



วารสารวิชาการ
ชายนีเทคโนโลยี
มรท.ภูเก็ต

ISSN 2822 - 1044 (Online)
ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2567

PKRU
SciTech
JOURNAL



วารสารวิชาการสายันเทคโนโลยี มรภ.ภูเก็ต
ISSN 2822-1044 (Online)



Approved by TCI during 2021 - 2024

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธิดา รัตนบุรี

มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ นัยวิกุล

ศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์

ศาสตราจารย์ ดร.ศุภมิตร จิตตะยโสธร

รองศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ วัฒนเส็ก

รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี อีสระไกรศีล

รองศาสตราจารย์ ดร.วรัญญู ศรีเดช

รองศาสตราจารย์ ดร.อัมพรพรรณ อีรานูตร

รองศาสตราจารย์ ดร.ชฎานิศา ลือวานิช

รองศาสตราจารย์ ดร.สุกัญญา วงศ์ธนะบุญ

รองศาสตราจารย์ ดร.ผุสดี พรหม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์รังสรรค์ พลสมัคร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการชาชนมฤ.ภูเก็ต (PKRU SciTech Journal) ฉบับนี้ได้รวบรวมบทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งผ่านกระบวนการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ บทความละ 3 ท่าน จากหลากหลายสถาบัน จำนวน 7 บทความ ประกอบไปด้วย บทความทางฟิสิกส์ด้านดาราศาสตร์ จำนวน 1 บทความ ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่ วี 1851 โอไรโอนิดส์ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลในช่วงแสงที่ตามองเห็นด้วยกล้องดีเอสแอลอาร์ที่ต่อเข้ากับกล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร และวัดแสงด้วยเทคนิคโฟโตเมตรี บทความด้านคณิตศาสตร์ จำนวน 1 บทความ ซึ่งศึกษาลักษณะเฉพาะของสมาชิกปรกติภายใน สมาชิกปรกติซ้าย สมาชิกปรกติขวา และสมาชิกปรกติบริบูรณ์ บนกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ รวมถึงพิสูจน์ว่าเซตของสมาชิกปรกติภายใน สมาชิกปรกติซ้าย สมาชิกปรกติขวา และสมาชิกปรกติบริบูรณ์ของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ทั้งหมดเป็นกึ่งกรุปย่อย บทความที่มีการวิเคราะห์ทางด้านเคมีและชีววิทยา จำนวน 1 บทความ มีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ การปนเปื้อนจุลินทรีย์และยีสต์ที่มักพบในอาหารที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นการศึกษาคุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งชั้นโรงในจังหวัดสงขลา บทความที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางเคมีที่ส่งผลต่อด้านสิ่งแวดล้อม จำนวน 2 บทความ คือ การพัฒนาวิธีทดสอบดีที่ที่อย่างง่ายสำหรับการหาค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชันของตัวอย่างฝุ่น $PM_{2.5}$ เป็นศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของวิธีการทดสอบดีที่ที่อย่างง่ายและตรวจวัดด้วยเครื่องไมโครเฟลทรีดเดอร์ สำหรับการหาค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชันของฝุ่น $PM_{2.5}$ และนำไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างฝุ่นที่เก็บในช่วงหมอกควันของจังหวัดเชียงใหม่ และอีก 1 บทความ เป็นการศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในน้ำชะขยะก่อนและหลังบำบัดของระบบบ่อฝัง ณ สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และบทความทางด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์เกี่ยวกับ AI และ IoT อย่างละ 1 บทความ คือ 1 บทความที่มีการศึกษาและพัฒนาโมเดลการจำแนกรูปภาพตามความหมายจากภาษาธรรมชาติด้วย ปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์ มีการทดสอบและประเมินผลเพื่อวัดประสิทธิภาพการจำแนกรูปภาพตามความหมายจาก ภาษาธรรมชาติด้วยปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์ และงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ และทดสอบประสิทธิภาพของ เครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ ซึ่งทั้ง 7 บทความนี้มีความหลากหลายทางด้านวิชาการ ทางกองบรรณาธิการคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์ให้กับผู้ที่สนใจในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ด้านต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

กองบรรณาธิการใคร่ขอเชิญชวนท่านผู้สนใจส่งบทความมาตีพิมพ์ในวารสารวิชาการชาชนเทคโนโลยี มรภ.ภูเก็ต โดยสามารถส่งต้นฉบับตามคำแนะนำในหน้าเว็บไซต์ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/pkruscitech> เพื่อเป็นการเผยแพร่ความรู้สู่สังคมอันจะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่านและผู้สนใจต่อไป



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธิดา รัตนบุรี)

บรรณาธิการ

สารบัญ

การศึกษาคุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งชันโรงในจังหวัดสงขลา ปณณช รุธิโร, อนุกุล เกียรติขวัญบุตร, รัชนิกร ฤทธาพัฒน์, ลูกมาน สือรี และ ณัฐกานต์ นิลอ่อน	1-11
การเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรและวิวัฒนาการของระบบดาวคู่ วี 1851 โอโรไนด์ส์ ฐิติพงษ์ อุ่นใจ	12-23
การพัฒนาเครื่องตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟด้วย เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง จุฬาวลี มณีเลิศ, พิรุฬห์ แก้วฟุ้งรังษี, ประธาน คำจันะ และ พรwana รัตน์ชูโชค	24-38
การเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในน้ำชะขยะก่อนและหลัง บำบัดของระบบบ่อฝัง ณ สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สมคิด ต้นแก้ง และ ศิริภัสสร พันธะสา	39-52
ลักษณะเฉพาะของความปรกติบนสมาชิกในกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ นเรศ สวัสดิ์รักษา, ชัญญา เล็กเจริญศรี, พันธกานต์ เวชกรณ และ พัชรภรณ์ สีทอง	53-64
การพัฒนาวิธีทดสอบดีที่ที่อย่างง่ายสำหรับการหาคักยภาพ การเกิดออกซิเดชันของตัวอย่างฝุ่น PM _{2.5} ดวงเดือน เทพนวล, ปริมฤทัย ดอกคำใต้ และ ณัฏติพร ยะบึง	65-78
การพัฒนาโมเดลการจำแนกรูปภาพตามความหมายจากภาษาธรรมชาติ ด้วยปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์ สุขสวัสดิ์ ณัฏฐวุฒิสิทธิ์	79-90

การศึกษาคุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งชันโรงในจังหวัดสงขลา A Study of the Quality of Chan Rong Honey Products in Songkhla Province

ปอญนุช รุธิระโก^{*1}, อนุกุล เกียรติขวัญบุตร¹, รัชนิกร ฤทธาพิพัฒน์²,
ลูกมาน สือรี² และ ณัฐกานต์ นิลอ่อน²

Poonyanuch Ruthirako^{*1}, Anukool Kietkwanboot¹, Ratchaneekorn Reudhabibadh²,
Lukman Sueree², & Nattakan Nin-on²

¹สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหาดใหญ่

²สาขาวิชาสาธารณสุขชุมชน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหาดใหญ่

¹Department of Occupational Health and Safety, Faculty of Science and Technology,
Hatyai University

²Department of Community Public Health, Faculty of Science and Technology, Hatyai University

Submitted 19/10/2023 ; Revised 13/12/2023 ; Accepted 29/01/2024

บทคัดย่อ

การศึกษาคุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งชันโรงในจังหวัดสงขลา มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณภาพน้ำผึ้งชันโรงของแต่ละวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดสงขลา กลุ่มตัวอย่างเป็นวิสาหกิจชุมชนที่อยู่ในจังหวัดสงขลา จำนวน 25 กลุ่ม ทำการทดสอบคุณภาพของน้ำผึ้งชันโรง โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และการปนเปื้อนจุลินทรีย์ ผลการตรวจวัดลักษณะทางกายภาพ และการปนเปื้อนจุลินทรีย์ ของน้ำผึ้งชันโรง ตรวจพบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำผึ้งชันโรง มีค่าความเป็นกรดอยู่ระหว่าง 3.21 – 4.45 และค่าความชื้นมีค่าอยู่ระหว่าง 14.48 – 20.07 % ส่วนการวิเคราะห์การปนเปื้อนจุลินทรีย์ ได้ทำการวิเคราะห์ยีสต์และราเส้นใย, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* sp., *Bacillus cereus* และ *Clostridium perfringens* จากน้ำผึ้งชันโรงที่เก็บจาก 25 กลุ่มวิสาหกิจชุมชน พบมีปริมาณยีสต์และราเส้นใย ในช่วงน้อยกว่า 1 (CFU/g) – 9.0×10^4 CFU/g, *Staphylococcus aureus* มีปริมาณน้อยกว่า 1 CFU/g, *Bacillus cereus* มีปริมาณน้อยกว่า 1 CFU/g, *Clostridium perfringens* มีปริมาณน้อยกว่า 1 CFU/g และตรวจไม่พบ *Salmonella* sp. ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพน้ำผึ้งชันโรง ทำให้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคต่อไป

คำสำคัญ: คุณภาพ น้ำผึ้งชันโรง คุณสมบัติทางกายภาพ การปนเปื้อนจุลินทรีย์

***ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)**

E-mail: poonyanuch@hu.ac.th

Abstract

This study aimed to assess the quality of Chan Rong honey products in Songkhla Province, focusing on honey produced by community enterprises in the region. Our research involved a sample group comprising 25 community enterprises in Songkhla Province. The study encompassed an evaluation of both physical properties and microbial contamination. The results revealed that the pH values of the Chan Rong honey products ranged from 3.21 to 4.45, while the moisture content varied between 14.48% to 20.07%. Microbial contamination was also analyzed, including yeast and mold, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* sp., *Bacillus cereus*, and *Clostridium perfringens* in honey samples collected from the 25 community enterprise groups. Specifically, the findings indicated that yeast and mold levels ranged from less than 1 colony-forming unit per gram (CFU/g) to 9.0×10^4 CFU/g. *Staphylococcus aureus* was detected at less than 1 CFU/g. *Bacillus cereus* was found in amounts less than 1 CFU/g, and *Clostridium perfringens* was present at levels below 1 CFU/g, while *Salmonella* sp. was not detected in any of the samples. These research outcomes hold valuable insights for enhancing the capacity of local communities in the development of high-quality, safe Chan Rong honey for consumers.

Keywords: quality, Chan Rong honey, physical properties, microbial contamination

บทนำ

ชันโรง (stingless bees) เป็นแมลงสังคม อยู่ในอันดับ Hymenoptera วงศ์ Apidae และวงศ์ย่อย Meliponinae ไม่มีเหล็กใน มีการสร้างรังตามธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่มักถูกพบในโพรงไม้ดิน และโพรงไม้ ชันโรงมีผลต่อระบบนิเวศวิทยา การเพาะปลูกทางการเกษตร และเศรษฐกิจ เนื่องจากบทบาทสำคัญคือการผสมเกสรของดอกไม้หลากหลายชนิด [1–3] ผึ้งชันโรงมีพฤติกรรมการเก็บยางไม้ในปริมาณมาก โดยเก็บยางไม้ผสมกับไขผึ้งที่เรียกว่า “พรอพอลิส” (propolis) เป็นโครงสร้างหลักของรัง ผึ้งชันโรงเป็นหนึ่งในชนิดผึ้งที่ให้น้ำผึ้งและเกสรได้ โดยให้น้ำผึ้งในปริมาณที่น้อยกว่าผึ้งรวง แต่น้ำผึ้งชันโรงหายาก และมีราคาแพงกว่าน้ำผึ้งธรรมดาทั่วไป ทั้งนี้เพราะเชื่อว่ามีคุณค่าทางโภชนาการ และทางยาสูงกว่าน้ำผึ้งชนิดอื่น ๆ [4] น้ำผึ้งชันโรงมีสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญหลายประการ ได้แก่ คุณสมบัติเป็นสารแอนติออกซิแดนท์ หรือสารต้านอนุมูลอิสระ สารออกฤทธิ์ต้านเนื้องอก สารออกฤทธิ์ต้านการแข็งตัวของเลือด สารออกฤทธิ์ลดไขมันในเลือด และสารออกฤทธิ์ต้านไวรัส [5] ปัจจุบันได้มีการผลิตชันของยางไม้ที่ชันโรงเก็บมาจากต้นพืชหลายชนิด นำมาผสมรวมกับไขผึ้งที่ชันโรงผลิตขึ้นจากภายในลำตัวของชันโรง มีผลในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ต้านเชื้อโรค และเพิ่มภูมิคุ้มกัน [6]

ประเทศไทยมีความเหมาะสมทุกด้านในการเลี้ยงชันโรงในเชิงเศรษฐกิจ เนื่องจากมีความหลากหลายของชนิดชันโรงในท้องถิ่น ภูมิอากาศเหมาะสม และความหลากหลายของพรรณไม้ที่เป็นอาหาร ถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์จากชันโรงจะมีศักยภาพในการเลี้ยงในเชิงเศรษฐกิจ และได้รับความนิยมทั้งตลาดในประเทศ และต่างประเทศ แต่เนื่องจากการขาดงานวิจัยรองรับ ไม่ว่าจะเป็นด้านเทคนิคการเลี้ยง เพื่อเก็บผลผลิต งานวิจัยที่จะยกระดับมาตรฐานเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ และความเชื่อมั่นของผู้บริโภค ทำให้การใช้ประโยชน์จากชันโรง ในประเทศไทยยังอยู่ในวงจำกัด คือเลี้ยงเพื่อรับประทานเป็นยาในครอบครัว และใช้เป็นแมลงผสมเกสรไม้ผลในพืชสวนเท่านั้น [7] น้ำผึ้งชันโรงถือเป็นอาหารพร้อมบริโภคที่เกษตรกรที่เลี้ยงชันโรงเป็นผู้เก็บน้ำผึ้ง และบรรจุขวดจำหน่าย โดยวิธีการและขั้นตอนในการเก็บน้ำผึ้งไม่ได้ควบคุมคุณภาพ อาจมีการปนเปื้อนสารพิษหรือจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogenic microorganisms) และในปัจจุบันยังไม่มีมีการประกาศเกณฑ์คุณภาพของน้ำผึ้งชันโรง ทำให้ผู้บริโภคที่ซื้อผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งชันโรงมาบริโภคอาจมีความเสี่ยงที่จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพได้

น้ำผึ้งชันโรง ที่มีการปนเปื้อนของสารพิษหรือจุลินทรีย์ก่อโรค ไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรีย ไวรัส และปรสิต จะทำให้เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค [8] โดยการปนเปื้อนของเซลล์ที่มีชีวิตของจุลินทรีย์ก่อโรค ทำให้ผู้บริโภคเจ็บป่วยจากโรค เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง ท้องเสีย และมีไข้ [9, 10] ส่วนการปนเปื้อนแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งชันโรงเป็นปัจจัยเสี่ยง ส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุการเกิดโรคต่าง ๆ [11] หากเกษตรกรไม่ได้ควบคุมคุณภาพในการเก็บน้ำผึ้งให้ถูกหลักสุขอนามัย อาจมีการปนเปื้อนสารพิษหรือจุลินทรีย์ก่อโรค ซึ่งเกิดได้จากกิจกรรมต่าง ๆ ได้แก่ การพูดคุย การไอ จาม [12] การขนส่ง การทำความสะอาดบ้าน หรือสถานประกอบการ การล้างห้องน้ำและสิ่งปฏิกูล และการถูพื้น ทำให้เกิดการปนเปื้อนและเกิดละอองฝอย [12, 13] ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนจุลินทรีย์ได้นอกจากนี้การปนเปื้อนจุลินทรีย์อาจเกิดจากภาชนะ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บและบรรจุน้ำผึ้ง ซึ่งปัจจัยที่กล่าวข้างต้นสามารถควบคุมได้ระหว่างที่มีการเก็บน้ำผึ้งชันโรง [14] ทั้งนี้ควรให้ความสำคัญต่อจุลินทรีย์ที่ ตรวจพบในน้ำผึ้งชันโรงที่เป็นกลุ่มเชื้อราและยีสต์ ได้แก่ *Penicillium*, *Mucor*,

Schizosaccharomyces, *Saccharomyces* และ *Torula* ซึ่งทำให้เกิดการหมักในน้ำผึ้งชันโรงและเกิดความชื้นสูงกว่า 21 เปอร์เซ็นต์ เกิดสปอร์ของแบคทีเรีย ได้แก่ *Bacillus cereus* และ *Clostridium* spp. ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเจ็บป่วยกับผู้บริโภค โดยเฉพาะแบคทีเรียกลุ่ม *Clostridium botulinum* ที่ทำให้เกิดการติดเชื้อได้ [15] ส่วนโคลิฟอร์มและยีสต์ เป็นจุลินทรีย์ที่บ่งบอกถึงสุขอนามัยเกี่ยวกับคุณภาพของน้ำผึ้งชันโรง [14]

จากข้อมูลข้างต้น จะเห็นได้ว่ายังไม่มีเกณฑ์ควบคุมคุณภาพน้ำผึ้งชันโรง และมีโอกาสที่ผู้บริโภคอาจได้รับอันตรายจากการบริโภค หากเกษตรกรไม่ได้ควบคุมคุณภาพในการเก็บน้ำผึ้งให้ถูกหลักสุขอนามัย ผู้บริโภคที่ซื้อน้ำผึ้งชันโรงมาบริโภค อาจได้รับสารพิษหรือจุลินทรีย์ก่อโรค ดังนั้น การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และการปนเปื้อนจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งชันโรงจึงมีความสำคัญ เนื่องจากการตรวจสอบคุณภาพและความปลอดภัยให้แก่ผู้บริโภค และยังเป็นแนวทางในการควบคุมคุณภาพน้ำผึ้งชันโรงให้แก่เกษตรกรที่เลี้ยงชันโรงในจังหวัดสงขลา ช่วยพัฒนาคุณภาพน้ำผึ้งชันโรงในจังหวัดสงขลา เพิ่มสมรรถนะขีดความสามารถในการแข่งขัน และสร้างรายได้ให้เกษตรกรอย่างยั่งยืนต่อไป

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งชันโรงของวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดสงขลา

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาคูณภาพผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งชันโรง ได้ทำการเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งชันโรงของวิสาหกิจชุมชน ในจังหวัดสงขลา โดยเก็บตัวอย่างทั้งสิ้น 11 อำเภอ ได้แก่ อำเภอหาดใหญ่ อำเภอกลองหอย อำเภอบางกล่ำ อำเภอสะเตา อำเภोजะนะ อำเภอนาทวี อำเภอกวนเนียง อำเภอสะบ้าย้อย อำเภอเทพา อำเภอสิงหนคร และ อำเภอนาหม่อม มีรายละเอียดการดำเนินการวิจัย ดังนี้

1. การเก็บตัวอย่างน้ำผึ้งชันโรง ทำเก็บตัวอย่างน้ำผึ้งชันโรงจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่เลี้ยงผึ้งชันโรง 25 กลุ่มในจังหวัดสงขลา มีวิธีการเก็บตัวอย่างน้ำผึ้ง ดังนี้

1.1 ผึ้งชันโรงกลุ่มที่มีถ้วยน้ำผึ้งขนาดเล็ก เก็บตัวอย่างน้ำผึ้งโดยใช้มีดสะอาดตัดกลุ่มถ้วยน้ำผึ้ง และรวบรวมถ้วยน้ำผึ้งไว้ในภาชนะที่สะอาด ควรระมัดระวังไม่ให้มีถ้วยเกสรปะปนมากับน้ำผึ้ง จากนั้นนำน้ำผึ้งไปกรองด้วยผ้าขาวบาง และบรรจุในภาชนะที่ปิดสนิท

1.2 ผึ้งชันโรงกลุ่มที่มีถ้วยน้ำผึ้งขนาดใหญ่ ใช้วิธีการดูน้ำผึ้งที่ถ้วยและรวบรวมน้ำผึ้งโดยใช้อุปกรณ์และภาชนะที่สะอาด ปฏิบัติด้วยความระมัดระวัง โดยไม่ให้ถ้วยน้ำผึ้งเกิดความเสียหาย ไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำผึ้งชันโรง จากนั้นนำน้ำผึ้งไปกรองด้วยผ้าขาวบาง และบรรจุในภาชนะที่ปิดสนิท

2. การวิเคราะห์/ทดสอบ คุณสมบัติทางกายภาพและการปนเปื้อนจุลินทรีย์ มีรายละเอียดดังนี้

2.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) นำตัวอย่างน้ำผึ้งชันโรง 10 มิลลิกรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำ 100 มิลลิลิตร คนจนสารกระจายตัว แล้ววัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่อง pH meter อ่านค่าและบันทึกผล

2.2 ค่าความชื้น (moisture content) การหาค่าความชื้นในตัวอย่างน้ำผึ้งชันโรง โดยการหาค่า moisture content (MC) ด้วยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการอบที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง แล้วคำนวณหาคร่าวร้อยละ MC ตามสูตร ดังต่อไปนี้

$$\% \text{ MC} = \frac{\text{น้ำหนักสารก่อนอบ (กรัม)} - \text{น้ำหนักสารหลังอบ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักสารหลังอบ (กรัม)}} \times 100$$

2.3 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณยีสต์และราเส้นใย (yeast and mold count) ปิเปตต์น้ำผึ้งชันโรงปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่บรรจุ peptone water เข้มข้นร้อยละ 0.1 ปริมาตร 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้ตัวอย่างเจือจาง 1:10 และทำการเจือจางเป็นลำดับให้ได้ระดับความเจือจางที่เหมาะสม ใช้วิธี spread plate ปิเปตต์ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Dichloran-Rose Bengal chloramphenicol agar (DRBC Agar) และเกลี่ยด้วยแท่งแก้วที่จุ่มและปลอดเชื้อ นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน เพื่อนับจำนวนโคโลนีที่พบและตรวจสอบลักษณะโคโลนีที่ได้

2.4 การตรวจวิเคราะห์เชื้อ *Staphylococcus aureus* ปิเปตต์น้ำผึ้งชันโรงปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่บรรจุ peptone water เข้มข้นร้อยละ 0.1 ปริมาตร 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้ตัวอย่างเจือจาง 1:10 และนำตัวอย่างที่ผ่านการเจือจางแล้วในระดับความเจือจางที่ 10^{-1} , 10^{-2} และ 10^{-3} โดยการปิเปตต์มาปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Baird-Parker agar ที่มี egg yolk และ potassium tellurite solution ร้อยละ 1 จากนั้นทำการ spread plate ความเจือจางละ 3 จาน นำตัวอย่างแต่ละตัวอย่างไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45-48 ชั่วโมง เพื่อนับจำนวนโคโลนีที่พบและตรวจสอบลักษณะโคโลนีที่ได้

2.5 การตรวจวิเคราะห์เชื้อ *Salmonella* sp. ชั่งตัวอย่าง 10 กรัม หรือ ปิเปตต์ตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Trypticase Soy broth (TS broth) จำนวน 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง เขย่าและปิเปตต์ตัวอย่างจากอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 0.1 มิลลิลิตร ลงใน อาหารเลี้ยงเชื้อ Rappaport Vassiliadis Soya broth (RVS broth) 10 มิลลิลิตร และปิเปตต์ตัวอย่าง จำนวน 1 มิลลิลิตร ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Tetrathionate Brilliant Green Bile broth (TBG broth) 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง Subculture เชื้อจากอาหารเลี้ยงเชื้อ RVS Broth และ TBG Broth ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Xylose-Lysine Deoxycholate agar (XLD agar) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18-48 ชั่วโมง ตรวจสอบและสังเกตลักษณะโคโลนีที่ได้ จะมีลักษณะรูปกลม สีชมพูใส อาจมีหรือไม่มีจุดดำ ตรงกลาง มีขนาดใหญ่มีมันวาวหรืออาจมีสีดำทั้งโคโลนี

2.6 การตรวจวิเคราะห์เชื้อ *Bacillus cereus* ใช้เทคนิคปลอดเชื้อ ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 50 กรัม ลงในโถปั่นปลอดเชื้อ เติมน้ำเจือจางบัฟเฟอร์ฟอสเฟตของ Butterfield 450 มิลลิลิตร (เจือจาง 1:10) แล้วปั่นด้วยความเร็วสูงเป็นเวลา 2 นาที (10,000-12,000 รอบต่อนาที) เจือจางตั้งแต่ 10^{-2} ถึง 10^{-6} โดยถ่ายโอนตัวอย่างที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน 10 มิลลิลิตร (1:10) ไปเป็นสารเจือจางเจือจางขนาด 90 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยการเขย่าแรง ๆ และทำต่อไปจนกระทั่งถึงการเจือจาง 10^{-6}

ใช้วิธี spread plate บนอาหารเลี้ยงเชื้อ Bacara หรือ Mennitol-egg yolk-phenal red polymyxin agar (MYP Agar) เจือจางตัวอย่างแต่ละครั้ง (รวมถึง 1:10) โดยการปิเปตมาปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มเป็นเวลา 18–24 ชั่วโมง ที่ 30 องศาเซลเซียส และสังเกตโคโลนีที่ล้อมรอบด้วยโซนตกตะกอน ซึ่งบ่งชี้ว่ามีการผลิตเลซิทีเนส ของเชื้อ *B. cereus* มักเป็นสีชมพูส้มบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Bacara หรือสีชมพูบนอาหารเลี้ยงเชื้อ MYP agar

2.7 การตรวจวิเคราะห์เชื้อ *Clostridium perfringens* วิเคราะห์ปริมาณ *C. perfringens* โดยวิธี spread plate บนอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptose Sulfite Cycloserine agar (TSC agar) โดยใช้ตัวอย่างที่ระดับความเจือจาง 10^{-1} , 10^{-2} และ 10^{-3} ความเจือจางละ 3 ซ้ำ บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน ในสภาวะไร้อากาศ ซึ่งเป็นขั้นตอน presumptive test ทำการนับโคโลนีของเชื้อ *C. perfringens* ซึ่งเมื่อเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อ TSC agar จะมีโคโลนีสีดำ

3. การวิเคราะห์ข้อมูล ใช้วิธีการวิเคราะห์ค่าเปรียบเทียบกับเกณฑ์คุณภาพของเครื่องดื่มที่ไม่ได้บรรจุในภาชนะปิดสนิท จากประกาศกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ เรื่องเกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร ฉบับที่ 3 [16]

ผลการวิจัย

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และการปนเปื้อนจุลินทรีย์ ของน้ำผึ้งชันโรง ได้ทำการตรวจลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ค่ากรด-ด่าง (pH) และความชื้น (moisture) ส่วนการตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนจุลินทรีย์ ได้ตรวจปริมาณยีสต์และราเส้นใย ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่พบทั่วไปตามธรรมชาติ และ ยีสต์มักพบในอาหารที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้มีการตรวจวิเคราะห์จุลินทรีย์อีก 4 ชนิด ได้แก่ *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* sp., *Bacillus cereus* และ *Clostridium perfringens* เนื่องจากเป็นเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคในระบบทางเดินอาหาร จึงมีความจำเป็นต้องตรวจเนื่องจากเสี่ยงต่อโรกระบบทางเดินอาหาร

ผลการตรวจวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ จำนวน 25 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 1 รายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและการปนเปื้อนจุลินทรีย์ของน้ำผึ้งชันโรง

Community enterprises	pH (at 10% w/v)	Moisture content (%)	Yeast and Mold Count (CFU/g)	<i>Staphylococcus aureus</i> (CFU/g)	<i>Salmonella</i> sp. (CFU/g)	<i>Bacillus cereus</i> (CFU/g)	<i>Clostridium perfringens</i> (CFU/g)
Group 1	3.60	16.66	<1	<1	ND	<1	<1
Group 2	3.85	15.59	3.8×10^3	<1	ND	<1	<1
Group 3	4.05	18.32	2.0×10^3	<1	ND	<1	<1
Group 4	3.95	15.88	10	<1	ND	<1	<1
Group 5	4.20	18.23	3.0×10^4	<1	ND	<1	<1
Group 6	4.25	14.48	195	<1	ND	<1	<1
Group 7	3.84	17.16	80	<1	ND	<1	<1
Group 8	4.07	16.20	640	<1	ND	<1	<1
Group 9	3.94	18.04	475	<1	ND	<1	<1
Group 10	4.13	17.44	515	<1	ND	<1	<1
Group 11	4.26	14.63	595	<1	ND	<1	<1
Group 12	4.16	15.47	530	<1	ND	<1	<1
Group 13	3.80	16.49	<1	<1	ND	<1	<1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและการปนเปื้อนจุลินทรีย์ของน้ำผิ่ชั้นโรง (ต่อ)

Community enterprises	pH (at 10% w/v)	Moisture content (%)	Yeast and Mold Count (CFU/g)	<i>Staphylococcus aureus</i> (CFU/g)	<i>Salmonella</i> sp. (CFU/g)	<i>Bacillus cereus</i> (CFU/g)	<i>Clostridium perfringens</i> (CFU/g)
Group 14	4.10	16.06	2.8×10^3	<1	ND	<1	<1
Group 15	4.25	18.13	1.6×10^4	<1	ND	<1	<1
Group 16	3.41	17.17	70	<1	ND	<1	<1
Group 17	3.68	18.20	<1	<1	ND	<1	<1
Group 18	4.08	17.21	20	<1	ND	<1	<1
Group 19	4.05	17.11	435	<1	ND	<1	<1
Group 20	4.19	18.26	6.0×10^3	<1	ND	<1	<1
Group 21	4.43	16.58	96	<1	ND	<1	<1
Group 22	4.45	16.81	2.1×10^4	<1	ND	<1	<1
Group 23	4.24	17.93	9.0×10^3	<1	ND	<1	<1
Group 24	3.90	19.68	9.0×10^4	<1	ND	<1	<1
Group 25	3.42	20.07	2	<1	ND	<1	<1

ND = Not Detected

จาก ตารางที่ 1 การตรวจวัดลักษณะทางกายภาพ และการปนเปื้อนจุลินทรีย์ ของน้ำผิ่ชั้นโรง ที่เก็บจาก 25 กลุ่มวิสาหกิจชุมชน ตรวจพบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำผิ่ชั้นโรง มีค่าความเป็นกรดอยู่ระหว่าง 3.21 – 4.45 ส่วนค่าความชื้นมีค่าอยู่ระหว่าง 14.48 -20.07%

การวิเคราะห์การปนเปื้อนจุลินทรีย์ ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณยีสต์และราเส้นใย, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* sp., *Bacillus cereus* และ *Clostridium perfringens* จาก น้ำผิ่ชั้นโรงที่เก็บจาก 25 กลุ่มวิสาหกิจชุมชน พบค่าการปนเปื้อน ดังนี้ 1) ปริมาณยีสต์และราเส้นใย น้อยที่สุด มีปริมาณน้อยกว่า 1 (CFU/g) และ ตัวอย่างที่มีปริมาณยีสต์และราเส้นใยมากที่สุด มีปริมาณ 9.0×10^4 CFU/g 2) *Staphylococcus aureus* มีปริมาณน้อยกว่า 1 CFU/g ทั้ง 25 ตัวอย่าง 3) *Salmonella* sp. ตรวจไม่พบทั้ง 25 ตัวอย่าง 4) ปริมาณ *Bacillus cereus* มีปริมาณน้อยกว่า 1 CFU/g ทั้ง 25 ตัวอย่าง และ 5) ปริมาณ *Clostridium perfringens* มีปริมาณน้อยกว่า 1 CFU/g ทั้ง 25 ตัวอย่าง

เนื่องจากยังไม่มีการประกาศเกณฑ์คุณภาพของน้ำผิ่ชั้นโรง จึงเทียบเคียงผลการวิเคราะห์กับ เกณฑ์คุณภาพของเครื่องดื่มที่ไม่ได้บรรจุในภาชนะปิดสนิท จากประกาศกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ เรื่องเกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร ฉบับที่ 3 [16] ดังนี้

เมื่อนำเกณฑ์คุณภาพของเครื่องดื่มที่ไม่ได้บรรจุในภาชนะปิดสนิท มาเปรียบเทียบกับผลการ วิเคราะห์น้ำผิ่ชั้นโรงทั้ง 25 ตัวอย่าง พบตัวอย่างน้ำผิ่ชั้นโรงทั้ง 25 ตัวอย่าง ไม่พบการปนเปื้อน จุลินทรีย์ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* sp., *Bacillus cereus* และ *Clostridium perfringens* โดยเทียบกับเกณฑ์คุณภาพของเครื่องดื่มที่ไม่ได้บรรจุในภาชนะปิดสนิท (ไม่พบ *Staphylococcus aureus* /0.1 มิลลิลิตร, ไม่พบ *Salmonella* spp. /25 มิลลิลิตร, *Clostridium perfringens* น้อยกว่า 100 CFU/มิลลิลิตร, *Bacillus cereus* น้อยกว่า 100 CFU/ มิลลิลิตร) ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณยีสต์และราเส้นใย ในเกณฑ์คุณภาพของเครื่องดื่มที่ไม่ได้บรรจุใน ภาชนะปิดสนิทไม่ได้ระบุเกณฑ์ไว้ แต่มีการระบุเกณฑ์จำนวนยีสต์ น้อยกว่า 5,000 CFU/มิลลิลิตร และ จำนวนราเส้นใย น้อยกว่า 100 CFU/มิลลิลิตร หากใช้เกณฑ์จำนวนยีสต์ (มีค่าน้อยกว่า 5,000 CFU/

มิลลิลิตร) มาพิจารณา พบตัวอย่างน้ำฝั้ช้โรงที่ผ่านเกณฑ์จำนวน 19 ตัวอย่าง และไม่ผ่านเกณฑ์จำนวน 6 ตัวอย่าง เนื่องจากการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำฝั้ช้โรง พบน้ำฝั้ช้โรงทุกตัวอย่างมีค่าความเป็นกรดอยู่ระหว่าง 3.41 – 4.45 ซึ่งเป็นสภาวะที่ยีสต์สามารถเจริญเติบโตได้ดี แต่ถ้านำเกณฑ์ของมาตรฐานน้ำฝั้ช้ จากประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 211 พ.ศ.2543 [17] ที่ได้กำหนดว่าในน้ำฝั้ช้ต้องตรวจพบยีสต์และราเส้นใย ไม่เกิน 10 โคโลนีต่อน้ำฝั้ช้ 1 กรัม พบตัวอย่างน้ำฝั้ช้โรงที่ผ่านเกณฑ์ จำนวน 5 ตัวอย่าง และไม่ผ่านเกณฑ์จำนวน 20 ตัวอย่าง

อภิปรายผลการวิจัย

จากการตรวจสอบคุณภาพของน้ำฝั้ช้โรง โดยตรวจลักษณะทางกายภาพ และการปนเปื้อนจุลินทรีย์ของน้ำฝั้ช้โรงที่เก็บจาก 25 กลุ่มวิสาหกิจชุมชน ตรวจพบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำฝั้ช้โรง มีค่าความเป็นกรดอยู่ระหว่าง 3.21 – 4.45 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chuttong et.al. [18] ที่ตรวจพบค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่าอยู่ระหว่าง 3.1–3.9 ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างจะมีผลต่อเนื้อสัมผัส ความเสถียร และอายุการเก็บรักษา ความเป็นกรดยังช่วยเพิ่มรสชาติให้กับน้ำฝั้ช้และเป็นตัวขั้ความคงตัวของจุลินทรีย์ เนื่องจากแบคทีเรียส่วนใหญ่ไม่สามารถเติบโตได้ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด [19] ส่วนค่าความชื้นของน้ำฝั้ช้โรงที่ตรวจ มีค่าอยู่ระหว่าง 14.48–20.07% สอดคล้องกับงานวิจัยของ สมนึก บุญเกิด [20] ที่เก็บน้ำฝั้ช้โรงที่เลี้ยงในพื้นที่ของวังสระปทุม จำนวน 3 จุด โดยตรวจค่าความชื้นของน้ำฝั้ช้โรงมีค่าระหว่าง 16–20%, 23–27% และ 21–24% ตามลำดับ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shamsudin et al. [21] ที่ตรวจพบค่าความชื้นในน้ำฝั้ช้โรง มีค่าระหว่าง 14.67–25.49% ซึ่งความชื้นในน้ำฝั้ช้โรง มีสาเหตุมาจากแหล่งทางพฤกษศาสตร์ของน้ำหวาน สภาพอากาศ และวิธีการในการเก็บน้ำฝั้ช้โรง ทั้งนี้ปริมาณความชื้นถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในน้ำฝั้ช้ เนื่องจากอาจส่งผลต่อความหนืด น้ำหนัก การบ่ม รสชาติ และการตกผลึกของน้ำฝั้ช้โรง [22]

จากรายงานการศึกษาของ Anderson et al. [23] และ Morais et al. [24] กล่าวว่าจุลินทรีย์ที่พบมากในน้ำฝั้ช้โรงเป็นยีสต์ รา และแบคทีเรีย ซึ่งแบคทีเรียที่พบส่วนใหญ่เป็น *Bacillus*, *Streptomyces*, และ *Lactobacillus* [25–28] แหล่งที่มาของแบคทีเรียเกิดได้ในเกษตร อากาศ ดอกไม้ และระบบย่อยอาหารของชันโรง ส่วนแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำฝั้ช้โรงมาจากการปนเปื้อนของมนุษย์ อุปกรณ์ ภาชนะบรรจุ ลม และฝุ่น [29] ซึ่งตัวอย่างน้ำฝั้ช้โรงจากการศึกษาครั้งนี้ การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ทั้ง 4 ชนิด (*Staphylococcus aureus*, *Salmonella* sp., *Bacillus cereus* และ *Clostridium perfringens*) ไม่เกินเกณฑ์คุณภาพของเครื่องดื่มที่ไม่ได้บรรจุในภาชนะปิดสนิท

ส่วนปริมาณยีสต์และราเส้นใย ของการศึกษานี้มีค่าน้อยที่สุดคือ น้อยกว่า 1 (CFU/g) และตัวอย่างที่มีปริมาณยีสต์และราเส้นใย มากที่สุด เท่ากับ 9.0×10^4 CFU/g เมื่อเทียบกับเกณฑ์คุณภาพของเครื่องดื่มที่ไม่ได้บรรจุในภาชนะปิดสนิท จากประกาศกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ พบตัวอย่างน้ำฝั้ช้โรงที่มีค่าเกินเกณฑ์คุณภาพเครื่องดื่มที่ไม่ได้บรรจุในภาชนะปิดสนิท (มีค่ายีสต์เกิน 5,000 CFU/g) สอดคล้องกับน้ำฝั้ช้โรงที่เก็บจากโรงที่เลี้ยงในพื้นที่ของวังสระปทุม จำนวน 3 จุด โดยมีปริมาณยีสต์รวม 1.1×10^4 ถึง 3.9×10^5 CFU/g ซึ่งมีค่าเกินเกณฑ์คุณภาพเครื่องดื่มที่ไม่ได้บรรจุในภาชนะปิดสนิทเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากยังไม่มีเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำฝั้ช้โรง มีแต่เพียงการเทียบเคียงกับมาตรฐานเกณฑ์คุณภาพของเครื่องดื่มที่ไม่ได้บรรจุในภาชนะปิดสนิทเท่านั้น ทั้งนี้ค่ายีสต์ที่มีค่าเกินเกณฑ์

คุณภาพเครื่องดื่มที่ไม่ได้บรรจุในภาชนะปิดสนิท เกิดได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ การปนเปื้อนจุลินทรีย์ อาจเกิดจากภาชนะ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บและบรรจุน้ำผึ้ง

สรุปผลการวิจัย

การปนเปื้อนของจุลินทรีย์เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์เช่น การพูดคุย การไอ จาม [12] การขนส่ง การทำความสะอาดบ้าน หรือสถานประกอบการ การล้างห้องน้ำและสิ่งปฏิกูล และการถูพื้น ทำให้เกิดการปนเปื้อนและเกิดละอองฝอย [12, 13] ถึงแม้ว่าน้ำผึ้งชั้นโรงจะมีความหนืดสูง ค่าปริมาณน้ำอิสระ และ สารอาหารต่ำ แต่ยังคงพบจุลินทรีย์ในเกสร ผุ่น อากาศ ดิน และ น้ำหวาน ซึ่งควบคุมได้ยาก จึงเกิดการปนเปื้อนจุลินทรีย์ทั้งจากภาชนะ อุปกรณ์ ซึ่งควบคุมให้ถูกหลักสุขอนามัยได้ระหว่างที่มีการเก็บน้ำผึ้งชั้นโรง [14] เพื่อให้ผู้บริโภคที่ซื้อผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งชั้นโรงมาบริโภคมีความปลอดภัย เกษตรกรที่เลี้ยงชันโรง ควรมีการควบคุมคุณภาพน้ำผึ้งชั้นโรง โดยควบคุมวิธีการเก็บน้ำผึ้งชั้นโรง และภาชนะที่บรรจุ การปนเปื้อนจุลินทรีย์อาจเกิดทั้งจากภาชนะ อุปกรณ์ ซึ่งควบคุมให้ถูกหลักสุขอนามัยได้ระหว่างที่มีการเก็บน้ำผึ้งชั้นโรงให้ปราศจากเชื้อ เพื่อให้น้ำผึ้งชั้นโรงที่จำหน่ายมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค

ผลการศึกษาครั้งนี้ ช่วยให้เกษตรกรที่เลี้ยงชันโรงทราบถึงการปนเปื้อนจุลินทรีย์ในน้ำผึ้งชั้นโรง และได้แนวทางในการควบคุมคุณภาพให้ปลอดภัยต่อผู้บริโภค โดยแนวทางที่ทำให้ผู้บริโภคมีความมั่นใจในการบริโภคน้ำผึ้งชั้นโรง คือ การขึ้นทะเบียน อย. น้ำผึ้งชั้นโรง ปัจจุบันมีวิสาหกิจชุมชนที่ขอขึ้นทะเบียน อย. ของน้ำผึ้งชั้นโรงเพียงกลุ่มเดียวเท่านั้น ซึ่งกลุ่มอื่นยังอยู่ระหว่างดำเนินการ เนื่องจากต้องใช้งบประมาณในการจัดสร้างโรงเรือนและจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ อย่างไรก็ตามเพื่อให้วิสาหกิจชุมชนสามารถขายผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งชั้นโรงได้ในปริมาณมากขึ้น คณะผู้วิจัยได้วางแผนศึกษาคุณภาพน้ำผึ้งชั้นโรง (สี รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการ) ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณงบประมาณในการสนับสนุนทุนการวิจัยจากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนาระดับพื้นที่ (บพท.) และขอขอบคุณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนทั้ง 25 กลุ่ม ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างน้ำผึ้งชั้นโรง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐพัชร เกียรติวรกานต์. (2560). มารู้จักกับชันโรง: ฐานเรียนรู้ผึ้งชันโรง มหาวิทยาลัยแม่โจ้. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <http://mjustinglessbee.com/content.php?view=201501211501163qZjwWu> (23 กรกฎาคม 2560).
- [2] Rao, P. V., Krishnana, K. T., Sallehb, N., & Gan, S. H. (2016). Biological and therapeutic effects of honey produced by honey bees and stingless bees: a comparative review. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 26, 657–664.
- [3] Rasmussen, C., & Cameron, S. A. (2010). Global stingless bee phylogeny supports ancient divergence, vicariance, and long distance dispersal. *Biological Journal of Linnean Society*, 99, 206–232.

- [4] สมนึก บุญเกิด และธนาธิ เสือวรรณศรี. (2544). *ผึ้ง แมลงที่มีแต่ให้...?*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ มติชน.
- [5] Adnan, F., Sadiq, M., & Jehangir, A. (2011). Anti-hyperlipidemic effect of Acacia honey (desi kika) in cholesterol-diet induced hyperlipidemia in rats. *Biomedica*, 27, 62–67.
- [6] วุฒิพร เสาวคนธ์. (2562). *แผนธุรกิจการจำหน่ายผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งชันโรง ภายใต้แบรนด์ PEUNG JIEW*. การจัดการมหบัณฑิต สาขาวิชาความเป็นผู้ประกอบการ. มหาวิทยาลัยกรุงเทพ.
- [7] อรรณพ ดวงภักดี, ปรีชา รอดอ้อม, มนูญญา เพียรเจริญ และ สุภาวดี ชมพูพันธ์. (2553). *การศึกษา การเลี้ยงชันโรง เพื่อผลิตน้ำผึ้งสมุนไพรและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้*. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัย.
- [8] ศนิ จิระสถิตย์. (2560). จุลินทรีย์ก่อโรคในอาหาร. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 22(2), 218–232.
- [9] Ray, B., & A. Bhunia. (2014). *Fundamental Food Microbiology* (5th ed). Florida: Taylor & Francis.
- [10] Scallan, E., Griffin, P. M., Angulo, F. J., Tauxe, R. V., & Hoekstra, R. M. (2011). Foodborne illness acquired in the United States-unspecified agents. *Emerging Infectious Diseases*, 17, 16–22.
- [11] Khalid, M. I., Chilik, T. Z. T., Ahmad, F., Abd Razak, S. B., & Mohd Amin, A. T. (2019). Bio-risk stingless bee honey: an assessment of microbial air quality surrounding meliponiculture farm with IMA standard at Marang and Kuala Nerus, Terengganu, Malaysia. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, Special Issue, 86–91.
- [12] Kalogerakis, N., Paschli, D., Lekaditis, V., Pandidou, A., Eleftheriadis, K., & Lazaridis, M. (2005). Indoor air quality - bioaerosol measurements in domestic and office premises. *Journal of Aerosol Science*, 36(5–6), 751–761.
- [13] Chen, Q., & Hildermann, L. M. (2009). The effect of human activities on exposure to particulate matter and bioaerosols in residential homes. *Environmental Science and Technology*, 43(13), 4641–4646.
- [14] Snowdon, J. A., & Cliver, D. O. (1996). Microorganisms in honey. *International Journal of Food Microbiology*, 31, 1–26.
- [15] สำนักคุณภาพและความปลอดภัยอาหาร. (2561). *เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารและ ภาชนะสัมผัสอาหาร ฉบับที่ 3*. [ออนไลน์], สืบค้นจาก www.moph.go.th (6 กันยายน 2566).
- [16] Van der Vorst, M. M., Jamal, W., Rotimi, V. O., & Moosa, A. (2006). Infant botulism due to consumption of contaminated commercially prepared honey. *Medical Principles Practice*, 15, 456–458.
- [17] สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. (2557). *มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 8003-2556*. [ออนไลน์], สืบค้นจาก www.acfs.go.th/standard/download/honey.pdf (6 กันยายน 2566).

- [18] Chuttong, B., Chanbang, Y., Sringarm, K., & Burgett, M. (2016). Physicochemical profiles of stingless bee (Apidae: Meliponini) honey from South East Asia (Thailand). *Food Chemistry*, 192, 149–155.
- [19] Keng, C. B., Haron, H., Talib, R. A., Subramaniam, P. (2017). Physical properties, antioxidant content and anti-oxidative activities of Malaysian stingless kelulut (*Trigona* spp.) honey. *Journal of Agricultural Science*, 9(13), 32–40.
- [20] สมนึก บุญเกิด. (ม.ป.ป). *คู่มือการเพาะเลี้ยงผึ้งชันโรง(ผึ้งจิ๋ว)*, ม.ป.ท.
- [21] Shamsudin, S., Selamat, J., Sanny, M., Bahari, A. R. S., Jambari, N. N., & Khatib, A. (2019). A comparative characterization of physicochemical and antioxidants properties of processed *Heterotrigona itama* honey from different origins and classification by chemometrics analysis. *Molecules*, 24(3898), 1–20.
- [22] Nascimento, A., Marchini, L., Carvalho, C., Araújo, D., Olinda, R., & Silveira, T. (2015). Physical-chemical parameters of honey of stingless bee (Hymenoptera: Apidae). *Chemical Sciences Journal*, 7, 139–149.
- [23] Anderson, K. E., Sheehan, T. H., Eckholm, B. J., Mott, B. M., & DeGarndi-Hoffman, G. (2011). An emerging paradigm of colony health: microbial balance of the honey bee and hive (*Apis mellifera*). *Insectes Sociaux*, 58, 431–444.
- [24] Morais, P. B., Calaça, P. S. S. T., & Rosa, C. A. (2013). *Microorganisms associated with stingless bees*. In Pot-Honey: A Legacy of Stingless Bees. New York: Springer.
- [25] Amin, F. A. Z., Sabri, S., Ismail, M., Chan, K. W., Ismail, N., Mohd Esa, N., Mohd Lila, M. A., & Zawawi, N. (2020). Probiotic properties of *Bacillus* strains isolated from stingless bee (*Heterotrigona itama*) honey collected across Malaysia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(1), 278.
- [26] Ngalmat, M. S., Raja Abd Rahman, R. N. Z., Yusof, M. T., Syahir, A., & Sabri, S. (2019). Characterisation of bacteria isolated from the stingless bee, *Heterotrigona itama*, honey, bee bread and propolis. *Peer Journal*, 7, 1–20.
- [27] Promnuan, Y., Kudo, T., & Chantawannakul, P. (2009). Actinomycetes isolated from beehives in Thailand. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25(9), 1685–1689.
- [28] Yaacob, S. N. S., Huyop, F., Ibrahim, R. K. R., & Wahab, R. A. (2018). Identification of *Lactobacillus* spp. and *Fructobacillus* spp. isolated from fresh *Heterotrigona itama* honey and their antagonistic activities against clinical pathogenic bacteria. *Journal of Apicultural Research*, 57(3), 395–405.
- [29] Olaitan, P. B., Adeleke, O. E., & Iyabo, O. O. (2007). Honey: a reservoir for microorganisms and an inhibitory. *African Health Sciences*, 7(3), 159–165.

การเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรและวิวัฒนาการของระบบดาวคู่ วี 1851 โอไรโอนิดส์ Orbital Period Change and Evolution of the Binary System V1851 Orionids

ฐิติพงษ์ อุ่นใจ

Thitipong Unchai

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
Physics Program, Faculty of Science, Ubon Ratchathani Rajabhat University

Submitted 5/12/2023 ; Revised 8/1/2024 ; Accepted 25/03/2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่ วี 1851 โอไรโอนิดส์ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลในช่วงแสงที่ตามองเห็นด้วยกล้องดีเอสแอลอาร์ ที่ต่อเข้ากับกล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร วัดแสงด้วยเทคนิคโฟโตเมตรีเพื่อสร้างกราฟแสงและค่าเวลาที่แสงน้อยที่สุดในช่วงอุปราคาปฐมภูมิ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าระบบดาวคู่ วี 1851 โอไรโอนิดส์ มีคาบการโคจรเท่ากับ $0.2702 (\pm 0.0028)$ วัน เมื่อนำข้อมูลมาเขียนเป็นแผนภาพ O - C พบว่าคาบการโคจรมีค่าลดลงในอัตรา $1.2340 \times 10^{-11} (\pm 0.0001 \times 10^{-11})$ วันต่อรอบหรือ $1.4062 \times 10^{-3} (\pm 0.0001 \times 10^{-3})$ วินาทีต่อปี เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานระหว่างดาวในระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด

คำสำคัญ: ระบบดาวคู่ วี 1851 โอไรโอนิดส์ อุปราคาปฐมภูมิ คาบการโคจร

ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)

E-mail: Thitipong.u@ubru.ac.th

Abstract

The research objective was to study the orbital period change of the variable star V1851 Orionids using a 0.2-meter reflecting telescope with a DSLR camera in the visible light band. A photometric system was used to observe the light curve and the primary minimum eclipse. The results indicated that the orbital period of V1851 Orionids is 0.2702 (± 0.0028) days. The O – C diagrams of the light curve showed that the orbital period decreased by 1.2340×10^{-11} ($\pm 0.0001 \times 10^{-11}$) day/cycle, or 1.4062×10^{-3} ($\pm 0.0001 \times 10^{-3}$) second/year, influenced by the thermal relaxation oscillation process in the closed binary system.

Keywords: binary star, V1851 Ori, primary eclipse, orbital period

บทนำ

ดาวแปรแสงคือดาวฤกษ์ที่ความสว่างเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ความแปรผันของความสว่างสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย ดาวแปรแสงสามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่าง ๆ ตามลักษณะของการผันแปรความสว่าง การแปรแสงของดาวฤกษ์มีปัจจัยที่ส่งผลแตกต่างกัน ได้แก่ ดาวแปรแสงชนิดที่มีการแปรแสงจากการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพภายใน (intrinsic variability) แบ่งเป็น 3 กลุ่มย่อย ได้แก่ pulsating variables คือ ดาวฤกษ์ที่มีการขยายขนาดรัศมีใหญ่ขึ้นอันเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการวิวัฒนาการตามอายุของดาว eruptive variables คือ ดาวฤกษ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันที่พื้นผิวของดาว เช่น การพวยพุ่งของมวลดาว และ explosive variables คือ ดาวฤกษ์ที่กำลังเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลง เช่น การเกิดโนวา หรือ ซูเปอร์โนวา ส่วนดาวแปรแสงชนิดที่มีการแปรแสงเกิดจากสมบัติภายนอก (extrinsic variability) เช่น การหมุน การเกิดคราส [1] แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ การเกิดคราสของดาวคู่หรือดาวแฝด (eclipsing binaries) ซึ่งจากมุมมองบนโลกจะมองเห็นดาวฤกษ์บังกันและกันเป็นบางครั้งตามรอบของการโคจร และดาวแปรแสงจากการหมุน (rotational variability) คือ ดาวฤกษ์ที่มีการแปรแสงอันเกิดจากการปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของดาว ตัวอย่างเช่น ดาวฤกษ์ที่มีจุดมืดขนาดใหญ่มาก ๆ จะส่งผลต่อความสว่างที่ปรากฏออกมา หรือ ดาวฤกษ์ที่มีอัตราการหมุนรอบตัวเองเร็วมากก็สามารถมองเห็นเป็นรูปทรงรี [2]

ดาวแปรแสงมีความสำคัญต่อนักดาราศาสตร์เพราะดาวฤกษ์ให้ข้อมูลที่มีคุณค่าเกี่ยวกับคุณสมบัติและกระบวนการของดาวฤกษ์ ด้วยการศึกษาความแปรผันของความสว่าง นักวิทยาศาสตร์สามารถเรียนรู้เกี่ยวกับโครงสร้างภายใน องค์ประกอบ และวิวัฒนาการของดาวฤกษ์ได้ [3] ดาวแปรแสงบางประเภท เช่น ดาวแปรแสงชนิดเซเฟอิด (Cepheid variable) มีความสำคัญอย่างยิ่งในการกำหนดระยะห่างจากกาแลคซีและทำความเข้าใจขนาดของจักรวาล

ดาวคู่อุปราคาวี 1851 โอไรโอนิดส์ หรือ V1851 Ori (หรือ GSC 702-1892 หรือ 2MASS J05124486+1015104 หรือ ASAS J051245+101512 หรือ NSVS 9512770) จัดเป็นระบบดาวคู่อุปราคาแบบแตะกันชนิด W UMa [4] ในกลุ่มดาวนายพราน (Orion) ที่ตำแหน่งพิกัด right ascension เท่ากับ $05^{\text{h}} 12^{\text{m}} 44.86^{\text{s}}$ (78.18692°) และ declination เท่ากับ $+10^{\circ} 15' 10.4''$ ($+10.25290^{\circ}$) ถูกค้นพบโดย Blattler and Diethelm ในปี ค.ศ.2007 [5] มีค่าความสว่างในช่วงแสงที่ตามองเห็นเท่ากับ 12.6 [6] และมีคาบการแปรแสง 0.276945 วัน [7]

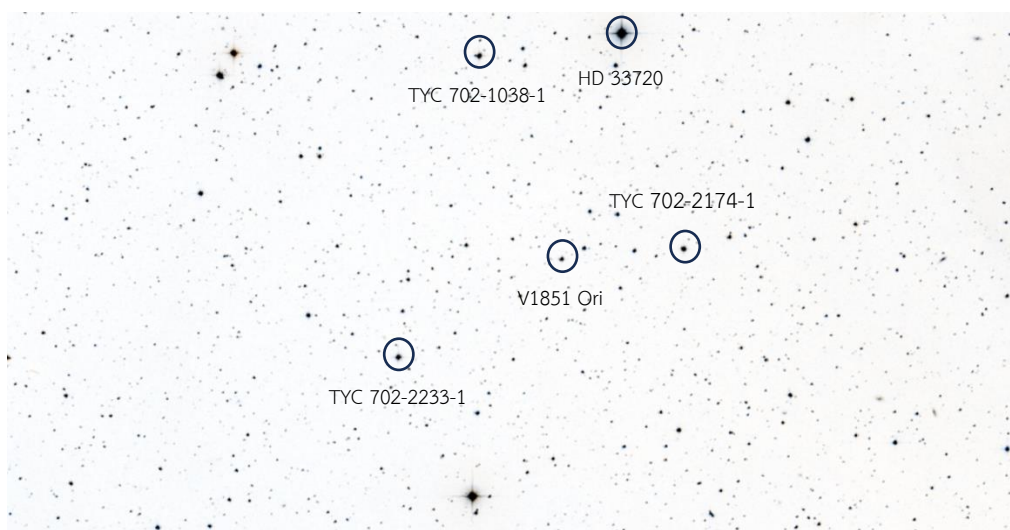
เนื่องจากดาวคู่อุปราคา V1851 Ori เป็นระบบดาวคู่ที่เพิ่งถูกค้นพบ ทำให้มีข้อมูลกายภาพและ วิวัฒนาการของดาวไม่มากนัก ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาวิเคราะห์คาบการโคจรและการเปลี่ยนแปลงคาบวงโคจร และนำข้อมูลที่ได้อมาศึกษาเปรียบเทียบกับทฤษฎีและผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคาบการโคจร เพื่อเป็นการตรวจสอบและยืนยันแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าการแปรแสงของระบบดาวคู่ V1851 Ori ให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคาบการแปรแสงของระบบดาวคู่ วี 1851 โอไรโอนิดส์
2. ตรวจสอบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าการแปรแสงของระบบดาวคู่วี 1851 โอไรโอนิดส์

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ดำเนินการสังเกตการณ์เก็บรวบรวมข้อมูลด้วยกล้องดีเอสแอลอาร์ (DSLR) Canon รุ่น 80D ความละเอียด 6000×4000 พิกเซล ต่อเข้ากับกล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสง Meade LX200 แบบสมิทท์-แคสสิเกรน (Schmidt-Cassegrain) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร ระยะโฟกัส 2,000 มิลลิเมตร อัตราส่วนความยาวโฟกัส (focal ratio) f/10 สังเกตและเก็บข้อมูลในระหว่างวันที่ 30–31 ธันวาคม 2564 ณ อำเภอเชิงเจียม จังหวัดอุบลราชธานี จำนวน 106 ภาพ เวลาเปิดหน้ากล้อง 60 วินาที ห่างกันภาพละ 4 นาที เทียบเวลากับกล้องดีเอสแอลอาร์กับเวลามาตรฐานประเทศไทยจากกรมอุทกศาสตร์ บันทึกภาพเป็นไฟล์ข้อมูล RAW บน ADC (analog-to-digital converter) ขนาด 14 บิต เพื่อเป็นการป้องกันสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้นที่ความไวแสง ISO 400 [8] ทั้งนี้ เนื่องจากกล้อง DSLR ใช้เซ็นเซอร์ CMOS ที่ประกอบด้วยพิกเซลแบบ RGB Bayer filter [9] การศึกษาวิจัยในครั้งนี้จึงเก็บรวบรวมข้อมูลเฉพาะช่วงแสงที่ตามองเห็นเท่านั้น จากนั้นวัดแสงด้วยเทคนิคโฟโตเมตรี (photometry) โดยอาศัยดาว TYC 702-0 2174-1 ดาว TYC 702-2233-1 และดาว TYC 702-1038-1 เป็นดาวเปรียบเทียบ (comparison star) และมีดาว HD 33720 เป็นดาวตรวจสอบ (check star) (ภาพที่ 1) ได้ข้อมูลเบื้องต้นของดาวศึกษา ดาวตรวจสอบ และดาวเปรียบเทียบ [10] (ตารางที่ 1)



ภาพที่ 1 ระบบดาวคู่ V1851 Ori ดาวตรวจสอบ และดาวเปรียบเทียบ

ตารางที่ 1 พิกัดและความสว่างของดาวคู่อุปราคา V1851 Ori ดาวตรวจสอบ และดาวเปรียบเทียบ

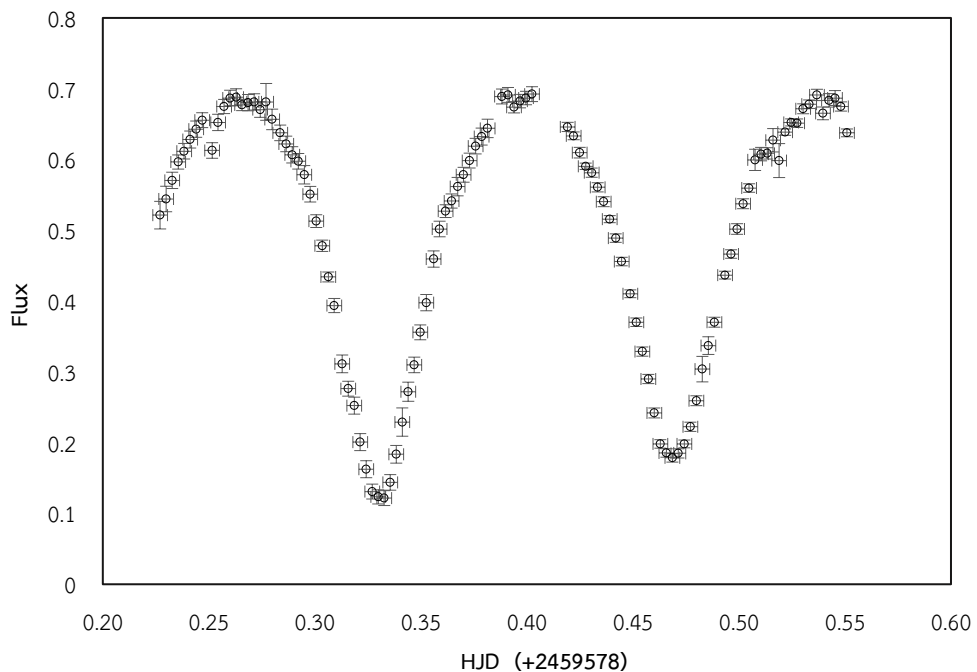
ดาว	Right ascension (J2000)	Declination (J2000)	ความสว่าง
V1851 Ori (ดาวศึกษา)	05 ^h 12 ^m 44.86 ^s	+10° 15' 10.40''	12.45
HD 33720 (ดาวตรวจสอบ)	05 ^h 12 ^m 34.69 ^s	+10° 24' 29.85''	8.28
TYC 702-2174-1 (ดาวเปรียบเทียบ)	05 ^h 12 ^m 24.09 ^s	+10° 15' 34.71''	11.59
TYC 702-2233-1 (ดาวเปรียบเทียบ)	05 ^h 13 ^m 12.26 ^s	+10° 11' 05.30''	11.39
TYC 702-1038-1 (ดาวเปรียบเทียบ)	05 ^h 12 ^m 58.61 ^s	+10° 23' 35.58''	11.27

ผลการวิจัย

กราฟแสงของระบบดาวคู่

การวิเคราะห์องค์ประกอบวงโคจรและสมบัติทางกายภาพ ตลอดจนการสร้างแบบจำลองของระบบดาวคู่ จำเป็นที่จะต้องสร้างกราฟแสงจากการสังเกตการณ์ (observational light curve) ระหว่างเวลา หรือนิยามกำหนดในรูปของเฟส (phase) และโชติมาตร (magnitude) ของระบบดาวคู่ในช่วงความยาวคลื่นที่สังเกตการณ์ โดยนักดาราศาสตร์นิยามเฟสของวงโคจร (orbital phase) ของระบบดาวคู่ โดยกำหนดให้ขณะที่ดาวดวงที่สว่างกว่าในระบบดาวคู่ถูกบดบังโดยสมาชิกอีกดวงหนึ่งที่สว่างน้อยกว่า เป็นช่วงเกิดอุปราคาปฐมภูมิ (primary minimum eclipse : Min.I) จะมีเฟสเท่ากับ 0 และความสว่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีความสว่างมากที่สุดที่เฟสเท่ากับ 0.25 ซึ่งเป็นช่วงที่ดาวคู่ทั้งสองไม่บดบังกัน หลังจากนั้นค่าความสว่างจะลดลงจนน้อยอีกครั้งในช่วงเกิดอุปราคาทุติยภูมิ (secondary minimum eclipse : Min.II) โดยในตำแหน่งนี้เฟสจะมีค่าเท่ากับ 0.5 หลังจากนั้นความสว่างจะเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งเฟสเท่ากับ 0.75 และกลับสู่ตำแหน่งเกิดอุปราคาปฐมภูมิอีกครั้งนับเป็นการโคจรครบหนึ่งรอบ ซึ่งตรงกับตำแหน่งเฟสเท่ากับ 0 ดังนั้น เฟสการโคจรของระบบดาวคู่จึงมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แบบนี้ต่อไปเป็นวัฏจักร [11]

เมื่อนำภาพถ่ายที่ได้มาผ่านกระบวนการรีดักชันภาพ (image reduction) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนและวัดแสงโดยวิธีโฟโตเมตรี (photometry) [12] ผ่านโปรแกรม AstrolmageJ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างกราฟแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นพร้อมความคลาดเคลื่อน (error bar) ของเวลา จากการเปิดหน้ากล้องรับแสงในแนวนอน และความคลาดเคลื่อน (uncertainty) ของความสว่างจากการเปรียบเทียบจากดาว HD 33720 (ดาวตรวจสอบ) ในแนวตั้ง (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 กราฟแสงของระบบดาวคู่ V1851 Ori

คาบการโคจรของระบบดาวคู่

การสังเกตการณ์ระบบดาวคู่อุปราคาแบบหนึ่งอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน [13] สร้างกราฟแสงที่ได้จากการสังเกตการณ์จะเกิดคาบเวลาที่แสงน้อยที่สุด (time of minimum) ค่าเวลาที่แสงน้อยที่สุดเหล่านี้จะมีลักษณะเป็นคาบตามสมการเชิงเส้นเอพริเมอร์ริส (linear ephemeris equation) ดังสมการ

$$\text{Min.I} = \text{HJD}_0 + P \cdot E \quad (1)$$

โดยที่ Min.I คือ เวลาที่แสงน้อยที่สุด ในหน่วยวันจูเลียนศูนัยสุริยะ
 HJD_0 คือ เวลาที่แสงน้อยที่สุดที่ epoch = 0 ในรูปของวันจูเลียนศูนัยสุริยะ
 P คือ คาบการโคจรของระบบดาวคู่
 E คือ ยุค (epoch) หรือจำนวนรอบการโคจรของระบบดาวคู่ นับจากวันจูเลียนศูนัยสุริยะ

เมื่อจำนวนรอบการโคจรของระบบดาวคู่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เวลาในการเกิดอุปราคาปฐมภูมิจะมีค่าเคลื่อนไปจากสมการ (1) เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่ สามารถพิจารณาห่อตราการเปลี่ยนแปลงคาบเชิงมุม ด้วยแผนภาพ O - C ได้ว่า

$$O = \text{HJD}_0 + P_{\text{obs}} \cdot E \quad (2)$$

และ

$$C = \text{HJD}_0 + P_{\text{est}} \cdot E \quad (3)$$

โดยที่	O	คือ เวลาที่แสงน้อยที่สุดที่ได้จากการสังเกตการณ์
	C	คือ เวลาที่แสงน้อยที่สุดที่ได้จากการคำนวณ
	P_{obs}	คือ คาบการโคจรของระบบดาวคู่ที่ได้จากการสังเกตการณ์
	P_{est}	คือ คาบการโคจรของระบบดาวคู่ที่คำนวณได้จากสมการเชิงเส้น ephemeris

เมื่อนำสมการ (2) – (3) จะได้

$$O - C = (P_{\text{obs}} - P_{\text{est}}) \cdot E \quad (4)$$

เมื่อนำค่า $O - C$ ที่ได้จากการวิจัยมาเขียนเป็นแผนภาพ $O - C$ ร่วมกับค่าทั้งหมดที่นักดาราศาสตร์ในอดีตเคยคำนวณไว้เป็นข้อมูลในการกำหนดแนวโน้มความสัมพันธ์ หากแผนภาพ $O - C$ มีการกระจายแบบพาราโบลา จะได้ว่า

$$O - C = a \cdot E^2 + b \cdot E + c = (P_{\text{obs}} - P_{\text{est}}) \cdot E \quad (5)$$

อนุพันธ์สมการ (5) เทียบกับ epoch จะได้

$$\frac{dP}{dE} E = (P_{\text{obs}} - P_{\text{est}}) \cdot E = 2a \cdot E + b \quad (6)$$

เทียบสัมประสิทธิ์ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\frac{dP}{dE} = 2a \quad (7)$$

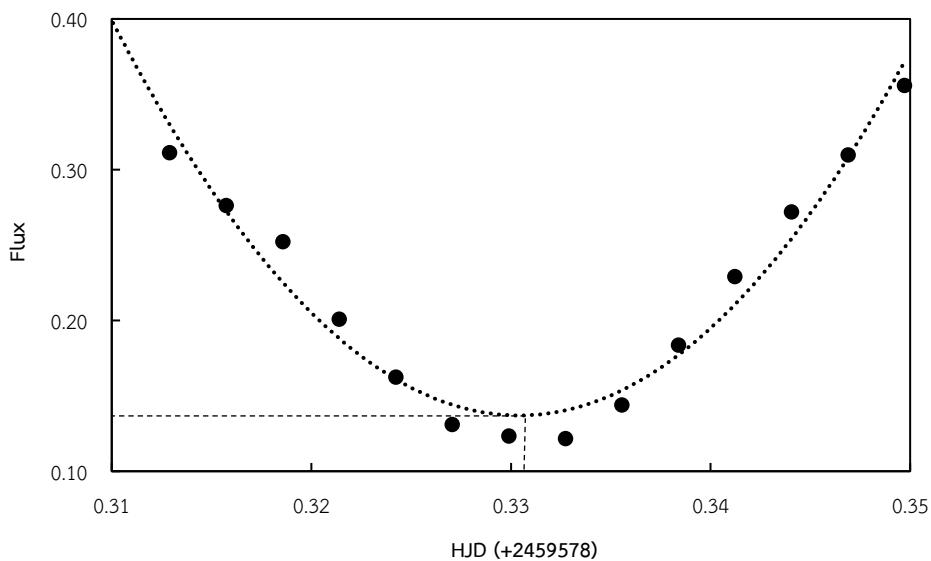
การหาอัตราการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่ จะใช้การพิจารณาแผนภาพ $O - C$ โดยการหาค่า a จากการใช้ quadratic polynomial fitting method โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่ในหน่วยวันต่อรอบ

ข้อมูลกราฟแสงที่ได้มีความสำคัญในการนำมาวิเคราะห์หาค่าเวลาที่แสงน้อยที่สุด (time of minimum light) [14] ของกราฟแสงของระบบดาวคู่ V1851 Ori (ภาพที่ 3) พบว่า ข้อมูลที่ได้จากกราฟแสงในช่วงอุปราคาปฐมภูมิ (primary eclipse) เส้นแนวโน้มตามสมการ

$$\text{Flux} = - (940.42 \cdot \text{HJD}^2) + (621.56 \cdot \text{HJD}) - 89.65 \quad (8)$$

ทำให้สามารถคำนวณหาช่วงเวลาที่แสงน้อยที่สุด time of minimum light (O) จากสมการ (8) ได้เท่ากับ 2459578.3312 มีคาบการโคจรใหม่เท่ากับ $0.2702 (\pm 0.0028)$ วัน สามารถนำมาเขียนเป็นสมการ ephemeris ใหม่เป็นจากงานวิจัยนี้ได้ดังสมการ (9)

$$\text{HJD Min.I} = 2459578.3312 (\pm 0.0009) + 0^{\text{d}}.2702 (\pm 0.0028) \cdot E \quad (9)$$



ภาพที่ 3 กราฟแสงในช่วงอุปราคาปฐมภูมิ

การเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่ V1851 Ori จากการวิจัยนี้ จำเป็นต้องอ้างอิงถึงสมการ linear ephemeris เดิมของนักดาราศาสตร์ท่านอื่น ๆ จากฐานข้อมูล Bob Nelson และงานวิจัยอื่น คือ

$$\text{HJD Min.I} = 2452617.77 + 0^{\text{d}}.27695 \cdot E \quad (10)$$

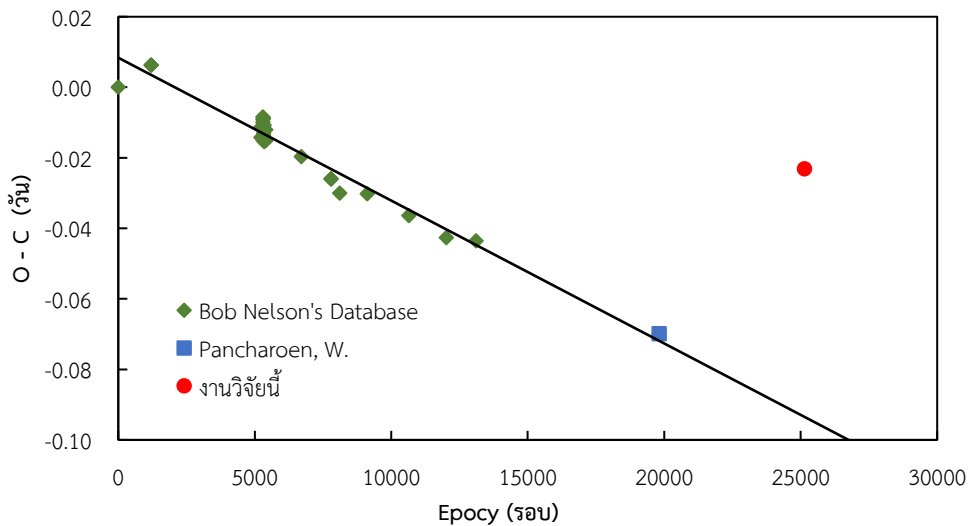
เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบดาวคู่ V1851 Ori มีการเปลี่ยนแปลงค่าวงโคจรไปจากเดิม แทนค่า time of minimum light (O) เพื่อหาค่ายุค (epoch) และคำนวณหาค่า time of minimum light (C) จากสมการ (10) จะได้ค่า $O - C$ เท่ากับ -0.0231 และเมื่อนำค่าที่ได้จากการวิจัยนี้มาเขียนเป็นแผนภาพ $O - C$ รวมค่าที่ได้จากนักดาราศาสตร์ท่านอื่นที่ได้เคยหาค่าไว้ก่อนหน้านี้ (ตารางที่ 2) จะได้ (ภาพที่ 4)

ตารางที่ 2 ค่า O - C ของระบบดาวคู่ V1851 Ori

เวลาที่แสงน้อยที่สุด	ยุค	ค่า O - C	ผู้วิจัย	อ้างอิง
2452617.77	0	0	Bob Nelson's database	[15]
2452950.8087	1202.5	0.00633	Bob Nelson's database	[15]
2452950.8087	1202.5	0.00633	Bob Nelson's database	[15]
2454066.3455	5230.5	-0.0115	Bob Nelson's database	[15]
2454066.4841	5231	-0.0113	Bob Nelson's database	[15]
2454066.6197	5231.5	-0.0142	Bob Nelson's database	[15]
2454083.3803	5292	-0.0091	Bob Nelson's database	[15]
2454083.517	5292.5	-0.0109	Bob Nelson's database	[15]
2454083.6523	5293	-0.014	Bob Nelson's database	[15]
2454085.3181	5299	-0.0099	Bob Nelson's database	[15]
2454085.4516	5299.5	-0.0149	Bob Nelson's database	[15]
2454085.5966	5300	-0.0084	Bob Nelson's database	[15]
2454090.3	5317	-0.0131	Bob Nelson's database	[15]
2454090.4428	5317.5	-0.0088	Bob Nelson's database	[15]
2454090.5764	5318	-0.0137	Bob Nelson's database	[15]
2454097.3646	5342.5	-0.0108	Bob Nelson's database	[15]
2454097.4984	5343	-0.0154	Bob Nelson's database	[15]
2454114.2573	5403.5	-0.012	Bob Nelson's database	[15]
2454114.3927	5404	-0.0151	Bob Nelson's database	[15]
2454474.2846	6703.5	-0.0197	Bob Nelson's database	[15]
2454777.8156	7799.5	-0.0259	Bob Nelson's database	[15]
2454777.954	7800	-0.026	Bob Nelson's database	[15]
2454862.6967	8106	-0.03	Bob Nelson's database	[15]
2455144.9085	9125	-0.0302	Bob Nelson's database	[15]
2455566.6972	10648	-0.0364	Bob Nelson's database	[15]
2455946.6664	12020	-0.0426	Bob Nelson's database	[15]
2456246.8793	13104	-0.0435	Bob Nelson's database	[15]

ตารางที่ 2 ค่า O - C ของระบบดาวคู่ V1851 Ori (ต่อ)

เวลาที่แสงน้อยที่สุด	ยุค	ค่า O - C	ผู้วิจัย	อ้างอิง
2458105.0490	19813.5	-0.06982	Pancharoen, W.	[16]
2459578.3312	25133	-0.0231	งานวิจัยนี้	



ภาพที่ 4 แผนภาพ O - C ของระบบดาวคู่ V1851 Ori

อัตราการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่ V1851 Ori หาได้จากการเปลี่ยนแปลงระหว่าง epoch และ O - C ที่นักดาราศาสตร์ในอดีตเคยคำนวณไว้ทั้งหมดมาเป็นข้อมูลในการกำหนดแนวโน้มความสัมพันธ์ พบว่า เส้นแนวโน้มมีลักษณะความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน (negative correlation) แสดงให้เห็นว่า ระบบดาวคู่ V1851 Ori มีแนวโน้มที่จะมีคาบการโคจรลดลง และเมื่อใช้การวิเคราะห์ quadratic ephemeris จะได้เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์เป็น

$$O - C = 6.1702 \times 10^{-12} (\pm 0.0001 \times 10^{-12}) \cdot E^2 - 4.1668 \times 10^{-6} (\pm 0.0027 \times 10^{-6}) \cdot E + 8.7792 (\pm 0.0014) \quad (11)$$

เมื่อนำมาหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่ V1851 Ori จะได้

$$\frac{dP}{dE} = 2 \cdot (6.1702 \times 10^{-12}) (\pm 0.0001 \times 10^{-12}) = 1.2340 \times 10^{-11} (\pm 0.0014 \times 10^{-12}) \text{ วัน/epoch} \quad (12)$$

อภิปรายผลการวิจัย

เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนคาบวงโคจรของระบบดาวคู่ V1851 Ori มีค่าเป็นจำนวนบวก ส่งผลให้คาบการโคจรของระบบดาวคู่จึงมีค่าลดลงในอัตรา $1.2340 \times 10^{-11} (\pm 0.0001 \times 10^{-11})$ วันต่อรอบ หรือคาบการโคจรลดลง ในอัตรา $1.4062 \times 10^{-3} (\pm 0.0001 \times 10^{-3})$ วินาทีต่อปี ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าคาบวงโคจรของระบบดาวคู่ V1851 Ori มีคาบการโคจรลดลง สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Pancharoen และคณะ [16] เนื่องจากวิวัฒนาการของระบบดาวคู่ที่ดาวสองดวงอยู่ใกล้กันมากจนมีการโคจรรอบจุดศูนย์กลางการโคจรร่วมกัน วิวัฒนาการต่อมาจนกระทั่งสมาชิกดวงหนึ่งกลายเป็นดาวยักษ์แดง กระทั่งมีการขยายตัวของชั้นบรรยากาศจนเต็มผิวห่อหุ้มโรซ (Roche lobes) เกิดการถ่ายเทมวลระหว่างกัน คาบการโคจรของระบบที่ลดลงแสดงให้เห็นว่าดาวทั้งสองดวงอยู่ใกล้กันมากขึ้นทุกขณะ เนื่องจากเกิดการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum lost) อย่างต่อเนื่อง คาบการโคจรของดาวคู่จึงลดลง และอาจนำไปสู่การหลอมกลายเป็นดาวเดี่ยวในที่สุด

สรุปผลการวิจัย

จากการสังเกตการณ์ระบบดาวคู่ V1851 โอโรไอนิดส์ ระหว่างวันที่ 30–31 ธันวาคม 2564 ณ อำเภอโขงเจียม จังหวัดอุบลราชธานี วัดแสงด้วยเทคนิคโฟโตเมตริกเพื่อหาช่วงเวลาที่แสงน้อยที่สุดได้เท่ากับ 2459578.3312 คำนวณคาบการโคจรได้เท่ากับ $0^d.2702 (\pm 0.0028)$ วัน ได้สมการ ephemeris ใหม่เป็น $HJD\ Min.I = 2459578.3312 (\pm 0.0009) + 0^d.2702 (\pm 0.0028) \cdot E$ เมื่อวิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรโดยใช้แผนภาพ O – C พบว่า คาบการโคจรของระบบดาวคู่มีค่าลดลงในอัตรา $1.2340 \times 10^{-11} (\pm 0.0001 \times 10^{-11})$ วันต่อรอบ จึงเป็นไปได้ว่า ระบบดาวคู่ V1851 โอโรไอนิดส์ มีการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมโดยการถ่ายเทมวลระหว่างกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] เชิดตระกูล หอมจำปา. (2552). *โครงสร้างทางกายภาพของระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด*. รายงานวิจัย. มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.
- [2] บุญรักษา สุนทรธรรม. (2550). *ดาราศาสตร์ฟิสิกส์*. สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [3] บุญรักษา สุนทรธรรม. (2546). *การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและวิวัฒนาการของระบบดาวคู่แบบเกือบแตะกันบางระบบ*. รายงานวิจัย. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- [4] Essam, A., Nakhlawy, A., & Rassem, M. A. (2013). The first photometric analyses and classification of the W-UMa eclipsing binary systems GSC 1283-53 and GSC 702-1892. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2(1), 1–7.
- [5] Blattler, E., & Diethelm, R. (2007). Observations of variables. *Information Bulletin on Variable Stars*, 5799, 1 – 4.
- [6] Lasker, B. M., Sturch, C. R., McLean, B. J., Russell, J. L., Jenkner, H., & Shara, M. M. (1990). The Guide Star Catalog. I - Astronomical foundations and image processing. *Astronomy Journal*, 99, 2019–2058.

- [7] Lohr, M. E., Norton, A. J., Payne, S. G., & West, R. G. (2015). Orbital period changes and the higher-order multiplicity fraction amongst SuperWASP eclipsing binaries. *Astronomy & Astrophysics*, 7, 1–7.
- [8] American Association of Variable Star Observers. (2023). AAVSO DSLR Observing Manual. [ออนไลน์], สืบค้นจาก https://www.aavso.org/sites/default/files/AAVSO_DSLR_Observing_Manual_v1-2 (10 มกราคม 2567).
- [9] Park, W., Pak, S., Shim, H., Le, H. A. N., Im, M., Chang, S., & Yu, J. (2015). Photometry Transformation from RGB Bayer Filter System to Johnson-Cousins BVR Filter System. *Advances in Space Research*, 57(1), 509–518.
- [10] Université de Strasbourg. (2023). SIMBAD Astronomical Database - CDS (Strasbourg). [ออนไลน์], สืบค้นจาก <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad> (15 มกราคม 2567).
- [11] ฟาร์รุ่ง สุริยา บุญทิศ. (2565). ฟิสิกส์ดาราศาสตร์เบื้องต้นของโนวา (พิมพ์ครั้งที่ 2). เชียงราย: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย.
- [12] Karen, A. C., John, F. K., & Keivan, G. S. (2017). Astroimagej: Image Processing and Photometric Extraction for Ultra-Precise Astronomical Light Curves. *Astrophysical Journal*, 115, 2.
- [13] ChangQing, L., XiaoBin, Z., Licai, D., Kun, W., Yangping, L., & Xiangsong, F. (2017). Photometric investigation of two contact binaries in the young open cluster NGC 957. *New Astronomy*, 52, 29–34.
- [14] Zasche, P., Liakos, A., Niarchos, P., Wolf, M., Manimanis, V., & Gazeas, K. (2008). Period changes in six contact binaries: WZ And, V803 Aql, DF Hya, PY Lyr, FZ Ori, and AH Tau. *New Astronomy*, 14(2), 121–128.
- [15] American Association of Variable Star Observers. (2023). Bob Nelson's Database of Eclipsing Binary O - C. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://www.aavso.org/bob-nelsons-o-c-files> (9 มกราคม 2567).
- [16] Pancharoen, W., & Maithong, W. (2021). The first study of a period change of the V1851 Orion binary system. *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports*, 24(3), 9–14.

การพัฒนาเครื่องตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟด้วยเทคโนโลยี อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง

The Development of a Coffee Bean Moisture and Temperature Measuring Device by Using Internet of Things

จุฬาวลี มณีเลิศ, พิรุฬห์ แก้วฟุ้งรังษี, ประธาน คำจិនะ และ พรวณา รัตนชูโชค*
Chulawalee Maneelert, Piroon Kaewfoongrunsi, Prathan Comejina,
& Ponwana Rattanachuchok*

ภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
Department of Computer, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University

Submitted 16/04/2024 ; Revised 23/05/2024 ; Accepted 15/06/2024

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ และทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ ผู้วิจัยได้พัฒนาต้นแบบเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ และระบบสารสนเทศแสดงผลการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ ซึ่งประกอบด้วย เซนเซอร์วัดความชื้น และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ วัดค่าและส่งข้อมูลไปยังคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ และแสดงผลการวัดค่าผ่านทางระบบสารสนเทศ ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการทดสอบระหว่างเซนเซอร์วัดความชื้นกับเครื่อง EE-KU และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับ เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (TP101) พบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 เครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ สามารถตรวจวัดความชื้น และอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟได้อย่างถูกต้อง แสดงผลการวัดไปยังแอปพลิเคชันที่ติดตั้งบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ และเว็บแอปพลิเคชันของผู้ใช้งานได้ แอปพลิเคชันสามารถเพิ่มระบบผู้ใช้งานได้ มีฐานข้อมูลเก็บข้อมูลจากผู้ขายได้ เมื่อเปรียบเทียบด้านราคาพบว่าเครื่องที่พัฒนาขึ้นมีราคาถูกกว่าเครื่องที่มีขายตามท้องตลาดซึ่งไม่สามารถใช้งานแบบออนไลน์ และแสดงผลบนหน้าจอของเครื่องเพียงอย่างเดียว อีกทั้งเครื่องที่พัฒนายังมีขนาดเล็กและเบา พกพาไปใช้ได้สะดวกกว่าเครื่องทั่วไปที่มีขนาดใหญ่และราคาแพงกว่า รวมถึงการซ่อมบำรุงก็เป็นไปได้โดยง่ายเพราะว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ หาซื้อได้ภายในประเทศและมีราคาถูก

คำสำคัญ: เมล็ดกาแฟ ความชื้น แอปพลิเคชัน อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง

***ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)**

E-mail: ponwana.r@g.cmr.ac.th

Abstract

This research aimed to develop a device for measuring the moisture and temperature of coffee beans and to test its efficiency. We developed a prototype of the device along with an information system to display the measurement results. The device comprised a moisture sensor and a temperature sensor, which measured the values, transferred the data to a cloud server, and presented the findings through the information system. The differences in test results between the humidity sensor and the EE-KU machine, as well as between the temperature sensor and the digital thermometer (TP101), were not statistically significant at the 0.01 level. The device accurately measured the moisture and temperature of coffee beans and displayed the results on a mobile application installed on mobile devices, as well as a web application accessible to users. This application allows users to create additional user accounts and includes a database for gathering seller information. In terms of cost, the developed device is less expensive than commercially available devices, which cannot be used online and only display the results on the machine's screen. Moreover, the developed device is smaller, lighter, and more portable than commercially available alternatives. Maintenance is also feasible, as the equipment can be easily sourced domestically at a low cost.

Keywords: coffee beans, moisture, application, Internet of Things

บทนำ

ตำบลเทพเสด็จ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ เป็นแหล่งเพาะปลูกของกาแฟชั้นดี มีเกษตรกรผู้ปลูกกาแฟมากถึง 98% ของประชากรทั้งหมดในตำบล หมู่บ้านปางไฮ ทุกหลังคาเรือนในหมู่บ้านปลูกกาแฟเป็นอาชีพหลัก ปัจจุบันมีการจัดตั้งกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกาแฟสด และบริษัทที่ปลูกและรวบรวมสารกาแฟเพื่อส่งขายไปยังโรงคั่วกาแฟ ร้านกาแฟสด และโครงการหลวง กาแฟจึงถือว่าเป็นพืชเศรษฐกิจของหมู่บ้านปางไฮ และตำบลเทพเสด็จ แต่ผลผลิตที่ได้ออกมาพร้อมกันในปริมาณมากทำให้ไม่สามารถจำหน่ายและส่งออกกาแฟดิบได้หมด จึงเกิดสภาวะกาแฟดิบล้นตลาด และเมล็ดกาแฟที่ยังไม่ได้จำหน่ายมีความชื้น เป็นมอดและเชื้อรา เนื่องจากมอดเจาะผลกาแฟในแหล่งที่ตาก กาแฟที่มีความชื้นสูง หรือมีการเก็บเกี่ยวผลกาแฟที่มีมอดเจาะทำลายอยู่ เมล็ดกาแฟที่ได้จะไม่มีคุณภาพ [1] รวมถึงการลดความชื้นของกาแฟและลาที่ยังไม่เหมาะสม มีผลทำให้ราคากาแฟตกต่ำ เกษตรกรได้รับความเดือดร้อนเป็นประจำทุกปี ซึ่งส่งผลกระทบอย่างมากต่อกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกกาแฟรายย่อยที่ไม่มีระบบการบริหารจัดการที่เข้มแข็งมากพอ ถึงแม้ด้านการตลาดจะมีผู้รับซื้อในพื้นที่แต่ราคาที่ได้นั้นไม่คุ้มค่าที่ควร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการแปรรูป และเก็บรักษาเพื่อเพิ่มมูลค่าให้ผลผลิตทางการเกษตรดังกล่าว

Internet of Things (IoT) หรืออินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง คือ การที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ รวมถึงของสิ่งของ ผู้คน ข้อมูลและการบริการ สามารถเชื่อมโยงและสื่อสารกันได้โดยผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต การทำงานของ IoT ประกอบด้วย 1) อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เฉพาะจุด หรืออุปกรณ์ตรวจวัดค่าต่าง ๆ โดยต้องมีการบรรจุอุปกรณ์สมองกลฝังตัวอยู่เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูล 2) ที่จัดเก็บข้อมูลที่ถูกรับส่งมาจากอุปกรณ์ตรวจวัดค่าต่าง ๆ ที่มีการส่งผ่านระบบเครือข่ายมาจัดเก็บไว้ในคลาวด์ 3) ส่วนแสดงผลและควบคุมการทำงานหรือแอปพลิเคชันสำหรับแสดงค่าต่าง ๆ [2] ปัจจุบันมีการนำอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งมาใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตร เช่น การผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีสารสนเทศสมัยใหม่และการเกษตรแบบดั้งเดิม เป็นยุคของการเกษตร 4.0 การพัฒนาระบบฟาร์มอัจฉริยะสามารถลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มผลผลิตและคุณภาพได้ [3] ส่วนเว็บแอปพลิเคชันเป็นส่วนแสดงผล ข้อมูล ข่าวสาร สารสนเทศผ่านทางเว็บเบราว์เซอร์ แอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ที่เป็นแอปพลิเคชันที่ติดตั้งบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ที่ใช้สำหรับแสดงผลข้อมูล หรือใช้งานผ่านทางอุปกรณ์เคลื่อนที่ ปัจจุบันเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการแสดงข้อมูล หรือสารสนเทศที่ต้องการเพื่อสะดวกในการใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เครือข่ายเซิร์ฟเวอร์ไร้สายสำหรับฟาร์มอัจฉริยะ มีการพัฒนาแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ สำหรับแสดงข้อมูลการตรวจวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้น ภายในฟาร์ม [4]

ความชื้นในอากาศเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้รสชาติของกาแฟเปลี่ยนแปลงไป เช่น รสชาติเปรี้ยวขึ้น ความหวานลดลง รสชาติตอนท้ายลดลง และความหอมของเมล็ดลดลง นอกจากนี้หากความชื้นสูงขึ้น ทำให้เมล็ดกาแฟเสียหาย [5] การซื้อขายผลผลิตโดยเฉพาะเกี่ยวกับเมล็ดพันธุ์การเกษตรเกือบทั้งหมดจะใช้ค่าความชื้นที่เป็นมาตรฐานในการประเมินคุณภาพและเป็นกลไกในการกำหนดราคา เนื่องจากความชื้นของวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นตัวแปรที่สำคัญในการผลิต ความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดพืชเป็นคุณสมบัติที่สำคัญจะเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของเมล็ดพืชนั้น ๆ รวมทั้งใช้เป็นข้อกำหนดในการซื้อขายด้วย ความชื้นที่สูงเกินมาตรฐานจะถูกหักลดน้ำหนักหรือราคาต่อหน่วยลง

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งมาพัฒนาเป็นระบบตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิของกาแฟ และนำเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟไปใช้ในชุมชน โดยเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ และข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดส่งเข้าระบบคลาวด์ และบันทึกลงในฐานข้อมูล นำมาสร้างระบบสารสนเทศแสดงผลการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟเพื่อให้คนในชุมชนได้จัดเตรียมวางแผนวิธีการเก็บเกี่ยว การเก็บรักษาเมล็ดกาแฟที่ยังไม่ได้จำหน่ายได้นานขึ้น เนื่องจากมีความชื้นที่เหมาะสมเป็นเมล็ดกาแฟที่มีคุณภาพ ก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่าของกาแฟดิบให้มีมูลค่าสูงขึ้น และยังเป็นส่งเสริมการเพิ่มมูลค่าของพันธุ์พืชบนพื้นที่สูงอีกด้วย

วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ และทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้ศึกษา และรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเมล็ดกาแฟ และการรับซื้อเมล็ดกาแฟตามมาตรฐานสินค้าเกษตร เกี่ยวกับเมล็ดกาแฟ พบว่า คุณภาพของเมล็ดกาแฟ คือ ไม่มีกลิ่นผิดปกติ มีสีตรงตามกระบวนการผลิต และมีความชื้นไม่เกิน 12.5% [6] ในการรับซื้อเมล็ดกาแฟความชื้นควรเป็นไปตามมาตรฐานสินค้าเกษตรไม่เกิน 12.5%

2. การออกแบบส่วนของอุปกรณ์เครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ

การออกแบบส่วนของเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ โดยมีการจัดทําระบบชุดเซนเซอร์สำหรับวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ การวัดความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟในงานวิจัยนี้ มีการเก็บข้อมูลวัน เวลาที่วัด ครั้งที่ ข้อมูลความชื้น อุณหภูมิ และข้อมูลผู้ใช้ จากนั้นส่งข้อมูลกลับมายังฐานข้อมูล บันทึกข้อมูล เครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ มีองค์ประกอบของอุปกรณ์ดังนี้

1) บอร์ดอาดุยโน (Arduino nodeMCU ESP32) ใช้เป็นตัวควบคุมการประมวลผล โดยมีการรับค่าสัญญาณแอนะล็อกจากเซนเซอร์วัดความชื้น (capacitive soil moisture sensor v2.0) แปลงสัญญาณแอนะล็อกที่เป็นค่าระดับแรงไฟฟ้ากระแสตรงช่วงระดับแรงดันที่ 0 ถึง 3 โวลต์ ให้เป็นค่าข้อมูลตัวเลขแบบดิจิทัล โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (A/D) ที่มีความละเอียด 12 บิต ที่อยู่ภายในบอร์ดอาดุยโนซึ่งจะทำให้ได้ค่าข้อมูลตัวเลขดิจิทัลที่แปลงเป็นเลขฐานสิบอยู่ในช่วง 0 - 4,095 เพื่อนำค่าตัวเลขฐานสิบนี้ ไปใช้ในสมการคำนวณค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟดังในสมการที่ (2) พร้อมทั้งบอร์ดอาดุยโนได้อ่านค่าจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Digital temperature temp sensor DS18B20) นำมาประมวลผลเพื่อนำไปแสดงผลที่หน้าจอแสดงผล (OLED display I2C) พร้อมทั้งส่งข้อมูลไปยังเซิร์ฟเวอร์ เมื่อมีการกดบันทึกข้อมูล

2) เซนเซอร์วัดความชื้น (capacitive soil moisture sensor v2.0) ใช้เซนเซอร์ที่เป็นชนิดเดียวกับการวัดความชื้นในดิน โดยใช้หลักการตรวจสอบประจุของวัตถุ ถ้าวัตถุมีค่าประจุมากแสดงว่าชื้นมาก ให้ค่าออกเป็นค่าแอนะล็อกที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ในระดับ 0 ถึง 3 โวลต์ เพื่อนำไปเข้าวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่อยู่ภายในบอร์ดอาดูยโน

3) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (digital temperature temp sensor DS18B20) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ในระดับ 5 โวลต์ โดยสามารถวัดอุณหภูมิได้ต่ำสุด -55°C และมากที่สุด $+125^{\circ}\text{C}$ ด้วยความแม่นยำ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

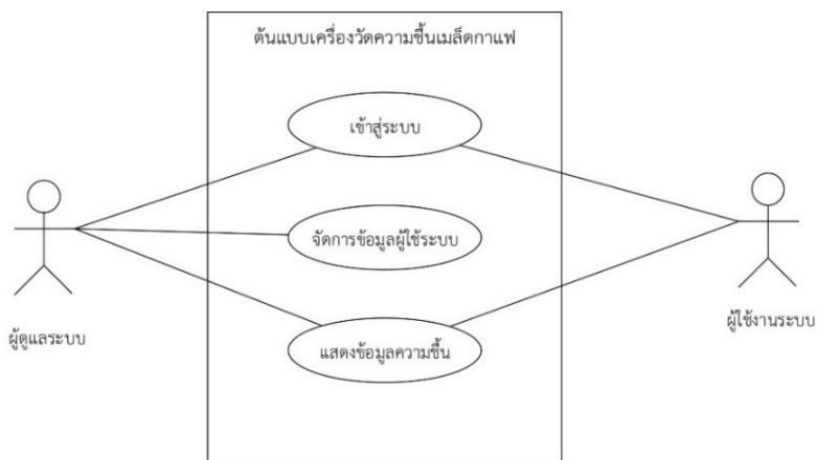
4) ตัวเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต (Pocket WiFi) ใช้ในการรับส่งข้อมูลของเครื่อง โดยส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย ไปยังฐานข้อมูลเพื่อบันทึกค่าที่ได้จากเซนเซอร์

5) จอแสดงผล (OLED display I2C) ใช้จอแสดงผลกราฟิก OLED ขนาด 1.3 นิ้ว รับส่งข้อมูลแบบ I2C สีขาว ความละเอียดในการแสดงผล 128x64 pixel

6) สวิตช์แบบกด (push button switch) ใช้สำหรับยืนยันการบันทึกข้อมูลสำหรับการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิไปยังเซิร์ฟเวอร์

3. วิเคราะห์และออกแบบระบบสารสนเทศแสดงผลการวัดความชื้นและอุณหภูมิเมลิคกาแพ

การพัฒนาระบบสารสนเทศแสดงผลการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมลิคกาแพ แผนภาพยูสเคส ไดอะแกรม แสดงรายละเอียดของการทำงานของผู้นดูแลระบบ ซึ่งสามารถล็อกอินเข้าสู่ระบบจัดการข้อมูลผู้ใช้งานระบบ และแสดงข้อมูลความชื้นและอุณหภูมิ ส่วนผู้ใช้งานทั่วไปสามารถล็อกอินเข้าสู่ระบบ และแสดงข้อมูลความชื้น (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ยูสเคส ไดอะแกรมระบบสารสนเทศแสดงผลการวัดความชื้นและอุณหภูมิเมลิคกาแพ

4. พัฒนารูปแบบเครื่องมือตรวจวัด และพัฒนาระบบสารสนเทศแสดงผลการวัด

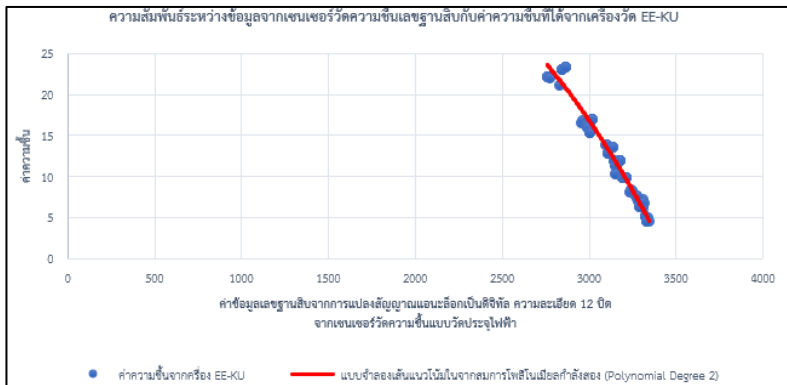
1) พัฒนารูปแบบเครื่องมือตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟ เชื่อมต่ออุปกรณ์เซนเซอร์ต่าง ๆ กับบอร์ดตามที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นเขียนโปรแกรมเพื่อให้อุปกรณ์ทำงานตามคำสั่งด้วยภาษาซี ให้เซนเซอร์เริ่มทำการตรวจวัดค่า จากนั้นส่งค่าที่ได้เก็บไว้ในฐานข้อมูล MySQL และในขั้นตอนการพัฒนาได้มีการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์ที่ใช้งาน เพื่อหาความถูกต้องของเซนเซอร์และนำค่าที่คำนวณได้จากเซนเซอร์มาเปรียบเทียบ โดยเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดความชื้นกับเครื่อง EE-KU และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (TP101)

1.1) เซนเซอร์วัดความชื้น จากการใช้เซนเซอร์วัดความชื้นแบบวัดประจุไฟฟ้า (capacitive sensor) ที่มีการส่งค่าออกมาเป็นสัญญาณแอนะล็อกทำให้ไม่สามารถแปลผลเป็นค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟได้ จึงจะต้องมีการหาสมการสำหรับการแปลงค่าสัญญาณแอนะล็อกที่อ่านมาได้จากเซนเซอร์วัดความชื้นไปเป็นค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟให้มีค่าใกล้เคียงกับเครื่องมือวัด EE-KU โดยการวัดและบันทึกค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟที่แตกต่างกันจำนวน 92 ค่า (ตารางที่ 1) เป็นการบันทึกค่าข้อมูลตัวเลขแบบดิจิทัล ที่ได้จากการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ที่มีความละเอียด 12 บิต นำมาแปลงเป็นเลขฐานสิบอยู่ในช่วง 0 - 4,095 เพื่อนำค่าตัวเลขฐานสิบนี้ไปใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์สมการพหุนามดีกรีสอง เพื่อให้ได้สมการคำนวณค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟดังสมการที่ (2)

ตารางที่ 1 ค่าข้อมูลตัวเลขแบบดิจิทัลที่ได้แปลงเป็นเลขฐานสิบ จากเซนเซอร์วัดความชื้น เปรียบเทียบกับค่าความชื้นจริงที่วัดจากเครื่องมือ EE-KU

ครั้งที่	ค่าจากเซนเซอร์วัดความชื้นเลขฐานสิบ	ค่าความชื้นจากเครื่อง EE-KU
1	3310	6.6
2	3245	8.3
3	3238	8.4
...		...
91	3328	4.5
92	3329	4.5

จากตารางที่ 1 เมื่อนำค่าข้อมูลตัวเลขแบบดิจิทัล ที่ได้จากการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ที่มีความละเอียด 12 บิต นำมาแปลงเป็นเลขฐานสิบอยู่ในช่วง 0 - 4,095 กับค่าความชื้นที่ได้จากเครื่องมือ EE-KU นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ของข้อมูล พร้อมทั้งทดลองสร้างแบบจำลองเส้นแนวโน้มในการประมาณค่าจากหลาย ๆ วิธี พบว่าการใช้สมการพหุนามดีกรีสอง (polynomial degree 2) สามารถประมาณค่าข้อมูลได้ดีที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความชื้นจากเซนเซอร์วัดความชื้นที่ผ่านการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและแปลงเป็นข้อมูลเลขฐานสิบ กับค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟที่วัดได้จากเครื่องมือ EE-KU นั้นมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (ดังภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างค่าจากเซนเซอร์วัดความถี่เลขฐานสิบกับค่าความถี่ที่ได้จากเครื่องวัด EE-KU

นอกจากนี้ ได้มีการนำค่าข้อมูลค่าเซนเซอร์วัดความถี่แบบวัดประจุไฟฟ้า การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล แบบ 12 บิต เปรียบเทียบกับค่าความถี่จริงที่วัดจากเครื่องมือ EE-KU นำไปหาค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนอง (R-Squared) พบว่าค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 99.59% แสดงให้เห็นว่าข้อมูลค่าเซนเซอร์วัดความถี่แบบวัดประจุไฟฟ้า จากการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ที่มีความละเอียด 12 บิตกับค่าความถี่จริงที่วัดจากเครื่องมือ EE-KU มีความสัมพันธ์กัน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำหลักการของการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression) [7] โดยการใช้ สมการโพลิโนเมียลกำลังสอง มาหาสมการเพื่อคำนวณหาค่าความถี่ของเมล็ดกาแฟที่ถูกต้องและมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเครื่องมือ EE-KU ที่มีการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

ตัวแปรตาม y เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรอิสระ 1 ตัวแปร คือ สามารถกำหนดให้สมการโพลิโนเมียลกำลังสองเป็นดังสมการที่ (1)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_1^2 + \varepsilon \quad (1)$$

โดยที่ $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงจุดตัดแกนและความชัน

ε คือ ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากฟังก์ชันและข้อมูลจริง

โดยทางผู้วิจัยได้กำหนดค่าให้มีค่าเท่ากับ 0

จากสมการที่ (1) เมื่อนำค่าในตารางที่ 1 ไปดำเนินการหาค่าสัมประสิทธิ์ในรูปแบบสมการโพลิโนเมียลกำลังสองจะได้ดังสมการที่ (2)

$$y = 3.940717033226963 + (x * 0.0448993767314285) + (x^2 * -0.0000126602644038996) \quad (2)$$

โดยที่ y คือ ค่าความถี่ของเมล็ดกาแฟที่วัดได้

x คือ ค่าจากเซนเซอร์วัดความถี่ซึ่งเป็นค่าตัวเลขจากโมดูล A/D แบบ 12 บิต

เมื่อได้สมการสำหรับการประมาณค่าในสมการที่ (2) จึงนำสมการมาทดลองใช้ในการคำนวณและเปรียบเทียบกับค่าความชื้นจริงที่ได้จากเครื่องมือ EE-KU เพื่อคำนวณหาความผิดพลาดโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) เป็นวิธีวัดความแม่นยำ โดยคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการประมาณค่า ถ้าได้ค่าต่ำจะมีความแม่นยำสูง มีสูตรคำนวณ ดังนี้

$$\text{ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์} = \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{At-Ft}{At} \right| \right) \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ At คือ ค่าจริงที่วัดได้
 Ft คือ ค่าที่ได้จากการประมาณค่า
 n คือ ค่าจำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด

เมื่อนำสมการที่ (3) ไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์เปรียบเทียบกับค่าความชื้นเมล็ดกาแฟจากเซนเซอร์วัดความชื้นที่ผ่านสมการโพลิโนเมียลกำลังสองกับค่าความชื้นจริงที่ได้จากเครื่องมือ EE-KU ดังตารางที่ 2 พบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 5.99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าความผิดพลาดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และหน่วยการวัดความชื้นที่ได้จากการคำนวณเป็นความชื้นสัมพัทธ์ สามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดความชื้นของเมล็ดกาแฟได้ สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ (ตารางที่ 2) ยังพบว่าในกรณีเมื่อค่าความชื้นที่วัดได้จากเครื่องมือ EE-KU ที่มีค่าน้อยกว่า 5 และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเมล็ดกาแฟจากเซนเซอร์วัดความชื้นที่ผ่านสมการโพลิโนเมียลกำลังสองนั้น จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์สูง เนื่องจากเซนเซอร์วัดความชื้นให้ค่าสัญญาณออกมาเป็นค่าแอนะล็อกที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ในระดับ 0 ถึง 3 โวลต์เท่านั้น จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นที่มีค่ามากกับค่าน้อยมีช่วงระดับแรงดันที่ต่างกันไม่มากนักส่งผลให้การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่มีความละเอียด 12 บิต ไม่เพียงพอในการอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของระดับแรงดัน ดังนั้นจึงควรเพิ่มความละเอียดจำนวน บิต เป็น 16 บิต เพื่อเพิ่มความละเอียดของการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลให้มีค่าอยู่ในช่วง 0–65,535 เพื่อลดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์สำหรับการวัดค่าความชื้นต่ำ ๆ ได้

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ ระหว่างความชื้นเมล็ดกาแฟจากเซนเซอร์วัดความชื้นที่ผ่านสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง กับเครื่องมือวัด EE-KU

ครั้งที่	ค่าจาก A/D	ค่าความชื้น จากเครื่องมือ EE-KU	ค่าที่คำนวณได้จาก โพลิโนเมียลกำลังสอง	ค่าเปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาดสัมบูรณ์
1	3310	6.6	5.97	9.56
2	3245	8.3	8.44	1.75
3	3238	8.4	8.71	3.63
...	...	...	...	...
89	3324	5.1	5.42	6.31
90	3327	4.5	5.30	17.87
91	3328	4.5	5.26	16.99

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ ระหว่างความขึ้นเมล์ดกาแฟจากเซนเซอร์วัดความชื้นที่ผ่านสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง กับเครื่องมือวัด EE-KU (ต่อ)

ครั้งที่	ค่าจาก A/D	ค่าความชื้นจากเครื่อง EE-KU	ค่าที่คำนวณได้จากโพลีโนเมียลกำลังสอง	ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์
92	3329	4.5	5.23	16.12
ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์				5.99
ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				4.32

1.2) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ค่าที่ได้จากเซนเซอร์เป็นองศาเซลเซียสเช่นเดียวกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (TP101) การทดสอบและเปรียบเทียบกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (TP101) ที่เป็นเครื่องมือมาตรฐานทั่วไป โดยทำการวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันจำนวน 100 ค่า (ตารางที่ 3) เพื่อใช้ในการหาความคลาดเคลื่อนในการวัดโดยเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (%error) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) พบว่าได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 1.12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความผิดพลาดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

$$\% \text{ ความผิดพลาด} = \left| \frac{X_t - X_m}{X_t} \right| \times 100\% \quad (4)$$

โดยที่ X_t คือ ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์

X_m คือ ค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (TP101)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมพัทธ์ (%error) อุณหภูมิของเมล์ดกาแฟจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ กับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (TP101)

ครั้งที่	ค่าจากเซนเซอร์	ค่าจากเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (TP101)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
1	25.94	25.10	0.38
2	26.25	26.30	0.23
3	25.50	25.60	0.20
4	25.50	25.70	0.39
...	...	...	...
97	25.75	25.70	0.19
98	25.69	25.40	1.14
99	25.75	25.90	0.58
100	25.81	26.10	1.11
ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด			1.12
ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.82

2) พัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ โดยใช้ Mit app inventor ในการพัฒนา โดยเรียกข้อมูลจากฐานข้อมูลที่เก็บไว้มาแสดงผ่านทางแอปพลิเคชันสำหรับติดตั้งบนอุปกรณ์เคลื่อนที่

3) พัฒนาระบบสารสนเทศแสดงผลการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟโดยใช้ภาษา PHP ในการพัฒนา โดยเรียกข้อมูลจากฐานข้อมูลที่เก็บไว้มาแสดงผ่านทางเว็บไซต์

5. ทดสอบการใช้งาน

การวิจัยครั้งนี้ได้ทดลองใช้งานเครื่องมือวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ โดยทดสอบการทำงานตามฟังก์ชันการทำงานของเครื่องมือวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ และทดสอบการทำงานของแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ และระบบสารสนเทศแสดงผลการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิผ่านทางเว็บแอปพลิเคชัน ทำการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องของระบบให้ใช้งานได้ถูกต้อง แสดงผลการทำงานได้ถูกต้อง

ผลการวิจัย

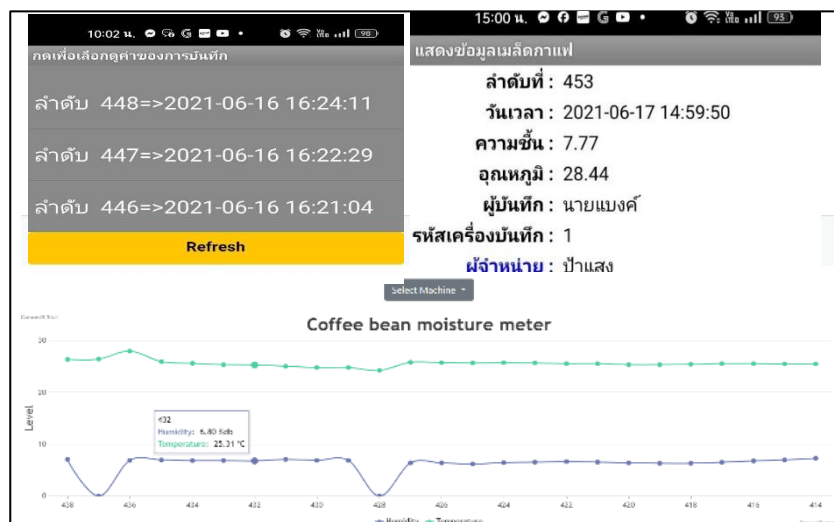
การพัฒนาเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ เครื่องต้นแบบสามารถตรวจวัดความชื้นของเมล็ดกาแฟได้ใกล้เคียงกับเครื่องจากเครื่อง EE-KU โดยมีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์อยู่ที่ 5.99 และค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.32 เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง EE-KU และการอ่านค่าอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟได้ใกล้เคียงกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (TP101) ที่เป็นมาตรฐาน โดยมีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ที่ 1.12 และค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.82 นอกจากนี้ตัวเครื่องยังสามารถส่งค่าความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟที่วัดได้ไปจัดเก็บไว้ฐานข้อมูลซึ่งเครื่อง EE-KU ไม่สามารถทำได้ สำหรับส่วนประกอบเครื่องวัดความชื้นเมล็ดและอุณหภูมิกาแฟ (ภาพที่ 3) ประกอบด้วย 1) เครื่องวัดความชื้น 2) ช่องรับเมล็ด 3) กรวยเท 4) ฝาปิดเครื่อง 5) สายแบตเตอรี่ คุณสมบัติของเครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิมีรายละเอียดดังนี้ 1) การวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟ ของตัวอย่างขณะนั้น 2) แสดงค่าอุณหภูมิ ได้ตั้งแต่ 0 ถึง 100 °C 3) แสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ ได้ตั้งแต่ 4 ถึง 40 % 4) ค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 1.0 % 5) ขนาดตัวอย่างเมล็ดกาแฟในการวัดค่า : 100 กรัม 6) พลังงานใช้ 3.7V 1 ก้อน



ภาพที่ 3 เครื่องตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ

ผลการพัฒนาระบบสารสนเทศแสดงค่าวัดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ

ระบบสารสนเทศแสดงค่าวัดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ ประกอบด้วยระบบสารสนเทศที่แสดงผลการตรวจวัดค่าผ่านทางเว็บแอปพลิเคชัน มีการแสดงผลการตรวจวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ มีการแสดงผลทั้งแบบข้อความ และกราฟ และระบบสารสนเทศในรูปแบบของแอปพลิเคชันสามารถติดตั้งแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ แสดงผลการตรวจวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ (ภาพที่ 4) โดยข้อมูลแสดงผ่านทางเว็บแอปพลิเคชัน และแสดงด้วยแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ที่มีการเก็บข้อมูลที่ตรวจวัดทั้งหมดในฐานข้อมูล สามารถเรียกดูข้อมูลย้อนหลัง ประวัติการตรวจวัดค่าของข้อมูลได้ตลอดเวลา



ภาพที่ 4 ผลการตรวจวัดค่าจากเมล็ดกาแฟแสดงผลทางแอปพลิเคชัน และเว็บเบราว์เซอร์

การพัฒนาเครื่องตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟด้วยเทคโนโลยี
อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ ดำเนินทดสอบเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิ โดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือสำเร็จรูปที่ใช้ในการตรวจวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของเมล็ดพันธุ์ที่มีมาตรฐาน โดยทำการทดลองวัดค่าด้วยเซนเซอร์ วัดความชื้นด้วยเครื่อง EE-KU และวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (TP101) ทั้งหมด 10 ครั้ง ใช้เมล็ดกาแฟกะลา 100 กรัม มาทดลองทำการตรวจวัดค่า (ตารางที่ 4) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบค่าที่ได้

ตารางที่ 4 การวัดค่าด้วยเซนเซอร์ การวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้วยเครื่อง EE-KU และอุณหภูมิจากเครื่อง TP101 Digital Thermometer

ครั้งที่	ค่าความชื้นจากเซนเซอร์	ค่าความชื้นจากเครื่อง EE-KU	ค่าอุณหภูมิจากเซนเซอร์	ค่าอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (TP101)
1	7.00	6.61	26.10	26.00
2	7.10	6.46	26.00	25.94
3	6.90	7.09	25.60	25.55
4	7.00	6.85	25.70	25.60
5	7.00	6.96	25.80	25.70
6	7.00	7.34	25.80	25.70
7	7.10	6.80	25.70	25.60
8	7.10	7.25	25.40	25.50
9	7.00	6.58	25.90	25.80
10	7.00	7.14	26.10	26.20

การเปรียบเทียบระหว่างการวัดด้วยเครื่อง EE-KU และการวัดด้วยเซนเซอร์ ผลการวัดค่าความชื้นด้วยเครื่อง EE-KU มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.02 และวัดด้วยเซนเซอร์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.91 จากการเปรียบเทียบพบว่า การวัดค่าความชื้นด้วยเครื่อง EE-KU และการวัดด้วยเซนเซอร์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 (ตารางที่ 5) การเปรียบเทียบระหว่างการวัดด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (TP101) และการวัดด้วยเซนเซอร์ ผลการวัดค่าอุณหภูมิเมล็ดกาแฟด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (TP101) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.81 ตรวจวัดด้วยเซนเซอร์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.76 จากการเปรียบเทียบพบว่า การวัดค่าอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (TP101) และการวัดด้วยเซนเซอร์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้วยเครื่อง EE-KU กับการวัดค่าด้วยเซนเซอร์ และการคำนวณด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (TP101) กับการวัดค่าด้วยเซนเซอร์

เครื่องมือ	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่า t	ระดับความเป็นอิสระ	ค่าความมีนัยสำคัญ
เครื่อง EE-KU	7.02	0.063	0.101	0.320	1.107	9	0.148
เซนเซอร์วัดความชื้น	6.91	0.299					
เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (TP101)	25.81	0.223	-0.05	0.082	-1.974	9	0.040
เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ	25.76	0.225					

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

อภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยและพัฒนาเครื่องตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ ออกแบบมาให้ตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง สามารถตรวจวัดและจัดเก็บผลการตรวจวัดบนคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ ซึ่งเมื่อศึกษาการวิจัยและพัฒนาเครื่องตรวจวัดความชื้นเมล็ดกาแฟ พบว่ามีการวิจัยที่มีการสร้างเครื่องวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกไร้สายซึ่งได้ประยุกต์ใช้งาน Arduino เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผล และแสดงค่าที่วัดได้ที่จอ LCD [8] แต่ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ บอร์ดอาดุยโน (Arduino nodeMCU ESP32) เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ และสามารถแสดงผลการตรวจวัดผ่านทางแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ และแสดงผลผ่านทางเว็บแอปพลิเคชัน ในการทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์วัดความชื้นเปรียบเทียบกับเครื่อง EE-KU ทำให้ทราบว่าเครื่องมือที่พัฒนา มีความผิดพลาดจากการวัดความชื้น เท่ากับ 5.99 อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเครื่อง EE-KU ในด้านความถูกต้อง 94.01% เซนเซอร์วัดอุณหภูมิเปรียบเทียบกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (TP101) มีความผิดพลาดจากการวัดอุณหภูมิ เท่ากับ 1.12 และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (TP101) ในด้านความถูกต้อง 98.88% และเครื่องมือที่พัฒนามีต้นทุนต่ำกว่าทั้งยังวัดค่าได้ทั้งความชื้นและอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้พัฒนาเครื่องวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกไร้สายมาประยุกต์ใช้งาน ที่มีค่าความถูกต้อง 98.50% สามารถวัดความชื้นบนกองข้าวสูง ๆ ได้อย่างสะดวกและเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานใกล้เคียงกับเครื่องของต่างประเทศที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง รวมถึงการซ่อมบำรุงก็เป็นไปได้โดยง่ายเพราะว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ หาซื้อได้ภายในประเทศและมีราคาถูก [8] เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของการวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเฉลี่ยด้วยสถิติ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 เห็นได้ว่าเครื่องมือที่

พัฒนาการออกแบบทั้งส่วนฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ เซนเซอร์ผ่านการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐาน และทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์ ก่อนนำไปใช้งาน สอดคล้องกับงานวิจัยของ วิจิตรา คุ่มวงศ์ และสรวง รุ่งประกายพรรณ [9] ได้ทำการวิจัยเรื่องการพัฒนาชุดอุปกรณ์อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับติดตามอุณหภูมิและความชื้นของการเก็บรักษาอาหาร ที่มีการประเมินประสิทธิภาพและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยและเห็นว่าจำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐาน ก่อนนำไปใช้งาน ส่วนของระบบสารสนเทศที่เป็นเว็บแอปพลิเคชัน และแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่แสดงข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟ มีการใช้งานง่าย มีการรับส่งข้อมูลแบบทันที มีรูปแบบการแสดงผลทั้งแบบตาราง และกราฟ สามารถเพิ่มระบบผู้ใช้งาน มีการจัดเก็บฐานข้อมูลผู้ขาย เมื่อเปรียบเทียบราคาเครื่องที่พัฒนามีราคาถูกกว่าที่มีขายตามท้องตลาด เครื่องที่พัฒนาสามารถแสดงผลแบบเรียลไทม์ ส่วนเครื่องที่มีขายตามท้องตลาดแสดงผลบนจอของเครื่องอย่างเดียว อีกทั้งเครื่องที่พัฒนายังมีขนาดเล็กและเบา พกพาไปใช้ได้สะดวกกว่าเครื่องทั่วไปที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง รวมถึงการซ่อมบำรุงก็เป็นไปได้โดยง่ายเพราะว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ หาซื้อได้ภายในประเทศและมีราคาถูก ในอนาคตอาจมีการสอบเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐานอื่น ๆ ที่เป็นที่ยอมรับใช้งานในอนาคตเพื่อทดสอบประสิทธิภาพและพัฒนาเครื่องมือต่อไป และอาจนำข้อมูลที่ได้จัดเก็บรวบรวมไปใช้ในการออกรายงานได้หลายมิติ เพื่อให้ครอบคลุมกับความต้องการของผู้ใช้งานให้มากขึ้น เพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลยิ่งขึ้น

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยได้พัฒนาเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ และระบบสารสนเทศแสดงผลการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ เครื่องตรวจวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดกาแฟ ผ่านกระบวนการออกแบบส่วนของฮาร์ดแวร์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ บอร์ดอาดุยโน (Arduino nodeMCU ESP32) เซนเซอร์วัดความชื้น และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ส่วนของระบบสารสนเทศได้ผ่านกระบวนการวิเคราะห์และออกแบบระบบ จากนั้นพัฒนาเครื่องวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิ โดยกระบวนการพัฒนาได้เปรียบเทียบกับเซนเซอร์วัดความชื้นกับเครื่อง EE-KU และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพเมื่อเทียบค่าความชื้นกับเครื่อง EE-KU และค่าอุณหภูมิกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 การทำงานของเครื่องมือถูกต้องมีประสิทธิภาพ สามารถตรวจวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟ และจัดเก็บข้อมูลที่ตรวจวัดบนคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ แสดงผลข้อมูลผ่านทางเว็บแอปพลิเคชัน และแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ ระบบสารสนเทศสามารถแสดงผลการตรวจวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟ ในชุมชนได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ โดยการสนับสนุนจากโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (อพ.สธ.)

เอกสารอ้างอิง

- [1] เยาวลักษณ์ จันทราบง. (2554). มอดเจาะผลกาแพแมลงศัตรูในแปลงปลูกที่ส่งผลเสียระหว่างเก็บรักษา. *ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว*, 10(4), 5–6.
- [2] ขนิษฐา จิตรกลาง. (2566). พื้นฐาน Internet of Things (IoT). [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://library.wu.ac.th/km/พื้นฐาน-internet-of-things-iots-basic-internet-of-things-iots/> (1 เมษายน 2567).
- [3] Paul, R., Nazir, J. B., & Ahammad, A. (2023). Design and development of a smart agriculture (SA) system with machine learning-based IoT architecture (pp 377–381). In *2023 International Conference on Information and Communication Technology for Sustainable Development (ICICT4SD)*. Dhaka: Bangladesh.
- [4] ชนิกานต์ รอดมรณ, มธุรส ผ่านเมือง, และ วีระศักดิ์ จงเลขา. (2564). การประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับฟาร์มอัจฉริยะ. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, 13(2), 315–329.
- [5] มินทิธิตา แดงเรือ. (2566). เมล็ดกาแฟกับความชื้นตัวร้ายทำลายรสชาติ. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://www.scilution.co.th/coffee-bean-and-humidity-to-spoil-the-taste/#:~:text=โดยปกติแล้วเมล็ดแล้วควรมีค่าความชื้น> (1 เมษายน 2567).
- [6] สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. (2561). *มาตรฐานสินค้าเกษตร เรื่อง เมล็ดกาแฟอาราบิก้า*. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [7] Ostertagová, E. (2012). Modelling using Polynomial Regression. *Procedia Engineering*, 48, 500–506.
- [8] กนกศักดิ์ บุญทัน และประกาศิต ตันตือลงกร. (2558). เครื่องวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกไร้สาย (หน้า 7–12). ใน *การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 8. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*.
- [9] วิจิตตรา คุ่มวงษ์, และ สรวง รุ่งประกายพรรณ. (2565). การพัฒนาชุดอุปกรณ์อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับติดตามอุณหภูมิและความชื้นของการเก็บรักษา. *The Thai Bulletin of Pharmaceutical Sciences*, 17(2), 101–118.

การเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในน้ำชะขยะก่อนและหลังบำบัด
ของระบบบ่อฝัง ณ สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
Comparative Analysis of Total Heavy Metal Removal in Influent and
Effluent of the Oxidation Pond System at Ayutthaya Municipal Landfill

สมคิด ตันแก้ง และ ศิริภัสสร พันธะสา*

Somkid Tangkan & Sirapassorn Phanthasa*

สาขาการจัดการสาธารณภัย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
Department of Disaster Management, Faculty of Science and Technology,
Walailak University under the Royal Patronage

Submitted 12/7/2024 ; Revised 19/8/2024 ; Accepted 11/10/2024

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบการปนเปื้อนโลหะหนักทั้งหมด (THMs) ได้แก่ สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ในน้ำชะขยะก่อน (Inf) และหลังบำบัด (Eff) ในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลาก ขั้นตอนการวิเคราะห์ THMs ใช้การย่อยด้วยกรดและการวิเคราะห์ THMs ได้ดำเนินการตามวิธีมาตรฐาน USEPA-3005A และ 6010D ผลการศึกษาพบว่าการปนเปื้อนของ THMs ในน้ำชะขยะหลังบำบัดไม่เกินค่ามาตรฐานของ USEPA และมาตรฐานน้ำทิ้งในประเทศไทยทั้ง 2 ฤดูกาล ชนิดของโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้สูงสุด คือ As (ฤดูแล้ง: Inf=0.07 ppm, Eff= Below detection limit (BDL) และ ฤดูน้ำหลาก: Inf=0.065 ppm, Eff=BDL), Cd (ฤดูแล้ง: Inf=0.005 ppm, Eff=BDL และ ฤดูน้ำหลาก: Inf=0.005 ppm, Eff=BDL) และ Cr (ฤดูแล้ง: Inf=0.065 ppm, Eff=BDL และ ฤดูน้ำหลาก: Inf=0.01 ppm, Eff=BDL) ที่ 100% ทั้ง 2 ฤดูกาล และบำบัดได้ต่ำสุดคือ Ni ที่ 28% ในฤดูแล้งและ 58.27% ในฤดูน้ำหลาก (ฤดูแล้ง: Inf=0.125 ppm, Eff=0.09 ppm และ ฤดูน้ำหลาก: Inf=0.115 ppm, Eff=0.055 ppm) ผลการวิเคราะห์สถิติพบว่าชนิดของโลหะหนักที่มีการปนเปื้อนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างน้ำชะขยะก่อนและหลังบำบัดคือ Cr, Mn, Ni ในฤดูแล้งและ Cr, Mn, Ni, Pb ในฤดูน้ำหลาก และโลหะหนักในน้ำชะขยะก่อนบำบัดเกือบทุกชนิด ยกเว้น Cu และ Fe มีความสัมพันธ์กันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลประกอบเพื่อหาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักในน้ำชะขยะและตรวจติดตามสถานะสิ่งแวดล้อมโดยรอบในอนาคต

คำสำคัญ: ระบบบำบัดแบบบ่อฝัง น้ำชะขยะ โลหะหนัก

*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)

E-mail: sirapassorn@vru.ac.th

Abstract

The study aimed to analyze and compare the total heavy metal contamination (THMs), including arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn), nickel (Ni), lead (Pb), and zinc (Zn) in influent and effluent during both dry and wet seasons. The analysis of THMs utilized acid digestion, with the determination of THMs conducted according to USEPA standard methods 3005A and 6010D. The study results indicated that THMs contamination levels were below USEPA and Thai wastewater discharge standards in both seasons. The metals with the highest treatment efficiencies were As (dry season: Inf=0.07 ppm, Eff=below detection limit (BDL); wet season: Inf=0.065 ppm, Eff=BDL), Cd (dry season: Inf=0.005 ppm, Eff=BDL; wet season: Inf=0.005 ppm, Eff=BDL), and Cr (dry season: Inf=0.065 ppm, Eff=BDL; wet season: Inf=0.01 ppm, Eff=BDL), achieving 100% removal efficiency during both the dry and wet seasons. In contrast, Ni showed the lowest treatment efficiency, with removal rates of 28% during the dry season and 58.27% during the wet season (dry season: Inf=0.125 ppm, Eff=0.09 ppm; wet season: Inf=0.115 ppm, Eff=0.055 ppm). Statistical analysis revealed significant differences ($P<0.05$) in heavy metal contamination levels between influent and effluent, particularly for Cr, Mn, and Ni during the dry season, and Cr, Mn, Ni, and Pb during the wet season. Additionally, most heavy metals in influent, except for Cu and Fe, showed significant statistical correlations ($P<0.05$). The research findings can inform strategies for enhancing the efficiency of heavy metal treatment in leachate and for monitoring the surrounding environmental conditions in the future.

Keywords: oxidation pond system, leachate, heavy metals

บทนำ

ขยะมูลฝอย (municipal waste) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากจำนวนประชากรและการพัฒนาอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้น [1] ปัจจุบันมนุษย์ผลิตขยะทั่วโลกต่อปีเฉลี่ย 2.01 พันล้านตันต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่อง โดยการพยากรณ์ปริมาณขยะในอนาคตคาดการณ์ว่า ในปี 2050 มนุษย์จะสร้างปริมาณขยะสูงถึง 3.4 พันล้านตันต่อปี [2] ดังนั้นด้วยอัตราการเกิดปริมาณขยะที่สูงและผลกระทบทางสุขภาพต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมจากขยะ มนุษย์จึงสร้างระบบการจัดการขยะมูลฝอยที่สามารถรองรับปริมาณขยะได้สูงขึ้น

ระบบการจัดการขยะที่ได้รับความนิยมในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนารวมถึงประเทศไทย คือการฝังกลบ (municipal waste landfill) ร่วมกับระบบบำบัดน้ำชะขยะด้วยระบบบ่อผึ่ง (oxidation pond system) เนื่องจากการฝังกลบขยะและระบบบ่อผึ่งมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนไม่สูง สามารถกำจัดขยะปริมาณสูงได้ สามารถรองรับชนิดขยะได้หลายประเภท มีระบบการดำเนินงานที่ไม่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพการบำบัดสารมลพิษในน้ำชะขยะได้ดีโดยเฉพาะโลหะหนัก อาทิ สามารถบำบัดตะกั่วได้ 85–95% และสังกะสีได้ 74–82% ในต่างประเทศ และในประเทศไทยระบบบำบัดแบบบ่อผึ่งของหลุมฝังกลบขยะบ้านคำบอน จังหวัดขอนแก่น สามารถบำบัดโลหะหนักในน้ำชะขยะให้มีระดับการปนเปื้อนที่ลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อาทิ บำบัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำชะขยะจาก 0.022 ppm ให้ลดลงเหลือ 0.002 ppm และบำบัดนิกเกิลจาก 0.096 ppm เหลือ 0.008 ppm [3–6]

ใน พ.ศ. 2565 ประเทศไทยมีการจัดการขยะด้วยการฝังกลบที่ถูกต้องตามหลักสุขาภิบาลจำนวน 111 แห่ง และหนึ่งในนั้นคือการจัดการขยะด้วยการฝังกลบของศูนย์จัดการขยะมูลฝอยต้นแบบ อบจ.พระนครศรีอยุธยา จากการศึกษาข้อมูลพื้นฐานของศูนย์จัดการขยะมูลฝอยต้นแบบ อบจ.พระนครศรีอยุธยาพบว่า ศูนย์กำจัดขยะเริ่มดำเนินการตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 โดยการฝังกลบแบบขุดร่อง ปัจจุบันรองรับขยะวันละ 450 ตัน โดยแบ่งออกเป็นการจัดการขยะมูลฝอยชุมชนให้หน่วยงานราชการและองค์การบริหารส่วนท้องถิ่นจำนวน 112 แห่ง และการจัดการขยะอันตรายให้หน่วยงานภาครัฐในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาจำนวน 16 แห่ง [7] นอกจากนี้ภายในศูนย์กำจัดขยะยังมีระบบบำบัดน้ำชะขยะแบบบ่อผึ่งจำนวน 3 บ่อเพื่อบำบัดน้ำชะขยะที่มาจากหลุมฝังกลบขยะ อย่างไรก็ตามการจัดการขยะด้วยการฝังกลบมีโอกาสเสี่ยงที่จะเกิดการรั่วไหลของน้ำชะขยะที่ปนเปื้อนสารมลพิษ ซึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมโดยรอบ [8, 9] สารมลพิษสำคัญที่มักก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมคือโลหะหนัก แหล่งกำเนิดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำชะขยะมาจากการย่อยสลายขยะที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่และกิจกรรมภายในหลุมฝังกลบขยะ อาทิ สารหนูในน้ำชะขยะมาจากกระบวนการย่อยสลายของขยะประเภท สารเคมีกำจัดศัตรูพืชและภาชนะบรรจุสารเคมีกำจัดศัตรูพืช นอกจากนี้ สารหนูในน้ำชะขยะสามารถมาจากการชะล้างที่เพิ่มขึ้นภายในหลุมฝังกลบขยะได้ด้วย [10] แคดเมียมในน้ำชะขยะเกิดการย่อยสลายของขยะประเภท แบตเตอรี่ สีทาบ้าน และเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมดอายุแล้ว และแมงกานีสมีสาเหตุมาจากการย่อยสลายขยะประเภทยาฆ่าแมลงและแบตเตอรี่ ดังนั้นหากมีการรั่วไหลของน้ำชะขยะที่ปนเปื้อนโลหะหนักจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ได้

จากการศึกษาผลกระทบของการปล่อยน้ำชะขยะที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักเกินค่ามาตรฐานสู่สิ่งแวดล้อมพบว่า ผลกระทบเมื่อมีการปล่อยน้ำชะขยะที่มีสารหนูปนเปื้อนเกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร สู่สิ่งแวดล้อมทางการเกษตรจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อพืชโดยเฉพาะข้าว [11] โดยสารหนูจะมีผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงในข้าวและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ เพราะสารหนูจัดเป็นสารกลุ่ม phytotoxic ที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อพืชโดยตรง แคดเมียมมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ สัตว์ และพืช โดยแคดเมียมจะก่อให้เกิดภาวะคลอโรซิสที่ใบพืชยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช ลดอัตราการเจริญเติบโตของพืช และสามารถส่งผลกระทบต่อบางชนิดที่พืชต้องการนำไปใช้ประโยชน์ อาทิ ภาวะขาดธาตุเหล็กในพืช และแมงกานีสมีความเป็นพิษต่อพืชโดยตรงแม้จะรับเข้าสู่พืชในปริมาณน้อย โดยแมงกานีสจะเข้าไปสะสมในพืชผ่านการดูดซับแร่ธาตุในดินที่มีแมงกานีสผสมอยู่ หากมนุษย์รับแมงกานีสเข้าสู่ร่างกายผ่านการบริโภคพืชและการถ่ายทอดในห่วงโซ่อาหาร แมงกานีสจะส่งผลกระทบต่อระบบสรีรวิทยาในมนุษย์และระบบประสาทในมนุษย์

ดังนั้นกระบวนการดำเนินการกิจกรรมภายในหลุมฝังกลบขยะจึงจำเป็นต้องมีการสร้างระบบบำบัดน้ำชะขยะที่ถูกออกแบบให้สามารถบำบัดโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำชะขยะที่หลุมฝังกลบขยะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมมีปริมาณโลหะหนักเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยวิธีการหนึ่งที่ถูกใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักของระบบบำบัดน้ำชะขยะ คือวิธีการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่ปนเปื้อนในน้ำชะขยะก่อนและหลังบำบัด ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ทราบปริมาณการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำชะขยะและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบำบัดน้ำชะขยะ นอกจากนี้ยังทำให้หน่วยงานที่มีหน้าที่กำกับและดูแลการจัดการขยะในสถานที่กำจัดขยะสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการปรับปรุงระบบบำบัดให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น อันจะนำไปสู่การลดผลกระทบซึ่งเกิดจากโลหะหนักในน้ำชะขยะที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ในอนาคต

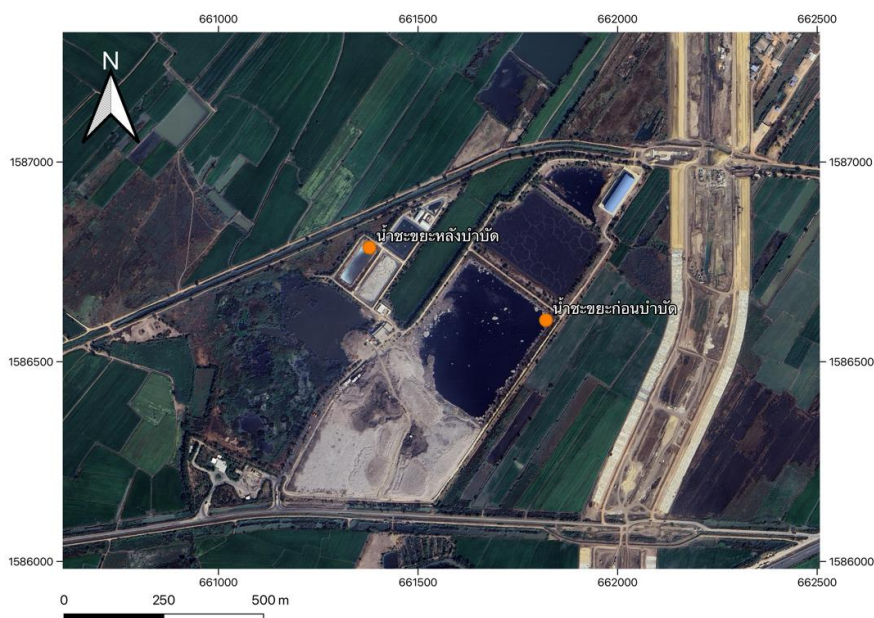
วัตถุประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการปนเปื้อนโลหะหนักทั้งหมดในน้ำชะขยะก่อนและหลังบำบัดในถุดูแลและถุดูแลน้ำหลาก
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักทั้งหมดของระบบบำบัดแบบบ่อฝัง ณ ศูนย์กำจัดขยะครบวงจร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

วิธีดำเนินการวิจัย

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนักในตัวอย่างน้ำชะขยะที่ใช้ระบบบำบัดแบบบ่อฝังในการบำบัด ตั้งอยู่ ณ ศูนย์กำจัดขยะครบวงจร องค์การบริหารส่วนจังหวัดพระนครศรีอยุธยา อำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา แผนที่แสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำชะขยะก่อนบำบัดและหลังบำบัดในพื้นที่ศึกษาดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำชะขยะก่อนและหลังบำบัด ในศูนย์จัดการขยะมูลฝอยต้นแบบ อบจ. พระนครศรีอยุธยา ด้วยโปรแกรม QGIS (Version 3.38)

การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างน้ำชะขยะก่อนผ่านระบบบำบัด (influent) และหลังผ่านระบบบำบัด (effluent) ใช้การเก็บตัวอย่างแบบจ้วง (grab sampling) จากพื้นที่รวบรวมน้ำชะขยะก่อนเข้าระบบบำบัดและจุดระบายน้ำทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมตามวิธีการมาตรฐานการเก็บตัวอย่างน้ำชะขยะของ USEPA [12, 13] ช่วงเวลาการเก็บตัวอย่างในพื้นที่ศึกษาคือ เดือนกุมภาพันธ์ 2566 (ฤดูแล้ง) และ มิถุนายน 2566 (ฤดูน้ำหลาก) โดยเก็บตัวอย่างเดือนละ 3 ครั้ง การเก็บตัวอย่างน้ำชะขยะดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำชะขยะ 2 ลิตร ใส่ขวด HDPE และเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิ 8–15 °C ในระหว่างการขนส่งไปห้องปฏิบัติการ ทุกตัวอย่างจะหยดกรดไนตริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร เพื่อป้องกันการตกตะกอนของโลหะหนักและเก็บรักษาตัวอย่างในพื้นที่ไร้แสง เมื่อถึงห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างจะถูกเก็บพื้นที่ไร้แสงที่อุณหภูมิ 4 °C ก่อนเริ่มกระบวนการทางห้องปฏิบัติการ (การย่อยและการวิเคราะห์โลหะหนัก) ตามวิธีการมาตรฐานการรักษาน้ำตัวอย่างของสำนักงานสิ่งแวดล้อมประเทศอังกฤษและ USEPA [14–16]

การย่อยและการวิเคราะห์โลหะหนัก

การวิเคราะห์การปนเปื้อนโลหะหนักทั้งหมดในรูปสารแขวนลอย สารคอลลอยด์ และสารละลายในตัวอย่างน้ำชะขยะก่อนและหลังบำบัด ใช้การย่อย (digestion) โลหะหนักทั้งหมด ได้แก่ สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) ตะกั่ว (Pb) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) และ สังกะสี (Zn) ในตัวอย่างของเหลวและวิเคราะห์การปนเปื้อนโลหะหนักในตัวอย่างโดยอ้างอิงระเบียบวิธีวิจัย USEPA 3005A และ USEPA 6010D ตามลำดับ [17, 18] ขั้นตอนการย่อยและ

การวิเคราะห์โลหะหนักทั้งหมดมีขั้นตอนดังนี้ นำตัวอย่างน้ำชะขยะก่อนและหลังบำบัดมา 50 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้น 70% (Kemaus) และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% (Fisher chemical™) 2 และ 5 มิลลิลิตร ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ผสมกรดแล้วไปให้ความร้อนบนเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90–95 °C จนปริมาตรลดลงเหลือ 15–20 มิลลิลิตร จึงนำตัวอย่างออกจากเตาให้ความร้อนนำตัวอย่างตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตรด้วยน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูง (milli q water) นำไปวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission spectroscopy (ICP-OES, PerkinElmer, model optima 8300) ความยาวคลื่นที่ใช้ในการตรวจวัดโลหะหนักคือ 193.696, 226.502, 267.716, 220.353, 257.610, 231.604, 213.856, 259.940 และ 324.754 นาโนเมตร สำหรับธาตุ As, Cd, Cr, Pb, Mn, Ni, Zn Fe และ Cu ตามลำดับ การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบใช้วิธีการการสร้างกราฟของสารละลายมาตรฐาน (calibration curve) ของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 0.125, 0.25, 0.5, 1 และ 2 ppm เพื่อทดสอบความเป็นเส้นตรง (linearity) โดยการเตรียมสารละลายจากสารละลายมาตรฐานของบริษัท Sigma-Aldrich (product no. 92091, lot bcch 2638) สารละลายมาตรฐานดังกล่าวเป็นวัสดุรับรองอ้างอิง จากห้องปฏิบัติการที่ได้ผ่านการรับรองมาตรฐาน ISO17034 ผลการทดสอบความเป็นเส้นตรงของกราฟสารละลายมาตรฐานพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient: r^2) ของโลหะทุกชนิดมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด คือ $r^2 > 0.995$ [19]

การวิเคราะห์ทางสถิติ

เทคนิคการวิเคราะห์เพื่อหาความแตกต่างของความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดในน้ำชะขยะก่อนผ่านระบบบำบัดและหลังผ่านระบบบำบัดด้วยวิธีการทาง independent sample t-test ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ทางสถิติของปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำชะขยะก่อนบำบัดด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's correlation coefficient) เพื่อความสัมพันธ์และวิเคราะห์แหล่งกำเนิดโลหะหนักที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำชะขยะก่อนผ่านระบบบำบัด ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS Version 26 [20]

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารปนเปื้อนทั้งหมดในน้ำชะขยะ (ตารางที่ 1) พบว่าน้ำชะขยะมีการปนเปื้อน As, Cd, Cr, Mn และ Zn ทั้ง 2 ฤดู ขณะที่ Pb และ Zn มีการปนเปื้อนเฉพาะในฤดูน้ำหลาก ชนิดโลหะหนักที่มีการปนเปื้อนสูงที่สุดในน้ำชะขยะก่อนบำบัดจากตัวอย่างในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลากคือ Mn และ Ni ตามลำดับ ชนิดโลหะหนักทั้งหมดที่ปนเปื้อนต่ำที่สุด ได้แก่ Fe และ Cu ในน้ำชะขยะตัวอย่างก่อนและหลังบำบัดทั้ง 2 ฤดูกาล และ Pb และ Zn ในน้ำชะขยะตัวอย่างก่อนและหลังบำบัดจากการเก็บตัวอย่างในฤดูน้ำหลาก ผลการเปรียบเทียบการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำชะขยะหลังบำบัดกับค่ามาตรฐานพบว่า การปนเปื้อนของโลหะทุกชนิดไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนด (ตารางที่ 2) ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำภาคสนามพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิของน้ำชะขยะก่อนบำบัดมีค่าสูงกว่าหลังบำบัด

ตารางที่ 1 การปนเปื้อนโลหะหนักทั้งหมดในน้ำชะขยะก่อน (Inf) และหลังบำบัด (Eff) ด้วยระบบบ่อฝังในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลาก และผลวิเคราะห์สถิติด้วยวิธี independent samples test (t-test)

ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในห้องปฏิบัติการ										
โลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (ppm) ในน้ำชะขยะ ($\bar{X} \pm SD$)						Independent sample t-test			
	ฤดูน้ำหลาก			ฤดูแล้ง			ฤดูน้ำหลาก		ฤดูแล้ง	
	น้ำชะขยะก่อนบำบัด	น้ำชะขยะหลังบำบัด	ประสิทธิภาพ (%)	น้ำชะขยะก่อนบำบัด	น้ำชะขยะหลังบำบัด	ประสิทธิภาพ (%)	t	p value	t	p value
As	0.065 ± 0.046	BDL	~ 100	0.07 ± 0.053	BDL	~ 100	2.447	0.071	-13.24**	0
Cd	0.005 ± 0.032	BDL	~ 100	0.005 ± 0.004	BDL	~ 100	2.748	0.051	3.148	0.088
Cr	0.01 ± 0.002	BDL	~ 100	0.065 ± 0.001	BDL	~ 100	8.660**	0.001	15.330**	0.004
Cu	BDL	BDL	NC	BDL	BDL	NC	-	-	-	-
Fe	BDL	BDL	NC	BDL	BDL	NC	-	-	-	-
Mn	0.047 ± 0.001	0.003 ± 0.0002	93.61	0.570 ± 0.0012	0.015 ± 0.0001	97.37	3810.5**	0	2.377	0.141
Ni	0.115 ± 0.004	0.055 ± 0.0025	52.17	0.125 ± 0.0017	0.09 ± 0.0027	28	231.64	0	18.853**	0
Pb	BDL	BDL	NC	0.07 ± 0.0184	BDL	~ 100	-	-	1.865	0.136
Zn	BDL	BDL	NC	0.02 ± 0.0015	BDL	~ 100	-	-	7.059*	0.019
ผลการตรวจคุณภาพน้ำในภาคสนาม										
pH	8.42	8.15		8.40	7.26					
อุณหภูมิ	38.0 °C	31.1°C		35.1°C	34.4°C					

BDL (below detection limit), NC = ไม่สามารถคำนวณได้, * = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$, ** = มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.01$, - = ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทั้ง 2 กลุ่มมีค่าเท่ากับ 0

ตารางที่ 2 ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำชะขยะและน้ำทิ้ง

โลหะหนัก	ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำชะขยะและน้ำทิ้ง (ppm)			
	มาตรฐาน USEPA [21]		มาตรฐานน้ำทิ้งของการนิคมแห่งประเทศไทย [22]	มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอยของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม [23]
	Long term	Short term		
As	0.1	2.0	0.25	0.05
Cd	0.01	0.05	0.03	0.005
Cr	0.1	1.0	0.25	-
Cu	0.2	5.0	2.0	-
Fe	5	20	10	-
Mn	0.2	10.0	5.0	2.0
Ni	0.2	2.0	1.0	-
Pb	5.0	10.0	0.2	0.05
Zn	2.0	10.0	5.0	-

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักด้วยระบบบ่อดึงพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักทั้งหมดในฤดูแล้งของ Cd (~100%), As (~100%), Cr (~100%), Pb (~100%) และ Zn (~100%) > Mn (97.37%) > Ni (28%), ประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักทั้งหมดในฤดูน้ำหลากของ Cd (~100%), As (~100%) และ Cr (~100%) > Mn (93.61%) > Ni (52.17%)

การวิเคราะห์ความแตกต่างของระดับการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำชะขยะก่อนและหลังบำบัดด้วยระบบบ่อดึงในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลากพบว่า ระดับการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำชะขยะก่อนและหลังบำบัดมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 คือ Cr, Mn และ Ni ในฤดูแล้ง และ Cr, Mn Ni และ Pb ในฤดูน้ำหลาก ดังนั้น แสดงว่าระบบบำบัดบ่อดึงสามารถบำบัดโลหะหนักดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ผลวิเคราะห์ทางสถิติยังแสดงให้เห็นว่าระดับการปนเปื้อนของ As และ Cd ในฤดูแล้ง และ As, Cd และ Zn ในฤดูน้ำหลากไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

การพิจารณาหาความสัมพันธ์ของโลหะหนักทั้งหมดที่ปนเปื้อนในน้ำชะขยะก่อนบำบัดด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (ตารางที่ 3) พบว่า โลหะหนักที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ได้แก่ As-Cd ($r = 0.837$), Ni-Cr ($r = 0.910$), Mn-Ni ($r = 0.893$), Mn-Pb ($r = 0.960$), Mn-Zn ($r = 0.997$), Ni-Pb ($r = 0.901$) และ Pb-Zn ($r = 0.978$) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 และโลหะหนักที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ได้แก่ Mn-Cr ($r = 0.990$), Pb-Cr ($r = 0.962$) และ Zn-Cr ($r = 0.997$)

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's correlation coefficient) ระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในตัวอย่างน้ำชะขยะก่อนบำบัด

	As	Cd	Cr	Mn	Ni	Pb	Zn
As	1	.837*	.100	.017	.446	.219	.109
Cd		1	.042	.011	.394	.228	.068
Cr			1	.999**	.910*	.962**	.997**
Mn				1	.893*	.960*	.997*
Ni					1	.901*	.901*
Pb						1	.978*
Zn							1

** ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 (2-tailed)

* ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (2-tailed)

อภิปรายผลการวิจัย

การเปรียบเทียบการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้งหมดในฤดูน้ำหลากและฤดูแล้งพบว่า การปนเปื้อนของโลหะหนักทั้งหมดในฤดูแล้งมีแนวโน้มสูงกว่าฤดูน้ำหลาก ยกเว้น Cd และ Mn โดยในน้ำชะขยะก่อนและหลังบำบัดจากการเก็บตัวอย่างในฤดูน้ำหลากและฤดูแล้งมีการปนเปื้อน Cd เท่ากัน และการปนเปื้อน Mn ในน้ำชะขยะหลังบำบัดในฤดูแล้งมีค่าต่ำกว่าฤดูน้ำหลาก สาเหตุที่แนวโน้มของ As, Cr, Cu, Fe, Ni Pb และ Zn ในน้ำชะขยะก่อนบำบัดมีการปนเปื้อนในฤดูแล้งมีค่าสูงกว่าในฤดูน้ำหลาก เนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่สูงในช่วงฤดูน้ำหลากทำให้เจือจางความเข้มข้นของ

น้ำชะขยะ ส่งผลให้น้ำชะขยะมีระดับการปนเปื้อนโลหะหนักทั้งหมดต่ำในฤดูน้ำหลากซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sankoh และคณะ [25] และ Kalčíková และคณะ [26] ซึ่งพบว่าการปนเปื้อนของโลหะหนักของน้ำชะขยะในฤดูน้ำหลากจะมีการปนเปื้อนที่น้อยกว่าฤดูแล้งจากการกระบวนชะล้างของน้ำฝนในฤดูน้ำหลาก ส่วนการปนเปื้อนของ Cr และ Mn ที่มีปริมาณแตกต่างกันอย่างมากต่างจากโลหะชนิดอื่นที่ลดลงในปริมาณที่ไม่สูง เป็นผลมาจากองค์ประกอบของขยะที่นำมาฝังกลบในช่วงฤดูน้ำหลากมีการปนเปื้อน Cr และ Mn ลดลงอย่างมาก จึงทำให้การปนเปื้อนของ Cr และ Mn มีค่าลดลงเช่นนั้นจากการศึกษาของ Kiou และคณะ [27] พบว่าในประเทศกำลังพัฒนามีปัจจัยด้านเศรษฐกิจและสังคมที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของขยะได้อย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น ซึ่งส่งผลให้การปริมาณการปนเปื้อนของ Cr และ Mn ในน้ำชะขยะเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันได้

การวิเคราะห์แหล่งกำเนิดของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำชะขยะจากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันพบว่า โลหะหนักที่มีความสัมพันธ์กันในเชิงบวกจะมาจากแหล่งกำเนิดที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำชะขยะก่อนบำบัดเดียวกัน [24] ซึ่งได้แก่ As-Cd, Ni-Cr, Mn-Ni, Mn-Pb, Mn-Zn, Ni-Pb, Pb-Zn, Mn-Cr, Pb-Cr และ Zn-Cr ซึ่งความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดและชนิดของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำชะขยะก่อนบำบัด มีความสอดคล้องกันในด้านประเภทของขยะอันตรายจากชุมชนปะปนมากับขยะชุมชนจนก่อให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำชะขยะก่อนบำบัด อาทิ Cd-As และ Zn-Ni ที่มีสาเหตุมาจากอันตรายประเภทขยะอิเล็กทรอนิกส์ และ Pb-Zn มีสาเหตุมาจากอันตรายประเภทขยะสารเคมีอันตราย (กระป๋องสี) นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับสถานการณ์ขยะอันตรายในพื้นที่ศึกษาของกรมควบคุมมลพิษที่พบว่า ในปี 2564 [28] มีปริมาณขยะอันตรายที่รวบรวมและเก็บไว้ในพื้นที่ที่มีจำนวน 6.83 ตัน และในปี 2565 [29] มีปริมาณขยะอันตรายที่รวบรวมได้จำนวน 9.12 ตันและส่งกำจัดไปเพียง 6.82 ตัน ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่ายังคงมีขยะอันตรายสะสมอยู่ในพื้นที่ศึกษาทำให้เพิ่มความเสี่ยงที่น้ำชะขยะจากพื้นที่จัดเก็บอันตรายจะรั่วไหลสู่ระบบบำบัดและทำให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำชะขยะได้

การเปรียบเทียบการปนเปื้อนโลหะหนักทั้งหมดในน้ำชะขยะหลังบำบัดกับค่ามาตรฐานพบว่า การปนเปื้อน As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb และ Zn ในน้ำชะขยะหลังบำบัดในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลากมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานของ USEPA ทั้งในรูปแบบ short term effect และ long term effect มาตรฐานน้ำทิ้งของการนิคมแห่งประเทศไทย และมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอยของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ผลการเปรียบเทียบการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้งหมดในน้ำชะขยะก่อนบำบัดกับค่ามาตรฐาน เพื่อศึกษาผลกระทบในกรณีเกิดการรั่วไหลของน้ำชะขยะที่ไม่ผ่านการบำบัดสู่สิ่งแวดล้อมพบว่า Cr, Cu, Fe, Ni และ Zn มีระดับการปนเปื้อนต่ำกว่าค่ามาตรฐานทั้งหมด และ As, Cd และ Mn มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน โดย As มีการปนเปื้อนสูงกว่าค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยในตัวอย่างทั้ง 2 ฤดูกาล, Cd มีค่าเท่ากับค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยในตัวอย่างทั้ง 2 ฤดูกาล และ Mn ในน้ำชะขยะก่อนการบำบัดมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของ USEPA แบบ long term effect ในตัวอย่างน้ำชะขยะก่อนบำบัดในฤดูแล้ง ซึ่งหากมีการรั่วไหลของน้ำชะขยะและเกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิตเป็นระยะเวลายาวนานจะสามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในระยะยาวได้

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักทั้งหมดพบว่า 1) ระบบบำบัดแบบบ่อฝัองสามารถบำบัดโลหะหนักได้จากกระบวนการภายในบ่อฝัอง อาทิ โลหะหนักที่อยู่ในรูปสารละลายจะดูดซับกับสารอินทรีย์และตกตะกอนสู่ก้นบ่อ [30, 31] กระบวนการของจุลินทรีย์ในบ่อฝัองที่จะดูดซับโลหะหนักไว้ และความเป็นต่าง (pH<7) ของน้ำชะขยะจะทำให้โลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนรูปเป็นโลหะหนักที่ไม่ละลายน้ำแล้วตกลงเป็นตะกอนภายในบ่อฝัอง [32] และ 2) ในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลากระบบบำบัดสามารถบำบัด As, Cd และ Cr ได้สูงสุด และสามารถบำบัด Ni ได้ต่ำสุดเหมือนกัน โดยสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัด Ni มีค่าต่ำ เนื่องจากความเสถียรของ Ni ที่อยู่ในรูปสารละลาย การปนเปื้อน Ni ในน้ำชะขยะก่อนบำบัดมีระดับการปนเปื้อนสูงซึ่งทำให้ที่ระบบบำบัดจะบำบัด Ni ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นเป็นไปได้ยากและค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำชะขยะไม่อยู่ในช่วงที่จะทำให้ Ni ที่อยู่ในรูปสารละลายเปลี่ยนรูปเป็น Ni ในรูปที่ไม่ละลายน้ำและตกตะกอนสู่ก้นบ่อได้ (pH= 10-10.5) ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัด Ni ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่น [33]

การวิเคราะห์ความแตกต่างของการบำบัดโลหะหนักในรูปแบบต่าง ๆ ด้วยระบบบ่อฝัองพบว่า โลหะหนักทั้งหมดที่ปนเปื้อนในน้ำชะขยะจะมีทั้งในรูปสารละลาย สารคอลลอยด์ และสารแขวนลอย โดยระบบบำบัดสามารถบำบัดโลหะในรูปสารละลายได้ดี เนื่องจากโลหะหนักที่อยู่ในรูปสารละลายมีการเปลี่ยนเป็นโลหะหนักรูปที่ไม่ละลายน้ำเพื่อตกตะกอนลงสู่ก้นบ่อฝัองได้ง่ายกว่ารูปอื่น และดังจะเห็นได้จากข้อมูลการศึกษาในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่พบว่า ระบบบำบัดจะบำบัด Ni ที่อยู่ในรูปสารละลายด้วยระบบบำบัดแบบบ่อฝัองมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงเมื่อมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมและบำบัดปริมาณโลหะหนักทั้งหมดได้ต่ำ โดยสามารถบำบัด Ni ในรูปสารละลายได้ 80.55% ถึง 91.67% ดังนั้นหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักให้สูงขึ้นควรมีการปรับปรุงระบบบำบัด โดยการเพิ่มการกระบวนการตกตะกอนเพื่อบำบัดหนักในรูปสารละลายและผสมผสานระบบพืชดูดซับโลหะ ได้แก่ หญ้าแพรก และธูปฤๅษี เพื่อบำบัดโลหะหนักที่ตกตะกอนสู่ก้นบ่อแล้วจึงปล่อยน้ำชะขยะที่ผ่านระบบบำบัดแล้วสู่สิ่งแวดล้อมได้

จากการศึกษาทั้งหมดทำให้คณะผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไปดังนี้ 1) ควรมีการศึกษาการแพร่กระจายและการสะสมตัวของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมโดยรอบหลุมฝังกลบขยะ 2) ควรมีการวิเคราะห์การปนเปื้อนโลหะหนักในตะกอนภายในบ่อฝัองเพื่อหาแนวทางการกำจัดที่ถูกต้อง และ 3) ควรมีการเฝ้าระวังการปนเปื้อนของโลหะที่ตรวจไม่พบในงานวิจัยนี้ อาทิ Pb อย่างใกล้ชิด เนื่องจากอาจมีการปนเปื้อนอยู่แต่ในปริมาณน้อย

สรุปผลการวิจัย

แนวโน้มการปนเปื้อนโลหะหนักทั้งหมดในน้ำชะขยะฤดูแล้งมีค่าสูงกว่าฤดูน้ำหลากและการปนเปื้อนในน้ำชะขยะหลังบำบัดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดโดย USEPA ทั้งในรูปแบบ short term effect และ long term effect มาตรฐานน้ำทิ้งของการนิคมแห่งประเทศไทย และมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอยของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำชะขยะก่อนบำบัดมาจากองค์ประกอบของขยะอันตรายที่มีการปะปนมากับขยะชุมชน

ประเภทเดียวกัน ($r > 0.8$, $p < 0.05$) ได้แก่ As-Cd, Cr-Ni, Mn-Ni, Pb-Ni, Zn-Ni, Cr-Mn, Cr-Pb, Cr-Zn, Mn-Pb, Mn-Zn และ Pb-Zn

ประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักมีค่าสูงสุดคือ 100% ได้แก่ As, Cd, Cr, Pb และ Zn ในฤดูแล้ง และ As, Cd, และ Cr ในฤดูน้ำหลาก ประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักที่มีค่าต่ำสุดคือการบำบัด Ni ในน้ำชะขยะโดยระบบบำบัดสามารถบำบัดได้ 52.17% และ 28% ในฤดูน้ำหลากและฤดูแล้ง ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของการปนเปื้อนโลหะหนักทั้งหมดในน้ำชะขยะก่อนและหลังบำบัดโดยใช้สถิติ independent sample *t*-test พบว่า Cr, Mn และ Ni ในฤดูแล้ง และ Cr, Mn, Ni และ Pb ในฤดูน้ำหลากมีความแตกต่างทางสถิติที่นัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบบำบัดมีประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักดังกล่าวที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลาก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) และ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยประจำปีงบประมาณ 2566 (รหัสโครงการ: ววน. 005/2566)

เอกสารอ้างอิง

- [1] James, D., Julius, C., Ahiekpor, S. N., Osei-Wusu, A., & Herbert, F. A. (2023). Municipal solid waste generation trend and bioenergy recovery potential: a review. *Energies*, 16, 7736.
- [2] Senbet, E. D., & Gemechu, S. O. (2023). Towards integrated, and sustainable municipal solid waste management system in Shashemane city administration, Ethiopia. *Heliyon*, 9(11), 1–15.
- [3] Imran, A., Shreeshivadasan, C., Norazli, O., & Roslina, M. (2018). A review of municipal solid waste (MSW) landfill management and treatment of leachate. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(5), 336–348.
- [4] Forbes, R. M., Peter R. W., Marina, F., & Peter, H. (1995). *Integrated solid waste management: a life cycle inventory*. London: Black Academic & Professional.
- [5] Pollution Control Department. (2004). *Sanitary Landfill*. Bangkok: Pollution Control Department.
- [6] Banerjee, G., & Sarker, S. (1997). The role of salvinia rotundifolia in scavenging aquatic Pb(II) pollution: a case study. *Bioprocess Engineering*, 17, 295–300.
- [7] องค์การบริหารส่วนจังหวัดพระนครศรีอยุธยา. (2566). สถิติการให้บริการกำจัดขยะ ณ ศูนย์จัดการขยะต้นแบบจังหวัดพระนครศรีอยุธยา. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <http://aypao.go.th/ita/datas/file/ita-2567/ita-012-11042567-003.pdf> (17 สิงหาคม 2567).

- [8] Alam, P., Khan, A. H., Islam, R., Sabi, E., Khan, N. A., & Zargar, T. I. (2024). Identification of prevalent leachate percolation of municipal solid waste landfill: a case study in India. *Scientific Reports*, 14(8910), 1–15.
- [9] European Environment Agency. (2024). Leachate pollution from landfills (Signal). [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://www.eea.europa.eu/en/european-zero-pollution-dashboards> (16 เมษายน 2567).
- [10] U.S. Department of health and human services. (2007). *Toxicological profile for arsenic*. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2.pdf> (12 กรกฎาคม 2567).
- [11] Rahman, M. A., Hasegawa, H., Rahman, M. M., Islam, M. N., Miah, M. A. M., & Tasmen, A. (2007). Effect of arsenic on photosynthesis, growth and yield of five widely cultivated rice (*Oryza sativa* L.) varieties in Bangladesh. *Chemosphere*, 67(6), 1072–1079.
- [12] Tytła, M. (2019). Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risk in sewage sludge from municipal wastewater treatment plant located in the most industrialized region in Poland: case study. *IJERPH*, 16, 2430.
- [13] NSW EPA. (2016). *Environmental Guidelines Solid waste landfills* (2nd ed). Sydney: NSW EPA.
- [14] Beinabaj, S. M. H., Heydariyan, H. M., Aleii, A., & Hosseinzadeh, A. (2023). Concentration of heavy metals in leachate, soil, and plants in Tehran's landfill: Investigation of the effect of landfill age on the intensity of pollution. *Helicon*, 9, 13017.
- [15] United Kingdom Environment Agency. (2014). *Guidance on monitoring of landfill leachate, groundwater and surface water*. Bristol: United Kingdom Environment Agency.
- [16] U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Collecting water-quality samples for dissolved metals-in-water*. Washington: U.S. Environmental Protection Agency.
- [17] U.S. Environmental Protection Agency. (1992). *METHOD 3005A: Acid digestion of waters for total recoverable or dissolved metals for analysis by FLAA or ICP spectroscopy*. Washington: U.S. Environmental Protection Agency.
- [18] U.S. Environmental Protection Agency. (2018). *METHOD 6010D: Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry*. Washington: U.S. Environmental Protection Agency.

- [19] Abdullah, N. H., Kean, O. B., Hirmizi, N. M., Yusoff, N., Nurdiana, A. R., & Sabarudin, A. R. N. M. (2020). Method validation of heavy metals determination in traditional herbal tablet, capsule and liquid by graphite furnace atomic absorption spectrometer and flow injection for atomic spectroscopy hydride system. *Asian journal of pharmacognosy*, 4(3), 37–45.
- [20] Safo-Adu, G. (2020). Assessment of an oily wastewater treatment plant in nyankrom industrial area, ghana: physico-chemical quality of effluent water and treatment efficiency. *European Journal of Pure and Applied Chemistry*, 7(1), 1–13.
- [21] U.S. Environmental Protection Agency. (2004). *Guidelines for Water Reuse*. Washington: U.S. Environmental Protection Agency.
- [22] Industrial Estate Authority of Thailand. (2017). Announcement of the Industrial Estate Authority of Thailand no. 76/2560: standards for wastewater effluent discharge regulations by Industrial Estate Authority of Thailand. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <http://www.oic.go.th/FILEWEB/CABINFOCENTER6/DRAWER064/GENERAL/DATA0000/0000026.PDF> (3 พฤษภาคม 2566).
- [23] Ministry of Natural Resources and Environment. (2022). Announcement of Ministry of Natural Resources and Environment: discharged leachate standard value by Ministry of Natural Resources and Environment. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://www.pcd.go.th/laws/26433> (3 พฤษภาคม 2566).
- [24] Mojeed, A. A., Abiodun, O. A., Martins, A. A., & Omobola, O. O. (2010). Heavy metals in wastewater and sewage sludge from selected municipal treatment plants in Eastern Cape Province, South Africa. *Water Journal*, 2020(12), 1–19.
- [25] Sankoh, A. A., Amara, J., Komba, T., Laar, C., Sesay, A., Derkyi, M. S., & Frazer-Williams, R. (2023). Seasonal assessment of heavy metal contamination of groundwater in two major dumpsites in Sierra Leone. *Cogent engineering*, 10(1), 2185955.
- [26] Kalčíková, G., Vávrová, M., Zagorc-Končan, J. & Žgajnar Gotvajn, A. (2011). Seasonal variations in municipal landfill leachate quality. *Management of Environmental Quality*, 22(5), 612–619.
- [27] Kieu, L. P. N., Yen, H. C., Ho, W. C., & Chih, C. C. (2020). Impacts of socioeconomic changes on municipal solid waste characteristics in Taiwan. *Resources, Conservation & Recycling*, 161, 104931.
- [28] กรมควบคุมมลพิษ. (2565). รายงานสถานการณ์ของเสียอันตรายจากชุมชน ปี พ.ศ. 2564. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ
- [29] กรมควบคุมมลพิษ. (2566). รายงานสถานการณ์ของเสียอันตรายจากชุมชน ปี พ.ศ. 2565. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ

- [30] Shumung, W., Guang, H., Xiao, W., & Qicheng, F. (2022). Wastewater treatment in mineral processing of non-ferrous metal resources: a review. *Water*, 14, 726.
- [31] Jacek, N., & Anna, R. (2010). The speciation and physico-chemical forms of metals in surface waters and sediments. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 22(1), 1–24.
- [32] David, M. A., Allen, P. D., & Paul, M. G. (1994). *Removing Heavy Metals from Wastewater*. Maryland: University of Maryland.
- [33] WHO. (2021). *Nickel in drinking-water*. Geneva: WHO.

ลักษณะเฉพาะของความปกติบนสมาชิกในกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ Characterization of Regularity on Elements in the Bicyclic Semigroup

นเรศ สวัสดิ์รักษา^{*1} ชัญญา เล็กเจริญศรี² พันธกานต์ เวชกรณ² และพัชรภรณ์ สีทอง²
Nares Sawatraksa^{*1}, Chanya Lekjaroensri², Panthakan Wetchakorn²,
& Patcharaporn Sitong²

¹สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

²หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การสอนคณิตศาสตร์) สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

¹Division of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology,
Nakhon Sawan Rajabhat University

²Master of Science Program in Teaching Mathematics, Division of Mathematics and Statistics,
Faculty of Science and Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University

Submitted 1/7/2024 ; Revised 29/8/2024 ; Accepted 15/10/2024

บทคัดย่อ

ให้ $\mathbb{N}^0$ แทนเซตของจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ และ $B := \mathbb{N}^0 \times \mathbb{N}^0$ นิยามการดำเนินการทวิภาคบนเซต B โดย

$$(a, b)(c, d) = (a - b + t, d - c + t)$$

เมื่อ $t = \max\{b, c\}$ สำหรับทุก $a, b, c, d \in \mathbb{N}^0$ จะได้ว่า B เป็นกึ่งกรุปปกติ และจะถูกระบุว่ากึ่งกรุปวัฏจักรคู่ ในงานวิจัยฉบับนี้ ศึกษาลักษณะเฉพาะของสมาชิกปกติภายใน สมาชิกปกติซ้าย สมาชิกปกติขวา และสมาชิกปกติบริบูรณ์ บนกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ นอกจากนั้น พิสูจน์ว่าเซตของสมาชิกปกติภายใน สมาชิกปกติซ้าย สมาชิกปกติขวา และสมาชิกปกติบริบูรณ์ของ B ทั้งหมด เป็นกึ่งกรุปย่อยของ B

คำสำคัญ: ปกติซ้าย ปกติขวา ปกติบริบูรณ์ ปกติภายใน

***ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)**

E-mail: nares.sa@nsru.ac.th

Abstract

Let $\mathbb{N}^0$ denote the set of all non-negative integers, and $B := \mathbb{N}^0 \times \mathbb{N}^0$. Define a binary operation on B by

$$(a, b)(c, d) = (a - b + t, d - c + t)$$

where $t = \max\{b, c\}$ for all $a, b, c, d \in \mathbb{N}^0$. Then B is a regular semigroup and called the bicyclic semigroup. In this paper, we investigate characterizations of intra-regular elements, left regular elements, right regular elements, and completely regular elements on the bicyclic semigroup. Moreover, we also prove that the set of all left regular elements, right regular elements, completely regular elements, and intra-regular elements of B forms a subsemigroup of B .

Keywords: left regular, right regular, completely regular, intra-regular

บทนำ

กึ่งกรุป (semigroup) คือ โครงสร้างทางพีชคณิตที่ประกอบด้วยเซตที่ไม่เป็นเซตว่าง S และการดำเนินการทวิภาคบนเซต S ที่สอดคล้องสมบัติปิด (closer) และสมบัติการเปลี่ยนหมู่ (associative) การศึกษา กึ่งกรุปอย่างเป็นทางการเริ่มขึ้นราวคริสต์ศตวรรษที่ 20 ซึ่งแนวคิดของกึ่งกรุปนับว่ามีความสำคัญต่อการศึกษาคณิตศาสตร์ในหลากหลายด้าน ในทางด้านคณิตศาสตร์ประยุกต์ได้ใช้กึ่งกรุปเป็นตัวแบบพื้นฐาน (fundamental model) สำหรับการศึกษาาระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (linear time-invariant system) นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 เป็นต้นมา กึ่งกรุปมีบทบาทสำคัญในการศึกษาทฤษฎีวิทยาการคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้เพราะโครงสร้างของกึ่งกรุปจำกัดมีความเชื่อมโยงกับออโตมาตาจำกัด (finite automata) การที่ออโตมาตาจะทำงานได้นั้นต้องอาศัยภาษา (languages) ในการสร้างภาษาต้องศึกษาทฤษฎีของไวยากรณ์ (grammar) ภาษาปกติ (regular languages) ภาษาทางการ (formal languages) ซึ่งอาศัยโครงสร้างของกึ่งกรุป เพราะลักษณะของการสร้างประโยคของภาษานั้นอาศัยสมบัติปิดและการเปลี่ยนหมู่ซึ่งเป็นเงื่อนไขของระบบทางคณิตศาสตร์ที่เป็นกึ่งกรุป นอกจากนี้แล้วโครงสร้างของกึ่งกรุปมีความซับซ้อนน้อยกว่าโครงสร้างทางพีชคณิตนามธรรมอื่น ๆ [1-5]

แนวคิดที่สำคัญอีกแนวคิดหนึ่งของกึ่งกรุปที่ถูกนำเสนอโดย Clifford [6] ในปี ค.ศ. 1941 ซึ่งศึกษาสมาชิก a ของกึ่งกรุป S ที่สอดคล้องเงื่อนไขว่า มี $x \in S$ ที่ทำให้ $a = axa$ และ $ax = xa$ ซึ่งเรียกว่า สมาชิกปกติบริบูรณ์ (completely regular) และในปี ค.ศ. 1953 Croisot [7] ได้ศึกษาแนวคิดดังกล่าวอีกครั้งหนึ่ง และยังศึกษาแนวคิดอื่นที่มีความใกล้เคียงกัน คือ สมาชิกปกติซ้าย (left regular) สมาชิกปกติขวา (right regular) และสมาชิกปกติภายใน (intra-regular) นอกจากนี้ยังได้มีการพิสูจน์ว่า a เป็นสมาชิกปกติบริบูรณ์ ก็ต่อเมื่อ a เป็นสมาชิกปกติซ้ายและขวา และแนวคิดของความปกติทั้งหมดเป็นแนวคิดเดียวกันในกึ่งกรุปสลับที่ [8]

ให้ N^0 แทนเซตของจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ และ $B = N^0 \times N^0$ นิยามการดำเนินการทวิภาคบน B โดย

$$(a, b)(c, d) = (a - b + t, d - c + t)$$

เมื่อ $t = \max\{b, c\}$ สำหรับทุก $a, b, c, d \in N^0$ จะได้ว่า B เป็นกึ่งกรุป และเรียกว่า กึ่งกรุปวัฏจักรคู่ (bicyclic semigroup) งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับแนวคิดของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ได้มีการเผยแพร่เป็นครั้งแรกโดยนักคณิตศาสตร์ชาวรัสเซียชื่อ Lyapin [9] ในปี ค.ศ. 1953 แต่มีการกล่าวอ้างจาก Clifford และ Preston อ้างว่ามีบุคคลที่ทำงานร่วมกับ David Rees ได้ศึกษาเกี่ยวกับกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ในช่วงก่อนปี ค.ศ. 1943 แต่ไม่ได้มีการเผยแพร่ผลงาน กึ่งกรุปวัฏจักรคู่ถือเป็นโครงสร้างทางพีชคณิตที่สำคัญของคณิตศาสตร์สำหรับทฤษฎีโครงสร้างของกึ่งกรุป ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้ในหลากหลายงาน เช่น การอธิบายกราฟต้นไม้แบบทวิภาค และพีชคณิตเชิงสัมพันธ์ เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 2020 Hovsepian [10] นำเสนอเงื่อนไขของสมสณฐานระหว่างกึ่งกรุปย่อยผกผันของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ ในปี ค.ศ. 2022 Gutik และคณะ [11] พิสูจน์ว่าเซตของฟังก์ชันอันตรสณฐาน (endomorphisms) บนกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ทั้งหมดสมสณฐานกับกึ่งผลคูณตรง (semidirect product) และในปีเดียวกันนี้ Schwab [12] แสดงว่า กึ่งกรุปวัฏจักรคู่เป็นโมนอยด์ผกผันเชิงเดียวคู่เชิงการจัด (combinatorial bisimple inverse monoid) เพียงชนิดเดียวที่มีโมนอยด์ย่อยผกผันแบบเกจเป็นกึ่งแลตทิซ (semilattice) ของนิพจน์ (idempotent) เมื่อไม่นานมานี้ (ค.ศ. 2024) Kudryavtsev [13]

พิสูจน์ว่า กึ่งกรุปวัฏจักรไม่เป็นทั้งแบบฝังเฉพาะที่ในชั้นของกึ่งกรุปจำกัด (locally embeddable into the class of finite semigroups) และแบบคลุมเฉพาะที่โดยชั้นของกึ่งกรุปจำกัด (locally wrapped by the class of finite semigroups) นอกจากนี้ยังมีนักคณิตศาสตร์จำนวนมากได้ขยายแนวคิดของกึ่งกรุปวัฏจักรจากเซตของจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบไปยังเซตของจำนวนเต็ม

ในงานวิจัยฉบับนี้ คณะผู้จัดทำศึกษาลักษณะเฉพาะของสมาชิกปรกติภายใน สมาชิกปรกติซ้าย สมาชิกปรกติขวา และสมาชิกปรกติบริบูรณ์ บนกึ่งกรุปวัฏจักร นอกจากนั้น คณะผู้จัดทำพิสูจน์ว่าเซตของสมาชิกปรกติภายใน สมาชิกปรกติซ้าย สมาชิกปรกติขวา และสมาชิกปรกติบริบูรณ์ของ B ทั้งหมดเป็นกึ่งกรุปย่อยของ B

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของสมาชิกปรกติภายใน สมาชิกปรกติซ้าย สมาชิกปรกติขวา และสมาชิกปรกติบริบูรณ์ บนกึ่งกรุปวัฏจักร
2. เพื่อพิสูจน์ว่าเซตของสมาชิกปรกติภายใน สมาชิกปรกติซ้าย สมาชิกปรกติขวา และสมาชิกปรกติบริบูรณ์ของกึ่งกรุปวัฏจักรทั้งหมดเป็นกึ่งกรุปย่อย

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการศึกษาลักษณะเฉพาะของสมาชิกปรกติภายใน สมาชิกปรกติซ้าย สมาชิกปรกติขวา และสมาชิกปรกติบริบูรณ์ บนกึ่งกรุปวัฏจักร เริ่มต้นจากการศึกษาตัวอย่างของสมาชิกในกึ่งกรุปวัฏจักรตามนิยามของหัวข้อที่กล่าวมาแล้วข้างต้น หลังจากนั้น กำหนดเงื่อนไขของสมาชิกของกึ่งกรุปวัฏจักร และสุดท้าย ดำเนินการพิสูจน์ทฤษฎีบท ดังหัวข้อต่อไปนี้

สมาชิกปรกติภายใน

บทนิยาม 1 [8] ให้ S เป็นกึ่งกรุป และ $a \in S$ จะกล่าวว่า a เป็นสมาชิกปรกติภายใน (intra-regular element) ของ S ก็ต่อเมื่อ มี $b, c \in S$ ที่ทำให้ $a = ba^2c$

การศึกษาตัวอย่างของสมาชิกปรกติภายในจะแบ่งการพิจารณาเป็น 3 กรณี ดังนี้

ตัวอย่าง 1 (4,3) เป็นสมาชิกปรกติภายในของ B

วิธีทำ พิจารณา

$$\begin{aligned}(3,4)(4,3)(4,3)(3,3) &= (3 - 4 + \max\{4,4\}, 3 - 4 + \max\{4,4\}) \\ &\quad (4 - 3 + \max\{3,3\}, 3 - 3 + \max\{3,3\}) \\ &= (3 - 4 + 4, 3 - 4 + 4)(4 - 3 + 3, 3 - 3 + 3) \\ &= (3,3)(4,3) \\ &= (3 - 3 + \max\{3,4\}, 3 - 4 + \max\{3,4\}) \\ &= (3 - 3 + 4, 3 - 4 + 4) \\ &= (4,3)\end{aligned}$$

ดังนั้น (4,3) เป็นสมาชิกปรกติภายในของ B

ตัวอย่าง 2 (3,4) เป็นสมาชิกปรกติภายในของ B

วิธีทำ พิจารณา

$$\begin{aligned}
 (3,3)(3,4)(3,4)(4,3) &= (3 - 3 + \max\{3,3\} \ 4 - 3 + \max\{3,3\}) \\
 &\quad (3 - 4 + \max\{4,4\}, 3 - 4 + \max\{4,4\}) \\
 &= (3 - 3 + 3, 4 - 3 + 3)(3 - 4 + 4, 3 - 4 + 4) \\
 &= (3,4)(3,3) \\
 &= (3 - 4 + \max\{4,3\}, 3 - 3 + \max\{4,3\}) \\
 &= (3 - 4 + 4, 3 - 3 + 4) \\
 &= (3,4)
 \end{aligned}$$

ดังนั้น (3,4) เป็นสมาชิกปรกติภายในของ B

ตัวอย่าง 3 (4,4) เป็นสมาชิกปรกติภายในของ B

วิธีทำ พิจารณา

$$\begin{aligned}
 (3,3)(4,4)(4,4)(3,3) &= (3 - 3 + \max\{3,4\}, 4 - 4 + \max\{3,4\}) \\
 &\quad (4 - 4 + \max\{4,3\}, 3 - 3 + \max\{4,3\}) \\
 &= (3 - 3 + 4, 4 - 4 + 4)(4 - 4 + 4, 3 - 3 + 4) \\
 &= (4,4)(4,4) \\
 &= (4 - 4 + \max\{4,4\}, 4 - 4 + \max\{4,4\}) \\
 &= (4 - 4 + 4, 4 - 4 + 4) \\
 &= (4,4)
 \end{aligned}$$

ดังนั้น (4,4) เป็นสมาชิกปรกติภายในของ B

การสังเกตจากตัวอย่าง นำไปสู่ข้อสรุปทางทฤษฎีได้ดังนี้

ทฤษฎีบท 1 (x, y) เป็นสมาชิกปรกติภายในของ B สำหรับทุก $(x, y) \in B$

บทพิสูจน์ ให้ $(x, y) \in B$ จะแสดงว่า (x, y) เป็นสมาชิกปรกติภายในของ B

กรณี 1 สมมติว่า $x \leq y$ จะได้ว่า $\max\{x, y\} = y$ เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned}
 (x, x)(x, y)(x, y)(y, x) &= (x - x + \max\{x, x\}, y - x + \max\{x, x\}) \\
 &\quad (x - y + \max\{y, y\}, x - y + \max\{y, y\}) \\
 &= (x - x + x, y - x + x)(x - y + y, x - y + y) \\
 &= (x, y)(x, x) \\
 &= (x - y + \max\{y, x\}, x - x + \max\{y, x\}) \\
 &= (x - y + y, x - x + y) \\
 &= (x, y)
 \end{aligned}$$

กรณี 2 สมมติว่า $y < x$ จะได้ว่า $\max\{x, y\} = x$ เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned}
 (y, x)(x, y)(x, y)(y, y) &= (y - x + \max\{x, x\}, y - x + \max\{x, x\}) \\
 &\quad (x - y + \max\{y, y\}, y - y + \max\{y, y\}) \\
 &= (y - x + x, y - x + x)(x - y + y, y - y + y) \\
 &= (y, y)(x, y) \\
 &= (y - y + \max\{y, x\}, y - x + \max\{y, x\}) \\
 &= (y - y + x, y - x + x) \\
 &= (x, y)
 \end{aligned}$$

ดังนั้น (x, y) เป็นสมาชิกปรกติภายในของ B

สมาชิกปกติซ้าย

บทนิยาม 2 [8] ให้ S เป็นกึ่งกรุป และ $a \in S$ จะกล่าวว่า a เป็นสมาชิกปกติซ้าย (left regular element) ของ S ก็ต่อเมื่อ มี $b \in S$ ที่ทำให้ $a = ba^2$

ตัวอย่าง 4 $(4,3)$ เป็นสมาชิกปกติซ้ายของ B

วิธีทำ พิจารณา

$$\begin{aligned}(3,4)(4,3)(4,3) &= (3 - 4 + \max\{4,4\}, 3 - 4 + \max\{4,4\})(4,3) \\ &= (3 - 4 + 4, 3 - 4 + 4)(4,3) \\ &= (3,3)(4,3) \\ &= (3 - 3 + \max\{3,4\}, 3 - 4 + \max\{3,4\}) \\ &= (3 - 3 + 4, 3 - 4 + 4) \\ &= (4,3)\end{aligned}$$

ดังนั้น $(4,3)$ เป็นสมาชิกปกติซ้ายของ B

ตัวอย่าง 5 $(3,4)$ ไม่เป็นสมาชิกปกติซ้ายของ B

วิธีทำ สมมติว่า $(3,4)$ เป็นสมาชิกปกติซ้ายของ B จะได้ว่า มี $(a,b) \in B$ ที่ทำให้

$$(a,b)(3,4)(3,4) = (3,4)$$

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned}(a,b)(3 - 4 + \max\{4,3\}, 4 - 3 + \max\{4,3\}) &= (3,4) \\ (a,b)(3 - 4 + 4, 4 - 3 + 4) &= (3,4) \\ (a,b)(3,5) &= (3,4) \\ (a - b + t, 5 - 3 + t) &= (3,4)\end{aligned}$$

เมื่อ $t = \max\{b, 3\}$ จะได้ว่า $2 + t = 4$ นั่นคือ $t = 2$ ซึ่งทำให้เกิดข้อขัดแย้งกับ $t = \max\{b, 3\}$

ดังนั้น $(3,4)$ ไม่เป็นสมาชิกปกติซ้ายของ B

การสังเกตจากตัวอย่าง นำไปสู่ข้อสรุปทางทฤษฎีได้ดังนี้

ทฤษฎีบท 2 ให้ $(x,y) \in B$ จะได้ว่า (x,y) เป็นสมาชิกปกติซ้ายของ B ก็ต่อเมื่อ $x \geq y$

บทพิสูจน์ ($\Rightarrow$) สมมติว่า $x < y$ และ (x,y) เป็นสมาชิกปกติซ้ายของ B จะได้ว่า มี $(a,b) \in B$

ที่ทำให้ $(a,b)(x,y)(x,y) = (x,y)$ เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned}(a,b)(x - y + \max\{y,x\}, y - x + \max\{y,x\}) &= (x,y) \\ (a,b)(x - y + y, y - x + y) &= (x,y) \\ (a,b)(x, 2y - x) &= (x,y) \\ (a - b + \max\{b,x\}, 2y - x - x + \max\{b,x\}) &= (x,y) \\ (a - b + \max\{b,x\}, 2y - 2x + \max\{b,x\}) &= (x,y)\end{aligned}$$

กรณี 1 สมมติว่า $\max\{b,x\} = x$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}2y - 2x + x &= y \\ 2y - x &= y \\ x &= y\end{aligned}$$

ซึ่งเกิดข้อขัดแย้งกับสมมติฐาน $x < y$

กรณี 2 สมมติว่า $\max\{b, x\} = b$ เนื่องจาก $x < y$ จะได้ว่า $x - y < 0$ เพราะฉะนั้น

$$2y - 2x + b = y$$

$$2y - 2x + b = y$$

$$b = 2x - y$$

$$b = x + (x - y) < x$$

ซึ่งเกิดข้อขัดแย้งกับ $\max\{b, x\} = b$

จะเห็นว่าเกิดข้อขัดแย้งทั้งสองกรณี ดังนั้น (x, y) ไม่เป็นสมาชิกปรกติซ้ายของ B เมื่อ $x < y$

($\Leftarrow$) สมมติว่า $x \geq y$ จะแสดงว่า (x, y) เป็นสมาชิกปรกติซ้ายของ B เนื่องจาก $x \geq y$

จะได้ว่า $2x \geq x + y$ เพราะฉะนั้น $2x - y \geq x$ พิจารณา

$$(y, x)(x, y)(x, y) = (y, x)(x - y + \max\{y, x\}, y - x + \max\{y, x\})$$

$$= (y, x)(x - y + x, y - x + x)$$

$$= (y, x)(2x - y, y)$$

$$= (y - x + \max\{x, 2x - y\}, y - (2x - y) + \max\{x, 2x - y\})$$

$$= (y - x + 2x - y, y - (2x - y) + 2x - y)$$

$$= (x, y)$$

ดังนั้น (x, y) เป็นสมาชิกปรกติซ้ายของ B

ต่อไปจะแสดงว่าเซตของสมาชิกปรกติซ้ายของ B ทั้งหมดเป็นกึ่งกรุปย่อยของ B โดยการประยุกต์ใช้บทนิยามและทฤษฎีบทต่อไปนี้

บทนิยาม 3 [8] ให้ S เป็นกึ่งกรุป และ $T \subseteq S$ โดยที่ $T \neq \emptyset$ จะกล่าวว่า T เป็นกึ่งกรุปย่อย (subsemigroup) ของ S ก็ต่อเมื่อ T เป็นกึ่งกรุปภายใต้การดำเนินการเดียวกับ S

ทฤษฎีบท 3 [8] ให้ S เป็นกึ่งกรุป และ $T \subseteq S$ โดยที่ $T \neq \emptyset$ จะได้ว่า T เป็นกึ่งกรุปย่อยของ S ก็ต่อเมื่อ $ab \in T$ สำหรับทุก $a, b \in T$

ทฤษฎีบท 4 ให้ L เป็นเซตของสมาชิกปรกติซ้ายของ B ทั้งหมด จะได้ว่า L เป็นกึ่งกรุปย่อยของ B

บทพิสูจน์ ให้ $(a, b), (c, d) \in L$ และ $t = \max\{b, c\}$ พิจารณา

$$(a, b)(c, d) = (a - b + t, d - c + t)$$

จะแสดงว่า $a - b + t \geq d - c + t$ เนื่องจาก (a, b) และ (c, d) เป็นสมาชิกปรกติซ้ายของ B โดยทฤษฎีบท 2 จะได้ว่า $a \geq b$ และ $c \geq d$ เพราะฉะนั้น $a - b \geq 0$ และ $d - c \leq 0$ ดังนั้น $d - c \leq 0 \leq a - b$ เพราะฉะนั้น $d - c + t \leq a - b + t$ ดังนั้น โดยทฤษฎีบท 2 จะได้ว่า $(a - b + t, d - c + t)$ เป็นสมาชิกปรกติซ้ายของ B นั่นคือ $(a, b)(c, d) \in L$ โดยทฤษฎีบท 3 จะได้ว่า L เป็นกึ่งกรุปย่อยของ B

สมาชิกปกติขวา

บทนิยาม 4 [8] ให้ S เป็นกึ่งกรุป และ $a \in S$ จะกล่าวว่า a เป็นสมาชิกปกติขวา (right regular element) ของ S ก็ต่อเมื่อ มี $b \in S$ ที่ทำให้ $a = a^2b$

ตัวอย่าง 6 $(3,4)$ เป็นสมาชิกปกติขวาของ B

วิธีทำ พิจารณา

$$\begin{aligned}(3,4)(3,4)(4,3) &= (3 - 4 + \max\{4,3\}, 4 - 3 + \max\{4,3\})(4,3) \\ &= (3 - 4 + 4, 4 - 3 + 4)(4,3) \\ &= (3,5)(4,3) \\ &= (3 - 5 + \max\{5,4\}, 3 - 4 + \max\{5,4\}) \\ &= (3 - 5 + 5, 3 - 4 + 5) \\ &= (3,4)\end{aligned}$$

ดังนั้น $(3,4)$ เป็นสมาชิกปกติขวาของ B

ตัวอย่าง 7 $(4,3)$ ไม่เป็นสมาชิกปกติขวาของ B

วิธีทำ สมมติว่า $(4,3)$ เป็นสมาชิกปกติขวาของ B จะได้ว่า มี $(a,b) \in B$ ที่ทำให้

$$(4,3)(4,3)(a,b) = (4,3)$$

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned}(4 - 3 + \max\{3,4\}, 3 - 4 + \max\{3,4\})(a,b) &= (4,3) \\ (4 - 3 + 4, 3 - 4 + 4)(a,b) &= (4,3) \\ (5,3)(a,b) &= (4,3) \\ (5 - 3 + t, b - a + t) &= (4,3)\end{aligned}$$

เมื่อ $t = \max\{3, a\}$ จะได้ว่า $2 + t = 4$ นั่นคือ $t = 2$ ซึ่งทำให้เกิดข้อขัดแย้งกับ $t = \max\{3, a\}$

ดังนั้น $(4,3)$ ไม่เป็นสมาชิกปกติขวาของ B

การสังเกตจากตัวอย่าง นำไปสู่ข้อสรุปทางทฤษฎีได้ดังนี้

ทฤษฎีบท 5 ให้ $(x,y) \in B$ จะได้ว่า (x,y) เป็นสมาชิกปกติขวาของ B ก็ต่อเมื่อ $x \leq y$

บทพิสูจน์ ($\Rightarrow$) สมมติว่า $x > y$ และ (x,y) เป็นสมาชิกปกติขวาของ B จะได้ว่า มี $(a,b) \in B$ ที่ทำให้ $(x,y)(x,y)(a,b) = (x,y)$ เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned}(x - y + \max\{y, x\}, y - x + \max\{y, x\})(a,b) &= (x,y) \\ (x - y + x, y - x + x)(a,b) &= (x,y) \\ (2x - y, y)(a,b) &= (x,y) \\ (2x - y - y + \max\{y, a\}, b - a + \max\{y, a\}) &= (x,y) \\ (2x - 2y + \max\{y, a\}, b - a + \max\{y, a\}) &= (x,y)\end{aligned}$$

กรณี 1 สมมติว่า $\max\{y, a\} = y$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}2x - 2y + y &= x \\ 2x - y &= x \\ x &= y\end{aligned}$$

ซึ่งเกิดข้อขัดแย้งกับสมมติฐาน $x > y$

กรณี 2 สมมติว่า $\max\{y, a\} = a$ เนื่องจาก $x > y$ จะได้ว่า $y - x < 0$ เพราะฉะนั้น

$$2x - 2y + a = x$$

$$x - 2y + a = x$$

$$a = 2y - x$$

$$a = y + (y - x) < y$$

ซึ่งเกิดข้อขัดแย้งกับ $\max\{y, a\} = a$

จะเห็นว่าเกิดข้อขัดแย้งทั้งสองกรณี ดังนั้น (x, y) ไม่เป็นสมาชิกปรกติขวาของ B เมื่อ $x > y$

($\Leftarrow$) สมมติว่า $x \leq y$ จะแสดงว่า (x, y) เป็นสมาชิกปรกติขวาของ B เนื่องจาก $x \leq y$

จะได้ว่า $2y \geq x + y$ เพราะฉะนั้น $2y - x \geq y$ พิจารณา

$$(x, y)(x, y)(y, x) = (x - y + \max\{y, x\}, y - x + \max\{y, x\})(y, x)$$

$$= (x - y + y, y - x + y)(y, x)$$

$$= (x, 2y - x)(y, x)$$

$$= (x - (2y - x) + \max\{2y - x, y\}, x - y + \max\{2y - x, y\})$$

$$= (x - (2y - x) + 2y - x, x - y + 2y - x)$$

$$= (x, y)$$

ดังนั้น (x, y) เป็นสมาชิกปรกติขวาของ B

ทฤษฎีบท 6 ให้ R เป็นเซตของสมาชิกปรกติขวาของ B ทั้งหมด จะได้ว่า R เป็นกึ่งกรุปย่อยของ B

บทพิสูจน์ ให้ $(a, b), (c, d) \in R$ และ $t = \max\{b, c\}$ พิจารณา

$$(a, b)(c, d) = (a - b + t, d - c + t)$$

จะแสดงว่า $a - b + t \leq d - c + t$ เนื่องจาก (a, b) และ (c, d) เป็นสมาชิกปรกติขวาของ B

โดยทฤษฎีบท 5 จะได้ว่า $a \leq b$ และ $c \leq d$ เพราะฉะนั้น $a - b \leq 0$ และ $d - c \geq 0$ ดังนั้น

$a - b \leq 0 \leq d - c$ เพราะฉะนั้น $a - b + t \leq d - c + t$ ดังนั้น โดยทฤษฎีบท 5 จะได้ว่า

$(a - b + t, d - c + t)$ เป็นสมาชิกปรกติขวาของ B นั่นคือ $(a, b)(c, d) \in R$ โดยทฤษฎีบท 3

จะได้ว่า R เป็นกึ่งกรุปย่อยของ B

สมาชิกปรกติบริบูรณ์

บทนิยาม 5 [8] ให้ S เป็นกึ่งกรุป และ $a \in S$ จะกล่าวว่า a เป็นสมาชิกปรกติบริบูรณ์ (completely regular element) ของ S ก็ต่อเมื่อ มี $b \in S$ ที่ทำให้ $a = aba$ และ $ab = ba$

ตัวอย่าง 8 $(3, 3)$ เป็นสมาชิกปรกติบริบูรณ์ของ B

วิธีทำ พิจารณา

$$(3, 3)(3, 3)(3, 3) = (3 - 3 + \max\{3, 3\}, 3 - 3 + \max\{3, 3\})(3, 3)$$

$$= (3 - 3 + 3, 3 - 3 + 3)(3, 3)$$

$$= (3, 3)(3, 3)$$

$$= (3 - 3 + \max\{3, 3\}, 3 - 3 + \max\{3, 3\})$$

$$= (3 - 3 + 3, 3 - 3 + 3)$$

$$= (3, 3)$$

ดังนั้น $(3, 3)$ เป็นสมาชิกปรกติบริบูรณ์ของ B

ตัวอย่างต่อไปจะแสดงให้เห็นว่ามีสมาชิกในกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ที่สอดคล้องเงื่อนไขของสมาชิก
ปรกติบริบูรณ์เพียงแค่ 1 เงื่อนไข ดังนี้

ตัวอย่าง 9 พิจารณา

$$\begin{aligned}(3,4)(4,3)(3,4) &= (3 - 4 + \max\{4,4\}, 3 - 4 + \max\{4,4\})(3,4) \\ &= (3 - 4 + 4, 3 - 4 + 4)(3,4) \\ &= (3,3)(3,4) \\ &= (3 - 3 + \max\{3,3\}, 4 - 3 + \max\{3,3\}) \\ &= (3 - 3 + 3, 4 - 3 + 3) \\ &= (3,4)\end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned}(3,4)(4,3) &= (3 - 4 + \max\{4,4\}, 3 - 4 + \max\{4,4\}) = (3 - 4 + 4, 3 - 4 + 4) = (3,3) \\ (4,3)(3,4) &= (4 - 3 + \max\{3,3\}, 4 - 3 + \max\{3,3\}) = (4 - 3 + 3, 4 - 3 + 3) = (4,4)\end{aligned}$$

จะเห็นว่า $(3,4)(4,3)(3,4) = (3,4)$ และ $(3,4)(4,3) \neq (4,3)(3,4)$

ในการศึกษาทฤษฎีของกึ่งกรุปได้มีการพิสูจน์ไว้แล้วว่า a สมาชิกในกึ่งกรุป S เป็นสมาชิก
ปรกติบริบูรณ์ของ S ก็ต่อเมื่อ a เป็นทั้งสมาชิกปรกติซ้ายและปรกติขวาของ S (ดูที่ [8]) ดังนั้นทฤษฎี
บทต่อไปนี้จะเป็ผลที่ได้จากทฤษฎีบท 2 และ 5

บทแทรก 1 ให้ $(x, y) \in B$ จะได้ว่า (x, y) เป็นสมาชิกปรกติบริบูรณ์ของ B ก็ต่อเมื่อ $x = y$

ทฤษฎีบท 4 และ 6 ทำให้ได้ผลการศึกษาต่อไปนี้

บทแทรก 2 ให้ C เป็นเซตของสมาชิกปรกติบริบูรณ์ของ B ทั้งหมด จะได้ว่า C เป็นกึ่งกรุปย่อยของ B

ผลการวิจัย

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของสมาชิกปรกติภายใน สมาชิกปรกติซ้าย สมาชิกปรกติขวา
และสมาชิกปรกติบริบูรณ์ บนกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ ได้ผลดังนี้

1. (x, y) เป็นสมาชิกปรกติภายในของ B สำหรับทุก $(x, y) \in B$
2. (x, y) เป็นสมาชิกปรกติซ้ายของ B ก็ต่อเมื่อ $x \leq y$
3. (x, y) เป็นสมาชิกปรกติขวาของ B ก็ต่อเมื่อ $x \geq y$
4. (x, y) เป็นสมาชิกปรกติบริบูรณ์ของ B ก็ต่อเมื่อ $x = y$

และเซตของสมาชิกปรกติภายใน สมาชิกปรกติซ้าย สมาชิกปรกติขวา และสมาชิกปรกติบริบูรณ์ของ B
ทั้งหมดเป็นกึ่งกรุปย่อยของ B

อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาพบว่า สมาชิกของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ทั้งหมดเป็นสมาชิกปรกติภายใน จึงทำให้โครงสร้างของสมาชิกปรกติภายในเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ที่สุดเช่นเดียวกับสมาชิกปรกติ (regular) [14] ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไม่เป็นจริงสำหรับโครงสร้างของกึ่งกรุปทั่วไป แต่สมาชิกปรกติซ้าย สมาชิกปรกติขวา และสมาชิกปรกติบริบูรณ์ของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ยังเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเฉพาะคล้ายกับโครงสร้างกึ่งกรุปทั่วไป และสมาชิกปรกติบริบูรณ์มีลักษณะเฉพาะเช่นเดียวกับสมาชิกนิพจน์ (idempotent) [14] นอกจากนี้ เซตของสมาชิกปรกติภายใน สมาชิกปรกติซ้าย สมาชิกปรกติขวา และสมาชิกปรกติบริบูรณ์ของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ทั้งหมดเป็นกึ่งกรุปย่อยของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นกึ่งกรุปที่แตกต่างจากกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ และจะเห็นว่าเซตของสมาชิกปรกติซ้ายของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ทั้งหมดสมมูลฐานกับเซตของสมาชิกปรกติขวาของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ทั้งหมด ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาของ Hovsepian [10] ในปี ค.ศ. 2020 ที่นำเสนอเงื่อนไขของการสมมูลฐานระหว่างกึ่งกรุปย่อยผกผันของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ ทำให้สามารถนำจากผลการศึกษาไปศึกษาสมบัติอื่น ๆ ของกึ่งกรุปได้ อาทิเช่น ไอเดิล (ideal) ความสัมพันธ์ของกรีน (Green's relation) อันดับบางส่วนธรรมชาติ (natural partial ordered) เป็นต้น

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของสมาชิกปรกติภายใน สมาชิกปรกติซ้าย สมาชิกปรกติขวา และสมาชิกปรกติบริบูรณ์ บนกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ พบว่า ผลการศึกษาสามารถอธิบายลักษณะเฉพาะของสมาชิกในกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ เพื่อใช้ในการตรวจสอบสมาชิกปรกติภายใน สมาชิกปรกติซ้าย สมาชิกปรกติขวา และสมาชิกปรกติบริบูรณ์ของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ ดังนี้

1. ทุกสมาชิกของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่เป็นสมาชิกปรกติภายใน
2. สมาชิกปรกติซ้ายของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่จะต้องมีสมาชิกตัวหน้าของคู่อันดับไม่เกินสมาชิกตัวหลัง
3. สมาชิกปรกติซ้ายของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่จะต้องมีสมาชิกตัวหลังของคู่อันดับไม่เกินสมาชิกตัวหน้า
4. สมาชิกปรกติบริบูรณ์ของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่มีเฉพาะคู่อันดับที่มีสมาชิกตัวหน้าเท่ากับตัวหลัง

นอกจากนั้น สามารถจำแนกสมาชิกในกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ออกเป็นกึ่งกรุปย่อยได้ ยิ่งไปกว่านั้น เซตของสมาชิกปรกติภายในของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ทั้งหมดเป็นเซตเดียวกับกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ ดังนั้นสมาชิกปรกติภายในเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ที่สุดในกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ และสมาชิกปรกติบริบูรณ์เป็นของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่โครงสร้างที่เล็กที่สุด นอกจากนี้ โครงสร้างสมาชิกปรกติซ้ายและสมาชิกปรกติขวาของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเฉพาะที่ตรงกันข้าม และกล่าวได้ว่าเซตของสมาชิกปรกติซ้ายและสมาชิกปรกติขวาของกึ่งกรุปวัฏจักรคู่ทั้งหมดมีจำนวนเชิงการนับ (cardinal number) เท่ากันอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Krohn, K., Rhodes, J. L., & Arbib, M. A. (1968). *Algebraic theory of machines, languages, and semigroups*. New York: Academic Press.
- [2] Arbib, M. A. (1969). *Theories of abstract automata (Prentice-Hall series in automatic computation)*. Prentice-Hall, Inc.
- [3] Boorman, S. A., & White, H. C. (1976). Social structure from multiple networks. II. Role structures. *American journal of sociology*, 81(6), 1384–1446.
- [4] Boyd, J. P., Haehl, J. H., & Sailer, L. D. (1972). Kinship systems and inverse semigroups. *Journal of Mathematical Sociology*, 2(1), 37–61.
- [5] Reddy, P. S., & Dawud, M. (2015). Applications of semigroups. *Global Journey of Science Frontier Research*, 15(F3), 17–25.
- [6] Clifford, A. H. (1941). Semigroups admitting relative inverses. *Annals of Mathematics*, 42(4), 1037–1049.
- [7] Croisot, R. (1953). Demi-groupes inversifs et demi-groupes réunions de demi-groupes simples. In *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*, 70(4), 361–379.
- [8] Petrich, M., & Reilly, N. R. (1999). *Completely regular semigroups*. New York: Wiley.
- [9] Lyapin, E. (1953). Canonical form of elements of an associative system given by defining relations. *Leningradskii Gosudarstvennyi Pedagogicheskii Institut Uchenye Zapiski*, 89, 45–54.
- [10] Hovsepyan, K. H. (2020). Inverse subsemigroups of the bicyclic semigroup. *Mathematical Notes*, 108, 550–556.
- [11] Gutik, O., Prokhorenkova, O., & Sekh, D. (2022). On endomorphisms of the bicyclic semigroup and the extended bicyclic semigroup. DOI:10.30970/vmm.2021.92.005-016
- [12] Schwab, E. D. (2022). The bicyclic semigroup as the quotient inverse semigroup by any gauge inverse submonoid. *Journal of Algebra Combinatorics Discrete Structures and Applications*, 9(2), 53–61.
- [13] Kudryavtsev, D. (2024). Restrictions on local embeddability into finite semigroups. *Semigroup Forum*, 109, 148–166
- [14] Clifford, A. H., & Preston, G. B. (1961). *The algebraic theory of semigroups*, vol. 1. Providence: American Mathematical Society.

การพัฒนาวิธีทดสอบดีทีทีอย่างง่ายสำหรับการหาค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน ของตัวอย่างฝุ่น PM_{2.5}

Development of a Simple DTT Assay for Determining the Oxidative Potential of PM_{2.5} Samples

ดวงเดือน เทพนวล^{*1} ปริมฤทัย ดอกคำใต้¹ และณัตติพร ยะบึง²

Duangduean Thepnuan^{*1}, Primruthai Dokkhamtai¹, & Nuttipon Yabueng²

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

²ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

¹Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University

² Environmental Science Research Center, Faculty of Science, Chiang Mai University.

Submitted 11/07/2024 ; Revised 27/08/2022 ; Accepted 17/10/2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้หาสภาวะที่เหมาะสมของวิธีทดสอบดีทีที (dithiothreitol assay: DTT assay) อย่างง่ายโดยการตรวจวัดด้วยเครื่องไมโครเพลทรีดเดอร์ สำหรับการหาค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน ในตัวอย่างฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}) โดยอาศัยหลักการวัดอัตราการลดลงของ ปริมาณสาร DTT ที่ทำปฏิกิริยากับสารอนุมูลอิสระออกซิเจน (reactive oxygen species: ROS) ที่มีใน ตัวอย่างฝุ่นที่เวลาต่าง ๆ โดยติดตามปริมาณ DTT ที่เหลือ จากค่าการดูดกลืนแสงเมื่อทำปฏิกิริยากับ 5,5'-dithio-bis-[2-nitrobenzoic acid] (DTNB) จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมพบว่า การสกัด แผ่นกรองฝุ่นควอตซ์ไฟเบอร์ที่มีน้ำหนักฝุ่น PM_{2.5} ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม ด้วยสารละลายฟอสเฟต บัฟเฟอร์ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำสารละลาย ตัวอย่างสกัดที่ได้ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ทำปฏิกิริยากับสารละลาย DTT ความเข้มข้น 0.10 มิลลิ-โมลาร์ ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที ตามลำดับ จากนั้นเติม สารละลาย DTNB ความเข้มข้น 0.40 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ที่เวลาต่าง ๆ แล้ววัดค่าการ ดูดกลืนแสงที่ λ_{max} 410 นาโนเมตร ค่าความชันและจุดตัดแกนของกราฟการลดลงของค่าการดูดกลืน แสงเมื่อเทียบกับเวลาถูกนำไปคำนวณหาค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชันของตัวอย่างฝุ่น ได้ทดสอบกับ ตัวอย่างฝุ่น PM_{2.5} จำนวน 12 ตัวอย่าง ที่เก็บช่วงเวลากลางวันของเดือนมีนาคม-เมษายน ปี พ.ศ. 2565 ในจังหวัดเชียงใหม่ (57.8±14.4 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) พบค่าเฉลี่ยของค่าศักยภาพการ ออกซิเดชันของฝุ่น เทียบกับปริมาตรอากาศ (OPv) และเทียบกับปริมาณฝุ่น (OPm) เป็น 0.304±0.133 นาโนโมลต่อเวลาที่ต่อลูกบาศก์เมตร และ 5.05±1.65 พิโคโมลต่อเวลาที่ต่อไมโครกรัม ตามลำดับ บ่งชี้ถึงความเป็นพิษจากการเกิดออกซิเดชันของสารที่อยู่ในตัวอย่างฝุ่นที่ต่ำ

คำสำคัญ: ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน วิธีทดสอบดีทีที ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน

*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)

E-mail: duangduean_the@cmru.ac.th

Abstract

The research aimed to determine the optimal conditions for a simplified dithiothreitol (DTT) assay using a microplate reader to assess the oxidative potential of PM_{2.5} samples. The method is based on measuring the rate of DTT consumption as it reacts with reactive oxygen species (ROS) present in the particulate matter over different time intervals. The remaining DTT is quantified by its absorbance after reacting with 5,5'-dithio-bis-[2-nitrobenzoic acid] (DTNB). The optimal conditions were as follows: PM_{2.5} samples, collected on quartz fiber filters (amount less than 0.5 mg), were extracted with 4 mL of phosphate buffer solution using a shaker at room temperature for 30 minutes. Subsequently, 100 μ L of the extracted solution was aliquoted to react with 50 μ L of 0.10 mM DTT solution at time intervals of 0, 5, 10, 15, 20, 25, and 30 minutes, respectively. Then, 100 μ L of 0.40 mM DTNB was added, and the absorbance was measured at λ_{max} 410 nm. The slope and intercept of the absorbance decline with reaction time were used to calculate the oxidative potential (OP). Twelve PM_{2.5} samples collected during the daytime in March–April 2022 in Chiang Mai Province ($57.8 \pm 14.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) were tested. The average oxidative potential of the particulate matter, calculated relative to air volume (OPv) and particulate mass (OPm), was $0.304 \pm 0.133 \text{ nmol}/\text{min}\cdot\text{m}^3$ and $5.05 \pm 1.65 \text{ pmol}/\text{min}\cdot\mu\text{g}$, respectively, indicating low oxidative toxicity of the substances in the dust samples.

Keywords: oxidative potential, DTT assay, PM_{2.5}

บทนำ

ประชาชนในจังหวัดเชียงใหม่และหลายจังหวัดในภาคเหนือตอนบนเผชิญกับปัญหาวิกฤตหมอกควันที่ทวีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อย ๆ ตลอดระยะเวลากว่า 10 ปีที่ผ่านมา โดยพบว่าค่าดัชนีคุณภาพอากาศ AQI (air quality index) สูงเป็นอันดับต้น ๆ ของโลกในช่วงฤดูหมอกควัน (เดือนกุมภาพันธ์-เมษายน) [1] ประชาชนในพื้นที่ ต้องสูดหายใจสารก่อมลพิษทางอากาศเข้าไปเป็นระยะเวลามากกว่า 3 เดือนอย่างต่อเนื่อง ทั้งอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็ก องค์กรประกอบทางเคมีที่เป็นพิษหรือสารก่อมะเร็งมีในตัวอย่างฝุ่น [2-4] ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ทั้งในภาวะเฉียบพลันและภาวะเรื้อรัง เช่น การเกิดโรคในระบบทางเดินหายใจ การเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด

กลไกสำคัญที่ก่อให้เกิดโรคจาก $PM_{2.5}$ เกี่ยวข้องกับการเหนี่ยวนำให้เกิดอนุมูลอิสระออกซิเจน (reactive oxygen species: ROS) ในร่างกายจากสารเคมีต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของ $PM_{2.5}$ ได้แก่ สารอนุมูลอิสระ สารประกอบอินทรีย์และโลหะทรานซิชันที่จะสามารถก่อให้เกิดอนุมูลอิสระออกซิเจนที่แพร่ผ่านไปตามกระแสเลือด ทำให้เกิดภาวะเครียดออกซิเดชันขึ้น หากเกิดภาวะดังกล่าวเป็นเวลานานจะทำให้มีความเสี่ยงที่จะมีผลไปทำลายเนื้อเยื่อต่าง ๆ เยื่อหุ้มเซลล์ และจะนำไปสู่การเกิดโรคในหลายระบบและนำไปสู่ความเสื่อมของอวัยวะต่าง ๆ ได้ เช่น โรคในระบบหัวใจและหลอดเลือด โรคทางสมองและระบบประสาท [5] สำหรับประเมินความเป็นพิษหรือการก่อให้เกิดภาวะเครียดออกซิเดชันในร่างกายของฝุ่น $PM_{2.5}$ สามารถประเมินได้จากค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน (oxidation potential: OP) ของ $PM_{2.5}$ โดยอาศัยวิธี dithiothreitol (DTT) assay ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางโดยวัดอัตราการลดลงของปริมาณสาร DTT ที่ทำปฏิกิริยากับสารอนุมูลอิสระออกซิเจน (reactive oxygen species: ROS) ในตัวอย่างฝุ่นที่เวลาต่าง ๆ ตรวจวัดปริมาณ DTT ที่เหลือ โดยให้ทำปฏิกิริยากับ Ellman's reagent (5,5'-dithio-bis-[2-nitrobenzoic acid], DTNB) ได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสีเหลืองซึ่งสามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสง [6] ทั้งนี้การติดตามปริมาณ DTT ที่ลดลงเมื่อทำปฏิกิริยากับตัวอย่างฝุ่น ปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาก็มีความสำคัญอย่างยิ่ง วิธี DTT assay ที่ใช้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้มีขั้นตอนที่ยากซับซ้อนหลายขั้นตอน ใช้สารเคมีจำนวนมากหลายชนิดในการทำปฏิกิริยาและยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาในเวลาที่กำหนด ก่อนนำสารละลายไปตรวจวัดด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ [7-9] ซึ่งการตรวจวัดการดูดกลืนแสงได้ครั้งละตัวอย่างทำให้ใช้เวลานาน ไม่สะดวกในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์ซ้ำหรือมีตัวอย่างจำนวนมาก ทั้งนี้มีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์โดยใช้สารเคมีปริมาณน้อยบนกระดาษแล้วตรวจวัดด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า [10,11] ซึ่งยังคงมีความยุ่งยากในส่วนของเครื่องมือตรวจวัดและยังไม่มีมีการนำไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างจริงอย่างกว้างขวาง

งานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาวิธีวิเคราะห์โดยวิธีทดสอบ DTT อย่างง่าย มีการใช้สารเคมีเท่าที่จำเป็นและปริมาณน้อย ทำการตรวจวัดอย่างรวดเร็วด้วยเครื่องมือโครเพลทรีดเดอร์ ซึ่งสามารถทำการตรวจวัดสารละลายปริมาตรน้อยที่บรรจุในไมโครเพลทได้ครั้งละหลายตัวอย่างพร้อมกัน โดยทำการศึกษาวิธีการทดสอบ หาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ความเข้มข้นและปริมาตรของสารรีเอเจนต์ ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างฝุ่นสกัด $PM_{2.5}$ แล้วนำวิธีที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่เก็บในจังหวัดเชียงใหม่ ช่วงวิกฤตหมอกควันเพื่อให้ทราบถึงค่าความสามารถในการเกิดออกซิเดชันของฝุ่น $PM_{2.5}$ ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับการสร้างความตระหนักและป้องกันตนเองของประชาชนต่อไป

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของวิธีการทดสอบดีที่ที่อย่างง่ายและตรวจวัดด้วยเครื่องมือโครเพลทรีเตอร์ สำหรับการหาค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชันของฝุ่น $PM_{2.5}$ และนำไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างฝุ่นที่เก็บในช่วงหมอกควันของจังหวัดเชียงใหม่

วิธีดำเนินการวิจัย

การเก็บตัวอย่างฝุ่น

เก็บตัวอย่างฝุ่น $PM_{2.5}$ ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ช่วงเดือนมีนาคม-เมษายน พ.ศ.2565 จำนวน 12 ตัวอย่าง โดยเก็บบนแผ่นกรองฝุ่นชนิดไฟเบอร์ควอทซ์ ขนาดรูปทรง 2.2 ไมครอน ขนาด 203×254 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอากาศปริมาณสูง (high volume air sampler, HW-RW, Sibata, Japan) ที่อัตราการไหล 1,000 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 12 ชั่วโมง ช่วงเวลา 07:00-19:00 นาฬิกา โดยแผ่นกรองฝุ่นจะถูกห่อด้วยอลูมิเนียมฟลอยด์แล้วบรรจุลงในถุงซิปล็อคทั้งก่อนและหลังจากการสุ่มตัวอย่าง และทำการชั่งน้ำหนักของแผ่นกรองฝุ่นทั้งก่อนและหลัง ทำการชั่ง 3 ครั้งโดยใช้เครื่องชั่งความละเอียดที่ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance, ML104, Mettler Toledo, Switzerland) จากนั้นนำตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตรเก็บรักษาแผ่นกรองฝุ่นโดยการแช่แข็งก่อนนำไปวิเคราะห์ทดสอบ

การเตรียมสารละลายรีเอเจนต์และสารละลายตัวอย่าง

สารละลายตัวอย่างและสารละลายรีเอเจนต์ทุกตัวที่ใช้ในการทดลองนี้ เตรียมในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (phosphate buffer saline, 10X PBS, ultra pure grade, Siam Bioscience) เจือจาง 10 เท่า pH 7.4 ดังนี้ สารละลาย DTT (dithiothreitol, $C_4H_{10}O_2S_2$, assay 99%, EMO millipore) ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลาร์ เตรียมโดยการชั่งสาร DTT นึก 0.0078 กรัม ละลายและปรับปริมาตรเป็น 50.00 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ สารละลาย DTNB (5,5'-Dithiobis 2-nitrobenzoic acid; Ellman's reagent, $C_{14}H_8N_2O_8S_2$, assay 99%, Sigma-Aldrich) ความเข้มข้น 0.40 มิลลิโมลาร์ เตรียมโดยการชั่งสาร DTNB นึก 0.0080 กรัม ละลายและปรับปริมาตรเป็น 50.00 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ สำหรับสารละลายตัวอย่างฝุ่นและสารละลายแบลนด์ ทำได้โดยการสกัดกระดาษกรองเก็บตัวอย่างที่เจาะเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร จำนวน 4 แผ่น ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เจือจาง 10 เท่า ปริมาตร 4 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องเขย่าเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกรองสารละลายตัวอย่างด้วย polytetrafluoroethylene (PTFE) ขนาด 0.45 ไมครอน

การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดด้วยวิธีทดสอบ DTT

การศึกษาความเข้มข้นและปริมาตรของสารละลาย DTT และ DTNB ที่เหมาะสม พิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายหลังเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วงของการใช้งานที่เหมาะสม โดยกำหนดค่าความเข้มข้นและปริมาตรของสารละลาย DTT และ DTNB ที่ต้องการศึกษา แล้วปิเปตต์สารละลายทั้งสองผสมกันในไมโครเพลต ตามจำนวนที่วางแผนไว้ โดยทุกชุดการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง

แล้วนำสารละลายไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่มีค่าการดูดกลืนสูงสุด ($\lambda_{\max}$) 410 นาโนเมตร ด้วยเครื่องไมโครเพลทรีดเดอร์ (microplate reader, spectrostar nano, BMG Labtech)

การหาสภาวะที่เหมาะสมของวิธีทดสอบ DTT เมื่อประยุกต์ใช้กับสารละลายตัวอย่างฝุ่นสกัดพิจารณาจากอัตราการลดลงของสารละลายตัวอย่างฝุ่นสกัดเทียบกับสารละลายแบลงค์สกัด และค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายหลังเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วงของการใช้งานที่เหมาะสม โดยกำหนดค่าต่าง ๆ ของปริมาตรสารละลายตัวอย่างฝุ่นสกัด ค่าความเข้มข้นและปริมาตรของสารละลาย DTT และ DTNB ที่ต้องการศึกษา ทำการทดลองโดยปิเปตต์สารละลายตัวอย่างฝุ่นสกัดและสารละลายแบลงค์สกัดลงในไมโครเพลต จำนวน 7 ชุด ๆ ละ 3 หลุม เติมสารละลาย DTT ความเข้มข้นและปริมาตรที่กำหนด โดยแต่ละชุด ให้ความเวลาในการทำปฏิกิริยากับสารละลาย DTT ที่ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที ตามลำดับ จากนั้นเติมสารละลาย DTNB เมื่อครบเวลาที่กำหนด แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ $\lambda_{\max}$ 410 นาโนเมตร ด้วยเครื่องไมโครเพลทรีดเดอร์ทันที

การหาค่าศักยภาพการออกซิเดชันของตัวอย่างฝุ่น $PM_{2.5}$ วิธีทดสอบดีที่ที่อย่างง่าย

นำวิธีการและสภาวะที่เหมาะสมของวิธีทดสอบ DTT อย่างง่ายที่พัฒนาขึ้น มาประยุกต์ใช้ตัวอย่างฝุ่น $PM_{2.5}$ จำนวน 12 ตัวอย่าง ที่เก็บในช่วงหมอกควันเดือนมีนาคม-เมษายน พ.ศ.2565 ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างแบลงค์และตัวอย่างฝุ่นพร้อมกันโดยใช้ความเข้มข้นและปริมาตรของสารละลาย DTT และ DTNB ที่ได้จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและเตรียมใหม่ทุกครั้งในการทดลองแต่ละวัน สารละลายสกัดที่ผ่านการกรองจะถูกปิเปตต์ลงในไมโครเพลตจำนวน 7 ชุด ๆ ละ 3 หลุมต่อตัวอย่าง สำหรับการทดลอง 3 ซ้ำ และกำหนดเวลาในการทำปฏิกิริยากับ DTT ที่ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที ตามลำดับ การควบคุมคุณภาพภายในของวิธีทดสอบดีที่ที่อย่างง่ายที่พัฒนาขึ้น ทำโดยการใช้แผนภูมิควบคุมเพื่อตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่างแบลงค์ให้อยู่ภายในเขตควบคุม และการวัดซ้ำค่าการดูดกลืนแสงของแต่ละตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ ($n=3$) อยู่ในเกณฑ์ยอมรับที่ %RSD ไม่เกิน 5

การคำนวณหาค่าศักยภาพการออกซิเดชันแสดงในเทอมของอัตราการลดลงของ DTT ทำได้โดยหาค่าเฉลี่ยค่าการดูดกลืนแสงของการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วนำไปพล็อตกราฟเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับ DTT นำค่าความชันและค่าจุดตัดแกนของแต่ละตัวอย่างไปใช้ในการคำนวณค่าศักยภาพการออกซิเดชันโดยคิดต่อหน่วยปริมาตรอากาศที่บ่งชี้ถึงความเสี่ยงต่อการรับสัมผัสอากาศของมนุษย์ และคิดต่อหน่วยน้ำหนักฝุ่นที่บ่งชี้ถึงความเป็นพิษจากการเกิดออกซิเดชันของสารที่อยู่ในตัวอย่างฝุ่น คำนวณได้ดังสมการ [9]

$$OP_V = \frac{(\Delta DTT_{sample} - \Delta DTT_{blank})}{V_{air}}$$

หรือ

$$OP_m = \frac{(\Delta DTT_{sample} - \Delta DTT_{blank})}{m_{PM}}$$

เมื่อ	OP_V	คือ ศักยภาพการออกซิเดชันของฝุ่นเทียบกับปริมาตรอากาศ (นาโนโมลต่อนาที่ต่อลูกบาศก์เมตร)
	OP_m	คือ ศักยภาพการออกซิเดชันของฝุ่นเทียบกับปริมาณฝุ่น (พิโคโมลต่อนาที่ต่อไมโครกรัม)
	V_{air}	คือ ปริมาตรอากาศ (ลูกบาศก์เมตร)
	m_{PM}	คือ น้ำหนักของตัวอย่างฝุ่น (ไมโครกรัม)
	ΔDTT_{sample}	คือ อัตราการลดลงของ DTT เมื่อทำปฏิกิริยากับตัวอย่างฝุ่น (นาโนโมลต่อนาที่)
	ΔDTT_{blank}	คือ อัตราการลดลงของ DTT เมื่อทำปฏิกิริยากับแบลงค์ (นาโนโมลต่อนาที่)

โดย

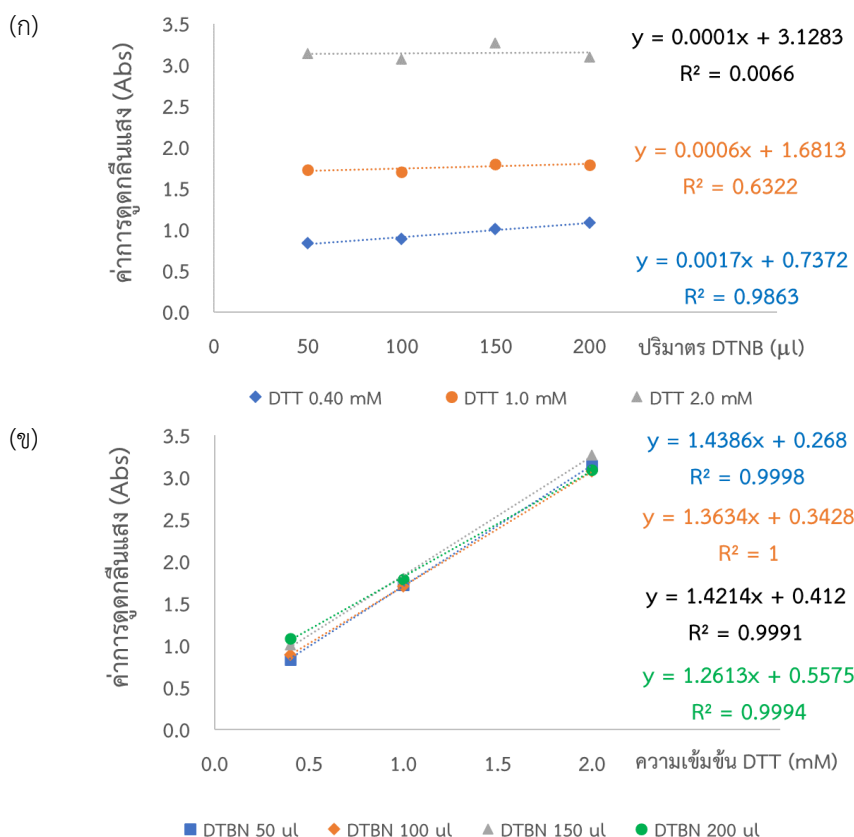
$$\Delta DTT = -\sigma Abs \frac{N_{DTT}}{Abs_0}$$

เมื่อ	σAbs	คือ ค่าความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับเวลา (ต่อนาที่)
	N_{DTT}	คือ จำนวนโมลเริ่มต้นของสาร DTT ในสารละลาย (นาโนโมล)
	abs_0	คือ ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น ประมาณค่าจากจุดตัดแกนของกราฟ

ผลการวิจัย

ผลของความเข้มข้นและปริมาตรที่เหมาะสมของสารละลาย DTT และ DTNB

ทำการทดลองหาความเข้มข้นและปริมาตรที่เหมาะสมของสารละลาย DTT และ สารละลาย DTNB ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาสำหรับการทดสอบด้วยวิธีทดสอบ DTT โดยเริ่มจากการใช้สารละลาย DTT ความเข้มข้น 2.0, 1.0, 0.4 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 25 ไมโครลิตร และสารละลาย DTNB ความเข้มข้น 2.50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50, 100, 150 และ 200 ไมโครลิตร ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 1 จากข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงพบว่าสารละลาย DTT ความเข้มข้น 2.0 และ 1.0 มิลลิโมลาร์ ให้ค่าการดูดกลืนแสงที่สูงกว่า 1 ซึ่งอยู่นอกเหนือจากค่าการดูดกลืนแสงในช่วงใช้งาน (0.1–0.8) ที่มีความคลาดเคลื่อนจากการตรวจวัดสูง การใช้สารละลาย DTT ความเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 25 ไมโครลิตร ให้ค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ทั้งนี้หากพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของสารละลาย DTNB กับค่าการดูดกลืนแสง (ภาพที่ 1ก) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาตรของ DTNB ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณของสาร DTNB ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา คือ 125, 250, 375 และ 500 นาโนโมลตามลำดับ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไม่ได้เพิ่มขึ้นมาก ซึ่งแตกต่างจากกรณีของการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย DTT ตามภาพที่ 1ข (ปริมาณสาร DTT คิดเป็น 10, 25 และ 50 นาโนโมล ตามลำดับ) กราฟมีความชันสูงกว่าแสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสาร DTT มากกว่า DTNB ซึ่งสอดคล้องกับการนำเอาปฏิกิริยานี้มาใช้ในการตรวจวัดปริมาณด้วยวิธีทดสอบ DTT

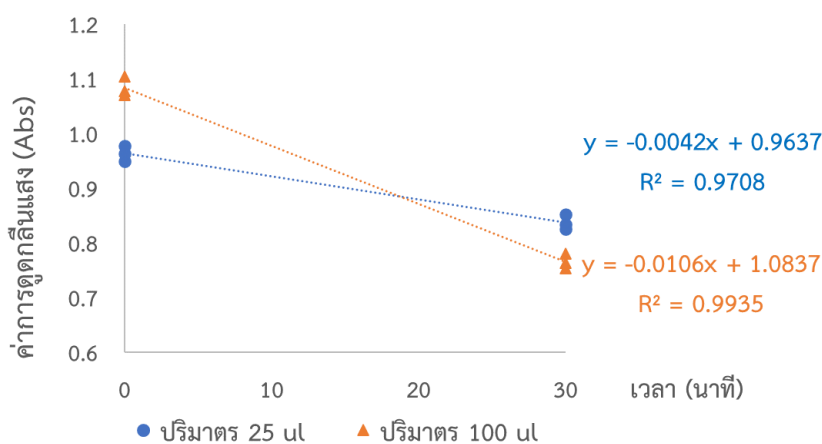


ภาพที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ 410 นาโนเมตร เทียบกับ (ก) ปริมาตรสารละลาย DTNB และ (ข) ความเข้มข้นของ DTT เมื่อความเข้มข้นหรือปริมาตรของสารละลาย DTT และ DTNB แตกต่างกัน

ผลของปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์

การหาปริมาตรที่เหมาะสมของสารละลายตัวอย่างที่สกัดสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีทดสอบ DTT กำหนดให้ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ศึกษา คือ 25 และ 100 ไมโครลิตร โดยปิเปตต์สารละลายตัวอย่างที่สกัดและสารละลายตัวอย่างแบล็คสแตนด์ลงในไมโครเพลต จำนวน 2 ชุดๆ ละ 3 ซ้ำ จากนั้นเติมสารละลาย DTT ความเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 25 ไมโครลิตร โดยชุดที่ 1 เติมสารละลาย DTNB ความเข้มข้น 2.50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร DTNB ทันที ในขณะที่ชุดที่ 2 ตั้งทิ้งไว้ให้สารสกัดในตัวอย่างทำปฏิกิริยากับละลาย DTT เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงเติมสารละลาย DTNB จากนั้นนำสารละลายทั้งหมดไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ λ_{max} 410 นาโนเมตร พบว่าเมื่อปล่อยให้สารสกัดจากตัวอย่างทำปฏิกิริยากับสารละลาย DTT เป็นเวลา 30 นาที ปริมาณของ DTT ที่ตรวจพบมีน้อยกว่าตอนเริ่มต้น โดยการเพิ่มปริมาตรของสารละลายตัวอย่างมากขึ้น จะทำให้อัตราการลดลง

ของ DTT มากขึ้นตาม พิจารณาได้จากค่าความชันของกราฟคือ -0.0042 เมื่อใช้สารละลายตัวอย่าง ปริมาตร 25 ไมโครลิตร ในขณะที่ความชันของกราฟคือ -0.0106 เมื่อใช้สารละลายตัวอย่างปริมาตร 100 ไมโครลิตร อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมสารละลายตัวอย่างปริมาณมาก จะมีค่าการดูดกลืนแสงของ สารละลายที่เวลาเริ่มต้นสูงมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากความขุ่นของสารละลายตัวอย่างที่เมื่อใช้ปริมาณ มากจะส่งผลให้ค่าแบคกราวด์ของการดูดกลืนแสงของสารละลายสูงไปด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมี การกรองสารละลายตัวอย่างสกัดและสารละลายบัลลงค์สกัดด้วยตัวกรองชนิด PTFE ขนาด 0.45 ไมครอนก่อนนำไปทดสอบต่อไป



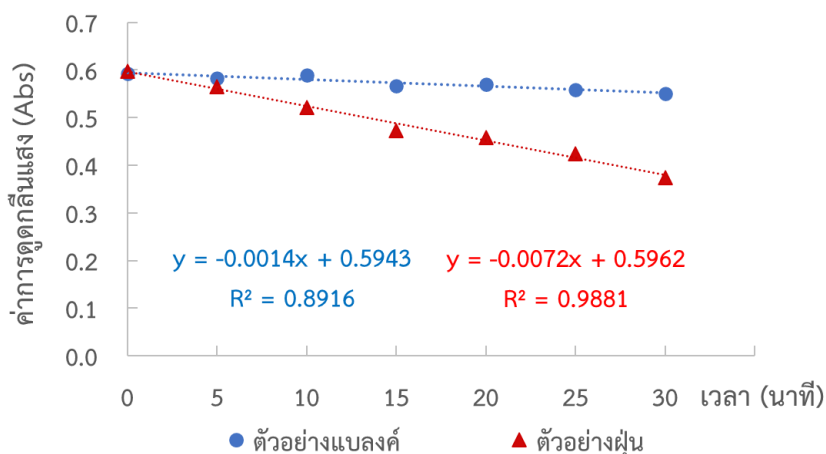
ภาพที่ 2 การค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 0 และ 30 นาที เมื่อใช้ สารละลายตัวอย่างสกัดปริมาตร 25 ไมโครลิตร และ 100 ไมโครลิตร

ผลของเวลาที่มีต่อค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายหลังการเกิดปฏิกิริยากับ DTNB

จากการศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย หลังเกิดปฏิกิริยากับ DTNB โดยปิเปตต์สารละลายตัวอย่างสกัดหรือสารละลายบัลลงค์สกัด 100 ไมโครลิตร ลงในไมโครเพลทจำนวน 3 หลุม แล้วเติมสารละลาย DTT ความเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 25 ไมโครลิตร ตามด้วยสารละลาย DTNB ความเข้มข้น 2.50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ λ_{max} 410 นาโนเมตรทันที จากนั้น ตั้งสารละลายทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องแล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงซ้ำที่เวลาต่าง ๆ พบว่าค่าการดูดกลืน- แสงของสารละลายทั้งสองหลังการทำการปฏิกิริยาการสาร DTNB มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับ ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น โดยสารละลายตัวอย่างสกัดมีค่าการดูดกลืนแสงลดลงร้อยละ 1.8, 3.6, 5.9 และ 10.2 สารละลายบัลลงค์สกัดมีค่าการดูดกลืนแสงลดลงร้อยละ 0.7, 3.7, 6.6 และ 10.6 ที่เวลา 5, 15, 25 และ 45 นาที ตามลำดับ ดังนั้นในการทดลองควรทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงทันทีหลัง การเติมสาร DTNB หรือ ต้องทำการตรวจวัดที่เวลาเดียวกันทุกครั้ง

ผลการค้าศักยภาพการเกิดออกซิเดชันของตัวอย่างฝุ่น PM_{2.5} ด้วยวิธีทดสอบดีดีทีอย่างง่าย

จากสถานะที่เหมาะสมของการทดสอบด้วยวิธีทดสอบ DTT ที่ได้ทำการศึกษา ถูกนำมาใช้ในการทดสอบตัวอย่างฝุ่น PM_{2.5} ที่เก็บตัวอย่างในช่วงหมอกควันของจังหวัดเชียงใหม่ โดยวิเคราะห์สารละลายแบลงค์สกัดและสารละลายตัวอย่างฝุ่นสกัดพร้อมกันดังนี้ ปิเปตต์สารละลายตัวอย่างสกัด ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงในไมโครเพลทจำนวน 7 ชุดๆ ละ 3 หลุม เติมสารละลาย DTT ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 ไมโครลิตร โดยกำหนดให้เวลาในการทำปฏิกิริยากับสารละลาย DTT ที่ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที ตามลำดับ เมื่อครบกำหนดเวลาของแต่ละชุด เติมสารละลาย DTNB ความเข้มข้น 0.40 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ $\lambda_{\max}$ 410 นาโนเมตรทันที ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับเวลาที่ใส่สารละลายแบลงค์สกัดและสารละลายตัวอย่างฝุ่นสกัดทำปฏิกิริยากับสารละลาย DTT เริ่มต้นปริมาณ 5 นาโนโมล แสดงดังภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าความชันของกราฟสำหรับตัวอย่างแบลงค์มีค่า -0.0014 แสดงถึงอัตราการลดลงที่น้อยกว่าตัวอย่างฝุ่นสกัดที่มีค่าความชัน -0.0072 ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของวิธีทดสอบ ซึ่งสามารถนำค่าความชันและจุดตัดแกน y ไปใช้ในการคำนวณค่าศักยภาพการออกซิเดชันของฝุ่นได้ แสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 1 การควบคุมคุณภาพของการวิเคราะห์ภายใน ใช้แผนภูมิควบคุมเพื่อตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่างแบลงค์เริ่มต้นให้อยู่ในควบคุม 0.57 ± 0.083 ค่าการดูดกลืนแสงของ การวัดซ้ำค่าการดูดกลืนแสงของแต่ละตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ ($n=3$) มีค่า %RSD ไม่เกิน 5 ค่าความชันของกราฟอัตราการลดลงของสารละลายแบลงค์อยู่ในช่วง -0.0016 ± 0.0003 ($n=7$) และ ค่า R^2 ของกราฟอัตราการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงสำหรับสารละลายตัวอย่างฝุ่นมีค่าไม่น้อยกว่า 0.95



ภาพที่ 3 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา แสดงถึงอัตราการลดลงของ DTT เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างแบลงค์และตัวอย่างฝุ่น

ตารางที่ 1 แสดงค่าฝุ่น PM_{2.5} และค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชันของฝุ่น PM_{2.5} ของจังหวัดเชียงใหม่ ในช่วงเดือนมีนาคม-เมษายน ปี พ.ศ. 2565

ตัวอย่างที่	วันที่เก็บตัวอย่าง (9:00-21:00 น.)	PM _{2.5} (ไมโครกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	OPv (นาโนโมลต่อนาที่ต่อ ลูกบาศก์เมตร)	OPm (พิโคโมลต่อนาที่ต่อ ไมโครกรัม)
1	24/2/2565	37.3	0.114	3.07
2	01/3/2565	64.4	0.386	6.00
3	06/3/2565	52.8	0.286	5.42
4	11/3/2565	58.1	0.265	4.57
5	16/3/2565	67.4	0.439	6.52
6	26/3/2565	68.1	0.368	5.41
7	31/3/2565	62.6	0.391	6.25
8	5/4/2565	39.9	0.282	7.05
9	10/4/2565	81.8	0.490	5.99
10	15/4/2565	68.9	0.390	5.66
11	20/4/2565	34.2	0.052	1.53
12	25/4/2565	58.8	0.187	3.17
ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		57.8 ± 14.4	0.304 ± 0.133	5.05 ± 1.65

อภิปรายผลการวิจัย

การหาสภาวะที่เหมาะสมของวิธีทดสอบ DTT ที่พัฒนาขึ้นสำหรับค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชันในตัวอย่างฝุ่น PM_{2.5}

การหาค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชันในตัวอย่างฝุ่นวัดด้วยวิธีทดสอบ DTT ของงานวิจัยที่มีก่อนหน้านี้เป็นการใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ในการตรวจวัด ซึ่งใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน ใช้สารปริมาณมาก หรือ ต้องใช้คิวเวตต์ชนิดพิเศษที่มีปริมาตรน้อย ในงานวิจัยนี้ได้ปรับเปลี่ยนวิธีการตรวจวัดด้วยเครื่องไมโครเพลทรีดเดอร์ ซึ่งใช้สารปริมาณน้อยกว่า เวลาที่ใช้ในการตรวจวัดน้อยกว่า เนื่องจากสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่บรรจุใน ไมโครเพลท 96 หลุม ได้พร้อมกัน ดังนั้นสามารถออกแบบการทดลองให้ทำซ้ำ หรือทำการวิเคราะห์หลายตัวอย่างพร้อมกันได้ในการตรวจวัดครั้งเดียว ทั้งนี้ด้วยข้อจำกัดในเรื่องปริมาตรของสารละลายที่บรรจุในไมโครเพลท ที่ปริมาตรรวมของสารละลายไม่ควรเกิน 300 ไมโครลิตร จึงจำเป็นต้องหาความเข้มข้นและปริมาตรที่เหมาะสมของสารละลาย DTT และ DTNB ที่ทำปฏิกิริยากันแล้วให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายในช่วงใช้งาน (0.1–0.8) ที่ยอมรับได้ตามหลักการของการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นและปริมาตรที่เหมาะสมของสารละลายรีเอเจนต์ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายหลังเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของ DTT มากกว่า DTNB ซึ่งเป็นไปตามหลักการเลือกใช้ปฏิกิริยาในการตรวจวัดปริมาณด้วยวิธีทดสอบ DTT กล่าวคือค่าการดูดกลืนแสงควรแปรผันตามความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตาม

สารรีเอเจนต์ ในขั้นตอนการศึกษาความเข้มข้นของสารรีเอเจนต์ที่เหมาะสม ได้ใช้สารละลาย DTT ความเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 25 ไมโครลิตร คิดเป็นปริมาณสาร 10.0 นาโนโมล ซึ่งค่าการดูดกลืนสูงกว่า 1.0 จึงลดปริมาณลง 2 เท่า โดยกำหนดให้ใช้สารละลาย DTT 0.10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 ไมโครลิตร คิดเป็นปริมาณสาร 5.0 นาโนโมล ซึ่งมีผลทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่างลดลงอยู่ในระดับ 0.6 ให้ค่าความน่าเชื่อถือของการตรวจวัดสูงกว่าการกรณีสารละลายมีค่าความเข้มข้นสูง นอกจากนี้ได้ลดปริมาณของสารละลาย DTNB จากเดิมใช้ 250 นาโนโมล จากสารละลายความเข้มข้น 2.50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ซึ่งมากเกินไปความต้องการ ประกอบกับ DTNB เป็นสารที่ละลายยากต้องละลายในเอทานอล กรณีที่เตรียมความเข้มข้นสูง จึงลดปริมาณสาร DTNB ที่ใช้ลงเหลือเพียง 40 นาโนโมล ด้วยการใส่สารละลายความเข้มข้น 0.40 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตรแทน ซึ่งให้ค่าอัตราส่วนโดยโมลของสาร DTNB:DTT เป็น 8 เท่า ทั้งนี้จากรายงานวิจัยที่มีการใช้เทคนิคนี้ โดยส่วนใหญ่กำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของสาร DTNB:DTT ไม่น้อยกว่า 4 เท่า [5-9] ซึ่งถือว่าปริมาณสาร DTNB เพียงพอในการเกิดปฏิกิริยา จึงกำหนดให้ใช้ความเข้มข้นนี้ในการทดสอบตัวอย่างต่อไป

การหาค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชันในตัวอย่างฝุ่น $PM_{2.5}$ ด้วยวิธีทดสอบ DTT เป็นการวัดอัตราการลดลงของ DTT เทียบกับเวลาที่สารในตัวอย่างฝุ่นใช้ในการทำปฏิกิริยา แล้วจึงตรวจวัดหาปริมาณ DTT ที่เหลือด้วยการทำปฏิกิริยากับสาร DTNB โดยวัดค่าดูดกลืนแสงของสารผลิตภัณฑ์สีเหลืองที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ปริมาณของสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบ ต้องมีความเหมาะสม คือมีปริมาณมากพอให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ DTT ในช่วงเวลาที่กำหนด ขณะเดียวกันต้องไม่มากเกินไปที่เข้าทำปฏิกิริยากับสาร DTT จนหมดไม่สามารถติดตามอัตราการลดลงได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสาร ROS ที่มีในตัวอย่างฝุ่นและค่าฝุ่นของแต่ละตัวอย่างนั้นๆด้วย ในกรณีของตัวอย่างฝุ่นที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ เป็นฝุ่นที่เก็บด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอากาศปริมาณสูง ที่อัตราการไหล 1000 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 12 ชั่วโมง มีค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ เฉลี่ย 57.8 ± 14.4 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งการใช้สารละลายตัวอย่างสกัดปริมาณ 100 ไมโครลิตร ที่ได้จากตัวอย่างฝุ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร จำนวน 4 แผ่น (น้ำหนักฝุ่น $PM_{2.5}$ อยู่ในช่วง 0.2–0.5 มิลลิกรัม) สกัดด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ปริมาตร 4 มิลลิลิตร มีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบ ดังจะเห็นได้จากผลการติดตามการลดลงของ DTT ในเวลา 30 นาที สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ การลดลงของ DTT มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง และค่าความชันที่ลดลงของกราฟจากผลของสารละลายตัวอย่างมีค่ามากกว่าความชันจากกราฟของสารละลายตัวอย่างแปลงค้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามหากตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์มีค่าฝุ่นสูงหรือต่ำไปจากที่ใช้ในการทดลองนี้ สามารถลดหรือเพิ่มปริมาณตัวอย่างฝุ่นหรือปริมาตรของสารละลายบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการสกัดให้เหมาะสมได้ โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของการลดลงของสาร DTT ที่ตรวจวัดได้ในเวลาที่กำหนด

ข้อดีของวิธีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้คือ ใช้สารรีเอเจนต์และสารละลายตัวอย่างปริมาณน้อยในระดับไมโครลิตร ลดขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ยาก จากการใช้ไมโครเพลท 96 หลุม แล้วตรวจวัดด้วยเครื่องไมโครเพลทรีดเดอร์ ทำให้ได้วิธีทดสอบที่ง่าย สะดวก ทำการตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว สามารถวางแผนการทดลองให้สามารถวิเคราะห์สารละลายตัวอย่างฝุ่นสกัดจำนวน 3 ตัวอย่าง ๆ ละ 3 ซ้ำ พร้อมเทียบกับสารละลายแปลงค้อย่างได้ในเวลาเพียง 40 นาที ซึ่งช่วยลดผลของสภาวะแวดล้อมที่มีต่อ

การวิเคราะห์ที่ได้ดีกว่าการตรวจวัดด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ ที่ตรวจวัดสารละลายได้ทีละตัวอย่าง ทำให้ใช้เวลาในการตรวจวัดนานและมีผลกระทบจากปัจจัยทางสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ และแสง ซึ่งเป็นผลให้มีความคลาดเคลื่อนสูง

ค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชันของตัวอย่างฝุ่น $PM_{2.5}$ ช่วงวิกฤตหมอกควันของจังหวัดเชียงใหม่

วิธีทดสอบ DTT อย่างง่ายที่ได้พัฒนาขึ้น ได้นำมาทดสอบกับตัวอย่างฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่เก็บช่วงเวลากลางวัน (07:00–19:00 นาฬิกา) ในเดือนมีนาคม-เมษายน ปี พ.ศ. 2565 จำนวน 12 ตัวอย่าง ซึ่งเป็นช่วงวิกฤตหมอกควันของจังหวัดเชียงใหม่รวมถึงหลายจังหวัดภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย พบว่ามีค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ เฉลี่ย 57.8 ± 14.4 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเฉลี่ยของค่าศักยภาพการออกซิเดชันของฝุ่นเทียบกับปริมาตรอากาศ (OPv) มีค่าเป็น 0.304 ± 0.133 นาโนโมลต่อนาที่ต่อลูกบาศก์เมตร โดยที่ค่า OPv ซึ่งบ่งชี้ถึงความเสี่ยงต่อการสัมผัสอากาศของมนุษย์ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ ($r = 0.879$) แสดงให้เห็นว่าอันตรายจากการสัมผัสมีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อค่าฝุ่นสูงขึ้น ทั้งนี้ค่าที่วิเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการวิจัยที่ประเทศไต้หวันมีค่า 0.32 ± 0.13 และ 0.43 ± 0.11 นาโนโมลต่อนาที่ต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับตัวอย่างที่เก็บในช่วงเวลา 10:00–15:00 และ 16:00–21:00 นาฬิกาตามลำดับ [9] มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลเฉลี่ยรายปีของงานวิจัยที่เก็บตัวอย่างในเมือง Beijing, Shanghai, Hangzhou ของประเทศจีนที่มีค่า OPv เป็น 0.19, 0.13, 0.62 นาโนโมลต่อนาที่ต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ แต่มีค่าต่ำกว่าข้อมูลเฉลี่ยรายปีที่รายงานไว้สำหรับเมือง Jinzhou และ Tianjin ที่มีค่า 4.4 และ 6.8 นาโนโมลต่อนาที่ต่อลูกบาศก์เมตร [7,8]

ค่าเฉลี่ยของค่าศักยภาพการออกซิเดชันของฝุ่นเทียบกับปริมาณฝุ่น (OPm) มีค่าเป็น 5.05 ± 1.65 พิโคโมลต่อนาที่ต่อไมโครกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยรายปีของเมือง Hangzhou ของประเทศจีนที่มีค่า OPm เป็น 6.39 พิโคโมลต่อนาที่ต่อไมโครกรัม [8] ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ต่ำกว่าที่มีรายงานทั่วไป ทั้งนี้มีค่าน้อยกว่าผลการวิจัยที่มีรายงานไว้ของประเทศไต้หวันประมาณ 6–8 เท่า [9] จากค่าที่วิเคราะห์ได้พบว่ามีค่า OPm ต่ำบ่งชี้ถึงความเป็นพิษจากการเกิดออกซิเดชันของสารที่อยู่ในตัวอย่างฝุ่นที่ต่ำ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นในแต่ละพื้นที่ในแต่ละช่วงเวลามีความแตกต่างกัน จึงส่งผลให้ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันมีค่าต่างกันไป ทั้งนี้ควรทำการเก็บตัวอย่างและทำการวิเคราะห์จำนวนมากขึ้นเพื่อเป็นตัวแทนข้อมูลที่ถูกต้องของพื้นที่ต่อไป

สรุปผลการวิจัย

วิธีทดสอบ DTT อย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการประเมินศักยภาพการออกซิเดชันของตัวอย่างฝุ่นได้ โดยมีข้อดีคือ ใช้สารเคมีที่เกี่ยวข้องในการทดสอบเฉพาะที่จำเป็น เป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย ใช้สารละลายตัวอย่างปริมาณน้อยในระดับไมโครลิตร ลดขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ยุ่งยาก ทำการวิเคราะห์ได้อย่างสะดวก รวดเร็ว ลดผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมที่มีต่อการวิเคราะห์ เป็นผลทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้มีความเที่ยง สามารถนำไปวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่น $PM_{2.5}$ ในช่วงหมอกควันของจังหวัดเชียงใหม่ได้ โดยให้ค่าศักยภาพการออกซิเดชันที่มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าฝุ่น และค่าที่คำนวณได้อยู่ในช่วงเดียวกันกับผลงานวิจัยที่มีรายงานไว้ก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามควรทำ

การเปรียบเทียบกับวิเคราะห์โดยวิธีมาตรฐานหรือวิธีที่มีการยอมรับด้วยจำนวนตัวอย่างที่มากพอ เพื่อความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ปีงบประมาณ พ.ศ.2567 ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำหรับการสนับสนุนตัวอย่างฝุ่นและงบประมาณบางส่วนสำหรับอุปกรณ์ สารเคมีในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] เกวลิน อินทวง และ ชาคริต โชติอมรศักดิ์. (2565). ความสัมพันธ์ของจุดความร้อนในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยและพื้นที่โดยรอบต่อค่าความเข้มข้น $PM_{2.5}$: กรณีศึกษาช่วงฤดูหมอกควัน พ.ศ.2562. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 33(2), 588–600.
- [2] Kraisitnitikul, P., Thepnuan, D., Chansuebsri, S., Yabueng, N., & Wiriya, W. (2024). Contrasting compositions of $PM_{2.5}$ in Northern Thailand during La Niña (2017) and El Niño (2019). *Journal of Environmental Sciences*, 135, 585–599.
- [3] Thepnuan, D., Chantara, S., Lee, C. Te, Lin, N. H., & Tsai, Y. I. (2019). Molecular markers for biomass burning associated with the characterization of $PM_{2.5}$ and component sources during dry season haze episodes in Upper South East Asia. *Science of the Total Environment*, 658, 708–722.
- [4] Thepnuan, D., & Chantara, S. (2020). Characterization of $PM_{2.5}$ -bound polycyclic aromatic hydrocarbons in Chiang Mai, Thailand during biomass open burning period of 2016. *Applied Environmental Research*, 42(3), 11–24.
- [5] Borlaza, L. J. S., Cosep, E. M. R., Kim, S., Lee, K., Joo, H., Park, M., Bate, D., Cayetano, M. G., & Park, K. (2018). Oxidative potential of fine ambient particles in various environments. *Environmental Pollution*, 243, 1–26.
- [6] Jiang, H., Ahmed, C. M. S., Canchola, A., Chen, J. Y., & Lin, Y. H. (2019). Use of dithiothreitol assay to evaluate the oxidative potential of atmospheric aerosols. *Atmosphere*, 10(10), 571, 1–21.
- [7] Liu, W. J., Xu, Y. S., Liu, W. X., Liu, Q. Y., Yu, S. Y., Liu, Y., Wang, X., & Tao, S. (2018). Oxidative potential of ambient $PM_{2.5}$ in the coastal cities of the Bohai Sea, northern China: seasonal variation and source apportionment. *Environmental Pollution*, 236, 514–528.
- [8] Wang, J., Lin, X., Lu, L., Wu, Y., Zhang, H., Lv, Q., Liu, W., Zhang, Y., & Zhuang, S. (2019). Temporal variation of oxidative potential of water-soluble components of ambient $PM_{2.5}$ measured by dithiothreitol (DTT) assay. *Science of The Total Environment*, 649, 969–978.

- [9] Hsiao, T. C., Chou, L. T., Pan, S. Y., Young, L. H., Chi, K. H., Chen, A. Y. (2021). Chemically and temporally resolved oxidative potential of urban fine particulate matter. *Environmental Pollution*, 291, 118206.
- [10] Mettakoonpitak, J., Sawatdichai, N., Thepnuan, D., Siripinyanond, A., Henry, C. S., & Chantara, S. (2023). Microfluidic paper-based analytical devices for simultaneous detection of oxidative potential and copper in aerosol samples. *Microchimica Acta*, 190(6), 241.
- [11] Sameenoi, Y., Panymeesamer, P., Supalakorn, N., Koehler, K., Chailapakul, O., Henry, C. S., & Volckens, J. (2012). A Microfluidic Paper-based Analytical Device (μ PAD) for Aerosol Oxidative Activity. *Environmental Science and Technology*, 47(2), 932–940.

การพัฒนาโมเดลการจำแนกรูปภาพตามความหมายจากภาษาธรรมชาติ
ด้วยปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์
Developing Next-Generation Semantic Image Classification Model
Through Generative Adversarial Networks (GANs)

สุขสวัสดิ์ ณัฏฐวุฒิสิทธิ์
Sooksawaddee Nattawuttisit

หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต และ หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
Master of Science Program and Doctor of Philosophy Program
Faculty of Information Technology, Sripatum University

Submitted 07/08/2024 ; Revised 21/09/2024 ; Accepted 29/10/2024

บทคัดย่อ 092 693 0005

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาโมเดลการจำแนกรูปภาพด้วยเจเนอเรทีฟ แอดเวอร์ซารี เน็ตเวิร์ค (จีเอเอ็น) เพื่อปรับปรุงการเรียกค้นรูปภาพและแปลความหมายของภาพ โดยใช้ภาษาธรรมชาติ ซึ่งเทคโนโลยีนี้จะสร้างเนื้อหาใหม่โดยเรียนรู้จากข้อมูลที่มีอยู่และสร้างผลลัพธ์ใหม่ที่คล้ายคลึงกับต้นแบบ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยข้อมูลจากชุดข้อมูลฟริกเกอร์ 30 เค ทั้งหมด 158,915 รายการ ซึ่งเป็นรูปภาพและคำบรรยายภาษาธรรมชาติ โดยสุ่มตัวอย่างด้วยสมการโคราน ที่ค่าความเชื่อมั่น 95% และค่าความคลาดเคลื่อน 5% ได้กลุ่มตัวอย่าง 384 รายการ ข้อมูลถูกแบ่งสำหรับการฝึกและทดสอบโมเดลในอัตราส่วน 80/20 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลความหมายของภาพ การประเมินผลของโมเดลวัดจากความคล้ายคลึงระหว่างผลลัพธ์ที่เอไอพยากรณ์และภาพที่มีคำบรรยาย พร้อมตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญด้าน ผลทดสอบพบว่าโมเดลมีค่าความแม่นยำ 82% การเรียกค้น 78% และความถูกต้อง 80% ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของโมเดลในการแปลความหมายภาพตามคำบรรยายภาษาธรรมชาติ ผลการวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์ได้ เช่น การจัดหมวดหมู่รูปภาพอัตโนมัติในสื่อสังคม หรือการค้นหารูปภาพในคลังข้อมูลขนาดใหญ่ การพัฒนาโมเดลในอนาคตควรมุ่งเน้นการปรับปรุงค่าการเรียกค้น เพื่อเพิ่มความสมบูรณ์และความตรงกับความต้องการของผู้ใช้มากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: การจำแนกรูปภาพ การเรียนรู้เชิงลึก ภาษาธรรมชาติ จีเอเอ็น

ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)

E-mail: sooksawaddee.na@spu.ac.th

Abstract

This research aims to develop an image classification model using Generative Adversarial Networks (GANs) to improve image retrieval and interpretation through natural language processing. This technology generates new content by learning from existing data and producing outputs similar to the original samples. The study's sample data is drawn from the Flickr 30K dataset, consisting of 158,915 entries of images and natural language descriptions. A sample size of 384 entries was determined using Cochran's formula with a 95% confidence level and a 5% margin of error. The data was split into training and testing sets at a ratio of 80/20 to optimize the model's performance in image interpretation. The model's performance was evaluated based on the similarity between the AI-predicted outcomes and the images with descriptions and validated by AI experts. The test results showed an accuracy of 82%, a recall of 78%, and a precision of 80%, indicating the model's effectiveness in interpreting images based on natural language descriptions. This research has commercial applications, such as automatic image categorization on social media or image retrieval in large-scale databases. Future model development should focus on improving recall to enhance completeness and better meet user needs.

Keywords: image classification, deep learning, natural language, GANs

บทนำ

การจำแนกรูปภาพเป็นหนึ่งในงานที่มีความสำคัญสูงในทุกประเภทอุตสาหกรรม เช่น การตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์ การรักษาความปลอดภัย และการตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามวิธีการจำแนกรูปภาพที่ใช้ส่วนใหญ่ยังมีข้อจำกัดในการตีความความหมายของรูปภาพโดยละเอียด โดยเฉพาะเมื่อใช้ในการประเมินอารมณ์หรือความรู้สึกของภาพที่มีความเป็นนามธรรม (abstract concept) หรือในกรณีพื้นผิว รูปทรง สี หรือสถานที่ที่มีคุณลักษณะระดับต่ำ (low-level features) ขาดองค์ประกอบของภาพที่ชัดเจน ทำให้ไม่สามารถสะท้อนความหมายเชิงลึกของรูปภาพได้อย่างถูกต้อง [1]

การนำปัญญาประดิษฐ์มาใช้เป็นโมเดลการจำแนกรูปภาพ รวมทั้งการเรียกค้นรูปภาพผ่านภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing, NLP) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ช่วยให้โมเดลสามารถเข้าใจและจำแนกความหมายของรูปภาพได้ใกล้เคียงกับการตีความของมนุษย์มากยิ่งขึ้น เช่น การใช้ convolutional neural networks (CNNs), support vector machines (SVMs) หรือ random forests [2] แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวิจัย [3] พบว่าการประมวลผลภาพที่มีลักษณะเฉพาะ เช่น รูปร่าง สี หรือลักษณะเชิงพื้นที่ด้วยวิธีการ machine learning เหล่านี้ยังคงมีข้อจำกัดในด้านความสามารถในการเรียนรู้และตีความความหมายของภาพที่ซับซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อข้อมูลมีความเป็นนามธรรมสูง วิธีการเหล่านี้จึงไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีเทียบเท่ากับวิธีการที่ใช้ deep learning เช่น generative adversarial networks (GANs) และ variational autoencoders (VAEs) [8] GANs และ VAEs เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ใช้ใน generative AI ซึ่งเป็นการสร้างเนื้อหาใหม่โดยใช้โมเดลที่เรียนรู้จากข้อมูลต้นแบบ (เช่น รูปภาพ เสียง หรือข้อความ) เพื่อสร้างสิ่งใหม่ที่คล้ายคลึงกัน โดย GANs เป็นโมเดลที่ได้รับความนิยมมากในการสร้างภาพและวิดีโอ [1] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์ เช่น งานวิจัยของ Karras และคณะ [8] พบว่า GANs สามารถสร้างภาพที่มีความละเอียดสูงได้โดยมีคุณภาพที่ดีและสมจริง ในขณะที่ VAEs ถูกใช้ในการสร้างภาพใหม่ งานวิจัยของ Kingma และ Welling [5] มุ่งเน้นการใช้ VAEs เพื่อสร้างภาพใหม่ที่ไม่รวมอยู่ในชุดข้อมูลฝึกอบรม ด้วยวิธีการเข้ารหัสข้อมูล ทำให้สามารถสร้างภาพที่มีความหลากหลายเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัย พบว่า GANs มักถูกใช้ในการสร้างภาพที่มีคุณภาพสูงและมีความสมจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานวิจัยของ Radford และคณะ [4] ได้นำ GANs มาใช้ในการสร้างโมเดลภาษา ซึ่งพบว่าโมเดลนี้สามารถสร้างข้อความที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือสูง ตัวอย่างโมเดลที่มีการใช้ปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์สร้างข้อความ รูปภาพ หรือสื่ออื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 1

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและพัฒนาโมเดลการจำแนกรูปภาพตามความหมายจากภาษาธรรมชาติด้วยปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์
2. ทดสอบและประเมินผลเพื่อวัดประสิทธิภาพการจำแนกรูปภาพตามความหมายจากภาษาธรรมชาติด้วยปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์

ตารางที่ 1 ตัวอย่างโมเดลที่มีการใช้ปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์สร้างข้อความ รูปภาพ หรือสื่ออื่น ๆ

โมเดล	ประเภท	การใช้งาน	จุดเด่น
DreamFusion	GANs	สร้างภาพ 3 มิติจากข้อความ	สร้างโมเดล 3 มิติ
StyleSDF	GANs	การสร้างภาพสไตล์ต่าง ๆ	สร้างภาพที่มีความหลากหลายสไตล์
YOLOv8	CNNs	การจำแนกรูปภาพ	พัฒนาขึ้นจาก YOLOv5
Stable diffusion	VAEs	สร้างภาพที่มีคุณภาพสูง	การปรับปรุงคุณภาพของภาพ
DALL-E	GANs	สร้างภาพจากข้อความ	สร้างภาพจากข้อความ
StyleGAN	GANs	สร้างภาพบุคคลที่สมจริง	สร้างภาพที่มีความละเอียดสูง

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนหลักของการวิจัยมีดังนี้

1. การออกแบบโมเดล GANs

- แบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ Generator (G) และ Discriminator (D) ซึ่งทำหน้าที่สร้างและแยกแยะข้อมูล
- Generator สร้างข้อมูลใหม่จากการสุ่มค่าและพยายามให้ข้อมูลมีลักษณะคล้ายคลึงกับข้อมูลจริง
- Discriminator แยกแยะว่าข้อมูลใดเป็นของจริงและข้อมูลใดที่สร้างขึ้น

2. การเตรียมข้อมูล

- ใช้ชุดข้อมูล Flickr30k ที่มีภาพและคำอธิบายภาพประกอบ
- คำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างโดยใช้สมการ Cochran เพื่อกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสม

3. การฝึกโมเดล GANs

- แบ่งข้อมูลเป็นชุดฝึกและชุดทดสอบในอัตราส่วน 80/20
- ฝึก Generator และ Discriminator ผ่านการสร้างและจำแนกข้อมูล เพื่อให้ทั้งสองโมเดลทำงานร่วมกันจนเกิดการปรับปรุงที่มีประสิทธิภาพ

4. การวัดความคล้ายคลึงกันของภาพและคำอธิบายภาพด้วย cosine similarity

- ใช้ cosine similarity ในการคำนวณความคล้ายคลึงระหว่างเวกเตอร์ของข้อมูลที่สร้างขึ้นและข้อมูลจริง
- เปรียบเทียบความเหมือนระหว่างคำบรรยายภาพที่สร้างโดย AI กับข้อมูลจริง เพื่อวัดประสิทธิภาพของโมเดล

5. การทดสอบและการวัดประเมนผลโมเดล

- วัดค่าความแม่นยำ (precision), ค่าการเรียกคืน (recall), และค่าความถูกต้อง (accuracy) ของโมเดล
- ประเมินผลการเรียกคืนภาพและการจับคู่คำบรรยายที่สร้างขึ้นกับคำบรรยายในชุดข้อมูล

รายละเอียดของขั้นตอนการทดสอบและประเมินผลโมเดลมีดังนี้

1. การออกแบบโมเดล GANs

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วย GANs เริ่มจาก Generator ที่พยายามสร้างข้อมูลที่คล้ายคลึงกับข้อมูลจริงจากการสุ่มค่า และ Discriminator ทำหน้าที่แยกแยะว่าข้อมูลใดมาจาก Generator และข้อมูลใดเป็นข้อมูลจริง เป้าหมายของการฝึกฝนทั้งสองโมเดลนี้คือ ให้ Generator สามารถสร้างข้อมูลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงให้มากที่สุด และให้ Discriminator สามารถแยกแยะได้อย่างแม่นยำ โดย Objective Functions ของ GANs สามารถเขียนในรูปของสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ได้ ดังแสดงในสมการ (1) และ (2)

$$\text{Objective functions} = \min_G \max_D V(D, G) \quad (1)$$

$$V(D, G) = E_{x \sim P_{data}(x)} [\log D(x)] + E_{z \sim P_z(z)} [\log (1 - D(G(z)))] \quad (2)$$

โดยที่

- $\min_G$: คือ การหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันสำหรับ Generator
- $\max_D$: คือ การหาค่ามากที่สุดของฟังก์ชันสำหรับ Discriminator
- $V(D, G)$: คือ ฟังก์ชันที่ใช้ในการฝึก GANs
- $G(z)$: คือ ข้อมูลที่สร้างขึ้นจาก Generator โดยที่ z เป็นข้อมูลสุ่ม
- $D(x)$: คือ ความน่าจะเป็นที่ Discriminator บอกว่าข้อมูล x เป็นข้อมูลจริง
- $E_{x \sim P_{data}(x)}$: คือ ค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันที่คำนวณจากการแจกแจงของข้อมูลจริง x
- $E_{z \sim P_z(z)}$: คือ ค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันที่คำนวณจากการแจกแจงของข้อมูลสุ่ม z
- $P_{data}(x)$: คือ การแจกแจงความน่าจะเป็นของข้อมูลจริง
- $P_z(z)$: คือ การแจกแจงความน่าจะเป็นของข้อมูลสุ่ม

2. การเตรียมข้อมูล

ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลจากชุดข้อมูลมาตรฐาน Flickr30k [6,7] ซึ่งเป็นที่นิยมในการวิจัยด้านการสร้างคำอธิบายภาพ โดยในชุดข้อมูลนี้จะมีคำอธิบายภาพแบบขยาย (augmented image captions) และโซ่อ้างอิง (coreference chains) ที่เชื่อมโยงการกล่าวถึงเอนทิตีเดียวกันในคำอธิบายที่แตกต่างกัน สำหรับภาพเดียวกัน ซึ่งช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งการกล่าวถึงข้อความในภาพได้อย่างชัดเจน งานวิจัยนี้ใช้จำนวนภาพทั้งหมด 158,915 ภาพ เพื่อใช้ในการพัฒนาโมเดลการสร้างคำอธิบายภาพ

ในการคำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยได้นำทฤษฎีของ Cochran (1963) มาใช้ ซึ่งทฤษฎีนี้เหมาะสำหรับการคำนวณขนาดตัวอย่างในกรณีที่ประชากรมีขนาดใหญ่และไม่ทราบสัดส่วนความแปรปรวนของประชากร (p) ที่แน่นอน โดยผู้วิจัยได้คำนวณและเลือกขนาดกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 384 ภาพ แบ่งเป็นชุดการฝึกฝน 80% และชุดทดสอบ 20% เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของโมเดล GANs ดังสมการ (3) และ (4)

$$n_0 = \frac{z^2 \cdot p \cdot (1-p)}{e^2} \quad (3)$$

โดยที่

n_0 = ขนาดกลุ่มตัวอย่างเริ่มต้น

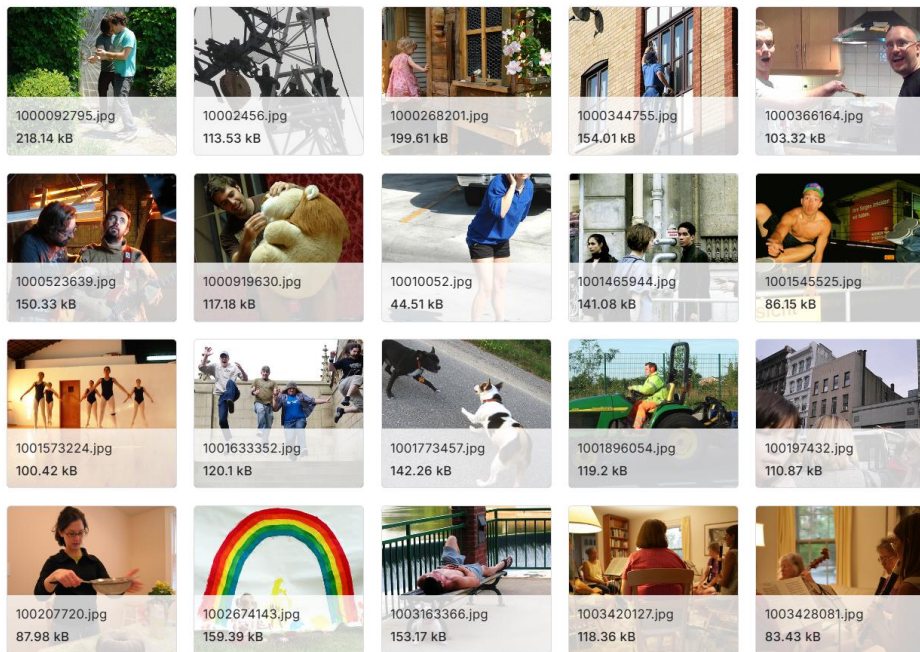
Z = ค่ามาตรฐาน z (เช่น 1.96 สำหรับระดับความเชื่อมั่น 95%)

p = สัดส่วนประชากรที่คาดว่าจะเกิด (เช่น 0.5 หากไม่ทราบค่าแน่นอน)

e = ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (เช่น 0.05)

จากนั้นหาขนาดกลุ่มตัวอย่างสำหรับประชากรที่มีขนาด 158,915 รายการ และใช้ค่าความเชื่อมั่น 95% ($Z=1.96$) ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ 5% ($e=0.05$) และไม่ทราบสัดส่วนประชากรที่แน่นอนจึงใช้ $p=0.5$ ดังนั้นจากการคำนวณด้วยสมการ Cochran จะได้จำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดเท่ากับ 384 ภาพ ผลลัพธ์จากการคำนวณแสดงในสมการ (4)

$$n_0 = \frac{(1.96)^2 \cdot 0.5 \cdot (1-0.5)}{0.05^2} = \frac{3.8416 \cdot 0.25}{0.0025} = 384.16 \quad (4)$$



ภาพที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง (dataset) ที่หลากหลายจากชุดข้อมูล Flickr30k

3. การฝึกโมเดล GANs

ใช้ข้อมูลจาก Kaggle เข้าสู่ Google Colab ด้วยฟังก์ชัน `load_data` เพื่อทดสอบโมเดล โดยสร้างโมเดล GANs ซึ่งประกอบด้วย generator ที่สร้างภาพและ discriminator ที่จำแนกภาพจริงและภาพปลอมด้วยฟังก์ชัน `build_generator` และ `build_discriminator` และฝึกโมเดลด้วยฟังก์ชัน `train_gan` (การฝึกโมเดลจะใช้ข้อมูลฝึกและทดสอบโมเดลด้วยข้อมูลทดสอบ ซึ่งผู้วิจัยได้แยกข้อมูลเป็นชุดฝึก (train) และทดสอบ (test) ในสัดส่วน 80/20) พร้อมแสดงผลการฝึกในแต่ละ epoch [19,20] บันทึกภาพที่สร้างด้วยฟังก์ชัน `save_imgs`

ผลลัพธ์จากการฝึก GANs ทำให้เกิดการหักล้างและอัปเดตค่า (adversarial) ระหว่าง Generator และ Discriminator ที่ทำให้ทั้งสองส่วนมีการปรับปรุงและเรียนรู้ไปพร้อมกันจนกว่า Generator จะสามารถสร้างข้อมูลที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับข้อมูลจริงและ Discriminator จะสามารถแยกแยะข้อมูลจริงและข้อมูลปลอมได้ดีขึ้น

4. การวัดความคล้ายคลึงกันของภาพและคำอธิบายภาพด้วย cosine similarity:

การคำนวณค่า cosine similarity ในรูปแบบเวกเตอร์ TF-IDF (term frequency-inverse document frequency) [9] ซึ่งผลลัพธ์จะถูกเรียงตามค่าคะแนน (similarity score) จากสูงไปต่ำ ที่แสดงระดับความคล้ายคลึงระหว่างคำบรรยายจาก AI และคำบรรยายในชุดข้อมูลจากมากไปน้อย ตามลำดับค่าคะแนนที่ได้ ซึ่งจะช่วยให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของโมเดลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ การวัดความคล้ายคลึงของข้อความด้วย cosine similarity แสดงในสมการ (5)

$$\text{Cosine similarity} = \frac{A \cdot B}{\|A\| \cdot \|B\|} \quad (5)$$

โดยที่

A และ B เป็นเวกเตอร์ TF-IDF ของสองข้อความ

$A \cdot B$ เป็น dot product ระหว่างสองเวกเตอร์

$\|A\|$ และ $\|B\|$ เป็นขนาดของเวกเตอร์แต่ละตัว (norm)

การพิจารณาว่าผลลัพธ์คำอธิบายที่สร้างขึ้นกับคำอธิบายจริงนั้นมีความคล้ายคลึงหรือไม่ จะใช้เกณฑ์การกำหนดค่า Threshold ของ similarity ที่ค่าเท่ากับ 0.5 ดังนี้

1. หากความคล้ายคลึง (similarity) มากกว่าหรือเท่ากับค่าเกณฑ์ที่กำหนด 0.5 (threshold ≥ 0.5) ให้ถือว่าเป็นบวก (Positive) ซึ่งจะถือว่าคำอธิบายที่สร้างขึ้นกับคำอธิบายจริงมีความคล้ายคลึง
2. หากความคล้ายคลึง (similarity) น้อยกว่าค่าเกณฑ์ที่กำหนด 0.5 (threshold < 0.5) ให้ถือว่าเป็นลบ (negative) ซึ่งจะถือว่าคำอธิบายที่สร้างขึ้นกับคำอธิบายจริงไม่มีความคล้ายคลึง

5. การทดสอบและการประเมินผล

งานวิจัยนี้จะใช้การคำนวณค่าความแม่นยำ ค่าการเรียกคืน และค่าความถูกต้อง [6, 8] ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของโมเดลในการสร้างคำอธิบายจากสมการ (6) – (8)

ค่าความแม่นยำ (precision) คือ สัดส่วนของตัวอย่างที่ทำนายว่าเป็นบวกที่ถูกต้องเมื่อเทียบกับจำนวนตัวอย่างที่ทำนายว่าเป็นบวกทั้งหมด

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (6)$$

ค่าการเรียกคืน (recall) คือ สัดส่วนของตัวอย่างที่เป็นบวกที่ถูกต้องเมื่อเทียบกับจำนวนตัวอย่างบวกทั้งหมด

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (7)$$

ค่าความถูกต้อง (accuracy) คือ สัดส่วนของตัวอย่างที่ทำนายถูกต้องเมื่อเทียบกับจำนวนตัวอย่างทั้งหมด

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (8)$$

โดยที่:

TP = True Positives (จำนวนตัวอย่างที่โมเดลทำนายว่าถูกต้อง (เป็นบวก) และถูกต้องตามข้อมูลทดสอบจริง)

TN = True Negatives (จำนวนตัวอย่างที่โมเดลทำนายว่าไม่ใช่ (เป็นลบ) และถูกต้องตามข้อมูลทดสอบจริง)

FP = False Positives (จำนวนตัวอย่างที่โมเดลทำนายว่าถูกต้อง (เป็นบวก) แต่ผิดไม่ตรงตามข้อมูลทดสอบ)

FN = False Negatives (จำนวนตัวอย่างที่โมเดลทำนายว่าไม่ใช่ (เป็นลบ) แต่ผิดไม่ตรงตามข้อมูลทดสอบ)

ผลการวิจัย

จากผลการวิจัยที่ใช้เทคนิค GANs ในการสร้างคำอธิบายภาพจากชุดข้อมูล Flickr30k พบว่า โมเดลสามารถสร้างคำอธิบายภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้กระบวนการฝึกฝนโมเดลด้วยการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็นชุดฝึกฝน 80% (307 ภาพ) และชุดทดสอบ 20% (77 ภาพ) เพื่อให้โมเดลเรียนรู้การเชื่อมโยงระหว่างภาพและคำอธิบายอย่างแม่นยำ การประเมินประสิทธิภาพของโมเดลหลังการฝึกฝนแสดงให้เห็นค่าความแม่นยำอยู่ที่ 82% และค่าเรียกคืนอยู่ที่ 78% ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโมเดลสามารถทำนายคำอธิบายภาพที่ถูกต้องได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์แสดงถึงค่าความผิดพลาดในจำนวนตัวอย่างที่ทำนายผิดพลาด (false positive, FP) และตัวอย่างลบที่ทำนายผิดพลาด (false negative, FN) ซึ่งชี้ถึงโอกาสในการปรับปรุงโมเดลเพื่อเพิ่มความแม่นยำยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบและการวัดประเมินประสิทธิภาพของโมเดล

จำนวนภาพทดสอบทั้งหมด	TP	FP	FN	TN
77	35.45	7.77	10	26.15
ค่าความแม่นยำ (precision)	82%			
ค่าเรียกคืน (recall)	78%			
ค่าความถูกต้อง (accuracy)	80%			

การประเมินความถูกต้องของคำอธิบายที่สร้างขึ้นโดยใช้ค่าความคล้ายคลึงระหว่างคำอธิบายภาพที่สร้างโดยโมเดลและคำอธิบายภาพที่แท้จริง ผลลัพธ์ที่ได้บ่งชี้ถึงความคล้ายคลึงในระดับสูง โดยมีค่า similarity score มากกว่า 0.90 ในหลายภาพ เช่น ภาพของการเดินบนบันไดและภาพของรถแทรกเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถจับคู่คำอธิบายภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดสอบนี้ยืนยันถึงศักยภาพของ GANs ในการสร้างคำอธิบายภาพที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลภาพจริงอย่างใกล้เคียง ซึ่งผลการทดสอบแสดงผลไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบโมเดลการจำแนกรูปภาพตามความหมายและคำอธิบายภาพ

ภาพที่ใช้ทดสอบ	คำอธิบายภาพจากเอไอ	Similarity score
	a man driving a green tractor while wearing a safety vest	0.91672711730003357
	two dogs interacting with each other on a paved road.	0.92926058292388916
	a colorful drawing of a rainbow with red, yellow, green, and blue	0.97672711730003357
	a woman is shown holding a kitchen utensil	0.90208024561405182
	a group of ballet dancers performing in a studio	0.9162032449245453
	three people, two wearing casual clothes and one in a cap, jumping	0.9264212667942047

อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้รองรับ SDG หมวดที่ 9 ด้านการส่งเสริมและพัฒนาอุตสาหกรรมที่ยั่งยืนด้วยนวัตกรรมเอไอ โดยผู้วิจัยได้ทดสอบให้เห็นความสามารถของ GANs ในการจับคู่ระหว่างภาพและคำอธิบาย ซึ่งสอดคล้องกับงานของ จักรินทร์ สันติรัตนภักดี และ ศุภกฤษฎ์ นิวัฒนากุล [7] ที่ใช้การจัดตำแหน่งระหว่างภาพและภาษาธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากการใช้ variational autoencoder (VAE) model ของ Nattawuttisit และ Chantron [10] ที่เน้นการแปลงข้อมูลภาพด้วยการเข้ารหัส ซึ่งจะมีความสามารถในการสร้างภาพที่มีมิติที่ซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตาม การใช้โมเดล GANs ในงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น ข้อมูลที่ใช้ยังขาดความหลากหลายจะทำให้เกิดความเสี่ยงของ mode collapse เมื่อ Generator สร้างข้อมูลที่ซ้ำกันบ่อย ๆ หรือสร้างข้อมูลในรูปแบบเดียวกัน ซึ่งทำให้ข้อมูลที่สร้างขาดความหลากหลายและไม่สามารถครอบคลุมรูปแบบของข้อมูลทั้งหมดได้ นอกจากนี้ GANs ยังไม่สามารถเทียบเท่ากับโมเดลที่ใช้ transformer-based อย่าง BERT หรือ GPT ในการสร้างคำอธิบายที่เป็นลำดับได้อย่าง

มีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นการเปรียบเทียบโมเดลเหล่านี้เพื่อนำมาใช้ปรับปรุงขยายผลต่อผลงานวิจัยนี้ให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้มากยิ่งขึ้น

สรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนาแบบจำลองครั้งนี้พบว่า เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ผู้วิจัยได้ใช้เกณฑ์การวัดความคล้ายคลึงกันของภาพและคำอธิบายภาพจากการคำนวณค่า cosine similarity ในรูปแบบเวกเตอร์ TF-IDF ซึ่งผลลัพธ์จะถูกเรียงตามค่าคะแนน (similarity score) จากสูงไปต่ำที่แสดงระดับความคล้ายคลึงระหว่างคำบรรยายจาก AI และคำบรรยายในชุดข้อมูลจากมากไปน้อยตามลำดับค่าคะแนนที่ได้ ผลการประเมินประสิทธิภาพของโมเดล GAN ด้วยชุดข้อมูลทดสอบ โดยการตรวจสอบได้ทำร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านปัญญาประดิษฐ์ จากผลการวัดและประเมินได้แสดงให้เห็นว่าโมเดล GAN สามารถสร้างคำอธิบายภาพที่มีความหมายใกล้เคียงกับต้นฉบับที่ใช้ทดสอบ โดยให้ค่าความแม่นยำและการเรียกคืนในระดับความถูกต้องได้ในระดับดี ซึ่งผลการวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์ได้ เช่น การจัดหมวดหมู่รูปภาพอัตโนมัติในสื่อสังคม หรือการค้นหารูปภาพในคลังข้อมูลขนาดใหญ่ หรือ สามารถนำโมเดลนี้ไปประยุกต์ใช้ร่วมกับโมเดล transformer-based อย่าง BERT หรือ GPT สำหรับการสร้างคำอธิบายที่เป็นลำดับเพื่อให้โมเดลมีประสิทธิภาพมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2023). *Deep Learning*. MIT Press.
- [2] Alif, M. D. N., & Fahrudin, N. F. (2024). Performance Analysis of Oversampling and Undersampling on Telco Churn Data Using Naive Bayes, SVM And Random Forest Methods (pp 1–13). In *E3S Web of Conferences*, 484, 02004.
- [3] Zhang, Y., Wang, S., & Li, H. (2023). Enhancing image classification with convolutional neural networks: a comprehensive review. *Journal of Computer Vision and Image Processing*, 45(2), 123–140.
- [4] Radford, A., Wu, J., Child, R., Luan, D., Amodei, D., & Sutskever, I. (2019). Language models are unsupervised multitask learners. *OpenAI Blog*, 1(8), 9.
- [5] Kingma, D. P., & Welling, M. (2014). Auto-Encoding Variational Bayes (pp 1–14). In *The International Conference on Learning Representations (ICLR) 2014*.
- [6] Papers with Code. (2024). Flickr30k Dataset. [Online], Retrieved from <https://paperswithcode.com/dataset/flickr30k> (7 August 2024).
- [7] จักรินทร์ สันติรัตนภักดี และ ศุภกฤษฎี นิวัฒนากุล. (2567). แบบจำลองการจำแนกรูปภาพตามความหมาย ได้รับการฝึกฝนสำหรับการเรียกค้นรูปภาพโดยใช้ภาษาธรรมชาติ. *วารสารวิชาการชาชนไทย มรภ.ภูเก็ต*, 8(1), 68–82.

- [8] Vivekananthan, S. (2024). Comparative analysis of generative models: Enhancing image synthesis with VAEs, GANs and stable diffusion. *arXiv*, 2408.08751.
- [9] Hassan, R. T., & Ahmed, N. S. (2023). Evaluating of efficacy semantic similarity methods for comparison of academic thesis and dissertation texts. *Science Journal of University of Zakho*, 11(3), 396–402.
- [10] Nattawuttisit, S., & Chantron, P. (2024). Revolutionizing AI driven innovations in gemstone classification: a synergistic approach integrating visual and semantic NLP techniques. *Nanotechnology Perceptions*, 20(4), 333–345.

กระบวนการเตรียมต้นฉบับ วารสารวิชาการชาชนไทย มรภ.ภูเก็ต

วารสารวิชาการชาชนไทย มรภ.ภูเก็ต มีวัตถุประสงค์ เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (research article) ในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทางด้านวิทยาศาสตร์ธรรมชาติ ประกอบด้วย ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา คณิตศาสตร์ และทางด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ประกอบด้วย วิทยาศาสตร์การอาหาร วิทยาศาสตร์ทางทะเล วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ วิทยาศาสตร์สุขภาพ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการแลกเปลี่ยนความรู้ แนวคิดที่เกี่ยวข้องกับผลงานวิจัย จัดพิมพ์ออกเผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน และ ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม) ดำเนินการเผยแพร่ในรูปแบบวารสารออนไลน์เท่านั้น โดยมีกระบวนการดังต่อไปนี้

1. ผู้เขียนส่งบทความต้นฉบับได้ตลอดทั้งปี
2. กองบรรณาธิการตรวจสอบความสมบูรณ์ ความถูกต้อง และคุณภาพของบทความต้นฉบับ
3. กองบรรณาธิการเตรียมต้นฉบับจัดส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิที่เกี่ยวข้องในสาขาวิชานั้น ๆ จำนวน 3 ท่าน เพื่อประเมินบทความ
4. กองบรรณาธิการส่งต้นฉบับที่ปรับแก้ไขแล้วพร้อมสรุปผลการประเมินคุณภาพต้นฉบับ
5. ผู้เขียนเพื่อปรับแก้ไข และชี้แจงการปรับแก้ไขกลับมายังกองบรรณาธิการ
6. กองบรรณาธิการตรวจสอบการปรับแก้ไข ความถูกต้อง และรูปแบบการเขียนต้นฉบับ
7. กองบรรณาธิการออกหนังสือตอบรับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ต้นฉบับดังกล่าว ผ่านทางเว็บไซต์
8. กองบรรณาธิการ ดำเนินการรวบรวมต้นฉบับที่จะตีพิมพ์และตรวจสอบความถูกต้อง ก่อนส่งโรงพิมพ์เพื่อจัดทำวารสารฉบับร่าง
9. กองบรรณาธิการตรวจสอบวารสารฉบับร่างจากโรงพิมพ์ และเผยแพร่ผ่านทางเว็บไซต์ โดยแสดงสถานะอยู่ระหว่างการตีพิมพ์ (in press) และจัดส่งวารสารต้นฉบับให้ผู้เขียน เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง
10. กองบรรณาธิการดำเนินการเผยแพร่วารสารวิชาการชาชนไทย มรภ. ภูเก็ต

ข้อตกลงการส่งบทความสำหรับผู้แต่ง

1. ต้นฉบับที่ผู้เขียนส่งมาเพื่อการพิจารณาต้องไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารใดวารสารหนึ่งมาก่อน
2. ผู้เขียนต้องเขียนต้นฉบับตามรูปแบบของวารสารวิชาการ ชาชนไทย มรภ.ภูเก็ต
3. ต้นฉบับที่ผู้เขียนส่งมาเพื่อการพิจารณาต้องไม่อยู่ระหว่างเสนอขอตีพิมพ์ในวารสารอื่น
4. เนื้อหาในต้นฉบับควรเกิดจากการสังเคราะห์ความคิดขึ้นโดยผู้เขียนเอง ไม่ได้ลอกเลียนหรือดัดทอนมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่น หรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือปราศจากการอ้างอิงที่เหมาะสม
5. กรณีที่มีการวิจัยในสัตว์หรือในมนุษย์ ต้นฉบับที่จะได้รับการพิจารณาเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ ต้องแสดงข้อมูลการรับรองการใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์หรือการรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ ไว้ในส่วนของวิธีดำเนินการวิจัย
6. ผลการประเมินต้นฉบับ มี 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ระดับการแก้ไข แบ่งออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ ไม่มีการแก้ไข แก้ไขน้อย แก้ไขปานกลาง และแก้ไขมาก ส่วนที่ 2 ผลการพิจารณาของผู้ทรงคุณวุฒิต่อการตีพิมพ์เผยแพร่ แบ่งออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ ตีพิมพ์เผยแพร่โดยไม่มีการแก้ไข แก้ไขก่อนตีพิมพ์เผยแพร่ เขียนใหม่ก่อนตีพิมพ์เผยแพร่ และไม่ควรตีพิมพ์เผยแพร่ ในการพิจารณาบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ ชาชนไทย มรภ.ภูเก็ต จะพิจารณาผลจากการประเมินในส่วนที่ 2 ซึ่งต้นฉบับนั้นต้องได้รับผลการประเมินตีพิมพ์เผยแพร่โดยไม่มีการแก้ไข หรือแก้ไขก่อนตีพิมพ์เผยแพร่เท่านั้น จึงจะได้รับการตอบรับการตีพิมพ์ (accepted)
7. เมื่อได้รับผลการอ่านประเมินของผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว ผู้เขียนต้องปรับแก้ไขตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ (reviewer) และชี้แจงการแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวมายังกองบรรณาธิการหลังจากผู้เขียนได้แก้ไขต้นฉบับแล้ว กองบรรณาธิการจะทำการตรวจสอบความถูกต้องอีกครั้ง
8. กองบรรณาธิการจะทำการจัดส่งวารสารฉบับร่าง (in press) ไปยังผู้เขียนเพื่อตรวจสอบความถูกต้องก่อนตีพิมพ์เผยแพร่
9. วารสารมีค่าค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์เผยแพร่เป็นเงิน 5,000 บาท โดยแบ่งจ่ายเป็น 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 จำนวน 3,500 บาท ชำระเมื่อได้รับการพิจารณาเชิงคุณภาพเบื้องต้นจากกองบรรณาธิการ และ ครั้งที่ 2 จำนวน 1,500 บาท ชำระเมื่อผ่านกระบวนการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิและกองบรรณาธิการเห็นชอบให้ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการชาชนไทย มรภ.ภูเก็ต (หมายเหตุ ในกรณีที่บทความของผู้นิพนธ์ไม่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิหรือจากการตัดสินใจของบรรณาธิการหรือกรณีอื่นใด หรือเกิดจากบทความบกพร่องของผู้นิพนธ์ ทางวารสารฯ ขอสงวนสิทธิ์ไม่คืนค่าธรรมเนียม)
10. จำนวนหน้า บทความต้นฉบับมีความยาวอยู่ระหว่าง 10-12 หน้า รวมตาราง รูปภาพ และเอกสารอ้างอิง

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ

กองบรรณาธิการได้กำหนดระเบียบในการจัดทำเพื่อให้ผู้เขียนยึดเป็นแนวทางในการดำเนินการสำหรับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการชาชนไทย มรภ.ภูเก็ต ดังนี้

1. การตั้งค่านำหน้ากระดาษของบทความต้นฉบับ ใช้ขนาด B5 โดยระยะห่างของขอบกระดาษ 1 นิ้ว ทั้ง 4 ด้าน
2. ต้นฉบับจัดพิมพ์เป็น 1 คอลัมน์ เนื้อหาหลักใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวธรรมดา จัดชิดขอบกระดาษทั้งสองด้าน
3. เนื้อหาเป็นภาษาไทยเท่านั้น ควรแปลคำศัพท์ภาษาอังกฤษเป็นภาษาไทยให้มากที่สุด ในกรณีที่คำศัพท์ภาษาอังกฤษเป็นคำเฉพาะที่แปลไม่ได้หรือแปลแล้วไม่ได้ความหมายชัดเจนให้ใช้คำศัพท์ภาษาอังกฤษได้ และควรใช้ภาษาที่ผู้อ่านเข้าใจง่าย ชัดเจน
4. หัวข้อหลัก ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งชิดขอบกระดาษด้านซ้าย
5. หัวข้อย่อย ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ระบุหมายเลขหน้า หัวข้อย่อยโดยเรียงตามลำดับหมายเลขตำแหน่ง ให้ Tab 0.75 เซนติเมตรจากอักษรตัวแรกของหัวข้อหลัก
6. หากใช้คำย่อต้องเขียนคำเต็มไว้ครั้งแรกก่อน
7. ท้ายกระดาษ ประกอบด้วย เลขหน้า ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวธรรมดา ตำแหน่งชิดขอบกระดาษด้านขวาล่าง
8. รูปภาพและตารางควรวางใกล้กับตำแหน่งที่ถูกกล่าวถึงเป็นครั้งแรก โดยขนาดของรูปภาพควรมีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 pixel (บันทึกเป็น .png .gif หรือ .tif) และแนบไฟล์ต้นฉบับของรูปแยกมาด้วย

การเรียงลำดับเนื้อหาและรายละเอียดส่วนต่าง ๆ ในต้นฉบับ

1. ชื่อเรื่องภาษาไทย ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 16 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งกึ่งกลางหน้ากระดาษ ความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด (ไม่ควรเกิน 100 ตัวอักษร)
2. ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 16 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งกึ่งกลางหน้ากระดาษ ความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด โดยขึ้นต้นทุกคำด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่ ยกเว้นคำบุพบท
3. ชื่อผู้แต่ง ต้องเขียนทั้งภาษาไทยและอังกฤษ ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งกึ่งกลางหน้ากระดาษ ได้ชื่อเรื่อง ให้ใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) กำหนดเป็นตัวยก กำกับท้ายนามสกุลของผู้ประสานงานหลัก

4. หน่วยงานหรือสังกัดที่ทำวิจัย ต้องเขียนทั้งภาษาไทยและอังกฤษ ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวเอียง ตำแหน่ง กึ่งกลางหน้ากระดาษใต้ชื่อผู้เขียน ให้ใส่ตัวเลขยกกำลังท้ายนามสกุล และ ด้านหน้าหน่วยงานหรือสังกัด
5. เชิงอรรถ กำหนดเชิงอรรถในหน้าแรกของบทความ ให้ใส่เครื่องหมายดอกจันตามด้วยข้อความ ดังนี้ *ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author) โดยใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา และระบุ E-mail: โดยใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวเอียง
6. หัวข้อบทคัดย่อภาษาไทย ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งชิดขอบกระดาษด้านซ้ายใต้ที่อยู่/หน่วยงานสังกัดของผู้เขียน เนื้อหาบทคัดย่อไทย ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวธรรมดา จัดพิมพ์เป็น 1 คอลัมน์ บรรทัดแรกเว้น Tab 1 เซนติเมตร จากขอบกระดาษด้านซ้าย และพิมพ์ให้ชิดขอบทั้งสองด้าน (ควรเขียนสรุปสาระสำคัญความยาวไม่เกิน 250 คำ หรือ 15 บรรทัด)
7. หัวข้อคำสำคัญภาษาไทย ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งชิดขอบกระดาษด้านซ้าย ใต้บทคัดย่อภาษาไทย ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวธรรมดา ไม่เกิน 4 คำ เว้นระหว่างคำด้วยการเคาะ 1 ครั้ง
8. หัวข้อบทคัดย่อภาษาอังกฤษ ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งชิดขอบกระดาษด้านซ้ายใต้ที่อยู่/หน่วยงานสังกัดของผู้เขียน เนื้อหาบทคัดย่อภาษาอังกฤษ ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวธรรมดา จัดพิมพ์เป็น 1 คอลัมน์ บรรทัดแรกเว้น Tab 1 เซนติเมตร จากขอบกระดาษด้านซ้าย และพิมพ์ให้ชิดขอบทั้งสองด้าน (ควรเขียนสรุปสาระสำคัญความยาวไม่เกิน 250 คำ หรือ 15 บรรทัด)
9. หัวข้อคำสำคัญภาษาอังกฤษ (Keyword) ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งชิดขอบกระดาษด้านซ้าย ใต้บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวธรรมดา ไม่เกิน 4 คำ เว้นระหว่างคำด้วย Comma “,”
10. บทนำ บอกถึงที่นำไปสู่การศึกษาวิจัย รวมถึงการอ้างอิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
11. วัตถุประสงค์ ชี้แจงจุดมุ่งหมายของงานวิจัย
12. วิธีดำเนินการวิจัย ควรอธิบายวิธีดำเนินการวิจัย โดยกล่าวถึงวิธีการสุ่มกลุ่มตัวอย่างที่มาของกลุ่มตัวอย่าง แหล่งที่มาของข้อมูล การเก็บและรวบรวมข้อมูล การใช้เครื่องมือ สถิติที่ใช้ในการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

13. ผลการวิจัย ควรนำเสนอสิ่งที่ได้จากการศึกษา ในรูปแบบตาราง กราฟ หรือแผนภาพ ทั้งนี้ ถ้าแสดงด้วยตาราง ควรเป็นตารางแบบไม่มีเส้นขอบตารางด้านซ้ายและขวา หัวตาราง แบบธรรมดาไม่มีสี ไม่ควรมีเกิน 5 ตาราง สำหรับรูปภาพประกอบควรเป็นรูปภาพที่ชัดเจน (ความละเอียดอย่างน้อย 300 pixel) และมีคำบรรยายใต้รูป (ตั้ง Template) กรณีที่ผู้เขียนต้นฉบับประสงค์จะใช้ภาพสีจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายดังกล่าว
14. อภิปรายผลการวิจัย ควรมีการอภิปรายผลการวิจัยว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่ และควรอ้างทฤษฎีหรือเปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบ เพื่อให้ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มีอยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงการนำผลไปใช้ประโยชน์ และการให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต
15. สรุปผลการวิจัย ควรให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์และระเบียบวิธีการวิจัย
16. กิตติกรรมประกาศ ควรกล่าวถึงแหล่งทุนสนับสนุนงานวิจัยอย่างกระชับ
17. เอกสารอ้างอิง ชิดขอบซ้าย เนื้อหาทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษใช้ TH SarabunPSK ขนาด 14 pt ชนิดตัวธรรมดา ตำแหน่งชื่อผู้เขียนชิดขอบซ้ายหากยาวเกิน 1 บรรทัด ให้ตัวอักษรในบรรทัดถัดไปตรงกับตัวอักษรแรกของชื่อในบรรทัดแรก การอ้างอิงเอกสาร ให้เขียนตามแบบ APA (American Psychological Association) โดย
 - 17.1 การอ้างอิงแทรกในเนื้อหา ให้ใส่เลขลำดับการอ้างอิงอยู่ในวงเล็บ [...] เช่น แผ่นเปลือกโลกมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาและแบ่งการเคลื่อนที่ของแผ่นโลกออกเป็น 3 แบบ คือ การชนกัน การแยกจากกัน และแบบรอยเลื่อน [1]
 - 17.2 การเขียนรายการอ้างอิงท้ายบทความ ให้เรียงลำดับรายการตามการอ้างอิงในบทความ ไม่ใช่ตามตัวอักษรของรายการที่อ้างอิง
 - 17.3 ลงชื่อผู้แต่งทุกคน โดยคั่นด้วยเครื่องหมายจุลภาค (,) ระหว่างผู้แต่งแต่ละคนและให้ใช้คำว่า “และ” นำหน้าผู้แต่งคนสุดท้ายในกรณีเอกสารอ้างอิงเป็นภาษาไทย หรือใช้ “&” นำหน้าผู้แต่งคนสุดท้ายในกรณีเอกสารอ้างอิงเป็นภาษาอังกฤษ กรณีชื่อผู้แต่งชาวไทย: ชื่อและนามสกุลเต็ม กรณีชื่อผู้แต่งชาวต่างประเทศ: นามสกุล, ตัวอักษรย่อของชื่อต้นและชื่อกลาง
 - 17.4 ปีที่พิมพ์อยู่ในเครื่องหมายวงเล็บ (...) หากอยู่ในระหว่างการพิมพ์ ให้ใช้ “(อยู่ระหว่างการพิมพ์)” ในกรณีเอกสารอ้างอิงเป็นภาษาไทย หรือใช้ “(in press)” ในกรณีเอกสารอ้างอิงนั้นเป็นภาษาอังกฤษ
 - 17.5 ชื่อเรื่องที่เป็นภาษาอังกฤษให้ขึ้นต้นด้วยอักษรตัวพิมพ์ใหญ่เฉพาะคำแรก อักษรตัวแรกของชื่อเรื่องย่อและ/หรือชื่อเฉพาะ (ถ้ามี) ใช้อักษรตัวเอียงในการพิมพ์

ตัวอย่างการอ้างอิง

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น บทความในวารสารวิชาการ (research/review article)

- [...] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร, ปีที่(ฉบับที่), เลขหน้าที่ปรากฏบทความในวารสาร.
- [1] นรภัทร น้อยหลบลู และชวิศ ปุคะภาค. (2559). การพัฒนาหนังเหนียวจากยางพาราโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 35(2), 141–149.
- [2] Lu, Y., & Larock, R. C. (2011). Synthesis and properties of grafted latices from a soybean oil-based waterborne polyurethane and acrylics. *Journal of Applied Polymer Science*, 119, 3305–3314.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น หนังสือ (book) และ บทในหนังสือ (book chapter)

- [...] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อเรื่อง (ครั้งที่พิมพ์). สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์หรือโรงพิมพ์.
- [1] บพิธ จารุพันธุ์ และนันทพร จารุพันธุ์. (2558). *สัตววิทยา (พิมพ์ครั้งที่ 7)*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [2] Hickman, C. P. Jr., Roberts, L. S., Keen, S. L., Eisenhour, D. J., Larson, A., & L'Anson, H. (2014). *Integrated principles of zoology (6th edition)*. New York: McGraw-Hill.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น รายงานการวิจัย (research report)

- [...] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อเรื่อง (รายงานผลการวิจัย). สถานที่พิมพ์: ชื่อหน่วยงานหรือสังกัด.
- [1] จิตาภรณ์ ภูมิไชย, กฤษดา สังข์สิงห์ และ เฉลิมพล ภูมิไชย. (2557). การศึกษาลักษณะทางกายภาพของสมบัติไม้ยางพารา (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น วิทยานิพนธ์ (thesis)

- [...] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อเรื่อง (วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี/มหาบัณฑิต หรือ Doctoral/Master's thesis). สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์หรือโรงพิมพ์.
- [1] พรณี สอาดฤทธิ์. (2545). ความหลากหลายและการแพร่กระจายของคลาโดเซอร่าในแหล่งน้ำจืด จังหวัดตรัง (วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น เว็บไซต์ (website)

- [...] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อเรื่อง. [ออนไลน์], สืบค้นจาก ระบุ URL ของเว็บไซต์ (วัน เดือน ปีที่สืบค้น)
- [1] สถาบันวิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเล ชายฝั่งทะเล และป่าชายเลน. (2562). องค์ความรู้เกี่ยวกับแมงกะพรุนพิษในประเทศไทย. [ออนไลน์], สืบค้นจาก https://km.dmcr.go.th/th/c_247/d_14183 (6 พฤศจิกายน 2562).

การส่งต้นฉบับ

ผู้เขียนส่งต้นฉบับเพื่อตีพิมพ์ในระบบ ThaiJo2.0

<https://www.tci-thaijo.org/index.php/pkruscitech/index>

การประเมิน และลิขสิทธิ์

1. การอ่านประเมินบทความต้นฉบับ ต้นฉบับจะได้รับการอ่านประเมิน โดยผู้ทรงคุณวุฒิจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยในสาขาวิชานั้น ๆ จำนวน 3 ท่านต่อเรื่อง และส่งผลการประเมินคืนผู้เขียนเพื่อปรับปรุง แก้ไข หรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่แล้วแต่กรณี ทั้งนี้กองบรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิต้องเป็นบุคคลที่อยู่คนละหน่วยงานกับผู้เขียนไม่น้อยกว่า 2 ใน 3 และผู้ทรงคุณวุฒิทั้งหมดต้องไม่เป็นผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่อผู้เขียน หรือบทความวิจัยดังกล่าว

2. เนื้อหาต้นฉบับที่ปรากฏในวารสารเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียน ทั้งนี้ไม่รวมความผิดพลาดอันเกิดจากเทคนิคการพิมพ์

3. ลิขสิทธิ์ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการชาชนไทย มรภ.ภูเก็ต ถือเป็นกรรมสิทธิ์ของวารสารวิชาการชาชนไทย มรภ.ภูเก็ต

ขอกระดาษ 1 นิ้วทั้ง 4 ด้าน

รูปแบบการเตรียมต้นฉบับบทความวิจัย
PKRU SciTech Journal

ชื่อเรื่องภาษาไทย (TH SarabunPSK, 16 pt, ตัวหนา, ยาวไม่เกิน 2 บรรทัด)

ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ (ขึ้นต้นทุกคำด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่ยกเว้นคำบุพบท)

ชื่อ นามสกุล¹ ชื่อ นามสกุล¹ และ ชื่อ นามสกุล²

Full name¹, Full name¹, & Full name²

(TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา ใช้เครื่องหมาย * ด้วยก หลังนามสกุลของผู้ประสานงาน)

ที่อยู่หน่วยงานที่สังกัด (TH SarabunPSK, 12 pt, ตัวเอียง)

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

¹Science Program, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University

²Environmental Science Program, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University

บทคัดย่อ (TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา)

เนื้อหาบทคัดย่อ (TH SarabunPSK, 14 pt, Tab 1 cm) ความยาวสูงสุดไม่ควรเกิน 250 คำ
เขียนเพียง 1 ย่อหน้า และไม่มีการเขียนอ้างอิงในส่วนของบทคัดย่อ

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำสำคัญ (TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา): (ไม่เกิน 4 คำ) (TH SarabunPSK, 14 pt)

*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author) (TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา)

E-mail: (TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวเอียง)

E-mail: **ผู้วิจัยร่วม ทุกคน** (อีเมลของผู้วิจัยร่วมนี้จะไม่ปรากฏในบทความวิจัย แต่ทางวารสาร
จำเป็นต้องบันทึกอีเมลของนักวิจัยทุกคนในระบบ ThaiJo)

Abstract (TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา)

เนื้อหาบทคัดย่อ (TH SarabunPSK, 14 pt, Tab 1 cm) ความยาวสูงสุดไม่ควรเกิน 250 คำ เขียนเพียง 1 ย่อหน้า และไม่มีการเขียนอ้างอิงในส่วนของบทคัดย่อ

Keywords(TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา): (ไม่เกิน 4 คำ) (TH SarabunPSK, 14 pt)

keywords เป็นตัวพิมพ์เล็กทั้งหมด ยกเว้นชื่อคน ชื่อสถานที่ และคำศัพท์เฉพาะ (technical term)

ข้อแนะนำ

1. บทความวิจัยควรมีความยาวไม่เกิน 10-12 หน้ากระดาษ B5
2. ลักษณะการเขียนเป็นรูปแบบ 1 คอลัมน์
3. หัวข้อ ใช้ตัวอักษร TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา
4. เนื้อหาใช้ตัวอักษร TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวปกติ
5. Line and Paragraph Spacing ให้ใช้ 1.0
6. การอ้างอิงให้ใช้ระบบตัวเลขอยู่ภายใน [...] และจะต้องเรียงลำดับเช่นนี้ในส่วนของการอ้างอิงท้ายบทความ

โดยมีรายละเอียดหัวข้อ ดังนี้

บทนำ (TH SarabunPSK, 14 pt ตัวหนา)

บทนำสามารถเขียนได้มากกว่า 1 ย่อหน้า โดยอธิบายถึงที่มา ปัญหาวิจัย คำถามวิจัย และการทบทวนวรรณกรรม (literature review) โดยไม่ต้องแยกเป็นหัวข้อย่อย

การอ้างอิงในเนื้อหา ใช้ระบบตัวเลขอยู่ภายใน [...] (TH SarabunPSK, 14 pt) เช่น [1] หรือ [1,2,4] หรือ [1-3] โดยตัวเลขจะเป็นลำดับของการอ้างอิง และจะต้องเรียงลำดับเช่นนี้ในส่วนของการอ้างอิงท้ายบทความ

วัตถุประสงค์ (TH SarabunPSK, 14 pt ตัวหนา)

1.(TH SarabunPSK, 14 pt)
2.(TH SarabunPSK, 14 pt)

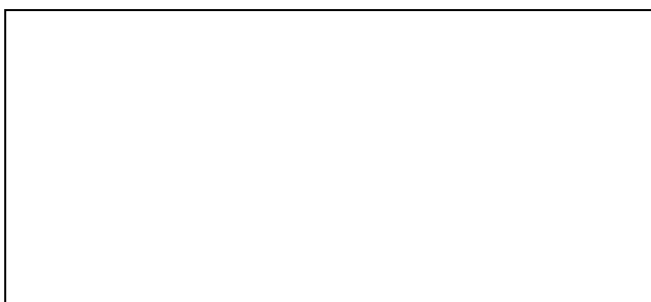
วิธีดำเนินการวิจัย (TH SarabunPSK, 14 pt ตัวหนา)

หัวข้อย่อย

ถ้าผู้เขียนต้องการเขียนหัวข้อย่อย ให้ทำตัวหนา แต่ต้องไม่ขีดขอบเป็นแนวเดียวกับหัวข้อหลัก
รูปภาพควรวางใกล้กับตำแหน่งที่ถูกกล่าวถึงเป็นครั้งแรก ขนาดของรูปภาพควรมีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi (โดยบันทึกเป็น .png .gif หรือ .tif)

หัวข้อย่อย

..... (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ภาพควรวางใกล้ตำแหน่งที่มีการกล่าวถึงเป็นครั้งแรก

ผลการวิจัย

หัวข้อย่อย

..... (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1

No.	Heading 1	Heading 2	Heading 3
1	Data 1.1	Data 1.2	Data 1.3
2	Data 2.1	Data 2.2	Data 2.3
3	Data 3.1	Data 3.2	Data 3.3
4	Data 4.1	Data 4.2	Data 4.3

ข้อเสนอแนะ

1. ตารางควรวางใกล้ตำแหน่งที่มีการกล่าวถึงเป็นครั้งแรก
2. ตารางควรจัดตัวอักษรให้อยู่ตรงกลาง
3. เส้นตารางใช้เฉพาะแนวนอน

หัวข้อย่อ

.....
.....
..... (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 ภาพควรวางใกล้ตำแหน่งที่มีการกล่าวถึงเป็นครั้งแรก

อภิปรายผลการวิจัย

อภิปรายผลการวิจัยสามารถเขียนได้มากกว่า 1 ย่อหน้า และสามารถมีหัวข้อย่อได้ โดยอธิบายว่าทำไมจึงได้ผลการวิจัยเป็นเช่นนั้น สอดคล้องหรือไม่สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้หรือไม่อย่างไร อธิบายถึงประโยชน์ การประยุกต์ใช้ ปัญหาและอุปสรรค หรือโจทย์วิจัยที่จะต่อยอดจากงานวิจัยครั้งนี้ เป็นต้น

สรุปผลการวิจัย

.....
.....
.....

กิตติกรรมประกาศ

.....
.....
.....

เอกสารอ้างอิง เรียงลำดับตามการกล่าวถึงในบทความ

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น บทความในวารสารวิชาการ (research/review article)

[1] นรภัทร น้อยหลบลู และชวิศร ปุคะภาค. (2559). การพัฒนากังหันเดิมอากาศโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 35(2), 141–149.

- [2] Lu, Y., & Larock, R. C. (2011). Synthesis and properties of grafted latices from a soybean oil-based waterborne polyurethane and acrylics. *Journal of Applied Polymer Science*, 119, 3305–3314.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น หนังสือ (book) และ บทในหนังสือ (book chapter)

- [3] บพิธ จารุพันธุ์, และนันทพร จารุพันธุ์. (2558). *สัตววิทยา (พิมพ์ครั้งที่ 7)*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] Hickman, C. P. Jr., Roberts, L. S., Keen, S. L., Eisenhour, D. J., Larson, A., & l'Anson, H. (2014). *Integrated principles of zoology (6th edition)*. New York: McGraw-Hill.
- [5] Agrawal, R., Mannila, H., Srikant, R., Toivonen, H., & Verkamo, A. I. (1996). Fast discovery of association rules (pp. 307–328). In Fayyad, U. M., Piatetsky-Shapiro, G., Smyth, P., & Uthurusamy, R. (eds). *Advances in knowledge discovery and data mining*. California: AAAI Press.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น รายงานการวิจัย (research report)

- [6] จิตาภรณ์ ภูมิไชย์, กฤษดา สังข์สิงห์ และเฉลิมพล ภูมิไชย์. (2557). *การศึกษาลักษณะทางกายภาพของสมบัติไม้ยางพารา*. รายงานการวิจัย. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น วิทยานิพนธ์ (thesis)

- [7] พรณี สอาดฤทธิ. (2545). *ความหลากหลายและการแพร่กระจายของคลาโดเซอราในแหล่งน้ำจืดจังหวัดตรัง*. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ (proceedings)

- [8] วันวิสาข์ ชิดเชื้อ, และพงษ์รัตน์ ดำรงโรจน์วัฒนา. (2553). อนุกรมวิธานของหอยทากบกในเขตอำเภอแกลง จังหวัดระยอง และอำเภอแก่งหางแมว จังหวัดจันทบุรี (หน้า 161–170). ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48*. กรุงเทพฯ.
- [9] Kumlom, T., & Choocherd, C. (2020). Quantity of particulate TSP and PM10 in cafeteria area Phuket Rajabhat University, Thailand using the high volume air sampler (pp 66–78). In *International Conference Sharing interlocal adaptation lessons: Climate Change Adaptations and Development in East and Southeast Asia Vietnam Institute of Economics (VIE)*. Vietnam.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น เว็บไซต์ (website)

- [10] สถาบันวิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเล ชายฝั่งทะเล และป่าชายเลน. (2562). องค์ความรู้เกี่ยวกับแมงกะพรุนพิษในประเทศไทย. [ออนไลน์], สืบค้นจาก https://km.dmcr.go.th/th/c_247/d_14183 (6 พฤศจิกายน 2562).

วารสารวิชาการชาชนเทคโนโลยี มรภ.ภูเก็ต
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต
21 ม. 6 ถ.เทพกระษัตรี ต.รัษฎา อ.เมือง จ.ภูเก็ต 83000
โทรศัพท์ : 076 - 523094 - 7 ต่อ 4000
<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/pkruscitech/index>
E-mail : researchscience@pkru.ac.th

