาเกมในการออกแบบเกมดิจิทัลเพื่อการศึกษาสำหรับเด็กอายุ 7-9 ปี โดยเฉพาะเจาะจง

DEG7-9 ประกอบไปด้วยคุณลักษณะสำคัญ 6 ประการที่ควรนำไปใช้ในการออกแบบเกม ผู้วิจัยได้พิสูจน์ให้เห็นว่า เกมดิจิทัลเพื่อการศึกษาที่เผยแพร่อยู่บนอินเทอร์เน็ต และเป็นเกมที่มีคะแนนเกมรีวิวสูง มักพบคุณลักษณะ 6 ประการอยู่ด้วยเสมอ นอกจากนั้น ผู้วิจัยยังได้รายงานประสิทธิภาพของ DEG7-9 ต่อผลการเรียนรู้ของเด็กอายุ 7-9 ปี โดยการนำ DEG7-9 ไปใช้ในการออกแบบและพัฒนา DEG จำนวน 1 เกม ชื่อ “เกมการคัดแยกขยะ” และให้เด็กอายุ 7-9 ปี เล่น ผลการศึกษาค้นค่าทางการเรียนรู้ของเกมนี้นับว่า เด็กที่เล่นเกมมีผลการเรียนรู้ในเรื่องการคัดแยกขยะเพิ่มขึ้นจากก่อนเล่นเกมอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม ในการสร้างสรรค์เกมดิจิทัลนั้นต้องคำนึงถึง ความสนุกสนานเป็นหลัก เพื่อเกมจะได้ส่งผลต่อประสบการณ์การเล่นเกม (Game Experience) ที่ดีต่อผู้เล่น และสามารถได้รับการยอมรับจากผู้เล่นต่อไป การออกแบบเกมให้มีความสนุกสนานนั้น พบนักวิจัย [11] ได้อ้างถึงทฤษฎี MDA (Mechanics – Dynamics – Aesthetics) [12] ไว้ว่า เกมจะมีความ

สนุกสนานได้นั้น ประเด็นสำคัญที่ควรคำนึงถึงคือ “สุนทรียภาพ (Aesthetics)” ของเกม โดยลักษณะที่ทำให้เกมมีสุนทรียภาพนั้นมีหลากหลาย เช่น สร้างความรู้สึกที่ดี (Sensation) สร้างจินตนาการ (Fantasy) มีเรื่องราว (Narrative) มีความท้าทาย (Challenge) ส่งเสริมการสร้างมิตรภาพ (Fellowship) สร้างประสบการณ์ใหม่ (Discovery) ได้ค้นหาตัวเอง (Expression) และมีนันทนาการ (Submission) เป็นต้น เกมที่มีสุนทรียภาพจะนำไปสู่ความสนุกสนานของผู้เล่นต่อไป นั่นคือ ความสนุกสนานของเกมประกอบไปด้วยประสบการณ์ด้านต่างๆ มากมาย ดังนั้น ก่อนที่เกมจะถูกเปิดตัวในตลาดเกมจึงควรได้รับการประเมิน Game Experience ก่อน จุดประสงค์ของการประเมิน Game Experience นั้น ไม่เฉพาะเจาะจงเพียงเพื่อให้ทราบว่าเกมนั้นสนุกหรือไม่แต่ยังศึกษาด้วยว่ามีประสบการณ์ประเภทใดบ้างที่ผู้เล่นได้รับการจากการเล่นเกม [13]

ในการประเมิน Game Experience นั้น ต้องใช้แบบสอบถามประเมินประสบการณ์การเล่นเกม (Game Experience Questionnaire: GEQ) ที่เหมาะสม ผู้วิจัยพบว่ายังไม่มี GEQ สำหรับประเมินประสบการณ์การเล่นเกมสำหรับเด็กไทยอายุ 7-9 ปีโดยเฉพาะเจาะจง แต่พบการศึกษาของ Poels และคณะ [14] ได้พัฒนาแบบสอบถามสำหรับใช้วัดประสบการณ์ในการเล่นสำหรับเด็กอายุ 8-12 ปีไว้ชื่อว่า “Kids Game Experience Questionnaire (KidsGEQ)” พบว่า ขอบเขตการประเมิน Game Experience ของ Poel และคณะ [14] นั้นครอบคลุมการพิจารณาความรู้สึกของผู้เล่น 7 ด้าน (ตารางที่ 3) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเกมที่มีความสนุกสนานที่น่าสนใจในทฤษฎี MDA [12] เช่น เกมมีความท้าทาย มีนันทนาการ เป็นต้น

Poel และคณะ [14] ได้รายงานให้เห็นว่าแบบสอบถามดังกล่าวผ่านการตรวจสอบประสิทธิภาพการใช้งานอย่างเพียงพอที่เด็กอายุ 8-12 ปี สามารถนำไปใช้ได้ด้วยตนเอง เด็กสามารถเข้าใจคำถามในแบบสอบถามได้ง่าย และสามารถกรอกแบบสอบถามได้ด้วยตนเองอย่างอิสระโดยไม่ต้องพึ่งผู้ใหญ่หรือผู้เชี่ยวชาญในการให้คำแนะนำ อย่างไรก็ตาม รายการคำถามใน KidsGEQ อยู่ในรูปแบบภาษาอังกฤษซึ่งไม่เหมาะสมกับเด็กไทยทั่วไปในระดับประถมศึกษาที่จะสามารถอ่านคำถามภาษาอังกฤษได้ด้วยตนเองโดยไม่อาศัยผู้ใหญ่ให้คำอธิบาย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดแปลง KidsGEQ ให้อยู่ในรูปแบบภาษาไทยที่ประกอบไปด้วยรายการคำถามที่เด็กไทยสามารถอ่านเข้าใจ

ได้ด้วยตนเอง

เนื่องจาก KidsGEQ ใช้มาตรวัดแบบ Likert Scale 5 ระดับ ในการวัดระดับ Game Experience จากเด็ก ผู้วิจัยคาดหวังว่าตัวเลขในลักษณะตัวพิมพ์ธรรมดาจะสอดคล้องกับข้อความกำกับระดับความรู้สึกที่ใช้ภาษาอย่างเป็นทางการ อาจยากต่อการทำความเข้าใจของเด็ก ประกอบกับพบรายงานว่า เด็กอายุ 7 ปีขึ้นไป สามารถใช้ภาพ Visual Analogue Scale (VAS) เพื่อระบุความรู้สึกหรือความคิดเห็นของตนเองได้ง่าย [15] อีกทั้งการศึกษาของนักวิจัยทาง HCI ที่ได้ออกแบบ VAS เพื่อใช้ในการสำรวจ Computer Experience (CE) จากเด็ก รายงานว่า VAS สามารถใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพกับเด็กอายุ 7 ปีขึ้นไป [16] ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดออกแบบรูปภาพ VAS สำหรับประเมิน Game Experience ขึ้นใช้แทนตัวเลข Likert Scale 5 ระดับ ซึ่งเป็นตัวพิมพ์ธรรมดา พร้อมปรับแต่งข้อความให้สั้นและใช้ภาษาอย่างไม่เป็นทางการ กำกับด้านล่างของแต่ละภาพ เพื่อให้เด็กอ่านประกอบให้เกิดการสื่อความหมายที่ดียิ่งขึ้น [17]

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดพัฒนา GEQ ขึ้นใหม่พร้อมเครื่องมือแสดงความคิดเห็นแบบ VAS ที่เหมาะสมกับเด็กไทยอายุ 7-9 ปี สำหรับใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของเกมดิจิทัลที่ได้รับการออกแบบด้วย DEG7-9 ในแง่ที่ส่งผลต่อประสบการณ์การเล่นเกม ผลการศึกษาวิจัยสามารถใช้เป็นอีกหนึ่งหลักฐานยืนยันประสิทธิภาพของ DEG7-9 หากได้นำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเกม เกมนั้นนอกจากจะส่งผลต่อการเรียนรู้ ยังส่งผลต่อประสบการณ์การเล่นเกมที่ดีของเด็กอายุ 7-9 ปีอีกด้วย ดังนั้น การศึกษาวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์และคำถามการวิจัยดังต่อไปนี้

1) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.1) เพื่อพัฒนา GEQ ที่เหมาะกับเด็กไทย สำหรับใช้ในการประเมิน Game Experience โดยแปลงมาจาก KidsGEQ และมีเครื่องมือแสดงความคิดเห็นแบบ VAS

1.2) เพื่อใช้ GEQ ที่พัฒนาขึ้น ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของ DEG7-9 ต่อการสร้างประสบการณ์การเล่นของเด็กอายุ 7-9 ปี

2) คำถามการวิจัย

2.1) GEQ ที่แปลงมาจาก KidsGEQ และ VAS ที่ได้ ออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการประเมิน Game Experience สามารถใช้ได้ดีและเหมาะสมสำหรับเด็กไทยอายุ 7-9 ปี หรือไม่?

2.2) คุณลักษณะเกม 6 ประการของ DEG7-9 มีผลต่อการสร้างประสบการณ์การเล่นที่ดีให้แก่เด็กอายุ 7-9 ปีได้หรือไม่?

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 พัฒนาเกมดิจิทัลเพื่อการศึกษา

เรื่อง “การคัดแยกขยะ”

ทีมวิจัยซึ่งประกอบไปด้วยผู้วิจัยในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาและนักศึกษาหลักสูตรเทคโนโลยีมีเดียและแอนิเมชัน ชั้นปีที่ 4 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จำนวน 1 กลุ่ม (2 คน) ที่กำลังศึกษารายวิชาโครงการทางด้านเทคโนโลยีมีเดียและแอนิเมชัน ในปีการศึกษา 1/2561 และมีหัวข้อปริญญานิพนธ์ทางด้านการออกแบบและพัฒนาเกมดิจิทัล ได้ร่วมกันออกแบบและพัฒนาเกมดิจิทัลเรื่อง “การคัดแยกขยะ” แม้ว่ายังไม่มีหลักการในเรื่องรูปแบบการออกแบบ (Design Pattern) ที่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงในการออกแบบและพัฒนาเกม [18] แต่ทีมวิจัยได้ประยุกต์ใช้หลักการวิศวกรรมซอฟต์แวร์เป็นแนวทางดังนี้

2.1.1 วงจรชีวิตกระบวนการวิศวกรรมซอฟต์แวร์ นักวิจัยทางวิทยาการคอมพิวเตอร์ได้นิยามเกมดิจิทัลไว้ว่าเป็นซอฟต์แวร์หรือแอปพลิเคชันประเภทหนึ่ง ดังนั้น ในการออกแบบและพัฒนาเกมดิจิทัลจึงควรคำนึงถึงหลักการวิศวกรรมซอฟต์แวร์ร่วมด้วย โดยวงจรชีวิตกระบวนการวิศวกรรมซอฟต์แวร์ในการพัฒนานั้นประกอบไปด้วย 3 เฟส (Phase) นั่นคือ กระบวนการก่อนการผลิต (Pre-Production) ในระหว่างการผลิต (Production) และหลังการผลิต (Post-Production) [19] การศึกษาวิจัยนี้จึงได้เทียบเคียงใช้วงจรชีวิตกระบวนการวิศวกรรมซอฟต์แวร์ในการออกแบบและพัฒนา DEG นั่นคือ ในกระบวนการก่อนการผลิต มีการใช้เอกสารการออกแบบเกม (Game Design Document) หรือ กรอบการออกแบบ (Design Framework) ซึ่งในบริบททาง HCI มักเรียกว่า Design Guideline หรือ Design Heuristics นั้นเอง

ในระหว่างการผลิต ทีมวิจัยได้ร่วมกันจัดทำสตอรี่บอร์ด (Storyboard Production) และผังงาน (Flowchart) ของเกม ซึ่งสอดคล้องกับงานในวงจรชีวิตกระบวนการวิศวกรรมซอฟต์แวร์ที่นักวิจัย [19] ได้ระบุไว้ว่าสตอรี่บอร์ดเป็นกระบวนการสำคัญที่สุดในการพัฒนาฉากต่างๆ ในเกมและแสดงให้เห็น

กระบวนการเล่นเกมผ่านผังงาน

ในกระบวนการหลังการผลิตของวงจรวิศวกรรมซอฟต์แวร์ มีการประเมินผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับการศึกษาวิจัยนี้ประเมินคุณภาพเกมทั้งด้านการส่งผลต่อการเรียนรู้ [9] และประสบการณ์การเล่น (Game Experience) ซึ่งนำเสนอผลการประเมินให้เห็นดังรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.1.2 การออกแบบเกมโดยใช้ Design Heuristics กรอบการออกแบบเกมในกระบวนการก่อนการผลิตสำหรับการวิจัยนี้ใช้ Design Heuristics ชื่อ “DEG7-9” (ตารางที่ 1) เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเกมดิจิทัลเพื่อการศึกษาสำหรับเด็กอายุ 7-9 ปี หน้าจอแรกของเกมแสดงดังรูปที่ 1 รายละเอียดการออกแบบและพัฒนาเกมแสดงดังตารางที่ 2 และ รูปที่ 2 - รูปที่ 7

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของ DEG7-9 Heuristics [8-9]

DEG7-9
DEG7-9#1: เป้าหมายความสำเร็จในการเล่นเกมนิติจิทัลเพื่อการศึกษาควรกำหนดเป็น เป้าหมายเพื่อการเรียนรู้ (Learning Goals) แทนเป้าหมายความสามารถ (Performance Goals) นอกจากนี้เป้าหมายดังกล่าวควรชัดเจน กระชับ เรียบง่าย และนำเสนอเป้าหมายไว้ในช่วงต้นๆ เมื่อเข้าสู่เกม
DEG7-9#2: ในเกมนิติจัลเพื่อการศึกษา ควรได้จัดเตรียมคำแนะนำต่างๆ ไว้ให้เด็กๆ ใช้เป็นตัวช่วยระหว่างการเล่นเกม โดยคำแนะนำต่างๆ เหล่านั้นควรได้อธิบายวิธีการเล่นเพื่อเข้าใจคำตอบที่ถูกต้องหรือทำอย่างไรจะชนะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคำแนะนำต้องไม่เป็นข้อความเท่านั้น
DEG7-9#3: เกมนิติจัลเพื่อการศึกษาสำหรับเด็กอายุ 7-9 ปี ควรมีลักษณะที่เล่นแล้วผ่อนคลาย เช่น ลักษณะเกมไม่ซับซ้อน หากเป็นเกมที่ใช้ความเร็วหรือเวลาที่จำกัดในการเล่น ควรให้ความเร็วที่เหมาะสมและไม่กดดันด้านเวลา
DEG7-9#4: เกมนิติจัลเพื่อการศึกษาควรมีหลายด่าน โดยด่านก่อนหน้าแฝงไปด้วยความรู้เพื่อใช้เล่นด่านต่อไป แต่ละด่านเพิ่มความยากขึ้นตามลำดับเพื่อเพิ่มความท้าทายให้เด็กๆ เล่นด้วยความอยากรู้อยากเห็นไปเรื่อยๆ การเล่นแต่ละด่านเปิดโอกาสให้เด็กได้ทบทวนความรู้ผ่านลักษณะการเล่นซ้ำๆ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของ DEG7-9 Heuristics [8-9] (ต่อ)

DEG7-9#5: เพื่อสร้างจินตนาการระหว่างการเล่นและนำไปสู่การเรียนรู้ เกมดิจิทัลเพื่อการศึกษาควรใช้ตัวละครในลักษณะการดูภาพเคลื่อนไหวมากกว่าตัวละครที่เลียนแบบมนุษย์

DEG7-9#6: เกมดิจิทัลเพื่อการศึกษาควรจัดให้มี feedback เพื่อแสดงความก้าวหน้าในการเรียนรู้ให้เด็ก ๆ ทราบ โดย feedback อาจอยู่ในรูปแบบการให้รางวัลเมื่อเด็กสามารถเรียนรู้อะไรบางอย่างได้



รูปที่ 1 หน้าแรกของเกมดิจิทัลเรื่อง “การคัดแยกขยะ”

ตารางที่ 2 การนำ DEG7-9 ใช้ในการออกแบบและพัฒนาเกมดิจิทัล ([9])

DEG7-9

DEG7-9#1 กำหนดเป้าหมายเพื่อการเรียนรู้ เป้าหมายเพื่อการเรียนรู้ที่เกมกำหนดให้ เช่น “น้องๆ ลากขยะมาทิ้งให้ตรงกับประเภทของถังขยะ” เกมไม่ได้กำหนดว่าต้องเล่นให้ได้คะแนนสูงสุดหรือกำหนดให้ทำคะแนนให้ได้ตามที่กำหนดไว้ นอกจากนั้น เป้าหมายสั้น กระชับ ชัดเจน และนำเสนอก่อนเข้าสู่เกม (รูปที่ 2)

DEG7-9#2 มีตัวช่วยระหว่างการเล่นเกม ระหว่างการเล่นเกม มีตัวช่วยที่ไม่ใช่ข้อความ แต่อยู่ในรูปแบบของ Animated Infographics หากไม่ทราบข้อมูลสำหรับเล่นเกม ผู้เล่นเกมสามารถสลับหน้าจอไปดู Animated Infographics ซึ่งมีเสียงบรรยายความรู้เรื่องการคัดแยกขยะ ผู้เล่นเกมจะรู้คำตอบที่ถูกต้องสำหรับนำไปเล่นเกมต่อไป (รูปที่ 3)

DEG7-9#3 เป็นเกมไม่ซับซ้อน มีลักษณะที่เล่นแล้วผ่อนคลาย เกมเป็นประเภท Casual Games ซึ่งเล่นง่าย เช่น ลากแล้วปล่อย คลิ๊กเมาส์ บางด่านมีเวลาที่จำกัดแต่ไม่กดดันจนเกินไป เพียงเพื่อกระตุ้นความท้าทาย (รูปที่ 4)

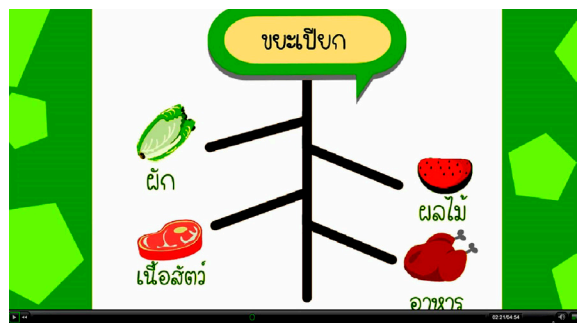
DEG7-9#4 ควรมีหลายด่าน เกมมีหลายด่าน (Levels) โดยด่านก่อนหน้าแฝงกลไก/ความรู้เพื่อใช้เล่นด่านต่อไป การเล่นแต่ละด่านเปิดโอกาสให้ผู้เล่นได้ทบทวนความรู้ผ่านลักษณะการเล่นซ้ำๆ (รูปที่ 5)

DEG7-9#5 ตัวละครอยู่ในลักษณะการดูภาพเคลื่อนไหว เกมใช้ตัวละครในลักษณะการดูภาพเคลื่อนไหวที่มีลักษณะเกินจริง เพื่อสร้างจินตนาการระหว่างการเล่นและนำไปสู่การเรียนรู้ (รูปที่ 6)

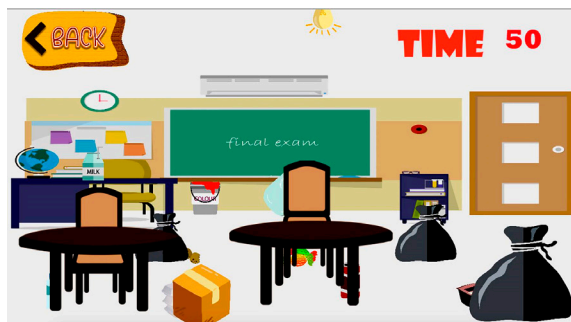
DEG7-9#6 มี Feedbacks เพื่อแสดงความก้าวหน้าในการเรียนรู้ เกมใช้คะแนนเป็น Feedbacks เพื่อแสดงความก้าวหน้าในการเรียนรู้ให้เด็กทราบ (รูปที่ 7)



รูปที่ 2 เป้าหมายเพื่อการเรียนรู้



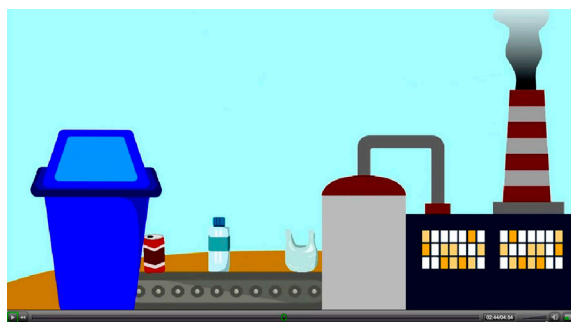
รูปที่ 3 ตัวช่วยระหว่างการเล่นเกม



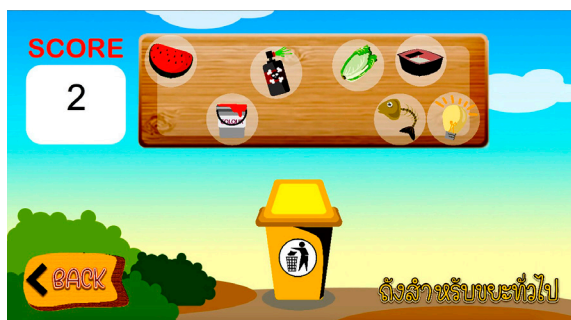
รูปที่ 4 เกมไม่ซับซ้อน มีลักษณะเล่นแล้วผ่อนคลาย



รูปที่ 5 เกมมีหลายด่าน



รูปที่ 6 ตัวละครเป็นการ์ตูนภาพเคลื่อนไหว



รูปที่ 7 ใช้คะแนนเป็น Feedback

2.2 พัฒนา GEQ

คณะทำงานได้พัฒนารายการคำถามและออกแบบรูปภาพ VAS เพื่อใช้ในการวัดระดับความรู้สึกหรือประสบการณ์ในการเล่น (Game Experience) ของเด็กอายุ 7-9 ปี

2.2.1 พัฒนารายการคำถามใน GEQ

GEQ สำหรับการประเมิน Game Experience ของการศึกษาวิจัยนี้แปลมาจาก KidsGEQ ซึ่งผ่านการทดสอบประสิทธิภาพแล้วโดย Poels และคณะ [14] KidsGEQ มีรายการคำถามเป็นภาษาอังกฤษจึงถูกแปลเป็นภาษาไทย จากนั้นนำ GEQ ที่แปลได้ไปทดลองใช้กับเด็กอายุ 7-9 ปี จำนวน 16 คน เพื่อตรวจสอบว่า GEQ มีความง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน (User Friendliness) ต่อเด็กหรือไม่ พร้อมทั้งศึกษาว่าเด็กสามารถเข้าใจข้อความรายการคำถามใน GEQ ได้ง่าย (Understandability) หรือไม่ ผลการทดลองใช้พบว่า มีบางคำถามที่เด็กอายุ 7-9 ปี เข้าใจได้ยาก บางคำถามซ้ำซ้อน อาจเนื่องมาจากคำศัพท์ภาษาอังกฤษบางคำเมื่อแปลเป็นภาษาไทยแล้วมีความหมายคล้ายกันมากหรือมีความหมายไปในทิศทางเดียวกัน ผู้วิจัยจึงปรับปรุงรายการคำถามในแบบสอบถามโดยเลือกเพียง 1 คำถามจากแต่ละประเด็น เพื่อให้แบบสอบถามกระชับ เด็กที่อ่านหนังสือไม่คล่องจึงยังไม่ทันรู้สึกเบื่อที่จะอ่าน พร้อมทั้งปรับข้อความหลังจากการแปลให้อยู่ในรูปภาษาไทยที่เด็กอ่านเข้าใจได้ง่ายโดยไม่ต้องถามผู้ใหญ่ ดังนั้นจาก KidsGEQ ฉบับภาษาอังกฤษ ซึ่งประกอบไปด้วย 21 คำถามจาก 7 ประเด็นของประสบการณ์การเล่นเกมดังกล่าวที่ 3 จึงได้ถูกปรับปรุงใหม่เป็นภาษาไทย เหลือเพียง 7 คำถาม จาก 7 ประเด็น ผู้วิจัยให้ชื่อ GEQ ที่พัฒนาขึ้นว่า “THGEQ” ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 KidsGEQ ของ Poels และคณะ [7, 14]

ประเด็น	รายการคำถาม
#1 Challenge	1. It was exciting. *** 2. I felt challenged by the game. 3. I had to put a lot of effort into the game.
#2 Competence	4. I felt confident while playing. 5. I felt competent/capable.

ตารางที่ 3 KidsGEQ ของ Poels และคณะ [7, 14] (ต่อ)

ประเด็น	รายการคำถาม
#3 Flow	6. I was good at it. ***
	7. I paid a lot of attention to the game.
	8. While playing, I forgot everything around me.
#4 Immersion	9. I felt like I was inside the game. ***
	10. I could use my fantasy in the game.
	11. I found the game impressive.
#5 Negative Affect	12. The game was beautiful. ***
	13. It was a stupid game.
	14. I found it tiresome/exhausting. ***
#6 Positive Affect	15. I felt bored.
	16. The game made me laugh from time to time.
	17. I thought it was fun to play the game. ***
#7 Tension	18. I felt good while playing.
	19. Playing the game did not go as I wanted to.
	20. The game made me nervous/tense/very uneasy.
	21. I have grumbled/complained while playing the game. ***

ตารางที่ 4 รายการคำถามใน THGEQ

ประเด็น	รายการคำถาม
#1 ความรู้สึกท้าทายระหว่างเล่นเกม	1. เกมน่าตื่นเต้นมาก
#2 ความสามารถในการเล่นเกม	2. ฉันเล่นเกมนี้ได้เก่ง
#3 ความรู้สึกสิ้นไหวระหว่างการเล่น	3. ระหว่างเล่นเกม ฉันรู้สึกเหมือนเข้าไปอยู่ในเกมนี้เลย
#4 ความรู้สึกดื่มด่ำอยู่ในเกม	4. เกมนี้มีภาพสวยๆ
#5 ความรู้สึกผ่อนคลายต่อเกม	5. เล่นเกมนี้แล้วฉันเหนื่อย
#6 ความรู้สึกด้านบวกต่อเกม	6. เกมนี้เล่นสนุกดี
#7 ความเครียดระหว่างการเล่นเกม	7. ฉันอยากบ่นมากเวลาเล่นเกมนี้

2.2.2 พัฒนา VAS และข้อความกำกับสำหรับใช้วัดระดับความรู้สึก

KidsGEQ วัดระดับความรู้สึกของเด็กเมื่อเล่นเกมดิจิทัล โดยใช้ Likert scale 5 ระดับ คือ Not (0) – Very little (1) – A bit (2) – Fairly (3) – A lot (4) เมื่อถูกแปลเป็นภาษาไทย จึงใช้ระดับความรู้สึก 5 ระดับคือ ไม่เลย (0) – น้อย (1) – ปานกลาง (2) – มาก (3) – มากที่สุด (4) การวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ VAS ร่วมกับ โดยได้ออกแบบตัวเลข 5 ระดับดังกล่าวให้เป็นรูปภาพในลักษณะการคูณแทนตัวเลข ในลักษณะตัวพิมพ์ธรรมดา ตัวเลขดังกล่าวมีขนาดใหญ่กว่าปกติ ทุกตัวมีดวงตาบ่งบอกความมีชีวิต ทำให้ตัวเลขธรรมดาที่มีลักษณะเกินจริง มีรายงานวิจัยว่า เด็กคุ้นเคยและชอบพฤติกรรมหรือการแสดงออกที่เกินจริงของการคูณมากกว่าการแสดงออกตามความเป็นจริงของมนุษย์ [20] ผู้วิจัยคาดการณ์ว่า การใช้รูปภาพตัวเลขที่เป็นการ์ตูนลักษณะเกินจริงนี้จะสามารถกระตุ้นจินตนาการและความสนุกสนานของเด็กระหว่างการแสดงความคิดเห็นได้

ในการทำเดียวกัน ตัวเลข VAS และข้อความกำกับ ถูกนำไปทดลองใช้นำร่องพร้อมกับรายการคำถามใน THGEQ เพื่อศึกษาว่าข้อความและรูปภาพสามารถสื่อความหมายและกระตุ้นความสนุกสนานในการตอบแบบสอบถามของเด็กหรือไม่ จากการสอบถามแบบไม่เป็นทางการพบว่า ตัวเลข VAS มีลักษณะสนุกสนานดี ในทางตรงกันข้าม ข้อความกำกับไม่สนุกสนานสอดคล้องกับรูปภาพ ในที่สุดจึงถูกปรับแก้เป็น *ไม่เลย (0) – นิดหน่อย (1) – จังๆ หละ (2) – มาก (3) – มากที่สุด (4)* ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 VAS สำหรับใช้ประเมิน Games Experience

รายการคำถามที่แปลจาก KidsGEQ VAS และข้อความกำกับ ที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว ถูกนำไปสร้างเป็น THGEQ ในลักษณะเอกสาร เพื่อใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลต่อไป

2.2.3 ตรวจสอบคุณภาพของ THGEQ

ก่อนนำ THGEQ ไปใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลกับ เด็กกลุ่มเป้าหมายอายุ 7-9 ปี ทีมวิจัยได้ตรวจสอบคุณภาพของ THGEQ โดยการขอคำแนะนำจากผู้วิจัยซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ครงงาน และอาจารย์ประจำหลักสูตรเทคโนโลยีมีลติมีเดียและ แอนิเมชันซึ่งเป็นอาจารย์ผู้สอบโครงการ จำนวน 4 คน เพื่อให้ ข้อมูลในการปรับปรุงแก้ไขอีกครั้ง

2.3 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรในการศึกษาวิจัย คือ เด็กนักเรียนระดับ ประถมศึกษาตอนต้น (ชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-3) ซึ่งมีอายุระหว่าง 7-9 ปี ของโรงเรียนที่อยู่ในพื้นที่ให้บริการวิชาการของคณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เฉพาะพื้นที่ตำบลขุนทะเล อันเนื่อง มาจากข้อจำกัดทางด้านเวลาของทีมวิจัย จึงได้ติดต่อไปยัง โรงเรียนนิคมสร้างตนเอง ซึ่งเป็นเพียง 1 ใน 7 โรงเรียนที่อยู่ใน พื้นที่ให้บริการวิชาการ โดยผู้วิจัยส่งจดหมายขออนุญาตอย่าง เป็นทางการไปยังโรงเรียน เพื่อขอเข้าศึกษาและเก็บข้อมูล จากนั้นโรงเรียนเป็นผู้กำหนดจำนวนห้องเรียน และช่วงเวลา ที่ อนุญาตให้ทีมวิจัยเข้าทำการเก็บข้อมูล โดยจำกัดเวลาให้เข้าเก็บ ข้อมูลเฉพาะในวันพฤหัสบดี ช่วงเวลาของคาบกิจกรรม คือ คาบเรียนลูกเสือ เพียง 1 ชั่วโมงเท่านั้น ดังนั้น จำนวนกลุ่ม ตัวอย่างสำหรับการศึกษาวิจัยซึ่งได้จากการคัดเลือกแบบสุ่ม อย่างง่าย จึงมีจำนวนทั้งสิ้น 72 คน ซึ่งมาจาก 3 ห้องเรียน ได้แก่ ห้องเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 1/1 จำนวน 26 คน ชั้น ประถมศึกษาปีที่ 1/2 จำนวน 23 คน และ ชั้นประถมศึกษา ปีที่ 2/1 จำนวน 23 คน การมีส่วนร่วมในการวิจัยเกิดจากความ สม่ัรใจของเด็กและครูประจำชั้น

จากการศึกษางานวิจัยทางด้าน UX พบว่าไม่มีข้อกำหนดตายตัวในเรื่องขนาดที่เหมาะสมของกลุ่มตัวอย่าง กรณีพบข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถสุ่มกลุ่มตัวอย่างให้มีขนาดใหญ่ได้ เช่น มีงบประมาณและเวลาจำกัด เป็นต้น เพื่อให้การสรุปผลการวิจัย ยังคงความน่าเชื่อถือ ให้นักวิจัยพิจารณาปัจจัยสำคัญข้อหนึ่ง ที่ว่า *กลุ่มตัวอย่างที่สุ่มเลือกต้องเป็นตัวแทนของประชากร อย่างแท้จริง* [21] ในการศึกษาวิจัยนี้ แม้ว่ากลุ่มตัวอย่างที่ได้ มีขนาดไม่ใหญ่ (N = 72) แต่กลุ่มตัวอย่างมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก คือ เป็นเด็กนักเรียนอายุ 7-9 ปีที่เรียนโรงเรียนเดียวกัน ห้องเรียนเดียวกัน เรียนในระดับใกล้เคียงกันคือ ป.1 และ ป.2 จึงอาจกล่าวได้ว่า กลุ่มตัวอย่างอยู่ในลักษณะที่สามารถใช้เป็นตัว แทนประชากรอย่างแท้จริง (ประชากรคือเด็กอายุ 7-9 ปี) นอกจากนั้น เมื่อกลุ่มตัวอย่างมีขนาดเล็ก ผู้วิจัยจึงไม่เลือกใช้ สถิติอ้างอิงหรือเชิงอนุมาน (Inferential Statistics) เพื่ออ้างอิง ไปยังประชากรกลุ่มใหญ่ ยิ่งไปกว่านั้น ผู้วิจัยยังได้วิเคราะห์ ข้อมูลระหว่างกลุ่มย่อย เช่น ระหว่างชั้นปีการศึกษา ระหว่าง กลุ่มอายุ และระหว่างเพศ เพื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ข้อมูล ว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่

2.4 เก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อการประเมิน Game Experience ต่อเกมดิจิทัลที่ออกแบบและพัฒนาด้วย DEG7-9 มีขั้นตอนตามลำดับกิจกรรมดังนี้: 1) ทีมวิจัยพบเด็กนักเรียน เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูล เมื่อวันที่ 27 ธันวาคม 2561 และ 10 มกราคม 2562 ในช่วงเวลา 13:50-14:50 น. 2) ทีมวิจัยอธิบาย วัตถุประสงค์และขั้นตอนของการศึกษาวิจัยแก่เด็ก 3) ให้เด็ก เล่นเกมการคัดแยกขยะ 4) หลังเล่นเกม เด็กจะได้รับ THGEQ ในรูปแบบเอกสารเพื่อแสดงความรู้สึกต่อเกมในแง่มุมต่างๆ โดยการให้คะแนนในแต่ละข้อความที่ถามด้วยการทำเครื่องหมาย ลงบนภาพ VAS ซึ่งอยู่ใต้ข้อความคำถามนั้น

การศึกษาวิจัยอยู่ภายใต้การสังเกตการณ์ของทีมวิจัยและ ครูผู้สอนซึ่งพร้อมให้การสนับสนุนแก่เด็ก เช่น ช่วยอ่านรายการ คำถามให้เด็กบางคนที่ย่านหนังสือยังไม่คล่อง เป็นต้น

2.5 แบบแผนการทดลอง

2.5.1 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย Game Experience ในภาพรวม

ค่าเฉลี่ยของระดับความรู้สึกต่อคำถาม 7 คำถาม จาก 7 ประเด็น ของการประเมิน Game Experience ที่ได้จาก THGEQ ถูกคำนวณ เกณฑ์การแปลผลในช่วงห่างหรือพิสัยของคะแนนทุกระดับเท่ากัน [22] ดังนั้น ค่าเฉลี่ยสำหรับแปลความหมาย ได้แก่

ระดับ	ความหมาย
3.21 - 4.00	มากที่สุด
2.41 - 3.20	มาก
1.61 - 2.40	ปานกลาง
0.81 - 1.60	น้อย
0.00 - 0.80	น้อยที่สุด

2.5.2 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย Game Experience

ระหว่างกลุ่มเด็กที่แตกต่างกัน

แบบแผนการทดลองที่ใช้คือ Between-Subjects Design คือ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของระดับความรู้สึกต่อคำถาม 7 คำถาม ระหว่างกลุ่มเด็กที่แตกต่างกัน (เพศ ระดับชั้นการศึกษา และอายุ)

ระดับความรู้สึกต่อแต่ละคำถามของเด็กทั้งหมดถูกนำไปทดสอบการแจกแจงปกติ (Normality Test) ด้วยสถิติ Kolmogorov-Smirnov Test (เนื่องจากมีข้อมูลมากกว่า 50 กรณี) ผลการทดสอบพบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบไม่ปกติในทุกคำถาม ($P < .05$) จึงใช้ Non-Parametric Mann-Whitney Test สำหรับการทดสอบตัวอย่างสองกลุ่มที่เป็นอิสระจากกัน และใช้ Kruskal-Wallis Test สำหรับการทดสอบตัวอย่าง k กลุ่มที่เป็นอิสระจากกัน ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของระดับความรู้สึกระหว่างกลุ่มเด็กว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจำแนกตามประชากรศาสตร์

ภายใต้ข้อจำกัดของจำนวนโรงเรียนในเครือข่ายมหาวิทยาลัยที่ตอบรับการเข้าร่วมการศึกษาวิจัยเพียง 1 โรงเรียน และข้อจำกัดทางด้านตารางเรียนของนักเรียน ที่ส่งผลให้ระยะเวลาร่วมกิจกรรมการวิจัยจำกัดเพียง 60 นาที อีกทั้งการวิจัยเป็นลักษณะการวิจัยเชิงทดลองแต่โรงเรียนมีข้อจำกัดที่ไม่

สามารถสนับสนุนเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับให้นักเรียนทดลองเล่นเกมได้ครบตามจำนวนนักเรียน ยิ่งไปกว่านั้น นักเรียนระดับประถมศึกษาบางคนยังอ่านหนังสือไม่คล่อง จึงส่งผลให้บางคนไม่สามารถให้ข้อมูลได้ทันเวลาและครบถ้วน และมีข้อมูลจากนักเรียน 2 คนซึ่งมีอายุเกินช่วงที่กำหนดคือ 6 และ 10 ปี จึงทำให้คงเหลือข้อมูลที่สามารถใช้ประโยชน์ได้เพียง 68 ข้อมูล อย่างไรก็ตาม มีนักเรียนจำนวน 2 คนไม่ได้ระบุอายุ แต่ข้อมูลอื่นๆ ยังสามารถใช้ประโยชน์ได้ อาจคำนวณอายุเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้คือ 7.50 ปี ($N = 66$, $SD = .662$) แจกแจงรายละเอียดได้ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ข้อมูลเด็กที่แสดงความรู้สึก Game Experience จำแนกตามประชากรศาสตร์

ข้อมูลประชากรศาสตร์		จำนวน (คน)	รวม
ระดับชั้นการศึกษา	ป. 1	45	68
	ป. 2	23	
เพศ	ชาย	39	68
	หญิง	29	
อายุ (ปี)	7	39	68
	8	21	
	9	6	
	ไม่ระบุ	2	

3.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของระดับความรู้สึก Game Experience ในภาพรวม

ข้อมูลจาก THGEQ ซึ่งประกอบไปด้วย 7 คำถาม จาก 7 ประเด็น ถูกคำนวณหาค่าเฉลี่ยของระดับความรู้สึก ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ย Game Experience แต่ละประเด็นของ THGEQ ในภาพรวม

ประเด็น	N	Mean	Std.
#1 ความรู้สึกท้าทายระหว่างเล่นเกม	65	3.58	.882
#2 ความสามารถในการเล่นเกม	63	2.86	1.281
#3 ความรู้สึกสิ้นไหวระหว่างการเล่น	62	2.05	1.654

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ย Game Experience แต่ละประเด็นของ THGEQ ในภาพรวม (ต่อ)

ประเด็น	N	Mean	Std.
#4 ความรู้สึกดื่มด่ำอยู่ในเกม	62	2.85	1.545
#5 ความรู้สึกด้านลบต่อเกม	58	1.28	1.673
#6 ความรู้สึกด้านบวกต่อเกม	61	3.28	1.213
#7 ความเครียดระหว่างการเล่นเกม	58	1.16	1.684

ผลลัพธ์ในตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่าเด็กรู้สึกว่าการเล่นเกมมีความท้าทายในระดับมากที่สุด สามารถเล่นเกมได้ในระดับมาก ระหว่างเล่นเกมรู้สึกสนใจไปกับการเล่นเกมในระดับปานกลาง รู้สึกดื่มด่ำไปกับเกมในระดับมาก มีความรู้สึกด้านบวกต่อเกมในระดับมากที่สุด ในขณะที่มีความรู้สึกด้านลบในระดับน้อย และรู้สึกมีความเครียดในระหว่างเล่นเกมในระดับน้อย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าว อาจกล่าวได้ว่า เด็กมีประสบการณ์การเล่นเกมนในด้านบวกอยู่ในระดับปานกลาง จนถึงมากที่สุด ในขณะที่รู้สึกเชิงลบกับเกมดิจิทัลอยู่ในระดับน้อย กล่าวคือ เกมดิจิทัลที่ออกแบบด้วย DEG7-9 สามารถทำให้เด็กมี Game Experience ที่ดีในระหว่างการเล่นเกมได้

3.1.3 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของระดับความรู้สึก Game Experience ระหว่างกลุ่มเด็กที่แตกต่างกัน

จากการใช้การทดลองแบบ Between-Subjects Design เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของระดับความรู้สึก Game Experience ของเด็กระหว่างกลุ่มที่แตกต่างกัน ได้แก่ เพศ ระดับชั้นการศึกษา และอายุ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 7 - ตารางที่ 9

จากตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ Game Experience ระหว่างกลุ่มเด็กชายและเด็กหญิง ไม่พบความเห็นต่างต่อประสบการณ์ในการเล่นเกมนในทุกประเด็น เด็กชายและหญิงให้ความคิดเห็นพ้องกันดังข้อมูลในหัวข้อ 3.1.2

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Game Experience แต่ละประเด็นของ THGEQ จำแนกตามเพศ

ประเด็น	เพศ	N	Mean	Std.	U	P
#1	หญิง	28	3.61	.916	- .448	.654
	ชาย	37	3.57	.867		
#2	หญิง	28	2.89	1.166	- .117	.907
	ชาย	35	2.83	1.382		
#3	หญิง	27	2.37	1.523	-1.337	.181
	ชาย	35	1.80	1.729		
#4	หญิง	26	2.77	1.531	- .452	.651
	ชาย	36	2.92	1.574		
#5	หญิง	25	1.12	1.453	- .464	.643
	ชาย	33	1.39	1.836		
#6	หญิง	26	3.46	1.067	-1.070	.285
	ชาย	35	3.14	1.309		
#7	หญิง	24	1.21	1.587	- .286	.775
	ชาย	34	1.12	1.771		

อย่างไรก็ตาม ตารางที่ 8 และ ตารางที่ 9 แสดงให้เห็นความแตกต่างทางความคิดเห็นในด้านความรู้สึกดื่มด่ำอยู่ในเกม (#4) ระหว่างกลุ่มเด็ก ป.1 และ ป.2 ($U = -2.513, P < .05$) และระหว่างกลุ่มเด็กอายุต่างกัน ($H = 6.391, P < .05$) โดยเด็ก ป.2 รู้สึกดื่มด่ำอยู่ในเกมในระดับมากที่สุด ($M = 3.62, SD = .669$) ในขณะที่เด็ก ป.1 รู้สึกดื่มด่ำอยู่ในเกมในระดับมาก ($M = 2.46, SD = 1.719$) และเด็กอายุ 8 และ 9 ปี รู้สึกดื่มด่ำอยู่ในเกมในระดับมากที่สุด ($M = 3.56, SD = .705$ และ $M = 3.67, SD = .516$ ตามลำดับ) ในขณะที่เด็กอายุ 7 ปี รู้สึกดื่มด่ำอยู่ในเกมในระดับปานกลาง ($M = 2.35, SD = 1.767$)

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Game Experience แต่ละประเด็นของ THGEQ จำแนกตามระดับชั้น

ประเด็น	ระดับชั้น	N	Mean	Std.	U	P
#1	ป.1	44	3.55	.975	- .167	.867
	ป.2	21	3.67	.658		

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Game Experience แต่ละประเด็นของ THGEQ จำแนกตามระดับชั้น (ต่อ)

ประเด็น	ระดับชั้น	N	Mean	Std.	U	P
#2	ป.1	42	2.93	1.295	- .747	.455
	ป.2	21	2.71	1.271		
#3	ป.1	41	1.71	1.778	-1.809	.070
	ป.2	21	2.71	1.146		
#4	ป.1	41	2.46	1.719	-2.513	.012**
	ป.2	21	3.62	.669		
#5	ป.1	37	1.24	1.801	- .694	.488
	ป.2	21	1.33	1.461		
#6	ป.1	40	3.20	1.305	- .674	.501
	ป.2	21	3.43	1.028		
#7	ป.1	37	1.14	1.782	- .681	.496
	ป.2	21	1.19	1.537		

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Game Experience แต่ละประเด็นของ THGEQ จำแนกตามอายุ

ประเด็น	อายุ	N	Mean	Std.	H	P
#1	7	38	3.58	.858	2.415	.299
	8	19	3.42	1.071		
	9	6	4.00	.000		
#2	7	36	2.72	1.323	.565	.754
	8	19	2.95	1.353		
	9	6	3.00	.894		
#3	7	36	1.81	1.653	1.376	.503
	8	19	2.26	1.558		
	9	6	2.50	1.975		
#4	7	37	2.35	1.767	6.391	.041**
	8	18	3.56	.705		
	9	6	3.67	.516		
#5	7	35	1.34	1.781	.014	.993
	8	17	1.12	1.364		
	9	6	1.33	2.066		

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Game Experience แต่ละประเด็นของ THGEQ จำแนกตามอายุ (ต่อ)

ประเด็น	อายุ	N	Mean	Std.	H	P
#6	7	36	3.19	1.305	.512	.774
	8	18	3.39	.916		
	9	6	3.33	1.633		
#7	7	35	1.14	1.751	.242	.886
	8	17	1.12	1.495		
	9	6	1.33	2.066		

จากการวิเคราะห์ข้อมูล Game Experience ต่อการเล่น เกมการคัดแยกขยะที่ออกแบบด้วย DEG7-9 ของเด็กกลุ่ม ประชากรศาสตร์ที่แตกต่างกัน อาจสนับสนุนได้ว่า เด็กมี ประสบการณ์การเล่นเกมในประเด็นต่างๆ ไม่แตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญ ยกเว้นความรู้สึกดีมีค่าอยู่ในเกม ที่แตกต่างกัน ระหว่างเด็ก ป.1 กับ ป.2 และเด็กอายุ 7 ปี กับเด็กอายุ 8-9 ปี แต่ยังคงมีความเห็นร่วมกันว่าความรู้สึกดีมีค่าอยู่ในเกมยังอยู่ใน ระดับปานกลางถึงมากที่สุด ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า เด็กทุกกลุ่มเห็น พ้องต้องกันว่า เกมดิจิทัลที่ออกแบบด้วย DEG7-9 สามารถ ทำให้เด็กมี Game Experience ที่ค่อนข้างดีในระหว่างการเล่น เกม

3.2 การอภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้น สามารถอภิปราย ผลแยกตามแต่ละประเด็นของ THGEQ และอ้างอิงให้เห็น ประสิทธิภาพของ DEG7-9 ต่อการออกแบบเกมดิจิทัล ที่ส่งผล ต่อ Game Experience ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.1 ความรู้สึกท้าทายระหว่างเล่นเกม

Elliot [23] อ้างถึงทฤษฎีวิธีการบรรลุเป้าหมาย ของ Dweck (Dweck's Achievement Goal Approach) [24] ไว้ว่า เด็กที่ตั้งเป้าหมายการเรียนรู้ไว้ในใจ จะมีความพยายาม ที่จะทำความเข้าใจหรือเรียนรู้สิ่งนั้นให้มากขึ้น เกมดิจิทัลเรื่อง การคัดแยกขยะได้รับการออกแบบตาม DEG7-9#1 คือ ได้ระบุ เป้าหมายการเรียนรู้ให้เด็กทราบก่อนเริ่มเกม (ตารางที่ 1) เด็ก จึงรู้ตัวก่อนว่าต้องเล่นอย่างไรให้ชนะ และจะเพิ่มความพยายาม

อย่างไรให้บรรลุเป้าหมายให้ได้ อาจอธิบายได้ว่า ความพยายามให้บรรลุเป้าหมายคือสิ่งที่ท้าทาย เกมสามารถกระตุ้นความรู้สึกของการถูกท้าทายได้หากเด็กต้องใช้ความพยายามอย่างมากในเกม เด็กจึงได้แสดงความรู้สึกว่า เกมดังกล่าวมีความท้าทายมากที่สุด ($M = 3.58$, $SD = .882$) (ตารางที่ 6) จึงสามารถอนุมานได้ว่าการนำเสนอเป้าหมายการเรียนรู้ที่ชัดเจนสามารถยกระดับความรู้สึกของการถูกท้าทายได้

3.2.2 ความสามารถในการเล่นเกม

รายงานวิจัยระบุไว้ว่า คำแนะนำซึ่งเตรียมไว้สำหรับเป็นตัวช่วยระหว่างเล่นเกมทำให้เด็กรู้สึกมั่นใจในการเล่น เพราะเด็กสามารถหาแนวคำตอบที่ถูกต้องจากตัวช่วยเหลือนั้นได้โดยไม่ต้องใช้วิธีการเล่นแบบลองผิดลองถูก [25-26]

ข้อมูลในตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่าเด็กรู้สึกมีความสามารถในการเล่นเกมได้ในระดับมาก ($M = 2.86$, $SD = 1.281$) สืบเนื่องจากเกมดิจิทัลเรื่องการคัดแยกขยะได้ถูกออกแบบให้มีคุณลักษณะที่ 2 ของ DEG7-9 (DEG7-9#2) อาจสรุปได้ว่าการให้คำแนะนำที่เหมาะสมระหว่างที่เด็กเล่นเกม ย่อมเหมาะสมกว่าการให้เด็กเล่นเกมไปเรื่อยๆ แบบลองผิดลองถูก การให้ข้อแนะนำที่ใกล้เคียงคำตอบทำให้เด็กรู้สึกมีความสามารถที่จะเล่นเกมให้ชนะได้ จึงอาจอนุมานได้ว่า เกมเพิ่มความรู้สึกของความสามารถให้แก่เด็กได้ถ้าเด็กรู้สึกมั่นใจในขณะที่เล่น

3.2.3 ความรู้สึกสิ้นใจระหว่างการเล่น

เกมดิจิทัลเรื่องการคัดแยกขยะ ได้รับการออกแบบตาม DEG7-9#4 คือ แบ่งออกเป็นเกมย่อยๆ แต่ละเกมย่อยมีหลายด่าน ซึ่งแต่ละเกมย่อยมีลักษณะของเกมที่แตกต่างกัน เช่น เกมลากขยะใส่ถัง เกมคลิกลาขยะที่ซ่อนอยู่ เป็นต้น เกมย่อยเหล่านั้นแม้จะมีลักษณะเกมที่แตกต่างกันแต่ต่างให้ความรู้เรื่องเดียวกันคือเรื่องการคัดแยกขยะ จึงอาจเป็นการกระตุ้นให้เด็กได้เรียนรู้เรื่องเดิมซ้ำได้ เด็กสามารถนำความรู้จากเกมย่อยที่ 1 ไปเล่นในเกมย่อยที่ 2 ได้ ดังที่ Downes [27] รายงานไว้ว่า เด็กสามารถเล่นเกมได้ดีขึ้นหลังจากได้ผ่านช่วงเวลาการเรียนรู้ในด่านแรก ๆ มาแล้ว จึงสามารถใช้ประสบการณ์เพื่อเล่นในด่านต่อไปได้ อย่างไรก็ตามพบรายงานว่า เด็กวัยเรียนบางคนไม่ชอบเล่นเกมสั้นและง่ายเกินไป [28] ในทำนองเดียวกับเด็กที่เล่นเกมย่อยของเกมคัดแยกขยะซึ่งมีลักษณะสั้นและง่ายยังไม่ทันที่จะดึงดูดให้เด็กรู้สึกสนใจจนสิ้นใจไปกับเกมก็ชนะหรือแพ้แล้ว จึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความรู้สึกสิ้นใจขณะเล่น

เกมอยู่ในระดับปานกลาง ($M = 2.05$, $SD = 1.654$) เท่านั้น

3.2.4 ความรู้สึกดื่มด่ำอยู่ในเกม

คำถามในประเด็น “ความดื่มด่ำ (Immersion)” คือ “เกมนี้มีภาพสวยๆ” คำว่า “ภาพสวยๆ” ในบริบทนี้อาจตีความได้ว่าเป็นภาพการ์ตูนแอนิเมชัน เนื่องจากพจนานุกรมว่า เด็กอายุไม่เกิน 12 ปี ชอบตัวละครที่เป็นลักษณะการ์ตูนแอนิเมชันมากกว่าตัวละครที่มีลักษณะเหมือนมนุษย์เกินไป [20] ดังนั้น หากเด็กแสดงความคิดเห็นว่าสวย ก็อาจหมายถึงเด็กชอบการ์ตูนแอนิเมชัน ในขณะที่การ์ตูนแอนิเมชันมักมีลักษณะเกินจริง เมื่อเด็กชอบในแอนิเมชันที่มีลักษณะเกินจริง จึงเกิดจินตนาการ เมื่อเกิดจินตนาการจึงรู้สึกดื่มด่ำอยู่ในเกมนั่นเอง และพบรายงานว่า จินตนาการจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนรู้ให้เด็กได้มากขึ้น [29]

ดังนั้น ผลการออกแบบเกมดิจิทัลเรื่องการคัดแยกขยะ ที่ได้รับการออกแบบตาม DEG7-9#5 คือ ตัวละครในเกมอยู่ในลักษณะการ์ตูนแอนิเมชันที่มีการแสดงออกเกินจริง จึงสามารถดึงดูดเด็กให้ดื่มด่ำกับเกมที่มีลักษณะแฟนซีหรือสร้างจินตนาการให้แก่เด็กอายุ 7-9 ปีได้ ส่งผลให้เด็กรู้สึกดื่มด่ำไปกับเกมในระดับมาก ($M = 2.85$, $SD = 1.545$)

3.2.5 ความรู้สึกด้านบวกต่อเกม

เกมดิจิทัลเรื่องการคัดแยกขยะ ได้รับการออกแบบตาม DEG7-9#6 คือ จัดให้มี feedback เพื่อแสดงความก้าวหน้าในการเรียนรู้ให้เด็กทราบ ในรูปแบบของคะแนนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความสามารถในการเล่นและเรียนรู้ของเด็ก มีรายงานว่าการให้รางวัลและการลงโทษเป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญของเกมที่สามารถรักษาแรงจูงใจของผู้เล่นให้เล่นเกมต่อไปได้อย่างสนุกสนาน [30-31] และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง หากการให้รางวัลและการลงโทษในเกมนั้นสามารถตอบสนองให้ผู้เล่นทราบได้ในเวลาที่เหมาะสม จะส่งผลให้ผู้เล่นมีความรู้สึกที่ดีต่อเกมนั้นได้ เช่น รู้สึกสนุกสนาน เพลิดเพลิน ตื่นเต้นในการเล่น รู้สึกภูมิใจเมื่อเล่นเกมได้ชนะ เป็นต้น [32] ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงอาจส่งผลให้เด็กมีความรู้สึกด้านบวกต่อเกมในระดับมากที่สุด ($M = 3.28$, $SD = 1.213$)

3.2.6 ความเครียดระหว่างการเล่นเกม

เกมดิจิทัลเรื่องการคัดแยกขยะ ได้รับการออกแบบตาม DEG7-9#3 คือ มีลักษณะที่เล่นง่าย ผ่อนคลาย ไม่ซับซ้อน ไม่แข่งขันกับความเร็วหรือเวลามากเกินไป จากรายงานการ

ศึกษาความต้องการของกลุ่มลูกค้าในธุรกิจเกมดิจิทัล [33] พบว่า ผู้เล่นเกมต้องการเกมที่มีลักษณะเล่นง่าย ใช้เวลาเรียนรู้สั้น สามารถเล่นจบได้ในระยะเวลาสั้น อีกทั้งพบรายงานวิจัยที่สอดคล้องกันว่า เกมที่มีลักษณะไม่ซับซ้อน เล่นไม่ยาก เข้าถึงได้ง่าย ไม่มีอุปสรรคใด เช่น Angry Birds, Bejeweled II เป็นต้น ทำให้ผู้เล่นรู้สึกไม่เครียดระหว่างการเล่น ในทางตรงกันข้าม จะรู้สึกผ่อนคลายขณะเล่น [34] ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงทำให้เด็กแสดงความรู้สึกว่ามีความเครียดในระหว่างเล่นเกมคัดแยกขยะในระดับน้อย ($M = 1.16$, $SD = 1.684$)

3.2.7 ความรู้สึกด้านลบต่อเกม

เมื่อเด็กมีความรู้สึกด้านบวกต่อเกมในระดับมากที่สุด และมีความเครียดในระหว่างเล่นเกมในระดับน้อย จึงส่งผลให้เด็กมีความรู้สึกด้านลบในระดับน้อย ($M = 1.28$, $SD = 1.673$)

4. สรุป

Design Heuristics เป็นหนึ่งในหลักการทาง HCI ที่นักออกแบบเกมดิจิทัลเพื่อการศึกษาเริ่มให้ความสำคัญมากขึ้น ในการใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ DEG อันเนื่องมาจากการออกแบบ DEG นั้น ต้องมีความสมดุลระหว่างความสนุกสนานและประสิทธิภาพในการเรียนรู้ ในการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ผู้วิจัยได้นำเสนอ Design Heuristics ชื่อ “DEG7-9” ซึ่งประกอบไปด้วยคุณลักษณะสำคัญ 6 ประการที่ใช้ในการออกแบบ DEG สำหรับเด็กอายุ 7-9 ปี (ตารางที่ 1) ผู้วิจัยได้แสดงให้เห็นว่า หาก DEG ได้รับการออกแบบให้มี 6 คุณลักษณะของ DEG7-9 แล้ว DEG นั้นจะสามารถกระตุ้นให้เด็กบรรลุผลทางการเรียนรู้ และพบว่าเกมดิจิทัลนั้นมีแนวโน้มจะได้รับคะแนนเกมรีวิสูง

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทดสอบว่า หากเกมดิจิทัลได้รับการออกแบบตาม DEG7-9 แล้ว จะส่งผลให้เกมมีความสนุกสนานหรือได้รับคะแนน Game Experience ในระดับดีด้วยหรือไม่ อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบแบบสอบถามประเมินประสบการณ์การเล่นเกม (GEQ) ที่เหมาะสมกับเด็กไทย การศึกษาวิจัยนี้จึงได้พัฒนา GEQ ชื่อ “THGEQ” ขึ้นจาก KidsGEQ [14] THGEQ มีรายการคำถามเป็นภาษาไทยและมีจำนวนคำถามที่กระชับกว่า KidsGEQ แต่ยังคงครอบคลุมประเด็นต่างๆ ที่ KidsGEQ ใช้ในการประเมินประสบการณ์การเล่นเกมดิจิทัลสำหรับเด็ก อีกทั้งยังได้นำเสนอ VAS ที่ออกแบบขึ้นใหม่

แทนการแสดงความคิดเห็นแบบตัวเลข 5 ระดับที่ KidsGEQ ใช้อยู่เดิม

THGEQ ถูกนำไปใช้วัดประสบการณ์การเล่นของเด็กไทย โดยผู้วิจัยได้นำเกมเรื่อง “การคัดแยกขยะ” ซึ่งทีมวิจัยได้ออกแบบและพัฒนาไว้ในการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา เกมดังกล่าวใช้ DEG7-9 เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนา ผลการศึกษาพบว่า เกมที่ออกแบบด้วย DEG7-9 ได้รับคะแนน Game Experience ตั้งแต่ระดับปานกลางจนถึงมากที่สุด เด็กมีความรู้สึกว่าการนี้เล่นสนุกดี เกมมีความน่าตื่นเต้น เด็กสามารถเล่นเกมนี้ได้เก่ง เกมมีภาพสวยๆ เด็กไม่เหนื่อยหน่ายที่จะเล่นเกม และไม่มีอะไรน่าบ่นเกี่ยวกับเกม อย่างไรก็ตาม ระหว่างเล่นเกมเด็กยังไม่ทันมีความรู้สึกสิ้นใจไปกับเกมมากนัก

ผลการวิจัยได้มาซึ่ง THGEQ และ VAS ที่ผ่านการทดสอบใช้งานแล้วพบว่าสามารถนำไปใช้ในการประเมิน Game Experience สำหรับเด็กไทยได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งแสดงให้เห็นหลักฐานยืนยันประสิทธิภาพของ DEG7-9 ว่า หากเกมได้รับการออกแบบให้มีลักษณะตามที่ DEG7-9 นำเสนอไว้ อาจอ้างได้ว่า DEG ดังกล่าวจะสร้างประสบการณ์การเล่นเกมที่ดีให้แก่เด็กอายุ 7-9 ปีได้ ทั้ง DEG7-9 และ THGEQ พร้อม VAS สามารถใช้เป็นหลักการทาง HCI สำหรับใช้ในการออกแบบเกมและประเมินเกมดิจิทัลเพื่อการศึกษาสำหรับเด็กอายุ 7-9 ปีได้

สำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคตพบว่าการพัฒนา GEQ และ VAS แบบใหม่ๆ ที่เหมาะสมสำหรับเด็กไทย ยังเป็นการศึกษาวิจัยที่ควรต่อยอดต่อไปได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งต่อผู้อำนวยการโรงเรียนนิคมสร้างตนเอง นายอโณชัย วิเศษกลิ่น และครูประจำชั้น คุณครูสุกัลยา อินทร์สม คุณครูทศธรรม อินทปิ่น คุณครูกมลชนก คุชาผล คุณครูทิพวรรณ อมรมณิทรัพย์ และ คุณครูทิฆัมพร บุราคร ในการสนับสนุนเป็นอย่างดีสำหรับการเข้าศึกษาและเก็บข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขอขอบคุณเด็กนักเรียนที่ให้ความร่วมมือในการให้ข้อมูลสำหรับการศึกษาวิจัยเป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

1. Robertson, J. and Howells, C., 2008, "Computer Game Design: Opportunities for Successful Learning,"

Computers and Education, 50 (2), pp. 559-578.

2. Dörner, R. and Spierling, U., 2014, "Serious Games Development as a Vehicle for Teaching Entertainment Technology and Interdisciplinary Teamwork: Perspectives and Pitfalls," *Proceedings of the 2014 ACM International Workshop on Serious Games*, Orlando, Florida, USA, pp. 3-8.

3. Bouzid, T., Darhmaoui, H. and Kaddari, F., 2017, "Promoting Elementary Mathematics Learning through Digital Games: Creation, Implementation and Evaluation of an Edutainment Game to Promote Basic Mathematical Operations," *Proceedings of the 2nd International Conference on Big Data, Cloud and Applications*, Tetouan, Morocco, pp. 1-4.

4. Heintz, S. and Law, E.L.C., 2018, "Digital Educational Games: Methodologies for Evaluating the Impact of Game Type," *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 25 (2), pp. 1-47.

5. Ibrahim, A., 2017, "Playability Heuristics Evaluation for Educational Video Games," *International Journal of Core Engineering and Management*, 4 (6), pp. 1-12.

6. Nielsen Norman Group, 1998-2019, UX Design for Children (Ages 3-12), Nielsen Norman Group, USA.

7. Khanana, K., 2016, Development of Design Heuristics for Digital Educational Games for School Children of 7 to 11 Years Old, Doctoral Dissertation, Department of Computer Science, University of Leicester, UK.

8. Khanana, K., 2021, "Development of Design Heuristics for Digital Educational Games for Children Aged 7-9," *Infomation Technology Journal*, 17 (1). (In Thai)

9. Sungkaew, K., 2018, Development of Design Heuristics for Digital Educational Game for Enabling Children to Learn, Faculty of Science and Technology, Surattthani Rajabhat University. 101 p. (In Thai)

10. Nielsen, J., 2007, How to Conduct a Heuristic Evaluation [Online], Available: https://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INF5261/v07/studentprosjekter/Skattekort/Heuristisk%20evaluating/heuristisk_evaluating.pdf. [22 April 2018]

11. Kim, B., 2015, Understanding Gamification, American Library Association, Chicago, USA.

12. Hunicke, R., Leblanc, M. and Zubek, R., 2004, "MDA: A Formal Approach to Game Design and Game Research," *AAAI Workshop - Technical Report*, 1, pp. 1-4.

13. Bernhaupt, R., 2010, Evaluating User Experience in Games: Concepts and Methods, Springer, London.

14. Poels, K., Ijsselstein, W. and de Kort, Y., 2008, "Development of the Kids Game Experience Questionnaire: A Self Report Instrument to Assess Digital Game Experiences in Children," *Proceedings of Meaningful Play 2008*, East Lansing, Michigan, USA,

15. Hunsley, J. and Mash, E.J., 2018, A Guide to Assessments That Work, Oxford University Press, UK.

16. Kano, A., Horton, M. and Read, J.C., 2010, "Thumbs-up Scale and Frequency of Use Scale for Use in Self Reporting of Children's Computer Experience," *Proceedings of the 6th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Extending Boundaries*, Reykjavik, Iceland, pp. 699-702.

17. Markopoulos, P., Read, J.M., MacFarlane, S. and Hoysniemi, J., 2008, Evaluating Children's Interactive Products: Principles and Practices for Interaction Designers, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.

18. Sriharee, G., 2018, "Software Engineering Prospective on Digital Game-based Learning for Thailand Education 4.0," *The Journal of KMUTNB*, 28 (2), pp. 477-488. (In Thai)

19. Aleem, S., Capretz, L.F. and Ahmed, F., 2016, "Game Development Software Engineering Process

Life Cycle: A Systematic Review," *Journal of Software Engineering Research and Development*, 4 (6).

20. Lowe, R. and Schnotz, W., 2008, *Learning with Animation: Research Implications for Design*, Cambridge University Press, UK.

21. Lewis, J.R., 2006, "Sample Sizes for Usability Tests: Mostly Math, Not Magic," *Interactions*, 13 (6), pp. 29-33.

22. Ruengpraprapan, C., 2000, *Basic Statistics with Examples Analyzed by MINITAB SPSS and SAS*, Khon Kaen University, Khon Kaen. (In Thai)

23. Elliot, A.J., 2013, *Handbook of Approach and Avoidance Motivation*, Taylor and Francis, New York.

24. Elliott, E.S. and Dweck, C.S., 1988, "Goals: An Approach to Motivation and Achievement," *Journal of Personality and Social Psychology*, 54 (1), pp. 5-12.

25. Clark, R.C. and Mayer, R.E., 2016, *E-Learning and the Science of Instruction: Proven Guidelines for Consumers and Designers of Multimedia Learning*, Pfeiffer/John Wiley and Sons, San Francisco, CA, US.

26. Moreno, R. and Mayer, R.E., 2005, "Role of Guidance, Reflection, and Interactivity in an Agent-Based Multimedia Game," *Journal of Educational Psychology*, 97 (1), pp. 117-128.

27. Downes, T., 2009, "Blending Play, Practice and Performance: Children's Use of the Computer at Home," *The Journal of Educational Enquiry*, 3 (2), pp. 21-34.

28. Gee, J.P., 2013, *Good Video Games and Good Learning: Collected Essays on Video Games, Learning, and Literacy*, 2nd ed., Peter Lang, New York.

29. Ainsworth, S., 2008, "How Do Animations Influence Learning?," pp. 37-67, in D. Robinson and G. Schraw (Eds.) *Current Perspectives on Cognition, Learning, and Instruction: Recent Innovations in Educational Technology that Facilitate Student Learning*, Information Age Publishing, North Carolina.

30. Sweetser, P. and Wyeth, P., 2005, "Game Flow: A Model for Evaluating Player Enjoyment in Games," *Computers in Entertainment*, 3 (3), pp. 1-24.

31. Ihamäki, P., 2014, "GameFlow Experience Model: Understanding Player Enjoyment in Pervasive Adventure Geocaching Game," *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 7 (6), pp. 536-548.

32. Wang, H. and Sun, C.T., 2011, "Game Reward Systems: Gaming Experiences and Social Meanings," *Proceedings of the 2011 DiGRA International Conference: Think Design Play*, Hilversum, The Netherlands, pp. 1-12.

33. Dararuang, A., Lersmethasakul, T. and Gerd Sri, N., 2016, "Technology Roadmapping for an Emerging Small Software Business," *KMUTT Research and Development Journal*, 39 (4), pp. 662-670. (In Thai)

34. Granic, I., Lobel, A. and Engels, R.C.M.E., 2014, "The Benefits of Playing Video Games," *American Psychologist*, 69 (1), pp. 66-78.

Evaluation of UAV Photogrammetric Accuracy for Mapping of Open Dump Based on Variation of Image Overlaps

Abhisit Bhatsada¹, Sirintornthep Towprayoon^{2*}, Savitri Garivait², Komsilp Wangyao^{3*},

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

Centre of Excellence on Energy Technology and Environment, PERDO, Bangkok 10140

Theera Laphitchayangkul⁴,

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

Tomonori Ishigaki⁵

National Institute for Environmental Studies, Onogawa, Ibaraki, Japan 305-0053

and Chart Chiemchaisri⁶

Kasetsart University, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok, 10900

* Corresponding Author: sirin@jgsee.kmutt.ac.th, komsilp@jgsee.kmutt.ac.th

¹ Master's Student, The Joint Graduate School of Energy and Environment

² Associate Professor, The Joint Graduate School of Energy and Environment

³ Research Associate, The Joint Graduate School of Energy and Environment.

⁴ Assistant Professor, Faculty of Engineering.

⁵ Researcher, Center for Material Cycles and Waste Management Research.

⁶ Associate Professor, Faculty of Engineering.

Article Info

Article History:

Received: September 27, 2019

Revised: March 10, 2020

Accepted: April 13, 2020

Keywords:

Open Dumping / Mapping /

UAV Photogrammetry /

Flight Configuration / Drone

Abstract

Urbanization in developing countries has led to an increase in both quantified amount of municipal solid waste (MSW) generation and final disposal. While many countries are utilizing open dumping to dispose MSW, such a practice can cause environmental, social, and economic problems. Accurate spatial data in the form of mapping is necessary for construction and proper management of a disposal site as well as for systematic operation, site maintenance, and monitoring of the site. Although unmanned aerial vehicle (UAV) has widely been used in many survey applications, UAV has not yet been applied to the work related to open dumpsite. The aim of this study was to evaluate the accuracy of open dump mapping with different image overlaps for setting basic and standard UAV flight information. Ground sampling distance values were set to 5 cm/pixel, while flight configurations were varied from 80% to 90% and 75% to 90% for frontal and side overlaps, respectively. Root mean square error (RMSE) was used to represent the accuracy of the measurement. Ten ground control points for geo-referencing and 26-28 check points for accuracy evaluation were utilized. The results were classified based on the accuracy class as per the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing standard. The best results were obtained when using 80% frontal overlap and 75% side overlap; these values resulted in the lowest RMSE on both horizontal and vertical coordinates for open dump mapping.

การประเมินความถูกต้องจากการรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับสำหรับทำแผนที่บ่อขยะแบบเทกองด้วยการกำหนดค่ารูปแบบการบินถ่ายภาพ

อภิสิทธิ์ ภาสตา¹ สิรินทรเทพ เต้าประยูร^{2*}

สาวิตรี การ์ิเวทย์² คมศิลป์ วังยา^{3*}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด พุทฺธ กรุงเทพมหานคร 10140

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัย

ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรุงเทพฯ 10140

ธีระ ลาภิศขยางกุล⁴

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด พุทฺธ กรุงเทพมหานคร 10140

Tomonori Ishigaki⁵

สถาบันวิจัยสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ โอโนกาวา สึกุยะ อิบารากิ ญี่ปุ่น 305-0053

และ ชาดิ เจียมไชยศรี⁶

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

* Corresponding Author: sirin@jgsee.kmutt.ac.th, komsilp@jgsee.kmutt.ac.th

¹ นักศึกษาปริญญาโท บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

² รองศาสตราจารย์ บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

³ นักวิจัย บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

⁴ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

⁵ นักวิจัย Center for Material Cycles and Waste Management Research

⁶ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 27 กันยายน 2562

แก้ไข : 4 มีนาคม 2563

ตอบรับ : 13 เมษายน 2563

คำสำคัญ :

บ่อขยะแบบเทกอง / การทำแผนที่ / การรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับ / การกำหนดรูปแบบการบิน / โดรน

การขยายตัวของชุมชนเมืองในประเทศที่กำลังพัฒนาส่งผลให้ปริมาณขยะมูลฝอยและการฝังกลบขยะมูลฝอยมีมากขึ้น ประเทศส่วนใหญ่จัดการขยะเหล่านี้ด้วยการนำไปกำจัดที่บ่อขยะแบบเทกองกลางแจ้ง ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สังคม และเศรษฐกิจ ในการสร้างและบริหารจัดการบ่อขยะอย่างเหมาะสม ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนของการดำเนินการ การซ่อมบำรุง และการตรวจสอบอย่างเป็นระบบนั้น จำเป็นต้องมีข้อมูลเชิงพื้นที่ ซึ่งแสดงในรูปแบบของแผนที่ ที่มีความถูกต้อง แม้ว่าอากาศยานไร้คนขับจะถูกนำมาใช้เพื่อการสำรวจอย่างแพร่หลาย แต่ยังไม่มีการนำมาใช้สำรวจบ่อขยะแบบเทกองกลางแจ้งมาก่อน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลความถูกต้องของการทำแผนที่บ่อขยะแบบเทกองกลางแจ้งด้วยการกำหนดการซ้อนทับภาพที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้ทราบรูปแบบการบินถ่ายภาพที่เหมาะสมสำหรับเป็นแนวทางมาตรฐานของการรังวัดทำแผนที่ด้วยอากาศยานไร้คนขับในบ่อขยะแบบเทกองกลางแจ้งต่อไป งานวิจัยนี้กำหนดค่า Ground Sample Distance เท่ากับ 5 ซม./จุดภาพ กำหนดรูปแบบการบินถ่ายภาพให้มีการซ้อนทับด้านหน้าและการซ้อนทับด้านข้างอยู่ที่ 80% ถึง 90% และ 75% ถึง 90% ตามลำดับ ประเมินความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งด้วยค่า Root Mean Square Error (RMSE) มีการวางจุดควบคุมภาพ จำนวน 10 จุด และจุดตรวจสอบ จำนวน 26-28 จุด ทั้งนี้ เปรียบเทียบการประมวลผลตามมาตรฐาน American Society for Photogrammetry and Remote Sensing จากการศึกษา พบว่า รูปแบบการบินถ่ายภาพที่ให้ค่าความถูกต้องสูงสุดสำหรับการทำแผนที่บ่อขยะแบบเทกองกลางแจ้ง คือ การบินถ่ายภาพด้วยการซ้อนทับด้านหน้า 80% และซ้อนทับด้านข้าง 75% ซึ่งให้ค่า RMSE น้อยที่สุดทั้งในแนวระนาบและแนวตั้ง

1. INTRODUCTION

Urbanization and industrialization of many developing countries have led to an increasing amount of municipal solid waste (MSW) generated and sent to final disposal sites. Open dumping is the most popular method for the disposal of MSW in developing countries due to low operating costs and skilled personal requirements [1-2]. Nowadays, the amount of waste has increased, so there must be more space to support the disposal. Correspondingly, it affects the environment, ecosystem community and real estate nearby [3-5]. Therefore, the operation and maintenance of open dumps are important tasks for solid waste disposal site management. The waste that is degraded in open dumps can change its chemical, biological, and physical characteristics, which produces leachate, gases and materials productions [6-7]. However, this degraded waste can be processed back into recyclable materials that have economic value. The study of changes in open waste disposal areas provides important information for social, economic and environmental assessments as well as social impacts from the discharge of leachate, gas, and materials. [8-9].

The tools used to identify the change of open dumping are spatial information. Map can be used for monitoring, tracking and planning the operation as well as planning for closure and rehabilitation of open dump. Open dump monitoring needs to monitor the amount of waste, waste height, slope of dumped waste, overflow of leachate, and litter problem. Open dump mining recovers materials from disposed waste, especially plastic; this mining needs to know the amount of waste that can be converted into Refuse Derived Fuel (RDF), which leads to estimation of potential energy recovery [10].

Topographic map by land surveying is necessary

for estimating the amount of disposed waste. Normally, surveyors use various equipments for mapping, e.g. total stations, theodolites, Global Navigation Satellite System (GNSS) receivers, which are used for collecting the three-dimensional (3D) positions of points and distances data. However, these methods are the direct measurements that need to set up survey instruments in the field. In actual conditions, surveying equipment on non-compact waste is very complicated and leads to severe uncertainty data. In addition, final disposal site is a hazardous area because wastewater, toxic gases, and dust can affect surveyors. Thus, traditional survey methods do not only cause harm to surveyors but it is also difficult for field working.

Nowadays, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) or drone technology has been used in manifold fields such as terrain mapping, construction industry, environmental monitoring, precision agriculture [11-12]. For mapping process, UAV has been operated with geospatial information and used for producing maps with a low-cost option. The strength of UAV photogrammetry for mapping, i.e., capability, flexibility, and high quality of photo acquisition, can produce a 3D model by structure-from-motion (SfM) method [13-15]. Kristen Cook (2017) and Ewertowski et al. (2019) defined the meaning of the SfM as a generation of photogrammetric technique that automatically solve the geometry of scene, camera positions, and the orientation without requiring a priori specification of a network in term of 3D positions. [16-17]. Many factors that affect accuracy of maps and 3D models obtained by Unmanned Aircraft System (UAS) photogrammetry are flight altitude, terrain morphology, number of ground control points (GCPs), frontal and side overlaps, and weather condition [18].

This study aims to evaluate the photogrammetric mapping accuracy of 3D models and orthophotos

derived from UAV Photogrammetry, based on the variation of frontal overlap and side overlap in open dump mapping in order to increase mapping accuracy of disposal operation.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Study site

The studied site is open dump in Muang district, Nakhon Pathom province, Thailand (13°52'03"N 100°02'37"E), as presented in Fig.1. This site covers 4.78 hectares (0.0478 km²). Currently, this studied site is collected the MSW from 19 municipalities. The open dump mapping was conducted from January to February 2019.

2.2 Image acquisition

This study generated images from a low-cost rotatory wing UAV with four rotors (DJI Phantom 3 professional). This UAV has an built-in digital camera, Sony EXMOR 1/2.3" CMOS camera with lens and fixed focal length of 20 mm The resolution of the camera sensor was 12.0 megapixels (4000×3000 megapixels) equipped with a gimbal.

The flight height was set at 114 m above the home point level, covered the surface of 390×250 m each photo and it is equivalent to the Ground sampling distance (GSD) of 5.0 cm/pixel. All flights were set as a single grid pattern. All flight plans in this study were automatically photographed above the study area by the Pix4Dcapture application.

To address the objectives, this study varied the overlapping between 80-90% and 75-90% for frontal and side overlap, respectively. Six flight configurations were used to determine a photogrammetric project (Table 1). The sets of 10 GCPs and 28 checkpoints (CPs) were placed in the studied area (Fig.1). The GCPs are used to produce photogrammetric output, likewise the CPs are used for accuracy

Table 1 Flight configurations (FC)

Flight configuration code	Frontal overlap (%)	Side overlap (%)	Number of captured images	Number of GCPs	Number of CPs
FC1	80	75	159	10	27
FC2	80	90	249	10	27
FC3	85	75	155	10	27
FC4	85	90	287	10	28
FC5	90	90	307	10	26
FC6	85	85	186	10	28

assessment.

According to American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data (2014), the number of static 3D checkpoints in Non-vegetated Vertical Accuracy (NVA) is at least 20 points based on a project area with less than 500 m² [19].

The 3D coordinates of positions at 10 GCPs and 28 CPs for geo-referencing and accuracy assessment in the image processing were measured before UAV flight by GNSS receptor working in Real-time kinetic (RTK) mode. Both rover and base GNSS receivers were Hi-target V100 system. For RTK measurements, these dual-frequency geodetic instruments have a manufacturer's stated accuracy specification of ±8 mm +0.5 ppm horizontal RMS and ±15 mm + 0.5 ppm vertical RSM. However, GCP and CP targets must have appropriately designed for minimizing error during geo-referencing and accuracy assessment processes. The dimension of GCP was 1.20×1.20 m, which had resembled a chequered block sheet. The dimension of CP was 0.40×0.40 m, which had a black circle with a diameter of 25 cm inside the orange square sheet. The figure of GCP and CP are shown in Fig.2.

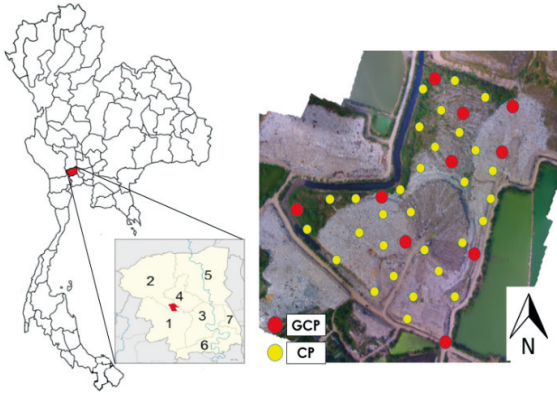
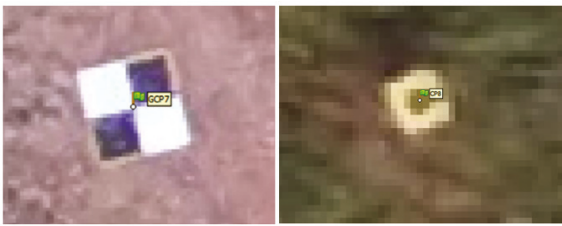


Figure 1 Location of the study area and the position of GCPs and CPs with orthoimage



(a) (b)
Figure 2 The GCP (a) and CP (b) targets

2.3 Image processing

The image processing was implemented by using the software package Agisoft PhotoScan Professional version 1.4.4. This software classified as the SfM algorithm. Agisoft Photoscan software was used for processing the photos, which illustrates the possibility of the generation of georeferenced point clouds, digital surface elevation models, and mosaiced image for geographic information system data in order to build a layer of mapping on the image processing. Aligning Photos, the first step of image processing, is performed to tie the images together in an automated image correlation process in order to create a sparse point cloud. The next step is “Optimizing the Photo-Alignment”; it is used for performing photogrammetric least squares bundle adjustment. The next is “Build



Figure 3 3D reconstruction from UAV image data

the Dense Point Cloud”, which is estimated camera positions, calculating of several X,Y,Z points in order to accurately create the model of processing. Finally, the inspection of textured model, which is important for a precise marker of GCP and CP placement generating into orthophoto, is conducted in this study, as shown in Fig.3. [18].

2.4 Accuracy assessment

The spatial accuracy of this study was evaluated based on the positions of the CP that were obtained from the RTK-GNSS and the positions generated by the 3D model. The accuracy of X, Y, and Z axes were evaluated in this study by using Root Mean Square Error (RMSE) for determining the accuracy classes.

The accuracy of all photogrammetric projects were evaluated by typical RMSE formulation, following to Martínez-Carricondo et al. (2018).

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{O_i} - X_{GNSS_i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{O_i} - Y_{GNSS_i})^2}{n}} \quad (2)$$

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(X_{O_i} - X_{GNSS_i})^2 + (Y_{O_i} - Y_{GNSS_i})^2]}{n}} \quad (3)$$

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{O_i} - Z_{GNSS_i})^2}{n}} \quad (4)$$

$$RMSE_T = \sqrt{(RMSE_{XY})^2 + (RMSE_Z)^2} \quad (5)$$

Where:

- n is the number of CPs tested for each project.
- X_{Oi} and Y_{Oi} are the X and Y coordinates, respectively, measured in the orthophoto for the i^{th} CP.
- X_{GNSS} and Y_{GNSS} are the X and Y coordinates, respectively, measured with GNSS for the i^{th} CP.
- Z_{Oi} is the height in the i^{th} CP, derived from the digital surface model (DSM), taking into account its coordinates X and Y, measured on the orthophoto.
- Z_{GNSS} is the Z coordinate of the i^{th} CP measured with GNSS.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Waste quantity and settlement can be calculated from 3D mapping by X, Y and Z coordination. The total station is used as a traditional survey in order to map and study the ground settlement. This method obtained the measurement of an accurate position [20]. However, this method has some limitations for implementation on open dump site. The accuracy of mapping by UAV photogrammetry should be studied because UAV photogrammetry is an appropriate method for open dump mapping.

The GCPs and CPs were used to investigate accuracy of the project; the independent accuracy of georeferencing was checked by GCPs, and project accuracy was checked by CPs [21]. Both parameters are represented in terms of RMSE of horizontal and vertical positions. $RMSE_x$ is the standard deviation of the horizontal linear RMSE in the X direction (Easting). $RMSE_y$ is the standard deviation of horizontal linear RMSE in the Y direction (Northing). $RMSE_r$ is the horizontal linear RMSE in the radial direction that includes both X- and Y-coordinate errors. $RMSE_z$ is the standard deviation of the vertical linear RMSE in

the Z direction (Elevation).

The results of the horizontal accuracy of both GCPs and CPs in each flight configuration are presented in Fig.4. The results of these flight configurations were based on the ASPRS standard Version 1.0-November 2014. This standard defines geolocation accuracy to geospatial products [19]. This standard recommends the use of orthoimage in three categories according to their orthoimage $RMSE_x$ and $RMSE_y$ values. When these values do not exceed 1-pixel, the orthoimagery can be used in the highest accuracy work. If these values do not exceed 2-pixel, this orthoimagery can be used in standard mapping and geographic information system (GIS) work. On the other hand, if these values are equal to or greater than 3-pixel, the orthoimage can be only used in visualization and less accurate work [19].

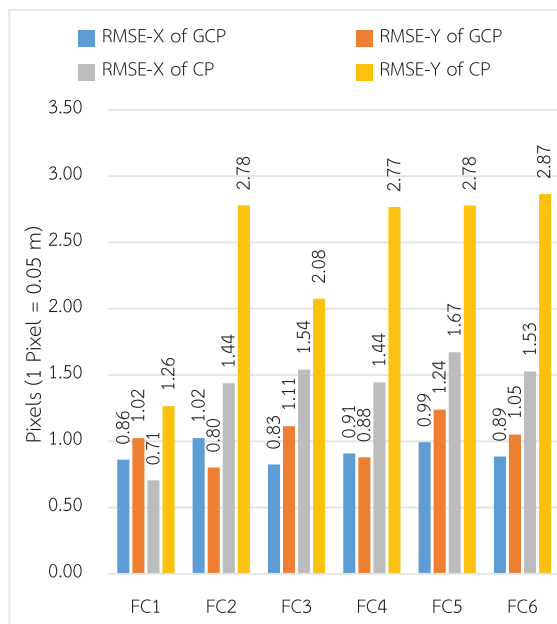


Figure 4 $RMSE_x$ and $RMSE_y$ of GCPs and CPs for each flight configuration

From Fig. 4, the $RMSE_x$ of GCPs were lower than 1 pixel (5 cm) in all flight configurations except FC2. The $RMSE_y$ of GCPs in FC2 and FC4 were lower than 1 pixel or 5 cm. The $RMSE_y$ of GCPs in FC1, FC3, FC5, and FC6 were between 1 and 2 pixels. The results showed that the FC4 had the best geo-referencing in this study.

The $RMSE_y$ of CPs was found that only $RMSE_x$ of CPs in FC1 had lower than 1 pixel. $RMSE_x$ of CPs in FC2-FC6 was between 1 and 2 pixels. The $RMSE_y$ of CPs in FC1 was between 1 and 2 pixels. However, in FC2 to FC6, the $RMSE_y$ of CPs were more than 2 pixels. According to the ASPRS standard (2014), it was found that the FC1 can be the recommended use in standard mapping and GIS work. For the cases of (FC2 to FC6), it can be recommended to be used only in the visualization and less accurate work.

Fig.5 presents the horizontal linear RMSE in radial direction, which is shown in terms of $RMSE_r$. The results of GCPs of all flight configurations were between 6.30-7.95 cm. $RMSE_r$ of FC1 gave the lowest value (7.25 cm). In contrast to the FC2 to FC6, the values of $RMSE_r$ of CPs were greater than FC1, which were between 12.90-16.25 cm.

The ASPRS standard also gives the recommendation for the comparison of $RMSE_z$ result with vertical accuracy criteria. [19]. This study assessed vertical accuracy in a non-vegetated terrain condition, which is suitable for the open dump. The vertical accuracy for the $RMSE_z$ of CPs in FC1, FC3, FC4, and FC6 can be defined as 5 cm-vertical accuracy class (Fig.6). The $RMSE_z$ of CPs in FC2 and FC5 can be defined as 10 cm and 15 cm-vertical accuracy class, respectively. The $RMSE_z$ of GCPs in FC1-FC4 also provided an accurate geo-referencing in vertical accuracy which showed the $RMSE_z$ below 5 cm. In addition, the 3D model process is referred to accurately position of $RMSE_z$ generated into a digital elevation model (DEM), as shown in the Fig.7.

The overall of horizontal and vertical accuracies are presented in term of $RMSE_T$ (Fig.8). The range of $RMSE_T$ of GCP in FC1-FC6 was between 1.41-2.87 pixels. The lower $RMSE_T$ of GCP was in the FC1 and the higher $RMSE_T$ of GCP was in the FC5. The range of $RMSE_T$ of CP in FC1-FC6 was between 1.55-3.86 pixels. The lower $RMSE_T$ of CP was in the FC1 and the higher $RMSE$ of CP was in the FC5. The horizontal and vertical accuracy according to the ASPRS 2014 standard and their equivalent to map scale in ASPRS 1990 standard are summarized as shown in Table 2.

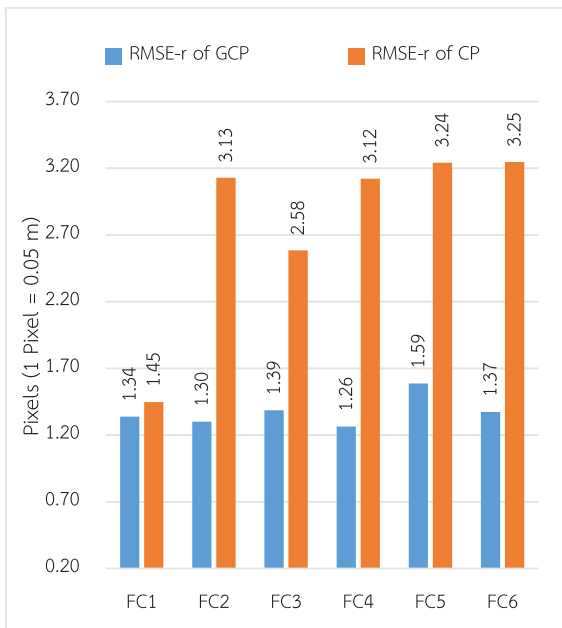


Figure 5 $RMSE_r$ of GCPs and CPs for each flight configuration

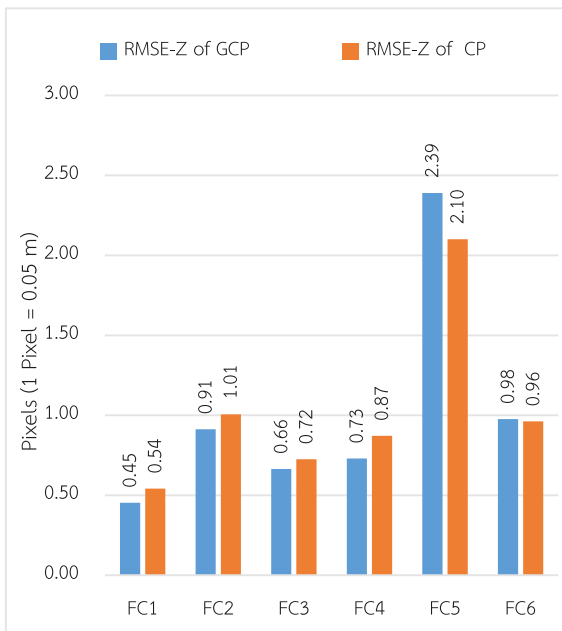


Figure 6 RMSE_Z of GCPs and CPs for each flight configuration

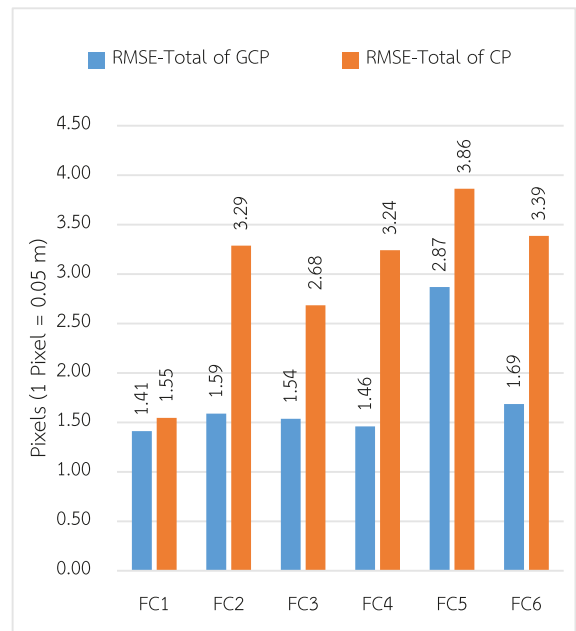


Figure 8 RMSE_T of GCPs and CPs for each flight configuration

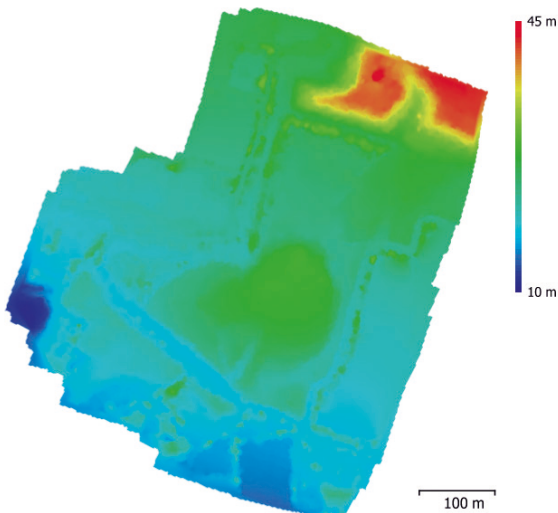


Figure 7 The digital elevation model (DEM) construction

Table 2 Summary of accuracy in all flight configurations

Flight configuration code	Horizontal Accuracy				Vertical Accuracy
	ASPRS 2015		Equivalent to map scale in		
	Horizontal Accuracy Class $RMSE_x$ and $RMSE_y$ (cm)	$RMSE_r$ (cm)	ASPRS 1990 Class 1	ASPRS 1990 Class 2	
FC1	7.50	10.60	1:300	1:150	5-cm
FC2	15.00	21.20	1:600	1:300	10-cm
FC3	12.50	17.70	1:500	1 :250	5-cm
FC4	15.00	21.20	1:600	1:300	5-cm
FC5	15.00	21.20	1:600	1:300	15-cm
FC6	15.00	21.20	1:600	1:300	5-cm

4. CONCLUSIONS

The UAV photogrammetry, which is a disruptive methodology, was implemented in this study. The orthomosaic maps and 3D models for open dump mapping were successfully generated based on 6 flight configurations that varied in frontal and side overlap. The images were captured by the low-cost UAV and processed by SfM software. This study shows a considerable advantage of UAV photogrammetry over the traditional survey method at open dump site. Based on the analysis part, each flight configuration contributed to different errors in terms of horizontal and vertical positions. The RMSE analysis showed that flight configuration at 80% frontal overlap and 75% side overlap gave the best results for RMSEX and RMSEY within 7.5 cm. as well as RMSE_z within 5 cm. Thus, this flight configuration can be suggested as the recommended UAV photogrammetry practice for the mapping at the open dump. However, the accuracy of mapping does not only depend on flight configuration but also depends on the appropriate GCP configuration of both numbers and alignment. In further study, the appropriate GCP configuration should be investigated for finding the minimum GCP number to ensure level of accuracy with the most appropriate and feasible facility.

5. ACKNOWLEDGMENT

This study is supported by the National Research Council of Thailand (NRCT) for the expenses in order to achieve the study. We would like to thank the Nakhonpathom Municipality for providing the opportunity to gather information in the studied site. In addition, we would like to thank the lecturer and students from the Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi that provided the advice and supported this study.

6. REFERENCES

1. Makarenko, N. and Budak, O., 2017, "Waste Management in Ukraine: Municipal Solid Waste Landfills and their Impact on Rural Areas," *Annals of Agrarian Science*, 15 (1), pp. 80-87.
2. Ali, S.M., Pervaiz, A., Afzal, B., Hamid, N. and Yasmin, A., 2014, "Open Dumping of Municipal Solid Waste and its Hazardous Impacts on Soil and Vegetation Diversity at Waste Dumping Sites of Islamabad city," *Journal of King Saud University-Science*, 26 (1), pp. 59-65.
3. Sharma, A., Gupta, A.K. and Ganguly, R., 2018, "Impact of Open Dumping of Municipal Solid Waste on Soil Properties in Mountainous Region," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10 (4), pp. 725-739.
4. Chinda, T., Leewattana, N. and Leeamnuayjaroen, N., 2012, "The study of landfill situations in Thailand," In *Mae Fah Luang University International Conference*, Mae Fah Luang University.
5. Maheshi, D., 2015, "Environmental and Economic Assessment of 'Open Waste Dump' Mining in Sri Lanka," *Resources, Conservation and Recycling*, 102, pp. 67-79.
6. Kaushal, A. and Sharma, M.P., 2016, "Methane Emission from Panki Open Dump Site of Kanpur, India," *Procedia Environmental Sciences*, 35, pp. 337-347.
7. Lu, S.F., Xiong, J.H., Feng, S.J., Chen, H.X., Bai, Z.B., Fu, W.D. and Lü, F., 2019, "A Finite-volume Numerical Model for Bio-Hydro-Mechanical Behaviors of Municipal Solid Waste in Landfills," *Computers and Geotechnics*, 109, pp. 204-219.
8. Seror, N. and Portnov, B.A., 2018, "Identifying Areas under Potential Risk of Illegal Construction and Demolition Waste Dumping using GIS Tools," *Waste Management*, 75, pp. 22-29.
9. Effat, H.A. and Hegazy, M.N. , 2012, "Mapping Potential Landfill Sites for North Sinai Cities using

Spatial Multicriteria Evaluation,” *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 15 (2), pp. 125-133.

10. Khan, M.M.-U.-H., Vaezi, M. and Kumar, A., 2018, “Optimal Siting of Solid Waste-to-value-added Facilities through a GIS-based Assessment”, *Science of The Total Environment*, 610, pp. 1065-1075.

11. Uysal, M., Toprak, A. and Polat, N., 2015, “DEM Generation with UAV Photogrammetry and Accuracy Analysis in Sahitler Hill,” *Measurement*, 73, pp. 539-543.

12. Ruzgienė, B., Berteška, T., Gečyte, S., Jakubauskienė, E. and Aksamitauskas, V.Č., 2015, “The Surface Modelling Based on UAV Photogrammetry and Qualitative Estimation,” *Measurement*, 73, pp. 619-627.

13. Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F. and Martínez-Carricondo, P., 2017, “Assessment of Photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation Ground Control Points Number using Unmanned Aerial Vehicle,” *Measurement*, 98, pp. 221-227.

14. James, M.R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S. and Niethammer, U., 2017, “Optimising UAV Topographic Surveys Processed with Structure-from-motion: Ground Control Quality, Quantity and Bundle Adjustment,” *Geomorphology*, 280, pp. 51-66.

15. Sriboonkaew, S. and Tangamchit, P., 2017, “Improved RGBDSLAM Algorithm for Handling Dynamic Environment,” *KMUTT Research and Development Journal*, 40 (1), pp. 55-72.

16. Cook, K.L., 2017, “An Evaluation of the Effectiveness of Low-Cost UAVs and Structure from Motion for Geomorphic Change Detection,” *Geomorphology*, 278, pp. 195-208.

17. Ewertowski, M., Tomczyk, A., Evans, D., Roberts, D. and Ewertowski, W., 2019, “Operational Framework for Rapid, Very-high Resolution Mapping of Glacial Geomorphology using Low-cost Unmanned Aerial Vehicles and Structure-from-motion Approach,” *Remote Sensing*, 11 (1), p. 65.

18. Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F.J., García-Ferrer, A. and Pérez-Porras, F.J., 2018, “Assessment of UAV-photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation of Ground Control Points,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 72, pp. 1-10.

19. Sensing, R., 2015, “ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data,” *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 81 (3), pp. A1-A26.

20. Sriviriyant, S., Phothong, T. and Laphitchayangkul, T., 2018, “Settlement of Building by Level,” *KMUTT Research and Development Journal*, 41 (1), pp. 3-16.

21. Eling, C., Wieland, M., Hess, C., Klingbeil, L. and Kuhlmann, H., 2015, “Development and Evaluation of a UAV Based Mapping System for Remote Sensing and Surveying Applications,” *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40 (1), p. 233.

Synthesis of Cerium Oxide by Colloidal Emulsion Aphrons (CEAs) Method for Biodiesel Production

Wasinee Amesuan¹ and Somnuk Jarudilokkul^{2*}

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod, Thung Kru, Bangkok 10140

* Corresponding Author : somnuk.jar@kmutt.ac.th

¹ Graduate Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering.

² Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: July 23, 2019

Revised: February 5, 2020

Accepted: April 16, 2020

Keywords:

Biodiesel / Cerium Oxide /
Heterogeneous Catalyst /
Transesterification

This study investigated the use of barium hydroxide doped ceria ($\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$) as solid base catalyst for the transesterification of palm oil with methanol to produce biodiesel. Cerium oxide was prepared by colloidal emulsion aphrons (CEAs), a type of dispersion method, which was then followed by calcination. The catalyst was evaluated for its activity in terms of the content of fatty acid methyl ester (%FAME). Moreover, the dependence of the %FAME on the reaction parameters, which included the amount of catalyst and reaction time, was studied. Physicochemical characteristics of the catalyst, as revealed by X-ray diffraction, Brunauer-Emmett-Teller analysis, scanning electron microscopy and differential thermal analysis/thermogravimetry, were also examined. The maximum methyl ester content was noted to be 94.65%. The optimal reaction condition for the transesterification used a 30:1 molar ratio of methanol to oil, with an addition of 8 wt.% $\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$ catalyst and reaction time of 4 h.

การสังเคราะห์ซีเรียมออกไซด์ด้วยวิธีคอลลอยดอลแอฟรอนเพื่อผลิตไบโอดีเซล

วาติณี เอี่ยมสุวรรณ¹ และ สมนึก จารุติลกกุล^{2*}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

* Corresponding Author : somnuk.jar@kmutt.ac.th

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 23 กรกฎาคม 2562

แก้ไข : 5 กุมภาพันธ์ 2563

ตอบรับ : 16 เมษายน 2563

คำสำคัญ :

ไบโอดีเซล / ซีเรียมออกไซด์ /

ตัวเร่งปฏิกิริยารีดักชัน /

ทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ซีเรียมออกไซด์เจือด้วยแบเรียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันกับเมทานอล โดยเตรียมซีเรียมออกไซด์ด้วยวิธีคอลลอยดอลอิมัลชันแอฟรอน (Colloidal emulsion Aphrons, CEAs) แล้วทำการเผา จากนั้นจึงทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการวัดค่าร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (%FAME) ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และระยะเวลาของการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์คุณลักษณะเชิงเคมี-กายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเทคนิควิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ จากการศึกษา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาคืออัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ซึ่งทำให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดที่ร้อยละ 94.65

1. Introduction

Energy security is one of the most important issues facing the world today, particularly regarding fluctuating fuel costs, with the price of non-renewable fossil fuel resources, including natural gases, oil and coal, increasing in the world market day by day. Moreover, the supply of fossil fuels is expected to be exhausted in the near future. As fossil fuel resources become more and more limited, scientists have been trying to find alternative energy as a replacement. Renewable energy refers to types of energy generated from natural sources that are not finite in amount. Biodiesel produced from palm oil is one such interesting alternative. The conventional biodiesel process uses homogeneous catalysts such as sodium hydroxide which have many drawbacks. The removal of these catalysts from biodiesel fuel is difficult and requires a washing process that uses a large amount of water [1]. Heterogeneous catalysis is an economically and ecologically important area in the wider catalysis research field because these catalysts have many advantages. They are non-corrosive, environmentally benign and present fewer disposal problems than other catalysts. Moreover, they are also much easier to separate from liquid products and can be designed to produce higher activity, more selectivity and longer catalyst lifetimes [2-3]. Many types of heterogeneous catalysts, such as alkaline earth metal oxides and various alkaline metal compounds supported on alumina or zeolite can catalyze transesterification reactions [4-10]. The order of activity among alkaline earth oxide catalysts is $\text{BaO} > \text{SrO} > \text{CaO} > \text{MgO}$ [11-13]. Wenlei et al. [13] found that the optimum catalyst of the reaction was Ba-ZnO with a loading of 2.5 mmol/g Ba on ZnO , calcined at 873 K for 5 h; this was able to exhibit the highest basicity and the best catalytic activity. When the transesterification reaction

was carried out at reflux of methanol (338 K), with a 12:1 molar ratio of methanol to oil and a catalyst amount of 6 wt. %, the conversion of soybean oil was 95.8%. Besides, Xinhai et al. [15] investigated the use of CaO-CeO_2 mixed oxides as solid base catalysts. The best catalyst was Ce/Ca with a molar ratio of 0.15 and calcined at 973 K. It was regenerated after being reused 5 times; the biodiesel yield was 91%. Meena et al. [16] studied the transesterification of used vegetable oil with barium aluminate. It was found that the maximum %FAME was 93%. The synthesized CeO_2 nanoparticles had high surface areas resulting in the catalyst having higher activity. Ba(OH)_2 is a basic catalyst that has a high reaction rate and is not corrosive. Therefore, the combination of Ba(OH)_2 and CeO_2 should provide the best performance [17-18].

There have been recent reports of CeO_2 nanoparticles being prepared by various techniques, including mechanochemical reaction, microemulsion, hydrothermal, sol-gel method, glycothermal process, precipitation and spray pyrolysis [19-24]. Colloidal emulsion aphrons (CEAs) are considered as micrometer-sized water-in-oil (W/O) emulsion cores encapsulated by a “soapy shell” consisting of multi-layer surfactant molecules. In this dispersion, the emulsion core sizes are mainly between 10–100 μm and those of the inner phase droplets are between 1–5 μm [25-29]. CEAs, which is mild and simple dispersion method, can also be used as a microreactor to synthesize nanoparticle materials.

Preparation of nickel over cerium oxide supported by the use of colloidal emulsion aphrons was studied by Sunisa et al. [29]. The three different methods of synthesis that were investigated were: (1) incipient wetness impregnation; (2) impregnate the support into CEAs loaded with nickel solution, and (3) co-precipitation in CEAs of support and active metal.

The synthesized particles were characterized by various techniques such as X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM), surface area and porosity analysis (BET), and inductively coupled plasma (ICP) analysis. The performances of all catalysts were tested with methane steam reforming. It showed that the catalyst prepared by method (2) exhibited the highest methane conversion rate [24]. Transesterification of palm kernel oil (PKO) with methanol over various types of natural calcium, including limestone calcite, cuttlebone, dolomite, hydroxyapatite, and dicalcium phosphate, has been investigated at 60°C and 1 atm. The calcination temperature had a significant effect on physicochemical properties, as evidenced by N_2 adsorption-desorption measurement, TGA, SEM and XRD. It was found that the calcination of dolomite at 800°C resulted in a highly active mixed oxide. Under the suitable reaction conditions, the amount of dolomite was calcined at 800°C of 6 wt.% based on weight of oil, with a methanol to oil molar ratio of 30:1 and reaction time of 3 h, methyl ester content of 98.0% can be achieved [18].

In the present study, cerium oxide was prepared by colloidal emulsion aphrons (CEAs) method followed by calcination and impregnation with $Ba(OH)_2$. The catalytic activity was presented in term of the conversion to methyl ester. Moreover, the dependence of the conversion to methyl ester on the reaction parameters, which included the amount of catalyst and reaction time, was examined.

2. Materials and Methods

2.1 Catalysts preparation

CeO_2 catalyst was obtained from the reduction of $CeCl_3 \cdot 7H_2O$ (Sigma) in colloidal emulsion aphrons (CEAs) as described in Sunisa et al. [29]. Then, mixed

$Ba(OH)_2$ (Merck)- CeO_2 were prepared using impregnation method. Following typical protocol, an aqueous solution containing barium hydroxide was stirred with CeO_2 catalyst for 6 h and then dried overnight at 100°C. Then, the solid particles were calcined in a muffle furnace at the given temperature for 1 h.

2.2 Catalyst characterization

The crystalline phase of $Ba(OH)_2$ - CeO_2 obtained from the preparation was identified by X-ray diffraction (XRD, Bruker: D8 Discover) analysis. XRD patterns were carried out at room temperature using $CuK\alpha$ radiation ($\lambda=1.54056 \text{ \AA}$). XRD patterns of nanosized CeO_2 were obtained in 2θ range between 20° and 80° with a step of 0.01° and a scan speed of 2°/min. The particle morphology and the sizes of the $Ba(OH)_2$ - CeO_2 were observed by Scanning Electron Microscope (SEM, Jeol Model JEM-2100) method. The surface area, pore size and pore volumes of the particles were measured by BET surface area and porosity analysis (Quantachrome: Autosorb-1).

2.3 Transesterification reaction

The transesterification was carried out in a 250 ml neck round-bottom flask equipped with reflux condensers and a magnetic stirrer. The mixture of palm oil (Oleen, Thailand), methanol and catalyst was stirred vigorously. After reaction, the catalyst was separated by filtration. Then, it was boiled in order to remove methanol. The organic phase was separated by centrifugation. The obtained sample was washed with deionized water and dried with anhydrous Na_2SO_4 . Finally, %FAME (Fatty Acid Methyl Ester) was measured by using a gas chromatograph (Agilent 6890) equipped with a flame ionization detector (FID) and a 30-m HP-INNOWAX capillary column. All data from the experiment are based on

duplicate sample.

3. Results and discussion

3.1 Biodiesel from palm oil by homogeneous and heterogeneous catalysts

For this experiment, the condition for reaction used a 30:1 molar ratio of methanol to oil, 4 wt% of catalyst, and reaction time of 4 h. Figure 1 reveals the effect of homogeneous and heterogeneous catalyst on %FAME. It was found that %FAME obtained from homogeneous catalyst was 95.68%. As the homogeneous catalyst is a liquid phase, which is the same as substrate, the catalyst can be mixed and made good contact with the substrate. However, a

byproduct of this caution was soap which causes difficulty in the separation of glycerin from product [30]. For heterogeneous catalyst, 1.45 %FAME was obtained from CeO_2 which indicated that CeO_2 was a non-active agent for the biodiesel process. As CeO_2 particles have a high surface area and are stable, they can improve thermal stability of various materials [31]; therefore, this was selected as a support. In order to improve the surface properties, oxide of alkaline earth ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2\text{-CeO}_2$ and $\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$) was selected as an active agent. It was found that %FAME of $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2\text{-CeO}_2$ and $\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$ were 20.93%, and 94.65%, respectively. Since the %FAME of $\text{Ba}(\text{OH})_2$ was close to % FAME of NaOH, it was this selected as a dopant with CeO_2 .

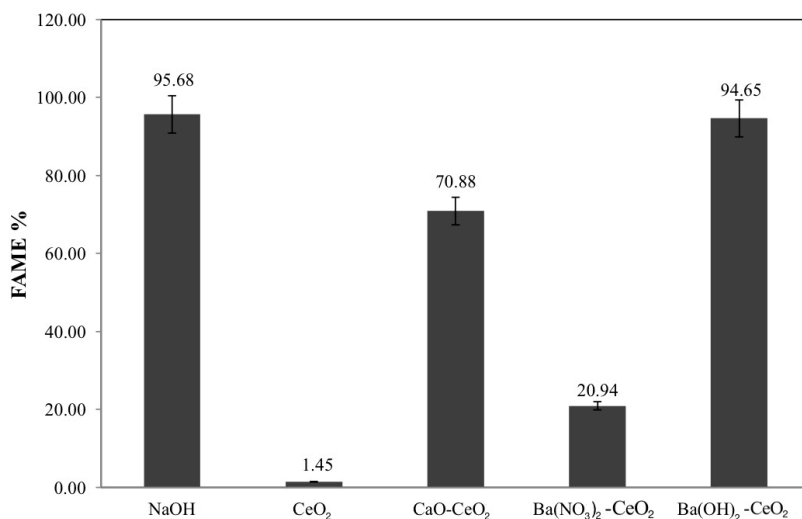


Figure 1 Influence of catalyst type on % FAME

3.2 Influence of catalysts preparation conditions

The influence of catalyst preparation is shown in Figure 2. %FAME obtained from $\text{Ba}(\text{OH})_2$ was 95.52%, which is higher than the $\text{Ba}(\text{OH})_2$ supported on CeO_2 .

By way of comparing catalyst support of cerium oxide commercial ($\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2\text{-com.}$) and cerium oxide synthesized by Colloidal Emulsion Aphrons ($\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2\text{-CEAs}$), it was found that %FAME obtained from $\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2\text{-com.}$ and $\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2\text{-CEAs}$ were

79.42% and 94.64 %, respectively. Sunisa et al. [29] reported that CeO_2 -CEA particles were spherical in shape and nanometer in scale. Surface area and pore volume of the catalyst were higher than CeO_2 -com whereas pore size of the catalyst was less than CeO_2 -com., as shown in Table 1. The surface areas

of CeO_2 -com and CeO_2 -CEAs were $0.977 \text{ m}^2/\text{g}$ and $131.2 \text{ m}^2/\text{g}$, respectively. Thus, CeO_2 -CEAs provided higher %FAME. It was chosen as a support for the impregnation with $\text{Ba}(\text{OH})_2$ for active agent of biodiesel production.

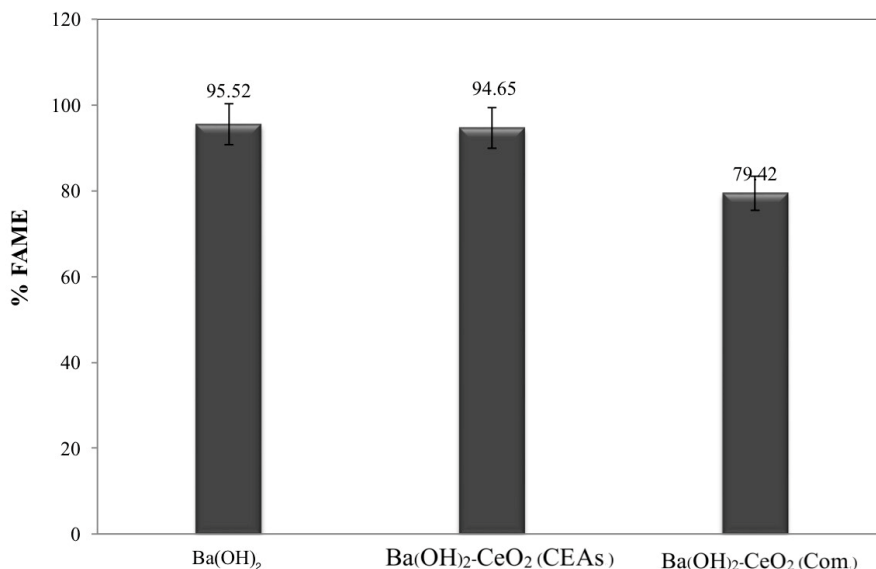


Figure 2 Influence of catalyst preparation condition

A : $\text{Ba}(\text{OH})_2$ B : $\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$ (CEAs.) C : $\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$ (Com.)

Table 1 The Surface area, Pore volume and Pore size of $\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$ with different CeO_2

Samples	Surface area (m^2/g)	Pore Volume (cm^3/g)	Pore Size ($\text{\AA}$)
CeO_2 (Com.) ^a	0.977	-	-
CeO_2 (CEAs) ^b	131.2	0.117	35.6
$\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$ (Com.)	5.731	0.0219	152.80
$\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$ CEAs	8.217	0.0279	135.70

^a(Navadol et al., 2005) and ^b(Sunisa et al., 2012)

The X-ray diffraction patterns of $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (com) and $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (CEAs) are shown in Figure 3. The patterns indicated the same element present in the characteristic peaks of both samples. The peak

of $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (com) is higher than cerium oxide prepared by $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (CEAs). This indicates that $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (com) has higher crystallinity.

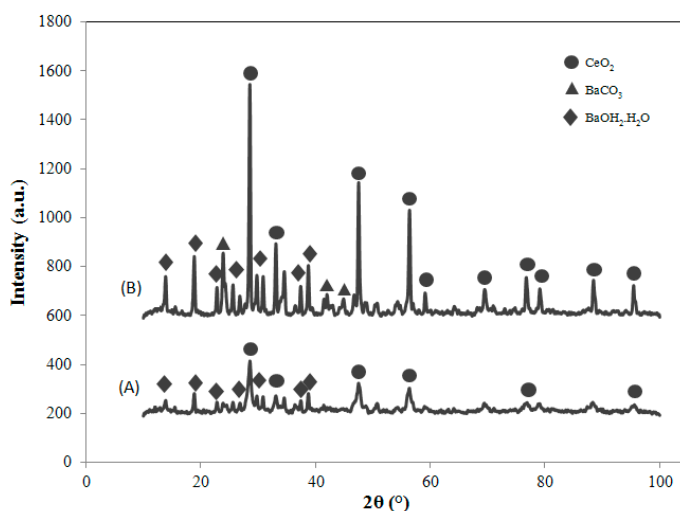
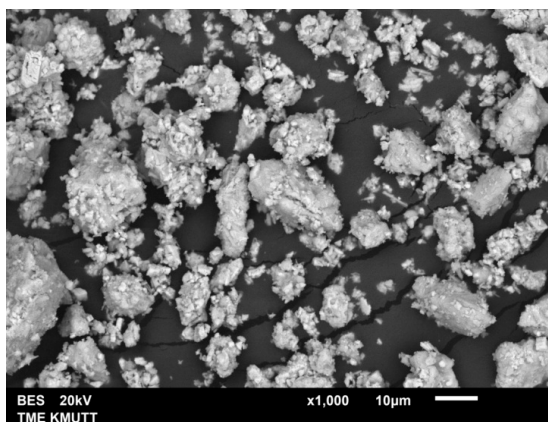


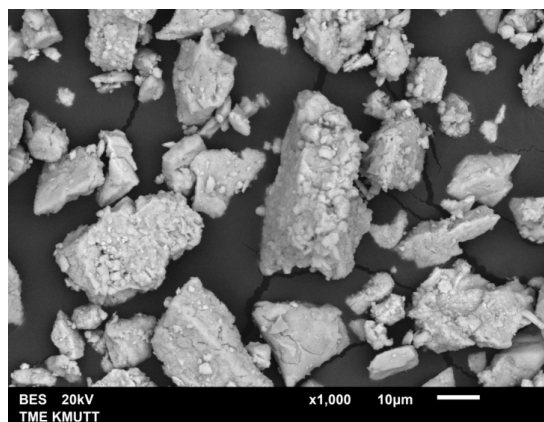
Figure 3 XRD patterns for samples: (A) $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (CEAs) and (B) $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (Com.)

Scanning electron micrographs (SEM) of $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (com) and $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (CEAs) are presented in Figure 4. Both barium - cerium oxide particles are

irregular-shaped crystalline particles. The $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (com) particles consist of many small granules attached to aggregate particles.



(A)



(B)

Figure 4 SEM images for samples: (A) $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (Com.) and (B) $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (CEAs)

In order to investigate the distribution of barium particles on cerium oxide, SEM/EDS was examined, as shown in Figure 5. The barium particles on $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (CEAs) in Figure 5 (D) were dispersed on the surface of cerium oxide and were more uniform than

that of $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (Com.), as shown in Figure 5 (B). Surface area and porosity of cerium oxide prepared by CEAs were higher than cerium oxide commercial, therefore, barium was seen to be loaded on the surface cerium oxide and more consistently.

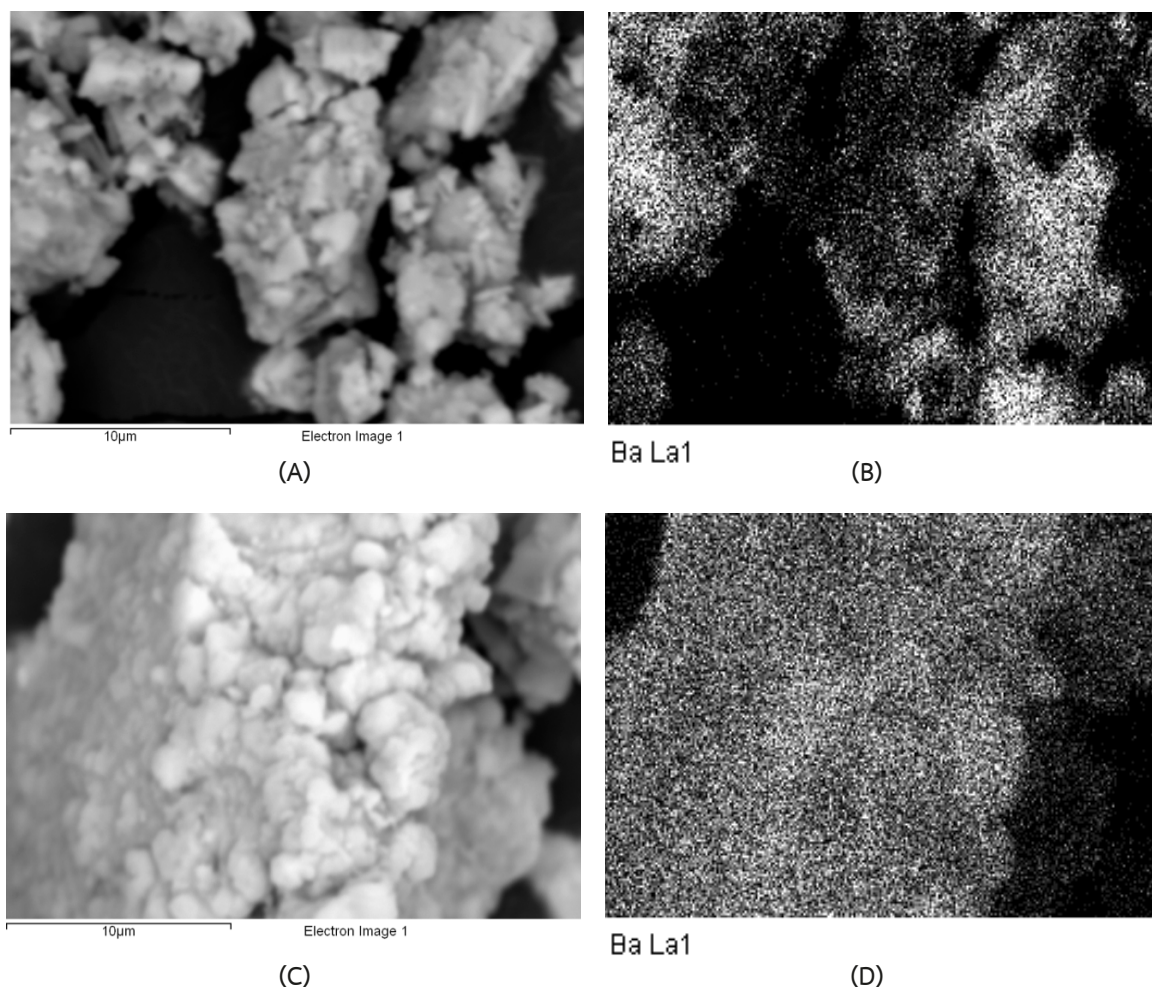


Figure 5 SEM image of sample: (A) $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (Com.), (C) $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (CEAs), and SEM/EDS images of samples: (B) Distribution of $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (Com.), (D) Distribution of $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ (CEAs).

The influence of calcination temperature (at the heating rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$) on %FAME is illustrated in Figure 6. It can be seen that %FAME increased with the calcination temperature. However, when the

temperature was greater than 500°C , %FAME decreased. The increasing %FAME when the temperature was less than 500°C should be caused by the greater roughness of CeO_2 surface at a high temperature. It

should be derived from the decomposition of the carbonate groups, which liberated CO_2 concomitantly resulting in the formation of small pores [17]. At a temperature higher than 500°C , the particle size increases substantially with increasing calcination

temperature, indicating an obvious sintering of crystallinity, which results in an unreactive state [15]. Thus, 500°C was an optimum temperature and selected for most experiments.

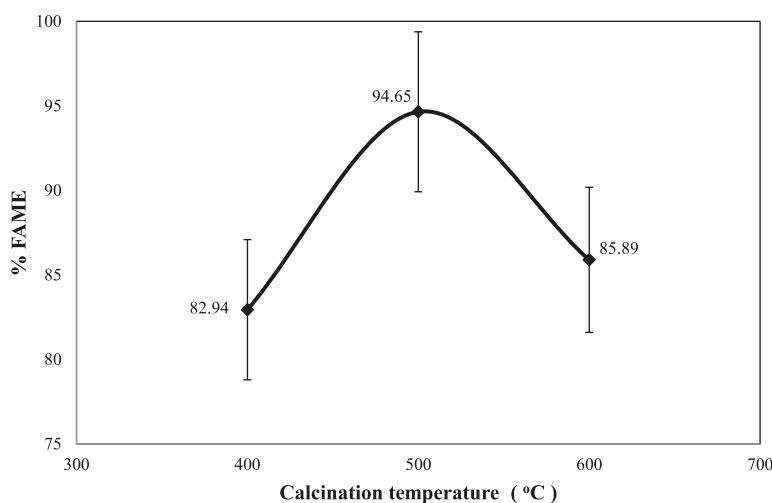


Figure 6 Influence of calcination temperature

Table 2 The Surface area, Pore volume and Pore size of $\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$ with different calcination temperatures

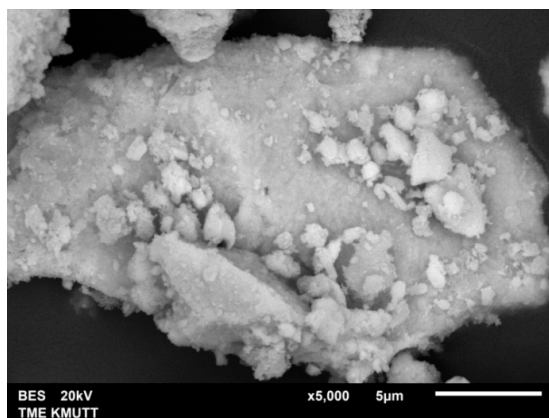
Calcination Temp. (°C)	Surface area (m^2/g)	Pore Volume (cm^3/g)	Pore Size (Å)
400	9.180	0.0497	216.40
500	8.217	0.0279	135.70
600	4.411	0.0152	138.10

N_2 adsorption-desorption measurement is presented in Table 2. The pore sizes of all samples were classified as meso-porous (less than 10 nm). Moreover, an increase of calcination temperature caused a decrease in BET surface area and pore volume which might have been caused by sintering of the particles. The scanning electron micrographs of the calcined

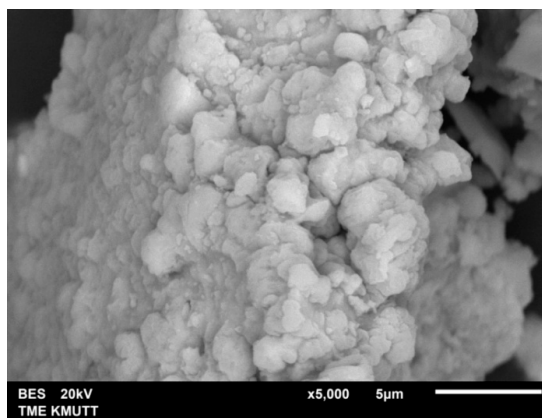
samples are presented in Figure 7. Catalysts calcined at high temperatures revealed increased roughness of cerium oxide surface, as shown in Figure 7 (A) and (B). Therefore, increasing the contact area between the catalyst and substrate resulted in a higher %FAME. Large fractures appeared on the surface when calcination temperatures were higher than 500°C , as shown

in Figure 7 (C). The surface fraction was reflected by a significant decrease in the average pore volume,

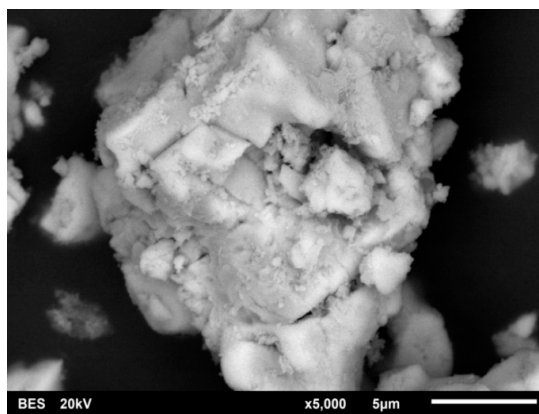
which corresponds to the data of BET in Table 1.



(A)



(B)



(C)

Figure 7 SEM images for $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$:

(A) $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ calcined at 400°C (B) 500°C and (C) 600°C

The X-ray diffraction patterns of calcined $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ samples at different temperatures are depicted in Figure 8. All of the samples presented the peak of cerium oxide. Increasing calcination temperature caused the particles crystallize more. The characteristic peaks of the cerium oxide ($2\theta = 28.56^\circ, 33.08^\circ, 47.48^\circ, 56.34^\circ, 59.09^\circ$ and 69.40°) and the characteristic XRD peak of Ba(OH)_2 were observed on the

samples calcined at 400°C and 500°C in Figure 8 (A) and (B), respectively. Figure 8 (C) shows the increasing calcination temperature up to 600°C . Ba(OH)_2 was decomposed to BaCO_3 ($2\theta = 23.90^\circ, 46.77^\circ$ and 46.99°) and BaCeO_3 ($2\theta = 28.71^\circ, 40.98^\circ, 50.87^\circ, 59.45^\circ, 67.44^\circ$ and 81.98°). BaCO_3 phase occurred by the loaded Ba(OH)_2 was decomposed to BaO on the surface of the cerium oxide support; subsequently, the formed

BaO could adsorb atmospheric CO_2 with the formation of BaCO_3 phase [14]. However, the BaO phase was not detected by XRD. The trace amounts of BaO phase may have been highly dispersed on the surface of the cerium oxide support as a monolayer [14]. The BaCeO_3 phase could be one reason for the lower catalytic activity because of decreased surface area of catalysts.

The representative weight loss (TG) and DTA curves of $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ are presented in Figure 9, which shows DTA peak with the associated mass loss

in the temperature ranges of 30-255°C and 255-800°C. At the temperature range of 30-255°C, a mass loss of 10.5% was related to a decrease in the amount of water in the $\text{Ba(OH)}_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ whereas at the temperature range of 255-800°C, the mass loss was due to the decomposition of the Ba(OH)_2 , the solid-state interaction between the guest compound with the support [14]. The related evidence for the solid state interaction of the catalyst and support can also be seen via XRD pattern in Figure 8.

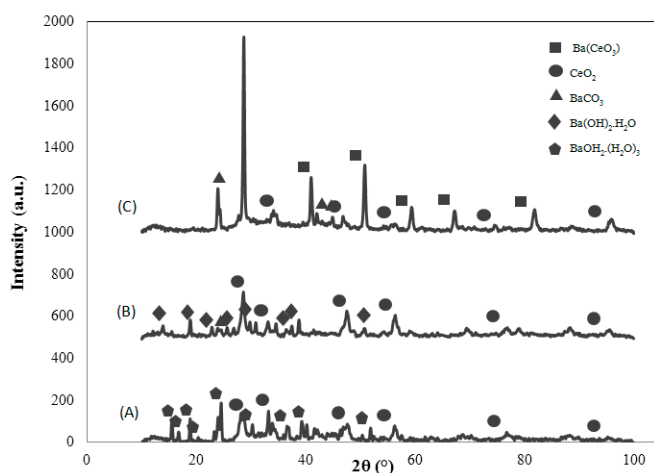


Figure 8 XRD patterns for $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$: (A) $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ calcined at 400°C (B) 500°C and (C) 600°C

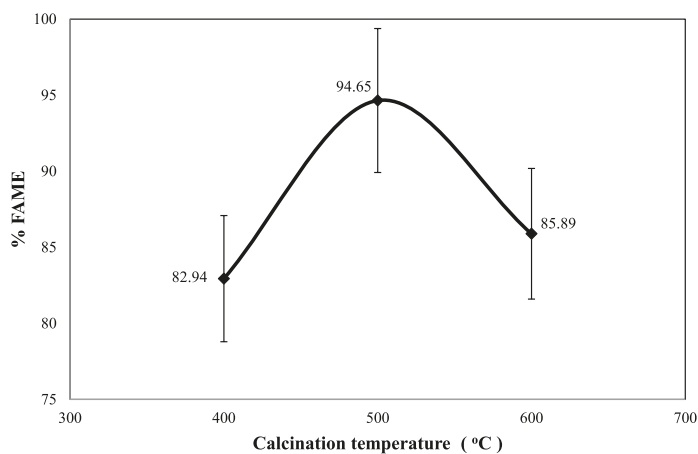


Figure 9 DTA-TG trace of the $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$

3.3 Influence of the reaction conditions

The influence of the catalyst amount was examined in the range of 4 - 16 wt. % of initial oil weight, as shown in Figure 10. The %FAME increased from 79.83% to 94.65% with an increase of catalyst amount from 4 wt. % to 8 wt. % which should increase

the number of active basic sites. However, when the amount of $\text{Ba(OH)}_2\text{-CeO}_2$ increased to 12 wt.%, %FAME decreased. This may have been caused by poor diffusion between the methanol-oil-catalyst systems, and higher viscosity of the mixture. [15].

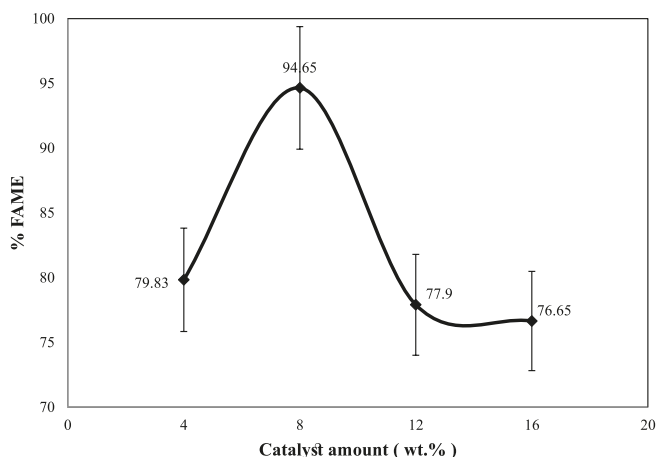


Figure 10 Influence of catalysts amount

The influence of reaction time on %FAME is shown in Figure 11. %FAME increased from 66.55% to 94.65% with an increased reaction time from 3 h to 4 h due to monoglycerides and diglycerides at initial stage retarded the diffusion of reactants and products [31]. Moreover, the rate of the reaction increased directly with reaction time until the reaction time reached 4 h.

The decreasing %FAME at 5 h might have been caused by the decreasing amount of triglyceride and reversion of the reaction. Thus, the maximum conversion was achieved at a reaction time of 4 h. The highest %FAME obtained from this condition was higher than the %FAME (86%) obtained from transesterification of palm oil with ZnO [30].

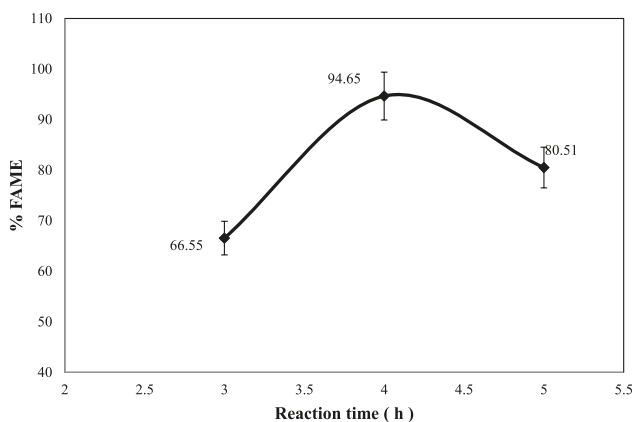


Figure 11 Influence of reaction time

After the completion of the reaction, the solid base catalyst of $\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$ was recovered by filtration, washed with methanol and dried at 100°C [33] for 1 h. Reusability studies were carried out under the optimal reaction conditions mentioned above (methanol : oil molar ratio of 30 : 1, catalyst amount of 8 wt% and reaction time of 4 h.). The

results are shown in Figure 12. The %FAME yield slightly decreased even in the second cycle (89.53%) and the third cycle (76.27%). This decrease in activity may have been due to the active site blockage by adsorbed intermediates or product species, such as diglyceride, monoglyceride, and glycerol [1] and loss of the active site by methanol leaching [32].

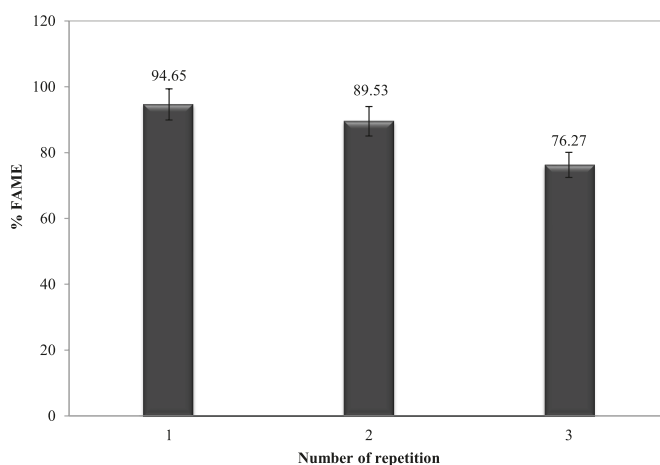


Figure 12 Influence of reusability of $\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$

4. Conclusions

$\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$ mixed oxides as solid base and high surface area catalysts can be seen as a good heterogeneous base catalyst for the transesterification of palm oil with methanol to produce biodiesel. The cerium oxides were prepared by colloidal emulsion aphrons (CEAs) method and loaded with $\text{Ba}(\text{OH})_2$. The optimum calcination temperature of the catalyst was at 500°C for 1 h. The optimized reaction condition for the transesterification had a 30:1 molar ratio of methanol to oil, with an addition of 8 wt.% $\text{Ba}(\text{OH})_2\text{-CeO}_2$ catalyst and reaction time of 4 h. The highest %FAME was 94.65% at the optimum condition. The reaction could be completed over a short time under mild temperatures and pressure conditions.

5. References

1. Boonyawan, Y., Parncheewa, U., Buppa, P. and Pawnprapa, K., 2010, "Modification of Calcite by Hydration-dehydration Method for Heterogeneous Biodiesel Production Process: The Effects of Water on Properties and Activity," *Chemical Engineering Journal*, 162 (1), pp. 135-141.
2. Gryglewicz, S., 1999, "Rapeseed Oil Methyl Esters Preparation using Heterogeneous Catalysts," *Bioresource Technology*, 70 (3), pp. 249-253.
3. Tanabe, K. and Holderich, W.F., 1999, "Industrial Application of Solid Acid-base Catalysts," *Applied Catalysis A:General*, 181 (2), pp. 399-434.
4. Schachter, Y. and Herman, P., 1968, "Calcium-oxide-catalyzed Reactions of Hydrocarbons and of

Alcohols,” *Journal of Catalysis*, 11 (2), pp. 147–158.

5. Xie, W., Peng, H. and Chen, L., 2006, “Transesterification of Soybean Oil Catalyzed by Potassium Loaded on Alumina as a Solid-base Catalyst,” *Applied Catalysis A:General*, 300 (1), pp. 67–74.

6. Supes, G.J., Dasari, M.A., Daskocil, E.J., Mankidy, P.J. and Goff, M.J., 2004, “Transesterification of Soy-bean Oil with Zeolite and Metal Catalysts,” *Applied Catalysis A:General*, 257 (2), pp. 213–223.

7. Zhang G., Hattori H. and Tanabe K., 1988, “Aldol Addition of Acetone, Catalyzed by Solid Base Catalysts: Magnesium Oxide, Calcium Oxide, Strontium Oxide, Barium Oxide, Lanthanum(III) Oxide and Zirconium Oxide,” *Applied Catalysis A:General*, 36, pp. 189–197.

8. Iizuka, T., Hattori, H., Ohno, Y., Sohma, J. and Tanabe, K., 1971, “Basic Sites and Reducing Sites of Calcium Oxide and their Catalytic Activities,” *Journal of Catalysis*, 22 (1), pp. 130–139.

9. Kabashima, H., Katou, T. and Hattori, H., 2001, “Conjugate Addition of Methanol to 3-buten-2-one Over Solid Base Catalysts,” *Applied Catalysis A:General*, 214, pp. 121–134.

10. Chantrasa, A., Sukphan, A. and Goodwin, J.G., 2011, “The Deactivation of Sulfonated Carbon Catalyst Derived from D-glucose on Amberlite XAD1180 during the Biodiesel Synthesis at High Temperature,” *KMUTT Research and Development Journal*, 34 (1), pp. 19–29. (In Thai)

11. Cantrell, D.G., Gillie, L.J., Lee, A.F. and Wilson, K., 2005, “Structure-reactivity Correlations in MgAl Hydrotalcite Catalysts for Biodiesel Synthesis,” *Applied Catalysis A:General*, 287 (2), pp. 183–190.

12. Seki, T., Kabashima, H., Akutsu, K., Tachikawa, H. and Hattori, H., 2001, “Mixed Tishchenko Reaction Over Solid Base Catalysts,” *Journal of Catalysis*, 204 (2), pp. 393–401.

13. Tsuji, H., Yagi, F., Hattori, H. and Kita, H., 1994, “Self-condensation of n-butyraldehyde over Solid Base Catalysts,” *Journal of Catalysis*, 148 (2), pp. 759–770.

14. Wenlei, X. and Zhenqiang, Y., 2007, “Ba–ZnO Catalysts for Soybean Oil Transesterification,” *Catalysis Letters*, 117 (3), pp. 159–165.

15. Xinhai, Y., Zhenzhong, W., Hongliang, L., Shantung, T. and Jinyue, Y., 2011, “Transesterification of Pistacia Chinensis Oil for Biodiesel Catalyzed by CaO–CeO₂ Mixed Oxides,” *Fuel*, 90 (5), pp. 1868–1874.

16. Meena, Y. and Yogesh C.S., 2019, “Transesterification of Used Vegetable Oil using BaAl₂O₄ Spinel as Heterogeneous Base Catalyst,” *Energy Conversion and Management*, 198, pp. 111795–111805.

17. Sahani, S., Roy, T. and Chandra Sharma, Y., 2019, “Clean and Efficient Production of Biodiesel Using Barium Cerate as a Heterogeneous Catalyst for the Biodiesel Production; Kinetics and Thermodynamic Study,” *Journal of Cleaner Production*, 237, pp. 117699–117704.

18. Banerjee, M., Dey, B., Talukdar, J. and Chandra Kalita, M., 2014, “Production of Biodiesel from Sunflower Oil using Highly Catalytic Bimetallic Gold–silver Core–shell Nanoparticle,” *Energy*, 69 pp. 695–699.

19. Bae, D.S., Lim, B., Kim, B.I. and Han K. S., 2002, “Synthesis and Characterization of Ultrafine CeO₂ Particles by Glycothermal Process,” *Materials Letters*, 56 (4), pp. 610–613.

20. Li, Y.X., Zhou, X.Z., Wang, Y. and You, X. Z., 2003, “Preparation of Nano-Sized CeO₂ by Mechanochemical Reaction of Cerium Carbonate with Sodium Hydroxide,” *Materials Letters*, 58 (3), pp. 245–249.

21. Kang, H.S., Kang Y.C., Koo, H.Y., Ju, S.H., Kim, D.Y., Hong, S.K., Sohn, J.R., Jung, K.Y. and Park, S.B., 2006, “Nano-Sized Ceria Particles Prepared by Spray

- Pyrolysis Using Polymeric Precursor Solution,” *Materials Sciences and Engineering B*, 127, pp. 99–104.
22. Yuejuan, W., Jingmeng, M., Mengfei, L., Ping, F. and Mai, H., 2007, “Preparation of High-Surface Area Nano-CeO₂ by Template-Assisted Precipitation Method,” *Journal of Rare Earths*, 25 (1), pp. 58–62.
23. Nagy, K. and Dékány I., 2009, “Preparation of Nanosized Cerium Oxide Particles in W/O Microemulsions,” *Colloid and Surface A*, 345 (1), pp. 31–40.
24. Yang, Z., Yang Y., Liang, H. and Liu, L., 2009, “Hydrothermal Synthesis of Monodisperse CeO₂ Nanocubes,” *Materials Letters*, 63 (21), pp. 1774–1777.
25. Deng, T., Dai, Y. and Wang, J., 2005, “A New Kind of Dispersion—Colloidal Emulsion Aphrons,” *Colloids and Surface: Physicochemical and Engineering*, 266, pp. 97–105.
26. Jauregi, P., Gilmour, S. and Varley, J., 1997, “Characterisation of Colloidal Gas Aphrons for Subsequent Use for Protein Recovery,” *Chemical Engineering Journal*, 65 (1), pp. 1–11.
27. He, Y., Wu, Z. and Mao, Z.S., 2009, “A General Diffusion Model for Mass Transfer in Colloidal Liquid Aphron Systems,” *Colloids and Surface: Physicochemical and Engineering*, 338, pp. 25–32.
28. Srivastava, P., Hahr, O., Buchholz, R. and Worden, R.M., 2000, “Enhancement of Mass Transfer using Colloidal Liquid Aphrons: Measurement of Mass Transfer Coefficients in Liquid–liquid Extraction,” *Biotechnology and Bioengineering*, 70, pp. 525–532.
29. Sunisa, S., Virote, B. and Somnuk, J., 2012, “Synthesis of Nanocrystalline CeO₂ Particles by Different Emulsion Methods,” *Materials Characterization*, 67, pp. 83–92.
30. Muhammad, T., SaqibAli, A. and NasirKhalid, 2012, “Activity of Homogeneous and Heterogeneous Catalysts, Spectroscopic and Chromatographic Characterization of Biodiesel: A Review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (8), pp. 6303–6316.
31. Asanumaab, H., Polcick, P., Kolozsvavic, S., Klimashinb, F.F., Riedlb, H. and Mayrhoferb, P., 2017, “Cerium Doping of Ti-Al-N Coatings for Excellent Thermal Stability and Oxidation Resistance,” *Surface and Coatings Technology*, 326, pp. 165–172.
32. Chawalit, N., Pramwit, N., Sithikorn, T. and Kunchana, B., 2010, “Biodiesel Production through Transesterification over Natural Calciums,” *Fuel Processing Technology*, 9 (11), pp. 1409–1415.
33. Kristaps, M., 2018, “The Potential of K₃PO₄, K₂CO₃, Na₃PO₄ and Na₂CO₃ as Reusable Alkaline Catalysts for Practical Application in Biodiesel Production,” *Fuel Processing Technology*, 179, pp. 302–312.

วัสดุควบคุมกำลังต่ำจากกากของเหลืออุตสาหกรรมแต่งแร่ดินขาว

อรุณเดช บุญสูง*

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ต.ท่าอิฐ อ.เมือง จ.อุดรดิตถ์ 53000

* Corresponding Author: A.Boonsung9@gmail.com

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 27 พฤษภาคม 2562

แก้ไข : 23 มีนาคม 2563

ตอบรับ : 24 เมษายน 2563

คำสำคัญ :

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ / ดินขาว /

เถ้าลอย / วัสดุถมกลับ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติด้านกำลังของวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ใช้กากดินขาวมาทดแทนมวลรวมโดยใช้เถ้าลอย (Fly Ash, FA) ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement, OPC) เป็นสารเชื่อมประสาน (Binder) ที่ปริมาณ 1%, 3%, 5%, 7%, 9% และ 11% โดยน้ำหนักของกากดินขาว ทั้งนี้ ศึกษาสมบัติดังกล่าวด้วยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน โดยปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมได้จากการพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบการไหลแผ่ และการยุบตัว ผลการศึกษา พบว่า สมบัติในสถานะเหลวของวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากกากดินขาวขึ้นกับปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในการผสม การใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณความต้องการน้ำลดลงประมาณ 8% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียว และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย ทั้งนี้ เป็นผลเนื่องมาจากอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม ดังนั้นเมื่อน้ำในส่วนผสม น้ำจึงเคลือบบริเวณพื้นผิวทำให้เถ้าลอยมีสมบัติเป็นวัสดุหล่อลื่น การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเชื่อมประสาน (เพิ่มอัตราส่วน OPC : FA) ในช่วง 1% – 11% ไม่ส่งผลต่อปริมาณความต้องการน้ำเพื่อให้เกิดการยุบตัวที่ค่าๆ หนึ่ง การใช้เถ้าลอยร่วมในสารเชื่อมประสานที่ทุกปริมาณทำให้ลดระยะเวลาการสูญเสียค่าการยุบตัวได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวยังแสดงให้เห็นว่า ลักษณะการวิบัติของก้อนตัวอย่างที่มีปริมาณสารเชื่อมประสานในปริมาณมาก แม้จะมีอายุการบ่มน้อย จะแสดงพฤติกรรมแบบแข็งแรง ในทางกลับกันหากก้อนตัวอย่างมีปริมาณสารเชื่อมประสานน้อย แม้อายุการบ่มมาก จะแสดงพฤติกรรมแบบยืดเหนียว โดยวัสดุควบคุมกำลังต่ำจากกากดินขาวผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยสามารถพัฒนากำลังได้เพียงพอต่อความต้องการใช้งานตามข้อกำหนดของวัสดุควบคุมกำลังต่ำตามมาตรฐาน ACI 229R (ACI, 1999)

Controlled Low-Strength Material (CLSM) from Industrial Waste Product of Kaolin

Aroondet Boonsung*

Uttaradit Rajabhat University, Tha It, Muang, Uttaradit 53000

* Corresponding Author: A.Boonsung9@gmail.com

Assistant Professor, Department of Construction Engineering Management, Faculty of Industrial Technology.

Article Info

Article History:

Received: May 27, 2019

Revised: March 23, 2020

Accepted: April 24, 2020

Keywords:

Controlled Low-Strength
Material / Kaolin / Fly Ash /
Back Fill Material

Abstract

This research was conducted to study the strength properties of controlled low-strength material, with aggregate replaced by the industrial waste kaolin (IWK) at 1%, 3%, 5%, 7%, 9% and 11% of fly ash (FA); ordinary portland cement (OPC) was used as the binder. The strength properties were evaluated via the unconfined compression test at curing ages of 3, 7, 14, 28 and 60 days. The amount of water used in the mixture was selected by considering the results of the flow test and slump test to obtain the desired consistencies. The results showed that liquid condition of the controlled low-strength material from kaolin was affected by the amount of fly ash used. The use of fly ash with cement helped reduce the water requirement by 8% when compared with the use of only cement as the binder. The more fly ash added, the more water could be reduced. This is because the fly ash particle shape was spherical. As a result, when the water was added to the mixture, the surface was coated with such particles; fly ash then became a lubricant. An increase in the binder (increasing OPC: FA) in the range of 1% to 11% did not affect the amount of water required to cause collapse at a certain value. The use of fly ash in the ordinary cement at every volume resulted in the time reduction of the slump value. In addition, the results of the unconfined compression test showed that fracture of the samples that contained more cement, even at a shorter curing time, exhibited stress hardening behaviour. On the other hand, if the sample contained less cement, even at a longer curing time, it would show the stress softening behaviour. The controlled low-strength material from industrial waste of kaolin mixed with cement and fly ash could develop adequate strength to meet the demand of work based on the requirements of the ACI 229R (ACI, 1999) standard.

1. บทนำ

วัสดุควบคุมกำลังต่ำ (Controlled Low-Strength Material, CLSM) เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับคอนกรีต สามารถไหลเข้าในที่แคบและอัดตัวแน่นได้ดี เป็นจุดเด่นที่สำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับดินถมแบบเดิม CLSM อาจมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันไปตามภูมิภาคเช่น Unshrink Fill, Controlled Density Fill, K-Kret, Flowable Mortar, Soil-Cement Slurry [1-2] CLSM ประกอบขึ้นมาจาก สารเชื่อมประสาน สารผสมเพิ่ม มวลรวม และน้ำเป็นหลัก ซึ่งการเลือกใช้วัสดุในส่วนผสมสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม โดยพิจารณาจากลักษณะการใช้งาน ต้นทุนการผลิตและความสามารถในการทำงานได้เป็นสำคัญ

การใช้กากอุตสาหกรรมอย่างเช่น เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ในส่วนผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติดินสำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้างเป็นวิธีการหนึ่งที่มีนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการก่อสร้าง Wu และคณะ [3] ศึกษาการใช้เถ้าลอยปรับปรุงสมบัติดินโดยการผสมลึก (Deep Mixing) พบว่าสามารถเพิ่มกำลังแบกทานของดินเหนียวอ่อนได้ นอกจากนี้ยังทำให้ดินมีสมบัติในการระบายน้ำได้ดีขึ้นทำให้เสาเข็มดินปูนซีเมนต์มีสมบัติเป็นทางระบายน้ำในแนวตั้ง ส่งผลให้ระยะเวลาการอัดตัวระบายน้ำลดลง Cokca [4] ศึกษาการใช้เถ้าลอย ปูนขาว และปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงสมบัติดินกระจายตัว (Expansive Soil) พบว่า การใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ และปูนขาวสามารถลดการกระจายตัวของดินได้ทั้งนี้ เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดิน ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มมวลละเอียดและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย Thongchai [5] และ Klameng และ Thongchai [6] ได้รายงานว่าการใช้เถ้าลอยแม่มาจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศไทยสามารถปรับปรุงให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดินบดอัดโดยวิธีการทดสอบแบบซีบีอาร์ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยอย่างชัดเจน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Thongchai และ Boonsung [7]

นอกจากนั้นยังพบว่ามีหลายงานที่จะศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าลอยและกากอุตสาหกรรมจากแหล่งต่างๆ เพื่อผลิต CLSM โดย Funston และคณะ [8] ได้เริ่ม

ศึกษาการนำเถ้าลอยเหลวเป็นวัสดุถมพื้นที่ที่ขึ้นไปในน้ำ โดยเถ้าลอยเหลวมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ 5% และน้ำ 35-45% โดยน้ำหนัก และควบคุมค่า การยุบตัว (Slump) ไว้ที่ประมาณ 6.5 นิ้วและเทลงบนพื้นที่ลาดเอียง 1:2 เมื่อทิ้งเวลาผ่านไป 6 เดือนได้ชุดเถ้าลอยที่แข็งตัวแล้วมาตรวจสอบพบว่า หลุมชุดที่มีความลึกกว่า 4 เมตร สามารถคงรูปอยู่ได้โดยไม่พังทลายจึงเกิดเป็นแนวคิดใหม่สำหรับการนำเถ้าลอยไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในกรณีอื่นๆ เช่น วัสดุถมน้ำหนักเบาบนดินอ่อนหรือวัสดุถมหลังโครงสร้างกันดิน ต่อมา Janardhanam และคณะ [9] ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยเหลวเพื่อใช้เป็นวัสดุถมหลังท่อฝังดินโดยใช้เถ้าลอย Class F ร่วมกับปูนซีเมนต์เปรียบเทียบกับดินถมบดอัดแน่นภายใต้แรงกระทำแบบสถิตและแบบแรงจลน์ตามลำดับ พบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับท่อในกรณีที่ใช้เถ้าลอยเหลวเป็นวัสดุถมกลับมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ใช้ดินถมบดอัดแน่น Butalia และคณะ [10] ได้ศึกษาการใช้ไอปซิมเทียม (Flue Gas Desulfurization, FGD) เป็นส่วนผสมในวัสดุถมแบบเหลวแทนที่เถ้าลอยที่อันตรายส่วนต่างๆ พบว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยการเพิ่มปริมาณน้ำจะทำให้ความสามารถในการไหลตัวของวัสดุมีค่าเพิ่ม Trejo และคณะ [11] ได้รายงานการใช้ CLSM จากกากอุตสาหกรรมในประเทศสหรัฐอเมริกา ร่วมกับเถ้าลอย Class C และ F พบว่านิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเทพาระดับ อุดช่องว่างใต้ถนน เทช่วงรอยต่อคอสะพานและวัสดุถมกลับ Katz และ Kovler [12] รายงานว่า CLSM ที่ใช้กากอุตสาหกรรม 5 ชนิดได้แก่ Cement Kiln Dust, (CKD), Dust from Asphalt Plants (AD), Coal Fly Ash (FA), Coal Bottom Ash (BA) and Quarry, (QW) ร่วมกับ Ordinary Portland Cement (OPC) พบว่าสมบัติด้านกำลังของ CLSM ที่ผสมด้วย CKD FA และ BA ให้ค่าที่ค่อนข้างสูงมาก

ข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่ามีความพยายามที่จะใช้ประโยชน์จากกากอุตสาหกรรมในรูปแบบ CLSM ด้วยวัสดุที่หลายชนิดเพื่อทดแทนดินถมแบบเดิม ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุด บทความนี้เป็นการรายงานผลการศึกษาสมบัติด้านกำลัง (Strength Property) และความสามารถในการทำงานได้ (Workability) จากการทดลองในห้องปฏิบัติการของ CLSM ที่มีกากของเหลือจากอุตสาหกรรมกรรมแต่งแร่ดินขาวทดแทนวัสดุมวลรวม

2. วัสดุ

วัสดุที่เป็นส่วนประกอบหลักในการผลิต CLSM ประกอบไปด้วย กากดินขาว (Industrial Wastes of Kaolin, IWK), ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement, OPC) และ เถ้าลอย (Fly Ash, FA) โดยรูปที่ 1, 2 และ ตารางที่ 1 แสดงลักษณะการกระจายตัว สมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตามลำดับ

2.1 กากดินขาว

IWK ถูกใช้เป็นมวลรวมทดแทนวัสดุแบบเดิมได้จากโรงงานอุตสาหกรรมแยกแร่ทางภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย โดยจะทำการทดสอบสมบัติพื้นฐานได้แก่ การกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Sized Distribution) ชีตจำกัดความชื้นเหลว (Consistency Limit) ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity) และการจำแนกประเภทดิน (Soil Classification) ตามมาตรฐาน ASTM D422, D4318, D854 และ D2487 [13-16] โดยผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 2 การกระจายตัวของกากดินขาวอยู่ในช่วง 4.75-0.075mm โดยมีค่าความเหนียวเล็กน้อยแม้กากดินขาวจะผ่านกระบวนการคัดแยกแร่ดินขาวออกไปแล้วก็ตาม ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากอิทธิพลของแร่ดินเหนียวตกค้างที่ติดอยู่บนพื้นผิวของส่วนเม็ดหยาบ มีคุณลักษณะเป็น Clayey Sand with Uniform Graded (SC) เมื่อจำแนกประเภทด้วยระบบ USCS ความถ่วงจำเพาะมีค่า

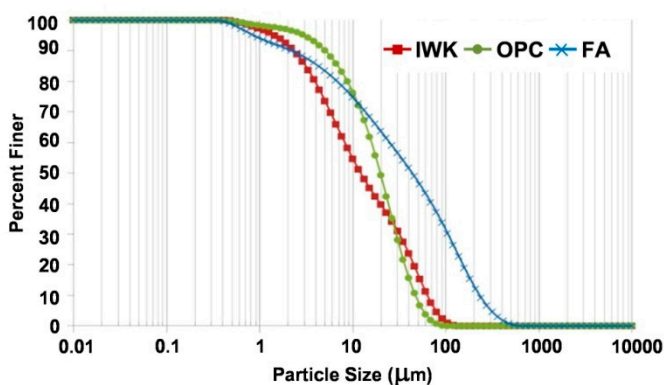
เท่ากับ 2.5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคุณลักษณะของแร่เฟลด์สปาร์ กลุ่มอัลคาไลด์ (*K-feldspars* or *Alkali Felspars*) [17] หรือ หินฟืนน้ำที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก

2.2 ปูนซีเมนต์

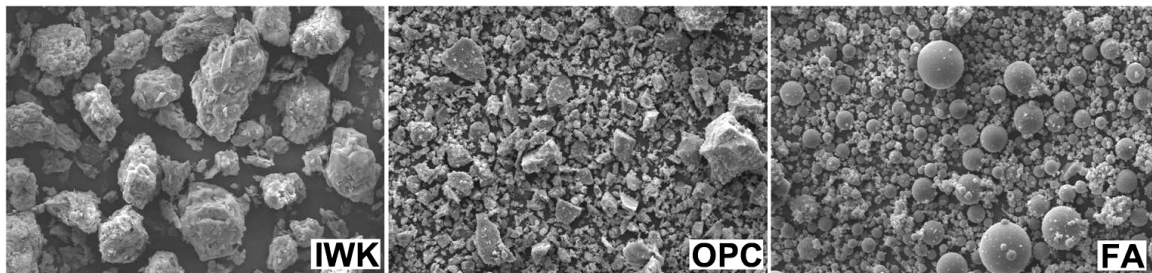
OPC เป็นสารเชื่อมประสานหลักที่มีสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 15-2555 [18] การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า ผลรวมของ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีค่าเท่ากับ 93.17% สอดคล้องกับสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [19] OPC มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.4-104 μm โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26 μm

2.3 เถ้าลอย

FA ถูกใช้เป็นสารเชื่อมประสานรองเพื่อทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า ปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีค่าเท่ากับ 67.69% ซึ่งค่าอยู่ในช่วง 50-70% และ SO_3 มีค่าเท่ากับ 4.8% ซึ่งมีค่าไม่เกิน 5% เมื่อพิจารณาตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C618 จัดได้ว่าเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้อยู่ใน Class C หรืออาจเรียกอีกอย่างว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง [20] โดยมีปริมาณ CaO เท่ากับ 21.34% FA มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.2-549 μm โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 138 μm



รูปที่ 1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค IWK, OPC และ FA



รูปที่ 2 คุณลักษณะทางกายภาพของ IWK, OPC และ FA (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ IWK, OPC และ FA

องค์ประกอบ	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
IWK (%)	17.24	75.46	0.00	3.48	0.37	0.30	0.00	1.82	1.34
OPC (%)	3.58	17.64	4.37	0.47	68.34	0.30	0.00	3.61	1.69
FA (%)	16.39	33.84	4.80	2.65	21.34	0.62	0.18	17.46	2.72

ตารางที่ 2 สมบัติทางธรณีเทคนิคของกากดินขาว

สมบัติ	ผลการทดสอบ
Grain Size Distribution	
Passing No 4 [#] , %	97.0
Passing No 200 [#] , %	3.0
D ₁₀ , D ₃₀ and D ₆₀ , mm	0.09, 0.14 and 0.46
C _u and C _c	0.09 and 0.14
Atterberg Limits	
Liquid Limit, %	26.3
Plastic Limit, %	20.0
Shrinkage Limit, %	4.5
Plastic Index	6.3
Specific Gravity	2.50
Soil Classification System (USCS)	Clayey Sand or Sand-Clay Mixture, SC

3. วิธีการศึกษา

3.1 ออกแบบส่วนผสม

ส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมดแสดงได้ดังตารางที่ 3 ปริมาณสารเชื่อมประสานเท่ากับ 1%, 3%, 5%, 7%, 9% และ 11% โดยน้ำหนักแห้งของ IWK ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมต้องเพียงพอต่อความต้องการในการทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อให้เกิดสารเชื่อมประสานและมีความสามารถในการทำงานได้ในระดับปกติ โดยมาตรฐาน ACI 229 กำหนดให้ค่าการยุบตัวอยู่ในช่วง 150-200mm ซึ่งหาได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 และ ASTM C143 [21-22] ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าต้องใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 33%

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

ส่วนผสมจะถูกผสมด้วย Pan Concrete Mixer และเทลงในแบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ความสูง 4 นิ้ว และปล่อยให้ทิ้งไว้ประมาณ 1-2 ชั่วโมงเพื่อให้วัสดุก่อตัว จากนั้นจึงปาดผิวให้เรียบเพื่อระหว่างการทดสอบก่อนตัวอย่างจะสามารถถ่ายแรงกดได้เต็มพื้นที่หน้าตัด หลังจากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้อีก 24 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อยเพื่อให้แข็งตัว จากนั้นจึงถอดก่อน

ตัวอย่างออกและหุ้มด้วยฟิล์มถนอมอาหารเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำจากการระเหยก่อนนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ

3.3 วิธีการทดสอบ

CLSM ในสภาวะเหลวถูกทดสอบค่าการไหลตัวด้วย Slump Flow, L-Box และ V-Funnel ตามมาตรฐาน ASTM C1611 และ EFNARC [23-24] เพื่อประเมินความสามารถในการทำงานได้ ก่อนตัวอย่างที่อายุการบ่มต่างๆ จะถูกทดสอบสมบัติด้านกำลังด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) ตามมาตรฐาน ASTM D2166 [25] โดยการให้แรงกดก่อนตัวอย่างจะใช้อัตราเคลื่อนที่ทางแนวตั้งของเครื่องให้อยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.1 นิวตันต่อพื้นที่ จากนั้นบันทึกข้อมูลจากวงแหวนวัดแรงทุกๆ การกดตัว 0.005 นิวตันของก้อนตัวอย่าง ซึ่งในกรณีที่ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงที่สูงอาจใช้ 0.002 นิวตัน เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับพฤติกรรมของวัสดุ ในกรณีที่ไม่มีรอยเลื่อนปรากฏชัดให้ทดสอบจนการกดตัวถึงประมาณ 20% ของความสูงก้อนตัวอย่าง โดยการรายงานค่าที่ได้จากการทดสอบจะใช้ค่าเฉลี่ยจากผลการทดสอบก่อนตัวอย่างจำนวน 5 ก้อน

ตารางที่ 3 การออกแบบวัสดุผสม CLSM

Binder	1%	3%	5%	7%	9%	11%	Water Content
OPC	1	3	5	7	9	11	33%
OPC:FA	0.5 : 0.5	1.5 : 1.5	2.5 : 2.5	3.5 : 3.5	4.5 : 4.5	5.5 : 5.5	

หมายเหตุ : OPC 1 หมายถึง ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน 1%

OPC:FA 1 หมายถึง ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน 0.5% ร่วมกับเถ้าลอย 0.5%

4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

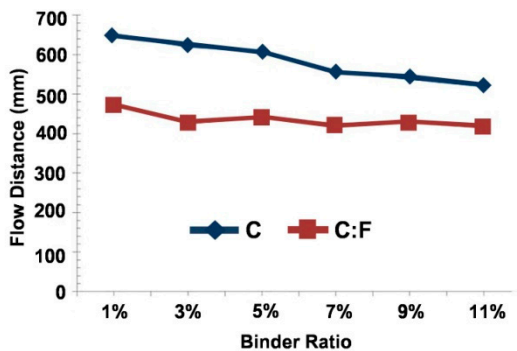
4.1 ความสามารถในการทำงานได้

รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ด้วยการไหลแผ่ และการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวดิ่งด้วยอุปกรณ์ L-Box และ V-Funnel พบว่าการทดสอบทั้ง 3 วิธีให้ผลที่สอดคล้องกันคือการใช้ OPC ล้วนจะส่งผลให้ความ

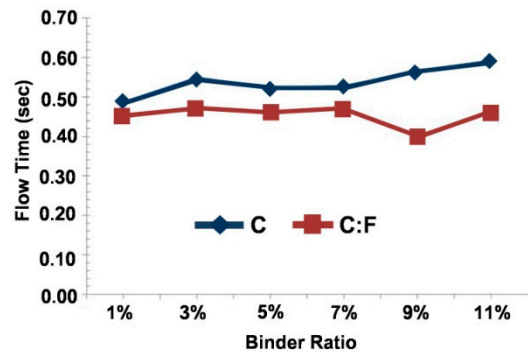
สามารถในการทำงานได้ลดลงเมื่อร้อยละของปริมาณสารเชื่อมประสานเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ CLSM ที่ผสมด้วย OPC:FA แสดงแนวโน้มว่า FA สามารถปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้เป็นอย่างดี [26] ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากสมบัติในสภาวะเหลวนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุผสมที่ใช้ซึ่งมีรูปทรงและลักษณะพื้นผิวเป็นปัจจัยควบคุม [27] โดยอนุภาคของ FA มีรูปทรงกลม

ต้นทำให้ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลได้จากการลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคภายในของวัสดุ [28-29] ทั้งนี้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมต้องการปริมาณน้ำที่สูงเพื่อให้เกิดความชื้นเหลวปกติ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมประสานจึงทำให้อายุของปริมาณน้ำที่เหลือจากการดูดซึมของวัสดุผงเพื่อให้

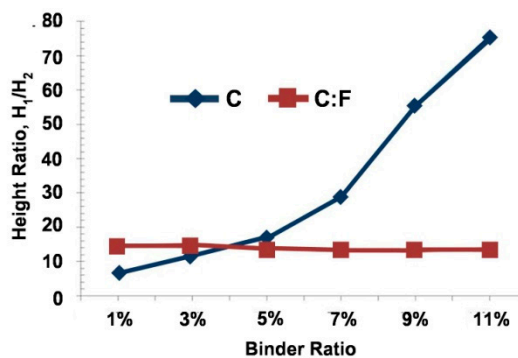
เกิดการลื่นไหลลดลง และส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของวัสดุโดยตรง แต่ทั้งนี้หากต้องการเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ การบดเกล็ดล่อยให้มีอนุภาคที่เล็กลงกว่าปกติก็จะสามารถลดแรงเสียดทานระหว่างสารเชื่อมประสานกับมวลรวมในวัสดุได้เป็นอย่างดี [20, 30-31]



Flow at 50 cm



V-Funnel



L-Box

รูปที่ 3 ผลการทดสอบการไหล

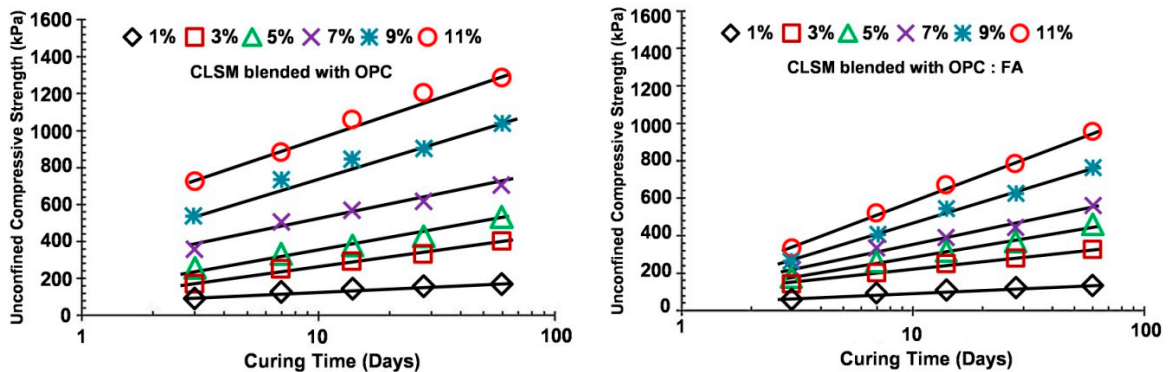
4.2 กำลังรับแรงอัดแกนเดียว

จากผลการทดสอบพบว่าลักษณะการวิบัติของก้อนตัวอย่างที่มีร้อยละของสารเชื่อมประสานในปริมาณที่มาก แม้มีอายุการบ่มน้อยจะแสดงพฤติกรรมการวิบัติเป็นแบบเปราะ (Brittle Material) โดยระนาบการวิบัติจะเกิดเป็นแบบแตกหักทำมุมเอียงประมาณ 45 องศาับแนวราบ และแสดงค่ากำลัง

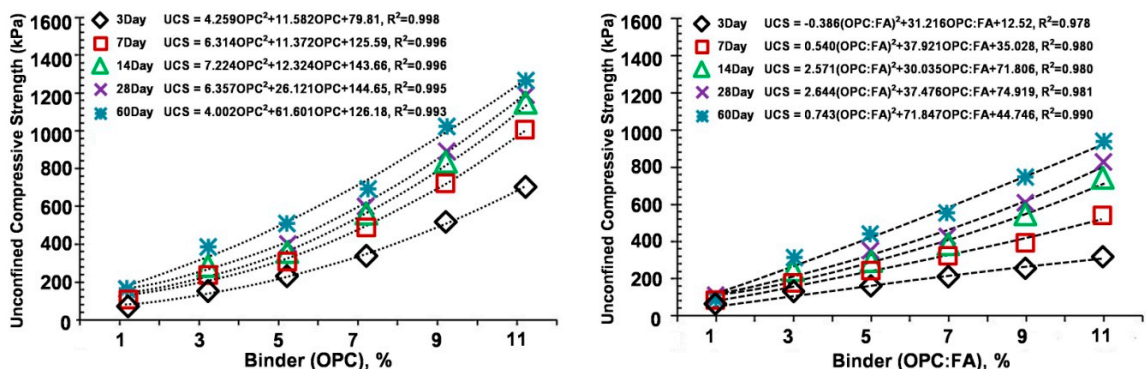
รับแรงสูงสุดได้อย่างชัดเจน แต่ในทางกลับกันหากก้อนตัวอย่างมีปริมาณสารเชื่อมประสานน้อยแม้อายุการบ่มมากจะแสดงพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียว (Ductile Material) โดยก้อนตัวอย่างจะเกิดการหลุดร่อนจากผิวด้านนอกและถูกบีบอัดให้ยุบตัวในแนวตั้งอย่างช้าๆ [32] รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่ม ผลการ

ทดสอบแสดงให้เห็นว่าการพัฒนากำลังรับน้ำหนักเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิด Ca(OH)_2 ซึ่งจะแตกตัวเป็น Ca^{2+} ทำปฏิกิริยากับ CSH และ CAH โดย Ettringite เกิดการขยายตัวเข้าสู่โพรงในรูปของปูนซีเมนต์เจล โดยจะมีสมบัติเป็นสารเชื่อมประสานเมื่อน้ำระเหยออกไป เกิดการหดและรวมตัวยึดเกาะกันแน่นบริเวณพื้นผิวสัมผัส เมื่อแข็งตัวจึงเกิดพันธะเชื่อมประสานในระดับที่สูง โดยเชื่อกันว่ากำลังของปูนซีเมนต์เจลอันั้นเกิดขึ้นจาก Vander Wall's Forces ที่อยู่ใกล้กันและพันธะทางเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งแรงชนิดนี้จะมีค่าความแข็งแรงกว่าแรงดูมมาก จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มด้วย [33-35]

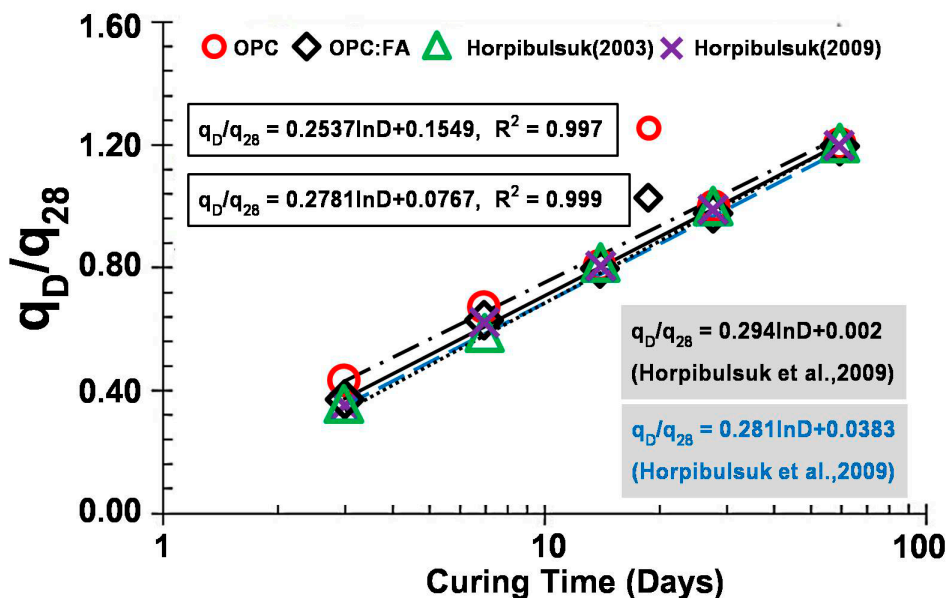
Rachan [36] ได้ศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินปูนซีเมนต์ด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค (Scanning Electron Microscopy, SEM) พบว่าการใช้ OPC ในปริมาณที่สูงแสดงให้เห็นการยึดเกาะของอนุภาคที่แน่นและทึบมากทำให้เกิดพันธะเชื่อมแน่นและลดปริมาตรโพรงดิน รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับปริมาณสารเชื่อมประสานพบว่า การใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียว (OPC) ให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สูงกว่ากรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอย (OPC:FA) และมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการพหุนาม (Polynomial Equation) ที่ทุกปริมาณสารเชื่อมประสานและอายุการบ่ม



รูปที่ 4 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนากำลังกับปริมาณสารเชื่อมประสาน



รูปที่ 6 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของ CLSM ผสม OPC และ OPC:FA เทียบกับอายุการบ่ม

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติดินโดยการนำ FA ผสมร่วมกับ OPC เพื่อให้ส่งเสริมการพัฒนา กำลังรับน้ำหนักจากการเพิ่มขึ้นของ Silica ให้กับดินซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาลำดับที่สอง (Secondary Reaction) ในรูปของปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ [37-38] แต่จากการศึกษาสภาพขยายของดินปูนซีเมนต์ที่อายุ 28 และ 60 วันพบว่า ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นรอบอนุภาคปูนซีเมนต์จะเชื่อมต่อเข้ากับอนุภาคเม็ดดินและเถ้าลอยเข้าด้วยกัน ซึ่งแม้ว่าพื้นผิวของเถ้าลอยถูกเคลือบด้วยชั้นของผลผลิตจากปฏิกิริยาดังกล่าว แต่พื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอยยังคงเรียบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เถ้าลอยไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก [39] และจากการศึกษาของ Horpibulsuk และคณะ [40] พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารเชื่อมประสาน CSH และ CAH ซึ่งเกิดตามปริมาณ Ca(OH)_2 อันเป็นผลจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ โดยเถ้าลอยจะทำให้ปูนซีเมนต์ที่จับตัวกันเป็นก้อนเกิดการแตกตัวออกจากกันทำให้มีขนาดเล็กลงส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อสัมผัสกับน้ำจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่ม ส่งผลให้ปริมาณ Ca(OH)_2

สูงขึ้นตาม รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนากำลังรับ (q_D/q_{28}) และ อายุการบ่ม (day) เมื่อ q_D คือ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม D และ q_{28} คือค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 28 วัน เห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินปูนซีเมนต์ที่ปริมาณน้ำสูงและดินปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่เสนอโดย Horpibulsuk และคณะ [41-43] ตามลำดับ ความสัมพันธ์เช่นนี้เป็นการสนับสนุนผลการศึกษาคอร์สสร้างระดับอนุภาคที่ว่า “ค่ากำลังรับแรงอัดของดินปูนซีเมนต์และดินปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่านั้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานิกแทบจะไม่มีบทบาทเลย”

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับโมดูลัสยืดหยุ่น

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) พบว่าความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Equation) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น (Coefficient of Determination, R^2) เท่ากับ 0.984 และ 0.964 ตามลำดับ นอกจากนั้นค่าโมดูลัส

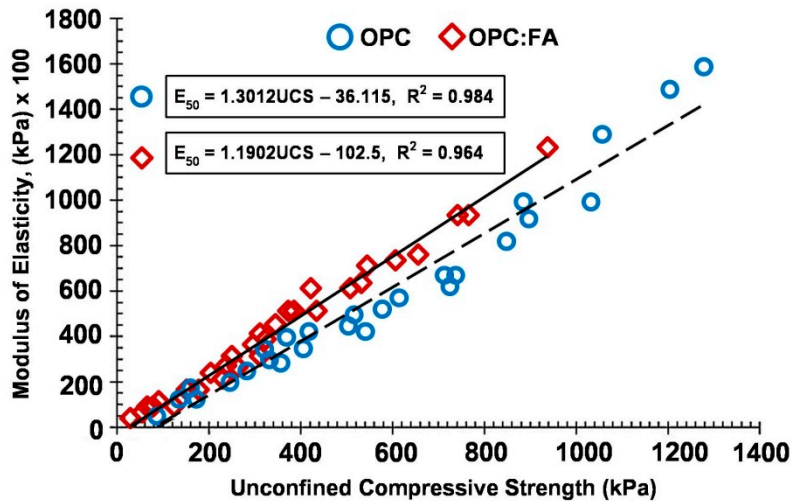
ยืดหยุ่นยังสามารถแสดงความสัมพันธ์กับค่ากำลังต้านทานแรง
เฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) (Binder with OPC)
ได้ในรูปตัวประกอบ (Factor, K) ซึ่งพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง
1.09-2.48 และ 1.55-2.85 ทั้งในกรณีที่ใช้ OPC และ OPC:FA (Binder with OPC : FA)
เป็นสารเชื่อมประสาน ตามลำดับ

$$E = K.S_u$$

$$E_{50} = (1.09 \text{ to } 2.48).S_u \quad (\text{kpa})$$

(Binder with OPC : FA)

$$E_{50} = (1.55 \text{ to } 2.85).S_u \quad (\text{kpa})$$



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

4.4 แนวทางการใช้ประโยชน์

CLSM เป็นวัสดุที่สามารถอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง สามารถใช้เป็นวัสดุถมกลับทางเลือกใหม่ในงานก่อสร้างได้เช่น ใช้เป็นวัสดุทดแทนทรายถมด้านหลังโครงสร้างซึ่งช่วยลดแรงงาน และต้นทุนการบดอัด หรือการใช้เป็นวัสดุทดแทนดินถมหลังการวางท่อในระบบสาธารณูปโภค สถาบันคอนกรีตอเมริกา (ACI) ได้ให้คำนิยามของวัสดุชนิดนี้ว่าเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 8.3Mpa ที่อายุการบ่ม 28 วัน การใช้งานทั่วไปนิยามกำหนดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.1Mpa เพื่อให้ในอนาคตสามารถขุดออกได้หากมีความจำเป็น แม้ว่าการใช้ OPC ร่วมกับ FA จะให้ค่า UCS ที่ต่ำ แต่ก็สามารถพัฒนากำลังได้เพียงพอต่อความต้องการใช้งานตามมาตรฐาน CLSM ACI 229R (ACI,

1999) โดยพบว่าการใช้ OPC 1%, OPC:FA 1% และ OPC:FA 3% จะให้ค่า UCS ต่ำกว่า 0.3Mpa เพื่อให้สามารถขุดออกได้ โดยการใช้เครื่องทุ่นแรงขนาดเล็กเช่น จอบ เสียม ส่วนการใช้ OPC 3%, 5%, 7% และ OPC:FA 5%, 7%, 9% จะให้ค่า UCS ต่ำกว่า 0.7Mpa โดยค่ากำลังในช่วงนี้จะเป็นการยากต่อการขุดเคลื่อนย้ายและจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรกลร่วมในการทำงาน โดยส่วนผสม OPC 9%, 11% และ OPC:FA 11% จะให้ค่ากำลังที่ค่อนข้างสูงมากเหมาะสมกับงานประเภทที่ไม่ต้องการขุดวัสดุออกในภายหลัง โดยสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4 อีกทั้งยังแสดงความเชื่อมโยงผลการทดสอบที่ได้เปรียบเทียบกับคุณลักษณะการรับน้ำหนักของดินในสภาพธรรมชาติ เพื่อการใช้ประโยชน์ในลักษณะของงานวิศวกรรมฐานรากอีกด้วย

ตารางที่ 4 แนวทางการใช้งานตามมาตรฐาน ACI 229R

สารเชื่อม ประสาน	คุณสมบัติเทียบเคียง	UCS _{28Day} (Mpa)	ความสามารถในการขุด
1%	OPC ดินเหนียวอัดตัวแน่น	0.1 – 0.2	เครื่องมือเบา
	OPC:FA ดินเหนียวอัดตัวแน่นปานกลาง	0.05 – 0.1	เครื่องมือเบา
3%	OPC ดินเหนียวอัดตัวแน่นมาก	0.2 – 0.4	เครื่องมือเบา/เครื่องจักรกล
	OPC:FA ดินเหนียวอัดตัวแน่นมาก	0.2 – 0.4	เครื่องมือเบา/เครื่องจักรกล
5%	OPC ดินเหนียวแข็ง	≥ 0.4	เครื่องจักรกล
	OPC:FA ดินเหนียวอัดตัวแน่นมาก	0.2 – 0.4	เครื่องมือเบา/เครื่องจักรกล
7%	OPC ดินเหนียวแข็ง	≥ 0.4	เครื่องจักรกล
	OPC:FA ดินเหนียวแข็ง	≥ 0.4	
9%	OPC ดินเหนียวแข็ง	≥ 0.4	
	OPC:FA ดินเหนียวแข็ง	≥ 0.4	
11%	OPC ดินเหนียวแข็ง	≥ 0.4	
	OPC:FA ดินเหนียวแข็ง	≥ 0.4	

4.5 จุดเด่นและผลกระทบเชิงบวกของ CLSM จากกากดินขาว

CLSM มีส่วนประกอบหลักคือ มวลรวม สารเชื่อมประสาน และน้ำ เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นในการออกแบบสูง ทั้งนี้เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อการใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์การใช้ CLSM ทดแทนวัสดุถมกลับจะช่วยลดแรงกระทำต่อโครงสร้างได้เป็นอย่างดี Chuangching [44] ได้ศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังของท่อฝังใต้ดินและกำแพงเข็มพืดด้วยวิธีวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ กรณีใช้วัสดุถมกลับแบบเหลวจากเถ้าลอยที่อัตราส่วนผสมและอายุการบ่มที่แตกต่างกันทดแทนดินทราย ซึ่งเป็นวัสดุถมกลับแบบเดิมพบว่า การใช้เถ้าลอยเหลวเป็นวัสดุถมกลับสามารถลดแรงกระทำต่อท่อลงได้มากถึงร้อยละ 22 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Janardhanam และคณะ [9] และสามารถลดโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับกำแพงเข็มพืดได้ระหว่างร้อยละ 14-64

อุตสาหกรรมดินขาวพบกระจายตัวอยู่ทั่วประเทศไทยโดยอยู่ในรูปของอุตสาหกรรมแต่งแร่ดินขาว กระบวนการผลิตจะคัดแยกเฉพาะส่วนที่เป็นอนุภาคแร่ดินขาวซึ่งจะมีปริมาณไม่มากนัก ดังนั้นผลที่ตามมาคือของเหลือที่เกิดจากกระบวนการคัดแยกซึ่งเรียกว่า กากดินขาวที่มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 70 โดยสถานประกอบการจะกองเก็บไว้ในที่โล่งทำให้เกิดการฟุ้งกระจายเกิดเป็นมลพิษทางอากาศต่อพื้นที่ข้างเคียง

การนำกากดินขาวมาประยุกต์ใช้ในส่วนผสม CLSM ทดแทนมวลรวมจึงเป็นการนำวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์และยังสามารถช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมได้อีกทาง อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมการพัฒนาวัสดุในงานวิศวกรรมที่สอดคล้องกับบริบทของประเทศ

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษา CLSM จากกากดินขาวโดยใช้ OPC และ OPC:FA เป็นสารเชื่อมประสาน แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานวัสดุนี้ในโครงการก่อสร้าง โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้เป็นประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. กากดินขาวมีการกระจายตัวของอนุภาคในช่วง 4.75-0.075mm มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ (GS) 2.50 โดยมีองค์ประกอบหลักทางเคมีคือ ซิลิกา (Si) และอลูมินา (Al) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคพบว่า มีรูปทรงหลายเหลี่ยมซึ่งเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคแบบแผ่นมีลักษณะคล้ายเกล็ดทับซ้อน

2. วัสดุ CLSM จากกากดินขาวในสถานะเหลวแม่ลักษณะทางกายภาพจะมีความชื้น หนืดคล้ายโคลน การใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ทำให้ความสามารถในการทำงานได้เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับวัสดุประเภทคอนกรีต

3. CLSM จากกากดินขาวสามารถพัฒนากำลังได้เพียงพอต่อความต้องการใช้งานตามข้อกำหนดของวัสดุควบคุมกำลังต่ำตามมาตรฐาน ACI 229R (ACI, 1999) โดยพบว่าการใช้ OPC 1%, OPC:FA 1% และ 3% ให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวต่ำกว่า 0.3Mpa เพื่อให้สามารถขุดออกได้ในอนาคตด้วยเครื่องมือเบา การใช้ OPC 3%, 5%, 7% และ OPC:FA 5%, 7%, 9% จะให้ค่าที่ต่ำกว่า 0.7Mpa ซึ่งเป็นช่วงของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่นิยมใช้งาน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เกิดจากความมุ่งมั่นที่จะนำกากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ภายใต้เทคโนโลยีพื้นฐาน โดยได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย โรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และโรงแยกแร่ดินขาวที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าลอยและกากดินขาวสำหรับการศึกษาตลอดโครงการ

7. เอกสารอ้างอิง

1. Javed, A., Lovencin, W. and Najafi, F.T., 2002, "Current Status of Accelerated Flowable Fill in the Pavement," *Proceeding CSCE 20th Annual Conference*,

Montreal, Quebec, Canada, pp. 1-9

2. American Concrete Institute, 1999, "ACI 229R-9 Controlled Low-Strength Material (Reapproved 2005)," ACI Committee 229, Marmington, USA.

3. Wu, D.Q., Broms, B.B. and Choa, V., 1993, "Soil Improvement with Fly Ash Columns," *Proceedings Southeast Asian Geotechnical 11th Conference*, Singapore, pp. 435-438

4. Cokca, E., 2001, "Use of Class C Fly Ash for the Stabilization of an Expansive Soil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(7), pp. 566-573.

5. Thongchai, A., 1997, "Fine Grain Soil Improvement with Fly Ash from Mae Moh Power Plant in Construction," *Proceeding of the 3th Nation Convention on Civil Engineering Conference*, Songkhla, Thailand. pp. 1-8. (In Thai)

6. Klammeng, A. and Thongchai, A., 2005, "Compressive Strength Behavior of Cement Fly Ash Stabilized Granitic Soil," *Proceeding of the 10th Nation Convention on Civil Engineering Conference*, Chonburi, Thailand. pp. 1-6. (In Thai)

7. Thongchai, A. and Boonsung, A., 2009, "Strength Properties of Soil – Cement Fly Ash for Deep Mixing Stabilization in Chiang Mai Subsoil," *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*, 2 (2), pp. 20-29. (In Thai)

8. Funston, J.J. Krell, W.C. and Zimmer, F.V., 1984, "Flowable Fly-Ash : New Cement Stabilization Backfill," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 54 (3), pp. 48-51.

9. Janardhanm, R., Burns, F. and Peindl, R.D., 1992, "Mix Design for Flow Fly-Ash Backfill Material," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4 (3), pp. 252-263.

10. Butalia, T.S., Wolfe, W.E. and Lee, J.W., 2001, "Evaluation of a Dry FGD Material as a Flowable Fill," *FUEL*, 80(6), pp. 845-850.

11. Trejo, D., Folliard, K.J. and DU, L., 2004, "Sustainable Development Using Controlled Low-Strength Material," *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, pp. 234-248.
12. Katz, A. and Kovler, K., 2004, "Utilization of Industrial By-Products for the Production of Controlled Low Strength Materials (CLSM)," *Waste Management*, 24 (5), pp. 501-512.
13. American Society for Testing and Materials, 2002, "ASTM D422 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016)," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08, Philadelphia, USA.
14. American Society for Testing and Materials, 2002, "ASTM D4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08, Philadelphia, USA.
15. American Society for Testing and Materials, 2002, "ASTM D854 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08, Philadelphia, USA.
16. American Society for Testing and Materials, 2002, "ASTM D2487 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08, Philadelphia, USA.
17. Braja, M.Das., 2002, *Principles of Geotechnical Engineering*, 5th ed., Pacific Grove, California, USA.
18. TIS. 15-2555, 2013, *Quality Standards for Industrial Products Portland Cement*, Thai Industrial Standard, pp. 1-12. (In Thai)
19. Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C., 2006, *Cement Pozzolan and Concrete*, 3th ed, Khonkaen University, Thailand. (In Thai)
20. Chindaprasirt, P., 2006, *Fly Ash in Concrete*, 3th ed, Khonkaen University, Thailand. (In Thai)
21. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50 mm] Cube Specimens)," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.01, Philadelphia, USA.
22. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C143 Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA.
23. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C1611 Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Philadelphia, USA.
24. EFNARC., 2002, *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, Surrey, UK, pp. 1-32.
25. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM D2166 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.08, Philadelphia, USA.
26. Boonsung, A., 2016, "Flowability of Controlled-Low Strength Material from Industrial Waste of Kaolin," *Proceeding of the 13th Kasetsart University Kampaeng Saen Conference*, Nakhonpathom, Thailand. pp. 372-383. (In Thai)
27. Sua-lam, G. and Makul, N., 2013, "Use of Ternary Blends Cementitious Material to Enhance Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete," *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (1), pp. 127-147. (In Thai)
28. Makarat, N. Jaturapitakkul, C. Namarak, C. and Sata, V., 2001, "Effects of Binder and CaCl₂ Contents on the Strength of Calcium Carbide Residue-Fly Ash Concrete," *Cement and Concrete Composites*, 33 (3), pp. 436-443.
29. American Concrete Institute, 2000, "ACI 232.2R-96 Use of Fly Ash in Concrete," *ACI Manual of Concrete Practice : Part 2*, Michigan, USA.

30. Chatveera, B. and Homsriprasert, W., 2011, "Behavior of Cement Plaste Blended Pozzolan Material in the Application of Microwave Energy," *KMUTT Research and Development Journal*, 34 (3), pp. 299-315. (In Thai)
31. Sata, V., Jaturapitukkul, C. and Kiattikomol, K., 2007, "Influence of Pozzolan from Various By-Product Material on Mechanical Properties of High-Strength Concrete," *Construction and Building Materials*, 21 (7), pp. 1589-1598.
32. Boonsung, A., 2013, "Unconfined Compressive Strength of Flowable fill Material from Industrial waste of Kaolin," *Proceeding of the 10th Kasetsart University Kampaeng Saen Conference*, Nakhonpathom, Thailand. pp. 1460-1468. (In Thai)
33. Lambe, T.W. Michells, A.S. and Moh, Z.C., 1959, Improvement of Soil-Cement with Alkali Metal Compounds, Highway Research Board Bulletin 241. Washington, USA.
34. Sukontasukkul, P., 2013, Concrete, Pathumthani, Thailand. (In Thai)
35. Kumpala, A., Katkan, W. and Horpibulsuk, S., 2007, "Unconfined Compressive Strength of Silty Clay Stabilized by Cement and Rice Husk Ash," *Proceeding of the 12th Nation Convention on Civil Engineering Conference*, Phitsanulok, Thailand. pp. 176-182. (In Thai)
36. Rachan, R., 2009, Strength Development and Microstructure Characteristics of Soft Bangkok Clay Admixed with Cement and Biomass Ash, Doctor of Philosophy Thesis, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Thammasat University, 207 p. (In Thai)
37. Rachan, R. and Vichan, S., 2013, "Unconfined Compressive Strength Development and Microstructure of Calcium Carbide Residue and Biomass Ash Admixed in Compacted Soft Bangkok Clay," *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (1), pp. 51-71. (In Thai)
38. Srijaroen, C., Rachan, R. and Horpibulsuk, S., 2014, "Strength Development in Soil Cement Column and Soil Fly Ash-Cement Column in Soft Bangkok Clay Deposit," *KMUTT Research and Development Journal*, 37 (2), pp. 151-164. (In Thai)
39. Chindaprasit, P., Jaturapitakul, C. and Sinsiri, T., 2005, "Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste," *Cement and Concrete Composites*, 27 (1), pp. 225-258.
40. Horpibulsuk, S., Rachan, R. and Raksachon, Y., 2009, "Role of Fly Ash on Strength and Microstructure Development in Blended Cement Stabilized Silty Clay," *Soil and Foundations*, 49 (1), pp. 85-98.
41. Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T.S., 2003, "Assessment of Strength Development in Cement-Admixed High Water Content Clay with Abrams's Law as a Basis," *Geotechnique*, 53 (4), pp. 439-444.
42. Horpibulsuk, S., Rachan, R. and Suddeepong, A., 2001, "Assessment of Strength Development in Blended Cement Admixed Bangkok Clay," *Construction and Building Materials*, 25 (4), pp. 1521-1531.
43. Horpibulsuk, S., Phetchuay, C. and Chinkulkijniwat, A., 2012, "Soil Stabilization by Calcium Carbide Residue and Fly Ash," *Journal of Material in Civil Engineering*, 24 (2), pp. 184-193.
44. Chuangching, N., 2005, Properties and Feasibility of Flowable Fly Ash as Back Fill Material, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 126 p. (In Thai)

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับการวางแผนการเก็บเกี่ยวผักเพื่อการบริโภค กรณีศึกษา เกษตรกรรายย่อย

ภาณุชิต สายเสมา¹ และ อภิชัย ฤตวิรุฬห์^{2*}

มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

* Corresponding Author: apichair@nu.ac.th

¹ นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 18 พฤศจิกายน 2562

แก้ไข : 18 พฤษภาคม 2563

ตอบรับ : 27 พฤษภาคม 2563

คำสำคัญ :

การวางแผนการเก็บเกี่ยว /

กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม /

ผัก

การวางแผนการเก็บเกี่ยวผักหลากหลายชนิดเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค เป็นการตัดสินใจวางแผนที่ยุ่ยากสำหรับเกษตรกรรายย่อย และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย ซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิดของผักที่ปลูก เช่น ระยะเวลาการเติบโต เวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยว และปริมาณการเก็บเกี่ยว เป็นต้น การวางแผนเก็บเกี่ยวผักโดยอาศัยประสบการณ์ของเกษตรกร ซึ่งขาดเครื่องมือช่วยในการวางแผนที่มีประสิทธิภาพ จึงทำให้สูญเสียโอกาสในการขาย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยตัดสินใจในการวางแผนการเก็บเกี่ยวผลผลิต โดยมีเป้าหมายให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมลดลง ผลการวิจัยพบว่า ค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ได้จากแบบจำลอง MILP ลดลง 43.43% เมื่อเปรียบเทียบกับดำเนินการของเกษตรกร

A Mixed-Integer Linear Programming Model for Vegetables Harvest Planning: A Case Study of a Small Farmer

Panuchit Saisema¹ and Apichai Ritvirool^{2*}

Naresuan University, Muang, Phitsanulok 65000

* Corresponding Author: apichair@nu.ac.th

¹ Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

² Associated Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: November 18, 2019

Revised: May 18, 2020

Accepted: May 27, 2020

Keywords:

Harvest Planning /
Mixed-Integer Linear
Programming / Vegetables

Harvest planning of various vegetables in response to consumer demand is a complex decision making process that may cause difficulties to farmers. This is due to the fact that several factors are related to vegetable plantations such as the growing period, starting and ending times for harvesting as well as harvested volume. A farmer usually plans the vegetable harvesting with his own experience without using any tool for effective planning, resulting in turn in the losses of sales opportunity. To alleviate such a problem, mixed-Integer linear programming (MILP) model has been developed to use as a decision supporting tool for harvest planning and to minimize the total cost. The results showed that the total cost from using the MILP model had reduced by 43.43% compared with that incurred by farmer's own operations.

1. บทนำ

ประเทศไทยมีพันธุ์พืชที่หลากหลาย มีพื้นที่อุดมสมบูรณ์ ซึ่งเอื้อต่อการเพาะปลูกพืช ผักเป็นพืชที่มนุษย์ต้องการบริโภคเพื่อการดำรงชีวิตและใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์เพื่อป้องกันและรักษาโรค ผักและผลิตภัณฑ์ของไทยมีมูลค่าการส่งออกไปจำหน่ายต่างประเทศประจำปี พ.ศ. 2561 อยู่อันดับที่ 9 ใน 10 อันดับแรกของสินค้าเกษตรและผลิตภัณฑ์ส่งออก มีมูลค่าการส่งออก 29,040 ล้านบาท ซึ่งมีมูลค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.86 เมื่อเทียบกับปี 2560 [1]

การผลิตผักเพื่อจำหน่ายมีความยุ่งยากซับซ้อน เพราะความหลากหลายของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เริ่มตั้งแต่ดินซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานในการผลิตที่ต้องบำรุงเพื่อให้พืชผักได้ธาตุอาหารครบ ศัตรูพืชที่ต้องป้องกันและกำจัด แรงงานที่ใช้ในการเพาะปลูกและเก็บเกี่ยว เกษตรกรต้องดำเนินการหลายขั้นตอน เช่น การคัดเลือกเมล็ดพันธุ์ การดูแลพื้นที่เพาะปลูก การใส่ปุ๋ย การเก็บเกี่ยว การเก็บรักษาผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว การบรรจุและส่งออกผลผลิต เป็นต้น ผลผลิตแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน ทั้งในเรื่องของการดูแล บำรุง และรักษาผลผลิตเพื่อให้ได้สินค้าที่มีคุณภาพ คงความสดและมีความปลอดภัยในการนำไปบริโภค มีนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับใช้เป็นเครื่องมือช่วยตัดสินใจในการวางแผนการผลิตผักและการเก็บเกี่ยวผักให้คงคุณภาพดีหลังการเก็บเกี่ยว เช่น Wishon และคณะ [2] ได้สร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) เพื่อช่วยในการวางแผนจ้างแรงงานต่างดาวในช่วงฤดูการผลิตผักของเกษตรกรซึ่งมีพื้นที่เพาะปลูกในเมืองยูมา มลรัฐออริโซนา ประเทศสหรัฐอเมริกา เนื่องจากต้องจ้างแรงงานภายในประเทศด้วยค่าจ้างสูง และแรงงานมีจำนวนไม่เพียงพอต่อความต้องการของเกษตรกรในช่วงฤดูการผลิตผัก รวมถึงช่วยในการวางแผนเพาะปลูกและเก็บเกี่ยวผักแบบจำลองถูกทดสอบโดยคัดเลือกเกษตรกร 1 รายใหญ่ ซึ่งมีพื้นที่สำหรับผลิตผัก 500 เอเคอร์ เลือกรับ 4 ชนิดคือ ผักกาดโรเมน ผักกาดแก้ว กะหล่ำดอก และบรอกโคลี ผลจากการดำเนินการตามแผนที่ได้จากแบบจำลอง พบว่าเกษตรกรมีมูลค่าผลกำไรเพิ่มขึ้นจากเดิม \$53,000 You และ Hsieh [3] ได้สร้างแบบจำลอง MILP สำหรับใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการวางแผนการผลิตผักเพื่อให้ได้ทราบถึงชนิดและปริมาณผักที่จะปลูก

เวลาและแปลงที่จะเพาะปลูกในแต่ละรอบการผลิตผัก รวมถึงช่วงเวลากการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมตามข้อกำหนดของลูกค้า โดยมีเป้าหมายให้ได้รายรับสูงสุด ทำการทดสอบแบบจำลองโดยเลือกฟาร์มขนาดใหญ่กรณีศึกษาในไต้หวัน และผักจำนวน 27 ชนิด นอกจากนี้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ยังถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการวางแผนการจัดการโลจิสติกส์ในระดับอุตสาหกรรมผักและผลไม้ เช่น Etemadnia และคณะ [4] ได้สร้างแบบจำลอง MILP ช่วยในการหาตำแหน่งของสถานที่ตั้งศูนย์กระจายผลผลิตผักและผลไม้ซึ่งส่งตรงจากแหล่งผลิตเพื่อกระจายภายในโซ่อุปทานอาหารของประเทศสหรัฐอเมริกา ไปสู่ผู้บริโภคได้อย่างรวดเร็ว Lamsal และคณะ [5] ได้สร้างแบบจำลอง MIP ช่วยในการจัดการโลจิสติกส์เพื่อวางแผนเก็บเกี่ยวพืชผลทางการเกษตร ผลที่ได้จากแบบจำลองทำให้ลดจำนวนรถขนส่งที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้จากฟาร์มไปยังโรงงานแปรรูปและคลังจัดเก็บ Limpianchob และ Chirnaksorn [6] ได้สร้างแบบจำลอง MILP ช่วยในการวางแผนรอบการปลูก การใส่ปุ๋ยจนถึงการเก็บเกี่ยว เพื่อให้เกษตรกรสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการวางแผนและการตัดสินใจเพื่อเป็นแนวทางการลดต้นทุนโลจิสติกส์การเพาะปลูกสับปะรดพันธุ์ควีน จะเห็นได้ว่าแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือเพื่อช่วยลดความยุ่งยากในการตัดสินใจวางแผนดำเนินการผลิตผัก

2. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

2.1 ปัญหาการเก็บเกี่ยวผัก

โรงพยาบาลระดับตติยภูมิ มีจำนวนเตียงมากกว่า 500 เตียง หน่วยโภชนาการของโรงพยาบาลดังกล่าวมีหน้าที่ประกอบอาหารสำหรับผู้ป่วยที่นอนพักรักษาตัวในโรงพยาบาลในแต่ละปีหน่วยโภชนาการต้องทำการจัดหาผักสำหรับประกอบอาหารให้ผู้ป่วยมากกว่า 60 ชนิด เพื่อให้ได้สารอาหารอย่างครบถ้วนในแต่ละมื้อและเหมาะสมกับโรคของผู้ป่วย ส่วนผักของเกษตรกรรายย่อยกรณีศึกษาได้ทำการผลิตผักหลากหลายชนิดเพื่อสนองความต้องการของหน่วยโภชนาการและผู้บริโภคหลากหลายกลุ่มซึ่งมีความต้องการแตกต่างกันไม่ว่าจะเป็นชนิดหรือปริมาณของผัก จากการเก็บข้อมูลพบว่า หน่วยโภชนาการทำการสั่งซื้อผักทุก 2 สัปดาห์ต่อครั้ง เกษตรกรจะได้รับคำสั่งซื้อผักล่วงหน้า 2 สัปดาห์ หลังจากที่ได้รับคำสั่งซื้อ เกษตรกรจะ

ทำการวางแผนการเก็บเกี่ยวผลผลิตโดยอาศัยประสบการณ์ แต่เนื่องจากผักแต่ละชนิดมีช่วงระยะเวลาที่สามารถเก็บเกี่ยวได้แตกต่างกัน เช่น ค่ะน้ำมีดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvesting index) หรือระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเก็บเกี่ยว 45-55 วัน หลังปลูก ผักกาดขาวมีระยะเวลา 40-45 วัน หลังปลูก เป็นต้น [7] ในการเก็บเกี่ยวต้องจ้างแรงงานซึ่งหาได้ยากและบางครั้งไม่ได้วางแผนการเก็บเกี่ยวล่วงหน้า ทำให้ขาดแคลนแรงงาน ในช่วงระยะเวลาที่ผลิตผลพร้อมเก็บเกี่ยว ส่งผลให้ระยะเวลาที่ผลิตผลคงค้างในแปลงล้นเลยระยะที่เหมาะสมกับการบริโภค หรือที่เรียกว่า ระยะความสมบูรณ์ทางพืชสวน (Horticultural maturity) [7] จึงทำให้ผลิตผลสิ้นอายุและหมดสภาพ ซึ่งนำไปสู่การถอนทิ้ง หรือนำไปทำปุ๋ย ดังนั้นผลิตผลที่เก็บเกี่ยวได้จึงมีปริมาณไม่เพียงพอสำหรับการตอบสนองคำสั่งซื้อ เกษตรกรจำเป็นต้องสั่งซื้อผักจากกลุ่มเครือข่ายเกษตรกรหรือผู้จำหน่าย ผักรายย่อยในราคาที่สูงขึ้นเนื่องจากไม่ได้มีการตกลงซื้อขายกันไว้ล่วงหน้า

เพื่อแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้สร้างเครื่องมือช่วยในการวางแผนการเก็บเกี่ยว เพื่อให้เกษตรกรมีผักในปริมาณที่สามารถตอบสนองความต้องการของหน่วยโภชนาการได้อย่างครบถ้วน สดใหม่ และมีคุณภาพ และช่วยในการวางแผนการเก็บรักษาผลิตผลในตู้เย็นเพื่อรอจำหน่าย รวมถึงช่วยวางแผนการซื้อผักเพิ่มในกรณีที่ผลิตผลจากการปลูกมีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการ โดยการสร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (MILP)

2.2 ข้อสมมติในการสร้างแบบจำลอง (Assumptions)

1. ผักทุกชนิดเริ่มเก็บเกี่ยวได้พร้อมกันในช่วงเวลา $t = 1$
2. กำลังการผลิตผักทุกชนิดมีค่าคงที่และทราบค่าล่วงหน้า
3. ผลิตผลมีน้ำหนักคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาการเก็บเกี่ยวและจัดเก็บ
4. กลุ่มเครือข่ายเกษตรกรมีผลิตผลพร้อมจำหน่ายตามความต้องการของเกษตรกร
5. ตู้เย็นของเกษตรกรมีความจุในการจัดเก็บผลิตผลได้อย่างไม่จำกัด

6. เมื่อถึงวันสิ้นอายุของผลิตผลชนิดใดๆ ที่จัดเก็บในตู้เย็น ผลิตผลชนิดนั้นต้องนำออกจากตู้เย็นทั้งหมดเพื่อจำหน่ายในราคาถูกหรือนำไปทำปุ๋ย

2.3 เซต (Sets)

- I กลุ่มของชนิดผัก, $I = \{1, 2, \dots, i\}$
- T กลุ่มของวันที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวและจัดเก็บผลิตผล, $T = \{1, 2, \dots, t\}$
- X_i กลุ่มของวันที่ผลิตผลสามารถเก็บเกี่ยวได้สำหรับผักชนิดที่ $i \in I$, $1 \leq x_i = t \leq X_i^{\max}$
- Y_i กลุ่มของวันที่ผลิตผลสามารถคงค้างในแปลงปลูกได้สำหรับผักชนิดที่ $i \in I$, $0 \leq y_i = t \leq Y_i^{\max}$
- Z_i กลุ่มของวันที่ผลิตผลสามารถจัดเก็บในตู้เย็นได้ โดยที่ผลิตผลยังคงความสดสำหรับผักชนิดที่ $i \in I$, $1 \leq z_i = t \leq Z_i^{\max}$

2.4 พารามิเตอร์ (Parameters)

- C_1 ค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยว
- C_2 ค่าใช้จ่ายในการดูแลผลิตผลที่พร้อมจำหน่าย แต่ยังคงค้างในแปลงปลูก
- C_3 ค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บผลิตผลในตู้เย็น
- C_4 ค่าใช้จ่ายในการจัดหาผักจากกลุ่มเครือข่ายเกษตรกร
- D'_i ปริมาณความต้องการผลิตผลของผักชนิดที่ i ในวันที่ t
- h_i ปริมาณผลิตผลขั้นต่ำในการเก็บเกี่ยวผักชนิดที่ i
- M จำนวนเต็มที่มากพอที่ทำให้สมการที่ 6 และ 7 เป็นไปตามเงื่อนไขบังคับต่างๆ ในการสร้างแบบจำลอง
- P_i ปริมาณผลิตผลของผักชนิดที่ i ที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ในช่วงระยะเวลาเก็บเกี่ยว

2.5 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables)

- B'_i มีค่าเป็น 1 เมื่อตัดสินใจทำการเก็บเกี่ยวผลิตผล ไม่เช่นนั้นจะมีค่าเป็น 0

$H_i^{x_i}$ ปริมาณผลิตผลของผักชนิดที่ i ที่ถูกเก็บเกี่ยวในวันที่ x_i

$L_i^{y_i}$ ปริมาณผลิตผลของผักชนิดที่ i ที่สามารถคงค้างในแปลงปลูกในวันที่ y_i

$R_i^{z_i}$ ปริมาณผลิตผลของผักชนิดที่ i ที่นำไปจัดเก็บในตู้เย็นในวันที่ z_i

SC_i^t ปริมาณผักชนิดที่ i ที่สั่งซื้อจากกลุ่มเครือข่ายเกษตรกรในวันที่ t

2.6 ฟังก์ชันจุดประสงค์

(Objective function)

เป้าหมายสำหรับแผนการเก็บเกี่ยวผลิตผลคือ มีค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำที่สุด และสามารถสนองความต้องการของลูกค้าได้ โดยแสดงได้ดังฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ 1, F, ประกอบด้วยค่าใช้จ่ายต่างๆ คือ (1) ค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยว (Harvesting cost) ซึ่งเกิดจากค่าจ้างแรงงานในการเก็บเกี่ยวผลิตผลในแต่ละวัน (2) ค่าใช้จ่ายในการดูแลผลิตผลที่คงค้างในแปลงปลูก (Maintaining cost) ซึ่งต้องทำการดูแลรักษาผลิตผลให้คงคุณภาพไว้ เช่น ค่าน้ำ ค่าจ้างแรงงานในการดูแลรักษา ค่าปุ๋ย เป็นต้น (3) ค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บผลิตผลในตู้เย็น (Refrigerated storage cost) และ (4) ค่าใช้จ่ายในการจัดหาผักจากกลุ่มเครือข่ายเกษตรกร (Procuring cost) ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ผลิตผลของเกษตรกรมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ จึงจำเป็นต้องจัดหาผักเพิ่มจากกลุ่มเครือข่ายเกษตรกร

$$\begin{aligned} \text{Min F} = & \underbrace{C1 \sum_{i \in I} \sum_{x_i \in X_i} H_i^{x_i}}_{\text{Harvesting cost}} \\ & + \underbrace{C2 \sum_{i \in I} \sum_{y_i \in Y_i} L_i^{y_i}}_{\text{Maintaining cost}} \\ & + \underbrace{C3 \sum_{i \in I} \sum_{z_i \in Z_i} R_i^{z_i}}_{\text{Refrigerated storage cost}} \\ & + \underbrace{C4 \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} SC_i^t}_{\text{Procuring cost}} \end{aligned} \quad (1)$$

2.7 เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

2.7.1 การเก็บเกี่ยวและจัดหาผลิตผล

1) การเก็บเกี่ยวผลิตผล

สมการที่ 2 และ 3 แสดงถึงผลิตผลที่ถูกเก็บเกี่ยวเพื่อนำมาตอบสนองความต้องการในแต่ละวันและยังมีผลิตผลบางส่วนที่เหลือคงค้างในแปลงปลูก สมการที่ 4 แสดงถึงผลิตผลต้องถูกเก็บเกี่ยวทั้งหมดภายในระยะเวลาที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ตามอายุของผักแต่ละชนิด

$$L_i^{y_i} = L_i^{y_i-1} - H_i^{x_i}, \quad \forall i \in I, x_i \in X_i, y_i \in Y_i \quad (2)$$

$$L_i^{y_i} = P_i, \quad \forall i \in I, y_i = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{x_i \in X_i} H_i^{x_i} = P_i, \quad \forall i \in I \quad (4)$$

2) การจัดหาผลิตผล

ผลิตผลที่ได้จากการเก็บเกี่ยวและผักที่ได้ทำการสั่งซื้อจากกลุ่มเครือข่ายเกษตรกร สามารถสนองความต้องการของหน่วยโภชนาการได้อย่างเพียงพอ ดังสมการที่ 5

$$\sum_{x_i \in X_i} H_i^{x_i} + \sum_{t \in T} SC_i^t \geq \sum_{t \in T} D_i^t, \quad \forall i \in I \quad (5)$$

3) ปริมาณขั้นต่ำของการเก็บเกี่ยว

เนื่องจากข้อจำกัดของแรงงานในการเก็บเกี่ยวผลิตผลแต่ละครั้ง เกษตรกรจึงกำหนดปริมาณขั้นต่ำในการเก็บเกี่ยวผลิตผลแต่ละชนิด และไม่ทำการเก็บเกี่ยว ถ้าความต้องการผลิตผลมีปริมาณน้อยกว่า ดังสมการที่ 6 และ 7

$$H_i^{x_i} \leq MB_i^t, \quad \forall i \in I, t \in T, x_i \in X_i \quad (6)$$

$$h_i - H_i^{x_i} \leq M(1 - B_i^t), \quad \forall i \in I, t \in T, x_i \in X_i \quad (7)$$

2.7.2 การจัดเก็บผลิตผล

ผลิตผลที่ถูกจัดเก็บในตู้เย็นประกอบด้วย (1) ผลิตผลที่เก็บเกี่ยวและซื้อจากกลุ่มเครือข่ายเกษตรกร เพื่อนำมาสนองความต้องการของหน่วยโภชนาการ (2) ผลิตผลที่ต้องเก็บเกี่ยวตามจำนวนขั้นต่ำซึ่งกำหนดโดยเกษตรกร และ (3)

ผลิตผลที่คงค้างในแปลงปลูกซึ่งต้องเก็บเกี่ยวให้หมดเนื่องจากครบกำหนดอายุ การจัดเก็บผลิตผลแต่ละชนิดในตู้เย็นมีระยะเวลาที่แตกต่างกัน โดยผลิตผลที่เข้าตู้เย็นก่อน จะต้องถูกนำออกไปสนองความต้องการก่อนตามลำดับอายุของการจัดเก็บ ดังแสดงในสมการที่ 8

$$R_i^z = R_i^{z-1} + H_i^{x_i} - D_i^z + SC_i^z, \forall i \in I, t \in T, x_i \in X_i, z_i \in Z_i \quad (8)$$

2.7.3 เงื่อนไขตัวแปรตัดสินใจ

ตัวแปรตัดสินใจทุกตัวมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า ศูนย์ และตัวแปรเป็นตัวแปรทวิภาคดังนี้

$$H_i^{x_i} \geq 0, \forall i \in I, x_i \in X_i \quad (9)$$

$$L_i^{y_i} \geq 0, \forall i \in I, y_i \in Y_i \quad (10)$$

$$R_i^z \geq 0, \forall i \in I, z_i \in Z_i \quad (11)$$

$$SC_i^z \geq 0, B_i^z \in \{0,1\}, \forall i \in I, t \in T \quad (12)$$

3. ผลการวิจัย

แบบจำลอง MILP ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ถูกนำมาทดสอบโดยใช้ข้อมูลนำเข้าที่รวบรวมได้จากสวนผักกรณีศึกษาซึ่งได้รับคำสั่งซื้อผลิตผลจากหน่วยโภชนาการของโรงพยาบาล โดยสั่งซื้อผักจำนวน 13 รายการ ดังแสดงในตารางที่ 1 ขนาดของปัญหาที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2 แบบจำลอง MILP ถูกถ่ายทอดลงในแผ่นงานบนซอฟต์แวร์ Microsoft Excel และหาค่าเหมาะที่สุดด้วย OpenSolver 2.7.1 [8] ซึ่งเป็น Add-ins ในซอฟต์แวร์ Excel

ผลเฉลยเหมาะที่สุดสำหรับแผนการเก็บเกี่ยวผลิตผลของเกษตรกร เพื่อนำมาตอบสนองความต้องการของหน่วยโภชนาการที่สั่งซื้อผักภายในระยะเวลา 2 สัปดาห์ต่อการอบการสั่งซื้อ ดังแสดงในตารางที่ 3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยเลือกผักบุงเงิน (ผักชนิดที่ 2 ในตารางที่ 3) เริ่มต้นของการวางแผน เกษตรกรมีผลิตผลปริมาณ 1,000 กิโลกรัมในแปลงปลูกที่คาดว่าจะเก็บเกี่ยวได้โดยวันแรก (t=1) ทำการเก็บเกี่ยว 300 กิโลกรัม เพื่อสนองความต้องการจำนวน 100 กิโลกรัม ผลิตผลที่เหลือนำไปเก็บในตู้เย็นจำนวน 200 กิโลกรัม เพื่อเก็บไว้ตอบสนองความต้องการในวันที่ 2 และ 3 ด้วยจำนวนเท่ากันคือ 100 กิโลกรัม รวมเป็น 200 กิโลกรัม จำนวนขั้นต่ำในการเก็บเกี่ยวผักบุงเงิน คือ 200 กิโลกรัมต่อวัน

(ซึ่งผักแต่ละชนิดมีจำนวนขั้นต่ำในการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน เช่น ถั่วฝักยาว และมะระ คือ 50 และ 150 กิโลกรัมต่อวัน ตามลำดับ) ดังนั้นในวันที่ 5 (t=5) ต้องเก็บเกี่ยว 200 กิโลกรัม เพื่อสนองความต้องการแค่ 50 กิโลกรัม ส่วนที่เหลือนำไปจัดเก็บในตู้เย็น ในวันที่ 7 ต้องเก็บเกี่ยวให้หมดแปลงจำนวน 500 กิโลกรัม เพราะสิ้นสุดระยะเวลาคงค้างในแปลงปลูกที่เหมาะสมกับการบริโภค จนกระทั่งในวันที่ 9 เหลือผลิตผลจำนวน 350 กิโลกรัม ซึ่งต้องนำออกจากตู้เย็นทั้งหมดเพื่อจำหน่ายในราคาถูก ในวันที่ 10 12 และ 13 ต้องทำการสั่งซื้อผักบุงเงินจากกลุ่มเครือข่ายเกษตรกร 100 กิโลกรัมต่อวัน ตามความต้องการของลูกค้า

ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของเกษตรกร ภายใน 1 ปี ก่อนและหลังจากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MILP ในการวางแผนการเก็บเกี่ยว ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าแผนที่ได้จากแบบจำลองโดยเกษตรกรทำการเก็บเกี่ยวผลิตผลในระยะเวลาที่เหมาะสมกับการบริโภค แล้วนำมาเก็บรักษาไว้ในตู้เย็น ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บผลิตผลในตู้เย็น ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ผันแปรตามปริมาณผลิตผลของผักที่จัดเก็บในตู้เย็น (R_i^z) ผลลัพธ์จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ พบว่า ผลผลิตของผักใน 14 วัน (2 สัปดาห์) ที่ถูกจัดเก็บในตู้เย็นมีจำนวน 9,075 กิโลกรัม ค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บผลิตผลคือ 5 บาทต่อกิโลกรัม ผลลัพธ์เท่ากับ $9,075 \times 5 = 45,375$ บาทต่อ 2 สัปดาห์ หรือ 1,134,375 บาทต่อปี ($45,375$ บาทต่อ 2 สัปดาห์ $\times 50$ สัปดาห์) โดยที่ผลิตผลยังสามารถจำหน่ายได้ตามราคาขายที่กำหนดไว้ ไม่ได้สูญเสียโอกาสในการขาย แต่ถ้าเกษตรกรไม่ได้คำนึงถึงการเก็บรักษาผลิตผลในตู้เย็น ปล่อยให้ผลิตผลคงค้างในแปลงปลูกจนล่วงเลยระยะครบกำหนดการเก็บเกี่ยว ทำให้ต้องนำไปจำหน่ายในราคาที่ต่ำกว่าราคาขาย ผลให้เกิดค่าสูญเสียโอกาสในการขายถึง 1,890,625 บาทต่อปี

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทั้งสองแล้วพบว่า หลังจากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MILP แล้วจะทำให้ค่าใช้จ่ายลดลง 756,250 บาท หรือ ลดลงร้อยละ 40 นอกจากนั้นยังพบว่า ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ลดลงด้วยเช่นกันอันประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยว ค่าใช้จ่ายในการดูแลผลิตผลที่คงค้างในแปลงปลูก และค่าใช้จ่ายในการจัดหาผักจากกลุ่มเครือข่ายเกษตรกรลดลง ร้อยละ 18.29 4.06 และ 66.32 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ปริมาณผลิตผลและความต้องการผักในช่วงเวลา 1 รอบการสั่งซื้อ (กิโลกรัม)

ลำดับ	ชนิดผัก	ปริมาณผลิตผล (P_i)	ความต้องการผัก (D_i')
1	กระเจี๊ยบเขียว	100	140
2	ถั่วแขก	100	90
3	ถั่วฝักยาว	500	500
4	ถั่วลันเตา	200	240
5	ผักกาดขาว	1,000	1,300
6	ผักบุ้งจีน	1,000	950
7	มะระ	500	700
8	คะน้า	1,200	1,320
9	แตงกวา	1,000	1,240
10	ปวยเล้ง	300	405
11	ผักกาดเขียววางตุ้ง	1,100	1,140
12	ผักกาดหอม	900	900
13	ผักบุ้งไทย	1,500	1,400

ตารางที่ 2 ขนาดของปัญหาที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง MILP

ปัญหา	จำนวน
ชนิดผัก (I)	13
ตัวแปรตัดสินใจ	657
- ตัวแปรที่มีค่าไม่เป็นจำนวนเต็ม (Non-integer value)	555
- ตัวแปรทวิภาค	102

ตารางที่ 3 ผลเฉลยเหมาะที่สุดของแผนการเก็บเกี่ยวผลิตผล (กิโลกรัม)

ชนิดผัก	ตัวแปร	วันที่ t													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ถั่วฝักยาว $P_3 = 500$	D_3^t	40	-	50	50	50	40	60	60	-	60	40	-	50	-
	$H_3^{x_3}$	50	-	50	50	350									
	$L_3^{y_3}$	450	450	400	350										
	$R_3^{z_3}$	10	10	10	10	310	270	210	150	150	90	50			
	SC_3^t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-
ผักบุ้งจีน $P_6 = 1,000$	D_6^t	100	100	100	-	50	100	100	-	100	100	-	100	100	-
	$H_6^{x_6}$	300	-	-	-	200	-	500							
	$L_6^{y_6}$	700	700	700	700	500	500								
	$R_6^{z_6}$	200	100	-	-	150	50	450	450	350					
	SC_6^t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	100	100	-
มะระ $P_7 = 500$	D_7^t	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100
	$H_7^{x_7}$	-	150	-	150	-	-	200							
	$L_7^{y_7}$	500	350	350	200	200	200								
	$R_7^{z_7}$	-	50	50	100	100	-	200	100	100	-	-	-	-	
	SC_7^t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	100

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของแผนการเก็บเกี่ยวผลิตผล ก่อนและหลังการใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

ค่าใช้จ่ายต่อปี	ก่อนใช้ (บาท)	หลังใช้ (บาท)	ผลต่าง	ร้อยละ
ค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยว	205,000	167,500	37,500	18.29
ค่าใช้จ่ายในการดูแลผลิตผลที่คงค้างในแปลงปลูก	1,204,750	1,155,875	48,875	4.06
ค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บผลิตผลในตู้เย็น	-	1,134,375	756,250	40.0
ค่าสูญเสียโอกาสเนื่องจากผลิตผลคงอยู่ในแปลงปลูกเกินกำหนดระยะที่เหมาะสมในการบริโภค	1,890,625	-		
ค่าใช้จ่ายในการจัดหาผักจากกลุ่มเครือข่ายเกษตรกร	2,478,750	811,750	1,667,000	67.25
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด	5,779,125	3,269,500	2,509,625	43.43

4. สรุปผลการวิจัย

แผนการเก็บเกี่ยวผลิตผลที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ จะช่วยให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมลดลงร้อยละ 43.43 เกษตรกร รายย่อยทำการตอบสนองความต้องการของลูกค้าโดยนำผลิตผล ที่จัดเก็บไว้ในตู้เย็นมาจำหน่ายก่อน จากนั้นเก็บเกี่ยวผลิตผล ในแปลงปลูกตามปริมาณการเก็บเกี่ยวขั้นต่ำที่กำหนดไว้ ซึ่งหาก ผลิตผลยังคงเหลืออยู่ในแปลงปลูกจนถึงวันสุดท้ายของช่วงระยะ เวลาที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ตามกำหนดอายุ ผลิตผลดังกล่าว จะถูกเก็บเกี่ยวจนหมดแปลงและจัดเก็บเข้าตู้เย็น เพื่อสนอง ความต้องการในวันถัดไป ผลิตผลสามารถจัดเก็บได้ในตู้เย็น ตามช่วงระยะเวลาของอายุการจัดเก็บ หากเกินกำหนดช่วงระยะ เวลาดังกล่าว ผลิตผลนั้นจะต้องนำออกจากตู้เย็น หากผลิตผล ที่รวบรวมได้มีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการ เกษตรกร สามารถจัดหาเพิ่มจากกลุ่มเครือข่ายเกษตรกร

5. ข้อเสนอแนะ

การจัดจำหน่ายผลิตผลในราคาถูกให้แก่ลูกค้า ก่อนที่ผลิตผล จะเสียคุณภาพนั้น เป็นการลดค่าเสียโอกาสในการจำหน่าย ผลิตผล ซึ่งฟังก์ชันจุดประสงค์ของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ในงานวิจัยนี้ ไม่ได้้นำการจัดจำหน่ายผลิตผลในราคาถูก มา พิจารณาร่วมด้วย ซึ่งอาจจะมีผลต่อค่าของตัวแปรตัดสินใจ ต่างๆ ได้ ดังนั้นแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่จะพัฒนาต่อไป

ในอนาคตจะพิจารณาในประเด็นการจัดจำหน่ายผลิตผลใน ราคาถูก รวมถึงการวางแผนการจัดหาเมล็ดพันธุ์ และการปลูก ผักที่หลากหลายชนิด ในพื้นที่แปลงเพาะปลูกที่จำกัด ความ สามารถในการผลิตที่ต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ร่วมด้วย เช่น ฤดูกาล ภัยธรรมชาติ เป็นต้น

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ เมื่อนำ ไปประยุกต์ใช้จริง อาจมีค่าใช้จ่าย หรือผลกระทบอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น การลงทุนการจัดเก็บผลิตผล จะต้องมีการจัดซื้อจัดหาตู้เย็น เพื่อจัดเก็บผลิตผล การจัดหาจัดจ้างแหล่งผลิตทดแทน จะต้อง มีค่าดำเนินการมาเกี่ยวข้องด้วย เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักงานปลัดกระทรวง การอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (R2562A140) และสำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรมแห่งชาติ ภายใต้โครงการส่งเสริมให้บุคลากรวิจัย ในสถาบันอุดมศึกษาไปปฏิบัติงานเพื่อแก้ไขปัญหาและเพิ่ม ขีดความสามารถในการผลิตให้กับภาคอุตสาหกรรม (Talent Mobility) ผู้วิจัยขอขอบคุณ เกษตรกรที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูล สำหรับการท้าววิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

1. Office of Agricultural Economics, 2019, Thailand Foreign Agricultural Trade Statistics 2018 [Online], Available: <http://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/ebook/2562/tradestat61.pdf>. [21 October 2019] (In Thai)
2. Wishon, C., Villalobos, J.R., Mason, N., Flores, H. and Lujan, G., 2015, "Use of MIP for Planning Temporary Immigrant Farm Labor Force," *International Journal of Production Economics*, 170, pp. 25-33.
3. You, P.S. and Hsieh, Y.C., 2017, "A Computational Approach for Crop Production of Organic Vegetables," *Computers and Electronics in Agriculture*, 134, pp. 33-42.
4. Etemadnia, H., Goetza, S.J., Canning, P. and Tavallali, M.S., 2015, "Optimal Wholesale Facilities Location within the Fruit and Vegetables Supply Chain with Bimodal Transportation Options: an LP-MIP Heuristic Approach," *European Journal of Operational Research*, 244, pp. 648-661.
5. Lamsal, K., Jones, P.C. and Thomas, B. W., 2016, "Harvest Logistics in Agricultural Systems with Multiple, Independent Producers and No On-Farm Storage," *Computers and Industrial Engineering*, 91, pp. 129-138.
6. Limpianchob, C. and Chirnakorn, S., 2013, "Cultivation Logistics Cost Reduction for Queen Pineapple Using Mixed-Integer Linear Programming," *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (3), pp. 287-298.
7. Jingtair, S., 2006, Postharvest Physiology and Technology of Vegetable and Fruit, Kasetsart University Press, Bangkok. (In Thai).
8. Mason, A.J. and Dunning, I., 2010, "Opensolver: Open Source Optimisation For Excel," *Proceedings of the 45th Annual Conference Of The ORSNZ*, Auckland, New Zealand, pp. 181-190.

พฤติกรรมหลังการโก่งเดาะของ Elastica ที่มีความยาวส่วนโค้งแปรเปลี่ยนได้โดยมีสปริงต้านทานการหมุนแบบอีลาสติก-พลาสติกภายในช่วงความยาวของ Elastica

ณัฐพัชร จันทรกุลมณี¹ บุญชัย ผึ้งไผ่งาม^{2*} และ กำธรเกียรติ มุสิเกต²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

* Corresponding Author: boonchai_p@rmutt.ac.th

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 23 มกราคม 2563

แก้ไข : 1 มิถุนายน 2563

ตอบรับ : 4 มิถุนายน 2563

คำสำคัญ :

Elastica / หลังการโก่งเดาะ /

Shooting Method /

อีลาสติก-พลาสติก /

สปริงต้านทานการหมุน

บทความนี้รายงานการศึกษาพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะของ Elastica ที่มีความยาวส่วนโค้งแปรเปลี่ยนได้ที่เชื่อมต่อกันด้วยสปริงต้านทานการหมุน โดยสปริงต้านทานการหมุนมีทั้งหมดสามแบบ ได้แก่ ยึดหยุ่นเชิงเส้น ยึดหยุ่นเชิงเส้นคู่ และอีลาสติก-พลาสติก ปลายด้านหนึ่งของ Elastica ยึดติดกับจุดรองรับแบบหมุนได้อย่างอิสระปลายอีกด้านวางอยู่บนจุดรองรับแบบรางเลื่อนในแนวราบ สปริงต้านทานการหมุนวางห่างจากจุดรองรับแบบหมุนได้อย่างอิสระตามระยะที่กำหนด แรงอัดกระทำที่ปลายด้านจุดรองรับแบบรางเลื่อนในแนวราบเพื่อดันความยาวส่วนโค้งของ Elastica เข้าไปในระบบและสังเกตพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะได้ชุดของสมการอนุพันธ์ครอบคลุมปัญหาสามารถหาได้จากสมการสมดุล ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง และความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิต เนื่องจากปัญหานี้เป็นปัญหาแบบขอบเขตสองจุดจึงใช้วิธี Shooting Method ในการศึกษา การคำนวณผลเฉลยใช้การอินทิเกรตเชิงตัวเลขแบบ Runge-Kutta จนกระทั่งสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต จากผลการคำนวณ พบว่า Elastica อยู่ในสภาวะไร้เสถียรภาพหลังการโก่งเดาะ และเมื่อสปริงต้านทานการหมุนเกิดการคราก แรงอัดอาจลดลงอย่างทันที ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสติฟเนส $r = \bar{k}_2 / \bar{k}_1$ และ Elastica สามารถเปลี่ยนกลับมาอยู่ในสภาวะที่มีเสถียรภาพได้ในช่วงใดช่วงหนึ่งของความยาวส่วนโค้งทั้งหมด นอกจากนั้น ยังพบว่าสามารถเกิดการหมุนกลับด้านของสปริงต้านทานการหมุนได้ซึ่งเป็นอีกประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจ

Postbuckling Behavior of Variable-Arc-Length Elastica Linked with Elastic-Plastic Rotational Spring Joint within the Span-Length of the Elastica

Nattaphat Chantarakunmanee¹, Boonchai Phungpaingam^{2*} and Kamtornkiat Musiket²

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani, 12110

* Corresponding Author: boonchai_p@rmutt.ac.th

¹ Graduate Student, Department of Civil Engineering.

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering.

Article Info

Article History:

Received: January 23, 2020

Revised: June 1, 2020

Accepted: June 4, 2020

Keywords:

Elastica / Postbuckling /

Shooting Method /

Elastic-Plastic /

Rotational Spring Joint

Abstract

This paper reports the investigation on postbuckling behavior of a variable-arc-length elastica connected with a rotational spring joint where three types of the spring joint (i.e., linear elastic, bilinear elastic, and elastic-plastic) were considered. One end of the elastica was attached on the hinged joint while the remote end was placed on the horizontal slider support. The rotational spring joint was located at a given distance apart from the hinged joint. Compression force was exerted at the horizontal slider support to push the arc-length into the system; the postbuckling behavior was then observed. A set of governing differential equations were obtained from the equilibrium equations, moment-curvature relation and geometric relations. Since this problem is a two-point boundary value problem, the shooting method was employed in this study. Numerical integration (i.e., Runge-Kutta method) was performed so that the boundary conditions were satisfied. It was found that the elastica became unstable after buckling and, after yielding of the spring joint, the compression might drop suddenly, depending on the ratio of the stiffness, $r = \bar{k}_2 / \bar{k}_1$. The elastica could turn into stable equilibrium for an interval of total arc-length. Moreover, reverse rotation of the spring joint could occur, representing another interesting aspect of the problem.

1. บทนำ

โครงสร้างหรือชิ้นส่วนอาทิ เช่น สายเคเบิล ท่อลำเลียงของไหล เป็นต้น สามารถเกิดการแอ่นตัวได้มากในขณะที่ความเครียดมีค่าน้อย ทั้งนี้ เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวมีความชะลูด (Slenderness) สูงมาก ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้ทฤษฎีคานแบบ Euler-Bernoulli (ใช้สำหรับกรณีการโก่งตัวมีค่าน้อย) ในการแก้ไขปัญหาได้ ปัญหาในลักษณะที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างสมดุลของเส้นโค้งที่โก่งตัวมากและความเครียดมีค่าน้อยเส้นโค้งดังกล่าวเรียกว่า *Elastica* ซึ่งสามารถใช้ทฤษฎี *Elastica* ในการแก้ไขปัญหาได้ การศึกษาพฤติกรรมของ *Elastica* เกิดขึ้นอย่างแพร่หลายและต่อเนื่อง โดยอาจแบ่งการศึกษาพฤติกรรม *Elastica* ได้สองรูปแบบคือ *Elastica* ที่มีความยาวคงที่ (Constant Length *Elastica*) และ *Elastica* ที่มีความยาวส่วนโค้งแปรเปลี่ยนได้ (Variable-Arc-Length *Elastica* หรือเรียกโดยย่อว่า VAL *Elastica*) ลักษณะพิเศษของ VAL *Elastica* คือปลายด้านหนึ่งอนุญาตให้ความยาวส่วนโค้งสามารถเลื่อนไหลเข้ามาในระบบได้ในขณะที่ความยาวช่วง (Span-Length) มีค่าคงที่ เป็นผลให้ความยาวส่วนโค้งทั้งหมดภายหลังการโก่งเคาะมีความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปแบบจำลองแบบ VAL *Elastica* ได้นำไปประยุกต์ใช้กับการศึกษาพฤติกรรมของท่อลำเลียงของไหลได้มหาสมุทรซึ่งปลายด้านหนึ่งของท่อยึดอยู่กับหลุมเจาะ ในขณะที่ปลายด้านหนึ่งที่อยู่บนเรือเดินสมุทรสามารถปล่อยความยาวของท่อลำเลียงให้เพิ่มขึ้นได้ *Elastica* ทั้งสองแบบนี้มีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อถูกกระทำโดยแรงอัดตามแนวแกน (Compression) *Elastica* ที่มีความยาวคงที่ภายใต้แรงอัดแสดงพฤติกรรมแบบมีเสถียรภาพ (Stable) ภายหลังการโก่งเคาะ [1-4] ในขณะที่ *Elastica* ที่มีความยาวส่วนโค้งแปรเปลี่ยนได้ภายใต้แรงอัดแบบเดียวกันแสดงพฤติกรรมแบบไร้เสถียรภาพ (Unstable) ภายหลังการโก่งเคาะ [5, 6] ซึ่ง *Elastica* ที่มีความยาวส่วนโค้งแปรเปลี่ยนได้นิยมนำไปใช้ในแบบจำลองของท่อลำเลียงใต้ทะเล (Marine Risers) [7] โดยความยาวส่วนโค้งของ *Elastica* สามารถเพิ่มขึ้นได้เป็นผลให้สถิติเนสการดัดลดลง ดังนั้นเมื่อความยาวส่วนโค้งเพิ่มขึ้นทำให้เกิดสภาวะสมดุลที่ไร้เสถียรภาพภายหลังการโก่งเคาะ โดยความยาวส่วนโค้งที่เพิ่มขึ้นทำให้มีโอกาสที่เกิดการหักงอของท่อลำเลียงได้ ซึ่งในงานวิจัยของ Phungpaingam และ Chucheebsakul [6] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของ *Elastica*

ที่มีสปริงต้านทานการหมุนภายในช่วงความยาวของ *Elastica* โดยใช้สปริงต้านทานการหมุนแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นเป็นแบบจำลองการหักงอของ *Elastica* การศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาพฤติกรรมของ *Elastica* สองชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกันด้วยสปริงต้านทานการหมุนแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น และเป็นการศึกษาพฤติกรรมที่ส่งผลกระทบต่อกัน (Interaction) ของ *Elastica* สองชิ้นส่วนซึ่งมีงานวิจัยที่ค่อนข้างจำกัด อีกตัวอย่างหนึ่งของการศึกษา *Elastica* สองชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกันด้วยสปริงต้านทานการหมุนคือ Dado และคณะ [8] ซึ่งได้ศึกษาพฤติกรรมของ *Elastica* ที่เป็นเสาเอ็น (Cantilever Column) ที่เชื่อมต่อกันด้วยสปริงต้านทานการหมุนแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น ซึ่งเป็นการศึกษาในส่วนของ *Elastica* ที่มีความยาวคงที่ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยทั้งสองชิ้นนี้ [6, 8] ยังไม่ได้ศึกษาถึงผลกระทบของลักษณะรูปแบบของสปริงต้านทานการหมุนแบบอื่นๆ จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจสำหรับการศึกษาในบทความนี้

เนื่องจากสปริงต้านทานการหมุนนี้อาจเกิดขนาดของมุมหมุนที่มีขนาดมากได้ในกรณีที่สปริงมีค่าสถิติ-เนสที่ค่อนข้างน้อย ทำให้มีโอกาสเกิดสภาพของพฤติกรรมของจุดหมุนที่เป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นคู่ (Bilinear Elastic Behavior) หรือ เป็นแบบอีลาสติก-พลาสติก (Elastic-Plastic Behavior) ได้ ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาบทความที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมภายใต้สภาวะที่ชิ้นส่วนของ *Elastica* เกิดสภาพที่เป็นอีลาสติก-พลาสติกมาแล้ว เช่นในงานวิจัยของ [9-11] และเมื่อไม่นานมานี้ในปี ค.ศ. 2016 Pandit และ Srinivasan [12] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการแอ่นตัวมากของคานโค้งที่พิจารณาผลกระทบของวัสดุที่เป็นแบบอีลาสโต-พลาสติก (Elasto-Plastic) ภายใต้แรงกระทำที่ติดตามการเสียรูปของคาน โดยจะเห็นได้ว่าในงานวิจัยของ [9-12] มุมลาดเอียงของคานเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียว พฤติกรรมการหมุนของหน้าตัดจึงเป็นการหมุนไปในทิศทางเดียว แต่ในบทความนี้ มุมหมุนของสปริงต้านทานการหมุนอาจมีการเพิ่มขึ้น และลดลง (หมุนกลับด้าน) ในขณะที่ความยาวส่วนโค้งของ *Elastica* จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นประเด็นที่น่าศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อพฤติกรรมของ *Elastica*

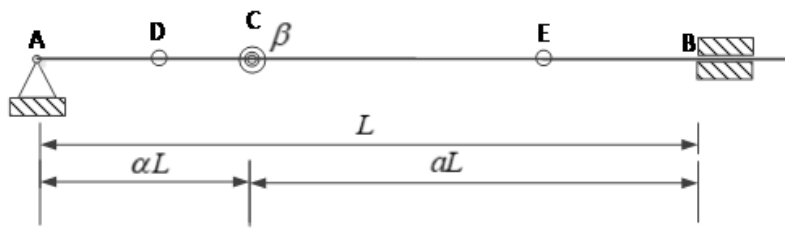
ในบทความนี้ใช้กระบวนการเชิงตัวเลขในการคำนวณหาผลเฉลย โดยสร้างระบบสมการอนุพันธ์ครอบคลุมปัญหาจากสมการสมดุลของของ *Elastica* ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง และความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตของ *Elastica*

หลังจากนั้นทำการอินทิเกรตด้วยวิธี Runge-Kutta จนกระทั่งสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา แบบจำลองของสปริงต้านทานการหมุนในบทความนี้ได้พิจารณาแบบจำลองทั้งหมดสามแบบคือ 1) ยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) 2) ยืดหยุ่นเชิงเส้นคู่ (Bilinear Elastic) และ 3) อีลาสติก-พลาสติก (Elastic-Plastic) โดยที่สปริงต้านทานการหมุนแบบแรกได้มีการศึกษาไว้แล้วโดย Phungpaingam และ Chucheeepsakul [6] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ขยายขอบเขตของพฤติกรรมของสปริงต้านทานการหมุนให้ครอบคลุมได้มากยิ่งขึ้น โดยที่ผลจากการคำนวณได้ถูกเรียบเรียงในรูปของแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ และขนาดการเปลี่ยนแปลงของมุมที่จุดสปริงต้านทานการหมุน $|\Delta\theta|$ กับความยาวส่วนโค้งทั้งหมด $\bar{s}$ และรูปร่างสมมูลของ Elastica ในสถานะต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นพฤติกรรมโดยรวมของ Elastica ได้ โดยพบว่าภายหลังการสปริงต้านทานการหมุนการครากน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ลดลง และจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อสถิติของสปริงต้านทานการหมุนมีค่าเป็นศูนย์ภายหลังการคราก และอาจมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ได้ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการมีเสถียรภาพของ Elastica ในช่วงสั้นๆ ในขณะที่ความยาวส่วนโค้ง $\bar{s}$ เพิ่มขึ้นขนาดของมุม $|\Delta\theta|$ อาจมีค่าที่เพิ่มขึ้นและลดลงได้ ซึ่งการเพิ่มขึ้นและลดลงของมุม $|\Delta\theta|$ มีผลต่อความสามารถในการถ่ายโมเมนต์ที่แตกต่างกันของสปริงต้านทานการหมุนทั้งสามรูปแบบ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการแสดงเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น และมีพฤติกรรมที่น่าสนใจ อาทิเช่น ผลของการเปลี่ยนแปลงสถิติของสปริงที่จุดครากต่อพฤติกรรมของ Elastica การมีเสถียรภาพของ Elastica ที่มีความยาวส่วนโค้งแปรเปลี่ยนได้ (VAL Elastica) พฤติกรรมของ Elastica เมื่อสปริงหมุนกลับด้าน เป็นต้น

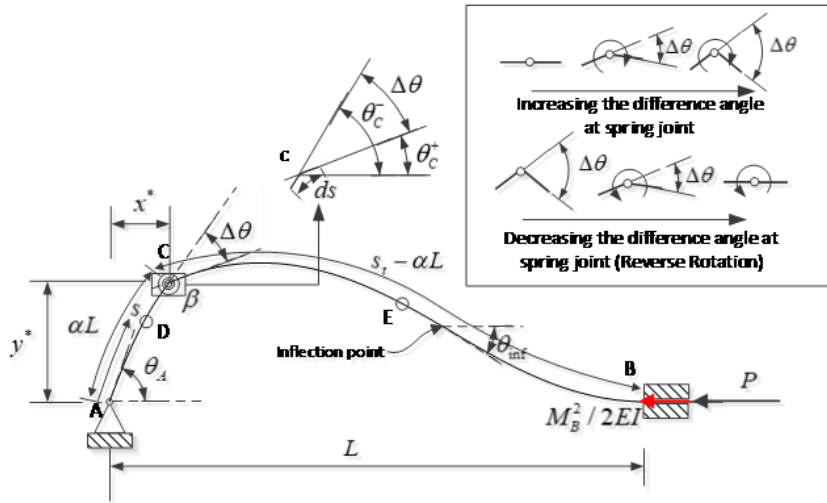
2. สมการครอบคลุมปัญหา

รูปที่ 1 แสดงรูปร่างของ Elastica ในสภาวะก่อนการโก่งเดาะ และภายหลังการโก่งเดาะ โดยที่ก่อนเกิดการโก่งเดาะ Elastica วางตัวในแนวเส้นตรงยึดติดกับจุดรองรับที่จุดแบบ

หมุนได้อย่างอิสระ ที่ปลายด้าน B วางอยู่บนจุดรองรับแบบรางเลื่อนในแนวราบ (Horizontal Slider) ซึ่งอนุญาตให้ชิ้นส่วน Elastica สามารถเลื่อนไหลในแนวราบได้อย่างอิสระ และที่จุด C เป็นจุดต่อของ Elastica ทั้งสองชิ้นส่วนซึ่งเป็นสปริงต้านทานการหมุนแบบอีลาสติก-พลาสติก ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่จุดสปริงต้านทานการหมุน M_s กับมุมที่เปลี่ยนแปลงไป $\Delta\theta$ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยในส่วนที่สาม (ส่วน III) เป็นส่วนของการหมุนกลับด้าน (Reverse Rotation) (ดังตัวอย่างแสดงลักษณะการหมุนกลับด้านของสปริงในรูปที่ 1b)) และค่าของมุม β_1 และ β_2 เป็นค่ามุมของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ของสปริงต้านทานการหมุนกับผลต่างของมุมที่จุด C ($\Delta\theta$) เมื่อ Elastica เกิดการโก่งเดาะอันเนื่องมาจากแรงที่ปลาย P จะมีรูปร่างหลังการโก่งเดาะดังแสดงในรูปที่ 1b) ภายหลังการโก่งเดาะมุมที่ปลาย A มีค่าเป็น θ_A ตำแหน่งของสปริงต้านทานการหมุนอยู่ที่ (x^*, y^*) และผลต่างของมุมที่สปริงต้านทานการหมุนมีค่าเป็น $\Delta\theta$ ซึ่งเกิดจากการส่งถ่ายโมเมนต์ตัดที่แตกต่างจาก Elastica ที่เชื่อมต่อเป็นเนื้อเดียวกัน ที่จุด B ซึ่งเป็นจุดรองรับแบบรางเลื่อนในแนวราบ เมื่อเกิดแรงอัด P ทำให้ชิ้นส่วนของ Elastica ถูกดันเข้าไปในระบบและความยาวส่วนโค้งทั้งหมดเพิ่มขึ้น และในขณะที่เกิดการเลื่อนอย่างอิสระนั้นมีแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตัดที่ปลาย B ซึ่งเรียกว่า Configurational Force มีค่าเท่ากับ $M_B^2 / 2EI$ แรงดังกล่าวได้รับการพิสูจน์ทั้งในเชิงทฤษฎีและการทดลองในห้องปฏิบัติการโดย Bosi และคณะ [13-14] โดยที่แรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ และชิ้นส่วนอิสระของ Elastica แสดงในรูปที่ 3

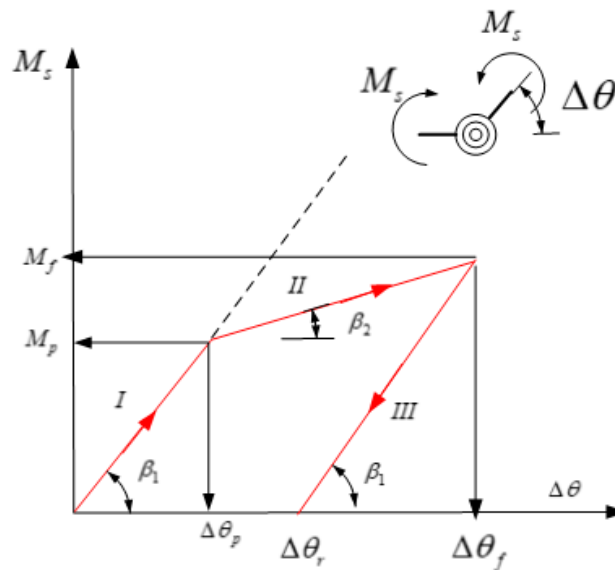


a) Elastica ก่อนการโก่งเดาะ

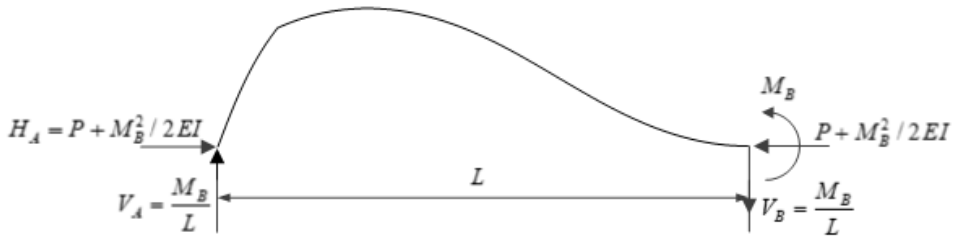


b) Elastica ภายหลังการโก่งเดาะและแสดงการหมุนของสปริงต้านทานการหมุน

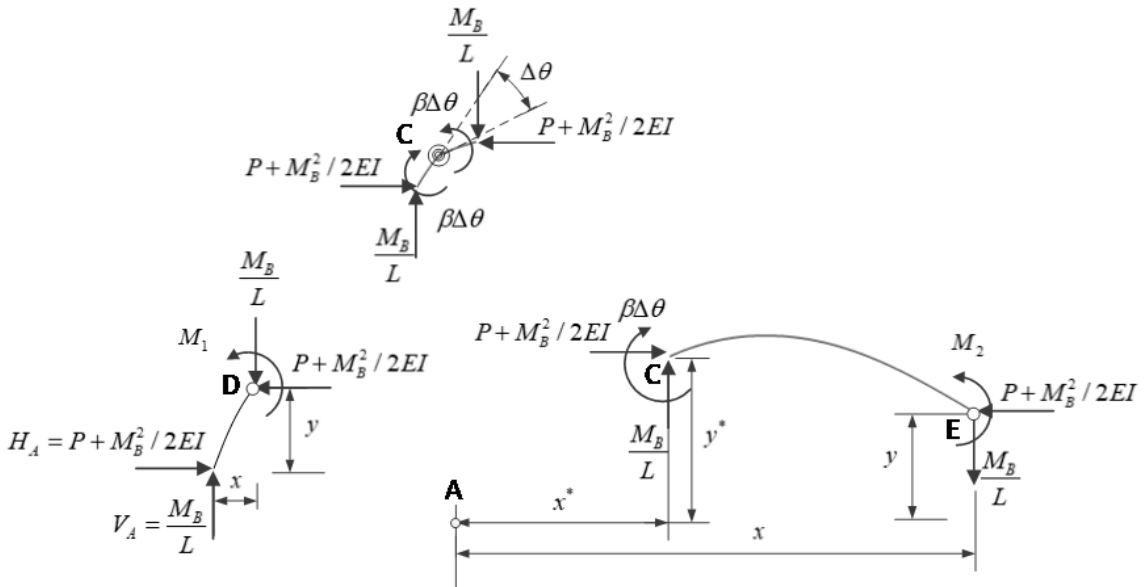
รูปที่ 1 รูปร่างของ Elastica ก่อนและภายหลังการโก่งเดาะ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ของสปริงต้านทานการหมุน M_s และมุม $\Delta\theta$ แบบอีลาสติก-พลาสติก



รูปที่ 3 แรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับของ Elastica



รูปที่ 4 แสดงชิ้นส่วนอิสระของ Elastica

สมการโมเมนต์ในในด้านซ้ายมือและขวามือของสปริงต้านทานการหมุนสามารถแสดงได้ดังนี้

ที่จุด D

$$M_1 = \frac{M_B}{L}x - \left(P + \frac{M_B^2}{2EI}\right)y \quad s \leq \alpha L \quad (1)$$

ที่จุด E

$$M_2 = \frac{M_B}{L}(x - x^*) + \left(P + \frac{M_B^2}{2EI}\right)(y^* - y) + M_s \quad \alpha L \leq s \leq s_l \quad (2)$$

โดยที่ s_l คือความยาวส่วนโค้งทั้งหมด s คือความยาวส่วนโค้งของ Elastica x คือระยะในแนวราบของ Elastica y คือระยะในแนวดิ่งของ Elastica และ M_s คือความสามารถในการส่งถ่ายโมเมนต์ที่จุดต้านทานการหมุนของสปริง ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าสติฟเนส (Stiffness) ของสปริงต้านทานการหมุน มีค่าเท่ากับ $k_1 = \tan(\beta_1)$ และ $k_2 = \tan(\beta_2)$ สำหรับช่วงที่ I และ II

ตามลำดับ ในขณะที่ช่วงที่ III ค่าสติฟเนสของสปริงต้านทานการหมุนจะกลับมาเป็น $k_1 = \tan(\beta_1)$ อีกครั้งโดยเป็นการหมุนกลับด้าน ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะทำให้การส่งถ่ายโมเมนต์ตัดผ่านจุดต้านทานการหมุนของสปริงขึ้นอยู่กับผลต่างของมุมที่จุด C ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$M_s = \begin{cases} \Delta\theta k_1 & 0 \leq \Delta\theta \leq \Delta\theta_p \\ M_p + (\Delta\theta - \Delta\theta_p)k_2 & \Delta\theta_p \leq \Delta\theta \leq \Delta\theta_f \\ (\Delta\theta - \Delta\theta_r)k_1 & \Delta\theta_r \leq \Delta\theta \leq \Delta\theta_f \end{cases} \quad (3)$$

โดยที่ M_p คือโมเมนต์เมื่อสปริงเกิดการคราก $\Delta\theta_p$ คือมุมที่สปริงเกิดการคราก และมุม $\Delta\theta_r$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta\theta_r = \Delta\theta_f - \frac{M_f}{k_1} \quad (4)$$

$\Delta\theta_f$ และ M_f คือผลต่างของมุมของสปริงที่เริ่มหมุนกลับด้าน และความสามารถในการส่งถ่ายโมเมนต์เมื่อสปริงเริ่มหมุนกลับด้านตามลำดับ ภายหลังจากเขียนสมการความสัมพันธ์ของ

โมเมนต์ตัดภายในช่วงของ Elastica แล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ตัดและความโค้งของ Elastica และความสัมพันธ์ทางด้านเรขาคณิตได้แสดงในสมการที่ (5) ถึง (7) ดังนี้

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{M_i}{EI} \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

$$\frac{dx}{ds} = \cos \theta \quad (6)$$

$$\frac{dy}{ds} = \sin \theta \quad (7)$$

สมการ (5) ถึง (7) ทั้งหมดประกอบกันเป็นสมการครอบคลุมปัญหา เพื่อความสะดวกในการคำนวณตัวแปรทั้งหมดจะอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติดังต่อไปนี้

$$\frac{d\theta}{d\bar{s}} = \bar{M}_i, \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

$$\frac{d\bar{x}}{d\bar{s}} = \cos \theta \quad (9)$$

$$\frac{d\bar{y}}{d\bar{s}} = \sin \theta \quad (10)$$

$$\bar{M}_1 = \bar{M}_B \bar{x} - \left(\bar{P} + \frac{\bar{M}_B^2}{2} \right) \bar{y} \quad \bar{s} \leq \alpha \quad (11)$$

$$\bar{M}_2 = \bar{M}_B (\bar{x} - \bar{x}^*) + \left(\bar{P} + \frac{\bar{M}_B^2}{2} \right) (\bar{y}^* - \bar{y}) + \bar{M}_s \quad \alpha \leq \bar{s} \leq \bar{s}_r \quad (12)$$

$$\bar{M}_s = \begin{cases} \Delta\theta \bar{k}_1 & 0 \leq \Delta\theta \leq \Delta\theta_p \\ \bar{M}_p + (\Delta\theta - \Delta\theta_p) \bar{k}_2 & \Delta\theta_p \leq \Delta\theta \leq \Delta\theta_f \\ (\Delta\theta - \Delta\theta_r) \bar{k}_1 & \Delta\theta_r \leq \Delta\theta \leq \Delta\theta_f \end{cases} \quad (13)$$

$$\Delta\theta_r = \Delta\theta_f - \frac{\bar{M}_f}{\bar{k}_1} \quad (14)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}\bar{s} &= \frac{s}{L}, \bar{s}_i = \frac{s_i}{L}, \bar{x} = \frac{x}{L}, \bar{x}^* = \frac{x^*}{L}, \bar{y} = \frac{y}{L}, \bar{y}^* = \frac{y^*}{L}, \bar{M}_i = \frac{M_i L}{EI}, \bar{M}_s = \frac{M_s L}{EI} \\ \bar{M}_B &= \frac{M_B L}{EI}, \bar{M}_p = \frac{M_p L}{EI}, \bar{M}_f = \frac{M_f L}{EI}, \bar{k}_i = \frac{k_i L}{EI}, \bar{P} = \frac{PL^2}{EI}\end{aligned}\quad (15)$$

ระบบสมการในรูปตัวแปรไร้หน่วย (8) ถึง (10) เป็นสมการครอบคลุมปัญหาที่ใช้ในกระบวนการแก้ไขปัญหาเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้ โดยระบบสมการดังกล่าวได้อธิบายการโก่งตัวของ Elastica ในชิ้นส่วนย่อย $d\bar{s}$ หากต้องการทราบพฤติกรรมโดยรวมทั้งหมด

จำเป็นต้องอินทิเกรตระบบสมการ (8) ถึง (10) จากจุดเริ่มต้น คือ $\bar{s} = 0$ ไปจนถึงจุดปลาย $\bar{s} = \bar{s}_i$ โดยที่การอินทิเกรตต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา ซึ่งแสดงเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

ตัวแปร	ความยาวส่วนโค้ง $\bar{s}$	
	$\bar{s} = 0$	$\bar{s} = \bar{s}_i$
$\bar{x}$	0	1
$\bar{y}$	0	0
θ	θ_A	0

จากตารางที่ 1 สามารถสร้างสมการเพื่อใช้ในกระบวนการแก้ไขปัญหาดังนี้

$$\bar{x}(\bar{s}_i) - 1 = 0 \quad (16)$$

$$\bar{y}(\bar{s}_i) = 0 \quad (17)$$

$$\theta(\bar{s}_i) = 0 \quad (18)$$

$$\bar{M}_B \bar{x}^* - \left(\bar{P} + \frac{\bar{M}_B^2}{2} \right) \bar{y}^* - \bar{M}_s = 0 \quad (19)$$

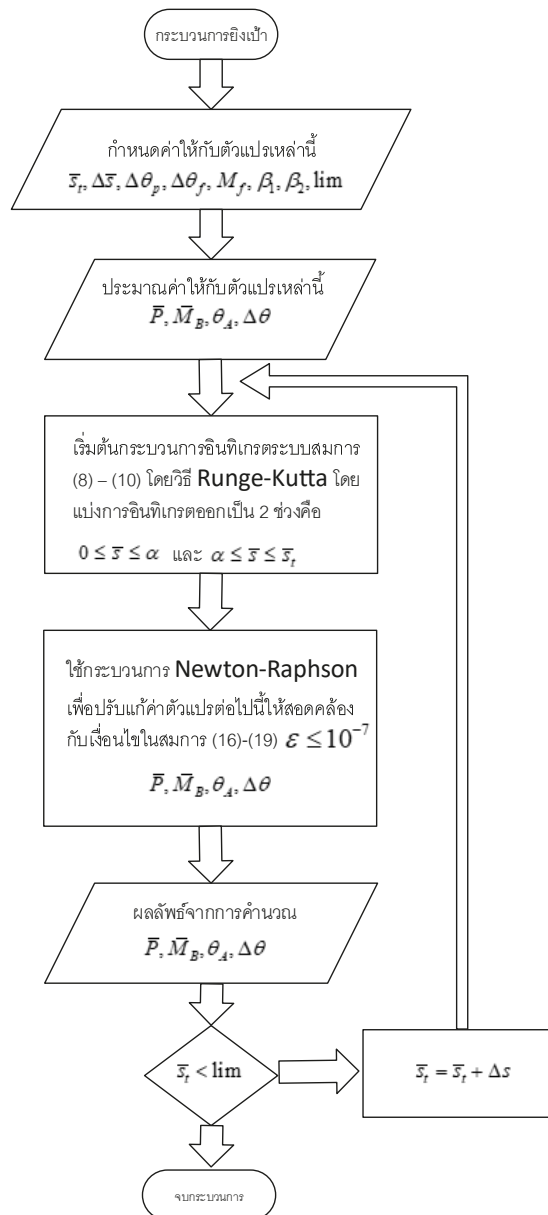
โดยที่ในสมการที่ (19) เป็นเงื่อนไขของโมเมนต์ดัดที่จุดด้านทานการหมุนของของสปริง $\bar{s} = \alpha$ (ในสมการที่ (11) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\bar{M}_s$)

จากสมการครอบคลุมปัญหา (8) ถึง (10) และสมการโมเมนต์ดัด (11) และ (12) และสมการโมเมนต์ของจุดด้านทานการหมุน (13) จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรไม่ทราบค่าทั้งหมด 5 ตัวแปรคือ $\bar{s}_i$, $\bar{P}$, $\bar{M}_B$, θ_A และ $\Delta\theta$ ในกระบวนการคำนวณเชิงตัวเลขได้กำหนดให้ $\bar{s}_i$ เป็นตัวแปรควบคุม ดังนั้นจึงเหลือตัวแปรไม่ทราบค่าอีก 4 ตัวแปร ซึ่งจะอาศัยสมการเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาในสมการที่ (16) ถึง (19) เป็นเงื่อนไขในการ

หาผลเฉลยของปัญหาต่อไป ในการหาผลเฉลยของปัญหานี้ เนื่องจากเป็นปัญหาที่ระบบสมการอนุพันธ์มีความไร้เชิงเส้นสูง ดังนั้นจึงนำกระบวนการเชิงตัวเลขมาใช้ในการแก้ไขปัญหานี้ โดยในบทความนี้ได้ใช้วิธี Shooting Method แสดงดังรูปที่ 5 โดยในกระบวนการในรูปที่ 5 ใช้วิธี Newton-Raphson ในการทำให้เงื่อนไขในสมการที่ (16)-(19) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์เป็นจริง แต่ในกระบวนการเชิงตัวเลขได้กำหนดค่า ε ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้โดยกำหนดให้ $\varepsilon \leq 10^{-7}$ เป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบการลู่เข้าหาคำตอบ กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการเชิงตัวเลขที่เหมาะสมกับการใช้แก้ไข

ปัญหาที่มีค่าขอบเขตชัดเจนเช่นปัญหาที่พิจารณาในบทความนี้ ในระหว่างการอินทิเกรตจาก $\bar{s} = 0$ ถึง $\bar{s} = \bar{s}_r$ ในกรณีที่มุม $\Delta\theta$ มีขนาดเพิ่มขึ้นโมเมนต์ $\bar{M}_s$ จะมีค่าเป็นไปตามสองลำดับแรกของสมการที่ (13) เมื่อ $\Delta\theta$ มีขนาดที่ลดลงโมเมนต์ $\bar{M}_s$ จะมีค่าเป็นไปตามสมการในสองลำดับแรกหากกำหนดให้สปริงด้านทานการหมุนเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น หรือ ยึดหยุ่นเชิงเส้นคู่ และ $\bar{M}_s$ มีค่าเป็นไปตามสมการลำดับที่สามของสมการ

ที่ (13) เมื่อกำหนดให้สปริงด้านทานการหมุนเป็นแบบอิลาสติก-พลาสติก โดยที่ตำแหน่งของสปริงด้านทานการหมุน (จุด C) จะไม่มีความต่อเนื่องของมุม ดังนั้นมุมที่จุดด้านทานการหมุนด้านซ้ายและด้านขวามีค่าไม่เท่ากันดังสมการ $\theta_C^+ = \theta_C^- + \Delta\theta$ โดยที่ θ_C^- และ θ_C^+ คือมุมด้านซ้ายมือ และขวามือที่จุด C ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 1b)



รูปที่ 5 แผนผังในการคำนวณวิธีการ Shooting method

3. ผลและการวิเคราะห์ผล

ผลจากการคำนวณได้นำเสนอในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลาย $\bar{P}$ กับความยาวส่วนโค้งทั้งหมด $\bar{S}_r$ โดยมีการแปรผันตัวแปรที่ต้องการศึกษาผลกระทบคือ ตำแหน่งของสปริงด้านทานการหมุน α ค่าสถิติของสปริงด้านทานการหมุน $\bar{k}_1, \bar{k}_2$ นอกจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\bar{P}$ และ $\bar{S}_r$ แล้ว กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุม $|\Delta\theta|$ และ $\bar{S}_r$ และรูปร่างสมดุลของ Elastica ที่สภาวะต่างๆ ได้นำเสนอในการวิเคราะห์ด้วยเช่นกัน

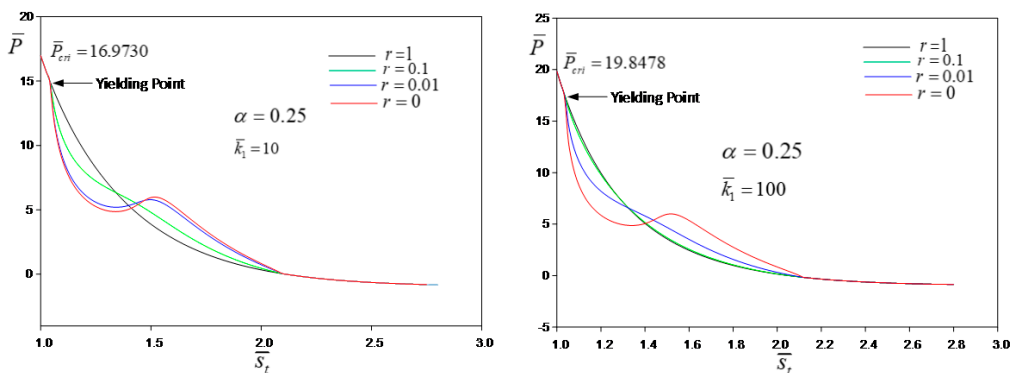
3.1 พฤติกรรมหลังการโก่งเตาะของ Elastica

พฤติกรรมหลังการโก่งเตาะของ Elastica ที่มีสปริงด้านทานการหมุนภายในช่วงความยาวของ Elastica ได้มีการศึกษาโดย Phungpaingam และ Chucheeprakul [6] ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้พิจารณาสปริงด้านทานการหมุนเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) โดยมีผลที่น่าสนใจหลายอย่างด้วยกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสถิติของสปริงมีค่าเป็นศูนย์ อาทิเช่น การเกิดรูปร่างสมดุลได้หลายแบบ (Multiple Equilibrium Shapes) การเกิดการโก่งเตาะในลำดับที่สอง (Secondary Buckling) ซึ่งเป็นการโก่งเตาะครั้งที่สองที่เกิดขึ้นหลังจากการโก่งเตาะในครั้งแรก (Primary Buckling) ในบทความนี้ได้พัฒนาแบบจำลองของสปริงด้านทานการหมุนในลักษณะที่เป็นแบบอิลาสติก-พลาสติก โดยศึกษาพฤติกรรมของ Elastica ในสองกรณีดังนี้ 1) พฤติกรรมเมื่อสปริงด้านทานการหมุนเกิดการครากและมีการเปลี่ยนแปลงสถิติ (แบบยืดหยุ่นเชิงเส้นคู่) เทียบกับกรณีที่ไม่เกิดการคราก 2) พฤติกรรมของ

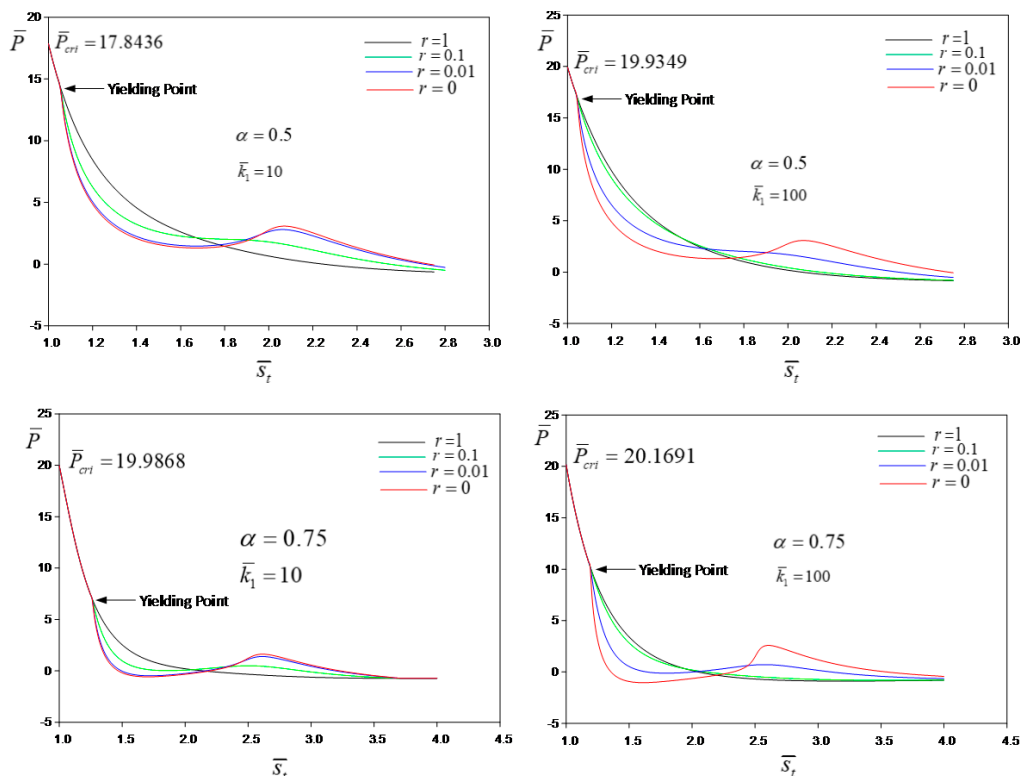
Elastica เมื่อสปริงเป็นแบบอิลาสติก-พลาสติกและเกิดการหมุนกลับด้าน โดยในกรณีที่สปริงด้านทานการหมุนเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นคู่ อาจไม่พบสปริงด้านทานการหมุนที่มีลักษณะดังกล่าวในทางปฏิบัติ แต่การศึกษาพฤติกรรมของ Elastica ที่มีสปริงด้านทานการหมุนแบบอิลาสติก-พลาสติก มีความจำเป็นในการนำผลการคำนวณของ $\Delta\theta_r$ และ $\bar{M}_r$ ในกรณีที่สปริงด้านทานการหมุนเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นคู่ เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของ Elastica ที่มีสปริงด้านทานการหมุนเป็นแบบอิลาสติก-พลาสติก ผลจากการคำนวณอาจแบ่งการพิจารณาในกรณีแรกโดยแปรผันอัตราส่วนของสถิติของสปริงหมุน $r = \bar{k}_2 / \bar{k}_1$ ซึ่งได้ทำการแปรผันอัตราส่วน r ระหว่าง 1 ถึง 0 เมื่อ $\bar{k}_1 = 10$ และ 100 ตามลำดับ ที่ตำแหน่งของสปริงด้านทานการหมุนแตกต่างกัน ($\alpha = 0.25, 0.50$ และ 0.75) ในกรณีที่สองจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการโก่งตัวมากขึ้นซึ่งการเปลี่ยนแปลงของมุมที่สปริงด้านทานการหมุนอาจมีการหมุนกลับด้านได้

3.2 พฤติกรรมของ Elastica เมื่อสปริงด้านทานการหมุนเกิดการคราก

ในการศึกษาพฤติกรรมของ Elastica ในกรณีนี้ ได้แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ และความยาวส่วนโค้งทั้งหมด $\bar{S}_r$ โดยมีการแปรผันอัตราส่วนของสถิติของจุดด้านทานการหมุนภายหลังและก่อนการคราก $r = \bar{k}_2 / \bar{k}_1$ ในแต่ละตำแหน่งของสปริงด้านทานการหมุน α ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ กับความยาวส่วนโค้งทั้งหมด $\bar{S}_r$ เมื่อแปรผันอัตราส่วนของสถิติ r ที่ตำแหน่งของสปริงด้านทานการหมุน α ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ กับความยาวส่วนโค้งทั้งหมด $\bar{S}_t$ เมื่อแปรผันอัตราส่วนของสติฟเนส r ที่ตำแหน่งของสปริงด้านทานการหมุน α ที่แตกต่างกัน (ต่อ)

รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสติฟเนสของจุดด้านทานการหมุน r โดยได้ทำการแปรผันค่า r ระหว่าง 1 ถึง 0 เมื่อ $r = 1$ (เส้นสีดำ) หมายถึงพฤติกรรมของสปริงแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นซึ่งได้ทำการศึกษาไว้แล้วจากงานวิจัยของ Phungpangam และ Chucheeprakul [4] ในบทความนี้ได้ใช้เป็นเส้นเปรียบเทียบกับกรณีที่เกิดการคราก และเมื่อ

$r = 0$ (เส้นสีแดง) คือกรณีที่สปริงด้านทานการหมุนมีพฤติกรรมแบบจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ซึ่งสติฟเนสภายหลังการครากมีค่าเป็นศูนย์ ($\bar{k}_2 = 0$) จากเส้นโค้งความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่าเริ่มแรก Elastica เกิดการโก่งเดาะเมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่าถึงจุดวิกฤต $\bar{P}_{crit}$ ซึ่ง Wang และคณะ [15] ได้นำเสนอสมการในการคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤต $\bar{P}_{crit}$ โดยแสดงในสมการที่ (20) และได้แสดงค่าดังกล่าวไว้ในกราฟแล้ว (รูปที่ 6)

$$\bar{k}_1 \left[\sqrt{\bar{P}_{crit}} - \tan \left(\sqrt{\bar{P}_{crit}} a \right) \right] + \left[\bar{P}_{crit} + \bar{k}_1 + \sqrt{\bar{P}_{crit}} (\bar{k}_1 - 1) \tan \left(\sqrt{\bar{P}_{crit}} a \right) \right] \tan \left[\sqrt{\bar{P}_{crit}} (a - 1) \right] = 0 \quad (20)$$

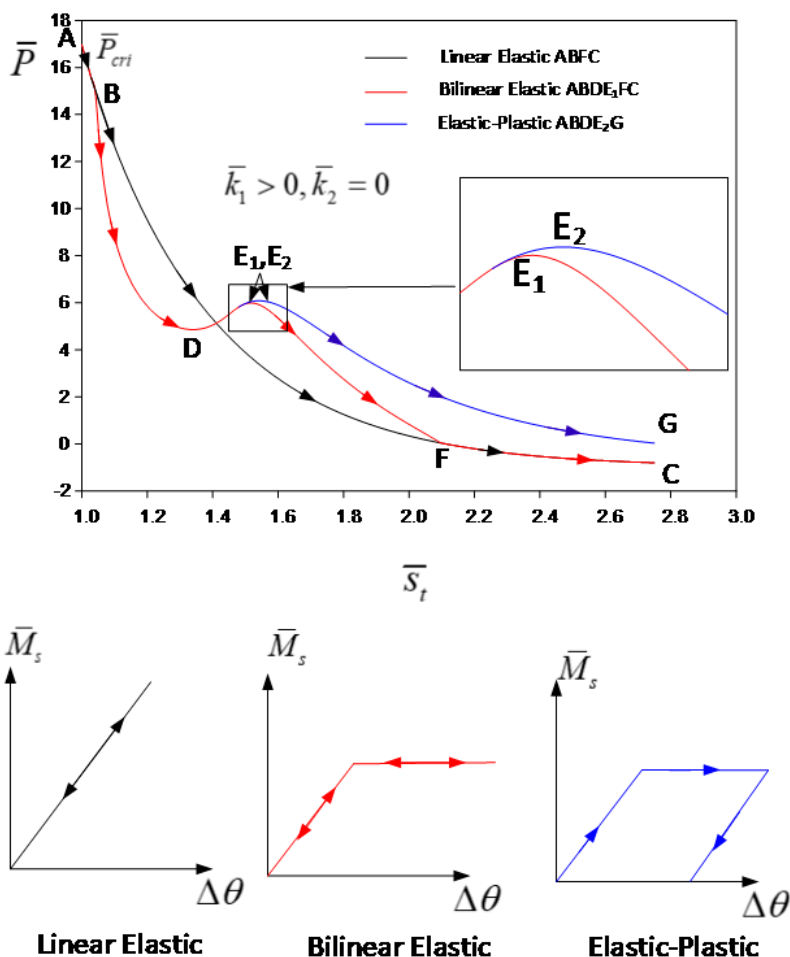
เมื่อกำหนดค่าสติฟเนสของสปริงหมุน $\bar{k}_1$ และตำแหน่งของสปริงหมุน $a = 1 - \alpha$ (แสดงในรูปที่ 1a) สามารถคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤตได้โดยกระบวนการกระทำซ้ำของ Newton-Raphson

หลังจากการโก่งเดาะของ Elastica แล้วจะสังเกตเห็นว่า

น้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ลดลงเมื่อมีการโก่งตัวมากขึ้น (ความยาวส่วนโค้งทั้งหมด $\bar{S}_t$ เพิ่มขึ้น) ลักษณะของความสัมพันธ์เช่นนี้บ่งบอกถึงความรู้เสถียรภาพ (Unstable) ของ Elastica น้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ จะลดลงอย่างต่อเนื่องและเมื่อถึงจุดที่กำหนดให้สปริงด้านทานการหมุนเกิดการคราก ในที่นี้กำหนดให้สปริง

เกิดการครากเมื่อผลต่างของมุมที่จุดสปริงด้านทานการหมุน มีขนาดที่มากกว่าค่าที่กำหนดคือ $|\Delta\theta_p|$ ซึ่งในบทความนี้กำหนดให้เท่ากับ 0.15 เมื่อค่าสตีเฟนส์ก่อนการคราก $\bar{k}_1 = 10$ และกำหนดให้เท่ากับ 0.015 เมื่อ $\bar{k}_1 = 100$ การกำหนดค่าที่แตกต่างกันเช่นนี้ไม่ทำให้พฤติกรรมโดยรวมเปลี่ยนแปลงไป การกำหนดค่าที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากเมื่อค่าสตีเฟนส์ $\bar{k}_1 = 10$ สปริงจะมีลักษณะแบบอ่อน ความสามารถในการถ่ายโมเมนต์ดัดที่จุดสปริงด้านทานการหมุนไม่มีประสิทธิภาพทำให้เกิดผลต่างของมุมที่จุดดังกล่าวได้มากกว่าในกรณีที่ $\bar{k}_1 = 100$ ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมจึงได้กำหนดขนาดของมุมที่ทำให้เกิดการครากแตกต่างกัน เมื่อสปริงด้านทานการหมุนเกิดการครากจะเห็นได้ว่าน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ มีค่าที่ลดลงมากกว่าในกรณีที่ไมเกิดการคราก (เส้นสีดำ) การลดลงจะเกิดมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสตีเฟนส์ภายหลังและก่อนการคราก r โดยที่อัตราส่วน r เมื่อลดลงหมายถึงค่าสตีเฟนส์ภายหลังการคราก $\bar{k}_2$ ลดลงตามไปด้วย ดังนั้นน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ จะมีค่าที่ลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วน r (สังเกตการลดลงของเส้นสีดำ เขียว น้ำเงิน และแดง) และภายหลังจากการลดลงของน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ อาจเป็นการลดลงแบบต่อเนื่อง หรืออาจเกิดการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ในช่วงสั้นๆ อีกครั้งก็เป็นไปได้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสตีเฟนส์ r และตำแหน่งของจุดด้านทานการหมุน α เช่นในกรณีที่ $\alpha = 0.25$ เมื่ออัตราส่วน r ลดลงเป็น 0.1 จะสังเกตเห็นว่าหลังจากจุดคราก น้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ความยาวส่วนโค้งทั้งหมด $\bar{s}_r$ มีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีที่ $\bar{k}_1 = 10$ และ 100 แสดงถึงสภาวะที่ไร้เสถียรภาพ แต่เมื่อกำหนดให้อัตราส่วน r ลดลงเป็น 0.01 หรือ 0 (เส้นสีน้ำเงินและแดงตามลำดับ) จะสามารถสังเกตได้ว่าในบางกรณีมีช่วงที่น้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ มีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อความยาวส่วนโค้งทั้งหมด $\bar{s}_r$ เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ $r = 0$ ซึ่งสปริงด้านทานการหมุนมีพฤติกรรมเป็นจุดหมุนพลาสติก โดยสามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ได้อย่างชัดเจนในทุกกรณีของค่าสตีเฟนส์ $\bar{k}_1$ และทุกตำแหน่งของสปริงด้านทานการหมุน α

อันเป็นสภาวะของ Elastica ที่มีเสถียรภาพ ซึ่งโดยปกติเป็นที่ทราบกันดีว่า Elastica ที่มีความยาวส่วนโค้งแปรเปลี่ยนได้ (VAL Elastica) ภายใต้อิทธิพลของแรงอัดจะเกิดสภาวะที่ไร้เสถียรภาพหลังจากการโก่งเดาะตลอดช่วงความยาว $\bar{s}_r$ [5] แต่ในกรณีนี้เมื่อเกิดจุดหมุนภายในช่วงความยาวของ Elastica หากเป็นจุดหมุนโดยทั่วไป (Hinged Joint) จะเกิดการโก่งเดาะลำดับที่สอง (Secondary Buckling) [6] และถ้าหากเป็นจุดหมุนแบบพลาสติก จะเกิดสภาวะที่มีเสถียรภาพขึ้นมาอีกครั้งหนึ่ง การลดลงและเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ เมื่อ Elastica มีจุดหมุนแบบพลาสติกคล้ายกับพฤติกรรมของ Elastica ที่ปรากฏในงานวิจัยของ Monasa [9] ซึ่งสตีเฟนส์โดยรวมของ Elastica เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Elastica นั้นเอง เมื่อน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดสูงสุดหลังจากนั้น น้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ จะลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสามารถแสดงได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 7 โดยได้นำเสนอพฤติกรรมของ Elastica 3 กรณีด้วยกันคือ กรณีที่แบบจำลองของสปริงด้านทานการหมุนไม่เกิดการคราก สปริงด้านทานการหมุนเกิดการครากและมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นคู่ และสปริงด้านทานการหมุนเกิดการครากและมีพฤติกรรมแบบอิลาสติก-พลาสติก ซึ่งพฤติกรรมทั้งสามแบบได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับเพื่อแสดงถึงผลกระทบของพฤติกรรมของสปริงด้านทานการหมุนในแต่ละแบบที่มีต่อพฤติกรรมโดยรวมของ Elastica โดยที่เส้น ABFC คือกรณีที่ไมเกิดการครากของสปริงด้านทานการหมุน เส้น ABDE₁FC เป็นกรณีที่เกิดการครากและจุดหมุนเป็นแบบจุดหมุนพลาสติกซึ่งสามารถสังเกตพฤติกรรมได้อย่างชัดเจน ในขณะที่เส้น ABDE₂G สำหรับกรณีที่จุดด้านทานการหมุนเกิดการครากและภายหลังจากการครากเมื่อสปริงด้านทานการหมุนมีการหมุนกลับด้านโดยที่สตีเฟนส์ในขณะหมุนกลับด้านมีค่าเท่ากับช่วงเริ่มแรกคือ $\bar{k}_1$ จะทำให้น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น (เส้นสีน้ำเงิน) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่สปริงด้านทานการหมุนกลับด้านบนเส้นทางเดิม (เส้นสีแดง) อันเนื่องจากสตีเฟนส์ที่เพิ่มขึ้นเป็น $\bar{k}_1$ ($\bar{k}_1 > \bar{k}_2$)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ความยาวส่วนโค้งทั้งหมด $\bar{s}_t$

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของมุมที่สปริง ต้านทานการหมุน $|\Delta\theta|$ และความยาว ส่วนโค้งทั้งหมด $\bar{s}_t$

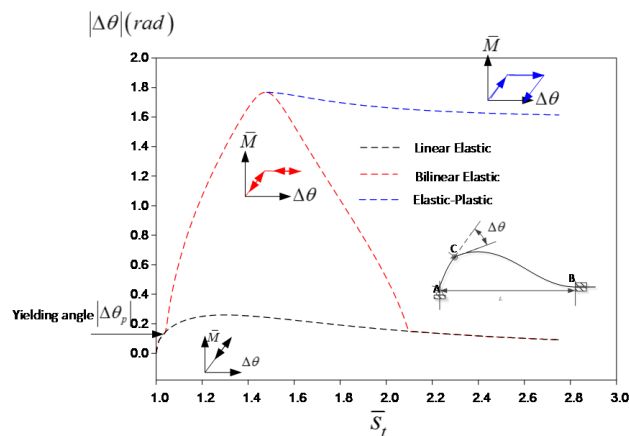
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของมุมที่จุดสปริง
ต้านทานการหมุน $|\Delta\theta| = |\theta_c^+ - \theta_c^-|$ และความยาวส่วนโค้งทั้งหมด
 $\bar{s}_t$ ในรูปที่ 8a) จะเห็นได้ว่าของมุม $|\Delta\theta|$ สามารถเพิ่มขึ้นและ
ลดลง (หมุนกลับด้าน) โดยเส้นสีแดงแสดงการเพิ่มขึ้นและลดลง
ของมุม $|\Delta\theta|$ เมื่อสปริงไม่เกิดการคราก (สปริงต้านทานการหมุน
เป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น) ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่าง
 $\bar{M}_s$ และ $\Delta\theta$ ในกรณีที่ 1 ในขณะที่เส้นสีแดงแสดงถึงสปริง
ต้านทานการหมุนเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นคู่ (Bilinear Elastic)
เมื่อขนาดของมุม $|\Delta\theta|$ มีค่ามากกว่า $|\Delta\theta_c|$ จะเกิดการคราก

และสตีเฟนสองสปริงเปลี่ยนเป็น $\bar{k}_2$ ซึ่งสามารถสังเกตถึงการ
เพิ่มขึ้นและลดลงของขนาดของมุม $|\Delta\theta|$ ได้อย่างชัดเจน
เนื่องจากค่าสตีเฟนสลายหลังการครากในกรณีนี้กำหนดให้มีค่า
เป็นศูนย์ เมื่อสตีเฟนสลายหลังการครากเป็นศูนย์ขนาดของมุม
 $|\Delta\theta|$ จึงสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างมากทั้งการเพิ่มขึ้นและ
ลดลง (หมุนกลับด้าน) ซึ่งขนาดของมุม $|\Delta\theta|$ ลดลงบนเส้นทาง
เดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของขนาดของมุม $|\Delta\theta|$ และสอดคล้อง
กับความสัมพันธ์ระหว่าง $\bar{M}_s$ และ $\Delta\theta$ ในกรณีที่ 2 (สปริง
ต้านทานการหมุนแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นคู่) เส้นสีน้ำเงินแสดงให้
เห็นถึงการลดลงของขนาดของมุม $|\Delta\theta|$ ที่สอดคล้องกับความ
สัมพันธ์ระหว่าง $\bar{M}_s$ และ $\Delta\theta$ ในกรณีที่ 3 (สปริงต้านทาน
การหมุนเป็นแบบอีลาสติก-พลาสติก) ซึ่งเมื่อเกิดการหมุนกลับ

ด้านสติเฟนของสปริงจะมีค่าเท่ากับค่าสติเฟนเริ่มแรกคือ $\bar{k}_1$ อีกครั้ง (เส้นตรงคู่ขนาน สีน้ำเงินของกราฟความสัมพันธ์ $\bar{M}_s - \Delta\theta$)

รูปที่ 8b) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างขนาดของมุม $|\Delta\theta|$ กับน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ซึ่งแสดงถึงจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมที่สำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่สปริงด้านทานการหมุนเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (เส้น abcde) กล่าวคือในกรณีที่สปริงด้านทานการหมุนมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นคู่ ที่จุดครากเมื่อขนาดของมุม $|\Delta\theta| > |\Delta\theta_p|$ ค่าสติเฟนของสปริงลดลง (ในที่นี้ลดลงจนเป็นศูนย์) ขนาดของมุมของสปริงด้านทานการหมุนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากภายหลังการคราก (เส้น bf) ในขณะที่น้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ลดลงอย่างมากเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าจุดหมุนไม่สามารถถ่ายโมเมนต์ดัดที่เกิดเพิ่มขึ้นได้อีกต่อไป ในระหว่างเกิดการโก่งตัวมากภายใต้สปริงด้านทานการหมุนที่เป็นจุดหมุนแบบพลาสติก (Plastic Hinge) ขนาดของมุม $|\Delta\theta|$ มีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างมากทั้งในส่วนของมุมที่เพิ่มขึ้น (เส้น bf) และลดลง (เส้น fde) ซึ่งเป็นการหมุนกลับด้านนั่นเอง โดยในระหว่างนั้นอาจมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ในช่วงสั้นๆ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Elastica และภายหลังจากนั้นน้ำหนักบรรทุกจะมีค่าที่ลดลงอย่างต่อเนื่องและขนาดของมุม $|\Delta\theta|$ ลดลงเช่นกัน เมื่อขนาดของมุมของสปริงด้านทานการหมุนลดลงจนน้อยกว่าขนาดของมุมที่ทำให้เกิดการ

คราก $|\Delta\theta_p|$ (เส้น de) จะเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 8b) ว่าน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ในกรณีที่สปริงด้านทานการหมุนเป็นแบบเชิงเส้นคู่ ซ้อนทับกรณีที่สปริงด้านทานการหมุนเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อขนาดของมุม $|\Delta\theta| \leq |\Delta\theta_p|$ พฤติกรรมของสปริงด้านทานการหมุนของทั้งสองกรณีเป็นแบบเดียวกัน ในกรณีที่สปริงด้านทานการหมุนมีลักษณะเป็นแบบอีลาสติค-พลาสติก (Elastic-Plastic) ในช่วงที่ขนาดของมุม $|\Delta\theta|$ มีค่าที่เพิ่มขึ้น (เส้น abf) มีพฤติกรรมที่เหมือนกับกรณีของสปริงด้านทานการหมุนเป็นแบบเชิงเส้นคู่ แต่เมื่อขนาดของมุม $|\Delta\theta|$ เริ่มลดลงสังเกตเส้น fg (หมุนกลับด้าน) จะมีพฤติกรรมที่แตกต่างออกไปกล่าวคือสปริงจะกลับมามีสติเฟนเท่ากับ $\bar{k}_1$ ($\bar{k}_1 > \bar{k}_2$) ทำให้ต้องการน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ที่มากกว่าสปริงด้านทานการหมุนในสองแบบแรก (แบบยืดหยุ่นเชิงเส้น และแบบเชิงเส้นคู่) และขนาดของมุม $|\Delta\theta|$ จะมีการลดลงที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับสปริงด้านทานการหมุนในสองแบบแรกเนื่องจากสปริงมีค่าสติเฟนที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ในกรณีที่ $\bar{k}_1$ หรือ α เปลี่ยนแปลงไปพฤติกรรมโดยรวมยังคงเป็นไปในลักษณะเช่นเดิมซึ่งแสดงในรูปที่ 9 (เมื่อทำการแปรผันค่า $\bar{k}_1 = 10$ และ 100 โดยแปรผันค่า $\alpha = 0.25, 0.5$ และ 0.75) และมีข้อสังเกตเล็กน้อยคือเมื่อค่า $\bar{k}_1 = 100$ ซึ่งสปริงด้านทานการหมุนมีค่าสติเฟนที่ค่อนข้างสูงทำให้มุม $|\Delta\theta|$ มีค่าที่น้อยมากในรูปที่ 9 (เส้นประสีดำในกรณีที่ $\bar{k}_1 = 100$)



า) มุม $|\Delta\theta|$ กรณีที่สปริงด้านทานการหมุนเป็นแบบ

1. ยืดหยุ่นเชิงเส้น (สีดำ)
2. ยืดหยุ่นเชิงเส้นคู่ (สีแดง)
3. อีลาสติค-พลาสติก (สีน้ำเงิน)

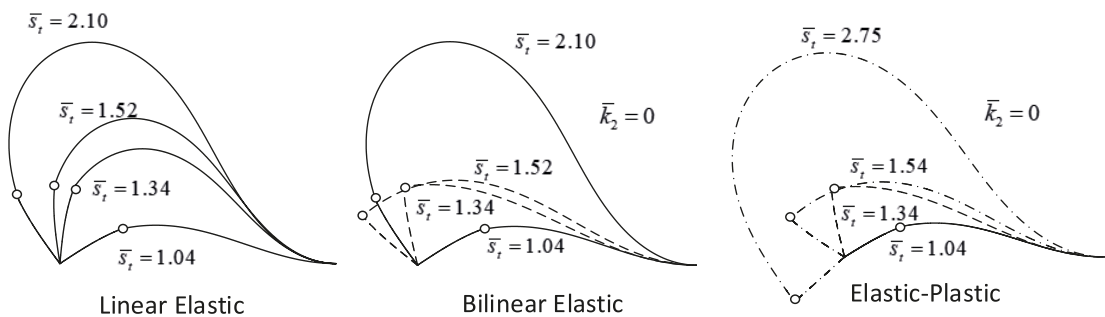
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของมุม $|\Delta\theta|$ และความยาวส่วนโค้งทั้งหมด $\bar{s}_t$ และการหมุนกลับด้านของมุม $|\Delta\theta|$

3.4 รูปร่างสมดุของ Elastica

รูปร่างสมดุของ Elastica ที่สอดคล้องกับตำแหน่งต่างๆ บนเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุก $\bar{P}$ และความยาวส่วนโค้งทั้งหมด $\bar{s}_t$ แสดงดังในรูปที่ 7 โดยเปรียบเทียบรูปร่างสมดุของ Elastica ในสามกรณีเมื่อสปริงต้านทานการหมุนเป็นแบบ 1) ยึดหยุ่นเชิงเส้น 2) ยึดหยุ่นเชิงเส้นคู่ และ 3) อีลาสติก-พลาสติกดังแสดงในรูปที่ 10a) และ 10b) ในที่นี้ได้นำเสนอรูปร่างสมดุที่ตำแหน่งของสปริงต้านทานการหมุนสองตำแหน่งได้แก่ $\alpha = 0.25$ และ 0.75 โดยเส้นทึบแสดงถึงรูปร่างของ Elastica ที่สปริงต้านทานการหมุนเป็นแบบยึดหยุ่นเชิงเส้น (พฤติกรรมตามช่วงที่ I ในรูปที่ 2) เส้นประหมายถึงรูปร่างของ Elastica ที่สปริงต้านทานการหมุนเป็นแบบยึดหยุ่นเชิงเส้นคู่ (พฤติกรรมตามช่วงที่ II ในรูปที่ 2) และเส้นประจุดแสดงถึงรูปร่างของ Elastica เมื่อเกิดการหมุนกลับด้านของมุม $|\Delta\theta|$ และสปริงต้านทานการหมุนมีพฤติกรรมแบบอีลาสติก-พลาสติก (พฤติกรรมตามช่วงที่ III ในรูปที่ 2) เมื่อได้สังเกตการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างสมดุของ Elastica ที่เกิดการครากและสลิปเนส $\bar{k}_2 = 0$ ในกรณีที่สปริงต้านทานการหมุนเป็นแบบยึดหยุ่นเชิงเส้นคู่ จะเห็นได้ว่ามุมของสปริงหมุนเกิดการหักงออย่างชัดเจนอันเนื่องมาจากจุดหมุนได้กลายเป็นจุดหมุน

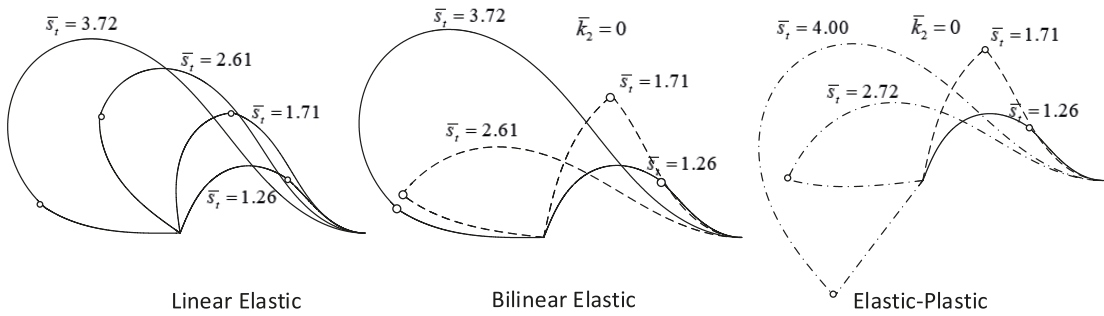
พลาสติก (Plastic Hinge) และเมื่อทำการเพิ่มความยาวส่วนโค้งต่อไปจะพบว่ามุม $|\Delta\theta|$ เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดและลดลงจนกระทั่งมุม $|\Delta\theta| \leq |\Delta\theta_p|$ ซึ่งหลังจากจุดนี้พฤติกรรมของ Elastica จะเหมือนกับกรณีที่สปริงหมุนเป็นแบบยึดหยุ่นเชิงเส้น ลักษณะของการหมุนกลับด้านของสปริงต้านทานการหมุนในกรณีนี้สามารถแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 10c) ซึ่งแสดงรูปร่างสมดุของ Elastica และมุม $|\Delta\theta|$ ในรูปร่างของ Elastica ที่ 1 ถึง 4 มุม $|\Delta\theta|$ มีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อการโก่งตัวเพิ่มขึ้น และเมื่อการโก่งตัวเพิ่มขึ้นมุม $|\Delta\theta|$ มีค่าที่ลดลงแสดงให้เห็นถึงการหมุนกลับด้านของสปริงต้านทานการหมุนในรูปร่างของ Elastica ที่ 5 และ 6

ในกรณีที่สปริงต้านทานการหมุนมีพฤติกรรมแบบอีลาสติก-พลาสติก ซึ่งมีพฤติกรรมแบบยึดหยุ่นเชิงเส้นในช่วงแรก แบบยึดหยุ่นเชิงเส้นคู่ในช่วงที่สอง และในช่วงที่สามเมื่อมุม $|\Delta\theta|$ หมุนกลับด้านจะหมุนกลับด้วยสลิปเนสของสปริงที่เท่ากับสลิปเนสในช่วงแรกคือ $\bar{k}_1$ ซึ่งเห็นได้ว่ามีพฤติกรรมที่แตกต่างจากกรณีของสปริงเชิงเส้นคู่คือในการหมุนกลับด้านของสปริงพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของมุมค่อนข้างน้อยเนื่องจากสปริงมีค่าสลิปเนสที่สูงขึ้น และด้วยเหตุผลนี้ทำให้น้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ เพิ่มขึ้นเช่นกัน

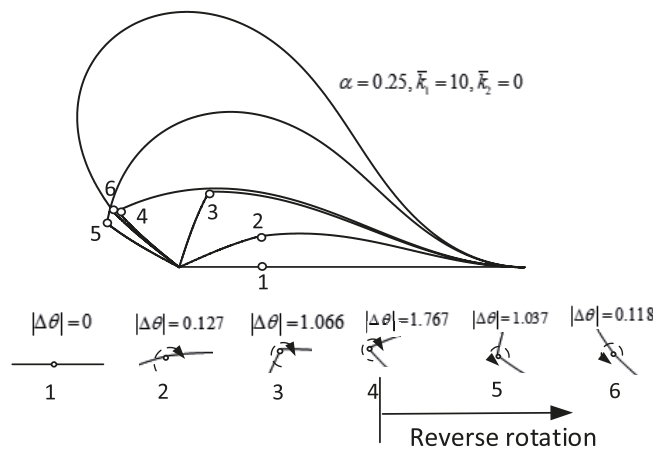


- a) $\alpha = 0.25, \bar{k}_1 = 10$ เส้นทึบคือการโก่งตัวในช่วงยึดหยุ่นเชิงเส้น เส้นประคือการโก่งตัวในช่วงยึดหยุ่นเชิงเส้นคู่ เส้นประจุดเป็นการโก่งตัวเมื่อสปริงหมุนกลับด้านในช่วงอีลาสติก-พลาสติก

รูปที่ 10 รูปร่างสมดุของ Elastica



b) $\alpha = 0.75, \bar{k}_1 = 10$ เส้นทึบคือการโก่งตัวในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น เส้นประคือการโก่งตัวในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นคู่ เส้นประจุดเป็นการโก่งตัวเมื่อสปริงหมุนกลับด้านในช่วงอีลาสติก-พลาสติก



c) แสดงหมุนกลับด้านของสปริงด้านทานการหมุน

รูปที่ 10 รูปร่างสมดุลของ Elastica (ต่อ)

4. สรุปผล

การศึกษาพฤติกรรมของ Elastica ที่มีสปริงด้านทานการหมุนอยู่ภายในช่วงความยาวของ Elastica ในบทความนี้ได้ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธี Shooting Method โดยการอินทิเกรตระบบสมการอนุพันธ์รอบคลุมปัญหา ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดขึ้น โดยมีการแปรผันตัวแปรที่สำคัญคือ ค่าสตีเฟนส และตำแหน่งของสปริงด้านทานการหมุน โดยที่ค่าสตีเฟนสของสปริงด้านทานการหมุนได้ถูกจำลองให้สอดคล้องกับพฤติกรรมของการหมุนของสปริงในสามรูปแบบคือ 1) แบบยืดหยุ่นเชิงเส้น 2) แบบยืดหยุ่นเชิงเส้นคู่ และ 3) แบบอีลาสติก-พลาสติก ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ในช่วงแรกหลังการโก่งเดาะ Elastica มีสมดุลที่ไร้เสถียรภาพในทุกกรณี
2. ภายหลังการเกิดการครากของสปริงด้านทานการหมุน น้ำหนักบรรทุกทุก $\bar{P}$ มีค่าที่ลดลง (เทียบกับกรณียืดหยุ่นเชิงเส้น) ในขณะที่มุม $|\Delta\theta|$ มีขนาดที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่าสตีเฟนสที่ลดลง และการลดลงของน้ำหนักบรรทุกทุก $\bar{P}$ (การเพิ่มขึ้นของมุม $|\Delta\theta|$) จะสังเกตเห็นชัดเจนมากขึ้นเมื่อสตีเฟนสหลังการครากมีค่าเป็นศูนย์ ($\bar{k}_2 = 0$)
3. จากการแปรผันค่าของอัตราส่วน r จาก 1 ถึง 0 พบว่าในทุกตำแหน่งของสปริงด้านทานการหมุน α มีพฤติกรรม

- ที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือมีการลดลงของน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ภายหลังการคราก (เมื่อเทียบกับกรณีที่สปริงด้านทานการหมุนเป็นแบบยึดหยุ่นเชิงเส้น) แต่เมื่อ $r = 0$ ($\bar{k}_2 = 0$) จะสามารถสังเกตพฤติกรรมได้ชัดเจนที่สุด
4. สติพเนสนในช่วงเริ่มต้น $\bar{k}_1$ มีผลต่อค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤต $\bar{P}_{cr}$ (เช่นเดียวกับตำแหน่งของสปริงด้านทานการหมุน α) และภายหลังการโก่งเดาะค่าสติพเนส $\bar{k}_1$ ที่มากกว่าเช่น $\bar{k}_2 = 100$ จะมีน้ำหนักบรรทุก $\bar{P}$ ที่สูงกว่ากรณี $\bar{k}_1$ มีค่าน้อย และเนื่องจากค่าสติพเนสที่สูงจะทำให้ค่าของมุม $|\Delta\theta|$ มีค่าที่ต่ำลง
 5. ภายหลังการครากเมื่อสปริงด้านทานการหมุนเป็นแบบยึดหยุ่นเชิงเส้นคู่ หรือแบบอิลาสติก-พลาสติก อาจพบลักษณะสมดุลที่มีเสถียรภาพได้ในช่วงสั้นๆ ซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดเจนเมื่อ $r = 0$
 6. การหมุนกลับด้านของสปริงด้านทานการหมุนในกรณีของสปริงด้านทานการหมุนแบบอิลาสติก-พลาสติก จะทำให้น้ำหนักบรรทุกมีค่าที่มากกว่ากรณีของสปริงด้านทานการหมุนแบบเชิงเส้นคู่ อันเนื่องจากค่าสติพเนสที่กลับมาเท่ากับค่าสติพเนสในช่วงเริ่มต้น

5. เอกสารอ้างอิง

1. Kunetsov, V.V. and Levyakov, S.V., 2002, "Complete Solution of the Stability Problem for Elastica of Euler's Column," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 37 (6), pp. 1003-1009.
2. Phungpaingam, B. and Chucheeepsakul, S., 2005, "Post-buckling of an Elastic Column with Various Rotational End Restraints," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 5 (1), pp. 113-123.
3. Mahasuwanchai, P., Athisakul, C., Chucheeepsakul, S. and Phungpaingam, B., 2016, "Effect of Material Nonlinearity on the Large Deflections of Cantilever Beam made of Generalized Ludwick Material Subjected to Tension from Guyed Cable," *KMUTT Research and Development Journal*, 39 (4), pp. 511-531. (In Thai)
4. Supperm, S. and Phungpaingam, B., 2017, "Application of Differential Transformation Method to Study Postbuckling Behavior of Cantilever Column under End Loading," *KMUTT Research and Development Journal*, 40 (1), pp. 73-90. (In Thai)
5. Phungpaingam, B., Athisakul, C. and Chucheeepsakul, S., 2009, "Large Deflections of Spatial Variable-Arc-Length Elastica under Terminal Forces," *Structural Engineering and Mechanics, An International Journal*, 32 (4), pp. 501-516.
6. Phungpaingam, B. and Chucheeepsakul, S., 2018, "Postbuckling Behavior of Variable-Arc-Length Elastica Connected with Rotational Spring Joint Including the Effect of Configurational Force," *Meccanica*, 53 (10), pp. 2619-2636.
7. Klaycham, K., Athisakul, C. and Chucheeepsakul, S., 2014, "Finite Element Method for Critical Top Tension Analysis of Naturally Buoyant Riser," *KMUTT Research and Development Journal*, 37 (4), pp. 429-446. (In Thai)
8. Dado, M., Al-Sadder, S. and Abuzeid, O., 2004, "Post-Buckling Behavior of Two Elastica Columns Linked with a Rotational Spring," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 39 (10), pp. 1579-1587.
9. Monasa, F.E., 1974, "Deflections and Stability Behavior of Elasto-Plastic Flexible Bars," *Journal of Applied Mechanics*, 41 (2), pp. 537-538.
10. Yu, T.X. and Johnson, W., 1982, "The Plastic: The Large Elastic-Plastic Deflection of a Strut," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 17 (3), pp. 195-209.
11. Luan, F. and Yu, T.X., 1991, "An Analysis of the Large Deflection of an Elastic-Plastic Cantilever Subjected to an Inclined Concentrated Force," *Applied Mathematics and Mechanics*, 12 (6), pp. 547-555.
12. Pandit, D. and Srinivasan, S.M., 2016, "Numerical Analysis of Large Elasto-Plastic Deflection of Constant Curvature Beam under Follower Load," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 84, pp. 46-55.

13. Bosi, F., Misseroni, D., Dal Corso, F. and Bigoni, D., 2015, "Development of Configurational Force during the Injection of an Elastic Rod," *Extreme Mechanics Letters*, 4, pp. 83-88.
14. Bosi, F., Misseroni, D., Dal Corso, F., Neukirch, S. and Bigoni, D., 2016, "Asymptotic Self-Restabilization of a Continuous Elastic Structure," *Physical Review E*, 94 (6), 063005.
15. Wang, C.Y., Wang, C.M. and Aung, T.M., 2004, "Buckling of a Weakened Column," *Journal of Engineering Mechanics*, 130 (11), pp. 1373-1376.

สมบัติต้านรังสียูวีและยับยั้งแบคทีเรียของผ้าฝ้ายย้อมราช้าวแดง

มาหามะสุโฮมี มะแซ^{1*}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ต.บ่อทราย อ.เมือง จ.สงขลา 90000

ประมวล ทรายทอง²

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10903

พิรวัส คางสง³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

และ สายใจ วัฒนเสน⁴

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ต.เขารูปช้าง อ.เมือง สงขลา 90000

* Corresponding Author: susumeme1983@yahoo.com

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

² นักวิจัยชำนาญการพิเศษ ฝ่ายจุลชีววิทยาประยุกต์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

³ อาจารย์ สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

⁴ อาจารย์ โปรแกรมวิชาชีววิทยาและชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 15 มีนาคม 2562

แก้ไข : 8 พฤษภาคม 2563

ตอบรับ : 10 มิถุนายน 2563

คำสำคัญ :

ราช้าวแดง / สีย้อมธรรมชาติ /

ความคงทนของสี / ผ้าฝ้าย

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือเพื่อพัฒนาการย้อมผ้าฝ้ายโดยใช้ราช้าวแดงหรือโมแนสคัส (*Monascus* spp.) โดยใช้อะลูมิเนียมโพแทสเซียมซัลเฟตหรือสารส้ม ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) เป็นสารช่วยติดสีพร้อมกับการย้อมสี ทำการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก น้ำ เหงื่อ และแสง ตามมาตรฐาน AATCC ศึกษาการต้านรังสียูวีของผ้าฝ้ายด้วยการคำนวณค่าแฟกเตอร์การต้านรังสียูวี วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในสีย้อมราช้าวแดงด้วยเทคนิคฟูเรียร์-ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และทดสอบการยับยั้งแบคทีเรียของผ้าฝ้ายต่อเชื้อ *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* จากผลการทดลอง พบว่า การย้อมราช้าวแดงโดยใช้สารส้มปรับพีเอชเท่ากับ 7 สามารถยับยั้งแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ร้อยละ 69 และ 97 ตามลำดับ ในเวลา 2 ชั่วโมง ผ้าที่ย้อมด้วยราช้าวแดงมีสีน้ำตาล ในขณะที่เมื่อใช้สารช่วยติดสีที่เป็นสารส้มจะมีสีน้ำตาลแดงเข้ม สีย้อมผ้าฝ้ายมีความคงทนต่อการซัก เหงื่อ น้ำ และแสงอยู่ในระดับปานกลางถึงดี การต้านรังสียูวีอยู่ในระดับค่าสูงสุด สารที่สกัดได้จากราช้าวแดงมีส่วนประกอบของสารในกลุ่มซิทรีนิน ($C_{13}H_{14}O_5$) ซึ่งมีสมบัติยับยั้งแบคทีเรียราช้าวแดงจึงนับเป็นอีกตัวเลือกหนึ่งที่สามารถใช้ในการย้อมผ้าฝ้ายและในการผลิตสีย้อมผ้า

UV Protection and Antibacterial Properties of Cotton Fabrics Dyed with *Monascus* spp.

Mahamasuhaimi Masae^{1*},

Rajamangala University of Technology Srivijaya, Boyang, Muang, Songkhla 90000

Pramuan Saithong²,

Kasetsart University, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10903

Peerawas Kongsong³

Rajamangala University of Technology Isan, Nai-muang, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

and Saijai Wattanasen⁴

Songkhla Rajabhat University, Khoa-Roob-Chang, Muang, Songkhla 90000

* Corresponding Author: susumeme1983@yahoo.com

¹ Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

² Researcher, Department of Applied Microbiology, Institute of Food Research and Product Development.

³ Lecturer, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering and Architecture.

⁴ Lecturer, Department of Biology and Applied Biology, Faculty of Science.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: March 15, 2019

Revised: May 8, 2020

Accepted: June 10, 2020

Keywords:

Monascus spp. /

Natural Dye /

Color Fastness / Cotton

The objective of this study was to develop the cotton fabric dyeing process using *Monascus* spp. A mordant, i.e., aluminum potassium sulphate, was used to dye fabric via the use of the meta-mordanting procedures. The color fastness to washing, water, perspiration and light of the dyed samples was determined according to the AATCC test methods. The UV-protection properties of the dyed fabrics were investigated via transmittance measurement using the calculated ultraviolet protection factor. Chemical functional groups of the dyes were characterized via Fourier-transform infrared spectroscopy. Antibacterial activity of the dyed fabrics was confirmed by exposing the samples to *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. The results showed that the fabrics dyed with *Monascus* spp. and mordanted with alum to pH 7 reduced the number of viable organisms by 69% and 97%, respectively, within 2 hours. Cotton fabrics dyed with *Monascus* spp. exhibited a shade of brown, while those mordanted with alum exhibited a red brown color shade. Color fastness to washing, perspiration, water and light was noted to be at fair to good level. The UV protection characteristics of the dyed samples were excellent. *Monascus* spp. contains citrinin, which exhibits antibacterial properties. *Monascus* spp. dye therefore has a potential to serve as a functional dye and be a part of the cotton dyeing natural colourant system.

1. บทนำ

สีย้อมสิ่งทอจากธรรมชาติ คือ สีที่ได้จากธรรมชาติ สีชนิดนี้มีความปลอดภัยมากกว่าสีสังเคราะห์ นอกจากการผลิตและกระบวนการย้อมจะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังปลอดภัยกับผู้สวมใส่ สีธรรมชาติเป็นสีที่สกัดได้จากใบไม้ต่างฤดูก็ให้สีที่แตกต่างกัน เช่น ไม้โกงกาง [1] ดอกไม้บานาชนิดของอิตาลี [2] หรือการใช้ชาดำย้อมสีผ้าขนสัตว์ [3] เป็นต้น รวมทั้งสีจากราบางชนิด ที่น่าสนใจ คือ สีจากราข้าวแดง (red yeast rice) เป็นสารให้สีแดงที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย ใช้เป็นสีผสมอาหารในประเทศจีนมานานับพันปี ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาเชื้อราสายพันธุ์นี้ จนสามารถผลิตเพื่อใช้ประโยชน์ได้ในระดับอุตสาหกรรมและประยุกต์ใช้เป็นยา เนื่องจากมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ลดคลอเรสเตอรอล และยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เป็นต้น ราชนิดนี้เป็นเชื้อราสายพันธุ์ *Monascus purpureus* ราข้าวแดงเกิดจากการหมักข้าวหนึ่งด้วยราข้าวแดง เชื้อราจะเจริญเติบโตบนข้าว ย่อยข้าวและสร้างสารสีออกมา สีของราข้าวแดงเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ให้สี 6 ชนิด คือ สารให้สีส้ม รูโบรพันทาทิน (Rubropunctatine) โมนาสโครูบริน (Monascorubrine) รูโบรพันทามีน (Rubropunctamine) โมนาสโครูบรามิน (Monascorubramine) สารให้สีเหลือง คือ โมนาสซิน (Monascine) และอันกาฟลาวิน (Ankaflavine) ซึ่งสารที่ให้สีแดงที่เป็นความต้องการของตลาดสูง คือ โมนาสโครูบรามิน (Monascorubramine) [4] แต่เนื่องจากสีที่ได้จากธรรมชาติมีความคงทนต่อการซัก ล้างหรือเหี่ยว น้อยกว่าสีสังเคราะห์ งานวิจัยจึงศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพความคงทนของสีด้วยสารช่วยติดสี (Mordant) ต่างๆ หรือสารละลายโลหะ ได้แก่ คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) เฟอรัสซัลเฟต (FeSO_4) ซิงค์ซัลเฟต (ZnSO_4) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และ แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) [3] เป็นต้น ซึ่งสามารถเพิ่มความคงทนของสีสกัดจากธรรมชาติได้ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาสีย้อมธรรมชาติให้มีความปลอดภัยเพิ่มขึ้น ซึ่งมีการศึกษาการต้านรังสียูวีจากดวงอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 200-400 nm ที่เป็นสาเหตุให้ผิวหนังมนุษย์เกิดการเกรียมแดด เป็นฝ้า แห้ง กร้าน เกิดรอยเหี่ยวย่น และอาจทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้ ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการต้านรังสียูวีในผ้า คือ สารเคมีและสารเติม และสีของผ้า นั่นเอง [5] ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจอย่างยิ่งที่จะศึกษาการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีที่สกัดด้วยราข้าวแดง เพื่อศึกษาสมบัติการ

ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและต้านทานรังสียูวีในผ้าฝ้าย และเป็นอีกทางเลือกในการพัฒนาและเพิ่มมูลค่าสินค้าให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคทั้งในด้านประโยชน์ใช้สอย ความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการต้านรังสียูวีของผ้าฝ้ายย้อมด้วยราข้าวแดง ที่ปรับด้วยค่าพีเอชต่างกัน
2. เพื่อศึกษาความคงทนของสีผ้าฝ้ายย้อมด้วยราข้าวแดง
3. เพื่อศึกษาการยับยั้งแบคทีเรียของผ้าฝ้ายย้อมด้วยราข้าวแดง

3. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีย้อมผ้าด้วยน้ำสีสกัดจากราข้าวแดง ใช้ราข้าวแดงรหัสสายพันธุ์ IFRPD 4046 ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้พบว่าให้ปริมาณสารสีแดงสูงสุดถึง 222 หน่วย/100 กรัม ต่อน้ำหนักแห้ง [6] ขั้นตอนแรกศึกษาความสะอาดผ้าฝ้ายขนาด 50x50 เซนติเมตร ด้วยผงซักฟอกแล้วตากให้แห้ง เพื่อกำจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรก การสกัดสีทำได้โดยนำราข้าวแดง 1 กรัม เติมนลงในเอทานอล (99.9%, J.T. Baker, PA, USA) ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น และกวน 1 ชั่วโมง แล้วกรองเก็บน้ำสีที่สกัดได้ ย้อมผ้าฝ้ายพร้อมสารช่วยติดสี โดยนำผ้าฝ้ายมาย้อมในน้ำสีปริมาตร 250 มิลลิลิตร และสารส้มในอัตราส่วนของสารช่วยติดสี 0.44 กรัม ต่อน้ำสี 250 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 10 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90°C เป็นเวลา 60 นาที

การปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำสีทำได้ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (36.5-38% HCl, J.T. Baker, PA, USA) หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (98% NaOH, Loba Chemie, Mumbai, India) โดยศึกษาค่าพีเอช 3, 7 และ 10 ต้มย้อมผ้าฝ้ายที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากตากผ้าให้แห้ง ทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก เหี่ยว น้ำ และแสง และอ้างอิงตามมาตรฐานความคงทนสีตามมาตรฐานทดสอบสิ่งทอ คือ AATCC Test Method 61-2010, AATCC TM 15:2009, AATCC Test Method 107-2009 และ AATCC TM 16: 2004 OPTION 3 ตามลำดับ

4. การทดสอบสมบัติของผ้าฝ้ายย้อมสี

น้ำสีวัดค่าพีเอชเริ่มต้นและขณะปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่องวัดค่าพีเอช รุ่น ad12, Adwa (Szeged, Hungary) ซึ่งค่าพีเอชน้ำสีเริ่มต้นเท่ากับ 4.33 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของผ้าฝ้ายย้อมสีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) รุ่น Vertex70, Bruker (MA, USA) เทคนิค KBr Pellet การทดสอบความต้านทานรังสียูวีและการส่องผ่านแสง ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-vis Spectrophotometer) รุ่น Genesys 10s, Thermo Scientific (MA, USA) ตามมาตรฐาน (AATCC Test Method 183-2004) และคำนวณค่าการต้านรังสียูวี [2] จากสมการที่ (1)

$$UPF = \frac{\sum_{280}^{400} E_{\lambda} S_{\lambda} \Delta_{\lambda}}{\sum_{280}^{400} E_{\lambda} T_{\lambda} S_{\lambda} \Delta_{\lambda}} \quad (1)$$

เมื่อ: E_{λ} คือ ค่าความเข้มรังสีที่มีผลกระทบต่อผิวหนังมนุษย์ S_{λ} คือ ความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์ T_{λ} คือ ค่าการส่องผ่านของแสงผ่านชิ้นตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์ได้ และ Δ_{λ} คือ ความยาวคลื่นที่ใช้ทดสอบ (nm)

ซึ่งค่า UPF จะบ่งบอกความสามารถในการป้องกันรังสียูวีของวัสดุสิ่งทอ และเปรียบเทียบกับมาตรฐานการป้องกันรังสียูวี UPF [2] สำหรับผลการทดสอบการต้านรังสียูวีได้ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 5 ตัวอย่าง

4.1 การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

การทดสอบสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียจะทดสอบกับแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ แกรมบวก คือ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และ แกรมลบ คือ *Escherichia coli* (*E. coli*) โดยเริ่มต้นนำเชื้อแบคทีเรียใส่ในหลอดทดลองที่มีอาหารเหลว Trypticase soy broth (Difco, PA, USA) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร แล้วบ่มที่ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมเชื้อแบคทีเรียปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงใน 0.85 เปอร์เซ็นต์ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl, Ajax Finechem, New South Wales, Australia) ในน้ำกลั่น ปริมาตร 9 มิลลิลิตร โดยใช้วิธีการเจือจางตัวอย่างเชื้อเริ่มต้น เพื่อการนับจำนวนจุลินทรีย์ (Serial dilution method) แล้วนำเชื้อมาเจือจาง 0.1 มิลลิลิตร หยดบนอาหารแข็ง

สำหรับเชื้อ *E. coli* จะใช้อาหาร MacConkey agar (Difco, PA, USA) ส่วนเชื้อ *S. aureus* จะใช้อาหาร Nutrient agar (Difco, PA, USA) โดยใช้เทคนิค Spread plate แล้วเจือจางจำนวนเชื้อให้อยู่ในช่วง 30-300 โคโลนี หลังจากรู้ความเข้มข้นของเชื้อตั้งต้นแล้ว ก็นำเชื้อที่ได้ไปเตรียมให้มีความเข้มข้นเชื้อประมาณ 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร แล้วทดสอบตามมาตรฐานทดสอบการยับยั้งแบคทีเรียของสิ่งทอ คือ AATCC Test Method 100-2004 การคำนวณอัตราการลดลงของแบคทีเรีย (% Disinfection) ด้วยสมการที่ (2)

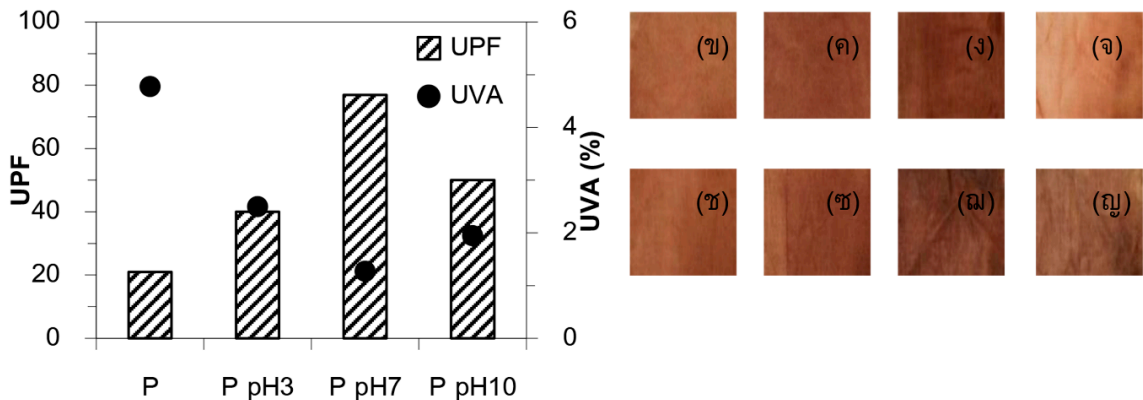
$$\% \text{ Disinfection} = \frac{N}{N_0} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนเชื้อเริ่มต้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และ N คือ จำนวนเชื้อ ณ เวลาทดสอบ โคโลนีต่อมิลลิลิตร

5. ผลการวิจัย

5.1 การต้านรังสียูวี

ผลการทดลอง UPF ดังรูปที่ 1(ก) พบว่าผ้าฝ้ายย้อมด้วยราข้าวแดงที่ปรับค่าพีเอชและผสมสารส้มจะมีค่า UPF สูงขึ้น และผ้าฝ้ายย้อมด้วยราข้าวแดงที่ปรับค่าพีเอช 7 และสารส้มมี ค่า UPF สูงสุดถึง 76 ในขณะที่ผ้าฝ้ายย้อมด้วยราข้าวแดง (P) มีค่า UPF เพียง 20 ตามลำดับ ดังรูปที่ 1 (ก) ซึ่งผลการทดสอบค่าแฟกเตอร์การต้านรังสียูวีในระดับช่วง 40-50 ดังกล่าว แสดงถึงความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลตได้สูงสุด ผลการทดสอบค่าการส่องผ่านแสงของยูวีเอ (UVA) ที่เป็นรังสีอันตราย ทำให้เกิดรอยย่น ริ้วรอยก่อนวัย ทำลายเส้นใยคอลลาเจนและวิตามินเอ และทำให้เกิดผิวสีแทนนั้นพบว่าผ้าฝ้ายย้อมดังกล่าวมีค่าการส่องผ่านแสงต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ในทุกสูตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานยุโรป (The European Standard for Sun Protective Clothing) และมาตรฐานจีน (The Chinese National standard GB/T18830-2002) คือ ผ้าที่สามารถต้านรังสียูวีได้ดี [2, 7] การใช้สารส้มเป็นสารช่วยติดสีทำให้ค่าการต้านรังสียูวีได้ด้นั้น เนื่องจากสารส้มมีกลุ่มไอออนของโลหะที่สามารถต้านทานรังสียูวีได้ นอกจากนี้โดยปกติราข้าวแดงจะประกอบไปด้วยสารให้สีหลายสี คือ ส้ม แดง เหลือง ซึ่งปริมาณสารให้สีจะขึ้นกับค่าพีเอชของสาร โดยในช่วงพีเอช 6-7 ราข้าวแดงจะผลิตสารให้สีแดงเกิดขึ้นมากที่สุด ซึ่งสารให้



รูปที่ 1 ก) การต้านรังสียูวีและลักษณะสีผ้าฝ้ายย้อมด้วยราข้าวแดง คือ (ข) ราข้าวแดง ที่ (ค) พีเอช 3 (ง) 7 และ (จ) 10 และ (ช) ผ้าฝ้ายย้อมด้วยราข้าวแดงและสารส้มที่ (ช) พีเอช 3 (ฉ) 7 และ (ญ) 10

สีแดงนี้สามารถดูดกลืนแสงเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 400-500 nm ดังรูปที่ 1(ก) [8]

5.2 ลักษณะทางกายภาพและความคงทนของสี

ลักษณะสีผ้าที่ได้จากการย้อมด้วยตาเปล่าแสดงดังรูปที่ 1 (ข-ญ) จะเห็นว่าผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยราข้าวแดงมีลักษณะสีน้ำตาลแดงและผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยราข้าวแดงที่ปรับค่าพีเอช 3, 7 และ 10 ผ้าฝ้ายจะมีสีน้ำตาลแดงเข้ม เมื่อใช้สารส้มเป็นสารช่วยติดสีจะเห็นได้ว่าผ้าฝ้ายติดสีน้ำตาลแดงเข้มกว่าไม่ใส่สารส้ม

ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก เหงื่อ และน้ำ โดยนำผ้าย้อมสูตรต่างๆ ซักรวมกับผ้าชนิดต่างๆ และดูการตกติดของสีแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าผ้าฝ้ายย้อมด้วยราข้าวแดงผสมสารส้มมีแนวโน้มมีค่าความคงทนสีดีกว่าเมื่อไม่ใช้ ซึ่งค่าความคงทนของสีต่อการซักสีมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจนเกือบ

พอสังเกตได้ (ระดับ 3.5-4.0) และการตกติดผ้าขาวเล็กน้อย (ระดับ 3.5-4.5) ความคงทนของสีต่อเหงื่ออยู่ในระดับสีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (ระดับ 3.5-4.0) และตกติดผ้าขาวพอสังเกตได้เล็กน้อย (ระดับ 3.0-4.0) ค่าความคงทนของสีต่อน้ำ พบว่าสีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจนเกือบสีเปลี่ยนแปลงพอสังเกตได้ (ระดับ 3.5-4.0) และตกติดผ้าขาวพอสังเกตได้เล็กน้อย

ผลการทดสอบความคงทนต่อแสงทดสอบที่ 20-40 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 3 พบว่าผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยราข้าวแดงที่ใช้สารส้มมีการตกติดสีน้อยกว่าในระดับพอสังเกตได้ (ระดับ 2.5-3.0) ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ไม่ใช้สารส้มซึ่งจะสีเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก (ระดับ 1.5) การเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะเกิดขึ้นจากการแตกตัวของโมเลกุลในสีย้อมกลุ่มไฮดรอกซิล ภายใต้สภาวะการทดสอบในสารละลายที่เป็นด่างที่ใช้ผงซักฟอกในการทดสอบ [9] และการสลายตัวของสารประกอบในสีย้อม [10]

ตารางที่ 1 ความคงทนของสีต่อการซัก ต่อเหงื่อและต่อน้ำ

ผลการทดลอง	ความคงทนของสี								
	ต่อการซัก			ต่อเหงื่อ			ต่อน้ำ		
การย้อมผ้าฝ้าย	น้ำจืด	pH = 7	pH = 7 + สารส้ม	น้ำจืด	pH = 7	pH = 7 + สารส้ม	น้ำจืด	pH = 7	pH = 7 + สารส้ม
สีเปลี่ยนจากเดิม (ระดับ)	3.5	3.5	4.0	3.5	3.5	4.0	3.5	3.5	4.0
สีตกติดผ้าขาว (ระดับ)									
ผ้าอะซีเตต (Acetate)	3.5	4.0	3.5	4.0	4.0	3.5	3.0	3.5	3.5
ผ้าฝ้าย (Cotton)	4.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.0
ผ้าไนลอน (Nylon)	3.5	4.0	4.0	3.0	3.5	3.5	3.5	3.5	4.0
ผ้าฝ้าย (Silk)	4.0	4.0	4.0	3.0	3.5	3.5	3.5	3.5	4.0
ผ้าวิสคอสเรยอง (Viscose Rayon)	3.5	4.0	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
ผ้าขนสัตว์ (Wool)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.5	3.5

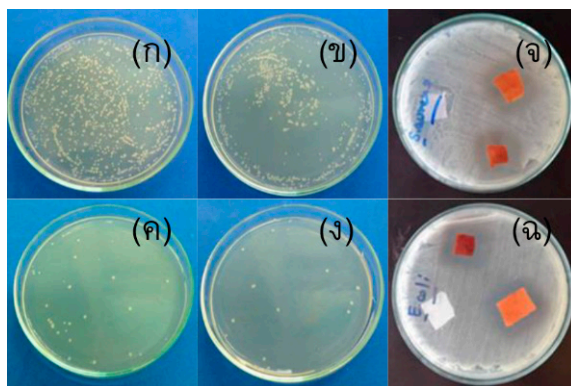
ตารางที่ 2 ความคงทนของสีต่อการซัก ต่อเหงื่อและต่อน้ำ

ความคงทนของสีต่อแสง	ผลการทดลอง		
การย้อมผ้าฝ้าย	น้ำจืด	pH = 7	pH = 7 + สารส้ม
สีเปลี่ยนจากเดิม (ระดับ)			
20 ชั่วโมง	1.5	1.5	3.0
40 ชั่วโมง	1.5	1.5	2.5

5.3 การยับยั้งแบคทีเรีย

รูปที่ 2 แสดงผลการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* และ *E. coli* และผลการทดสอบขอบเขตใส (Clear zone) ของผ้าฝ้ายอมสีจากราข้าวแดงและสารส้มปรับค่าพีเอช 7 ดังรูปที่ 2 (ก) และ (ข) พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที และ 2 ชั่วโมง ผ้าฝ้ายอมราข้าวแดงที่ใช้สารส้มเป็นสารช่วยติดสี สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ได้ 43 และ 69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* รูปที่ 2 (ค) และ (ง) ที่เวลา 30 นาที และ 2 ชั่วโมง พบว่าสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ 94 และ 97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อทดสอบขอบเขตใสจะสังเกตเห็นได้ว่ารอบๆ ผ้าฝ้ายอมจะพบเชื้อแบคทีเรียเจริญอยู่ในปริมาณน้อย (วงใส) อยู่รอบตัวอย่าง เมื่อเทียบกับ

กับผ้าที่ไม่ได้ย้อม (ผ้าสีขาว) รูปที่ 2 (จ) และ (ฉ) ที่เป็นเช่นนี้ เพราะสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของราข้าวแดงสายพันธุ์โมแนสคัส เกิดจากสารซิทรินินที่มีอยู่ในราข้าวแดงมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา และโปรโตซัว เป็นต้น และราข้าวแดงยังประกอบไปด้วยสารประกอบฟีนอลิกที่พบได้มากในสมุนไพรและข้าวไทย สารประกอบนี้มีสมบัติป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของร่างกายได้อีกด้วย [11-15] นอกจากนี้จากงานวิจัยอื่นๆ พบว่าสารส้ม ซึ่งประกอบไปด้วยไอออนของโลหะยังมีสมบัติยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้อีกด้วย ซึ่งไอออนนี้จะเกาะและทำลายผนังเซลล์ ส่งผลให้เซลล์แบคทีเรียตายในที่สุด [13, 16]

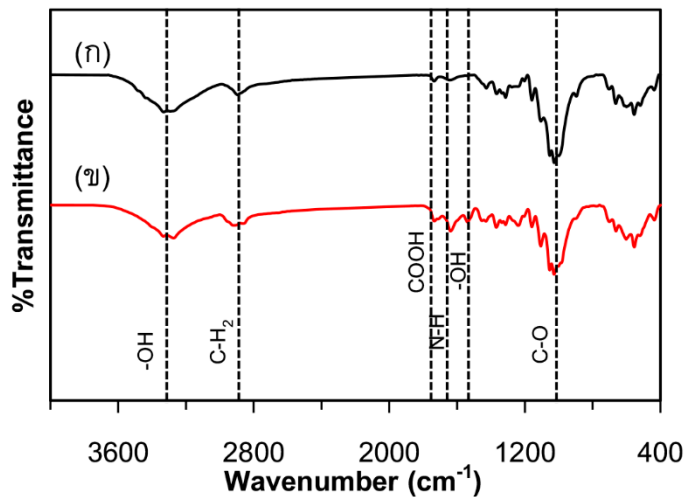


รูปที่ 2 ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของผ้าฝ้ายอมราข้าวแดงและสารส้ม *S. aureus* (ก) 30 นาที (ข) 2 ชั่วโมง และ *E. coli* (ค) 30 นาที และ (ง) 2 ชั่วโมง และการทดสอบขอบเขตใส (จ) *S. aureus* และ (ฉ) *E. coli*

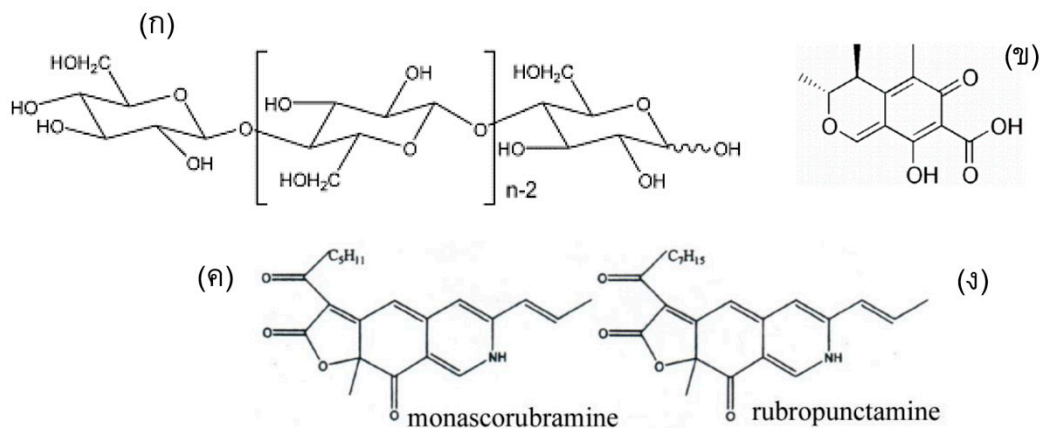
5.4 องค์ประกอบทางเคมีของผ้าฝ้ายอมราข้าวแดงวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

รูปที่ 3 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผ้าฝ้ายอมราข้าวแดงด้วยเทคนิค FTIR เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าฝ้ายที่ไม่ย้อมราข้าวแดง พบว่าผ้าฝ้ายอมราข้าวแดงมีตำแหน่งเลขคลื่นที่มีการดูดกลืนที่มีความเข้มเพิ่มขึ้น แสดงค่าการดูดกลืนหลักที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1640 cm^{-1} ที่เป็นการสั่นของโครงสร้างเอไมด์ (N-H bending vibration) ของเม็ดสีที่ให้สีแดงในราข้าวแดง คือ โมนาสคอรูบาริน ($\text{C}_{23}\text{H}_{27}\text{NO}_4$) และรูโบรพันตามีน ($\text{C}_{21}\text{H}_{23}\text{NO}_4$) ดังรูปที่ 4 (ค) และ (ง) [8, 12] ตำแหน่งเลขคลื่นที่พบได้ในผ้าฝ้ายที่ย้อมและไม่ย้อมราข้าวแดง คือ การสั่นของ

ความยาวคลื่นที่ 1000 cm^{-1} คือ การยืดของพันธะ C-O และการดูดกลืนหลักที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2906 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ $-\text{CH}_2$ การสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1730 cm^{-1} เป็นการสั่นของหมู่ COOH ที่ระบุได้ว่าเป็นโครงสร้างของเซลล์ลูโลสที่เป็นส่วนประกอบของผ้าฝ้าย ดังรูปที่ 4 (ก) และสารยับยั้งเชื้อราแบคทีเรีย และโปรโตซัวที่มีอยู่ในราข้าวแดง คือ ซิทรินิน ดังรูปที่ 4 (ข) [16-18] ส่วนตำแหน่งเลขคลื่นที่ 3370 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ $-\text{OH}$ ในโครงสร้าง การสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3370 และ 1654 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ $-\text{OH}$ ที่มีในโมเลกุลน้ำ



รูปที่ 3 เทคนิค FTIR วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ (ก) ผ้าฝ้าย และ (ข) ผ้าฝ้ายย้อมราข้าวแดง



รูปที่ 4 (ก) โครงสร้างเซลล์ของเส้นใยผ้าฝ้าย (ข) ซิตรีนิน และเม็ดสีในราข้าวแดง คือ (ค) โมนาสคอร์บรามิน และ (ง) รูบรอปันตามีน [11,13-15]

6. สรุปผลการศึกษา

สีจากราข้าวแดงสามารถใช้เป็นสีย้อมจากธรรมชาติย้อมผ้าฝ้ายได้ ผ้าฝ้ายย้อมราข้าวแดงจะให้สีน้ำตาลแดง ในขณะที่สีย้อมจากการผสมสารส้มจะทำให้ผ้าฝ้ายมีสีเข้มขึ้น ผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยราข้าวแดงที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และสารส้มจะมีสมบัติต่างๆ ที่ดี คือ มีค่าการต้านรังสีสูงที่สุด เกิดจากสารให้สีแดงที่เกิดขึ้นทำให้สมบัติการดูดกลืนแสงช่วง 400-500 nm เพิ่มขึ้น ทนต่อการซัก เหงื่อและน้ำอยู่ในระดับระดับปานกลางถึงดี ความคงทนจากแสงอยู่ในระดับพอใช้ถึงปานกลาง และสมบัติการยับยั้งเชื้อ

แบคทีเรียที่ดีกว่าผ้าฝ้ายย้อมราข้าวแดงเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ถึง 97 เปอร์เซ็นต์ ผลจากซิตรีนินและไอออนโลหะที่มีอยู่ในสีย้อมดังกล่าว

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณฝ่ายวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2561

8. เอกสารอ้างอิง

1. Punrattanasin, N., Nakpathom, M., Somboon, B., Narumol, N., Rungruangkitkrai, N. and Mongkholtattanasit, R., 2013, "Silk Fabric Dyeing with Natural Dye from Mangrove Bark (*Rhizophora apiculata* Blume) Extract," *Industrial Crops and Products*, 49, pp. 122-129.
2. Grifoni, D., Bacci, L., Di Lonardo, S., Pinelli, P., Scardigli, A., Camilli, F., Sabatini, F., Zipoli, G. and Romani, A., 2014, "UV Protective Properties of Cotton and Flax Fabrics Dyed with Multifunctional Plant Extracts," *Dyes Pigments*, 105, pp. 89-96.
3. Moiz, A., Ahmed, M.A., Kausar, N., Ahmed, K. and Sohail, M., 2010, "Study the Effect of Metal Ion on Wool Fabric Dyeing with Tea as Natural Dye," *Journal of Saudi Chemical Society*, 14 (1), pp. 69-76.
4. Chatterjee, S., Maity, S., Chattopadhyay, P., Sarkar, A., Laskar, S. and Sen, S.K., 2009, "Characterization of Red Pigment from *Monascus* in Submerged Culture Red Pigment from *Monascus purpureus*," *Journal of Applied Sciences Research*, 5 (12), pp. 2102-2108.
5. Kan, C.W., 2014, "A Study on Ultraviolet Protection of 100% Cotton Knitted Fabric: Effect of Fabric Parameters," *The Scientific World Journal*, pp. 1-10.
6. Saithong, P., Chitisankul, W.T. and Nitipan, S., 2019, "Comparative Study of Red Yeast Rice with High Monacolin K, Low Citrinin Concentration and Pigments in White Rice and Brown Rice," *Czech Journal of Food Sciences*, 37, pp. 75-80.
7. Feng, X.X., Zhang, L.L., Chen, J.Y. and Zhang, J.C., 2006, "New Insights into Solar UV-protective Properties of Natural Dye," *Journal of Cleaner Production*, 15, pp. 366-372.
8. Mukherjee, G. and Singh, S.K., 2011, "Purification and Characterization of a New Red Pigment from *Monascus purpureus* in Submerged Fermentation," *Process Biochemistry*, 46 (1), pp. 188-192.
9. Räisänen, R., Nousiainen, P. and Hynninen, P., 2002, "Dermorubin and 5-chlorodermorubin Natural Anthraquinone Carboxylic Acids as Dyes for Wool," *Textile Research Journal*, 72 (11), pp. 973-976.
10. Jothi, D., 2008, "Extraction of Natural Dyes from African Marigold Flower (*Tagetes erecta* L.) for Textile Coloration," *Autex Research Journal*, 8 (2), pp. 49-53.
11. Ferdes, M., Ungureanu, C., Radu, N. and Chirvase, A.A., 2009, "Antimicrobial Effect of *Monascus purpureus* Red Rice Against some Bacterial and Fungal Strains," *New Biotechnology*, 25, pp. 1.
12. Pattanagul, P., Pinthong, R., Phianmongkhol, A. and Leksawasdi, N., 2007, "Review of Angkak Production (*Monascus purpureus*)," *Chiang Mai Journal of Science*, 34 (3), pp. 319-328.
13. Haji, A., 2012, "Antibacterial Dyeing of Wool with Natural Cationic Dye Using Metal Mordants," *Materials Science*, 18 (3), pp. 267-270.
14. Halee, A. and Rattanapun, B., "Study of Antioxidant Efficacies of 15 Local Herbs," *KMUTT Research and Development Journal*, 40 (2), pp. 283-293.
15. Halee, A. and Rattanapun, B., "Effects of Solvent Type and Concentration of Citric Acid on the Extraction of Antioxidants from Hom Nin Rice," *KMUTT Research and Development Journal*, 39 (3), pp. 353-364.
16. Wong, H.C. and Bau, Y.S., 1977, "Pigmentation and Antibacterial Activity of Fast Neutron and X-ray-induced Strains of *Monascus purpureus* Went," *Plant Physiology*, 60 (4), pp. 578-581.
17. Li, F., Xu, G., Li, Y. and Chen, Y., 2003, "Study on the Production of Citrinin by *Monascus* Strains Used in Food Industry," *Wei sheng yan jiu= Journal of Hygiene Research*, 32 (6), pp. 602-605.
18. Sabater-Vilar, M., Maas, R.F. and Fink-Gremmels, J., 1999, "Mutagenicity of Commercial *Monascus* Fermentation Products and the Role of Citrinin Contamination," *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 444 (1), pp 7-16.

เชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ดจากผลพลอยได้โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลโดยไม่ใช้ตัวประสาน

นรารธร มหรรทศนพงศ์¹ และ ยูวรัตน์ เงินเย็น^{2*}

มหาวิทยาลัยขอนแก่น ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

* Corresponding Author: nyuvarat@kku.ac.th

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 20 พฤศจิกายน 2561

แก้ไข : 17 มีนาคม 2563

ตอบรับ : 16 เมษายน 2563

คำสำคัญ :

เชื้อเพลิงแข็ง /

โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล /

กากหม้อกรองโคลน / ทอริแฟคชั่น /

ค่าความร้อน

งานวิจัยนี้ศึกษาการอัดเม็ดกากหม้อกรองโคลน ซึ่งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลให้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง โดยศึกษาผลของความดันในการอัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ด และอุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟคชั่น พบว่า การอัดเม็ดทำให้ได้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงกว่าตอนที่ไม่ได้อัดเม็ด โดยเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร สูง 1 เซนติเมตร ต้องใช้ความดันในการอัดต่ำที่สุดเท่ากับ 30 บาร์ จึงจะได้ลักษณะของเม็ดที่แน่น ไม่แตกหัก ส่วนเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ความสูงของเม็ดเท่ากัน ต้องใช้ความดันในการอัดต่ำที่สุด 40 บาร์ หากพิจารณาเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเท่ากัน เมื่อเพิ่มความดันในการอัดจะได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความร้อน ค่าความหนาแน่น ค่าความชื้น และปริมาณเถ้าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อนำตัวอย่างอัดเม็ดไปทำการทอริแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ถึง 120 นาที พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการทอริแฟคชั่นมีค่าความร้อนสูงขึ้น (21,689–22,642 kJ/kg) กว่าตอนที่ไม่ได้ทำทอริแฟคชั่น (13,954 kJ/kg) โดยมีค่าความหนาแน่นของเม็ดลดต่ำลงจาก 0.72 g/cm³ มาเป็น 0.48–0.89 g/cm³ การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟคชั่น ทำให้ค่าความร้อนของเม็ดตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าความหนาแน่นของเม็ดมีค่าลดต่ำลง

Binderless Solid Fuel Pellets from By-Product of Sugar Industry

Narathorn Mahantadsanapong¹ and Yuvarat Ngernyen^{2*}

Khon Kaen University, Mittraphap Road., Nai-Mung, Muang, Khon Kaen 40002

* Corresponding Author: nyuvarat@kku.ac.th

¹ Graduate Student, Chemical Engineering Program, Faculty of Engineering.

¹ Assistant Professor, Chemical Engineering Program, Faculty of Engineering.

Article Info

Article History:

Received: November 20, 2018

Revised: March 17, 2020

Accepted: April 16, 2020

Keywords:

Solid Fuel / Sugar Industry /

Sugar Cane Filter Cake /

Torrefaction / Heating Value

Abstract

This research studied the compression of filter cake, which is a by-product from the sugar industry, into pellet form of solid fuel. The effects of compression pressure, pellet diameter as well as temperature and time of torrefaction were investigated. The results showed that solid fuel in the pellet form had higher heating value than the original form. The minimum pressure for forming pellets with the diameter and height of 1 cm was 30 bar, whereas the pellets with a larger diameter (1.5 cm) with the same height needed a higher pressure (40 bar). At the same pellet diameter, increasing the compression pressure resulted in the solid fuel pellets with higher heating value, pellet density, moisture and ash contents. Torrefaction at 250 and 300°C for 0.5–2 h yielded the samples with higher heating values (21,689–22,642 kJ/kg) when compared with the values belonging to the original sample (13,954 kJ/kg). On the contrary, density of the pellets decreased from 0.72 g/cm³ to 0.48–0.89 g/cm³. Increased torrefaction temperature and time increased the heating value but decreased the pellet density.

1. บทนำ

ในปัจจุบัน มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ให้เป็นประโยชน์มากมาย เนื่องจากโลกประสบปัญหาวิกฤตการณ์ขาดแคลนพลังงานและราคาน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้แล้วหมดไปไม่สามารถสร้างขึ้นทดแทนได้ และด้วยการเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นภาคอุตสาหกรรม ภาคการขนส่ง ภาคการท่องเที่ยวและการบริการ ส่งผลต่อการบริโภคที่มีเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

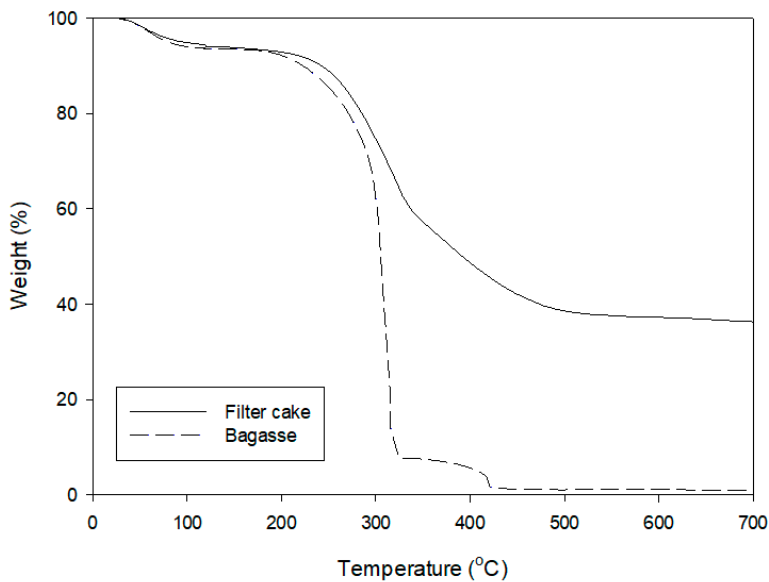
สำหรับสถานการณ์ด้านพลังงานของประเทศไทยนั้น กระทรวงพลังงานมีนโยบายที่จะพัฒนาพลังงานทดแทนให้เป็นแหล่งพลังงานหลักของประเทศ ด้วยการจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551-2565) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ประเทศไทยใช้พลังงานทดแทนเป็นพลังงานหลักของประเทศ แทนการนำเข้าน้ำมัน ซึ่งนับวันจะมีปริมาณลดน้อยลงและราคาสูงขึ้น

แนวทางหนึ่งของการจัดหาแหล่งพลังงานทดแทน คือ การใช้ของเสียไม่ว่าจากเกษตรกรรม อุตสาหกรรม หรือ จากกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวัน ซึ่งประเทศไทยมีอุตสาหกรรมหลายอย่าง โดยอุตสาหกรรมหนึ่งที่สำคัญ คือ อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมเกษตร (agro industry) ที่สำคัญของประเทศ โดยประเทศไทยผลิตน้ำตาลและส่งออกเป็นอันดับ 3 หรือ 4 ของโลก ซึ่งในปี 2559/2560 มีโรงงานน้ำตาล 54 โรงงาน ส่งออกน้ำตาลถึง 7.38 ล้านตัน ก่อให้เกิดเงินหมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจของประเทศหลายแสนล้านบาท ดังนั้น อุตสาหกรรมนี้จึงมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ และเกี่ยวเนื่องกับเกษตรกรรมประมาณ 2 แสนราย ซึ่งพื้นที่ปลูกอ้อยทั่วประเทศมากกว่า 5 ล้านไร่ ในกระบวนการผลิตน้ำตาลนั้น จะมีวัสดุพลอยได้ (by-product) หลายชนิด เช่น ขานอ้อย (bagasse) กากน้ำตาล (molasses) และกากหม้อกรองโคลน (filter cake) เป็นต้น [1]

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล นั่นคือ กากหม้อกรองโคลน มาศึกษา โดยนำมาทำ

เป็นเชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ด กากหม้อกรองโคลนเป็นกากตะกอนที่แยกจากน้ำอ้อยในขั้นตอนการทำน้ำอ้อยให้สะอาด มีส่วนผสมของขานอ้อย ปูนขาว ดิน โคลน และน้ำตาล ซึ่งในปัจจุบันกากหม้อกรองโคลนนำไปใช้เป็นปุ๋ยเท่านั้น หากสามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ดได้ ก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่า และเป็นแนวทางในการลดการใช้พลังงานฟอสซิล

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติทางเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ดได้ ซึ่งไม่ใช่ตัวประสานในการเตรียม เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุน นอกจากนั้น ยังทำการทอริแฟคชัน (torrefaction) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนกับตัวอย่างที่อุณหภูมิปานกลาง เพื่อเพิ่มค่าความร้อนให้กับตัวอย่าง ซึ่งเหตุผลที่นำมาอัดเม็ดยังนั้นเนื่องจากการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ มาใช้ประโยชน์ โดยส่วนใหญ่ผู้ใช้จะนำวัสดุเหล่านั้นมาใช้ทันทีโดยไม่ผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการใช้งานหลายประการ เช่น เศษวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ ส่วนมากจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ต้องเปลืองพื้นที่สำหรับการจัดเก็บ รวมถึงเกิดปัญหาในการขนส่งเคลื่อนย้ายเศษวัสดุจากแหล่งผลิตไปสู่พื้นที่จัดเก็บ เพราะหากเศษวัสดุมีขนาดใหญ่ น้ำหนักจะมากตามไปด้วย รวมทั้งรูปร่างของเศษวัสดุอาจมีความยาวและความโตแตกต่างกัน ทำให้การขนย้ายทำได้น้อย ส่งผลให้สิ้นเปลืองเวลาการขนส่งเป็นอย่างมาก และปัญหาการออกแบบห้องเผาไหม้ เนื่องจากถ้าเศษวัสดุมีขนาดใหญ่ ขนาดของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงจึงจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่ตามด้วย ทำให้การออกแบบต้องรองรับปริมาณเชื้อเพลิงที่มาก หากต้องการความร้อนที่เพียงพอซึ่งจากปัญหาของการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น สามารถแก้ปัญหาได้โดยการนำเศษวัสดุมาอัด (densification) ซึ่งการอัดเป็นการแปรรูปเศษวัสดุโดยใช้แรงกดอุณหภูมิเล็กน้อย ทำให้เกิดการอัดแน่นพอเหมาะที่จะรวมกันเป็นก้อนได้ โดยการอัดเม็ดจะทำได้โดยนำเศษวัสดุที่ผ่านการลดขนาดจนเป็นผงละเอียดมาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดโดยการอัดเม็ดนี้จะช่วยลดปริมาตรชีวมวลให้เล็กลงได้ทำให้ช่วยลดพื้นที่ของการจัดเก็บเชื้อเพลิงและจำนวนเที่ยวของการขนส่งเคลื่อนย้ายอีกด้วย [2]



รูปที่ 1 กราฟการสลายตัวทางความร้อนของกากหม้อกรองโคลนและชานอ้อย

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมกากหม้อกรองโคลน

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือ กากหม้อกรองโคลน จากโรงงานผลิตน้ำตาลแห่งหนึ่ง นำวัตถุดิบมาทำให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อน (oven) ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 20 mesh (ขนาดตะแกรง 850 ไมโครเมตร) วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนโดยใช้เครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA-50, SHIMADZA) ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มา กำหนดอุณหภูมิในการทำทอริแฟคชัน

2.2 การอัดเม็ดและการทอริแฟคชัน

การอัดเม็ดกากหม้อกรองโคลนทำโดยนำตัวอย่างมา ป้อนใส่บล็อกที่ใช้ในการอัดเม็ด โดยบล็อกอัดเม็ดที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 และ 1.5 เซนติเมตร สูง 1 เซนติเมตร หลังจากนั้นทำการอัดด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกที่ความดัน 20 30 40 และ 50 บาร์ สังเกตลักษณะของเม็ดด้วยตาเปล่า ส่วนการทอริแฟคชันทำโดยชั่งตัวอย่างอัดเม็ด 30 กรัม จากนั้นนำไปบรรจุภายในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed-bed reactor)

ที่ทำจากเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ให้ความร้อนด้วยเตาเผาไฟฟ้าแนวตั้ง อัตราการให้ความร้อนที่ 30°C/min เพื่อทำการทอริแฟคชันภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทอริแฟคชันจะได้จากข้อมูลการสลายตัวทางความร้อนของวัตถุดิบ ดังที่กล่าวไปข้างต้น โดยใช้เวลา 0.5 1 1.5 และ 2 ชั่วโมง

2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกลและสมบัติทางเชื้อเพลิงของกากหม้อกรองโคลนอัดเม็ด

หาค่าความร้อน (heating value) ด้วยเครื่อง Bomb calorimeter (GALLENKAMP) ทำการวิเคราะห์ค่าความชื้นของตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการทำให้แห้ง โดยใช้วิธีมาตรฐาน EN 14774-1: 2009 Solid biofuels – Methods for determination of moisture content – Oven dry ทำโดยชั่งน้ำหนักตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำน้ำหนักของตัวอย่างก่อนและหลังอบมาคำนวณหาค่าความชื้น และทำการหาปริมาณเถ้าของตัวอย่างทำตามมาตรฐาน EN 14775: 2009 Solid biofuels – Methods for determination of ash content ทำโดยชั่ง

น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น จากนั้นนำตัวอย่างไปเผาด้วยเตาเผา ความร้อนสูง (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักเถ้าที่เหลือสุดท้ายและทำการวิเคราะห์ค่า ความหนาแน่นของเม็ดโดยนำตัวอย่างอัดเม็ดไปชั่งน้ำหนัก วัด เส้นผ่านศูนย์กลางและวัดความยาวของตัวอย่างด้วยเวอร์เนีย- ดิจิตอล เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาตรของเม็ด จากนั้นคำนวณ หาความหนาแน่นจริงของตัวอย่างอัดเม็ดจากการนำน้ำหนัก ของเม็ดหารด้วยปริมาตรของเม็ด

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

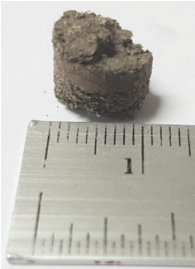
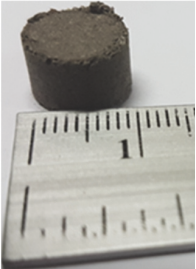
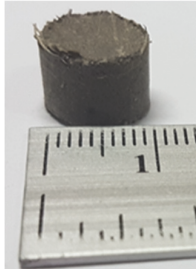
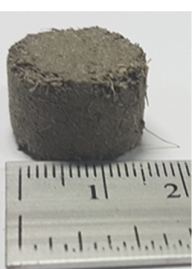
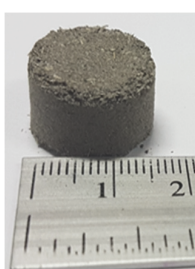
3.1 สมบัติของวัตถุดิบ

รูปที่ 1 แสดงกราฟการสลายตัวทางความร้อนของ กากหม้อกรองโคลน (filter cake) พบว่า กากหม้อกรองโคลน สลายตัวเป็นอย่างมากในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 500°C ดังนั้น ช่วงอุณหภูมินี้จึงเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำทอริแฟคชั่น โดยกากหม้อกรองโคลนมีค่าความร้อน 11,197 kJ/kg ซึ่งเมื่อ ทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนกับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นๆ ที่นำ มาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิง พบว่า กากหม้อกรองโคลนมี ค่าความร้อนมากกว่า เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (6,192 kJ/kg) เหม้ามันสำปะหลัง (6,820 kJ/kg) ทางปาล์มน้ำมันและใบ (7,698 kJ/kg) ปลายไม้กระถินยักษ์ (9,498 kJ/kg) และปึกไม้ ยางพารา (10,376 kJ/kg) [3] ดังนั้น กากหม้อกรองโคลน จึงเป็นวัสดุที่มีศักยภาพที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ดังที่กล่าว ไปแล้วข้างต้นว่า กากหม้อกรองโคลนมีองค์ประกอบหลายอย่าง (ขานอ้อย ปูนขาว ดิน โคลน และน้ำตาล) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับขานอ้อยที่มีค่าความร้อนประมาณ 9,500 kJ/kg [4] แสดงว่า ส่วนผสมอื่นๆ ในกากหม้อกรองโคลนที่ไม่ใช่ขานอ้อย มีส่วน ทำให้ค่าความร้อนของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยทั้งปูนขาว ดิน โคลน และน้ำตาล ต่างก็มีค่าความร้อน นอกจากนั้น กราฟ การสลายตัวทางความร้อนดังแสดงในรูปที่ 1 ยังแสดงให้เห็นว่า กากหม้อกรองโคลนมีองค์ประกอบไม่เหมือนกับขานอ้อย (bagasse)

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความชื้นและปริมาณเถ้าของกาก หม้อกรองโคลนโดยวิธีมาตรฐาน พบว่า กากหม้อกรองโคลน มีค่าความชื้นร้อยละ 3.45 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าน้อยกว่าวัสดุ ชีวมวลชนิดอื่นๆ ที่นำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิง เช่น ปึกไม้ยางพารา (ร้อยละ 43.4 โดยน้ำหนัก) ปลายไม้กระถินยักษ์ (ร้อยละ 48.0 โดยน้ำหนัก) ทางปาล์มน้ำมันและใบ (ร้อยละ 56.6 โดยน้ำหนัก) เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (ร้อยละ 60.4 โดย น้ำหนัก) หรือ เหม้ามันสำปะหลัง (ร้อยละ 60.7 โดยน้ำหนัก) [3] สำหรับปริมาณเถ้า กากหม้อกรองโคลนมีอยู่ร้อยละ 37.15 โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม Prariya [5] ได้รายงานไว้ว่า สมบัติของเชื้อเพลิงที่ดี ต้องมีค่าความชื้น น้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ และเถ้าต้องมีปริมาณไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น กากหม้อกรองโคลนจึงมีค่าความชื้นและ ปริมาณเถ้าที่สามารถเป็นเชื้อเพลิงที่ดีได้

3.2 ผลของความดันต่อลักษณะทางกายภาพของ เชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ด

การศึกษาผลของความดันต่อลักษณะทางกายภาพของ เชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ดจากกากหม้อกรองโคลนแสดงดังรูปที่ 2 โดยใช้ความดันในการอัดเม็ด 20 30 40 และ 50 บาร์ มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ด 1 และ 1.5 เซนติเมตร ตามลำดับ พบว่า เมื่อความดันในการอัดเม็ดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ลักษณะ ของตัวอย่างเมื่อพิจารณาด้วยตาเปล่ามีความเป็นเม็ด ไม่แตกหัก โดยสำหรับตัวอย่างที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ไม่สามารถใช้ความดัน 20 บาร์ ในการอัดเม็ดได้ โดยเมื่อใช้ ความดันตั้งแต่ 30 บาร์ ขึ้นไป จึงจะได้เชื้อเพลิงที่ลักษณะของ เม็ดแน่น ไม่แตก ไม่เป็นรูปร่าง ส่วนตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ไม่สามารถใช้ความดัน 20 และ 30 บาร์ ในการอัดเม็ดได้ โดยลักษณะของเม็ดจะแน่น ไม่แตกหัก เมื่อใช้ความดันตั้งแต่ 40 บาร์ ขึ้นไป

เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร			
			
ความดัน 20 บาร์	ความดัน 30 บาร์	ความดัน 40 บาร์	ความดัน 50 บาร์
เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร			
			
ความดัน 20 บาร์	ความดัน 30 บาร์	ความดัน 40 บาร์	ความดัน 50 บาร์

รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของกากหม้อกรองโคลนอัดเม็ดที่ความดันต่างๆ

ตามร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด [2] กำหนดไว้ว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทั้งเกรดธรรมดาและเกรดคุณภาพสูง มีค่าไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร หรือ 0.6 เซนติเมตร และไม่เกินกว่า 12 มิลลิเมตร หรือ 1.2 เซนติเมตร ซึ่งงานวิจัยนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเชื้อเพลิง 1 และ 1.5 เซนติเมตร ส่วนความยาวของเม็ด ร่างมาตรฐานได้กำหนดไว้ว่าไม่น้อยกว่า 3.15 มิลลิเมตร หรือ 0.315 เซนติเมตร และไม่เกินกว่า 40 มิลลิเมตร หรือ 4 เซนติเมตร ทั้งเกรดธรรมดาและเกรดคุณภาพสูง โดยงานวิจัยนี้มีความยาวของเม็ดเชื้อเพลิง 1.25 เซนติเมตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางเชื้อเพลิงและสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเปรียบเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้นที่ยังไม่อัดเม็ด โดยทำการวิเคราะห์เฉพาะเม็ดเชื้อเพลิงที่แน่น คงรูป และไม่แตกหักเท่านั้น ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการ

อัดเม็ดตัวอย่าง จะได้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเดียวกัน เมื่อเพิ่มความดันในการอัดเม็ดจะได้ค่าความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันจะทำให้อนุภาคของวัตถุดิบที่อยู่ในบล็อกอัดเม็ดอยู่ชิดกันมากขึ้น จึงสามารถเพิ่มปริมาณวัตถุดิบลงในบล็อกอัดเม็ดได้เพิ่มขึ้นเพื่อให้ความสูงของเม็ดมีค่าเท่าเดิม ดังนั้น เมื่อปริมาณวัตถุดิบมีมากขึ้น ค่าความร้อนจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และที่ความดันเดียวกัน เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดมีค่าเพิ่มขึ้นจะสามารถใส่วัตถุดิบลงในบล็อกอัดเม็ดได้เพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองโคลนมีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 13,954–18,995 kJ/kg ซึ่งตามร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด [2] กำหนดไว้ว่า ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเกรดธรรมดามีค่าไม่น้อยกว่า 14,600 kJ/kg

ส่วนเกรตคุณภาพสูงมีค่าไม่น้อยกว่า 16,700 kJ/kg ดังนั้น กากหม้อกรองโคลนอัดเม็ดจึงมีค่าความร้อนเป็นไปตามมาตรฐาน

ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเดียวกัน แต่ความดันในการอัดสูงขึ้น และที่ความดันในการอัดเดียวกัน แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดสูงขึ้น ค่าความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อปริมาณวัตถุดิบที่ใส่ลงไปในบล็อกอัดเม็ดเพิ่มขึ้น ความชื้นที่อยู่ในวัตถุดิบที่ใส่เพิ่มเข้าไปในบล็อกจึงทำให้ความชื้นโดยรวมของเม็ดมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเหตุผลนี้สามารถอธิบายการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าเมื่อเพิ่มความดันและเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดได้เช่นกัน โดยกากหม้อกรองโคลนอัดเม็ดมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 3.45–4.51 โดยน้ำหนัก โดยตามร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด [2] กำหนดไว้ว่า ค่าความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทั้งเกรดธรรมดาและเกรดคุณภาพสูง มีค่าไม่เกินกว่าร้อยละ 10 ของน้ำหนัก ซึ่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าความชื้นต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด อย่างไรก็ตาม เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มีปริมาณเถ้าค่อนข้างสูง ผู้วิจัยจะได้หาแนวทางการนำเถ้าที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์ในงานวิจัยต่อไปในอนาคต เช่น

นำไปใช้เป็นปุ๋ยบำรุงดิน ใช้เป็นตัวดูดซับ หรือนำไปใช้ผสมในซีโอพอลิเมอร์ โดยในเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์สมบัติรุกรุ่นของเถ้าด้วยการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ-196°C พบว่า เถ้าที่เกิดจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดนี้ไม่มีรุกรุ่น ดังนั้น ก่อนจะนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับ ต้องปรับปรุงสมบัติ เช่น การใช้กรดหรือใช้เบส เป็นต้น

สำหรับค่าความหนาแน่นของเม็ด ที่ขนาดของเม็ดเท่ากัน การเพิ่มความดันทำให้ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งความหนาแน่นของเม็ดคำนวณได้จากการนำมวลของเม็ดมาหารด้วยปริมาตรของเม็ด ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า การเพิ่มความดันสามารถเพิ่มปริมาณวัตถุดิบลงไปในบล็อกอัดเม็ดได้เพิ่มขึ้นมามากขึ้น แต่ปริมาตรยังเท่าเดิมเนื่องจากขนาดของเม็ดเท่าเดิม ดังนั้น ความหนาแน่นจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่วนที่ความดันเดียวกัน เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นของเม็ดมีค่าลดลง เนื่องจากไม่เพียงแต่ปริมาณของวัตถุดิบที่ใส่ลงไปในบล็อกอัดเม็ดเพิ่มขึ้น ปริมาตรของเม็ดก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองโคลนมีค่าความหนาแน่นของเม็ดอยู่ระหว่าง 0.48–0.89 g/cm³

ตารางที่ 1 สมบัติทางเชื้อเพลิงและสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรองโคลนอัดเม็ด

ตัวอย่าง (g/cm ³)	ค่าความร้อน (kJ/kg)	ความชื้น (wt%)	เถ้า (wt%)	ความหนาแน่นของเม็ด (g/cm ³)
ไม่ได้อัดเม็ด	11,197	3.45	37.15	—
เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร				
30 บาร์	13,954	3.45	40.08	0.72
40 บาร์	14,149	3.47	40.10	0.77
50 บาร์	14,468	3.64	40.16	0.89
เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร				
40 บาร์	18,763	4.43	41.32	0.48
50 บาร์	18,995	4.51	42.92	0.52

3.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟคชัน

เมื่อนำตัวอย่างอัดเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ความดัน 30 บาร์ มาทำการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C เป็นเวลา 0.5 1 1.5 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้วทำการสังเกตตัวอย่างที่ได้ด้วยตาเปล่าภายหลังการทอรีแฟคชัน พบว่า ตัวอย่างมีสีเข้มขึ้น และยังคงรูปร่าง แน่น ไม่แตกหัก โดยตารางที่ 2 แสดงค่าความร้อนและความหนาแน่นของเม็ดตัวอย่างที่ผ่านการทอรีแฟคชันเทียบกับก่อนทำทอรีแฟคชัน พบว่า การทำทอรีแฟคชันทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าความร้อนสูงขึ้นมาก โดยที่อุณหภูมิในการทอรีแฟคชันเดียวกัน เมื่อเพิ่มเวลาในการทอรีแฟคชัน จะได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น แต่อาจเพิ่มสูงขึ้นไม่มาก และที่เวลาในการทอรีแฟคชันเดียวกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันก็จะได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนของกากหม้อกรองอัดเม็ดทอรีไฟด์ (21,689–22,642 kJ/kg) กับเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีไฟด์จากงานวิจัยอื่นๆ พบว่า มีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีไฟด์จากฟางข้าวสาลี (18,800 kJ/kg) [6] โดยมีค่าความร้อนเทียบเท่ากับเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอรีไฟด์จากไม้สนเหลือง (21,380–27,100 kJ/

kg) [7] ซึ่งเฉลี่ยผสมระหว่างไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน (20,180–25,540 kJ/kg) [7] ไม้สน (19,870–23,170 kJ/kg) [8] ไม้การบูร (18,900–22,350 kJ/kg) [8] และไม้สน Scots (20,420–24,340 kJ/kg) [9] ดังนั้น กากหม้อกรองซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม จึงมีศักยภาพที่จะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง

ส่วนค่าความหนาแน่นของเม็ด พบว่า เมื่อทำทอรีแฟคชันทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นลดลง โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (เวลาเดียวกัน) และเพิ่มเวลา (อุณหภูมิเดียวกัน) ความหนาแน่นของเม็ดจะมีค่าลดลง ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มเวลาในการทำทอรีแฟคชัน ทำให้น้ำหนักของตัวอย่างมีค่าลดลง เนื่องจากการสูญเสียสารที่สามารถระเหยได้ในช่วงอุณหภูมินี้ (ดังแสดงในกราฟการสลายตัวทางความร้อนรูปที่ 1) ซึ่งจากสมการการหาค่าความหนาแน่นของเม็ดที่นำมวลของเม็ดมาหารด้วยปริมาตรของเม็ด เมื่อการทอรีแฟคชันไม่ได้ทำให้ปริมาตรของเม็ดเปลี่ยนแปลง หรือ ขนาดของเม็ดยังคงเท่าเดิม ไม่มีการหดตัวของตัวอย่างที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีแฟคชัน ดังนั้น เมื่อน้ำหนักของตัวอย่างมีค่าลดลง ค่าความหนาแน่นจึงมีค่าลดลง

ตารางที่ 2 สมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความร้อน (kJ/kg)	ความหนาแน่นของเม็ด (g/cm ³)
ไม่ได้ทำทอรีแฟคชัน		13,954	0.72
250	0.5	21,689	0.71
	1	22,110	0.69
	1.5	22,246	0.69
	2	22,583	0.67
300	0.5	22,338	0.52
	1	22,351	0.51
	1.5	22,421	0.51
	2	22,642	0.44

4. สรุปผล

เมื่อนำกากหม้อกรองโคลนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล มาทำการอัดเม็ดเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มีค่าความร้อนสูงกว่าตอนที่ไม่ได้อัดเม็ด เมื่อเพิ่มความดันในการอัดเม็ด จะได้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อน ค่าความหนาแน่นของเม็ด ความชื้น และปริมาณเถ้าเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดไปทำการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C เป็นเวลา 0.5 1 1.5 และ 2 ชั่วโมง พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้หลังการทอริแฟคชันมีค่าความร้อนสูงขึ้นจากเม็ดเชื้อเพลิงก่อนการทำทอริแฟคชัน โดยลักษณะทางกายภาพของเม็ดยังเหมือนเดิม เพียงแค่มีสีเข้มขึ้นเท่านั้น ซึ่งอุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟคชันมีผลต่อค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้เพียงเล็กน้อย กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟคชัน ทำให้ค่าความร้อนของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น การใช้อุณหภูมิต่ำ (250°C) และเวลาในการทอริแฟคชันน้อย (0.5 ชั่วโมง) จึงมีความเหมาะสม เพราะทำให้ประหยัดพลังงาน กากหม้อกรองโคลนจึงมีเหมาะสมที่จะนำมาเป็นแหล่งพลังงาน ทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้จากโรงงาน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปีงบประมาณ 2562

6. เอกสารอ้างอิง

- Office of the Cane and Sugar Board, 2016, Annual Report 2016, Office of the Cane and Sugar Board, Bangkok. (In Thai)
- Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2017, Energy Situation January - December 2017, Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Bangkok. (In Thai)
- Borrisut, C., 2015, Technology Status Pellet Of Thailand [Online], Available: <http://www.jgsee.kmutt.ac.th/v2/uploads/images/files/pellet.pdf>. (In Thai)
- Sudhakar, J. and Vijay, P., 2013, "Control of Moisture Content in Bagasse by Using Bagasse Dryer," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 4 (5), pp. 1331-1333. (In Thai)
- Prariya, R., 2003, A Feasibility Study of Inorganic Industrial Wastewater Sludge being Utilized for the Production of Heating Fuel Briquettes, KMUTNB Textbook Publishing Center, pp. 4-31. (In Thai)
- Azócar, L., Hermosilla, N., Gay, A., Rocha, S., Díaz, J. and Paulina, J., 2019, "Brown Pellet Production using Wheat Straw from Southern Cities in Chile," *Fuel*, 237, pp. 823-832.
- Manouchehrinejad, M. and Mani, S., 2018, "Torrefaction after Palletization (TAP): Analysis of Torrefied Pellet Quality and Co-products," *Biomass and Bioenergy*, 118, pp. 93-104.
- Cao, L., Yuan, X., Li, H., Li, C., Xiao, Z., Jiang, L., Huang, B., Xiao, Z., Chen, X., Wang, H. and Zeng, G., 2015, "Complementary Effects of Torrefaction and Co-pelletization: Energy Consumption and Characteristics of Pellets," *Bioresour. Technology*, 185, pp. 254-262.
- Shang, L., Nielsen, N.P.K., Dahl, J., Stelte, W., Ahrenfeldt, J., Holm, J.K., Thomsen, T. and Henriksen, U.B., 2012, "Quality Effects Caused by Torrefaction of Pellets Made from Scots Pine," *Fuel Processing Technology*, 101, pp. 23-28.

